

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ARGAMASSAS
PARA REBOCO COM RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

RENAN FERRAZ NOVAES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO DE 2025**

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ARGAMASSAS
PARA REBOCO COM RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

RENAN FERRAZ NOVAES

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

ORIENTADOR: PROF. JONAS ALEXANDRE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO DE 2025

FICHA CATALOGRÁFICA
UENF - Bibliotecas
Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

N935

Novaes, Renan Ferraz.

Estudo da condutividade térmica de argamassas para reboco com resíduo de rochas ornamentais / Renan Ferraz Novaes. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

127 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2025.

Orientador: Jonas Alexandre.

1. Argamassa. 2. Resíduo de rochas ornamentais. 3. Condutividade térmica. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ARGAMASSAS PARA REBOCO COM RESÍDUO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

RENAN FERRAZ NOVAES

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em 10 de fevereiro de 2025.

Comissão examinadora:



Prof. Leonardo Gonçalves Pedroti - (D. Sc., UFV)

Documento assinado digitalmente

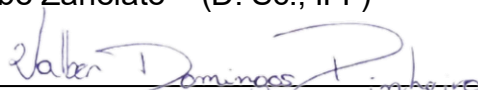


EUZÉBIO BERNABÉ ZANELATO

Data: 30/04/2025 16:54:38-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Euzébio Bernabé Zanelato – (D. Sc., IFF)



Prof. Valber Domingos Pinheiro – (D. Sc., LAMAV/UENF)



Prof. Jonas Alexandre – (D.Sc., UENF)
Orientador

Prof. Jonas Alexandre
Laboratório de Engenharia Civil
CEP: 24.220-2

DEDICATÓRIA

Em memória do meu pai, cuja luz continua a
guiar a minha jornada pela vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e Nossa Senhora por me concederem bençãos, forças, sabedoria e perseverança para concluir esta etapa da minha jornada.

Agradeço à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa. Meu sincero agradecimento ao meu orientador, Professor Jonas Alexandre, por sua orientação, paciência e dedicação ao longo deste trabalho.

Aos colegas, técnicos e servidores do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) e do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV), cuja colaboração e compartilhamento de conhecimentos foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Professor André Guimarães, do Laboratório de Ciências Físicas (LFIS), pelo apoio e contribuições valiosas, que enriqueceram significativamente esta investigação.

À minha mãe Márcia Valéria, à minha irmã Natália, à minha noiva Larissa e à minha prima Lauany, pelo amor, apoio e incentivo incondicional, que foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui. Aos amigos que compartilharam essa caminhada comigo, minha gratidão por todo o suporte e motivação.

Por fim, agradeço à CAPES e à FAPERJ, cujo apoio financeiro possibilitou a realização desta pesquisa.

A todos, o meu mais sincero obrigado!

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações iniciais.....	14
1.2 – Objetivos.....	15
1.2.1 – Geral.....	15
1.2.2 – Específicos.....	15
1.3 – Justificativas.....	16

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Argamassas.....	17
2.1.1 – Histórico.....	17
2.1.2 – Normas.....	18
2.1.3 – Funções das argamassas.....	19
2.1.4 – Classificação das argamassas.....	20
2.1.4.1 – Camadas de revestimento.....	21
2.1.4.1.1 – Substrato.....	23
2.1.4.1.2 – Chapisco.....	24
2.1.4.1.3 – Emboço.....	25
2.1.4.1.4 – Reboco.....	25
2.1.4.1.5 – Camada única.....	26
2.1.5 - Propriedades das argamassas.....	27
2.1.5.1 – Aderência.....	27
2.1.5.1.1 – Adesão inicial.....	28
2.1.5.1.2 – Coesão.....	29
2.1.5.2 – Permeabilidade à água.....	30
2.1.5.3 – Retenção.....	31
2.1.5.4 – Resistência mecânica.....	32
2.1.5.5 – Trabalhabilidade.....	32
2.1.5.5.1 – Consistência.....	33
2.1.6- Propriedades térmicas das argamassas.....	34
2.1.6.1 – Massa Específica e Calor específico.....	35
2.1.6.2 – Condutividade térmica.....	36

2.2 – Resíduo de rocha ornamental na construção civil.....	37
2.2.1 - Origem.....	37
2.2.2 - Produção.....	38
2.2.3 - Impacto Ambiental.....	39
2.2.4 - Composição Química.....	42
2.2.5 - Morfologia dos grãos.....	44
2.2.6 - Distribuição granulométrica.....	46
2.2.7 - Impacto do resíduo de rocha nas propriedades das argamassas no estado fresco.....	48
2.2.7.1 - Consistência e Trabalhabilidade.....	48
2.2.7.2 - Densidade no estado fresco e porosidade.....	49
2.2.7.3 - Retenção de água.....	50
2.2.8 - Impacto do resíduo de rocha nas propriedades das argamassas no estado endurecido.....	51
2.2.8.1 - Resistência Mecânica.....	51
2.2.8.2 - Absorção de água e densidade de massa no estado endurecido.....	54
2.2.9 - Impacto do resíduo de rocha nas propriedades térmicas das argamassas.....	55
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	
3.1 – Materiais.....	58
3.1.1 - Cimento Portland.....	58
3.1.2 - Areia.....	58
3.1.3 - Resíduo de rocha ornamental.....	59
3.1.4 - Cal.....	60
3.1.5 - Água.....	60
3.2 – Métodos.....	60
3.2.1 - Caracterização dos materiais.....	60
3.2.1.1 - Massa específica real dos grãos.....	61
3.2.1.2- Análise granulométrica.....	61
3.2.1.3- Difração de raios-x.....	61
3.2.1.4- Análise Química.....	61
3.2.1.5- Microscopia eletrônica de varredura.....	61

3.2.2 - Dosagem.....	62
3.2.3 - Caracterização da argamassa.....	62
3.2.3.1 - Índice de consistência.....	63
3.2.3.2 - Teor de Ar Incorporado e Densidade de Massa no Estado Fresco.....	64
3.2.3.3 - Retenção de Água.....	64
3.2.3.4 - Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido.....	65
3.2.3.5 - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.....	65
3.2.3.6 - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.....	66
3.2.3.7 - Resistência de aderência superficial à tração.....	66
3.2.3.8 - Ensaio de condutividade.....	67
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	
4.1 - Caracterização dos materiais.....	68
4.1.1 - Composição química e fases cristalinas.....	68
4.1.2 - Morfologia, distribuição granulométrica.....	70
4.2 - Índice de consistência.....	73
4.3 - Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado.....	76
4.4 - Retenção de água.....	79
4.5 - Densidade de massa no estado endurecido.....	81
4.6 - Absorção de água por capilaridade.....	83
4.7 - Absorção de água por imersão e índice de vazios.....	85
4.8 - Resistência à compressão.....	87
4.9 - Resistência à tração na flexão.....	90
4.10 - Resistência de aderência à tração.....	92
4.11 - Condutividade térmica.....	94
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	
5.1 - Conclusões.....	97
5.2 - Sugestões para trabalhos futuros.....	99
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
APÊNDICE A.....	117
APÊNDICE B.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: a) Revestimento de camada única, b) Revestimento de duas camadas.....	22
Figura 2.2: Imagem de MEV do resíduo de granalha.....	45
Figura 2.3: Imagem do MEV de resíduo de rocha.....	46
Figura 2.4: Análise do VosViewer da base Scopus.....	56
Figura 2.5: Análise do VosViewer da base Web of Science.....	56
Figura 3.1: Fluxograma do programa experimental.....	58
Figura 3.2: Frações de areias utilizadas na pesquisa.....	59
Figura 3.3: Processo de destorroamento e peneiramento do resíduo.....	60
Figura 3.4: O sistema Trident da C-Therm com sensor MTPS.....	68
Figura 4.1: Difratoograma de raios-X do resíduo de rochas ornamentais.....	70
Figura 4.2: Imagem do MEV do resíduo de rocha ornamental.....	71
Figura 4.3: Granulometria a laser do resíduo de rocha ornamental.....	72
Figura 4.4: Resultados do ensaio de densidade de massa no estado fresco.....	76
Figura 4.5: Resultados do ensaio de teor de ar incorporado.....	77
Figura 4.6: Resultados do ensaio de retenção de água.....	79
Figura 4.7: Resultados do ensaio de densidade de massa no estado endurecido...81	
Figura 4.8: Resultados do ensaio do coeficiente de capilaridade.....	83
Figura 4.9: Resultados do ensaio de absorção de água por imersão.....	85
Figura 4.10: Resultados do ensaio de índice de vazios.....	86
Figura 4.11: Resultados do ensaio de resistência à compressão.....	87
Figura 4.12: Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.....	90
Figura 4.13: Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração.....	92
Figura 4.14: Resultados do ensaio de condutividade térmica.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Distribuição granulométrica de quatro tipos de resíduo de rocha.....	46
Tabela 3.1: Traços utilizados em proporção.....	62
Tabela 3.2: Classificação da densidade de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).....	64
Tabela 3.3: Classificação da retenção de água de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).....	64
Tabela 3.4: Classificação da densidade de massa no estado endurecido de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).....	65
Tabela 3.5: Classificação do coeficiente de capilaridade de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).....	66
Tabela 3.6: Classificação da resistência à tração de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).....	66
Tabela 3.7: Classificação da aderência à tração de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).....	67
Tabela 4.1: Resultado do ensaio de fluorescência de raios-x.....	68
Tabela 4.2: Comparativo de densidade areia e resíduo de rocha ornamental.....	72
Tabela 4.3: Resultados do ensaio de índice de consistência.....	73
Tabela 4.4: Relação água/materiais secos dos traços pesquisados.....	74
Tabela A.1 – Resultados do ensaio de densidade de massa.....	118
Tabela A.2 – Resultados do ensaio de retenção de água.....	118
Tabela B.1 – Resultados do ensaio de densidade de massa.....	119
Tabela B.2 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	120
Tabela B.3 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios.....	121
Tabela B.4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão e resistência à tração na flexão.....	122
Tabela B.5 – Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração.....	123
Tabela B.6 – Resultados do ensaio de condutividade térmica.....	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Divisão das argamassas de acordo com as finalidades.....	21
Quadro 2.2: Composições químicas dos resíduos de rocha.....	28
Quadro 3.1: Ensaio no estado fresco e endurecido realizados na pesquisa.....	63

RESUMO

A crescente demanda energética, impulsionada pelo aumento das temperaturas globais e pelas intensas ondas de calor, destaca a necessidade de melhorias no desempenho térmico das edificações. A alta incidência solar, especialmente em regiões de clima quente como no Brasil, afeta a durabilidade das construções e o consumo energético. Nesse contexto, a utilização de agregados reciclados e leves em argamassas tem sido amplamente investigada, com resultados promissores no aumento da eficiência térmica. Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver uma argamassa para reboco de uso externo, com traço 1:1:3 (cimento Portland: cal: areia natural), substituindo parcialmente o agregado miúdo por resíduo de rochas ornamentais. Foram avaliadas propriedades no estado fresco (consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água) e endurecido (resistências mecânicas, densidade, absorção de água por capilaridade e por imersão, índice de vazios e resistência de aderência à tração). O desempenho térmico foi analisado por meio do ensaio de condutividade térmica. As substituições em taxas de 20% a 40% melhoraram todas as propriedades avaliadas, enquanto teores mais elevados de 80% a 100% aumentaram significativamente o desempenho térmico, mantendo as propriedades físicas e mecânicas dentro das especificações da ABNT NBR 13281-1 (2023). Os resultados reforçam a viabilidade do uso de resíduos de rochas ornamentais em argamassas sustentáveis para a construção civil.

Palavras-chave: argamassa, resíduo de rochas ornamentais, condutividade térmica.

ABSTRACT

The growing energy demand, driven by rising global temperatures and intense heatwaves, highlights the need for improvements in the thermal performance of buildings. High solar incidence, especially in hot climate regions such as Brazil, affects both the durability of constructions and energy consumption. In this context, the use of recycled and lightweight aggregates in mortars has been widely investigated, showing promising results in enhancing thermal efficiency. The main objective of this study was to develop an external plastering mortar with a 1:1:3 mix ratio (Portland cement: lime: natural sand), partially replacing the fine aggregate with ornamental stone waste. Properties in the fresh state (consistency, bulk density, air content, and water retention) and hardened state (mechanical strength, density, water absorption by capillarity and immersion, void index, and tensile bond strength) were evaluated. Thermal performance was assessed through thermal conductivity testing. Replacement levels between 20% and 40% improved all evaluated properties, while higher contents from 80% to 100% significantly enhanced thermal performance, while maintaining physical and mechanical properties within the specifications of ABNT NBR 13281-1 (2023). The results reinforce the feasibility of using ornamental stone waste in sustainable mortars for the construction industry.

Keywords: mortar, ornamental stone waste, thermal conductivity.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações iniciais

O desempenho térmico das edificações tem se tornado um tema de crescente relevância no contexto da construção civil, especialmente diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas globais. O aumento das temperaturas médias globais é uma realidade incontestável e o ano de 2024 foi registrado como o mais quente da história, segundo dados da Global Climate Highlights (2024). A maior incidência solar, gera impactos significativos na durabilidade das construções e na qualidade de vida das populações, destacando a necessidade de soluções construtivas que promovam maior eficiência energética e conforto térmico.

Segundo Fontes *et al.* (2021), a busca pelo aprimoramento do desempenho térmico das edificações tem impulsionado melhorias na execução, bem como uma fiscalização no setor da construção civil. Os Estados Unidos (ASHRAE 55) e a União Europeia (EN 15251) já adotam normas específicas para o conforto e o desempenho de edificações residenciais e comerciais. No Brasil, a norma da ABNT NBR 15575 (2024) aborda o desempenho habitacional, com destaque crescente na pesquisa científica para o conforto térmico, uma das exigências estabelecidas nesses regulamentos.

O setor residencial consome cerca de 23% da energia no Brasil, sendo os sistemas de condicionamento de ar responsáveis por 20% desse consumo. As propriedades térmicas das coberturas externas das habitações são uma alternativa eficaz para reduzir a dependência de sistemas ativos de climatização. Nesse contexto, revestimentos de argamassa podem contribuir significativamente, sendo responsáveis por até 30% do isolamento térmico das vedações (PASSOS *et al.*, 2018).

Além do consumo energético destinado à refrigeração de ambientes, a construção civil se destaca como um grande consumidor de energia na manutenção de suas atividades, englobando atividades que vão desde a extração e produção de materiais até a construção e o uso prolongado das edificações ao longo de seu ciclo de vida.

Nesse cenário, a utilização de agregados reciclados e leves em argamassas tem sido amplamente investigada, com resultados promissores no aumento da eficiência térmica. De acordo com Nunes *et al.* (2023), como alternativa para o desenvolvimento de concretos e argamassas mais sustentáveis, materiais como agregados naturais e leves manufacturados vêm sendo substituídos por resíduos industriais, incluindo etileno acetato de vinila (EVA), poliestireno expandido (EPS), serragem de madeira, resíduos de construção e demolição, e casca de dendê.

Entretanto, a significativa redução na densidade das argamassas pode comprometer seu desempenho mecânico e sua durabilidade. Nesse contexto, o presente estudo busca preencher uma lacuna existente no conhecimento, analisando as propriedades térmicas de argamassas com a incorporação de resíduos de rochas. Chen *et al.* (2020), Kabeer e Vyas (2020), Gado (2020), Azevedo *et al.*, 2019; Singh *et al.* (2016) publicaram trabalhos que atestam a melhoria das propriedades mecânicas das argamassas após incorporação de resíduos de rochas, porém esses trabalhos não abrangem como essas incorporações influenciam no desempenho térmico.

1.2 – Objetivos

1.2.1 – Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma argamassa de revestimento para uso externo com baixa condutividade térmica utilizando o resíduo de rochas ornamentais com substituto parcial do agregado miúdo.

1.2.2 – Específicos

- A caracterização do resíduo de rochas ornamentais, quanto sua composição química e mineralógica, morfologia e granulometria;
- Analisar de acordo com a norma técnica ABNT NBR 13281-1 (2023) os parâmetros no estado fresco (consistência, densidade de massa no estado fresco, teor de ar incorporado e retenção de água) da argamassa de referência e das argamassas contendo substituição parcial e total da areia #100 por resíduo de rocha;

- Analisar de acordo com a norma técnica ABNT NBR 13281-1 (2023), os parâmetros no estado endurecido (resistência à tração na flexão, resistência à compressão, densidade de massa no estado endurecido, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e índice de vazios) da argamassa de referência e das argamassas contendo substituição parcial e total da areia por resíduo de rocha;
- Analisar a aderência à tração de acordo com a ABNT NBR 13528-3 (2019) de um substrato cerâmico com uma argamassa de referência e com argamassas contendo substituição parcial e total da areia por resíduo de rocha.
- Avaliar o comportamento térmico da argamassa desenvolvida, através do ensaio de condutividade térmica.
- Considerando que a argamassa é amplamente utilizada nas construções, essa abordagem não só atende à elevada demanda do setor da construção civil, como também oferece uma alternativa eficiente e econômica para o uso de resíduos gerados em grandes proporções atualmente.

1.3 – Justificativas

Apesar de já existirem estudos relevantes sobre o aproveitamento dos resíduos de rocha na construção civil como os de Chen *et al.* (2020), Kabeer e Vyas (2020), Gado (2020), Azevedo *et al.*, 2019; Singh *et al.* (2016), ainda existe a necessidade de aprofundar o debate sobre a desempenho térmico das argamassas, com o intuito de minimizar patologias em edificações. Essas patologias, segundo Carasek (2010) geram grandes custos em reparos e depreciação de valor econômico e dano, principalmente nas fachadas que se deterioram em função das fissuras e das manchas, causando danos estéticos nos edifícios, podendo inclusive causar acidentes.

A incorporação de resíduos em argamassas se destaca também como uma solução relevante no âmbito ambiental e econômico. Aparecendo como uma alternativa à extração excessiva de recursos naturais provocados pela construção civil, um setor que gera grande impacto ambiental. E como forma de promover o reaproveitamento de resíduos, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade (FONTES *et al.*, 2021; PASSOS *et al.*, 2018; NUNES *et al.*, 2023).

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Argamassas

A norma brasileira ABNT NBR 13529 (2013) define a argamassa de revestimento como uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento.

Já a norma brasileira ABNT NBR 13281-1 (2023) define a argamassa orgânica como uma mistura homogênea de um ou mais ligantes inorgânicos, agregados miúdos que pode conter fibras, adições e/ou aditivos, com características específicas de desempenho adequadas à utilização.

2.1.1 – Histórico

As argamassas são materiais de construção utilizados há mais de 10 mil anos pela humanidade, com os primeiros registros sendo nas construções do Oriente Médio e do Antigo Egito, onde o gesso e a cal desempenhavam a função de ligantes para unir blocos de pedra e tijolos (Abdel-Motelib *et al.*, 2015). Os gregos e romanos foram responsáveis por aperfeiçoar as misturas, adicionando outros materiais que melhoram a resistência e durabilidade das argamassas. Durante o período romano, o uso da pozolana (cinza vulcânica) permitiu a construção de estruturas duradouras como aquedutos, templos, permitindo que permanecessem resistentes à decomposição por quase 2.000 anos. (JACKSON *et al.*, 2010; SEYMOUR *et al.*, 2023)

Segundo Mukerji *et al.* 2006, a troca cultural e de conhecimento entre os povos fizeram com que as composições das argamassas evoluíssem, e novos componentes passaram a ser incorporados. Até a Idade Média, as argamassas eram compostas basicamente de cal e areia, sendo empregadas de acordo com as necessidades das construções. A partir do Renascimento, a retomada do conhecimento romano levou a um uso mais sofisticado das argamassas. No entanto, o maior avanço ocorreu no século XIX, com o desenvolvimento do cimento Portland, que revolucionou a indústria da construção. A adição de cimento trouxe maior resistência, trabalhabilidade e

durabilidade, tornando-o o principal aglomerante nas argamassas modernas (ELSEN *et al.*, 2011; VITTI, 2021).

Atualmente, as argamassas são desenvolvidas de forma industrializada e podem ser modificadas com aditivos e adições, como polímeros, resíduos e fibras. Isso permite que as argamassas tenham características especiais, como isolamento térmico, acústico, impermeabilidade e alta aderência, impulsionando a grande versatilidade das aplicações (HENDRY, 2001; LIU e LV, 2022).

Segundo Sakir *et al.* (2020), nos últimos anos as pesquisas em argamassas têm se concentrado no desenvolvimento de materiais sustentáveis e no aproveitamento de resíduos industriais, como cerâmicos e escórias de alto-forno, e resíduos naturais, como cinza da casca do arroz e rocha ornamental, visando reduzir o impacto ambiental.

Outros focos incluem a melhoria das propriedades térmicas e acústicas, a durabilidade em ambientes agressivos e o uso de tecnologias como nanomateriais para aprimorar as características mecânicas e a resistência das argamassas. A busca por soluções mais ecológicas e eficientes tem impulsionado avanços que alinham inovação tecnológica com práticas construtivas mais sustentáveis e de alto desempenho. (BALAPOUR *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2022).

2.1.2 – Normas

As argamassas são utilizadas principalmente para revestimento e assentamento de pisos, paredes e tetos. No Brasil, a qualidade e o desempenho das argamassas são regulamentados por normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que definem os requisitos, métodos de ensaio e procedimentos de aplicação. Essas normas visam garantir a padronização das argamassas, assegurando que os materiais atendam às exigências da construção civil.

- **NBR 13281-1:2023** - Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos

Esta norma estabelece os requisitos, critérios e métodos de ensaios para as argamassas inorgânicas destinadas ao revestimento de paredes e

tetos, podendo ser produzidas de forma manual em canteiros ou industrializadas com aplicação manual e mecanizada.

- **NBR 13218-2:2016** - Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria
- Esta norma estabelece os requisitos, critérios e métodos de ensaios para as argamassas inorgânicas destinadas ao assentamento de unidades de alvenaria (blocos e tijolos) com e sem função estrutural e para as argamassas destinadas à fixação horizontal da alvenaria sem função estrutural, podendo ser produzidas de forma manual em canteiros ou industrializadas com aplicação manual e mecanizada.
- **NBR 13529:2013** -Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia

Esta Norma define os termos relativos a revestimentos de paredes e tetos em argamassas inorgânicas à base de cimento, cal, ou ambos, e a materiais e instrumentos auxiliares de aplicação.

- **NBR 13749:2013** -Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação
- Esta Norma fixa as condições exigíveis para o recebimento de revestimento de argamassa inorgânicas aplicadas sobre paredes e tetos de edificações. Esta Norma aplica-se ao revestimento de elementos constituídos por concreto e alvenarias.
- **NBR 13754:1996** -Revestimento de paredes internas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento
- Esta Norma estabelece os requisitos para a execução, fiscalização e recebimento de revestimento de paredes internas com placas cerâmicas assentadas com argamassa colante.

2.1.3 – Funções das argamassas

As argamassas desempenham funções que vão além da simples união entre elementos construtivos. Quando usadas como revestimentos de paredes, elas são

fundamentais para a proteção da alvenaria e das estruturas contra as intempéries, como chuva, vento, radiação solar e variações de temperatura. Nos revestimentos externos, essa proteção é responsável por prolongar a vida útil da edificação, prevenindo a degradação precoce causada por fatores climáticos. Assim, as argamassas funcionam como uma barreira física, que protege os materiais internos e a estrutura do edifício contra danos que poderiam comprometer sua integridade (MATIAS *et al.*, 2020; MAURENBRECHER *et al.*, 2016).

Segundo Carasek (2010) além da proteção, as argamassas também são responsáveis pela vedação e isolamento dos edifícios. Elas são responsáveis por cerca de 30% do isolamento térmico, 50% do isolamento acústico e de 70 a 100% da estanqueidade da água. Por fim, o revestimento de argamassa oferece resistência ao fogo e protege contra desgastes superficiais e impactos leves, contribuindo significativamente para a segurança e durabilidade da construção.

A estética da edificação também é beneficiada pelo uso das argamassas, que possibilitam a regularização das superfícies e servem como base para a aplicação de acabamentos decorativos. Uma superfície bem nivelada é crucial para garantir a qualidade do acabamento, seja ele pintura, revestimento cerâmico ou outro tipo de acabamento. Além disso, ao atuar como elemento de ligação e nivelamento, a argamassa proporciona um aspecto mais uniforme e atraente às paredes, valorizando o projeto arquitetônico.

Para Carasek (2010) para se satisfazer as funções requeridas das argamassas, algumas propriedades são indispensáveis, tais como:

- Aderência;
- Permeabilidade à água;
- Resistência mecânica;
- Retenção de água;
- Trabalhabilidade.

2.1.4 – Classificação das argamassas

As argamassas podem ser classificadas de acordo com diferentes critérios, a NBR 13281-1 (2023) define o tipo de argamassa com a sua aplicação, dividindo-a

em duas classes, as que serão empregadas em assentamento de pisos e as que serão, empregadas em revestimentos de paredes e tetos. Carasek (2010) também faz alusão a uma divisão das argamassas de acordo com as finalidades de sua aplicação na edificação, a argamassa de assentamento que tem a função de unir as unidades de alvenaria e a argamassa de revestimento que tem função de revestir e proteger a alvenaria e estrutura. Essas classificações são de acordo com o Quadro 2.1, a seguir:

Quadro 2.1: Divisão das argamassas de acordo com as finalidades.

Categoria	Tipo de Argamassa	Descrição
Argamassa para assentamento	Alvenaria de Vedação	Para ligação de componentes de vedação (blocos e tijolos) com função de vedação.
	Alvenaria Estrutural	Para ligação de componentes de vedação (blocos e tijolos) com função estrutural.
	Complementação da Alvenaria (Encunhamento)	Para fechamento da alvenaria de vedação, após a última fiada de componentes.
Argamassa para Revestimento de Paredes e Tetos	Revestimento Interno	Para revestimento de ambientes internos, caracterizando-se como camada de regularização.
	Revestimento Externo	Para revestimento de fachadas, muros e outros elementos em contato com o meio externo.
	Uso Geral	Para assentamento de alvenaria sem função estrutural e revestimento de paredes/tetos internos e externos.
	Reboco	Para cobrimento de emboço, proporcionando superfície fina para acabamento (massa fina).
	Decorativa em Camada Fina	Para revestimentos decorativos em camada fina.
	Decorativa em Monocamada	Para revestimento decorativo de fachadas e muros em camada única, em contato com o meio externo.

2.1.4.1 – Camadas de revestimento

De acordo com a ABNT NBR 13529 (2013) os revestimentos podem ser classificados em dois tipos: de camada única ou de duas camadas. O revestimento

de camada única é composto por um único tipo de argamassa, aplicado diretamente sobre a base de revestimento, podendo ser em uma ou mais demãos. Já o revestimento de duas camadas é constituído por emboço e reboco, que são aplicados sobre a base de revestimento. Como esquematizados na Figura 2.1, a seguir:

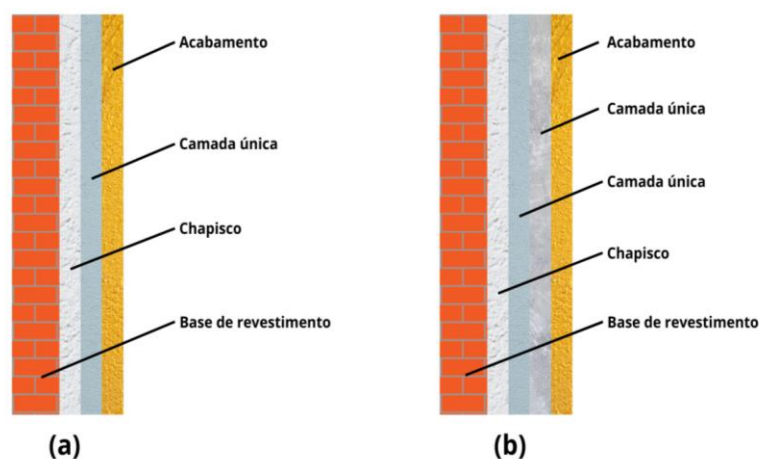


Figura 2.1: a) Revestimento de camada única, b) Revestimento de duas camadas. Fonte: autor (2025)

O revestimento de duas camadas é mais tradicional e é amplamente utilizado no Brasil, sendo valorizado por sua robustez e capacidade de oferecer maior resistência, especialmente em fachadas. Ele consiste na aplicação de uma primeira camada de argamassa, emboço, com maior espessura, que atua para regularizar a superfície, seguida de uma segunda camada mais fina, reboco, que garante o acabamento e melhora a durabilidade. Esse método é utilizado principalmente em projetos que demandam maior resistência a intempéries, trincas e outras deformações mecânicas, sendo aplicado tanto em estruturas residenciais quanto comerciais.

Segundo Musse *et al.* (2020), o revestimento de duas camadas se destaca por incorporar adições que aumentam a impermeabilidade e resistência a fissuras, como fibras sintéticas, resíduos e polímeros. Isso torna o sistema mais eficiente para regiões com alta variação térmica e exposição constante à chuva, garantindo um desempenho superior em comparação a sistemas de camada única. Esse tipo de revestimento também permite a correção de falhas durante o processo de aplicação,

uma vantagem que o sistema monocamada ou camada única não oferece, tornando-o uma escolha frequente em obras de grande porte no Brasil.

2.1.4.1.1 – Substrato

O substrato ou base de revestimento é a base sobre a qual os revestimentos são aplicados. A ligação adequada entre o substrato e o revestimento é essencial para garantir uma aderência adequada, prevenindo o descolamento da argamassa, prolongando a proteção e a vida útil da construção (AMBROZEWICZ, 2015).

Além disso, a textura e a porosidade do substrato são determinantes para a ancoragem mecânica da argamassa. Superfícies mais rugosas e porosas, como concreto e alvenaria, criam micro espaços onde a argamassa penetra, proporcionando uma ligação física forte. Já substratos lisos, como o drywall ou o metal, dependem mais da adesão química, o que muitas vezes exige o uso de primers ou tratamentos superficiais que aumentem a aderência (BECKER, 2022).

Segundo Chibana *et al.* (2022), a absorção de água pelo substrato é outro fator importante, pois superfícies muito secas ou porosas podem sugar a água da argamassa, prejudicando a hidratação e a cura dos componentes cimentícios, o que afeta negativamente a adesão. Por isso, o controle da umidade e a preparação adequada são etapas essenciais para garantir a durabilidade e a eficiência dos revestimentos aplicados.

De acordo com Carasek (1996), a aderência entre um substrato poroso e a argamassa se caracteriza pela transferência de água que acontece entre a argamassa e o substrato, o que permite que a pasta de cimento penetre nos poros e na rugosidade do substrato. À medida que essa pasta de cimento se hidrata, ocorre a formação de hidróxidos e silicatos, esses cristais de etringita se entrelaçam nos poros do substrato e desempenham um papel fundamental na ancoragem do revestimento.

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 13281-1 (2023), visando uma maior aderência entre o sistema argamassa/substrato, a fim de evitar o aparecimento de patologias nos revestimentos, são necessários procedimentos de preparo do substrato-base. Devendo-se efetuar a limpeza do local, retirando gorduras, materiais pulverulentos, matéria orgânica ou qualquer outro elemento que possa obstruir os

poros.

2.1.4.1.2 – Chapisco

A norma brasileira ABNT NBR 13529 (2013) classifica o chapisco como uma camada de preparo da base, aplicada de forma contínua ou descontínua, podendo ser necessária ou não, conforme a natureza da base e tem a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento.

Segundo Silva (2006), o chapisco tem por finalidade melhorar a aderência da primeira camada do revestimento ao substrato em situações críticas, basicamente vinculadas a dois fatores: limitação da capacidade de aderência da base e revestimento sujeito a ações de maior intensidade. Sua aplicação cria uma superfície áspera que facilita a aderência das camadas subsequentes e sem o chapisco, a eficácia dos revestimentos poderia ser comprometida, levando a problemas de manutenção e reparo a curto prazo.

Segundo Zanelato *et al.* (2019) os principais requisitos para o chapisco são a resistência, aderência e durabilidade. A aderência está atrelada aos altos teores de cimento no traço, que comumente é preparado com um traço de 1:3 (cimento: areia). O cimento em alta concentração, se beneficia da sua granulometria fina, e além de conferir resistência contribui com a ancoragem da argamassa com os poros do substrato. A areia é a responsável por quase toda a aspereza, e a ancoragem deve ter granulometria média a grossa.

Os três tipos de chapisco mais usados na construção civil são convencionais, rolados e industrializados, cada um possuindo características distintas para atender a diferentes demandas das edificações. O chapisco convencional ou tradicional é o mais comum, composto por uma mistura de cimento e areia, aplicado manualmente para criar uma superfície áspera que facilita a aderência do emboço. Já o chapisco rolado utiliza a mesma mistura, porém com uma consistência mais fluida e é aplicado com rolos e esponjas, especialmente em áreas grandes e lisas. Por sua vez, o chapisco industrializado é comercializado pronto para o uso, contendo misturas padronizadas de cimento, areia e aditivos que otimizam a aderência e resistência, podendo ser aplicado tanto manualmente quanto com máquinas projetoras, é mais utilizado em grandes obras onde se faz necessário uma aplicação mais rápida.

(FERRÁNDEZ *et al.*, 2022).

2.1.4.1.3 – Emboço

Segundo a norma brasileira NBR 13529 (2013), o emboço pode ser entendido como um revestimento executado para cobrir e regularizar a superfície do substrato ou chapisco, propiciando uma superfície lisa e nivelada que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo, ou que se constitua no acabamento, devendo para tanto possuir espessura média entre 15 mm e 25 mm.

Segundo Santos (2019), o emboço desempenha um papel na proteção e acabamento de edificações. Ele é uma camada intermediária aplicada sobre a alvenaria com o chapisco e antes do reboco, sendo responsável por uniformizar a superfície, proporcionar maior aderência ao revestimento final e aumentar a resistência contra agentes externos. Sua composição tradicional é à base de cimento, areia e água, sendo ajustada conforme as necessidades específicas de cada obra, como exigências térmicas ou de impermeabilização. Para um desempenho eficaz, o emboço deve garantir boa aderência, resistência mecânica e ser aplicado de forma adequada, respeitando os tempos de cura (CARASEK *et al.*, 2014).

Entretanto, patologias comuns no emboço, como fissuração e destacamento, podem ocorrer devido a falhas na execução ou no controle da qualidade dos materiais. Essas patologias afetam diretamente a durabilidade do sistema de revestimento e podem comprometer tanto a estética quanto a proteção das edificações, facilitando a penetração de umidade e reduzindo a vida útil das fachadas. Estudos como o de Camacho *et al.* (2015) indicam que o controle da umidade e a técnica de aplicação são fatores críticos para garantir o desempenho adequado do emboço, especialmente em sistemas que utilizam métodos modernos de projeção mecânica, que têm mostrado melhores resultados em termos de aderência e durabilidade do revestimento

2.1.4.1.4 – Reboco

Segundo a norma brasileira NBR 13529 (2013), o reboco é compreendido como um revestimento que cobre o emboço, preparando a superfície para receber o

revestimento decorativo ou o acabamento.

O reboco é composto por uma mistura de cimento, cal, areia, sendo 1 parte de cimento, 0,5 a 1 parte de cal e de 3 a 4 partes de areia fina. Podendo o traço ser alterado dependendo das texturas e acabamentos desejados, podendo ir desde superfícies rugosas até acabamentos lisos e polidos. Segundo Uygunoğlu *et al.* (2016) e a espessura ideal do reboco de cimento varia conforme o tipo de parede e a orientação do edifício, mas em seus estudos a espessura ideal ficou entre 4 a 6 mm.

Segundo a ABNT NBR 13749 (2013) os rebocos podem ser executados com os seguintes tipos de acabamento da superfície:

- Desempinado,
- Camurçado,
- Raspado,
- Chapiscado,
- Lavado ou tratado com produtos químicos e
- Imitação travertina (cimento queimado).

A composição e a textura do reboco influenciam não apenas na sua aparência, mas também suas propriedades mecânicas, como aderência, compactação, durabilidade e resistência.

Segundo Kanaková *et al.* (2015), existem diferentes tipos de reboco, cada um com finalidades específicas. O reboco comum é o mais utilizado em construções, servindo como base para pintura ou aplicação de outros revestimentos. Já o reboco impermeável é formulado com aditivos que o tornam resistente à umidade, sendo ideal para áreas expostas, como fachadas e banheiros. Outros tipos incluem o reboco térmico, que utiliza materiais como poliestireno expandido (EPS) e vermiculita para melhorar o isolamento térmico, e o reboco acústico, que é aplicado em locais onde é necessário o controle sonoro.

2.1.4.1.5 – Camada única

O revestimento de camada única, popularmente conhecido como reboco paulista, é um tipo de revestimento aplicado diretamente sobre a base de alvenaria

ou concreto, utilizando uma única camada de argamassa. Este sistema substitui a necessidade de aplicar várias camadas (emboço e reboco), combinando-as em uma única etapa. Sua principal vantagem está na maior produtividade e na redução de custos, uma vez que simplifica o processo de revestimento em obras. (CALDAS *et al.*, 2020).

Por ser uma técnica versátil, o reboco paulista é amplamente utilizado em todo o Brasil, sendo especialmente comum em edifícios residenciais e comerciais.

Apesar de sua eficiência em termos de mão de obra, o uso de massa única exige cuidados técnicos para garantir durabilidade e desempenho. As espessuras variam, dependendo da aplicação, mas geralmente ficam entre 15 e 25 mm. O uso de aditivos e a escolha de uma formulação adequada de argamassa são essenciais para evitar patologias como fissuras e descolamento, comuns em ambientes sujeitos a variações térmicas ou retrações da argamassa.

2.1.5 - Propriedades das argamassas

2.1.5.1 – Aderência

A aderência pode ser compreendida como a propriedade que define a resistência e a ligação na interface entre a argamassa e o substrato, geralmente composto por alvenaria ou concreto moldado in loco. Essa característica da argamassa não é isolada, tornando-se dependente das propriedades e da rugosidade do substrato ao qual está aderida (Stolz *et al.* 2016). De acordo com Carasek (2010), a eficácia da aderência reflete a interação entre os dois materiais, sendo fundamental para a durabilidade e a funcionalidade do revestimento aplicado.

A definição de aderência abrange a capacidade da camada de argamassa em suportar tensões, tanto tangenciais (cisalhamento) quanto normais (tração), sem que ocorra ruptura. Como destacado por Sabbatini (1984), essa resistência é influenciada pelas propriedades físicas do substrato, incluindo sua porosidade, resistência mecânica, textura superficial e absorção de água. Essas características determinam o modo como a argamassa se comporta ao ser aplicada, afetando diretamente a eficácia do revestimento (ZANELATO *et al.* 2019).

Além das características do substrato, a execução do revestimento e as características da própria argamassa, como consistência, teor de ar incorporado e retenção de água, desempenham papéis significativos na adesão entre a argamassa e o substrato. A trabalhabilidade e a umidade da argamassa são fatores essenciais, pois influenciam a formação de uma interface forte e coesa durante o processo de cura.

Carvalho Jr. *et al.* (2005) identificam dois mecanismos principais que governam a aderência da argamassa à alvenaria: a aderência química e a aderência mecânica. A aderência química é estabelecida por meio de forças covalentes geradas durante a hidratação do cimento, que interagem com a superfície do substrato. Este tipo de aderência é crucial para garantir uma ligação duradoura e resistente ao longo do tempo. Por outro lado, a aderência mecânica se origina da ancoragem dos produtos da hidratação do cimento nos poros da alvenaria. Essa interação é facilitada pela penetração da argamassa nos poros do substrato, que ocorre através de tensões capilares.

Além disso, o uso de aditivos e materiais reciclados tem ganhado destaque nas pesquisas sobre aderência em argamassas. Produtos como aditivos poliméricos, pontes de aderência e materiais reciclados, como cinzas volantes e resíduos de rocha, têm demonstrado potencial para melhorar a coesão e a ligação entre a argamassa e o substrato. Essa abordagem sustentável não apenas melhora as propriedades adesivas, mas também contribui para práticas de construção mais ecológicas e eficientes, alinhadas às diretrizes de sustentabilidade na construção civil.

2.1.5.1.1 – Adesão inicial

Segundo Póvoas (2005) a adesão pode ser entendida como a soma das interações intermoleculares que ocorrem na interface argamassa/substrato, cujo somatório é uma força de atração entre as moléculas distintas.

A adesão inicial da argamassa ao substrato a revestir, deve-se à princípio a reologia da pasta aglomerante, influenciada pela trabalhabilidade da argamassa, baixa tensão superficial e tamanho dos agregados. Sendo fator essencial, a presença de tratamento prévio e condições de limpeza do substrato para uma boa adesão inicial (VITTI *et al.*, 2021).

De acordo com os estudos de Moreno Júnior e Selmo (2007), os princípios que regem como um material adere desenvolvem-se em dois momentos interligados, mas distintos: a adesão inicial e a aderência. A diferença principal entre esses dois estágios é o fato de que a adesão inicial ocorre quando a argamassa fresca é aplicada sobre o substrato, enquanto a aderência se manifesta durante o processo de endurecimento dos componentes ligantes presentes na argamassa. Essa aderência, por sua vez, influenciará o desempenho ao longo de toda a vida útil do material (KHALDI *et al.*, 2020).

Como observado por Recena (2008), aderência (ou adesão) da argamassa instantânea ocorre devido à formação de um vácuo que resulta da deformação quando o material é lançado sobre a superfície do substrato. Esse fenômeno é principalmente influenciado pelas propriedades de coesão e plasticidade do material que está sendo aplicado (FENG *et al.*, 2020).

2.1.5.1.2 – Coesão

A coesão em argamassas é definida como a força de atração que mantém unidas as partículas sólidas da mistura. Ocorre através da formação de uma rede de nanopartículas de hidrato de silicato de cálcio, com uma atração entre as superfícies das partículas garantindo que a argamassa permaneça estável e coesa durante a aplicação e o processo de cura. A coesão afeta diretamente a resistência mecânica da argamassa, influenciando sua durabilidade e capacidade de suportar tensões sem se romper (GOYAL *et al.*, 2021).

Diversos fatores impactam a coesão das argamassas. A composição da mistura, incluindo a proporção de cimento, areia e água, desempenha um papel significativo. Um aumento no teor de cimento geralmente resulta em uma maior coesão, devido à formação de mais ligações químicas durante a hidratação. A textura e o tamanho dos agregados também influenciam, pois, uma distribuição adequada pode melhorar a compactação e, portanto, a coesão. Além disso, condições ambientais, como umidade e temperatura, afetam a interação das partículas durante a cura (CARASEK, 2010; CINCOTTO, 1995).

Segundo Ramesh *et al.* (2019) a adição de cal à argamassa reduz a tensão superficial da argamassa, facilitando a penetração da água nas superfícies dos

agregados e do substrato. Isso resulta em uma argamassa mais plástica e trabalhável, além de melhorar a resistência à deformação ao longo do tempo.

Além da cal, existem outros materiais e aditivos que podem modificar as propriedades de coesão das argamassas. Aditivos superplastificantes, por exemplo, podem melhorar a reologia da argamassa, aumentando a trabalhabilidade sem adicionar água excessiva.

2.1.5.2 – Permeabilidade à água

A permeabilidade à água das argamassas está diretamente relacionada à durabilidade e funcionalidade das construções. Estudos como o de Zhou *et al.* (2011) indicam que ela é intrinsecamente ligada à porosidade e à microestrutura do material. Segundo o autor, a permeabilidade depende tanto do teor de água retida quanto da distribuição do tamanho dos poros, sendo influenciada por fatores como o tipo de aglomerante e a composição granulométrica dos materiais.

Argamassas formuladas com cimento, por exemplo, tendem a exibir menor retenção de água e maior permeabilidade quando comparadas às baseadas em cal, devido à microestrutura mais densa e à maior capacidade de compactação das últimas (RAMESH *et al.*, 2019).

A interface entre a argamassa e os substratos desempenha um papel crucial na dinâmica da permeabilidade. Durante a aplicação, a sucção capilar age como uma força motriz, promovendo a penetração de água nos poros do material. Em condições de secagem, a descontinuidade da fase líquida limita o transporte de água, o que pode gerar tensões internas e, conseqüentemente, fissuras. Dessa forma, a permeabilidade da argamassa é modulada tanto por fatores físicos, como o tamanho dos poros, quanto por fenômenos interfaciais, como as forças capilares (HENDRICKX *et al.*, 2010).

Estudos revelam que a permeabilidade diminui à medida que a compactação aumenta e que o conteúdo de água nos poros é reduzido. Esse efeito é especialmente visível em argamassas que apresentam maior densidade de empacotamento das partículas. Por outro lado, o excesso de porosidade, geralmente associado a argamassas com maior relação água/cimento, tende a aumentar a permeabilidade e pode comprometer a durabilidade da estrutura (SAELI *et al.*, 2019).

2.1.5.3 – Retenção

A retenção de água corresponde à propriedade das argamassas no estado fresco que permite manter sua consistência e trabalhabilidade, mesmo quando sujeitas a condições que favoreçam a perda de água, como evaporação, sucção do substrato ou hidratação dos aglomerantes (Paiva *et al.*, 2006). Garantindo assim a uniformidade da argamassa durante a aplicação e evitando que o material se torne excessivamente seco e difícil de manusear.

A retenção de água é especialmente importante em condições climáticas adversas como a do Brasil, onde as alta temperatura e ventos fortes intensificam a evaporação, ou em substratos de alta absorção de água, como blocos cerâmicos e tijolos porosos (CARASEK, 2010).

Além de afetar o comportamento da argamassa no estado fresco, a retenção de água também desempenha um papel crucial no estado endurecido. Durante o processo de cura e endurecimento, a argamassa depende de um teor adequado de umidade para que as reações químicas dos aglomerantes ocorram corretamente. Uma boa retenção de água garante que o cimento e outros componentes ligantes tenham tempo suficiente para reagir e formar uma matriz sólida e coesa, resultando em maior resistência mecânica e durabilidade. Propriedades como aderência ao substrato e resistência à tração e compressão estão diretamente ligadas à capacidade da argamassa de reter água de forma adequada durante o processo de cura (FREITAS, 2010).

Segundo Spychał *et al.* (2021), a cal, é um material que, quando adicionado à argamassa, ajuda a aumentar a retenção de água, tornando a mistura mais plástica e evitando o ressecamento precoce. Outras substâncias, como resinas sintéticas e aditivos hidrófilos, também são frequentemente utilizadas para ajustar essa propriedade. A utilização de materiais reciclados ou adições minerais, como cinzas e resíduos de rocha, pode ainda impactar a retenção de água, modificando a distribuição dos poros na matriz e influenciando a capacidade da argamassa de armazenar água durante o processo de aplicação e endurecimento (FARINHA E VEIGA, 2015).

2.1.5.4 – Resistência mecânica

As propriedades mecânicas das argamassas representam o comportamento do material ao ser submetido a forças externas, como compressão, tração e cisalhamento. Essas propriedades estão diretamente relacionadas ao tipo e à quantidade de agregados e aglomerantes utilizados, além da técnica de execução aplicada, que busca compactar adequadamente a argamassa durante a aplicação e o acabamento. Também é importante considerar a influência da temperatura e umidade no desempenho e durabilidade das argamassas. A resistência do material, por exemplo, é inversamente proporcional ao consumo de água (relação água/cimento), uma vez que o aumento dessa proporção leva a um maior índice de vazios (AMENTA *et al.*, 2017; SAELI *et al.*, 2019).

Entre as principais propriedades mecânicas estão a resistência à compressão, resistência à tração na flexão e a aderência ao substrato. A resistência à compressão mede a capacidade da argamassa de suportar forças compressivas sem se deformar ou romper. Já a resistência à tração na flexão é importante para avaliar o comportamento do material quando submetido a esforços de dobra, que simulam as tensões geradas por variações térmicas, cargas não uniformes ou movimentações estruturais. A aderência, por sua vez, avalia a força de ligação entre a argamassa e o substrato, garantindo que o material permaneça firmemente aderido à superfície durante toda a vida útil (CINCOTTO *et al.*, 1995).

As propriedades mecânicas são influenciadas por diversos fatores, como a proporção de aglomerantes e agregados, a qualidade dos materiais utilizados, a quantidade de água na mistura e a presença de aditivos. Segundo Ramesh *et al.* (2019) a adição de cal, por exemplo, pode aumentar a trabalhabilidade e a retenção de água da argamassa, mas tende a reduzir a resistência mecânica. Por outro lado, materiais recicláveis como os resíduos de rocha e cinzas pozolânicas, podem aumentar a resistência mecânica sem comprometer a trabalhabilidade.

2.1.5.5 – Trabalhabilidade

A trabalhabilidade está relacionada a dois fatores, a consistência e a plasticidade. Pode-se dizer então, que a trabalhabilidade significa facilidade de manuseio. Uma argamassa é trabalhável quando ela se espalha facilmente ao ser

assentada, não gruda na ferramenta quando está sendo aplicada, não endurece em contato com superfícies que absorvem muita água, não segrega ao ser transportada e permanece plástica por tempo suficiente para que a aplicação seja finalizada (SABBATINI, 1984).

Segundo Stolz *et al.* (2016) a trabalhabilidade de uma argamassa é alterada quando esta entra em contato com o substrato. A qualidade e quantidade da alteração dependem das características da base, tais como: sucção de água, textura superficial e características de movimentação de água no seu interior, além das condições ambientais que vão interferir na evaporação.

2.1.5.5.1 – Consistência

É comum ver no dia a dia da obra, um pedreiro que visando ter maior trabalhabilidade da argamassa, altere a quantidade de água de amassamento, sendo a adição de água o único meio pelo qual isso é proporcionado de forma direta. O ajuste, pela adição de água, diz respeito à consistência ou fluidez da argamassa.

A consistência da argamassa é a propriedade pela qual no estado fresco, descreve a resistência do material à deformação sob seu próprio peso. Ela reflete a capacidade da mistura em manter-se coesa e estável durante a aplicação e o manuseio, garantindo uma distribuição homogênea do material sobre o substrato. Essa propriedade está diretamente relacionada à quantidade de água incorporada na mistura, mas também é influenciada pela proporção entre aglomerante e agregado, a granulometria dos agregados e o tipo de aglomerante utilizado, como o cimento, cal ou outros aditivos. Uma consistência inadequada pode resultar em problemas como exsudação, segregação e dificuldade de aplicação, impactando a qualidade e a durabilidade do revestimento final (CINCOTTO *et al.*, 1995; SILVA, 2006).

Segundo Carasek (2010), as argamassas podem ser classificadas quanto à sua consistência da seguinte forma:

- **Argamassas secas:** necessitam de aplicação de energia para adquirirem sua forma final, onde a pasta preenche os vazios entre os grãos.
- **Argamassas plásticas:** com a aplicação de um pequeno esforço, atingem a

forma desejada, com a pasta formando uma fina película que atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados.

- **Argamassas fluidas:** escorrem e se auto nivelam, sem necessidade de esforço adicional além da força da gravidade, mantendo os grãos imersos na pasta.

A consistência pode ser medida em laboratório através de ensaios específicos, como o ensaio de espalhamento (flow table), usado para avaliar a fluidez e a trabalhabilidade da argamassa no estado fresco. Esse ensaio permite determinar se a argamassa atende os parâmetros necessários para a aplicação e possibilitam ajustes na composição da mistura para atender aos requisitos normativos e técnicos (RECENA, 2008; SENFF *et al.*, 2009).

2.1.5.5.2 – Plasticidade

A plasticidade pode ser compreendida como a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a conservar-se deformada após a redução das tensões de deformação (SILVA,2006).

Segundo Ren *et al.* (2021) a plasticidade das argamassas é influenciada pelos tipos e pelas quantidades de aglomerantes e agregados, pelo tempo e pela intensidade de mistura, além de pela presença de aditivos. Assim sendo, a plasticidade adequada para cada mistura varia de acordo com a finalidade e forma de aplicação da argamassa, demandando níveis individuais de água para se chegar a uma quantidade ótima, sendo função do proporcionamento e natureza dos materiais (CARASEK, 2010).

Ainda segundo Carasek (2010) um erro comum é confundir plasticidade e consistência como sinônimos da trabalhabilidade, pois os dois fatores afetam diretamente a trabalhabilidade das argamassas.

2.1.6- Propriedades térmicas das argamassas

Com o aumento das preocupações em relação à sustentabilidade, o desempenho térmico das edificações tornou-se um tema cada vez mais relevante.

Projetar com foco em eficiência energética, conforto térmico e acústico, além de atender às exigências de desempenho, passou a ser uma prioridade. Nesse contexto, a norma ABNT NBR 15575-1 (2024) foi estabelecida para definir critérios mínimos de desempenho aplicáveis às edificações habitacionais. Dedicando uma parte à discussão do desempenho térmico nas edificações, orientando os profissionais a adotarem práticas que promovam maior eficiência energética e maior conforto térmico.

A implementação dessas diretrizes visa reduzir o consumo de energia e melhorar o conforto ambiental, garantindo que as edificações atendam a padrões de qualidade e eficiência exigidos pelo mercado atual.

2.1.6.1 – Massa Específica e Calor específico

As propriedades termodinâmicas estão relacionadas ao estado de equilíbrio de um sistema. Duas dessas propriedades amplamente utilizadas na análise térmica são a massa específica (ρ) e o calor específico (c).

O calor específico (c) refere-se à quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de um componente em um grau, por unidade de massa, e é expresso em unidades de Joules por quilograma por Kelvin ($J/kg \cdot K$). Essa propriedade é fundamental para entender como um material se comporta termicamente, uma vez que diferentes materiais possuem distintas capacidades de armazenar e transferir calor. A capacidade térmica de um material, que é definida como o produto da densidade (ρ) pelo calor específico (c), revela a quantidade de energia térmica que ele pode armazenar (MENDES *et al.*, 2021).

Além disso, a massa específica (ρ), que representa a densidade do material, é a relação entre a massa e o volume ocupado pela argamassa. A massa específica de argamassas influencia diretamente suas propriedades mecânicas e térmicas. Argamassas com maior massa específica tendem a apresentar maior densidade e resistência, enquanto aquelas com menor massa específica costuma ser mais leves e utilizadas para aplicações que exigem maior isolamento térmico (SHAFIGH *et al.*, 2020).

2.1.6.2 – Condutividade térmica

Segundo Clauser e Huengs (1995), a condutividade térmica dos materiais cimentícios é diretamente influenciada pelas propriedades térmicas dos minerais que os compõem. Essa característica regula a capacidade de transmissão de calor por unidade de tempo através de uma superfície submetida a um diferencial de temperatura. Argamassas com baixa condutividade ajudam a reduzir a transferência de calor entre ambientes internos e externos, contribuindo para o conforto térmico e a eficiência energética das edificações. Argamassas com baixa condutividade térmica também pode combater a ocorrência de fissuras, uma vez que a transmissão lenta de calor reduz a geração de tensões térmicas, que podem levar ao aparecimento de trincas (FONTES *et al.*, 2021).

De acordo com Cincotto *et al.* (1995), as propriedades termo físicas de uma argamassa são determinadas por uma série de fatores, incluindo a composição e quantidade de matéria sólida, bem como a distribuição, geometria e dimensão dos poros que formam sua estrutura celular. Outros fatores incluem o teor de umidade e o tipo de gás presente nos poros, ambos impactando significativamente o comportamento térmico do material.

Segundo Smith *et al.* (2016), materiais mais porosos tendem a ter menor condutividade térmica, pois o ar aprisionado nos poros atua como isolante térmico. Akutsu *et al.* (1987), destacam que a condutividade térmica dos materiais é inversamente proporcional à quantidade de ar presente em sua composição e diretamente proporcional à massa específica aparente. A presença de umidade nos materiais aumenta a condutividade térmica, pois a água possui menor capacidade de isolamento em comparação com o ar, substituindo o volume gasoso nos poros.

A microestrutura dos agregados é um fator determinante na condutividade térmica dos materiais, pois pesquisas indicam que agregados com estrutura cristalina e poros interconectados, como os quartzosos, apresentam maior condutividade térmica do que agregados de estrutura vítrea, que possuem poros distribuídos de forma discreta.

Pesquisas como a de Fontes *et al.* (2021), Passos *et al.* (2018) e Nunes *et al.* (2023) e tem se concentrado em desenvolver argamassas de revestimento com

características termo isolantes, buscando reduzir a condutividade térmica e, assim, combater a fissuração e melhorar o conforto térmico. Para isso, investiga-se a incorporação de materiais leves, como vermiculita, perlita e poliestireno expandido, além de resíduos reciclados que possam reduzir a densidade e aumentar a capacidade de isolamento do material.

Entretanto, a dificuldade dos estudos que avaliam a influência de novos materiais que otimizem as propriedades térmicas e mecânicas das argamassas é balancear a redução da condutividade com a manutenção da resistência, aderência e durabilidade dos revestimentos.

2.2 – Resíduo de rocha ornamental na construção civil

2.2.1 - Origem

As rochas ornamentais e de revestimento são materiais litológicos extraídos em blocos ou chapas que podem ser cortados e beneficiados por processos como esquadrejamento, polimento e lustro. Graças à sua versatilidade, resistência e apelo estético, essas rochas são amplamente utilizadas em acabamentos arquitetônicos e design. A variedade de cores, texturas e padrões presente em materiais como mármore, granitos e quartzitos faz com que sejam ideais para revestimentos de pisos, paredes, bancadas e elementos decorativos (COSTA *et al.*, 2000).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma 15012 (2013), define rocha ornamental como um material rochoso natural que passa por diferentes graus ou tipos de beneficiamento, destinado a exercer uma função estética.

Segundo Chiodi Filho (2018), a designação comercial das rochas ornamentais e de revestimento no Brasil é baseada em três grupos litológicos composicionais: rochas silicáticas, rochas carbonáticas e rochas silicosas. Embora essas subdivisões não tenham uma conotação genética rigorosa, elas refletem características comuns entre as rochas.

- **Rochas Silicáticas:** Formadas por proporções variáveis de minerais silicáticos, como feldspatos, micas e anfibólios, além de silicosos, como o

quartzo. Este grupo inclui materiais comercialmente conhecidos como granito, pegmatito e xisto.

- **Rochas Carbonáticas:** Compostas principalmente por calcita, dolomita e outros carbonatos, podendo conter quantidades subordinadas de minerais silicáticos e/ou silicosos. Este grupo abrange o mármore, e travertino, o limestone (calcário), o ônix (mármore ônix) e o alabastro.
- **Rochas Silicosas:** Predominantemente formadas por quartzo e/ou sílica amorfa, com quantidades subordinadas de minerais silicáticos e/ou carbonáticos. Exemplos comerciais incluem quartzito, metaconglomerado e quartzo.

2.2.2 - Produção

Segundo o balanço de 2024 da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS), o setor de rochas ornamentais e de revestimento teve um crescimento significativo no século 21. A produção mundial saltou de 60 milhões de toneladas (Mt) em 2000 para cerca de 170 Mt em 2023. Nesse mesmo período, o comércio internacional cresceu de 23 Mt para 58 Mt, sendo 60% rochas brutas e 40% rochas processadas, resultando em transações comerciais que somaram US\$20 bilhões em 2022.

O Brasil se encontra em 4º lugar mundialmente dentre os maiores produtores de rochas ornamentais com uma produção de 10 (Mt) anualmente, sendo também o 5º país que mais exporta. Na vanguarda das exportações brasileiras de rochas ornamentais está o estado do Espírito Santo, que em 2023 somou um valor de US\$914,7 milhões em exportações, representando 82,2% do total brasileiro nesse setor (CHIODI FILHO, 2024).

Para a produção de rochas ornamentais é necessária uma cadeia de processos, que Silveira (2014) denomina como *indústria a pedra*. Segundo o autor, o processo é dividido em quatro etapas distintas: pesquisa mineral, lavra (extração), beneficiamento (serragem) e acabamento (resinagem, polimento e corte).

Já Silva (2011) simplifica o processo, dividindo-o em 3 etapas. A extração, realizada nas pedreiras, onde o matacão é cortado em bloco de rocha, o desdobramento, onde ocorre a serragem dos blocos em chapas e o beneficiamento

responsável por dar o acabamento nas chapas.

A extração de rochas ornamentais consiste na remoção de material útil ou economicamente aproveitável diretamente dos maciços rochosos ou dos matacões. O produto dessa etapa é um bloco de rocha com arestas aproximadamente retangulares e dimensões variáveis, planejado para maximizar o aproveitamento do material (MENDES *et al.*, 2023).

Vieira e Duarte (2021), explicam que o beneficiamento tem como objetivo transformar os blocos extraídos na fase de lavra em produtos finais ou semi acabados. Assim, as etapas de beneficiamento são divididas em primário e secundário. O beneficiamento primário, também chamado de desdobramento, consiste na preparação e serragem dos blocos em chapas de espessura variável, geralmente entre dois ou três centímetros. Já o beneficiamento secundário envolve o acabamento superficial das chapas, com ou sem resinação (SAMPAIO E LUZ, 2001).

No processamento das rochas ornamentais, ocorrem perdas de material em todas as etapas do processo produtivo, desde a extração até o beneficiamento final. Cada fase gera diferentes tipos de resíduos, que variam conforme o tipo de processamento e estágio produtivo.

Segundo Gadioli *et al.* (2021), os resíduos de rochas ornamentais se dividem em duas categorias principais: resíduos grosseiros, gerados nas pedreiras durante a extração, e resíduos finos, provenientes das plantas de beneficiamento. No Brasil, segundo Vidal *et al.*, (2014), estima-se que, em 2012, a geração total foi de 22 milhões de toneladas (Mt), sendo 20 Mt de resíduos grosseiros e 2 Mt de resíduos finos, dos quais 1,5 Mt foram no estado do Espírito Santo.

2.2.3 - Impacto Ambiental

O Espírito Santo desempenha um papel de destaque na produção de rochas ornamentais no Brasil, mas, ao mesmo tempo, gera um volume significativo de resíduos ao longo do ciclo de produção. Somado a isso, o fato de que segundo dados do Governo do Estado do Espírito Santo, o estado ser um dos menores do Brasil e contar com somente 40% do estado em áreas de planície. A destinação desses rejeitos é um grande desafio.

Segundo Vidal et al. (2018), a taxa de aproveitamento do resíduo de rocha nas pedreiras é cerca de 30%, com as perdas de material na produção chegando conseqüentemente a valores impressionantes que variam entre 65% a 75%. Perdas essas, que além de reduzirem a produção, geram grande impacto com a sua destinação incorreta (CAMPOS NETO *ET AL.*, 2009).

As atividades de extração e transformação mineral geram diferentes volumes de resíduos, com níveis variados de toxicidade. Assim, essas operações enfrentam o desafio de armazenar, descartar ou reaproveitar esses materiais de forma adequada, visando minimizar os impactos ambientais e otimizar o uso dos recursos naturais (SOUZA, 2002).

Os impactos ambientais já começam na primeira etapa do processo, a extração. O processo de extração frequentemente envolve a remoção das camadas superficiais do solo, o que pode causar compactação e erosão, comprometendo a capacidade de carga do solo, a vegetação nativa e os ecossistemas locais. Além disso, as grandes mineradoras utilizam explosões para extração das rochas, levando a ocorrência de problemas geomorfológicos, processos erosivos e mudanças na rede de drenagem local. Outro fato salientado pelos autores, é que a abertura de novas áreas para exploração pode resultar em fragmentação e destruição de habitats, contribuindo ainda mais para o declínio de diversas espécies de plantas e animais (SIMÃO *ET AL.*, 2021).

Segundo Santos et al., 2010, o setor de rochas ornamentais gera diversos resíduos, como pó de rocha, fragmentos de rochas nas pedreiras e serrarias, lama abrasiva, além de causar ruídos, vibrações e impacto visual nas áreas de extração. Dentre esses, o de maior preocupação para o setor e os órgãos ambientais, devido aos impactos significativos ao meio ambiente, são os afluentes de serrarias que usam teares convencionais, que geram a lama abrasiva. Pois a contaminação de corpos hídricos, colmatação do solo e poluição visual e estética (CAMPOS NETO *ET AL.*, 2009).

A lama abrasiva é o resíduo de maior impacto, gerado no processo de fabricação das rochas. Ela ocorre do desdobramento de blocos de granitos comerciais em chapas nos teares convencionais e é composta principalmente por sílica (cerca de 60%), além de conter óxidos de alumínio, ferro, cálcio e outros elementos em menor quantidade. Esse resíduo resulta da combinação dos principais

insumos e instrumentos utilizados no corte, como lâminas, granalha de aço, cal, pó de rocha e água (MARCON *ET AL.*, 2015; SOUZA *ET AL.*, 2022; SIMÃO *ET AL.*, 2021).

Os resíduos são geridos de acordo com as regulamentações do país em que são gerados. Nos Estados Unidos, resíduos sólidos perigosos e não perigosos devem seguir as recomendações da Agência de Proteção Ambiental (EPA). Na Europa, testes de lixiviação são realizados para orientar a classificação dos resíduos como inertes, perigosos ou não perigosos, de acordo com a Diretiva de Aterros e a Decisão do Conselho 2003/33/EC (União Europeia, 2008). No Brasil, visando atender à crescente preocupação da sociedade em torno das questões ambientais e construção sustentável. A ABNT atualizou em 2004 a NBR:10004 que trata sobre resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, etc. Com o objetivo de classificá-los de acordo com os seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, além de orientar sobre o manejo adequado desses resíduos (SIMÃO *ET AL.*, 2021).

A norma em questão divide os resíduos em duas classes principais: Classe I (perigosos) e Classe II (não-perigosos) e os de Classe II são subdivididos em A e B.

- **Classe I – Perigosos:** São aqueles que apresentam periculosidade devido a características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, entre outras. Esses resíduos podem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente se não forem gerenciados corretamente.
- **Classe II A – Resíduos Não Inertes:** São aqueles que, embora não sejam perigosos, podem ter alguma reatividade química, como resíduos orgânicos (restos de alimentos) ou alguns tipos de papel, plásticos e tecidos que podem sofrer decomposição.
- **Classe II B – Resíduos Inertes:** Os resíduos presentes nessa classe não apresentam reações químicas, biológicas ou físicas significativas quando em contato com a água ou outros agentes ambientais de acordo com outras diretrizes contidas na norma.

Estudos de Braga *et al.* (2010), Gonçalves *et al.* (2002), e Manhães e Holanda (2008) classificaram o resíduo de rochas ornamentais como "Não Perigoso e Não Inerte" (Classe II-A), indicando que, embora não ofereçam riscos significativos

à saúde ou ao meio ambiente, podem sofrer alterações físicas, químicas ou biológicas ao longo do tempo.

2.2.4 - Composição Química

Segundo Dobiszewska *et al.* (2023), inicialmente considerados materiais inertes, os agregados demonstraram, ao longo do tempo, que sua composição química influencia diretamente as propriedades do concreto, fato que muitas vezes era negligenciado no design do concreto. Um exemplo disso é a albita, um mineral do grupo dos feldspatos que reage com o hidróxido de cálcio presente na matriz de cimento. Essa interação promove a substituição de íons de sódio por íons de cálcio na estrutura da albita, resultando na integração da camada superficial ao gel C–S–H, melhorando a zona de transição interfacial e as propriedades do material.

Devido ao fato de as rochas ornamentais brasileiras serem formadas por três grupos litográficos: rochas silicáticas (granitos, pegmatitos e xisto), rochas carbonáticas (mármore e travertinos) e rochas silicosas (quartzo, quartzito e metaconglomerado) e os resíduos das indústrias serem depositados todos juntos, sem nenhuma distinção. Os resíduos de rocha ornamental possuem composição química muito diversa (CHIODI FILHO, 2018).

Diante da quantidade e diversidade significativa de resíduos de rochas ornamentais, um compilado mostrando as variadas composições químicas encontradas na literatura em trabalhos sobre a viabilidade do uso RRO em concretos e argamassas. Foram dispostos no Quadro 2.2, as composições químicas dos resíduos de granito, mármore e resíduos de diversas rochas.

Quadro 2.2: Composições químicas dos resíduos de rocha

Material	Pesquisadores	Elementos (%)												
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	Outros	Perda ao fogo
Mármore	Ahmadi <i>et al.</i> (2023)	0,46	0,05	0,32	53,49	0,12	—	0,01	—	0,02	—	—	2,28	43,26
	Benjeddou <i>et al.</i> (2020)	3,00	0,14	0,39	52,28	0,50	—	—	—	—	—	—	1,09	42,60
	Song <i>et al.</i> (2022)	7,92	0,69	0,64	60,40	14,32	0,01	0,34	—	—	—	—	—	15,68
	Farooq <i>et al.</i> (2023)	4,20	18,06	—	51,40	2,78	1,30	3,60	—	—	0,01	—	—	18,65
	Kabeer e Vays (2018)	1,57	0,18	1,18	32,19	19,85	—	—	—	—	—	—	—	45,03
	Vardhan, Siddique, Goyal (2019)	4,66	0,21	0,49	28,67	22,30	0,05	0,06	—	—	—	—	—	43,56
Granito	Sharma e Vyas (2023)	74,39	13,5	0,86	0,41	0,38	4,79	4,16	—	—	—	—	—	1,51
	Chen <i>et al.</i> (2020)	67,91	13,13	1,97	2,98	0,51	3,91	4,69	0,36	—	0,38	—	1,25	2,91
	Nascimento <i>et al.</i> (2020)	48,70	2,86	14,05	19,67	0,25	10,9	—	2,49	1,09	—	—	—	—
	Lu <i>et al.</i> (2023)	65,28	20,44	2,05	2,27	2,85	3,75	2,59	0,36	0,09	—	—	—	3,17
	Gehlot e Shrivastava (2024)	75,12	13,13	0,82	1,12	0,42	3,01	4,82	0,15	—	—	0,03	—	1,38
Resíduos Diversos	Almada <i>et al.</i> (2023) - C1	44,75	10,41	3,84	14,79	4,32	2,82	1,98	0,73	—	0,34	0,06	2,40	13,56
	Almada <i>et al.</i> (2023) - N1	56,87	12,65	2,58	7,58	2,59	4,16	2,63	0,76	—	0,33	0,06	3,90	5,89
	Gado (2022)	16,08	2,09	2,85	35,45	6,88	0,27	0,55	0,25	0,10	0,05	0,08	0,16	35,19
	Nguyen <i>et al.</i> (2023)	77,12	9,4	4,47	0,84	0,80	1,67	0,16	0,26	0,32	—	—	0,54	4,42
	Bernachid <i>et al.</i> (2019)	64,56	15,55	5,52	2,57	2,92	2,84	3,76	0,54	—	0,14	0,08	0,05	1,47
	Santos <i>et al.</i> (2013)	92,06	3,26	—	1,07	—	0,93	—	—	1,73	—	—	0,95	—
	Azevedo <i>et al.</i> (2019)	63,23	15,34	3,53	3,34	—	5,34	3,04	1,13	1,52	—	—	7,06	—

Segundo Simão *et al.* (2021), o mármore é um calcário metamórfico cristalino, formado pela recristalização do calcário (CaCO_3) e da dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) sob altas temperaturas e pressões, apresentando alta concentração de carbonato de cálcio (CaCO_3) e pequenas quantidades de impurezas como sílica, feldspato, óxidos de ferro, mica, flúor e matéria orgânica. Por outro lado, o granito é uma rocha ígnea composta predominantemente por feldspato, quartzo e mica, com os principais constituintes sendo sílica, alumina, óxido de cálcio e óxidos alcalinos.

Segundo Santos *et al.* (2013) o resíduo diamantado apresenta o maior teor de sílica, enquanto os resíduos de levigação, polimento e granalha são mais ricos em óxidos fundentes (K_2O , Fe_2O_3 , CaO). A presença de óxido de cálcio e ferro nesses resíduos é atribuída ao uso de cal e granalha no processo de beneficiamento.

Ao analisar a tabela, nota-se uma diferença significativa nas composições químicas do granito e do mármore: o granito contém maior percentual de sílica (SiO_2), enquanto o mármore apresenta maior concentração de óxido de cálcio (CaO). Além disso, o resíduo de mármore demonstra maior suscetibilidade ao fogo, apresentando maior perda de massa, enquanto o resíduo de granito se mostra mais estável. Outro ponto observado é que os resíduos formados pela mistura de várias rochas possuem características semelhantes às do granito.

2.2.5 - Morfologia dos grãos

A heterogeneidade e a estrutura interna dos resíduos de rochas são influenciadas por vários fatores, como as características físicas, mineralógicas e químicas da rocha de origem, o tipo de segmento da indústria e o método da deposição dos resíduos.

Segundo Manhães e Holanda (2008), resíduos de rochas graníticas apresentam partículas com morfologia irregular e angular, devido ao processo de corte e serragem dos blocos de rochas ornamentais. Esses grãos angulares, ricos em quartzo e feldspatos, são resultantes do impacto mecânico durante a serragem, o que gera uma distribuição ampla de tamanhos de partículas, com uma grande proporção acima de 20 μm .

Além disso, Santos *et al.* (2013) atestam esse mesmo tipo de morfologia ao examinar resíduos gerados por diferentes processos de corte e beneficiamento. No

caso do resíduo de granalha (Figura 2.2), obtido do corte com lâminas metálicas e granalha de aço, as partículas são angulares e irregulares, uma característica comum aos métodos mais abrasivos de corte. Já o resíduo diamantado, proveniente do corte com fio diamantado, apresenta uma morfologia igualmente irregular, apesar de o processo ser menos abrasivo que o de granalha. Os resíduos de levigação e polimento, fases posteriores do beneficiamento, também possuem grãos com a mesma morfologia, embora esses processos envolvam menos abrasão direta nas superfícies.

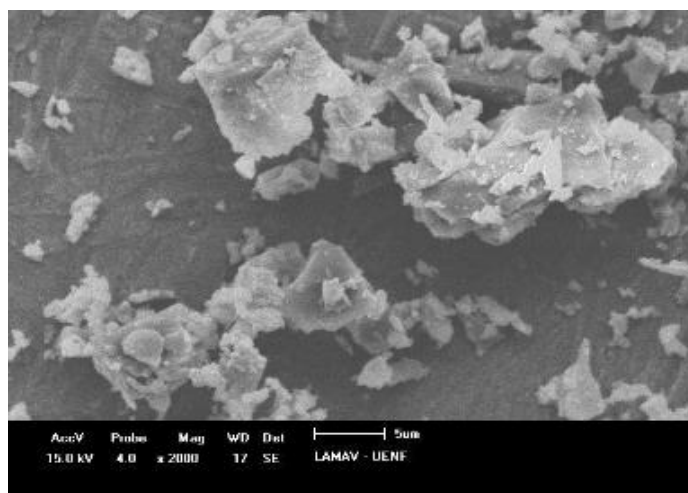


Figura 2.2: Imagem de MEV do resíduo de granalha. Fonte: Santos *et al.* (2013).

Almada *et al.* (2023), notou no seu trabalho a presença de partículas arredondadas no resíduo de rocha ornamental (Figura 2.3), algo que vai contra a literatura. Segundo o autor, a morfologia das partículas de resíduos de rochas ornamentais é influenciada pelos processos de beneficiamento, como corte e polimento. O uso de serra de diamante e água pressurizada gera partículas lamelares e irregulares, mas com desprendimento de minerais mais duros, como o quartzo, podem ocorrer partículas mais arredondadas. No polimento, a fricção e abrasão causam mais desprendimento de minerais, reforçando essa forma arredondada. Além disso, as microfissuras nas partículas, causadas pelo processamento, aumentam a porosidade e podem demandar mais água na mistura.

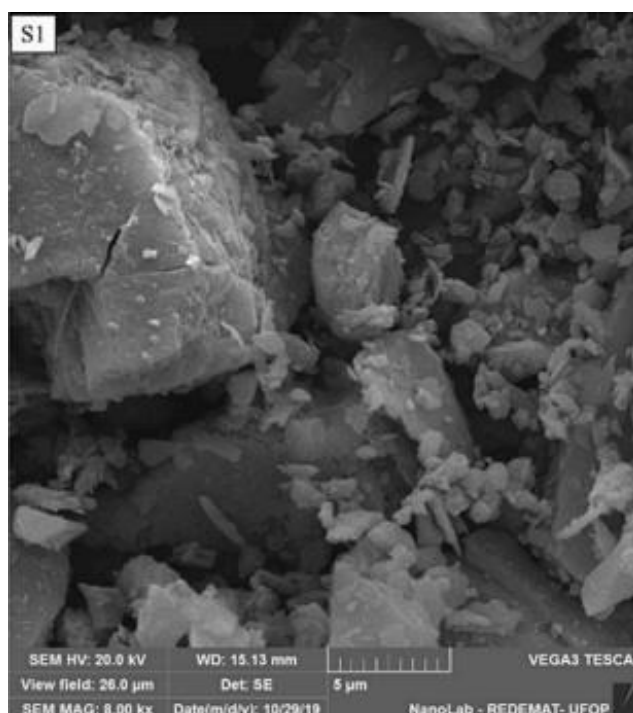


Figura 2.3: Imagem do MEV de resíduo de rocha. Fonte: Almada *et al.* (2023).

2.2.6 - Distribuição granulométrica

No âmbito da distribuição granulométrica, os resíduos apresentam uma ampla distribuição de tamanhos de partículas, dependendo da etapa ao qual é coletado. Os resíduos de levigação e gralalha tendem a ser mais grosseiros, enquanto os resíduos de diamantado e polimento são mais finos, conforme detalhado na Tabela 2.1 abaixo (SANTOS *et al.*, 2013).

Tabela 2.1: Distribuição granulométrica de quatro tipos de resíduo de rocha.

Fração	Tamanho das Partículas (μm)	Diamantado	Gralalha	Levigação	Polimento
Argila	< 2	0,2	–	0,2	–
Silte	$2 \leq x \leq 63$	9,8	8,5	7,9	8,0
Areia	$63 < x \leq 2000$	75,6	66,3	18,4	81,8
Pedregulho	> 2000	14,4	25,3	73,5	10,2

Fonte: Santos *et al.* (2013).

Existe uma diferença significativa na distribuição granulométrica dos resíduos de mármore e granito, refletindo as propriedades físicas e mineralógicas de cada tipo de rocha e os processos industriais pelos quais passam.

Tanto o pó de mármore quanto o cimento apresentam distribuições contínuas de tamanhos de partículas; contudo, o mármore se destaca por uma faixa de partículas mais ampla. Segundo Li *et al.* (2018), a lama de mármore quando colocada em estufa a 105 °C ou ao sol rapidamente perde a umidade, transformando-se em um pó seco com quase todas as partículas menores que 150 µm.

De acordo com Dobiszewska *et al.* (2023), os pós de calcário e mármore, ao serem analisados por microscopia eletrônica de varredura, demonstraram finura comparável à do cimento, com área de superfície específica entre 2.500 e 4.500 cm²/g.

Esse comportamento é atribuído à menor dureza do mármore (Mohs 3), que, durante o polimento, facilita a fragmentação em partículas mais finas.

O granito é composto por minerais mais duros, como quartzo (7 Mohs) e feldspatos (6 Mohs), gerando uma distribuição granulométrica ampla, com partículas de diferentes tamanhos e formas irregulares, especialmente após processos de corte e polimento.

De acordo com Chen *et al.* (2020), a granulometria do resíduo de granito situa-se entre a da areia e a do cimento, destacando-se por seu tamanho intermediário. Nos resultados de distribuição de partículas, as medianas das partículas para o cimento, o resíduo de granito e a areia foram 12,87 µm, 0,12 mm e 0,71 mm, respectivamente. Esses aspectos também foram observados nos estudos de Jain *et al.* (2020) e Gehlot e Shrivastava (2024), os dados sugerem que o resíduo de granito pode ser uma alternativa interessante para ajustar as propriedades granulométricas em argamassas.

A areia de rio, utilizada amplamente como agregado fino na construção civil, apresenta uma distribuição granulométrica mais uniforme e partículas geralmente mais arredondadas devido ao processo natural de desgaste pelo movimento da água (NEVILLE, 1997). Essa homogeneidade granulométrica e a forma arredondada dos grãos de areia do rio facilitam a trabalhabilidade das misturas, aumentando sua fluidez e distribuição uniforme na matriz cimentícia. No entanto, diferentemente do

resíduo de granito, a areia de rio não possui os grãos angulares que contribuem para uma ancoragem mecânica mais eficiente, o que pode resultar em misturas com menor resistência inicial.

2.2.7 - Impacto do resíduo de rocha nas propriedades das argamassas no estado fresco

A incorporação de resíduos de rocha em argamassas pode impactar diretamente as propriedades no estado fresco, oferecendo tanto vantagens quanto desafios. A adição de resíduos pode influenciar a consistência, tornando a mistura mais fluida ou seca, dependendo da capacidade de absorção de água do resíduo e da interação com os demais componentes da argamassa. Resíduos finos, em particular, podem melhorar a retenção de água, aumentando a área superficial e minimizando a perda de umidade, o que previne secagem precoce e formação de fissuras. Contudo, a inclusão excessiva de resíduo ou uma granulometria inadequada, principalmente resíduos com granulometria menor que 75 μm , pode causar segregação e exsudação, comprometendo a homogeneidade e a qualidade final da argamassa (Silva *et al.*, 2016; Azevedo *et al.*, 2019; Paes *et al.*, 2022; Carasek, 2010).

2.2.7.1 - Consistência e Trabalhabilidade

Através do índice de consistência é possível avaliar a quantidade de água necessária para a mistura obter a plasticidade adequada para aplicação *in situ* e fornecer uma avaliação indireta de sua vida útil em termos de trabalhabilidade (SILVA *et al.*, 2016).

Conforme Singh *et al.* (2016), a substituição parcial da areia natural por resíduos de granito resultou em uma perda gradual de trabalhabilidade em todas as relações água/cimento (a/c).

Gado (2022) observou que a demanda de água subiu de 27% na mistura de referência para 36% e 38% nas argamassas com 25% e 30% de lama de mármore e granito, respectivamente.

Sharma e Vyas (2023), observaram que a relação a/c necessária para atingir

o valor padrão de fluidez nas misturas 1:3 aumentou 12,5% e 16,2% para as misturas com pó de brita e resíduo de granito em comparação com a areia de rio. Além disso, o resíduo apresenta maior absorção de água em comparação com em relação ao pó e a areia.

Os autores explicam que esse comportamento é resultado do aumento da fricção interna nas misturas, causada pelas partículas finas do resíduo (4,86 μm) em comparação com as partículas maiores e mais arredondadas da areia ($\leq 0,6 \text{ mm}$). A forma angular e a textura áspera do resíduo intensificam essa fricção, o que dificulta a trabalhabilidade. A alta absorção de água do resíduo, atribuída ao aumento da área de superfície das partículas em relação à areia natural, é outro fator que contribui para a perda de trabalhabilidade.

Entretanto, Chen *et al.* (2020), mostrou que a substituição da areia com 10% a 15% de resíduo de granito beneficiou significativamente a fluidez das misturas, a trabalhabilidade só começou a decair a partir da substituição de 20%.

Kabber e Vyas (2018) demonstraram que ao substituir totalmente a areia por resíduo de mármore a relação água/ cimento quase que dobrou, entretanto, argamassas com substituição de 20% a 40% da areia do rio fluem mais facilmente quando uma força é aplicada. Segundo o autor, essa redução na necessidade de água é, na verdade, uma consequência da diminuição dos parâmetros reológicos das argamassas, onde o pó de mármore dolomítico desempenha o papel de um superplastificante fraco.

2.2.7.2 - Densidade no estado fresco e porosidade

A adição de resíduo de rocha pode impactar a densidade da argamassa no estado fresco de acordo com o tipo, a granulometria e a proporção do resíduo utilizado. Em geral, resíduos de rocha tendem a aumentar a densidade aparente da argamassa, uma vez que são compostos por partículas minerais finas que ocupam os poros da matriz cimentícia resultando em uma argamassa mais densa e, frequentemente, mais resistente no estado endurecido. No entanto, dependendo da morfologia do resíduo, pode reduzir a compactação e aumentar a incorporação de ar, o que pode diminuir a densidade (AMARAL., 2020; KABEER E VYAS, 2018).

Nos estudos de Kabeer e Vyas (2018), a densidade aparente fresca é máxima com 20% de substituição da areia de rio por pó de mármore, devido ao preenchimento dos vazios na massa cimentícia. Com 40% de substituição, a densidade é igual a de controle e começa a decair com o aumento na substituição, devido ao aumento no conteúdo de água.

Amaral *et al.* (2020), explica que a densidade e o ar incorporado em argamassas possuem uma relação inversa: um aumento na densidade reduz o volume de vazios, diminuindo a quantidade de ar incorporado. A granulometria mais fina do resíduo de pedras ornamentais e seu alto teor de sílica (SiO_2) contribuem para esse efeito ao promover reações de hidratação que preenchem os poros da matriz cimentícia e aumentam a densidade.

Segundo Chen *et al.* (2020), a densidade e a relação de vazios possuem uma relação inversa: o aumento da densidade reduz a relação de vazios e vice-versa. No caso do resíduo de granito como substituto da areia, suas partículas mais finas preenchem os vazios entre as partículas de areia, reduzindo a relação de vazios e aumentando a densidade. No entanto, quando o teor de resíduo ultrapassa o necessário para preencher esses vazios, ocorre o afastamento das partículas de areia, resultando em um afrouxamento do empacotamento e uma redução da densidade.

De acordo com Gehlot e Shrivastava (2024), a variação na densidade endurecida é atribuída à relação a/c e à hidratação aprimorada das argamassas.

2.2.7.3 - Retenção de água

Os resíduos de rochas em argamassas podem impactar significativamente a retenção de água, dependendo de suas composições químicas e morfologias.

Segundo Martínez *et al.* (2018), resíduos mais finos, que atuam como fillers, geralmente aumentam a capacidade da argamassa de reter água, pois preenchem os poros da matriz e promovem maior coesão entre os componentes.

Moreira *et al.* (2022) analisou a retenção de água em argamassas com diferentes tipos de cimento Portland e diferentes níveis de substituição de areia por resíduo. Em geral, a retenção de água caía quando a areia era substituída por 10% de resíduo e aumentava à medida que maiores teores de substituições eram

utilizados.

Por outro lado, resíduos com granulometria mais grossa podem ter um efeito mais neutro ou até reduzir a retenção de água, pois possuem menor área superficial para interação com a água e não contribuem diretamente para o aumento da densidade da mistura (VERGARA *et al.*, 2019).

Além disso, a composição química do resíduo pode influenciar a retenção de água. Resíduos que contêm minerais argilosos, aumentam a retenção de água devido à alta capacidade de absorção desses minerais. Por outro lado, resíduos com características pozolânicas podem modificar a microestrutura da argamassa, melhorando sua coesão e indiretamente favorecendo a retenção de água. Contudo, resíduos que não interagem quimicamente com a matriz cimentícia, como resíduos de quartzito, têm um impacto mais limitado (AZEVEDO *et al.*, 2019; ALMADA *et al.*, 2022; BECKER *et al.*, 2023).

2.2.8 - Impacto do resíduo de rocha nas propriedades das argamassas no estado endurecido

Segundo Ramos *et al.* (2013), resíduos de rocha, dependendo de suas características físicas e químicas, podem funcionar como materiais reativos ou de preenchimento, impactando diretamente a resistência mecânica, durabilidade e comportamento térmico das argamassas.

Quando incorporados à matriz cimentícia, os resíduos podem aumentar a resistência à compressão e minimizar a permeabilidade, contribuindo para argamassas mais duráveis.

2.2.8.1 - Resistência Mecânica

A substituição parcial do cimento por pó de rocha tem impacto direto na resistência à compressão das argamassas e concretos. Dobiszewska *et al.* (2023) mostra que a adição de até 10-15% de pó de rocha pode melhorar a resistência mecânica, especialmente em idades iniciais, devido ao efeito *filler* e à possível reatividade pozolânica de algumas rochas. O efeito *filler*, provocado pelas partículas finas do resíduo, resulta em uma matriz mais densa, reduzindo a porosidade e

aprimorando a interface pasta-agregado. Isso favorece a formação de produtos de hidratação, como o C–S–H, que conferem resistência ao compósito. Além disso, destaca-se a influência do fenômeno de heteronucleação, no qual as partículas finas do pó de rocha atuam como sítios ativos para a nucleação de produtos de hidratação. Essas superfícies adicionais proporcionadas pelo resíduo mineral aceleram a hidratação do cimento e promovem uma distribuição mais eficiente e homogênea do C–S–H na matriz, resultando em maior compactação e coesão interna. Esse mecanismo contribui significativamente para o ganho de resistência, mesmo quando há substituição parcial do cimento. No entanto, em teores mais elevados de substituição, a redução do teor de clínquer pode comprometer a disponibilidade de compostos hidratáveis, levando à diminuição da resistência.

Vardanh *et al.* (2019) ao compararem os resultados da resistência à compressão de argamassas com resíduos de mármore indicaram melhorias significativas até um nível de substituição de 40%. Nessa faixa, o uso dos resíduos levou a um aumento progressivo na resistência à compressão com aumento de até 22,4% em comparação com a mistura controle. Esse comportamento positivo pode ser atribuído a três fatores principais: o efeito de preenchimento, onde partículas finas refinam a microestrutura da matriz; a geometria angular dos resíduos, que melhora a ligação na zona de transição interfacial; e reações químicas, especialmente a formação de carboaluminatos a partir da interação da calcita presente no mármore com o C₃A do cimento.

Gado (2022) estudou a incorporação de pó de lodo de mármore e granito em argamassas modificadas com polímero e notou melhorias significativas nas resistências à compressão e à flexão. Os melhores resultados foram obtidos com 20% de adição de lodo, alcançando valores de 11,50 N/mm² e 4,86 N/mm², respectivamente. Conforme o autor, o efeito de preenchimento das partículas ultrafinas e a aceleração da hidratação do cimento, devido à presença de calcário (CaCO₃), contribuíram para a formação de uma matriz mais densa e reforçada.

Kabeer e Vyas (2018), verificam que a resistência à compressão das misturas de argamassa após 28 dias de cura em água indica que a substituição de até 20% da areia natural por pó de mármore oferece os melhores ganhos de resistência. As misturas A, B, C e D com 20% de substituição apresentaram aumentos de resistência de 24%, 49%, 53% e 91%, em comparação com as misturas controle, enquanto

substituições completas (100%) resultaram em uma resistência inferior.

Ao estudarem a resistência de aderência das argamassas aplicadas em substratos, Kabeer e Vyas (2018) verificaram um aumento com a substituição de até 20% da areia por pó de mármore, mas a partir desse ponto, a resistência diminuiu. No entanto, ao ultrapassar esse limite de substituição, a resistência adesiva apresentou uma queda, principalmente devido ao aumento da porosidade e à redução da densidade de empacotamento da argamassa.

Chen *et al.* (2020) analisou a resistência à compressão das argamassas incorporando resíduo de pó de granito como substituição parcial da areia. Seus estudos mostram um aumento significativo na resistência com a adição de resíduo, substituindo de 15% a 25% da areia, resultando em um aumento de resistência de 31,2% a 72,0%, dependendo da relação água/cimento (A/C). Por exemplo, com uma relação A/C de 1,2, a adição de 15% de resíduo aumentou a resistência de 49,7 MPa para 71,6 MPa, representando um aumento de 44,1%. Houve um aumento consistente de pelo menos 19,3% com substituição de até 25%. Segundo o autor, a relação a/c influenciou o conteúdo ótimo de resíduo para maximizar a resistência.

Segundo as pesquisas de Ahmad *et al.* (2023), a substituição de 20% e 40% dos agregados convencionais por agregados reciclados influenciou positivamente a resistência à compressão, com aumentos de 8,1% e 4,9%, respectivamente. Segundo o autor, esse comportamento pode ser explicado pelo fato de os agregados de mármore possuírem maior resistência à compressão e módulo de elasticidade em comparação aos agregados finos convencionais, o que melhora o desempenho do compósito.

Outros autores pesquisaram o impacto do resíduo de rocha quando se fazia a substituição da massa de cimento por diversos tipos de resíduos de rocha.

Farroq *et al.* (2023) realizaram testes de compressão para investigar o efeito de diferentes materiais, como pó de granito (PG) e pó de granito moído (PGM), na resistência de argamassas quando se substitui parcialmente o cimento. Nos primeiros dias de cura, especificamente no 3º e 7º dias, a resistência à compressão da argamassa padrão foi superior às misturas modificadas com PG e PGM, independentemente do índice de substituição. No entanto, à medida que o tempo de cura avançou, as misturas com 5% e 10% de PGM superaram a resistência da argamassa padrão após 28 e 91 dias, mostrando um desenvolvimento mais

significativo da resistência nas idades mais avançadas. Esse comportamento pode ser explicado pela capacidade do PGM de melhorar a densidade da microestrutura da argamassa, aumentando a resistência a longo prazo.

2.2.8.2 - Absorção de água e densidade de massa no estado endurecido

A absorção de água e a densidade de massa no estado endurecido são propriedades que influenciam diretamente a durabilidade e o desempenho mecânico das argamassas. A absorção de água está relacionada à porosidade do material, sendo maior em argamassas com alta relação água/cimento, agregados leves ou poros interconectados, o que pode comprometer a resistência à agentes agressivos. Já a densidade de massa reflete a compacidade da argamassa, sendo maior com o uso de agregados densos e bem graduados, além de aditivos plastificantes, resultando em menor absorção e maior resistência (KIM *et al.*, 2012; DJOBO *et al.*, 2016).

Vardhan *et al.* (2019) observaram que a absorção de água do concreto diminuiu com o tempo de cura, devido ao aumento da densidade da matriz e a contínua hidratação do material. A substituição de 40% dos agregados finos por resíduos de mármore (mistura M40) mostrou o melhor desempenho, com menor taxa de absorção de água, atribuída ao refinamento da zona de interface do agregado e à maior compacidade, o que favoreceu a durabilidade do compósito.

Segundo Li *et al.* (2018), as taxas de absorção inicial e secundária das argamassas diminuem com a redução da relação água/cimento e com o aumento do volume de pó de mármore na argamassa. Em uma relação a/c de 0,55, a adição de 20% de pó reduziu as taxas de absorção inicial e secundária em 72,7% e 78,7%, respectivamente, enquanto em a/c de 0,40, as reduções foram de 45,5% e 32,4%. Esses efeitos são mais significativos em relações mais altas, onde a porosidade inicial é maior. Já em relações baixas, a eficácia do pó é limitada devido à menor porosidade e à maior sucção capilar.

Kabeer e Vyas (2018), observaram que os efeitos da substituição de areia por pó de mármore em argamassas indicam que proporções de até 20% promovem melhorias na densidade endurecida, devido à redução da relação água/cimento e ao

maior grau de hidratação. Essa substituição resulta em uma matriz mais densa, com menor propagação de fissuras e aumento da resistência mecânica. Em substituições superiores a 20%, os autores observaram uma redução na densidade endurecida e um aumento na porosidade permeável, levando a maior absorção de água, especialmente em substituições totais, que aumentaram a absorção em até 142,6% em relação às misturas controle.

Chen *et al.* (2020) investigou os efeitos da variação da razão água/cimento (a/c) mantendo o volume de agregado constante e definindo o volume da pasta em 0,50. Os resultados indicaram que, à medida que o conteúdo de pó de granito aumentava de 0% para 25%, a densidade aumentava, atingindo o máximo com 10% de resíduo, e depois diminuía ligeiramente. A adição do pó, por ser mais fina que a areia, ajudou a preencher os vazios entre as partículas de areia, diminuindo a razão de vazios e, assim, aumentando a densidade. No entanto, quando o conteúdo de granito excedeu a quantidade necessária para o preenchimento, a densidade diminuiu devido à desorganização do empacotamento.

2.2.9 - Impacto do resíduo de rocha nas propriedades térmicas das argamassas

O impacto do resíduo de rocha nas propriedades térmicas das argamassas é um campo emergente de pesquisa, que ainda apresenta um número limitado de estudos no contexto acadêmico. Embora a utilização de materiais reciclados em construção civil seja frequentemente discutida, a análise específica sobre como resíduos de rochas podem influenciar as características térmicas das argamassas não tem sido amplamente debatida.

Uma maneira eficiente de compreender o panorama das pesquisas nessa área é por meio de análises bibliométricas. Essas análises permitem identificar tendências, lacunas e os principais tópicos de interesse científico, oferecendo uma visão abrangente sobre a evolução do conhecimento ao longo do tempo. Este tópico utiliza o software VOSviewer para realizar uma análise bibliométrica dos últimos 10 anos, explorando publicações indexadas nas duas principais bases de dados acadêmicos: Scopus e Web of Science. O objetivo é mapear as principais contribuições científicas e avaliar a relevância do tema no cenário acadêmico.

Ao fazer uma combinação das palavras chaves: Condutividade térmica (*thermal conductivity*), argamassa (*rock waste*) e resíduo de rocha (*rock waste*) são

predominante em estudos sobre desempenho térmico em materiais, incluindo argamassas, como evidenciado pela significativa conexão do termo argamassa (*mortar*) ao cluster de propriedades térmicas. No entanto, uma lacuna foi identificada em relação à presença de estudos envolvendo resíduos de rocha (*rock waste*), que aparece com menor frequência ou destaque nas publicações analisadas. Na análise da plataforma Web of Science, há uma tendência clara de integração multidisciplinar, abrangendo materiais tradicionais e tecnologias emergentes, como nanofluidos e grafeno, a utilização de resíduos de rocha em argamassas ainda demanda maior exploração acadêmica. Embora o resíduo de rocha seja representado por termos como "granite," o mapa de palavras-chave revela poucas associações explícitas entre resíduos específicos, como "rock waste," e conceitos relacionados à eficiência energética ou desempenho térmico, indicando uma lacuna no conhecimento sobre esse tema.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma argamassa que utiliza resíduo de rocha como substituição parcial do agregado miúdo e analisar o impacto de tal substituição no comportamento térmico do material. Como as argamassas possuem requisitos normativos para classificação, foi necessário desenvolver um plano experimental para avaliar tanto o comportamento térmico quanto às propriedades mecânicas dessas novas misturas.

Na Figura 3.1, a seguir, é apresentado um fluxograma com o método da pesquisa aplicado neste trabalho.

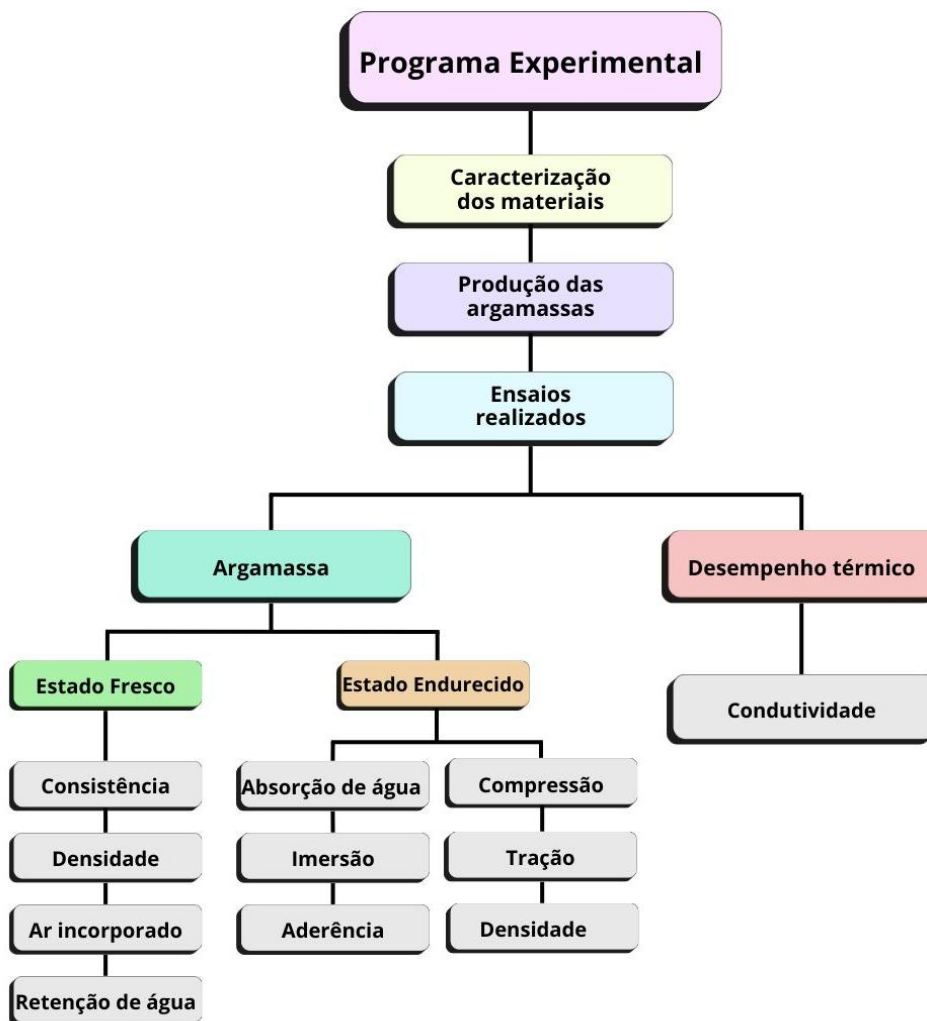


Figura 3.1: Fluxograma do programa experimental.

3.1 – Materiais

3.1.1 - Cimento Portland

O cimento Portland empregado nesta pesquisa foi o do tipo CII-E-32 da fabricante CSN e lote número 789808621730. Foi feita a opção por este aglomerante devido ao seu baixo calor de hidratação, sua granulometria mais grosseira se comparada com o CP V e alta usabilidade nas obras em Campos dos Goytacazes.

3.1.2 - Areia

A areia natural de rio utilizada neste estudo, é proveniente de um areal situado no município de Campos dos Goytacazes (RJ) e é extraída do Rio Paraíba do Sul.

A faixa granulométrica da areia foi definida a partir das frações da areia normal brasileira utilizadas em ensaios físico-mecânicos de cimento Portland e regidas pela ABNT NBR 7214 (2015). Foram utilizadas as frações média-fina #50 (passante na #30 e retida na #50) e fração fina #100 (passante na #50 e retida na #100), a fim de manter a areia com uma granulometria mais fina conforme utilizada em argamassas para reboco. As duas frações utilizadas na pesquisa podem ser observadas conforme a Figura 3.2, a seguir.



Figura 3.2: Frações de areias utilizadas na pesquisa.

3.1.3 - Resíduo de rocha ornamental

O resíduo de rocha ornamental utilizado no estudo foi coletado de uma pedreira localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim, no Espírito Santo. O material passou por um processo de secagem em estufa a uma temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ até que em duas pesagens consecutivas demonstrasse estabilidade no peso, indicando a eliminação da umidade. Posteriormente, o resíduo foi submetido a um processo de refinamento em duas etapas. Na primeira etapa, realizada manualmente, o destorroamento foi feito utilizando almofariz de porcelana e pistilo, resultando em um material fino, porém com presença de torrões e resíduos. Para refinar o material, peneirou-se utilizando uma peneira de abertura #50 (0,03 mm), com o auxílio de um pincel. O processo de destorroamento e peneiramento pode ser

observado na Figura 3.3, a seguir.



Figura 3.3: Processo de destorroamento e peneiramento do resíduo.

3.1.4 - Cal

A cal utilizada no estudo foi a cal hidratada do tipo CH III da marca Itabira com lote 109268, escolhida devido ao seu alto desempenho, ampla disponibilidade e ao uso frequente em obras da região.

3.1.5 - Água

Foi utilizada a água fornecida pela rede pública de abastecimento da cidade de Campos dos Goytacazes para a confecção das argamassas.

3.2 – Métodos

3.2.1 - Caracterização dos materiais

Foram efetuados ensaios de caracterização física e mineralógica do agregado miúdo e do pó de rocha, além de verificações no estado fresco e endurecido das argamassas produzidas. Os ensaios de caracterização estão dispostos a seguir.

3.2.1.1 - Massa específica real dos grãos

Foram realizados no laboratório de engenharia civil da UENF (LECIV) os ensaios preconizados pelas normas técnicas ABNT NBR 6508 (1984) e ABNT NBR 6457 (2016), para se obter a massa específica real dos grãos dos materiais estudados.

3.2.1.2- Análise granulométrica

Os ensaios para determinar a distribuição dos tamanhos das partículas dos materiais estudados foram realizados no laboratório de engenharia civil da UENF (LECIV) de acordo com a norma técnica ABNT NBR 7181 (2016).

3.2.1.3- Difração de raio-x

No laboratório de materiais avançados da UENF (LAMAV) utilizando o equipamento Photo AXRD Benchtop foi realizado, em um equipamento Shimadzu operando com radiação de Cobre ($\text{Cu-K}\alpha$) e varredura de 2θ variando de 5° a 60° , o ensaio de DRX para se obter a composição das fases mineralógicas.

3.2.1.4- Análise Química

O ensaio foi realizado com o objetivo de determinar as porcentagens de óxidos presentes nos aglomerantes em análise (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO , K_2O , TiO_2 , Na_2O), possibilitando a caracterização química dos materiais estudados. A análise foi conduzida no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF, utilizando o equipamento Shimadzu EDX-700.

3.2.1.5- Microscopia eletrônica de varredura

Os aspectos morfológicos das argamassas foram avaliados através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), em microscópio SHIMADZU SSX-550, do LAMAV/UENF

3.2.2 - Dosagem

O traço de argamassa para reboco utilizado no estudo foi o 1:1:3 (cimento Portland:cal:areia natural), em massa. A menor proporção de areia vai de acordo com os trabalhos de Li *et al.* (2018) e Kabeer e Vyas (2018), que notaram que em altas concentrações, os resíduos podem gerar maior propagação de fissuras nas argamassas. As porcentagens de areia que foram substituídas pelo resíduo de rochas ornamentais (RRO), foram em taxas de 20% até ser realizada a substituição total da fração #100 em massa. Maiores porcentagens de substituição foram descartadas, devido aos relatos na literatura da perda de trabalhabilidade e resistência (KABEER, VYAS, 2018; DOBIZEWSKA *et al.* 2023). Os traços utilizados estão dispostos na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1: Traços utilizados em proporção.

Nomenclatura	Cimento Portland	Cal	Areia natural #50	Areia natural #50	RRO
REF	1	1	1,5	1,5	0
S20	1	1	1,5	1,2	0,3
S40	1	1	1,5	0,9	0,6
S60	1	1	1,5	0,6	0,9
S80	1	1	1,5	0,3	1,2
S100	1	1	1,5	0	1,5

3.2.3 - Caracterização da argamassa

A norma técnica da ABNT NBR 13281-1 (2023) estabelece os requisitos, critérios e métodos de ensaios para argamassas inorgânicas utilizadas no revestimento de paredes e tetos. Assim, avaliou-se as propriedades da argamassa no estado fresco e no endurecido. Conforme descrito no Quadro 3.1, a seguir:

Quadro 3.1: Ensaios no estado fresco e endurecido realizados na pesquisa.

	Ensaio	Norma
F r e s c o	Índice de consistência	NBR 13276 (2016)
	Teor de ar incorporado	NBR 13278 (2005)
	Densidade de massa	NBR 13278 (2005)
	Retenção de água	NBR 13277 (2005)
E n d u r e c i d o	Resistência à compressão	NBR 13279 (2005)
	Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (2005)
	Densidade de massa	NBR 13280 (2005)
	Absorção de água por capilaridade	NBR 15259 (2005)
	Absorção de água por imersão e índice de vazios	NBR 9778 (2005)
	Resistência de aderência superficial à tração	NBR 13528-3 (2019)

3.2.3.1 - Índice de consistência

Os ensaios de consistência foram conduzidos na argamassa no seu estado fresco, seguindo as diretrizes estabelecidas na ABNT NBR 13276:2016. Conforme as recomendações, a argamassa foi preparada seguindo as indicações para o preparo de argamassa à base de cimento (com adições ou aditivos) e o índice de consistência alvo era de (260 ± 5) mm. Para alcançar esse índice, foram realizadas repetidas tentativas de ensaio, ajustando a quantidade de água adicionada em cada tentativa até atingir o índice desejado. A quantidade de água utilizada na dosagem final foi aquela registrada na tentativa em que o índice de consistência alvo foi alcançado.

3.2.3.2 - Teor de Ar Incorporado e Densidade de Massa no Estado Fresco

A ABNT NBR 13281-1 (2023), requer que as argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos, sejam classificadas de acordo com sua faixa de densidade de massa no estado fresco. Conforme a Tabela 3.2, a seguir.

Tabela 3.2: Classificação da densidade de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).

Classe	Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)
DF0	$DF < 1\ 400$
DF1	$1\ 400 \leq DF < 1\ 600$
DF2	$1\ 600 \leq DF < 1\ 800$
DF3	$1\ 800 \leq DF < 2\ 000$
DF4	$DF \geq 2\ 000$

3.2.3.3 - Retenção de Água

O ensaio de retenção de água foi conduzido conforme a ABNT NBR 13277 (2005) e a argamassa no estado fresco foi preparada de acordo com a ABNT NBR 13276 (2005).

A ABNT NBR 13281-1 (2023), requer que as argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos produzidas, sejam classificadas de acordo com a sua porcentagem de retenção de água. Conforme a Tabela 3.3, a seguir.

Tabela 3.3: Classificação da retenção de água de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).

Classe	Retenção de água (U) (%)
U0	$U < 70\%$
U1	$70\% \leq U < 80\%$
U2	$80\% \leq U < 90\%$
U3	$U > 90\%$

3.2.3.4 - Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido

A ABNT NBR 13281-1 (2023), requer que as argamassas sejam classificadas de acordo com sua faixa de densidade de massa no estado endurecido. Conforme a Tabela 3.4, a seguir.

Tabela 3.4: Classificação da densidade de massa no estado endurecido de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).

Classe	Densidade de massa no estado endurecido (DE) kg/m ³
DE0	$DE < 1200$
DE1	$1200 \leq DE < 1400$
DE2	$1400 \leq DE < 1600$
DE3	$1600 \leq DE < 1800$
DE4	$DE \geq 1800$

3.2.3.5 - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade

O ensaio para determinação do coeficiente de capilaridade foi realizado de acordo com a ABNT NBR 15259 (2005). Conforme a norma ABNT NBR 13281 (2005),

as argamassas são classificadas de acordo com o seu coeficiente de capilaridade. Conforme a Tabela 3.5, a seguir.

Tabela 3.5: Classificação do coeficiente de capilaridade de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).

Classe	Coeficiente de capilaridade g/dm ² .min ^{1/2}
C1	≤ 1,5
C2	1,5 a 2,5
C3	2,0 a 4,0
C4	3,0 a 7,0
C5	5,0 a 12,0
C6	> 10

3.2.3.6 - Determinação da resistência à tração na flexão

A ABNT NBR 13281-1 (2023), requer que as argamassas sejam classificadas de acordo com seu valor de resistência à tração na flexão. Conforme a Tabela 3.6, a seguir.

Tabela 3.6: Classificação da resistência à tração de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).

Classe	Resistência à tração na flexão (Rf) MPa
R1	Rf < 0,5
R2	0,5 ≤ Rf < 1,5
R3	1,5 ≤ Rf < 3,0
R4	Rf > 3,0

3.2.3.7 - Resistência de aderência superficial à tração

O ensaio de aderência superficial do revestimento em substratos de tijolos cerâmicos foi realizado conforme os procedimentos descritos na ABNT NBR 13528-3 (2019). Como o objetivo do trabalho é produzir uma argamassa de revestimento para

uso externo, é necessário que a classificação RA2 seja alcançada. Conforme a Tabela 3.7, a seguir.

Tabela 3.7: Classificação da aderência à tração de acordo com a ABNT NBR 13281-1 (2023).

Argamassa	Classe	Resistência potencial de aderência à tração ao substrato (Ri) MPa
ARV-I, ARV-II e ARV-III para produção de revestimento interno destinado à aplicação de pintura e/ou textura	RA1	$R_i \geq 0,20$
ARV-I, ARV-II e ARV-III para produção de revestimento interno destinado à aplicação de peças cerâmicas (ver ABNT NBR 13754) a ou de revestimento externo	RA2	$R_i \geq 0,30$

3.2.3.8 - Ensaio de condutividade

A condutividade das amostras foi medida à temperatura de $25 \pm 3^\circ\text{C}$, utilizando-se o equipamento Tridend (C-THERM) com sensor MTPS do laboratório de Ciências Físicas da UENF (LCFIS). Esse equipamento funciona pelo modified transient plane source (MTPS) method, desenvolvido por Mathis (1999).

O dispositivo utiliza um sensor de refletância de calor interfacial de um lado que aplica uma fonte de calor momentânea de 1 a 3 segundos e constante à amostra e funciona medindo a condutividade e efusividade térmica de um material. A metodologia de ensaio utilizado foi o presente na norma internacional ASTM D7984-21 adaptada para materiais cerâmicos, já configurada no equipamento.

Para a realização do ensaio foram fabricadas 5 amostras para cada traço estudado de acordo com as especificações da norma ASTM D7984-21 e as argamassas foram produzidas de acordo com a norma técnica ABNT NBR 16541 (2016) e deixadas em cura por 28 dias.

Os corpos de prova eram circulares com diâmetro de $\varnothing 25\text{mm}$ e com espessura de 10mm, a fim de garantir que o calor emitido pelo equipamento não atravessasse o material. A amostra foi lixada e limpa, visando garantir bom contato com o sensor e prevenindo interferências na leitura.

A produção das argamassas de acordo com a norma brasileira foi necessária para que se pudesse correlacionar o comportamento das amostras nos ensaios do estado fresco e endurecido com o comportamento dos ensaios térmicos.

Antes da realização das medições, as amostras foram acondicionadas na mesma sala à temperatura de 28°C por 48 horas para garantir a padronização das condições dos ensaios. Com o objetivo de minimizar possíveis erros nas medições, foram realizadas pelo menos 4 leituras para cada amostra, assegurando a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos.

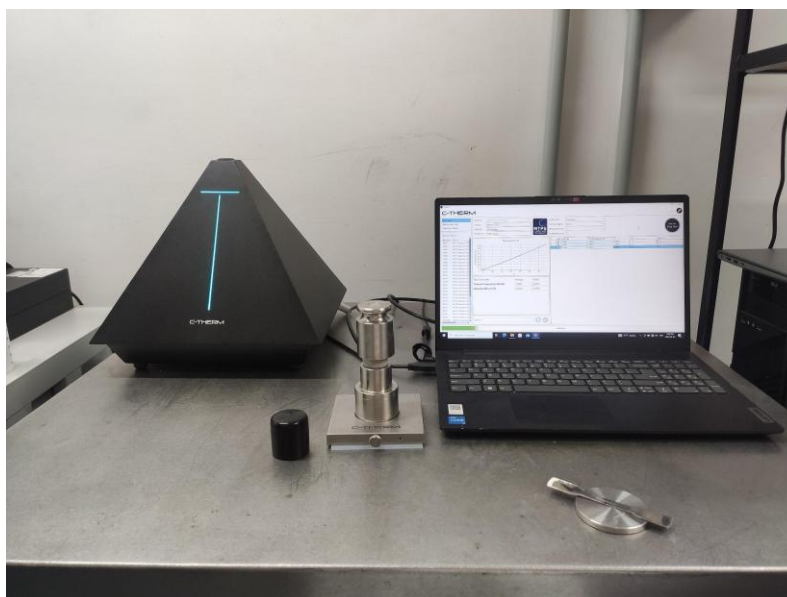


Figura 3.4: O sistema Trident da C-Therm com sensor MTPS.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Caracterização dos materiais

4.1.1 - Composição química e fases cristalinas

A espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), permite identificar e analisar os elementos químicos que estão presentes em uma amostra. A Tabela 4.1 apresenta a composição química qualitativa do resíduo de rocha ornamental.

Tabela 4.1: Resultado do ensaio de fluorescência de raios-x

Composição Química do Resíduo	
Óxido	Teor (% em massa)
SiO ₂	87,02
Al ₂ O ₃	5,81
CaO	2,93
SO ₃	1,68
K ₂ O	1,05
Outros	1,51

A composição química apresentada do resíduo de rocha destaca os elevados teores de sílica (SiO₂), que corresponde a 87,02% da massa total e de alumina (Al₂O₃), que corresponde a 5,81%. Esse valor indica que o resíduo é quimicamente considerado um material sílico-aluminoso, o que é típico de materiais derivados de rochas silicáticas, na maioria das vezes granitos e gnaisses, contendo minerais como o quartzo, feldspatos e micas (muscovita e biotita).

Autores como Azevedo *et al.* (2019), Bahiense (2007) e Santos *et al.* (2013) corroboram para os valores da composição química do resíduo utilizado neste trabalho. Santos *et al.* (2013) destacou que os resíduos gerados por corte com fio diamantado apresentaram um alto teor de sílica (92,058%), isenção de óxido de ferro e baixos teores de óxidos fundentes, como K₂O, Fe₂O₃ e CaO.

Através dos resultados obtidos na difração de raios X (Figura 4.1), evidencia-se que, do ponto de vista mineralógico, o resíduo de rocha ornamental apresenta características semelhantes às rochas graníticas. Sua composição é predominantemente formada por sílica (SiO₂ – quartzo), albita (NaAlSi₃O₈ – feldspato sódico), microclina (KAlSi₃O₈ – feldspato potássico) e ilita (KAl₂(Si₃Al)O₁₀(OH)₂ –

filossilicato). De acordo com a literatura, as rochas graníticas são essencialmente constituídas por feldspatos, quartzo e mica. Entretanto, a presença de dolomita também foi identificada, reforçando a diversidade mineralógica do resíduo analisado. A análise química corrobora os resultados obtidos na difração de raios X, pois observa-se uma grande quantidade de silício em forma da sua composição mais estável de óxido de silícia (87,02%) e um pico intenso de quartzo no DRX, também observa-se a presença de potássio, enxofre que estão presentes na formação dos feldspatos e micas.

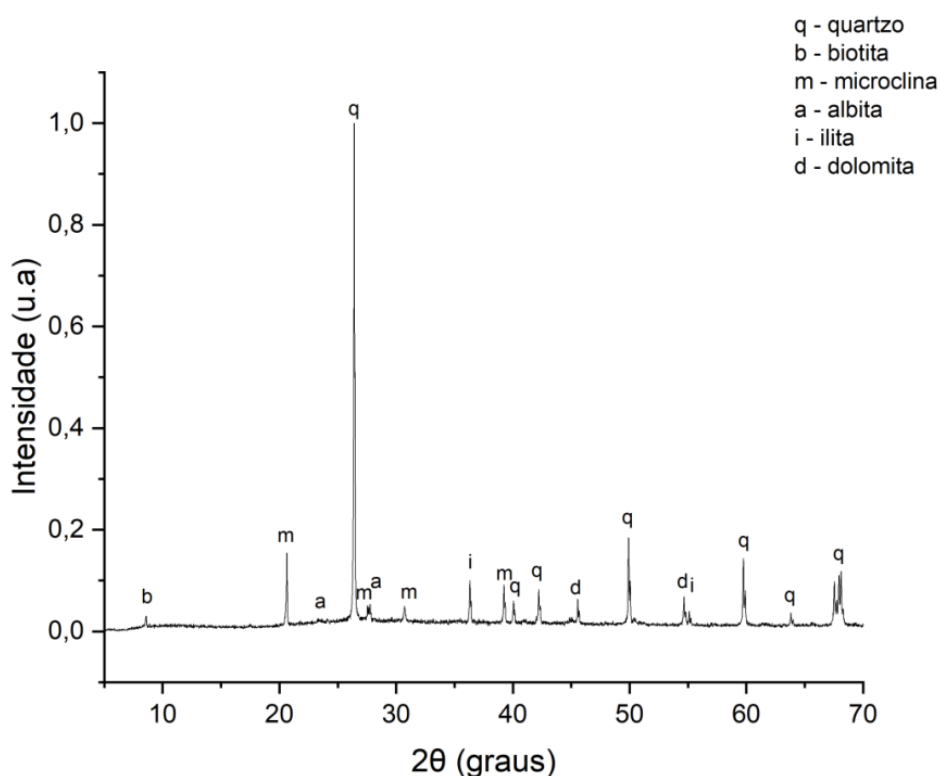


Figura 4.1: Difratograma de raios-X do resíduo de rochas ornamentais

4.1.2 - Morfologia, distribuição granulométrica e massa específica real dos grãos

A análise morfológica do resíduo, realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), é ilustrada na Figura 4.2. Observa-se que o resíduo apresenta grãos com formato irregular, característica resultante do processo de laminação, o qual provoca alterações assimétricas e não uniformes na estrutura do material. Indo

de encontro com o que foi relatado por Azevedo *et al.* (2019), Santos *et al.* (2017), Manhães e Holanda (2008) e Farooq *et al.* (2023).

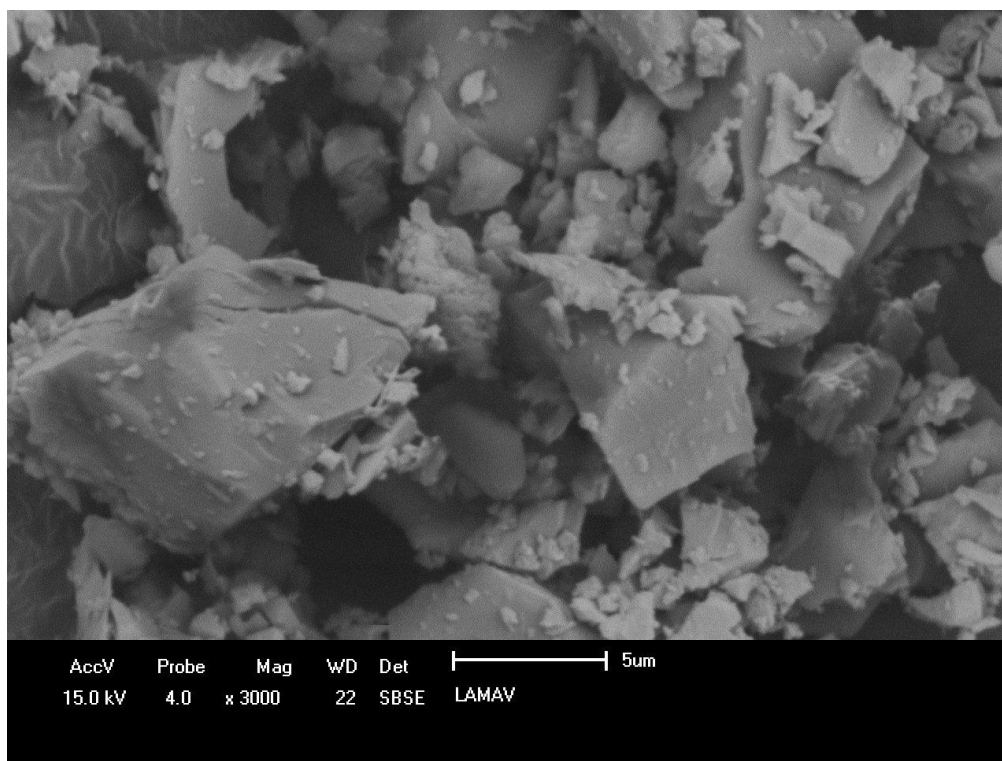


Figura 4.2: Imagem do MEV do resíduo de rocha ornamental.

Segundo Azevedo *et al.* (2019), a areia natural proveniente de leitos fluviais apresenta uma morfologia bastante regular, com formas predominantemente circulares e uniformes. Dessa forma, a substituição da areia pelo resíduo de rocha resulta em uma alteração significativa na morfologia das formulações, a qual, por sua vez, ocasionou mudanças nas propriedades tecnológicas da argamassa.

A análise granulométrica a laser revelou que o resíduo possui uma granulometria predominantemente fina, com aproximadamente 90% do material passando na peneira ABNT nº 200 (abertura de 0,075 mm). O material apresenta uma distribuição ampla de tamanhos de partículas, sendo 5% na fração argila ($< 2 \mu\text{m}$), 85% na fração silte ($2 \leq x \leq 60 \mu\text{m}$) e 10% na fração areia fina ($60 < x \leq 1200 \mu\text{m}$), conforme ilustrado na Figura 4.3, a seguir.

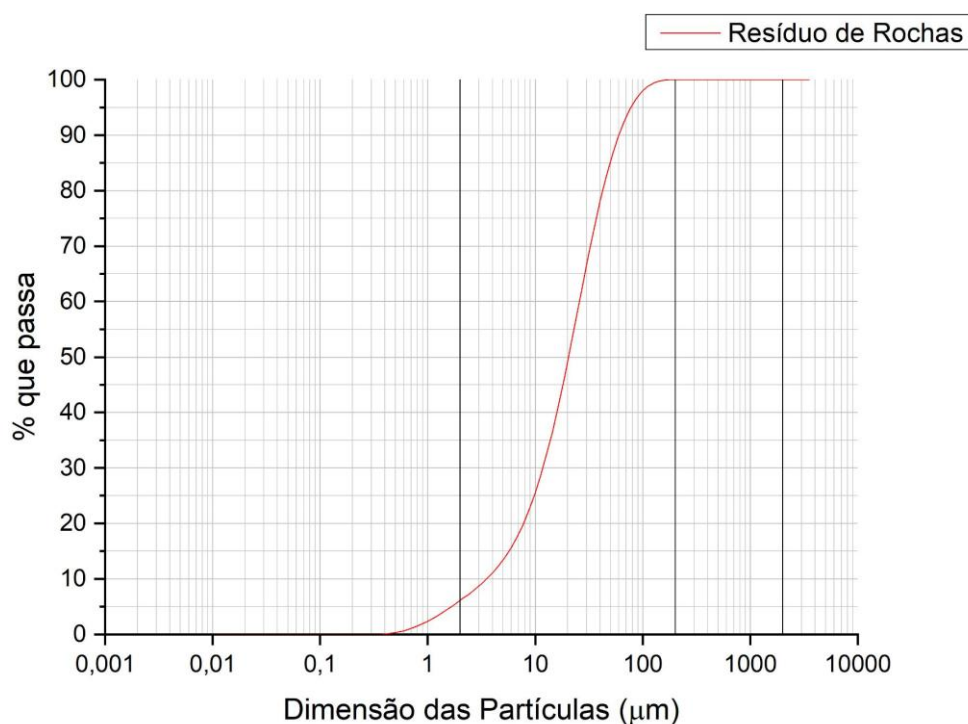


Figura 4.3: Granulometria a laser do resíduo de rocha ornamental.

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com os apresentados na literatura, observa-se que a fração silte é predominante em resíduos de rochas ornamentais. Azevedo *et al.* (2019) reportaram que cerca de 80% do material analisado estava na fração silte, enquanto Bahiense (2007) identificou 71%, e Santos *et al.* (2013) apresentaram valores que variaram de 66% a 82%.

Conforme a Tabela 4.2, ao comparar a densidade real dos grãos do resíduo, $2,55 \text{ g/cm}^3$, com a da areia, $2,60 \text{ g/cm}^3$, é possível notar queda no valor da densidade. Este valor, ligeiramente inferior, é devido a maior quantidade de vazios internos no resíduo de rocha, de forma que sua menor massa em relação ao volume foi significativa.

Material	Densidade real dos grãos (g/cm ³)
Areia	2,60
RRO	2,55

Tabela 4.2: Densidade de areia e resíduo de rocha ornamental.

Azevedo *et al.* (2019) e Gehlot e Shrivastava (2020), obtiveram densidade para a areia de 2,62 e 2,64 g/cm³ respectivamente, indo de acordo com o valor de 2,60 g/cm³ encontrado nesta pesquisa.

Estudos realizados por Gehlot e Shrivastava (2020), Bahiense (2007) e Santos *et al.* (2013) relataram densidades de 2,60 g/cm³, 3,01 g/cm³ e 2,82 g/cm³, respectivamente. Os valores de densidade do resíduo encontrados pelos autores foram ligeiramente superiores ao registrado nesta pesquisa, de 2,55 g/cm³. Isso pode ser atribuído à presença de granalha nas outras amostras, uma liga metálica que aumenta a densidade do material.

4.2 - Índice de consistência

Os resultados do ensaio de índice de consistência são apresentados na Tabela 4.3 e 4.4, a seguir:

Tabela 4.3: Resultados do ensaio de índice de consistência.

Traço	Cimento (g)	Cal (g)	Areias (g)		SRO (g)	Água (ml)	Relação a/c
			Fração 50	Fração 100			
REF	300	300	450	450	0	286	0,95
S20	300	300	450	360	90	282	0,94
S40	300	300	450	270	180	292	0,97
S60	300	300	450	180	270	323	1,08
S80	300	300	450	90	360	347	1,16
S100	300	300	450	0	450	370	1,23

Tabela 4.4: Relação água/materiais secos dos traços pesquisados.

Traço	Água/materiais secos
REF	0,191
S20	0,188
S40	0,195
S60	0,215
S80	0,231
S100	0,247

Observa-se que, conforme o teor de substituição aumenta de 20% (traço S20) para 100% (traço S100), há um aumento progressivo na quantidade de água utilizada, passando de 282ml no traço S20 para 370ml no traço S100. Ao comparar com a argamassa de referência, traço REF, há um aumento de aproximadamente 29% no consumo de água. Esse comportamento reflete uma maior demanda de água com o aumento da porcentagem de resíduos de rocha e vai de acordo com o que é relatado nos trabalhos de Singh *et al.* (2016), Gado (2022), Vardhan *et al.* (2019) e Kabeer e Vyas (2018).

Resultados semelhantes foram encontrados por Vardhan *et al.* (2019) que relataram uma queda de 35% da trabalhabilidade do traço M50 com 50% de substituição da areia por resíduo do concreto e Kabeer e Vyas (2018) que obtiveram um aumento de 36% na demanda de água no traço A60 com 60% de substituição, resultados que corroboram o aumento de 29% relatado nesse estudo.

Segundo Singh *et al.* (2016), à medida que o conteúdo de resíduo de granito aumenta, a viscosidade ou resistência ao fluxo da mistura também aumenta. Uma das principais razões para esse aumento na demanda de água é a morfologia das partículas de resíduo, por serem mais ásperas e angulosas em comparação com as partículas de areia, o atrito entre o agregado e a pasta de cimento aumenta. Além disso, Gado (2022) e Moreira *et al.* (2022), relatam que o aumento na área de superfície específica

eleva a demanda de água principalmente devido ao aumento da absorção de água pelas partículas de RRO.

Além disso, a relação água/cimento (a/c) e a relação água/materiais secos também crescem com a substituição, partindo de 0,95 no traço REF e alcançando 1,23 no traço S100 e partindo de 0,191 no traço REF e alcançando 0,247 no traço S100, respectivamente. Segundo Gado (2022), espera-se que à medida que o percentual de resíduo é incorporado às formulações a demanda de água aumente gradualmente. Esse comportamento é devido à maior proporção das partículas relativamente finas do RRO em comparação com à areia. Esse aumento na proporção de partículas fina leva a um aumento na área de superfície total da argamassa e, conseqüentemente, no aumento da demanda de água, que é necessária para umedecer as partículas. O traço S20 apresentou um comportamento distinto dos demais em relação ao traço de referência (REF). Apesar da substituição, a quantidade de água necessária para atingir a mesma consistência foi ligeiramente menor, passando de 286 ml no traço REF para 282 ml no traço S20. Essa redução na água necessária também resultou em uma relação água/cimento (a/c) e água/materiais secos (a/ms) menor.

Esse comportamento também foi relatado por Chen et al. (2020), Kabeer e Vyas (2018) e Moreira *et al.* (2022). Os autores notaram que substituição entre 10 a 30% da areia por resíduo aumentou significativamente a fluidez do material, o que vai de acordo com a pesquisa, pois o traço S20 foi o que apresentou uma redução na relação a/c.

Chen *et al.* (2020) e Kabeer e Vyas (2018) discutem que a redução na quantidade de água necessária pode ser explicada pelo comportamento tixotrópico do resíduo, onde o material atua como um "superplastificante fraco". Adicionalmente, esse comportamento também está associado ao preenchimento de vazios pelo pó de mármore e granito, substituindo o volume de água anteriormente necessário para alcançar a consistência desejada. Contudo, em altos níveis de substituição o efeito benéfico da tixotropia e do preenchimento de poros é neutralizado pela elevada finura do pó de mármore.

4.3 - Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado

Os resultados dos ensaios de densidade de massa no estado fresco são apresentados na Figura 4.4, a seguir:

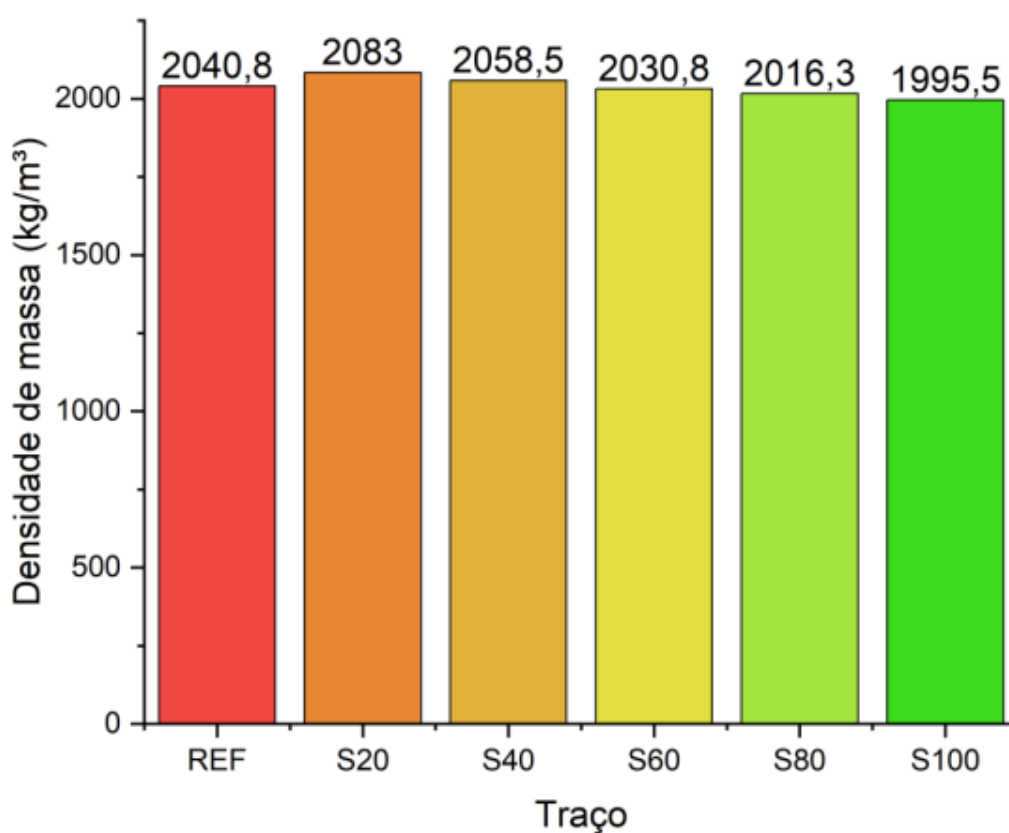


Figura 4.4: Resultados do ensaio de densidade de massa no estado fresco

Observa-se que a densidade de massa dos traços com a substituição da fração #100 da areia pelo resíduo de rocha (RRO) influenciou uma queda na densidade das argamassas. Com o aumento progressivo do teor de RRO (traços S40 a S100), a densidade de massa diminui gradualmente, alcançando 1995,5 kg/m³ no traço S100. Entretanto, no traço S20, a densidade de massa é a maior registrada, 2083,0 kg/m³, superando inclusive a do traço de referência (REF), que apresentou 2040,8 kg/m³.

Ao verificar os requisitos para argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos, segundo a ABNT NBR 13281-1 (2023), observa-se que todas as argamassas produzidas, com exceção do traço S20, estão na mesma classe DF4. O traço S20 com a queda na densidade se encaixa na classe DF3.

O aumento inicial na densidade sugere que, com a substituição de 20% da fração 100 por SRO, houve um melhor empacotamento das partículas, resultando em uma maior compactação da argamassa. O aumento total foi de 2,06% na densidade e vai de acordo com o que é relatado na literatura, ao analisar outros trabalhos como o de Amaral *et al.* (2020) que obteve 2,36% de aumento, Nascimento *et la.* (2020) que obteve um aumento de 2,03%, Chen *et al.* (2020) que obteve aumentos de 1% a 2% na densidade nos quatro traços utilizados em sua pesquisa e Kabeer e Vyas (2018) que para todas as quatro misturas, a densidade máxima foi obtida com 20% de substituição da areia de rio e ficou entre 1% e 5%.

É possível observar que a densidade das argamassas é influenciada pela capacidade das partículas finas dos resíduos preencherem os vazios entre a areia e o cimento, aumentando a compacidade da matriz cimentícia. Segundo Kabeer e Vyas (2018), o pó de mármore atua efetivamente nesse sentido, enquanto Amaral *et al.* (2020) destaca a relação inversa entre densidade e volume de vazios, com o alto teor de sílica contribuindo para reações de hidratação que preenchem a matriz.

Chen *et al.* (2020) reforça essa interação, mas observa que, ao exceder o teor ótimo de resíduo, o empacotamento é prejudicado, reduzindo a densidade devido ao afastamento das partículas. Um comportamento observado ao analisar as formulações com substituição acima de 20%.

Os resultados apresentados na Figura 4.5 são referentes ao ensaio de teor de ar incorporado realizados nas argamassas.

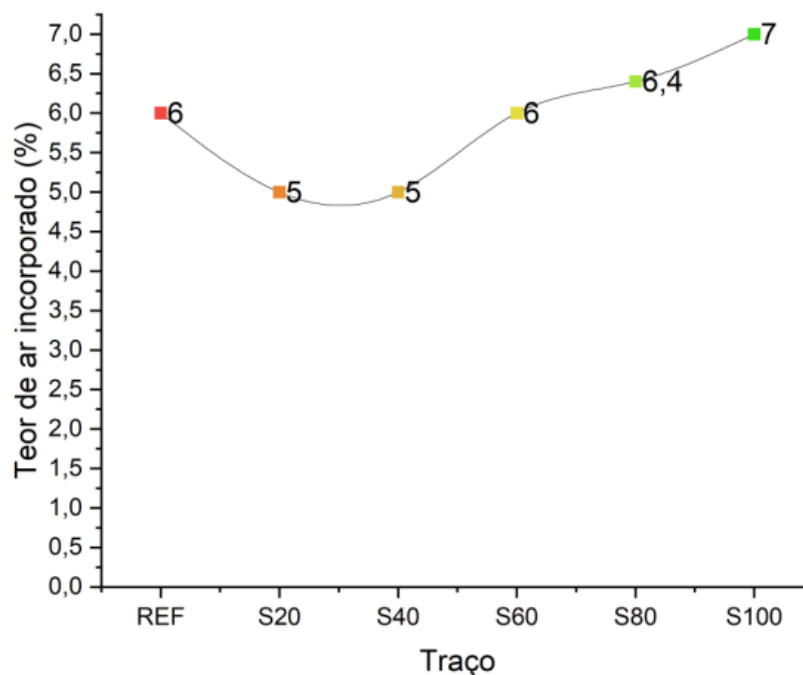


Figura 4.5: Resultados do ensaio de teor de ar incorporado.

Ao analisar o teor de ar incorporado nos traços observa-se variações significativas, com o menor índice obtido no traço S20 (5%) e S40 (5%) e o maior no traço S100 (7%). Enquanto o traço de referência (REF) apresentou 6%. Esses resultados indicam que a substituição de areia por resíduo de rocha ornamental em altas quantidades tende a aumentar o teor de ar incorporado, ao passo que a substituição em menores quantidades como no traço S20 provoca uma redução. As argamassas avaliadas neste ensaio apresentaram uma correlação no comportamento observado no teste de densidade de massa no estado fresco. A argamassa com o menor teor de substituição de resíduo de rocha ornamental (RRO) demonstrou maior densidade, enquanto, à medida que o teor de RRO aumentava, houve uma redução gradativa na densidade.

O comportamento pode estar associado às adições de resíduos em baixas proporções acarretam uma diminuição do teor de ar incorporado na mistura, pois possuem um maior teor de finos, o que preenchem os poros da matriz cimentícia. Porém em taxas mais elevadas os resíduos podem aprisionar maiores quantidades de ar na mistura devido ao afastamento das partículas e sua menor massa específica como já discutido por Chen *et al.* (2020).

4.4 - Retenção de água

Os resultados dos ensaios de retenção de água são apresentados na Figura 4.6, a seguir:

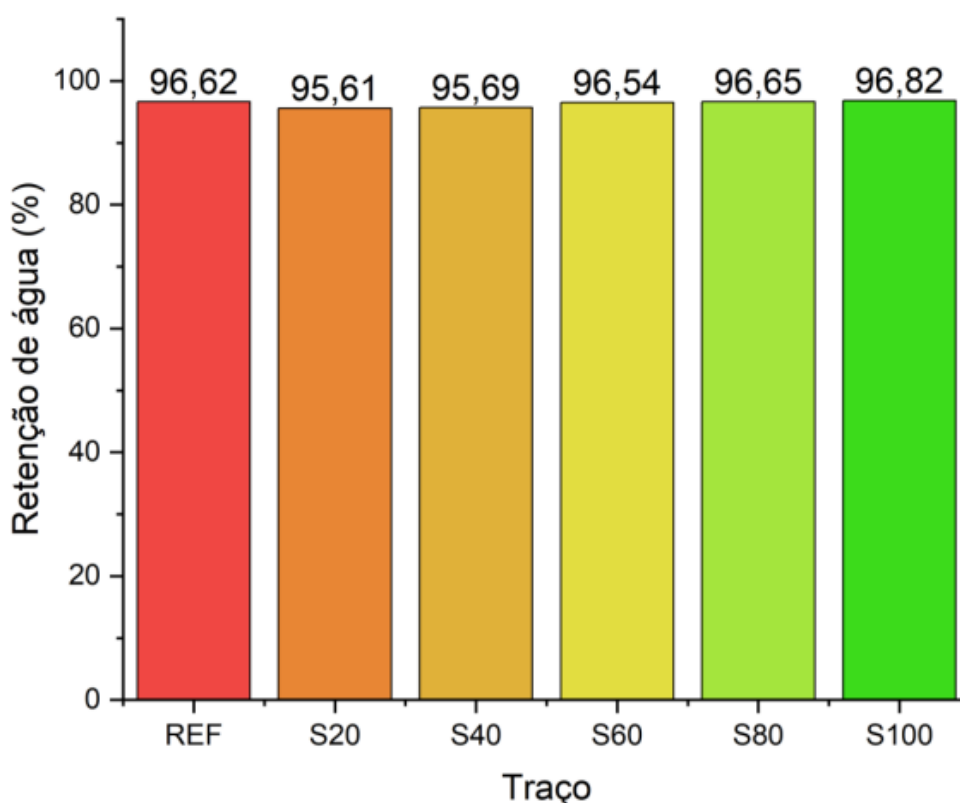


Figura 4.6: Resultados do ensaio de retenção de água.

As argamassas apresentaram índice de retenção de água superior a 90%, então conforme a norma ABNT NBR 13281-1 (2023), são classificadas na classe U3.

O traço de controle (REF), sem substituição, apresentou retenção de água de 96,62%, e a medida que foi realizada a substituição de 20% (traço S20), houve uma leve redução para 95,61%. Entretanto, a partir do traço S40, a retenção de água aumentou gradualmente, alcançando o valor máximo de 96,72% no traço S100.

Essa tendência se relaciona ao ensaio de índice de consistência, onde o traço S20 apresentou menor necessidade de água para atingir o mesmo espalhamento do traço de referência (REF). À medida que a substituição pelo RRO aumentou, foi necessário mais volume de água para atingir a mesma consistência, culminando no traço S100 com valor de 96,72%.

Segundo Kabeer e Vyas (2020), a melhoria na retenção de água das argamassas com resíduo pode ser atribuída à grande quantidade de partículas finas presentes nos agregados reciclados, que favorecem essa propriedade. Por outro lado, resíduos com granulometria mais grossa têm efeito neutro ou reduzem a retenção, devido à menor área superficial e à falta de contribuição para a densificação da mistura. De maneira geral, todas as proporções estudadas apresentaram bons resultados de retenção de água, pois argamassas com baixa retenção podem perder água tanto para o substrato, especialmente substratos cerâmicos que absorvem muita água, quanto pela rápida exsudação, em função da ação de intempéries, como alta incidência solar e ventos. Isso compromete a resistência e a trabalhabilidade da argamassa pela falta de água.

Ao comparar os resultados obtidos nesta pesquisa com os de Azevedo *et al.* (2019), Becker *et al.* (2023), Martínez *et al.* (2013) e Moreira *et al.* (2020), que apresentaram retenção de água de 93%, 90%, 91% e 98%, respectivamente, observa-se que os materiais utilizados neste estudo demonstraram desempenho muito semelhantes.

4.5 - Densidade de massa no estado endurecido

Os resultados dos ensaios de retenção de água são apresentados na Figura 4.7, a seguir.

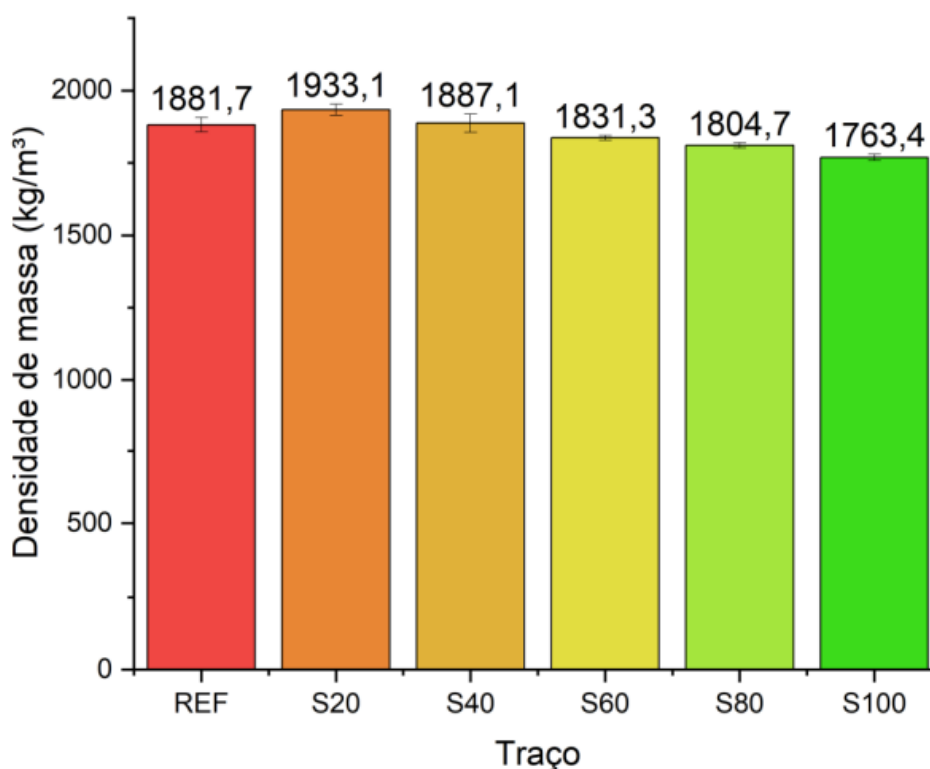


Figura 4.7: Densidade de massa no estado endurecido.

A Figura 4.7 apresentam os valores de densidade de massa (em kg/m³) para as diferentes formulações de argamassa, indicando o impacto significativo da substituição da fração #100 da areia pelo resíduo de rocha (RRO). Observa-se que a densidade de massa varia de forma não linear, com um aumento inicial e posterior redução significativa à medida que a taxa de resíduo cresce.

O traço de referência (REF), sem substituição, apresenta uma densidade de massa de 1881,7 kg/m³. Com a substituição de 20%, traço S20, a densidade aumenta 2,37% chegando ao maior valor registrado de 1933,1 kg/m³. A partir do traço S40, a densidade de massa começa a diminuir gradativamente, retornando a valores próximos à referência no traço (S40) e caindo continuamente até atingir o menor valor no traço (S100) com 1763,4 kg/m³.

As densidades ficaram entre 1881,7 kg/m³ e 1763,4 kg/m³ e ao comparar os valores com os obtidos por outros autores que utilizaram resíduos de rocha em suas pesquisas, observa-se que os resultados encontrados são satisfatórios. Nascimento *et al.* (2020), Chen *et al.* (2020) e Kabeer e Vyas (2020) relataram um aumento entre 2% e 6% na densidade com baixos teores de substituição de resíduo e uma queda na densidade à medida que maiores teores foram adicionados.

Segundo os autores citados acima esse comportamento pode ser explicado pela menor relação água/cimento e pelo maior grau de hidratação nas argamassas. Ainda reforçam que a redução na relação água/cimento e o avanço do grau de hidratação promovem um aumento no volume dos produtos de hidratação, resultando em uma matriz cimentícia mais densa e contribuindo para o aumento da densidade real da argamassa, dificultando a formação, propagação e interconexão de fissuras na microestrutura.

As argamassas produzidas nesse estudo apresentaram densidade de massa superior a 1800kg/m³, então conforme a norma ABNT NBR 13281-1 (2023), são classificadas na classe DE4. Somente com a exceção do traço S100 que se encontram na classe DE3.

É importante que haja a queda na densidade das argamassas, pois esse parâmetro exerce influência direta na condutividade térmica, segundo Passos *et al.* (2020), sendo que menores densidades geralmente resultam em melhor isolamento térmico devido ao maior volume de poros preenchidos com ar, que possui baixa condutividade.

4.6 - Absorção de água por capilaridade

Os resultados dos ensaios de retenção de água são apresentados na Figura 4.8, a seguir:

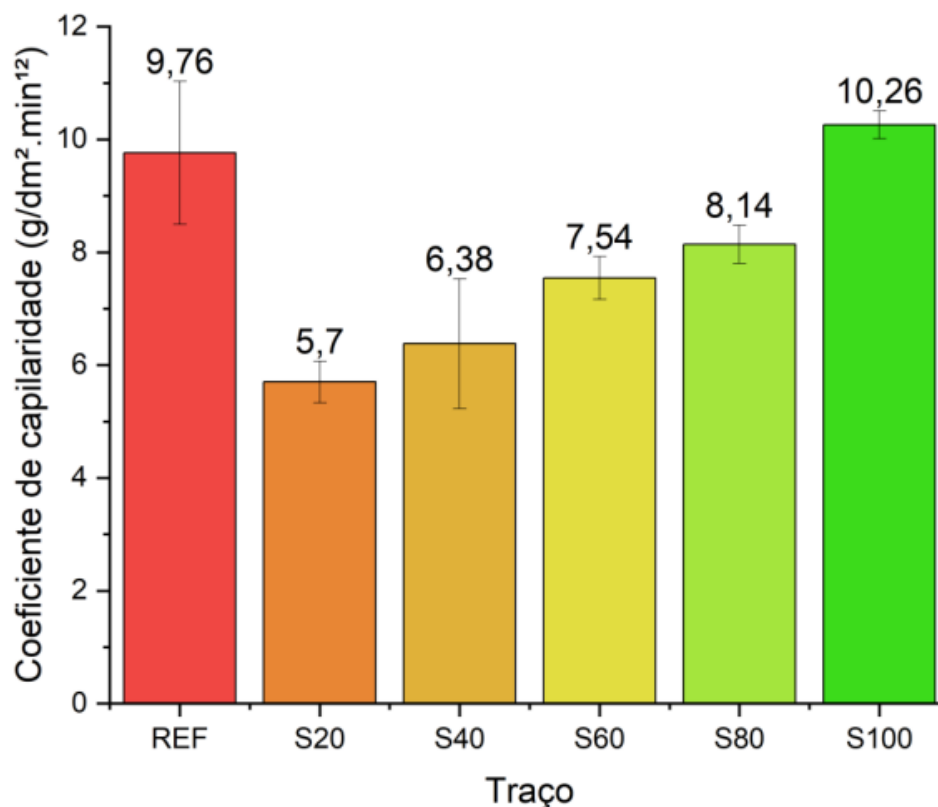


Figura 4.8: Resultados do ensaio do coeficiente de capilaridade.

O traço de referência (REF) apresenta um coeficiente de capilaridade elevado, de 9,76 g/dm²·min¹², de acordo com a norma ABNT NBR 13281 (2005), indicando maior susceptibilidade à penetração de água. Nos traços S20 e S40, há uma redução significativa desses valores, com diminuições de 42% e 35%, respectivamente, o que está associado ao aumento da densidade aparente das argamassas. Esse comportamento pode ser explicado pela melhoria no empacotamento e pela consequente redução de vazios na matriz cimentícia com a introdução de baixos teores de RRO. No entanto, à medida que o teor de substituição aumenta, nos traços S60, S80 e S100, os valores de absorção e capilaridade passam a crescer progressivamente, ultrapassando até mesmo o valor do traço REF no traço S100, que alcança 10,26 g/dm²·min¹² com aumento de 5%.

Santos (2008) discute que o teor de partículas finas presentes no resíduo de rocha ornamental (RRO) favorece a formação de poros com diâmetros menores nas argamassas e, potencialmente, gera uma maior conectividade entre eles. Destacando que a altura de penetração da água é inversamente proporcional ao diâmetro dos capilares, ou seja, quanto menores os diâmetros dos capilares, maior será a altura alcançada pela água no corpo de prova. Esse comportamento pode estar relacionado com o aumento gradual na no coeficiente de capilaridade das argamassas, à medida que maiores porções de resíduos são incorporados às argamassas.

Ao consultar as pesquisas internacionais que fizeram substituição do agregado miúdo pelo resíduo de rocha, constata-se que há um comportamento semelhante ao apresentado nessa pesquisa. Nascimento *et al.* (2020) registrou uma queda na absorção de água com substituições de 10% e 20%, entretanto o autor não realizou maiores teores de substituição em suas pesquisas. Yang *et al.* (2023) produziu duas argamassas, uma com granito com agregado e outra com areia de quartzo, e observou um leve aumento na absorção de água na formulação fabricada com granito. Isso pode estar relacionado com a pesquisa pois no traço com substituição total (S100) há um maior absorção do que no traço de referência (REF).

Ao comparar os resultados encontrados nesta pesquisa com as especificações da norma ABNT NBR 13281 (2005), as argamassas tiveram classificações variadas. Conforme a Tabela 4.8, a seguir, todas as argamassas se encontram na classe C5.

4.7 - Absorção de água por imersão e índice de vazios

Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão são apresentados na Figura 4.9, a seguir:

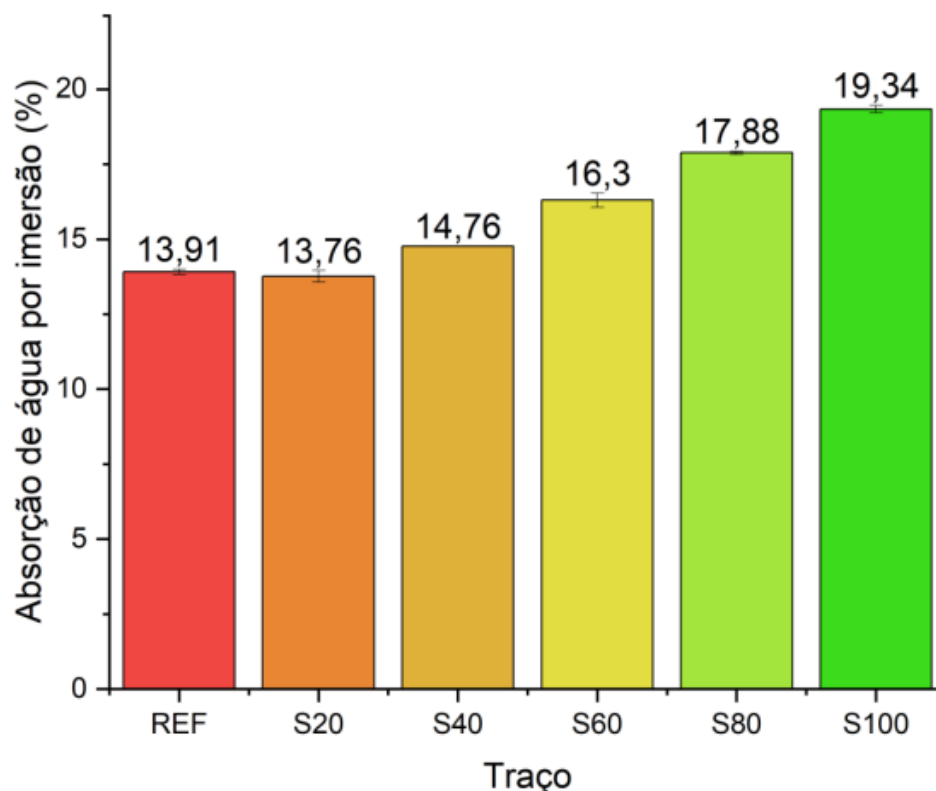


Figura 4.9: Resultados do ensaio de absorção de água por imersão.

A análise da Figura 4.9 revela que o traço de referência (REF), sem qualquer substituição, apresenta uma absorção de água de 13,91%. Quando se introduz 20% de substituição por resíduo no traço S20, essa absorção diminui ligeiramente para 13,59%. Essa redução, ainda que discreta, sugere que em baixos teores o uso de resíduo de rocha ornamental pode contribuir para uma melhor compactação da matriz cimentícia, reduzindo a quantidade de vazios e poros acessíveis à água, o que indica uma melhoria nas propriedades da mistura. No entanto, a partir do traço S40, com 40% de resíduo, observa-se uma tendência de aumento progressivo na absorção: o valor sobe para 14,75% em S40, 16,01% em S60, 17,77% em S80 e atinge o pico de 19,40% no traço S100. Esse comportamento representa um aumento total de 39,4% em relação ao traço de referência e indica que, em teores mais elevados, a

substituição compromete a densidade e coesão da matriz, resultando em uma maior porosidade e, conseqüentemente, maior susceptibilidade à absorção de água.

Na Figura 4.10, a seguir, são apresentados os resultados para os índices de vazios:

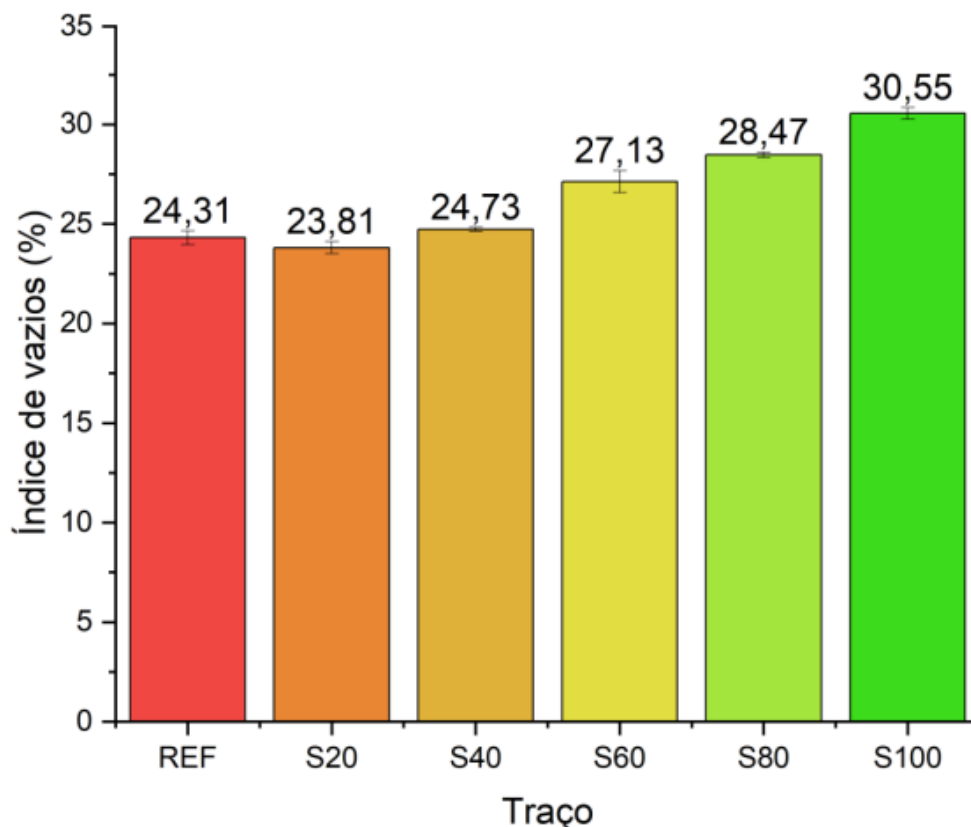


Figura 4.10: Resultados do ensaio de índice de vazios.

Os resultados do índice de vazios demonstram uma relação direta com o comportamento da absorção de água por imersão dos traços de argamassa. O traço de referência (REF) apresentou um índice de vazios de 24,07%, que é levemente reduzido para 23,66% no traço S20, em alinhamento com a redução inicial observada na absorção de água (de 13,91% para 13,59%).

No entanto, a partir do traço S40, observa-se um aumento progressivo no índice de vazios, que cresce de 24,73% em S40 para 30,55% em S100. Esse aumento acompanha a tendência observada nos resultados de absorção de água, que também cresce continuamente, atingindo o valor máximo de 19,40% em S100.

Comportamento semelhante foi relatado por Kabeer e Vyas (2020), que observaram que a variação da absorção de água e do índice de vazios seguiu o mesmo padrão observado nas alterações da densidade aparente endurecida. Devido principalmente à maior capacidade de absorção de água do resíduo em comparação com a areia de rio, ou à natureza excessivamente coesa da mistura de argamassa, o que resultou em um aumento no volume poroso da composição.

Outros autores da literatura internacional também apresentaram constatações semelhantes como Song *et al.* (2022), Buyuksagis *et al.* (2017), Chen *et al.* (2020) e Ahmadi *et al.* (2023) relataram quedas de até 10% na absorção de água quando pequenas quantidades de resíduos eram adicionadas. Os autores discutem que a adição de resíduo à argamassa reduz sua taxa de absorção de água, devido à dispersão do mesmo na mistura, formando um revestimento hidrofóbico nos vazios da argamassa. Além disso, o aumento no grau de hidratação diminui a conectividade dos poros, resultando em uma estrutura mais compacta.

4.8 - Resistência à compressão

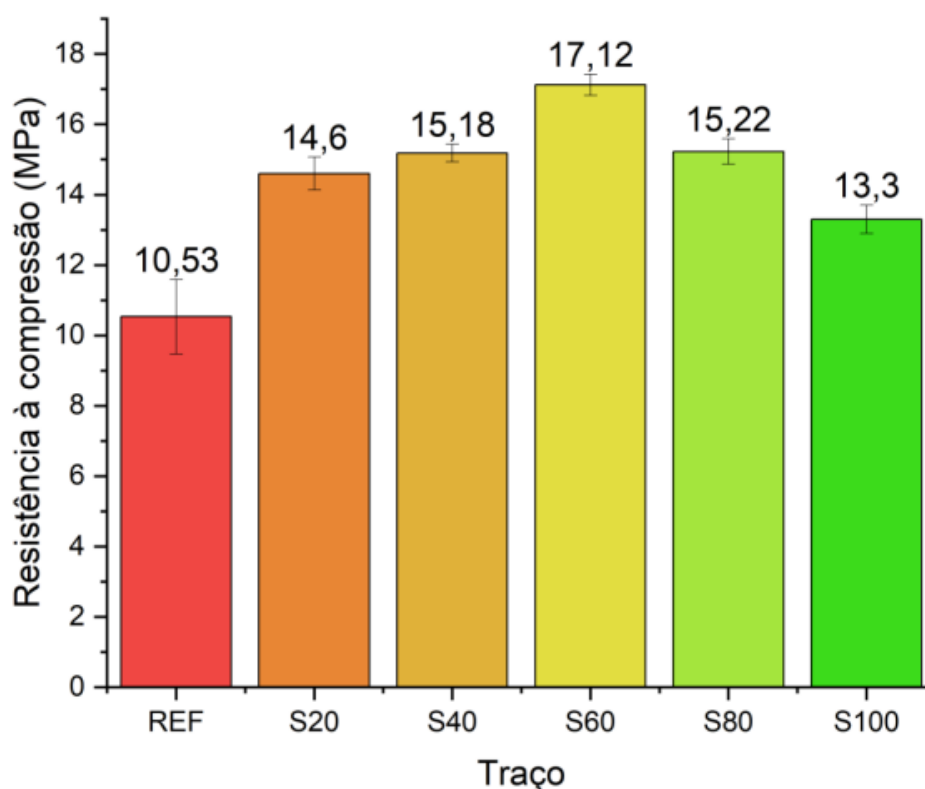


Figura 4.11: Resultados do ensaio de resistência à compressão.

Os resultados da Figura 4.11 demonstra a resistência à compressão aos 28 dias, inicialmente nota-se um ganho significativo, seguido de uma redução no desempenho mecânico com o aumento do teor de substituição. A resistência aumentou de 10,53 MPa no traço de referência (REF) para 14,60 MPa em S20, alcançando o máximo de 17,12 MPa em S60 (aumento efetivo de 62,60%). No entanto, a partir de S60, ocorreu uma queda na resistência (15,22 MPa em S80 e 13,30 MPa em S100). Pode-se observar que mesmo com a queda na resistência a partir do traço S60, o traço S100 apresentou valores superiores ao da formulação de referência.

A resistência à compressão das argamassas é fortemente influenciada pela relação água/cimento (a/c), sendo bem conhecido que menores valores dessa relação resultam em maior resistência mecânica nas formulações. A introdução de partículas finas provenientes de resíduos de rocha potencializa esse efeito, ao favorecer uma interação mais eficiente entre o cimento e os agregados. Quando é realizada a substituição parcial da areia por esses resíduos, a rugosidade das partículas e a melhoria no empacotamento granular contribuem para a melhoria da zona de transição interfacial, promovendo um intertravamento eficiente e aumentando significativamente a resistência à compressão (GADO, 2022; GEHLOT E SRIVASTAVA, 2024).

Resultados semelhantes foram observados em estudos como Vardhan *et al.* (2020), Chen *et al.* (2020), Gado (2022), Kabeer e Vyas (2020), Sharma *et al.* (2013), Singh *et al.* (2016), Nascimento (2020), Ahmadi *et al.* (2023), Gehlot e Shrivastava (2024), Almada *et al.* (2023), Farooq *et al.* (2023) que atestaram a viabilidade do uso de resíduo como substituição parcial da areia natural como agregados finos em argamassas. Indo de acordo com o que foi apresentado nesta pesquisa.

Farooq *et al.* (2023) relataram melhoria na resistência à compressão das argamassas produzidas com até 10% de substituição do cimento por resíduo está associando ao efeito de preenchimento proporcionado pela alta finura, formando uma matriz mais densa e compacta.

Chen *et al.* (2020), substituiu até 25% da areia natural por resíduo de rocha ornamental para diversas relações de a/c , indicando que a substituição de 15% a 25% da areia por GPW resultou em aumentos significativos na resistência das formulações, variando de 31,2% a 72,0%, dependendo da relação a/c . Na relação água/cimento de

1,2, por exemplo, a adição de 15% de GPW elevou a resistência de 49,7 MPa para 71,6 MPa, um aumento de 44,1%.

Gehlot e Shrivastava (2024), ao substituírem até 50% da areia natural por resíduo de rocha ornamental, observaram que a maior resistência à compressão foi alcançada com 30% de substituição da areia natural por resíduo, registrando o valor 8,9 MPa aos 28 dias de cura, representando um aumento de 75% em relação ao traço sem substituição (GP0). Substituições superiores a 30% resultaram em redução da resistência, com GP50 apresentando uma queda de 31% em comparação ao pico de resistência em GP30. Apesar disso, a argamassa com 50% de GCW apresentou resistência semelhante à argamassa de controle, que obteve os menores valores aos 28 dias.

O aumento da resistência em misturas com razão água/cimento igual ou superior às aquelas contendo apenas areia, é explicado pelo efeito de nucleação promovido pela incorporação de partículas ultrafinas do resíduo durante o processo de hidratação do cimento. Essas partículas criam pontos de nucleação ideais para a aceleração das reações de hidratação das fases do cimento, resultando em um ganho de resistência tão significativo que os traços S40 e S60, apresentam aumento na resistência à compressão mesmo contendo uma relação água/cimento superior à mistura de controle. Observações semelhantes foram relatadas por Kabeer e Vyas (2020), os autores destacaram que, quando presentes em excesso, como nos traços S80 e S100, as partículas finas tendem a se repelir, resultando em uma redução na densidade de empacotamento. Esse fenômeno compromete a estrutura da matriz cimentícia e leva a uma diminuição na resistência à compressão.

4.9 - Resistência à tração na flexão

A Figura 4.12 demonstra os resultados encontrados no ensaio de resistência à tração na flexão para os corpos de prova com 28 dias.

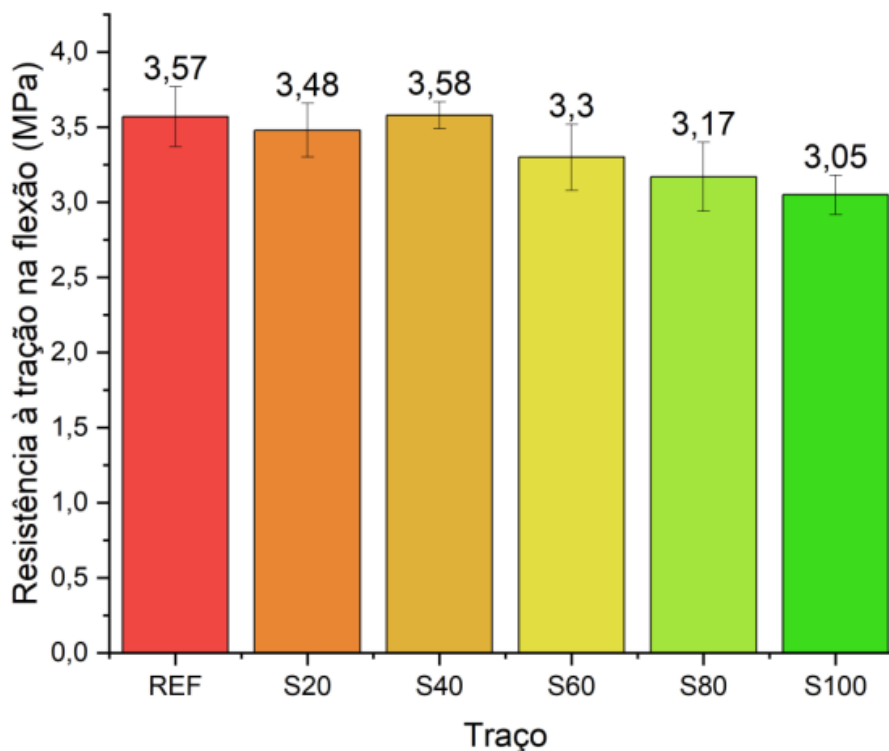


Figura 4.12: Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.

Ao analisar os resultados da resistência à tração na flexão, nota-se uma oscilação nos valores. O traço de referência (REF) apresenta uma resistência de 3,57 MPa, que sofre uma pequena queda para 3,48 MPa no traço S20, seguido por um leve aumento para 3,58 MPa no traço S40, indicando que substituições moderadas de areia por resíduo de rocha ornamental (SRO) não impactam significativamente a resistência flexional. No traço S60, há uma redução discreta, acompanhada de um leve aumento no traço S80, e, posteriormente, uma queda mais acentuada no traço S100. No entanto, a aplicação do desvio padrão nos gráficos revela que não há diferenças estatisticamente significativas entre os valores obtidos até o traço S100. Isso sugere que o uso de resíduo em teores baixos ou moderados (S20, S40, S60 e S80) mantém a resistência à tração na flexão em níveis equivalentes à argamassa de referência.

Moreira *et al.* (2022), Gelhot e Shrivastava (2024), Singh *et al.* (2016), Nascimento *et al.* (2020) e Ahmadi *et al.* (2024) investigaram o impacto dos resíduos de rocha na resistência à tração na flexão de argamassas. Os autores destacaram que os mecanismos responsáveis pelo aumento na resistência à tração são semelhantes aos que ocorrem na resistência à compressão: o efeito de preenchimento proporcionado pelo resíduo, que promove a formação de uma zona de transição interfacial mais resistente. O resíduo de mármore e granito não são classificados como material pozolânico, sua contribuição para o aumento da resistência ocorre por meio de mecanismos de reforço físico e preenchimento dos vazios, otimizando a densidade e a compactação da matriz cimentícia.

Segundo Dobiszewska *et al.* (2023), o aumento ou a manutenção dos valores de resistência à flexão pode ser atribuído à irregularidade e à rugosidade das partículas do resíduo, que favorecem uma ligação mecânica mais eficiente na matriz cimentícia. O aumento progressivo da fase C–S–H ao longo da hidratação preenche os espaços entre as partículas irregulares, criando uma matriz mais densa e resistente. Esse preenchimento reduz a presença de defeitos críticos, especialmente na zona de transição interfacial, enquanto facilita a transferência eficaz de tensões entre a pasta de cimento e as partículas, aproveitando a alta resistência intrínseca das mesmas.

No entanto, o impacto dessas substituições é inferior quando comparado ao observado na compressão. Os estudos também indicaram que, à medida que os valores de resistência à tração aumentam, a variação decorrente do incremento no teor de resíduo de rocha se torna menor, o que pode justificar a manutenção dos valores observados nesta pesquisa.

As argamassas produzidas neste trabalho apresentaram valores de resistência à tração na flexão superiores a 3 MPa. Portanto, conforme as especificações da norma ABNT NBR 13281-1 (2023), são classificadas na classe mais resistente.

Os dados obtidos no presente estudo indicam que todas as argamassas atendem aos critérios de bom desempenho e durabilidade estabelecidos pela ABNT NBR 13281-1 (2023), uma vez que os resultados situam-se nas faixas mais altas da classificação normativa. A coerência entre os altos valores de resistência à tração na flexão e compressão reforça o impacto da incorporação de resíduos, pois todas as argamassas permaneceram na mesma classe de desempenho.

4.10 - Resistência de aderência à tração

A Figura 4.13 demonstra os resultados encontrados no ensaio de resistência de aderência à tração para os corpos de prova com 28 dias.

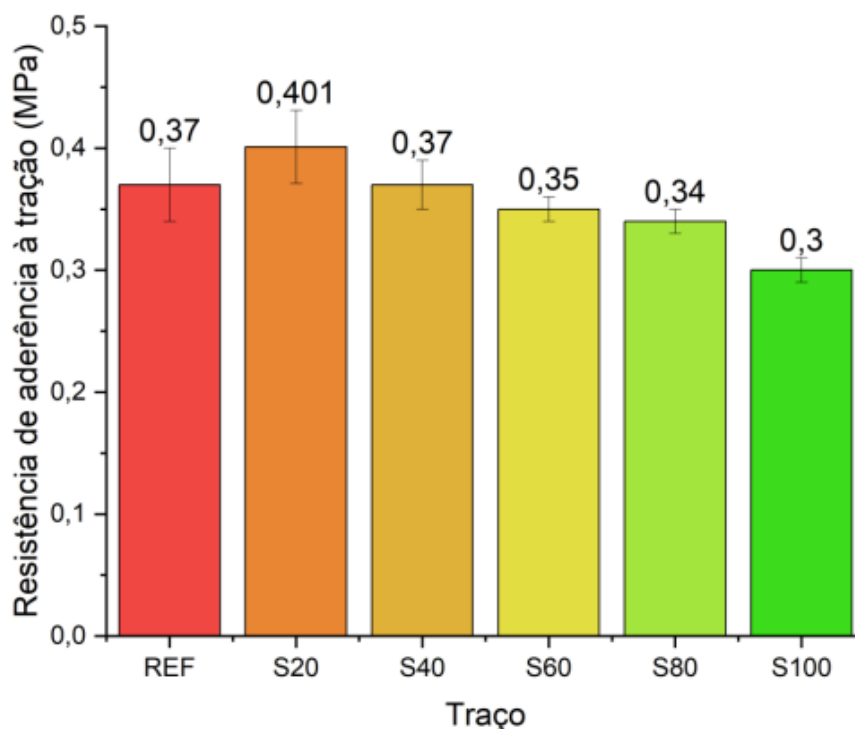


Figura 4.13: Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração.

Observa-se um leve aumento na resistência no traço com 20% de substituição (traço S20), o maior registrado com 17,6% de aumento. Enquanto os traços de controle (REF) e com 40% de substituição (S40), tiveram valores muito próximos. Por outro lado, a medida que maiores teores de resíduos são incorporados, ocorre uma redução progressiva na resistência, com valores de 0,35 MPa, 0,34 MPa e 0,30 MPa para S60, S80 e S100, respectivamente.

Comportamento semelhante é descrito no trabalho de Kabeer e Vyas (2020), os resultados mostram um aumento de 39% na resistência de aderência à tração nas formulações da série A com 20% de substituição de areia por resíduo e uma queda à medida que maiores teores eram adicionados, complementa-se que essa série usou a mesma proporção de cimento: areia deste trabalho. Segundo os autores, a

capacidade dos resíduos de acelerar o processo de hidratação favorece a penetração dos produtos de hidratação no substrato, resultando em um aprimoramento da resistência mecânica e da ligação entre a argamassa e o tijolo.

Gehlot e Shrivastava (2024), que também utilizaram uma proporção de cimento: areia igual ao deste estudo obtiveram aumento de 8% a 24% na resistência de aderência para formulações com substituições de 10% a 20%. Segundo os autores, o aumento nos parâmetros de resistência pode ser atribuído à distribuição homogênea dos elementos químicos e a incorporação de partículas angulares do resíduo, promovendo misturas mais compactas e com menor presença de poros e vazios.

Chen *et al.* (2020), concluíram que a substituição de até 10% da areia por resíduo aumentou a aderência em até 10%, porém substituições mais elevadas levaram a uma queda na resistência. Segundo os autores, o aumento na resistência está diretamente relacionado à densidade do material, uma vez que a substituição em baixos teores contribui para o preenchimento dos vazios na matriz. Esse preenchimento gera mais pontos de contato entre as partículas sólidas e as superfícies aderentes, favorecendo a transmissão de forças de ligação.

Conforme as especificações da norma ABNT NBR 13281-1 (2023), as argamassas são aptas para serem aplicadas como revestimento externo, pois todas apresentaram resistência de aderência à tração maiores do que 0,30 MPa.

4.11 - Condutividade térmica

O gráfico (figura 4.14) demonstra os resultados encontrados no ensaio de condutividade para os corpos de prova com 28 dias.

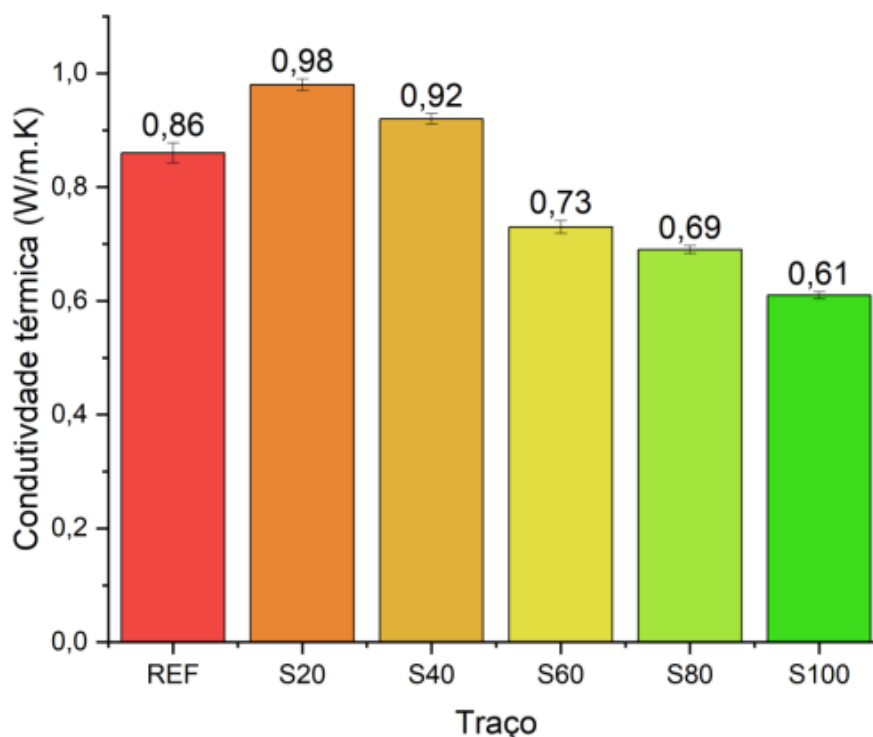


Figura 4.14: Resultados do ensaio de condutividade térmica.

Os resultados do ensaio de condutividade térmica indicam que o traço de referência (REF), sem substituição, apresenta uma condutividade de 0,86 W/m·K, que aumenta para 0,98 W/m·K no traço S20. Esse incremento inicial é atribuído ao melhor empacotamento granular proporcionado pelo resíduo de rocha ornamental (RRO) em baixos teores, reduzindo a quantidade de vazios, os quais atuam como isolantes térmicos, e aumentando a capacidade de condução de calor. Entretanto, a partir do traço S40, ocorre uma inversão na tendência, com redução progressiva na condutividade térmica. Os valores diminuem para 0,92 W/m·K em S40, 0,73 W/m·K em S60, 0,69 W/m·K em S80, e atingem o mínimo de 0,61 W/m·K em S100, uma queda de 30% em comparação a argamassa de referência, indicando que teores elevados de RRO promovem maior porosidade e contribuem para um melhor isolamento térmico.

Fontes et al. (2021), ao estudarem a substituição da areia por argila expandida em argamassas, observaram uma redução na condutividade térmica, atribuída ao aumento do índice de vazios e à diminuição da densidade de massa causada por maiores taxas de substituição pelo resíduo. Essas características foram associadas a uma melhoria na resistência térmica do material.

Passos et al. (2018) registraram 0,66 W/m·K para uma densidade de 1707 kg/m³, enquanto Fontes et al. (2021) encontraram 1,14 W/m·K para 2138,53 kg/m³. Já Nunes et al. (2024) relataram 0,486 W/m·K para uma densidade de 1367 kg/m³, e Borges et al. (2018) obtiveram 1,466 W/m·K para 1909 kg/m³. Os autores evidenciam uma significativa variação nos valores de condutividade térmica de argamassas de referência, associada diretamente à densidade inicial das formulações. Considerando que os valores de condutividade térmica de controle variam entre 0,486 W/m·K e 1,466 W/m·K, o valor obtido, de 0,86 W/m·K, está alinhado com os dados apresentados por outras pesquisas.

Passos et al. (2018) observaram uma redução significativa na condutividade térmica ao substituir 80% da areia por resíduo de poliestireno expandido (EPS) e 90% da areia por resíduo de placas isolantes, com quedas de 74% e 78%, respectivamente. A condutividade térmica passou de 0,66 W/m·K para 0,17 W/m·K e 0,14 W/m·K, acompanhada por uma redução de 62% e 64% na densidade do material. De forma complementar, Nunes et al. (2024) relataram uma condutividade térmica máxima de 0,575 W/m·K em painéis sanduíche, destacando seu potencial como elemento de vedação para melhorar o conforto térmico em edificações. Esses valores são notáveis ao serem comparados com materiais tradicionais, como blocos cerâmicos e alvenaria de concreto, que possuem condutividades térmicas superiores, da ordem de 0,90 W/m·K e 1,75 W/m·K, respectivamente.

Borges et al. (2018) destacam a necessidade de um balanceamento cuidadoso no uso de resíduos leves em argamassas, considerando o impacto no desempenho global do material. Embora o aumento da capacidade isolante seja uma vantagem, ele pode vir acompanhado de reduções significativas em propriedades físicas e mecânicas. Por exemplo, argamassas com grânulos de cortiça expandida apresentaram as maiores reduções de resistência, variando entre 72% e 75% para resistência à flexão e entre 84% e 97% para resistência à compressão, quando comparadas às formulações com areia convencional. Já as argamassas com argila

expandida apresentaram reduções mais moderadas, entre 25% e 43% na resistência à flexão e entre 34% e 55% na resistência à compressão. Complementarmente, Passos et al. (2018) relataram quedas na resistência de aderência à tração, variando de 50% a 82% em argamassas com resíduo de EPS e em torno de 66% para aquelas com resíduos de painéis isolantes.

Os resultados indicam que a substituição parcial da areia pelo resíduo de rocha influencia significativamente as propriedades térmicas das argamassas. Enquanto baixos teores de SRO (S20) promovem maior condutividade térmica devido ao efeito de compactação, substituições mais elevadas (S60 a S100) conferem maior capacidade isolante à matriz. Segundo os critérios da norma ABNT NBR 15220-3 (2024), todas as formulações atenderam aos requisitos de desempenho térmico, apresentando valores de condutividade térmica inferiores ao limite de 1,15 W/m·K estipulado pela norma.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - Conclusões

Este estudo teve como objetivo desenvolver uma argamassa para reboco de uso externo, substituindo parcialmente o agregado miúdo (areia de rio) por resíduo de rochas ornamentais nos teores de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, com foco na avaliação das propriedades físicas, mecânicas e térmicas do material. Os resultados obtidos evidenciaram a viabilidade do uso desse resíduo como substituto da areia, com destaque para melhorias no desempenho térmico e impactos mínimos nas propriedades físicas e mecânicas, mantendo-se dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 13281-1 (2023) para argamassas de uso externo.

O traço com 100% de substituição (S100) se destacou, mesmo apresentando reduções nas resistências à compressão, tração e aderência em comparação com os demais traços. Ainda assim, atendeu às exigências normativas e obteve o melhor desempenho térmico, com uma redução de 30% na condutividade térmica. Esse resultado representa um avanço significativo rumo à sustentabilidade na construção civil, ao promover o uso de materiais reciclados e reduzir o consumo de recursos naturais.

A análise granulométrica revelou que o resíduo de rocha ornamental possui características distintas em relação à areia, com cerca de 85% de sua composição classificada na fração silte, segundo a ABNT. Isso impossibilitou a substituição equivalente entre os materiais e restringiu a substituição a frações específicas da areia. Ainda assim, a menor densidade dos grãos e sua composição química — predominantemente sílica (SiO_2 – 87,02%) e alumina (Al_2O_3 – 5,81%) — evidenciaram seu potencial como agregado alternativo, contribuindo para a melhor compactação da mistura sem comprometer as propriedades essenciais da argamassa.

Nos ensaios no estado fresco, observou-se que as características do resíduo — como menor densidade, partículas mais finas e maior área específica — influenciaram diretamente os resultados. A argamassa com 20% de substituição (S20) apresentou a menor demanda de água para alcançar a consistência desejada, enquanto teores mais elevados exigiram maior quantidade de água, indicando que o resíduo, em

pequenas proporções, atua como um plastificante fraco, ajudando a preencher os poros e a reduzir a necessidade de água.

As propriedades físicas da argamassa foram afetadas de forma significativa pelo uso do resíduo. Em baixas proporções, observou-se aumento da densidade de massa no estado fresco e redução do teor de ar incorporado, devido à ocupação eficiente dos vazios. No entanto, em teores mais altos, houve tendência de repulsão entre as partículas finas, o que reverteu esse comportamento, resultando na diminuição da densidade e no aumento do ar incorporado. No ensaio de retenção de água, verificou-se uma queda inicial (S20), seguida de aumento progressivo com o aumento da substituição. A análise integrada desses dados permitiu estabelecer correlações consistentes e validar o padrão de comportamento da argamassa com diferentes teores de substituição.

No estado endurecido, as propriedades como densidade de massa, absorção de água por capilaridade e por imersão, além do índice de vazios, refletiram diretamente as variações observadas na fase fresca. Em relação ao desempenho mecânico, os resultados mostraram ganhos expressivos na resistência à compressão até 60% de substituição, atribuídos ao efeito de empacotamento e à possível aceleração da hidratação do cimento. Acima desse limite, houve queda na resistência, embora os valores ainda superassem os da argamassa de referência. A resistência à tração na flexão manteve-se estável nos teores baixos e médios, permanecendo na classe mais alta da norma. Já a resistência de aderência à tração aumentou em baixas taxas de substituição, em função da maior densidade da argamassa, mas apresentou redução nos teores mais altos — ainda assim, todos os valores permaneceram dentro dos limites normativos.

Do ponto de vista térmico, o uso do resíduo proporcionou uma redução significativa da condutividade térmica, especialmente em teores elevados, alcançando até 30% de diminuição. Esse ganho contribui para a melhoria da eficiência energética dos sistemas de vedação, representando uma vantagem importante para aplicações em revestimentos externos.

5.2 - Sugestões para trabalhos futuros

Sugerem-se os seguintes temas para posterior investigação:

- Estudo da interferência do traço utilizado na composição das argamassas como por exemplo o traço 1:1:6 ou 1:2:9 (cimento: cal: areia) e substituir por resíduo;
- Estudo da interferência do uso de outros tipos de resíduos nas propriedades térmicas das argamassas, como por exemplo o resíduo de mármore;
- Estudos de durabilidade, retração, propagação de fissuras e exposição ao sol de paredes revestidas com argamassas com resíduo, verificando o impacto do maior teor de finos nas formulações e o desempenho em condições externas;
- Otimizar a distribuição granulométrica das matérias-primas utilizadas na fabricação das argamassas, montado uma areia contendo várias frações de resíduos e avaliar o impacto nos parâmetros do estado fresco e endurecido.

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica. Rio de Janeiro, 2015.

_____.NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____.NBR-6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____.NBR-7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____.NBR 7175: Cal Hidratada para Argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____.NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____.NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

_____.NBR 9575: Impermeabilização - Seleção e projeto. Rio de Janeiro, 2010.

_____.NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____.NBR 9935: Agregados — Terminologia . Rio de Janeiro, 2024.

_____.NBR 11172: Aglomerantes de origem mineral— Terminologia . Rio de Janeiro, 1990.

_____.NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____.NBR 13277:Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

_____.NBR 13278:Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____.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.

_____.NBR 13280:Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____.NBR 13281-1:Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios. Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2023.

_____.NBR 13218-2: Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro, 2016.

_____.NBR 13528-3: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas — Determinação da resistência de aderência à tração. Parte 3: Aderência superficial. Rio de Janeiro, 2019.

_____.NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

_____.NBR 13749:Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____.NBR 13754:Revestimento de paredes internas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento.Rio de Janeiro, 1996.

_____.NBR 15012: Rochas para revestimentos de edificações — Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

_____.NBR 15259:Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR15575-2: Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2018.

_____.NBR 16697:Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D7984 - 21: Standard Test Method for Measurement of Thermal Conductivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument. 2021.

ABDEL, A. TAHER, ALBIDE, M. Composition and diagenesis of ancient Shali city buildings of evaporite stones (kerchief), Siwa Oasis, Egypt, Quaternary International, v. 369, 2015, p. 78-85, ISSN 1040-6182, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.09.009>.

AHMADI, M. ERFAN, A. MAHDI K. Using marble waste as a partial aggregate replacement in the development of sustainable self-compacting concrete, Materials Today:Proceedings, 2023,ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.103>.

ALMADA, B. MELO, L. SILVA, G. SANTOS, W. AGUILAR, M. Effect of the waste ornamental rocks on the hydration and life cycle of Portland cement composites, Construction and Building Materials, v. 395, 2023, 132353, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132353>.

AMARAL, L. DELAQUE, G. NICOLITE, M. MARVILA, M. AZEVEDO, A. ALEXANDRE, J. VIEIRA, C. MONTEIRO, S. Eco-friendly mortars with addition of ornamental stone waste - A mathematical model approach for granulometric optimization, Journal of Cleaner Production, v. 248, 2020, 119283, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119283>.

AMBROZEWICZ, P. H. L. Construção de Edifícios: do início ao fim da obra. São Paulo: Pini, 2015.

AMENTA, M. KARATASIO, I. MARAVELAKI, P. KILIKOGLU, V.. (2017). The role of aggregate characteristics on the performance optimization of high hydraulicity restoration mortars. Construction and Building Materials. 153. 527-534. [10.1016/j.conbuildmat.2017.07.134](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.134).

AKUTSU, M. SATO, N. M. PEDROSO, N. G. Desempenho térmico de edificações habitacionais escolares: manual de procedimentos para avaliação, ITP, Divisão de Edificações, São Paulo, 1987.

AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez et al. Effect of granite residue incorporation on the behavior of mortars. Materials, v. 12, n. 9, p. 1449, 2019.

BALAPOUR, M. HAJIBANDE, E. & RAMEZANIANPOU, A. Engineering Properties and Durability of Mortars Containing New Nano Rice Husk Ash (RHA). High Tech Concrete:

Where Technology and Engineering Meet. p.199-206, 2018. DOI:10.1007/978-3-319-59471-2_25.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A. Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 95-105.

BAUER, R. J. F. Patologia em alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. In: Materiais de Construção, capítulo 16, 2014.

BECKER, P. EFFITING, C. SCHACKOW, A. Lightweight thermal insulating coating mortars with aerogel, EPS, and vermiculite for energy conservation in buildings, *Cement and Concrete Composites*, v. 125, 2022, 104283, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104283>.

BRAGA, F.S.; BUZZI, D.C.; COUTO, M.C.L.; LANGE, L.C. Caracterização ambiental de lamias de beneficiamento de rochas ornamentais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 5, n. 3, p. 237-244, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522010000300006>

BOMEDIANO, K. S.; GOMES, C. E. M.; FONTANINI, P. S. P. Propriedades da argamassa modificada com polímeros redispersíveis de etileno-acetato de vinila (EVA). *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 419-429, jul./set. 2020.

BORGES, A. COLEN, I. BRITO, J. Physical and mechanical performance of cement-based renders with different contents of fly ash, expanded cork granules and expanded clay, *Construction and Building Materials*, Volume 191, 2018, Pages 535-543, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.043>.

BUYUKSAGIS, I. UYGUNOGLU, T. TATAR, E. Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar, *Construction and Building Materials*, Volume 154, 2017, Pages 734-742, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.014>.

CALDAS, L. R.; CARVALHO, M. T. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação de estratégias para a mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 343-362, jul./set. 2020. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000300433>

CAMACHO, J. S.; LOGULLO, B. G.; PARSEKIAN, G. A.; SOUDAIS, P. R. N. The influence of grouting and reinforcement ratio in the concrete block masonry

compressive behavior. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 8, n. 3, p. 341-364, jun. 2015.

CAMPOS NETO, M.C., BASEI, M.A.S., JANESI, V.A., MORAES, R., 2011. Orogen Migration and Tectonic Setting of the Andrelândia Nappe System: an Ediacaran Western Gondwana Collage, South of São Francisco Craton. *Journal of South American Earth Sciences*, 32, 393-406.

CAPORRINO, C. F. *Patologias em alvenarias*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018

CARASEK, H. Aderência de argamassa à base de cimento portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. São Paulo, 1996. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARASEK, H. Patologia das argamassas de revestimento. In: Isaia, G.C. (Org.) *Materiais de Construção e Princípios de Ciência em Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007, v. 1, p. 1-11.

CARASEK, H. Argamassas. In: Isaia, G.C. (Ed.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 892-944.

CARVALHO JR., A. N.; BRANDÃO, P. R. G.; FREITAS, J. M. C. Relação entre a resistência de aderência de revestimento de argamassa e o perfil de penetração de pasta de aglomerante nos poros do bloco cerâmico. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*, VI., 2005, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 518-529

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. *Boletim Técnico* n. 68.

CHEN, J. LI, B. NG, P. KWAN, A. Adding granite polishing waste as sand replacement to improve packing density, rheology, strength and impermeability of mortar, *Powder Technology*, Volume 364, 2020, Pages 404-415, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.012>.

CHIODI FILHO, C. *Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2017*. São Paulo: ABIROCHAS, 2018. 15 p. (Informe n.01/2018).

CHIODI FILHO, C. SÍNTESE DAS EXPORTAÇÕES BRASILEIRAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS E DE REVESTIMENTO NO 1º BIMESTRE DE 2024. São Paulo: ABIROCHAS, 2024. 9 p. (Informe n.02/2024).

CLAUSER, C. e HUENGES, E. Thermal conductivity of rocks and minerals, American Geophysical Union, v. 3, p. 105–126, 1995.

COSTA, Antônio Gilberto; CAMPELLO, Marcos; PIMENTA, Vítor. ROCHAS ORNAMENTAIS E DE REVESTIMENTO DE MINAS GERAIS: PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. Geonomos, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 9-13, 1 jul. 2000.

DE OLIVEIRA, Alexandre Magno et al. Fissuras, trincas e rachaduras causadas por recalque de diferencial de fundações. 2012.

DOBISZEWSKA, Magdalena et al. Utilization of rock dust as cement replacement in cement composites: An alternative approach to sustainable mortar and concrete productions. *Journal of Building Engineering*, v. 69, p. 106180, 2023. ISSN 2352-7102.

DOBISZEWSKA, Magdalena; SCHINDLER, Anton K.; PICHÓR, Waldemar. Propriedades mecânicas e microestrutura da zona de transição interfacial de concreto com adição de pó de basalto residual. *Construction and Building Materials*, v. 177, p. 222-229, 2018. ISSN 0950-0618.

DJOBBO, J. ELIMBI, A. TCHAKOUTE, H. KUMAR, S. Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars, *Construction and Building Materials*, Volume 124, 2016, Pages 606-614, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.141>.

DUARTE, R.B. Fissuras em alvenaria: causas principais medidas preventivas e técnicas de recuperação, 1998. Boletim técnico nº25 - Porto Alegre.

EFFTING, Carmeane. DESENVOLVIMENTO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS CONFORTÁVEIS TERMICAMENTE. 2008. Tese de doutorado (Pós graduação em engenharia civil) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, [S. l.], 2008.

ELSEN, J. MERTENS, G.ertens, Koen Van Balen; Raw materials used in ancient mortars from the Cathedral of Notre-Dame in Tournai (Belgium). *European Journal of Mineralogy*, v. 23, p. 871–882, 2011. doi.org/10.1127/0935-1221/2011/0023-2139

FARIAS, M. M.; PALMEIRA M. E. Agregado para a Construção Civil. IBRACON, v.1. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São

Paulo, cap. 16, 2007.

FARINHA, C.; BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars. *Construction and Building Materials*, V. 83, 2016. P. 194-206.

FAROOQ, O. BILAL, H. CAVALERI, L. KHAN, A. Properties of blended mortars produced with recycled by-products from different waste streams, *Developments in the Built Environment*, Volume 14, 2023, 100156, ISSN 2666-1659, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100156>.

FENG, R. LIU, Y. ZHU, JI. XING, F. Flexural behaviour of C-FRCM strengthened corroded RC continuous beams, *Composite Structures*, Volume 245, 2020, 112200, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112200>.

FERRANDEZ, D. ALVAREZ, M. SAIZ, P. ZARAGOZA, A. Experimental Study with Plaster Mortars Made with Recycled Aggregate and Thermal Insulation Residues for Application in Building. *Sustain.* v. 14, p. 2386, 2022. doi:10.3390/su14042386.

FIESS, J.R.F. Fissuras em argamassas de revestimento. *Téchne – Revista de Tecnologia e Negócios da Construção*, São Paulo, ano 10, n. 54, p. 15, set. 2001.

FONTES, A. É. M. de S.; CABRAL, K. C.; SOUZA, W. R. M. de; MARTINELLI, A. E.; FONTES, K. E. S. Análise mecânica e térmica de argamassas de revestimento com substituição parcial do agregado por argila expandida. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 22, n. 3, p. 299-311, jul./set. 2022. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000300620>.

FOSSATI, M. SCALCO, V. LINCZUK, V. LAMBERTS, R. Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 65, 2016, Pages 1216-1231, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.048>.

FREITAS, CLEVERSON. ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM AGREGADOS MIÚDOS DE BRITAGEM DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA: PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO. 2010. 135 p. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, [S. l.], 2010.

GADO, R. Viabilidade da reciclagem de resíduos de mármore e granito em argamassas cimentícias modificadas por polímeros - Parte A: Em argamassa adesiva cimentícia modificada por polímeros. *Process Safety and Environmental Protection*, v.

159, p. 978-991, 2022. ISSN 0957-5820.

GADIOLI, M.C.B.; AGUIAR, M.C.D.; GIORI, A.J.N.; PAZETO, A.D.A.; FERNANDES, M.

C.S. Rochas aglomeradas: uma alternativa tecnológica e ambiental para a utilização dos resíduos de rochas ornamentais. 2021.

GEHLOT, M. SHRIVASTAVA, S. Development of rendering mortar from granite cutting waste and impact of accelerated aging environment on its adhesive strength, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134177, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134177>.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; MOLIN, D. C. C. D. Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte e granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. Ambiente Construído, v. 2, n. 1, p. 53-68, 2002.

GOYAL, H. SIDDIQUE, R. JHA, S. SHARMA, D. Utilization of textile sludge in cement mortar and paste, Construction and Building Materials, Volume 214, 2019, Pages 169-177, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.023>.

HADDAD, L. NEVES, R. OLIVEIRA, P. SANTOS, W. JUNIOR, A. SANTOS, W. Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties, Journal of Materials Research and Technology, Volume 9, Issue 4, 2020, Pages 9299-9314, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.068>.

HELENE, P. Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto. São Paulo, Red Rehabilitar, 2003.

HENDRICKX, R. ROELS, S. BALEN, V. Measuring the water capacity and transfer properties of fresh mortar, Cement and Concrete Research, Volume 40, Issue 12, 2010,

Pages 1650-1655, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.002>.

HENDRY, A. Masonry walls: materials and construction, Construction and Building Materials, Volume 15, Issue 8, 2001, Pages 323-330, ISSN 0950-0618, [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00019-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00019-8).

IDRESS, M. SAEED, F. AMIN, A. HUSSAIN, T. Improvement in compressive strength of Styrene-Butadiene-Rubber (SBR) modified mortars by using powder form and nanoparticles, Journal of Building Engineering, Volume 44, 2021, 102651, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102651>.

JACKSON, M., DEOCAMPO, D., MARRA, F. and SCHEETZ, B. Mid-Pleistocene pozzolanic volcanic ash in ancient Roman concretes. *Geoarchaeology*, v. 25, p. 36-74, 2010. <https://doi.org/10.1002/gea.20295>.

KABEER, S. VYAS, A. Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes, *Construction and Building Materials*, Volume 165, 2018, Pages 321-332, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.061>.

KASANYA, M, ALAIBANI, A. THOMAS, M. RIDING, A. Exploring the efficacy of emerging reactivity tests in screening pozzolanic materials, *Construction and Building Materials*, Volume 325, 2022, 126781, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126781>.

KIM, H. JEON, J. LEE, H. Flow, water absorption, and mechanical characteristics of normal- and high-strength mortar incorporating fine bottom ash aggregates, *Construction and Building Materials*, Volume 26, Issue 1, 2012, Pages 249-256, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.019>.

KONÁKOVÁ, D.; VEJMEJKOVÁ, E.; CÁCHOVÁ, M.; REITERMAN, P.; KEPPERT, M.; CERNY, R. Characterization of the effect of brick-powder application in lime-based plasters, 59, 291–301, 2015.

KRONLOF, A. LEIVO, M. SIPARI, P. Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar, *Cement and Concrete Research*, Volume 25, Issue 8, 1995, Pages 1747-1754, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00170-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00170-0).

KHALDI, N., BELACHIA, M., BENOUIS, A. Estimation of the adherence of mortars using ultrasound. *Civil and Environmental Engineering Reports*, v. 30, p. 0185-0199, 2020. <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0026>

KRUGER, P., SERBAI, P., CHINELATO, A. PEREIRA, E. Influence of particle size distribution of conventional fine aggregate and construction demolition waste aggregate in Portland cement mortar. *Cerâmica*, v. 67, p. 269–276, 2021. <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673833035>.

LI, L.G.; HUANG, Z.H.; TAN, Y.P.; KWAN, A.K.H.; LIU, F. Utilização de pó de mármore como substituto de pasta para reciclagem de resíduos e melhoria da durabilidade e estabilidade dimensional de argamassa. *Construction and Building Materials*, v. 166, p. 423-432, 2018. ISSN 0950-0618.

LI, X. SHU, D. CHIA, H. SIEW, C. GUO, J. The Effect of Water to Cement Ratio on the

Fresh and Hardened Mortar Containing Steel Slag as Cement Replacement Material. Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, Ltd., March 4, 2022. <https://doi.org/10.4028/p-nhwz8w>.

LISBÔA, Edvaldo Monteiro. OBTENÇÃO DO CONCRETO AUTO- ADENSÁVEL UTILIZANDO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE E GRANITO E ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS. 2004. 144 f. Dissertação de Mestrado (Pós graduação em engenharia civil) - Universidade Federal de Alagoas, [S. l.], 2004.

LIU, J.; LV, C. Properties of 3D-Printed Polymer Fiber-Reinforced Mortars: A Review. *Polymers*, v. 14, p. 1315, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14071315>.

LU, L. YANG, Z. LIN, Y. DONG, S. Partial replacement of manufactured sand with homologous granite powder in mortar: The effect on porosity and capillary water absorption, *Construction and Building Materials*, Volume 376, 2023, 131031, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131031>.

MA, Z. LIU, X. HU, R. BA, G. WANG, C. Using recycled aggregate and powder from high-strength mortar waste for durable cement-based materials: Microstructure and chloride transport, *Journal of Cleaner Production*, Volume 417, 2023, 137998, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137998>.

MALASZKIEWICZ, D. Influence of polymer fibers on rheological properties of cement mortars. *Open Engineering*. v. 7, 2017. doi:10.1515/eng-2017-0029.

MANHÃES, J.P.V.T.; HOLANDA, J.N.F. Caracterização e classificação de resíduo sólido "pó de rocha granítica" gerado na indústria de rochas ornamentais. *Química Nova*, v. 31, n. 6, p. 1301-1304, 2008.

MARCON, DANILO; VIDAL, VIL; CASTRO, NEY. CARACTERIZAÇÃO E TRATAMENTO DA LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS (LBRO). XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, [S. l.], p. 1-9, 22 out. 2015.

MARTINEZ, I. ETXEBERRIA, M. PAVON, E. DIAZ, N. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars, *Construction and Building Materials*, Volume 49, 2013, Pages 384-392, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.049>.

MATIAS, L. TORRES, I. REI, F. GOMES, F. Analysis of the functional performance of different mortars with incorporated residues, *Journal of Building Engineering*, Volume 29, 2020, 101150, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101150>.

MAURENBRECHER, P. GROOT, C. VAN BALEN, K. SIMSIR, B. BINDA, L. ET AL. Repair mortars for historic masonry. State-of-the-art report RILEM TC 203-RHM, 2016.

MARTINS, G. *ET AL.*, Influence of blocks and grout on compressive strength and stiffness of concrete masonry prisms, *Constr. Build. Mater.*, vol. 182, pp. 233–241, 2018, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.091>.

MARVILA, M. Desenvolvimento de um aditivo para argamassas de múltiplo uso com uma composição argila-calcário. 2018. 199 p. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, [S. l.], 2018.

MATTOS, L. Identificação e Caracterização das Argamassas para Revestimento Externo Utilizada na Cidade de Belém - PA. 2001. 146f. Dissertação Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MENDES, R. F. et al. Study of new reinforcing materials for cementitious panel production. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 37217-37230, 2021.

MENDES, V. FARDIN, W. BARRETO, R. CAETANO, L. MENDES, J. Sensitivity analysis of coating mortars according to their specific heat, specific gravity, thermal conductivity, and thickness in contribution to the global thermal performance of buildings, *Sustainable Materials and Technologies*, Volume 31, 2022, e00381, ISSN 2214-9937, <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00381>.

MENDOZA, E. ALONZO, E. SANCHEZ, A. BEDOLLA, J. BECERRA, H. NAVARRO, E. ANTONIA G. BELEM, G. MARTINEZ, M. Physical and Mechanical Characterization of Lime Pastes and Mortars for Use in Restoration. *Heritage*. v. 6, p. 2582-2600, 2020. 10.3390/heritage6030136.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MOHAMMADHOSSEINI, H.; LIM, N. H. A. S.; TAHIR, M. M.; ALYOUSEF, R.; ALABDULJABBAR, H.; SAMADI, M. Enhanced performance of green mortar comprising high volume of ceramic waste in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, [s.l.], v. 212, p.607-617, jul. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.024>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

MORENO JUNIOR, R.; SELMO, S. M. de S. *Aderência de Argamassas de Reparo de Estruturas de Concreto* São Paulo, 2007. Boletim técnico da escola politécnica da

USP.

MOREIRA, P.I.; de Oliveira Dias, J.; de Castro Xavier, G.; Vieira, C.M.; Alexandre, J.; Monteiro, S.N.; Ribeiro, R.P.; de Azevedo, A.R.G. Ornamental Stone Processing Waste Incorporated in the Production of Mortars: Technological Influence and Environmental Performance Analysis. *Sustainability* 2022, 14, 5904. <https://doi.org/10.3390/su14105904>.

MUSEE, A. LEARENG, S. KEBABETSWE, L. TUBATSI, G. MAHAYE, N. THWALA. Chapter 14 - Implications of surface coatings on engineered nanomaterials for environmental systems: status quo, challenges, and perspectives, In *Micro and Nano Technologies, Handbook of Functionalized Nanomaterials for Industrial Applications*, Elsevier, 2020, Pages 399-416, ISBN 9780128167878, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816787-8.00014-4>.

MUKERJI, C. Tacit Knowledge and Classical Technique in Seventeenth-Century France: Hydraulic Cement as a Living Practice among Masons and Military Engineers. *Technology and Culture*, vol. 47, no. 4, 2006, pp. 713–33. <http://www.jstor.org/stable/40061117>.

NASCIMENTO, A. SANTOS, C. CAVALCANTE, F. OLIVEIRA, V. OLIVEIRA, B. MACEDO, Z. OLIVEIRA, H. Production of plaster mortar with incorporation of granite cutting wastes, *Journal of Cleaner Production*, Volume 265, 2020, 121808, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121808>.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NUNES, M. S.; LIMA, P. R. L.; CARVALHO, R. F. Potencialidade de painéis sanduíche com núcleo de bioconcreto leve com resíduo do endocarpo de palma para uso na construção civil. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 24, e133290, jan./dez. 2024. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212024000100761>.

NGUYEN, V. PHUNG, T. PHAM, D. HO, L. Mechanical properties and durability of concrete containing coal mine waste rock, F-class fly ash, and nano-silica for sustainable development, *Journal of Engineering Research*, Volume 11, Issue 3, 2023, Pages 75-86, ISSN 2307-1877, <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100097>.

OHAMA, Y. *Hand book of polymer-modified concrete and mortars – Properties and process technology*. Noyes Publications. New Jersey. 1995.

PAIVA, H. SILVA, L. LABRINCHA, J. FERREIRA, V. Effects of a water-retaining agent

on the rheological behaviour of a single-coat render mortar, *Cement and Concrete Research*, Volume 36, Issue 7, 2006, Pages 1257-1262, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.02.018>.

PASSOS, P. M., CARASEK, H. Argamassas com resíduos para revestimento isolante térmico de parede pré-moldada de concreto. *Cerâmica*, 64(372), 577–588, 2018. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643722391>

PELLENQ, R. KUSHIMA, A. SHAHSAVARI, R. VAN, BUEHLER, YIP, K. ULM, F. A realistic molecular model of cement hydrates, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, v. 106, p.16102-16107, 2009. <https://doi.org/10.1073/pnas.0902180106>.

PÓVOAS, Y, V. PILEGGI, R. G. JOHN, V. M. Análise do filme superficial da argamassa colante no estado fresco. In: VI Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. Anais do VI SBTA. Florianópolis. 2005.

RAMESH, M. AZENHA, M. LOURENÇO, P. Quantification of impact of lime on mechanical behaviour of lime cement blended mortars for bedding joints in masonry systems, *Construction and Building Materials*, Volume 229, 2019, 116884, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116884>.

RAMOS, T. MATOS, A. SCHMIDT, B. RIO, J. COUTINHO, J. Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability, *Construction and Building Materials*, Volume 47, 2013, Pages 1001-1009, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.098>.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. *Conhecendo argamassa*. 1ª ed. EDIPUCRS. Porto Alegre/RS, 2007.

REN, Q. TAO, Y. JIAO, D. JIANG, Z. YE, G. SCHUTTER, G. Plastic viscosity of cement mortar with manufactured sand as influenced by geometric features and particle size, *Cement and Concrete Composites*, Volume 122, 2021, 104163, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104163>.

RESENDE, D. MENDES, V. CARVALHO, V. NOGUEIRA, M. CARVALHO, J. PEIXOTO, R. Coating mortars produced with recycled PET aggregates: A technical, environmental, and socioeconomic approach applied to Brazilian social housing, *Journal of Building Engineering*, Volume 83, 2024, 108426, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108426>.

RIBEIRO, B.; MORAES, J. V.; MATA, R. C. Levantamento das principais

manifestações patológicas de edificações multifamiliares. Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Curso de Engenharia Civil, 2020.

RODRIGUES, Paula Nader. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSA HISTÓRICAS DA RUÍNA DE SÃO MIGUEL ARCANJO/RS. 2013. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, [S. l.], 2013. p. 142.

SABBATINI, F. H. O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária. São Paulo. 1984. 298 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SAELI, M. SENFF, L. TOBALDI, D. SEABRA, M. LABRINCHA, J. Novel biomass fly ash-based geopolymeric mortars using lime slaker grits as aggregate for applications in construction: Influence of granulometry and binder/aggregate ratio, *Construction and Building Materials*, Volume 227, 2019, 116643, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.024>.

SAHADE, R. Avaliação de sistemas de recuperação de fissuras em alvenaria de vedação. v. 169 f. Dissertação (Mestrado em Habitação) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2005.

SANTOS, W. ET AL., Study of the effects of excessive cement or lime in mechanical properties and durability of the mortar coating. *Int. J. Develop. Res.*, vol. 9, no. 9, pp. 29923–29927, 2019.

SANTOS, M. M. A.; DESTEFANI, A.Z.; HOLANDA, J.N.F. Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. *Revista Matéria*. V.18, N.04, 2013, pág. 1442-1450.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. e LINS, F. F. (editores). Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil, CETEM, 2001, 398 p.

SAKIR, S.; RAMAN, S.N.; SAFFIUDIN, M.; KAISH, A.B.M.A.; MUTALIB, A.A. Utilization of By-Products and Wastes as Supplementary Cementitious Materials in Structural Mortar for Sustainable Construction. *Sustainability*, v. 12, p. 3888, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12093888>

SHAFIGH, P.; ASADI, I.; AKHIANI, A. R.; MAHYUDDIN, N. B.; HASHEMI, M. Thermal properties of cement mortar with different mix proportions. *Materiales de Construcción*, [S. l.], v. 70, n. 339, p. e224, 2020. DOI: 10.3989/mc.2020.09219.

SENEFF, L. BARBETTA, P. REPETTE, W. HOTZA, D. PAIVA, H. FERREIRA, V. LABRINCHA, J. Mortar composition defined according to rheometer and flow table tests using factorial designed experiments, *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 10, 2009, Pages 3107-3111, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.028>.

SILVA, D. A. Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de Cimento Portland. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2001. 263p.

SILVA, E; DE MATOS, R. Patologia do concreto: fissuras. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 10, n. 10, p. 3679-3696, 2024.

SILVA, R. BRITO, J. DHIR, R. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes, *Construction and Building Materials*, Volume 105, 2016, Pages 400-415, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.171>.

SILVEIRA, L. L. L.; VIDAL, F. W. H.; SOUZA, J. C. Beneficiamento de rochas ornamentais. In: *Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. Cap.7, p.329-398.

SIMAO, L. TRAMONTIN, M. SOUZA, M RIBEIRO, M. MONTEDO, K. HOTZA, D. NOVAIS, R. PEREIRA, F. Assessment of the recycling potential of stone processing plant wastes based on physicochemical features and market opportunities, *Journal of Cleaner Production*, Volume 319, 2021, 128678, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128678>.

SINGH, S. KHAN, S. KHANDELWAL, R. CHUGH, A. NAGAR, R. Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. *Journal of Cleaner Production*, Volume 119, 2016, Pages 86-98, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.008>.

SEYMOUR LM, MARAGH J, SABATINI P, DI TOMASO M, WEAVER JC, MASIC A. Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. *Sci Adv*. Jan 6; v. 9. doi: 10.1126/sciadv.add1602.

SMITH, D.S., AIZINA, A., BOURRETt, J. Thermal conductivity of porous materials. *Journal of Materials Research* **28**, 2260–2272 (2013). <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.179>

SYED AHMED KABEER, K. I.; VYAS, Ashok Kumar. Utilization of marble powder as

fine aggregate in mortar mixes. *Construction and Building Materials*, v. 165, p. 321-332, 2018. ISSN 0950-0618.

SOCOLOSKI, R. F. Indicadores para Avaliação de Anomalias em Fachadas com Revestimento de Argamassa. 2021. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

SOUSA, A. A. P. ; RODRIGUES, R. Consumo dos principais insumos do desdobramento de granitos do Nordeste, de diferentes grau de dureza. In: III Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2002, Recife/PE. III Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2002.

SOUZA, E. .; AMORIM SENA SOUZA, G. .; FERREIRA DA SILVA, I. .; SANTOS TATTO , K. .; DE CERQUEIRA LUZ, P. A. Estudo de caso da ruptura da barragem de Fundão (Mariana-MG). *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, [S. l.], v.21, n.1, p.92–117, 2022.

SONG, W. WANG, Q. QU, L. LI, X. XU, S. Study of water absorption and corrosion resistance of the mortar with waste marble powder, *Construction and Building Materials*, Volume 345, 2022, 128235, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128235>.

SPYCHAL E, DACHOWSKI R. The Influence of Hydrated Lime and Cellulose Ether Admixture on Water Retention, Rheology and Application Properties of Cement Plastering Mortars. *Materials (Basel)*. 2021;14(19):5487. Published 2021 Sep 23. doi:10.3390/ma14195487.

STOLZ, C. MASUERO, A. PAGNUSSAT, D. KIRCHHEIM, A. Influence of substrate texture on the tensile and shear bond strength of rendering mortars, *Construction and Building Materials*, Volume 128, 2016, Pages 298-307, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.097>.

THOMAZ, E. Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação. São Paulo: Pini, 1989

TRISTÃO, F. A. Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento. Florianópolis, 1995. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

UYGUNOGLU, Y. SIMSEK, B. CERAN, O. ERYESIL, O. Novel hybrid fiber reinforced mortar production using polyvinyl alcohol with a blend of graphene oxide and silver

nanoparticles, *Journal of Building Engineering*, Volume 44, 2021, 102641, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102641>.

VARDHAN, Kirti; SIDDIQUE, Rafat; GOYAL, Shweta. Resistência, permeabilidade e características microestruturais do concreto incorporando resíduos de mármore. *Construction and Building Materials*, v. 203, p. 45-55, 2019. ISSN 0950-0618.

VIEIRA, Ardalla; DUARTE, Lauren. Reaproveitamento de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais: o design como ferramenta de valorização. *ENSUS*, [S. l.], v. 3, p. 71-82, 16 mar. 2021.

VIDAL, F. W. H. et al. Lavra de rochas ornamentais. In: *Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. Cap.4, p.155-257.

VIDAL, Francisco; VIEIRA, Geilma; VAZZOLER, Janaína. *NORMATIZAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM ARTEFATOS DE CERÂMICA VERMELHA E À BASE DE CIMENTO PORTLAND*. Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, [S. l.], p. 1-18, 21 nov. 2018.

VITTI, P. Mortars and masonry — structural lime and gypsum mortars in antiquity and Middle Ages. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12520-021-01408-y>

VITORINO, Stefane Jardim. *DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA COLANTE POLIMERIZADA PARA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS EM FACHADAS*. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2019.

YANG, B. BERNARD, S. BERNARD, F. Microstructure, tensile strength and shear strength of aggregate-mortar interface: Effect of aggregate mineralogy, *Construction and Building Materials*, Volume 388, 2023, 131721, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131721>.

ZANELATO, E. ALEXANDRE, J. AZEVEDO, A. MARVILA, M. Evaluation of roughcast on the adhesion mechanisms of mortars on ceramic substrates. *Materials and Structures*. v. 52, 2019. [10.1617/s11527-019-1353-x](https://doi.org/10.1617/s11527-019-1353-x).

ZHOU, J., CHEN, X., WU, L. et al. Influence of free water content on the compressive mechanical behaviour of cement mortar under high strain rate. *Sadhana* 36, 357–369 (2011). <https://doi.org/10.1007/s12046-011-0024-6>

APÊNDICES

APÊNDICE A

RESULTADOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

Tabela A.1 – Resultados do ensaio de densidade de massa

Densidade				
Traço	Recipiente cheio	Recipiente vazio	Volume	Densidade de massa (kg/m ³)
REF	1708,3	892	400	2040,8
S20	1725,2	892	400	2083,0
S40	1715,4	892	400	2058,5
S60	1705,3	893	400	2030,8
S80	1699,5	893	400	2016,3
S100	1690,2	892	400	1995,5

Tabela A.2 – Resultados do ensaio de retenção de água

Retenção de água							
Traço	Conjunto com argamassa	Conjunto vazio	Conjunto após a sucção	massa total de água	massa de argamassa	AF	Retenção de água (%)
REF	1717	607	1711	286	1500	0,1601343785	96,62
S20	1760	608	1752	282	1500	0,1582491582	95,61
S40	1747	609	1739	292	1500	0,1629464286	95,69
S60	1747	605	1740	323	1500	0,1771804717	96,54
S80	1720	606	1713	347	1500	0,1878722252	96,66
S100	1719	605	1712	370	1500	0,1978609626	96,82

APÊNDICE B

RESULTADOS DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO E CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Tabela B.1 – Resultados do ensaio de densidade de massa

Densidade								
REF	l	h	c	v	m	densidade	média	Desvio padrão (kg/m ³)
c1	4,05	4,05	16	262,44	486,9	1855,28	1881,7	24,41
c2	4	3,95	16	252,8	483,9	1914,16		
c3	4,05	4	16	259,2	486,2	1875,77		
S20	l	h	c	v	m	densidade	média	Desvio padrão (kg/m ³)
c1	4	3,95	16	252,8	489,7	1937,10	1933,1	9,26
c2	4	4	16	256	491,6	1920,31		
c3	4	3,9	16	249,6	484,7	1941,91		
S40	l	h	c	v	m	densidade	média	Desvio padrão (kg/m ³)
c1	4	3,95	16	252,8	488	1930,38	1887,1	34,99
c2	4,05	4,1	16	265,68	490,1	1844,70		
c3	4	3,95	16	252,8	476,8	1886,08		
S60	l	h	c	v	m	densidade	média	Desvio padrão (kg/m ³)
c1	4	4,1	16	262,4	472,9	1802,21	1831,3	20,57
c2	4	4,1	16	262,4	484,3	1845,66		

c3	4	4,1	16	262,4	484,4	1846,04		
S80	l	h	c	v	m	densidade	média	Desvio padrão (kg/m ³)
c1	4	4,1	16	262,4	474,8	1809,45	1804,7	3,40
c2	4,05	4,05	16	262,44	472,8	1801,55		
c3	4,05	4	16	259,2	467,4	1803,24		
S100	l	h	c	v	m	densidade	média	Desvio padrão (kg/m ³)
c1	4	4,05	16	259,2	452,2	1744,60	1763,4	14,98
c2	4	3,95	16	252,8	450,3	1781,25		
c3	4,05	4	16	259,2	457,3	1764,27		

Tabela B.2 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade

Absorção de água por capilaridade						
REF	m0	m10	m90	Coefficiente de capilaridade C (g/dm ² .min ^{1/2})	Média	Desvio Padrão
c1	487,52	495,27	506,48	11,21	9,76	1,0
c2	496,53	501,93	510,76	8,83		
c3	494,58	501,4	510,64	9,24		
S20	m0	m10	m90	Coefficiente de capilaridade C (g/dm ² .min ^{1/2})	Média	Desvio Padrão
c1	512,43	515,94	521,62	5,68	5,70	0,3
c2	496,74	500,98	507,06	6,08		
c3	504,16	509,07	514,41	5,34		
S40	m0	m10	m90	Coefficiente de capilaridade C (g/dm ² .min ^{1/2})	Média	Desvio Padrão

c1	484,6	488,75	496	7,25	6,38	0,9
c2	499,36	504,42	511,23	6,81		
c3	494,4	498,55	503,63	5,08		
S60	m0	m10	m90	Coefficiente de capilaridade C (g/dm ² .min ¹²)	Média	Desvio Padrão
c1	478,14	484,22	491,48	7,26	7,54	0,3
c2	482,39	486,4	493,79	7,39		
c3	486,87	490,81	498,79	7,98		
S80	m0	m10	m90	Coefficiente de capilaridade C (g/dm ² .min ¹²)	Média	Desvio Padrão
c1	472,37	477,02	485,5	8,48	8,14	0,3
c2	474,57	479,81	487,62	7,81		
c3	462,94	469,09	477,21	8,12		
S100	m0	m10	m90	Coefficiente de capilaridade C (g/dm ² .min ¹²)	Média	Desvio Padrão
c1	456,53	463,02	473,03	10,01	10,26	0,2
c2	445,85	451,72	462,0	10,3		
c3	448,01	453,26	463,76	10,5		

Tabela B.3 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios

REF	ms	msat	mi	A %	média	desvio padrão (%)	lv %	média	desvio padrão (%)
c1	470,67	536,9	264,5	14,07	13,91	0,09	24,31	24,31	0,29
c2	474,31	540,3	269,1	13,91			24,33		

c3	471,33	536,6	261,4	13,85			23,72		
S20	ms	mi	msat	A %	média	desvio padrão (%)	lv %	média	desvio padrão (%)
c1	478,54	544,4	267,8	13,76	13,76	0,19	23,81	23,81	0,24
c2	475,67	540,3	267,1	13,59			23,66		
c3	472,8	539,2	265,2	14,04			24,23		
S40	ms	mi	msat	A %	média	desvio padrão (%)	lv %	média	desvio padrão (%)
c1	463,04	531,4	254,3	14,76	14,76	0,01	24,67	24,73	0,08
c2	467,86	537	258,9	14,78			24,86		
c3	463,86	532,3	255,6	14,75			24,73		
S60	ms	mi	msat	A %	média	desvio padrão (%)	lv %	média	desvio padrão (%)
c1	453,24	527,1	254,9	16,30	16,30	0,24	27,13	27,13	0,46
c2	448,2	522,6	252,3	16,60			27,52		
c3	453,08	525,6	251,1	16,01			26,42		
S80	ms	mi	msat	A %	média	desvio padrão (%)	lv %	média	desvio padrão (%)
c1	435,56	513,6	239,5	17,92	17,88	0,06	28,47	28,47	0,12
c2	438,4	516,3	240,6	17,77			28,26		
c3	438,42	516,8	242	17,88			28,52		
S100	ms	mi	msat	A %	média	desvio padrão (%)	lv %	média	desvio padrão (%)
c1	431,02	514,4	243,3	19,34	19,34	0,12	30,76	30,55	0,24
c2	428,21	511,3	239,3	19,40			30,55		
c3	423,17	504,1	236	19,12			30,19		

Tabela B.4 – Resultados do ensaio de resistência à compressão e resistência à tração na flexão

REF	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	Resistência a tração na flexão (MPa)	Média	Desvio Padrão
c1	9,03	10,53	1,06	3,79	3,57	0,20
c2	11,28			3,31		
c3	11,28			3,62		
S20	Rc	Média	Desvio Padrão	Rf	Média	Desvio Padrão
c1	14,23	14,88	0,47	3,73	3,48	0,18
c2	15,09			3,42		
c3	15,33			3,29		
S40	Rc	Média	Desvio Padrão	Rf	Média	Desvio Padrão
c1	15,53	15,18	0,25	3,51	3,58	0,09
c2	15,04			3,52		
c3	14,98			3,7		
S60	Rc	Média	Desvio Padrão	Rf	Média	Desvio Padrão
c1	17,33	17,12	0,30	3,5	3,30	0,22
c2	17,34			3		
c3	16,7			3,4		
S80	Rc	Média	Desvio Padrão	Rf	Média	Desvio Padrão
c1	15,58	15,22	0,36	2,9	3,17	0,23
c2	15,35			3,47		
c3	14,72			3,13		
S100	Rc	Média	Desvio Padrão	Rf	Média	Desvio Padrão
c1	12,74	13,30	0,40	3,07	3,05	0,13

c2	13,53			3,2		
c3	13,62			2,88		

Tabela B.5 – Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração

Determinação de Resistência à tração								
Traço	Corpo de prova			Carga de ruptura N	Tensão MPa	média	Desvio Padrão	Tipo de ruptura
	Nº	Diâmetro (d) mm	Área mm ²					
REF	1,000	44,000	1520,531	500,000	0,329	0,374	0,033	B
REF	2,000	44,000	1520,531	580,000	0,381			B
REF	3,000	44,000	1520,531	510,000	0,335			B
REF	4,000	44,000	1520,531	600,000	0,395			B
REF	5,000	44,000	1520,531	530,000	0,349			B
REF	6,000	44,000	1520,531	660,000	0,434			B
REF	7,000	44,000	1520,531	630,000	0,414			B
REF	8,000	44,000	1520,531	590,000	0,388			B
REF	9,000	44,000	1520,531	560,000	0,368			B
REF	10,000	44,000	1520,531	610,000	0,401			B
REF	11,000	44,000	1520,531	500,000	0,329			B
REF	12,000	44,000	1520,531	550,000	0,362			B
S20	13,000	44,000	1520,531	630,000	0,414	0,406	0,028	B
S20	14,000	44,000	1520,531	650,000	0,427			B
S20	15,000	44,000	1520,531	670,000	0,441			B
S20	16,000	44,000	1520,531	580,000	0,381			B
S20	17,000	44,000	1520,531	590,000	0,388			B
S20	18,000	44,000	1520,531	690,000	0,454			B

S20	19,000	44,000	1520,531	630,000	0,414			B
S20	20,000	44,000	1520,531	550,000	0,362			B
S20	21,000	44,000	1520,531	670,000	0,441			B
S20	22,000	44,000	1520,531	580,000	0,381			B
S20	23,000	44,000	1520,531	590,000	0,388			B
S20	24,000	44,000	1520,531	580,000	0,381			B
S40	25,000	44,000	1520,531	570,000	0,375			B
S40	26,000	44,000	1520,531	580,000	0,381			B
S40	27,000	44,000	1520,531	510,000	0,335			B
S40	28,000	44,000	1520,531	580,000	0,381			B
S40	29,000	44,000	1520,531	490,000	0,322			B
S40	30,000	44,000	1520,531	520,000	0,342			B
S40	31,000	44,000	1520,531	550,000	0,362			B
S40	32,000	44,000	1520,531	530,000	0,349			B
S40	33,000	44,000	1520,531	600,000	0,395			B
S40	34,000	44,000	1520,531	540,000	0,355			B
S40	35,000	44,000	1520,531	570,000	0,375			B
S40	36,000	44,000	1520,531	600,000	0,395			B
S60	37,000	44,000	1520,531	550,000	0,362			B
S60	38,000	44,000	1520,531	540,000	0,355			B
S60	39,000	44,000	1520,531	520,000	0,342			B
S60	40,000	44,000	1520,531	530,000	0,349			B
S60	41,000	44,000	1520,531	530,000	0,349			B
S60	42,000	44,000	1520,531	500,000	0,329			B
S60	43,000	44,000	1520,531	560,000	0,368			B
S60	44,000	44,000	1520,531	550,000	0,362			B
						0,364	0,023	
						0,347	0,012	

S60	45,000	44,000	1520,531	520,000	0,342			B
S60	46,000	44,000	1520,531	530,000	0,349			B
S60	47,000	44,000	1520,531	510,000	0,335			B
S60	48,000	44,000	1520,531	500,000	0,329			B
S80	49,000	44,000	1520,531	520,000	0,342			B
S80	50,000	44,000	1520,531	500,000	0,329			B
S80	51,000	44,000	1520,531	520,000	0,342			B
S80	52,000	44,000	1520,531	530,000	0,349			B
S80	53,000	44,000	1520,531	520,000	0,342			B
S80	54,000	44,000	1520,531	500,000	0,329			B
S80	55,000	44,000	1520,531	550,000	0,362			B
S80	56,000	44,000	1520,531	500,000	0,329			B
S80	57,000	44,000	1520,531	510,000	0,335			B
S80	58,000	44,000	1520,531	500,000	0,329			B
S80	59,000	44,000	1520,531	470,000	0,309			B
S80	60,000	44,000	1520,531	520,000	0,342			B
S100	61,000	44,000	1520,531	450,000	0,296			B
S100	62,000	44,000	1520,531	480,000	0,316			B
S100	63,000	44,000	1520,531	440,000	0,289			B
S100	64,000	44,000	1520,531	450,000	0,296			B
S100	65,000	44,000	1520,531	460,000	0,303			B
S100	66,000	44,000	1520,531	470,000	0,309			B
S100	67,000	44,000	1520,531	480,000	0,316			B
S100	68,000	44,000	1520,531	470,000	0,309			B
S100	69,000	44,000	1520,531	440,000	0,289			B
S100	70,000	44,000	1520,531	460,000	0,303			B
						0,337	0,013	
						0,302	0,011	

S100	71,000	44,000	1520,531	480,000	0,316			B
S100	72,000	44,000	1520,531	430,000	0,283			B

Tabela B.6 – Resultados do ensaio de condutividade térmica