

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

BIANCA CARLIN CADORE

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DA RECICLAGEM DE LAMA DO BENEFICIAMENTO
DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM ARGAMASSAS COLANTES**

São Leopoldo

2024

BIANCA CARLIN CADORE

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA RECICLAGEM DE LAMA DO BENEFICIAMENTO
DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM ARGAMASSAS COLANTES

Defesa final apresentado(a) como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador(a): Prof.^a Dra. Regina Célia Espinosa Modolo

Co-orientador(a): Prof.^a Dra. Fernanda Pacheco

São Leopoldo

2024

C125a Cadore, Bianca Carlin.
Análise de viabilidade da reciclagem de lama do beneficiamento de rochas ornamentais em argamassas colantes / Bianca Carlin Cadore. – 2024.
122 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

“Orientadora: Profa. Dra. Regina Célia Espinosa
Mosolo

Coorientadora: Profa. Dra. Fernanda Pacheco”

1. Argamassas colantes. 2. Lama. 3. Polimento. 4. Resíduos sólidos. 5. Rochas ornamentais. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O Brasil destaca-se no âmbito de produção de rochas ornamentais, sendo esse setor responsável por uma quantidade expressiva de resíduos sólidos, entre eles a lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO), produzida a partir do corte e polimento das peças. O objetivo geral dessa pesquisa consiste em avaliar o potencial uso da lama do beneficiamento de rochas ornamentais como material alternativo na produção de argamassas colantes, empregado na substituição do teor de finos do agregado miúdo. A metodologia adotada envolve três etapas, sendo elas: amostragem, tratamento e caracterização da lama e dos demais materiais; elaboração dos traços desenvolvidos, sendo proposto um traço referência e três com substituição da fração fina do agregado miúdo e, a caracterização das argamassas colantes produzidas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Destacam-se os ensaios de caracterização realizados no resíduo sólido: granulometria a laser, área superficial específica, picnometria a gás hélio, difração de raios-x, fluorescência de raios-x e pozolanicidade pelo método R³. Com relação aos ensaios no estado fresco, foram realizados testes de índice de consistência (ABNT NBR 13276:2016), densidade de massa e teor de ar incorporado (ABNT NBR 13278:2016), retenção de água (ABNT NBR 13277:2016), deslizamento (ABNT NBR 14081-5:2012), tempo em aberto (ABNT NBR 14081-3:2012) e poder molhante e transferência (EN 1347:2007). No estado endurecido, destacam-se os testes de resistência de aderência à tração (ABNT NBR 14081-4:2012) aos 28 dias e envelhecimento acelerado, iniciado após os 28 dias de cura ambiente, sendo mantido em ciclo durante 14 dias.

Os resultados indicam que nenhum dos traços com substituição superou os resultados obtidos pela referência, que atingiu resultados acima do mínimo de 0,50 MPa para as três condições de norma, indicando que o resíduo não trouxe melhoras nas propriedades. O traço de 20%LBRO obteve resultados de 0,68, 0,41 e 0,08 MPa, respectivamente para ambiente, submersa e estufa, mostrando que na última condição ocorreu algum erro de ensaio. Já no traço 60%LBRO, os resultados foram de 0,48, 0,55 e 0,29 MPa.

Pela análise estatística, excluindo-se o traço 100%LBRO, os demais apresentaram resultados para normalidade satisfatórios, além de indicarem uma tendência com relação aos maiores resultados, sendo ambiente, tempo em aberto, submerso e estufa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Hierarquia do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos	22
Figura 2 – Esquema referente ao resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais. (LBRO G - lama abrasiva utilizada na etapa de corte em teares convencionais; LBRO D - lama resultante do corte com fios diamantados e do processo de polimento)	25
Figura 3 – Forças atuantes no deslizamento da argamassa colante	40
Figura 4 – Eficiência do contato argamassa colante/placa cerâmica: (a) Argamassa muito viscosa; (b) Argamassa com viscosidade adequada; (c) Argamassa muito fluida	40
Figura 5 – Fatores que influenciam a aderência	42
Figura 6 – Representação esquemática do sistema de revestimento cerâmico.....	44
Figura 7 – Organograma das etapas da metodologia	48
Figura 8 – Pontos de coleta dos resíduos – (a) Empresa de São Leopoldo;	53
Figura 9 - Liberação de calor de hidratação para as misturas de argila calcinada e portlandita sem calcário a 20°C.....	56
Figura 10 – Substrato padrão normatizado	59
Figura 11 – Estruturação do programa experimental	60
Figura 12 – Materiais constituintes do traço – (a) Antes da homogeneização; (b) Depois da homogeneização	64
Figura 13 – Argamassadeira de bancada utilizada	65
Figura 14 – Mesa de consistência conforme NBR 13276	66
Figura 15 – Densidade de massa conforme NBR 13278	66
Figura 16 – Aparelho de retenção de água conforme NBR 13277	67
Figura 17 – Aparato desenvolvido.....	68
Figura 18 – Aparato montado com a amostra a ser ensaiada.....	68
Figura 19 – Placas em cura ambiente.....	71
Figura 20 – Ensaio de resistência de aderência à tração.....	71
Figura 21 – Tipos de ruptura - Legenda:	72
Figura 22 – Ciclo de temperatura, umidade e duração	73
Figura 23 – Câmara higrotérmica.....	74
Figura 24 – Índice de consistência dos traços.....	77

Figura 25 – Placa de vidro após o teste de transferência de argamassas colantes e área preenchida calculada, sendo considerado 25 cm² de área total)81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição do consumo de argamassa industrializada no Brasil	36
Gráfico 2 – Curva granulométrica do Cimento Portland II F40	49
Gráfico 3 – Distribuição granulométrica da areia.....	51
Gráfico 4 – Curva granulométrica passante 150 µm	51
Gráfico 5 – Resultados do primeiro teste para o ensaio de pozolanicidade (R^3).....	55
Gráfico 6 – Resultados oficiais do ensaio de pozolanicidade (R^3).....	55
Gráfico 7 – Curva granulométrica do resíduo LBRO	57
Gráfico 8 – Difração de raios-X do resíduo LBRO.....	58
Gráfico 9 – Resistência de aderência à tração: Ambiente.....	83
Gráfico 10 – Resistência de aderência à tração: Submerso	84
Gráfico 11 – Resistência de aderência à tração: Estufa.....	85
Gráfico 12 – Resistência de aderência à tração: Tempo em aberto.....	88
Gráfico 13 – Tendência à normalidade dos resultados	89
Gráfico 14 – Dispersão dos resultados	91
Gráfico 15 – Resultados obtidos para cada condição de cura	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição mineralógica dos resíduos.....	28
Quadro 2 – Análise granulométrica	29
Quadro 3 – Síntese de estudos relacionados com a utilização da LBRO em matrizes cimentícias	32
Quadro 4 – Síntese de normas e parâmetros a serem avaliados	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção brasileira por tipo de rochas	15
Tabela 2 – Composição química dos resíduos, em porcentagem.....	26
Tabela 3 – Requisitos da argamassa colante.....	37
Tabela 4 – Características do cimento no mês de Setembro/23.....	49
Tabela 5 – Massa unitária, massa específica e absorção do agregado miúdo: areia	50
Tabela 6 – Distribuição granulométrica agregado miúdo: areia	50
Tabela 7 – Resultado Fluorescência de raios-X quantitativo, em porcentagem.....	58
Tabela 8 – Traço utilizado para o desenvolvimento das argamassas colantes.....	63
Tabela 9 – Índice de consistência e características da moldagem.....	78
Tabela 10 – Massa específica no estado fresco e teor de ar incorporado	78
Tabela 11 – Retenção de água	79
Tabela 12 - Resistência de aderência à tração: Ambiente	83
Tabela 13 - Resistência de aderência à tração: Submerso.....	84
Tabela 14 - Resistência de aderência à tração: Estufa.....	85
Tabela 15 - Resistência de aderência à tração: Câmara higrotérmica.....	86
Tabela 16 – Resultados médios de 28 dias de resistência de aderência à tração	86
Tabela 17 - Resistência de aderência à tração: Tempo em aberto	88
Tabela 18 – Análise de variância	94
Tabela 19 – Médias pareadas.....	95

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

a/c	Relação água cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Argamassa colante
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
cm	Centímetro
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
Gt	Giga tonelada
h	Horas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kg	Quilograma
LBRO	Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais
min	Minutos
mm	Milímetro
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
rpm	Rotações por minuto
s	Segundos
ton	Tonelada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 TEMA	16
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	16
1.3 PROBLEMA	16
1.4 OBJETIVOS	17
1.4.1 Objetivo geral	17
1.4.2 Objetivos específicos.....	17
1.5 JUSTIFICATIVA	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	20
2.2 GERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	21
2.3 ROCHAS ORNAMENTAIS.....	23
2.3.1 Processo de beneficiamento de rochas ornamentais e geração da LBRO	24
2.3.2 Características da LBRO	26
2.3.2.1 Composição química.....	26
2.3.2.3 Composição granulométrica.....	29
2.3.3 Impactos ambientais relacionados ao beneficiamento de rochas ornamentais	29
2.3.4 Estudos relacionados a utilização da LBRO na construção civil.....	31
2.3.5 Influência da utilização da LBRO em matrizes cimentícias	32
2.4 ARGAMASSA COLANTE.....	35
2.4.1 Tempo em aberto	38
2.4.3 Resistência de aderência à tração	41
2.4.3.1 Influência dos componentes da argamassa colante na resistência à aderência	42
2.4.3.2 Influência de agentes externos na resistência à aderência – Durabilidade...	43
2.5 SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO	44
2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	45
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	47

3.1 MATERIAIS	48
3.1.1 Aglomerante	48
3.1.2 Agregado miúdo	49
3.1.3 Água	52
3.1.3 Aditivos	52
3.1.3.1 Aditivo polimérico	52
3.1.3.2 Aditivo à base de éter de celulose.....	52
3.1.4 Lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO).....	52
3.1.4.1 Amostragem e homogeneização.....	52
3.1.4.2 Determinação da pozolanicidade pelo método R ³	54
3.1.4.3 Caracterização	56
3.1.5 Substrato padrão.....	59
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	60
3.2.1 Análise e granulométrica	60
3.2.2 Massa unitária	61
3.2.3 Massa específica	61
3.2.4 Área superficial por BET.....	61
3.2.5 Fluorescência de raios -X.....	62
3.2.6 Difração de raios -X.....	62
3.3 REPRODUÇÃO DA ARGAMASSA COLANTE	62
3.4 ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO	65
3.4.1 Ensaio de índice de consistência	65
3.4.2 Ensaio de densidade e teor de ar	66
3.4.3 Retenção de água.....	67
3.4.4 Ensaio de determinação do deslizamento	67
3.4.5 Poder molhante e transferência	69
3.5 ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	70
3.5.1 Ensaio de determinação do tempo em aberto	70
3.5.2 Ensaio de determinação da resistência de aderência à tração	70
3.5.3 Envelhecimento acelerado – exposição térmica	73
3.6 SÍNTESE DE NORMAS E PARÂMETROS	74
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	75
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
4.1 ESTADO FRESCO.....	77

4.1.1 Índice de consistência	77
4.1.2 Densidade e teor de ar	78
4.1.3 Retenção de água	79
4.1.4 Determinação do deslizamento	80
4.1.5 Poder molhante	80
4.2 ESTADO ENDURECIDO	82
4.2.1 Determinação da resistência de aderência à tração	82
4.2.1.1 Condição – Ambiente	82
4.2.1.2 Condição – Submerso	84
4.2.1.3 Condição – Estufa	85
4.2.1.4 Câmara higrotérmica	86
4.2.2 Determinação do tempo em aberto	88
4.3.1 Análise estatística	89
5. CONCLUSÃO	97
REFERÊNCIAS	100
APÊNDICE A - FOTOGRAFIAS DOS TIPOS DE RUPTURA DAS AMOSTRAS EM CONDIÇÃO AMBIENTE	111
APÊNDICE B - FOTOGRAFIAS DOS TIPOS DE RUPTURA DAS AMOSTRAS EM CONDIÇÃO SUBMERSA	114
APÊNDICE C - FOTOGRAFIAS DOS TIPOS DE RUPTURA DAS AMOSTRAS EM CONDIÇÃO ESTUFA	117
APÊNDICE D - FOTOGRAFIAS DOS TIPOS DE RUPTURA DAS AMOSTRAS PARA O TEMPO EM ABERTO	120

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha um papel crucial na economia do Brasil, porém, é também uma das principais causadoras de impactos ambientais que levam a degradação de áreas. No Brasil, a degradação provocada pelo setor ocorre em três estágios distintos: durante a extração e produção de materiais, durante a fase de construção e no descarte dos resíduos gerados pelo processo (ROTH; GARCIAS, 2009).

A produção do cimento Portland é considerada uma prática potencialmente poluidora, pelo fato da geração de elevado volume de dióxido de carbono (CO₂) durante as fases de calcinação, queima de combustível e uso de eletricidade (LOPES; DOS SANTOS, 2018). Ainda, o cimento é o considerado o maior produto fabricado na Terra, em termos de massa e, é a segunda substância mais utilizada no mundo, depois da água (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Várias tentativas foram feitas para reduzir as emissões de CO₂ provenientes da indústria de cimento; contudo, apesar de a maioria dessas estratégias ser tecnicamente viável, devido a várias barreiras, o grau de mitigação de CO₂ no setor ainda não atingiu um nível satisfatório (BENHELAL; SHAMSAEI; RASHID, 2021).

Além da indústria cimentícia, de acordo com dados publicados pela Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC, 2021), no ano de 2022 a demanda foi de 640 milhões de toneladas de agregados, correspondendo 374 milhões de toneladas de areia e 266 milhões de toneladas de brita e, para 2023, estima-se um crescimento de 3%.

Ramadon (2021) considera a extração de areia uma das práticas mais nocivas, sendo responsável pela poluição e alteração de cursos hídricos, aumento do assoreamento, erosão do solo e destruição de áreas de preservação permanente. A areia natural, especificamente a areia de rio, serve como um material de construção amplamente utilizado, ultrapassando 5 bilhões de toneladas por ano, tornando-se um recurso cada vez mais escasso (LI *et al.*, 2022).

Tendo em vista que o Brasil é classificado como o 3º principal produtor mundial de revestimentos cerâmicos e o 3º principal consumidor, segundo dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres (ANFACER, 2022), a argamassa colante acaba se tornando um produto indispensável para o processo de fixação. Considerando que a argamassa

colante industrializada é composta basicamente por cimento Portland, agregados minerais e aditivos químicos (VANDERLIND; SPECK, 2012), se faz necessária a busca por alternativas a fim de minimizar os impactos ambientais do produto.

Dentre as práticas que podem ser adotadas para mitigar os impactos negativos que o setor da construção civil oferece está a reciclagem de resíduos sólidos. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos nessa área ao longo dos anos, podendo ser citados os resíduos cerâmicos, resíduos do processo de laminação do vidro, lama do beneficiamento de rochas ornamentais, lama de carbonato de cálcio (CaCO_3), cinza volante, cinza de casca de arroz, cinza de combustão de biomassa, entre outros (CADORE *et al.*, 2023; EHRENBRING *et al.*, 2020, LIMA *et al.*, 2022; MODOLO *et al.*, 2021; PEREIRA *et al.*, 2023).

Tratando-se especificamente do setor de rochas, o Brasil ocupa a 5ª posição como produtor e exportador mundial, sendo um importador pouco expressivo (ABIROCHAS, 2021). Dentre os principais estados produtores destacam-se o Espírito Santo e Minas Gerais (ABIROCHAS, 2023). Ainda, a Tabela 1 ilustra a produção por tipo de rochas.

Tabela 1 – Produção brasileira por tipo de rochas

Tipo de rocha	Produção (Mt)	Participação (%)
Granito e similares	4,0	40
Mármore e travertino	2,8	28
Quartzito maciço	1,9	19
Ardósia	0,4	4
Quartzito foliado	0,2	2
Pedra Miracema	0,2	2
Outros	0,5	5
Total	10,0	100

Fonte: Adaptada de Abirochas (2023, p. 15).

A geração de resíduos sólidos pelo setor de beneficiamento de rochas é relevante, levando em consideração as grandes quantidades geradas e a concentração em poucos polos industriais. Cerca de 25% a 30% da massa dos blocos que é serrado em placas menores é transformado em pó e incorporado à Lama do

Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) (MATHIELO *et al.*, 2019), que geralmente é descartada.

A incorporação de materiais finos nas argamassas aumenta a densidade da matriz, preenchendo espaços que antes seriam ocupados por ar ou água com partículas sólidas (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). Além de diminuir a quantidade de água livre, devido ao aumento da área superficial da fase sólida (BRAGA; DE BRITO; VEIGA, 2012).

Portanto, o presente estudo propõe a incorporação da LBRO em argamassas colantes, a fim de minimizar os impactos ambientais provenientes da destinação incorreta desse resíduo sólido e potencializar a redução da extração de recursos naturais não renováveis no setor da construção civil.

1.1 TEMA

O presente estudo visa promover a valorização da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), em argamassas colantes, a partir da calcinação e posterior substituição dos finos do agregado miúdo.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente estudo está limitado à caracterização e aplicação da LBRO como substituto da fração fina do agregado miúdo, em argamassa colante, sendo realizados testes em escala laboratorial.

1.3 PROBLEMA

A construção civil é a principal atividade humana responsável por significativos impactos ambientais, demandando uma considerável quantidade de recursos naturais, tais como argila, areia e cascalho, sendo muitas vezes obtidos através de métodos de extração que impactam o ambiente (BRASILEIRO; MATOS, 2015). Tais atividades, desde a extração até o descarte dos materiais, resultam em diversos impactos ambientais significativos.

Por ser um setor que gera uma quantidade significativa de resíduos, acaba levantando preocupações a respeito do tratamento, reciclagem e reutilização desses

materiais. Dentre as soluções conhecidas está a reciclagem de resíduos sólidos que apresentam propriedades promissoras como substituto de algum material usual da matriz cimentícia, como por exemplo, a LBRO, que na maior parte das vezes é descartada de maneira inadequada, sem tratamento prévio (NEVES; RAYMUNDO, 2022).

Considerando o exposto, o problema abordado na pesquisa é: é possível a utilização de LBRO em argamassas colantes sem impactar nas suas propriedades e aplicabilidade?

1.4 OBJETIVOS

Os objetivos do presente estudo dividem-se em objetivo geral e objetivos específicos.

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar o potencial da reciclagem da LBRO como material alternativo na produção de argamassas colantes, substituindo o teor de finos do agregado miúdo.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) avaliar, pelo método R^3 , a pozolanicidade da LBRO após a calcinação;
- b) caracterizar quimicamente a LBRO após a calcinação;
- c) avaliar as características físicas, pelos ensaios no estado fresco de consistência, densidade, teor de ar, retenção de água, deslizamento e poder molhante, e, o desempenho mecânico pelos ensaios de resistência de aderência à tração de argamassas colantes produzidas com LBRO calcinada;
- d) avaliar a durabilidade do sistema pelo ensaio em câmara higrotérmica;
- e) validar os resultados obtidos a partir da metodologia estatística (análise de normalidade, ANOVA e teste de Tukey).

1.5 JUSTIFICATIVA

O ramo da construção civil apresenta práticas consideradas insustentáveis. Nesse sentido, pode se citar o grande consumo de recursos naturais, a geração de grandes quantidades de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e, a produção de resíduos sólidos. De acordo com Hoornweg e Bhada-Tata (2012), estima-se que até o ano de 2025 as cidades devam gerar 2,2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos ao ano, representando um aumento de 70% em comparação aos 1,3 bilhões reportados para o ano de 2012. Atrelado a isso, está a falta de locais adequados para o descarte dos resíduos gerados, especialmente nos centros urbanos (SOUZA *et al.*, 2004). Segundo Piovesan (2016), os problemas associados à disposição inadequada desses resíduos no meio ambiente podem ser graves e irreparáveis.

Além disso, o setor é responsável pela elevada demanda de energia na produção de bens, seja para a extração ou transporte e processamento, resultando em situações de risco com uma variedade de consequências significativas, tais como a elevação da vulnerabilidade dos lençóis freáticos e dos corpos d'água nas proximidades, danos às estruturas e vias adjacentes, deterioração da qualidade do ar devido a ruídos e poluição, bem como problemas de saúde derivados da disposição de resíduos, impactando diretamente as comunidades locais (ROTH; GARCIAS, 2009).

Levando em consideração a sustentabilidade, segundo Rodrigues *et al.* (2013), para minimizar o impacto ambiental das edificações, uma solução eficaz seria reduzir o consumo de agregados naturais e empregar os resíduos gerados pela construção civil como substitutos dos materiais primários. Essa abordagem não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também resulta em economia financeira durante a obra.

De acordo com Neves e Raymundo (2022), o processo de beneficiamento de rochas ornamentais faz uso de uma lama acrescida de granalha de aço, cal e água, chamada tecnicamente de Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), a qual apresenta granulometria fina. Para dos Reis e de Alvarez (2006), essa LBRO serve para proteger as lâminas contra oxidação, lubrificar e esfriar; além disso, facilita o processo de corte e limpeza dos canais. Quando a lama torna-se muito viscosa é descartada, tornando-se um resíduo sólido. Segundo Sato, Galina e Teixeira (2018), frequentemente, esses resíduos sólidos são descartados em lagoas de decantação

ou aterros e, muitas vezes, não passam por um processo de tratamento para eliminar ou reduzir os poluentes presentes, como por exemplo, graxa e óleos residuais provenientes dos equipamentos.

No estudo de Gado (2022), o resíduo sólido de mármore e granito foi incorporado em argamassas colantes como substituto da areia, em teores de 0% a 30%, com incrementos de 5%. Com base nos resultados experimentais obtidos, a porcentagem ótima situou-se na faixa de 10% a 15%, apresentando melhorias na trabalhabilidade, tempo de pega, resistência ao deslizamento e resistência à tração em diferentes condições de cura.

Uliana *et al.* (2015) estudaram o desempenho da lama do beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico e moagem, analisando o potencial de aplicação como substituto parcial do cimento. Dois dos quatro tratamentos mostraram-se efetivos, sendo eles, 1200 °C, com resfriamento lento e em mufla e, 1500 °C, com resfriamento rápido em forno tubular.

Com base no exposto, esta pesquisa tem como justificativa potencializar a mitigação de impactos ambientais provenientes da destinação incorreta da LBRO, como por exemplo, assoreamento de corpos hídricos. Sendo assim, a proposta foi reciclar resíduo sólido, com a intenção de desenvolver um material capaz de ser empregado em matrizes cimentícias, proporcionando melhoras ou mesmo mantendo as características necessárias por Norma.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por finalidade apresentar uma revisão bibliográfica sobre os materiais componentes do estudo, a argamassa colante e a Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO). Além disso, apresentam-se características gerais e propriedades da argamassa colante, bem o uso de resíduos sólidos em materiais de construção, especialmente em matrizes cimentícias. O objetivo deste capítulo é estabelecer uma base para a análise dos resultados obtidos no estudo.

2.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Apesar de a sociedade encontrar-se em elevado desenvolvimento tecnológico e econômico, apresenta sérios problemas no que diz respeito a falta de matérias-primas, altos níveis de poluentes, aquecimento global, uso de combustíveis fósseis, entre outros (SAINT JEAN; LONGO; LIMA, 2022).

O setor da construção civil apresenta maior e mais rápido crescimento no mundo devido ao aumento da população, busca por qualidade de vida e maior demanda por infraestrutura (ALSHEYAB, 2022). Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2021, o setor da construção civil cresceu 9,7%, ficando acima do crescimento total do país, que foi de 4,6% (CBIC, 2022). De acordo com o *2022 Global Status Report*, apesar de um aumento considerável no investimento e sucesso a nível global na redução da intensidade energética dos edifícios, o consumo total de energia do setor e as emissões de CO₂ aumentaram em 2021 acima dos níveis pré-pandemia (*UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME*, 2022).

A indústria da construção é uma das atividades humanas que mais utiliza recursos naturais, estima-se que entre 40% e 75% dos recursos naturais disponíveis sejam consumidos por esse setor em âmbito internacional, o que resulta em uma significativa geração de resíduos sólidos. Apenas no Brasil, a construção é responsável por 25% do total (MATTES, 2019).

A falta de uma gestão adequada dos resíduos sólidos industriais em relação à sua destinação, transporte, descarte e armazenamento pode resultar em graves riscos ambientais e impactos prejudiciais na saúde humana. É essencial implementar

medidas eficazes para prevenir danos significativos ao meio ambiente e à saúde da população.

Nesse contexto, torna-se evidente a importância do estudo da sustentabilidade no setor da construção civil, uma vez que as instituições estão cada vez mais conscientes de que assegurar uma vantagem competitiva não se baseia apenas na satisfação do cliente em relação a custos baixos e qualidade do produto ou serviço oferecido (LIMA *et al.*, 2021). Além de superar as expectativas dos clientes oferecendo produtos de qualidade, as empresas precisam respeitar o meio ambiente, serem éticas e demonstrar responsabilidade social (ALENCAR; PRIORI JÚNIOR; ALENCAR, 2017). Para Roque e Pierri (2018), a partir da exigência do mercado e crescimento da concorrência, produzir de modo sustentável se tornou um diferencial competitivo, sendo necessário aplicar os princípios de sustentabilidade desde a concepção de um projeto.

A norma de desempenho NBR 15575-1 (ABNT, 2024) define como quesitos de sustentabilidade a durabilidade e a manutenibilidade do sistema. A durabilidade diz respeito a capacidade do sistema de desempenhar sua função ao longo do tempo, considerando uso e manutenção adequada, já a manutenibilidade consiste em qualificar um sistema de uma edificação quanto à sua facilidade de manutenção. No que diz respeito a vida útil de projeto, tem-se para sistemas de vedação vertical interna e externa, as idades de, respectivamente, 40 e 20 anos. Dentre as maneiras de implantar a sustentabilidade na construção civil, destaca-se a reciclagem de resíduos sólidos, tema principal desse trabalho.

2.2 GERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Desde o início de suas atividades, o setor da construção civil atua de maneira artesanal, resultando na elevada produção de resíduos sólidos que provêm de diversas naturezas (LINTZ *et al.*, 2012), sendo majorado pelo aumento da quantidade de obras nas cidades, afetando negativamente a qualidade de vida das comunidades devido à geração e ao descarte inadequado desses resíduos (ALENCAR *et al.*, 2022).

Os resíduos sólidos podem estar presentes nas fases de processo produtivo de materiais ou elementos, uso em canteiro de obras, reformas ou demolições (JOHN, 2000). Ainda, destacam-se aqueles provenientes da indústria, como por exemplo, siderúrgica (PIMENTEL *et al.*, 2017), mineradora (MARQUES; SANTOS; CRUZ,

2021), agrícola (TASHIMA *et al.*, 2011), de beneficiamento do vidro (CADORE *et al.*, 2023) e de beneficiamento de rochas ornamentais (RICHETTI *et al.*, 2022).

Segundo o Artigo nº 9, da Lei 12.305/2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2012), os gerenciadores de resíduos sólidos têm por objetivo prioritário a não geração de resíduos em obras; caso não seja possível, optar pela: a) redução: menos consumo, menos resíduos poupando recursos naturais; b) reutilização: aproveitamento dos resíduos sem sua transformação biológica, física ou físico-química; c) reciclagem: processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos; d) tratamento: inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, as destinações admitidas pelos órgãos competentes, a recuperação e o aproveitamento energético e, e) disposição final adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Hierarquia do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos



Fonte: Adaptado do Artigo nº 9, da Lei 12.305/2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2012).

Apesar de grande gerador, o setor possui um alto potencial para utilizar esses resíduos sólidos por meio da reciclagem e sua incorporação em matrizes cimentícias, entre outras aplicações, o que contribui para minimizar os impactos ambientais. Torna-se então viável obter materiais alternativos que possuam as características necessárias para atender às necessidades dos usuários, ao mesmo tempo em que são menos prejudiciais ao meio ambiente (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Tendo em vista a necessidade da implantação de práticas mais sustentáveis, tem-se buscado materiais alternativos aos convencionais que mantenham ou

melhorem as propriedades das matrizes cimentícias. Uma das práticas consiste na substituição de agregados, materiais que provêm de fontes não renováveis ou, de cimento Portland, que apresenta um processo de produção poluente e elevado consumo de energia (SOUSA NETO, 2014).

A redução de resíduos sólidos em atividades de mineração e industriais tem sido uma das principais questões ambientais nos últimos anos; portanto, é fundamental desenvolver novas tecnologias para converter resíduos sólidos em produtos de valor agregado (KÜRKLÜ; GÖRHAN, 2019).

Em 2021, os municípios coletaram mais de 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição, conhecidos como RCD, representando um aumento de 2,9% em relação ao ano de 2020. Ainda, a média coletada foi de aproximadamente 227 kg por habitante/ano. A região Sudeste se destaca pela coleta de pouco mais da metade (52%) do total de RCD do país. No entanto, a região que se destaca em termos de coleta per capita é a Centro-Oeste, com quase 323 kg por habitante/ano (ABRELPE, 2022).

2.3 ROCHAS ORNAMENTAIS

De acordo com a NBR 15012 (ABNT, 2013), o termo “rochas ornamentais” é definido como:

Material pétreo natural, utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária. (ABNT NBR 15012, 2013, p.1).

Ainda, denomina-se rocha para revestimento a rocha natural que, submetida a processos diversos de beneficiamento, é utilizada no acabamento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas, em obras de construção civil (ALENCAR, 2013).

Dentre as diversas rochas ornamentais existentes, destacam-se os mármore, que são rochas carbonáticas que podem ter origem tanto sedimentar quanto metamórfica, sendo compostos basicamente por minerais de calcita e dolomita e, os granitos, classificados como rochas ígneas intrusivas, compostos por feldspato e

quartzo, podendo conter minerais acessórios como biotita e moscovita (RASHWAN *et al.*, 2020).

A geração de resíduos é uma característica inerente a qualquer processo de transformação ou fabricação de materiais. No contexto do beneficiamento de rochas ornamentais, essa produção é significativa e tem impacto ambiental em várias fases da produção, como: lamas resultantes do desdobramento e polimento, casqueiros, fragmentos, lâminas e granalhas desgastadas, sacos de cimento e cal, bem como sobras de pastilhas abrasivas, entre outros (BRAGA, Florindo dos Santos *et al.*, 2010).

De maneira geral, os resíduos sólidos de mármore e granito apresentam um comportamento não plástico e, tal como a grande maioria dos materiais cerâmicos tradicionais, seus constituintes químicos majoritários, expressos na forma de óxidos, são a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3), seguidos pela cal (CaO) e os óxidos alcalinos (Na_2O , K_2O) (SILVA *et al.*, 2005).

A cadeia produtiva da indústria de rochas ornamentais tem uma grande importância econômica e social no país. No entanto, os problemas gerados pela extração e processamento de rochas ornamentais, causados pelo descarte inadequado, podem afetar bacias hidrográficas, lagos e reservatórios de água natural, especialmente quando descartados sem nenhum tratamento prévio (PASSOS *et al.*, 2022), o que vem preocupando as autoridades e a população. O método convencionalmente utilizado para tratar esses resíduos, na forma de lama, envolve principalmente o processo de desaguamento em tanques de sedimentação, os quais têm uma eficiência limitada na remoção de sólidos (BRAGA, Florindo dos Santos *et al.*, 2010).

Portanto, fica evidente a necessidade de aproveitar os resíduos sólidos gerados pelo beneficiamento de rochas ornamentais, sendo de extrema importância realizar estudos que tornem o setor de rochas mais sustentável do ponto de vista ambiental, proporcionando um destino mais adequado para os resíduos sólidos produzidos e viabilizando sua utilização técnica, garantindo a qualidade e durabilidade do produto que o incorpora, dando-lhes um propósito nobre (SATO; GALINA; TEIXEIRA, 2018).

2.3.1 Processo de beneficiamento de rochas ornamentais e geração da LBRO

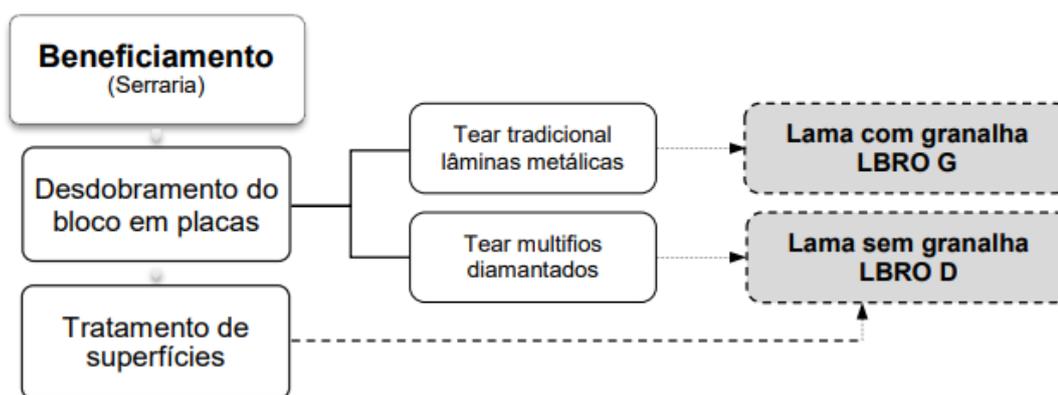
O processo de beneficiamento de rochas ornamentais tem como objetivo a alteração de blocos, extraídos na fase de lavra, em produtos finais ou semiacabados

(SILVEIRA; VIDAL; SOUZA, 2014). Essa etapa de beneficiamento pode ser dividida em duas fases, o desdobramento, que diz respeito ao corte dos blocos de rocha em chapas, sendo utilizado teares multilâmina (convencionais) ou multifio (diamantados) e, o polimento, relacionado ao acabamento da superfície das placas (SILVEIRA; VIDAL; SOUZA, 2014). Os resíduos sólidos finos e ultrafinos gerados durante o beneficiamento apresentam característica de lama, visto que o processo é realizado via úmida, sendo classificados por diversos estudos como Resíduos Classe II A – Não Inerte, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004) (CAMPOS *et al.*, 2014).

Independentemente do método adotado, todas as etapas geram resíduos sólidos; contudo, o modelo de tear com fios diamantados apresenta menor potencial de impacto ambiental em comparação ao tear convencional, pois o segundo utiliza a polpa de cal, granalha de aço e água (CALMON; SILVA, 2006). No Brasil, os teares convencionais ainda são os mais comuns (NEVES *et al.*, 2021).

A Figura 2 ilustra o processo de produção dos resíduos do beneficiamento das rochas ornamentais.

Figura 2 – Esquema referente ao resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais. (LBRO G - lama abrasiva utilizada na etapa de corte em teares convencionais; LBRO D - lama resultante do corte com fios diamantados e do processo de polimento)



Fonte: Uliana (2014, p. 49).

Segundo Uliana (2014), a LBRO G é uma lama abrasiva utilizada em teares convencionais, composta principalmente por água, cal, granalha de aço, fragmentos de lâminas e pó de rocha, exigindo um descarte apropriado controlado pelo sistema do tear. Já a LBRO D, resultante do corte com fios diamantados e do polimento, não

possui granalha de aço e inicialmente é composta por água e pó de rocha, podendo conter resíduos de lixas e vestígios de resina posteriormente. Os resíduos sólidos são coletados por canaletas e tubulações direcionados para poços de coleta.

2.3.2 Características da LBRO

2.3.2.1 Composição química

Através da análise via fluorescência por raios-x, a Tabela 2 ilustra a composição química do resíduo sólido de lama do beneficiamento de rochas ornamentais de diferentes trabalhos. Percebe-se que aqueles que utilizam apenas o mármore, destacam-se pela presença de Óxido de Cálcio (CaO) e, os que utilizam apenas granito, pela Sílica (SiO₂), essa diferença está relacionada principalmente com a formação geológica variada das rochas (ULIANA, 2014). Além disso, a presença de Óxido de Ferro (Fe₂O₃) tem relação direta com a utilização de granalha durante a o processo de serragem (MOREIRA, 2021).

Tabela 2 – Composição química dos resíduos, em porcentagem

(continua)

Autores	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	PF
Al-Akhras; Ababneh; Alaraji (2010)	5,97	1,09	0,28	76,09	0,93	-
Al-Jrajreh <i>et al.</i> (2023)	40,1	5,20	0,67	48,3	1,70	-
Almada <i>et al.</i> (2020)	48,30	9,45	2,73	15,70	3,44	14,17
Buyuksagis;Uygunoglu; Tatar (2017)	0,63	0,46	0,15	54,70	0,44	43,45
Gado (2022)	16,08	2,09	2,85	35,45	6,88	35,19
Mashaly; Shalaby; Rashwan (2018)	58,17	11,96	13,35	3,27	0,36	2,58
Mittri <i>et al.</i> (2018)	67,11	23,42	1,53	2,62	1,50	0,10
Passos <i>et al.</i> (2022)	53,70	8,90	4,70	13,14	3,10	9,60

Autores

	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	PF
Pereira <i>et al.</i> (2023)	42,57	9,41	4,60	18,04	4,33	-
Rashwan <i>et al.</i> (2020)	9,77	2,21	1,14	41,97	5,76	37,31
Richetti <i>et al.</i> (2022)	48,38	13,15	7,28	12,74	4,00	8,34
Uliana (2014)	66,80	13,50	3,79	3,44	0,93	-
Vazzoler <i>et al.</i> (2018)	67,07	23,22	1,56	2,64	1,50	-

Fonte: Elaborada pela autora.

Percebe-se que os estudos que utilizaram resíduos com composição de sílica próxima ou acima de 60% obtiveram resultados satisfatórios na substituição, tendo em vista a pozolanicidade do resíduo, atingindo resultados superiores ao traço referência.

Quando utilizada em matrizes cimentícias, a LBRO atua como um material de preenchimento inerte, produzindo um efeito de preenchimento de poros (SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016). Dessa forma, antes de adicioná-la em compostos à base de cimento, alguns autores submeteram esse resíduo sólido a um tratamento térmico, com temperaturas variando de 700 °C (AL-AKHRAS; ABABNEH; ALARAJI, 2010; MÁRMOL *et al.*, 2010) a 1200 °C (ULIANA *et al.*, 2015), com a intenção de aprimorar as propriedades físico-químicas da LBRO, tendo alteração do estado cristalino para o amorfo e convertendo-a em uma pozolana (MITTRI *et al.*, 2018). Vale salientar que a decomposição de CaCO₃ ocorre aproximadamente aos 900 °C. Outros autores, como Pereira *et al.*, (2023), utilizaram o resíduo sem tratamento térmico, apenas com secagem em estufa e moagem para cominuição das partículas.

2.3.2.2 Difração por raios-x

Através da análise de difração por raios-x, o Quadro 1 apresenta a composição mineralógica dos resíduos sólidos provenientes de rochas ornamentais de diferentes estudos, além da possível presença de halo amorfo, o que indica ser um material pozolânico.

Quadro 1 – Composição mineralógica dos resíduos

Autores	Principais componentes do difratograma
Gado (2022, p. 980)	Quartzo, calcita e dolomita
Mármol <i>et al.</i> (2010, p. 619)	Quartzo, feldspato sódico, mica, feldspato potássico, biotita e calcita.
Mashaly; Shalaby; Rashwan (2018, p. 803)	Quartzo, feldspato sódico, feldspato potássico e anfibólios.
Passos <i>et al.</i> (2022, p. 8)	Quartzo (Q), muscovita (M), albita (A'), dolomita (D), anortoclásio (A).
Pereira <i>et al.</i> (2023, p.3)	Anita, dolomita, calcita, quartzo e albita (mica e feldspato plagioclásio)
Rashwan <i>et al.</i> (2020, p.3)	Calcita, dolomita e quartzo
Rashwan <i>et al.</i> (2020, p. 3)	Quartzo, minerais de feldspato (albita sódica e anortita cálcica), actinolita, muscovita e caulinita.
Richetti <i>et al.</i> (2022, p. 4)	Anita, tremolita, quartzo, dolomita, albita, calcita, anortita
Uliana (2014, p. 118)	Sílica (hexagonal e ortorrômbica)
Vazzoler <i>et al.</i> (2018, p.317)	Quartzo

Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se na maior parte dos estudos a presença de quartzo, dolomita, calcita e feldspato. O tratamento térmico aplicado pode ter diminuído a organização cristalina do material, revelando o potencial do resíduo para se transformar em um material vítreo após o tratamento térmico, corroborando com o estudo de Uliana *et al.* (2015).

2.3.2.3 Composição granulométrica

O Quadro 2 apresenta os resultados obtidos para os principais parâmetros granulométricos referentes a diferentes trabalhos que utilizaram rochas ornamentais no desenvolvimento do estudo.

Quadro 2 – Análise granulométrica

Autores	D₁₀ (µm)	D₅₀ (µm)	D₉₀ (µm)
Ribeiro <i>et al.</i> , (2022)	2,42	6,41	19,66
Pereira (2020)	5,38	27,59	92,26
Sato (2015)	1,70	11,0	40,00
Mitri <i>et al.</i> (2018)	1,29	8,17	48,99

Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se que a granulometria está diretamente ligada com o método de moagem escolhido pelos autores. No estudo de Pereira (2020), o material foi seco e destorroado apenas manualmente, apresentando granulometria mais grosseira. Já os demais estudos utilizaram algum equipamento elétrico para auxiliar na moagem, sendo o método escolhido por Ribeiro *et al.* (2022) o mais eficiente, apresentando a granulometria mais fina.

2.3.3 Impactos ambientais relacionados ao beneficiamento de rochas ornamentais

Segundo a resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, n. 001 (BRASIL, 1986), art. 1º, impacto ambiental é definido como:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, a qualidade dos recursos ambientais (BRASIL, 1986, p. 2548).

O rápido processo de urbanização e o desenvolvimento da construção civil, acompanhados pelo aumento do padrão de vida das pessoas em países em desenvolvimento, têm gerado uma crescente demanda por esses materiais brutos (NAYAK; SATAPATHY; MANTRY, 2022).

A atividade de mineração provoca danos irreversíveis, iniciando com a extração das rochas, que mesmo sendo realizada sob os olhares da legislação ambiental e de forma cuidadosa, trata-se da retirada de um mineral, que provoca impactos visuais negativos e erosão do solo, visto que a vegetação é retirada (LEITÃO, 2018).

Dentre os fatores que contribuem para a geração excessiva de resíduos no setor produtivo de rochas ornamentais, destacam-se: característica geológica do maciço, origem da rocha, técnica de desmonte e beneficiamento e, mão de obra (CAMPOS *et al.*, 2009). O descarte desses resíduos em ambientes abertos tem impactos negativos no meio ambiente e na saúde humana devido à sua natureza tóxica. Pesquisas extensivas foram realizadas sobre a reciclagem desses resíduos na indústria da construção, visando utilizar esses materiais como substitutos do cimento e dos agregados finos ou grossos no concreto, entre outras aplicações. (NAYAK; SATAPATHY; MANTRY, 2022).

Os resíduos de mármore e granito encontram-se presentes na maioria das vezes sob duas formas: retalho de rochas (durante a extração em pedreiras) e, o lodo (durante os processos de fabricação), gerado em todas as etapas de processamento nas zonas de fabricação, em uma quantidade muito grande para ser estocada. Esta lama causa poluição do ar e da água, infertilidade do solo e obstrui reservatórios subterrâneos (SINGH *et al.*, 2017).

O aumento contínuo da acumulação desses resíduos nos locais de descarte resulta em poluição ambiental, especialmente quando secos, transformando-se em uma poeira fina que pode ser dispersada pelo vento, afetando as áreas industriais, agrícolas e residenciais próximas e representando uma ameaça potencial para a saúde humana. (MASHALY; SHALABY; RASHWAN, 2018).

A utilização de pós industriais provenientes de pedreiras e indústrias de rochas ornamentais como materiais cimentícios suplementares alternativos minimiza a ameaça ambiental desses resíduos sólidos e adiciona uma dimensão econômica com benefícios elevados (FARES; ALBAROUD; KHAN, 2019).

2.3.4 Estudos relacionados a utilização da LBRO na construção civil

Diante do aumento na demanda por recursos naturais como os utilizados na construção civil, se faz pertinente buscar alternativas para reduzir seu uso, visando mitigar os impactos ambientais resultantes desses processos. Buscar materiais alternativos ao cimento também é importante para minimizar as emissões de CO₂. Nesse contexto, os resíduos gerados no beneficiamento de rochas ornamentais apresentam-se como uma alternativa mais sustentável, conforme evidenciado em estudos já realizados.

No setor de pavimentos flexíveis existe a possibilidade de uso como material de enchimento (fíler), sendo substituto de materiais convencionais do concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) (FACHIN *et al.*, 2022), como material para melhoramento da base, as quais necessitam de algum tipo de reforço (MENEGUETE; BATISTA; CESCO NETTO JÚNIOR, 2018) e, na produção de pisos intertravados (CARDOSO *et al.*, 2021), como substituto do cimento.

No setor de produção do cimento, aparece como potencial substituto do clínquer na produção de cimento belítico, resultando na redução de emissão de CO₂ e menor consumo de energia para produção do material (RIBEIRO *et al.*, 2022).

Ainda nesse segmento de materiais cimentícios, para Vazzoler *et al.* (2018), o melhora as características pozolânicas do resíduo de rochas ornamentais, mesmo apresentando baixa atividade quando utilizado em pastas de cimento, o tratamento resultou em uma microestrutura mais densa devido ao efeito de enchimento e possivelmente a uma pequena reação pozolânica.

Uliana *et al.* (2015), também observaram um comportamento semelhante. Após tratamentos térmicos a 1200 °C, os resíduos de rochas ornamentais foram transformados em um material de vidro, mostrando evidências de reatividade pozolânica quando utilizados como substitutos parciais do cimento Portland na produção de argamassas. Além disso, o material apresentou bons resultados no que diz respeito à resistência mecânica e durabilidade em relação à penetração de cloretos, em argamassa, com substituição de 5 a 10% de cimento (ULIANA *et al.*, 2015) e em concreto, com adição de 10 a 20% em relação ao cimento (MITTRI *et al.*, 2018). As fases ativas dos materiais pozolânicos são a sílica e a alumina, com altos níveis de amorfismo; portanto, as pozolanas são formadas, em sua maioria, por SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ (VAZZOLER *et al.*, 2018).

Outros estudos utilizaram o resíduo em pastas cimentícias sem a ativação térmica, com características físicas de um material pulverulento com poder de efeito fíler, por não possuir atividade química e ter uma alta superfície específica (FARES; ALBAROUD; KHAN, 2019; SATO; GALINA; TEIXEIRA, 2018).

Ainda, alguns estudos utilizaram os resíduos de rochas ornamentais na produção de argamassa, como substituto do agregado miúdo (LEITE, 2021; PEREIRA, et al., 2023; SANTOS; LIRA; RIBEIRO, 2012) e do cimento (NASCIMENTO, 2019).

2.3.5 Influência da utilização da LBRO em matrizes cimentícias

O Quadro 3 apresenta pesquisas que envolveram a utilização do resíduo sólido do beneficiamento de rochas ornamentais, suas variáveis e respectivas conclusões.

Quadro 3 – Síntese de estudos relacionados com a utilização da LBRO em matrizes cimentícias

(continua)

Referências (título e autores)	Variáveis	Principais Resultados
<i>Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions</i> (SINGH; NAGAR; AGRAWAL, 2016)	- Substituição parcial de 10, 25, 40, 55, e 70%; - Areia de rio com módulo de finura 3,36; - a/c 0,3 e 0,4.	- A substituição de 25% apresentou um desempenho superior à referência e demais misturas; - Destacando-se o ataque ácido, carbonatação, ataque de sulfato, penetração de cloreto e temperatura elevada.
<i>Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions</i> (SINGH; NAGAR; AGRAWAL, 2016)	- Substituição parcial de 10, 25, 40, 55, e 70%; - Areia de rio com módulo de finura 3,36; - a/c 0,3 e 0,4.	- A substituição de 25% apresentou um desempenho superior à referência e demais misturas; - Destacando-se o ataque ácido, carbonatação, ataque de sulfato, penetração de cloreto e temperatura elevada.
<i>Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars</i> (JENNI et al., 2005)	- Porcentagem de material seco: 35% de cimento Portland; 40% de areia quartzosa; 22,5% de pó de carbonato; 0,5% de éter de celulose; 2% de pó redispersível e 25,5% de água deionizada.	- A adição de pó redispersível aumenta a força adesiva de uma argamassa adesiva para azulejos; - O éter de celulose é o segundo componente polimérico e tendem a crescer junto com as fases de cimento; - Tanto PVA quanto EC são dissolvidos na solução dos poros e podem formar filmes isolados ao secar.

(continuação)

Referências (título e autores)	Variáveis	Principais Resultados
<p><i>Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar</i> (BUYUKSAGIS; UYGUNOGLU; TATAR, 2017)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Substituição parcial de 0, 20, 40, 60, 80 e 100% de dolomita; - Cimento ME 3,07 g/cm³; - Pó de mármore ME 2,72 g/cm³; - a/c 0,8 	<ul style="list-style-type: none"> - No ensaio de espalhamento, de espalhamento, a quantidade de grãos finos aumenta com o aumento de pó de mármore, resultando em mais água para a argamassa; - 40% das amostras com adição de pó de mármore apresentaram uma resistência de aderência inferior à amostra de referência.
<p><i>Improvement of ornamental stone wastes as sand replacement in concrete using silane coupling agent</i> (AL-JRAJREH et al., 2023)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Substituição parcial de 3, 5, 10 e 30 %; - a/c 0,6; - resíduos de mármore e granito de duas formas: não tratados e tratados com silano. 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução da trabalhabilidade ao usar MGW não tratado, onde uma redução máxima de 42% na fluidez foi observada na mistura com 30% de MGW não tratado. Em contraste, foi observado um aumento máximo de 40% na fluidez do concreto com 30% de MGW tratado com silano; - O teste de absorção de água ao usar MGW reduziu a permeabilidade em 58% quando adicionado em uma proporção de 3%. Para substituição da areia por 30% de MGW tratado com silano a taxa de absorção aos 28 dias reduziu a permeabilidade em 30% em comparação com o controle.
<p><i>Heat treatment of processing sludge of ornamental rocks: application as pozzolan in cement matrices</i> (ULIANA et al., 2015)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de queima da LBRO variando de 1200 a 1500 °C; - Substituição parcial do cimento em teores de 5, 10, 15 e 20%. 	<ul style="list-style-type: none"> - Após tratamento térmico e moagem, a lama gerada pelo processamento de rochas ornamentais foi considerada promissora como substituto parcial pozolânico para o cimento.
<p><i>Utilisation of heat-treated ornamental stone processing waste as an addition to concretes to improve compressive strength and reduce chloride ion penetration</i> (MITTRI et al., 2018)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de queima da LBRO de 1200 °C; - Substituição parcial do cimento em teores de 5 e 10%. 	<ul style="list-style-type: none"> - Depois de tratada termicamente, a LBRO confere um alto teor de Al₂O₃, que contribui para a formação de C₃A. O C₃A então reage com os íons de cloreto e forma compostos estáveis.
<p><i>Production of adhesive mortars with ornamental rock processing sludge and calcium carbonate sludge</i> (PEREIRA, et al., 2023)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Substituição parcial da parte fina do agregado miúdo de 5 e 10%. 	<ul style="list-style-type: none"> - As misturas com 10% apresentaram resultados de aderência à tração superiores ao traço referência, o que não ocorreu com os de 5%.

(conclusão)

Referências (título e autores)	Variáveis	Principais Resultados
<p><i>Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes</i> (KABEER; VYAS, 2018)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Traços de 1:3; 1:4; 1:5 e 1:6, com substituições de 0 a 100%, de 20 em 20%; - Areia de rio, módulo de finura 2,13, com densidade de 2,67 g/cm³. 	<ul style="list-style-type: none"> - A resistência à compressão das misturas contendo 60% de pó de mármore apresentam desempenho equivalente às argamassas referências; - A retração por secagem das misturas com 20% de pó de mármore é quase a mesma que a das argamassas de controle; - A absorção de água das argamassas com 20% de pó de mármore tem uma variação marginal em relação às argamassas de controle. Os valores de porosidade também indicam variação semelhante.
<p><i>Evaluation of strength and durability of lean mortar mixes containing marble waste</i> (KHYALIYA; KABEER; VYAS, 2017)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Resíduo de mármore triturado e substituído por areia de rio nas proporções de 0, 25, 50 e 100%. 	<ul style="list-style-type: none"> - O pico de resistência é alcançado na substituição de 50% de pó de mármore devido à redução da proporção água/cimento; - No que diz respeito à durabilidade, a mistura de argamassa em que 25% da areia foi substituída por mármore parece ser a mais estável.
<p><i>Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete</i> (CORINALDESI; MORICONI; NAIK, 2010)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Substituição parcial de cimento e areia no teor de 10%; - Areia natural, dimensão máxima de 5mm, com densidade de 2,62 g/cm³. 	<ul style="list-style-type: none"> - O pó de mármore utilizado para substituir areia em 10% apresentou a resistência máxima; - Como material de preenchimento em idades iniciais exibiu um efeito positivo.
<p>Análise de propriedades mecânicas da incorporação de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais em argamassa colante para construção civil (GUARCONI <i>et al.</i>, 2020)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Substituição parcial de areia de rio lavada, nos teores de 20 e 40% - Granulometria utilizada: passante #30 e retida #100. 	<ul style="list-style-type: none"> - A incorporação do resíduo resultou em melhoras, como o acréscimo de resistência nas propriedades de aderência e tempo em aberto da argamassa; - Além do fato de estar sendo criada uma utilização rentável para o resíduo de rocha que antes era destinado a aterros, o que gera custos e possíveis danos ao meio ambiente.

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir das informações expostas no quadro acima, percebe-se que teores entre 10 e 25% de substituição de agregado miúdo mostraram-se promissores, principalmente no que diz respeito a durabilidade, tendo em vista o efeito fíler proporcionado pelo material. Os ensaios de resistência de aderência à tração também

se mostraram efetivos. Ainda, sem tratamento térmico, o lodo produzido atua como um fíler, por tratar de um material inerte, sendo necessário tratá-lo termicamente, em especial a uma temperatura de 1200 °C a fim de proporcionar características de pozolana.

Na pesquisa em questão, mesmo tratando termicamente o resíduo permaneceu com propriedades inertes. Além disso, a fim de extrapolar os teores utilizados convencionalmente, optou-se por teores mais elevados de substituição, com a intenção de verificar o quanto os resultados seriam impactados.

2.4 ARGAMASSA COLANTE

Com base na norma NBR 14081-1 (ABNT, 2012), o termo “argamassa colante” é definido como:

Produto industrial, no estado seco, composto de cimento Portland, agregados minerais e aditivo químicos, que, quando misturados com água, formam uma massa viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de placas cerâmicas para revestimento (ABNT NBR 14081-1, 2012, p.1).

As argamassas colantes são amplamente utilizadas no setor da construção e consistem basicamente em um ligante (cimento Portland) e um material de enchimento mineral, sendo geralmente modificadas com éter de celulose, sendo mais conhecido hidróxietil celulose (HEC) e, polímero redispersível em pó, conhecido como PVA (polivinil álcool). O polivinil e o éter de celulose são dissolvidos na solução porosa, resultando em filmes isolados após a secagem. De acordo com alguns estudiosos, tais como Hercules (1997); Olmo, (1982); Union Carbide (1997) e pelos próprios fabricantes de aditivos, o traço de cimento:areia recomendado para argamassa colante varia entre 1:2 e 1:4, em massa (PÓVOAS, 1999). Ainda para a autora, com relação à granulometria e forma dos grãos, recomenda-se grãos com formato liso e arredondado, o que aumenta a trabalhabilidade. Para complementar a distribuição granulométrica, alguns fabricantes adicionam pó calcário.

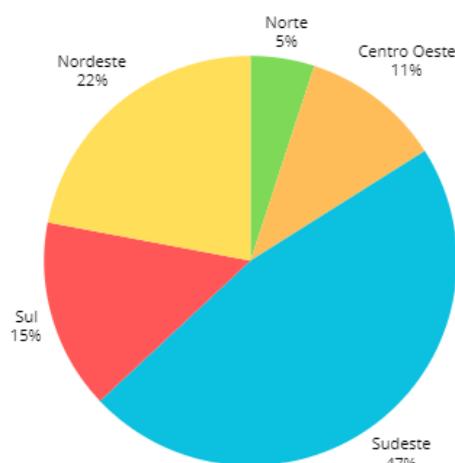
O éter de celulose, utilizado para modificar o cimento Portland, garante uma trabalhabilidade suave e melhora a eficiência de espessamento, aeração e retenção

de água, tornando-a mais plástica e coesa, evitando o deslizamento da placa cerâmica e retardando os tempos de pega que ampliam o tempo em aberto. O polímero envolve os grãos do cimento e, por sua vez, melhora a reologia da argamassa fresca, a flexibilidade e a resistência à tração da argamassa endurecida. Devido ao protetor coloidal em sua composição, o PVA retém água e retarda a formação de uma película superficial que poderia prejudicar a aderência da placa à argamassa (KÜRKLÜ; GÖRHAN, 2019; PÓVOAS, 1999).

Com relação aos finos, que são as partículas inferiores a 0,075mm (#200), segundo estudo realizado por Oliveira (2015), o qual estudou três fornecedores de agregado miúdo para os três tipos de argamassa, foi possível a constatação das seguintes conclusões: AC I apresenta aproximadamente 14% de finos em sua composição; AC II aproximadamente 19% e, por fim, AC III em torno de 30%. Tratando-se da granulometria, os três tipos de argamassa apresentam maior retenção na peneira #100 (abertura 0,149mm), com aproximadamente 60%, quanto à segunda maior retenção, para a argamassa AC I representa a peneira de abertura 0,297mm (#50) com 27% e, para a AC II e AC III o passante na 0,075mm.

Segundo a Associação Brasileira de Argamassas Industrializadas (ABAI, 2015 apud Sabatke; Nunes; Sales, 2021), o Brasil possui um mercado de argamassas industrializadas e não industrializadas estimado em 120 milhões de toneladas anuais, distribuída de acordo com o Gráfico 1, sendo que apenas o sul brasileiro representa 15% dessa demanda totalizando 18 milhões de toneladas por ano.

Gráfico 1 – Distribuição do consumo de argamassa industrializada no Brasil



Fonte: Adaptado de Sabatke; Nunes; Sales (2021).

Com relação aos requisitos de desempenho, deve-se atentar às especificações da Tabela 3.

Tabela 3 – Requisitos da argamassa colante

Requisito	Unidade	Critério		
		AC I	AC II	AC III
Tempo em aberto	min	≥ 15	≥ 20	≥ 20
Resistência de aderência à tração aos 28 dias	Cura normal	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0
	Cura submersa	MPa	≥ 0,5	≥ 0,5
	Cura em estufa	-	≥ 0,5	≥ 1,0

Fonte: Adaptado da NBR 14081-1 (ABNT, 2012 p.3).

O papel da argamassa colante é particularmente desafiador para a fixação de amostras grandes e densas, como ocorreu nas últimas décadas devido à evolução na indústria de azulejos, sendo que seu desempenho depende do conteúdo, qualidade e interação entre os componentes (JENNI *et al.*, 2005).

O desempenho mecânico das argamassas adesivas cimentícias para revestimento de azulejos é fundamental para garantir a durabilidade dos revestimentos em paredes e pisos, controlando a adesão entre os azulejos e o substrato (WETZEL *et al.*, 2012).

A argamassa colante possui alta resistência tanto a esforços de tração perpendicular ao plano de referência quanto a esforços tangenciais de cisalhamento. Além disso, sua capacidade de retenção de água permite a aplicação em camadas finas sem a necessidade de molhar o substrato ou as peças cerâmicas. Essa propriedade está relacionada ao tempo em aberto da argamassa colante, que determina o período máximo para o assentamento das placas cerâmicas sobre a argamassa. Durante esse tempo, a argamassa mantém sua plasticidade e aderência, proporcionando um período adequado para a colocação das peças cerâmicas (DA SILVA, 2018).

Ao contrário das aplicações de concreto, essas argamassas adesivas para azulejos são preparadas com uma alta relação a/c (água/cimento) de

aproximadamente 0,8 e são caracterizadas por altos teores de vazios de ar de mais de 20% em volume e baixos graus de hidratação do cimento (JENNI *et al.*, 2006).

Atualmente, os produtos de revestimento variam de acordo com seu uso e/ou método de aplicação, com argamassas especiais frequentemente projetadas para atender demandas mais específicas (CARDOSO *et al.*, 2014).

As tensões ambientais afetam o sistema como um todo, e as argamassas modificadas com polímeros surgem como uma alternativa para reduzir essas tensões. Esses materiais são preferidos para fixar azulejos cerâmicos devido à sua menor rigidez. Além disso, melhoram a trabalhabilidade, retenção de água, propriedades mecânicas, resistência à aderência, flexibilidade e propriedades hidrofóbicas em comparação com as argamassas tradicionais (MARANHÃO; COSTA E SILVA; SICHIERI, 2008).

Alguns pesquisadores têm investigado o desempenho de argamassas colantes com diferentes aditivos minerais ou químicos, bem como diferentes resíduos sólidos, tendo como exemplo, resíduos de vidro (DE AZEVEDO *et al.*, 2017), cinzas residuais da combustão de biomassa (MODOLO *et al.*, 2015), pó de pedra (KÜRKLÜ; GÖRHAN, 2019), pó de mármore (BUYUKSAGIS; UYGUNOGLU; TATAR, 2017), resíduo de rochas ornamentais e carbonato de cálcio (PEREIRA *et al.*, 2023) e, diferentes teores de EVA (acetato de vinila etileno) (CONSTANTINO *et al.*, 2022).

Nesses estudos, dentre os ensaios realizados destacam-se: squeeze flow, deslizamento, densidade no estado fresco, poder molhante, aderência à tração, tempo em aberto e absorção de água por capilaridade. Os teores de substituição variam entre 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100%, sendo substituído tanto o aglomerante quanto o agregado miúdo. Os teores definidos para o estudo baseiam-se nos trabalhos propostos por Modolo *et al.* (2015) e Buyuksagis, Uygunoglu e Tatar (2017).

2.4.1 Tempo em aberto

O tempo em aberto é influenciado pela perda de água da argamassa colante, seja por sucção da base ou por evaporação para o ambiente. Essa perda ocorre principalmente após o espalhamento, resultando em uma redução progressiva da resistência de aderência e, conseqüentemente, no descolamento do revestimento cerâmico (PÓVOAS; JOHN; CINCOTTO, 2002).

Póvoas (1999) demonstrou que existe uma correlação estatística entre a perda de água por evaporação e a resistência de aderência indicando que a evaporação influencia o tempo em aberto. O que há de verificação do tempo em aberto é que a superfície da argamassa se torna seca e o interior do cordão da argamassa permanece ainda úmido. Ainda segundo Póvoas (1999), a película, na verdade, é resultado da dessecação superficial causada pela evaporação e sucção de água da argamassa.

Para que se tenha um maior aproveitamento da camada de argamassa colante no estado fresco e conseqüente melhora na aderência, Dias (2016) recomenda, durante a fase de assentamento, realizar a ruptura da película formada sobre os cordões por meio de uma movimentação perpendicular da placa cerâmica sobre os cordões de argamassa, até a posição final.

Segundo a NBR 14081-1 (ABNT, 2012), o tempo em aberto é considerado o maior intervalo de tempo no qual uma placa cerâmica pode ser assentada sobre a argamassa colante em ambiente de laboratório. Em contrapartida, a NBR 13755 (ABNT, 2017) define dois tipos de tempo em aberto, o teórico, conforme descrito anteriormente e, o real, que considera esse mesmo intervalo, porém quando aplicado em obra, podendo ser consideravelmente menor, pois leva em conta as condições atmosféricas e as propriedades do substrato.

A velocidade de formação dessa película e, conseqüentemente, o tempo em aberto, dependem de vários fatores, incluindo a quantidade de água e de polímeros adicionados à argamassa colante, bem como de condições ambientais como velocidade do vento, temperatura, umidade relativa do ar e radiação (PÓVOAS, PILEGGI, JOHN, 2005).

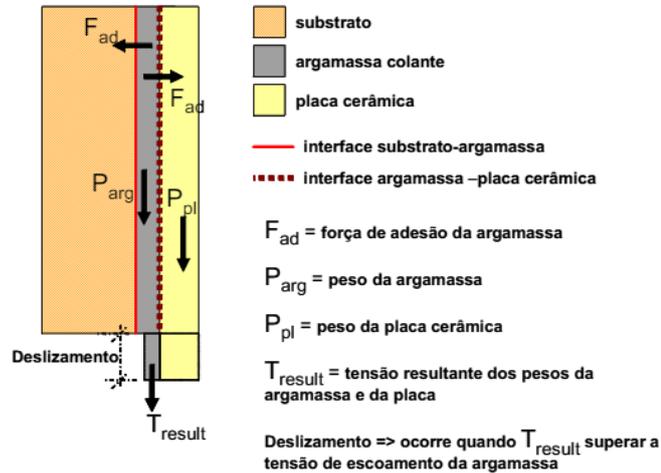
2.4.2 Deslizamento

De acordo com a NBR 14081-1 (ABNT, 2012), o deslizamento consiste no deslizamento vertical sofrido por uma placa cerâmica aplicada sobre a argamassa colante ainda fresca, sob a ação do seu próprio peso.

Conforme ilustrado pela Figura 3, o deslizamento da argamassa ocorrerá se sua tensão de escoamento for menor que a tensão resultante dos pesos da argamassa e da placa cerâmica. Assim, a tensão de escoamento é o parâmetro que determina se a argamassa irá deslizar, sendo esta a tensão a partir da qual a

argamassa começa a fluir. Por outro lado, a velocidade do escoamento da argamassa é definida por sua viscosidade (COSTA; CINCOTTO; PILEGGI, 2007).

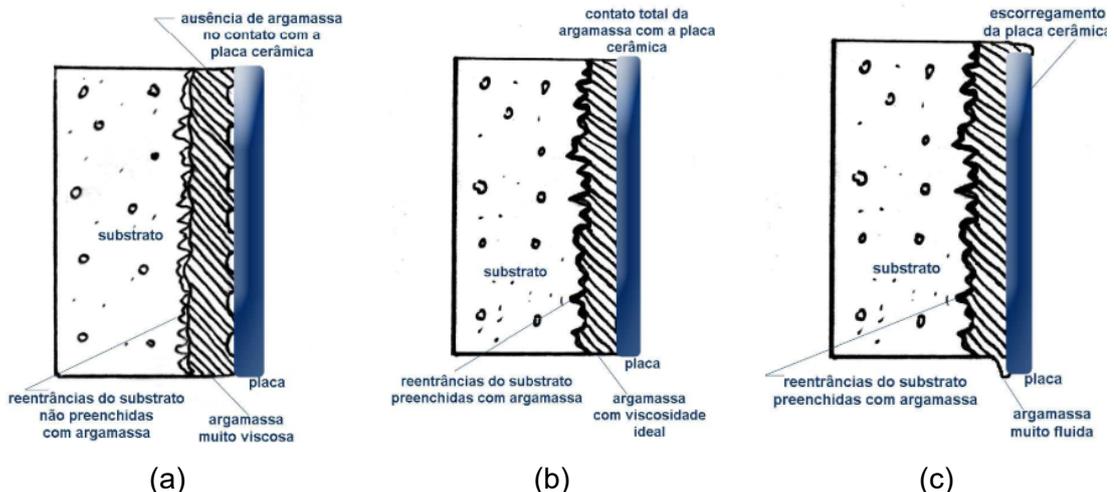
Figura 3 – Forças atuantes no deslizamento da argamassa colante



Fonte: Costa; Cincotto; Pileggi (2007).

A viscosidade indica a facilidade de formação dos cordões de argamassa, mas não garante o preenchimento completo do tardo da placa, pois isso depende da pressão aplicada pelo instalador. Uma viscosidade adequada contribui para uma melhor aderência na interface entre a argamassa e a placa cerâmica, conforme ilustra a Figura 4 (COSTA, 2006).

Figura 4 – Eficiência do contato argamassa colante/placa cerâmica: (a) Argamassa muito viscosa; (b) Argamassa com viscosidade adequada; (c) Argamassa muito fluida



Fonte: Costa (2006).

O potencial de deslizamento da argamassa deve ser previsto e controlado durante sua fabricação, em conformidade com o limite máximo estabelecido pela norma brasileira (COSTA; CINCOTTO; PILEGGI, 2007).

2.4.3 Resistência de aderência à tração

De acordo com Carasek (1996) apud Pereira, da Silva, da Costa (2013), a aderência entre um substrato poroso e a argamassa ocorre por meio de um processo mecânico que envolve a transferência de água entre os dois materiais, permitindo que a pasta de cimento penetre nos poros do substrato. Com a hidratação do cimento, ocorre a formação de hidróxidos e silicatos que promovem a ancoragem do revestimento, tendo a análise microscópica revelado que o entrelaçamento de cristais de etringita nos poros do substrato é o principal responsável pela resistência de aderência.

Durante a mistura do cimento Portland com água, ocorre a formação localizada de etringita. A gipsita, utilizada como reguladora de pega do cimento, dissolve-se e libera íons sulfato e cálcio. Esses íons são os primeiros a se dissolverem na solução, seguidos pelos íons aluminatos e cálcio provenientes da dissolução do C_3A do cimento. Devido ao efeito de sucção, esses íons em solução são transportados para regiões mais internas do substrato, resultando na formação do trissulfoaluminato de cálcio hidratado dentro dos poros (CARASEK, 2017).

Sendo assim, a aderência está relacionada diretamente com a trabalhabilidade, energia de impacto, características e propriedades dos substratos e fatores externos. A Figura 5 reúne os principais fatores que impactam na aderência.

Figura 5 – Fatores que influenciam a aderência



Fonte: Adaptado de Carasek (2017, p. 919).

Além disso, de acordo com Santos (2008), a aderência também pode ocorrer de forma química, por meio da utilização de aditivos adesivos, como PVA, polímeros e resinas, que têm a capacidade de melhorar a aderência das argamassas. Nesse tipo de aderência, ocorrem ligações de Van Der Waals entre moléculas eletricamente neutras, que são forças intermoleculares responsáveis por diversos fenômenos físicos e químicos, como adesão, atrito e viscosidade (GRILLO, 2010).

2.4.3.1 Influência dos componentes da argamassa colante na resistência à aderência

Na prática, substratos porosos tendem a absorver uma quantidade significativa de água da argamassa, o que pode afetar a correta hidratação do cimento em contato com o azulejo. Nessas circunstâncias, a adesão pode ser comprometida (BREA, 2003). Por outro lado, em substratos pouco porosos, de baixa absorção, a pasta de cimento não consegue penetrar adequadamente, o que prejudica a aderência entre os materiais (PEREIRA; DA SILVA; DA COSTA, 2013).

A escolha do agregado miúdo também desempenha um papel importante na capacidade de aderência da argamassa, contribuindo para a durabilidade da aderência ao reduzir a retração. Areias muito grossas podem prejudicar a trabalhabilidade da argamassa, dificultando sua aplicação no substrato. Além disso, areias com alto teor de finos podem comprometer a aderência por dois motivos: em

primeiro lugar, os grãos finos podem penetrar nos poros durante o processo de sucção, ocupando o espaço dos produtos de hidratação do cimento que deveriam se formar na interface e proporcionar uma aderência mais efetiva. Em segundo lugar, a teoria dos poros ativos do substrato sugere que os poros do substrato podem ser ineficientes em absorver a pasta aglomerante da argamassa, uma vez que o fluxo hidráulico ocorre dos poros maiores para os menores. Portanto, quanto maior for o módulo de finura das areias, desde que a argamassa seja trabalhável, maior será a resistência de aderência alcançada (CARASEK, 2017).

2.4.3.2 Influência de agentes externos na resistência à aderência – Durabilidade

De acordo com Almada *et al.* (2020) os indicadores de durabilidade, tais como porosidade, absorção de água, resistência à abrasão, resistência à carbonatação e à penetração de agentes agressivos, têm seus resultados melhorados a partir da introdução de resíduos de rochas ornamentais.

Conforme Mashaly *et al.* (2016), o resíduo exerce uma influência positiva na absorção final do compósito cimentício, resultando em uma redução dos poros permeáveis e da absorção de água, quando substituído por até 20% de cimento por resíduos de mármore. Ainda, os autores concluem que, com o aumento do teor de resíduos de mármore, a densidade aparente diminui, mas aumenta com o aumento dos tempos de cura de 3 a 7 e até 28 dias. Esse efeito é resultado do processo de hidratação, que reduz a porosidade e aumenta a densidade aparente da pasta de cimento endurecida. No estudo de Rana, Kalla e Csetenyi (2015), a lama de mármore proporciona o preenchimento dos poros capilares da matriz de concreto, bloqueando sua interconectividade, pelo fato de ser mais fino do que o cimento.

Com relação a característica de abrasão, que consiste no movimento de fricção entre duas superfícies com propriedades e características intrínsecas um pouco diferentes, o estudo de Mashaly, Shalaby e Rashwan (2018), obteve resultados similares para o traço referência e os teores de substituição de 10 e 20%.

De acordo com Sadek, El-Attar e Ali (2016), a maior resistência ao sulfato proporcionada por aditivos minerais está relacionada ao refinamento da estrutura de poros e, conseqüentemente, à dificuldade de penetração do sulfato. Ainda, no caso de materiais pozolânicos, o consumo de Ca(OH)_2 e a diluição de C_3A resultam na

redução das fases contendo aluminato e, conseqüentemente, diminuem o potencial de formação de produtos expansivos, como a etringita.

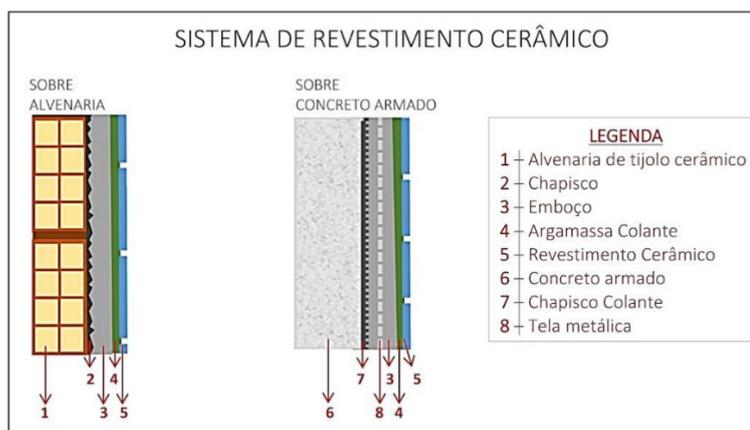
2.5 SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO

O sistema de revestimento cerâmico de fachadas é tradicionalmente composto por um conjunto de camadas aderidas entre si, sendo que, a falha de alguma destas camadas pode implicar no surgimento de manifestações patológicas (CONSTANTINO *et al.*, 2022). No ano de 2022, a produção brasileira de revestimentos cerâmicos atingiu 927,2 milhões de m², representando uma redução de 11,6% frente à produção do ano de 2021. Em 2019, o Brasil foi o 2º maior consumidor mundial, com 796 milhões de m² (ANFACER, 2023).

Inicialmente, é importante destacar que as camadas de revestimento são compostas por diferentes elementos, conforme ilustra a

Figura 6. A base ou substrato, que normalmente é feita de alvenaria ou concreto, serve como suporte para as demais camadas. Em seguida, é aplicada uma camada de chapisco, seguida pela argamassa de emboço e a argamassa colante. Por fim, tem-se a instalação do revestimento cerâmico, sendo as juntas preenchidas com rejunte. É fundamental construir um conjunto que funcione de forma integrada, como se fosse um único elemento, a fim de minimizar os riscos de ocorrência de problemas que possam comprometer a função do sistema. Isso significa que todas as camadas devem ser adequadamente aplicadas e interligadas para garantir a estabilidade e durabilidade do revestimento (DA SILVA, 2018).

Figura 6 – Representação esquemática do sistema de revestimento cerâmico



Fonte: Parente (2018).

Uma parede externa com revestimento de azulejos é um sistema de múltiplas camadas com propriedades diferentes e ligações rígidas. O desgaste é causado por agentes ambientais como chuva, sol e vento, afetando o sistema como um todo. Para um bom desempenho, é essencial analisar as cargas e propriedades dos materiais durante o projeto, em especial em edifícios altos. (MARANHÃO; LOH; JOHN, 2011).

Dessa forma, ao seguir corretamente o processo de construção e garantir uma integração adequada entre as camadas, é possível reduzir as chances de surgimento de danos patológicos que possam comprometer a funcionalidade do sistema de revestimento.

Dentre as manifestações patológicas possíveis, o deslocamento é o principal delas, sendo observado em várias situações de uso, especialmente quando esses materiais estão expostos às condições climáticas adversas ou em locais com alta umidade (PEREIRA; DA SILVA; DA COSTA, 2013).

2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Esse capítulo apresenta algumas das técnicas estatísticas empregadas para análise de resultados, considerando especificamente as empregadas nesse estudo, conforme segue:

a. Análise de normalidade

De acordo com Ferreira (2022), *“a suposição de normalidade dos dados é muito utilizada para realizar inferências sobre os parâmetros populacionais, diversos métodos estatísticos e fenômenos aleatórios podem ser descritos de forma aproximada pela distribuição normal.”*

Considerando tal fato, cabe mencionar que a técnica é amplamente empregada, verificando a normalidade da distribuição de dados aleatórios, podendo ser feita, por exemplo, com a análise de distribuição linear dos dados.

Dentre as possibilidades de análise da normalidade está o gráfico Quantil-Quantil, também conhecido como Q-Q Plot. Nesse gráfico, os valores observados da variável são plotados no eixo (x), enquanto os valores esperados, assumindo uma distribuição Normal, são plotados no eixo (y), caso os dados se ajustem bem à distribuição Normal, os pontos ficarão próximos à linha de referência apresentada no gráfico (TORMAN; COSTER; RIBOLDI, 2012).

b. Análise de variância (ANOVA)

De acordo com Rocha e Bacelar Júnior (2018), “a ANOVA compara a variação resultante de fontes específicas com a variação entre indivíduos que deveriam ser semelhantes”.

Para Gomes (1990), o modelo estatístico ANOVA verifica se as médias de duas ou mais populações são iguais ou diferentes, sendo que, a hipótese nula (H_0) assume que as médias são iguais, indicando tratamentos estatisticamente iguais e não significativos e, a hipótese alternativa (H_1) sugere que as médias são diferentes, mostrando que pelo menos um tratamento apresenta diferença estatística em relação aos outros.

Quando utilizado o método é necessário atender a dois requisitos: os dados devem ser normais e homogêneos se o número de amostras for menor que 30. Nos testes de normalidade e homogeneidade, se $p > 0,05$, a variável é considerada normal ou homogênea; se $p \leq 0,05$, a variável não é normal ou homogênea (SILVA *et al.*, 2023).

c. Teste de Tukey

Tukey é um método utilizado em ANOVA para criar intervalos de confiança para todas as diferenças entre pares de médias dos níveis dos fatores, enquanto controla a taxa de erro global para um nível de significância determinado. É crucial levar em conta a taxa de erro global ao realizar múltiplas comparações, pois a probabilidade de cometer um erro do tipo I aumenta quando se fazem várias comparações, em comparação com uma única comparação. Para corrigir essa elevada taxa de erro, o método de Tukey ajusta o nível de confiança de cada intervalo individual, de modo que o nível de confiança simultâneo final seja o especificado (MINITAB, 2024).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em três etapas. A primeira etapa consistiu na amostragem e caracterização dos materiais, a segunda etapa na elaboração das formulações e, a terceira etapa na caracterização física, mecânica e de durabilidade das argamassas produzidas.

A Etapa I consistiu na amostragem da lama de beneficiamento de rochas ornamentais de acordo com norma brasileira 10007 (ABNT, 2004), sendo ainda propostos os ensaios gerais e específicos de caracterização. Para a lama, foram realizados alguns ensaios específicos, sendo eles: análise granulométrica a laser, massa específica, composição química e mineralógica, pozolanicidade e área superficial. Além disso, foram realizados ensaios de caracterização para o aglomerante e o agregado miúdo.

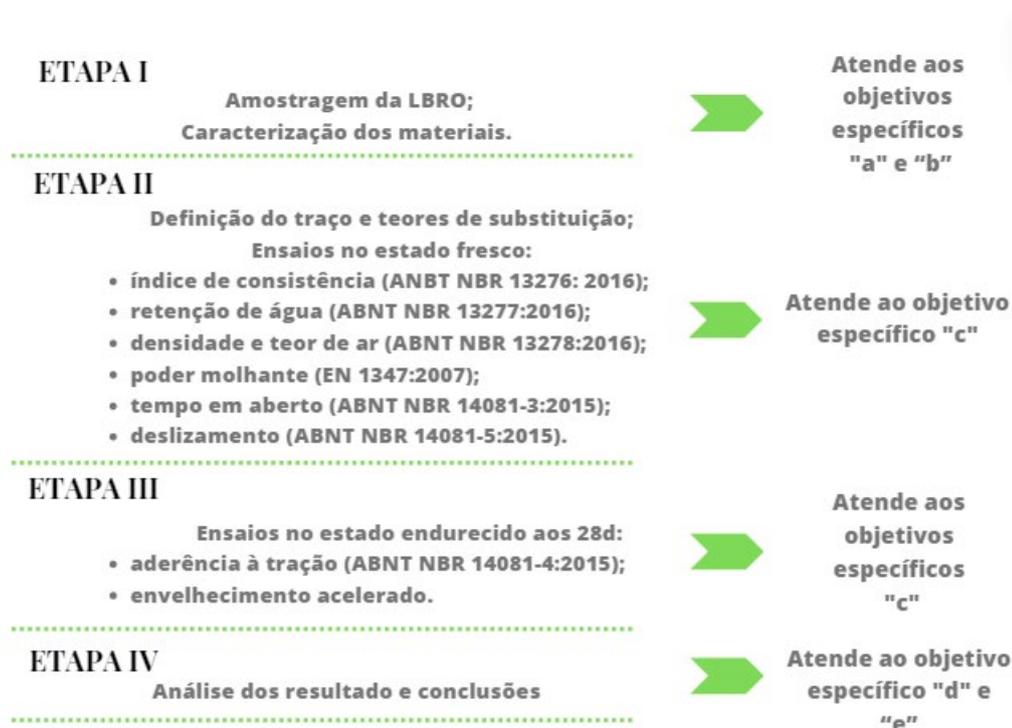
A Etapa II apresentou, após caracterização completa dos materiais, a definição dos traços que foram reproduzidos, sendo compostos por um traço referência e três traços com substituição, nos quais foi utilizada a lama do beneficiamento de rochas ornamentais em substituição da fração fina do agregado miúdo, que nesse caso representou 22%. Nessa etapa, ainda, foram realizados ensaios no estado fresco, a fim de caracterizar cada argamassa colante.

A Etapa III consistiu na realização dos ensaios de aderência à tração, tempo em aberto e envelhecimento acelerado, com a intenção de avaliar a influência dos traços com substituição frente ao traço referência.

Por fim, na Etapa IV, foi realizada uma discussão sobre os resultados e conclusões obtidas. Além disso, foi realizada uma análise estatística dos resultados, com o auxílio do *software* Statistica.

A Figura 7 relaciona cada etapa proposta com a realização dos objetivos específicos.

Figura 7 – Organograma das etapas da metodologia



Fonte: Elaborada pela autora.

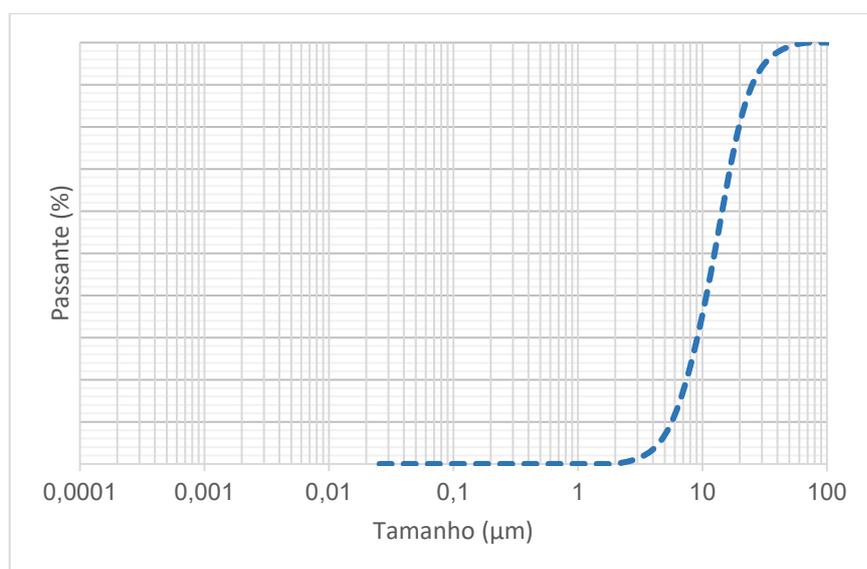
3.1 MATERIAIS

A seguir são descritos os materiais utilizados na realização da pesquisa.

3.1.1 Aglomerante

Para a produção das argamassas colantes utilizou-se o cimento CP II F-40 marca Votoran, da fabricante Votorantim. Para a caracterização do aglomerante foram realizados os ensaios de massa específica, área superficial (BET) e granulometria a laser no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Unisinos. O Gráfico 2 apresenta a curva granulométrica obtida, destacam-se os resultados de Diâmetro 10, Diâmetro 50, e Diâmetro 90, respectivamente, 5,68 μm , 12,52 μm , e, 25,12 μm . A Tabela 4 apresenta informações adicionais conforme fabricante. Por fim, pelo ensaio de massa específica obteve-se o resultado de 3,14 g/cm^3 e, para o ensaio de área superficial 1,63 m^2/g .

Gráfico 2 – Curva granulométrica do Cimento Portland II F40



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4 – Características do cimento no mês de Setembro/23

Característica	Exigência	Média	Desvio padrão
Blaine (cm ² /g)	≥ 2800	4747	115,22
# 200 (%)	≤ 10,0	0,00	0,00
# 325 (%)	N/A	0,29	0,13
Início de pega (min)	≥ 60	267	11,9
Fim de pega (min)	≤ 600	334	16,72
01 dia (MPa)	N/A	24,8	1,01
03 dias (MPa)	≥ 15,0	34,1	1,15
07 dias (MPa)	≥ 25,0	39,0	0,92
28 dias (MPa)	≥ 40,0	46,1	0,73
MgO (%)	N/A	5,29	0,48
SO ₃ média (%)	≤ 4,5	3,26	0,21
Perda ao fogo média (%)	≤ 12,5	5,25	0,36
Resíduo insolúvel (%)	≤ 7,5	1,36	0,22

Fonte: Votorantim (2024).

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural de leito de rio, extraída do rio Jacuí, na região de Porto Alegre, no Estado do Rio Grande do Sul (RS). Os ensaios

de caracterização e análise granulométrica foram realizados no laboratório da empresa Concretus, localizada na cidade de Porto Alegre/RS, atendendo às exigências das normas NBR 16916 (ABNT, 2021) NBR 16972 (ABNT, 2021) e NBR 17054 (ABNT, 2022). Obtiveram-se, a partir de ensaios laboratoriais, os resultados de massa unitária, massa específica saturada superfície seca e seca e absorção, conforme Tabela 5. Além disso, a granulometria é apresentada na Tabela 6, bem como sua representação gráfica no Gráfico 3, onde é comparado com os limites propostos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 5 – Massa unitária, massa específica e absorção do agregado miúdo: areia

Característica analisada	Resultado
Massa unitária (g/cm ³)	1,42
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,60
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,57
Absorção (%)	1,0

Fonte: Elaborada pela autora.

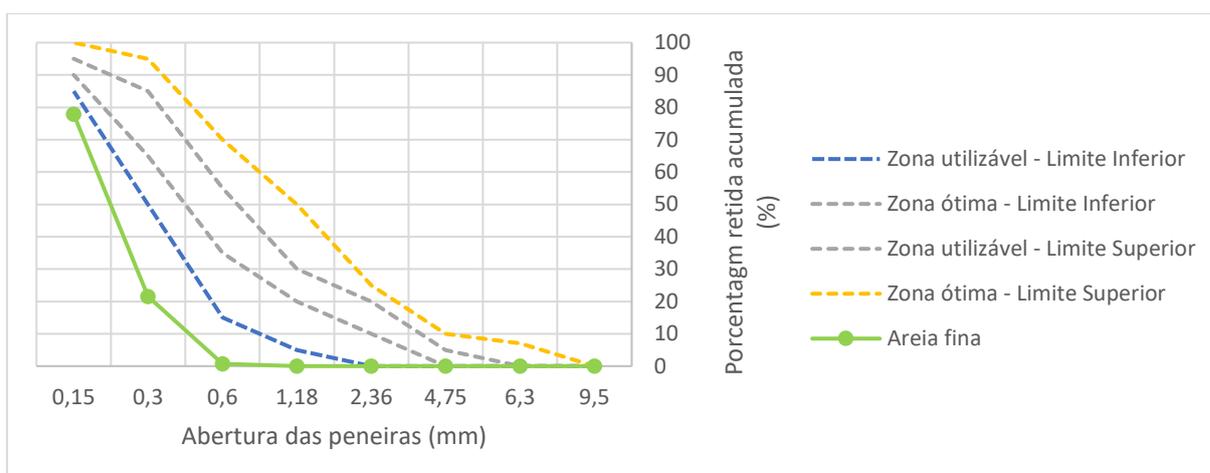
Tabela 6 – Distribuição granulométrica agregado miúdo: areia

Abertura das peneiras (mm)	Massa retida (g)	% retido em massa	% acumulado
4,8	0,0	0,0	0,0
2,4	0,0	0,0	0,0
1,2	0,0	0,0	0,0
0,6	0,6	0,1	0,1
0,3	24,6	3,1	3,2
0,15	597,2	74,7	77,8
Fundo	177,2	22,1	100,0
Total	800	-	-

Dmáx.: 0,3 mm Módulo de finura: 0,81

Fonte: Elaborada pela autora.

Gráfico 3 – Distribuição granulométrica da areia

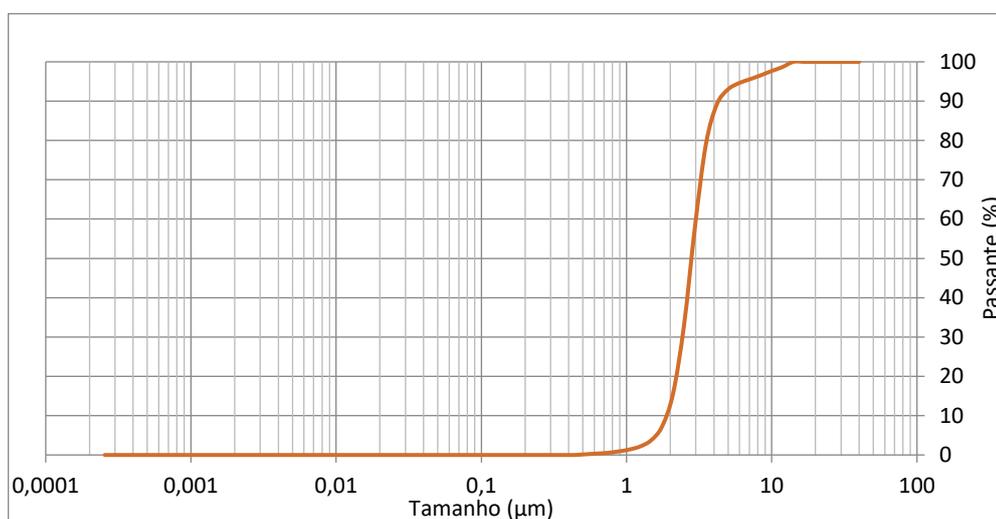


Fonte: Elaborado pela autora.

O agregado miúdo utilizado no trabalho encontra-se fora dos limites estipulados pela NBR 7211 (ABNT, 2009), situado abaixo da zona utilizável de limite inferior, representando uma areia com partículas finas, mas para essa utilização está adequada.

A substituição parcial do agregado miúdo por LBRO ocorreu no percentual passante de 22%, nos teores de 20, 60 e 100%.

Para esse material passante foi realizada a análise granulométrica a laser no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Unisinos. O Gráfico 4 representa a curva granulométrica obtida, destacam-se os resultados dos diâmetros D10, D50, D90, respectivamente, 101,0 μm , 149,4 μm , e, 210,8 μm .

Gráfico 4 – Curva granulométrica passante 150 μm 

Fonte: Elaborado pela autora.

3.1.3 Água

Com relação à água, utilizou-se a fornecida pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE).

3.1.3 Aditivos

3.1.3.1 Aditivo polimérico

O aditivo polimérico utilizado foi o DA-1200, da marca Dairen Chemical Corporation, à base de etileno e acetato de vinila. Segundo o fabricante, na utilização em cola de azulejo, recomenda-se o uso de 1 a 5% do produto em conjunto com cerca de 0,2 - 0,6% de éter de celulose. Para obter adesivos com maior plasticidade, a proporção de pó redispersível deve ser aumentada e a quantidade de cimento reduzida. Apresenta pH neutro e viscosidade de 2000 mPa.s. A porcentagem utilizada na pesquisa foi de 5%.

3.1.3.2 Aditivo à base de éter de celulose

O aditivo à base de éter de celulose utilizado foi o MKW 4000 PF 01, da marca Walocel, sendo disponibilizado na forma de pó, solúvel em água, apresentando pH neutro e viscosidade entre 3,5 e 5 mPa.s. De acordo com o fabricante, o aditivo confere propriedades bem equilibradas, incluindo tempo aberto, propriedades de adesão e resistência ao cisalhamento. Além de boa trabalhabilidade e melhora de retenção de água. A porcentagem utilizada na pesquisa foi de 0,4%.

3.1.4 Lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO)

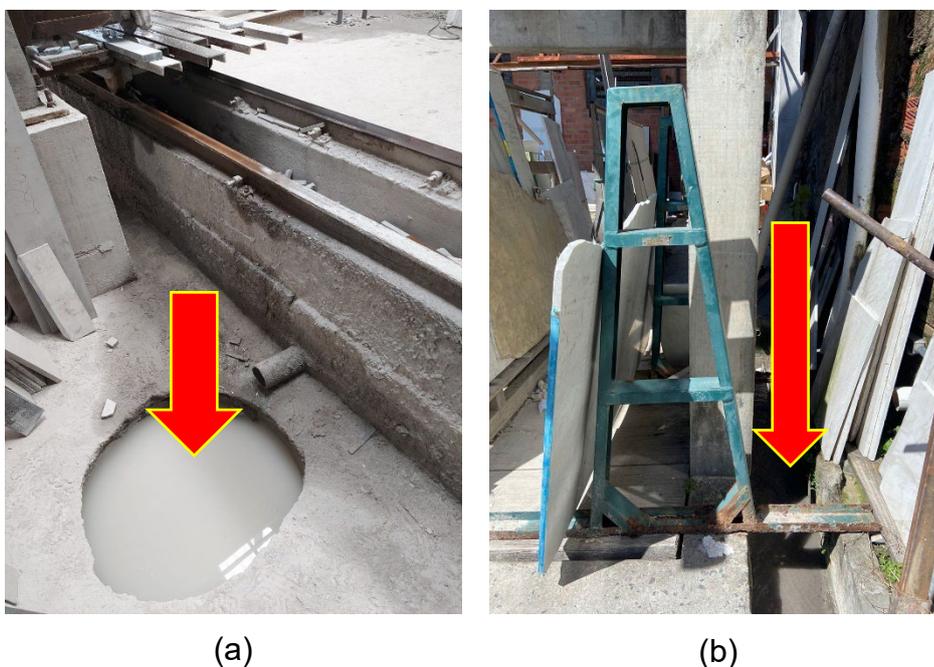
3.1.4.1 Amostragem e homogeneização

Com a intenção de manter um padrão para o resíduo sólido, foi utilizada a norma NBR 10007 (ABNT, 2004) para a realização da amostragem do material. Ao todo, foram coletadas quatro amostras da LBRO produzidas durante a serragem e polimento das placas de rochas ornamentais. Uma das coletas foi realizada em datas espaçadas, diretamente da descarga do tear de uma empresa de mármore e granitos

localizada na cidade de São Leopoldo/RS e, a outra, também seguindo os procedimentos da NBR 10007 (ABNT, 2004), porém localizada na cidade de Canoas/RS, conforme ilustra a Figura 8.

Cada amostra foi avaliada individualmente quanto à pozolanicidade, em diversas temperaturas conforme descrito no item 3.1.4.2, com a intenção de se trabalhar apenas as amostras com potencial de utilização, ou seja, que apresentassem pozolanicidade e assim, definir se a substituição seria pelo cimento Portland ou agregado miúdo, se fossem reativas ou inertes, respectivamente.

Figura 8 – Pontos de coleta dos resíduos – (a) Empresa de São Leopoldo;
(b) Empresa de Canoas



Fonte: Registrada pela autora.

Ambas as coletas foram realizadas nos decantadores das empresas, no caso da Figura (a), havia apenas um equipamento de corte que despejava no decantador e ele encontrava-se ao lado da serra. Já na Figura (b), apresenta-se o decantador localizado na parte externa, recebendo o lodo de mais de uma serra a partir da canaleta ilustrada na Figura 8.

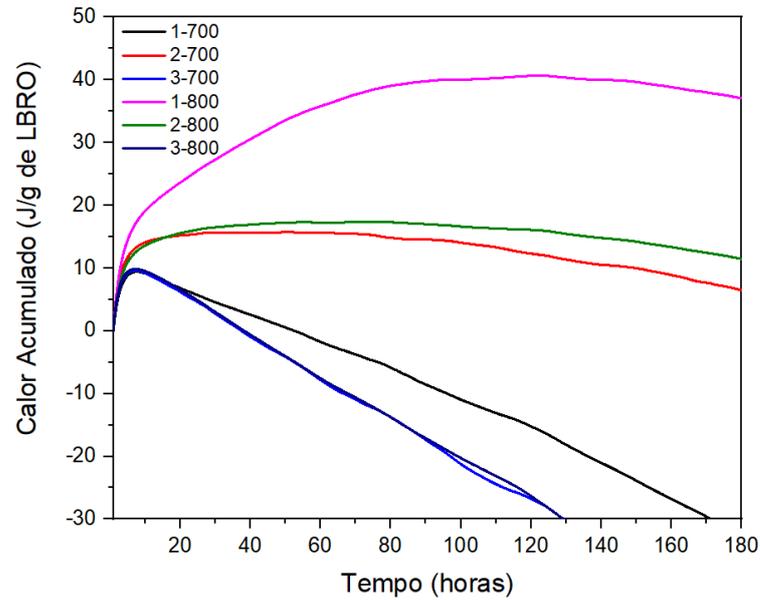
3.1.4.2 Determinação da pozolanicidade pelo método R³

As amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 105 ± 5 °C pelo período de 24h. Após, o material foi desagregado em almofariz a fim de reduzir o tamanho dos torrões, não sendo necessária a utilização de moinho horizontal, visto que o material se desagrega com facilidade.

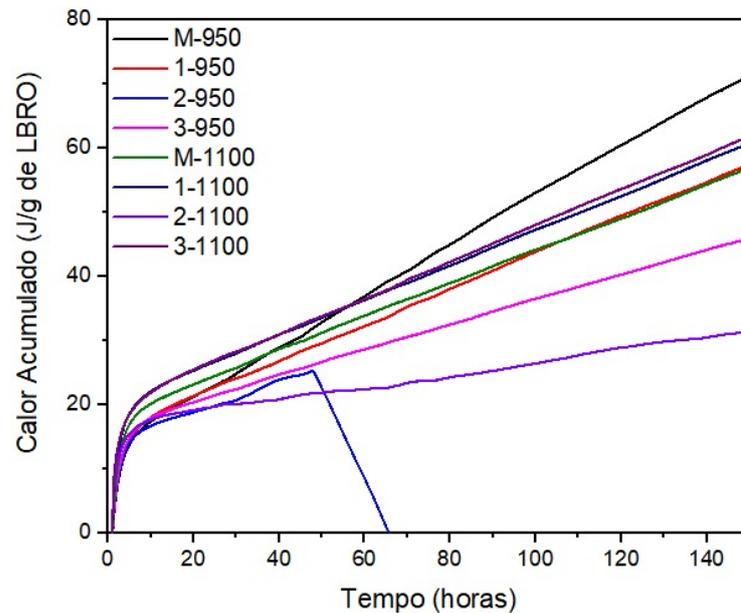
O uso da metodologia R³ está relacionado à avaliação da pozolanicidade do material, sendo, em um primeiro momento, testadas as três amostras separadamente em duas temperaturas de calcinação, 700 e 800 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. Para a realização dessa etapa, o material utilizado foi o passante na peneira de 75 µm (*peneira de número #200*).

A técnica, baseada no estudo de Avet *et al.* (2016), consiste em reproduzir o ambiente de reação da argila calcinada em um cimento misturado, sem incorporar efetivamente as fases de clínquer hidratado. Portanto, álcalis solúveis e sulfato foram adicionados, primeiramente para reproduzir o pH da solução porosa do cimento e acelerar a reação pozolânica e, para levar à formação de produtos de reação similares aos cimentos misturados reais, como gel C-A-S-H, etringita e fases AFm. A quantidade de calor acumulada durante a reação foi medida em um calorímetro isotérmico (TAM Air) ao longo de 7 dias a 20 °C. Todos os componentes da pasta, incluindo as soluções de mistura, foram armazenados à mesma temperatura do teste. Foram pesadas 110 g da pasta e então misturados a 1600 rpm por 2 minutos e 15 g da pasta foram colocados em uma ampola de vidro, que foi fechada e colocada dentro do calorímetro.

O Gráfico 5 ilustra o primeiro teste realizado, sendo possível observar que nenhuma das amostras apresentou indícios de pozolanicidade. Dessa forma, optou-se pela coleta de um novo resíduo, coletado na cidade de Canoas identificado pela letra "M" e, a definição de novas temperaturas de calcinação, conforme pode ser observado no Gráfico 6. As demais identificações, de 1 a 3, correspondem a ordem de coletas realizadas em São Leopoldo.

Gráfico 5 – Resultados do primeiro teste para o ensaio de pozolanicidade (R³)

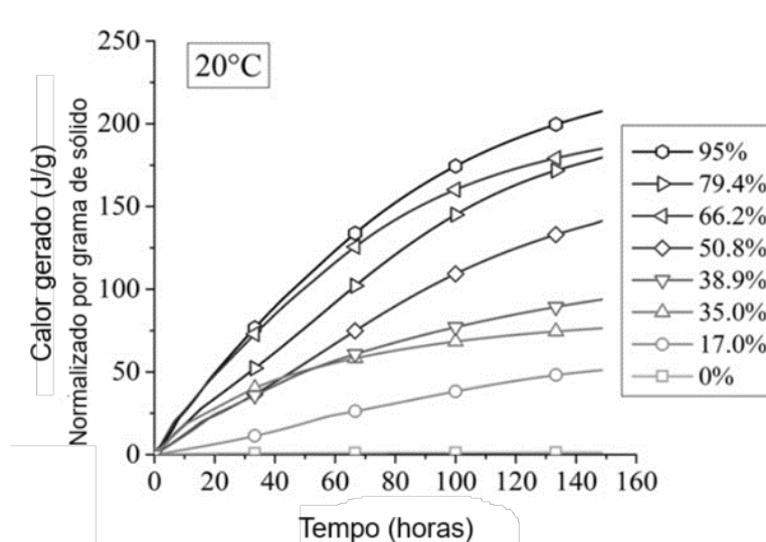
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 6 – Resultados oficiais do ensaio de pozolanicidade (R³)

Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se que com o aumento da temperatura de calcinação, as amostras se mostraram promissoras, contudo, nenhuma delas apresentou característica similar ao resultado obtido no estudo de AVET *et al.* (2016), conforme observado na Figura 9.

Figura 9 - Liberação de calor de hidratação para as misturas de argila calcinada e Portlandita sem calcário a 20°C



Fonte: Avet *et al.* (2016, p. 6).

Analisando a Figura 9, percebe-se o calor gerado está em torno dos 200 J/g para um período de 7 dias. Percebe-se que mesmo a amostra com maior calor gerado, M-950, atingiu resultados inferiores a metade, de 80 J/g, indicando que o resíduo não apresentou características para ser utilizado como uma pozolana. Apenas disso, optou-se por utilizar apenas a amostra M-950, a qual obteve destaque no resultado, sendo seguida pelas demais amostras que tiveram queima superior, de 1100 °C., sendo optado utilizar o resíduo em substituição do agregado miúdo.

Para dar continuidade aos ensaios de caracterização e, posterior moldagem das argamassas, todas as amostras coletadas na marmoraria em Canoas foram misturadas ainda úmidas, secas em temperatura por um período de 48 horas a fim de retirar parte da umidade e, por fim, seco em estufa a 105 °C por 24 horas.

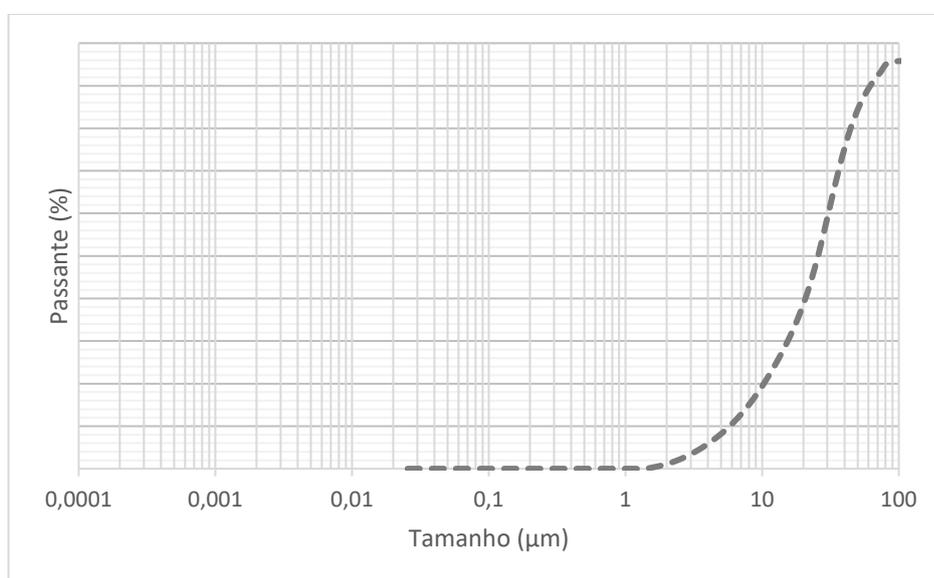
Após esses processos, as amostras foram destorroadas, a fim de soltar as partes aglomeradas e, posteriormente, quarteadas. Depois do quarteamento, foram postas em cadinhos de porcelana e calcinadas a uma taxa de 10 °C/min até uma temperatura de 950 °C, sendo mantidas nessa temperatura por 3 horas.

3.1.4.3 Caracterização

Os ensaios utilizados para caracterização da LBRO foram os de massa específica, área superficial (BET), granulometria à laser e difração de raios X (DRX)

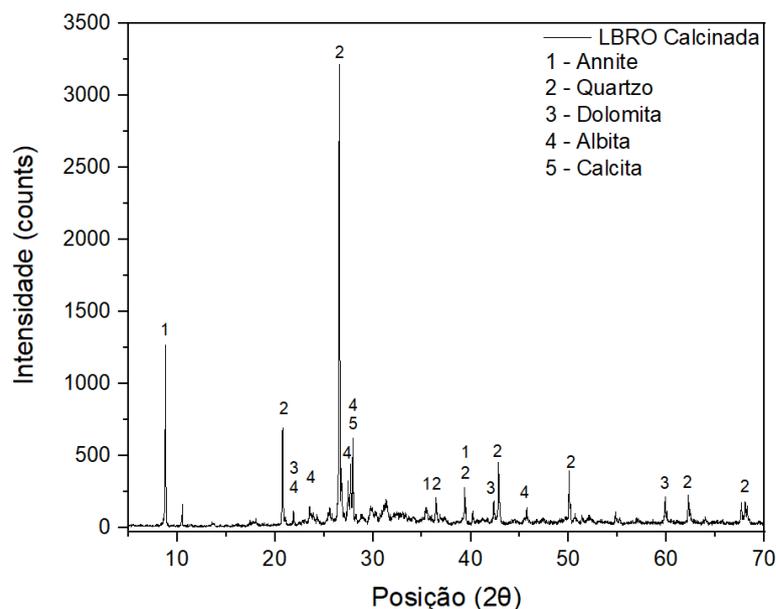
no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) e, último, no ito Oceaneon, ambos localizados na Unisinos. O Gráfico 7 representa a curva granulométrica obtida para o resíduo. Destacam-se, no caso do resíduo, os resultados de D10, D50, D90, respectivamente, 5,79 μm , 25,65 μm , e, 61,87 μm , sendo o resíduo um material mais grosso que o aglomerante. O Gráfico 8 apresenta a composição mineralógica do resíduo, obtida de maneira qualitativa pelo ensaio de DRX. A Tabela 7 a apresenta a composição química da LBRO, obtida de modo quantitativo pelo ensaio de FRX. Além disso, foram realizados os ensaios de massa específica, onde obteve-se o resultado de 2,98 g/cm^3 e, de área superficial de 1,03 m^2/g .

Gráfico 7 – Curva granulométrica do resíduo LBRO



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 8 – Difração de raios-X do resíduo LBRO



Fonte: Elaborado pela autora.

Mesmo apresentando diversos picos de quartzo, a amostra não apresentou halo-amorfo e, além disso, os picos de intensidade foram abaixo, quando comparados a trabalhos em que após a calcinação o resíduo apresentou características de pozolana, como por exemplo VAZZOLER *et al.*, (2018).

Tabela 7 – Resultado Fluorescência de raios-X quantitativo, em porcentagem

MgO	17,76
Al ₂ O ₃	7,39
SiO ₂	40,47
SO ₃	0,45
Cl	0,17
K ₂ O	1,84
CaO	24,02
TiO ₂	1,34
Fe ₂ O ₃	5,73
CuO	0,17
PF	0,30

Fonte: Elaborada pela autora.

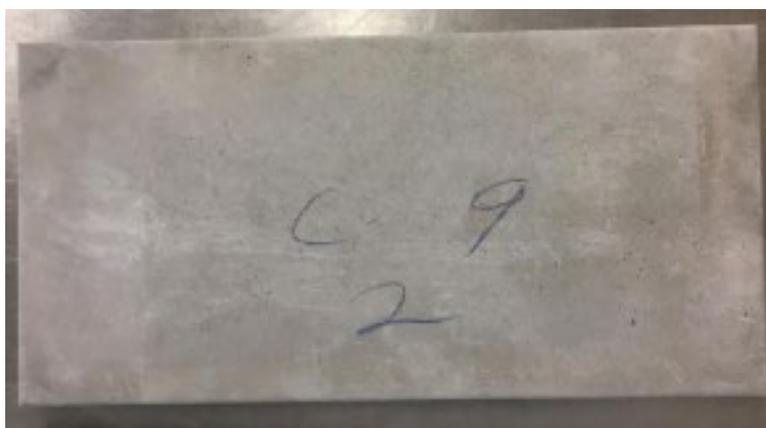
De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), existem três classes de material pozolânico, (N) pozolanas naturais e artificiais; (C) cinzas volantes e, (E) quaisquer pozolanas não contempladas em (N) e (C), a partir das quais, algumas propriedades requeridas. Dentre elas, destaca-se o somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, a quantidade de SO_3 e perda ao fogo, no caso do material estudado, os valores obtidos foram, respectivamente, 53,59%, 0,45% e 0,3%, enquadrando-se nos limites propostos em norma para a classe E, de ≥ 50 , ≤ 5 e, ≤ 3 .

Como uma análise preliminar, percebe-se que os estudos apresentados na Tabela 2 cujos valores de sílica presentes no resíduo são superiores a 50%, foi possível a substituição pelo aglomerante, tendo em vista a pozolanicidade apresentada pelo material, sendo classificados como N ou C. No caso dessa pesquisa, o resíduo se classificou como E, algo genérico e com características insuficientes para proporcionar propriedades superiores a uma amostra de referência.

3.1.5 Substrato padrão

O substrato padrão, conforme apresentado na Figura 10, possui as dimensões de 250 x 500 x 200 mm, devendo permanecer, por pelo menos 48 horas, em condição ambiente. Além disso, antes da aplicação da argamassa colante, a superfície foi limpa com escova de aço com a intenção de retirar qualquer partícula solta e molhada com água, por fim, recebe uma imprimação.

Figura 10 – Substrato padrão normatizado

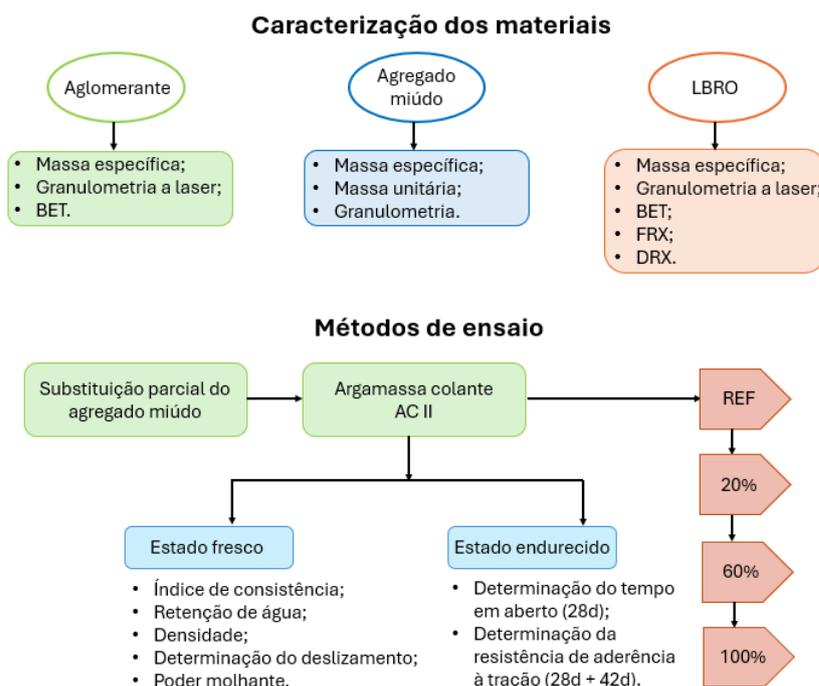


Fonte: Registrada pela autora.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os métodos de ensaio utilizados foram: ensaios de caracterização dos materiais constituintes e análises das argamassas colantes no estado fresco e endurecido, conforme descritos na Figura 11 a seguir.

Figura 11 – Estruturação do programa experimental



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.1 Análise e granulométrica

Com o intuito de avaliar a curva granulométrica do cimento e da lama do beneficiamento de rochas ornamentais, foi utilizado o método de granulometria por difração à laser, tendo em vista a finura dos materiais. Posteriormente, o ensaio foi realizado para o material passante na peneira 150 μm . O ensaio foi realizado no equipamento da marca Microtrac modelo S3500, disponível no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Unisinos. Com o término das análises, alguns dados importantes foram ser obtidos: diâmetro médio (D50), diâmetro de 90% (D90) e 10% (D10), além das curvas granulométricas em forma de histograma.

Com relação ao agregado miúdo foi utilizada a norma NBR 17054 (ABNT, 2022), a fim de elaborar uma curva de distribuição granulométrica, a partir da qual foi

analisado se o agregado pertence a zona ótima, zona utilizável superior ou zona utilizável inferior e, os resultados de dimensão máxima e módulo de finura.

Ambas as amostras foram preparadas com secagem prévia em estufa a uma temperatura de 105 ± 5 °C por um período de 24 horas. Para o aglomerante e a LBRO, foi utilizada a técnica por via-úmida, sendo o fluido escolhido na análise o álcool isopropílico e a dispersão auxiliada pela utilização de ultrassom.

3.2.2 Massa unitária

Para a determinação da massa unitária do agregado miúdo foi empregado o método C descrito pela norma NBR 16972 (ABNT, 2021). A amostra para ensaio deve representar aproximadamente 150% a quantidade total do recipiente a ser preenchido, sendo seca em estufa a temperatura de 105 ± 5 °C por um período de 24 horas.

3.2.3 Massa específica

A massa específica do aglomerante e do resíduo sólido foi definida pela técnica de picnometria a gás hélio, sendo utilizado o equipamento da marca Micromeritics modelo Accupyc II 1340, disponível no LCVMat. As amostras foram secas em estufa a temperatura de 105 ± 5 °C por um período de 24 horas, após, foram moídas até a obtenção de uma granulometria inferior a $75 \mu\text{m}$ (peneira #200), controlada por peneiramento.

Quanto ao agregado miúdo, foi utilizado o método descrito pela norma NBR 16916 (ABNT, 2021), sendo a amostra preparada com no mínimo 2,5 kg de material e distribuída em uma bandeja, coberta com água por um período de 24 horas.

3.2.4 Área superficial por BET

No ensaio de área superficial específica por BET, a intenção foi avaliar se o resíduo sólido apresenta área superficial maior do que o material referência, nesse caso, o cimento. O ensaio consiste na adsorção física de um gás na superfície do sólido, geralmente utilizado o N_2 , sendo calculada a quantidade de gás adsorvido correspondente à camada monomolecular na superfície. O ensaio foi realizado no equipamento Micromeritics, modelo TriStar II Plus pertencente ao LCVMat da

Unisinos. As amostras foram secas em estufa a temperatura de 105 ± 5 °C por um período de 24 horas, após, foram moídas até a obtenção de uma granulometria inferior a 75 µm (peneira #200), controlada por peneiramento. Antes do ensaio, as amostras passam por um processo de desgaseificação.

3.2.5 Fluorescência de raios-X

A partir desse ensaio, foram identificados os elementos químicos presentes na amostra de LBRO, bem como sua concentração, em porcentagem, a partir da utilização de uma ficha padrão do mesmo material. Como resultado, obtém-se, em porcentagem de óxidos, os elementos químicos presentes na amostra analisada. O equipamento utilizado foi o espectrômetro de fluorescência de raios-X de bancada, Epsilon 1 da PANalytical, disponível no ITT Oceaneon, sendo os materiais analisados qualitativamente. As amostras foram preparadas conforme descrito em 3.1.5.

3.2.6 Difração de raios-X

Tendo os resultados do FRX, o ensaio de Difração de raios-X (DRX) serve como um complemento. O principal objetivo do ensaio foi determinar possível grau de amorfismo no resíduo sólido, sendo representado pelo halo amorfo. Além disso, determinar a composição mineralógica do material, sendo possível avaliar a presença de calcita e dolomita (para rochas carbonáticas – mármore) e, quartzo, feldspato e moscovita (para rochas ígneas – granito) (RASHWAN *et al.*, 2020), determinando a principal rocha utilizada. O equipamento utilizado foi o disponível no ITT Oceaneon da Unisinos, de marca PANalytical, modelo EMPYREAN e, os resultados interpretados através do software X'pert HighScore Plus da empresa PANalytical.

A preparação das amostras se deu conforme descrito em 3.1.5. Quanto aos parâmetros de ensaio adotados: radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40 kV e corrente de 40 mA, variando de 5 a 75 graus 2θ , com um passo de 632 s.

3.3 REPRODUÇÃO DA ARGAMASSA COLANTE

A argamassa colante foi preparada de acordo com os procedimentos descritos na norma NBR 14081-2 (ABNT, 2015). O traço foi desenvolvido a partir de testes

baseados em literaturas que desenvolveram o mesmo produto, a argamassa colante, destacando-se Constantino (2022) e Pereira *et al.*, (2023). Além disso, a quantidade de água foi estipulada de acordo com a recomendação do fabricante de argamassa colante ensacadas.

A Tabela 8 apresenta a quantidade de materiais utilizados, sendo o traço definido 1:2,5 (cimento:areia), a/c 0,70, éter de celulose (0,4%) e PVA (5%), teores de substituição de 20, 60 e 100% da porcentagem de fundo da areia, que, conforme distribuição granulométrica, corresponde a 22% do total. Os teores de substituição foram escolhidos com base no trabalho de Modolo *et al.* (2015), sendo definidos teores altos com a intenção de fugir dos teores convencionais.

Tabela 8 – Traço utilizado para o desenvolvimento das argamassas colantes

Traço	Cimento (g)	Areia (4,75 a 0,15 mm) (g)	Fundo		Água (g)	Éter (g)	PVA (g)
			(passante na 0,15 mm) (g)	Lama (LBRO) (g)			
REF	1000	1950	550	-	700	4,0	50,0
20%LBRO	1000	1950	440	110	700	4,0	50,0
60%LBRO	1000	1950	220	330	700	4,0	50,0
100%LBRO	1000	1950	-	550	700	4,0	50,0

Fonte: Elaborada pela autora.

Com os materiais previamente secos, no caso da areia e LBRO e, pesados de acordo com o traço desenvolvido, foi realizada a homogeneização de todos os componentes em um saco plástico vedado, por aproximadamente 3 minutos, até que ocorresse a dispersão dos grãos, conforme ilustra a Figura 12.

Figura 12 – Materiais constituintes do traço – (a) Antes da homogeneização; (b) Depois da homogeneização



Fonte: Registrada pela autora.

A velocidade de mistura proposta pela norma é a lenta, com rotação em torno do eixo igual a 140 ± 5 rpm e movimento planetário igual a 62 ± 5 rpm. Com relação ao ambiente de preparo da argamassa, temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade em $(60 \pm 2) \%$. Para a cura das amostras, a umidade relativa do ar se altera para $(60 \pm 4) \%$. Todos os materiais foram deixados em ambiente climatizado por um período de pelo menos 24 h antes da moldagem, com exceção das placas-padrões que já se encontravam 24 h antes nesse ambiente.

Para a mistura dos materiais, primeiramente a água foi disposta completamente na cuba metálica e, após, o conteúdo presente no saco plástico, em um tempo limite de 30 s. O misturador foi acionado na velocidade baixa e permaneceu ligado por 30 s. Após esse período, a argamassadeira foi desligada e teve suas pás e superfície interna da cuba limpas, em um tempo máximo de 60 s. Por fim, a argamassadeira permaneceu ligada por mais 60 s na velocidade baixa.

Finalizada a mistura, a argamassa colante permaneceu por um período de maturação de 15 min, sendo a cuba coberta por um pano úmido para evitar a perda de água, conforme ilustra a Figura 13. Em seguida, foi misturada por 15 s e se deu início a aplicação no substrato-padrão, em um período máximo de 15 min. As amostras permaneceram com a superfície de ensaio expostas a condições de laboratório por 48 h.

Vale salientar que foram desenvolvidos quatro traços de argamassa, sendo uma referência e três com substituição da fração do fundo do agregado miúdo pela LBRO (20, 60 e 100%, em massa).

Figura 13 – Argamassadeira de bancada utilizada



Fonte: Registrada pela autora.

3.4 ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO

3.4.1 Ensaio de índice de consistência

Para a definição desse parâmetro foi utilizada a norma NBR 13276 (ABNT, 2016). Após o preparo da argamassa colante, o conteúdo foi despejado no molde padrão em 3 camadas aproximadamente iguais, sendo aplicados, sucessivamente, quinze, dez e cinco golpes com soquete.

Em seguida, o molde foi retirado lentamente e aplicadas 30 quedas na mesa de consistência, conforme ilustra a Figura 14.

Figura 14 – Mesa de consistência conforme NBR 13276



Fonte: Registrada pela autora.

3.4.2 Ensaio de densidade e teor de ar

Esses parâmetros foram definidos pela NBR 13278 (ABNT, 2005). O recipiente, de volume e massa conhecida, foi preenchido com a argamassa em três camadas de alturas aproximadamente iguais, em cada uma delas, foram aplicados 20 golpes e 3 quedas na mesa de consistência, sendo registrado o peso ao final, conforme Figura 15.

Figura 15 – Densidade de massa conforme NBR 13278



Fonte: Registrada pela autora.

3.4.3 Retenção de água

O ensaio de determinação de retenção de água foi realizado seguindo os procedimentos da NBR 13277 (ABNT, 2005). O ensaio consiste em medir a massa de água retida pela argamassa em um funil de filtragem, após sucção realizada com o auxílio de uma bomba à vácuo, conforme Figura 16.

Figura 16 – Aparelho de retenção de água conforme NBR 13277



Fonte: Registrada pela autora.

3.4.4 Ensaio de determinação do deslizamento

O ensaio de determinação do deslizamento da argamassa colante foi realizado de acordo com os procedimentos da NBR 14081-5 (ABNT, 2012), sendo necessário a moldagem de uma placa por traço, totalizando quatro amostras. Para isso, foi necessário desenvolver um aparato articulado que possibilitou o substrato padrão ficar na posição vertical, conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17 – Aparato desenvolvido



Fonte: Registrada pela autora.

Como etapa inicial do ensaio, tem-se a fixação de uma régua na borda longitudinal do substrato, sendo colocada uma fita adesiva sobre o substrato, de modo que sua aresta fique rente à régua fixada. A seguir, foi aplicada a argamassa colante sobre o substrato, sendo formados cordões no sentido transversal, de modo que a argamassa sobreponha ligeiramente a fita, com objetivo de que os cordões fiquem perpendiculares à régua. A fita foi retirada e foram imediatamente posicionados dois espaçadores de 25 mm de lado para cada placa cerâmica, posicionados de modo a ficarem encostado na régua, conforme ilustra a Figura 18.

Figura 18 – Aparato montado com a amostra a ser ensaiada



Fonte: Registrada pela autora.

Após um período de 2 min desde a aplicação da argamassa, foram dispostas três placas cerâmicas quadradas, do grupo de absorção Bla, de lado (100 ± 1 mm) centralizadas sobre os cordões de argamassa e com uma das arestas contra os

espaçadores. Antes de posicionar o conjunto na posição vertical, foi disposto, sobre cada placa cerâmica, um peso padrão de 5 kg por 30 s. Em seguida, foram retirados os espaçadores e realizadas duas leituras iniciais para cada placa, nos pontos previamente marcados, da distância entre a placa cerâmica e a régua.

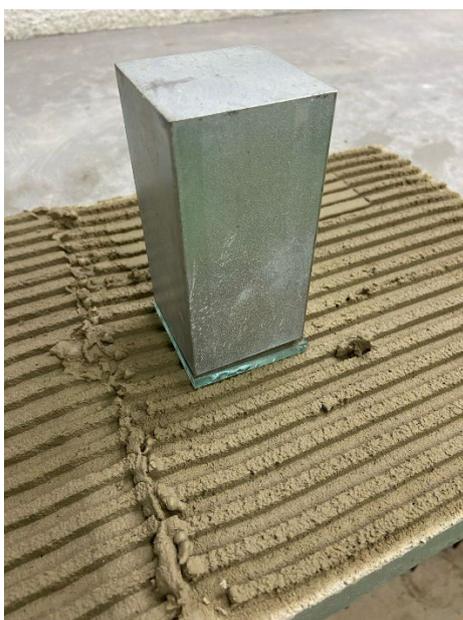
Após as leituras iniciais, o conjunto foi colocado na posição vertical e aguardado 20 min. Passado esse período, o substrato foi colocado novamente na posição horizontal, a fim de determinar a distância entre os pontos definidos anteriormente, sendo verificada a variação entre a medida inicial e final.

3.4.5 Poder molhante e transferência

O ensaio foi realizado juntamente com o ensaio de deslizamento, sendo necessário moldar uma placa para cada traço, totalizando quatro amostras. Esse ensaio foi definido a partir da Norma Europeia EN 1347:2007, tendo como principal objetivo a determinação do tempo de vida da argamassa colante após sua aplicação.

O ensaio consiste na distribuição de peças de vidro com dimensão 50 x 50 x 5 mm sobre a placa padrão após espalhamento da argamassa, nos tempos de 10, 20, 30 e 40 minutos, sendo necessário pressionar as peças com um peso metálico de 2 kg durante 30 s, conforme ilustra a Figura 19. A finalidade do ensaio foi contabilizar a área de contato entre a argamassa e a folha de vidro.

Figura 19 – Disposição do peso sobre a placa de vidro



Fonte: Registrada pela autora.

3.5 ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECIDO

3.5.1 Ensaio de determinação do tempo em aberto

O ensaio de determinação do tempo em aberto da argamassa colante foi realizado de acordo com os procedimentos propostos pela norma brasileira NBR 14081-3 (ABNT, 2012). As placas cerâmicas de seção quadrada com aresta de (50 ± 1 mm), pertencentes ao grupo BIII, foram aplicadas à argamassa após transcorrido o tempo em aberto especificado na NBR 14081-1 (ABNT, 2012), dependendo do produto a ser ensaiado, sendo que, para ACII o tempo em aberto é ≥ 20 minutos.

O conjunto foi mantido nas condições ambientes especificadas na NBR 14081-2 (A-BNT, 2012) até a idade de ensaio, aos 28 dias. A quantidade total de amostras a serem ensaiadas foram uma por traço, totalizando quatro amostras.

3.5.2 Ensaio de determinação da resistência de aderência à tração

Para o ensaio de determinação da resistência de aderência à tração da argamassa colante, foi seguido o procedimento descrito na NBR 14081-4 (ABNT, 2012). Sendo utilizados três substratos padrões por argamassa, totalizando doze amostras. Em cada substrato, foram dispostas 10 placas cerâmicas do grupo BIIa, de seção quadrada com aresta de (50 ± 1 mm), sobre 4 cordões de argamassa colante, sendo necessário aguardar 5 min após aplicação da argamassa para o assentamento.

Sobre cada placa cerâmica aplica-se o peso padrão de ($2 \pm 0,01$ kg) durante 30 s. A sequência de colocação e remoção do peso padrão deve coincidir com a ordem de colocação das peças cerâmicas sobre os cordões. Após a conclusão da aplicação do peso, foi deixado aproximadamente 1 cm de cordão ao redor de cada peça, sendo essa etapa concluída em até 10 min após o término da aplicação dos pesos padrão, conforme ilustra a Figura 20.

Figura 20 – Placas em cura ambiente



Fonte: Registrada pela autora.

O tempo de cura foi de 28 dias, sendo ensaiadas as condições de cura normal (I), onde se controla a temperatura em $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade em $(60 \pm 2) \%$, cura em estufa (II), onde nos primeiros 14 dias as amostras permaneceram em condições normais e, passando esse período permaneceram o restante do tempo em estufa à temperatura de $(70 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e, cura com imersão em água (III), a qual permaneceram 7 dias em condições normais e, os 21 dias restantes submersas em tanque com temperatura controlada de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

No período de 72h antes do ensaio as pastilhas metálicas foram coladas, com cola epóxi, em cada placa cerâmica. O ensaio foi realizado com o auxílio do aparelho de arrancamento hidráulico manual da marca SOLOTEST, com capacidade de carregamento de 15000 N, conforme ilustra a Figura 21.

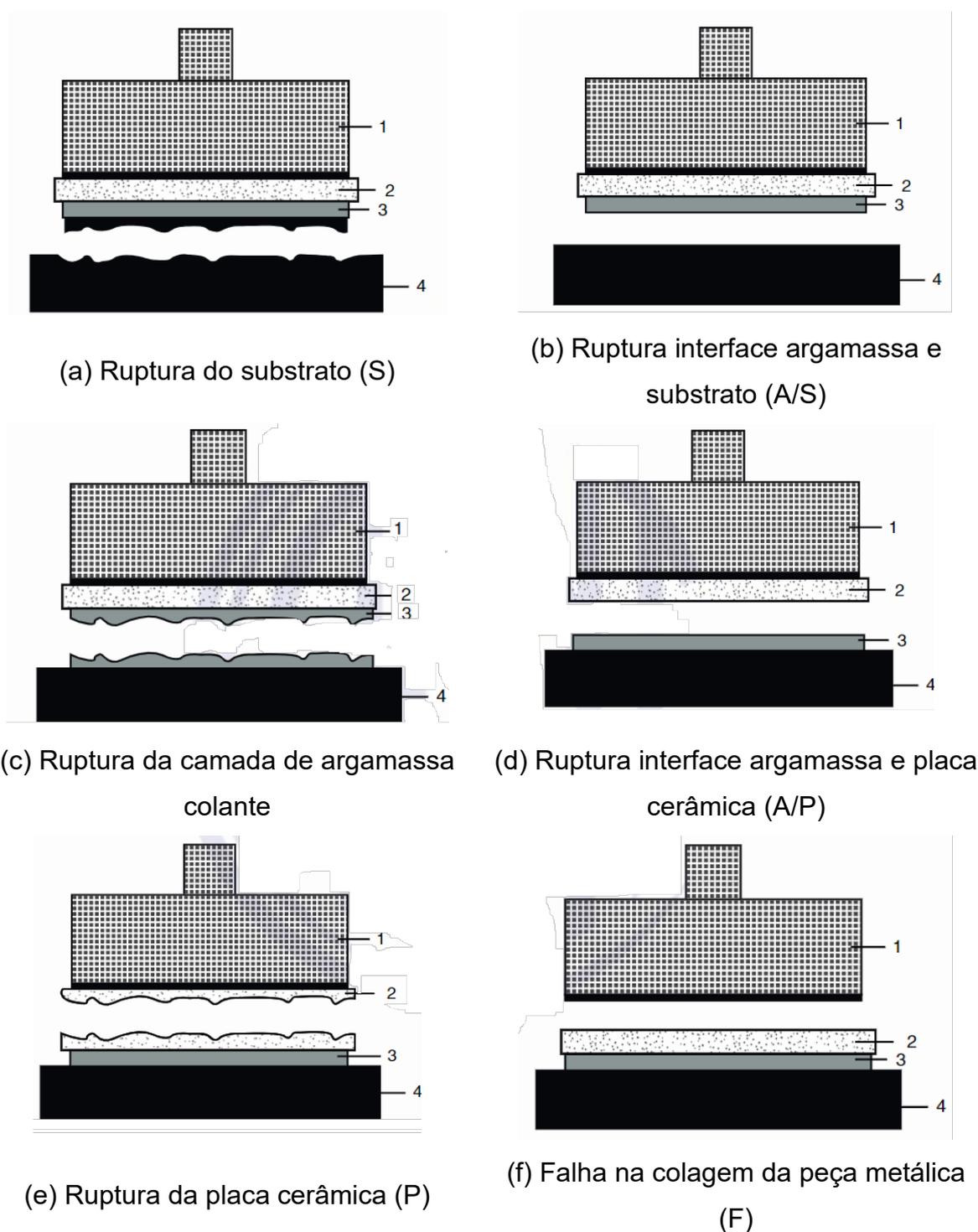
Figura 21 – Ensaio de resistência de aderência à tração



Fonte: Registrada pela autora.

A NBR 14081-4 (ABNT, 2012) define, por meio de ilustrações, as formas de ruptura possíveis para esse ensaio, sendo ilustradas na Figura 22 abaixo. Além disso, deve ser indicada a porcentagem de ruptura de cada uma das 12 amostras, seja uma ou mais formas.

Figura 22 – Tipos de ruptura



Fonte: NBR 14081-4 (ABNT, 2012, p. 5).

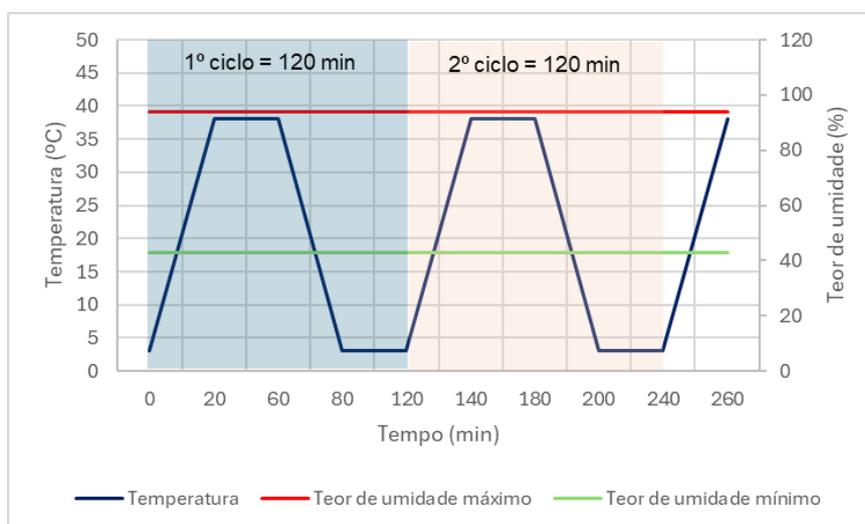
(Legenda: 1 – peça metálica; 2 – placa cerâmica;
3 – argamassa colante; 4 – substrato padrão)

3.5.3 Envelhecimento acelerado – exposição térmica

O ensaio de envelhecimento acelerado por exposição térmica teve como intenção simular diversas condições climáticas, tais como calor, chuva e orvalho, as quais as pastilhas cerâmicas em conjunto com a argamassa colante, são expostas diariamente.

Para esse ensaio foram moldadas uma placa por traço, totalizando quatro unidades, sendo avaliadas posteriormente com relação à aderência à tração. O ciclo higrotérmico foi definido com base no estudo de Constantino *et al.*, 2022, sendo composto pelas etapas de aquecimento e resfriamento. Cada etapa demorou 60 minutos, sendo 20 para a elevação/diminuição da temperatura e, 40 para a permanência, totalizando 120 min por ciclo. Durante a etapa de aquecimento, a temperatura foi elevada de 3 °C à 38 °C e, na etapa de resfriamento, diminuição de 38 °C à 3 °C. Com relação a umidade relativa, fixados em 43% e 94%, sendo os valores mínimo e máximo, respectivamente. Esses valores foram estabelecidos de forma a simular condições de clima úmido para temperatura mínima, e de clima seco para a temperaturas máxima. A Figura 23 ilustra um esquema do ciclo realizado nas amostras. O ensaio teve duração de 14 dias, aproximadamente, representando 160 ciclos.

Figura 23 – Ciclo de temperatura, umidade e duração



Fonte: Elaborada pela autora.

Por meio de ensaios de alta e baixa temperatura, ambiente seco ou úmido, é possível analisar as falhas que podem ocorrer no produto e de que forma isso afetará as suas funcionalidades para o qual foi projetado. O ensaio foi realizado na câmara de choque térmico pertencente ao ITT Fuse da Unisinos, conforme a Figura 24.

Figura 24 – Câmara higrotérmica



Fonte: Registrada pela autora.

3.6 SÍNTESE DE NORMAS E PARÂMETROS

O Quadro 4 apresenta de maneira resumida todos os ensaios realizados na dissertação.

Quadro 4 – Síntese de normas e parâmetros a serem avaliados

Método	Parâmetro analisado
ABNT NBR 17054:2022	Análise granulométrica
ABNT NBR 16972:2021	Massa unitária
ABNT NBR 16916:2021	Massa específica
ABNT NBR 14081-2:2015	Aplicação da argamassa colante
ABNT NBR 14081-3:2012	Tempo em aberto
ABNT NBR 14081-4:2012	Aderência à tração
ABNT NBR 14081-5:2012	Deslizamento
ABNT NBR 13276:2016	Índice de consistência
ABNT NBR 13277:2016	Retenção de água
ABNT NBR 13278:2016	Densidade e teor de ar
EN 1347:2007	Poder molhante

Fonte: Elaborado pela autora.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para analisar dos resultados obtidos frente ao ensaio de resistência à aderência, utilizou-se a análise de variância (ANOVA) com o auxílio do software Statistica. Esse recurso estatístico foi utilizado com a intenção de identificar erros associados ao método experimental, chamado de erro puro e, as fontes de variação, que neste caso incluem a substituição da parte fina da areia pelo resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, os diferentes tipos de cura e a interação entre essas variáveis. A metodologia permite comparar as médias de diferentes grupos e verificar se existem diferenças estatisticamente significativas entre elas.

O intervalo de confiança adotado foi de 95%, com um nível de significância de $\alpha = 0,05$. O p-valor, que representa a probabilidade de obter valores iguais ou mais extremos do que os observados, é extraído da distribuição sob a hipótese nula (H_0). Valores de p inferiores ao nível de significância ($p \leq \alpha$) indicam uma baixa probabilidade de que as diferenças observadas sejam atribuídas ao acaso, sugerindo, portanto, que essas diferenças são estatisticamente significativas.

Antes da aplicação da ANOVA, foi realizado um teste de normalidade para verificar se os dados seguem uma distribuição normal, condição essencial para a aplicação da ANOVA.

Para comparar as médias entre os diferentes tratamentos (REF, 20%LBRO, 60%LBRO, 100%LBRO, cura ambiente, saturada, seca e tempo em aberto), foi utilizado o teste pareado de Tukey, sendo consideradas 06 amostras válidas para cada propriedade analisada.

Considerando a verificação feita pela ANOVA e o grau de significância do tratamento nos resultados obtidos, este estudo realizou o teste de Tukey, a fim de identificar a variação dos dados entre os grupos de tratamentos.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

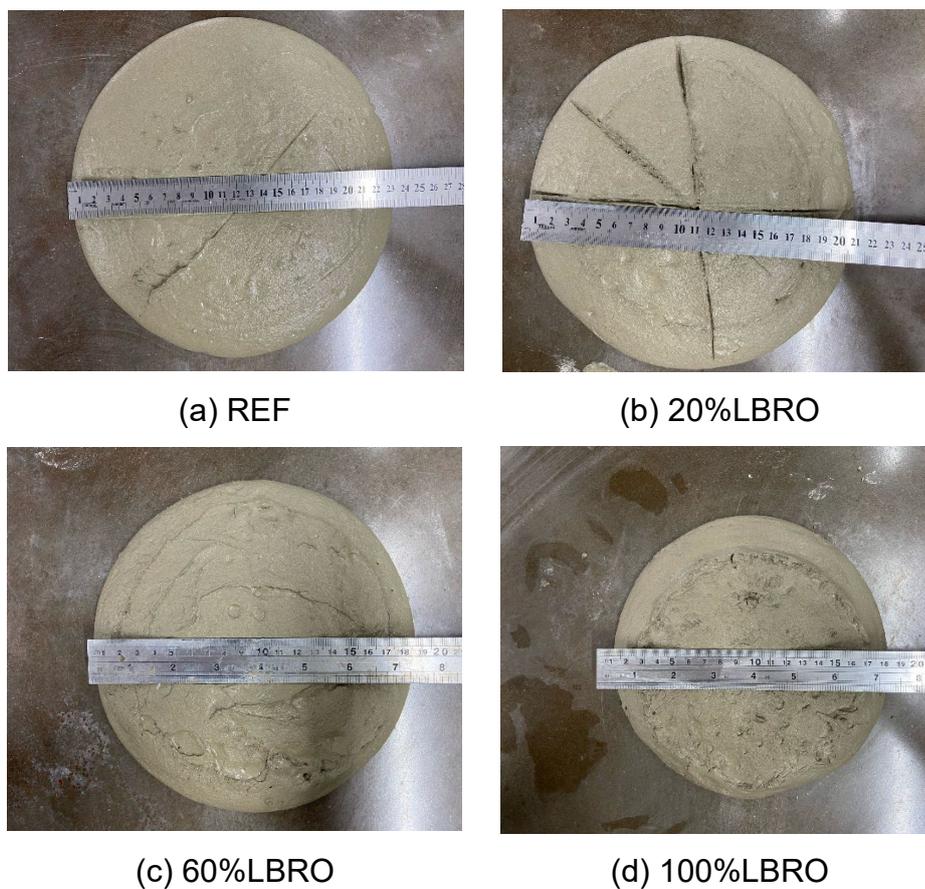
Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais, as comparações com a bibliografia e a comparação entre os diferentes traços de argamassa colante propostos.

4.1 ESTADO FRESCO

4.1.1 Índice de consistência

A Tabela 9 apresenta os resultados do índice de consistência realizados para cada traço, bem como as ilustrações na Figura 25. Para cada traço foram realizadas três medições, sendo apresentado o valor da média, além das condições climáticas no dia da moldagem.

Figura 25 – Índice de consistência dos traços



Fonte: Registrada pela autora.

Tabela 9 – Índice de consistência e características da moldagem

Traço	REF	20%LBRO	60%LBRO	100%LBRO
Consistência (mm)	230	215	185	170
Temperatura (°C)	32,1	30,3	28,6	31,5
Umidade (%)	63	61	62	61

Fonte: Elaborada pela autora.

Percebe-se que quanto maior a substituição da fração fina da areia por lama do beneficiamento de rochas ornamentais, menor a consistência, resultado também verificado por Pereira (2020). Dentre os fatores para explicar esse fenômeno está o aumento do teor de materiais finos, como pode ser verificado no resultado da granulometria a laser realizada na amostra de material passante na #150 e de LBRO, os quais aumentam a coesão da mistura, devido aumento da área superficial e capacidade de absorção de água pelo material.

4.1.2 Densidade e teor de ar

Conforme descrito nos itens 3.1.2 e 3.1.4, a massa específica da LBRO é maior do que a do agregado miúdo. Dessa forma, tem-se, no estado fresco, densidades maiores quanto maior for a substituição do agregado pelo resíduo, conforme ilustra a Tabela 10.

Tabela 10 – Massa específica no estado fresco e teor de ar incorporado

Traço	Densidade (kg/m ³)	Teor de ar (%)
REF	1.783	15,48
20%LBRO	1.787	15,51
60%LBRO	1.836	13,73
100%LBRO	1.933	9,70

Fonte: Elaborada pela autora.

Comparando-se os traços extremos, REF e 100%LBRO, a diferença em percentual é de aproximadamente 59% para o resultado de teor de ar e, 8,4% para a densidade, sendo um resultado inversamente proporcional ao outro. Para o traço mais denso, menor a quantidade de vazios e conseqüentemente de ar. Esses resultados impactam diretamente na consistência, que obteve uma diferença máxima de

aproximadamente 35%, representando um menor índice para o traço com menor teor de ar. Para Harbi; Derabla; Nafa (2017), partículas pequenas preenchem os vazios, aumentando a densidade do material e liberando a água retida nos poros.. Uma das hipóteses é que liberando essa água a consistência acaba se retraindo, no caso do traço com maior incorporação de resíduo.

4.1.3 Retenção de água

Essa propriedade permite a aplicação do material em camada fina sem perder a quantidade de água necessária para a hidratação do cimento Portland, seja para a base ou para o ambiente (DIAS *et al.*, 2016). A quantidade de água retida pela argamassa resulta em maiores tensões de aderência, melhor desempenho produtivo e maior durabilidade devido à maior formação de produtos de hidratação e ligações mais fortes entre revestimento e substrato (DIAS, 2016).

A Tabela 11 ilustra que não há diferença entre os resultados obtidos para qualquer um dos traços desenvolvidos.

Tabela 11 – Retenção de água

Traço	Retenção (%)
REF	99
20%LBRO	99
60%LBRO	100
100%LBRO	99

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com Dias (2016), alguns estudos comprovaram a partir de ensaios o aumento da capacidade de retenção de água de materiais à base de cimento contendo éteres de celulose. Por esse motivo, os resultados obtidos para argamassa colante são superiores a argamassa convencionais.

Nota-se que o resíduo não apresentou qualquer influência sobre os resultados de retenção de água, indicando total influência da quantidade de aditivo HEC.

4.1.4 Determinação do deslizamento

Conforme descrito no item 3.4.4, este teste baseia-se nos procedimentos descritos pela ABNT NBR 14081-5:2012. Todos os traços apresentaram deslizamento igual a 0,00 mm, resultados obtidos por Modolo *et al.* (2015).

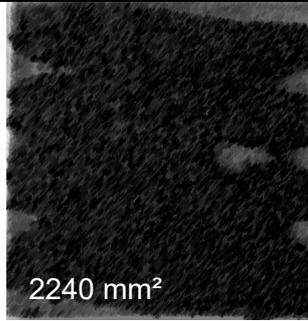
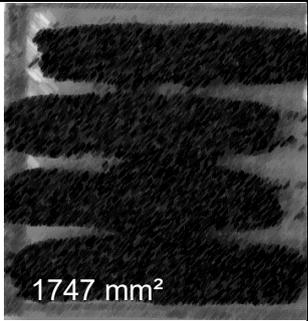
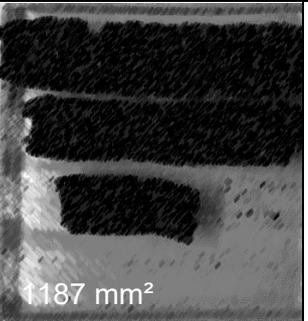
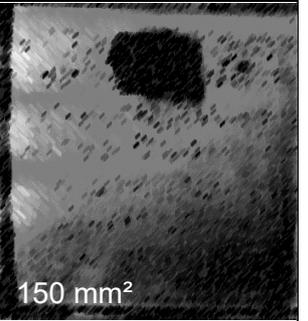
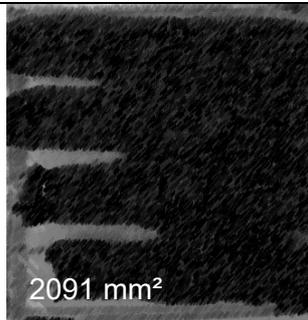
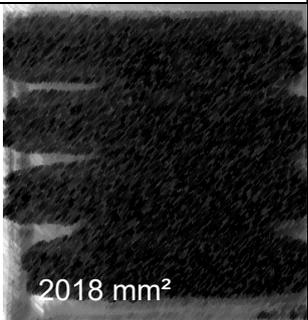
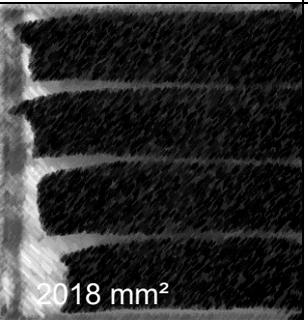
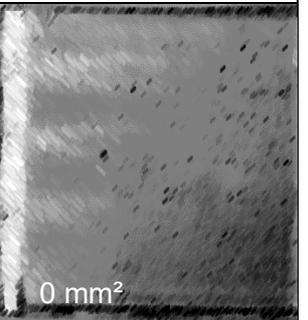
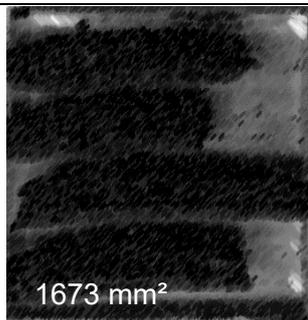
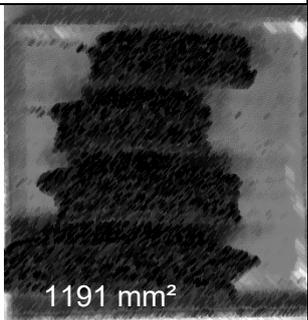
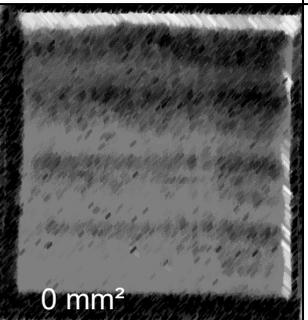
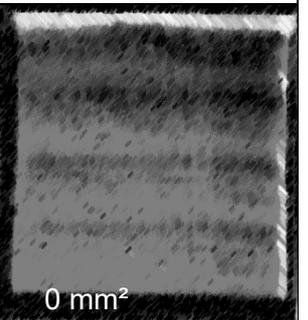
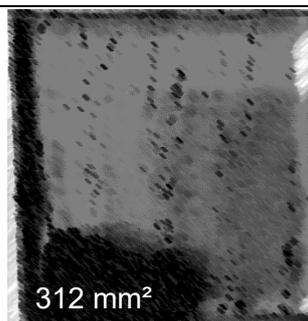
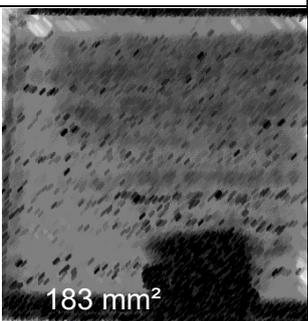
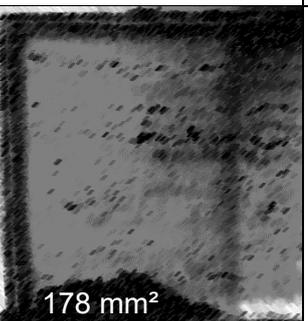
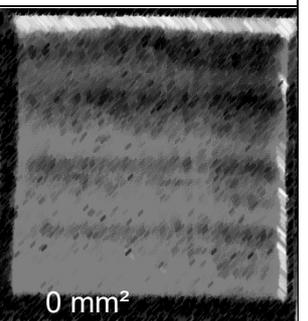
Foi possível verificar que nenhum dos traços apresentou deslizamento durante os 20 minutos que permaneceram na posição vertical, conforme ilustrado anteriormente na Figura 18.

De acordo com os resultados obtidos no ensaio de índice de consistência, à medida que se aumenta o percentual de resíduo, reduz-se a trabalhabilidade da argamassa. Dessa forma, essa redução pode ter auxiliado no que diz respeito ao deslizamento das placas cerâmicas, contribuindo para essa característica. Além disso, de acordo com Santos (2016) a utilização do aditivo HEC (hidróxietil celulose) tem a capacidade de aumentar a plasticidade e a coesão da argamassa evitando o deslizamento da placa cerâmica, mostrando mais uma vez que para essa característica o resíduo não teve influência sobre o resultado.

4.1.5 Poder molhante

A Figura 26 ilustra a molhabilidade da superfície vítrea mostrada pelos traços desenvolvidos em função do tempo de exposição (10, 20, 30 e 40 min após a aplicação).

Figura 26 – Placa de vidro após o teste de transferência de argamassas colantes e área preenchida calculada, sendo considerado 25 cm² de área total)

ID	10min	20min	30min	40min
REF	 2240 mm ²	 1747 mm ²	 1187 mm ²	 150 mm ²
20%	 2091 mm ²	 2018 mm ²	 2018 mm ²	 0 mm ²
60%	 1673 mm ²	 1191 mm ²	 0 mm ²	 0 mm ²
100%	 312 mm ²	 183 mm ²	 178 mm ²	 0 mm ²

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com Bühler *et al.*, (2013) forma-se uma camada superior que endurece mais rapidamente que o interior do material, reduzindo sua capacidade de deformação e adesão. A formação dessa camada depende da formulação da argamassa, da natureza do substrato, da técnica de aplicação e também do clima.

A Fig. 24 apresenta imagens da superfície dos azulejos cobertos pelas argamassas, usadas para estimar a capacidade de transferência. Essa figura foi analisada por um software de imagem, permitindo a quantificação das áreas cobertas pela argamassa. Ainda, na Fig. 24, o cálculo da área foi realizado com base na área total de cada azulejo (2500 mm^2), o que se observa é uma diminuição constante na capacidade de transferência da argamassa com o tempo de exposição, conforme observado por Modolo *et al.* (2015).

Contudo, em ambos os traços, desde os primeiros 10 min de aplicação a argamassa já apresentou postos de falha, indicando possível erro de dosagem ou mesmo falha na execução do ensaio, visto que é algo muito manual e suscetível a erros. Teoricamente, a tendência seria um maior preenchimento da área, levando em consideração a presença de material fino, contudo, não acabou contribuindo, podendo estar relacionando com a composição química do material.

4.2 ESTADO ENDURECIDO

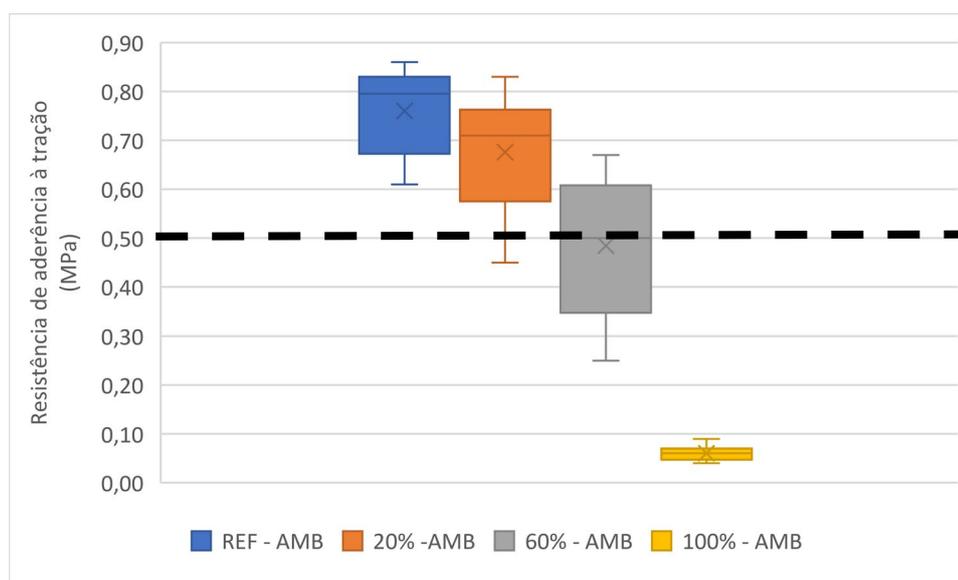
4.2.1 Determinação da resistência de aderência à tração

Os resultados dos ensaios de resistência de aderência à tração para os quatro traços desenvolvidos sob as três condições de ensaio e a variações de umidade e temperatura são apresentados nos itens a seguir.

4.2.1.1 Condição – Ambiente

A partir do Gráfico 9 e da Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios em condição ambiente. Além disso, o APÊNDICE A ilustra as fotografias e os resultados obtidos para as formas de ruptura.

Gráfico 9 – Resistência de aderência à tração: Ambiente



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 12 - Resistência de aderência à tração: Ambiente

Traço	REF	20%LBRO	60%LBRO	100%LBRO
MPa	0,76	0,68	0,48	0,06

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com os resultados apresentados no Gráfico 9, percebe-se que apenas dois dos quatro traços atingiram valores de média acima dos 0,5 MPa definidos em norma, conforme exposto na Tabela 3, sendo eles o REF e 20%LBRO. O traço 60%LBRO apresentou resultado muito próximo ao solicitado em norma, podendo ser considerado adequado, levando em consideração a quantidade de amostras e variabilidade do ensaio. O traço 100%LBRO acabou sendo desconsiderado, tendo em vista que ao acoplar o equipamento as pastilhas estavam se soltando, mostrando que a substituição total não trouxe benefícios nos ensaios de estado endurecido.

Com relação à variação de resultados entre um mesmo traço, percebe-se que quanto maior a inserção da LBRO, maior a amplitude entre os resultados. Além disso, entre limites, os valores superiores apresentaram-se mais próximos ao topo do que da base, representando maior quantidade de resultados altos.

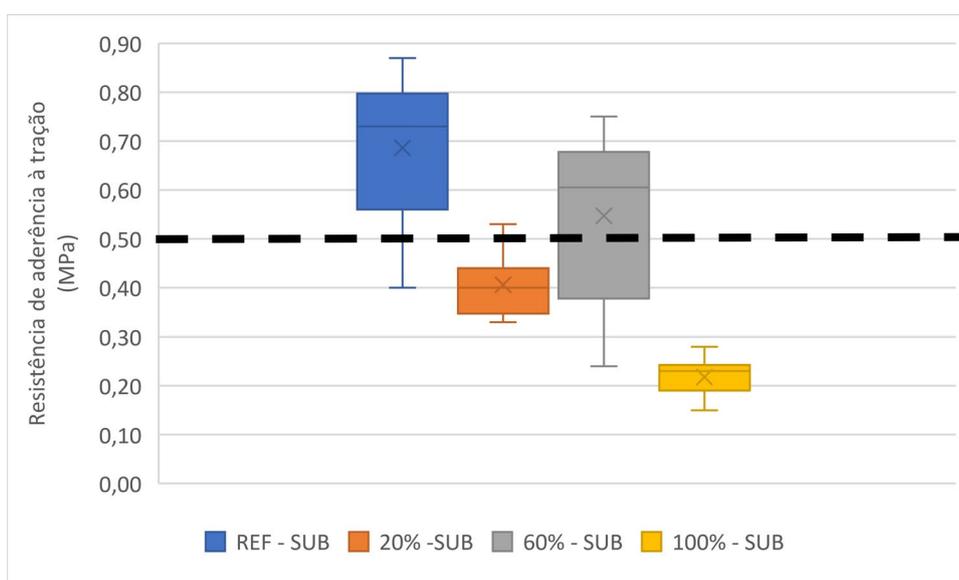
Percebe-se que todas as rupturas foram identificadas na interface argamassa/placa cerâmica (APÊNDICE A). No caso da referência, alguns pontos também tiveram arrancamento na argamassa e, no traço 100%LBRO nota-se que os

cordões não foram quebrados completamente, tendo relação com os resultados baixos.

4.2.1.2 Condição – Submerso

A partir do Gráfico 10 e da Tabela 13 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios em condição submerso. O APÊNDICE B ilustra as imagens e os resultados obtidos para as formas de ruptura.

Gráfico 10 – Resistência de aderência à tração: Submerso



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 13 - Resistência de aderência à tração: Submerso

Traço	REF	20%LBRO	60%LBRO	100%LBRO
MPa	0,69	0,41	0,55	0,22

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com os resultados apresentados no Gráfico 10, percebe-se que apenas dois dos quatro traços atingiram valores de média acima dos 0,5MPa estabelecidos pela norma, sendo eles o REF e 60%LBRO. Nessa condição, o traço 100%LBRO mostrou-se melhor, não havendo deslocamento das placas ao acoplar o equipamento, contudo os resultados ainda se mostraram insatisfatórios.

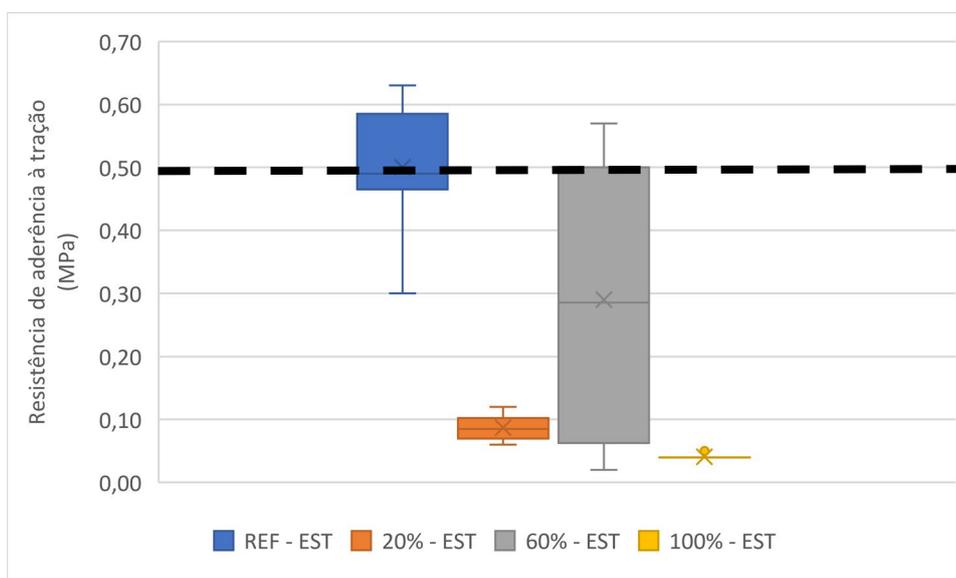
Com relação a variação de resultados entre um mesmo traço, percebe-se que o traço com menor amplitude foi o 20%LBRO, contudo, para que houvesse coerência, o resultado deveria ser superior ao 60%LBRO e não intermediário entre eles.

Foi possível observar que o mesmo padrão apresentado anteriormente, onde todas as rupturas foram identificadas na interface argamassa/placa cerâmica com exceção algumas amostras do REF (APÊNDICE B). No traço 100%LBRO nota-se que os cordões não foram quebrados completamente, porém, nessa condição, por influência da água, os resultados não foram próximos de zero.

4.2.1.3 Condição – Estufa

A partir do Gráfico 11 e da Tabela 14 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios em condição de estufa. Além disso, o APÊNDICE C ilustra as fotografias e os resultados obtidos para as formas de ruptura.

Gráfico 11 – Resistência de aderência à tração: Estufa



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 14 - Resistência de aderência à tração: Estufa

Traço	REF	20%LBRO	60%LBRO	100%LBRO
MPa	0,50	0,09	0,29	0,04

Fonte: Elaborada pela autora.

No gráfico 11, é possível verificar que apenas o traço REF atingiu o valor médio de 0,5MPa preconizado pela norma. Como já havia demonstrado valores insatisfatórios para as outras condições, desconsiderou-se os resultados de 100%.

Com relação ao traço 20%LBRO, pode ter ocorrido algum erro durante a aplicação da argamassa no substrato, pois o resultado obtido não tem coerência frente os demais. Analisando o APÊNDICE C, percebe-se que todas as rupturas ocorreram na interface argamassa/placa cerâmica.

4.2.1.4 Câmara higrotérmica

A partir da Tabela 15 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios em condição de variação de temperatura e umidade, conforme apresentado na Figura 20, sendo expostos a 160 ciclos em equipamento específico.

Tabela 15 - Resistência de aderência à tração: Câmara higrotérmica

Traço	REF	20%LBRO	60%LBRO	100%LBRO
MPa	0,10	0,08	0,05	0,00

Fonte: Elaborada pela autora.

Pela análise da Tabela 15, percebe-se que nenhum dos traços atingiu resistência à tração com valores significantes, principalmente pelas condições as quais as placas foram expostas. Em alguns casos ocorreu o destacamento antes mesmo do ensaio, indicando aderência zero, outros obtiveram resultados muito próximos a zero, assim como observado por Lunardi e Pelisser (2011).

A Tabela 16 apresenta o compilado dos resultados obtidos em cada ensaio de aderência realizado.

Tabela 16 – Resultados médios de 28 dias de resistência de aderência à tração

Condição	Traço			
	REF	20%LBRO	60%LBRO	100%LBRO
Ambiente	0,76	0,68	0,48	0,06
Submersa	0,69	0,41	0,55	0,22
Estufa	0,50	0,09	0,29	0,04
Câmara higró	0,10	0,08	0,05	0,00

Fonte: Elaborada pela autora.

Pode-se observar, analisando a Tabela 16, que o traço 100%LBRO não pode ser utilizado em qualquer uma das hipóteses, visto que desde o ensaio em condição ambiente não apresentou resultados satisfatórios ($\geq 0,5$ MPa). Na maioria dos ensaios, a pastilha foi arrancada antes mesmo de se aplicar a carga, mostrando quão baixa estava a resistência do material à tração.

Dessa forma, excluindo-se o traço 100% e avaliando os demais (REF, 20% e 60%), percebe-se que o tipo de cura afeta diretamente a aderência à tração, especialmente a cura em estufa e, no caso desse estudo, a câmara higrotérmica.

De acordo com estudo realizado por Zanelato *et al.* (2017), considerando os resultados obtidos para as cerâmicas com absorção de 4% e ACII, que foram as utilizadas nesse estudo, percebe-se que os maiores resultados foram obtidos para cura submersa, ambiente e estufa. O maior resultado para cura submersa pode estar diretamente relacionado a estabilidade da cerâmica em relação à água, mantendo-a na argamassa, minimizando a retração e perda de água.

Observando os resultados entre um mesmo traço, o traço REF e 20%LBRO não seguem a lógica observada no estudo de Zanelato *et al.* (2017), observando pelo traço REF, que obteve os resultados mais coerentes e dentro da faixa estipulada em norma, a sequência seria cura ambiente, submersa e estufa. Já o traço 60%LBRO apresenta a mesma lógica, tendo um resultado mais elevado para a aderência em condição submersa.

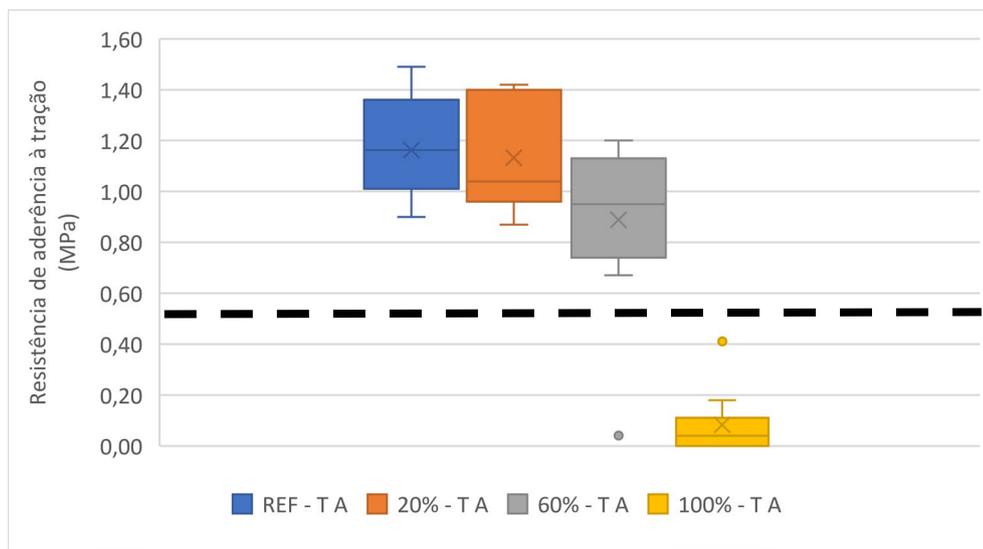
Realizando uma análise entre os diferentes traços, os resultados obtidos indicam que o melhor traço é o REF. No traço 20%LBRO, ocorreu algum erro durante a moldagem e ensaio das placas submersa e estufa, colocando o traço 60%LBRO como o segundo melhor, resultado que iria contra a lógica. Além disso, analisando a Figura 24, percebe-se que depois do traço REF, o segundo com maior área preenchida é o 20%LBRO. Para confirmar os resultados, seria necessário refazer os ensaios que apresentaram valores incoerentes.

Por fim, ao expor as placas em ciclos higrotérmicos, a ruptura chegou a atingir até 100% na camada de argamassa, o que demonstra que a cura em ciclos teve um impacto significativo nas suas propriedades. Em alguns casos, o destacamento ocorreu antes mesmo do ensaio, indicando aderência nula. Esse destacamento ocorreu na interface entre a argamassa e a placa cerâmica.

4.2.2 Determinação do tempo em aberto

A partir do Gráfico 12 e da Tabela 17 são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de tempo em aberto. Além disso, o APÊNDICE D ilustra as fotografias e os resultados obtidos para as formas de ruptura.

Gráfico 12 – Resistência de aderência à tração: Tempo em aberto



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 17 - Resistência de aderência à tração: Tempo em aberto

Traço	REF	20%LBRO	60%LBRO	100%LBRO
MPa	1,16	1,13	0,89	0,08

Fonte: Elaborada pela autora.

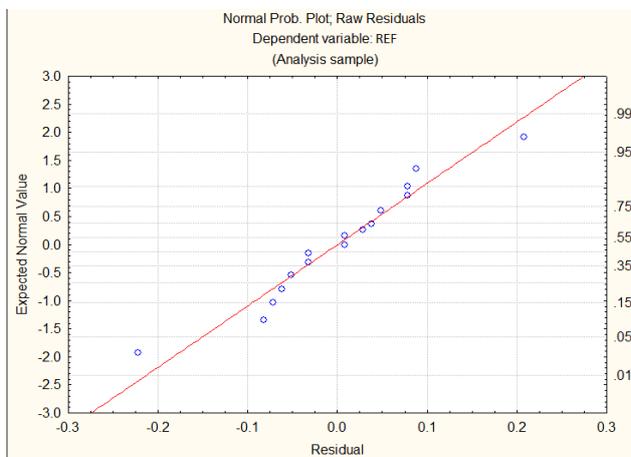
Pela análise do Gráfico 12 e Tabela 16 é possível perceber que com exceção do traço 100%LBRO, os demais atingiram resultados quase 2x maiores do que o estipulado em norma. Os resultados obtidos corroboram com as ilustrações da Figura 24, representadas pela área aderida no vidro nos diferentes intervalos de tempo, nesse caso em específico, o de 20 minutos. Percebe-se que o traço REF apresenta média e mediana bem próximas, representado uma amostragem homogênea. O traço 60%LBRO, mesmo apresentando um ponto *outlier*, que consiste em um valor destoante dos demais, apresentou resultado final satisfatório. O traço 100%LBRO, como já representado anteriormente, não demonstrou quaisquer efeitos positivos, mesmo para esse ensaio.

Foi possível verificar também que apenas o traço REF apresentou rupturas na argamassa e o restante (APÊNDICE D), todas as rupturas ocorreram na interface argamassa/placa cerâmica. Percebe-se que os resultados foram elevados, com exceção do traço 100%LBRO, confirmando o estudo de Zanelato *et al.* (2017), quanto maior a absorção da peça cerâmica, maior a aderência. Além disso, em comparação com a cerâmica utilizada para os demais ensaios, essa não apresenta a cola que une as pastilhas, podendo ser um ponto de interferência da aderência.

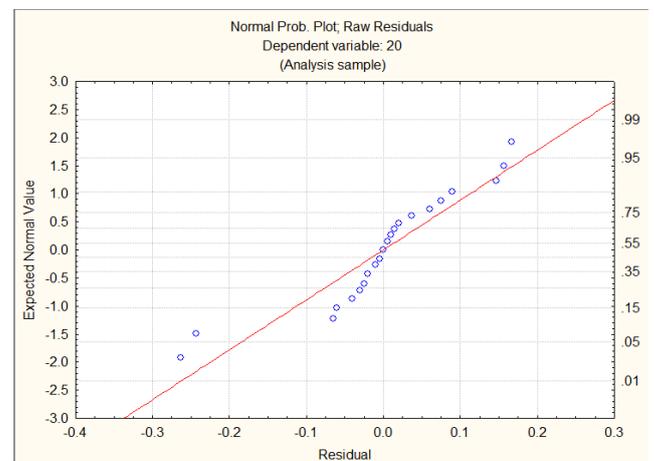
4.3.1 Análise estatística

Para cada traço desenvolvido foi analisado, primeiramente, a tendência de normalidade dos resultados de aderência para os diferentes tipos de cura, verificando se atende ao critério para aplicabilidade do método, conforme ilustra o Gráfico 13.

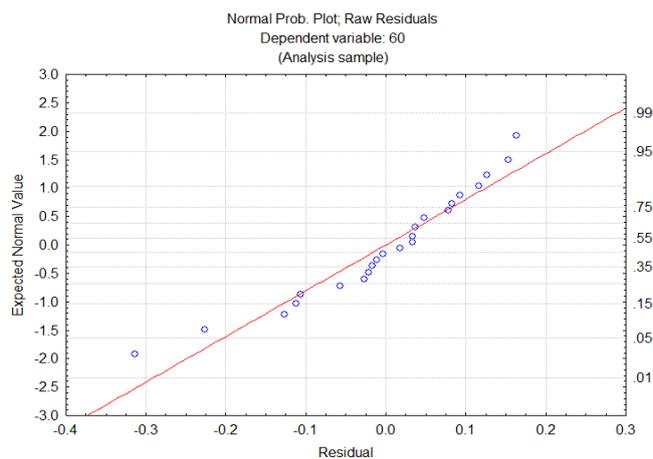
Gráfico 13 – Tendência à normalidade dos resultados



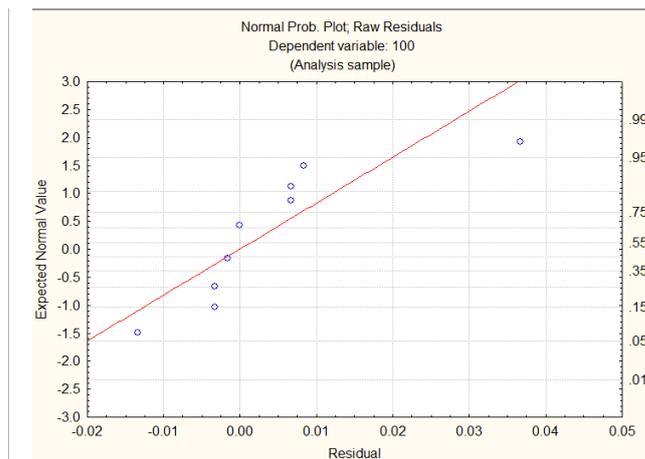
(a) REF



(b) 20%LBRO



(c) 60%LBRO



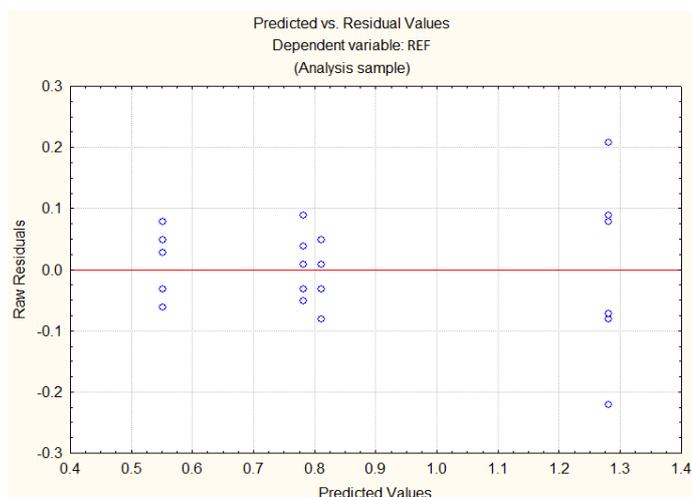
(d) 100%LBRO

Fonte: Elaborado pela autora.

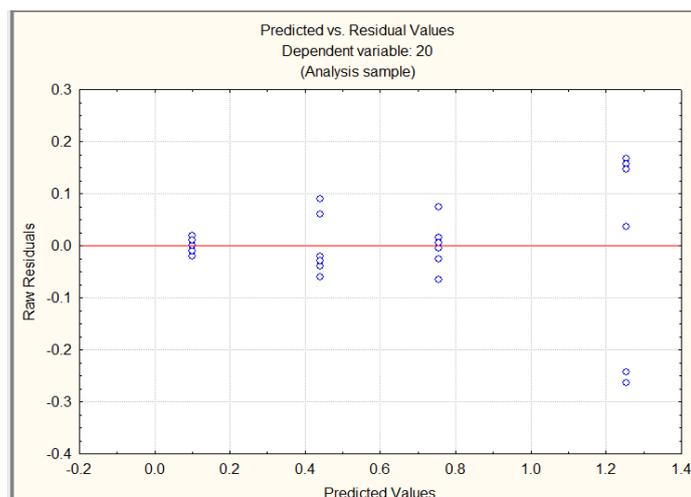
Foi possível perceber, considerando os tratamentos de (a) REF; (b) 20%LBRO e (c) 60%LBRO, uma distribuição dos dados com menor afastamento em relação à distribuição normal. Em oposição a isso, nota-se em (d) 100%LBRO uma distribuição que se afasta mais da linha que indica a distribuição normal. Analisando juntamente a Tabela 16, percebe-se que nos traços 20%LBRO e 60%LBRO ocorrem alguns afastamentos da normal, o que podem estar ligados ao resultado incoerente na cura em estufa, para o primeiro e, para o segundo, o resultado de aderência superior na cura submersa,

A técnica estatística apresentada no Gráfico 14 ilustra a dispersão dos resultados obtidos para cada um dos quatro traços, com relação às diferentes condições de cura.

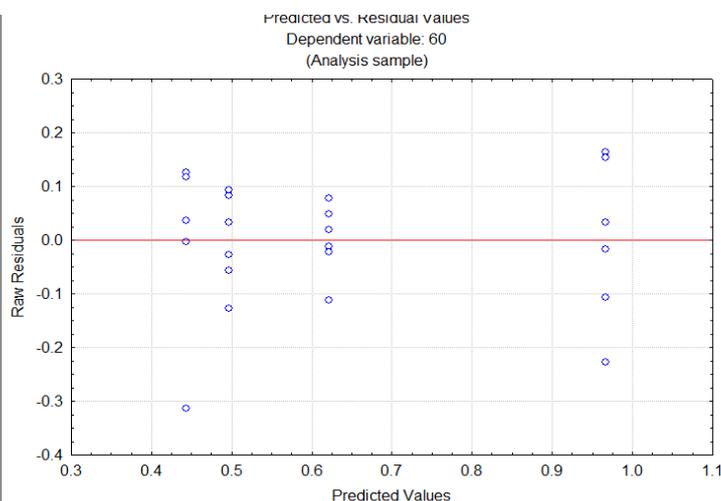
Gráfico 14 – Dispersão dos resultados



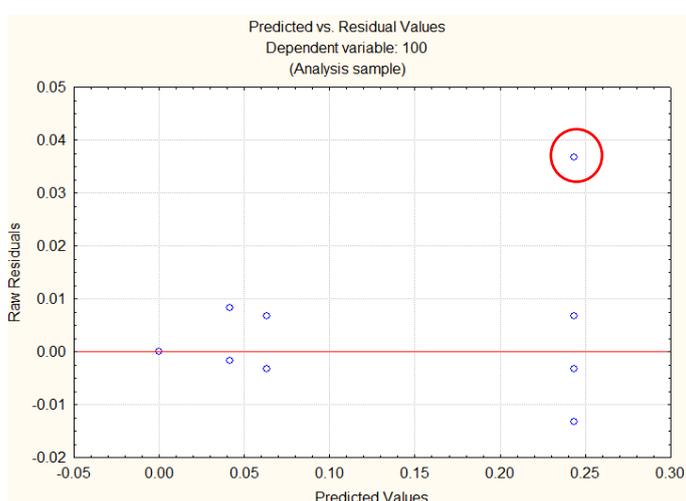
(a) REF



(b) 20%LBRO



(c) 60%LBRO



(d) 100%LBRO

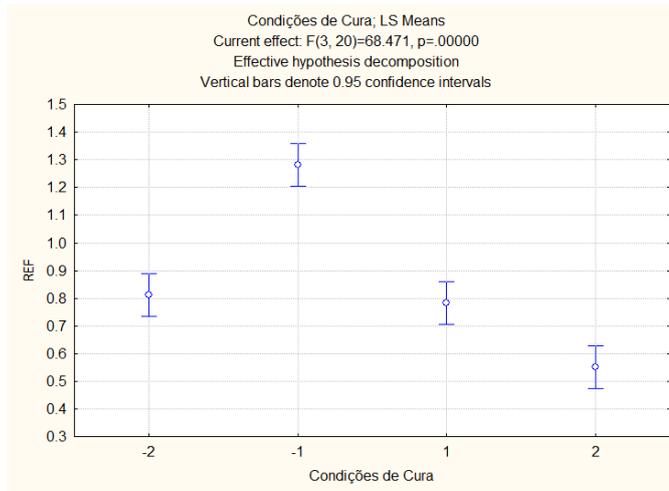
Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que, os resultados de (a), (b) e (c) apresentam uma distribuição razoável, com uma aleatoriedade de resultados tanto acima quanto abaixo da média. No caso de (d), o ponto marcado em vermelho indica um desvio em relação aos demais resultados, sugerindo um possível erro experimental. No entanto, de modo geral, há um equilíbrio na distribuição dos resultados.

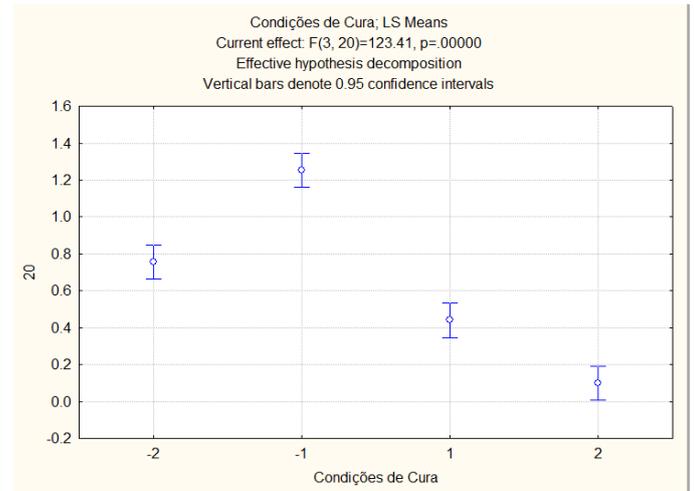
A seguir, no Gráfico 15 são ilustrados os resultados relacionados à variação composição do traço e os tipos de cura propostos em norma.

A legenda indica: (-2) ambiente, (-1) em aberto, (1) submerso e (2) estufa.

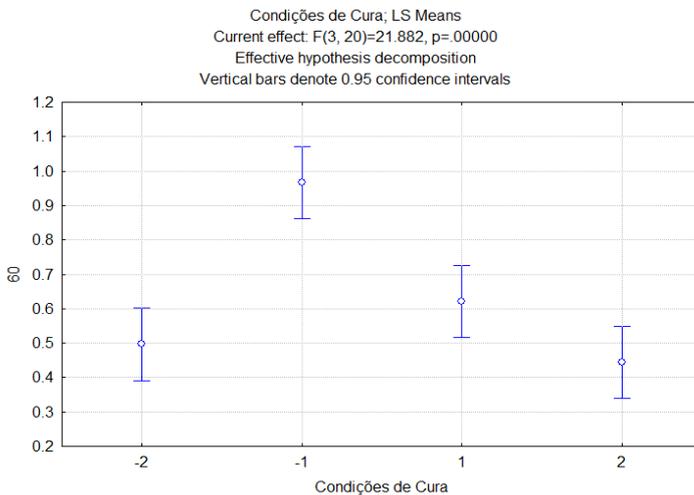
Gráfico 15 – Resultados obtidos para cada condição de cura



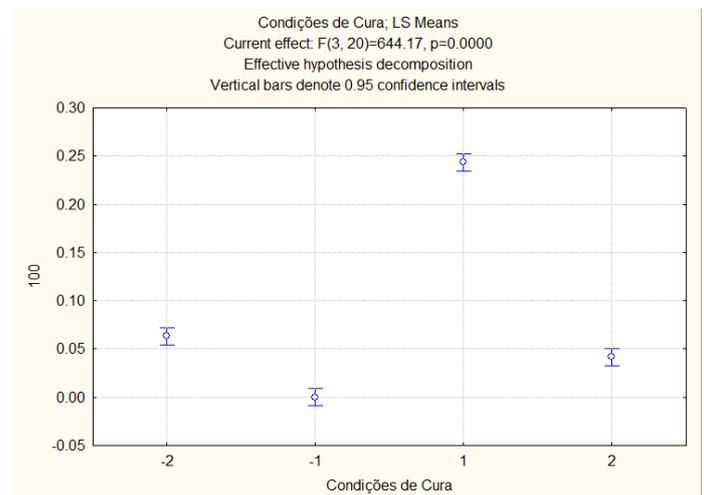
(a) REF



(b) 20%LBRO



(c) 60%LBRO



(d) 100%LBRO

Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se que o traço (d) apresenta resultados insatisfatórios para qualquer uma das 4 condições, sendo o maior resultado 0,25 MPa, 50% menor do que o indicado em norma. Conclui-se que a substituição total não trouxe benefícios para utilização de fato, possivelmente por conta da composição química insuficiente com relação a presença de sílica, o que não contribuiu como pozolana.

Para os demais traços (a), (b) e (c), percebe-se um padrão, com exceção para a amostra de 20%LBRO condição saturada, que apresentou resultado inferior a condição ambiente, sinalizando um possível erro de moldagem, tendo em vista a técnica manual utilizada para aplicação da argamassa nas placas.

Para ambos os traços, o resultado de tempo em aberto mostrou os melhores resultados, seguidos pela condição saturada, ambiente e estufa.

Para o teste de análise de variância (ANOVA), a Tabela 18 expõem os resultados obtidos. Segundo Pacheco (2016): “Para interpretar os dados verificados na ANOVA, expõe-se o valor F que representa a variância entre diferentes grupos e das variâncias internas em um conjunto. Quanto maior é este valor, maior é a dessemelhança entre os grupos, representadas neste estudo pelo consumo de cimento. O p valor que indica a significância dos dados, apontando se há diferença entre os grupos ou se os resultados foram obtidos ao acaso, ou atribuídos a erros na execução do experimento. Se o p valor apresenta valor inferior a 0,05, pode-se afirmar com 95% de significância que os dados são influenciados pelo traço do concreto.” O traço de concreto mencionado pela referida autora no presente estudo se relaciona com o percentual de uso do resíduo, assim como, o consumo de cimento, no trabalho atual, poderia ser indicado pelas condições de cura.

Tabela 18 – Análise de variância

REF					
Efeito	SS	Graus de liberdade	MS	F	P
Interseção	17,61307	1	17,61307	2143,578	0,000000
Condições de cura	1,68780	3	0,56260	68,471	0,000000
Erro	0,16433	20	0,00822		
20%LBRO					
Efeito	SS	Graus de liberdade	MS	F	P
Interseção	9,741001	1	9,741001	833,6927	0,000000
Condições de cura	4,325812	3	1,441937	123,4095	0,000000
Erro	0,233683	20	0,011684		
60%LBRO					
Efeito	SS	Graus de liberdade	MS	F	P
Interseção	9,5888704	1	9,5888704	631,9098	0,000000
Condições de cura	0,996113	3	0,332038	21,8818	0,000002
Erro	0,303483	20	0,015174		
100%LBRO					
Efeito	SS	Graus de liberdade	MS	F	P
Interseção	0,182004	1	0,182004	1693,062	0,000000
Condições de cura	0,207746	3	0,069249	644,173	0,000000
Erro	0,002150	20	0,000107		

Fonte: Elaborada pela autora.

Observa-se que para todas as misturas, o valor de p-valor foi inferior a 0,05, indicando que as condições de cura exercem uma influência significativa nos resultados de resistência à aderência. Destaca-se a soma quadrática (SS) da mistura 60%LBRO, com valor de 0,996113, mostrando-se a menos influenciável pela alteração da condição de cura. O resultado de 0,207746 da amostra 100%REF é coerente, tendo em vista que para todas as condições os resultados foram insatisfatórios e tendendo a zero, mas, num geral, não se aplica. O resultado de 4,325812 mostra que o traço 20%LBRO foi o mais afetado pelas condições de cura

diversas, destacando-se por conta do resultado incoerente na condição estufa. Dos traços utilizáveis, o REF apresentou resultado intermediário com soma quadrática de 1,68780. Esses resultados são visíveis na Tabela 19 abaixo.

Por fim, de forma a validar a influência dos tratamentos entre si, tem-se a variação da condição de cura em relação aos percentuais empregados de LBRO, conforme ilustra a Tabela 19.

Tabela 19 – Médias pareadas

Condição de cura	(a) REF	1	2	3	4
-2	0,551667		****		
-1	0,781667	****			
1	0,811667	****			
2	1,281667			****	

Condição de cura	(b) 20%LBRO	1	2	3	4
-2	0,100000	****			
-1	0,440000		****		
1	0,755000			****	
2	1,253333				****

Condição de cura	(c) 60%LBRO	1	2	3	4
-2	0,443333	****			
-1	0,496667	****			
1	0,621667	****			
2	0,966667		****		

Condição de cura	(d) 100%LBRO	1	2	3	4
-2	0,000000	****			
-1	0,0411667		****		
1	0,063333			****	
2	0,243333				****

Fonte: Elaborada pela autora.

Percebe-se que, para os traços REF e 60% as condições de tempo em aberto, ambiente e saturadas tem relação entre si, podendo ser considerados equivalentes estatisticamente. Com relação aos traços de 20% e 100%LBRO, cada condição é independente e apresenta uma característica. No caso do primeiro traço por conta de erros de moldagem e, no segundo, pela substituição total do agregado natural pelo resíduo, que acabou não contribuindo para a mistura.

5. CONCLUSÃO

A partir do estudo desenvolvido, foi possível obter resultados importantes para consolidar os objetivos inicialmente propostos. Sendo assim, as conclusões obtidas são apresentadas a seguir.

- O resíduo coletado a partir das canaletas de uma marmoraria na cidade de Canoas/RS, foi previamente preparado, a partir de secagem, quarteamento e, por fim calcinação, com a intenção de ativar as possíveis propriedades pozolânicas da LBRO, contudo, após realização do ensaio rápido de R^3 , o material mostrou-se inadequado para essa finalidade, servindo como um material de preenchimento;
- A caracterização da LBRO após a calcinação indicou que o resíduo não apresentava as características mínimas para se enquadrar como uma pozolana, conforme análise dos somatórios dos componentes químicos a partir do FRX, indicado pela norma NBR 12653 (ABNT, 2014). Além disso, com relação a granulometria, mostrou-se ser mais fino do que a fração da areia substituída, contudo, não foi suficiente para promover uma melhora nos traços. Além disso, com relação ao DRX, não apresentou sinal de halo-amorfo, outra indicação de que o material não apresentava características pozolânicas;
- Com relação às características físicas, os traços desenvolvidos não apresentaram diferenças significativas. Algumas características eram esperadas, como a redução da consistência, pela incorporação de material mais fino e, o aumento da densidade no estado fresco, por conta da densidade do material, interferindo diretamente no teor de ar incorporado. Sobre o desempenho mecânico de argamassas colantes, percebe-se que o traço referência manteve-se com os melhores resultados para ambas as condições de cura e demais análises. O traço 100%LBRO teve o pior desempenho, comprovando que uma substituição completa não é favorável. Já os traços 20%LBRO e 60%LBRO apresentaram resultados favoráveis ao uso para as condições de cura ambiente, submersa e tempo em aberto;

- A partir do ensaio em câmara higrotérmica que avaliou a durabilidade do sistema, foi possível observar que nenhum dos traços obteve resultados favoráveis, mostrando-se deficientes em condições extremas e intensas;
- Pela análise estatística foi possível verificar que os traços REF, 20%LBRO e 60%LBRO apresentaram resultados próximos a reta normal, indicando certo padrão entre os resultados, isto é, menor variação e presença de *outliers*. Além disso, quando comparada cada condição de cura para um mesmo traço, percebeu-se uma tendência com relação aos melhores resultados, sendo ambiente, tempo em aberto, submerso e estufa, respectivamente. Ainda, pela análise de médias pareadas nota-se que o traço com 20% de substituição apresenta interdependência entre as condições, possivelmente por algum erro de moldagem que ocorreu na condição de cura em estufa. Os traços REF e 60% apresentam relação nas curas submersa e ambiente.
- Por fim, pode-se constatar que, para os teores de 20% e 60% é possível utilizar o resíduo em substituição dos teores finos da areia, mesmo não atingindo resultados superiores à referência, os resultados foram promissores para os ensaios de aderência. Como o ensaio possui apenas 12 amostras e dessas apenas 6 foram utilizadas para análise estatística, percebe-se a sensibilidade e variabilidade apresentada no ensaio.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização desse trabalho foram sugeridos outros métodos de análise dos resultados, a fim de contribuir para a caracterização das argamassas colantes e contribuir para uma escolha mais assertiva quanto à substituição. Dentre as questões que possam motivar novos estudos, destacam-se as seguintes:

- reduzir as porcentagens de substituição da LBRO;
- avaliar as argamassas colantes pelo ensaio de *squeeze-flow*, aprimorando as características reológicas;

- utilizar um agregado miúdo que se enquadre nos padrões de zona utilizável da norma;
- buscar fornecedores do resíduo que tenham maior controle da produção com a intenção de utilizar o resíduo como substituto do cimento Portland;
- aumentar a quantidade de amostras para reduzir a variabilidade do ensaio ou mesmo reproduzir uma mini parede para que o ensaio seja realizado em uma área maior, possibilitando a dispersão dos pontos de ensaio;
- ACV em relação ao emissões de CO₂.

REFERÊNCIAS

ABIROCHAS, Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Balanço das Exportações e Importações de Rochas Ornamentais em 2022. , p. 35, 2023. .

ABIROCHAS, Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Cenário Mundial 2021. , p. 3, 2021.

ABRELPE. Panaroma dos resíduos sólidos no brasil 2022. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE**, v. 1, 2022.

AL-AKHRAS, Nabil M.; ABABNEH, Ayman; ALARAJI, Wail A. Using burnt stone slurry in mortar mixes. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2658–2663, 2010.

AL-JRAJREH, Sondos S.; AL-HAMAIEDEH, Husam; AL-KHEETAN, Mazen J.; JWEIHAN, Yazeed S.; ALJAAFREH, Tariq. Improvement of ornamental stone wastes as sand replacement in concrete using silane coupling agent. **Results in Engineering**, v. 20, n. November, p. 101580, 2023.

ALENCAR, Carlos Rubens Araujo. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais**. 2013. 1–242 f. 2013.

ALENCAR, *et al.* Utilização de Resíduo do Corte de Mármore e Granito em Argamassa de Contrapiso. **XIX Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído**, v. 19, p. 1–14, 2022. <https://doi.org/10.46421/entac.v19i1.2106>.

ALENCAR, Marcelo Hazin; PRIORI JÚNIOR, Luiz; ALENCAR, Luciana Hazin. Structuring objectives based on value-focused thinking methodology: Creating alternatives for sustainability in the built environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 156, p. 62–73, 2017.

ALMADA, *et al.* Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 262, n. 120036, 2020.

ALSHEYAB, M. A.T. Recycling of construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, n. 3, p. 2129–2138, 2022.

ANEPAC, Associação Nacional Das Entidades De Produtores De Agregados Para Construção. Perspectivas do setor de agregados. **Revista de Areia e Brita**, v. 77, p. 21, 2021. Disponível em: <https://www.anepac.org.br/publicacoes/revista-areia-e-brita>. Acesso em: 9 out. 2022.

ANFACER, Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres. **Números do Setor Cerâmico**. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor>. Acesso em: 9 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**. Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – 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. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 14081-1**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14081-2**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14081-3**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 3: Determinação do tempo em aberto. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14081-4**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 4: Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14081-5**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 5: Determinação do deslizamento. Rio de Janeiro, 2012.

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

_____. **NBR 16916**. Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **NBR 16972**. Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **NBR 17054**. Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **NBR 5752**. Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

AVET, et al. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. **Cement and Concrete Research**, v. 85, p. 1–11, 2016.

BENHELAL, Emad; SHAMSAEI, Ezzatollah; RASHID, Muhammad Imran. Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review. **Journal of**

Environmental Sciences (China), v. 104, p. 84–101, 2021.

BRAGA, Florindo dos Santos; BUZZI, Daniella Cardoso; COUTO, Maria Cláudia Lima; LANGE, Liséte Celina. Environmental characterization of processing sludge of ornamental stones. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 237–244, 2010.

BRAGA, Mariana; DE BRITO, Jorge;; VEIGA, Rosário. Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 960–968, 2012.

BRASIL Resolução CONAMA n. 001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. p. 2548- 2549. Diário Oficial da União. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>.

BRASIL. **Câmara dos Deputados. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010.** [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/.../politica_residuos_solidos_3ed.reimp.pdf?

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M.E. Literature review: Reuse of construction and demolition waste in the construction industry. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178–189, 2015.

BREA, Fernando M. Resistência de aderência e tempo em adição de éteres de celulose. , p. 507–517, 2003.

BÜHLER, Th; ZURBRIGGEN, R.; PIELES, U.; HUWILER, L.; RASO, R. A. Dynamics of early skin formation of tiling mortars investigated by microscopy and diffuse reflectance infrared Fourier transformed spectroscopy. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, n. 1, p. 161–170, 2013.

BUYUKSAGIS, Ismail Sedat; UYGUNOGLU, Tayfun; TATAR, Ertunc. Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 734–742, 2017.

CALMON, João Luiz; SILVA, Sérgio Augusto C. da. **A gestão dos recursos hídricos e a mineração.** [S. l.: s. n.], 2006.

CAMPOS, *et al.* Resíduos: tratamento e aplicações industriais. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**, , p. 434–492, 2014. .

CAMPOS, *et al.* Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental. **Anais XXIII Simpósio de geologia do Nordeste VII Simpósio de rochas ornamentais do Nordeste**, n. 2, p. 199, 2009.

CARASEK, Helena. **Argamassa.** *In:* ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2017. v. 2., ed. 3, p. 922-969.

CARDOSO, *et al.* Avaliação Da Incorporação De Resíduo De Corte De Mármore E Granito Em Concreto Para Produção De Pisos Intertravados Para Pavimentação.

Revista Ifes Ciência, v. 7, n. 1, p. 01–17, 2021. <https://doi.org/10.36524/ric.v7i1.1192>.

CARDOSO; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G.; BANFILL, P. F.G. Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry. **Cement and Concrete Research**, v. 57, p. 79–87, 2014.

CBIC, Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Informativo Econômico - PIB Construção Civil. , p. 1–8, 2022. .

CONSTANTINO, R. C. et al.; Análise de resistência de aderência de argamassas colantes com diferentes porcentagens de EVA expostas a ciclos higrotérmicos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 3, 2022.

CORINALDESI, Valeria; MORICONI, Giacomo; NAIK, Tarun R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 1, p. 113–117, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.013>.

COSTA, Marienne Do Rocio De Mello Maron Da. Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos. , p. 148, 2006. .

COSTA, Marienne R.M.M.; CINCOTTO, Maria Alba; PILEGGI, Rafael G. Análise Do Deslizamento Da Argamassa Colante Através Do Seu Comportamento Reológico. n. 1, 2007.

DA SILVA, Anne Caroline Melo. **Contribuição ao estudo da influência da área de contato na aderência da interface argamassa colante-cerâmica**. 2018. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, 2018.

DE AZEVEDO, *et al.* Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 359–368, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.208>.

DIAS, L. S.; MOL, R. M. R.; SILVA, K. D. C.; MENDES, A. J. C.; CAMPOS, P. A. M.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Rejeitos De Mineração De Quartzito Para Produção De Argamassa Colante. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, Brasil**, n. 2, p. 4155–4166, 2016.

DIAS, LUMA DE SOUZA. Rejeito de mineração de quartzito como agregado para produção de argamassa colante. **Proceedings of 22th Brazilian Congress on Material Science and Engineering**, v. 2016, 2016.

DOS REIS, Alessandra Savazzani; DE ALVAREZ, Cristina Engel. A Sustentabilidade e o Resíduo Gerado No Beneficiamento Das Rochas Ornamentais. **IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**, n. 1, p. 511–520, 2006.

EHRENBRING, Hinoel Zamis *et al.* Evaluation of mechanical properties of grouts substituting the natural coarse aggregate for ceramic civil construction waste. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.25, n.1, 2020.

EN 1347. Adhesives for tiles — Determination of wetting capability, CEN, European Standards, 2007.

FACHIN, *et al.* Valorização da lama do beneficiamento de rochas ornamentais em pavimentos flexíveis. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.25404>.

FARES, Galal; ALBAROUD, Mahmoud Hamad; KHAN, M. Iqbal. Fine limestone dust from ornamental stone factories: A potential filler for a high-performance cementitious matrix. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 428–438, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.027>.

FERREIRA, Amanda Ramalho. Testes de normalidade : Um estudo comparativo. 2022.

GADO, R. A. The feasibility of recycling marble & granite sludge in the polymer-modified cementitious mortars Part A: In polymer-modified cementitious adhesive mortar. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 159, p. 978–991, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.059>.

GOMES, F. P. Curso de estatística experimental. 13. ed. Piracicaba: Nobel, 1990.

GRILLO, Karin Verônica Freitas. **Análise comparativa da aderência de tipos rochosos assentados com três argamassas**. 2010. 187 f. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2010.

GUARCONI, Giovanni Bruzzi; ALEXANDRE, Jonas; MARVILA, Markssuel Teixeira; AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de; ZANELATO, Euzébio Bernabé; MIGUEL, Thais Pirovane; MONTEIRO, Sergio Neves. Análise De Propriedades Mecânicas Da Incorporação De Resíduo De Beneficiamento De Rochas Ornamentais Em Argamassa Colante Para Construção Civil. n. January, p. 1041–1047, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/2594-5327-33327>.

HARBI, Radhia; DERABLA, Riad; NAFA, Zahreddine. Improvement of the properties of a mortar with 5% of kaolin fillers in sand combined with metakaolin, brick waste and glass powder in cement. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 632–641, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.062>.

JENNI, A.; HOLZER, L.; ZURBRIGGEN, R.; HERWEGH, M. Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 1, p. 35–50, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.039>.

JENNI, A.; ZURBRIGGEN, R.; HOLZER, L.; HERWEGH, M. Changes in microstructures and physical properties of polymer-modified mortars during wet storage. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 1, p. 79–90, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.001>.

KABEER, K. I. Syed Ahmed; VYAS, Ashok Kumar. Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 321–332, 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.061. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.061>.

KHYALIYA, Rajendra Kumar; KABEER, K. I.Syed Ahmed; VYAS, Ashok Kumar. Evaluation of strength and durability of lean mortar mixes containing marble waste. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 598–607, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.199>.

KÜRKLÜ, Gökhan; GÖRHAN, Gökhan. Investigation of usability of quarry dust waste in fly ash-based geopolymer adhesive mortar production. **Construction and Building Materials**, v. 217, p. 498–506, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.104>.

LEITÃO, Adriana Isabelle Barbosa Lima Sá. O Processo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais e suas Implicações Jurídico-Ambientais. **Revista dos Estudantes de Direito da Universidade de Brasília**, , p. 181–208, 2018. .

LEITE, Ana Paula Mendes. **Utilização do pó de granito como substituição parcial do agregado miúdo, na fabricação de argamassas**. 2021. 6 f. 2021.

LI, Ziyang; LAO, Junying; WANG, Lijie; LIM, Namyo Salim; TAN, Kang Hai; QIAN, Shunzhi. A review on substitution of natural sand with granite fines in sustainable concrete. **Construction and Building Materials**, v. 346, n. May, p. 128417, 2022. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.128417. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128417>.

LIMA, *et al.* Durability, life cycle cost and life cycle assessment of binary mixtures with fly ash, rice husk ash and concrete demolition waste. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 1, p. 161–177, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000100585>.

LIMA, *et al.* Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. **Journal of Cleaner Production**, Pernambuco, Brasil, v. 289, n. 125730, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730>.

LOPES, Flavia Tardelli Campo; DOS SANTOS, Danielle da Costa Rubim Messeder. O potencial poluidor da indústria cimenteira. **15º Congresso Nacional de Meio Ambiente**, 2018.

LOTENBACH, Barbara; SCRIVENER, Karen; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.

LUNARDI, S.; PELISSER, F. **Estudo da resistência de aderência de argamassa colante exposta a ciclos higrotérmicos**. Universidade do Extremosul Catarinense, 2011.

MARANHÃO, F. L.; COSTA E SILVA, A. J; SICHIERI, E. THE INFLUENCE OF MOISTURE ON ADHESIVE PERFORMANCE. **Proceedings of The Japan Congress on Materials Research**, n. 1, p. 110–118, 2008.

MARANHÃO; LOH, Kai; JOHN, Vanderley M. The influence of moisture on the deformability of cement-polymer adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2948–2954, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.004>.

MÁRMOL, *et al.* Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 617–622, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.06.003>.

MASHALY, Ahmed O.; SHALABY, Basel N.; RASHWAN, Mohammed A. Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 800–818, 2018. Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.046>.

MASHALY, *et al.* Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 731–741, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.023>.

MATHIELO, *et al.* **Conselho Fiscal Diretoria Executiva Da Abirochas Conselho De Administração Produção Limpa E Riscos Ambientais**. [S. l.: s. n.], 2019.

MENEGUETE, Dayanne Severiano; BATISTA, Lays Carvalho; CESCINETTO JÚNIOR, Wagner Antônio. Aproveitamento de resíduos gerados no corte de rochas ornamentais em pavimentação asfáltica para melhoramento de base. **Revista Mosaicum**, n. 27, p. 239–250, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.26893/rm.v15i27.65>.

MINITAB. **O que é o método de Tukey para múltiplas comparações?** Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/supporting-topics/multiple-comparisons/what-is-tukey-s-method/>. Acesso em: 14 de ago de 2024.

MITTRI, *et al.* Utilisation of heat-treated ornamental stone processing waste as an addition to concretes to improve compressive strength and reduce chloride ion penetration. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 444–455, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.129>.

MODOLO, *et al.* Bottom ash from biomass combustion in BFB and its use in adhesive-mortars. **Fuel Processing Technology**, v. 129, p. 192–202, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.015>.

MODOLO, *et al.* Recycling of Ashes From Biomass Combustion As Raw Material for Mortars. **MIX Sustentável**, v. 7, n. 2, p. 137–146, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2021.v7.n2.137-146>.

MOREIRA, Beatriz Carvalheira. **Resíduos da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais: Potencial de Contaminação e Possibilidade de uso**. 2021. 46 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 49, p. 262–267, 2003.

NASCIMENTO, Any Salomny Santos. **Estudo para desenvolvimento de argamassa de revestimento com reaproveitamento de resíduos de corte de granito**. 2019. 1–14 f. 2019. Disponível em:

http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI.

NAYAK, Sandip Kumar; SATAPATHY, Alok; MANTRY, Sisir. Use of waste marble and granite dust in structural applications: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 46, n. October 2021, p. 103742, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103742>.

NEVES, *et al.* Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais Processadas no Espírito Santo: Composição e Aproveitamento. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 40, n. 1, p. 123–136, 2021.

NEVES, Mirna Aparecida; RAYMUNDO, Valerio. Depósitos de resíduos finos do beneficiamento de rochas ornamentais e qualidade do aquífero freático. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, p. 257–267, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220200257>.

OLIVEIRA, Marcelo de Jesus Dias. Avaliação Do Tempo De Consolidação De Argamassas Colantes Através De Métodos Reológicos. 2015. Disponível em: [https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7888/OLIVEIRA%2C MARCELO DE JESUS DIAS DE.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7888/OLIVEIRA%2C%20MARCELO%20DE%20JESUS%20DIAS%20DE.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

PASSOS, *et al.* Assessment of the Chemical Reactivity of Brazilian Stone Cutting Plant Waste into Cementitious Matrices. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 24, p. 1–16, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su142416925>.

PEREIRA, Eduardo; DA SILVA, Isac José; DA COSTA, Marianne do Rocio de Mello Maron. Avaliação dos mecanismos de aderência entre argamassa colante e substrato não poroso. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 139–149, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212013000200011>.

PEREIRA, *et al.* Production of adhesive mortars with ornamental rock processing sludge and calcium carbonate sludge. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 8, n. 29, 2023.

PÓVOAS, Yeda Vieira. Tempo em aberto da argamassa colante : método de medida e influência dos Universidade de São Paulo Escola Politécnica Departamento de Engenharia de Construção Civil Da Argamassa Colante : Aditivos HEC e Resina PVA. Dissertação apresentada à Escola Politéc. n. December, 1999.

PÓVOAS, Yêda Vieira; JOHN, Vanderley Moacyr; CINCOTTO, Maria Alba. Influência da perda de água por evaporação na resistência de aderência entre argamassa colante e placa cerâmica. **Ambiente Construído**, , p. 7–18, 2002.

RAMADON, Luis Fernando Freire Porto Alegre. Extração Ilegal de Areia: O Faturamento no Brasil e no Mundo. **Revista Brasileira de Ciências Policiais**, Brasília, v. 12, n. 6, p. 281–313, 2021.

RANA, Aditya; KALLA, Pawan; CSETENYI, Laszlo J. Sustainable use of marble slurry in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 304–311, 2015. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.053>.

RASHWAN, *et al.* Behaviour of fresh and hardened concrete incorporating marble and granite sludge as cement replacement. **Journal of Building Engineering**, v. 32, n. 101697, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101697>.

RIBEIRO, *et al.* Production of Belite Based Clinker from Ornamental Stone Processing Sludge and Calcium Carbonate Sludge with Lower CO₂ Emissions. **Materials**, v. 15, n. 7, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15072352>.

RICHETTI, *et al.* Production of granilite concrete plates with recycled aggregates and ornamental rock processing sludge. **Revista Materia**, v. 27, n. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0078>.

ROCHA, Keslei Rosendo da; BACELAR JÚNIOR, Arilton Januário. Anova Medidas Repetidas E Seus Pressupostos: Análise Passo a Passo De Um Experimento. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia - ISSN: 1984-5693**, v. 10, p. 29, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.22407/1984-5693.2018.v10.p.29-51>.

RODRIGUES, Fernando; CARVALHO, Maria Teresa; EVANGELISTA, Luís; DE BRITO, Jorge. Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 438–445, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.023>.

ROQUE, Rodrigo Alexander Lombardi; PIERRI, Alexandre Coan. Uso inteligente de recursos naturais e sustentabilidade na construção civil. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 2, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i2.703>.

ROTH, Graças; GARCIAS, Carlos Mello. Construção Civil e a Degradação Ambiental. **Desenvolvimento em Questão**, v. 7, n. 13, p. 111–128, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2009.13.111-128>.

SABATKE, Vinícius; NUNES, Rodolfo Vieira; SALES, George André Willrich. Viabilidade econômica e financeira de uma fábrica de argamassas em Mafra/SC. **Cafi**, v. 4, n. 2, p. 168–190, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.23925/cafi.v4i2.52340>.

SADEK, Dina M.; EL-ATTAR, Mohamed M.; ALI, Haitham A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 19–32, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>.

SAINT JEAN, Goodry; LONGO, Orlando Celso; LIMA, Glêdson Pereira. A sustentabilidade e planejamento aplicados na construção civil sob a visão dos profissionais. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.27864>.

SANTOS, Diogo Pereira dos. **INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE VIDRO NAS PROPRIEDADES DE UMA ARGAMASSA COLANTE**. 2016.

SANTOS, Heraldo Barbosa dos. **Ensaio de Aderência das Argamassas de Revestimento**. 2008. 1–50 f. Especialização em Construção Civil – Escola de

Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

SANTOS, R. A; LIRA, B. B; RIBEIRO, A. C. M. Argamassa com substituição de agregado natural por resíduo de britagem de granito. **HOLOS**, v. 5, p. 125–135, 2012.

SATO, V. Y.; GALINA, A. P. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L. Contribuição ao Estudo Reológico de Pastas Cimentícias com Adição de Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 11, n. 6, p. 1284–1307, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1983-41952018000600007>.

SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. February, p. 2–26, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.

SILVA, *et al.* Avaliação Estatística Para Predição No Processo De Analise Dos Tensoativos Catiônicos Em Manufatura Discreta. n. October, 2023. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/hcpa>.

SILVA, *et al.* Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas (Incorporation of marble and granite sludge in clay materials). **Cerâmica**, v. 51, p. 325–330, 2005.

SILVEIRA, Leonardo L L; VIDAL, Francisco Wilson Hollanda; SOUZA, Júlio César. **Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014.

SINGH, Manpreet; CHOUDHARY, Kailash; SRIVASTAVA, Anshuman; SINGH SANGWAN, Kuldip; BHUNIA, Dipendu. A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 13, n. February, p. 87–95, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.07.009>.

SINGH, Sarbjeet; NAGAR, Ravindra; AGRAWAL, Vinay. Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 172–182, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.034>.

TAGUCHI, *et al.* Avaliação das propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado. **Cerâmica**, v. 60, n. 354, p. 291–296, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000200020>.

TORMAN, Vanessa Bielfeld; COSTER, Rodrigo; RIBOLDI, João. Normality of variables: diagnosis methods and comparison of some nonparametric tests by simulation. **Clinical & Biomedical Research**, v. 32, n. 2, p. 227–234, 2012. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/hcpa>.

ULIANA, *et al.* Heat treatment of processing sludge of ornamental rocks: application as pozzolan in cement matrices. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 2, p. 100–123, 2015. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952015000200004>.

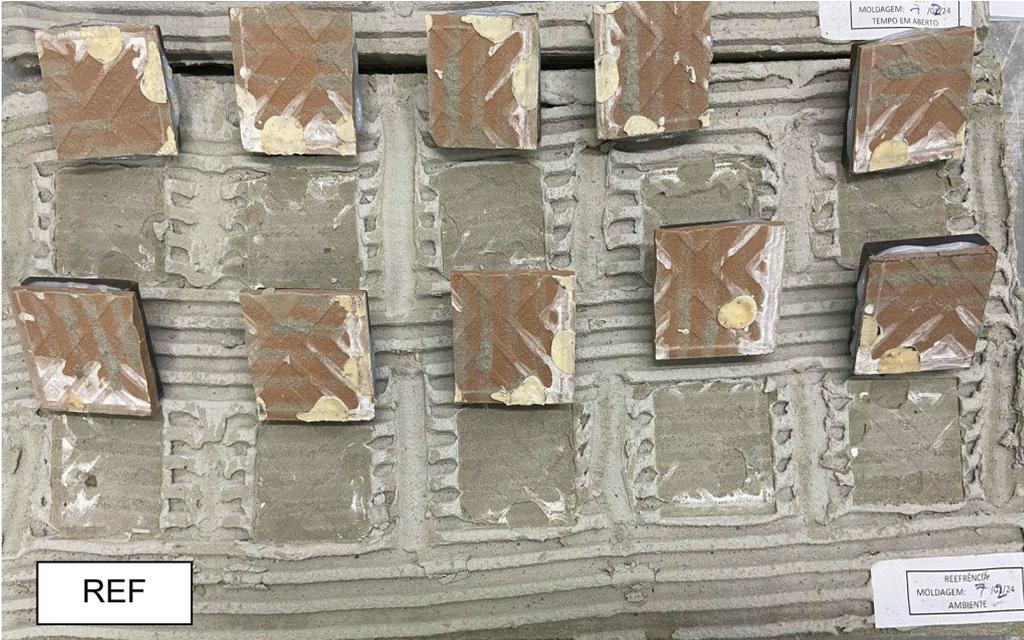
ULIANA, Juliana Gavani. **Tratamento Térmico da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais: Aplicação como Pozolana em Matrizes Cimentícias**. 2014. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Global Alliance for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. **United Nations Environment programme**, v. 224, p. 41, 2022.

VANDERLIND, Cassio; SPECK, Jaison Araújo. Análise da resistência de aderência à tração de argamassas colantes industrializadas com diferentes tipos de cimentos na composição. , p. 1–14, 2012.

VAZZOLER, *et al.* Investigation of the potential use of waste from ornamental stone processing after heat treatment for the production of cement-based paste. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 314–321, 2018.

APÊNDICE A - FOTOGRAFIAS DOS TIPOS DE RUPTURA DAS AMOSTRAS EM CONDIÇÃO AMBIENTE

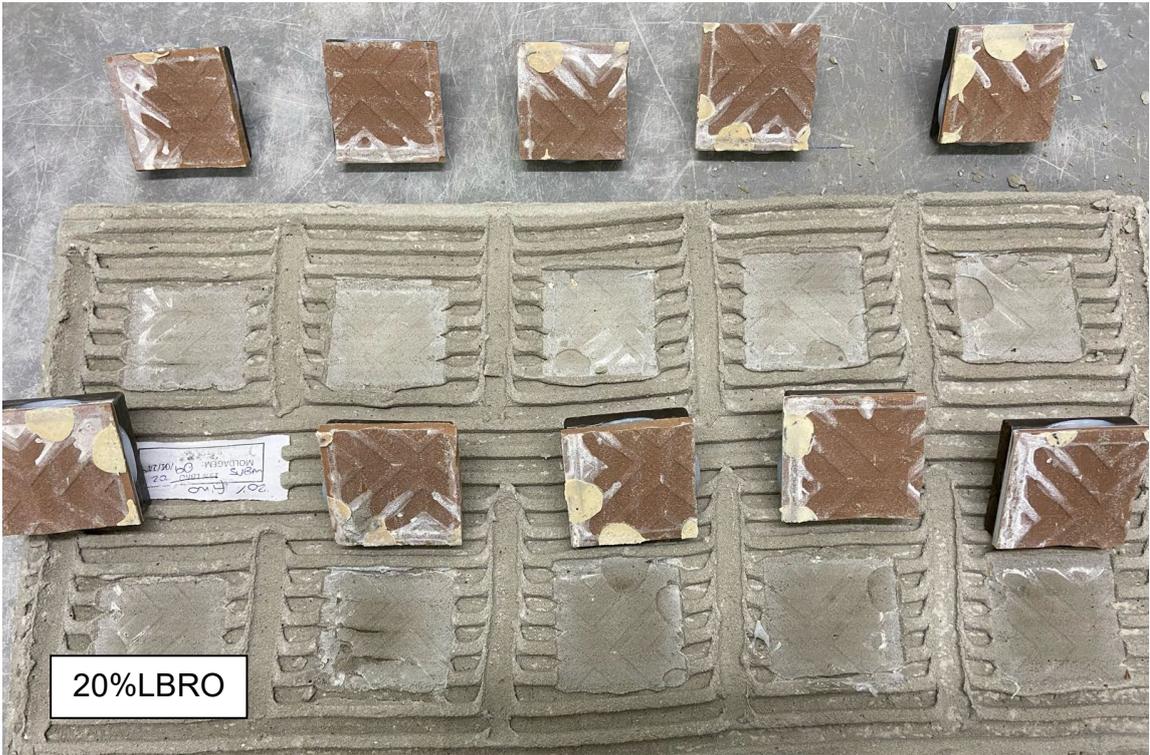




	REF - AMB	20% - AMB	60% - AMB	100% - AMB
Resistência de aderência à tração (MPa)	0,61	0,73	0,25	0,06
	0,78	0,83	0,44	0,04
	0,73	0,58	0,66	0,09
	0,86	0,75	0,58	0,06
	0,62	0,45	0,67	0,04
	0,82	0,64	0,53	0,07
	0,86	0,56	0,47	0,06
	0,81	0,69	0,37	0,05
	0,82	0,77	0,59	0,07
	0,69	0,76	0,28	0,06

Ponto	Forma de ruptura (%) - REF					
	S	S/A	A	A/P	P	F
1			15	85		
2			15	85		
3			15	85		
4			15	85		
5			15	85		
6			15	85		
7			15	85		
8			15	85		
9			15	85		
10			15	85		
Ponto	20%LBRO					
1				100		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8			5	95		
9				100		
10			5	95		
Ponto	60%LBRO					
1				100		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		
Ponto	100%LBRO					
1				100		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		

APÊNDICE B - FOTOGRAFIAS DOS TIPOS DE RUPTURA DAS AMOSTRAS EM CONDIÇÃO SUBMERSA

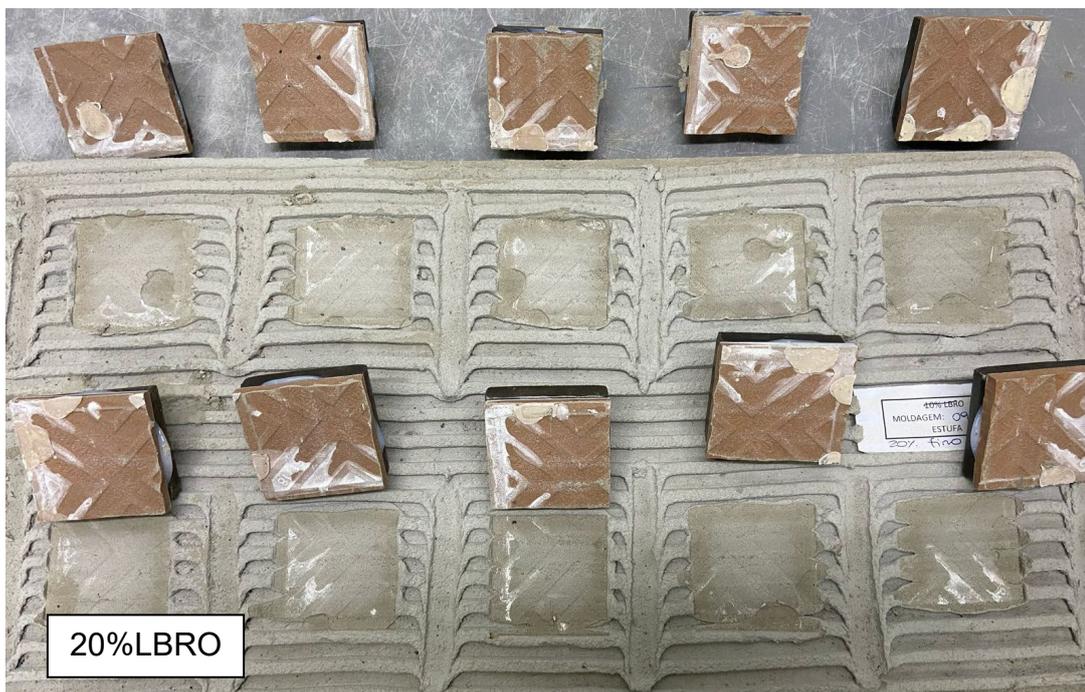


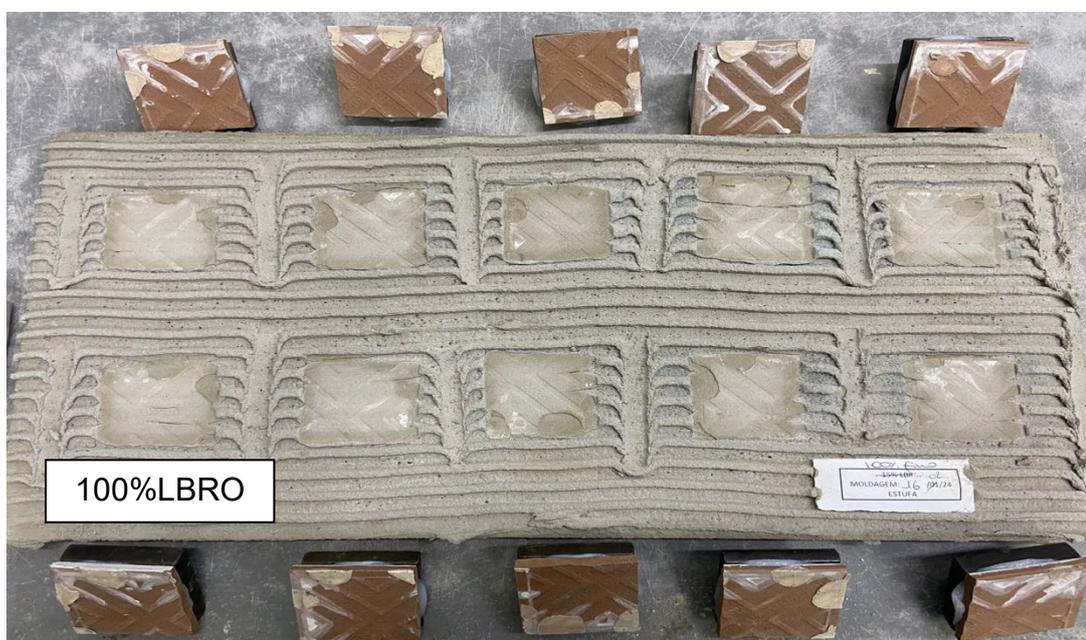


	REF - SUB	20% -SUB	60% - SUB	100% - SUB
Resistência de aderência à tração (MPa)	0,73	0,40	0,64	0,25
	0,57	0,53	0,37	0,28
	0,73	0,38	0,61	0,23
	0,53	0,35	0,51	0,20
	0,40	0,50	0,67	0,16
	0,75	0,42	0,60	0,24
	0,82	0,33	0,75	0,23
	0,67	0,41	0,70	0,23
	0,79	0,40	0,38	0,15
	0,87	0,34	0,24	0,21

Ponto	Forma de ruptura (%) - REF					
	S	S/A	A	A/P	P	F
1			25	75		
2			25	75		
3				100		
4				100		
5				100		
6			15	85		
7			15	85		
8				100		
9				100		
10				100		
Ponto	20%LBRO					
1				100		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		
Ponto	60%LBRO					
1			15	85		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		
Ponto	100%LBRO					
1				100		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		

APÊNDICE C - FOTOGRAFIAS DOS TIPOS DE RUPTURA DAS AMOSTRAS EM
CONDIÇÃO ESTUFA

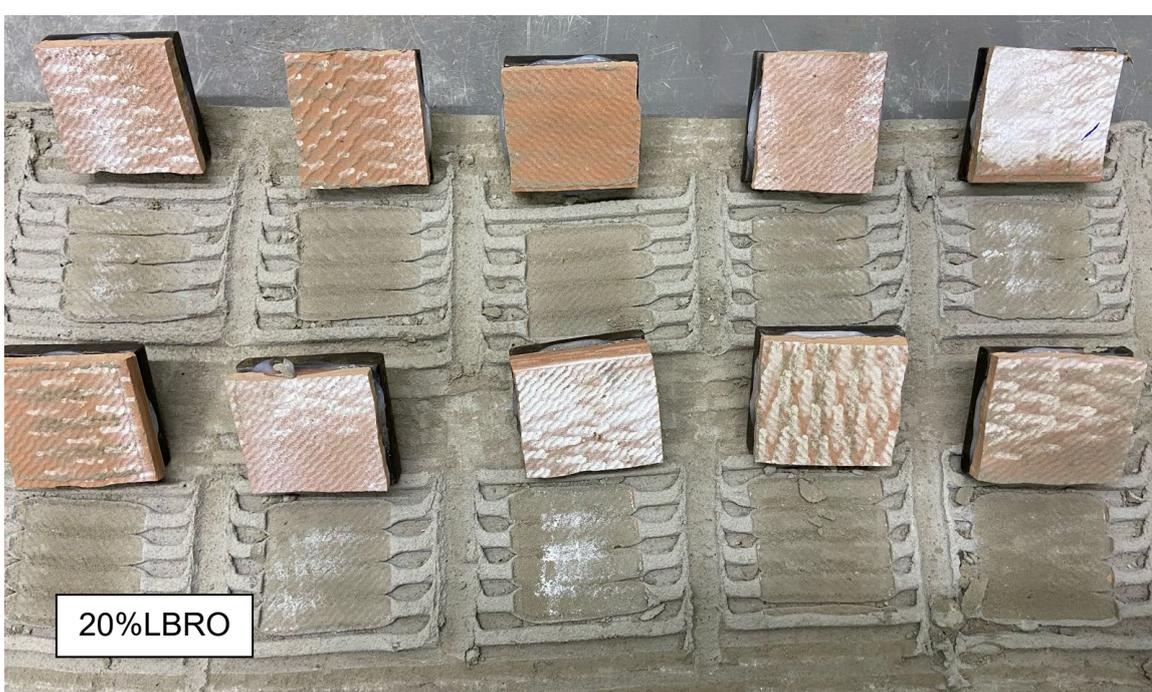




	REF - EST	20% - EST	60% - EST	100% - EST
Resistência de aderência à tração (MPa)	0,63	0,07	0,11	0,04
	0,30	0,12	0,57	0,04
	0,45	0,08	0,48	0,04
	0,58	0,07	0,44	0,05
	0,60	0,06	0,13	0,04
	0,47	0,09	0,04	0,04
	0,49	0,10	0,07	0,04
	0,47	0,10	0,48	0,04
	0,49	0,11	0,56	0,04
	0,52	0,07	0,02	0,04

Ponto	Forma de ruptura (%) - REF					
	S	S/A	A	A/P	P	F
1			5	95		
2			5	95		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		
Ponto	20%LBRO					
1				100		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		
Ponto	60%LBRO					
1				100		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		
Ponto	100%LBRO					
1				100		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		

APÊNDICE D - FOTOGRAFIAS DOS TIPOS DE RUPTURA DAS AMOSTRAS
PARA O TEMPO EM ABERTO





	REF - T A	20% - T A	60% - T A	100% - T A
Resistência de aderência à tração (MPa)	1,05	1,04	0,67	0,00
	1,49	1,42	1,13	0,04
	1,37	1,41	1,12	0,00
	1,20	1,40	1,17	0,18
	1,21	1,29	1,00	0,04
	0,98	0,93	0,74	0,05
	1,36	0,87	0,04	0,00
	1,06	1,01	1,20	0,11
	1,01	0,99	0,95	0,00
	0,90	0,96	0,86	0,41

Ponto	Forma de ruptura (%) - REF					
	S	S/A	A	A/P	P	F
1			35	65		
2			25	75		
3			40	60		
4			45	55		
5			60	40		
6			60	40		
7			25	75		
8			80	20		
9			55	45		
10			95	5		
Ponto	20%LBRO					
1				100		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		
Ponto	60%LBRO					
1				100		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		
Ponto	100%LBRO					
1				100		
2				100		
3				100		
4				100		
5				100		
6				100		
7				100		
8				100		
9				100		
10				100		