

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO PARA
UTILIZAÇÃO PELO MÉTODO DE PROJEÇÃO**

ANA LUIZA CAMPINHO PAES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO –
UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MAIO - 2020

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO PARA UTILIZAÇÃO PELO MÉTODO DE PROJEÇÃO

ANA LUIZA CAMPINHO PAES

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

Orientador: Prof. D.Sc. Jonas Alexandre

Campos dos Goytacazes - RJ

Maio – 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

P126

Paes, Ana Luiza Campinho.

Desenvolvimento de argamassa de revestimento para utilização pelo método de projeção / Ana Luiza Campinho Paes. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2020.

107 f. : il.

Bibliografia: 99 - 105.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2020.

Orientador: Jonas Alexandre.

1. Argamassa projetada. 2. Filito. 3. Resíduo de rocha ornamental. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO PARA UTILIZAÇÃO PELO MÉTODO DE PROJEÇÃO

ANA LUIZA CAMPINHO PAES

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

Aprovado em 13 de maio de 2020.

Comissão examinadora:

Prof. José Maria Franco de Carvalho, D.Sc. – DEC/UFV

Prof. Alexandre Vianna Bahiense, D.Sc. – Coord. Eng. Mecânica/IFES

Prof. Sérgio Luis González Garcia, D.Sc. – LECIV/UENF

Prof. Jonas Alexandre, D.Sc., LECIV/UENF
(Orientador)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Antônio Carlos da Silva Paes e Vilma Campinho Ribeiro Paes que estiveram ao meu lado a cada passo, apoiando meus sonhos e me incentivando a ir além.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me auxiliou nas escolhas que me trouxeram até aqui, por me erguer nos momentos em que fraquejei, por me acompanhar quando achei que não fosse conseguir terminar e por me dar foco para concluir esse trabalho. Sem Ele ao meu lado nada disso seria possível.

Aos meus pais que não desistiram de mim mesmo quando eu já havia desistido, que sempre me apoiaram independente do que eu escolhesse, que me incentivaram em meus projetos e a buscar meus sonhos e objetivos. Obrigada por acreditarem em mim, por todo amor, compreensão, paciência e carinho, por estarem sempre ao meu lado, sem vocês eu não seria quem eu sou hoje e não chegaria nem na metade do caminho que eu já percorri. Agradeço também a toda minha família que sempre torceu por mim. Ao Kaio que por me incentivar, ser um ótimo ouvinte das coisas boas e ruins ao longo desse período, por torcer e acreditar em mim e que eu conseguiria finalizar essa etapa da minha vida.

Agradeço ao meu orientador Jonas Alexandre pelo conhecimento transmitido e por acreditar no meu potencial para realizar esse trabalho. Aos meus amigos de laboratório que conviveram comigo durante esses dois anos, que aguentaram meu mau humor, minhas reclamações, que me ajudaram quando eu achei que não fosse conseguir sozinha, vocês fizeram minha vida mais leve e feliz. Agradeço aos técnicos de laboratório de engenharia civil, em especial ao Geucimar, que estava sempre disposto a ajudar no que fosse preciso, sempre com um sorriso no rosto.

Agradeço de maneira especial aos meus amigos Valber e Thuany, que me guiaram por boa parte desse caminho, que não me deixaram desistir e sempre me deram forças. Com a experiência de vocês, cada um a seu modo foi essencial para a conclusão desse trabalho. Obrigada por lerem em primeira mão essa dissertação e me ajudarem em ensaios, análise de resultados e em tudo que eu tinha dúvida.

Quero agradecer as agências de fomento, CAPES, FAPERJ e CNPQ, pelo suporte a essa dissertação, e a todos aqueles, que mesmo indiretamente, auxiliaram-me a concluir essa etapa da minha vida acadêmica.

RESUMO

Argamassas de múltiplo uso são materiais amplamente utilizados em construções para revestimento de paredes e assentamento de blocos. Usualmente são compostas de cimento, cal hidratada, areia e água, podendo ou não conter adições e aditivos. Para cumprir sua função, as principais propriedades desejadas para esse material são aderência ao substrato e trabalhabilidade. Com o intuito de diminuir o custo e o tempo de execução do revestimento, uma das alternativas é utilizar o método de projeção, sistema caracterizado pelo lançamento mecanizado da argamassa sobre o substrato. Para reduzir ainda mais os gastos, algumas empresas usam produtos para substituir totalmente a cal, aglomerante com alto valor comercial e emissor de gases poluentes em sua fabricação, responsável pela trabalhabilidade da pasta. Entretanto essa mudança deve ser feita de maneira adequada, avaliando a compatibilidade entre a cal e seu substituinte para não haver problemas futuros no revestimento. Tomando como referência uma construtora da região de Campos dos Goytacazes/RJ, que emprega o sistema de projeção e utiliza o filito em substituição a cal, o objetivo deste trabalho foi buscar alternativas ao problema de fissuras apresentado pelo revestimento após o período de secagem. Foi proposto um novo traço utilizando filito, além do desenvolvimento de uma argamassa própria para projeção com a incorporação de resíduo de rocha ornamental, onde suas propriedades irão depender do equipamento empregado na projeção. Devido a ausência de normas nacionais específicas para esse tipo de material, os ensaios foram realizados com as normas para argamassas de aplicação convencional. Nesta temática, foi feita a caracterização dos materiais utilizados, bem como ensaios de consistência, *squeeze flow*, densidade de massa no estado fresco, teor de ar incorporado, retenção de água, densidade de massa no estado endurecido, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, índice de vazios, de resistência à aderência à tração, ensaio de variação dimensional e análise visual da presença de fissuras. Os resultados foram comparados aos obtidos por outros autores, e tratados através de ANOVA e Teste de Tukey. Por meio dos dados obtidos, conclui-se que a argamassa com os resultados mais satisfatórios, em concordância com a bibliografia e sem apresentar fissuras na superfície do revestimento, foi a mistura composta por cimento, resíduo de rocha ornamental e areia.

Palavras-chave: Argamassa projetada, Filito, Resíduo de rocha ornamental.

ABSTRACT

Multipurpose mortars are materials widely used in constructions for wall cladding and settlement of the blocks. They are usually composed of cement, hydrated lime, sand and water, and may or may not contain additions and additives. To fulfill its function, the main properties desired for this material are adhesion to the substrate and workability. In order to reduce the cost and coating time, one of the alternatives is to use the projection method, a system characterized by mortar mechanized launching on the substrate. To further reduce expenses, some companies use products to totally replace lime, a binder with high commercial value and emitter of polluting gases in its manufacture, responsible for the workability of the paste. However, this change must be made in an appropriate manner, evaluating the compatibility between the lime and its substitute so that there are no future coating problems. Taking as a reference a construction company from Campos dos Goytacazes / RJ region, which uses the projection system and phyllite instead of lime, the objective of this work was to seek alternatives to the fissures problems presented by the coating after drying period. A new composition was proposed using phyllite, and a development of a suitable mortar for projection with the incorporation of ornamental rock residue, where its properties will depend on the equipment used in the projection. Due to the absence of specific national standards for this type of material, the tests were carried out with the standards for mortars with conventional application. In this theme, the characterization of the materials used was made, as well as consistency, squeeze flow, fresh mass density, incorporated air content, water retention, hardened mass density, compressive strength, flexural tensile strength, water absorption by capillarity, water absorption by immersion, void index, resistance to traction adhesion, dimensional variation test and visual analysis of the presence of fissures. With the results obtained, it is concluded that the mortar with the most satisfactory results, in agreement with the bibliography and without showing fissures on the coating surface, was the mixture composed of cement, ornamental rock residue and sand.

Key-words: Projected mortar, Phyllite, Ornamental rock residue.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE QUADROS	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES	xvii
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo geral.....	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificativa	4
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Histórico das argamassas	5
2.1.1. Evolução das argamassas desde a antiguidade.....	5
2.1.2. Argamassas industrializadas	6
2.1.3. Argamassas projetadas	7
2.2. Principais constituintes das argamassas.....	8
2.2.1. Filito	9
2.2.2. Resíduo de rocha ornamental.....	12
2.3. Classificação das argamassas	14
2.4. Propriedades das argamassas.....	17
2.4.1. Propriedades no estado fresco	17
2.4.1.1. Trabalhabilidade	17
2.4.1.2. Massa específica e teor de ar incorporado.....	18
2.4.1.3. Retenção de água	19
2.4.1.4. Aderência inicial.....	19
2.4.1.5. Reologia	20
2.4.2. Propriedades no estado endurecido	20
2.4.2.1. Aderência	20
2.4.2.2. Capacidade de absorver deformações.....	21

2.4.2.3. Resistência mecânica.....	21
2.4.2.4. Retração plástica e por secagem	21
2.4.2.5. Permeabilidade.....	22
2.4.2.6. Durabilidade	22
2.5. Funções das argamassas de revestimento	23
2.6. Argamassa projetada	23
2.6.1. Equipamentos empregados na projeção mecanizada	24
2.6.1.1. Recipiente acoplado	24
2.6.1.2. Bombas de argamassa.....	25
2.6.2. Processos de projeção.....	27
2.6.2.1. Processo via seca.....	27
2.6.2.2. Processo via úmida	28
2.6.3. Características das argamassas projetadas	28
2.6.4. Fatores influentes na projeção mecanizada.....	29
2.6.4.1. Teor de água	29
2.6.4.2. Tempo de mistura.....	29
2.6.4.3. Característica dos agregados	30
CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	33
3.1. Considerações Iniciais.....	33
3.2. Materiais utilizados	33
3.3. Metodologia	34
3.3.1. Caracterização dos materiais.....	34
3.3.1.1. Granulometria.....	34
3.3.1.2. Fluorescência de Raios-X de Energia Dispersiva (EDX)	35
3.3.1.3. Difração de Raios-X (DRX)	35
3.3.1.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	35
3.3.2. Dosagem.....	35
3.3.3. Ensaio tecnológicos no estado fresco	38
3.3.3.1. Índice de consistência (<i>flow table</i>)	38
3.3.3.2. Ensaio de reologia de <i>squeeze flow</i>	39
3.3.3.3. Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado	42
3.3.3.4. Retenção de água	44
3.3.4. Ensaio tecnológicos no estado endurecido	45

3.3.4.1. Densidade de massa no estado endurecido.....	46
3.3.4.2. Resistência à tração na flexão.....	46
3.3.4.3. Resistência à compressão axial	47
3.3.4.4. Absorção de água por imersão e índice de vazios	48
3.3.4.5. Absorção de água por capilaridade	49
3.3.4.6. Resistência de aderência à tração.	50
3.3.4.7. Determinação da variação dimensional.....	52
3.4. Tratamento estatístico	53
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1. Considerações Iniciais.....	55
4.2. Caracterização dos materiais	56
4.2.1. Caracterização física.....	56
4.2.2. Caracterização química e mineralógica	58
4.2.3. Caracterização microestrutural	61
4.3. Parâmetros tecnológicos no estado fresco.....	62
4.3.1. Ensaio de consistência (<i>flow table</i>)	63
4.3.2. <i>Squeeze Flow</i>	64
4.3.3. Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado.....	67
4.3.4. Retenção de água.....	69
4.4. Parâmetros tecnológicos no estado endurecido.....	70
4.4.1. Densidade de massa no estado endurecido	70
4.4.2. Resistência à tração na flexão	73
4.4.3. Resistência à compressão axial.....	75
4.4.4. Absorção de água por imersão e índice de vazios	77
4.4.5. Absorção de água por capilaridade	81
4.4.6. Resistência de aderência à tração e análise de fissuras	85
4.4.7. Variação dimensional.....	93
CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5.1. Conclusões	96
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	98
REFERÊNCIAS.....	99
ANEXO I.....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pirâmides de Guizé, Egito	5
Figura 2 – Construções romanas: (a) Coliseu, (b) Pantheon Romano	6
Figura 3 – Primeiro equipamento de projeção de argamassa inventado por Akeley..	7
Figura 4 – Filito utilizado na pesquisa.....	9
Figura 5 - Curvas granulométricas dos materiais estudados por Santiago (2008)	10
Figura 6 - Pilha com resíduo de rocha ornamental com certo grau de umidade.....	12
Figura 7 – Sistemas de aplicação da argamassa de revestimento. (a) sistema mais antigo de 3 camadas + de pintura; (b) uso apenas da camada única e pintura; (c) RDM.....	17
Figura 8 – Fatores interferentes na trabalhabilidade	18
Figura 9 – Esquematização do ensaio de <i>squeeze-flow</i>	20
Figura 10 – Aplicação de revestimento de argamassa. (a) método de lançamento manual; (b) aplicação por spray; (c) aplicação por projeção mecânica contínua	23
Figura 11 – Projetor com recipiente acoplado. (a) pistola, (b) caneca.....	25
Figura 12 – Bombas de argamassa: (a) bomba com misturador integrado, (b) visualização do mangote de projeção	25
Figura 13 – Bomba de argamassa com eixo helicoidal	26
Figura 14 – Bomba de argamassa com pistão	26
Figura 15 – Uso de taliscas como guia de controle na parte superior e inferior	27
Figura 16 – Diagrama do processo de projeção por via seca.....	27
Figura 17 – Diagrama do processo de projeção por via úmida	28
Figura 18 – Distribuição granulométrica: A – areia uniforme, B – areia contínua, C – areia descontínua, D – brita uniforme	31
Figura 19 – Distribuição volumétrica e sua influência na retração.....	31
Figura 20 – Materiais empregados: (a) Frações de areia usada na argamassa, (b) filito, (c) resíduo de rocha passado na peneira #50.....	33
Figura 21 – Equipamento de projeção empregado na obra de referência.....	34
Figura 22 – Caneta com 13,5 cm de comprimento ao lado das fissuras no estado endurecido.....	36
Figura 23 – Equipamentos utilizados no ensaio de índice de consistência	39
Figura 24 – Ilustração das argamassas A e B como fluido de Bingham.....	40

Figura 25 – Esquema de ensaio de <i>squeeze flow</i> . (a) máquina universal de ensaios; (b) célula de carga com capacidade de 30 kN; (c) placa superior de aço com 100 mm de diâmetro; (d) molde cilíndrico com diâmetro interno de 100 mm e altura de 10 mm; (e) placa inferior de aço com diâmetro de 180 mm	41
Figura 26 – Curva típica de carga x deslocamento em um ensaio de <i>squeeze flow</i> para argamassas.....	41
Figura 27 – Copo cilíndrico para densidade de massa no estado fresco	42
Figura 28 – Aparelho utilizado no ensaio de retenção de água.....	44
Figura 29 – Ensaio de tração na flexão	47
Figura 30 – Ensaio de compressão no corpo de prova	47
Figura 31 – Ensaio de Capilaridade	49
Figura 32 – Distribuição das amostras na parede para ensaio de aderência a tração	50
Figura 33 – Materiais empregados no ensaio de aderência a tração: (a) dinamômetro, (b) pastilha.....	51
Figura 34 – Tipos de ruptura	52
Figura 35 – Corpos de prova para ensaio de variação dimensional.....	52
Figura 36 – Equipamento para medição da variação dimensional com bastão de calibração à direita	53
Figura 37 - Curvas granulométricas: (rosa) cal hidratada CH III, (azul) filito, (vermelho) resíduo de rochas ornamentais e (roxo) areia lavada do rio Paraíba.	56
Figura 38 – Difratograma de raio-X: (a) cal hidratada, (b) filito e (c) resíduo de rocha ornamental. Legenda: C – calcita; D – dolomita; K – caulinita; M – muscovita; P – portlandita; Q – quartzo; S – sericita; Mi – microclina; Gi - gipsita	59
Figura 39 – MEV da cal hidratada: (a) aumento de 100x; (b) aumento de 2000x	61
Figura 40 – MEV do resíduo de rocha: (a) aumento de 100x; (b) aumento de 2000x	61
Figura 41 – MEV do filito: (a) aumento de 100x; (b) aumento de 2000x	61
Figura 42 – Curva carga x deslocamento na velocidade lenta (0,1 mm/s): (a) série F e F01; (b) série RC, R e F01 e (c) série RF e F01	64/65
Figura 43 – Curva carga x deslocamento na velocidade rápida (3 mm/s): (a) série F e F01; (b) série RC, R e F01 e (c) série RF e F01	65/66
Figura 44 - Gráfico de média de densidade de massa aos 28 dias. Linha vermelha mostra valor máximo de acordo com Mattana <i>et al.</i> (2012).....	71
Figura 45 – Gráfico das médias de resistência à tração na flexão aos 28 dias. Linha vermelha mostra valor mínimo de acordo com Mattana <i>et al.</i> (2012).....	73

Figura 46 - Gráfico das médias de resistência à compressão aos 28 dias. Linha vermelha mostra valor mínimo e máximo de acordo com Mattana <i>et al.</i> (2012).	76
Figura 47 - Gráfico das médias da absorção de água por imersão.	78
Figura 48 - Gráfico das médias de índice de vazios. Linha vermelha mostra valor máximo de acordo com Mattana <i>et al.</i> (2012).	80
Figura 49 - Gráfico das médias do coeficiente de capilaridade. Linha vermelha mostra valor máximo de acordo com Mattana <i>et al.</i> (2012).	82
Figura 50 - Gráfico das médias de absorção de água aos 90 minutos.	84
Figura 51 – Corpos de prova para ensaio de aderência à tração e visualização de presença de fissuras. Traços: (a) R01, (b) R02 e (c) R03	86
Figura 52 – Corpos de prova para ensaio de aderência à tração e visualização de presença de fissuras. Traços: (a) F02, (b) F03, (c) F04 e (d) F05.....	87
Figura 53 – Corpos de prova para ensaio de aderência à tração e visualização de presença de fissuras. Traços: (a) RC25, (b) RC30, (c) RC40 e (d) RC45.....	88
Figura 54 – Corpos de prova para ensaio de aderência à tração e visualização de presença de fissuras. Traços: (a) RF25, (b) RF30, (c) RF40 e (d) RF45	89
Figura 55 – Gráficos das médias de resistência de aderência à tração, com linha limite da NBR 13528 (ABNT, 2010) para aplicação de revestimento externo, em vermelho, e interno, em laranja.....	90
Figura 56 – Revestimento R01 aplicado em canteiro de obras em condições reais.	93
Figura 57 – Retração por secagem (mm/m) x idade (dias).....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporções utilizadas em massa.	36
Tabela 2 - Dados meteorológicos referentes aos dias de aplicação da argamassa no substrato.	51
Tabela 3 – Valores limites de referência para comparação com os resultados obtidos.....	55
Tabela 4 – Parâmetros físicos	56
Tabela 5 – Análise química, em %, da cal hidratada, resíduo de rocha, filito e areia	58
Tabela 6 – Parâmetros obtidos no estado fresco.....	62
Tabela 7 - ANOVA para DIC da densidade de massa no estado endurecido ($p \leq 0,05$).	71
Tabela 8 - Teste de Tukey para contraste de médias da densidade de massa no estado endurecido ($p \leq 0,05$).....	71
Tabela 9 – ANOVA para DIC da resistência à tração na flexão ($p \leq 0,05$)	73
Tabela 10 – Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à tração na flexão ($p \leq 0,05$).....	74
Tabela 11 – ANOVA para DIC da resistência à compressão ($p \leq 0,05$)	76
Tabela 12 – Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à compressão ($p \leq 0,05$).....	76
Tabela 13 – ANOVA para DIC da absorção de água por imersão ($p \leq 0,05$)	78
Tabela 14 – Teste de Tukey para contraste de médias da absorção de água por imersão ($p \leq 0,05$).	78
Tabela 15 – ANOVA para DIC do índice de vazios ($p \leq 0,05$)	80
Tabela 16 – Teste de Tukey para contraste de médias do índice de vazios ($p \leq 0,05$)	80
Tabela 17 – ANOVA para DIC do coeficiente de capilaridade ($p \leq 0,05$).....	83
Tabela 18 – Teste de Tukey para contraste de médias do coeficiente de capilaridade ($p \leq 0,05$).....	83
Tabela 19 – ANOVA para DIC da absorção de água por capilaridade aos 90 minutos ($p \leq 0,05$).....	84
Tabela 20 – Teste de Tukey para contraste de médias da absorção de água por capilaridade aos 90 minutos ($p \leq 0,05$)	85

Tabela 21 – ANOVA para DIC da resistência de aderência à tração ($p \leq 0,05$)	91
Tabela 22 – Teste de Tukey para contraste de médias da resistência de aderência à tração ($p \leq 0,05$)	91
Tabela 23 - Classificação do revestimento R01 segundo critério da NBR 13281:2005	98.
Tabela 24 – Limites unilaterais de F ao nível de 95% de confiança	106
Tabela 25 – Valores da amplitude total estudentizada (q), para uso no teste de Tukey, ao nível de 95% de confiança	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das argamassas quanto ao tipo.....	15
Quadro 2 – Classificação das argamassas sob diferentes critérios	16
Quadro 3 – Propriedades relacionadas a trabalhabilidade.....	18
Quadro 4 – Limites de resistência de aderência à tração.....	20
Quadro 5 – Fatores influentes na resistência mecânica.....	21
Quadro 6 – Ensaio realizado no estado fresco e suas respectivas normas técnicas	38
Quadro 7 – Ensaio realizado no estado endurecido e suas respectivas normas técnicas.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

- **Letras Romanas Maiúsculas**

A –	Absorção por imersão;
A ₉₀ –	Absorção por capilaridade após 90 minutos;
AF –	Fator água/argamassa;
A _i –	Teor de ar incorporado;
C –	Coeficiente de capilaridade;
CV -	Coeficiente de variação;
CH –	Cal hidratada;
CP –	Cimento Portland;
F -	Parâmetro calculado para realização do teste F;
F _c –	Carga máxima aplicada;
F _t –	Carga aplicada verticalmente no centro do prisma;
FV -	Fonte de variação;
GL -	Grau de liberdade;
I _v –	Índice de vazios;
L –	Distância entre os suportes;
R _a –	Retenção de água;
R _c –	Resistência à compressão;
R _t –	Resistência à tração na flexão;
SQ -	Soma dos quadrados;
QM -	Quadrados médios

V – Volume;

• **Letras romanas minúsculas**

a.C. – Antes de Cristo;

d.C. – Depois de Cristo;

c – Comprimento;

d – Densidade de massa no estado fresco;

d_t – Densidade teórica da argamassa sem vazios;

h – Altura;

l – Largura;

m – Soma das massas dos componentes anidros;

m_0 – Massa inicial;

m_{10} – Massa do corpo de prova após 10 minutos;

m_{90} – Massa do corpo de prova após 90 minutos;

m_a – Massa do conjunto com argamassa;

m_c – Massa recipiente com argamassa;

m_{cp} – Massa do corpo de prova;

m_s – Massa do conjunto após sucção;

m_i – Massa seca de cada componente da argamassa mais a massa de água;

m_{im} – Massa da amostra saturada imersa após sucção;

m_s – Massa da amostra seca em estufa;

m_{sat} – Massa da amostra saturada após imersão e fervura;

m_v – Massa do recipiente/conjunto vazio;

v_r – Volume do recipiente.

- **Letras gregas**

γ - Massa específica;

ρ - Densidade de massa aparente no estado endurecido.

- **Siglas**

ABAI – Associação Brasileira de Argamassa Industrializada;

ABIROCHAS – Associação Brasileira Da Indústria De Rochas Ornamentais;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

CSTC – Centre Scientifique et Technique de la Construcion;

EUA – Estados Unidos da América;

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

LAMAV – Laboratório de Materiais Avançados;

LECIV – Laboratório de Engenharia Civil;

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora;

RDM – Revestimento decorativo em monocamada;

UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense.

- **Unidades**

cm – Centímetro;

cm³ - Centímetro cúbico;

g – Grama;

g/cm³ - Grama por centímetro cúbico;

g/dm².min^{1/2} – Grama por decímetro quadrado raiz quadrado de minuto;

kg – Quilograma;

kg/cm^3 -	Quilograma por centímetro cúbico;
km -	Quilometro;
kN -	Quilonewton;
kPa -	Quilopascal;
m^2 -	Metro quadrado;
m^3 -	Metro cúbico;
m^3/h -	Metro cúbico por hora;
min -	Minuto;
mm -	Milímetro;
MPa -	Megapascal;
N -	Newton;
N/s -	Newton por segundo;
$^{\circ}\text{C}$ -	Graus Celsius;
s -	Segundo;
ton -	Tonelada;
μm -	Micrometro.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

O setor da construção civil é relevante economicamente para o Brasil, contribuindo com cerca de 5 a 15% do PIB do país (IBGE, 2017). Desde o 2º trimestre de 2013 até o 2º semestre de 2017, a queda deste setor soma 14,3% (IBGE, 2017), sendo o que apresentou maior déficit no ano de 2017, como queda consecutiva de 2,5% em 2018 em relação ao ano anterior (IBGE, 2019).

Devido à importância econômica desse setor, é necessário impulsionar seu crescimento em tempos de declínio, desenvolvendo novas técnicas ou melhorando aquelas já existente, em busca de diminuir custos e acelerar o processo de produção, sem perder de vista a qualidade do produto final.

A argamassa é um dos materiais mais utilizados na construção civil, presente em praticamente todas as obras dessa área. Segundo a Associação Brasileira de Argamassa Industrializada - ABAI – (2015), o mercado total desse produto é estimado em 120 milhões de toneladas/ano.

De acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 13281 (ABNT, 2005), a argamassa é uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

As argamassas podem ser classificadas de uma maneira abrangente em argamassas de múltiplo uso e argamassas colantes. Aquelas são para assentamento de blocos e revestimento de paredes e tetos, enquanto estas são empregadas em assentamento de revestimento cerâmico (CARASEK, 2017, VIANA *et al.*, 2010). Uma outra forma de classificação refere-se ao tipo: assentamento, revestimento de paredes e tetos, de uso geral, para reboco, decorativa em camada fina, decorativa em monocamada (NBR 13281, ABNT 2005). O presente trabalho aborda as argamassas de múltiplo uso, aplicadas como revestimento e reboco de paredes e tetos pelo sistema de projeção.

Esse sistema é caracterizado pelo lançamento mecanizado da argamassa sobre o substrato e confere maior produtividade na aplicação quando comparado ao convencional, baixo desperdício de material, baixo impacto ambiental – por gerar menos resíduo em obra, e, conseqüentemente, uma obra mais limpa. Há dois tipos de projeção: por *spray* e por bomba (PINTO *et al.*, 2006).

Para o emprego do sistema de projeção, algumas características no estado reológico das argamassas devem ser distintas daquelas que são usadas no sistema convencional de aplicação por meio da colher de pedreiro, onde a principal delas é a trabalhabilidade, sendo a facilidade de manuseio do material (CARASEK, 1996, SANTOS e RAMOS, 2005).

Uma forma de avaliar essa característica é por meio do ensaio de consistência, normatizado pela NBR 13276 (ABNT, 2016), que limita o valor do índice de consistência em 260 ± 5 mm para argamassas aplicadas de maneira convencional. Contudo, esse limite resulta em um material pouco fluido, dificultando ou tornando o processo de projeção inviável.

Um modo simples de aumentar o espalhamento na mesa de consistência, logo a trabalhabilidade, é acrescentando água à mistura, aumentando assim o fator água-cimento. Entretanto essa ação gera conseqüências como a diminuição da resistência, aumento da porosidade e maior aparecimento de fissuras devido a retração (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Antes de prosseguir, é válido abordar a distinção entre fissuras e trincas. Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), elas podem ser classificadas de acordo com a espessura de abertura, sendo as fissuras com espessuras inferiores à 0,6 mm enquanto as trincas possuem espessuras até 0,6 mm ou superiores.

A presença de fissuras foi um problema observado em revestimentos aplicados pela projeção mecanizada em alguns edifícios em construção visitados na cidade de Campos dos Goytacazes/RJ. Essa patologia foi constatada após a secagem da argamassa, com substituição total da cal pelo filito, e aplicada mecanicamente por meio de bombas de argamassa.

Para a projeção desse material, sua consistência deve se apresentar mais fluida quando comparada àquelas de aplicação convencional. Para determinar o valor

do índice de consistência, partiu-se de uma amostra obtida em um canteiro de obras, no qual esse índice foi de 310 mm. Tomando esse valor como ponto de partida para esta dissertação, a faixa de trabalhabilidade adotada foi de 310 ± 5 mm, diferente do limite da norma brasileira.

Com base nos argumentos supracitados e em busca de melhorar o desempenho das argamassas de projeção dosadas em obras, este projeto apresenta como proposta mitigar o aparecimento de fissuras nessas argamassas, sem modificar sua trabalhabilidade.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi buscar alternativas ao problema das fissuras, problema esse observado nos revestimentos aplicados pelo método da projeção mecanizada, após seu período de secagem, em alguns edifícios da região de Campos dos Goytacazes/RJ. Para isso, buscou-se desenvolver um traço utilizando filito, material que vem sendo usado em argamassas e que foi empregado na argamassa de referência. Além do filito, também foi empregado o resíduo de rocha ornamental, proveniente da região de Cachoeiro do Itapemirim/ES, para que fosse usado como substituto total da cal hidratada para o desenvolvimento de um novo traço de argamassa de projeção.

1.2.2. Objetivos específicos

- Modificar o traço da argamassa de referência com filito por meio de mudança na proporção dos materiais e emprego de traços normalmente usados, buscando solucionar o problema de fissuras;
- Avaliar a possibilidade da argamassa com o resíduo de rocha ornamental ser projetada por meio da sua consistência;
- Analisar e comparar os parâmetros no estado fresco das argamassas desenvolvidas, sendo eles: consistência, teor de ar incorporado, densidade de massa no estado fresco, retenção de água, *squeeze flow*;
- Analisar e comprar os parâmetros no estado endurecido das argamassas desenvolvidas, sendo eles: resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, resistência de aderência à tração, absorção de água por imersão e índice de vazios, densidade de massa no estado endurecido, absorção de água por capilaridade e variação dimensional;

- Fazer uma análise visual dos traços desenvolvidos quanto ao aparecimento de ondulações e escorregamento, além de verificar o aparecimento de fissuras.

1.3. Justificativa

O trabalho se justifica pela implicação econômica e ambiental da utilização das argamassas desenvolvidas, além de buscar uma solução para a Construção Civil em relação ao aparecimento de fissuras em argamassas projetadas.

A implicação econômica se dá pelo aparecimento de fissuras e o que elas podem acarretar, uma vez que espaços deixados por elas são capazes de reter sujeiras, que podem servir como fonte nutricional para outras patologias, como a proliferação de microorganismos, sendo fungos e bolores os mais comuns. Esses, por sua vez, são responsáveis pelo aparecimento de manchas, perda de coesão e desagregação do revestimento por conta da produção de ácidos (CARASEK, 2011 e GUERRA, 2016).

Com isso, pode haver necessidade de intervenção, seja para recuperação do revestimento onde ocorreu o deslocamento ou refazer o acabamento onde estava manchado, elevando o custo anteriormente previsto e, sabendo que caso o problema das fissuras não sejam solucionados, essas patologias serão recorrentes. É importante salientar que o problema dos bolores é de difícil solução, visto que a simples remoção e aplicação de produtos fungicidas não representam uma medida definitiva. Por isso, propor um novo traço para mitigar o aparecimento de fissuras apresentadas pelas argamassas se faz importante.

Além disso, existe a questão econômica de substituir a cal por esses produtos, tendo em vista que seu valor comercial é mais elevado quando comparado com o filito e resíduo de rocha. De acordo com a tabela de insumos da Caixa Econômica Federal referente a maio de 2020 (SINAPE, 2020), o preço médio nacional cal foi de 0,70 R\$/kg, o valor do filito, 0,55 R\$/kg, adquirido em lojas de produto de construção online. Já o custo associado ao resíduo de rocha, em um primeiro momento, foi seu transporte de Cachoeiro do Itapemirim-ES para Campos dos Goytacazes-RJ, de 0,073 R\$/kg.

Há um ganho ambiental em substituir a cal uma vez que seu processo produtivo é altamente poluidor. Além disso, há contribuição ambiental ao empregar o resíduo de rocha ornamental, um material que atualmente é considerado um lixo industrial, auxiliando no desenvolvimento sustentável do setor da construção civil.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Histórico das argamassas

2.1.1. Evolução das argamassas desde a antiguidade

Desde a antiguidade, o homem emprega materiais de diversas naturezas para a construção de abrigos, fazendo com que trabalhem de maneira conjunta, buscando condições favoráveis para sua proteção e melhorando sua qualidade de vida.

Segundo Elsen (2006) e Matias *et al.* (2014), as primeiras argamassas eram uma mistura de solos argilosos e materiais provenientes de rochas calcárias, equivalentes quimicamente ao carbonato de cálcio encontrado no ciclo da cal. Desta forma, percebe-se que sua constituição antes do cimento Portland era de materiais argilosos com calcário, uma combinação estável e não propensa a patologias.

Por volta dos anos de 2.980 a 2.925 a.C., os egípcios foram os pioneiros em empregar a argamassa para revestimento, aplicando reboco em vedação, paredes internas e antecâmaras, criando o conceito de múltiplo uso, embora este termo não fosse utilizado na época. Eles usavam argamassas de gesso calcinado misturado com quantidades controladas de barro e um aglomerante rudimentar, constatadas nas pirâmides de Gizé e Quéfrem (Figura 1) (RECENA, 2017; CARVALHO, 2008; SCHIMID e DARIZ, 2016).



Figura 1 - Pirâmides de Gizé, Egito.

Fonte: <http://historiadaartefersuneg.blogspot.com/2013, 2019>.

Aproximadamente no ano de 2.000 a.C., os romanos incorporaram cinza vulcânica da região de Pozzouli (pozolana) na mistura de cal e solo argiloso, empregando a pozolana para melhorar o desempenho da argamassa em relação a umidade. As construções em que foi empregado se mantêm erguidas até a atualidade, como o Coliseu e o Pantheon Romano, ilustrados na Figura 2 (RECENA, 2017).



Figura 2 - Construções romanas: (a) Coliseu, (b) Pantheon Romano.

Fonte: <https://pixfeeds.com/images/3>, 2019.

Como consequência econômica da queda do Império Romano, as argamassas passaram a ser constituídas por menores quantidade de cal, e maiores proporções de argila e areia, resultando em um produto final de qualidade inferior (MARTINGANÇA *et al.*, 2005).

Essa situação foi mantida por um período durante a Idade Média, e segundo Carvalho (2008), a tecnologia do fabrico deste material não sofreu grandes avanços. A partir do século VIII o gesso passou a ser a base preferencial para o preparo das argamassas, quando foi introduzido na Europa pelos árabes.

No Brasil, existem relatos da instalação de caieiras no primeiro século da colonização, 49 anos após o seu descobrimento. Esse material era destinado a produção de argamassas e pintura, principalmente no interior do país (GUIMARÃES, 2002; RECENA, 2017).

Após a invenção do cimento Portland em 1824, por John Aspdin, em Leeds, Inglaterra, constituído por uma mistura de argila e calcário calcinados, e posteriormente gesso, a composição básica da argamassa de múltiplo uso passou por uma reformulação, sendo formada agora por cimento, areia e um material que confira trabalhabilidade a mistura, geralmente calcário ou mesmo o solo argiloso.

2.1.2. Argamassas industrializadas

Esse produto surgiu no final do século XIX na Europa e nos EUA, e no Brasil na década de 1990, com o objetivo de minimizar as patologias ocasionadas pela falta de qualidade dos materiais empregados na produção da argamassa e para substituir argamassas medidas e misturadas no canteiro de obras.

As argamassas industrializadas são misturas dosadas em plantas industriais no estado seco, compostas de agregados miúdos, aglomerantes, podendo conter aditivos e adições, e no momento de sua aplicação só é necessária a adição de água conforme recomendação do fabricante (NBR 13529, ABNT, 2013).

Com essa tecnologia, surgiram argamassas específicas para cada aplicação, entre elas as próprias para projeção. Devido ao grau de complexidade dos sistemas de jateamento e dos diferentes tipos existentes, pesquisas foram realizadas nessa área a fim de definir as características necessárias a essas misturas para que elas pudessem ser bombeadas sem perder suas propriedades essenciais.

2.1.3. Argamassas projetadas

No ano de 1907, para revestir de maneira rápida a fachada no Museu da universidade de Columbia nos Estados Unidos, Carl Eathan Akeley inventou uma máquina de projeção de argamassa por via seca (Figura 3). Nela, o gesso em pó era inserido na parte superior do equipamento e chegava à inferior por meio de ar comprimido, e por um tubo era transportado até a saída. Nesse ponto, recebia água vindo de outro mangote, sendo projetado no substrato (TEICHERT, 2002). Com o desenvolvimento e difusão desta tecnologia pelo mundo, outros testes foram feitos e obtiveram bom desempenho.



Figura 3 - Primeiro equipamento de projeção de argamassa inventado por Akeley.

Fonte: Teichert, 2002.

No Brasil, as primeiras tentativas de utilizar o equipamento de projeção ocorreram na década de 1970 no estado de São Paulo, entretanto, não foram bem-sucedidas. Isso se deu em função do fabricante, que ao efetuar a venda, focou apenas nas características do maquinário, sem dar atenção à necessidade do treinamento da

mão de obra e adaptações na gestão do canteiro de obras, devido ao emprego de um processo com maior produtividade (CRESCENCIO *et al.*, 2000).

2.2. Principais constituintes das argamassas

Como citado previamente, as argamassas são materiais compósitos entendidas como misturas homogêneas de agregados miúdos, aglomerantes (cal hidratada ou cimento Portland), podendo conter ou não aditivos ou adições químicas e minerais, além de água (NBR 13281, ABNT, 2005).

Os agregados são materiais granulares, não coesivos, que não interferem na reação de endurecimento da argamassa, e funcionam como uma contenção em face da retração da pasta quando ocorre o endurecimento (retração por secagem), além de estar relacionada com a resistência do material e sua compacidade (PINTO, 2006, BAUER, 2008). A classificação mais usual divide sua granulometria em agregados miúdos e graúdos.

Os aditivos, segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013), são empregados nas argamassas com o intuito de melhorar suas propriedades, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Os principais aditivos encontrados são os plastificantes, aceleradores de pega, retardadores de pega e incorporadores de ar.

A norma técnica define as adições como materiais inorgânicos com granulometria extremamente fina, adicionados em busca de ganho ou melhoria nas propriedades físicas e químicas previamente existentes, cuja quantidade é levada em consideração no proporcionamento (NBR 13529, ABNT, 2013). São exemplos de adições a cinza da casca do arroz, cinza do bagaço da cana-de-açúcar, escória de alto forno, saibros e solos finos beneficiados.

Os aglomerantes são materiais ativos, ligantes, geralmente pulverulentos cuja função é unir os grãos do agregado por meio de uma pasta, ou seja, são responsáveis pela aglutinação dos constituintes, dar coesão, e influenciar na resistência final do material. Eles podem ser classificados em quimicamente inertes ou ativos. Os inertes são aqueles que endurecem por simples secagem, como é o caso da argila e do betume.

Os quimicamente ativos endurecem por meio de reações químicas, e podem se subdividir em aéreos e hidráulicos. Os aéreos endurecem pela ação química do

contato com o CO₂ ou por reação de hidratação, como gesso e cal aérea. Já os aglomerantes hidráulicos, pela ação exclusiva da água, possuindo resistência satisfatória quando em contato com a água após seu período de secagem, sendo os mais empregados na construção civil. São eles, a cal hidráulica e cimento Portland (NBR 11172, ABNT, 1990).

Para as argamassas produzidas neste trabalho, foram empregados dois materiais que substituíram a cal hidratada, sendo eles o filito e o resíduo de rocha ornamental, abordados de maneira mais detalhada a seguir.

2.2.1. Filito

É um mineral abundante na crosta terrestre, apresentando-se como rochas metamórficas, estratificadas ou laminadas, de fácil pulverização, fornecedora de um pó finíssimo, com baixo custo agregado (Figura 4). É composto principalmente de Al (alumínio) e Si (silício), e seus constituintes essenciais são filossilicatos de pequeno tamanho de grão, como a mica muscovita finamente dividida ou sericita (25 a 30%), caulinita (40 a 50%), responsável pela sua plasticidade, e quartzo (10 a 25%) (VALERA *et al.*, 2002).

De acordo com Romano *et al.* (2011), quando finamente moídos, os filitos conferem às composições cimentícias características similares àquelas obtidas com o uso da cal no estado fresco, por esse motivo, tem sido comum o seu emprego na produção de argamassas para revestimento. Entretanto, sua composição química apresenta pequenas quantidades de óxido cálcio e de magnésio, ilustrando a falta de material ligante, caracterizando o mesmo como inerte. A deficiência de ligante nas argamassas faz com que a consolidação e o endurecimento fiquem somente em função do cimento. Em consequência disto, são comuns o aparecimento de problema após o endurecimento da argamassa, como fissuras.



Figura 4 - Filito utilizado na pesquisa.

Fonte: Autora, 2020.

Nos estudos de Santiago (2008) sobre alteração de rochas básicas intrusivas metamorfozadas e filitos sericíticos da região do quadrilátero ferrífero, ele avaliou três tipos de filito de diferentes jazidas da região e encontrou valores médios de Limite de Liquidez de 42%, Limite de Plasticidade de 27,3% e Índice de Plasticidade de 18,7%, dados esses que serviram de comparação para os valores desta dissertação. A Figura 5 apresenta a granulometria dos três filitos estudados, por ele denominados de CMT 01A, CMT 01B e CMT 01C, e observada a curva granulométrica dos materiais de interesse, é possível dizer que o teor de finos do filito é de aproximadamente 80%.

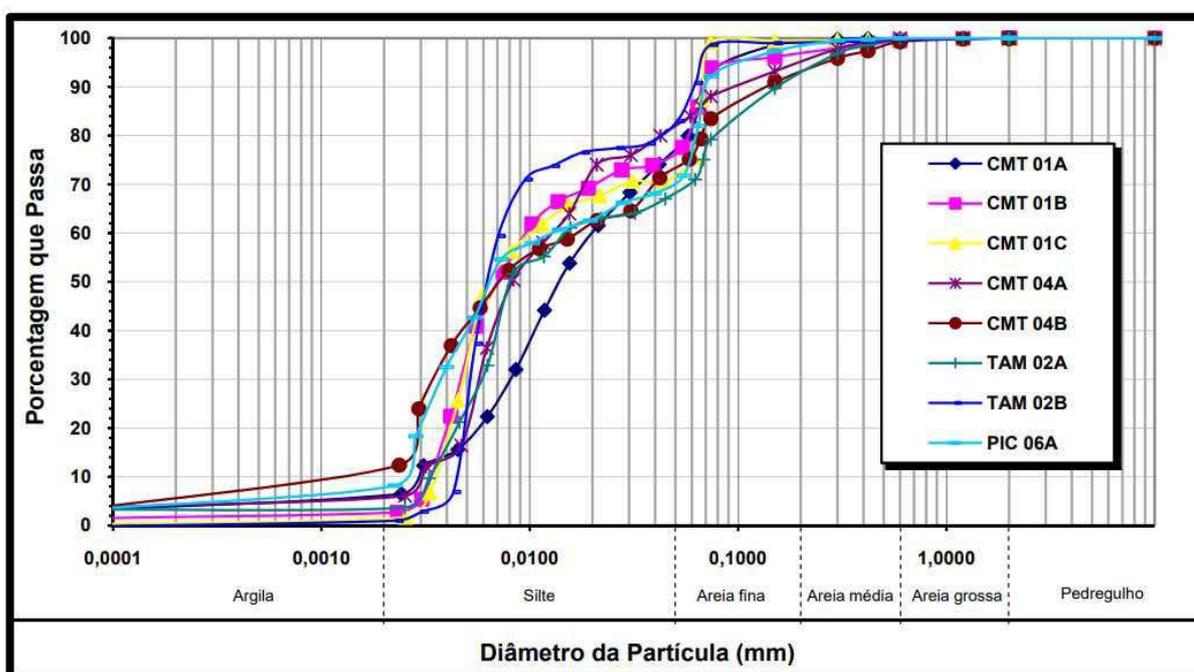


Figura 5 - Curvas granulométricas dos materiais estudados por Santiago (2008).

Fonte: Santiago, 2008.

A seguir serão apresentados alguns trabalhos em que o filito foi empregado:

Romano *et al.* (2014) fizeram ensaios com argamassas de cal, filito e uma mistura de cal e filito, chamada de blendas. Eles observaram que os filitos puros possuíam elevada quantidade de material insolúvel. Por meio dos ensaios de calorimetria, que mostraram o pico de calor no final do período de indução durante a hidratação da pasta, os autores observaram que aquelas constituídas apenas por cal apresentaram um maior pico entre as argamassas estudadas, tendo mais alteração nas reações químicas do que aquelas com filito, blenda ou de referência (apenas cimento). Já as pastas apenas com filito, não apresentaram nenhuma alteração na cinética de reação em comparação com a pasta de cimento, comprovando que esses

minerais não apresentam nenhuma reatividade, evidenciando que não possuem propriedades ligantes.

Nos estudos de Ribeiro *et al.* (2016), eles observaram que por se tratar de um material pulverulento é interessante o seu emprego, uma vez que seus finos ocupam espaços vazios entre as partículas maiores, melhorando o empacotamento e índices no estado fresco e endurecido quando comparado a uma argamassa sem finos. Para valores de retenção de água, propriedade relacionada à trabalhabilidade e ao desempenho do revestimento, das três argamassas analisadas (cimento/filito, cimento/fíler e cimento/saibro), os maiores valores obtidos foram para o filito e para o fíler pela presença dos finos. A permeabilidade também foi analisada, e a argamassa com adição de filito apresentou os valores mais elevados, assim como para absorção por imersão e por capilaridade, podendo comprometer a durabilidade dos revestimentos.

Manifestações patológicas de fissuração devido à retração por secagem foram observadas no trabalho de Ribeiro *et al.* (2016). Esse fenômeno pode ter sido em razão do maior teor de finos, aumentando a relação água/cimento, principal causa da retração. Outra patologia apresentada pelo revestimento foi a presença de bolores, devido à alta absorção e coeficiente de capilaridade da argamassa com filito, que impediram a perda de água para o ambiente, promovendo a saturação ideal para a proliferação desses fungos.

Com os dados fornecidos, foi necessário fazer uma avaliação adequada a respeito da incorporação do filito, e analisar de maneira coerente a viabilidade de seu uso, fazendo a caracterização dos materiais, dosagem e execução da argamassa de maneira correta.

Observou-se que a granulometria desse material, mesmo visivelmente, era composta de uma quantidade maior de grãos mais grosseiros quando comparada à da cal, o que poderia estar contribuindo para o aparecimento de fissuras. Todavia, seu peneiramento não se mostrou viável, visto que isso demandaria de mais tempo em obras reais, e o objetivo é diminuir o tempo de execução dos revestimentos, então, isso não foi executado no laboratório.

2.2.2. Resíduo de rocha ornamental

O Brasil, principalmente os estados do Espírito Santo e Minas Gerais, é um dos grandes produtores e exportadores de rochas ornamentais, seja em forma de blocos ou materiais processados. No ano de 2019 foram exportadas 2,16 milhões/ton e somente o estado do Espírito Santo foi responsável por 77% do volume físico e 81% do total do faturamento das exportações brasileiras (SINDIROCHAS, 2019).

Este setor muito lucrativo gera enormes quantidades de resíduos que necessitam ser descartados. Em se tratando de micro e pequenas empresas, geralmente esse processo é feito de forma inadequada, e esse material é depositado ao ar livre ou em lagoas sem o menor cuidado ou tratamento, causando grande impacto ambiental, como contaminação do solo e de mananciais (CAMPOS, 2009). Podem também ser colocados em grandes pátios reservados para seu armazenamento ou em aterros, mas essa última solução demanda tempo para que seja feito o licenciamento do terreno e construção dos aterros, e ainda, a vida útil do projeto é cerca de 10 anos, sendo, então, uma solução temporária. Uma destinação comum e definitiva para esses resíduos, quando não apresentam toxicidade ou agressividade, é o setor da construção civil.

A Figura 6 mostra uma pilha de resíduos, ainda úmidos, no momento da coleta em uma empresa localizada no estado do Espírito Santo, na cidade de Cachoeiro do Itapemirim.



Figura 6 - Pilha com resíduo de rocha ornamental com certo grau de umidade.

Fonte: Autora, 2020.

O processamento de rochas divide-se em duas etapas: a extração dos blocos e seu beneficiamento. Nesta última há geração de grandes quantidades de resíduos, podendo alcançar de 20 a 30% do volume do bloco. O pó de rocha é obtido por meio

da laminação de diferentes tipos de rocha, prevalecendo as de granito e mármore, formando diferentes faixas granulométricas, que podem contribuir satisfatoriamente para a melhoria das propriedades do revestimento (ANGELIN *et al.*, 2018).

Embora não haja na natureza nenhuma rocha idêntica à outra, é interessante conhecer as características físicas, químicas e mineralógicas de resíduos verificadas por outros pesquisadores, afim de comparar e avaliar a viabilidade da aplicação do resíduo empregado nesta dissertação.

Calmon *et al.* (1997) estudaram argamassas com dois traços (1:2:8 e 1:1:6) e substituíram a cal pelo resíduo entre 25% e 100% em massa. Observaram que a consistência ficou dentro dos limites da norma vigente na época, de 255 ± 10 mm, a retenção de água foi acima de 80% para todos os traços, a absorção por imersão e capilaridade e o índice de vazios diminuíram quando comparados as argamassas padrão. Enquanto isso, a massa específica e as resistências aumentaram naquelas com adição de resíduo, fenômeno explicado pelo efeito fíler que preenche os vazios, diminuindo a porosidade.

Coelho *et al.* (2007) estudaram a substituição de argila em argamassas pelo resíduo de rochas ornamentais, em 25%, 50%, 75% e 100%, e viram que a troca não interferiu na consistência, que ficou dentro da faixa especificada de 255 ± 5 mm, nem nos valores da massa volumétrica, absorção por imersão e índice de vazios. Os autores concluíram que a substituição mais adequada para argamassas de assentamento e revestimento foi de 75% de resíduo, pois nessa proporção foram encontrados os melhores resultados para resistência e absorção de água por capilaridade dentre os traços verificados.

Corinaldesi *et al.* (2010) avaliaram a possibilidade de utilizar o pó de mármore em argamassas e concretos auto adensáveis. Observou-se que esse resíduo tinha como principal mineral carbonato de cálcio, e possuía alta superfície específica, dando mais coesão e trabalhabilidade. Já a resistência sofreu um decréscimo devido ao aumento de zonas de transição, contudo esse fato não é preocupante na maioria dos casos, salvo em argamassas empregadas para reforço estrutural.

Vardhan *et al.* (2015) realizaram um estudo sobre a possibilidade da substituição de cimento por pó de mármore proveniente de uma indústria da Índia. Para testar a influência do pó de mármore, caracterizado como calcário dolomítico,

foram confeccionadas argamassas com traço de 1:3 (cimento:areia) com substituição de resíduo nas proporções de 0% (referência), 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, e avaliaram a trabalhabilidade. Eles perceberam que na medida em que o pó de mármore era incorporado, havia uma melhora na trabalhabilidade, contudo estatisticamente, não havia diferença entre a substituição de 10% e 50%, quando analisado este parâmetro. Para a resistência a compressão, houve uma queda significativa, sendo apenas o traço com 10% viável. Com uma verificação da microestrutura das argamassas, os autores perceberam que a incorporação do pó de mármore gerava uma maior quantidade de vazios, problema que poderia ser resolvido com adição de uma granulometria mais fina deste material.

Singh *et al.* (2017) realizaram um estudo das vantagens econômicas e ambientais da substituição de cimento por resíduo de mármore em concretos, e produziram três tipos de concreto, sendo um de referência sem adição do resíduo (normal), um com 15% de substituição de cimento por pó de mármore (C15) e outro com 25% de substituição de cimento por areia (S25). Os autores obtiveram resistência à compressão 20-25% superior ao traço de referência com os traços C15 e S25. As propriedades de porosidade, resistência à abrasão e carbonatação, resistência à sulfatos e penetração de água, foram superiores para os traços modificados, podendo ser justificado pelo efeito fíler provocado pelo resíduo de mármore. A substituição da areia e do cimento é vantajosa do ponto de vista ambiental, sabendo que a fabricação do cimento é um processo extremamente poluidor, e no caso da areia, um recurso natural seria preservado. Além disso, também informam que o resíduo de mármore pode ser usado para substituir a cal hidratada, uma vez que esta rocha é classificada como calcária e, por isso, o resíduo apresenta composição química similar à cal.

De acordo com as pesquisas realizadas, a incorporação do resíduo se mostrou viável em argamassas e concretos. Desta forma, este trabalho analisou a viabilidade de incorporação de porcentagens do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais em argamassas projetadas, avaliando seu comportamento e buscando corrigir o problema de fissura apresentado pelo revestimento

2.3. Classificação das argamassas

Existem algumas maneiras de classificar as argamassas, e uma forma abrangente e bastante utilizada é subdividi-las em colante e para assentamento de blocos e revestimento de paredes e tetos. As chamadas colantes aderem

revestimentos ao substrato, como pisos ou cerâmicas para paredes; são adquiridas prontas no mercado e existem três tipos de acordo com seu uso. Já as argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos, também chamadas de múltiplo uso, são empregadas nas juntas horizontais e verticais para o assentamento de blocos, e execução de camadas de revestimento como reboco e emboço de tetos e paredes (NBR 13281, ABNT, 2005).

Segundo a NBR 13281 (2005), as argamassas de múltiplo uso podem se classificar segundo a função que elas desempenham, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação das argamassas quanto ao tipo.

Tipos de Argamassa		Função
Assentamento	Em alvenaria de vedação	Indicada para ligação de blocos e tijolos no assentamento da alvenaria, com função de vedação.
	Em alvenaria estrutural	Indicada para ligação de blocos e tijolos no assentamento da alvenaria, com função estrutural.
	Complementação da alvenaria	Indicada para fechamento da alvenaria após a última fiada (encunhamento).
Revestimento de paredes e tetos	Interno	Indicada para o revestimento de ambientes internos da edificação, caracterizando-se como camada de regularização (camada única ou emboço).
	Externo	Indicada para o revestimento de fachadas e elementos da edificação em contato com o meio externo, caracterizando-se como camada de regularização (camada única ou emboço).
	Uso geral	Assentamento de alvenaria sem função estrutural e revestimento interno ou externo.
	Reboco	Cobrimento do emboço, proporcionando uma camada fina que receberá o acabamento.
	Decorativa em camada única	Argamassa de acabamento indicada para revestimentos com fins decorativos.

Fonte: Autora, adaptado da NBR 13281, ABNT 2005.

Para Carasek (2017), esse material pode ser classificado segundo diferentes critérios, apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação das argamassas sob diferentes critérios.

Critério	Classificação
Tipo de aglomerante	Argamassa de cal, cimento, cimento e cal, gesso ou cal e gesso.
Número de aglomerantes	Simple ou mista.
Consistência	Seca, plástica ou fluida.
Natureza do aglomerante	Aérea ou hidráulica.
Plasticidade da argamassa	Pobre ou magra, média ou cheia, rica ou gorda.
Densidade de massa	Leve, normal ou pesada.
Forma de preparo ou fornecimento	Preparada em obra, mistura semipronta, industrializada ou dosada em central.

Fonte: Carasek, 2017.

O enfoque desta dissertação é em argamassas de múltiplo uso utilizadas como revestimento de paredes, tetos e muros, os quais podem receber tratamento posterior de pintura ou acabamento em revestimento cerâmico, dividindo-se da seguinte forma, segundo Carasek (2017) e Palomar *et al.* (2015):

- Chapisco: prepara a base e torna sua superfície áspera de modo a aumentar a aderência da próxima camada com o substrato;
- Emboço: veda e regulariza a superfície, propiciando a execução de outra camada;
- Reboco: executada sobre o emboço, podendo receber pintura ou servir de acabamento;
- Camada única: é composto de apenas uma camada, aplicada sobre a base, e por cima desta é feita uma camada decorativa;
- Revestimento decorativo monocamada (RDM): como o anterior, é composto de camada única, com função de regularização e cobertura da base, sendo um produto industrializado com diversas composições.

De uma maneira ilustrativa, a Figura 4 demonstra as diferentes composições compreendidas pelas argamassas de revestimento. Nela, o acabamento é representado apenas como pintura, contudo também podem ser cerâmicos, têxteis, laminados, pedras naturais e papeis de parede.

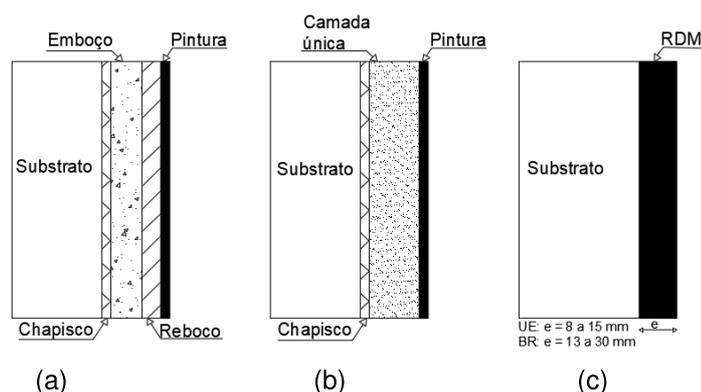


Figura 7 - Sistemas de aplicação da argamassa de revestimento. (a) sistema mais antigo de 3 camadas + pintura; (b) uso apenas da camada única e pintura; (c) RDM.

Fonte: Autora, 2020.

2.4. Propriedades das argamassas

Para um desempenho satisfatório dos revestimentos, eles devem apresentar um conjunto de propriedades no estado fresco e endurecido, independentemente de sua maneira de aplicação.

Entre todas as propriedades da argamassa de múltiplo uso, uma das que mais devem ser levadas em consideração é a trabalhabilidade, propriedade geralmente associada à componente cal hidratada, sendo uma característica de extrema importância nas argamassas projetadas (SILVA *et al.*, 2011; BEZERRA *et al.*, 2011; ANTONIO, 2015; PALOMAR *et al.*, 2015).

2.4.1. Propriedades no estado fresco

2.4.1.1. Trabalhabilidade

É uma propriedade indispensável para a projeção mecanizada da argamassa, isso porque em sua ausência pode ocorrer a obstrução do mangote das bombas de projeção, ou até da própria bomba.

Essa característica está diretamente relacionada com a consistência. De maneira prática, pode-se dizer que a trabalhabilidade é a facilidade de mistura, transporte, aplicação e acabamento do traço em condições homogêneas, sem haver segregação e exsudação, desde sua mistura até sua aplicação. É a capacidade da massa de fluir ou espalhar-se pela superfície do substrato, suas saliências e protuberâncias, definindo o grau de contato entre eles (CARASEK, 1996).

A Figura 8 relaciona diversos fatores que afetam a trabalhabilidade.



Figura 8 - Fatores interferentes na trabalhabilidade.

Fonte: Autora, 2020.

Essa propriedade é considerada complexa, uma vez que sofre influência de outras propriedades, como consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, exsudação, densidade de massa e adesão inicial, mostradas na Quadro 3 (CARASEK, 2017).

Quadro 3 - Propriedades relacionadas a trabalhabilidade.

Propriedade	Definição
Consistência	Maior ou menor facilidade de deformação das argamassas sob ação de cargas.
Plasticidade	Propriedade relacionada com o comportamento da argamassa se deformar sem se romper.
Retenção de água e consistência	Capacidade da argamassa fresca se manter trabalhável quando sujeita a ações que provocam perda de água.
Adesão inicial	União ao substrato ainda no estado fresco.
Coesão	Referente às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas presentes nas argamassas e as ligações químicas da pasta aglomerante.
Densidade de massa	Relação entre a massa e volume do material.
Exsudação	Tendência de separação da água (pasta) da argamassa, onde a água se manterá na parte superior da argamassa e os agregados na parte inferior.

Fonte: Autora 2020, adaptado de Carasek, 2017.

2.4.1.2. Massa específica e teor de ar incorporado

Segundo Sabbatini *et al.* (1998), a massa específica pode ser entendida como a relação entre a massa da argamassa e seu volume, podendo ser dividida em:

- Massa específica absoluta: os vazios existentes no volume não são considerados;
- Massa específica relativa: os vazios presentes são levados em consideração, também chamada de massa unitária.

O teor de ar incorporado corresponde a quantidade de vazios formados pela entrada de ar no interior da argamassa, de maneira intencional ou não, durante o

processo de mistura. Quanto maior for o teor de ar incorporado, menor a massa específica relativa e maior a trabalhabilidade da argamassa. Contudo em excesso, essa propriedade pode reduzir a resistência mecânica e de aderência dos revestimentos, além de aumentar a porosidade (WOJCIECH e HUBERT, 2015).

2.4.1.3. Retenção de água

Para Mattana *et al.* (2012), essa propriedade está relacionada com a capacidade da argamassa de reter água no estado fresco, mantendo sua trabalhabilidade ou consistência quando submetida a solicitações que motivam perda de água por evaporação, sucção do substrato ou pela hidratação do cimento e carbonatação da cal.

Para Carneiro (1999), a retenção de água influencia na retração por secagem, uma das causas de fissuração das argamassas no estado endurecido, devido à velocidade de evaporação da água de amassamento, prejudicando a estanqueidade e a durabilidade do revestimento.

A retenção também é importante nas etapas após o lançamento do material no substrato, quando ele envolverá as reentrâncias e fissuras presentes na base, e nos serviços de desempenho e sarrafeamento, interferindo no tempo de aplicação da argamassa e no tempo disponível para a execução das atividades de acabamento (SANTOS, 2003).

2.4.1.4. Aderência inicial

É a capacidade de permanecer unida à base do substrato após o seu lançamento. De acordo com Rosello (1976 *apud* Carasek, 1996), ela está relacionada à superfície de contato efetiva entre a argamassa e o substrato, e em função da energia de ligação interfacial dependente das características reológicas da pasta. Gonçalves (2004) ressalta que essa propriedade ainda é influenciada pelas características superficiais do substrato, como por exemplo, a rugosidade.

Para argamassas projetadas, a adesão inicial é fundamental, sabendo que sua ausência pode aumentar o deslocamento em decorrência da plasticidade da massa lançada, e a reflexão, ocasionada na argamassa no estado fresco devido ao seu impacto do lançamento contra a superfície (SILVA, 1997).

2.4.1.5. Reologia

Glatthor e Schweizer (1994) definem a reologia como o estudo do fluxo e deformação da matéria, analisando a relação entre a tensão cisalhante aplicada e a deformação, em determinado período de tempo.

A reologia por *squeeze-flow* é baseada na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, observadas na Figura 9. Por meio desse ensaio, é possível medir a coesão da massa e avaliar a trabalhabilidade por meio da viscosidade e tensão de cisalhamento.



Figura 9 - Esquematização do ensaio de *squeeze-flow*.

Fonte: Engamann *et al.*, 2005.

2.4.2. Propriedades no estado endurecido

2.4.2.1. Aderência

A aderência permite a interface argamassa-substrato resistir as tensões normais (tração) e tangenciais (cisalhamento), sem que haja ruptura, mantendo-se estável na ausência de fissuras e fixo ao substrato. É considerada essencialmente mecânica, uma vez que acontece pela ancoragem da massa nas proeminências macroscópicas da superfície e nos poros do substrato, ocorrendo a penetração por tensão capilar, sendo complementado pelas forças físicas e químicas, como as forças intermoleculares de Van der Waals (GONÇALVES, 2004, ZANELATO, 2015).

O Quadro 4 apresenta os limites mínimos de resistência de aderência à tração (Ra) que os revestimentos à base de argamassa para emboço e camada única devem possuir, de acordo com a NBR 13749 (ABNT, 2013).

Quadro 4 - Limites de resistência de aderência à tração.

Local	Acabamento	Ra (MPa)	
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	≥ 0,20
		Cerâmica ou laminado	≥ 0,30
	Externa	Pintura ou base para reboco	≥ 0,30
		Cerâmica	≥ 0,30
Teto		≥ 0,20	

Fonte: NBR 13749, ABNT 2013.

2.4.2.2. Capacidade de absorver deformações

Representa a competência do revestimento no estado endurecido em absorver pequenas deformações sem se romper quando sob tensões, e retornar a sua dimensão inicial quando as tensões cessam (SABBATINI *et al.*, 1998).

2.4.2.3. Resistência mecânica

Ao longo de sua vida útil, os revestimentos estão sujeitos a todo tipo de solicitação, estando sua resistência mecânica relacionada a sua capacidade de resistir a abrasão superficial, tração, impacto e cisalhamento. Entretanto, a resistência à compressão é mais utilizada por ser de mais fácil determinação e estar estatisticamente ligada as outras propriedades do revestimento.

A resistência mecânica é influenciada pela proporção de agregados, aglomerantes e água na mistura, definida como a propriedade que os revestimentos apresentam de possuir um estado interno de consolidação, capazes de sustentar tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento (SELMO, 1989).

No Quadro 5 são apresentados os fatores que influenciam na resistência mecânica dos revestimentos de argamassa, assim como no seu período aplicação.

Quadro 5 - Fatores influentes na resistência mecânica.

Fatores	Consequências
Consumo de cimento	Quanto maior o consumo de cimento maior a resistência à compressão, tração, cisalhamento e abrasão (MARTINELLI e HELENE, 1991). Entretanto, associado ao menor consumo de agregados e água, afeta a durabilidade devido ao aparecimento de fissuras.
Relação água/cimento	É o principal fator da resistência das argamassas. As ricas em aglomerantes precisam de um alto teor de água para aumentar sua plasticidade, e atingir maiores valores de aderência. Nas argamassas pobres, pouca quantidade de água aumenta resistência sem prejudicar a trabalhabilidade, otimizando a aderência (ZANELATO, 2015).
Consumo de cal	Adições de pequenos volumes de cal conferem melhorias na resistência mecânica, resistência a deformações, além de aumentar a aderência (CINCOTTO <i>et al.</i> , 1995).

Fonte: Autora, 2020.

2.4.2.4. Retração plástica e por secagem

É uma propriedade de grande relevância nas argamassas projetadas em razão da sua consistência mais fluida. A retração é um fenômeno físico associado a uma deformação na estrutura da pasta hidratada, tendo como consequência inevitável a fissuração. Em materiais cimentícios ela pode ser classificada em retração plástica, por secagem, química, autógena e térmica.

A retração plástica se dá pela rápida evaporação inicial da água de amassamento antes do fim da pega e resulta em uma fissuração superficial. Já a retração por secagem é causada pela redução dimensional, que se dá até os 7 dias de idade, por meio da perda de água para o ambiente e reações de hidratação (FIORITO, 2009). Quando a água é adicionada em excesso, esta acaba evaporando e ocasionando tensões internas, levando a uma maior probabilidade do surgimento de fissuras e trincas, deixando o revestimento sujeito ao aparecimento de toda ordem de patologias, podendo causar até mesmo o descolamento do revestimento (RECENA, 2017).

Segundo Sabbatini *et al.* (1998), fatores como características e dosagem dos materiais, espessura e intervalo entre aplicação das camadas, tempo de cura, tempo de sarrafeamento e desempenho, influenciam na retração por secagem.

2.4.2.5. Permeabilidade

Uma das funções do revestimento é colaborar com a estanqueidade à água, tendo em vista que a penetração de umidade é uma das maiores causas de deterioração de fachadas e paredes internas de edifícios.

A permeabilidade de um material é definida como o fluxo de matéria por unidade de tempo, sendo dependente das características próprias do material, mas também de condições externas, como a viscosidade do fluido. A permeabilidade de materiais porosos, como a argamassa, resulta da fração volumétrica dos poros, sua conectividade e diâmetro médio (VASCONCELOS, 1997).

A permeabilidade também pode ser influenciada pela força de aplicação da argamassa e a espessura do revestimento. Duailibe *et al.* (2005) comprovaram que na projeção mecânica, onde a força de aplicação do revestimento é superior ao sistema manual de aplicação, houve uma melhora de 85% na permeabilidade.

2.4.2.6. Durabilidade

Pode ser entendida como a vida útil de um material, ou ainda, sua capacidade em manter suas propriedades e funções no ambiente para o qual foi designado ao longo do tempo.

2.5. Funções das argamassas de revestimento

Para Sabbatini (1984), de maneira geral, os revestimentos em argamassa apresentam função de proteger as vedações e estruturas da ação de agentes agressivos, evitando degradação precoce, aumentando a durabilidade e reduzindo o custo de manutenção das edificações. Auxiliam ainda no isolamento térmico e acústicos, na estanqueidade à água e aos gases, protegendo também contra o fogo. Como função estética, relaciona-se com o acabamento e à valorização da construção.

O cumprimento desses requisitos é o resultado da combinação de fatores relacionados às propriedades dos materiais, componentes e sistemas, ação dos agentes de intemperismos e dos procedimentos adotados ao longo das fases de produção (CINCOTTO *et al.*, 1995).

2.6. Argamassa projetada

O setor da construção civil está sempre em busca de inovações tecnológicas no que tange os processos construtivos com o objetivo de racionalizá-los e otimizá-los, entre eles a projeção mecanizada.

Enquanto na Europa esse método é bastante difundido, no Brasil, apesar de haver potencial e, em alguns casos, necessidade de utilização, esse sistema ainda é pouco empregado (SABBATINI *et al.*, 2013). O método manual de lançamento é o mais usado, (Figura 10a), e algumas empresas que buscam racionalização do processo produtivo sem muita modificação, usam a projeção mecânica por *spray*, (Figura 10b), sendo este mais difundido quando comparado à projeção contínua, Figura 10c.



Figura 10 - Aplicação de revestimento de argamassa: (a) método de lançamento manual; (b) aplicação por spray; (c) aplicação por projeção mecânica contínua.

Fonte: Sabbatini *et al.*, 2013.

O método de projeção permite a execução do chapisco, emboço e camada única, agilizando a produção dos revestimentos, diminuindo a interferência humana,

e reduzindo desperdícios, além de conferir maior uniformidade nas características do produto final (SANTOS e RAMOS, 2005).

Todavia, é importante salientar que modificando apenas o processo de aplicação do revestimento, a otimização e redução dos custos não será totalmente satisfatória. É necessário que outros subsistemas do edifício sejam revistos, que o canteiro de obras esteja preparado adequadamente para receber essa inovação e que haja um treinamento específico da mão de obra.

Os principais equipamentos usados, de acordo com Santos e Ramos (2005), são projetores com recipiente acoplado e as bombas de argamassa com misturador acoplado. Como os dois métodos utilizam ar comprimido no processo de projeção, é importante que a pressão esteja regulada. Pressões baixas podem reduzir a energia de lançamento, prejudicando a aderência da massa ao substrato, e pressões elevadas podem separar a pasta do agregado, causar maior reflexão e problemas de aderência. Existem dois processos de projeção: por via úmida e via seca.

O sistema de projeção é altamente dependente do bom funcionamento do equipamento assim como do suprimento contínuo de argamassa, seja ela industrializada ou por silos. Recomenda-se que a espessura do revestimento não seja superior a 2 cm, e em caso de necessidade, estas devem ser executadas em mais de uma camada (SANTOS e RAMOS, 2005).

2.6.1. Equipamentos empregados na projeção mecanizada

2.6.1.1. Recipiente acoplado

O projetor com recipiente acoplado é o mais simples entre os equipamentos, podendo ser conhecido como “canequinha” e *spray* de ar comprimido. Nesse sistema o equipamento é abastecido diretamente no estoque de argamassa fresca, não havendo bombeamento do material.

Existem dois sistemas de projeção com recipiente acoplado: a pistola e a caneca de projeção. Os dois métodos projetam a argamassa por meio de ar comprimido, entretanto o primeiro é constituído por um recipiente em forma de funil (Figura 11a) e a caneca possui um recipiente com orifícios acoplados em si (Figura 11b).

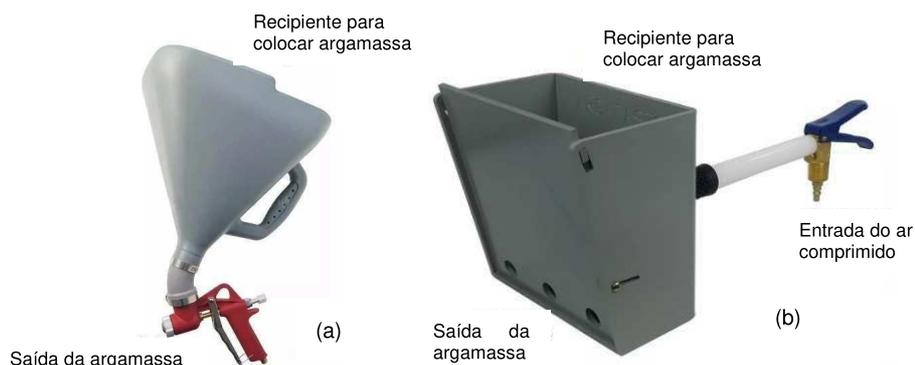


Figura 11 - Projeter com recipiente acoplado: (a) pistola, (b) caneca.

Fonte: <https://produto.mercadolivre.com.br/>

De acordo com Fernandes e John (2007), uma das desvantagens desse sistema é o peso do equipamento quando este está carregado de argamassa, exigindo esforço físico do operador. Além disso, o pequeno volume do recipiente limita a projeção devido as paradas frequentes para o reabastecimento do equipamento.

Esse método não acarreta grandes mudanças no sistema produtivo quando comparado ao convencional, visto que não bombeiam a argamassa. Desta forma apenas a aplicação é feita de forma mecanizada, suas etapas de produção e transporte podem permanecer as mesmas de antes da implementação do sistema.

2.6.1.2. Bombas de argamassa

Esse foi o método empregado para a projeção das argamassas avaliadas nesse trabalho e, de acordo com Crescencio *et al.* (2000), os equipamentos são mais sofisticados e exigem mudanças mais significativas no sistema produtivo. Na maioria dos casos, os misturadores de argamassa estão integrados ou dispostos de maneira que a mesma saia do misturador e vá diretamente para o recipiente da bomba, com o objetivo de atender à grande capacidade do equipamento (Figura 12).



Figura 12 – Bombas de argamassa: (a) bomba com misturador integrado, (b) visualização do mangote de projeção.

Fonte: Autora, 2020.

Dois tipos de bombas podem ser usados na projeção contínua de argamassa: com eixo helicoidal, indicada para pequenas produções devido a sua vazão máxima ser de 5 m³/h (Figura 13), e bomba de pistão, que possui maior capacidade, chegando a projetar até 20 m³/h (Figura 14) (GOODIER, 2002).



Figura 13 - Bomba de argamassa com eixo helicoidal.

Fonte: Santos e Ramos, 2005.

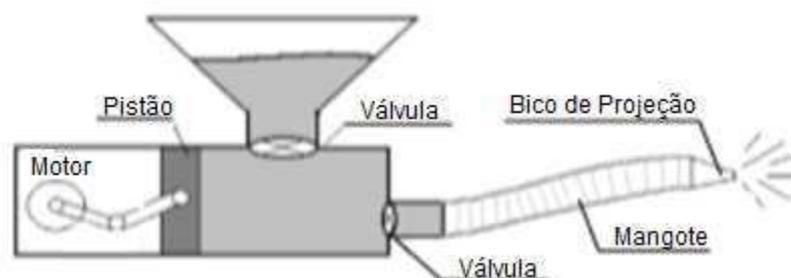


Figura 14 - Bomba de argamassa com pistão.

Fonte: Santos e Ramos, 2005.

O custo do aluguel ou compra desses equipamentos é significativamente maior que dos recipientes acoplados, por isso as bombas devem ficar ociosas o menor tempo possível para que o sistema seja rentável e justifique seu uso. Para que a implementação do método seja efetuada de maneira adequada, deve existir um projeto bem elaborado, logística do canteiro de obras e mão de obra qualificada.

No mercado existem algumas opções de acessórios para bombas e a escolha destes irão depender de alguns fatores. Pistolas angulares e longas são indicadas para uso em tetos, enquanto as curtas e retas, em paredes. Para o bico, é recomendado que este seja 3 vezes maior que o diâmetro máximo do agregado usado. O comprimento do mangote está relacionado com a probabilidade de entupimento, quanto mais comprido, maior a possibilidade de ocorrência.

A sequência da execução dos revestimentos em argamassa projetada não muda muito desde a preparação do substrato até o acabamento. A base pode passar por uma etapa de tratamento, limpeza e uniformização da superfície, podendo ou não utilizar o chapisco. Devem ser colocadas guias para controle de espessura, prumo, nível e planicidade, sendo bastante comum o uso de taliscas, conforme Figura 15.



Figura 15 - Uso de taliscas como guia de controle na parte superior e inferior.

Fonte: Autora, 2020.

2.6.2. Processos de projeção

Os processos de projeção podem ser por via seca ou úmida. Na escolha do mais adequado é considerado o espaço disponível para o lançamento em obra, as características especificadas do material e o volume a ser projetado. O processo por via seca utiliza equipamentos mais compactos e é de fácil acesso em obras. O método úmido é mais moderno e empregado em obras com grandes volumes a serem projetados (BERTINI, 2002).

2.6.2.1. Processo via seca

Neste processo, apenas os agregados podem se apresentar úmidos. A Figura 16 apresenta um esquema desse processo.

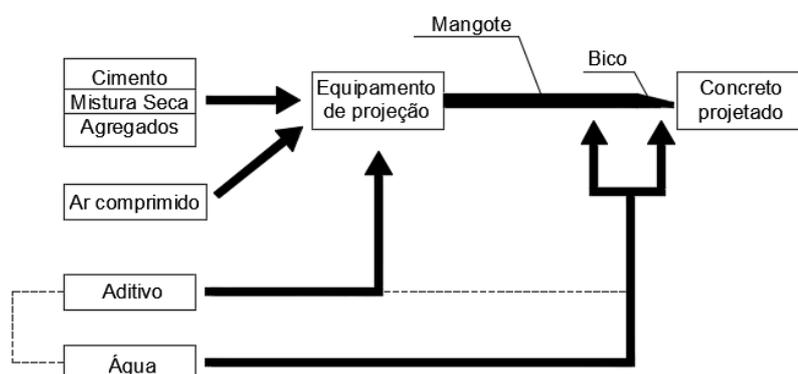


Figura 16 - Diagrama do processo de projeção por via seca.

Fonte: Autora, 2020.

A mistura de agregado e cimento é conduzida por ar comprimido através do mangote até o bico projetor. No mangote ou já no bico de projeção, a mistura recebe água de outra mangueira, onde a argamassa é projetada com alto poder de

compactação. A saída de água é controlada pelo mangoteiro, que deve ter treinamento específico, uma vez que o desempenho do produto final depende dele.

2.6.2.2. Processo via úmida

Ao contrário do processo por via seca, todos os constituintes incluindo a água são misturados antes de serem introduzidos no equipamento. Essa mistura inicial garante maior uniformidade da argamassa em comparação com o processo por via seca, uma vez que a quantidade de água não é controlada pelo mangoteiro.

A mistura é introduzida na câmara do equipamento de projeção e transportada pneumaticamente ou por bomba de pistão. O ar comprimido é injetado, ou, no caso do transporte pneumático, ar de outro compressor junto do bico, lançando o material em alta velocidade, garantindo sua compactação e aderência ao substrato (Figura 17).

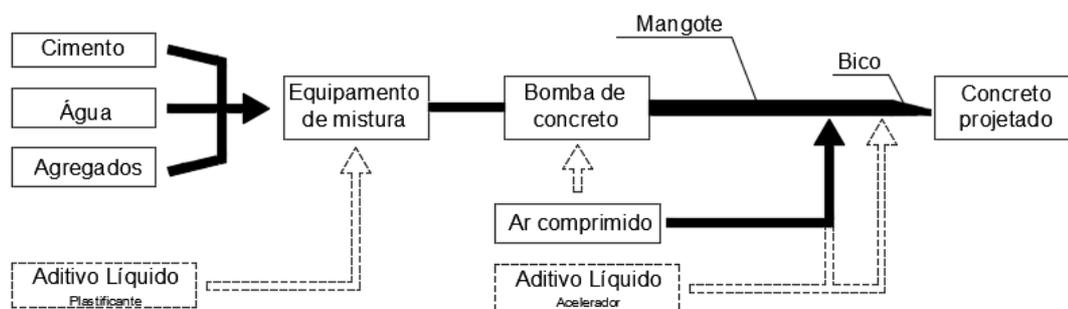


Figura 17 - Diagrama do processo de projeção por via úmida.

Fonte: Autora, 2020.

2.6.3. Características das argamassas projetadas

Na aplicação do revestimento por projeção mecanizada, existem alguns detalhes especiais inerentes ao método que devem ser observados.

As argamassas necessitam de características que não provoquem problemas no bombeamento como entupimento do mangote; nem na projeção, como reflexão elevada e deslocamento. Esse material deve ter uma consistência mais fluida quando comparado aos aplicados de forma convencional, de maneira a permitir a projeção sem perder a plasticidade e sem causar obstrução do equipamento.

Santos e Bauer (2003) relacionaram a consistência da argamassa com sua bombeabilidade, avaliando quais características as permitiam ser bombeáveis, partindo do princípio que essa propriedade é governada pela viscosidade plástica da argamassa. Sabendo que a viscosidade é proporcional a consistência, essa propriedade será usada para analisar a possibilidade de a argamassa ser bombeada.

2.6.4. Fatores influentes na projeção mecanizada

De acordo com Santos e Ramos (2005), os parâmetros mais importantes a serem levados em consideração nas argamassas aplicadas mecanicamente são: teor de água, tempo de mistura e as características dos agregados.

2.6.4.1. Teor de água

Esse parâmetro é de extrema importância, pois afeta a consistência e a plasticidade das argamassas, que por sua vez interferem na trabalhabilidade, adesão inicial ao substrato, e possível obstrução do mangote. Em excesso, pode levar ao escorregamento do material, maior probabilidade de reflexão e deslocamento.

Caso a quantidade de água seja inferior à necessária, pode haver o entupimento do mangote pela falta de fluidez, provavelmente em consequência de uma excessiva concentração de agregados, e também pela carência de camadas de lubrificação proporcionadas pela pasta de cimento entre a argamassa e as paredes do mangote. Essa lubrificação é importante pois faz com que o material deslize com mais facilidade, diminuindo a viscosidade da argamassa. A alta concentração de agregados, por sua vez, aumenta a tensão de fricção, que além da mangueira de projeção, pode prejudicar também o rotor da bomba.

Entretanto, caso a obstrução seja decorrente do excesso de água, haverá pasta em demasia devido à segregação. Em dutos forçados, a fase mais fluida tende a se separar da fase sólida quando a pressão de bombeamento é maior que a pressão de segregação, levando a exsudação do material. Assim, quando o material for projetado, haverá uma filtração das partículas mais finas junto com a água, em detrimento das partículas mais grossas, que ficam retidas na tubulação, provocando o entupimento.

O método mais utilizado para determinar o teor de água é pelo ensaio na Mesa de Consistência (NBR 13276, ABNT, 2016), embora seja criticado no meio científico em virtude da grande dispersão dos resultados para argamassas caracterizadas sob as mesmas condições de trabalhabilidade (SOUSA e LARA, 2005).

2.6.4.2. Tempo de mistura

Esse parâmetro influenciará no teor de ar incorporado na argamassa. Assim, quanto maior o tempo de mistura, maior será o teor de ar, parâmetro que proporciona mais fluidez e plasticidade, características essenciais para a projetibilidade, sem que seja adicionada grandes quantidades de água, principais responsáveis pela retração

da argamassa. Além do tempo de mistura, a intensidade e velocidade do misturador, o uso de aditivos também influencia nesse teor.

De acordo com a NBR 11768 (ABNT, 2011), os aditivos incorporadores de ar permitem que durante o amassamento uma quantidade controlada de pequenas bolhas de ar seja agregada a mistura, uniformemente distribuídas, e que permaneçam na argamassa após seu endurecimento.

Contudo, caso o tempo de mistura seja significativamente elevado, pode ocasionar excesso de ar incorporado, modificando a trabalhabilidade do material no sentido de deixá-lo muito plástico e diminuir a sua aderência ao substrato.

Segundo Alves e Do Ó (2005), as propriedades modificadas positivamente por pelo aumento do teor de ar são retração, exsudação e massa específica, que tendem a diminuir e o módulo de deformação, normalmente reduzido, possibilitando o aumento da capacidade de deformação.

Alves (2002) observou em seus estudos uma redução de 55% na resistência de aderência à tração, atribuindo esse resultado a possível redução do contato entre a argamassa e o substrato. Observou ainda que um aumento exacerbado das bolhas leva ao aumento da porosidade da argamassa, diminuindo a parte resistente, e junto dela, as resistências mecânicas.

2.6.4.3. Característica dos agregados

A granulometria dos agregados influencia diretamente na consistência da argamassa, logo a trabalhabilidade e a bombeabilidade também sofrem interferência desse parâmetro. No estado fresco influencia na trabalhabilidade, no consumo de água e aglomerantes, enquanto no estado endurecido, sua influência se estende na resistência de aderência, permeabilidade, fissuração e na rugosidade da argamassa.

A granulometria pode ser dividida em três, contínua, descontínua e uniforme, como ilustradas na Figura 18. Ela é contínua quando possui partículas de todos os diâmetros, dita bem graduada quando as frações menores preenchem os espaços deixados pelas maiores, proporcionando o menor volume de vazios possível, e aberta quando não há finos suficientes para preencher todos os vazios. Já a descontínua se caracteriza quando há ausência de alguma fração intermediária, representada no gráfico por um patamar horizontal, e por último a uniforme ocorre quando a maioria

das partículas pertencem a mesma fração, com gráfico representado por um “S” alongado.

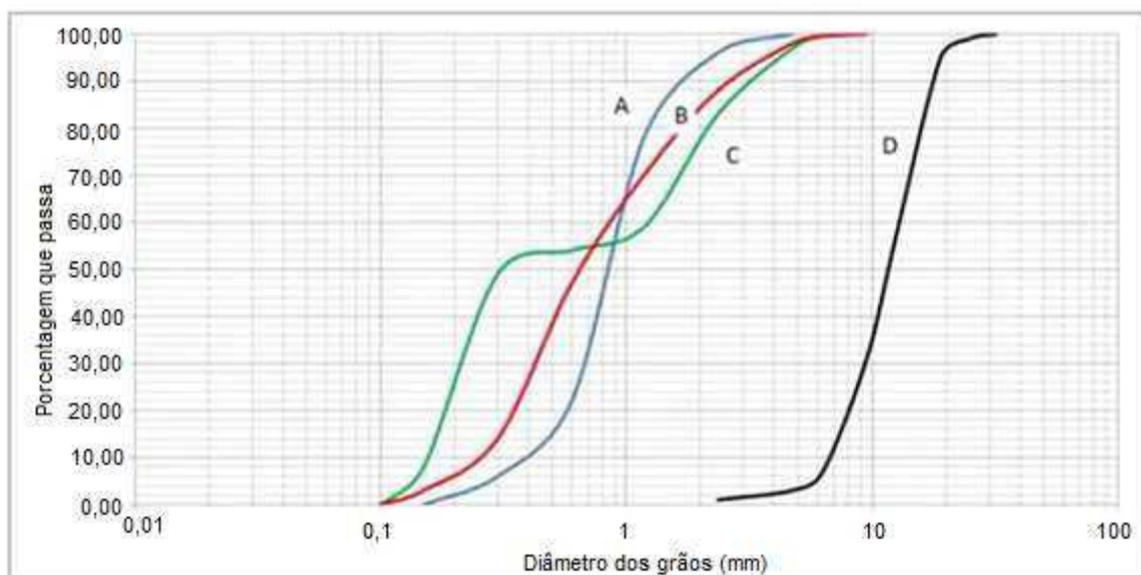


Figura 18 - Distribuição granulométrica: A – areia uniforme, B – areia contínua, C – areia descontínua, D – brita uniforme.

Fonte: COPEVE, 2015.

Os agregados podem se dividir em graúdos e miúdos, estes empregados nas argamassas, sendo classificados como partículas passantes na abertura de 4,75 mm e retidas na peneira com abertura de malha 150 μm (NBR 7211, ABNT, 2009).

De acordo com Santos e Ramos (2005) quanto maior a massa unitária e menor o volume de vazios, consequência do maior empacotamento presente em agregados bem graduados ou de granulometria contínua, menor a quantidade de água necessária para se atingir determinada consistência (Figura 19).

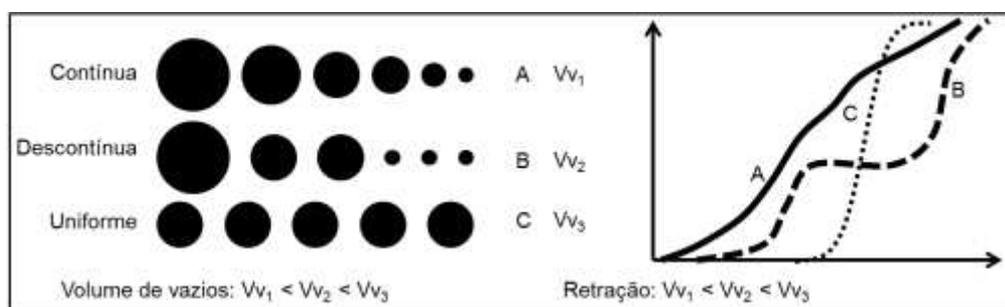


Figura 19 - Distribuição volumétrica e sua influência na retração.

Fonte: Isaia, 2010.

Segundo Carasek (2007), a granulometria da areia determina o volume de vazios que deverá ser preenchido pela pasta, logo, para granulometrias uniformes, que possuem mais vazios, a quantidade de pasta usada vai ser maior, potencializando

o efeito da retração. Desta forma, o emprego de uma granulometria contínua também irá diminuir a ocorrência desse fenômeno, bem como do consumo de cimento.

A textura e forma dos grãos são fatores que interferem na trabalhabilidade. As partículas mais arredondadas e lisas melhoram essa propriedade, embora diminuam a aderência e retenção de água. Já as partículas ásperas, angulosas e alongadas necessitam de mais quantidade de pasta para produzir uma mistura mais trabalhável.

Isaia (2010) observou que argamassas com alto teor de finos possuem boa trabalhabilidade, entretanto, além de consumir mais água de amassamento, aumentando a probabilidade de retração por secagem e permeabilidade, diminuem a aderência ao substrato, uma vez que essa fração tampona os poros da base, prejudicando o travamento da argamassa.

CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo serão descritos os detalhes do programa experimental desenvolvido para atender aos objetivos apresentados. O trabalho foi dividido em fases, sendo elas a caracterização dos materiais, moldagem dos corpos de prova e execução dos ensaios, realizados no Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).

Devido à escassez de normas brasileiras voltadas especialmente para argamassas projetadas, essas foram confeccionadas de acordo com as normas vigentes para argamassas de aplicação convencional, sendo o mesmo feito com os ensaios.

3.2. Materiais utilizados

Os materiais usados foram: cimento Portland CPIII 40-RS, que pode conter adição de escória entre 35% e 70%, cal hidratada CH III, areia natural do rio Paraíba do Sul, extraída em Campos dos Goytacazes/RJ, com $D_{\text{máx}}$ de 2,4 mm (Figura 20a), filito (Figura 20b), água fornecida pela rede pública de abastecimento da cidade e resíduo de rocha proveniente da cidade de Cachoeiro do Itapemirim/ES (Figura 20c).



Figura 20 – Materiais empregados: (a) Frações de areia usada na argamassa, (b) filito, (c) resíduo de rocha passado na peneira #50.

Fonte: Autora, 2020.

Além desses materiais, com o intuito de diminuir a quantidade de água e, conseqüentemente, a probabilidade de fissuração, foram empregados dois tipos de aditivos. O primeiro aditivo, chamado aqui de aditivo X, é um aditivo industrial composto de policarboxilatos, enquanto que o aditivo Y foi produzido na universidade, composto de um produto tensoativo aniônico. Ambos os aditivos foram adicionados juntamente com a água na mistura.

O sistema empregado para aplicar a argamassa no substrato foi a projeção contínua por meio de bomba de argamassa e por via úmida (Figura 21). É importante lembrar que as características da argamassa de projeção dependem do tipo de equipamento utilizado para esse fim.



Figura 21 - Equipamento de projeção empregado na obra de referência.

Fonte: Autora, 2020.

3.3. Metodologia

3.3.1. Caracterização dos materiais

3.3.1.1. Granulometria

A distribuição do tamanho das partículas do filito, do resíduo e também da areia foram realizadas de acordo com os procedimentos da NM 248 (ABNT, 2003) para peneiramento e sedimentação. Essa análise foi importante uma vez que determinou as dimensões das partículas do agregado e de suas respectivas porcentagens de

ocorrência. Seu principal objetivo foi conhecer a distribuição granulométrica dos materiais usados e representá-la através de uma curva, possibilitando, assim, a determinação geral de suas características físicas.

3.3.1.2. Fluorescência de Raios-X de Energia Dispersiva (EDX)

Este ensaio foi utilizado para determinar a caracterização química dos materiais estudados por meio da sua composição química e porcentagem de óxidos presentes nos aglomerantes. O ensaio foi realizado no LECIV - UENF em um equipamento Shimadzu EDX-700, sendo ensaiados o filito, o resíduo de rocha, a cal e a areia.

3.3.1.3. Difração de Raios-X (DRX)

É uma técnica empregada para determinar a estrutura atômica e molecular de um cristal, através da obtenção de picos cristalinos nas amostras. Assim, sabendo o padrão que cada argilomineral e mineral apresenta, é possível fazer a análise mineralógica qualitativa das amostras. O ensaio foi realizado no LECIV – UENF em um equipamento Rigaki MiniFlex 600 e as amostras ensaiadas foram filito, resíduos de rochas, cal hidratada e da areia. Os parâmetros usados foram: 2θ entre 10° e 70° com precisão de $0,05^\circ$, passo de $10^\circ/\text{min}$, com equipamento operando em 15 kV e 40 mA, utilizando a plataforma de dados Match para determinar os picos.

3.3.1.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com o microscópio eletrônico de varredura existente no Laboratório de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (LAMAV) da UENF, foi possível realizar a análise morfológica das partículas da cal, filito e resíduo de rocha. Com um equipamento da marca Shimadzu SSX-50 Superscan, determinou-se a forma e textura dos grãos, uma vez que essas características influenciam na reologia de misturas cimentícias.

3.3.2. Dosagem

Sabendo que o trabalho busca desenvolver traços para a argamassa projetada com incorporação de resíduo de rocha e filito, sem que haja o aparecimento de fissuras (Figura 22), a determinação da proporção entre os materiais foi feita a partir da argamassa de referência.



Figura 22 - Caneta com 13,5 cm de comprimento ao lado das fissuras no estado endurecido.

Fonte: Autora, 2020.

Dessa forma, o traço de início foi de 1:1:4 (cimento:filito:areia), e a partir desse, modificações foram feitas, com os traços desenvolvidos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Proporções utilizadas em massa.

Amostra	Descrição	CP	Filito	Cal	Resíduo	Areia	Relação água/ materiais secos	Aditivo x (%)	Aditivo y (%)
F01	Argamassa de referência	1	1	-	-	4	0,257	-	-
F02	Composta de filito	1	1	-	-	4	0,240	-	-
F03	Composta de filito	1	1	-	-	4	0,206	1,5	-
F04	Composta de filito	1	1	-	-	6	0,200	1,5	-
F05	Composta de filito	1	2	-	-	8	0,235	1,5	-
RC25	Areia substituída parcialmente pelo resíduo	1	-	1	0,80	3,92	0,254	-	-
RC30	Areia substituída parcialmente pelo resíduo	1	-	1	1,20	2,80	0,274	-	-
RC40	Areia substituída parcialmente pelo resíduo	1	-	1	1,60	2,40	0,300	-	-
RC45	Areia substituída parcialmente pelo resíduo	1	-	1	1,80	2,20	0,324	-	-
RF25	Filito e areia substituída parcialmente pelo resíduo	1	1	-	0,80	3,92	0,287	-	-
RF30	Filito e areia substituída parcialmente pelo resíduo	1	1	-	1,20	2,80	0,297	-	-
RF40	Filito e areia substituída parcialmente pelo resíduo	1	1	-	1,60	2,40	0,338	-	-
RF45	Filito e areia substituída parcialmente pelo resíduo	1	1	-	1,80	2,20	0,369	-	-
R01	Composta de resíduo	1	-	-	1	4,5	0,192	-	1,3
R02	Composta de resíduo	1	-	-	1	4,5	0,197	-	1,2
R03	Composta de resíduo	1	-	-	1	4,5	0,199	-	1,0
Cal		1		1	-	4	0,160	-	-

Fonte: Autora, 2020.

Inicialmente, as argamassas com filito foram testadas com diferentes teores de água, até chegar na argamassa F02. Depois foi incorporado aditivo, F03, e por fim, houve uma mudança no traço para utilizar dois que são comumente empregados, resultando nas argamassas F04 e F05.

Além das argamassas com substituição da cal pelo filito, foram produzidas outras com substituição parcial de 25, 30, 40 e 45%, em massa, da areia por resíduo de rocha. Essas porcentagens foram adotadas por terem sido testadas previamente no laboratório do LECIV – UENF, e os resultados obtidos, para argamassas de aplicação convencional, terem sido satisfatórios. Levou-se também em consideração os estudos de Colangelo *et al.* (2004), que avaliaram argamassas com substituição parcial da areia por resíduo de mármore, em teores de 10%, 20% e 30%.

As argamassas com substituição parcial da areia, foram feitas com cal e com filito, no traço de 1:1:4. As argamassas com incorporação de resíduo e de filito foram denominadas de RF seguidas da proporção do resíduo, como por exemplo RF25, com substituição de 25% de areia por resíduo. Já as argamassas apenas com incorporação de resíduo foram denominadas de RC, seguidas também da proporção de substituição da areia pelo resíduo. Ainda foram realizados testes onde a cal hidratada foi substituída pelo resíduo de rocha, partindo também do traço de 1:1:4, sendo essas denominadas de R01, R02 e R03, estando sua diferença na porcentagem de aditivo.

O teor de água em todas as misturas se deu em função da consistência, que varia em 310 ± 5 mm, de acordo com a argamassa de referência, sendo esse espalhamento o necessário para a projeção da argamassa no equipamento empregado. Assim, buscando reduzir a presença de fissuras, os novos traços desenvolvidos contaram com a presença de aditivos plastificantes, com a intenção de diminuir a quantidade de água de amassamento sem afetar o índice de consistência, mantido constante, uma vez que a fluidez da argamassa é em função do tipo de bomba usada.

Nesse trabalho foram empregados dois aditivos distintos, um para utilizar na mistura com o filito, adquirido no mercado, chamado de aditivo x. A proporção do aditivo foi dosada em relação a quantidade de cimento usada, em massa, de acordo com o recomendado pelo fabricante.

Para desenvolver um novo produto, as argamassas onde a cal hidratada foi substituída pelo resíduo de rocha foi empregado um aditivo plastificante desenvolvido no laboratório do LECIV – UENF, chamando de aditivo y. Neste caso, durante o proporcionamento, observou-se que grandes quantidades desse material prejudicava a aderência da argamassa ao substrato, apesar de melhorar significativamente sua trabalhabilidade.

3.3.3. Ensaio tecnológicos no estado fresco

Todas as argamassas foram produzidas segundo a NBR 13276 (ABNT, 2016), que orienta o preparo de argamassas sem a utilização de cal virgem da seguinte forma: os materiais foram pesados e colocados no misturador, e nos 10s iniciais com a velocidade de mistura baixa, foi adicionada 75% da massa de água, prosseguindo com a mistura até completar 30s a partir do acionamento do misturador. Passados os 30s, a velocidade foi modificada para alta e a misturando permaneceu durante 60s. Depois desse tempo, a pá foi retirada e realizada a raspagem da superfície interna, assim como da pá, procedimento feito em 90s, caso fosse feito em tempo inferior, a argamassa deveria ficar em repouso até completar 90s. Com a cuba de volta ao misturador, o restante de água foi adicionado em 10s, continuando a mistura até completar 30s mais o tempo indicado pelo fabricante, e na ausência dessa informação, a mesma deveria completar 60s.

Os ensaios realizados no estado fresco e suas respectivas normas são apresentados na Quadro 6.

Quadro 6 - Ensaio realizados no estado fresco e suas respectivas normas técnicas.

Ensaio	Norma
Índice de Consistência (<i>flow table</i>)	NBR 13276 (ABNT, 2016)
Reologia por <i>squeeze-flow</i>	NBR 15839 (ABNT, 2010)
Teor de ar incorporado e densidade de massa no estado fresco	NBR 13278 (ABNT, 2005)
Retenção de água	NBR 13277 (ABNT, 2005)

Fonte: Autora, 2020.

3.3.3.1. Índice de consistência (*flow table*)

O índice de consistência é o parâmetro descrito pela NBR 13276 (ABNT, 2016), que o recomenda em 260 ± 5 mm para argamassas com aplicação manual. Entretanto, como esta pesquisa trata de argamassas por projeção mecanizada, o índice proposto

não se aplica devido à necessidade de uma maior fluidez. A quantidade de água nos traços deve proporcionar um espalhamento em torno de 310 ± 5 mm, assim como a argamassa de referência. A quantidade de água a ser adicionada e a proporção do aditivo para alcançar esse valor é feita por meio do ensaio de consistência.

Este ensaio consistiu em determinar o diâmetro de espalhamento da argamassa após seu adensamento no tronco-cônico sobre a mesa de consistência. Neste molde foram colocadas três camadas sucessivas, com altura aproximadamente iguais, aplicando 15, 10 e 5 golpes, respectivamente, distribuídos de maneira uniforme. Em seguida, foi feito o rasamento da superfície, e ao retirar o molde, a mesa de consistência foi acionada, efetuando 30 quedas em 30 segundos.



Figura 23 - Equipamentos utilizados no ensaio de índice de consistência.

Fonte: Autora, 2020.

3.3.3.2. Ensaio de reologia de *squeeze flow*

O ensaio de *squeeze flow* foi desenvolvido segundo a NBR 15839 (ABNT, 2010), e de acordo com o manual de utilização do *squeeze flow* de Cardoso *et al.* (2010) e Azevedo *et al.* (2017).

As propriedades reológicas da argamassa no estado fresco são de extrema importância, porque com essas características é possível obter o comportamento deste material em relação ao espalhamento, nivelamento e acabamento de revestimentos e assentamento de blocos, propriedades que interferem diretamente no desempenho e durabilidade das argamassas em serviço.

O método é baseado na teoria de as argamassas serem classificadas como fluidos de Bingham, materiais que apresentam tensão mínima para que o escoamento se inicie (tensão de escoamento) e o fluxo apresenta uma relação linear entre tensão e taxa de cisalhamento. Então, como são necessários no mínimo duas medidas em diferentes taxas de cisalhamento para caracterização desse fluido, a norma brasileira recomenda o uso de duas velocidades: 0,1mm/s e 3 mm/s.

No manual de Cardoso *et al.* (2010), os autores exemplificam a teoria com duas argamassas, A e B, ambas como fluidos de Bingham (Figura 24). Pela imagem, identifica-se que a argamassa A possui maior tensão de escoamento e menor viscosidade plástica (inclinação da reta) que a argamassa B. Iniciado o escoamento, para valores menores que a taxa de cisalhamento x , a argamassa A necessita de maior tensão de escoamento, mostrando-se mais consistente que a B. Entretanto, após o ponto x , a tendência se inverte, e a argamassa B passa a ser mais consistente que A. Assim, a análise dos resultados por meio de apenas uma taxa de cisalhamento pode levar a conclusões precipitadas sobre a plasticidade e trabalhabilidade da argamassa.

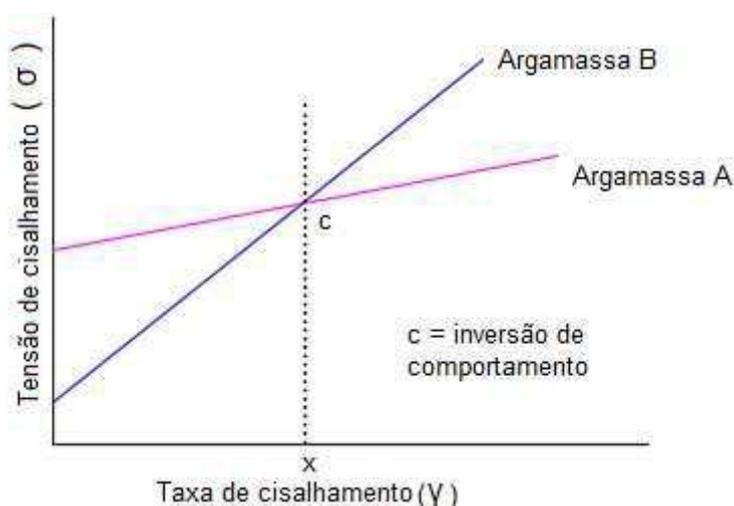


Figura 24 - Ilustração das argamassas A e B como fluido de Bingham.

Fonte: Autora, 2020, adaptado de Cardoso *et al.* (2010).

O ensaio consistiu em comprimir uma amostra cilíndrica de argamassa no estado fresco entre duas placas paralelas. Para isso foi utilizada a seguinte configuração experimental: como a compressão foi aplicada pelo disco ou placa superior, esta teve o mesmo diâmetro inicial da amostra, e para permitir que a argamassa se espalhasse, o disco ou placa inferior teve aproximadamente duas vezes o diâmetro inicial.

As medidas apresentadas na Figura 25 estão padronizadas de acordo com a NBR 15839 (ABNT, 2010). A argamassa foi preparada, de acordo com o mesmo procedimento utilizado no ensaio de consistência, colocada no molde e rasada, de forma que todo o volume do cilindro fosse preenchido e sua superfície, lisa. Em seguida o molde foi retirado. A placa superior foi aproximada de maneira cuidadosa da superfície da argamassa e o ensaio, iniciado, respeitando as duas velocidades

descritas na norma, de 0,1 mm/s e 3 mm/s. Ele se encerrava quando a força aplicada atingia 1000 N ou quando o deslocamento atingia o limite de 9 mm.

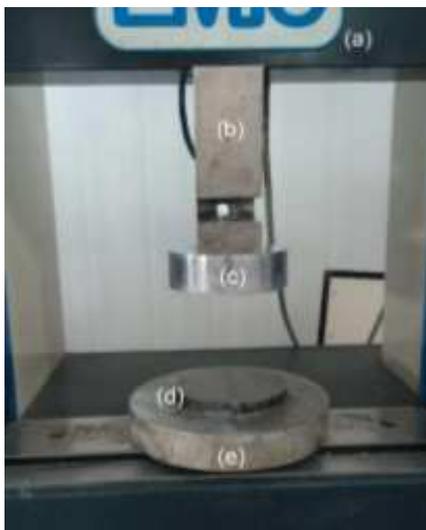


Figura 25 - Esquema de ensaio de *squeeze flow*: (a) máquina universal de ensaios; (b) célula de carga com capacidade de 30 kN; (c) placa superior de aço com 100 mm de diâmetro; (d) molde cilíndrico com diâmetro interno de 100 mm e altura de 10 mm; (e) placa inferior.

Fonte: Marvila, 2018.

Para a análise dos resultados, comparou-se uma curva típica (Figura 26), que apresenta três regiões, e a curva carga x deslocamento de cada amostra.

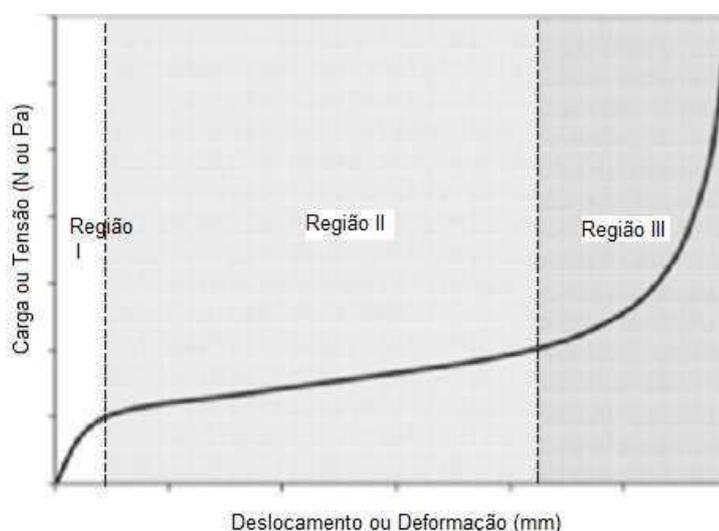


Figura 26 - Curva típica de carga x deslocamento em um ensaio de *squeeze flow* para argamassas.

Fonte: Autora, adaptado Engamann *et al.*, 2005.

Na região ou estágio I, ocorrem pequenas deformações, a argamassa se comporta como um sólido apresentando deformação elástica linear. A região II corresponde a deslocamentos intermediários, a compressão leva à deformação radial elongacional e o cisalhamento é maior que as forças que mantinham o material sob comportamento elástico, conseqüentemente, o material irá fluir com deformação

plástica ou viscosa. Por sua vez, no estágio III há um aumento expressivo da carga para continuar com a deformação do material, caracterizando o fluxo restrito do material, pois as forças de atrito são predominantes, sendo esse estágio de grandes deformações.

As argamassas que apresentam o estágio (II) expressivo são mais trabalháveis, tendo em vista que nessa região o material é capaz de sofrer grandes deformações sem que haja aumento significativo de força, favorecendo, ainda, a produtividade no momento de sua aplicação. Já as que apresentam a região (III) predominante apresentam pouca trabalhabilidade, porque nesse estágio é preciso uma maior carga para deslocar, resultando em dificuldade no processo de aplicação e acabamento, podendo ocorrer separação do material.

3.3.3.3. Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado

O ensaio de densidade de massa no estado fresco é determinado por meio da NBR 13278 (ABNT, 2005), e com esse valor são feitos cálculos, para obter o valor do teor de ar incorporado.

Determinou-se a massa do recipiente cilíndrico de ensaio, ilustrado na Figura 27, vazio (m_v), e seu volume (v_r).



Figura 27 - Copo cilíndrico para densidade de massa no estado fresco.

Fonte: Autora, 2020.

A argamassa foi introduzida de forma suave no recipiente, em três camadas uniformes, aplicando 20 golpes em cada camada, ao longo do perímetro do recipiente. Para que não existissem vazios entre a argamassa e o recipiente, efetuaram-se 3 quedas na mesa de consistência. O recipiente foi rasado para regularização da superfície. Eliminados os excessos, pesou-se o molde com a argamassa, determinando a massa do molde com argamassa (m_c).

- **Densidade de massa no estado fresco**

Para obtenção da densidade de massa no estado fresco (d), em g/cm^3 , é utilizada a equação (01):

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \quad (01)$$

em que:

m_c – massa do recipiente cilíndrico contendo argamassa a ser ensaiada (g);

m_v – massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

v_r – volume do recipiente cilíndrico (cm^3).

- **Teor de ar incorporado**

Para o cálculo do teor de ar incorporado (A_i), em %, é usada a equação (02):

$$A_i = 100. \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (02)$$

em que:

d – densidade de massa de argamassa (g/cm^3);

d_t – densidade de massa teórica da argamassa (g/cm^3), sem vazios.

Para argamassas não industrializadas, o valor da densidade de massa teórica, em g/cm^3 , é obtida por meio da equação 03:

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad (03)$$

em que:

m_i – massa seca de cada componente da argamassa, mais a água (g);

γ_i – massa específica de cada componente da argamassa.

É importante atentar-se para a expressão que calcula o teor de ar incorporado, uma vez que a densidade de massa no estado fresco deve ser convertida de kg/m^3 para g/cm^3 , para uma aplicação coerente da Equação 02.

3.3.3.4. Retenção de água

Esse parâmetro é obtido segundo a NBR 13277 (ABNT, 2005), necessitando de uma bomba de vácuo para aplicar sucção na argamassa e um funil de Buchner modificado, ilustrado na Figura 28.



Figura 28 - Aparelho utilizado no ensaio de retenção de água.

Fonte: Autora, 2020.

O ensaio consistiu na sequência apresentada abaixo:

1. Colocar o prato sobre o funil, garantindo a estanqueidade entre eles;
2. Posicionar o papel-filtro umedecido no fundo do prato do equipamento;
3. Com a torneira fechada, a bomba de vácuo foi acionada até que a sucção atinja 51 mm de mercúrio;
4. Abrir a torneira do equipamento para retirada do excesso de água do papel-filtro por 90 s;
5. Pesar o funil/papel-filtro úmido e registrar a massa (m_v);
6. Preencher o prato com argamassa até acima da borda para o adensamento com soquete, com 16 golpes distribuídos uniformemente junto a borda, e 21 golpes na parte central da amostra. O excesso de argamassa deve ser retirado para obtenção de uma superfície plana;
7. Realizar a limpeza do excesso de argamassa, e registrar a massa do conjunto com argamassa (m_a);
8. Abrir a torneira que controla a sucção e aplicar uma sucção de 51 mm de mercúrio durante um período de 15 minutos;
9. Retirar o prato do funil e registrar a massa do conjunto prato e argamassa (m_s).

Após o procedimento experimental ter sido realizado, o cálculo para o parâmetro de retenção de água foi determinado segundo a equação 04:

$$R_a = \left[1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF * (m_a - m_v)} \right] 100 \quad (04)$$

Sendo AF, o fator água/argamassa determinado por (05):

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad (05)$$

em que m_a é massa do conjunto com argamassa (g), m_s corresponde à massa do conjunto após a sucção (g), m_v é massa do conjunto vazio (g), m_w como massa total de água acrescentada à mistura (g), e por último m sendo a soma das massas dos componentes anidros (g).

3.3.4. Ensaio tecnológicos no estado endurecido

Para esses ensaios, os corpos de prova foram preparados de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), moldados em formas prismáticas metálicas com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, com exceção do ensaio de variação dimensional. Após a moldagem, as formas permaneceram em um local plano, com temperatura controlada, de aproximadamente 23°C, para cura ao ar. A desforma das amostras ocorreu entre 48 ± 24 horas.

Os ensaios realizados no estado endurecido e suas respectivas normas são apresentados na Quadro 7.

Quadro 7 - Ensaio realizados no estado endurecido e suas respectivas normas técnicas.

Ensaio	Norma
Densidade de massa no estado endurecido	NBR 13280 (ABNT, 2005)
Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Resistência à compressão axial	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Absorção de água por imersão e índice de vazios	NBR 9778 (ABNT, 2009)
Absorção de água por capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)
Resistência de aderência à tração	NBR 13528 (ABNT, 2010)
Determinação da variação dimensional	NBR 15261 (ABNT, 2005)

Fonte: Autora, 2020.

3.3.4.1. Densidade de massa no estado endurecido

A determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido é dada seguindo a NBR 13280 (ABNT, 2005). Após 28 dias, a altura, largura e comprimento das amostras foram medidos com um paquímetro, sempre usando duas ou mais posições distintas para cada dimensão. A massa dos corpos de prova também foi determinada.

Com esses dados em mãos, obtém-se primeiramente, o volume da amostra, pela equação (06):

$$V = l * h * c \quad (06)$$

Sendo:

V – volume do corpo de prova (cm³);

l – largura do corpo de prova (cm);

h – altura do corpo de prova (cm);

c – comprimento do corpo de prova (cm).

Para determinar a massa aparente no estado endurecido, aplica-se a seguinte equação:

$$\rho = \frac{m_{cp}}{V} \quad (07)$$

Com:

ρ – densidade de massa aparente no estado endurecido (g/cm³);

m_{cp} – massa do corpo de prova (g);

V – volume do corpo de prova (cm³).

3.3.4.2. Resistência à tração na flexão

Este ensaio segue a norma NBR 13279 (ABNT, 2005), e esta cita que a quantidade mínima de corpos de prova para obtenção desse parâmetro é de três. Para sua realização, as amostras foram posicionadas nos dispositivos de apoio do equipamento, como a Figura 29 demonstra.



Figura 29 - Ensaio de tração na flexão.

Fonte: Autora, 2020.

Conforme recomenda a norma, uma carga de 50 ± 10 N/s foi aplicada até a ruptura do corpo de prova, e a resistência à tração na flexão é calculada segundo a equação (08):

$$R_t = \frac{1,5 \cdot F_t \cdot L}{40^3} \quad (08)$$

em que:

R_t – resistência à tração na flexão (MPa);

F_t – carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L – distância entre os suportes (mm).

3.3.4.3. Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência a compressão foi executado segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005), com as metades dos corpos de prova ensaiados à tração na flexão. Para isso, eles foram posicionados, assim como no ensaio anterior, de forma que sua face rasada não ficasse em contato com o apoio ou com o dispositivo de carga (Figura 30). A carga aplicada foi de 500 ± 50 N/s até a amostra atingir sua ruptura.

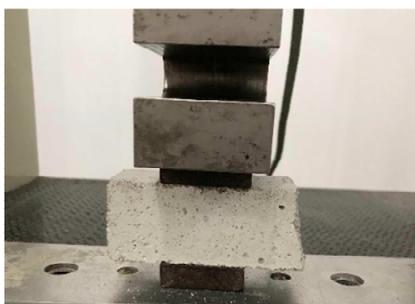


Figura 30 - Ensaio de compressão no corpo de prova.

Fonte: Autora, 2020.

A resistência à compressão é determinada pela equação (09):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (09)$$

Sendo:

R_c – resistência à compressão (MPa);

F_c – carga máxima aplicada (N);

1600 – área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40 mm x 40 mm.

3.3.4.4. Absorção de água por imersão e índice de vazios

Esses ensaios foram executados segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009), e foram utilizados três corpos de prova, com um volume de 256 cm³.

Inicialmente as amostras foram colocadas em estufa durante 72 horas, e registrada a massa seca (m_s). Em seguida, o corpo de prova foi imerso em água durante 72 horas. Após a completa saturação, as amostras foram levadas à ebulição, iniciados entre 15 e 30 min depois de completada a saturação. Esse processo de fervura foi mantido por 5 horas, com o volume de água constante no recipiente. A seguir, a água foi resfriada até atingir a temperatura ambiente, registrando-se a massa imersa (m_i). A amostra foi retirada da água e registrada a sua massa saturada (m_{sat}).

- **Absorção**

O cálculo da absorção (A), em porcentagem, utiliza a equação (10):

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad (10)$$

em que:

A – absorção de água por imersão (%);

m_{sat} – massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

m_s – massa da amostra seca em estufa (g).

- **Índice de vazios**

A determinação do índice de vazios (I_v), em porcentagem, é dado por (11):

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_{im}} \quad (11)$$

em que:

I_v – índice de vazios (%);

m_{sat} – massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

m_s – massa da amostra seca em estufa (g);

m_{im} – massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

3.3.4.5. Absorção de água por capilaridade

A obtenção da absorção de água por capilaridade é em função do coeficiente de capilaridade, ensaio executado de acordo com a NBR 15259 (ABNT, 2005).

Os corpos de prova foram curados 28 dias, e após esse período lixou-se e limpou-se sua superfície, e foi determinada a massa inicial (m_0). Em seguida, os corpos de prova foram posicionados sobre suportes dentro do recipiente, para que as outras superfícies não fossem molhadas, conforme ilustra a Figura 31.



Figura 31 - Ensaio de Capilaridade.

Fonte: Autora, 2020.

O nível de água no período do ensaio foi mantido constante em 5 ± 1 mm acima da face em contato com a água, de acordo com a recomendação da norma. Contando o tempo a partir do momento em que os corpos de prova foram colocados em contato com a água, suas massas foram registradas após 10 min (m_{10}) e 90 min (m_{90}).

Primeiramente foi definido o coeficiente de capilaridade, equação 12, e depois a absorção de água por capilaridade aos 90 minutos, equação 13:

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (12)$$

$$A_{90} = \frac{m_{90} - m_0}{16} \quad (13)$$

Com:

A_{90} – absorção de água por capilaridade aos 90 minutos (g/cm^2);

C – coeficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$);

m_0 – massa inicial do corpo de prova (g);

m_{10} – massa do corpo de prova após 10 minutos (g);

m_{90} – Massa do corpo de prova após 90 minutos (g).

3.3.4.6. Resistência de aderência à tração

Na época do desenvolvimento das argamassas, o ensaio era normatizado pela NBR 13528 (ABNT, 2010), embora esta tenha sido atualizada para NBR 13528-3 (ABNT, 2019). Neste ensaio, algumas paredes foram confeccionadas com tijolos cerâmicos para aplicação da argamassa por projeção, com, no máximo, 2 cm de espessura, onde, no mínimo 12 corpos de prova deveriam ser distribuídos de maneira aleatória, e com espaçamento mínimo de 50 mm entre eles, os cantos e quinas (Figura 32).



Figura 32 - Distribuição das amostras na parede para ensaio de aderência a tração.

Fonte: Autora, 2020.

Antes de aplicado o revestimento, o substrato foi umedecido de maneira uniforme para que não houvesse perda excessiva de água da argamassa. Depois de umedecido, a argamassa foi aplicada sem a presença de chapisco. Na Tabela 2, são apresentados os dados de temperatura, umidade e velocidade de vento no momento de aplicação dos revestimentos, obtidos com o Instituto Nacional de Meteorologia (2020).

Tabela 2 - Dados meteorológicos referentes aos dias de aplicação da argamassa no substrato.

Amostra	Temperatura (°C)	Umidade do ar (%)	Velocidade do vento (m/s)	Amostra	Temperatura (°C)	Umidade do ar (%)	Velocidade do vento (m/s)
F01	21,76	70,54	1,13	RF25	18,52	70,73	1,89
F02	19,05	70,87	2,69	RF30	18,52	70,73	1,89
F03	19,05	70,87	2,69	RF40	17,74	74,42	2,12
F04	19,91	72,73	1,89	RF45	17,74	74,42	2,12
F05	19,91	72,73	1,89	R01	23,42	71,79	4,42
RC25	19,96	58,21	4,98	R02	23,42	71,79	4,42
RC30	19,96	58,21	4,98	R03	23,42	71,79	4,42
RC40	18,17	77,58	2,31	Cal	21,77	71,67	2,41
RC45	18,17	77,58	2,31				

Fonte: Autora, 2020.

Após 28 dias, os corpos de prova foram feitos com uma serra copo de 50 mm de diâmetro, até que fosse atingida uma profundidade de 1 mm a 5 mm no substrato. Posteriormente ao corte, pastilhas metálicas (Figura 33a) de 50 mm de diâmetro foram coladas completamente centradas no corpo de prova delimitado pelo corte, sem que a espessura da cola ultrapassasse 5 mm. Esperado o tempo de secagem da cola determinado pelo fabricante, o ensaio foi iniciado com a aplicação de uma carga contínua com auxílio de um dinamômetro sobre as pastilhas (Figura 33b).

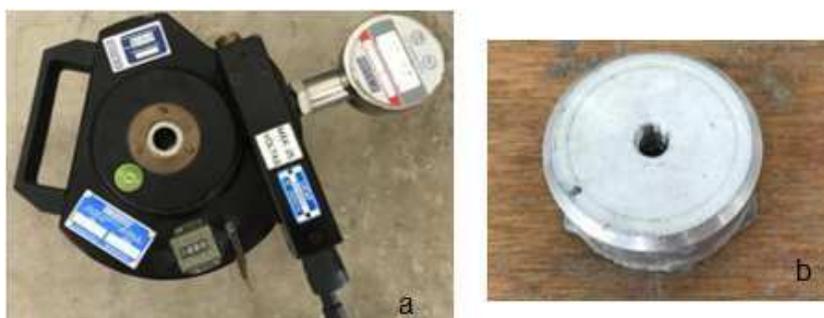


Figura 33 - Materiais empregados no ensaio de aderência a tração: (a) dinamômetro, (b) pastilha.

Fonte: Autora, 2020.

De acordo com NBR 13528 (ABNT, 2010), existem diferentes superfícies de rupturas possíveis. A Figura 34 apresenta um sistema como o empregado nos ensaios, onde o revestimento foi aplicado sem chapisco. É importante salientar que caso a ruptura ocorresse na interface argamassa cola, este resultado seria desconsiderado. A tensão de ruptura, em MPa, é dada pela carga de ruptura (N) e a área da pastilha (mm²).

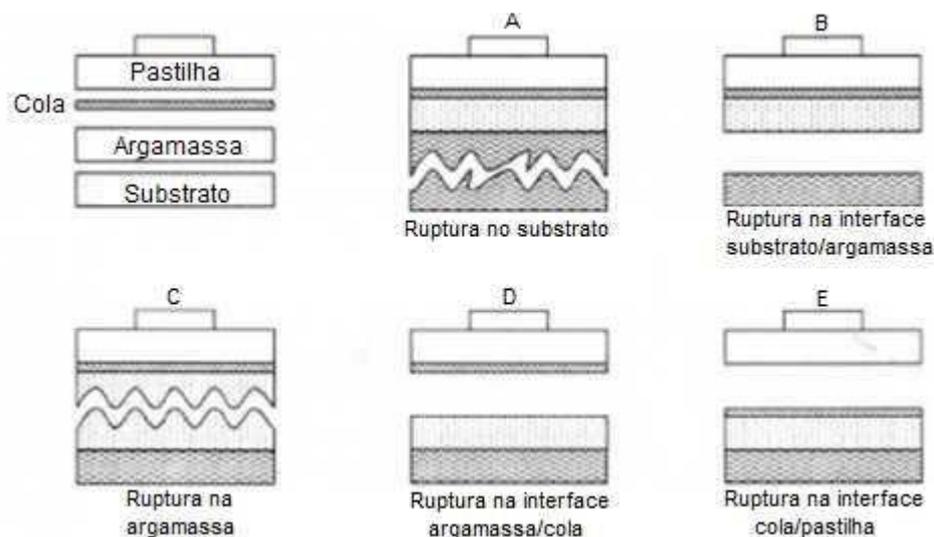


Figura 34 - Tipos de ruptura.

Fonte: NBR 13528, ABNT 2010.

Depois de feita a análise visual e o ensaio de aderência a tração, os traços que apresentaram os melhores desempenhos foram levados para o canteiro de obras para que fosse feita a sua projeção em larga escala.

3.3.4.7. Determinação da variação dimensional

Esse ensaio é usado para determinar a variação dimensional na fase de endurecimento e secagem das argamassas, sendo regida pela NBR 15261 (ABNT, 2005). Foram moldados três corpos de prova de 25 x 25 x 285 mm (Figura 35), com pinos que penetravam $17,5 \pm 5$ mm em suas extremidades, de maneira que o comprimento efetivo da amostra fosse de 250 mm (distância interna entre os pinos). Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em ambiente controlado a fim de evitar a evaporação diferencial da água entre as amostras de um mesmo traço.



Figura 35 - Corpos de prova para ensaio de variação dimensional.

Fonte: Autora, 2020.



Figura 36 - Equipamento para medição da variação dimensional com bastão de calibração à direita.

Fonte: Autora, 2020.

As medições foram feitas com 1, 7, 14, 28 e 35 dias, sendo a variação dimensional calculada por:

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (14)$$

Com:

ε_i – é a medida de variação dimensional, em mm/m, para valores negativos significa que houve uma retração, e em caso positivos, uma expansão;

L_i – leitura na idade final, em mm;

L_0 – leitura efetuada após a desforma, em mm.

3.4. Tratamento estatístico

Alguns dos ensaios foram realizados uma única vez, tendo em vista que a norma não recomenda repetição, então, nesses casos, não foi empregado nenhum tratamento estatístico. Contudo, para avaliar os parâmetros obtidos em ensaios onde houve repetição, foi empregada a análise de variância (ANOVA) por delineamento inteiramente casualizado (DIC), com nível de confiança de 95% ($p \leq 0,05$), buscando verificar a existência de diferença significativa em relação aos tratamentos utilizados. Caso a diferença estatística fosse comprovada, seria empregado o teste de Tukey (p

$\leq 0,05$), que consiste em um procedimento com uma única etapa de comparação múltipla, usado para encontrar meios significativamente diferentes entre si.

A comprovação da diferença estatística pela análise de variância (ANOVA) é feita quando o valor $F_{\text{calculado}}$ for superior ao F_{tabelado} . Caso contrário, todos os tratamentos realizados são estatisticamente iguais para nível de significância estudado. No método de Tukey os testes são realizados calculando uma distância padronizada, conhecida como DMS (distância mínima significativa). Toda vez que a diferença entre duas médias for inferior ao DMS, os tratamentos apresentam a mesma média experimental. Quando isso não ocorre, as médias são diferentes entre si.

Para finalizar a análise da ANOVA por DIC, é válido determinar o coeficiente de variação do ensaio, o CV, que por sua vez mostra o quão homogêneo foi o ensaio. Para valores de CV abaixo de 10% o ensaio apresentou alta precisão, enquanto valores de CV entre 10 e 30% indicam que o ensaio teve precisão média. Contudo, caso os valores de CV estejam acima de 30%, isso indica baixa precisão experimental, e os resultados encontrados devem ser revistos.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Considerações Iniciais

Quando estudadas as argamassas utilizadas no presente trabalho, uma das problemáticas encontradas foi a falta de valores limites estabelecidos pela NBR 13281 (ABNT, 2005), com exceção da resistência de aderência à tração. As normas apresentam classificações em diferentes níveis de acordo com os resultados, contudo não apresentam valores mínimos ou máximos que devem ser alcançados.

Por este motivo foram adotados limites utilizados por: Mattana *et al.* (2012), Gomes e Neves (2012), Silva *et al.* (2011), (2008), Corinadelsi *et al.* (2010), Romano *et al.* (2014), Melo e Thaumaturgo (2012). A Tabela 3 apresenta alguns desses valores. Além disso, foi produzida uma argamassa de cal hidratada no traço de 1:1:4 em massa, com consistência estabelecida pela NBR 13276 (ABNT, 2016), somente a título de comparação em relação a alguns resultados.

Tabela 3 - Valores limites de referência para comparação com os resultados obtidos.

Parâmetro	Valores limite	Observação
Índice de consistência	310 ± 5 mm	Argamassa de referência
Densidade no estado fresco	1400 a 2000 kg/m ³	Mattana <i>et al.</i> (2012)
Retenção de água	Superior a 75%	ASTM C 270
Teor de ar incorporado	Entre 1% e 7% ou abaixo de 20%.	Gomes e Neves (2002), Silva <i>et al.</i> (2011), Mattana <i>et al.</i> (2012) e Cuadrado <i>et al.</i> (2017)
Resistência à tração	Entre 1,0 a 4,5 MPa	Mattana <i>et al.</i> (2012)
Resistência à compressão	Entre 1,5 e 9,0 MPa	Mattana <i>et al.</i> (2012)
Resistência de aderência à tração	Acima de 0,20 MPa para revestimento interno e de 0,30 MPa para revestimento externo	NBR 13528 (ABNT, 2010)
Índice de vazios	Limitado a 35%	Mattana <i>et al.</i> (2012)
Densidade no estado endurecido	1200 a 1900 kg/m ³	Mattana <i>et al.</i> (2012)
Coefficiente de capilaridade	Limitado a 12,5g/dm ² .min ^{1/2}	Mattana <i>et al.</i> (2012)

Fonte: Autora, 2020.

Como parte importante da análise foi feita uma observação visual buscando localizar a presença de fissuras. Para alguns traços, essa observação foi feita junto

com o ensaio de aderência à tração, enquanto para outros, ela foi realizada separada do ensaio. Nesse último caso, se fosse constatada a presença de fissuras, os ensaios tanto no estado fresco quanto endurecido não seriam realizados, tendo em vista que o objetivo principal desta dissertação foi mitigar a presença dessa patologia no revestimento.

4.2. Caracterização dos materiais

4.2.1. Caracterização física

A Figura 37 apresenta as curvas granulométricas da cal, filito, resíduo de rocha e da areia, de onde foi obtido o teor de finos (<0,075mm). Na Tabela 4 são mostrados os parâmetros físicos dos materiais.

Tabela 4 - Parâmetros físicos.

Parâmetro	Cal hidratada	Resíduo de Rocha	Filito
Densidade real dos grãos (g/cm) ³	2,27	2,48	2,59
Limite de Liquidez (%)	54,5	NP	43,5
Limite de Plasticidade (%)	28,2	NP	26,1
Índice de Plasticidade (%)	26,3	NP	17,4
% de finos (<0,075mm)	97	95	78

Fonte: Autora, 2020.

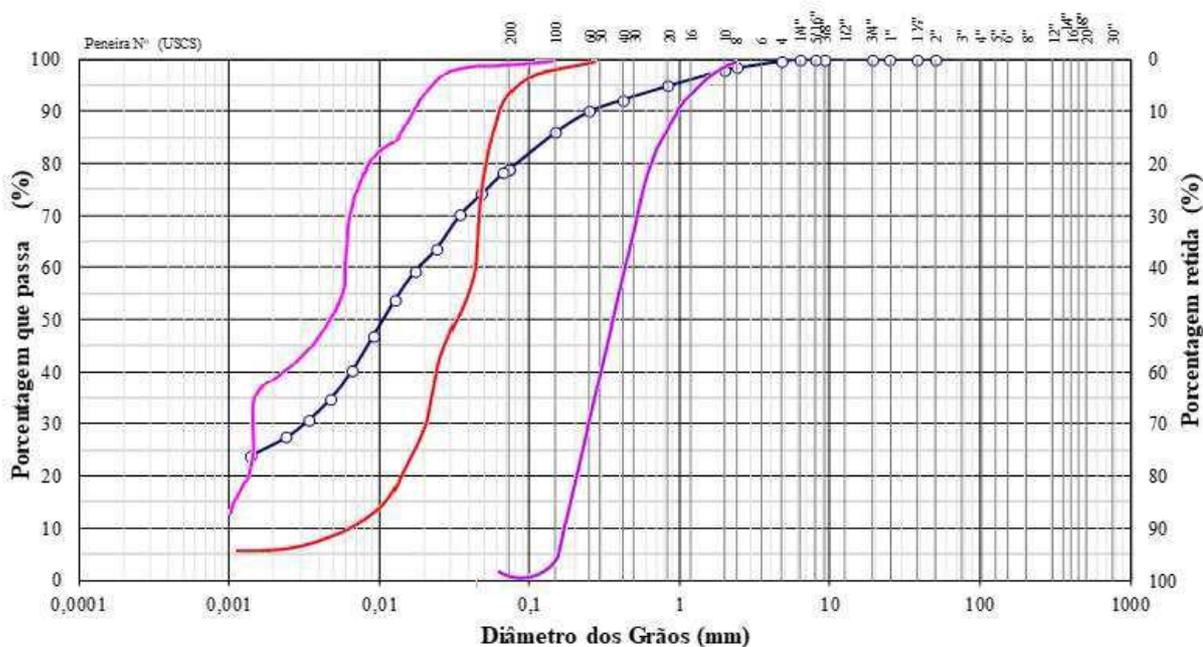


Figura 37 - Curvas granulométricas: (rosa) cal hidratada CH III, (azul) filito, (vermelho) resíduo de rochas ornamentais e (roxo) areia lavada do rio Paraíba.

Fonte: Autora, 2020.

Como exposto durante o programa experimental no item 3.3.2, as argamassas produzidas e estudadas ao decorrer do trabalho buscaram a substituição da cal hidratada, comumente utilizada, por materiais com menor impacto ambiental. Para isso foram utilizados o filito e o resíduo de rocha ornamental para a fabricação de uma argamassa de aplicação pelo método da projeção. Uma análise prévia para avaliar essa substituição foi a granulometria na qual foi observada a distribuição dos grãos, e a partir das curvas, mostradas na Figura 37, é possível fazer uma comparação entre os materiais.

Comparando essas imagens é possível concluir que o filito possui uma quantidade de partículas mais grosseiras quando comparadas com as partículas encontradas na cal hidratada e ao resíduo de rocha ornamental, sendo a cal hidratada a que apresenta as partículas mais finas em relação as duas citadas anteriormente. Isso também pode ser constatado pelo teor de finos de cada material, em que o filito apresenta aproximadamente 78% de finos enquanto a cal e o resíduo possuem porcentagens semelhantes, de 97% e 95%, respectivamente.

Fazendo uma comparação com os valores obtidos no presente trabalho com os abordados na revisão bibliográfica, percebe-se que os resultados encontrados para os índices de plasticidade são coerentes com aqueles encontrados por Santiago (2008), onde o IP foi de 18,7%, bem próximo ao valor encontrado do filito utilizado, de 17,4%, entretanto esse índice está abaixo do encontrado para a cal hidratada, de 26,35%. O teor de finos encontrado por Santiago (2008) para o filito foi de aproximadamente 80%, também semelhante ao obtido, de 78%.

Ao contrário do filito, o resíduo de rocha não apresentou características plásticas, já que não foi possível determinar os limites de liquidez e de plasticidade. Essa ausência de plasticidade é ruim do ponto de vista do emprego desse material em substituição à cal hidratada, já que a não determinação desses índices pode levar a supor que esse material tem pouca capacidade de aglomeração, podendo influenciar diretamente na aderência da argamassa ao substrato, o que não foi constatado nesse estudo. Entretanto, são precipitadas conclusões acerca da substituição apenas levando em consideração a plasticidade.

O resíduo de rocha ornamental foi comparado com os estudos de Corinadelsi *et al.* (2010). A caracterização do resíduo destes autores mostrou o $D_{90} = 0,050$ mm,

logo, 90% desse material passa pela peneira de abertura de 0,050 mm, logo é possível concluir que o teor de finos desse material, ou seja, grãos com diâmetro inferior à 0,075 mm, é superior a 90%. Relacionando esse valor com o obtido para o resíduo de rocha ornamental empregado nesse trabalho, que foi de aproximadamente 95%, e devido à grande dispersão de formas de beneficiamento de rochas, é possível concluir a coerência desses resultados. Assim, do ponto de vista da granulometria, pode-se afirmar que o melhor material para substituir a cal seria o resíduo de rocha.

A massa específica dos materiais apresentada na Tabela 4, estão um pouco distintas dos valores de comparação. Para o resíduo, este valor está abaixo do apresentado por Vardhan *et al.* (2015), no qual dispõe de 2,60 g/cm³ de massa específica. Já a massa do filito está abaixo das encontradas para três tipos estudados por Romano *et al.* (2014), sendo elas de 2,80 g/cm³, 2,76 g/cm³ e 2,90 g/cm³, assim como para o filito cinza estudado por Melo e Thaumaturgo (2012), de 2,76 g/cm³.

4.2.2. Caracterização química e mineralógica

Por meio da análise química, Tabela 5, foi observado que a cal hidratada é formada majoritariamente por CaO, correspondendo a um total de 93,43%, já o filito é composto principalmente por 51,17% de SiO₂ e 30,34% de Al₂O₃, e por último, o resíduo de rocha ornamental, que é constituído de 76,34% de SiO₂.

Tabela 5 - Análise química, em %, da cal hidratada, resíduo de rocha, filito e areia.

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	SrO	Er ₂ O ₃	Outros
Cal Hidratada	1,43	-	93,43	1,60	0,99	1,82	-	-	-	0,24	0,47	0,01
Resíduo de Rocha	76,34	6,90	12,49	2,14	1,64	0,34	0,12	0,07	-	-	-	0,04
Filito	51,17	30,34	0,25	5,10	1,82	9,56	-	1,43	0,21	-	-	0,11
Areia	67,50	17,83	2,20	4,43	1,98	3,60	-	2,01	0,10	0,02	-	0,32

Fonte: Autora, 2020.

Ao comparar com os dados de Santos *et al.* (2013), o resíduo pode ser considerado quimicamente sílico-aluminoso por apresentar 93,24% desses dois componentes, uma vez que esses autores caracterizam resíduos de rocha com valores de sílica e alumina elevados até 96,31%. Relacionando os valores de CaO e MgO encontrados no resíduo, em torno de 13%, com a bibliografia internacional, de aproximadamente 50%, nota-se a diferença existente entre as rochas que são empregadas. Já o filito estudado era composto de 51, 17% de sílica e 30,34% de óxido de alumínio, próximos aos encontrados por Melo e Thaumaturgo (2012), com SiO₂ de 68,84%, Al₂O₃, de 15,72%, e MgO e CaO inferiores a 2%.

Os valores encontrados para o filito e o resíduo de rocha diferem de forma significativa para os da cal. Assim, decidindo por critérios baseados apenas na análise química, seria possível concluir que ambos seriam substitutos ruins para a cal hidratada, uma vez que eles são incompatíveis quimicamente.

A Figura 38 mostra os picos obtidos por meio do ensaio de difração de raios-x, assim como os minerais detectados.

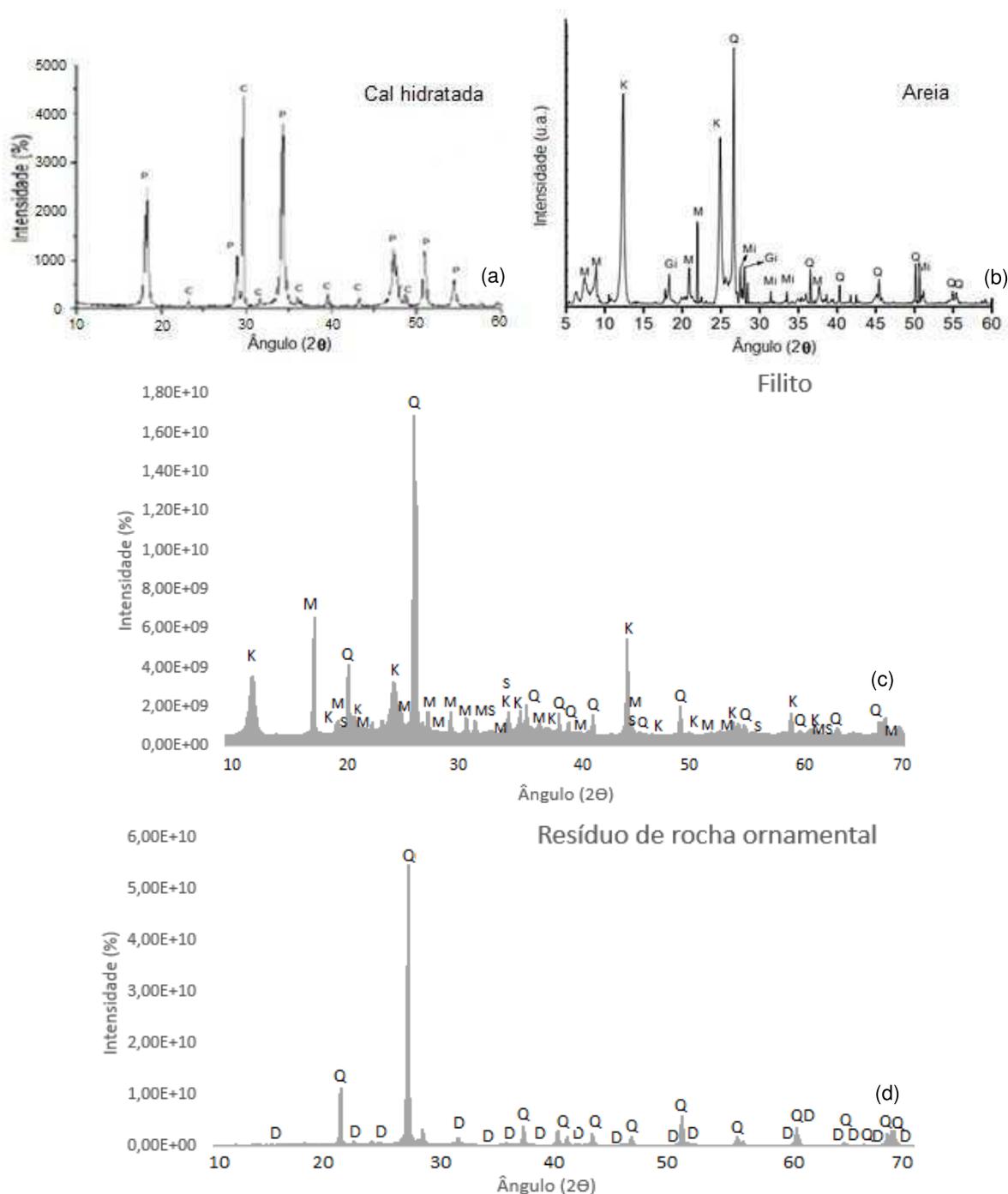


Figura 38 - Difratoograma de raio-X: (a) cal hidratada, (b) areia lavada do Rio Paraíba do Sul, (c) filito, (d) resíduo de rocha ornamental. Legenda: C – calcita; D – dolomita; K – caulinita; M – muscovita; P – portlandita; Q – quartzo; S – sericita; Mi – microclina; Gi - gibsita.

Fonte: Autora, 2020.

No difratograma da cal hidratada (Figura 38a) houve predominância de portlandita e calcita, coincidente com a análise química. Na análise mineralógica da areia (Figura 38b) observaram-se picos de quartzo, em concordância com a análise química, que mostrou 67,50% SiO₂, caulinita, muscovita, gibsita, que podem ser consideradas impurezas presentes no material.

Para o filito (Figura 38c), os minerais que mais apareceram nos difratogramas foram quartzo, potássio, caulinita e muscovita e em menor quantidade, a sericita, também de acordo com a composição química; por último, no resíduo de rocha (Figura 38d) os minerais predominantes foram quartzo e dolomita, apresentando boa correlação com a análise química realizada.

Assim como na análise química, a conclusão a que se pode chegar observando as características mineralógicas é de que não há uma boa correlação entre o filito e o resíduo de rocha com a cal hidratada, o que pode dificultar a substituição desse material.

Os resultados obtidos para a cal hidratada são comprovados pela pesquisa de Cho *et al.* (2017), que destacou a presença da portlandita na cal hidratada, e que em sua mineralogia poderiam haver traços de calcita, assim como o que foi encontrado. A composição mineralógica do filito é coerente com os estudos de Amaral *et al.* (2017), que apontou a presença da sericita, caulinita e quartzo, assim como mencionado por Valera *et al.* (2002), a muscovita foi apontada na mineralogia fornecida pelo fabricante. Já o resíduo de rocha pode ser apontado como proveniente granito devido a quantidade quartzo em torno de 75%.

Pode-se concluir, então, que os resultados das amostras estudadas estão em concordância com os estudos realizados previamente por outros autores. No que tange a substituição da cal hidratada pelo resíduo de rocha ou pelo filito, com base na caracterização química e mineralógica desses materiais, o resíduo de rocha seria o mais apropriado entre os dois, ainda que não ideal, isso porque, apesar das diferenças entre seus componentes químicos, quando comparado ao filito, ele é o que chega mais próximo, além de apresentar uma semelhança granulométrica, o que não ocorre com o filito. Entretanto, um fato que pode ser prejudicial para a substituição da cal pelo resíduo é que o mesmo não apresenta plasticidade.

4.2.3. Caracterização microestrutural

Para essa caracterização, foram feitas micrografias por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), possibilitando observar as diferentes formas e tamanho das partículas da cal, resíduo de rocha e filito, apresentadas, respectivamente, nas Figura 39, Figura 40 e Figura 41.

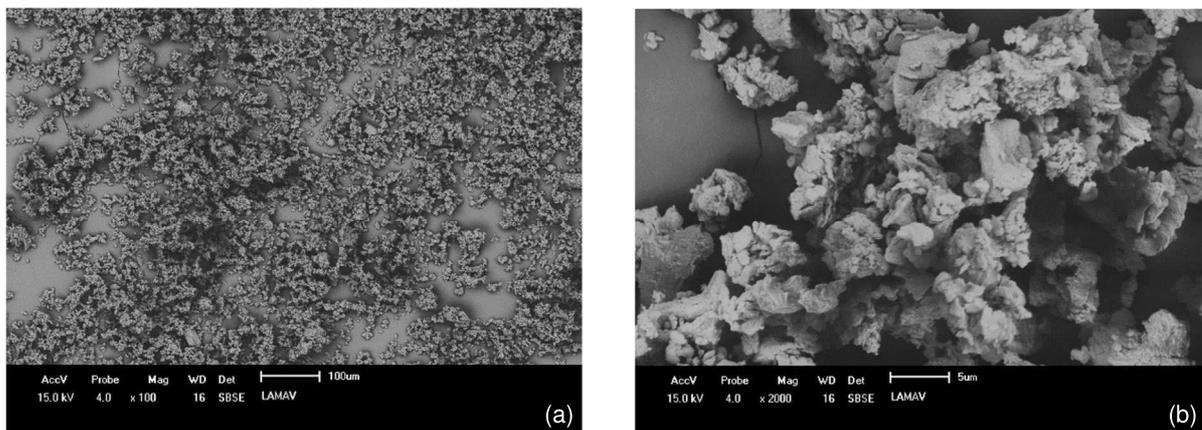


Figura 39 - MEV da cal hidratada: (a) aumento de 100x; (b) aumento de 2000x.

Fonte: Autora, 2020.

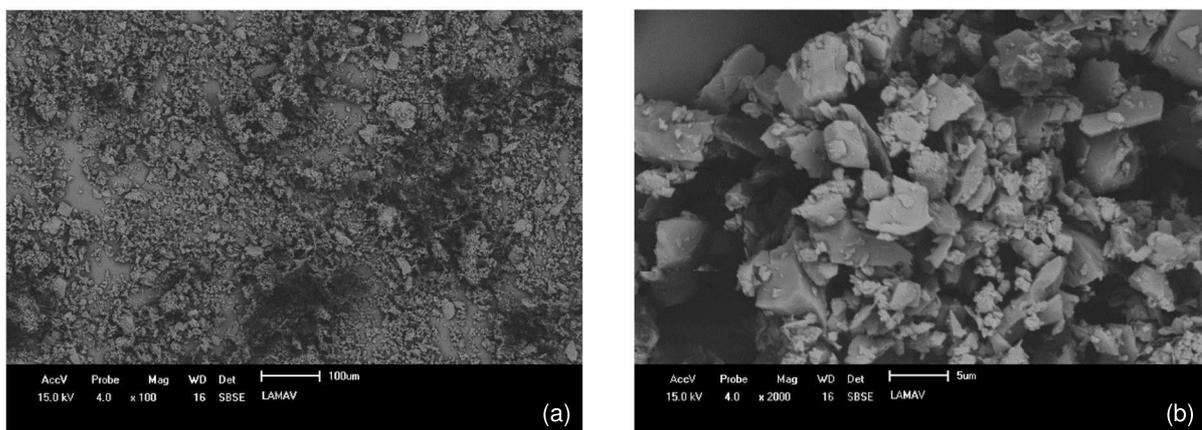


Figura 40 - MEV do resíduo de rocha: (a) aumento de 100x; (b) aumento de 2000x.

Fonte: Autora, 2020.

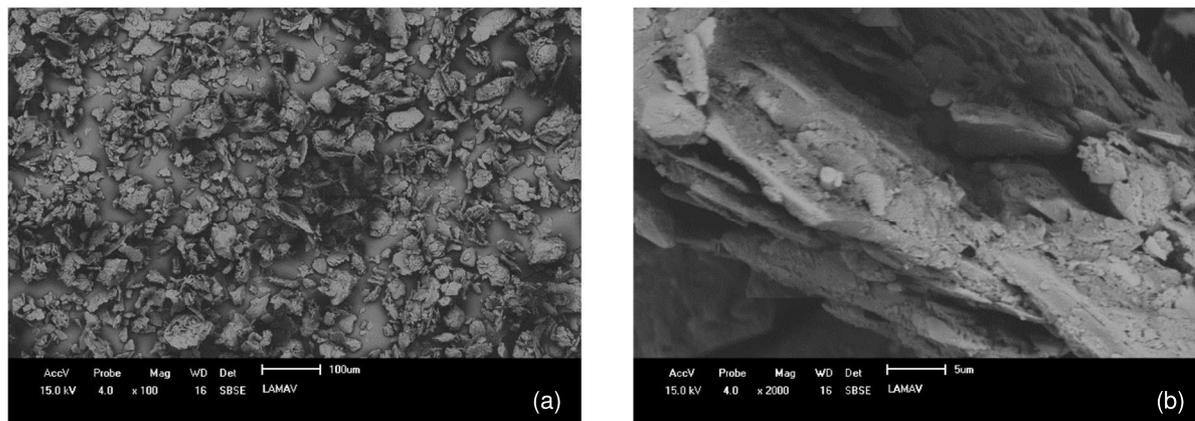


Figura 41 - MEV do filito: (a) aumento de 100x; (b) aumento de 2000x.

Fonte: Autora, 2020.

Comparando as imagens da caracterização microestrutural, percebe-se uma semelhança no tamanho das partículas e sua textura, além da dimensão dos poros da cal hidratada e do resíduo de rocha, Figura 39a e Figura 40a. Comparando esses dois materiais com o filito, Figura 41a, nota-se que, além de seus grãos serem de maior diâmetro, os seus poros também possuem maior tamanho.

Observando a Figura 39b e Figura 40b, que apresenta a morfologia das partículas de cal hidratada e do resíduo de rocha ornamental, percebe-se que a da cal é de arestas curvas e grãos próximos a esferas, com formato dos grãos parecidos uns com os outros. Enquanto isso, a morfologia dos grãos de resíduo é tipicamente irregular devido aos diferentes tipos de corte e beneficiamento das rochas que os deram origem, por isso eles apresentam formas e arestas irregulares, cantos angulosos e estruturas alongadas (RODRIGUES *et al.*, 2012). Se analisarmos a Figura 41b, é possível visualizar grãos com aspecto alongado, achatados e com camadas ou lâminas, como as rochas as quais deram origem ao filito.

4.3. Parâmetros tecnológicos no estado fresco

A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios no estado fresco e nos itens posteriores, a sua discussão.

Tabela 6 - Parâmetros obtidos no estado fresco.

Amostra	Consistência (mm)	Relação água/materiais secos	Densidade de massa (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)	Retenção de água (%)
F01	310,0	0,257	2,003	8,45	95,374
F02	306,7	0,240	1,991	8,42	94,832
F03	305,2	0,206	2,042	8,12	95,026
F04	312,7	0,200	2,008	7,97	94,392
F05	305,7	0,235	1,969	7,83	97,143
RC25	306,8	0,254	1,853	5,71	93,065
RC30	305,9	0,274	1,842	5,94	96,321
RC40	306,2	0,300	1,823	6,35	96,448
RC45	306	0,324	1,804	7,32	95,594
RF25	307,2	0,287	1,926	4,11	93,286
RF30	312	0,297	1,875	4,52	95,157
RF40	309,3	0,338	1,856	5,23	94,322
RF45	314,3	0,369	1,828	6,22	95,407
R01	315	0,192	1,954	9,35	92,259
R02	310	0,197	1,971	8,67	91,154
R03	314	0,199	1,963	8,93	91,935

Fonte: Autora, 2020.

Relembrando, os traços da série F são constituídos de cimento:filito:areia em diferentes proporções, os traços F03, F04 e F05 ainda possuem aditivo plastificante. Já os traços da série RC e RF possuem resíduo substituindo parte da areia em, 25%, 30%, 40% e 45%, em massa. A série RF possui filito em sua composição, enquanto a série RC é constituída de cal. As argamassas R01, R02 e R03 têm em seu traço cimento:resíduo:areia e aditivo plastificante.

4.3.1. Ensaio de consistência (*flow table*)

O ensaio de consistência seguiu a NBR 13276 (ABNT, 2016). Devido a necessidade de a argamassa aplicada pelo sistema de projeção possuir uma maior fluidez, este tópico seguiu as recomendações de ensaio, entretanto o limite imposto pela norma não foi empregado. Sendo assim, o índice de consistência foi mantido em 310 ± 5 mm, uma vez que esse foi o valor obtido na argamassa de referência, F01, e o que possibilitaria a sua projeção. Logo, todas as argamassas produzidas apresentam essa mesma característica.

Por meio da observação da Tabela 6, percebeu-se que a argamassa que precisou de menos água para se manter na faixa de trabalhabilidade proposta foi o traço R01, composto de 100% de substituição de resíduo, enquanto que o RF45, onde a cal hidratada foi substituída pelo filito e 45% da areia, pelo resíduo, foi o que apresentou essa relação mais elevada.

Entre os traços compostos apenas por filito, não houve significativa diferença na relação água/materiais secos entre os cinco propostos, sendo o traço de referência, F01, o que apresentou maior fator e o F04, o menor. Para a série constituída de cal hidratada e filito, com o resíduo substituindo parcialmente a areia, na medida em que a areia era substituída, o teor de água aumentava. Essa ocorrência pode ser explicada pelas características granulares do resíduo apresentarem uma maior área superficial quando comparado com a areia.

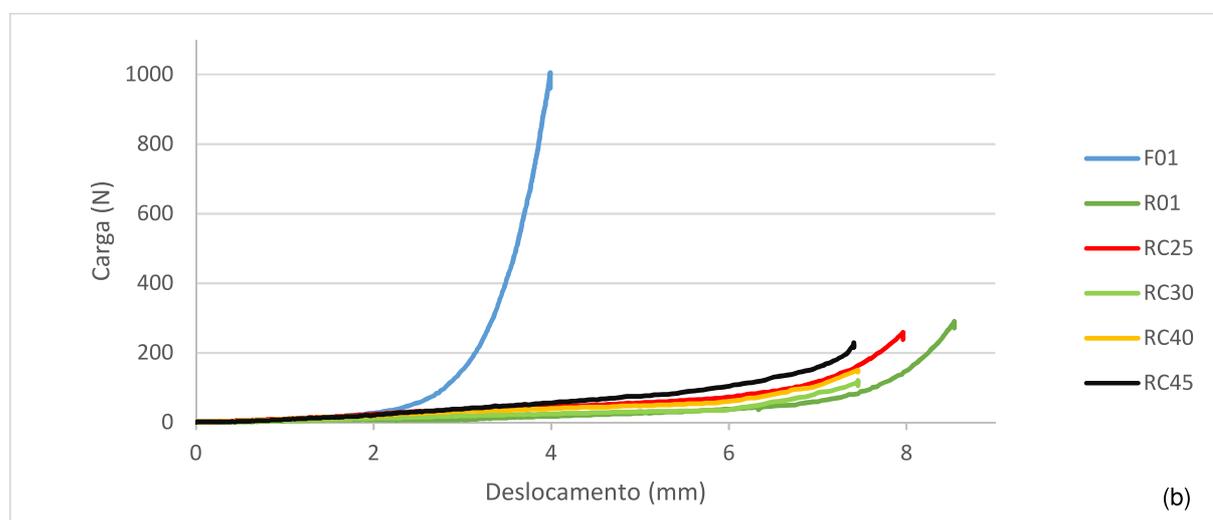
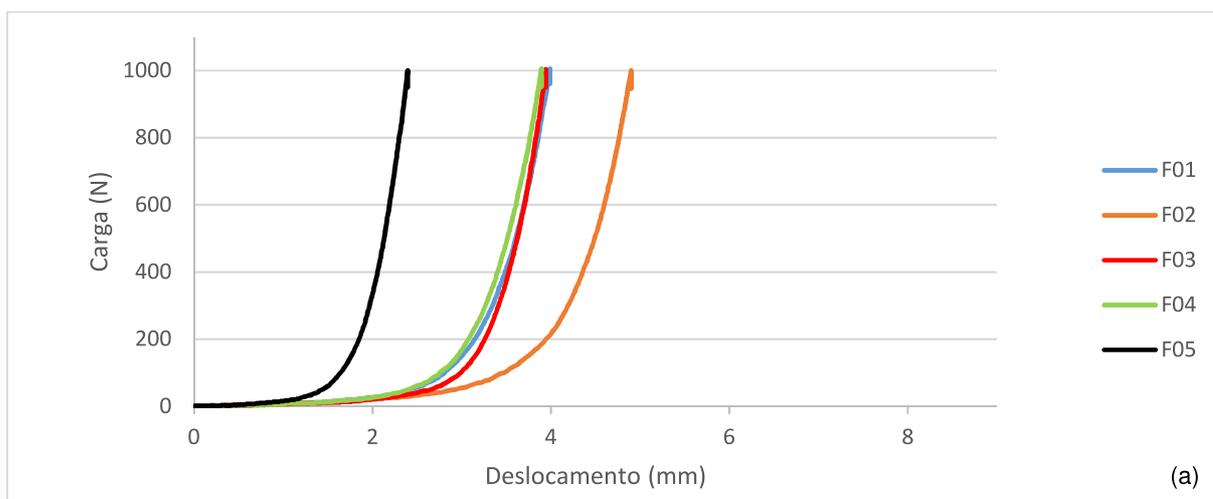
Quando comparamos o traço RC45 com o RF45, onde a única diferença era que o RC era composto de cal hidratada e o RF, composto de filito, foi possível perceber que a troca da cal hidratada pelo filito resultou em um aumento na quantidade de água, de aproximadamente, 13,89%.

É importante ressaltar que, com exceção da F01 e F02, as argamassas das séries F e R tiveram incorporação de aditivo plastificante em diferentes proporções,

de 1,5% e, variando de 1,3% a 1%, em relação a massa de cimento, respectivamente. Além das características físicas dos componentes da argamassa, a incorporação do aditivo também contribuiu para que, com uma menor quantidade de água, fosse possível chegar a trabalhabilidade proposta.

4.3.2. Squeeze Flow

O procedimento do ensaio seguiu as recomendações da NBR 15829 (ABNT, 2010), e consistiu em comprimir uma amostra cilíndrica de argamassa no estado fresco entre duas placas paralelas. Como a compressão foi aplicada pelo disco ou placa superior, esta tinha o mesmo diâmetro inicial da amostra, e para permitir que a argamassa se espalhasse, o disco ou placa inferior, teve aproximadamente duas vezes o diâmetro inicial. O ensaio foi realizado em duas velocidades: 0,1 mm/s e 3 mm/s, denominadas de velocidade lenta e rápida, respectivamente. O ensaio era encerrado quando a força aplicada atingisse 1000 N ou para um deslocamento limite de 9 mm. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 42 e Figura 43.



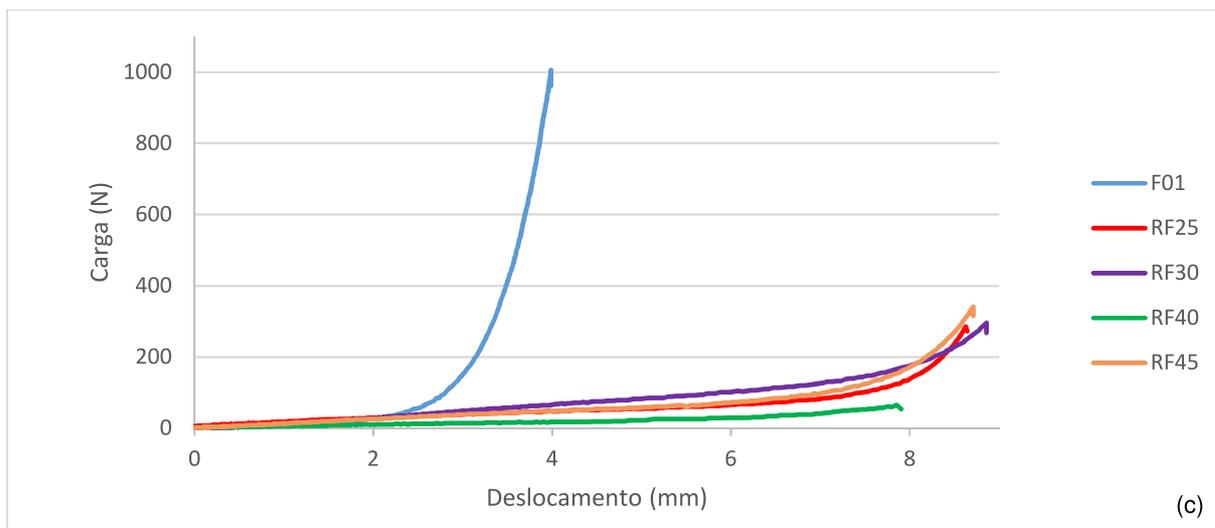
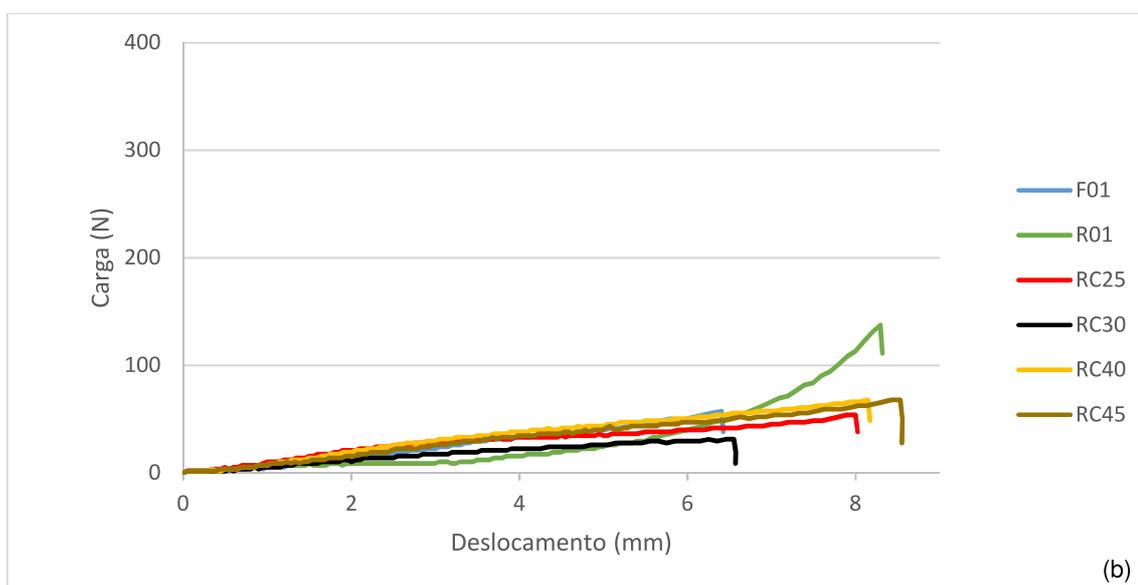
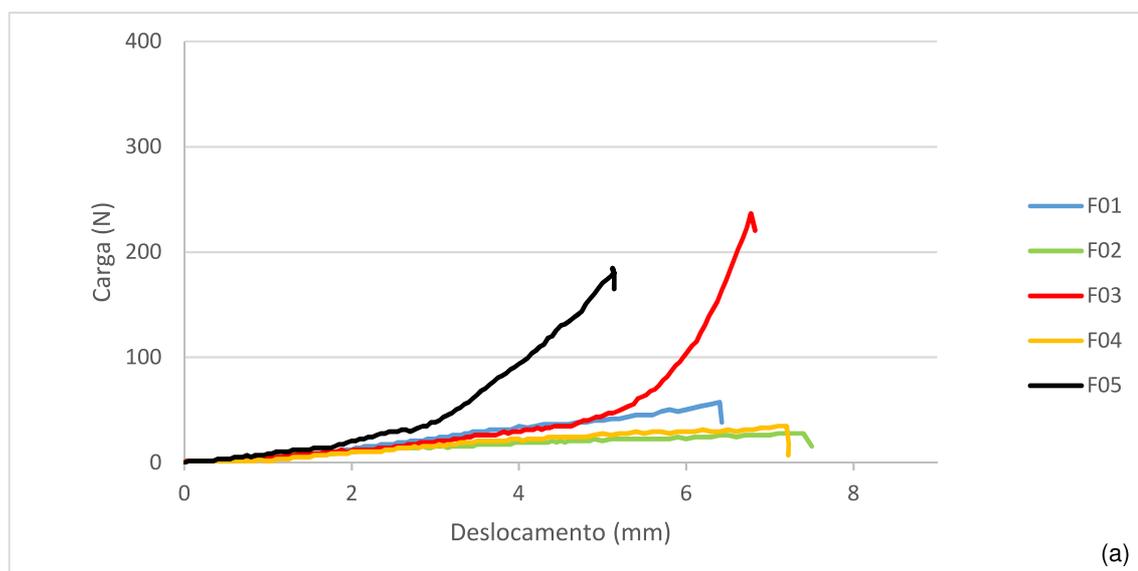


Figura 42 - Curva carga x deslocamento na velocidade lenta (0,1 mm/s): (a) série F e F01; (b) série RC, R e F01 e (c) série RF e F01.

Fonte: Autora, 2020.



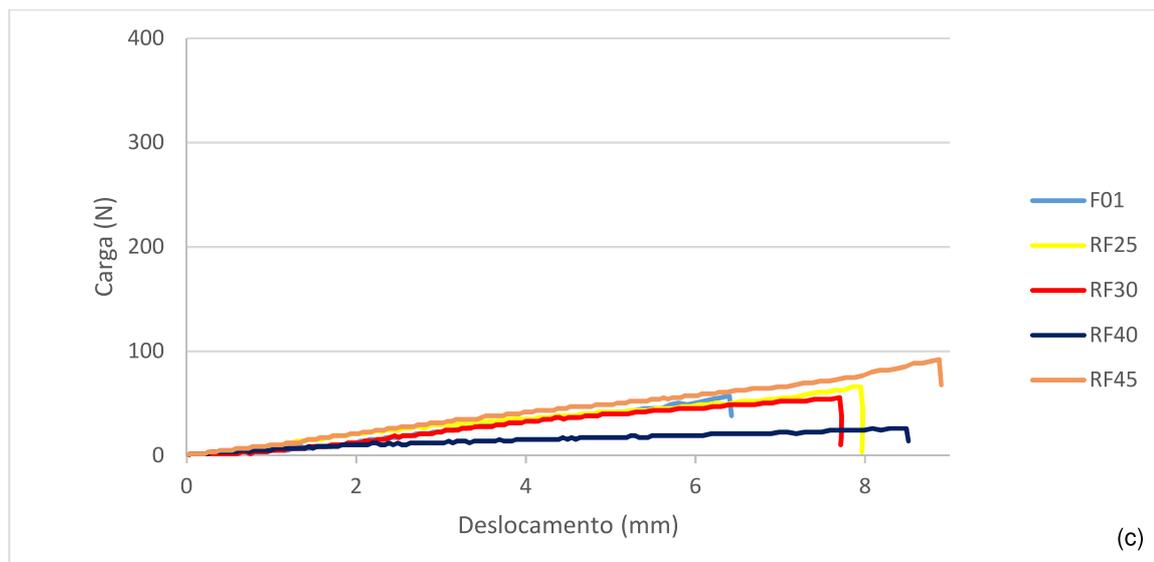


Figura 43 - Curva carga x deslocamento na velocidade rápida (3 mm/s): (a) série F e F01; (b) série RC, R e F01 e (c) série RF e F01.

Fonte: Autora, 2020.

A partir do gráfico típico da Figura 26 e analisando a Figura 42, que mostra os resultados encontrados para os traços estudados na velocidade lenta, foi possível dizer que a região I é pequena, podendo ser considerada desprezível em todos os traços, quando comparada com a região II. A região III, caracterizada pelo aumento da carga de forma expressiva para que o deslocamento continue ocorrendo, só foi observada nos traços da série F, na Figura 42a.

Ainda nesta figura, analisando as argamassas com filito, observou-se que a F01, F03 e F04 possuem curvas praticamente idênticas, enquanto que a F05 apresenta pequena região II quando comparada com os outros traços dessa série. Sabendo que argamassas onde essa região é predominante possuem uma melhor trabalhabilidade, a F05 pode ser considerada a menos trabalhável, tendo em vista que para continuar deformando, mesmo que pouco, é necessário que haja um aumento significativo de carga. Também é possível concluir que a F02 é a mais trabalhável entre os traços da série F, isso porque, para uma mesma força, ela obteve uma maior deformação. Agora, quando as argamassas da série F são comparadas com a R01, Figura 42b, nota-se que a incorporação do resíduo aumentou de maneira significativa a trabalhabilidade do material, observando-se predominância da região II, além de necessitar de menos carga para atingir maiores deformações.

Observando a Figura 42b e Figura 42c, as argamassas das séries RC e RF apresentaram gráficos bastante parecidos, e se o relacionarmos com a R01, percebemos que esses três tipos de argamassa possuem gráficos com a região II

predominante, o que significa que deformam com aplicação de pouca carga. Comparando as Figura 42b e Figura 42c com a Figura 42a, pode-se dizer que as argamassas das séries RC e RF são mais trabalháveis que da série F. Como a argamassa F01 era a referência para projetabilidade, aquelas que possuíssem menor trabalhabilidade, de acordo com os gráficos obtidos nesse ensaio, poderiam ter problemas para serem projetadas, sendo a F05 a única argamassa que se encontra nessa situação.

Analisando a Figura 43, para ensaio realizado na velocidade 3 mm/s, percebeu-se que houve uma diferença menor entre o comportamento das argamassas de todas as séries, observando-se grande similaridade entre os gráficos das séries RC, RF e R01. Além disso, elas apresentaram maiores deformações para menores cargas, quando comparada com a Figura 42. Esse fato é explicado por Cardoso *et al.* (2010) visto que em menores velocidades existe uma tendência maior à segregação, então a pasta vai se deslocar radialmente enquanto os agregados vão se concentrar na parte central, e as cargas nessa região serão mais elevadas. Em velocidades mais rápidas a pasta não tem tempo de deslocar grandes distâncias, logo, o sistema vai se comportar como fluido homogêneo, necessitando de menos carga para se deformar.

Comparando as Figura 43a, Figura 43b e Figura 43c, percebeu-se que mesmo em velocidades mais elevadas algumas argamassas da série F (F03 e F05) necessitaram de cargas um pouco mais elevadas para chegarem a mesma deformação que as outras argamassas da série.

Assim, pode-se concluir que as argamassas com filito apresentaram menor trabalhabilidade quando comparadas com os traços contendo filito e resíduo, cal e resíduo e apenas resíduo. Do ponto de vista da argamassa de referência F01, os traços menos trabalháveis foram o F03 e F05 para velocidade rápida, e F05 para velocidade mais lenta, o que indica que essas duas argamassas podem ter problemas no momento da aplicação, apesar de no ensaio de *flow table* sua consistência estar de acordo com a referência.

4.3.3. Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado

O ensaio foi realizado seguindo o procedimento descrito pela NBR 13278 (ABNT, 2005), os cálculos utilizaram as expressões (1) e (3), e os resultados obtidos foram apresentados na Tabela 6.

Analisando a densidade de massa no estado fresco das argamassas, observou-se que as da série RC, compostas de cal e com substituição parcial da areia pelo resíduo de rocha, possuem as menores densidades devido a massa específica da cal ser a menor entre os três materiais estudados. Além disso, na medida em que a areia foi substituída pelo resíduo de rocha ornamental, esse parâmetro também tendeu a decair, visto que a massa específica da areia utilizada foi de $2,73 \text{ g/cm}^3$ e a do resíduo de rocha, de $2,48 \text{ g/cm}^3$. As argamassas da série F apresentaram a maior densidade de massa, pois o filito possui a maior densidade entre os três materiais analisados.

Assim, de maneira geral, é possível concluir que a substituição da cal hidratada pelo resíduo de rocha ornamental e pelo filito levou ao aumento da densidade de massa no estado fresco das argamassas estudadas. Esse aumento não apresentou prejuízos significativos, visto que esta propriedade apresenta baixa importância no desempenho das argamassas, de acordo com Mattana *et al.* (2012), apesar de ter relevância para o método de projeção por “canequinha”.

De acordo com Ribeiro *et al.* (2016), a densidade de massa esperada para argamassas confeccionadas com filito estava na faixa de $2,01 \text{ g/cm}^3$, por isso, de acordo com esses autores, todas as argamassas constituídas desse material estão dentro do valor esperado. Segundo Mattana *et al.* (2012), a faixa de densidade de massa no estado fresco deveria estar entre $1,4$ a $2,0 \text{ g/cm}^3$, e com exceção da F03 e F04, que ficaram um pouco acima desse valor, com $2,042 \text{ g/cm}^3$ e $2,008 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, todas as outras argamassas estudadas estão dentro do valor esperado. Comparando com o valor encontrado para a argamassa de cal hidratada, de $1,643 \text{ g/cm}^3$, todas as séries apresentaram esse parâmetro mais elevado, o que já era esperado devido aos valores mais elevados da massa específica do resíduo e do filito.

Sabe-se que quanto maior o teor de ar incorporado na argamassa mais trabalhável ela será (WOJCIECH e HUBERT, 2015). Com esse pensamento, pode-se concluir que a argamassa R01 foi a mais trabalhável e a RF25, a menos, com 9,35% e 4,11% de teor de ar incorporado, respectivamente. Observando-se as séries RC e RF, percebeu-se que a incorporação do filito diminuiu o teor de ar incorporado em relação aos valores obtidos com argamassas produzidas com cal hidratada e que, na

proporção em que o resíduo de rocha era incorporado substituindo a areia, o teor de ar tendia a aumentar.

A diminuição do teor de ar incorporado pela incorporação do filito em detrimento da cal hidratada era esperado, uma vez que nos trabalhos de Ribeiro *et al.* (2016), esses autores encontraram valores na faixa de 2% para argamassas de filito. Assim, os valores encontrados estão acima dos valores de referência, o que nesse caso é bom, uma vez que para argamassas projetadas é fundamental que a mistura seja mais fluida e trabalhável.

Comparando os valores encontrados com os de referência da Tabela 3, vê-se alguns dos resultados obtidos estão acima dos valores de referência, o que aponta que as argamassas em questão são mais trabalháveis. Contudo, os parâmetros de resistência devem ser verificados, uma vez que, em geral, argamassas com altos teores de ar incorporado apresentam baixa resistência mecânica.

4.3.4. Retenção de água

Seguindo as recomendações da NBR 13277 (ABNT, 2005), e empregando as equações (04) e (05), chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 6. Essa propriedade é de extrema importância, uma vez que argamassas com deficiência nessa propriedade, geralmente, perdem muita água para o substrato, levando a problemas de resistência devido à sua escassez para a hidratação do cimento.

Por meio dos valores obtidos, notou-se que o traço F05, que possui maior teor de filito em sua composição, apresentou o maior valor de retenção de água entre os traços estudados, chegando à 97,143%, valor superior aos encontrados por Ribeiro *et al.* (2016), de 92%. De maneira geral, as argamassas com filito, tanto as da série F quanto da série RF, obtiveram bons valores para esse parâmetro, como foi constatado pelos estudos de Silva *et al.* (2006), que apontam a boa capacidade de armazenamento de água do material, já que de 57,6% de sua porosidade total, 42,3% fazem parte da microporosidade. Essa classe de poro após ser saturada com água, a retém contra a gravidade, fazendo com que esses microporos sejam responsáveis pela retenção de água, o que é interessante para o emprego desse material na argamassa (REINERT e REICHERT, 2006).

Nos estudos de Calmon *et al.* (1997), esses autores encontraram valores na retenção de água acima de 80% para argamassas com substituição parcial do resíduo

de rocha pela cal, estando os resultados dessa dissertação, entre 91% e 95%, coerentes com os resultados obtidos por esses autores.

Comparando os resultados obtidos com os valores da bibliografia mostrados na Tabela 3, onde o valor mínimo para a retenção de água era de 75% segundo Mattana *et al.* (2012), percebe-se que esse parâmetro foi superior para os traços ensaiados, que estão na faixa dos 90%, enquanto que os estudos de Gomes e Neves (2002), atingiram valores de 97%, ficando mais próximo aos valores encontrados, assim como o obtido para a cal hidratada, de 98% de retenção de água.

4.4. Parâmetros tecnológicos no estado endurecido

Para os ensaios realizados no estado endurecido, diferentemente dos realizados no estado fresco, foi feita uma análise de variância (ANOVA) por delineamento inteiramente casualizado (DIC) com nível de confiança de 95% ($\rho \leq 0,05$). O método de Tukey foi usado para verificar as discordâncias encontradas nos traços depois da análise feita pela ANOVA. A utilização desse método estatístico foi necessária em decorrência de a norma brasileira não determinar a necessidade de sua aplicação nos dois estados da argamassa, bem como ao fato dessa análise ser aplicada somente no estado endurecido na bibliografia internacional.

Posteriormente, foi determinado o coeficiente de variação (CV) que indica o quanto os resultados obtidos estavam homogêneos, assim quanto mais próximo de 1%, mais precisos são os dados.

4.4.1. Densidade de massa no estado endurecido

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido foi realizado de acordo com a NBR 13280 (ABNT, 2005), empregando as equações (06) e (07) para chegar aos resultados dos traços analisados.

A Figura 44 apresenta os valores encontrados para as densidades de massa, a Tabela 7 e a Tabela 8 mostram, respectivamente, a ANOVA e o teste de Tukey. Para a ANOVA foram empregadas três repetições, correspondendo a quantidade de corpo de prova para cada traço, e 14 tratamentos, equivalente à soma dos traços F, RC, RF e R, totalizando 42 amostras experimentais. Os valores do F_{tab} e q_{tab} usados para o cálculo do DMS (diferença mínima significativa) se encontram no Anexo I.

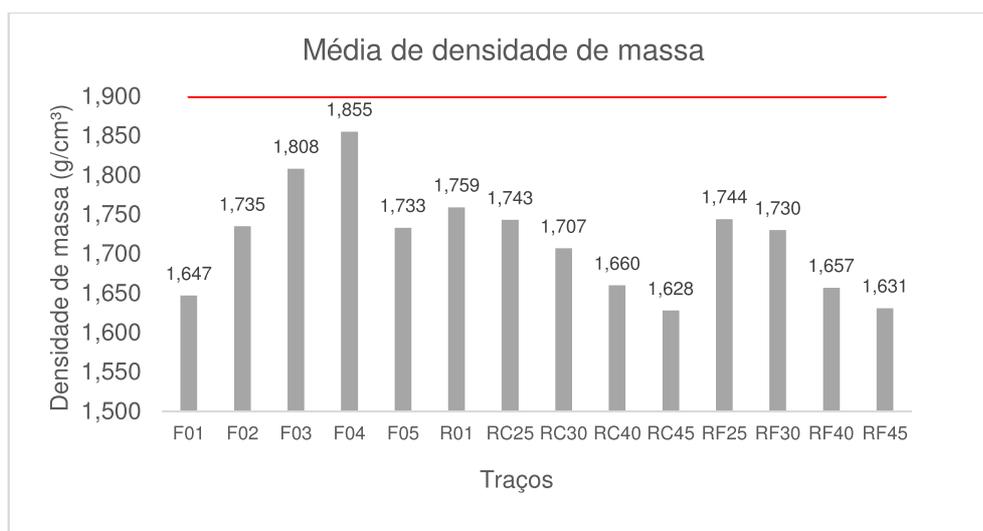


Figura 44 - Gráfico de média de densidade de massa aos 28 dias. Linha vermelha mostra valor máximo de acordo com Mattana *et al.* (2012).

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 7 - ANOVA para DIC da densidade de massa no estado endurecido ($p \leq 0,05$).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamento	13	0,17525384	0,013481065	6,930599764	2,09*
Resíduo	28	0,054464234	0,001945151	-	-
Total	41	0,229718075	-	-	-
CV%		2,57			

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 8 - Teste de Tukey para contraste de médias da densidade de massa no estado endurecido ($p \leq 0,05$).

Tratamento	Média (g/cm³)	Tukey
RC45	1,628	A
RF45	1,631	A
F01	1,647	A
RF40	1,657	A
RC40	1,660	A
RC30	1,707	AB
RF30	1,730	ABC
F05	1,733	ABC
F02	1,735	ABC
RC25	1,743	ABC
RF25	1,744	ABC
R01	1,759	ABC
F03	1,808	BC
F04	1,855	C
DMS		0,132919

Fonte: Autora, 2020.

Analisando os resultados mostrados na Tabela 7 e na Tabela 8, é possível apontar a existência de diferença significativa entre os traços estudados, ou seja, dos 14 traços avaliados, pelo menos dois são estatisticamente distintos. Um outro dado importante é o coeficiente de variação do ensaio, que foi de 2,57%, mostrando o alto grau de confiabilidade para os resultados alcançados.

Para avaliar quais resultados eram iguais e quais eram diferentes, utilizou-se o método de Tukey, chegando à conclusão de que os traços com menores densidades foram RC45, RF45, F01, RF40 e RC40, variando de 1,628 g/cm³ à 1,660 g/cm³. Já os traços com maior densidade foram R01, F03 e F04, variando de 1,759 g/cm³ à 1,855 g/cm³, como apresenta a Figura 44.

As argamassas das séries RC e RF, em suas devidas proporções de resíduo substituindo a areia, não apresentaram diferença significativa entre elas, levando a crer que a incorporação do filito no lugar da cal hidratada não influenciou nessa propriedade. Isso pode ser explicado pelo fato do filito, apesar de ter maior densidade dos grãos, o que levaria a uma argamassa mais pesada, ter também uma maior porcentagem de grão de maior diâmetro.

Houve uma variação entre os valores obtidos para as argamassas contendo filito, o que pode ser explicado pelo teor de água e pelo traço, onde houve diferenciação de quantidade de filito e areia. O traço F04, com maior densidade, é o que possui menor porcentagem de filito entre os traços da série F, seguido pelo F03 e F05. Uma possível explicação é a quantidade de areia que varia nessas argamassas, podendo-se dizer que quanto maior os teores de areia, maior a densidade de massa, visto que esses materiais possuem a maior densidade real dos grãos.

É importante destacar que é mais interessante empregar uma argamassa que apresenta valores de densidade no estado endurecido baixos, já que essa característica faz com que o peso próprio da edificação diminua de forma significativa, como afirmam Mattana *et al.* (2012). Ao relacionar os resultados encontrados com o valor obtido para a argamassa de cal hidratada, de 1,44 g/cm³, observou-se que todos os traços desenvolvidos estão acima desse valor. Comparando os valores obtidos nessa dissertação, que estão entre 1,625 g/cm³ e 1,855 g/cm³, com aqueles

mostrados na Tabela 3, que variam de 1,20 g/cm³ a 1,9 g/cm³, pode-se dizer que os resultados encontrados se mostram satisfatórios.

4.4.2. Resistência à tração na flexão

Esse parâmetro foi determinado seguindo as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005), usando uma prensa universal de ensaios da EMIC e os resultados, determinados pela expressão (08), apresentados pela Figura 45. A ANOVA e o teste de Tukey deste parâmetro são mostrados na Tabela 9 e na Tabela 10, respectivamente. Assim como no ensaio de densidade de massa no estado endurecido, foram utilizados 3 corpos de prova, como recomenda a norma técnica, totalizando 3 repetições, 14 tratamentos e 42 amostras.

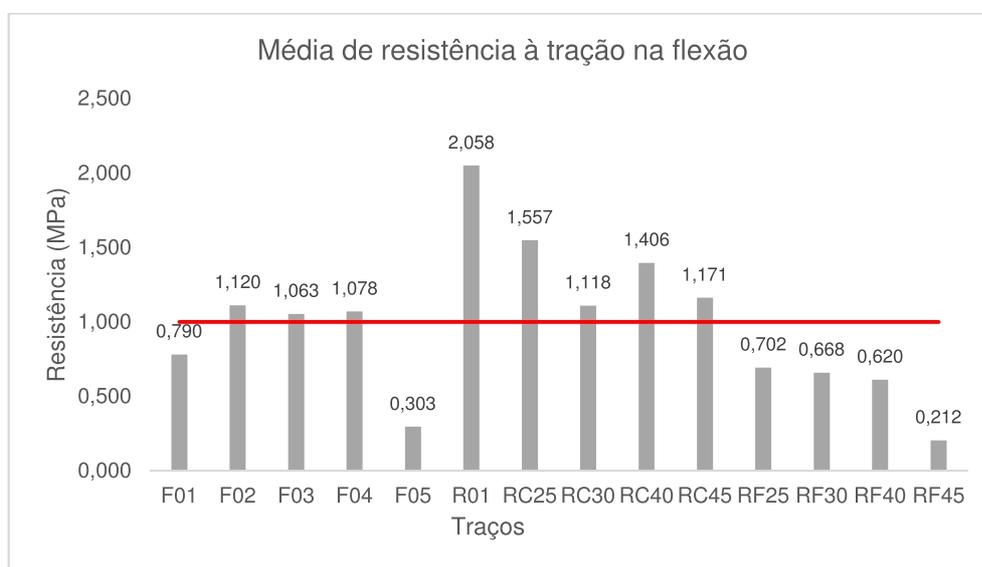


Figura 45 - Gráfico de média de resistência à tração na flexão aos 28 dias. Linha vermelha mostra valor mínimo de acordo com Mattana *et al.* (2012).

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 9 - ANOVA para DIC da resistência à tração na flexão ($p \leq 0,05$).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamento	13	9,465581767	0,72812167	10,4131301	2,09*
Resíduo	28	1,957855772	0,06992342	-	-
Total	41	11,42343754	-	-	-
CV%		26,69			

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 10 - Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à tração na flexão ($p \leq 0,05$).

Tratamento	Média (MPa)	Tukey
RF45	0,212	A
F05	0,303	AB
RF40	0,620	ABC
RF30	0,668	ABC
RF25	0,702	ABC
F01	0,791	ABCD
F03	1,063	BCD
F04	1,078	BCD
RC30	1,118	CD
F02	1,120	CD
RC45	1,171	CD
RC40	1,406	CDE
RC25	1,557	DE
R01	2,058	E
DMS		0,796932

Fonte: Autora, 2020.

Observando a Tabela 10, percebeu-se que existem no mínimo três médias de resistências analisadas que diferem estatisticamente entre si. Ainda nessa tabela observou-se que as argamassas da série RF não possuem diferença estatística, assim como as da série RC, entretanto as argamassas com filito em sua composição são estatisticamente distintas. A argamassa com o resíduo de rocha ornamental foi o que apresentou melhor resistência à tração na flexão, enquanto o RF45, obteve a resistência mais baixa.

A argamassa de cal hidratada para comparação alcançou valor médio de resistência à tração na flexão de 1,382 MPa, 74,71% superior à F01, argamassa de referência. Percebeu-se que a substituição da areia pelo resíduo junto com a incorporação do filito diminuiu de forma significativa esse parâmetro, o que não aconteceu quando o resíduo foi colocado no lugar da cal ou substituindo parte da areia em argamassas com cal hidratada na sua composição. Assim, não é recomendado que seja feita a substituição parcial da areia pelo resíduo concomitantemente com a da cal pelo filito.

Ainda sobre a série RC e RF, a incorporação do filito contribuiu para a diminuição da resistência. Justificando a diminuição da resistência para porcentagens mais elevadas do resíduo sendo empregado no lugar da areia, nos estudos de Singh

et al. (2015), eles observaram o mesmo comportamento e chegaram à conclusão de que após atingido o valor ótimo de substituição, momento em que o material age como fíler e preenche os vazios, ele passa a aumentar a área superficial e, conseqüentemente, demandar um aumento na quantidade de pasta. Entretanto, como a quantidade de cimento permanece constante para todas as proporções, existem grãos que não estão envolvidos pela pasta, o que leva ao aumento do índice de vazios e diminuição da resistência.

Comparando as resistências da série F com os valores obtidos por Ribeiro *et al.* (2016), constata-se que, com exceção da F05, todas as argamassas ficaram acima do valor encontrado por esses autores, de 0,52 MPa, assim como dos resultados encontrados para a argamassa de referência. A baixa resistência do traço F05 pode ser resultado da existência de maior quantidade de filito, e uma elevada proporção de areia em sua composição.

O traço que apresentou melhor resultado foi composto de resíduo de rocha, cimento e areia. Valores médios de 2,058 MPa para resistência à tração na flexão foram aferidos, contudo, estatisticamente falando, não houve diferença entre esse traço com substituição da cal pelo resíduo de rocha e o traço de cal hidratada.

Analisando os valores apresentados na Tabela 3, onde os resultados desse parâmetro ficam na faixa de 1,0 MPa a 4,5 MPa de acordo com Mattana *et al.* (2012), seis dos quatorze traços estudados estão abaixo desta faixa, como é possível observar na Figura 45.

4.4.3. Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão seguiu os procedimentos da NBR 13279 (ABNT, 2005), sendo realizado em uma prensa universal da marca EMIC e os dados desse ensaio foram obtidos por meio da expressão (09). Os valores encontram-se na Figura 46, e as análises estatísticas na Tabela 11 e na Tabela 12, ANOVA e Tukey, respectivamente. Da mesma maneira que o ensaio de resistência à flexão, foram usadas 3 repetições e 14 traços diferentes, resultando em 42 amostras.

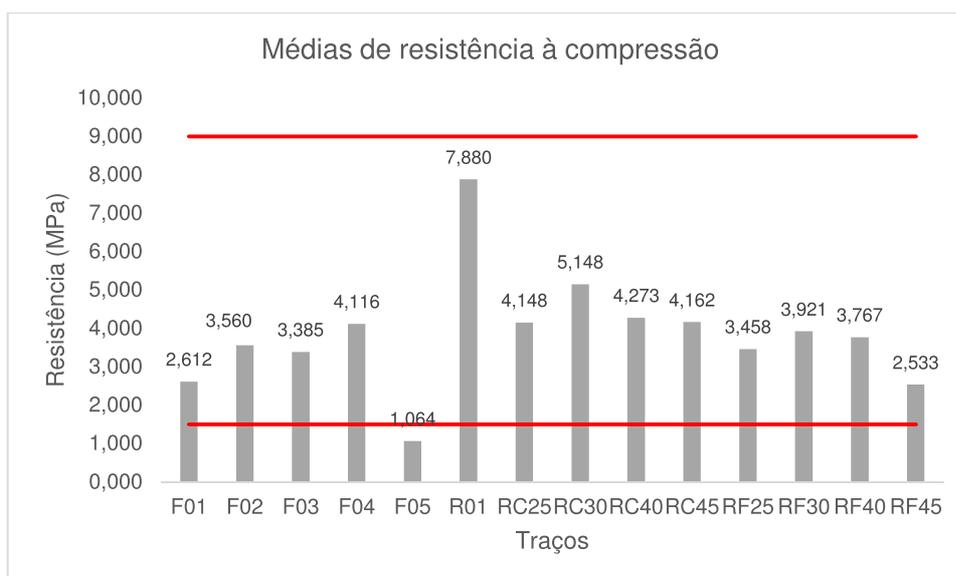


Figura 46 - Gráfico das médias de resistência à compressão aos 28 dias. Linha vermelha mostra valor mínimo e máximo de acordo com Mattana *et al.* (2012).

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 11 - ANOVA para DIC da resistência à compressão ($p \leq 0,05$).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamento	13	89,57000258	6,8900002	20,3161702	2,09*
Resíduo	28	9,495884478	0,33913873	-	-
Total	41	99,06588706	-	-	-
CV%		15,09			

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 12 - Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à compressão ($p \leq 0,05$).

Tratamento	Média (MPa)	Tukey
F05	1,064	A
RF45	2,533	AB
F01	2,612	AB
F03	3,385	B
RF25	3,458	BC
F02	3,560	BC
RF40	3,767	BC
RF30	3,921	BC
F04	4,116	BC
RC25	4,148	BC
RC45	4,162	BC
RC40	4,273	BC
RC30	5,148	C
R01	7,880	D
DMS	1,741637744	

Fonte: Autora, 2020.

Por meio da análise estatística da ANOVA, notou-se que os resultados eram significativos, e o teste de Tukey mostrou que o traço R01 foi o que obteve o melhor resultado de resistência à compressão, representado pela letra D, não sendo estatisticamente igual a nenhum dos outros. Ele também ficou acima do valor da argamassa de referência, F01, e da argamassa de cal, que alcançou 5,357 MPa.

Os traços da série RC foram estatisticamente iguais ao da RF, com exceção do RF45, que juntamente com o F05 e F01, apresentaram os menores resultados, de 2,533 MPa, 1,064 MPa e 2,612 MPa, respectivamente. O coeficiente de variação dessa característica foi de 15,09%, mostrando que houve dispersão nas amostras.

Assim como no ensaio de tração na flexão, as argamassas da série F e RF apresentaram os menores resultados. Já nas séries RF, além da substituição da cal houve também uma substituição parcial do resíduo pela areia, e ao atingir o valor ápice da substituição, o resíduo que antes estava agindo como fíler passa a aumentar a área superficial, que por sua vez vai necessitar de maior quantidade de pasta, mas como a quantidade de cimento permaneceu constante, haverá falta de pasta, o que contribui para o aumento do volume de vazios juntamente com os deixados pelo filito.

Comparando os resultados obtidos no trabalho de Ribeiro *et al.* (2016), que realizaram estudos com argamassas de cimento, filito e areia e obtiveram valores de 0,83 MPa, é perceptível que a menor das resistências alcançadas nessa dissertação, pelo F05 de 1,064 MPa, foi superior ao encontrado no trabalho desses autores. Relacionando os dados encontrados com os valores da Tabela 3, de acordo com Mattana *et al.* (2012), que determina uma faixa de resistência em 1,5 MPa a 9 MPa, apenas a F05 está abaixo, como é fácil de visualizar na Figura 46.

4.4.4. Absorção de água por imersão e índice de vazios

Apesar de não ser usual que os métodos experimentais empreguem o ensaio de absorção de água por imersão, ele pode ser considerado de grande relevância uma vez que analisa, mesmo que a norma técnica simule situações extremas, a exposição da argamassa à chuva, umidade excessiva, ação proveniente de lavagem e limpeza do revestimento. Como a norma para absorção de água por imersão e índice de vazios é a mesma, NBR 9778 (ABNT, 2009), é mais comum que seja avaliado o índice de vazios, sendo esses dois parâmetros equivalentes um ao outro.

Para o ensaio de absorção de água foram utilizados três corpos de prova para cada traço, empregando a equação (10) para chegar aos dados mostrados na Figura 47. A análise de variância e o teste de Tukey são apresentados na Tabela 13 e na Tabela 14. O coeficiente de variação foi de 2,29%, considerado de alta precisão.

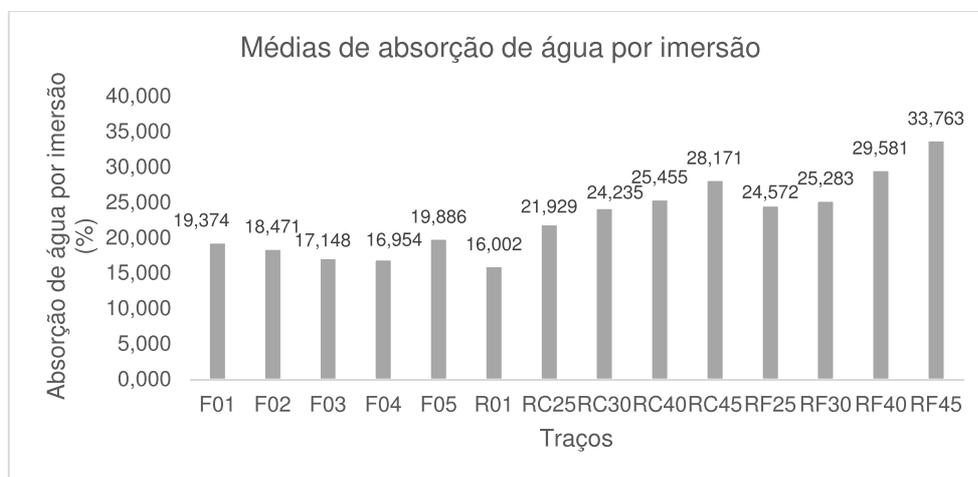


Figura 47 - Gráfico das médias da absorção de água por imersão.

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 13 - ANOVA para DIC da absorção de água por imersão ($p \leq 0,05$).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamento	13	1095,861	84,29701	306,7059	2,09*
Resíduo	28	7,695698	0,274846	-	-
Total	41	1103,557	-	-	-
CV%		2,29			

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 14 - Teste de Tukey para contraste de médias da absorção de água por imersão ($p \leq 0,05$).

Tratamento	Média (%)	Tukey
R01	16,002	A
F04	16,953	AB
F03	17,3148	AB
F02	18,471	BC
F01	19,374	C
F05	19,886	C
RC25	21,929	D
RC30	24,235	E
RF25	24,572	E
RF30	25,283	E
RC40	25,455	E
RC45	28,171	F
RF40	29,581	F
RF45	33,763	G
DMS		1,567885

Fonte: Autora, 2020.

Observando a Tabela 13 e a Tabela 14, notou-se que os tratamentos realizados são significativos e que, ao menos, quatro traços são estatisticamente distintos. É possível separar os resultados em dois grupos, o primeiro deles agrupados pela letra A, que apresentaram os menores valores de absorção de água, composto pelos traços R01, F04 e F03, enquanto que os grupos F e G apresentaram os maiores valores, constituído pelos traços RC45, RF 40 e RF45.

Comparando os resultados encontrados com o traço de cal hidratada, verificou-se que mesmo o traço que apresentou o menor valor de absorção de água estudado nessa dissertação, de 16,002% ficou acima do valor encontrado para essa argamassa, de 15,350%. Os resultados dos traços da série F foram comparados com aqueles obtidos por Riberio *et al.* (2016), que para as argamassas compostas por filito chegaram à valores de 17,4%, próximo aos dados encontrados nos traços estudados.

Ao substituir a cal pelo filito houve uma mudança significativa na absorção de água por imersão. No gráfico da Figura 47, identificou-se que, na medida em que aumentava a proporção de resíduo e diminuía a quantidade de areia, tanto nas séries RF quanto RC, havia um aumento na absorção de água, isso porque em altas proporções, o resíduo gerou o aumento significativo da área superficial no momento em que deixou de agir com fíler, e com isso requereu maiores quantidades de pasta.

Contudo, ao incorporar o resíduo de rocha no lugar da cal hidratada, não houve mudança significativa nessa propriedade, tendo em vista que o material possui granulometria próxima ao do que foi substituído, e partículas uniformes e arredondadas, de acordo com Vardhan *et al.* (2015), o que melhora o empacotamento, reduzindo esse parâmetro.

A Figura 48, Tabela 15 e Tabela 16 apresentam os parâmetros encontrados para o índice de vazios dos traços estudados, assim como sua análise estatística, cujo coeficiente de variação encontrado foi de 1,78%, mostrando que o ensaio tem alto grau de confiabilidade, assim como o de absorção de água por imersão.

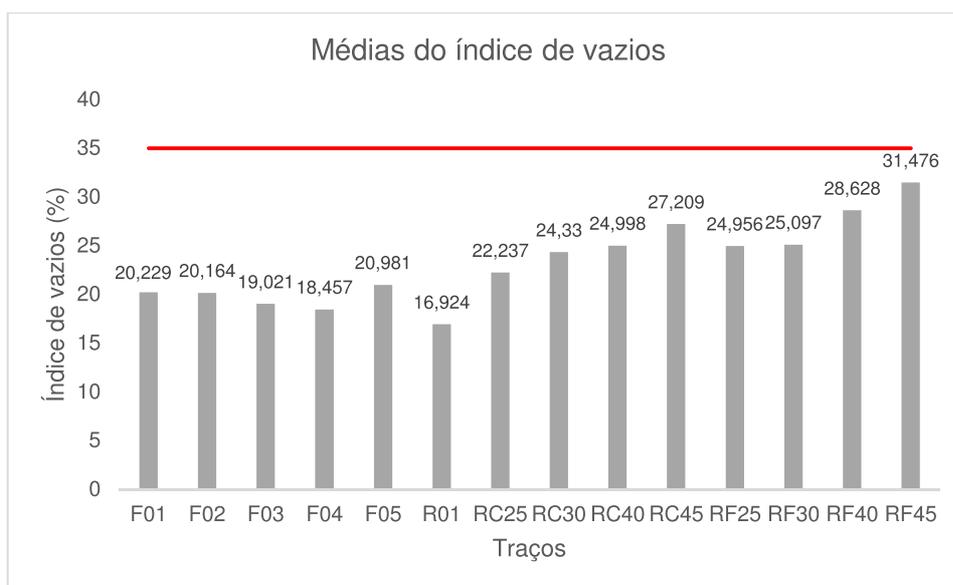


Figura 48 - Gráfico das médias de índice de vazios. Linha vermelha mostra valor máximo de acordo com Mattana *et al.* (2012).

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 15 - ANOVA para DIC do índice de vazios ($p \leq 0,05$).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamento	13	685,3698	52,72075	309,1679	2,09*
Resíduo	28	4,77469	0,170525	-	-
Total	41	690,1445	-	-	-
CV%		1,78			

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 16 - Teste de Tukey para contraste de médias do índice de vazios ($p \leq 0,05$).

Tratamento	Média (%)	Tukey
R01	16,924	A
F04	18,457	B
F03	19,021	BC
F02	20,164	CD
F01	20,229	CD
F05	20,981	D
RC25	22,237	E
RC30	24,330	F
RF25	24,956	F
RC40	24,998	F
RF30	25,097	F
RC45	27,209	G
RF40	28,628	H
RF45	31,476	I
DMS		1,234988

Fonte: Autora, 2020.

Conforme a Tabela 15 e a Tabela 16, que apresentam os testes estatísticos, é possível observar que houve diferença significativa entre as amostras, e que seis deles não são estatisticamente iguais a nenhuma das outras. A amostra que apresentou o maior índice de vazios foi a RF45, com 31,476% e a R01, que obteve menor resultando, alcançando valores de 16,924%. Os mesmos resultados foram encontrados para o parâmetro de absorção de água por imersão.

Assim, é possível dizer que a absorção de água por imersão e o índice de vazios estão interligados, estando associados à porosidade total da argamassa, na medida em que o primeiro tende a aumentar, o mesmo ocorre com o índice de vazios. É possível correlacionar também esse último parâmetro com as resistências à tração na flexão e à compressão, uma vez que quanto maior o índice de vazios, menor vai ser a parte da argamassa que está resistindo aos esforços, logo menor será a resistência, o que foi verificado observando a Tabela 10, Tabela 12 e Tabela 16.

Ao incorporar uma maior proporção de resíduo de rocha em substituição à areia, tende a crescer o índice de vazios devido ao aumento da superfície específica do material. Como a quantidade de cimento é constante nesses traços, vai existir um déficit de pasta, que não sendo capaz de envolver todos os grãos e preencher todos os vazios, leva ao aumento desse índice, assim como da absorção de água por imersão e diminuição das resistências mecânicas.

Comparando a Tabela 3 com a Tabela 16, pode-se considerar que os valores de índice de vazios encontrados nessa pesquisa estão abaixo do limite estabelecido nos estudos de Mattana *et al.* (2012), de 35%.

4.4.5. Absorção por capilaridade

Esse procedimento seguiu as recomendações da NBR 15259 (ABNT, 2005), de onde foram retirados dois parâmetros importantes relacionados a absorção de água por capilaridade: o coeficiente de capilaridade, obtido por meio da equação (12) e a absorção de água por capilaridade aos 90 minutos de ensaio, pela expressão (13). Para esse ensaio, foram empregadas 3 amostras de cada traço, totalizando 42 corpos de prova.

Antes de apresentar os resultados referentes a essa propriedade é importante ressaltar que, diferentemente da absorção por imersão, a absorção por capilaridade relaciona-se aos poros que se encontram na superfície do revestimento. Esse

fenômeno ocorre quando um líquido, geralmente a água, se movimenta por tubos ou poros capilares presentes na argamassa, que possuem diâmetros entre 0,01 μm a 10 μm . As moléculas presentes nos poros, que por serem muito finos se comportam como um tubo, atraem as moléculas do líquido que começam a subir e a se alinhar às moléculas do tubo que as atraiu. Assim, cada molécula vai atraindo a outra, no que pode ser chamado de capilaridade ou ação capilar (MARVILA, 2018).

Por meio deste fenômeno é possível compreender e prever a durabilidade dos revestimentos, já que ele é um dos parâmetros de maior importância para essa característica. Isso porque a sucção capilar é um dos meios mais importantes de entrada de agente agressivos e patológicos nos poros da argamassa.

A Figura 49 apresenta os dados médios obtidos para o coeficiente de capilaridade, enquanto a Tabela 17 e a Tabela 18 apresentam, respectivamente, a ANOVA e o método de Tukey. O experimento pode ser caracterizado como confiável em função do coeficiente de variação de 18,55%. Pela análise de variância, nota-se que ao menos duas médias de tratamento são diferentes entre si. Pelo teste de Tukey é possível concluir que todos os traços estudados apresentam desempenho superior ao traço de referência F01.

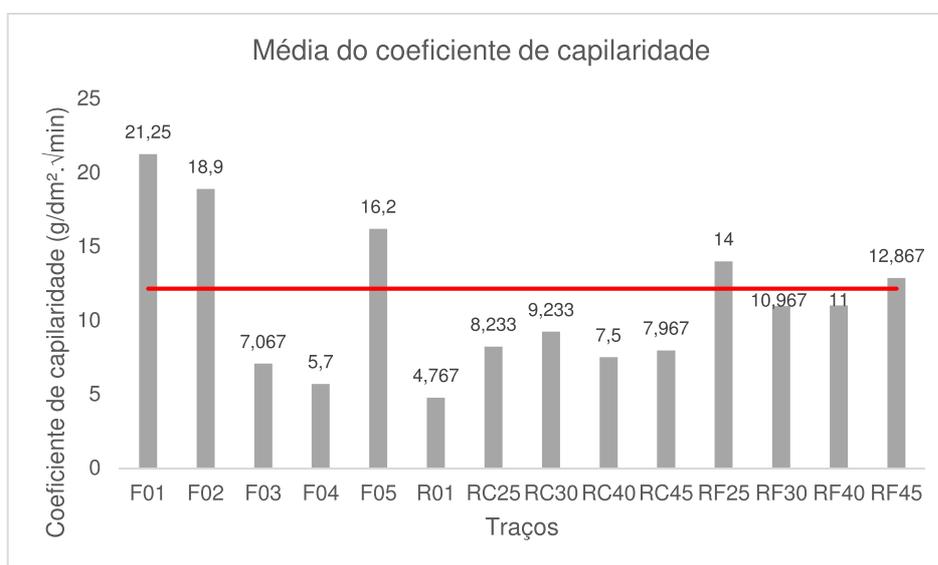


Figura 49 - Gráfico das médias do coeficiente de capilaridade. Linha vermelha mostra valor máximo de acordo com Mattana *et al.* (2012).

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 17 - ANOVA para DIC do coeficiente de capilaridade ($p \leq 0,05$).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamento	13	958,286	73,71431	17,36035	2,09*
Resíduo	28	118,8917	4,246131	-	-
Total	41	1077,178	-	-	-
CV%		18,55			

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 18 - Teste de Tukey para contraste de médias do coeficiente de capilaridade ($p \leq 0,05$).

Tratamento	Média (g/dm ² .√min)	Tukey
R01	4,767	A
F04	5,700	AB
F03	7,067	ABC
RC40	7,500	ABC
RC45	7,967	ABCD
RC25	8,233	ABCD
RC30	9,233	ABCD
RF30	10,967	BCDE
RF40	11,000	BCDE
RF45	12,867	CDEF
RF25	14,000	DEF
F05	16,200	EFG
F02	18,900	FG
F01	21,250	G
DMS		6,162626

Fonte: Autora, 2020.

Comparando os resultados com a argamassa composta de cal hidratada, que obteve coeficiente de capilaridade de 5,800 g/dm².min^{1/2}, percebe-se que o traço R01, com substituição total de cal por resíduo, possui um coeficiente de capilaridade mais baixo, sendo melhor para a durabilidade, seguido da mistura F04, com substituição total de filito. Os resultados com menor desempenho obtidos foram para as amostras RF45, RF25, F05, F02 e F01, que pela explicação do fenômeno da capilaridade, possuem mais poros capilares.

Fazendo uma relação entre o coeficiente de capilaridade encontrado por Ribeiro *et al.* (2016) em seus estudos de argamassas com filito, de 18,3 g/dm².min^{1/2}, percebe-se que os traços F04, F03 e F05 apresentaram resultados melhores que o esperado, enquanto que os outros traços dessa série estão próximos do valor encontrado por esses autores. Já quando comparado com os resultados apresentados

na Tabela 3, com limite desse coeficiente em $12,15 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, os traços RF45, RF25, F05, F02 e F01 estão acima desse limite, podendo comprometer a durabilidade do revestimento.

Posteriormente à análise do coeficiente de capilaridade, foi analisada a absorção de água por capilaridade após 90 minutos, Figura 50, tempo de ensaio previsto na norma. Na Tabela 19 e na Tabela 20 são apresentados a ANOVA e o teste de Tukey. A ANOVA mostra que os resultados obtidos são significativos e que pelo menos dois deles diferem, estatisticamente, entre si. Pelo coeficiente de variância, de 14,47%, é possível dizer que este ensaio apresenta um bom grau de confiabilidade.

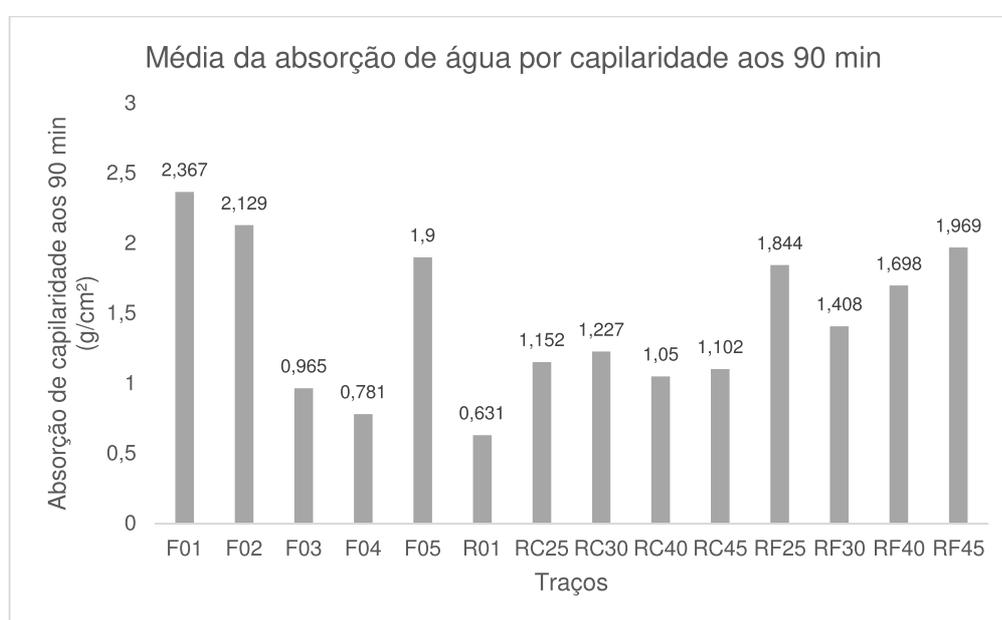


Figura 50 - Gráfico das médias de absorção de água aos 90 minutos.

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 19 - ANOVA para DIC da absorção de água por capilaridade aos 90 minutos ($p \leq 0,05$).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamento	13	958,286	73,71431	17,36035	2,09*
Resíduo	28	118,8917	4,246131	-	-
Total	41	1077,178	-	-	-
CV%		18,55			

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 20 - Teste de Tukey para contraste de médias da absorção de água por capilaridade aos 90 minutos ($p \leq 0,05$).

Tratamento	Média (g/cm²)	Tukey
R01	0,631	A
F04	0,781	A
F03	0,965	AB
RC40	1,050	AB
RC45	1,102	ABC
RC25	1,152	ABC
RC30	1,227	ABCD
RF30	1,408	BCDE
RF40	1,698	CDEF
RF25	1,844	DEFG
F05	1,900	EFG
RF45	1,969	EFG
F02	2,129	FG
F01	2,367	G
DMS		0,625199

Fonte: Autora, 2020.

A absorção de água aos 90 minutos apresentou, basicamente, a mesma tendência de resultados que os encontrados para o coeficiente de capilaridade. Os traços que obtiveram os piores resultados para o coeficiente, foram os mesmos que apresentaram desempenho ruim na absorção aos 90 minutos, sendo eles RF25, F05, RF45, F02 e F01, com os maiores valores de absorção.

O grupo com os menores valores de absorção, logo os melhores traços nesse parâmetro, permanece o mesmo que o obtido no coeficiente de capilaridade, demonstrando que existe uma boa relação entre os dois parâmetros discutidos neste tópico, até porque ambos são realizados com o mesmo conjunto de dados.

4.4.6. Resistência de aderência à tração e análise de fissuras

Esse ensaio seguiu as recomendações da NBR 13528 (ABNT, 2010). Como todos os traços foram aplicados no substrato cerâmico, foi feita uma avaliação visual a respeito da incidência de fissuras no revestimento, e aquelas argamassas que apresentassem essa patologia estariam com seu uso comprometido.

As argamassas R02 e R03 foram aplicados no substrato antes de serem ensaiadas no estado endurecido, uma vez que foram produzidas depois dos outros traços e com tempo avançado de projeto. Assim, caso houvesse a presença de

fissuras, esse material não seria testado nos outros parâmetros. Na argamassa F01 não foi feita a análise visual, já que nela foram constatadas as fissuras iniciais. As figuras a seguir apresentam os revestimentos.



Figura 51 - Corpos de prova para ensaio de aderência à tração e visualização de presença de fissuras. Traços: (a) R01, (b) R02 e (c) R03.

Fonte: Autora, 2020.



Figura 52 - Corpos de prova para ensaio de aderência à tração e visualização de presença de fissuras. Traços: (a) F02, (b) F03, (c) F04 e (d) F05.

Fonte: Autora, 2020.

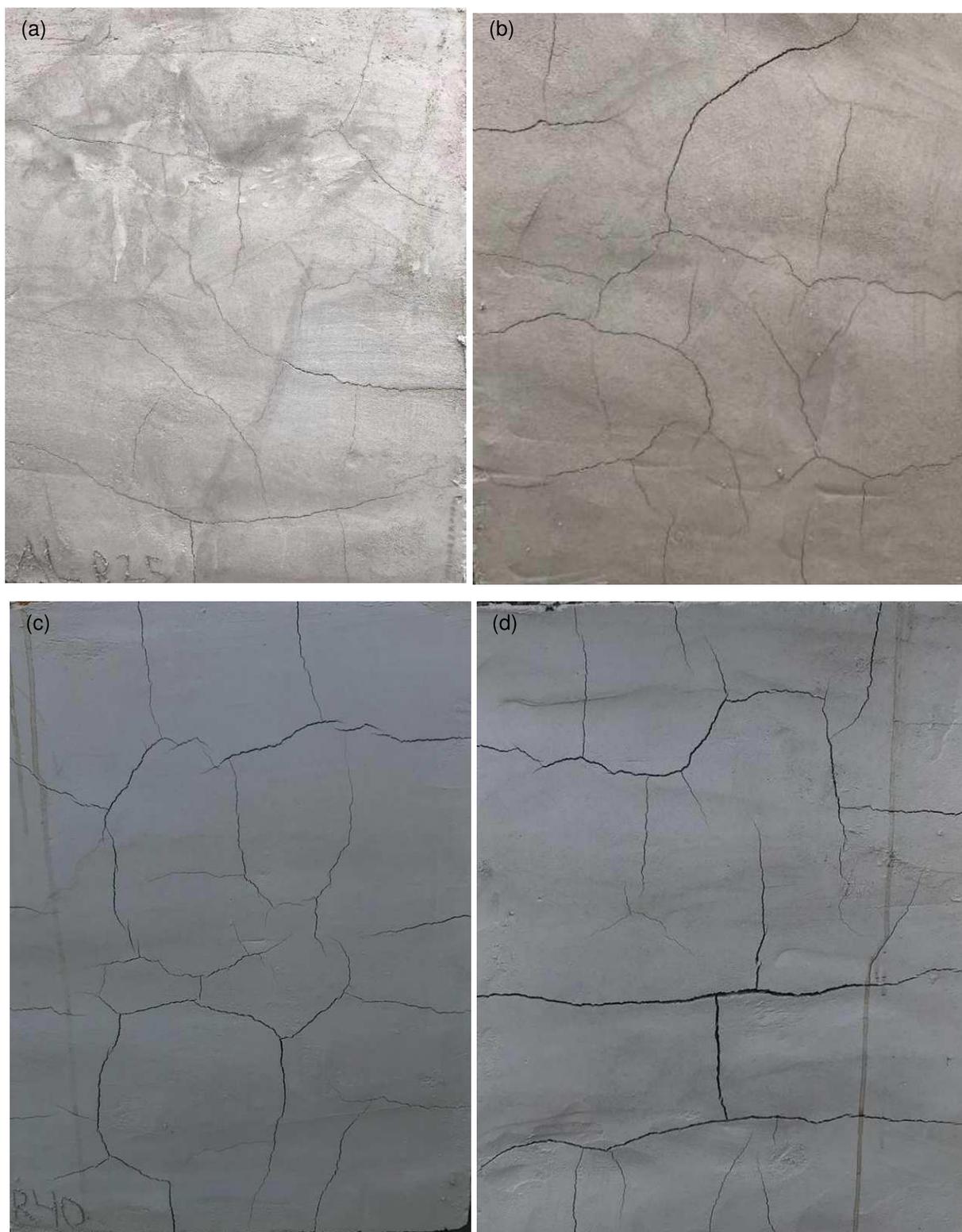


Figura 53 - Corpos de prova para ensaio de aderência à tração e visualização de presença de fissuras. Traços: (a) RC25, (b) RC30, (c) RC40 e (d) RC45.

Fonte: Autora, 2020.

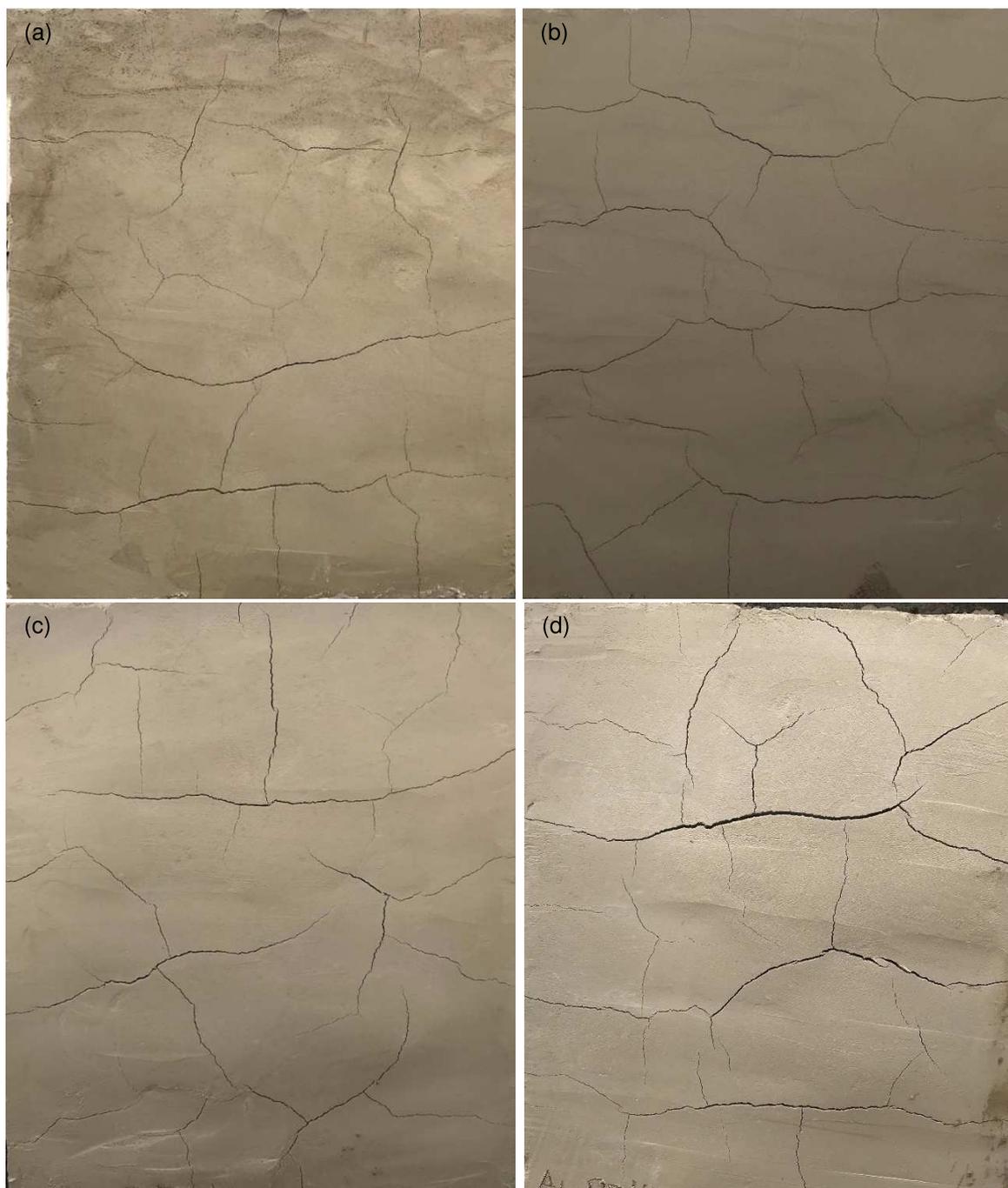


Figura 54 - Corpos de prova para ensaio de aderência à tração e visualização de presença de fissuras. Traços: (a) RF25, (b) RF30, (c) RF40 e (d) RF45.

Fonte: Autora, 2020.

Com base na Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54, observa-se que os traços da série RF e da série RC apresentaram significativo número de fissuras em sua superfície. Um dos possíveis motivos para isso ter acontecido foi a quantidade de água na mistura, uma vez que esses traços apresentaram a maior relação água/materiais secos. Entre esses traços, o que obteve o menor número de fissuras foi o RC25.

Da série F, Figura 52, os traços F02, F03 e F05 apresentaram pequena incidência de fissuras e apenas o traço F04 não as apresentou. Já da série R, apresentadas na Figura 51, apenas o traço R01 não apresentou fissuras, o que pode ser explicado pela relação água/materiais secos, uma vez que essas amostras possuíam o mesmo traço, entretanto com variação no teor de água. Os traços R02 e R03 continham menor porcentagem de aditivo, conseqüentemente, mais água.

O aparecimento da maioria das fissuras foi observado quando o revestimento ainda não estava totalmente endurecido, podendo configurar retração plástica, que ocorre pela rápida evaporação da água de amassamento antes do fim da pega e resulta em fissuração superficial. Entretanto, é possível que tenha havido a retração por secagem, que por sua vez, ocorre pela perda de água da massa da argamassa (FIORITO, 2009). É notório que quanto maior for o teor de água presente na mistura, maior será a possibilidade de o revestimento apresentar grandes deformações.

Com exceção dos traços R02 e R03 que foram retirados do substrato antes dos 28 dias, todos os outros foram testados para aderência à tração, até mesmo os que apresentaram grande incidência de fissuras. Para cada traço foram produzidos de 16 corpos de prova, uma vez que o ensaio poderia apresentar erros ou possíveis problemas metodológicos. Os corpos de prova que romperam no substrato ou na cola foram descartados, ficando somente aqueles que romperam na argamassa, com seus resultados apresentados na Figura 55.

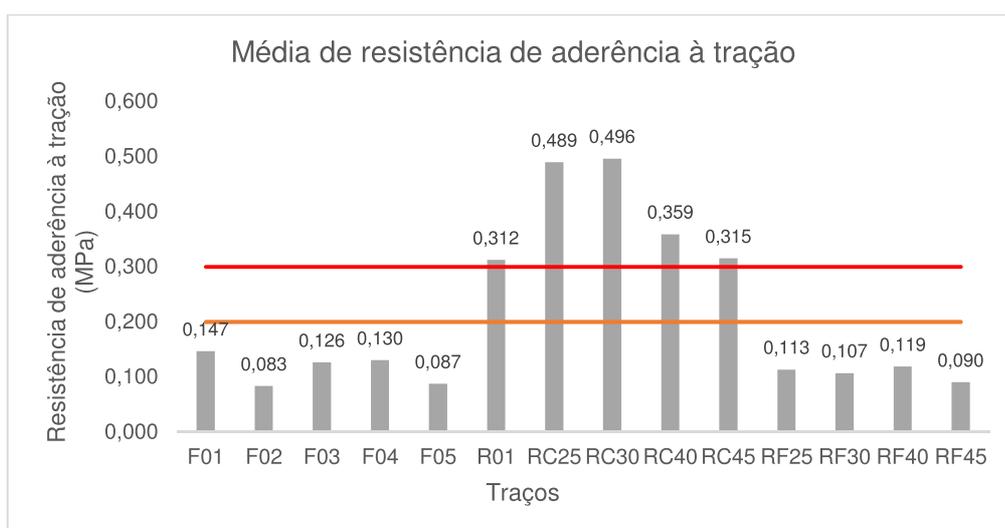


Figura 55 - Gráficos das médias de resistência de aderência à tração, com linha limite da NBR 13528 (ABNT, 2010) para aplicação de revestimento externo, em vermelho, e interno, em laranja.

Fonte: Autora, 2020.

Para avaliar essa propriedade foram usados 12 corpos de prova para cada traço, totalizando 168 amostras experimentais. A Tabela 21 e Tabela 22 mostram a ANOVA e o teste de Tukey.

Tabela 21 - ANOVA para DIC da resistência de aderência à tração ($p \leq 0,05$).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamento	13	3,53699227	0,272076	67,48495	1,72*
Resíduo	154	0,62087553	0,004032	-	-
Total	167	4,1578678	-	-	-
CV%		29,88			

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 22 - Teste de Tukey para contraste de médias da resistência de aderência à tração ($p \leq 0,05$).

Tratamento	Média (MPa)	Tukey
F02	0,083	A
F05	0,087	A
RF45	0,090	A
RF30	0,107	A
RF25	0,113	A
RF40	0,119	A
F03	0,126	A
F04	0,130	A
F01	0,147	A
R01	0,312	B
RC45	0,315	B
RC40	0,359	B
RC25	0,489	C
RC30	0,496	C
DMS		0,08688196

Fonte: Autora, 2020.

Aferindo os resultados do ensaio foi apontado o valor de 29,88% para o coeficiente de variação, sendo tal valor o maior encontrado dentre os ensaios realizados. A dispersão encontrada no ensaio é proveniente de fatores como exposição diferencial ao meio ambiente, chuva, umidade, insolação e variação de temperatura, que atuam de maneira distinta nos revestimentos devido a sua posição geográfica, da diferença cronológica do ensaio, visto que, em um mesmo dia, dois revestimentos eram executados; diferença de interação entre o substrato e o revestimento, mesmo que blocos cerâmicos como substrato fossem iguais; ao molhar

o substrato, algumas partes ficam mais úmidas do que outras; devido ao operador, dentre outros.

Apesar de não possuir propriedade ligante, o resíduo não apresentou problemas de aderência ao substrato, ao contrário, obteve uma boa resistência de aderência, podendo inclusive, ser aplicado como revestimento externo, uma vez que alcançou valores acima de 0,30 MPa, o mínimo exigido pela norma técnica. Os valores mais baixos foram obtidos pelos traços representados pela letra A no teste de Tukey, compreendendo todos os traços contendo filito, incluindo os da série RF. Uma observação que deve ser feita acerca desses traços, é que no momento do ensaio de aderência, os traços F02 e F05 estavam “esfarelando”, sendo esses os revestimentos que obtiveram os menores resultados.

Embora muitas fissuras tenham sido observadas nos traços RC, esses foram os que apresentaram os melhores resultados. Além disso, quando comparados com a argamassa de cal produzida para comparação, esta alcançou 0,43 MPa, ficando apenas o RC45 e RC40 abaixo desse valor.

Com base nos valores mínimos da NBR 13281 (ABNT, 2005) e ilustrados na Figura 55, em conjunto com os resultados dos ensaios, percebe-se que apenas os traços da série RC e R01 podem ser aplicados como revestimento interno e externo, e que as argamassas com filito foram reprovadas tanto para uso interno quanto externo. Entretanto, devido às fissuras, apenas o uso do traço R01 é recomendado.

Diante do exposto e buscando maior confiabilidade dos resultados, o traço R01 foi aplicado em um canteiro de obras, onde foi empregado revestimento de uma unidade de apartamento, Figura 56. Conforme esperado, essa argamassa apresentou bom desempenho, sem apresentar fissuras nem problemas de aderência inicial ao substrato. Em discussão com os colaboradores em exercício e que manusearam a argamassa para sua aplicação no substrato, foi atestada facilidade no seu sarrafeamento, desempenho e acabamento.



Figura 56 - Revestimento R01 aplicado em canteiro de obras em condições reais.

Fonte: Autora, 2020.

4.4.7. Variação dimensional

Esse ensaio foi realizado segundo a NBR 15261 (ABNT, 2005), para as idades de 7, 14, 28 e 35 dias, para avaliar a tendência de retração das argamassas, e com os resultados obtidos, foi plotada a curva de retração pelo tempo apresentada na Figura 57.

Para o ensaio foram escolhidos 5 dos 14 traços desenvolvidos no trabalho sendo utilizados para análise o traço F01, de referência, o F04 e R01, os traços que não apresentaram fissuras no revestimento, compostos de filito e resíduo de rocha em substituição à cal hidratada, e por fim, os traços que apresentaram fissuras RC25 e RF25, ambas com substituição de 25% da areia pelo resíduo de rocha e a RF25 possui

filito em sua composição. Optou-se por colocar amostras que apresentaram fissuras no revestimento afim de avaliar se sua variação dimensional era de fato superior à das outras argamassas. Sendo assim foram analisadas amostras dos traços F01, F04, R01, RC25 e RF25.

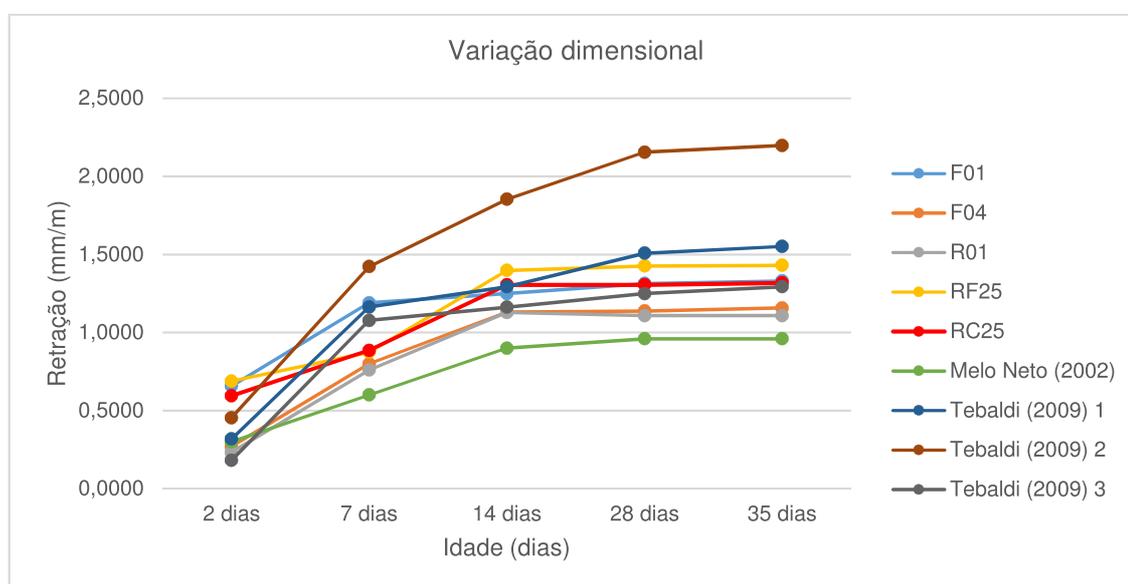


Figura 57 - Retração por secagem (mm/m) x idade (dias).

Fonte: Autora, 2020.

Observando o gráfico, percebe-se que as argamassas desenvolvidas no trabalho atingiram em torno de 90% da sua retração total aos 14 dias. Segundo Taylor (1990), a retração cresce quando há um aumento na relação água/cimento, o que é comprovado pelas misturas RC25 e RF25, que apresentaram esse parâmetro mais elevado e retraíram de forma semelhante.

Comparando as argamassas F04 com a R01, nota-se que elas possuem retração similar, e ambos possuem a menor relação água/materiais secos.

Tebaldi (2009) realizou estudos em argamassas industrializadas provenientes dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Bahia, que ela denominou de argamassa 1, 2 e 3. Seus resultados mostraram que essas argamassas atingiram 90% de variação dimensional total aos 20 dias, e pela Figura 57 nota-se que a argamassa utilizada para projeção no estado do Rio de Janeiro apresentou maiores retrações que aquelas desenvolvidas nesse projeto. Já Melo Neto (2002), estudou a retração em argamassa com escória de alto forno e comparou seus resultados com argamassas fabricadas com o cimento CPV – ARI, que possui uma moagem mais fina quando comparado com os outros tipos de cimento, e uma relação a/c de 0,48. Nessa argamassa, a retração total foi atingida em aproximadamente 18 dias. Comparando

com esse autor, todas as argamassas apresentaram maiores retrações, sendo a R01 a que ficou mais próxima.

Com as considerações de Taylor (1990) mencionadas acima, e com os resultados obtidos com o gráfico, fazendo uma comparação com o fator a/c das argamassas, a que obteve a menor retração, R01, foi a que também obteve menor fator a/c , enquanto que a RF25 obteve a maior retração aos 35 dias e maior fator a/c , corroborando o que foi dito por Taylor (1990).

CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

O intuito deste trabalho foi desenvolver argamassas com substituição da cal hidratada pelo filito e resíduo de rocha, para serem aplicadas no substrato pelo método de projeção mecanizada contínua, por via úmida, sem que houvesse o aparecimento de fissuras. Para isso, foi feita a caracterização dos materiais e ensaios tanto no estado fresco quanto no endurecido.

Primeiramente, foi realizada a caracterização física, química e mineralógica dos materiais. Assim, constatou-se que o resíduo de rocha era mais próximo à cal em relação a sua granulometria e morfologia, muito embora os dois substituintes distinguíssem relativamente do substituído considerando sua composição química e mineralógica.

Ao substituir a cal hidratada pelo filito, foi visto que a densidade de massa aumentou em ambos os estados, fresco e endurecido, devido ao valor da massa específica do filito ser superior à da cal. O mesmo ocorreu ao incorporar o resíduo de rocha, embora de forma mais sutil, e o contrário foi observado ao substituir parcialmente a areia por esse material, sendo a massa específica daquela superior à do resíduo de rocha. A incorporação desses materiais não resultou em prejuízos no teor de ar incorporado e retenção de água. O primeiro parâmetro ficou na faixa de 9,35% e 4,11%, para R01 e RF25, respectivamente, estando dentro do limite recomendando, abaixo de 20%. Já o segundo permaneceu entre 91 e 98%, acima do limite mínimo, de acordo com a ASTM C 270, de 75%.

Em relação aos parâmetros de resistência à tração na flexão e compressão, as médias dos traços das séries RC, RF e F ficaram abaixo do valor obtido com a argamassa de cal hidratada, com redução de, aproximadamente, 5%, 60% e 37%, respectivamente, na tração, e 17%, 36% e 45%, respectivamente, na compressão. O traço R01 obteve um aumento percentual de 48,91 e 47,10 nas resistências à tração e compressão. Tanto a absorção de água por imersão e capilaridade quanto o índice de vazios aumentaram quando a cal foi substituída, sendo o traço R01 o que alcançou os melhores resultados nesses parâmetros, de 16,002%, 4,767 g/dm². $\sqrt{\text{min}}$ e 16,924%, respectivamente, valores esses próximos aos encontrados para a

argamassa de cal hidratada. Todos os traços desenvolvidos ficaram dentro do valor recomendado para o índice de vazios, abaixo de 35% e, com exceção dos traços RF45, RF25, F05, F02 e F01, que ficaram acima do valor limite de $12,15 \text{ g/dm}^2 \cdot \sqrt{\text{min}}$, todos os outros se encontraram dentro do previsto para o coeficiente de capilaridade.

Pela análise visual de fissuras, realizada concomitantemente com o ensaio de aderência à tração, foi observado que somente os traços F04 e R01 não possuíam essa patologia em sua superfície, atingindo o objetivo do trabalho. Entretanto, de acordo com NBR 13528 (ABNT, 2010), que rege o ensaio de aderência à tração, para ser utilizado como revestimento externo, as argamassas devem ter, no mínimo, 0,3 MPa de resistência e 0,2 MPa, para ser usada como revestimento interno. O traço R01 alcançou valores do mínimo para ser usado em ambiente externo, enquanto o traço F04 não obteve o mínimo para ser empregado como revestimento interno. Devido a fissuração, foi realizado o ensaio de variação dimensional, e ficou comprovado que os traços com maior relação a/c foram aqueles com maior retração e, também, com maior índice de fissuras.

Como o objetivo do trabalho era desenvolver argamassas de revestimento para aplicação pelo método de projeção mecanizada sem fissuras em sua superfície, apenas os traços F04 e R01 atingiram esse requisito. Entretanto, embora essencial, essa não era a única característica que o revestimento deveria ter para seu uso ser recomendado. O traço F04 apresentou bons parâmetros no estado endurecido, com exceção do valor mínimo requerido pela norma no ensaio de aderência à tração, não sendo, então, recomendado. Assim, o único traço que apresentou bom desempenho em todos os parâmetros e não apresentou fissuras na superfície do revestimento no processo de secagem, atingindo todos os requisitos de argamassa de revestimento para aplicação pela projeção mecanizada, foi o traço R01, constituído de cimento:resíduo:areia.

Por último, o traço R01 foi classificado de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), como mostra a Tabela 23.

Tabela 23 - Classificação do revestimento R01 segundo critério da NBR 13281:2005.

Parâmetro	Valor	Classe	Limites
Densidade de massa no estado fresco	1,954 g/cm ³	D5	1,800 a 2,000 g/cm ³
Retenção de água	92,26%	U5	91 a 97%
Densidade de massa no estado endurecido	1,759 g/cm ³	M5	1,600 a 2,000 g/cm ³
Resistência à tração na flexão	2,058 MPa	R4	2,0 a 3,5 MPa
Resistência à compressão	7,88 MPa	P5	5,5 a 9,0 MPa
Coefficiente de capilaridade	4,767 g/dm ² .min ^{1/2}	C4	3,0 a 7,0 g/dm ² .min ^{1/2}
Resistência de aderência à tração	0,312 MPa	A3	≥ 0,30 MPa

Fonte: Autora, 2020.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos e no que foi discutido, como recomendação para futuros trabalhos, indico compor uma argamassa contendo filito e resíduo de rocha ornamental como aglomerantes, uma vez que haverá a compensação granulométrica entre esses dois materiais, podendo ocorrer a diminuição do índice de vazios e absorção por imersão, e com isso elevação das resistências das argamassas. Seria interessante utilizar essa composição no traço F04, porque foi o único da série de filito que não apresentou fissuras em sua superfície e resultados razoavelmente bons, sendo importante observar a sua trabalhabilidade, já que, apesar do índice de consistência estar em 310 ± 5 mm como foi proposto, analisando o ensaio de *squeeze flow* essa argamassa foi menos trabalhável que a de referência.

Em relação as argamassas com substituição parcial da areia, poderia ser utilizado um aditivo plastificante para redução da relação água/materiais secos, e muito provavelmente isso levaria a diminuição das fissuras que pareceram. Entretanto, é importante observar a proporção em que o resíduo está sendo empregado para não aumentar a superfície específica ao ponto de prejudicar as propriedades do material.

REFERÊNCIAS

- Alves, M. S. (2008) *Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Belo Horizonte - MG, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 170p.
- Alves, N. J. D., Do Ó, S. W. (2005) Aditivos incorporadores de ar. In: Bauer, E. (coordenador). *Revestimentos de argamassa: Características e peculiaridades*. Brasília: LEM-UNB, 58p., p. 30 - 37.
- Amaral, L. F., Vieira, C. M. F., Delaqua, G. C. G., Nicolite, M. (2017) Evaluation of phyllite and sand in the heavy clay body composition, *Material Science Forum*, Vol. 912, p. 55-59.
- Angelin, A.F., Lintz, R.C., Barbosa, L.A.G. (2018) Propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável modificado com agregados leves e reciclados. *IBRACON de Estruturas e Materiais*, V. 11, nº 7, p. 76 – 94.
- Antonio, J. S. P. (2015) Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate, *Construction and Building Materials*, Vol. 77, p. 472-478.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA Disponível em: <<http://abai.org.br/mercados/>>. Acesso em: 21 de jan. de 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990) Aglomerantes de origem mineral – Terminologia: NBR 11172. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1998). Revestimentos de paredes e tetos de argamassa inorgânica - Procedimento: NBR 7200. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003). Cal Hidratada para Argamassas – Requisitos: NBR 7175. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003) Agregados - Determinação da composição granulométrica: NBR NM 248. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – requisitos: NBR 13281. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão: NBR 13279. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água: NBR 13277. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado: NBR 13278. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido: NBR 13280. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade: NBR 15259. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear): NBR 15261. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009). Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos: NBR 15900-1. Rio de Janeiro

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009). Agregados para concreto – Especificação: NBR 7211. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009) Agregados - Amostragem: NBR NM 26. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009). Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica: NBR 9778. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010). Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração: NBR 13528. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2010). Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow: NBR 15839. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2012). Concreto projetado — Especificação: NBR 14026. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013). Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia: NBR 13529. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013). Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação: NBR 13749. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013). Edificações habitacionais – Desempenho: NBR 15575. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016) Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência: NBR 13276. Rio de Janeiro.

Azevedo, A.R.G; Alexandre, J; Zanelato, E.B; Marvila, M.T. (2017) Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar, *Construction and Building Materials*, Vol. 148, p. 359-368.

Barbosa, C. S.; Hanai, J. B.; Lourenço, P. B.; Mohamad, G. (2011) Influência da perda de água e das tensões confinantes nas propriedades físicas e mecânicas da argamassa de assentamento para alvenaria estrutural. *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, Belo Horizonte.

Bauer, L. A. F. (2008) *Materiais de Construção 2*. 5. ed. Rio de Janeiro: LCT – Livros Técnicos e Científicos S.A., Vol. 2, 960p.

Bertini, A. A. (2002) *Estruturas Tipo Sanduíche Com Placas de Argamassa Projetada*. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – São Carlos – SP. Escola de Engenharia de São Carlos, 222p.

Bezerra, I.M.T.; Souza, J.; Carvalho, J.B.Q.; Neves, G. (2011) Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Vol. 15, n.6, p. 639–645.

Bruno, G. Copeve - Curva granulométrica. CNE Concursos, Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.cneconcursos.com.br/post/copeve-curva-granulometrica>>. Acesso em: 16 de out. de 2019.

- Caixa Econômica Federal – CEF (2020) *Referências de preços e custos*. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/referencias-precos-insumos/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 25 de jun. 2020.
- Calmon, J. L., Tristão, F. A.; Lordêllo, F. S. S., Da Silva, S. A. C., Mattos, F. V. (1997) Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. *Anais II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, Salvador, p. 64 -75.
- Campos, A. R. Castro, N. F.; Vidal, F. W. H.; Borlini, M. C. (2009) Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental. In: *Simpósio de Geologia do Nordeste, 23, 2009, Fortaleza. Anais...* Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2009. p.16-25.
- Carasek, H. (1996) *Aderência de Argamassas a Base de Cimento Portland a Substratos Porosos – Avaliação dos Fatores Intervenientes e Contribuição ao Estudo do Mecanismo de Ligação*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – São Paulo – SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 285 p.
- Carasek, H. (2011) Patologia das Argamassas de Revestimento. *Livro Materiais de Construção*. 11p.
- Carasek, H. (2017) Argamassas. In: IBRACON. *Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 3ª ed. Capítulo 28. São Paulo, Vol. 1, 1712p.
- Cardoso, F.A; John, V.M; Pileggi, R.G. (2009) Rheological behavior of mortars under different squeezing rates, *Cement and Concrete Research*, Vol. 39 (9), p. 748-753.
- Carneiro, A.M.P. (1999) *Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - São Paulo – SP, Escola Politécnica Universidade de São Paulo, 170p.
- Carvalho, J. D. N. (2008) Sobre as origens e desenvolvimento do concreto, *Revista Tecnológica*, Vol. 17, p. 19-28.
- Cho, J.S., Moon, K.L., Chol, M.K., Cho, K.H. (2017) Performance improvement of local Korean natural hydraulic lime-based mortar using inorganic by-products. *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 34(5), p. 1385-1392.
- Cincotto, M. A., Silva, M. A. C., Carasek, H. (1995) Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. *Instituto de Pesquisas Tecnológicas*. São Paulo, 118p.
- Coelho, M. A. M.; Tristão, F. A.; Moreira, J. R.; Vaz, A. N. A.; Prezotti, J. (2007) Utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) em substituição à argila em argamassas. *APFAC, 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*. Lisboa – Portugal.
- Colangelo, F.; Marroccoli, M.; Cioffi, R. (2004) Properties of Self-Levelling Concrete Made With Industrial Wastes. *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, Vol. 40, p. 580-589.
- Corinaldesi, V; Moriconi, G.; Naik, T. R. (2010) Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 1, p. 113–117.
- Coutinho, S.M.; Pretti, S.M.; Tristão, F.A. (2013) Argamassa preparada em obra x argamassa industrializada para assentamento de blocos de vedação: Análise do uso em Vitória, ES. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, Vitória, Vol. 21, p. 41-48.
- Crescencio, R. M., Parsekian, G. A., Barros, M. S. B., Sabbatini, F. H. (2000) Execução de revestimentos com argamassa projetada. *Anais VIII Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído*, Salvador, Vol. 2, p. 1067–1074.
- Cruz, D. F. M. Da, Lameiras, R. De M., Barboza, A. S. R., Lima, L. A. (2003). Estudo das propriedades mecânicas de argamassas produzidas utilizando-se resíduo do corte de mármore e granito. *VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil*. São Paulo. IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto) – CT 206 –Meio Ambiente.

- Cuadrado, J.G., Rodríguez, A., Cuesta, I.I., Calderón, V., González, S.G. (2017) Study and analysis by means of surface response to fracture behavior in lime-cement mortars fabricated with steelmaking slags, *Construction and Building Materials*, Vol. 138, p. 204–213.
- Duailibe, R. P., Cavani, G. de R., Oliveira, M. C. B. (2005) Influência do tipo de projeção da argamassa na resistência de aderência à tração e permeabilidade à água. *Anais do VI Simpósio Brasileiro De Tecnologia das Argamassas*, Florianópolis, p. 508 - 517.
- Elsen, J. (2006) Microscopy of historic mortars—a review, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, p. 1416–1424.
- Engmann, J., Servais, C., Burbidge, A.S. (2005) Squeeze flow theory and application to rheometry: A review, *Journal of Non-Newtonian Fluids Mechanics*, Vol. 132, p. 1-27.
- Figueiredo, A. D. (1992) *Concreto Projetado: Fatores Intervenientes no Controle de Qualidade do Processo*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – São Paulo – SP Escola Politécnica Universidade de São Paulo.
- Figueiredo, M.G., Varum, H., Costa, A. (2011) Caracterização das técnicas construtivas em terra edificadas no século XVIII e XIX no centro histórico de São Luís (MA, Brasil), *Arquitetura Revista*, Vol. 7, n.1, p. 81-93.
- Fiorito, A. J. S. I. (2009) *Manual de argamassas e revestimentos: Estudos e procedimentos de execução*. 2. ed. São Paulo: Pini, 232p.
- Fernandes, H. C., Antunes, R. P. N., Barros, M. M. S. B., John, V. M. (2006) Energia de lançamento na resistência de aderência à tração e permeabilidade à água. *Anais do XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, Florianópolis, p. 4093–4108.
- Fernandes, H. C., John, V. M. (2007) Desenvolvimento de metodologia para estimativa da energia de lançamento das argamassas projetadas por spray a ar comprimido. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, n.474, 23p.
- Glatthor, A., Schweizer, D. (1994) Rheological Lab Testing of Building Formulations, *ConChem Conference*, Düsseldorf.
- Gomes, A.O., Neves, C.M.M. (2002) Proposta de método de dosagem racional de argamassas contendo argilominerais, *Ambiente Construído*, Vol. 2, n.2, p.19-30.
- Gonçalves, S. R. de C. (2004) *Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos em argamassa – estudo de caso*. Tese (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Brasília – DF, Universidade de Brasília – Unb, 148p.
- Gonçalves, J. P. (2000) *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 135p.
- Goodier, C. (2002) Construction and repair with wet process sprayed concrete and mortar, *Concrete Society Technical Report 56*. United Kingdom. Disponível em: <<http://www.allbusiness.com/manufacturing/nonmetallic-mineral-product-manufacturing/1012297-1.html>>. Acesso em: 10 de jan. de 2019.
- Guimarães, J. E. P. (2002) *A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil*. 2. ed. São Paulo: Pini, 329p.
- Haach, V.G; Vasconcelos, G; Lourenço, P.B. (2011) Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, Vol. 25(6), p. 2980–2987.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2017). *Anuário Brasileiro de Empregos*. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 de jan. de 2019.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2019). *Agência IBGE Notícias*. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de->>. Acesso em: 28 de fev. de 2019.

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2020). *Estações automáticas*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTYwNw>. Acesso em: 22 de jun. de 2020.

Isaia, G.C. (2010) *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 862p.

Lanas, J.; Pérez-Bernal, J.L.; Bello, M.A.; Alvarez Galindo, J.I. (2004) Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, p. 2191–2201.

Lisbôa, E. M. (2004) *Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Maceió – AL - Universidade Federal de Alagoas – UFAL, 144p.

Lobato, F. H. C., Moresi, M. V. D., Kuwajima, F. M., Matsui, M. M. (2005) *Evolução do concreto projetado na construção: O caso histórico do lote 1 da linha do metrô/SP*. Disponível em: <http://www.itaaites.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/Training/TrainingCourses/SP13_2005.pdf>. Acesso em: 07 de jan. de 2019.

Martingança, J. A. S., Martingança, C. S. S., Costa, M. (2005) Ensinaamentos a tirar do passado histórico das argamassas. *Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas*, Lisboa.

Mattana, A.J., Medeiros, M.H.F., Silva, N.G., Costa, M.R.M.M. (2012) Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimento, *Ambiente Construído*, Porto Alegre, Vol. 12, n.4, p. 63-79.

Matias, G., Faria, P., Torres, I. (2014) Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review, *Construction and Building Materials*, Vol. 73, p. 125–136.

Mehta, P. K; Monteiro, P. J. M. (1994) *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. 1. Ed. São Paulo: PINI, 573p.

Melo, L. G. A., Thaumaturgo, C. (2012) Filito: um material estratégico para fabricação de novos cimentos, *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, 2º trimestre, p. 10-24.

Melo Neto, A. A. (2002) *Estudo da retração em argamassas com cimento escória ativada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – São Paulo – SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, 121p.

Mendes, J. C., Moro, T. K., Figueiredo, A. S., Silva, K. D. C., Silva, G. C., Silva, G. J. B., Peixoto, R. A. F. (2017) Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS-based air entraining agente, *Construction and Building Materials*, Vol. 145, p. 648-661

Moura, P. G. T. (2013) *Reabilitação Com Argamassa Projetada Em Construções Históricas De Pedra No Litoral Paraibano*. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Salvador – BA, Universidade Federal da Bahia – UFBA, 160p.

Neville, A. M. (1982) *Propriedades do concreto*. São Paulo: PINI, 737p.

Neville, A. M., Brooks, J.J. (2013) *Tecnologia do Concreto*. 2.ed. São Paulo: Editora Bookman, 472p.

Norton, F. H. (1973) *Introdução à tecnologia cerâmica*. São Paulo: Ed. Edgard Blucher LTDA, 325p.

Palomar, I., Barluenga, G., Puentes, J. (2015) Lime–cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance, *Construction and Building Materials*, Vol. 75, p. 306–314.

Palomar, I., Barluenga, G. (2017) Assessment of lime-cement mortar microstructure and properties by P- and S- ultrasonic waves, *Construction and Building Materials*, Vol. 139, p. 334–341.

Paravisi, S. (2008) *Avaliação de sistemas de produção de revestimentos de fachada com aplicação mecânica e manual de argamassa*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, p. 181.

Pinto, A. P. F., Gomes, A., Pinto, J. B. (2006). *Argamassas*. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 32p.

Projeto de argamassa chapiscadeira e rebocadeira. Disponível em: <<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-949700267-projeto-de-argamassa-chapiscadeira-e-rebocadeira-44lts>> . Acesso em: 14 de out. de 2019.

Quarcioni, V. A., Cincotto, M. A. (2008) Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – estudo em pasta. *Boletim Técnico da Escola Politécnica. BT/PCC/506*. São Paulo, 20p.

Recena, F.A.P. (2017) *Conhecendo argamassa*. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 223p.

Reinert, D. J., Reichert, J. M. (2006). Propriedade físicas do solo. Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Ciências Rurais – Santa Maria, RS.

Ribeiro, D., Vieira, S., Vieira, R. (2016) Correlação Entre Os Índices Físicos De Argamassas Produzidas Com Diferentes Materiais Inertes, As Manifestações Patológicas E As Propriedades Do Revestimento. *Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções*. Pará.

Romano, R. C. O., Souza, R. B., Câmpora, F. L., Seabra, M. A., John, M. A., Pileggi, R. G. (2011) Efeito da utilização de cales e filitos nas propriedades de pastas cimentícias, *Anais IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*. Belo Horizonte.

Romano, R. C. O., Seabra, M. A., John, M. A., Pileggi, R. G. (2014) Caracterização reológica de suspensões cimentícias mistas com cales ou filitos, *Ambiente Construído*, Porto Alegre, Vol. 14, n. 1, p. 75 – 84.

Sabbatini, F. H. (1984) *O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico calcária*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - São Paulo – SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, 298p.

Sabbattini, F. H. (1986) Argamassas de Assentamento para Paredes de Alvenaria Resistente. *Boletim Técnico 02/86*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

Sabbatini, F. H., Maciel, L. L., Barros, M. M. S. B. (1998) Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação internas e externas e tetos. 40p.

Sabbatini, F. H., Zanelatto, K. C., Barros, M. M. S. B. de, Monte, R. (2013) Avaliação da influência da técnica de execução no comportamento de revestimento de argamassa aplicado com projeção mecânica contínua, *Ambiente Construído*, Porto Alegre, Vol. 13, n. 2, p. 87 – 109.

Sabbioni, C; Bonazza, A.; Zappia, G. (2002) Damage on hydraulic mortars: the Venice Arsenal, *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 3, p. 83 – 88.

Santos, M. M. A.; Destefani, A.Z.; Holanda, J.N.F. (2013) Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. *Matéria Rio de Janeiro*, Vol. 18, n. 4, p. 1442-1450.

Santos, C. C. N. (2003) *Critérios de projetabilidade para as argamassas industrializadas de revestimento utilizando bomba de argamassa com eixo helicoidal*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Brasília – DF, Universidade de Brasília – UnB, 138p.

Santos, C. C. N., Bauer, E. (2003) A influência do tempo de mistura e do teor de água na projetabilidade das argamassas industrializadas. *Anais V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*. São Paulo, p. 339–351.

Santos, C. C. N., Ramos, D. V. M. (2005) Aspectos das Argamassas Projetadas. In: Bauer, E. (coordenador). *Revestimentos de argamassa: Características e peculiaridades*. Brasília: LEM-UNB, 58p., p. 51-58.

Santos, M. M. A.; Destefani, A.Z.; Holanda, J.N.F. (2013) Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. *Matéria Rio de Janeiro*, Vol. 18, N 4, p. 1442-1450.

Santiago, L. O. R. (2008). *Alteração e alterabilidade de rochas básicas intrusivas metamorfozadas e filitos sericíticos da região do quadrilátero ferrífero e sua implicação no comportamento mecânico*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Viçosa – MG, Universidade Federal de Viçosa – UFV.

Schmid, T., Dariz, P. (2016) Chemical imaging of historical mortars by Raman microscopy, *Construction and Building Materials*, Vol. 114, p. 506–516.

Selmo, S.M. S. (1989) *Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachada de edifícios*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - São Paulo - SP, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – EPUSP, 150p.

Silva, P. F. A. (1997) *Concreto projetado para túneis*. 1. ed. São Paulo: Editora Pini, 92p.

Silva, G. P., Fontes, M. P. F., Costa, L. M., Barros, N. F. (2006) Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da mina de alegria, Mariana-MG. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Vol. 36, n. 1, p. 45-52.

Silva, N.G., Campiteli, V.C., Gleize, P.J. (2011) Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia de britagem de rocha calcária. *Anais do IX Simpósio Brasileiro De Tecnologia das Argamassas*, Belo Horizonte, p. 21-33.

SINDIROCHAS Espírito Santo. Disponível em: <https://www.sindirochas.com/downloads/relatorios/exportacoes-de-rochas-dezembro-2019.pdf>. Acesso em: 26 de mar. de 2020.

Singh, S., Tiwari, A., Nagar, R., Agrawal V. (2016) Feasibility as a potential substitute for natural sand: a comparative study between granite cutting waste and marble slurry, *Procedia Environmental Sciences*. Vol. 35, p. 571-582.

Singh, M., Choudhary, K., Srivastana, A. (2017) A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete, *Journal of Building Engineering*. Vol. 13, p. 87–95.

Taylor, H. F. W. (1990) *Cement Chemistry*. London: Academic Press, 475p.

Teichert, P. (2002). Carl Akeley. A Tribute to the Founder of Shotcrete. *American Shotcrete Association*, New York, p.10.

Valera, T.S., Ribeiro, A.P., Valenzuela-Díaz, F.R., et.al. (2002) The effect of phyllite as a filler for PVC plastisols. *Annual Technical Conference - Society of Plastics Engineers*. Vol. 3, n. 60, p. 3949-3953.

Vardhan, K., Goyal, S., Siddique, R., Singh, M. (2015) Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement, *Construction and Building Materials*, Vol. 96, p. 615–621.

Vasconcelos, W. L. (1997) Descrição da permeabilidade em cerâmicas. *Cerâmica*, Vol. 3, n. 281–282, p. 120–123.

Veiga, M.R. (1998) *Comportamento de argamassas de revestimento de paredes - Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Lisboa – PRK. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Viana, C.E., Dias, D.P., Paranhos, R.P.R., Holanda, J.N.F. (2010) Influência da incorporação de resíduo de escória de fluxo de soldagem nas propriedades tecnológicas de argamassa de múltiplo uso e cerâmica vermelha para construção civil, *Cerâmica*, Vol. 56, p. 83-90.

Wojciech, P., Sikorab, H. (2015) Effect of air entrainment on shrinkage of blended cements concretes, *Construction and Building Materials*, Vol. 99, p. 298–307.

Zanelato, E. B. (2015) *Influência do Chapisco na Resistência de Aderência à Tração de Revestimentos de Argamassa em Blocos Cerâmicos*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 127p.

ANEXO I

Tabela 24 - Limites unilaterais de F ao nível de 95% de confiança.

n_2/n_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	24	30	40	60	120	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,0	243,9	244,4	245,0	245,9	246,0	248,0	249,1	250,1	251,1	252,2	253,3	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,40	19,41	19,42	19,42	19,43	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,76	8,74	8,72	8,71	8,70	8,69	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,93	5,91	5,89	5,87	5,86	5,84	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,70	4,68	4,66	4,64	4,62	4,60	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,03	4,00	3,98	3,96	3,94	3,92	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,60	3,57	3,55	3,52	3,51	3,49	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,31	3,28	3,25	3,23	3,22	3,20	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,10	3,07	3,04	3,02	3,01	2,98	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,94	2,91	2,88	2,86	2,85	2,82	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,82	2,79	2,76	2,74	2,72	2,70	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,72	2,69	2,66	2,64	2,62	2,60	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,63	2,60	2,57	2,55	2,53	2,51	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,56	2,53	2,50	2,48	2,46	2,44	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,51	2,48	2,45	2,43	2,40	2,39	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,45	2,42	2,39	2,37	2,35	2,33	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,41	2,38	2,35	2,33	2,31	2,29	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,37	2,34	2,31	2,29	2,27	2,25	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,34	2,31	2,28	2,26	2,23	2,21	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,31	2,28	2,25	2,23	2,20	2,18	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,28	2,25	2,22	2,20	2,18	2,15	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,26	2,23	2,20	2,18	2,15	2,13	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,24	2,20	2,17	2,14	2,13	2,10	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,22	2,18	2,15	2,13	2,11	2,09	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,20	2,16	2,13	2,11	2,09	2,06	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,18	2,15	2,12	2,10	2,07	2,05	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,16	2,13	2,10	2,08	2,06	2,03	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,15	2,12	2,09	2,06	2,04	2,02	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,14	2,10	2,07	2,05	2,03	2,00	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,12	2,09	2,06	2,04	2,01	1,99	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,04	2,00	1,97	1,95	1,92	1,90	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,95	1,92	1,89	1,86	1,84	1,81	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,86	1,83	1,80	1,77	1,75	1,73	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,79	1,75	1,72	1,69	1,67	1,64	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00

Legenda: n_1 = número de graus de liberdade do numerador e n_2 = número de graus de liberdade do denominador.

Fonte: Gomes, 1987.

Tabela 25 - Valores da amplitude total estudentizada (q), para uso no teste de Tukey, ao nível de 95% de confiança.

$n_2 \ln_1$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	17,97	26,98	32,82	37,08	40,41	43,12	45,40	47,36	49,07	50,59	51,96	53,20	54,33	55,36	56,32	57,22	58,04	58,83	59,56
2	6,09	8,33	9,80	10,88	11,74	12,44	13,03	13,54	13,99	14,39	14,75	15,08	15,38	16,65	15,91	16,14	16,37	16,57	16,77
3	4,50	5,91	6,83	7,50	8,04	8,48	8,85	9,18	9,46	9,72	9,95	10,15	10,35	10,53	10,69	10,84	10,98	11,11	11,24
4	3,93	5,04	5,76	6,29	6,71	7,05	7,35	7,60	7,83	8,03	8,21	8,37	8,53	8,66	8,79	8,91	9,03	9,13	9,23
5	3,64	4,60	5,22	5,67	6,03	6,33	6,58	6,80	7,00	7,17	7,32	7,47	7,60	7,72	7,83	7,93	8,03	8,12	8,21
6	3,46	4,34	4,90	5,31	5,63	5,90	6,12	6,32	6,49	6,65	6,79	6,92	7,03	7,14	7,24	7,34	7,43	7,51	7,59
7	3,34	4,17	4,68	5,06	5,36	5,61	5,82	6,00	6,16	6,30	6,43	6,55	6,66	6,76	6,85	6,94	7,02	7,10	7,17
8	3,26	4,04	4,53	4,89	5,17	5,40	5,60	5,77	5,92	6,05	6,18	6,29	6,39	6,48	6,57	6,65	6,73	6,80	6,87
9	3,20	3,95	4,42	4,76	5,02	5,24	5,43	5,60	5,74	5,87	5,98	6,09	6,19	6,28	6,36	6,44	6,51	6,58	6,64
10	3,15	3,88	4,33	4,65	4,91	5,12	5,31	5,46	5,60	5,72	5,83	5,94	6,03	6,11	6,19	6,27	6,34	6,41	6,47
11	3,11	3,82	4,26	4,57	4,82	5,03	5,20	5,35	5,49	5,61	5,71	5,81	5,90	5,98	6,06	6,13	6,20	6,27	6,33
12	3,08	3,77	4,20	4,51	4,75	4,95	5,12	5,27	5,40	5,51	5,62	5,71	5,80	5,88	5,95	6,02	6,09	6,15	6,21
13	3,06	3,74	4,15	4,45	4,69	4,89	5,05	5,19	5,32	5,43	5,53	5,63	5,71	5,79	5,86	5,93	6,00	6,06	6,11
14	3,03	3,70	4,11	4,41	4,64	4,83	4,99	5,13	5,25	5,36	5,46	5,55	5,64	5,71	5,79	5,85	5,92	5,97	6,03
15	3,01	3,67	4,08	4,37	4,60	4,78	4,94	5,08	5,20	5,31	5,40	5,49	5,57	5,65	5,72	5,79	5,85	5,90	5,96
16	3,00	3,65	4,05	4,33	4,56	4,74	4,90	5,03	5,15	5,26	5,35	5,44	5,52	5,59	5,66	5,73	5,79	5,84	5,90
17	2,98	3,63	4,02	4,30	4,52	4,71	4,86	4,99	5,11	5,21	5,31	5,39	5,47	5,54	5,61	5,68	5,73	5,79	5,84
18	2,97	3,61	4,00	4,28	4,50	4,67	4,82	4,96	5,07	5,17	5,27	5,35	5,43	5,50	5,57	5,63	5,69	5,74	5,79
19	2,96	3,59	3,98	4,25	4,47	4,65	4,79	4,92	5,04	5,14	5,23	5,32	5,39	5,46	5,53	5,59	5,65	5,70	5,75
20	2,95	3,58	3,96	4,23	4,45	4,62	4,77	4,90	5,01	5,11	5,20	5,28	5,36	5,43	5,49	5,55	5,61	5,66	5,71
24	2,92	3,53	3,90	4,17	4,37	4,54	4,68	4,81	4,92	5,01	5,10	5,18	5,25	5,32	5,38	5,44	5,49	5,55	5,59
30	2,89	3,49	3,85	4,10	4,30	4,46	4,60	4,72	4,82	4,92	5,00	5,08	5,15	5,21	5,27	5,33	5,38	5,43	5,48
40	2,86	3,44	3,79	4,04	4,23	4,39	4,52	4,64	4,74	4,82	4,90	4,98	5,04	5,11	5,16	5,22	5,27	5,31	5,36
60	2,83	3,40	3,74	3,98	4,16	4,31	4,44	4,55	4,65	4,73	4,81	4,88	4,94	5,00	5,06	5,11	5,15	5,20	5,24
120	2,80	3,36	3,69	3,92	4,10	4,24	4,36	4,47	4,56	4,64	4,71	4,78	4,84	4,90	4,95	5,00	5,04	5,09	5,13
∞	2,77	3,31	3,63	3,86	4,03	4,17	4,29	4,39	4,47	4,55	4,62	4,69	4,74	4,80	4,85	4,89	4,93	4,97	5,01

Legenda: n_1 = número de tratamentos e n_2 = número de graus de liberdade do residuo.

Fonte: Gomes, 1987.