

**DESENVOLVIMENTO DE UM ADITIVO PARA ARGAMASSAS DE  
MÚLTIPLO USO COM UMA COMPOSIÇÃO ARGILA-CALCÁRIO**

**MARKSSUEL TEIXEIRA MARVILA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MARÇO - 2018

# **DESENVOLVIMENTO DE UM ADITIVO PARA ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO COM UMA COMPOSIÇÃO ARGILA-CALCÁRIO**

**MARKSSUEL TEIXEIRA MARVILA**

Dissertação de mestrado 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: D. Sc. Jonas Alexandre

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MARÇO - 2018

# DESENVOLVIMENTO DE UM ADITIVO PARA ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO COM UMA COMPOSIÇÃO ARGILA-CALCÁRIO

**MARKSSUEL TEIXEIRA MARVILA**

Dissertação de mestrado 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 março de 2018.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Maria Lúcia Pereira Antunes (D. Sc.), UNESP

---

Prof. Sérgio Rafael Cortes de Oliveira (D. Sc.), IFF

---

Prof. Gustavo de Castro Xavier (D. Sc.), UENF

---

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

(Orientador)

## SUMÁRIO

Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xii
1. Introdução	1
1.1. Objetivo Geral	2
1.2. Objetivo Específico	2
1.3. Justificativa	3
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Argamassas	4
2.2. Argamassas mistas de cimento e cal hidratada	10
2.3. A aglomerante cal hidratada	11
2.4. Trabalhos com argamassas mistas de cimento e cal hidratada	17
2.5. Argila como aglomerante para argamassas	22
2.6. Resíduo de mármore como material de construção	46
3. Metodologia	57
3.1. Materiais utilizados	57
3.2. Caracterização dos aglomerantes	57
3.2.1. Massa específica real dos grãos	57
3.2.2. Análise Granulométrica	57
3.2.3. Limites de Atterberg	58
3.2.4. Fluorescência de raios-X de energia dispersiva (EDX)	58
3.2.5. Difração de raios-X	59
3.3. Dosagem dos traços	59
3.4. Ensaio realizados nas argamassas	62
3.4.1. Ensaio de mesa de consistência (flow table)	62
3.4.2. Ensaio de Reologia de Squeeze Flow	63
3.4.3. Densidade de massa no estado fresco e Teor de ar incorporado	69
3.4.4. Retenção de água	70
3.4.5. Moldagem dos corpos de prova	72
3.4.6. Densidade de massa no estado endurecido	72
3.4.7. Resistência à tração na flexão	73
3.4.8. Resistência à compressão em CP prismático	74

3.4.9. Absorção de água por capilaridade	75
3.4.10. Absorção de água por imersão e índice de vazios	76
3.4.11. Resistência à compressão em CP cilíndrico	77
3.4.12. Ensaio de aderência entre substrato e argamassa	78
3.5. Questionário de aplicação da argamassa	80
3.6. Tratamento de dados obtidos	81
3.6.1. Delineamento estatístico dos parâmetros estudados	81
3.6.2. Discussão dos resultados obtidos para os parâmetros obtidos	85
3.6.3. Correlação de parâmetros utilizando Pearson	90
3.6.4. Utilização da rede simplex	92
3.7. Análise financeira dos custos do cimento e da cal hidratada	94
4. Resultados e Discussões	95
4.1. Caracterização dos aglomerantes estudados	95
4.1.1. Caracterização física	95
4.1.2. Caracterização química e mineralógica	98
4.2. Parâmetros tecnológicos das argamassas	102
4.2.1. Ensaio de consistência (flow table)	102
4.2.2. Squeeze Flow	105
4.2.3. Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado	110
4.2.4. Retenção de água	112
4.2.5. Densidade de massa no estado endurecido	113
4.2.6. Resistência à tração na flexão	116
4.2.7. Resistência à compressão em CP prismático	118
4.2.8. Módulo de Elasticidade	120
4.2.9. Resistência à compressão em CP cilíndrico	123
4.2.10. Absorção de água por capilaridade	125
4.2.11. Absorção de água por imersão e Índice de Vazios	130
4.2.12. Ensaio de aderência à tração	133
4.2.13. Questionário de aplicação da argamassa	135
4.2.14. Correlação entre parâmetros do estado endurecido	139
4.3. Tratamento dos dados obtidos	142
4.4. Análise dos traços estudados por Rede Simplex	151

4.5. Resumo das análises realizadas	154
4.6. Análise financeira dos custos do cimento e da cal hidratada.	155
5. Conclusão	157
6. Sugestão para trabalhos futuros	163
7. Referências Bibliográficas	164
Anexo I	173
Anexo II	175
Anexo III	178

## RESUMO

Argamassas de múltiplo uso são materiais de construção, usualmente compostas de cimento, cal hidratada, areia e água, utilizadas para assentamento de blocos e para revestimento de paredes. Para cumprir essas funções, as principais propriedades almejadas para esse material são aderência com o substrato e trabalhabilidade. O uso da cal hidratada é justificado por causa dessa última propriedade destacada. Porém, esse aglomerante apresenta elevado valor comercial e sua produção emite milhares de toneladas de gases poluentes. Em função disso, o objetivo deste trabalho é desenvolver e avaliar um aditivo contendo uma composição de argila e resíduo de calcário proveniente de uma indústria de mármore ornamental para substituir a cal hidratada em argamassas de múltiplo uso, gerando vantagens econômicas e ambientais. A escolha da argila é em função de suas propriedades de plasticidade e por causa do seu uso já consagrado em argamassa de múltiplo uso, enquanto o uso do resíduo é justificado por sua similaridade química, mineralógica e granulométrica com a cal hidratada. Para atingir o objetivo foram realizados ensaios de caracterização da argila, do resíduo de calcário e da cal hidratada e testes em argamassas na composição 1:1:6, contendo diversas proporções de argila e calcário substituindo parcialmente e totalmente a cal hidratada. Os ensaios realizados foram o de consistência, *squeeze flow*, densidade de massa no estado fresco e 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 e índice de vazios e de resistência à aderência à tração. Os resultados foram comparados aos obtidos por outros autores, e tratados através de ANOVA e Teste de Tukey, coeficiente de correlação de Pearson, Análise Hierárquica de Pesos (AHP) e rede simplex. Os resultados demonstram a possibilidade da substituição da 1 parte de cal hidratada por 0,44 a 0,55 partes de argila e 0,45 a 0,56 partes de resíduo de calcário, tendo sido obtido dessa forma o objetivo proposto.

Palavras-chave: argamassa de múltiplo uso, cal hidratada, argila, resíduo de calcário.

## ABSTRACT

Multipurpose mortars are building materials, usually composed of cement, hydrated lime, sand and water, used for block setting and wall cladding. To fulfill these functions, the main properties desired for this material are adhesion with the substrate and workability. The use of hydrated lime is justified because of this last outstanding property. However, this binder presents high commercial value and its production emits thousands of tons of polluting gases. Therefore, the objective of this work is to develop and evaluate an additive containing a composition of clay and limestone residue from an ornamental marble industry to replace hydrated lime in mortars of multiple use, generating economic and environmental advantages. The choice of clay is due to its plasticity properties and because of its already used use in mortar of multiple use, while the use of the residue is justified by its chemical, mineralogical and granulometric similarity with hydrated lime. In order to reach the objective, clay, limestone and hydrated lime characterization tests were performed, and mortar tests in the 1: 1: 6 composition, containing various proportions of clay and limestone, partially and totally replacing the hydrated lime. The tests performed were consistency, squeeze flow, fresh mass density and incorporated air content, water retention, hardened mass density, compressive strength, flexural tensile strength, water absorption by capillarity, absorption of water by immersion and voids index and resistance to traction adhesion. The results were compared to those obtained by other authors and treated through ANOVA and Tukey's test, Pearson's correlation coefficient, Hierarchical Weight Analysis (AHP) and simplex network. The results demonstrate the possibility of replacing the 1 part of hydrated lime by 0.44 to 0.55 parts of clay and 0.45 to 0.56 parts of limestone residue, thereby achieving the proposed objective. each 1.00 kg of cement, which was obtained in this way the proposed objective.

Keywords: multipurpose mortars, hydraulic lime, clay, limestone residue.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de sistemas com argamassas de revestimento	6
Figura 2.2 – Esquematização do ciclo da cal	12
Figura 2.3 – Micrografia eletrônica de varredura na interface da pasta de cimento com areia	12
Figura 2.4 – (a) Curvas granulométricas das amostras A1, A2 e A3 do G1 e (b) Curvas granulométricas das amostras A1, A2 e A3 do G2	23
Figura 2.5 – (a) Difração de raios-X das amostras do grupo G1 e (b) Difração de raios-X das amostras do grupo G2	25
Figura 2.6 – Análise Granulométrica das amostras estudadas.	26
Figura 2.7 – Análise mineralógica das amostras estudadas por Vieira (2001): (a) Argila cinza e (b) Argila Amarela	26
Figura 2.8 – Análise granulométricas das amostras estudadas por (a) Vieira (2011), (b) Candido (2013) e (c) Coutinho (2016)	27
Figura 2.9 – Análise mineralógica das amostras estudadas por (a) Vieira (2011), (b) (c) Candido (2013), (d) Coutinho (2016) e (e) Areias (2017)	28
Figura 2.10 – Esquemas das unidades cristalográficas básicas dos argilominerais, (a) octaedro e (b) tetraedro.	30
Figura 2.11 – Estrutura esquemática da caulinita	31
Figura 2.12 – Microscopia de varredura do argilomineral caulinita	32
Figura 2.13 – Estrutura esquemática da illita	32
Figura 2.14 – Microscopia de varredura do argilomineral Illita	33
Figura 2.15 – Estrutura esquemática da montmorilonita	33
Figura 2.16 – Microscopia de varredura do argilomineral Montmorilonita	34
Figura 2.17 – Patologia de revestimento com argila	35
Figura 2.18 – Fissuração apresentada em argamassa com saibro, imediatamente após aplicação.	36
Figura 2.19 – Desagregação da argamassa com saibro	36

Figura 2.20 – Exportações mensais do setor de Rochas Ornamentais 2015-2016 em dólares.	46
Figura 2.21 – Exportações mensais do setor de Rochas Ornamentais 2015-2016 em toneladas.	47
Figura 2.22 – Principais estados brasileiros exportadores de rochas ornamentais em 2016	47
Figura 2.23 – Relação entre resistência à compressão e tempo de cura para argamassas estudadas por Corinadelsi (2010)	49
Figura 2.24 – Difração de raios-X para o resíduo de mármore estudado por Ergün (2011)	50
Figura 2.25 – Difração de raios-X para o resíduo de mármore estudado por Vardhan (2015)	52
Figura 2.26 – Resistência à compressão dos traços estudados por Vardhan (2015)	53
Figura 2.27 – Microscopia eletrônica de varredura dos traços estudados por Vardhan (2015)	54
Figura 3.1 – (a) Mesa de consistência, molde em tronco cônico e martelo para golpes na argamassa; (b) Ensaio de espalhamento na argamassa.	63
Figura 3.2 – Ilustração esquemática das argamassas A e B descritas como fluido de Bingham.	64
Figura 3.3 – Indicação do esquema utilizado para o Squeeze Flow	66
Figura 3.4 – Execução do squeeze flow para o traço TR01	67
Figura 3.5 – Perfil típico de carga x deslocamento em um ensaio squeeze flow para argamassas	68
Figura 3.6 – (a) Copo Cilíndrico para densidade de massa no estado fresco e (b) aparelho de retenção de água.	72
Figura 3.7 – (a) Ensaio de tração na flexão e (b) ensaio de compressão em CP de argamassa.	74
Figura 3.8 – (a) Ensaio de capilaridade aos 0 minutos e (b) Ensaio de capilaridade aos 90 minutos.	76
Figura 3.9 – (a) Corpos de prova cilíndricos e (b) Ensaio de resistência à compressão em corpos cilíndricos de argamassa.	78

Figura 3.10 – (a) Dinamômetro utilizado na pesquisa e (b) Ensaio de resistência à aderência entre substrato e argamassa.	79
Figura 3.11 – Tipos de ruptura possíveis no ensaio de aderência à tração	80
Figura 3.12 – Representação da rede simplex para três componentes	92
Figura 3.13 – (a) Modelo linear, (b) Modelo quadrático, (c) Modelo cúbico simplex para rede Simplex.	93
Figura 4.1 – Curva granulométrica dos aglomerantes estudados	95
Figura 4.2 – Difratoograma de raio-X obtido para (a) argila, (b) calcário proveniente do beneficiamento de mármore e (c) cal hidratada.	99
Figura 4.3 – Curva carga x deslocamento velocidade lenta (0,1mm/s) para (a) traços REF e SX e (b) traços EST.	107
Figura 4.4 – Curva carga x deslocamento velocidade rápida (3mm/s) para (a) traços REF e SX e (b) traços EST.	108
Figura 4.5 – Curva carga x deslocamento comparando a velocidade lenta e rápida para os traços TR00, TR01 e TR02.	109
Figura 4.6 – Curva tensão x deformação para as proporções (a) TR00; (b) TR01; (c) TR02; (d) SXac; (e) SXah; (f) SXch e (g) SXach.	121
Figura 4.7 – (a) molde para CP prismáticos e (b) molde para CP cilíndrico	125
Figura 4.8 – Correlação entre índice de vazios e densidade de massa no estado endurecido.	139
Figura 4.9 – Correlação entre índice de vazios e resistência mecânica.	140
Figura 4.10 – Correlação entre índice de vazios e coeficiente de capilaridade.	141
Figura 4.11 – Correlação entre índice de vazios e absorção de água por imersão.	141
Figura 4.12– Região ótima para parâmetros (a) Retenção de água, (b) Resistência à compressão, (c) Módulo de Elasticidade, (d) Coeficiente de Capilaridade, (e) Índice de vazios e (f) Aderência com o substrato.	153
Figura 4.13 – Sobreposição das regiões ótimas obtidas pelos parâmetros avaliados.	154

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Exigências químicas para cal Hidratada	13
Tabela 2.2 – Exigências físicas para cal Hidratada	15
Tabela 2.3 – Comparativo entre o preço do kg das cales X, Y e Z e do cimento Portland CP II Z 32 em Recife.	16
Tabela 2.4 – Estudos com diferentes traços 1:1:6.	20
Tabela 2.5 – Estudos com diferentes traços 1:1:6.	21
Tabela 2.6 – Fracionamento das amostras estudadas por Alexandre (2000)	24
Tabela 2.7 – Massa específica, LL e LP obtidos por Alexandre (2000)	24
Tabela 2.8 – Análise química das amostras estudadas por Alexandre (2000)	25
Tabela 2.9 – Parâmetros físicos para as amostras estudadas por Vieira (2001)	26
Tabela 2.10 – Análise química das amostras estudadas por Vieira (2001)	27
Tabela 2.11 – Parâmetros Físicos de diferentes estudos realizados com argilas das jazidas de Campos.	29
Tabela 2.12 – Análise química de diferentes estudos realizados com argilas das jazidas de Campos.	29
Tabela 2.13 – Patologia em Argamassas com argila	35
Tabela 2.14 – Argamassas com argila estudadas por Gomes e Neves (2002)	42
Tabela 2.15 – Argamassas com argila estudadas por Gomes (2012)	44
Tabela 2.16 – Argamassas com argila estudadas por Andres (2016)	45
Tabela 2.17 – Análise química de diferentes resíduos de mármore.	50
Tabela 2.18 – Resistência mecânica obtido para concretos estudados por Ergün (2011)	51
Tabela 2.19 – Tempo de consistência para os traços estudados por Vardhan (2015)	53
Tabela 2.20 – Análise granulométrica do resíduo de mármore estudado por Buyksagis (2017).	56
Tabela 3.1 – Proporções utilizadas	59

Tabela 3.2 – Massa Atômica de alguns elementos químicos	61
Tabela 3.3 – Traços obtidos pelo balanceamento estequiométrico	61
Tabela 3.4 – Tabulação de dados para DIC	82
Tabela 3.5 – Tabela ANOVA para DIC	83
Tabela 3.6 – Faixas de consumo de cimento em kg/m <sup>3</sup> de argamassa	86
Tabela 3.7 – Escalas de importância baseada na ASTM E 1765 (AMERICAN..., 2002).	87
Tabela 3.8 – Matriz de decisão para os traços analisados pela metodologia 01	89
Tabela 3.9 – Matriz de decisão para os traços analisados pela metodologia 02	90
Tabela 3.10 – Relação entre os pontos da rede simplex e os traços estudados	93
Tabela 4.1 – Parâmetros físicos obtidos para os aglomerantes estudados	95
Tabela 4.2 – Análise Química dos aglomerantes estudados	99
Tabela 4.3 – Principais parâmetros tecnológicos das argamassas estudadas	103
Tabela 4.4 – Principais parâmetros tecnológicos das argamassas estudadas	103
Tabela 4.5 – ANOVA para DIC da densidade de massa no estado endurecido ( $p \leq 0,05$ )	114
Tabela 4.6 – Teste de Tukey para contraste de médias da densidade de massa no estado endurecido ( $p \leq 0,05$ )	114
Tabela 4.7 – ANOVA para DIC da resistência à tração na flexão ( $p \leq 0,05$ )	116
Tabela 4.8 – Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à tração na flexão ( $p \leq 0,05$ )	116
Tabela 4.9 – ANOVA para DIC da resistência à compressão em CP prismático ( $p \leq 0,05$ )	118
Tabela 4.10 – Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à compressão em CP prismático ( $p \leq 0,05$ )	119
Tabela 4.11 – Módulos de elasticidade teóricos obtidos para as argamassas estudadas	122

Tabela 4.12 – ANOVA para DIC da resistência à compressão em CP cilíndrico ( $p \leq 0,05$ )	123
Tabela 4.13 – Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à compressão em CP cilíndrico ( $p \leq 0,05$ )	124
Tabela 4.14 – ANOVA para DIC do coeficiente de capilaridade ( $p \leq 0,05$ )	126
Tabela 4.15 – Teste de Tukey para contraste de médias do coeficiente de capilaridade ( $p \leq 0,05$ )	126
Tabela 4.16 – ANOVA para DIC da absorção de água por capilaridade aos 90 minutos ( $p \leq 0,05$ )	128
Tabela 4.17 – Teste de Tukey para contraste de médias da absorção de água por capilaridade aos 90 minutos ( $p \leq 0,05$ )	129
Tabela 4.18 – ANOVA para DIC da absorção de água por imersão ( $p \leq 0,05$ )	130
Tabela 4.19 – Teste de Tukey para contraste de médias da absorção de água por imersão ( $p \leq 0,05$ )	131
Tabela 4.20 – ANOVA para DIC do índice de vazios ( $p \leq 0,05$ )	132
Tabela 4.21 – Teste de Tukey para contraste de médias do índice de vazios ( $p \leq 0,05$ )	133
Tabela 4.22 – ANOVA para DIC da aderência à tração ( $p \leq 0,05$ )	134
Tabela 4.23 – Teste de Tukey para contraste de médias de aderência à tração ( $p \leq 0,05$ )	134
Tabela 4.24 – Respostas do questionário para medir a trabalhabilidade das argamassas utilizando a metodologia de Gomes (2012)	136
Tabela 4.25 – Validação dos princípios estipulados por Gomes e Neves (2002) nos traços estudados	142
Tabela 4.26 – Cálculo da quantidade de argilominerais na composição das argamassas	144
Tabela 4.27 – Análise da metodologia de Mattana (2012) nos traços TR e SX.	147
Tabela 4.28 – Análise da metodologia de Mattana (2012) nos traços EST.	147

Tabela 4.29 – Parâmetros utilizados na metodologia 01 normatizados conforme Mattana (2012)	148
Tabela 4.30 – Parâmetros utilizados na metodologia 02 normatizados conforme Mattana (2012)	150
Tabela 4.31 – Preço do cimento e da cal hidratada em diferentes materiais de construção da cidade de Campos dos Goytacazes.	155

## 1. Introdução

Argamassas de múltiplo uso são materiais de construção utilizadas para assentamento de blocos e para revestimento de paredes que geralmente apresentam em sua composição aglomerantes (cimento Portland e cal hidratada) e agregado miúdo (VIANA *et al.*, 2010). As principais propriedades necessárias para um bom desempenho das argamassas são: consistência, trabalhabilidade e capacidade de absorver deformações, garantidas pelo uso da cal hidratada, resistência mecânica e durabilidade, obtidas com o uso do cimento Portland, e baixos teores de retração por secagem, asseguradas com o uso do agregado miúdo e da cal hidratada (QUARCIONI *et al.*, 2011). Além disso, um papel importante do agregado miúdo, usualmente areia, é baratear o preço do produto, uma vez que o cimento Portland e a cal hidratada apresentam elevado valor comercial.

Neste contexto, pesquisas que envolvam a substituição, parcial ou total, do cimento Portland ou da cal hidratada em argamassas são de extrema importância e contribuem de forma significativa para o avanço da tecnologia dos materiais de construção, uma vez que a substituição destes materiais por outros menos nobres reduzem o preço do produto obtido. Porém, o uso de materiais menos nobres tende a piorar as propriedades tecnológicas das argamassas, e, portanto, estudos experimentais que avaliem os parâmetros mais importantes devem ser sempre realizados quando se objetiva realizar tais substituições.

Outro grande problema apresentado pelo uso do cimento Portland e da cal hidratada em materiais de construção, com destaque para o uso em argamassas, objeto de estudo desta dissertação, é a grande emissão de CO<sub>2</sub> gerada durante a fabricação destes dois aglomerantes (AL MULALI *et al.*, 2015; AREL, 2016). O estudo de novos aglomerantes que substituam os dois supracitados é de extrema relevância e contribui para o desenvolvimento sustentável do setor de construção civil, um dos setores mais poluidores e que mais gera resíduos no mundo.

A argila é um tipo material natural extraído de jazidas que é muito utilizado como substituição da cal hidratada em obras de construção civil por acrescentar à argamassa bons parâmetros de plasticidade e trabalhabilidade (GOMES *et al.*, 2012), embora poucos estudos científicos sejam conduzidos com argamassas contendo este material. A grande vantagem da argila é que este material não necessita de nenhum tratamento industrial e apresenta baixo valor comercial, quando comparado com a cal



hidratada. Portanto o uso deste material como substituição da cal, auxiliaria não apenas na diminuição do preço da argamassa, como também na minimização da quantidade de CO<sub>2</sub> emitido pelo setor construtivo.

Outro material que poderia ser utilizado para substituir a cal hidratada é o resíduo proveniente do beneficiamento de mármore, uma vez que esta rocha é classificada como calcária e, por isso, o resíduo apresenta composição química similar à cal (SINGH *et al.*, 2017). Por ser um rejeito industrial sem valor comercial, a substituição da cal por este material ajudaria a diminuir o preço das argamassas. Esta substituição também possibilitaria ganho ambiental, uma vez que além de diminuir o uso da cal hidratada, um material cuja produção gera grande poluição atmosférica, o resíduo, que atualmente é tratado como lixo industrial, agregaria função de aglomerante.

### 1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e avaliar um aditivo mineral para argamassas de múltiplo uso utilizando uma composição de argila com o resíduo do beneficiamento de mármore, classificado como material calcário, como forma de substituição da cal hidratada.

### 1.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho podem ser citados:

- Caracterização química, física e mineralógica da argila e do resíduo de mármore estudados, a fim de comparar com os parâmetros do material a ser substituído, isto é, da cal hidratada;
- Analisar os parâmetros no estado fresco (consistência, *squeeze flow*, densidade de massa no estado fresco, teor de ar incorporado, teor de retenção de água) de uma argamassa de referência e de argamassas contendo substituição parcial e total da cal hidratada por argila, por resíduo de mármore, ou por combinações dos dois;
- Analisar os parâmetros no estado endurecido (resistência à tração na flexão, resistência à compressão, densidade de massa no estado endurecido, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e índice de vazios) de uma argamassa de referência e de argamassas contendo substituição parcial e total da cal hidratada por argila, por resíduo de mármore, ou por combinações dos dois;

- Analisar a aderência à tração de um substrato cerâmico com uma argamassa de referência e de argamassas contendo substituição parcial e total da cal hidratada por argila, por resíduo de mármore, ou por combinações dos dois.
- Obter, através de diferentes metodologias, a melhor composição de argila com resíduo de mármore de forma a substituir a cal hidratada sem prejuízos nas propriedades da argamassa.

### 1.3. Justificativa

O trabalho se justifica pela contribuição econômica e ambiental que o desenvolvimento do aditivo proporciona, já que a substituição da cal hidratada, aglomerante cuja produção é altamente poluidora e cujo valor comercial é elevado, por materiais menos nobres, como a argila e o resíduo de mármore, proporcionará significativa redução no preço final da argamassa e elevados ganhos ambientais.

A contribuição ambiental é justificada pela destinação de um material que atualmente é considerado um lixo industrial, como é o caso do resíduo de mármore, e pela substituição da cal hidratada, que ao ser menos usada auxilia no desenvolvimento sustentável do setor da construção civil.

Vale ressaltar que existe, ainda, uma terceira justificativa, que é tecnológica, pois a função da cal hidratada nas argamassas é garantir boa trabalhabilidade e auxiliar na capacidade de acomodar deformações, propriedades estas provavelmente mantidas com o uso da argila, aglomerante com elevados teores de plasticidade, e com o uso do resíduo de mármore, que apresenta composição química similar ao aglomerante a ser substituído.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. Argamassas

Argamassas são materiais de construção confeccionados a partir da mistura de aglomerantes (usualmente cimento Portland e cal hidratada), agregado miúdo e água, podendo ou não conter aditivos e adições químicas e minerais (CARASEK, 2017; MATTANA *et al.*, 2012; NBR 13281, ABNT, 2005).

Segundo Carasek (2017) as argamassas podem ser classificadas de diversas formas, seguindo diferentes critérios, a saber:

- Quanto ao tipo de aglomerante: argamassa de cal, de cimento, de cimento e cal, de gesso ou de cal e gesso;
- Quanto ao número de aglomerantes: argamassa simples ou mista;
- Quanto à consistência: argamassa seca, plástica ou fluida;
- Quanto à natureza do aglomerante: argamassa aérea ou hidráulica;
- Quanto à plasticidade da argamassa: argamassa pobre ou magra, média ou cheia, e por fim, rica ou gorda;
- Quanto à densidade de massa da argamassa: argamassa leve, normal ou pesada;
- Quanto à forma de preparo ou fornecimento: argamassa preparada em obra, mistura semipronta, industrializada ou dosada em central.

Ainda segundo Carasek (2017), outra classificação empregada para distinguir as argamassas é baseada na função que este material desempenha, em que a argamassa pode ser dividida nos seguintes grupos:

- Argamassas para construção de alvenarias: argamassa de assentamento (elevação de alvenaria) e de fixação (encunhamento);
- Argamassas para revestimento de paredes e tetos: argamassa de chapisco, de emboço, de reboco, de camada única e a para revestimento decorativo monocamada;
- Argamassas para revestimento de pisos: argamassas de contrapiso e de alta resistência para piso;

- Argamassa para revestimentos cerâmicos (parede ou piso): argamassa colante para assentamento de peças cerâmicas e de rejuntamento;
- Argamassa para recuperação de estruturas: argamassas de reparo;
- Argamassas de múltiplo uso: argamassas que apresentam duas ou mais funções entre as descritas acima (VIANA *et al.*, 2010).

As composições de argamassas estudadas nesta dissertação são classificadas como argamassas de múltiplo uso, uma vez que podem ser utilizadas para assentamento de blocos ou para revestimento de paredes e tetos, tendo, portanto, duas funções de classes diferentes. Por causa disso, a discussão do presente trabalho terá enfoque maior nas argamassas de revestimento e de assentamento.

Argamassas de assentamento de alvenaria são argamassas utilizadas para elevação de paredes e muros de tijolos ou blocos, cujas principais funções são: unir as unidades de alvenaria de forma a compor um elemento monolítico, contribuindo desta maneira na rigidez da construção e na resistência aos esforços aplicados nas laterais; selar as juntas garantindo estanqueidade às paredes sujeitas à ação de chuva; absorver deformações naturais e acidentais de origem térmica e de retração por secagem atuantes sobre as paredes e distribuir de forma uniforme as cargas que atuam na parede pela área resistente dos blocos (CARASEK, 2017; SILVA *et al.*, 2009; BEZERRA *et al.*, 2011).

Em decorrência disto são propriedades fundamentais para as argamassas de assentamento: trabalhabilidade, uma vez que se a argamassa não for trabalhável de nada adianta a qualidade de seu desempenho em serviço, aderência ao substrato onde está aplicada, resistência mecânica e capacidade de absorver deformações (CARASEK, 2017).

Por sua vez as argamassas de revestimento podem ser definidas como argamassas utilizadas para revestir paredes, muros e tetos, os quais geralmente recebem tratamento posterior como pintura ou revestimento cerâmico (CARASEK; IBRACON, 2017; KAZMIERCZAK *et al.*, 2016; PALOMAR *et al.*, 2015). Este tipo de revestimento apresenta uma subclassificação descrita a seguir:

- Chapisco: camada que serve para preparar a base a aumentar as propriedades de aderência entre substrato e camada posterior.

- Emboço: camada executada para cobrir a base e propiciar uma superfície que permita receber outra camada, reboco, ou ainda revestimentos decorativos cerâmicos.

- Reboco: camada utilizada para cobrimento do emboço, propiciando uma superfície que permita receber revestimento decorativos como a pintura ou servir de acabamento.

- Camada única: revestimento com apenas uma camada que é aplicada sobre a base onde aplica-se uma camada decorativa, como por exemplo pintura. Chamado popularmente de massa única ou reboco paulista.

- Revestimento decorativo monocamada (monocapa ou RDM): revestimento em única camada que tem ao mesmo tempo função de regularização e decorativa, sendo um produto industrializado com composição variada.

A Figura 2.1 indica a aplicação destas diferentes camadas englobadas pelas argamassas de revestimento.

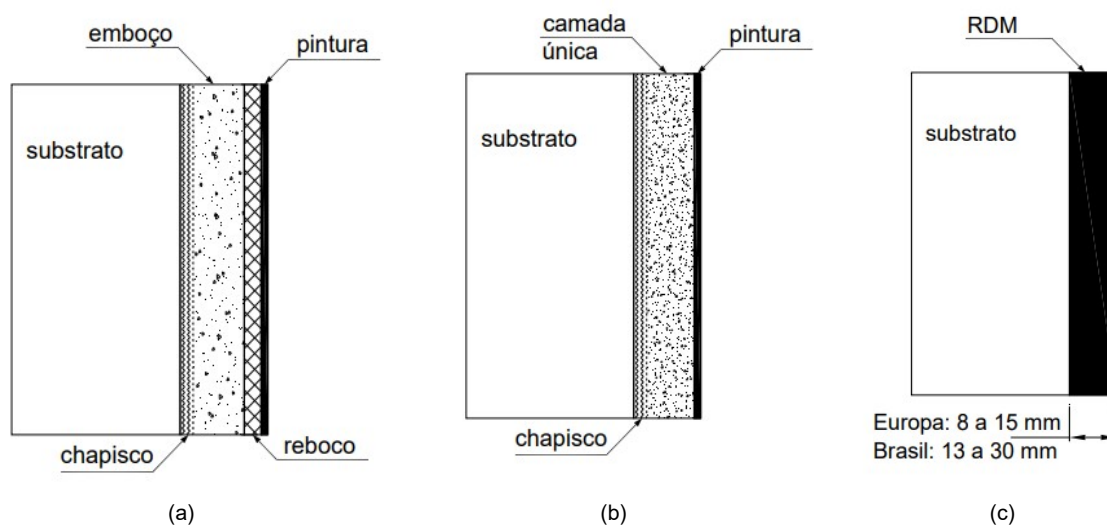


Figura 2.1 – Tipos de sistemas com argamassas de revestimento: (a) sistema mais antigo com chapisco + emboço + reboco + pintura; (b) camada única + pintura; (c) revestimento decorativo monocamada (RDM).

Fonte: Carasek (2017).

As principais funções de uma argamassa de revestimento são: proteger a alvenaria e estrutura contra intemperismo, no caso de argamassas externas, e integrar o sistema de vedação dos edifícios contribuindo nas funções de isolamento térmico e acústico, estanqueidade à água, segurança ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais (CARASEK, 2017; PALOMAR *et al.*, 2015).

Em decorrência disso são propriedades fundamentais as argamassas de assentamento: trabalhabilidade, aderência ao substrato, baixa permeabilidade à água, resistência mecânica, capacidade de absorver deformações e baixa retração.

A definição e o estudo destas propriedades estão fortemente ligados aos materiais que compõem cada argamassa, uma vez que cada componente da argamassa apresenta um papel nas características da argamassa.

Mattana *et al.* (2012) fazem uma abordagem detalhada das principais propriedades que as argamassas de múltiplo uso precisam ter, destacando quais propriedades apresentam mais importância no estudo destes materiais:

- Densidade de massa no estado fresco: definido como a relação entre massa e volume com a argamassa no estado fresco, sendo que em termos gerais quanto menor seu valor mais favorável por gerar mais economia no material utilizado. Entretanto valores muito baixos de densidade podem caracterizar muito ar dentro da amostra, prejudicando a resistência. Este parâmetro pode ser definido com importância relativamente baixa em termos de avaliação de desempenho.

- Teor de ar incorporado: obtido através do ensaio de densidade de massa, este teor apresenta dois efeitos contrários no desempenho de argamassas. Por um lado quanto maior, o teor de ar incorporado, melhor a trabalhabilidade, porém, por outro lado quanto maior o teor de ar incorporado, pior a resistência mecânica de uma argamassa. Sabendo que a resistência mecânica elevada não é um fator primordial para o desempenho de argamassas, considera-se que quanto maior o teor de ar incorporado, melhor o desempenho que ela irá apresentar até o limite de 20%. Mattana *et al.* (2012) destacam que argamassas com valores de ar incorporado acima de 20% devem ser descartadas, uma vez que a resistência do material tende a ser muito baixa. Este parâmetro é considerado como de importância relativamente baixa para avaliação de desempenho de argamassas.

- Retenção de água: é a capacidade da argamassa, no estado fresco, de reter água quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água por evaporação, sucção do substrato ou pela hidratação do cimento e carbonatação da cal (MATTANA, *et al.*, 2012). Assim quanto maior a retenção de água, melhor a condição de aplicação. Mattana *et al.* (2012) consideram essa propriedade importante para o desempenho das argamassas, uma vez que esse parâmetro permite que as reações de

endurecimento da argamassa tornem-se mais gradativas, o que promove a correta hidratação do cimento e o ganho de resistência do material.

- Densidade de massa no estado endurecido: é a relação entre massa e volume no estado endurecido, sendo que quanto menor seu valor melhor é o rendimento da argamassa. Esta propriedade apresenta baixa importância no estudo do desempenho das argamassas.

- Índice de vazios: representa a quantidade de vazios presentes na argamassa no estado endurecido. Pode ser avaliada pelo mesmo critério de rendimento: quanto maior o índice de vazios, melhor o rendimento. Porém, este critério só se aplica quando a percolação da água é avaliada pelo ensaio de capilaridade. Caso contrário está lógica não pode ser tomada como verdadeira, uma vez que altos índices de vazios podem comprometer à resistência mecânica da argamassa.

- Módulo de elasticidade: medida que permite avaliar a capacidade que a argamassa no estado endurecido apresenta de deforma-se sem apresentar ruptura quando sujeita a solicitações diversas, e de retornar à dimensão inicial quando estas solicitações cessam (MATTANA *et al.*, 2012). A elasticidade é uma propriedade que determina a ocorrência de fissuras no revestimento, sendo que a qualidade e a durabilidade de um revestimento de argamassa estão diretamente ligadas à capacidade de absorver deformações, que são representadas pelo módulo de elasticidade. Quanto menor o valor do módulo de elasticidade, melhor à capacidade de deformação da argamassa e melhor o desempenho que esse material terá em serviço. Este parâmetro é definido como uma característica de muita importância no desempenho de argamassas, uma vez que existe forte relação entre essa propriedade e a ocorrência de fissuras de retração e térmica.

- Resistência à compressão: ensaio tradicional para materiais cimentícios, principalmente por apresentar simples execução, sendo que de forma geral quanto maior o valor da resistência, melhor o desempenho da argamassa. Mattana *et al.* (2012) consideram o parâmetro como importante para avaliação do desempenho de argamassas.

- Resistência à tração na flexão: esforços de tração estão presentes nas argamassas de revestimentos de paredes e tetos como consequência de movimentações originadas por variações térmicas, por variações de umidade e por

retração. De forma geral quanto maior a resistência à tração na flexão da argamassa, melhor seu desempenho em serviço, porém valores muito elevados deste parâmetro podem causar redução do módulo de elasticidade do material.

- Aderência à tração da argamassa: a aderência da argamassa ao substrato pode ser definida como sendo a capacidade que a interface argamassa-substrato possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper. Além disso, manifestações patológicas como o descolamento em placas que ocorre junto à interface argamassa-substrato podem ser relacionadas com a inadequada condição do substrato para possibilitar a penetração da pasta de aglomerante em seus poros, como, por exemplo, base impregnada com pulverulência e com gordura. Assim, quanto maior o valor de aderência entre substrato e argamassa, melhor o desempenho do material e serviço. Além disso, Mattana *et al.* (2012) destacam que esta propriedade é definida como de extrema importância no estudo de argamassas.

- Absorção por capilaridade: o ensaio de absorção de água por capilaridade consiste em determinar a absorção capilar em um corpo de prova ao longo do tempo, em função da variação de massa até sua estabilização, sendo que quanto mais interligados forem os poros capilares, dependendo da quantidade e do diâmetro, maior será a absorção apresentada. Além disso, o ensaio caracteriza indiretamente a durabilidade; quanto menor o valor do coeficiente, melhor o desempenho da argamassa. Sendo assim esta propriedade é uma característica classificada como importante no estudo do desempenho das argamassas. No estudo desta propriedade é importante atentar-se para que a argamassa não apresenta coeficientes de capilaridades muito excessivos.

Além do estudo das propriedades das argamassas, destacadas anteriormente, o estudo dos componentes que compõem a argamassa é de grande importância para o entendimento do comportamento da argamassa em serviço. De maneira generalista, a função do cimento Portland é garantir adequada resistência mecânica e durabilidade à argamassa, enquanto o papel do agregado miúdo, usualmente utiliza-se areia, é amenizar problemas causados na retração por secagem da argamassa. Uma das propriedades mais desejadas para argamassas de múltiplo uso a serem utilizadas em revestimento e assentamento de blocos é a trabalhabilidade, propriedade está geralmente associada à componente cal hidratada. Além disso a cal hidratada tem a função de auxiliar na capacidade de absorver deformações da argamassa,



característica de extrema importância para argamassas de assentamento de blocos (SILVA *et al.*, 2011; BEZERRA *et al.*, 2011; ANTONIO, 2015; PALOMAR *et al.*, 2015).

## 2.2. Argamassas mistas de cimento e cal hidratada

Argamassas mistas de cimento e cal hidratada são muito utilizadas para argamassas de revestimento e de assentamento de blocos em decorrência das propriedades que o cimento e a cal hidratada proporcionam a este material de construção. Conforme descrito anteriormente, enquanto o cimento é responsável pela resistência mecânica e durabilidade da argamassa, a cal é responsável pela capacidade de absorver deformações e pela trabalhabilidade da mistura final (BASTOS E COUTO, 2009; MATTANA *et al.*, 2012; CASTRO E MARTINS, 2016; KAZMIERCZAK *et al.*, 2016; PALOMAR E BARLUENGA, 2017).

O grande problema do uso em conjunto destes dois materiais é que ambos geram grandes impactos ambientais durante sua produção e preço de mercado considerável, o que encarece o produto (AL-MULALI *et al.*, 2015; DOWLING *et al.*, 2015; CASTRO E MARTINS, 2016). Percebe-se que o desenvolvimento de materiais alternativos que possam substituir o cimento e a cal hidratada nas argamassas de múltiplo uso é de grande interesse para o setor da construção civil, uma vez que além do barateamento do material final, a substituição destas matérias por outros menos danosos ao meio ambiente é fundamental para que tal setor se torne cada vez mais sustentável.

Nesta dissertação, dois materiais serão testados com objetivo de substituir a cal hidratada: a argila e um resíduo proveniente da indústria de beneficiamento de mármore (pó de mármore). A argila foi escolhida porque já é amplamente utilizada como substituição da cal hidratada em obras de construção civil em decorrência de sua elevada plasticidade (NEHDI, 2014; ANDRES *et al.*, 2016). O resíduo de mármore foi escolhido porque apresenta composição química próxima à da cal hidratada e, portanto, pode apresentar parâmetros tecnológicos próximos a este aglomerante (AREL, 2016; MOLNAR E MANEA, 2016; SINGH *et al.*, 2017). Destaca-se, também, que a opção por substituir a cal hidratada, e não o cimento, é em função dos dois materiais estudados na pesquisa: a argila já é substituída por cal e o pó de mármore apresenta composição similar a cal. Portanto é mais coerente substituir a cal hidratada.

É importante ressaltar, que tanto a argila quanto o pó de mármore apresentam baixo valor comercial agregado e apresentam vantagens ecológicas quando comparados à cal hidratada. As vantagens ambientais podem ser entendidas uma vez que a argila é um material natural que não necessita de nenhum tratamento para ser utilizado em argamassas (NEHDI, 2014), ao contrário da cal que passa por um processo industrial altamente poluidor. Além disso, o resíduo de mármore atualmente é um lixo industrial sem nenhum fim comercial. Portanto, caso a substituição da cal pelo resíduo seja viável, além dos ganhos com a não emissão de gases poluentes pela indústria da cal, ocorrerão ganhos com a destinação de um material que atualmente fica disposto em grandes depósitos a céu aberto sem nenhuma outra função a não ser a de lixo.

### 2.3. Aglomerante cal hidratada

A cal hidratada pode ser definida como sendo um material pulverulento obtido pela hidratação da cal virgem e constituída essencialmente de hidróxido de cálcio, podendo apresentar ainda em sua composição hidróxido de magnésio ou óxido de magnésio (JUNIOR *et al.*, 2006; CHO *et al.*, 2017; NBR 7175, ABNT, 2003).

O entendimento das propriedades que a cal hidratada apresenta é melhor compreendido quando se analisa o ciclo da cal, sendo este uma série de reações que ocorrem na cal ao longo de sua vida útil.

De forma sucinta, este ciclo pode ser explicado da seguinte forma: os minerais que constituem as rochas carbonatadas cálcio-magnesianas, ou seja, calcita e aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), sofrem decomposição térmica emitindo  $\text{CO}_2$  para a atmosfera e produzindo cal virgem ou cal viva. Esta etapa do ciclo é chamada de calcinação ou descarbonização. Em seguida a cal virgem, composta predominantemente de  $\text{CaO}$ , e podendo conter também  $\text{MgO}$ , reage com a água formando a cal hidratada e liberando grande quantidade de calor durante esta reação, etapa conhecida com hidratação ou “extinção”. Por último, a cal hidratada, predominantemente  $\text{Ca(OH)}_2$ , endurece ao entrar em contato com o ar onde absorve  $\text{CO}_2$ , eliminando água e calor no processo e originando calcário como principal produto. Esta última etapa é chamada de carbonatação ou recarbonização (JUNIOR *et al.*, 2006; GUTIERREZ *et al.*, 2012). A Figura 2.2 ilustra este ciclo.

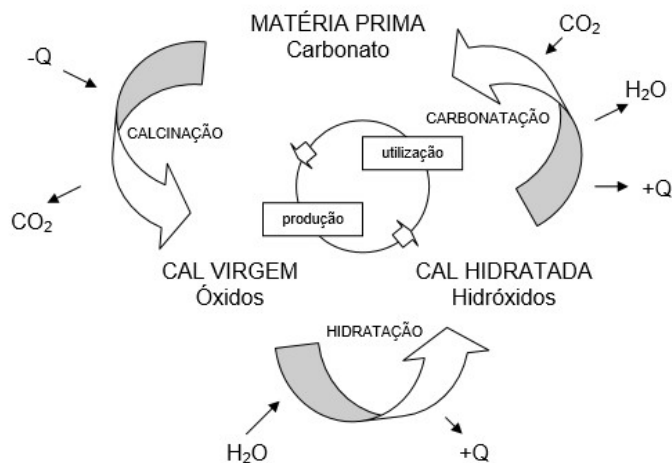


Figura 2.2 – Esquemática do ciclo da cal.

Fonte: Junior *et al.* (2006).

Desta maneira, é possível perceber que a composição química da cal hidratada é predominantemente hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , conforme destacado na definição da cal e na explicação do ciclo deste aglomerante. Como já destacado anteriormente, pode haver hidróxido ou óxido de magnésio na composição da cal hidratada (KALAITZAKI *et al.*, 2005; CHO *et al.*, 2017). Mineralogicamente, a cal hidratada é composta predominantemente por portlandita, podendo haver cristais de  $\text{CaCO}_3$  na estrutura do composto (SILVA *et al.*, 2014; CHO *et al.*, 2017), conforme observado na Figura 2.3.

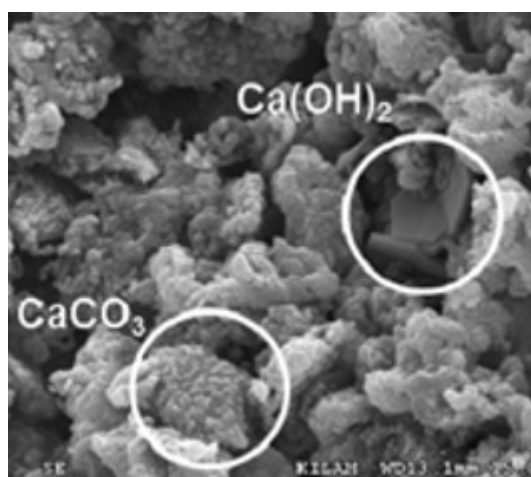


Figura 2.3 – Micrografia eletrônica de varredura na interface da pasta de cimento com areia.

Fonte: Cho *et al.* (2017).

Diversas exigências químicas são requeridas pela NBR 7175 (ABNT, 2003), que é a norma que regulariza os tipos de cal hidratada comercializados no Brasil

para utilização em argamassas. Basicamente, a norma divide as cales em três grupos distintos: CH-I, CH-II e CH-III, sendo a primeira considerada a cal hidratada mais “pura” e mais “nobre” e a última considerada a mais impura e menos nobre. Isto também causa um impacto no preço do produto e, por isso, CH-I é a mais cara entre as três opções, enquanto a CH-III é a mais barata. Os parâmetros químicos da cal são de extrema importância para avaliar o desempenho que a argamassa contendo este aglomerante irá desempenhar, uma vez que quanto maior a quantidade de impurezas contidas no material, estimado através de parâmetros como quantidade de anidrido carbônico e quantidade de óxidos de cálcio e magnésio não hidratados, pior serão as características de aglomeração e de poder de colar (NBR 7175, ABNT, 2003; JUNIOR *et al.*, 2006; PAIVA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2011). A Tabela 2.1 demonstra os limites químicos estipulados pela referida norma.

Tabela 2.1 – Exigências químicas para cal hidratada.

Fonte: NBR 7175 (ABNT, 2003).

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido Carbônico (CO <sub>2</sub> )	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 7%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxido de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO+MgO) <sup>1</sup>		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não voláteis (CaO <sub>t</sub> +MgO <sub>t</sub> ) <sup>1</sup>		≥90%	≥88%	≥88%

<sup>1</sup> A norma também explica o procedimento para obter estes dois parâmetros, porém não descrito nesta dissertação.

De acordo com a NBR 7175 (ABNT, 2003), os principais parâmetros químicos da cal hidratada são:

- Quantidade de anidrido carbônico (CO<sub>2</sub>): o gás carbônico, também chamado de anidrido carbônico ou dióxido de carbono, é liberado na queima das rochas que formarão a cal virgem. A determinação da quantidade de CO<sub>2</sub> na argamassa é de extrema importância porque possibilita identificar se o minério utilizado na produção do material foi bem calcinado ou se alguma parte do material ficou sem reagir. Além disso serve para identificar se houve carbonatação no armazenamento da cal hidratada por contato com dióxido de carbono no meio

ambiente. O ensaio para determinação deste parâmetro consiste em queimar uma amostra da cal hidratada e verificar o quanto de gás carbônico foi liberado. Quanto mais CO<sub>2</sub> for liberado no ensaio, pior foi o processo de queima da rocha que serviu de matéria prima para este aglomerante.

- Quantidade de óxidos não hidratados: este parâmetro avalia a quantidade de cal virgem que não foi hidratada com água na produção da cal hidratada. Por isso, quanto maior essa quantidade, menor a fração de cal hidratada efetivamente no produto e, conseqüentemente, menor o poder de aglomeração da cal hidratada analisada. Esse parâmetro também é importante para verificar se existe a possibilidade de ocorrer pequenas bolhas na parede durante a vida útil da argamassa em decorrência da hidratação tardia da cal hidratada.

- Quantidade de óxidos totais: quanto maior for a fração de impurezas na amostra, medidos através dos dois parâmetros anteriores, menor a fração de cal hidratada efetivamente no produto. Este parâmetro mede a qualidade da matéria prima que foi utilizada na produção da cal hidratada.

Sobre as características físicas, a norma também limita algumas propriedades conforme a classificação das cales. Estes parâmetros são importantes porque estabelecem se a cal hidratada passou por processo de moagem adequada durante sua fabricação, se é econômica, se tem trabalhabilidade adequada para uso da mão de obra da construção civil e se a argamassa composta com este aglomerante irá apresentar retenção de água, ou se irá perder água excessivamente para o substrato sobre o qual foi aplicada (NBR 7175, ABNT, 2003; SILVA *et al.*, 2005; PAIVA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2011). A Tabela 2.2 indica esta classificação.

Os parâmetros físicos descritos pela NBR 7175 (ABNT, 2003) são detalhados a seguir:

- Finura: o parâmetro é determinado através do peneiramento de amostras em duas peneiras de aberturas diferentes. A norma especifica valores limites para esta quantidade, porque caso os valores obtidos sejam maiores que os estipulados pela norma conclui-se que a cal hidratada não foi bem moída no processo de fabricação.

Tabela 2.2 – Exigências físicas para cal hidratada.

Fonte: NBR 7175 (ABNT, 2003).

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥75%	≥75%	≥70%
Incorporação de areia		≥3%	≥2,5%	≥2,2%
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥110	≥110	≥110

- Plasticidade: através desta propriedade é possível analisar se a cal hidratada dará origem a argamassas com bons parâmetros de trabalhabilidade, fundamentais para que se obtenha uma maior qualidade no serviço em que a argamassa será utilizada.

- Retenção de água: a água utilizada na argamassa não deve ser rapidamente perdida para o substrato onde a argamassa foi aplicada, porque caso contrário a argamassa poderá apresentar pequenas rachaduras depois de seca, comprometendo o acabamento da argamassa na parede. Além disso, caso a argamassa perca água rapidamente, o cimento Portland não terá água suficiente para se hidratar, e a argamassa poderá apresentar problemas de resistência mecânica. É através deste parâmetro que essas informações são avaliadas.

- Incorporação de areia: como a argamassa é constituída por aglomerante, areia e água, quanto mais areia a argamassa tiver, sem que seu desempenho seja comprometido, mais econômica será a argamassa utilizada.

- Estabilidade: é necessário verificar através do ensaio apropriado se a cal hidratada apresenta em sua composição substâncias expansivas, ou seja, substâncias que tenham a tendência de reagir depois que a argamassa já está seca e aplicada sobre o substrato. Caso haja essas substâncias, a argamassa pode sofrer expansão de volume e descolamento de parte de sua estrutura do substrato.

Conforme destacado anteriormente, um dos grandes usos da cal hidratada é em argamassa, principalmente nas de assentamento e revestimento. Este uso se

deve ao fato de que no estado fresco a cal proporciona maior plasticidade e, conseqüentemente, maior trabalhabilidade à argamassa, aumentando desta forma a produtividade na execução dos revestimentos e do assentamento dos blocos. Outra propriedade importante no desempenho das argamassas obtida com uso da cal hidratada é a retenção de água, já que se a argamassa não tiver correta retenção de água, o substrato onde ela está aplicada irá sugar a água da argamassa, evitando que as reações de hidratação do cimento ocorram corretamente (JUNIOR *et al.*, 2006; PAIVA *et al.*, 2007; ANTONIO, 2015).

No estado endurecido, a cal hidratada é responsável por auxiliar na capacidade de absorver deformações, necessária ao correto desempenho da argamassa que deve acompanhar as movimentações sofridas pela estrutura. Isto é possível porque o uso da cal hidratada proporciona redução do módulo de elasticidade da argamassa, que melhora seu desempenho em acomodar deformações. A cal hidratada tem papel importante na diminuição da retração, o que proporciona menores variações dimensionais na argamassa. Por fim, o aglomerante citado, carbonata lentamente ao longo do tempo, diferente do cimento que sofre hidratação e endurecimento mais acelerado até os 28 dias de idade, o que proporciona tamponamento de eventuais fissuras ocorridas no endurecimento da argamassa mista (JUNIOR *et al.*, 2006; PAIVA *et al.*, 2007; ANTONIO, 2015).

Um dos grandes problemas do uso desenfreado da cal hidratada em argamassas é que o preço do kg deste aglomerante é muito similar ao preço do kg de cimento Portland, chegando a ser mais caro em alguns casos. Junior *et al.* (2006) realizaram um comparativo entre o preço de três cales hidratadas com o cimento Portland CP II Z 32 em Recife, conforme ilustrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Comparativo entre o preço/kg das cales X, Y e Z e do cimento Portland CP II Z 32 em Recife.

Fonte: Junior *et al.* (2006).

Aglomerante	Cal X	Cal Y	Cal Z	CIM CP
Rs/kg	0,22	0,275	0,29	0,264

Observa-se que o preço da cal hidratada é bastante similar ao cimento Portland, sendo até mais caro no caso das cales Y e Z. Portanto as argamassas convencionais são opções muito caras de argamassas, não apenas em função do uso do cimento, mas também por causa do uso da cal hidratada. A substituição

parcial ou total destes dois aglomerantes é importante na tecnologia de argamassas, porque, conforme ilustrado, causa o barateamento do produto.

Outro problema a ser destacado que envolve o uso da cal hidratada em argamassas é o grande impacto ambiental gerado na produção deste material. George *et al.* (2010), Gutierrez *et al.* (2012) e Dowling *et al.* (2015) destacam que para a produção de 1 tonelada de cal hidratada são emitidas 1,2 toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera em decorrência da etapa de descarbonização. Gutierrez *et al.* (2012) destacam ainda que o processo de produção deste aglomerante é uma das atividades que possui a maior emissão específica de CO<sub>2</sub> e que, por isso, este setor industrial é um dos principais atores das mudanças climáticas enfrentadas por todo planeta. Percebe-se a grande necessidade do surgimento de novos aglomerantes que não apresentem etapas industriais tão danosas afim de contribuir, desta forma, para o desenvolvimento sustentável do setor construtivo.

Além de ser usada na composição de argamassas, a cal hidratada também é utilizada na fabricação de blocos construtivos, na estabilização de solos, em pintura de paredes com o princípio da caiação ou como forma de adição ao cimento Portland na forma de filler calcário. Estes usos não serão levados em consideração na presente dissertação, uma vez que o foco do trabalho é verificar a possibilidade da substituição da cal hidratada unicamente em argamassas de múltiplo uso.

Segundo Silva *et al.* (2011) e Mattana *et al.* (2012) os traços de argamassas de revestimento e assentamento de blocos mais utilizados são 1:1:6 e 1:2:9 (cimento Portland: cal hidratada: areia) ambos mantendo a relação aglomerante/agregado em 3:1. Nesta dissertação optou-se por estudar as argamassas na proporção 1:1:6, uma vez que existem diversos trabalhos na bibliografia que utilizam este traço e, desta forma, estudos comparativos podem ser realizados.

#### 2.4. Trabalhos com argamassas mistas de cimento e cal hidratada

A seguir são descritos alguns trabalhos de diferentes autores que utilizaram em sua pesquisa argamassas mistas de cimento e cal na proporção 1:1:6. O objetivo desta descrição não é indicar a conclusão alcançada pelos autores, mas sim apresentar os parâmetros tecnológicos dessas argamassas, com o intuito de criar uma ferramenta de comparação com os traços obtidos no presente trabalho, uma vez que objetiva-se criar um aditivo mineral que irá substituir a cal hidratada, mas



sem alterar de forma significativa as propriedades dessas argamassas mistas. Busca-se, aqui, contextualizar de onde os dados apresentados foram extraídos, mas sem aprofundar nas conclusões obtidas. Serão destacados apenas os traços de referência utilizados, sem se preocupar em descrever os traços contendo tratamentos experimentais.

Silva *et al.* (2011) e Mattana *et al.* (2012) realizaram estudos de diferentes propriedades geométricas de argamassas mistas na proporção 1:1:6 utilizando como agregados areia natural e areia de britagem de rochas ornamentais, ambos com  $D_{máx}=2,4\text{mm}$ . Os resultados obtidos pelo autor são detalhados na Tabela 2.4.

Palomar *et al.* (2015) e Palomar e Barluenga (2017) estudaram diferentes argamassas mistas 1:1:6 com variação dos tipos de agregado. Os autores utilizaram agregados de areia com tamanho de partícula entre 0-4 mm e com tamanho de partícula entre 2-3mm, além de argila expansiva. Os resultados obtidos pelos autores são destacados na Tabela 2.4.

Mota *et al.* (2016) realizaram um estudo com intuito de verificar se a substituição parcial de cimento Portland por metacaulim era prejudicial ou benéfica para as propriedades das argamassas. Em seus estudos um dos traços utilizados foi o 1:1:6 (cimento: cal: areia) com 0% de substituição, que correspondia ao traço de referência do estudo citado, conforme indicado na Tabela 2.5.

Carasek *et al.* (2016) estudaram os parâmetros de diferentes tipos de areia utilizadas para confeccionar argamassas mistas de diferentes proporções de cimento e cal hidratada. As propriedades mecânicas encontradas no estudo são indicadas na Tabela 2.5, onde é possível identificar o uso de 5 diferentes tipos de agregado (na tabela destaca-se apenas a areia natural, que foi utilizada nessa pesquisa).

Kazmierczak *et al.* (2016) verificaram a influência do filer da areia de britagem nas propriedades de argamassas mistas, realizando a substituição parcial de areia natural no traço 1:1:6 pelo filer em 1,5%, 6%, 10%, 20% e 30%. Os resultados são demonstrados na Tabela 2.5.

Cuadrado *et al.* (2017) analisaram a interferência da substituição de cimento Portland por cinza volante em argamassas mistas de cimento e cal na proporção de 1:1:6. Os resultados obtidos são destacados na Tabela 2.5.

Palomar e Barluenga (2018) realizaram estudo em argamassas mistas contendo diferentes agregados, entre eles areia natural, utilizando proporções variadas, incluindo o traço 1:1:6. Os autores realizaram o estudo com intuito de verificar a porosidade das argamassas estudadas. O traço de controle utilizado pelos autores está apresentado na Tabela 2.5, onde os parâmetros tecnológicos são indicados.

Um estudo mais antigo, porém, de grande valia e aplicação para a tecnologia das argamassas, foi realizado por Gomes e Neves (2002) em que os autores criaram uma metodologia racional de dosagem de argamassas que apresentam em sua composição argilominerais da região nordeste do Brasil. Para efeito de comparação os autores caracterizaram uma argamassa mista de cimento e cal hidratada. Os valores do traço de referência são apresentados na Tabela 2.5.

Assim com base no estado da arte, espera-se que a argamassa de referência utilizada nesta dissertação apresente parâmetros tecnológicos próximos aos encontrados pela bibliografia apresentada.

Destaca-se que, para que os aglomerantes testados (argila e pó de mármore) obtenham êxito em seu desempenho em serviço, é necessário que as propriedades tecnológicas apresentadas pelas argamassas confeccionadas com esses materiais apresentem valores semelhantes aos encontrados para o traço de referência. Melhorias nessas propriedades serão consideradas aceitáveis, porém, caso os aglomerantes causem significativas pioras nos parâmetros das argamassas de referência, o uso desses novos aglomerantes se mostrará inviável.

Tabela 2.4 – Estudos com diferentes traços 1:1:6.

Fonte: Silva *et al.* (2011), Mattana *et al.* (2012), Palomar *et al.* (2015) e Palomar e Barluenga (2017).

Propriedades	Silva <i>et al.</i> (2011) e Mattana <i>et al.</i> (2012)	Silva <i>et al.</i> (2011) e Mattana <i>et al.</i> (2012)	Palomar <i>et al.</i> (2015) e Palomar e Barluenga (2017)	Palomar <i>et al.</i> (2015) e Palomar e Barluenga (2017)	Palomar <i>et al.</i> (2015) e Palomar e Barluenga (2017)
Tipo de Cimento	CP-II-Z-32	CP-II-Z-32	Cimento Branco BL tipo II/B-L 32.5N <sup>1</sup>	Cimento Branco BL tipo II/B-L 32.5N <sup>1</sup>	Cimento Branco BL tipo II/B-L 32.5N <sup>1</sup>
Tipo de Cal	CH-III	CH-III	CL 90-S <sup>1</sup>	CL 90-S <sup>1</sup>	CL 90-S <sup>1</sup>
Tipo de Agregado	Areia natural de rio com D <sub>max</sub> =2,4 mm	Areia de britagem de rocha calcária com D <sub>max</sub> =2,4 mm	Areia natural 0-4 mm	Areia natural 2-3 mm	Argila expansiva
Densidade de massa no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	1986	2066	2030	1880	1630
Retenção de água (%)	46,22	64,03	-	-	-
Teor de ar incorporado (%)	1,04	0,33			
Relação água/materiais secos	0,24	0,23	0,12	0,08	0,11
Índice de consistência (mm)	270	270	175	177	175
Densidade de massa no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	1724	1774	1277	1393	888
Índice de vazios após saturação e fervura (%)	32,38	33,48	25,65	17,83	17,01
Coefficiente de Capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	2,45	2,64	1,30	0,53	0,50
Resistência à compressão (MPa)	2,87	2,82	6,50±0,55	6,17±0,75	7,83±1,17
Resistência à tração na flexão (MPa)	0,78	1,07	2,14±0,14	1,59±0,04	2,22±0,03
Módulo de elasticidade (GPa)	4,11	4,23	12,34±0,97	16,29±1,59	14,18±1,17
Aderência à tração (MPa)	0,27	0,25	0,41	0,27	0,23

<sup>1</sup> cimento e cal hidratada de acordo com padrão europeu.

Tabela 2.5 – Estudos com diferentes traços 1:1:6.

Fonte: Gomes e Neves (2002), Mota *et al.* (2016), Carasek *et al.* (2016), Kazmierczak *et al.* (2016), Cuadrado *et al.* (2017), Palomar e Barluenga (2018).

Propriedades	Mota <i>et al.</i> (2016)	Carasek <i>et al.</i> (2016)	Kazmierczak <i>et al.</i> (2016)	Cuadrado <i>et al.</i> (2017)	Palomar e Barluenga (2018)	Gomes e Neves (2002)
Tipo de Cimento	CP-II-Z-32	CP-II-F-32	CP-II-Z-32	CEM 1 42.5R	Cimento Branco BL tipo II/B-L 32.5N <sup>1</sup>	CP-II-F-32
Tipo de Cal	CH-I	CH-I	CH-I	CL-90-S	CL 90-S <sup>1</sup>	CH-I
Tipo de Agregado	Areia natural quartzosa D <sub>max</sub> =2,4mm	Areia natural com D <sub>max</sub> =1,2mm	Areia natural D <sub>max</sub> =2,4mm	Areia natural 0-2mm	Areia natural 2-3 mm	Areia natural D <sub>max</sub> =1,2mm
Densidade de massa no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	-	2040	2020	2052	-	2023
Retenção de água (%)	-	-	97	-	-	91
Teor de ar incorporado (%)	-	-	4,40	6,20	-	5,00
Relação água/materiais secos	0,19	0,23	0,198	0,15	0,10	0,18
Índice de consistência (mm)	-	348	260±5	175±10	-	254
Densidade de massa no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	1810	1812	1830	1790
Absorção de água (%)	10,46±0,18	-	16	22,93	-	15,00
Índice de vazios (%)	-	-	29,2	-	16,42±1,22	27,00
Coefficiente de Capilaridade (kg/m <sup>2</sup> min <sup>1/2</sup> )	-	-	1,6	-	0,65±0,10	1,20
Resistência à compressão (MPa)	7,53±0,24	-	2,70	2,41	9,67±1,63	5,2
Resistência à tração na flexão (MPa)	-	-	0,80	-	2,34±0,10	0,69
Módulo de elasticidade (GPa)	10,22±0,44	-	4,101	-	13,55±0,66	-

## 2.5. Argila como material para argamassas

Uma alternativa para amenizar os problemas econômicos e ambientais associadas ao uso da cal hidratada em argamassas é substituir esse material por argila, prática muito difundida no setor da construção civil, porém com poucos estudos científicos e acadêmicos (NEHDI, 2014).

Tradicionalmente a argila pode ser definida como uma fração granulométrica do solo com tamanho de grãos inferiores à  $2\mu\text{m}$  (COUTINHO E VIEIRA, 2016; GAMA *et al.*, 2017; SCHJONNING *et al.*, 2017). Outra definição utilizada para argila é que ela é a matéria-prima básica para materiais cerâmicos, composto predominantemente por material cristalizado (OLIVEIRA *et al.*, 2017; AREIAS *et al.*, 2017). E ainda a argila é definida como um material natural composto por partículas pequenas de um ou mais argilominerais, podendo ser considerada como um tipo de solo (CARASEK, 2004; ZHOU *et al.*, 2016; HAMIDI E MARANDI, 2018). Regionalmente este material recebe diferentes denominações, tais como barro, saibro, taguá, arenoso, caulim, massara, piçarra, salmorão, argila de goma, areia rosa, areia de meia liga, areia de reboco e outros (CARASEK, 2004).

O uso da argila no setor da construção civil é bastante diversificado. Esse material pode ser utilizado como matéria prima para tijolos, blocos e telhas cerâmicas, louças sanitárias, azulejos, pastilhas e porcelanatos, ou ainda em usos medicinais e estéticos (MORAIS E SPOSTO, 2017), sendo também utilizada como adição mineral em argamassas, substituindo a cal hidratada. No estudo das argilas, ou de qualquer outro tipo de solo, alguns parâmetros são de extrema importância para a classificação e para o entendimento de como se comportará os materiais confeccionados com estes materiais em serviço. As principais propriedades avaliadas são: composição química através da fluorescência de raios-X por dispersão de energia, análise mineralógica através do difratograma de raios-X, a distribuição do tamanho das partículas através da análise granulométrica, os limites de liquidez e plasticidade obtidos através do método de Atterberg e a análise térmica através das curvas ATD/TG/DTG. No que diz respeito às argamassas, o único desses parâmetros que não se aplica é a análise térmica, uma vez que nenhum tratamento térmico será realizado para incorporação da argila em argamassas.

As argilas da cidade de Campos dos Goytacazes, interior do estado do Rio de Janeiro, já foram amplamente estudadas e caracterizadas por pesquisadores da região. Os estudos foram motivados pelo fato da cidade ser um grande polo produtor de cerâmica vermelha, sendo que esse setor industrial corresponde uma das principais atividades econômicas da baixada fluminense. O polo apresenta mais de cem cerâmicas, que produzem mensalmente cerca de noventa milhões de peças, entre telhas, tijolos e lajotas e respondem por aproximadamente três mil empregos diretos (RAMOS *et al.*, 2008). Portanto, esses trabalhos envolvendo a caracterização das argilas campistas apresentaram grande aplicação prática para as indústrias ceramistas da região.

As primeiras pesquisas feitas nas jazidas foram realizadas por Alexandre (2000) e Vieira (2001), em que ambos pesquisadores caracterizaram diversas jazidas utilizadas pelas cerâmicas da baixada campista. Alexandre (2000) já havia realizado um estudo anterior nas jazidas de Campos utilizando 21 amostras diferentes. Porém, optou por destacar o trabalho posterior, em que o pesquisador analisa dois grupos de argilas distintas retiradas em diferentes jazidas (G1 e G2), extraindo amostra de 3 profundidades diferentes, totalizando 6 amostras estudadas por se tratar de um trabalho mais completo. As curvas granulométricas obtidas pelo autor são apresentadas na Figura 2.4. A Tabela 2.6 apresenta o fracionamento granulométrico encontrado para as amostras, enquanto a Tabela 2.7 apresenta a massa específica dos grãos e os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) obtidos pelo autor. A Figura 2.5 apresenta a caracterização mineralógica encontrada para as amostras e a Tabela 2.8 indica a composição química as argilas estudadas.

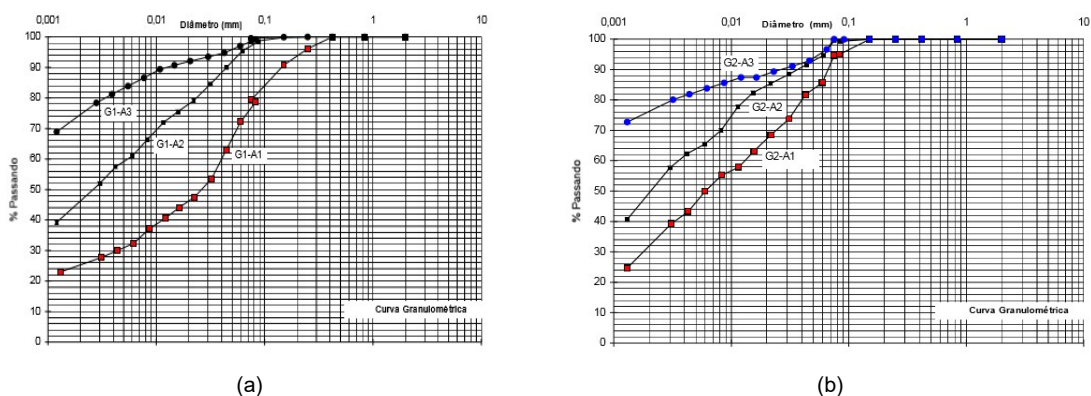


Figura 2.4 – (a) Curvas granulométricas das amostras A1, A2 e A3 do G1 e (b) Curvas granulométricas das amostras A1, A2 e A3 do G2.

Fonte: Alexandre (2000).

Tabela 2.6 – Fracionamento das amostras estudadas por Alexandre (2000).

Fonte: Alexandre (2000).

Camadas Campistas	Percentuais			
	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
G1-A1	6	22	47	25
G1-A2	0	4	50	46
G1-A3	0	3	23	74
G2-A1	0	14	54	32
G2-A2	0	5	45	50
G2-A3	0	4	20	76

Tabela 2.7 – Massa específica, LL e LP obtidos por Alexandre (2000).

Fonte: Alexandre (2000).

Camadas Campistas	Parâmetros			
	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
G1-A1	44	27	17	2,68
G1-A2	64	28	36	2,65
G1-A3	76	37	39	2,62
G2-A1	60	29	31	2,67
G2-A2	57	25	32	2,64
G2-A3	85	27	58	2,60

Analisando os resultados obtidos, Alexandre (2000) chegou à conclusão que as amostras da baixada campista estudadas apresentam altos teores de plasticidade devido a seu alto teor de partículas finas, evidenciado pelos índices de plasticidade obtidos. O autor conclui que à medida que a posição em que a argila é extraída é fundamental para determinar seus parâmetros: camadas mais profundas apresentam argilas mais plásticas, uma vez que a fração argila para estas camadas é mais acentuada. A porcentagem de finos (<0,075 mm) das amostras estudadas pode ser estimada através da curva granulométrica da Figura 2.4, em que se obtém um teor de aproximadamente 97% para as amostras G1-A2, G1-A3, G2-A1 e G2-A2, cerca de 90% para G2-A3 e de 72% para G1-A3, destacando que partículas mais finas são encontradas em maiores profundidades.

Através da análise química e mineralógica, Alexandre (2000) concluiu que as argilas da região estudada apresentam predominância do argilomineral caulinita, evidenciado pelos picos característicos obtidos na difração de raios-X e pela presença de altos teores de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> obtidos na análise química das amostras. Essas propriedades obtidas pelo pesquisador são de extrema relevância para o

uso das argilas em argamassas de múltiplo uso, conforme será discutido mais adiante.

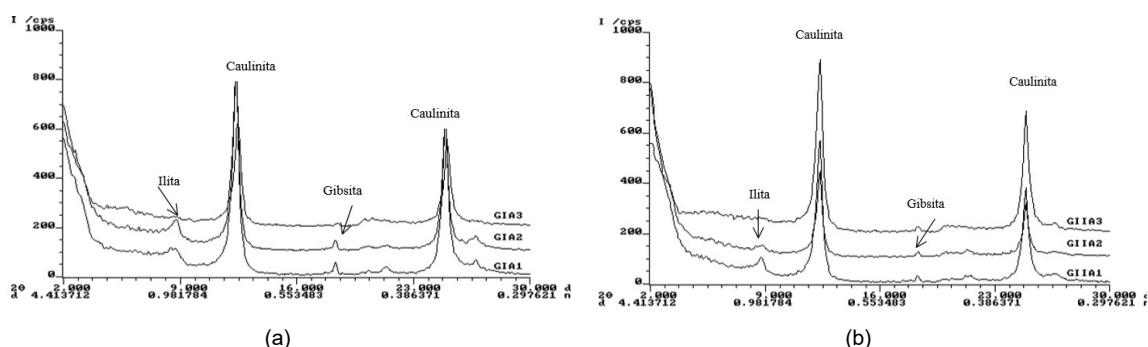


Figura 2.5 – (a) Difração de raios-X das amostras do grupo G1 e (b) Difração de raios-X das amostras do grupo G2.

Fonte: Alexandre (2000).

Tabela 2.8 – Análise química das amostras estudadas por Alexandre (2000).

Fonte: Alexandre (2000).

Amostras	Valores obtidos utilizando o método da Embrapa (1979) com ataque de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/kg)			
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
G1-A1	171	185	69	9,8
G1-A2	264	788	99	1,98
G1-A3	305	269	40	2,07
G2-A1	214	215	88	1,69
G2-A2	253	256	96	1,68
G2-A3	298	267	47	1,90

Vieira (2001) realizou a caracterização de duas argilas tipicamente utilizadas para produção de peças cerâmicas no polo industrial de Campos dos Goytacazes. O autor nomeou as duas amostras como “argila cinza” e “argila amarela”, sendo que a amostra de coloração cinza em geral é obtida em camadas mais profundas e a de coloração amarela obtida nas camadas mais superficiais das jazidas. A Figura 2.6 indica a distribuição granulométrica da amostra estudada, enquanto a Tabela 2.9 indica os demais parâmetros físicos encontrados na pesquisa. A Figura 2.7 indica a análise mineralógica e a Tabela 2.10 indica a análise química da argila pesquisada pelo autor. Todos os resultados encontrados estão de acordo com os resultados obtidos por Alexandre (2000), isto é, ambos os autores chegaram à conclusão de que a argila de Campos dos Goytacazes apresenta bons parâmetros de trabalhabilidade, grande porcentagem de grãos finos e predominância do argilomineral caulinita. Vieira (2001) destaca também que a as



amostras analisadas provavelmente apresentam outros argilominerais do grupo das micas e das esmectitas, porém em menor quantidade do que o mineral caulinita. O autor encontrou teores de finos bem variados nas duas argilas analisadas, encontrando 98% para a argila cinza e cerca de 70% para a argila amarela, o que pode comprovar a conclusão de Alexandre (2000) que o teor de finos varia com a profundidade da argila.

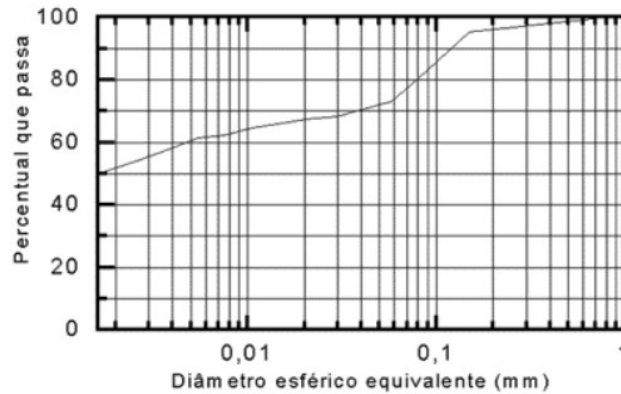


Figura 2.6 – Análise Granulométrica das amostras estudadas.

Fonte: Vieira (2001).

Tabela 2.9 – Parâmetros físicos para as amostras estudadas por Vieira (2001).

Fonte: Vieira (2001).

Parâmetro	Argila Cinza	Argila Amarela
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,64	2,68
Limite de Liquidez (%)	75	52
Limite de Plasticidade (%)	23	19
Índice de Plasticidade (%)	52	33

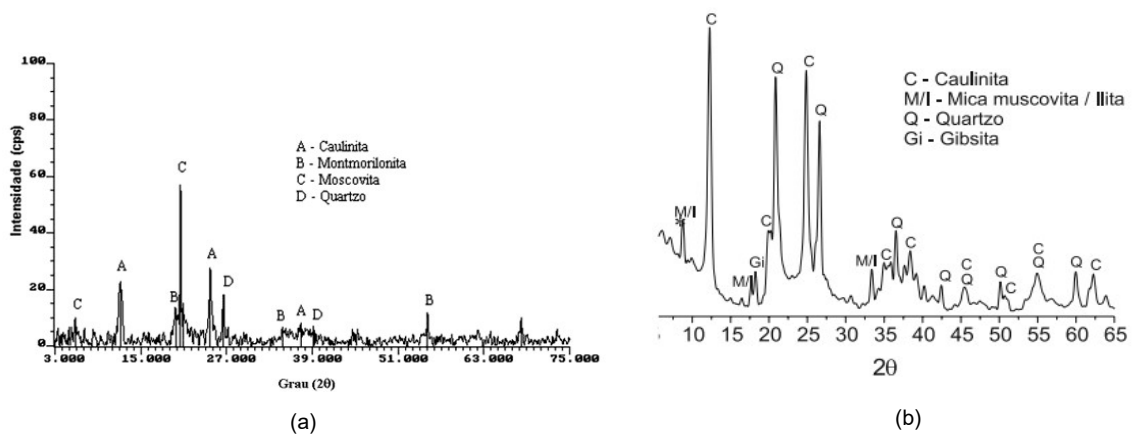


Figura 2.7 – Análise mineralógica das amostras estudadas por Vieira (2001): (a) Argila cinza e (b) Argila Amarela.

Fonte: Vieira (2001).

Tabela 2.10 – Análise química das amostras estudadas por Vieira (2001).

Fonte: Vieira (2001).

Composição	Argila Cinza (%)	Argila Amarela (%)
SiO <sub>2</sub>	47,38	51,67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,83	25,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,59	7,81
CaO	0,15	0,13
MgO	0,28	0,59
Na <sub>2</sub> O	0,083	0,39
K <sub>2</sub> O	0,54	1,33
TiO <sub>2</sub>	1,21	1,37
PF <sup>1</sup>	14,0	11,5

<sup>1</sup> PF= perda ao fogo à 1000°C

Recentemente outros pesquisadores analisaram diferentes argilas extraídas de jazidas da baixada fluminense. Os resultados obtidos por Vieira *et al.* (2011), Candido *et al.* (2013), Coutinho e Vieira (2016) e Areias *et al.* (2017) são ilustrados nas Figuras 2.8 e 2.9 e nas Tabelas 2.11 e 2.12, que apresentam a distribuição granulométrica dos materiais estudados, a análise mineralógica, os parâmetros físicos obtidos e a análise química, respectivamente. Todos os autores chegaram as mesmas conclusões já obtidas pelos estudos precursores de Alexandre (2000) e Vieira (2001).

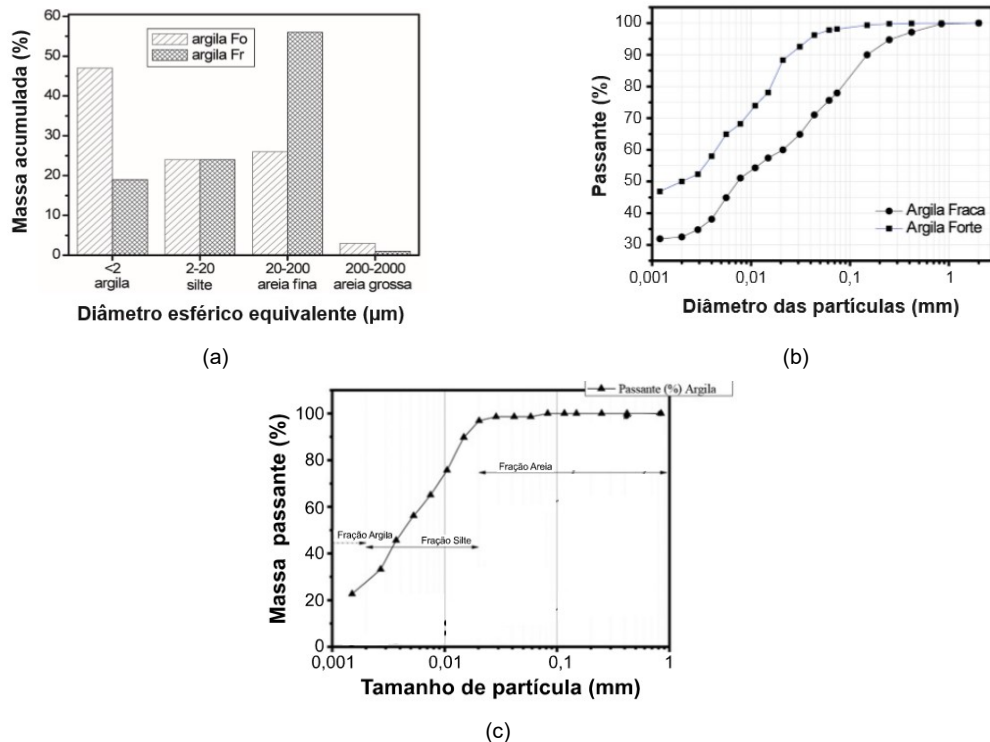


Figura 2.8 – Análise granulométricas das amostras estudadas por (a) Vieira *et al.* (2011), (b) Candido *et al.* (2013) e (c) Coutinho *et al.* (2016).

Fonte: Vieira *et al.* (2011), Candido *et al.* (2013) e Coutinho e Vieira (2016).

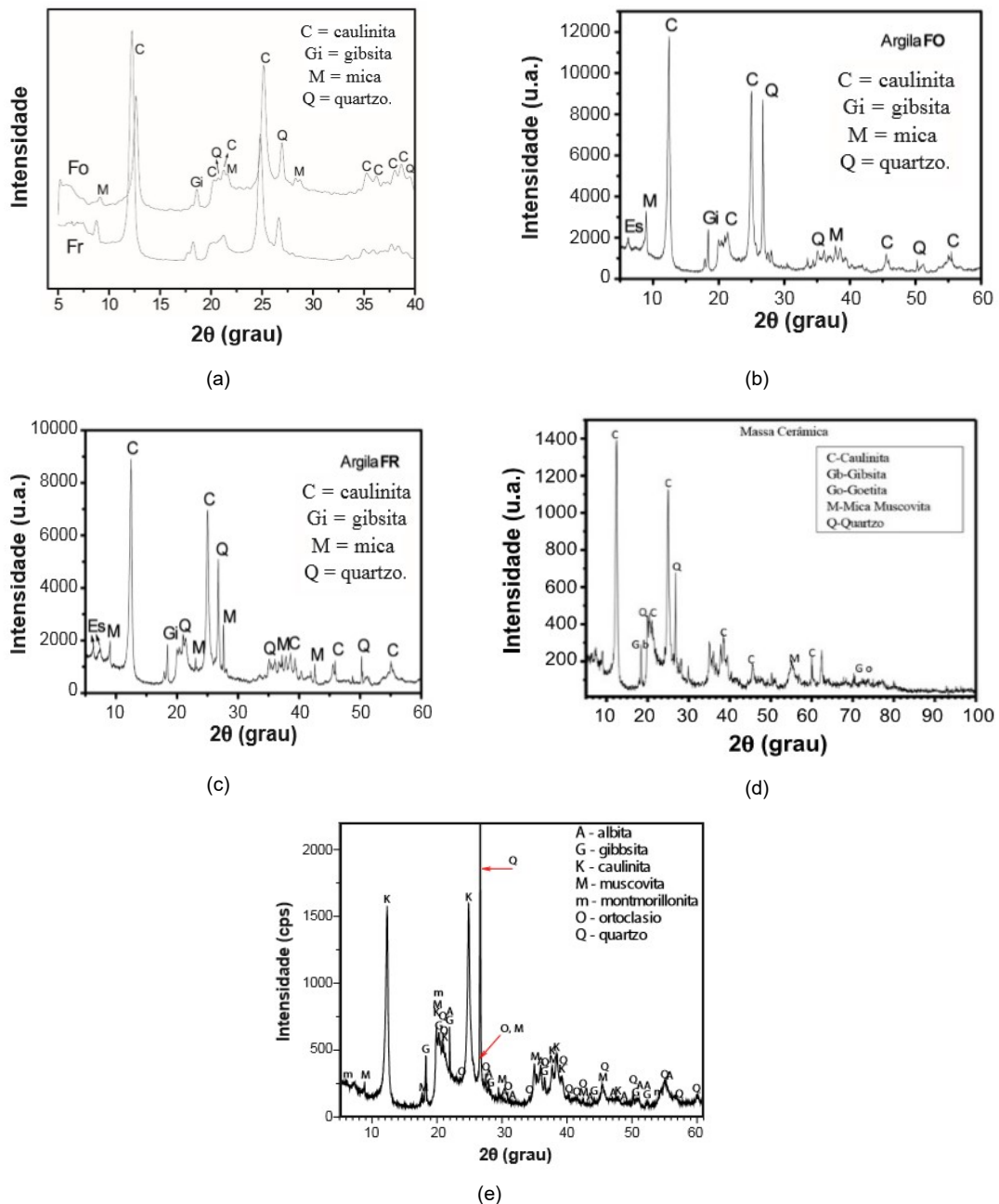


Figura 2.9 – Análise mineralógica das amostras estudadas por (a) Vieira *et al.* (2011), (b) (c) Candido *et al.* (2013), (d) Coutinho e Vieira (2016) e (e) Areias *et al.* (2017).

Fonte: Vieira *et al.* (2011), Candido *et al.* (2013), Coutinho *et al.* (2016) e Areias *et al.* (2017).

Diante desses resultados um dado muito importante é obtido quando se objetiva utilizar a argila da região de Campos dos Goytacazes em argamassas de múltiplo uso: por possuir excelentes parâmetros de plasticidade, é provável que a argamassa confeccionada com este material apresente bons parâmetros de aderência ao substrato. O fato das argilas apresentarem granulometria com maior porcentagem de partículas finas é vantajoso porque o objetivo da pesquisa é substituir a cal hidratada, que é um material com extrema finura.

Tabela 2.11 – Parâmetros Físicos de diferentes estudos realizados com argilas das jazidas de Campos.

Fonte: Vieira *et al.* (2011), Candido *et al.* (2013), Coutinho e Vieira (2016) e Areias *et al.* (2017).

Parâmetro	Argila FO – Vieira <i>et al.</i> (2011)	Argila FR – Vieira <i>et al.</i> (2011)	Argila Fraca – Candido <i>et al.</i> (2013)	Argila Forte – Candido <i>et al.</i> (2013)	Massa cerâmica – Areias <i>et al.</i> (2017)
Limite de Liquidez (%)	59	49	46	65	-
Limite de Plasticidade (%)	32	25	26	32	-
Índice de Plasticidade (%)	27	24	20	33	-
Área de superfície específica total – AM (m <sup>2</sup> /g)	-	-	-	-	105,4
Área de superfície específica externa – BET (m <sup>2</sup> /g)	-	-	-	-	20,00

Tabela 2.12 – Análise química de diferentes estudos realizados com argilas das jazidas de Campos.

Fonte: Vieira *et al.* (2011), Candido *et al.* (2013), Coutinho e Vieira (2016) e Areias *et al.* (2017).

Composição (%)	Argila FO – Vieira <i>et al.</i> (2011)	Argila FR – Vieira <i>et al.</i> (2011)	Argila Fraca – Candido <i>et al.</i> (2013)	Argila Forte – Candido <i>et al.</i> (2013)	Massa argilosa – Coutinho e Vieira (2016) e Areias <i>et al.</i> (2017)
SiO <sub>2</sub>	48,84	55,75	54,7	46,09	62,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,94	21,48	21,61	26,78	21,23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,14	8,55	9,92	10,05	2,73
CaO	0,30	0,39	0,57	0,34	0,35
MgO	0,83	0,98	0,86	0,71	0,48
Na <sub>2</sub> O	0,46	0,74	-	-	0,38
K <sub>2</sub> O	1,91	2,27	2,47	1,66	1,21
TiO <sub>2</sub>	1,30	1,18	1,35	1,59	0,89
PF <sup>1</sup>	12,06	8,30	7,56	11,96	9,47

<sup>1</sup> PF= perda ao fogo à 1000°C

Porém, é importante destacar um grande problema que as argamassas confeccionadas com argila costumam apresentar. Por possuir uma estrutura química e mineralógica instável em presença de água devido a elevada atividade superficial das partículas de argila, problemas patológicos são frequentes em argamassas contendo esse material.

A explicação para este fato pode ser melhor compreendida analisando a estrutura da argila. Esse material apresenta uma aparência amorfa, porém na verdade é composta por pequeníssimos minerais cristalinos, denominados argilominerais (BERTHONNEAU *et al.*, 2017; TAN *et al.*, 2017). Esses argilominerais são formados basicamente por duas unidades cristalográficas fundamentais, uma com configuração de um tetraedro formada por um átomo de silício equidistante de quatro átomos de oxigênio e outra representada por um octaedro composta por um átomo de alumínio rodeado por seis átomos de oxigênio ou por seis hidroxilas (BOROZNOVSKAYA *et al.*, 2017; TAN *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2018). A Figura 2.10 indica um esquema sistemático das duas unidades básicas descritas.



Figura 2.10 – Esquemas das unidades cristalográficas básicas dos argilominerais, (a) octaedro e (b) tetraedro.

Fonte: Shaikh *et al.* (2017).

A associação destas duas unidades fundamentais presentes na Figura 2.10, somada a outros compostos que podem estar na composição dos argilominerais, formam as diferentes famílias em que estes cristais são divididos (ZHANG *et al.*, 2016; NDZANA *et al.*, 2018). Segundo Shaikh *et al.* (2017) as famílias podem ser divididas da seguinte forma:

- Silicatos: não são considerados argilominerais por estarem presentes nas frações silte e areia. Subdivisões: zeolites, quartzos, feldspatos, entre outros.
- Filossilicatos: constituem a fração argila, portanto são considerados argilominerais. Subdivisões:

- a. Filossilicatos 1:1 – são formados pela associação de uma camada tetraédrica com uma camada octaédrica, que se unem alternadamente. Se subdividem novamente em dois grupos: o grupo das caulinitas, onde os principais representantes são a caulinita e a haloisita, e o grupo das serpentitas.



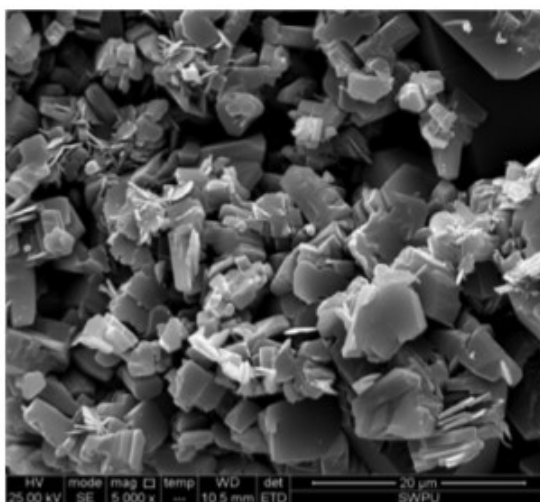


Figura 2.12 – Microscopia de varredura do argilomineral Caulinita.

Fonte: Xiao *et al.* (2015).

O argilomineral ilita é um filossilicato 2:1, considerado parcialmente expansivo e parcialmente estável em presença de água, com distância basal de 10 Å, representado pela fórmula química  $(K,H_3O)Al_2(Si_3Al)O_{10}(H_2O,OH)_2$  e apresentando  $Al^{+3}$  ocupando os espaços entrefolhares. Além disso apresenta superfície específica entre 10 a 80  $m^2/g$  e seus cristais são lamelares (SHAIKT *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2018). A estrutura esquemática deste mineral é indicada na Figura 2.13, bem como o formato dos cristais obtido por microscopia eletrônica de varredura na Figura 2.14.

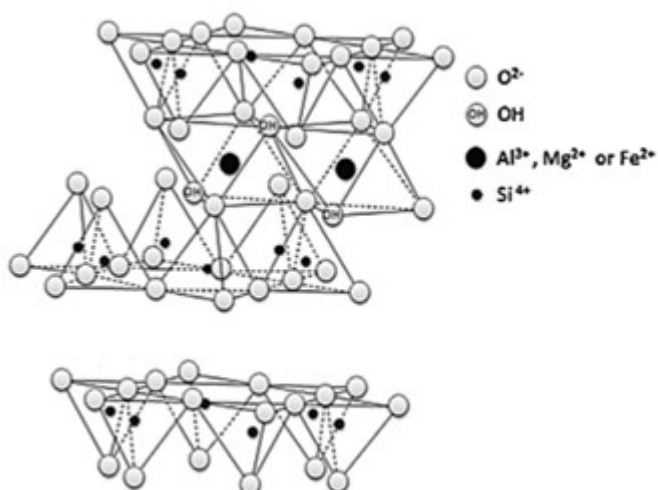


Figura 2.13 – Estrutura esquemática da ilita.

Fonte: Shaikt *et al.* (2017).

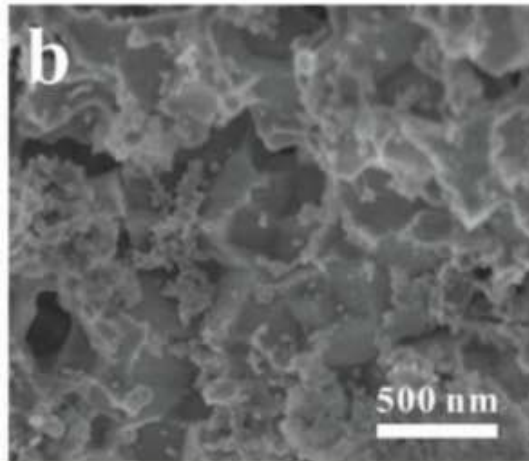


Figura 2.14 – Microscopia de varredura do argilomineral Ilita.

Fonte: Chen *et al.* (2018).

Por fim são descritas algumas informações a respeito do mineral montmorilonita: pertencente ao grupo dos filossilicatos 2:1, é extremamente expansivo e apresenta grande instabilidade em presença de água, além de grande atividade superficial. Representado pela fórmula química  $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$ , apresenta distância basal entre 10 e 20 Å, pequenos cristais e grande área específica que varia entre 700 a 800 m<sup>2</sup>/g (XIAO *et al.*, 2015; SHAIKT *et al.*, 2017). A Figura 2.15 e 2.16 demonstram o esquema da estrutura do mineral e a geometria dos cristais da montmorilonita, respectivamente.

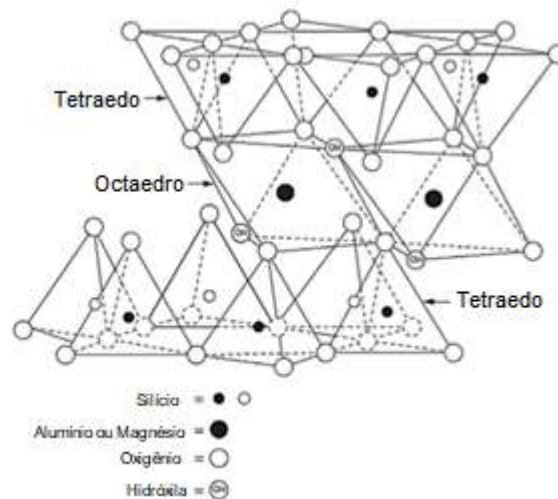


Figura 2.15 – Estrutura esquemática da montmorilonita.

Fonte: Shaikt *et al.* (2017).



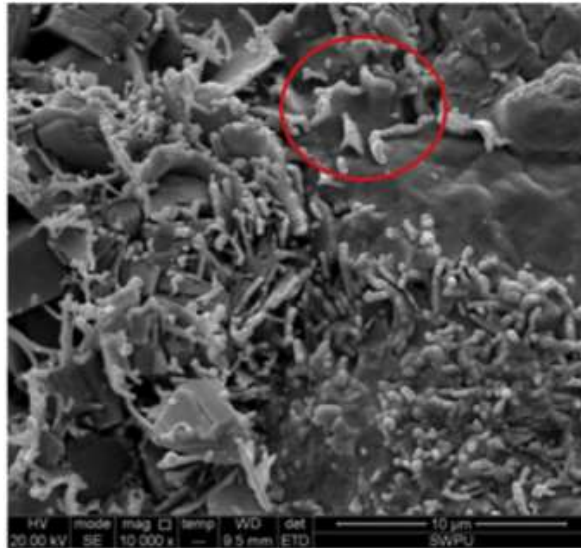


Figura 2.16 – Microscopia de varredura do argilomineral Montmorilonita

Fonte: Xiao *et al.* (2015)

Com base nesta análise dos argilominerais mais comuns encontrados em solos argilosos fica fácil comprovar que as caulinitas são os minerais mais estáveis em presença de água, enquanto as montmorilonitas são os minerais que apresentam pior comportamento. Conforme visto anteriormente com base no estudo das argilas presentes nas jazidas de Campos, o argilomineral que predomina na região é a caulinita, justamente o que apresenta maior estabilidade em presença de água. Este fato é benéfico quando se objetiva utilizar as referentes argilas em argamassas, porém, mesmo assim, cuidados devem ser tomados no que diz respeito a problemas patológicos pois mesmo predominando o argilomineral caulinita, há evidências de outros minerais na composição das argilas estudadas em Campos.

Os problemas patológicos de argamassas de múltiplo uso contendo argila foram estudados por Carasek (2004). A autora destaca que o uso indiscreto e sem restrições tecnológicas de argamassas contendo argila pode gerar diferentes tipos de problemas no revestimento e no assentamento de blocos, sendo os mais comuns descolamento, fissuração, eflorescência e pulverulência. A Figura 2.17 ilustra um revestimento com patologias causadas pelo uso de argila em argamassas e a Tabela 2.13 resume os principais problemas patológicos e suas causas estudadas por Carasek (2004).



Figura 2.17 – Patologia de revestimento com argila.

Fonte: Carasek (2004).

Tabela 2.13 – Patologia em argamassas com argila.

Fonte: Carasek (2004).

Problema Patológico	Causa/ explicação
Fissuração mapeada	O excesso de partículas finas, de argila, leva ao aumento do consumo de água para garantir a trabalhabilidade adequada. A saída dessa água causa a retração e a conseqüentemente fissuração do revestimento.
Desagregação e Pulverulência	Como o saibro entra na composição das argamassas para substituir a cal hidratada (efeito plastificante no estado fresco) pode ocorrer da argamassa ser proporcionada com pouco aglomerante (pois esta adição não possui efeito cimentante), gerando um revestimento pulverulento. Por outro lado, as partículas de argila podem recobrir os grãos de areia e prejudicar a adesão entre a pasta aglomerante e a areia, reduzindo a coesão interna da argamassa.
Descolamento	Os grãos muito finos de argila podem penetrar no interior dos poros do substrato tomando o lugar de produtos de hidratação do cimento que se formariam na interface e produziram o travamento mecânico da pasta nos poros.
Eflorescência	Alguns saibros possuem alto teor de álcalis que favorecem o aparecimento das eflorescências.
Bolor e Mofo	A presença de sais no saibro torna os revestimentos mais higroscópicos ficando úmidos por mais tempo.
Fissuração após endurecimento	Alguns argilominerais (como a montmorilonita) apresentam variações cíclicas de volume como conseqüência de variações da umidade ambiente, produzindo contrações ou expansões na argamassa endurecida, levando ao aparecimento ou alargamento de fissuras.

Oliveira *et al.* (2009) também estudaram problemas patológicos em argamassas de argila. Os autores destacam que o uso desse material é muito comum na região nordeste do Brasil, já que a adição de saibro à argamassa aumenta consideravelmente a trabalhabilidade da mesma. As Figuras 2.18 e 2.19 apresentam revestimentos estudados pelos autores. Tais argamassas foram feitas com saibro na cidade de Recife e apresentaram fissuração (Figura 2.18) e desagregação (Figura 2.19).



Figura 2.18 – Fissuração apresentada em argamassa com saibro, imediatamente após aplicação.

Fonte: Oliveira *et al.* (2009).



Figura 2.19 – Desagregação da argamassa com saibro.

Fonte: Oliveira *et al.* (2009).

Para evitar os problemas patológicos destacados, algumas ações podem ser tomadas: evitar o uso de argilas que apresentem em sua composição grande proporção de argilomineral montmorilonita, priorizando os que apresentem argilomineral caulinita e realizar testes prévios de absorção de água para verificar o desempenho das argamassas em serviço.

Sabe-se que as primeiras argamassas produzidas pelo homem levavam em sua composição misturas de solo barroso, material que pode ser considerado como argila, e materiais cálcicos provenientes de rochas calcárias, quimicamente semelhantes ao carbonato de cálcio ou os demais compostos encontrados no ciclo da cal (ELSEN, 2006; MATIAS *et al.*, 2014). Portanto percebe-se que a composição das argamassas primitivas, produzidas antes da descoberta do cimento Portland que revolucionou a tecnologia das argamassas, era uma mistura de argila com calcário altamente estável e não suscetível a problemas patológicos. Estas argamassas primitivas, presente em obras de grande importância para a humanidade como as Pirâmides do Egito e o Coliseu Romano, apresentam parte de sua estrutura original até os dias atuais, com excelentes desempenhos em serviço. O histórico das primeiras argamassas, executadas com argila e calcário (carbonato de cálcio) como citado acima, é apresentado a seguir.

Segundo Carvalho (2008) e Matias *et al.* (2014) os primeiros usos de argamassas que se tem conhecimento datam de 14.000 a.C. na região da Mesopotâmia, onde essas argamassas eram utilizadas para assentamento de pedras e assentamento de tijolos de barro modelados manualmente. Tem-se conhecimento também de argamassas usadas para o assentamento de tijolos queimados na região do rio Nilo, Egito, por volta de 5.000 a.C. Inicialmente essas argamassas utilizavam o barro (argila) e, na sequência, passaram a utilizar também uma argamassa mais resistente e durável, feita com uma composição de cal e argila. O uso do barro era indispensável, porque era esse material que proporcionava o parâmetro da trabalhabilidade que facilitava a execução dos serviços numa época em que a tecnologia das construções era bastante precária.

Carvalho (2008) e Schmid e Dariz (2016) destacam que foram os egípcios os primeiros a utilizarem a argamassa para revestimento e vedação, dando mais versatilidade ao uso desse material, e criando o conceito de argamassa de múltiplo uso, embora esse nome ainda não fosse usado na época. A civilização egípcia

usava para assentamento das pedras de suas pirâmides (pirâmide de Queóps, construída por volta de 2.700 a.C.) e para revestimento em reboco das partes internas das antecâmaras, argamassas compostas por gesso calcinado (uma espécie de cimento primitivo), misturado com quantidades controladas de barro. Essas obras executadas pelos egípcios encontram-se com suas estruturas em bom estado até os dias atuais, mesmo usando em sua composição argila, material que apresenta um histórico de grandes problemas patológicos.

Elsen (2006) e Carvalho (2008) apresentam uma cronologia a respeito do avanço do uso das argamassas até se tornar o concreto como se conhece hoje. Eles destacam que após os avanços proporcionados pelos egípcios, foram os romanos que alavancaram a tecnologia de argamassas ao descobrirem uma nova composição para esse material de construção, por volta de 200 a.C. Os romanos usavam um tipo de argamassa a base cal, cinza vulcânica e uma espécie de solo barroso. Com o tempo, a técnica foi aperfeiçoada e o solo barroso caiu em desuso. Schmid e Dariz (2016) destacam que foi com esse tipo de argamassa, apelidada de argamassa romana, que os romanos construíram suas principais obras, como por exemplo, o aqueduto Pont Du Gard, o Pantheon, o Fórum romano, o Coliseu, os famosos banhos romanos, a Basílica de Constantino, além de várias estradas e diversas outras construções, executadas entre 312 e 27 a.C. Schmid e Dariz (2016) explicam ainda, o porquê de readaptar a composição das argamassas romanas, deixando de utilizar os materiais argilosos em sua composição. Segundo eles para a execução de obras como aquedutos, os banhos e as termas romanas eram necessários o uso de uma argamassa que além de resistente e de fácil conformação, fosse impermeável e estanque. Essas duas últimas propriedades só foram obtidas com o desuso do solo barroso, originalmente presente nas argamassas.

Ainda segundo Carvalho (2008), durante a idade média, toda a tecnologia de uso de argamassa não sofreu grandes avanços, e o revestimento e o assentamento de blocos dos castelos e construções da época eram feitos com os mesmos materiais deixados pelos romanos: misturas de cal e cinza vulcânica, contendo ou não o acréscimo de solo argiloso.

A partir do século XVIII, com o avanço da tecnologia do cimento, e da invenção do cimento Portland (mistura de argila e calcário queimados, e posterior acréscimo

de gesso), as argamassas de múltiplo uso ganharam nova composição: cimento, areia e algum material que conferisse trabalhabilidade a essa mistura, em geral calcário (e mais recentemente cal hidratada), ou ainda, solo argiloso.

Recentemente alguns estudos têm sido realizados em argamassas medievais para identificação de sua composição através da microscopia óptica, como o estudo realizado por Conte *et al.* (2017). Nesse estudo, os autores identificaram a composição das fases minerais de diferentes argamassas presentes em um sítio histórico no Sul da Itália. Com base nas evidências históricas comprovou-se que as argamassas medievais (datadas dos séculos XVI – XVII) utilizavam carbonatos e solos argilosos como matéria-prima. Já as argamassas mais novas, portanto chamadas de pós-medievais, e datadas dos séculos XIX – XX, apresentavam em sua composição um aglomerante com características mais próximas do cimento, sendo preenchidos por agregado silicato (areia).

Outro estudo realizado por García-Esparza *et al.* (2017) em argamassas de castelos medievais localizados na zona rural de Valência, na Espanha, comprovaram a tendência encontrada por Conde *et al.* (2017) para as argamassas medievais, uma vez que ao realizar a caracterização da composição dessas argamassas García-Esparza *et al.* (2017) comprovaram que elas eram produzidas com barro, calcário e pequenas adições de gesso. As argamassas, extraídas de 200 construções distintas da região analisada, foram datadas do século XVII, mesmo período do trabalho de Conde *et al.* (2017).

Ao mesmo tempo em que argamassas contendo material argiloso eram utilizadas na Europa antiga, estudos realizados por pesquisadores sul-americanos constataram que este tipo de argamassa também era utilizado na América pré-colombiana. Aguilar *et al.* (2017) estudaram as argamassas e os blocos utilizados na execução da obra Huaca de la Luna, situada no Peru, e construída por volta de 2600 a.C., mantendo parte de sua estrutura original em bom estado até os dias atuais. Os autores descobriram ao analisar a composição destas argamassas, utilizadas para assentamento e recobrimento (espécie de revestimento rudimentar) dos blocos de Huaca, que estas eram executadas utilizando material argiloso em sua composição. Ou seja, tanto na Europa antiga quanto na América do Sul pré-colombiana existem indícios de obras históricas executadas com argamassas de múltiplo uso contendo em sua composição material argiloso.

Wells (2010) realizou estudo semelhante em testemunho de argamassas extraídas de fortes construídos no final do século XVII pelos europeus em Castillo de San Critóbal, em Porto Rico. O autor comprovou que a composição das argamassas analisadas era de predominantemente barro com características parecidas ao barro encontrado na ilha, e quantidades significativas de carbonato de cálcio, tendo ainda em sua composição outros materiais em menores proporções. Por fim, Figueiredo *et al.* (2011), analisando testemunhos de argamassas extraídas de patrimônios tombados do centro histórico de São Luís, no Maranhão, em obras executadas no início do século XVIII comprovaram que predominava argila e material calcário na composição dos materiais extraídos para estudo.

Desta forma, uma grande evidência é obtida quando todo este retrospecto é analisado: de fato as argamassas com argila apresentam problemas patológicos em função de sua microestrutura atômica. Porém, existem evidências históricas e científicas de que argamassas produzidas com materiais argilosos (barro) e materiais carbonáticos (rocha calcária e cal hidratada) constituem estruturas altamente duráveis e com excelente desempenho em serviço, a ponto de manter parte da estrutura original centenas de anos após serem construídas. Isso justifica a substituição parcial da cal hidratada por argila, e até mesmo a substituição total do aglomerante por uma composição de argila com pó de mármore (calcário) uma vez que está é a mesma composição de argamassa empregada nas obras históricas descritas anteriormente.

Nos últimos anos, alguns pesquisadores realizaram estudos em argamassas contendo argila em sua composição. Embora muitos pesquisadores realizem o estudo de argamassas contendo argilas calcinadas, poucos autores realizam pesquisas em argamassas contendo argila natural sem tratamento térmico. Adiante são descritas pesquisas envolvendo argamassas com argila com o objetivo de entender o comportamento que estes materiais de construção apresentam, bem como a interferência provocado por materiais argilosos na composição das argamassas.

Gomes e Neves (2002) realizaram estudo de argamassas compostas por cimento Portland, argilas da região metropolitana de Salvador, na Bahia, e areia natural de rio. Os autores destacam que as argilas da região, popularmente

chamada de arenoso ou caulim, são provenientes da formação de Barreiras, cujo solo possui parcelas de areia de granulometria heterogênea e parcelas de argila de diferentes colorações, predominando as de coloração cinza avermelhado, roxo e amarelo. Em termos minerais, a fração argila do material estudado é composto basicamente de caulinita, com discreta presença de illita.

Segundo os autores, o uso de caulim e arenoso em substituição da cal hidratada em argamassas de múltiplo uso é muito comum na região em que o estudo foi conduzido. Por serem materiais não processados, as argamassas produzidas com esses materiais argilosos apresentam custo menor do que os de argamassa convencional produzidos com argamassa mista. Porém, a falta de metodologia de dosagem dessas argamassas provoca problemas patológicos nos revestimentos, por isso, estudos de durabilidade são de extrema importância nessa área, principalmente quando se usa argamassas com argila, um material muito suscetível à problemas patológicos. Os autores destacam por último que, mesmo tendo um histórico negativo, não se detectaram manifestações patológicas nas argamassas confeccionadas com materiais argilosos da região de Salvador.

A Tabela 2.14 apresenta as propriedades tecnológicas das argamassas estudadas pelos referidos autores. Essas argamassas eram compostas de cimento, diferentes tipos de argila, chamadas de arenoso, e agregado miúdo areia natural.

Gomes *et al.* (2012) destacam em seu estudo que ao longo das últimas décadas existe uma crescente preocupação em desenvolver e utilizar materiais de construção com características sustentáveis. Nesse contexto, pesquisas em argamassas contendo “terra”, em que o material ligante é a argila, se tornaram cada vez mais comuns, uma vez que em edificações construídas no passado era comum o emprego desses materiais. Os autores destacam que os estudos de argamassas de cimento e cal são muito comuns, enquanto os estudos de argamassas de “terra” são muito vagos, dispersos e raros.

Por causa disso, Gomes *et al.* (2012) desenvolveram suas pesquisas utilizando quatro traços de argamassa, sendo que três dessas tinham em sua composição três diferentes solos da região de Alentejo, Portugal, e a quarta apresentava em sua composição uma terra argilosa comercial.



Tabela 2.14 – Argamassas com argila estudadas por Gomes e Neves (2002).

Fonte: Gomes e Neves (2002).

Propriedade	T-A1	T-A2	T-A3	T-A4	T-A5	T-C1
Cimento utilizado	CP II-F-32					
Argila utilizada	Arenoso com $D_{max}=2,4mm$ e Módulo de finura 2,36 e IP=14	Arenoso com $D_{max}=1,2mm$ e Módulo de finura 1,88 e IP=3	Arenoso com $D_{max}=1,2mm$ e Módulo de finura 2,07 e IP=10	Arenoso com $D_{max}=1,2mm$ e Módulo de finura 1,58 e IP=6	Arenoso com $D_{max}=1,2mm$ e Módulo de finura 1,48, sendo NP	Caulim com $D_{max}=1,2mm$ e Módulo de finura 1,51 e IP=4
Agregado miúdo	Areia natural com $D_{max}=1,2mm$ e Módulo de finura 1,66					
Densidade de massa no estado fresco ( $kg/m^3$ )	1765	1785	1856	1780	1871	1849
Retenção de água (%)	91	85	83	70	62	69
Teor de ar incorporado (%)	17	16	13	19	16	17
Relação água/materiais secos	0,185	0,178	0,191	0,138	0,140	0,151
Índice de consistência (mm)	258	255	251	250	253	258
Densidade de massa no estado endurecido ( $kg/m^3$ )	1610	1660	1637	1661	1767	1700
Índice de vazios após saturação e fervura (%)	36	36	28	33	30	30
Coefficiente de Capilaridade ( $kg/m^2min^{1/2}$ )	0,89	0,84	0,86	0,60	0,54	0,99
Resistência à compressão (MPa)	3,0	3,3	4,1	4,8	4,7	6,2
Resistência à tração na flexão (MPa)	0,50	0,47	0,77	0,81	0,88	0,86
Aderência à tração (MPa)	0,38	0,54	0,47	0,40	0,40	0,44

O principal objetivo da pesquisa de Gomes *et al.* (2012) era determinar parâmetros de trabalhabilidade dessas argamassas através de ensaios de consistência e verificar parâmetros de retração dos materiais estudados. Além disso, foram realizados testes com aplicação de questionários a operadores que aplicaram a argamassa em um substrato e deram suas opiniões numa escala qualitativa (má, suficiente, boa, excelente) utilizando quatro critérios: (i) manuseio da argamassa, (ii) aderência com substrato, (iii) aperto e (iv) regularização e acabamento. Os resultados obtidos na pesquisa são destacados na Tabela 2.15.

Os resultados da pesquisa indicam que os valores de retração linear não foram conclusivos e não apresentam relação com a consistência das argamassas estudadas. Os autores recomendam o emprego de retração volumétrica para o estudo de argamassas. Utilizando os critérios estabelecidos pelas normas europeias, todas as argamassas, com exceção da MAV deveriam ser rejeitadas, uma vez que o limite é de no máximo 3% de retração linear.

A pesquisa comprova que materiais mais finos necessitam de maior quantidade de água para manter a consistência das argamassas, fixada em 210 mm na referida pesquisa.

Sobre o questionário aplicado aos operadores as argamassas com as melhores avaliações foram MAV e MPD. A argamassa MTP apresentou parâmetros satisfatórios, enquanto a argamassa MVC apresentou os piores índices. Fica comprovado que não existe correlação linear entre parâmetros práticos de trabalhabilidade com a consistência das argamassas. Além disso, as argamassas que apresentaram menores porcentagens de finos obtiveram os melhores parâmetros na avaliação de trabalhabilidade realizada.

Lima (2013) destaca que o emprego de argamassas de barro contribui de forma significativa para o desenvolvimento sustentável do setor da construção civil, uma vez que o barro é um material construtivo abundante, acessível, de fácil extração e transformação, totalmente reutilizável e reciclável, sendo seu ciclo de vida caracterizado por um reduzido impacto ambiental e energético. Somado a isso, o barro é um produto não transformado, que mesmo depois de aplicado mantém as características originais do material original e, por isso, promove emissões de CO<sub>2</sub> próximas a zero.

Tabela 2.15 – Argamassas com argila estudadas por Gomes *et al.* (2012).Fonte: Gomes *et al.* (2012).

Propriedade	MTP	MAv	MPD	MVC
Cimento Utilizado	CEM 1 42.5R			
Argila empregada	Argila comercial contendo predominantemente caulinita e quartzo, com 90% de materiais finos (<0,06mm)	Argila extraída da comunidade rural de Avis, contendo feldspatos e quartzo, com 25% de materiais finos (<0,06mm)	Argila extraída da comunidade rural de Pá Danado, contendo mica, ilita, caulinita e quartzo, com 68% de materiais finos (<0,06mm)	Argila extraída da comunidade rural de Val Chaim, contendo mica, ilita e quartzo, com pequenas quantidades de caulinita e clorita, com 72% de materiais finos (<0,06mm)
Agregado Miúdo	Areia natural 0-2 mm			
Relação água/material seco	0,610	0,150	0,300	0,410
Consistência (mm)	210	210	210	210
Retração linear (%)	16	1	6	4
Critério (i)	Suficiente	Excelente	Excelente	Suficiente
Critério (ii)	Boa	Excelente	Boa	Má
Critério (ii)	Boa	Excelente	Boa	Suficiente
Critério (iv)	Excelente	Boa	Excelente	Suficiente

Além disso, o autor destaca que as técnicas em construção com terra são utilizadas pelo ser humano há mais de 9000 anos e que, mesmo nos tempos atuais, um terço da população mundial vive em construções realizadas com terra, sendo que em países subdesenvolvidos essa porcentagem aumenta para metade da população.

Lima (2013) ainda destaca que o uso de argamassas de barro gera outras vantagens para a edificação, tais como: contribuição para a regularização da umidade do ar interior, uma vez que materiais argilosos absorvem água do ar quando o ar está mais úmido e devolvem essa umidade ao meio ambiente quando o ar está mais seco; contribuições para o conforto térmico; contribuição para salubridade e não toxicidade do ar interior; contribuições na renovação do ar interior; e auxílio no conforto acústico, quando comparados a outras soluções.

Diante desse cenário, Lima (2013) propõe um estudo qualitativo do desempenho e conforto de uma edificação rebocada com argamassa mista de

cimento e cal e de uma edificação executada com uma argamassa de cimento e argila. O autor chega a conclusão, desta maneira, que o desempenho e o conforto da edificação realizada com argila são superiores a edificação executada com cal.

Por fim, Andres *et al.* (2016) realizaram um estudo das propriedades mecânicas de argamassas produzidas com argila motivado pelo uso histórico desse material na composição de argamassas e pelo fato do seu emprego causar redução dos impactos ambientais produzidos pelo setor da construção civil. Para isso, os autores utilizaram duas argilas: uma extraída do solo da região de Cluj-Napoca, România, e outra comercial, comumente empregada na região. Os dados obtidos na referida pesquisa são apresentados na Tabela 2.16. As argamassas analisadas foram confeccionadas com areia natural da România (tamanho máximo de partícula não apresentado) e cimento Portland de uma marca comumente empregada na região.

Através das pesquisas analisadas, comprova-se que o uso de argilas em argamassas é uma alternativa que proporciona ganhos econômicos e ambientais, conforme destacado pelos diversos autores. Além disso, as evidências históricas de diversas obras realizadas com argamassas de terra, além dos parâmetros tecnológicos obtidos pelos autores citados, destacam a viabilidade técnica de se utilizar argamassas contendo em sua composição materiais argilosos. Por último, destaca-se que as pesquisas com argamassas de barro são escassas e, portanto, trabalhos envolvendo esses materiais de construção devem sempre ser encorajadas.

Tabela 2.16 – Argamassas com argila estudadas por Andres *et al.* (2016).

Fonte: Andres *et al.* (2016).

Propriedade	ProCrea	Clay Ground
Argila empregada	Argila comercial utilizada da Romenia com presença de caulinita, mica e quartzo.	Argila extraída de forma natural com grande predominância de caulinita.
Relação água/material seco	0,231	0,219
Densidade de massa no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	1700	1572
Resistência à compressão (MPa)	1,23	1,05
Resistência à tração na flexão (MPa)	0,50	0,80

## 2.6. Resíduo de mármore como material de construção

Conforme destacado pelo relatório anual da Associação Brasileira de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2017), cujo relatório mais recente é do ano de 2016, o Brasil apresenta grande destaque na produção e exportação de rochas ornamentais, seja em forma de blocos ou através de materiais processados. Os principais produtos brasileiros são os granitos e os mármore, que tiveram juntos 92,85% da participação percentual no faturamento dessas indústrias no ano de 2016. Destaca-se que dentre esse percentual, 16,94% corresponde aos materiais em forma de bloco e 75,8% corresponde ao material processado.

Em termos de faturamento, a ABIROCHAS destaca que o mármore em forma de bloco ou processado foi responsável por aproximadamente 58,51 milhões de dólares, tendo sido exportado um volume físico de 59,1 mil toneladas do produto somente no ano de 2016. Os gráficos indicados nas Figuras 2.20 e 2.21 apresentam os números da indústria de rochas ornamentais nos anos de 2015 e 2016, sendo possível perceber que mesmo apresentando uma redução nas exportações, o setor destacado movimenta anualmente valores significativos.

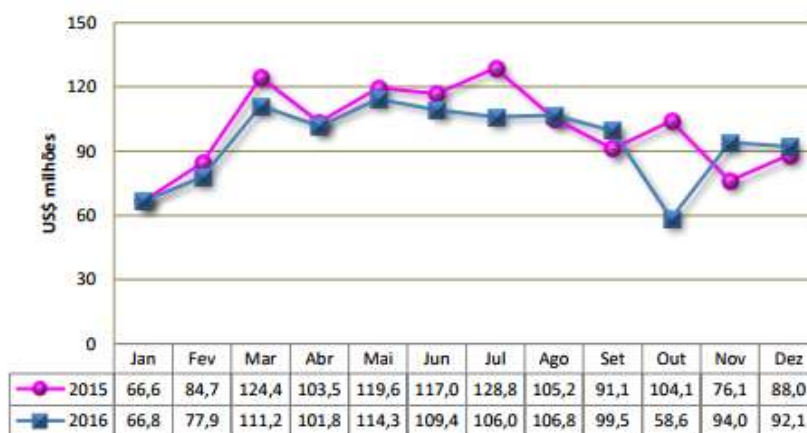


Figura 2.20 – Exportações mensais do setor de Rochas Ornamentais 2015-2016 em dólares.

Fonte: ABIROCHAS (2017).

Com essas informações é fácil perceber que o setor brasileiro de rochas ornamentais apresenta grande importância econômica, principalmente nos estados produtores com destaque no setor. Segundo o relatório da ABIROCHAS, o principal estado exportador de rochas ornamentais é o Espírito Santo, que sozinho exportou 75% do volume físico e foi responsável por 81% do total do

faturamento das exportações brasileira, conforme é possível identificar na Figura 2.22.

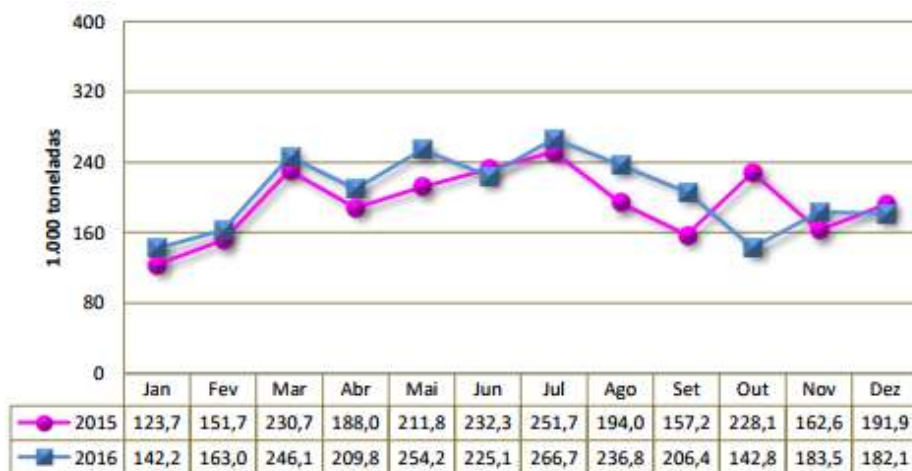


Figura 2.21 – Exportações mensais do setor de Rochas Ornamentais 2015-2016 em toneladas.

Fonte: ABIROCHAS (2017).

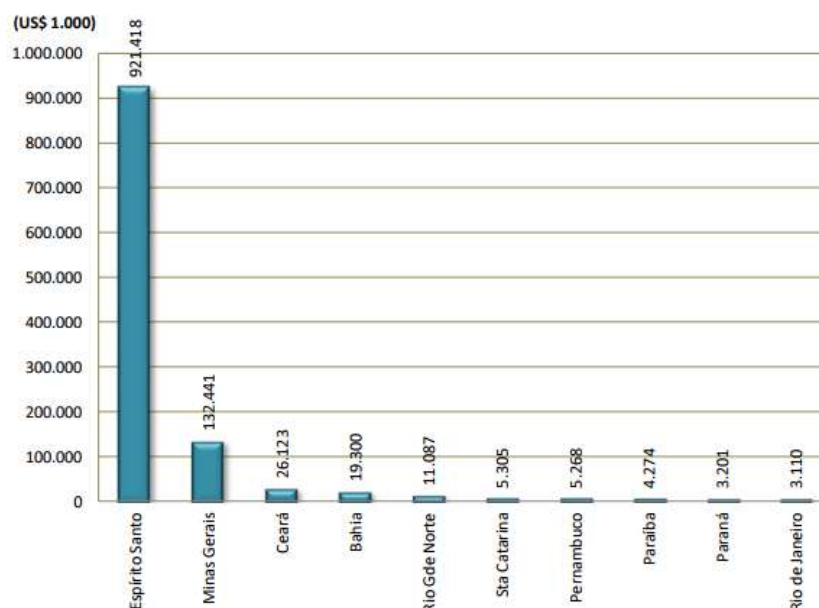


Figura 2.22 – Principais estados brasileiros exportadores de rochas ornamentais em 2016.

Fonte: ABIROCHAS (2017).

O principal problema das indústrias de rocha ornamental é dar uma destinação para os resíduos gerados durante a extração e o beneficiamento das matérias primas do setor. Segundo Dantas *et al.* (2010) e Buyuksagis *et al.* (2017) a exploração causada pelo setor descrito gera em torno de 30 a 40% de perdas em forma de resíduo, considerando todas as etapas do setor produtivo, desde a

extração até o acabamento. Os autores destacam também que esses resíduos geram grande impacto na economia das indústrias, que precisam pagar para armazenar o resíduo em grandes pátios reservados justamente para esse propósito.

Assim, é possível perceber a relevância de realizar uma pesquisa utilizando o resíduo proveniente das indústrias de rochas ornamentais do Espírito Santo, em particular da cidade de Cachoeiro de Itapemirim, uma vez que o referido estado é o principal responsável por movimentar esse setor industrial no Brasil. As motivações são ambientais, devido à grande produção de resíduos pelo setor, e econômicas, uma vez que dar uma destinação do material causaria alívio na economia das indústrias.

A indústria de rochas ornamentais não é exclusiva do Brasil, e diversos outros países, como China, Índia, Turquia e Itália, apresentam grande destaque no setor. Os países citados, entretanto, apresentam maior evolução em pesquisas realizadas com resíduos de rochas ornamentais, principalmente mármore e granito, conforme observado na bibliografia mundial do tema. Isso se deve a vários fatores: maiores restrições nas políticas de destinação de resíduos sólidos nesses países, maior contingente de institutos científicos e tecnológicos, maior incentivo das indústrias do setor, dentre outras causas.

Embora não haja nenhuma rocha completamente igual a outra, é interessante conhecer as características físicas, químicas e mineralógicas verificadas para os resíduos empregados por outros pesquisadores, a fim de comparar e avaliar a viabilidade da aplicação do resíduo escolhido nesta dissertação. Em função disso, a seguir são citados estudos de caracterização de resíduo de rocha ornamental de empregado por diferentes pesquisadores. O estudo será restrito ao resíduo de mármore empregado nesta dissertação, aqui chamado também de pó de mármore, não sendo abordado estudos envolvendo resíduos de granito ou de misturas de diferentes rochas.

Corinaldesi *et al.* (2010) realizaram a caracterização de um resíduo de mármore proveniente de uma indústria italiana a fim de verificar a possibilidade da incorporação do resíduo em argamassas. Alguns dados obtidos pelos pesquisadores são apresentados a seguir: densidade relativa de 2,55; área específica pelo método de Blaine de 1500 m<sup>2</sup>/kg, D<sub>50</sub>= 7 µm e D<sub>90</sub>=50 µm. A análise

mineralógica do material através de difração de raios-X comprovou que ele é feito predominantemente de calcita, comprovado pela análise química que indica 66% de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Em decorrência dessas características, os autores concluíram que o material é extremamente fino, conforme observado na análise de granulometria e área da superfície específica.

Posteriormente, Corinaldesi *et al.* (2010) realizaram estudos em argamassas 1:3 (cimento: areia natural) com substituição de 10% de cimento e substituição de 10% de areia, realizando ensaios de reologia e ensaios de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias em corpos de prova (CP's) prismáticos 40x40x160 mm. Os ensaios de reologia comprovaram que a incorporação de resíduo de mármore conferiu à argamassa maior coesão e maior trabalhabilidade. Já os resultados de resistência comprovaram que a incorporação do resíduo provoca decréscimo nessa propriedade, conforme Figura 2.23. Porém, os autores destacam que essa queda de resistência não é preocupante na maioria dos usos para argamassas, excetuando-se os casos em que essas são utilizadas como reforço estrutural. Além do mais, essa redução pode indicar menor rigidez das argamassas, propriedade vantajosa em aplicações como revestimento e assentamento de blocos.

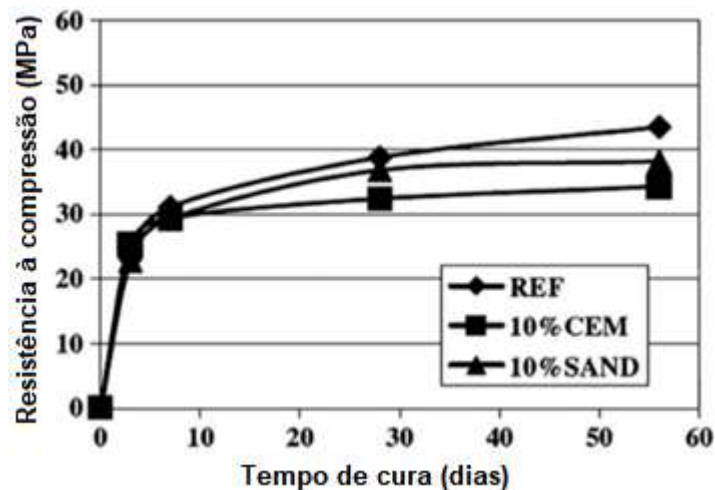


Figura 23 – Relação entre resistência à compressão e tempo de cura para argamassas estudadas por Corinaldesi *et al.* (2010)

Fonte: Corinaldesi *et al.* (2010)

Ergün (2011) verificou a possibilidade da substituição parcial de cimento por resíduo de mármore em concretos, com o objetivo de obter melhores parâmetros



de resistência no concreto. Inicialmente, o autor realizou a caracterização química e mineralógica do resíduo, proveniente de uma indústria turca. Os resultados indicados na Tabela 2.17 e Figura 2.24, respectivamente, indicam a predominância da mineral calcita, sendo encontrado dolomita em baixíssima concentração, percebido pelos poucos picos na difração de raios-X e pela porcentagem de 0,40% de MgO na análise química. O autor destaca que os resultados obtidos foram conforme esperados, uma vez que o resíduo pode ser classificado como um calcário calcítico. Na caracterização física, o autor obteve 2,68 g/cm<sup>3</sup> como massa específica e 5960 cm<sup>2</sup>/g como superfície específica, não sendo realizada no estudo a análise granulométrica do material.

Tabela 2.17 – Análise química de diferentes resíduos de mármore.

Fonte: Ergün (2011), Vardhan *et al.* (2015) e Buyuksagis *et al.* (2017).

Composição (%)	Ergün (2011)	Vardhan <i>et al.</i> (2015)	Buyuksagis <i>et al.</i> (2017)
CaO	51,70	40,73	54,70
MgO	0,40	15,21	0,44
SiO <sub>2</sub>	0,18	6,01	0,63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,67	0,60	0,46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,44	0,80	0,15
K <sub>2</sub> O	0,21	0,05	0,05
Na <sub>2</sub> O	-	0,06	0,05
SO <sub>3</sub>	-	0,09	0,01
PF <sup>1</sup>	46,04	37,87	43,45

<sup>1</sup> PF= perda ao fogo à 1000°C

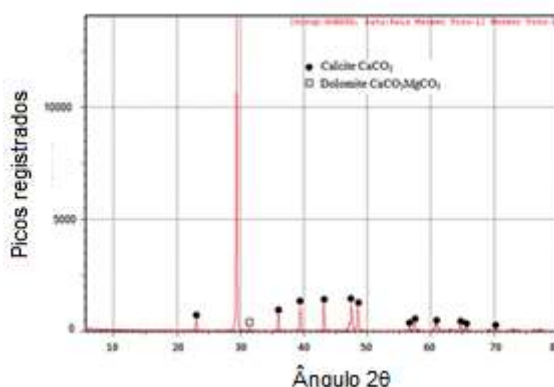


Figura 2.24 – Difração de raios-X para o resíduo de mármore estudado por Ergün (2011).

Fonte: Ergün (2011).

Após a caracterização do material, Ergün (2011) confeccionou CP's de concreto, utilizando um traço de referência e traços como 5%, 7,5% e 10% de

substituição do cimento, realizando ensaios aos 7, 28 e 90 dias para avaliação da resistência à compressão com CP's cúbicos 100x100x100 mm e à tração na flexão com CP's em forma de viga 100x100x300 mm. Os resultados do autor são apresentados na Tabela 2.18, onde é possível perceber que a resistência à tração é pouco afetada com a incorporação de resíduo de mármore, independentemente da idade analisada. Porém, a resistência à compressão apresenta comportamento diferenciado, sendo que, de uma forma geral, a incorporação de 5% melhora as propriedades de resistência à compressão e a incorporação de 7,5% piora essa mesma propriedade a curto prazo (7 e 28 dias), alcançando valores melhores que o traço de referência em idades mais avançadas (90 dias).

Ergün (2011) conclui que o objetivo do estudo é obtido utilizando incorporação de 5% de resíduo e que a incorporação de 7,5% é viável, mas deve ser realizada com cautela, não sendo recomendada pelo autor.

Tabela 2.18 – Resistência mecânica obtido para concretos estudados por Ergün (2011).

Fonte: Ergün (2011).

Traço estudado	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à tração na flexão (MPa)		
	7 dias	28 dias	90 dias	7 dias	28 dias	90 dias
REF	27,2	35,4	36,6	5,1	5,3	5,7
M5	30,3	39,4	40,9	5,1	5,3	6,0
M7.5	29,5	39,9	41,1	5,1	5,1	5,6
M10	25,8	31,1	31,3	4,8	5,0	5,1

Vardhan *et al.* (2015) realizaram estudo sobre a possibilidade da substituição de cimento por pó de mármore, proveniente da indústria da Índia, com objetivo de comprovar a viabilidade do reaproveitamento desse resíduo, uma vez que o país é um dos grandes produtores mundiais de mármore. Para isso, os autores realizaram inicialmente a caracterização do resíduo estudado chegando a 2,6 g/cm<sup>3</sup> de massa específica, 329m<sup>2</sup>/kg de superfície específica como parâmetros físicos, e os parâmetros químicos e mineralógicos já indicados na Tabela 2.17 e Figura 2.25, respectivamente. Observando a análise mineralógica, concomitante com a análise química, os autores concluíram que o resíduo utilizado pode ser caracterizado como calcário dolomítico, uma vez que os picos que predominaram foram os de dolomita, e os teores de CaO e MgO foram 40,73% e 15,21% respectivamente, indicando presença de dolomita. Dessa forma, analisando os

resultados de Vardhan *et al.* (2015), percebe-se que o resíduo utilizado por eles era diferente do resíduo utilizado por Ergün (2011), o que poderia levar a resultados diferentes para os autores.

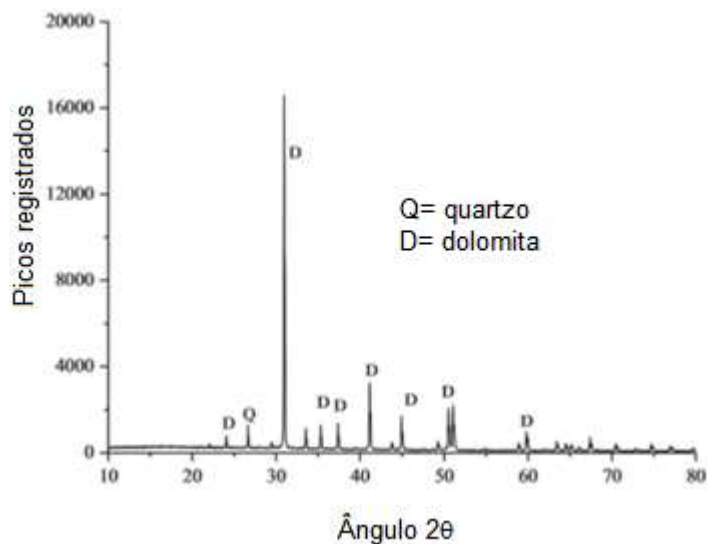


Figura 2.25 – Difração de raios-X para o resíduo de mármore estudado por Vardhan *et al.* (2015).

Fonte: Vardhan *et al.* (2015).

A fim de testar a influência da substituição de pó de mármore na argamassa, Vardhan *et al.* (2015) utilizaram argamassas 1:3 (cimento:areia) com substituição de pó de mármore nas proporções de 0% (referência), 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. A areia utilizada pelos autores tinha  $D_{máx}=2\text{mm}$  e o teor de água/aglomerante foi fixado em 0,48. Uma observação deve ser realizada a respeito do traço contendo 50% de substituição de cimento por pó de mármore, uma vez que esse traço corresponde ao 0,5:0,5:3, ou ainda, 1:1:6 (cimento: pó de mármore: areia), um dos traços estudado nesta dissertação.

Para estudar a trabalhabilidade, Vardhan *et al.* (2015) utilizaram o ensaio de Cone de Marsh, sendo possível medir o tempo que a argamassa demora para deslizar medidas pré-estabelecidas do cone utilizado no ensaio (de 1000ml para 900ml). Quanto maior o tempo que a argamassa levar para passar pelo cone, pior a trabalhabilidade da mistura. Os tempos obtidos pelos autores são indicados na Tabela 2.19, onde é possível perceber que ocorre redução no tempo e, conseqüentemente, melhoria na trabalhabilidade, à medida que se incorpora pó de mármore. Porém, conforme destacado pelos autores, estatisticamente não

existe diferença entre incorporar 10% ou 50% de pó de mármore à argamassa quando analisado esse parâmetro. Isso quer dizer que em termos de trabalhabilidade não existe mudança em incorporar 10%, 20%, 30%, 40% ou 50%, porém todos esses traços apresentam trabalhabilidade superior ao traço de referência.

Tabela 2.19 – Tempo de consistência para os traços estudados por Vardhan *et al.* (2015).

Fonte: Vardhan *et al.* (2015).

Traço estudado	Tempo de consistência (s)
REF	179
M10	129
M20	115
M30	105
M40	102
M50	98

Vardhan *et al.* (2015) também confeccionaram CP's cúbicos de 70,5 mm de aresta para ensaiar à compressão aos 3, 7 e 28 dias de idade, conforme Figura 2.26. Os autores concluíram que a incorporação do resíduo diminui significativamente a resistência à compressão das argamassas e que apenas a incorporação de 10% é estatisticamente igual ao traço de referência nas três idades estudadas. Portanto, para aplicações como reforço ou outra função estrutural o único traço possível é o M10. Para outras aplicações, a utilização dos demais traços não está descartada, porém, outros ensaios complementares devem ser realizados.

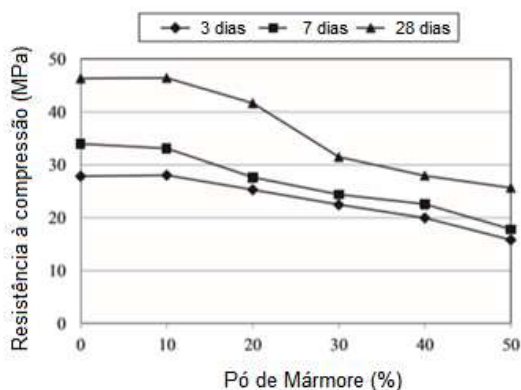
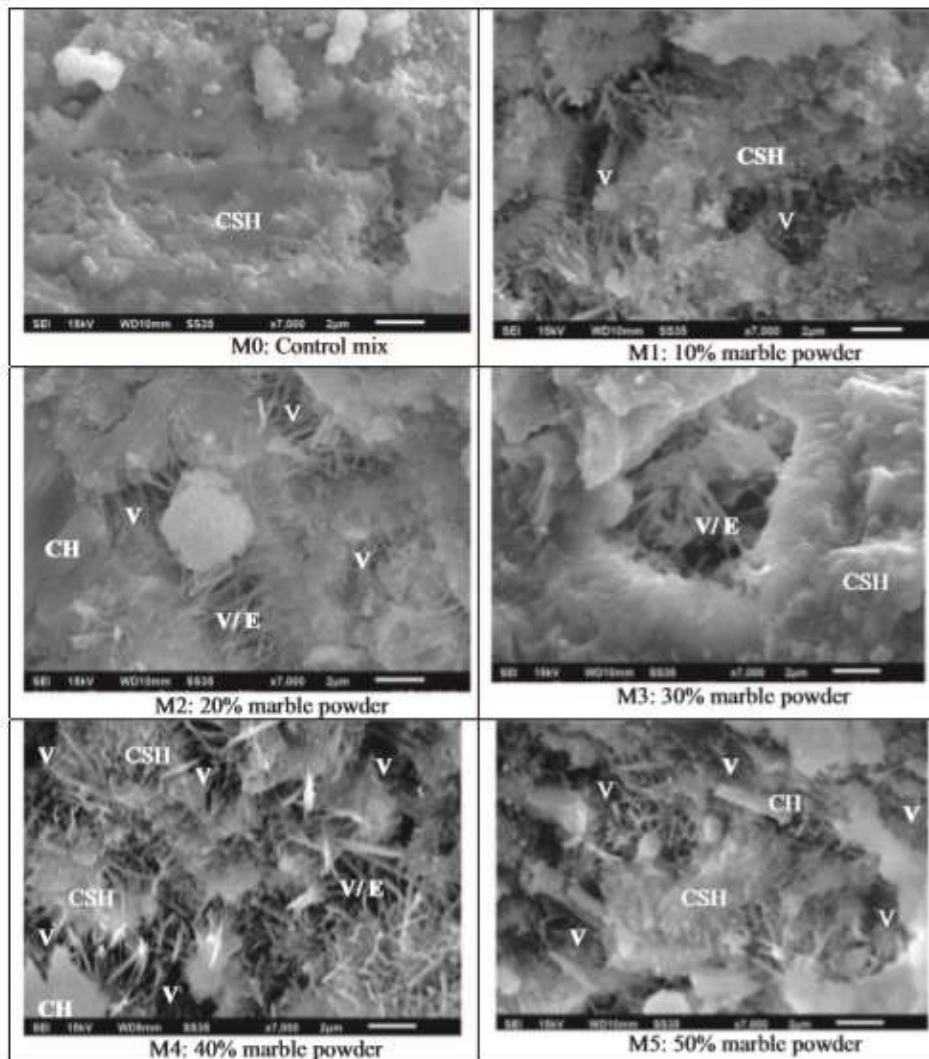


Figura 2.26 – Resistência à compressão dos traços estudados por Vardhan *et al.* (2015).

Fonte: Vardhan *et al.* (2015).

Por fim, Vardhan *et al.* (2015) realizaram a análise da microestrutura dos traços estudados na pesquisa, conforme indicado na Figura 2.27. Os autores concluíram com base nessa análise, que a incorporação de resíduo de mármore ocasiona maior quantidade de vazios na argamassa, quando comparado ao traço de referência. Esses vazios apresentam relação direta com a resistência mecânica encontrada pelos autores. Vardhan *et al.* (2015) terminam dizendo que o uso de um resíduo mais fino provavelmente resolveria o problema detectado.



(E= etringita, CH= hidróxido de cálcio, CSH= silicato de cálcio hidratado, V= espaços)

Figura 2.27 – Microscopia eletrônica de varredura dos traços estudados por Vardhan *et al.* (2015).

Fonte: Vardhan *et al.* (2015).

Singh *et al.* (2017) realizaram um estudo das vantagens econômicas e ambientais da substituição de cimento por resíduo de mármore em concretos. Na revisão bibliográfica, os autores destacam os números da indústria de mármore,

que apresenta grande destaque em países como França, Índia, Itália, Turquia, Brasil, USA, Espanha e Bélgica. Um dos principais dados apresentados é que na Índia, país onde a pesquisa foi conduzida, a produção de mármore produz aproximadamente 60.000 m<sup>3</sup> de resíduo inerte de carbonato ultrafino por ano, atendendo a média mundial das indústrias do setor, que geram entre 40-45% de resíduo em relação a produção.

Para realizar o estudo proposto, Singh *et al.* (2017) confeccionaram três classes de concreto: um de referência sem incorporação de pó de mármore (Normal), um com 15% de substituição de cimento por pó de mármore (C15) e um com 25% de substituição de cimento por areia (S25). Como resultados os autores comprovaram que os traços com incorporação do pó de mármore (C15 e S25) apresentaram resistência à compressão 20-25% superior ao traço de referência. As propriedades de durabilidade, como porosidade, resistência à abrasão, carbonatação, resistência à sulfatos e penetração de água, foram superiores para os traços modificados. Isso pode ser justificado pelo efeito fíler causado pelo pó de mármore.

Singh *et al.* (2017) também concluíram que o uso de pó de mármore nos concretos causou uma economia de 9,077% (traço C15) e 3,27% (traço S25) em relação ao concreto convencional e proporcionou vantagens ambientais, uma vez que um resíduo industrial passa a ter uma finalidade, deixando de estar disposto de forma irresponsável na natureza. A substituição da areia, um agregado natural, é vantajosa ambientalmente no sentido de não usar um recurso natural e passar a usar um resíduo industrial. A substituição de cimento é ainda mais interessante, do ponto de vista ambiental, uma vez que a produção de cimento é altamente poluidora. No estudo em questão, para produzir 1 tonelada de concreto do traço de referência seria necessário emitir 410 kg/m<sup>3</sup>, ao passo que para produzir 1 tonelada do traço C15 seriam necessários 350 kg/m<sup>3</sup>. Assim, ficam comprovadas as hipóteses levantadas pelos autores, de que a incorporação de pó de mármore proporciona melhorias tecnológicas, ambientais e econômicas para o setor da construção civil.

Buyuksagis *et al.* (2017) verificaram a possibilidade da incorporação de pó de mármore proveniente de uma indústria turca em argamassas colantes a base de cimento. Para isso, inicialmente, os autores caracterizaram o resíduo de mármore

quimicamente, conforme Tabela 2.19, e fisicamente, conforme análise de granulometria contida na Tabela 2.20. Avaliando os resultados obtidos pelos autores é possível comprovar que, quimicamente, o resíduo apresenta similaridade com o resíduo estudado por Ergün (2011), provavelmente tratando-se de um calcário calcítico. Fisicamente, os autores encontraram massa específica de 2,72 g/cm<sup>3</sup>, próxima aos demais estudos apresentados, e chegaram à conclusão que o material estudado apresentava tamanho de partículas relativamente finas, análogo aos demais autores analisados.

Tabela 2.20 – Análise granulométrica do resíduo de mármore estudado por Buyksagis *et al.* (2017).

Fonte: Buyksagis *et al.* (2017).

Tamanho de Partículas (µm)	Porcentagem Retido (%)
+1000	0,5
+710	6,0
+500	8,3
+250	24,6
+125	24,4
+90	11,2
Passante	25,0

Os resultados dos ensaios obtidos por Buyuksagis *et al.* (2017) não serão detalhados, uma vez que se trata de uma pesquisa com argamassa colante que envolve variáveis diferentes em relação a argamassas de múltiplo uso. Destaca-se apenas que os autores concluíram, ainda, que é possível incorporar o resíduo estudado em argamassas colantes sem perder as propriedades tecnológicas avaliadas, a saber: consistência e trabalhabilidade, resistência à compressão, porosidade e absorção de água.

Com base nas pesquisas apresentadas, fica evidente a viabilidade do uso de pó de mármore em concretos e em argamassas. Em geral, as pesquisas realizam a substituição do resíduo por cimento ou agregado, não sendo prática usual a substituição do resíduo por cal hidratada em argamassas mistas.

É evidente também a dispersão dos resultados encontrados em função dos diferentes processos industriais que geram o resíduo de mármore, o que provoca diferenças na granulometria, densidade real dos grãos e composições químicas e mineralógicas dos materiais estudados.

### 3. Metodologia

#### 3.1. Materiais utilizados

Os seguintes materiais foram utilizados nesta pesquisa: cimento Portland CP-II-E-32, cal hidratada CH-III, areia natural do rio Paraíba extraída em Campos dos Goytacazes com  $D_{m\acute{a}x}=2,4\text{mm}$ , argila natural extraída da jazida da empresa Artecerâmica Sardinha localizada na Baixada Campista, e resíduo de pó de mármore proveniente da indústria Polita Mármore localizada em Cachoeiro do Itapemirim - ES.

Após extração da argila e do pó de mármore, os materiais foram triturados e passados em peneira nº 100 (200  $\mu\text{m}$  de abertura). Essa abertura de peneira foi escolhida após análise granulométrica de dois produtos comerciais: um calcário ensacado comercial (Liga Paraíso) e uma argila ensacada comercial (Argimix). Desta maneira obteve-se mais ou menos 200  $\mu\text{m}$  como diâmetro máximo para o calcário comercial e 900  $\mu\text{m}$  como diâmetro máximo para a argila comercial. Optou-se por padronizar os dois materiais como passantes na peneira nº 100, a fim de eliminar uma variável no estudo.

#### 3.2. Caracterização dos materiais

Os materiais analisados (cal hidratada, argila natural e pó de mármore) foram caracterizados fisicamente, mineralogicamente e quimicamente através dos ensaios citados a seguir:

##### 3.2.1. Massa específica real dos grãos:

Para a determinação da massa específica real dos grãos, as amostras dos materiais foram submetidas aos ensaios em conformidade com as normas NBR 6508 (ABNT, 1984) e NBR 6457 (ABNT, 2016). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UENF (LECIV-UENF).

##### 3.2.2. Análise granulométrica:

As distribuições dos tamanhos das partículas das amostras de cal hidratada, da argila e do resíduo de mármore foram realizadas de acordo com os procedimentos de peneiramento e sedimentação segundo a NBR 7181 (ABNT, 2016). Os ensaios foram realizados no LECIV-UENF.



Além disso, foram calculadas as porcentagens de materiais finos (<0,075mm), que representam a porcentagem que passa pela peneira #200, com o objetivo de facilitar a comparação entre as granulometrias obtidas pelos aglomerantes estudados.

### 3.2.3. Limites de Atterberg:

Os limites de Atterberg determinam as propriedades plásticas de um determinado material (Limite de Liquidez – LL, Limite de Plasticidade – LP e Índice de Plasticidade – IP). Esses limites foram obtidos através da NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016). Os ensaios foram realizados no LECIV-UENF.

As análises descritas apresentam grande importância no estudo de argamassas porque indicam as capacidades colantes de um determinado material, podendo estar relacionado também às características de trabalhabilidade. Segundo Siqueira e Holanda (2013) o LP determina a quantidade de água mínima necessária para que o estado plástico seja adquirido e o LL determina a quantidade de água mínima para que o material atinja uma consistência de lama.

O IP é obtido aplicando a expressão seguinte:

$$IP (\%) = LL - LP \quad (01)$$

em que:

IP= Índice de Plasticidade (%);

LL= Limite de Liquidez (%);

LP= Limite de Plasticidade (%).

### 3.2.4. Fluorescência de raios-X de energia dispersiva (EDX):

Este ensaio foi realizado com o objetivo de determinar as porcentagens de óxidos presentes nos aglomerantes em análise ( $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $K_2O$ ,  $TiO_2$ ,  $Na_2O$ ). Através deste ensaio, portanto, é possível realizar uma caracterização química dos materiais estudados.

O ensaio foi realizado no LECIV - UENF em um equipamento Shimadzu EDX-700.

### 3.2.5. Difração de raios-X

Através deste ensaio é possível obter os picos cristalinos das amostras estudadas. Assim, conhecendo o padrão que cada tipo de argilomineral apresenta, faz-se a análise mineralógica qualitativa das amostras estudadas.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Avançados da UENF (LAMAV-UENF) em um difratômetro da marca SHIMADZU operando com radiação de Cobre (Cu-K $\alpha$ ) e varredura de 2 $\theta$  variando de 5° a 60°.

### 3.3. Dosagem dos traços

O traço padrão de estudo utilizado foi o 1:1:6 (cimento Portland: aglomerante: areia natural); uma das proporções de argamassa mista mais utilizadas para produção de argamassas de múltiplo uso, conforme já discutido na revisão bibliográfica. Os traços avaliados estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Proporções utilizadas em massa.

Nomenclatura	Cimento Portland	Cal Hidratada	Argila caulínica	Pó de Mármore	Areia Natural
TR00	1	1	0	0	6
TR01	1	0	1	0	6
TR02	1	0	0	1	6
SXac	1	0	0,5	0,5	6
SXah	1	0,5	0,5	0	6
SXch	1	0,5	0	0,5	6
SXach	1	0,33	0,33	0,33	6

As proporções de aglomerante utilizadas nas argamassas foram definidas através de dois critérios. O primeiro subdividiu-se na utilização de 100% dos três aglomerantes analisados (TR00, TR01 e TR02), proporções de 50% de cada aglomerante (SXac, SXah e SXch) e 33,33% de cada um dos três aglomerantes em estudo (SXach). A justificativa para o uso dessas proporções é que através delas é possível realizar diversos delineamentos estatísticos, análise de região ótima com o emprego de rede simplex, além de verificar a possibilidade da substituição total ou parcial da cal hidratada, conforme proposto nesta dissertação.

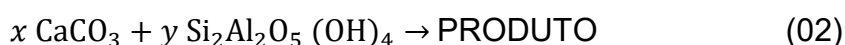
O segundo critério utilizado para dosagem das argamassas foi o de balanceamento de cargas teóricas através de relação estequiométrica em mols dos

dois principais materiais analisados na pesquisa, a argila natural e o resíduo de pó de mármore.

A aplicação desse método se baseia na teoria apresentada na seção 2.5, em que se comprovou o fato da argila apresentar cargas elétricas livres em decorrência de sua estrutura mineralógica (XIAO *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2016; BERTHONNEAU *et al.*, 2017; BOROZNOVSKAYA *et al.*, 2017; TAN *et al.*, 2017; SHAIKT *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2018; NDZANA *et al.*, 2018), e que são essas cargas responsáveis pelas patologias que as argamassas de argila usualmente apresentam (CARASEK *et al.*, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2009). Para equilibrar as cargas, é possível basear-se nas diversas argamassas históricas apresentadas na seção 2.5 que tinham em sua composição argila com materiais compostos por rocha calcária ou derivados do seu ciclo, como é o caso da cal e do resíduo de mármore (ELSEN, 2006; CARVALHO, 2008; WELLS, 2010; FIGUEIREDO *et al.*, 2011; MATIAS *et al.*, 2014; SCHMID *et al.*, 2016; AGUILAR *et al.*, 2017; CONTE *et al.*, 2017; GARCÍA-ESPARZA *et al.*, 2017). Entende-se que o uso desses dois materiais em conjunto proporciona equilíbrio dentro da argamassa, evitando problemas de fissuração e outras patologias, uma vez que grande parte dessas obras históricas analisadas apresentam parte de sua estrutura original até os dias da atualidade.

Buscou-se com essa ferramenta criar uma metodologia de variação das porcentagens de argila e pó de mármore, diante da dificuldade pela falta de métodos racionais de dosagem de argamassas.

Para isso foram necessários estipular as fórmulas teóricas dos dois materiais a serem analisados, o pó de mármore considerado rocha calcária ( $\text{CaCO}_3$ ) e a argila caulínica ( $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), que se estabilizam conforme a expressão seguinte em relação mol e mol:



Conhecendo as fórmulas químicas dos dois compostos da reação foi possível calcular as massas molares dos dois compostos, utilizando as massas atômicas presentes na Tabela 3.2, o que resulta em 100,08 g/mol para o pó de mármore e 240,12 g/mol para a argila caulínica. Variando x e y em proporções diversas, obteve-se os traços destacados na Tabela 3.2, que relaciona dessa forma as proporções molares dos materiais estudados (traços EST1:1, EST1:2, EST2:1,

EST1:3, EST3:1, EST2:3 e EST3:2).

Para obter o traço em massa correspondente ao traço 1:1:6 foi necessário dividir a massa da argila pela soma das massas de argila e pó de mármore, chegando ao parâmetro “a” e a massa do resíduo por esta mesma soma, resultando no parâmetro “b”. Na Tabela 3.3 os traços foram indicados na proporção em massa 1:a:b:6 (cimento: argila: pó de mármore: areia natural).

Tabela 3.2 – Massa Atômica de alguns elementos químicos

Elemento Químico	Massa Atômica (g)
H	1,00
O	16,00
Al	26,98
Si	28,08
Ca	40,08

Tabela 3.3 – Traços obtidos pelo balanceamento estequiométrico

Traço (x:y)	Massa de Pó de mármore (g)	Massa de Argila (g)	Proporção (cimento: argila: pó de mármore: areia)
EST1:1	100,08	240,12	1:0.71:0.29:6
EST1:2	100,08	480,24	1:0.83:0.17:6
EST2:1	200,16	240,12	1:0.55:0.45:6
EST1:3	100,08	720,36	1:0.88:0.12:6
EST3:1	300,24	240,12	1:0.44:0.56:6
EST2:3	200,16	720,36	1:0.78:0.22:6
EST3:2	300,24	480,24	1:0.62:0.38:6

Algumas observações devem ser feitas para a aplicação da metodologia apresentada: (i) a presença de cimento nas argamassas provavelmente interfere na reação de balanceamento de cargas entre a argila e o pó de mármore, porém, como em todas argamassas o mesmo tipo de cimento e a mesma quantidade do material serão utilizados, essa variável foi eliminada da análise; (ii) existe a possibilidade de ambos materiais não reagirem quimicamente, uma vez que são classificados em algumas pesquisas como agregados inertes, porém o balanceamento será feito em torno de cargas elétricas, não de reação química; e (iii) faltam metodologias que comprovem o equilíbrio das cargas dos dois materiais estudados estão em equilíbrio,

e, portanto, serão utilizados como parâmetros conclusivos os resultados obtidos dos parâmetros tecnológicos analisados, principalmente a propriedade de absorção de água por imersão.

### 3.4. Ensaaios realizados nas argamassas

#### 3.4.1. Ensaio de mesa de consistência (*flow table*)

Os ensaios de consistência foram realizados de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016), que recomenda o índice de consistência  $260 \pm 5$  mm. Por tentativa e erro, o ensaio é repetido até que se encontre o índice recomendado. A quantidade de água adicionada na dosagem é determinada desta maneira, sendo necessária para que este índice seja alcançado para obtenção dos demais parâmetros.

Neste ensaio, utilizou-se uma forma tronco-cônica de 12,5 cm de diâmetro de base, 8 cm de diâmetro de topo e 6,5 cm de altura. A mesa circular deve possuir um diâmetro de 50 cm e pesar 12,0 kg, além de uma altura de queda de 14 mm.

Inicialmente realizou-se a mistura da argamassa, que é baseada nos princípios da NBR 13276 (ABNT, 2016). Os materiais utilizados no traço são previamente pesados e ensacados. Realizou-se a mistura e homogeneização dos materiais secos no saco plástico. A água a ser utilizada na mistura também foi inferida com o auxílio de um recipiente de laboratório. Em seguida, os materiais secos foram colocados numa argamassadeira, sendo posteriormente acrescentada água à mistura, feita em velocidade lenta por 90 s. Transcorrido esse tempo, um pano úmido foi colocado de forma a cobrir a argamassa, que ficou em descanso por 15 minutos. Após esse tempo, a argamassa foi novamente homogeneizada por 15 s em velocidade lenta. Destaca-se que todos os ensaios realizados com as argamassas seguiram esse mesmo procedimento de mistura e homogeneização de amostras.

Após a mistura da argamassa, o molde foi colocado no centro da mesa e preenchido por três camadas sucessivas, com alturas aproximadamente iguais, e aplicados golpes moderados do soquete, sendo 15 golpes na primeira camada, 10 golpes na segunda e 5 golpes na terceira uniformemente distribuídos. Em seguida, foi realizado o rasamento da argamassa passando a régua metálica rente à borda do molde tronco cônico. Depois de retirado o molde, a manivela foi acionada, efetuando 30 quedas em 30 segundos.

Dessa maneira, foi possível medir o espalhamento da argamassa, que é

medido com uma régua em três direções diferentes. Caso este espalhamento ficasse no limite da norma ( $260\pm 5$  mm), o valor de água adicionado à mistura era utilizado nos ensaios posteriores. O índice de consistência obtido é a média das três direções analisadas e indica uma tendência da trabalhabilidade das argamassas estudadas, ou seja, quanto maior o índice de consistência, maior a trabalhabilidade desse material. A Figura 3.1 ilustra os equipamentos usados nesse ensaio.

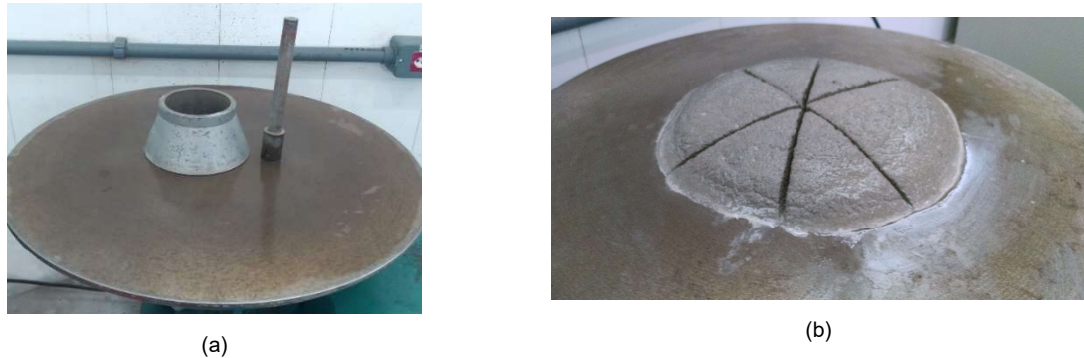


Figura 3.1 – (a) Mesa de consistência, molde em tronco cônico e martelo para golpes na argamassa; (b) Ensaio de espalhamento na argamassa.

#### 3.4.2. Ensaio de Reologia de *Squeeze Flow*

O ensaio de *squeeze flow* foi realizado de acordo com a NBR 15839 (ABNT, 2010) e seguindo as recomendações do manual de utilização do *squeeze flow* de Cardoso *et al.* (2010) e Azevedo *et al.* (2017). O ensaio foi realizado com a argamassa no estado fresco, utilizando a mesma quantidade de água encontrada pelo ensaio de consistência.

A grande vantagem de utilizar o ensaio de reologia de *squeeze flow* é que nele é possível analisar as tensões de escoamento e a viscosidade na resistência ao fluxo das argamassas, propriedades não obtidas com a utilização do ensaio *flow table*, ensaio mais simplório que permite apenas avaliar parâmetros de trabalhabilidade.

As propriedades reológicas das argamassas no estado fresco são de extrema importância, uma vez que são essas características que permitem a obtenção do comportamento desses materiais quanto ao espalhamento, nivelamento e acabamento de revestimentos e no assentamento de blocos. Essas propriedades irão interferir diretamente no desempenho e na durabilidade das argamassas em serviço.

O método se baseia na seguinte teoria: usualmente as argamassas são classificadas como fluidos de Bingham, de forma simplificada. Esses materiais apresentam uma tensão mínima para iniciar o escoamento, tensão de escoamento, e o fluxo apresenta uma relação linear entre tensão e taxa de cisalhamento. Conseqüentemente, são necessários no mínimo duas medidas em diferentes taxas de cisalhamento para caracterizar esse tipo de fluido, razão pela qual a norma brasileira recomenda o uso de duas velocidades diferentes de ensaio (0,1 mm/s e 3 mm/s).

Para exemplificar a teoria é possível recorrer ao exemplo apresentado no manual de Cardoso *et al.* (2010). Os autores apresentam duas argamassas, A e B, como fluidos de Bingham, conforme pode ser visto na Figura 3.2. Na figura é possível identificar que a argamassa A apresenta tensão de escoamento maior e viscosidade plástica (inclinação da reta tensão x taxa de cisalhamento) menor que a argamassa B. Depois de iniciado o escoamento, em taxas de cisalhamento menores que  $x$ , a argamassa A é mais consistente que B, já que necessita de maior tensão de escoamento, porém após  $x$  a tendência se inverte e é B que flui com maiores dificuldades. Sendo assim a análise de resultados através da utilização de uma única taxa de cisalhamento é limitada, podendo levar a conclusões errôneas sobre a plasticidade e trabalhabilidade de argamassas. Assim conclui-se que a utilização de métodos reológicos se faz necessário na avaliação do comportamento de argamassas.

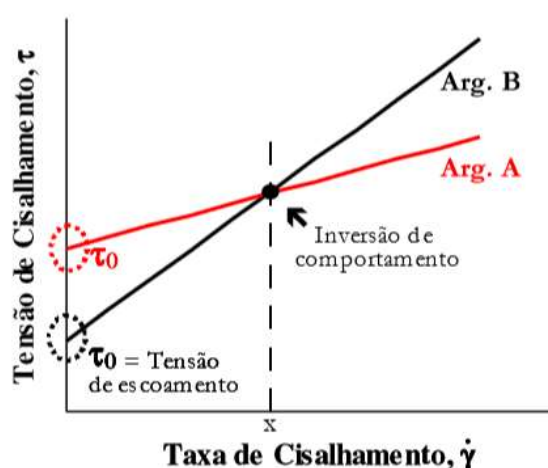


Figura 3.2 – Ilustração esquemática das argamassas A e B descritas como fluido de Bingham.

Fonte: Cardoso (2010).

A utilização desse método se justifica porque ele permite a realização do ensaio sem que haja perda de contato entre o elemento cisalhante e a amostra estudada, além de eliminar problemas com o entupimento de capilares dos equipamentos utilizados. O método também apresenta como vantagens o fato de ser simples, rápido e de fácil execução, apresentando ampla utilização já que dispensa o uso de reômetros e usa como base máquinas universais de ensaios é um equipamento facilmente encontrado em universidades e centros de pesquisa.

Somado a isso, está o fato de que o *squeeze flow* apresenta grande aplicação para o comportamento de argamassas, uma vez que na avaliação do comportamento desse material é de grande interesse avaliar as mudanças de geometria, as mudanças na taxa de cisalhamento bem como os diferentes gradientes de deformação sofridos por esse material de construção. Dessa maneira é possível simular os fenômenos de restrição sofridos pela argamassa durante as várias etapas que o material passa, tais como lançamento no substrato, em que a argamassa é solicitada com altas taxas de cisalhamento e sofre grandes deformações, e nas etapas de desempenho e acabamento, em que a argamassa sofre taxas de cisalhamento e deformações muito variáveis.

Em função de tudo que foi apresentado fica justificado o uso do ensaio de *squeeze flow* para argamassas de múltiplo uso, como forma de complementação aos resultados obtidos pelo ensaio de mesa de consistência.

O ensaio de reometria por *squeeze flow* consiste em comprimir uma amostra cilíndrica de argamassa no estado fresco entre duas placas paralelas. Para isso a seguinte configuração experimental foi utilizada: a compressão foi aplicada na argamassa através da placa ou disco superior, que apresenta o mesmo diâmetro inicial da amostra, enquanto a argamassa se espalha sobre a placa ou disco inferior, que deve ter por volta de duas vezes o diâmetro da amostra inicial, a fim de permitir o espalhamento da amostra. O esquema utilizado é ilustrado na Figura 3.3.



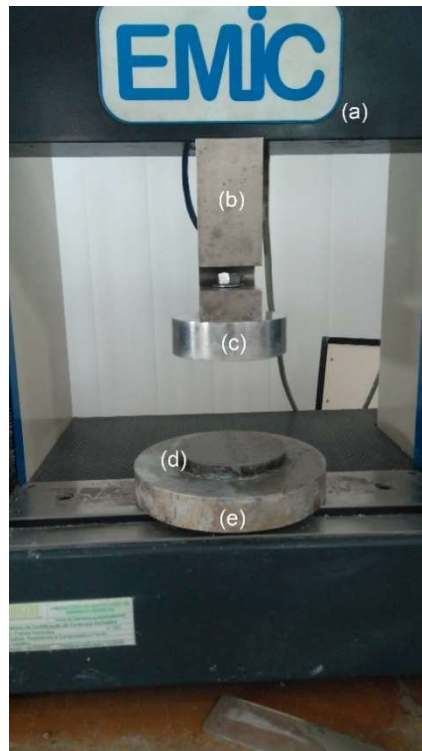


Figura 3.3 – Indicação do esquema utilizado para o *Squeeze Flow*: (a) máquina universal de ensaios EMIC; (b) cédula de carga tipo S com 30kN de capacidade; (c) placa superior de aço com diâmetro de 100mm; (d) molde cilíndrico com diâmetro interno de 100mm e altura de 10mm; (e) placa inferior de aço com diâmetro de 180 mm.

Conforme se observa na Figura 3.3, os seguintes equipamentos ou ferramentas foram utilizados para execução do ensaio: (a) máquina universal de ensaios EMIC com (b) cédula de carga tipo S de 30 kN de capacidade; (c) placa superior de aço para punção da amostra com diâmetro de 100 mm, encaixada na cédula de carga S; (d) molde em forma de anel de metalon com diâmetro interno de 100 mm, 2 mm de espessura e 10 mm de altura, que também foi utilizado para gabarito na realização do ensaio; (e) placa inferior de aço com diâmetro de 180 mm; e demais acessórios necessários como espátulas e régua para rasamento de argamassa. Destaca-se que todas as medidas foram utilizadas conforme padronização da NBR 15839 (ABNT, 2010).

O ensaio de *squeeze flow* foi realizado seguindo o procedimento: inicialmente a argamassa foi misturada seguindo o mesmo procedimento descrito no ensaio de consistência, respeitando o tempo de 15 minutos para descanso da argamassa; em seguida a argamassa foi colocada no molde cilíndrico e rasada, de forma que preenchesse todo volume do molde e que fique com a superfície lisa; na sequência o molde cilíndrico foi retirado, já que o ensaio foi realizado sem confinamento da amostra.

A placa superior foi cuidadosamente aproximada da superfície da argamassa; o ensaio foi então iniciado respeitando uma das duas velocidades descritas pela norma (0,1 mm/s ou 3 mm/s). Todas as amostras analisadas foram ensaiadas com as duas velocidades normativas. O ensaio se encerra quando a força aplicada na argamassa atinge 1000N ou quando o deslocamento da argamassa atinge o limite de 9 mm. Dessa maneira, foram obtidos vários pares ordenados deslocamento por força aplicada, ao longo do tempo. O resultado do ensaio consiste em um gráfico que relaciona esses dois parâmetros obtidos, sendo que o deslocamento fica no eixo X e a força no eixo Y. A Figura 3.4 indica a realização do ensaio para a argamassa do traço TR01.

A análise dos resultados obtidos pelo ensaio de squeeze flow deve seguir o procedimento exposto por Azevedo *et al.* (2017), em que se realiza uma comparação entre a curva carga x deslocamento obtido por cada amostra estudada e a curva típica presente na Figura 3.5. Essa figura indica três regiões típicas do comportamento de argamassas.



Figura 3.4 – Execução do *squeeze flow* para o traço TR01.

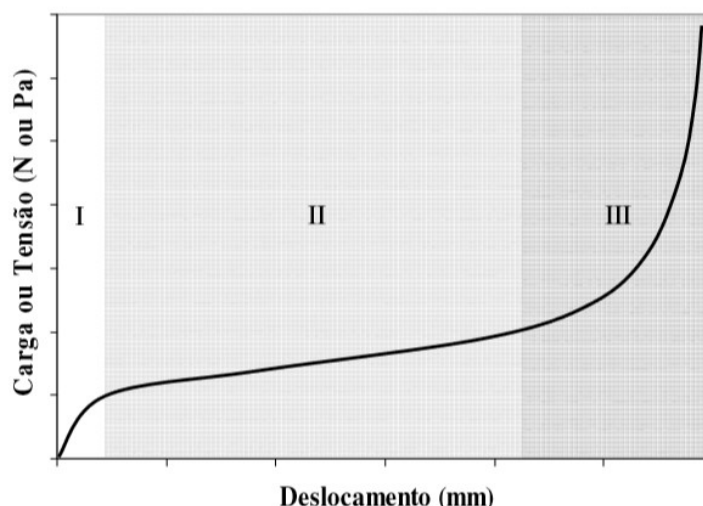


Figura 3.5 – Perfil típico de carga x deslocamento em um ensaio *squeeze flow* para argamassas.

Fonte: Cardoso *et al.* (2010) e Azevedo *et al.* (2017)

Os estágios ou fases que as argamassas se apresentam no ensaio de *squeeze flow* são descritos brevemente a seguir: no primeiro estágio (I), em pequenas deformações, a argamassa comporta-se como um sólido apresentando deformação elástica linear; na segunda região (II), correspondente a deslocamentos intermediários, a compressão resulta em deformação radial alongacional e o cisalhamento supera as forças que mantinham o material sob comportamento elástico, como consequência o material flui com deformação plástica e/ou viscosa; por fim o terceiro estágio (III), em grandes deformações, ocorre aumento expressivo da carga necessária para prosseguir a deformação do material, o que caracteriza que o fluxo do material é restrito porque as forças de atrito entre o material são predominantes nesse estágio.

As argamassas com região (II) expressiva, apresentam comportamento mais trabalhável, uma vez que nessa região o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo de força, o que favorece a produtividade na aplicação de argamassas, enquanto argamassas com região (III) predominante apresentam dificuldades na trabalhabilidade, uma vez que nesse estágio o comportamento dos procedimentos de aplicação e acabamento tendem a ser dificultados devido às altas cargas envolvidas, podendo ocorrer separação das fases do material.

Azevedo *et al.* (2017) destacam que a análise do gráfico carga x deslocamento deve ser realizada da seguinte maneira: como a região (II) fica mais à esquerda e à

região (III) fica mais à direita, é possível realizar uma análise qualitativa da trabalhabilidade das proporções estudadas, sendo que os traços mais à esquerda apresentam comportamento mais trabalhável, e traços mais à direita comportamento menos trabalhável. Para realizar essa análise deve ser plotado um gráfico conjunto para as proporções que serão comparadas.

#### 3.4.3. Densidade de massa no estado fresco e Teor de ar incorporado

O ensaio de densidade de massa no estado fresco foi realizado seguindo o procedimento da NBR 13278 (ABNT, 2005). O teor de ar incorporado das argamassas é calculado através desse parâmetro utilizando a marcha de cálculo citada na mesma norma.

Previamente foram registrados a massa do recipiente cilíndrico de ensaio vazio ( $m_v$ ), bem como seu volume ( $v_r$ ) que foi obtido utilizando calibração com água como forma de conferência ao volume fornecido pelo fabricante. O recipiente utilizado está ilustrado na Figura 3.6.

O ensaio deve ser feito com a argamassa ainda no estado fresco, após a mistura e homogeneização realizada de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016) e respeitando o tempo de 15 minutos de descanso do material. Transcorrido esse tempo, a argamassa foi introduzida de maneira suave no recipiente cilíndrico utilizando uma espátula em três camadas uniformes. Em cada camada foram aplicados 20 golpes ao longo do perímetro do recipiente. Após a execução e golpeamento das camadas, efetuaram-se três quedas na mesa de consistência, de forma que não ficassem vazios entre a argamassa e o recipiente de ensaio.

O recipiente cilíndrico foi então rasado, em movimentos de vai-e-vem, de forma a regularizar a superfície da argamassa aplicada. Após a eliminação dos excessos, o recipiente com argamassa foi pesado, onde registrou-se a massa do molde com argamassa ( $m_c$ ).

Os resultados da densidade de massa no estado fresco e do teor de ar incorporado foram obtidos através das expressões, respectivamente, detalhadas a seguir:

$$d = 1000 * \frac{m_c - m_v}{v_r} \quad (03)$$

$$A = 100(1 - \frac{d}{d_t}) \quad (04)$$

com:

d= densidade de massa no estado fresco (kg/m<sup>3</sup>);

m<sub>c</sub>= massa do recipiente cilíndrico contendo argamassa (g);

m<sub>v</sub>= massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

v<sub>r</sub>= volume do recipiente cilíndrico (cm<sup>3</sup>);

A= teor de ar incorporado (%);

d<sub>t</sub>= densidade de massa teórico (g/cm<sup>3</sup>), obtido através de:

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad (05)$$

em que:

m<sub>i</sub>= massa seca de cada componente da argamassa, mais água (g);

γ<sub>i</sub>= massa específica de cada componente da argamassa (g/cm<sup>3</sup>).

Uma observação deve ser feita para aplicação da expressão (04). A densidade de massa no estado fresco deve ser convertida de kg/m<sup>3</sup> para g/cm<sup>3</sup>, uma vez que ao calcular esse parâmetro pela expressão (03) a resposta sai em kg/m<sup>3</sup>, mas para aplicação coerente da expressão de teor de ar incorporado a densidade real deve estar em g/cm<sup>3</sup>.

#### 3.4.4. Retenção de água

O ensaio da retenção de água foi realizado de acordo com a NBR 13277 (ABNT, 2005). Para a realização do ensaio foram utilizadas argamassas no estado fresco confeccionadas conforme a NBR 13276 (ABNT, 2005).

Na realização desse ensaio foram necessários uma bomba de vácuo para aplicar sucção na argamassa e um funil de Buchner modificado, indicado na Figura 3.6.

O procedimento utilizado consiste na seguinte sequência: primeiramente, foi colocado o prato sobre o funil de ensaio, garantindo a estanqueidade entre eles; logo em seguida foi posicionado o papel-filtro umedecido no fundo do prato do equipamento. Com a torneira fechada, a bomba de vácuo foi acionada até que atingisse uma sucção de 51 mm de mercúrio. Em seguida foi aberta a torneira do equipamento para a retirada do excesso de água do papel-filtro por 90 s.

Na sequência, o conjunto funil/papel-filtro úmido foi pesado e registrado a massa ( $m_v$ ). Preencheu-se o prato com a argamassa até acima da borda para o adensamento com soquete. Foram aplicados 16 golpes uniformemente junto à borda e 21 golpes uniformemente distribuídos na parte central da amostra. O excesso de argamassa foi retirado com uma régua metálica até a obtenção de uma superfície plana. Após a limpeza do excesso de argamassa, o conjunto com argamassa foi pesado, registrando-se a massa ( $m_a$ ). Em seguida, a torneira que controla a sucção foi aberta, aplicando uma sucção de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos. Após esse tempo o prato do funil foi removido e pesou-se o conjunto registrando a massa ( $m_s$ ).

Após a realização do procedimento experimental, o cálculo da retenção de água foi realizado aplicando a expressão seguinte:

$$R_a = \left[ 1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF * (m_a - m_v)} \right] * 100 \quad (06)$$

Sendo AF, o fator água/argamassa fresca determinado por:

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad (07)$$

onde:

$m_a$ = massa do conjunto com argamassa (g);

$m_s$ = massa do conjunto após a sucção (g);

$m_v$ = massa do conjunto vazio (g);

$m_w$ = massa total de água acrescentada à mistura (g);

$m$ = soma das massas dos componentes anidros (g).



(a)



(b)

Figura 3.6 – (a) Copo cilíndrico para densidade de massa no estado fresco e (b) aparelho de retenção de água.

#### 3.4.5. Moldagem dos corpos de prova

Para moldagem dos corpos de prova, as argamassas foram misturadas e homogeneizadas segundo o procedimento da NBR 13276 (ABNT, 2005), respeitando o tempo de descanso. Transcorrido esse tempo, as argamassas foram utilizadas para preenchimento dos moldes em duas camadas uniformes, sendo que cada camada recebeu 30 golpes aplicadas pela mesa de consistência.

Os corpos de prova confeccionados foram prismáticos, com as dimensões 4 x 4 x 16 cm, conforme exigências das normas correntes de argamassas.

#### 3.4.6. Densidade de massa no estado endurecido

O ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido foi executado de acordo com a NBR 13280 (ABNT, 2005). Para a realização do ensaio foram utilizados três corpos-de-prova confeccionados de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

Após 28 dias de cura, os corpos de prova tiveram medidas, com o auxílio de um paquímetro, os valores da altura, da largura e do comprimento, sempre utilizando duas ou mais posições distintas para cada dimensão. Também foram determinadas as massas dos corpos de prova utilizando uma balança de laboratório.

Com esses dados, foi possível realizar os cálculos para obtenção da densidade aparente no estado endurecido. Primeiro calculou-se o volume do corpo de prova pela expressão a seguir:

$$V = l * h * c \quad (08)$$

sendo:

V= volume do corpo de prova;

l= largura do corpo de prova;

h= altura do corpo de prova;

c= comprimento do corpo de prova.

Para obter a massa aparente no estado endurecido aplicou-se a seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{v} * 100 \quad (09)$$

com:

$\rho$ =densidade de massa aparente no estado endurecido;

m= massa do corpo de prova;

V= volume do corpo de prova.

#### 3.4.7. Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi executado de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). Para a realização do ensaio foram utilizados cinco corpos-de-prova confeccionados de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

Os corpos de prova foram posicionados nos dispositivos de apoio do equipamento de ensaio, de modo que a face rasada não ficasse em contato com os dispositivos de apoio ou com os dispositivos de carga. A Figura 3.7 ilustra o procedimento do ensaio sendo realizado.

Conforme as recomendações normativas, na realização do ensaio foi aplicada uma carga de  $50 \pm 10$  N/s até a ruptura do corpo-de-prova. Assim foi possível obter a resistência à tração na flexão utilizando a expressão:

$$R_t = \frac{1,5 * F_t * L}{40^3} \quad (10)$$

sendo:

$R_t$  = resistência à tração na flexão (MPa);

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

L= distância entre os suportes (mm).





Figura 3.7– (a) Ensaio de tração na flexão e (b) ensaio de compressão em CP de argamassa.

#### 3.4.8. Resistência à compressão em CP prismático

O ensaio de resistência à compressão axial foi executado de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). Para a realização do ensaio foram utilizadas uma das duas metades dos corpos-de-prova ensaiados à tração, conforme recomendação da norma.

Os CP's foram posicionados nos dispositivos de apoio do equipamento de ensaio, de modo que a face rasada não ficasse em contato com os dispositivos de apoio ou com os dispositivos de carga, conforme indicado na Figura 3.7. Foi aplicada uma carga de  $500 \pm 10$  N/s até a ruptura do corpo-de-prova.

A resistência à compressão axial foi então calculada, aplicando a expressão a seguir:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (11)$$

em que:

$R_c$ = resistência à compressão (MPa);

$F_c$ = carga máxima aplicada (N).

Caso os corpos de prova tivessem sido instrumentados, seria possível obter as deformações sofridas pelos CP's e, conseqüentemente, o módulo de elasticidade das argamassas. Porém, não foi possível realizar a instrumentação dos CP's, portanto, será indicado apenas como forma de comparação a curva tensão x deformação para cada traço ensaiado. Essa curva é obtida dividindo todos os valores de carga registrados pela máquina de ensaios global pela seção transversal inicial do corpo de

prova, de maneira parecida ao que é realizado para obter a resistência à compressão pela expressão (11), sendo indicados esses valores no eixo Y, com seus respectivos pares ordenados correspondentes as deformações sendo indicadas no eixo X. A deformação será obtida dividindo o valor de deslocamento obtido no equipamento pela altura inicial do corpo de prova, destacando que o deslocamento apresentado é o da máquina de ensaios, e não do corpo de prova.

Assim, será apresentado o módulo de elasticidade aproximado para cada traço analisado, com a ressalva que o procedimento correto para obtenção do módulo de elasticidade seria a instrumentação dos corpos de prova, que não foi possível nessa dissertação. Para obter o módulo de elasticidade, basta encontrar o coeficiente angular do trecho linear do diagrama tensão x deformação, conforme teoria embasada na Lei de Hooke, descrita pela expressão:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (12)$$

sendo:

$\sigma$ = tensão (MPa);

$\varepsilon$ = deformação (mm/mm);

E= módulo de elasticidade teórico (MPa).

#### 3.4.9. Absorção de água por capilaridade

O ensaio para a determinação do coeficiente de capilaridade foi executado de acordo com a NBR 15259 (ABNT, 2005). Para a realização do ensaio foram utilizados três CP's confeccionados de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

O procedimento para a realização do ensaio é descrito a seguir: após 28 dias de cura, lixou-se a superfície do corpo de prova com lixa grossa e determinou-se a massa inicial ( $m_0$ ). Em seguida, a face quadrada dos corpos de prova foi posicionada sobre suportes no recipiente de ensaio, evitando a molhagem de outras superfícies, conforme Figura 3.8. O nível de água do ensaio foi constante e igual a  $5 \pm 1$  mm acima da face em contato com a água, conforme recomendação normativa. Finalmente, a partir da colocação dos corpos de prova, em contato com a água, determinou-se a massa após 10 minutos ( $m_{10}$ ) e após 90 minutos ( $m_{90}$ ). A Figura 3.8 (b) ilustra o ensaio registrado aos 90 minutos.

Para determinar o coeficiente de capilaridade e a absorção de água por capilaridade aos 90 minutos foram aplicadas as seguintes expressões:

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (13)$$

$$A_{90} = \frac{m_{90} - m_0}{16} \quad (14)$$

com:

$A_{90}$ = absorção de água por capilaridade aos 90 minutos (g/cm<sup>2</sup>);

C= coeficiente de capilaridade (g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>);

$m_0$ = 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).



Figura 3.8 – (a) Ensaio de capilaridade aos 0 minutos e (b) Ensaio de capilaridade aos 90 minutos.

#### 3.4.10. Absorção de água por imersão e índice de vazios

O ensaio de absorção de água e índices de vazios foi executado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009). Para a realização dos ensaios foram utilizados quatro CP's confeccionados de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005).

Primeiramente os corpos-de-prova foram colocados na estufa por um período de 72h. Decorrido esse tempo foi registrada a massa ( $m_s$ ). Em seguida o corpo-de-prova foi imerso em água durante 72 horas. Depois de completada a saturação em

água à temperatura ambiente, os CP's foram levados à ebulição. O processo de fervura dos corpos de prova foi realizado durante 5 horas, com o volume de água do recipiente de ensaio mantido constante. Após completada essa etapa, a água foi esfriada naturalmente até atingir a temperatura ambiente. Registrou-se a massa imersa dos corpos de prova ( $m_i$ ) utilizando uma balança hidrostática. Por fim, as amostras foram retiradas da água, secas com um pano úmido e foi registrada a massa saturada dos corpos de prova ( $m_{sat}$ ).

Finalizado o procedimento experimental, realizou-se os cálculos da absorção de água por imersão e fervura e do índice de vazios utilizando as expressões seguintes, respectivamente:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad (15)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (16)$$

sendo:

A= absorção de água por imersão (%);

$I_v$ = 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);

$m_i$ = massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g)

#### 3.4.11. Resistência à compressão em CP cilíndrico

Foram realizados ensaios de resistência à compressão em CP's cilíndricos, com o intuito de verificar os resultados de compressão obtidos com diferentes geometrias e fornecer uma ferramenta de comparação com a pesquisa de autores internacionais, que usualmente utilizam CP's cilíndricos para analisar a compressão em materiais cimentícios. Conforme será melhor discutido na seção de Resultados e Discussões, esse ensaio serviu como uma ferramenta para análise da interferência da trabalhabilidade das argamassas em parâmetros de resistência mecânica.

Foram escolhidos os traços de referência (TR00, TR01, TR02) além do traço SXac que apresentou os melhores resultados nas demais propriedades avaliadas. A modelagem dos CP's e o ensaio de resistência à compressão axial foram executados

de acordo com a metodologia da NBR 5739 (ABNT, 2007), onde utilizou-se três corpos de prova para cada traço. A moldagem dos corpos de prova envolveu a utilização de três camadas uniformes de argamassa, em que para cada camada foram aplicados 15 golpes uniformemente distribuídos com um martelo apropriado.

Os corpos de prova tinham 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura conforme Figura 3.9, tendo sido rompidos em uma máquina de ensaios universal EMIC com 30kN de capacidade, ilustrado na mesma figura. A taxa de carregamento do ensaio foi de  $500 \pm 10$  N/s até a ruptura do CP.

O cálculo da resistência à compressão foi realizado aplicando a equação a seguir:

$$R_c = \frac{F_c}{625\pi} \quad (17)$$



(a)



(b)

Figura 3.9– (a) Corpos de prova cilíndricos e (b) Ensaio de resistência à compressão em corpos cilíndricos de argamassa.

#### 3.4.12. Ensaio de aderência entre substrato e argamassa

Os ensaios de resistência de aderência à tração foram executados de acordo com a NBR 13528 (ABNT, 2010).

Utilizando uma parede de alvenaria, usada especificamente para este ensaio, presente no LECIV-UENF, foi realizada a distribuição de no mínimo 12 corpos-de-prova em cada traço de argamassa. A distribuição foi feita de modo que os CP's ficassem espaçados entre si, além dos cantos e das quinas, em no mínimo 50 mm.

Os traços escolhidos para serem ensaiados à aderência foram os TR00, TR01, TR02, SXac, SXah, SXch e SXach, com o objetivo de obter a região ótima pela rede simplex.

Para a obtenção desses CP's primeiramente foram realizados cortes com uma serra copo, de 50 mm de diâmetro, até a profundidade de 1 mm, sem que se atingisse os substratos (parede de alvenaria). Os cortes não devem interferir na integridade do revestimento; para isso, os furos foram feitos com muito cuidado e preciosismo. Após o corte do revestimento, realizou-se a colagem das pastilhas, de 50 mm de diâmetro, que foram coladas totalmente centradas no corpo-de-prova delimitado pelo corte utilizando cola Epóxi, evitando-se que a espessura da cola ultrapassasse 5 mm. Após o tempo de secagem da cola, verificada de acordo com o fabricante, realizou-se o ensaio, que consiste na aplicação contínua de carga com o auxílio de um dinamômetro sobre as pastilhas, conforme ilustrado na Figura 3.10.



Figura 3.10– (a) Dinamômetro utilizado na pesquisa e (b) Ensaio de resistência à aderência entre substrato e argamassa.

Os valores registrados no dinamômetro e a superfície onde ocorreu a ruptura foram registrados em planilhas apropriadas, que foram identificadas com base no traço analisado. As possíveis superfícies de ruptura são apresentadas na Figura 3.11.

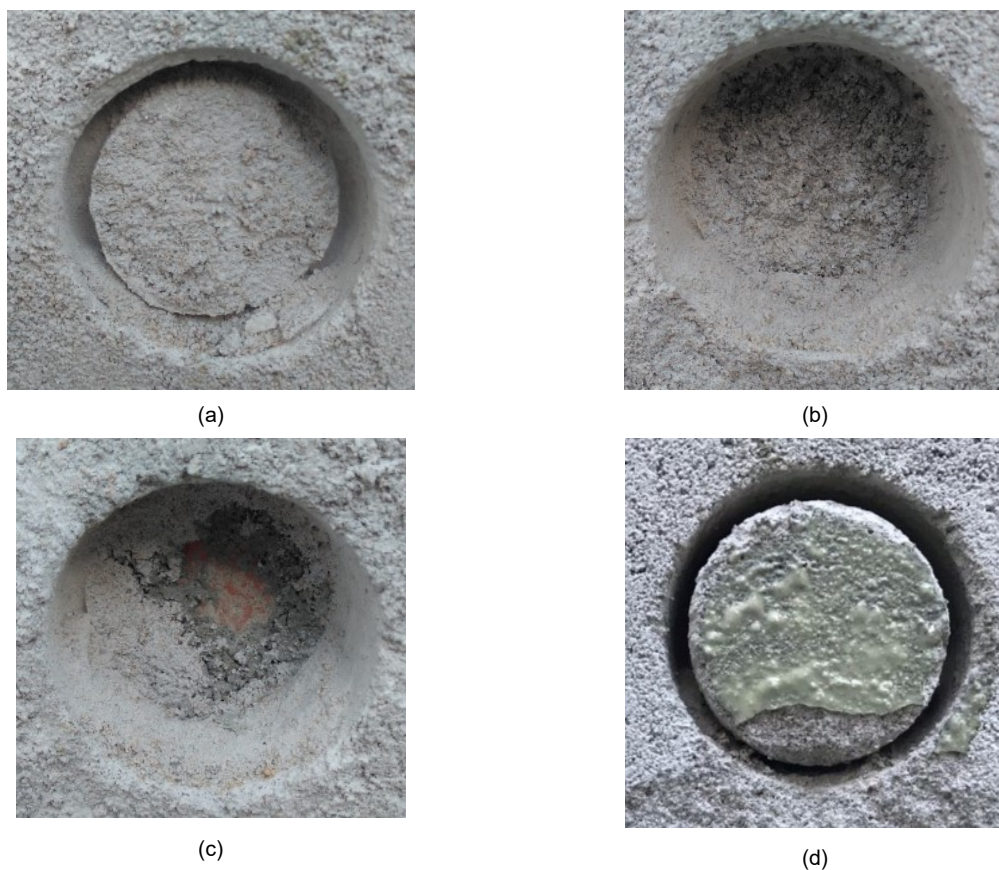


Figura 3.11 – Tipos de ruptura possíveis no ensaio de aderência à tração: (a) Ruptura na argamassa, (b) Ruptura na interface da argamassa com chapisco, (c) Ruptura na interface entre chapisco e substrato cerâmico e (d) Ruptura na cola epóxi.

### 3.5. Questionário de aplicação da argamassa

Durante a aplicação da argamassa no substrato cerâmico (muro de alvenaria), um questionário baseado em Gomes *et al.* (2012) foi aplicado ao técnico que realizou o revestimento dos traços analisados. Para as proporções TR00, TR01, TR02, SXac, SXch, SXah e SXach foi possível obter uma análise baseada na experiência da mão de obra que realizou a aplicação dessas argamassas.

A motivação para a aplicação do questionário foi que, apesar de ensaios tecnológicos que medem a trabalhabilidade das argamassas, como é o caso do *flow table* e do *squeeze flow*, a experiência do operador não deve ser ignorada, uma vez que importantes dados podem ser obtidos com essa análise voltada para a execução prática dos revestimentos.

Uma observação deve ser feita a respeito do questionário aplicado: como só foi possível obter a opinião de um operador, os dados ficam restritos à experiência de apenas uma pessoa, comprometendo a análise estatística do questionário. Porém,

como não foi possível aplicar o questionário a mais operadores, uma vez que a pesquisa foi realizada em uma universidade e não em um canteiro de obras, os dados obtidos não serão desprezados, mas serão analisados com cautela e com essa ressalva destacada no texto.

O questionário utilizado foi o mesmo utilizado por Gomes *et al.* (2012) e nomeado com a mesma nomenclatura utilizada pelos autores, “avaliação direta da trabalhabilidade das argamassas”. Os itens avaliados foram: (i) manuseio da argamassa, (ii) facilidade de aderência com o substrato, (iii) facilidade de aperto, (iv) facilidade de regularização e (v) opinião geral sobre a trabalhabilidade. As avaliações foram classificadas qualitativamente em mau, suficiente, bom e excelente.

### 3.6. Tratamento dos dados obtidos

#### 3.6.1. Delineamento estatístico dos parâmetros estudados

Os parâmetros obtidos no estado fresco não foram tratados com delineamento estatístico, uma vez que conforme as recomendações normativas e os resultados da bibliografia estudada, não são realizadas repetições para esses parâmetros. Assim sendo, a discussão dos resultados obtidos no estado fresco foi realizada seguindo a lógica e a teoria encontrada nos trabalhos de outros autores.

Já os parâmetros obtidos no estado endurecido apresentaram mais de uma repetição e, portanto, é necessário que os dados sejam tratados através de análise estatística antes de serem comparados. Por esse motivo, na avaliação dos parâmetros obtidos em estado endurecido foi utilizada a análise de variância (ANOVA) do delineamento inteiramente casualizado (DIC) ( $p \leq 0,05$ ), com o intuito de verificar a existência de significância estatística entre os tratamentos realizados. Uma vez comprovada a diferença estatística foi realizado o teste de comparação de médias de Tukey ( $p \leq 0,05$ ), a fim de verificar qual traço obteve os melhores resultados para cada parâmetro. Os cálculos foram realizados utilizando a ferramenta excel do pacote office. A seguir é apresentada a teoria do delineamento estatístico inteiramente casualizado e do Teste de Tukey retirados do livro de Gomes (1987).

O delineamento inteiramente casualizado (DIC) leva em consideração os princípios da repetição e da casualização, e é considerado o mais simples entre os delineamentos estatísticos. São realizados em situações de homogeneidade, por isso



são muito usados em ensaios de engenharia. Apresenta como vantagem o fato de poder ser utilizado com qualquer número de tratamentos e repetições e por apresentar um maior grau de liberdade associado ao resíduo, quando comparado a outros delineamentos. Como desvantagens poder ser citadas: a necessidade de existir homogeneidade total das condições experimentais e o fato de poder conduzir uma estimativa da variância residual bastante alta.

A tabela de casualização é apresentada na Tabela 3.4. O modelo estatístico utilizado está apresentado adiante:

Tabela 3.4 – Tabulação de dados para DIC

Tratamentos	Observações				Totais	Médias
1	y <sub>11</sub>	y <sub>12</sub>	...	y <sub>1b</sub>	y <sub>1</sub>	μ <sub>1</sub>
2	y <sub>21</sub>	y <sub>22</sub>	...	y <sub>2b</sub>	y <sub>2</sub>	μ <sub>2</sub>
...	...	...	...	...	...	...
A	y <sub>a1</sub>	y <sub>a2</sub>	...	y <sub>ab</sub>	y <sub>a</sub>	μ <sub>a</sub>
Total Geral					Y	μ=(y/ab)

$$y_{ij} = \mu + t_i + \varepsilon_{ij}, \text{ com } i = 1, 2, \dots, a \text{ e } j = 1, 2, \dots, b \quad (18)$$

em que:

a= número de tratamentos;

b= números de repetições;

y<sub>ij</sub>= representa a j-ésima observação do i-ésimo tratamento;

μ= média geral do experimento;

t<sub>i</sub>= efeito particular do tratamento i, no valor observado y<sub>ij</sub>;

ε<sub>ij</sub>= erro associado a observação y<sub>ij</sub>.

Através da tabela de tabulação de dados é possível realizar a análise de variância utilizando como base a Tabela 3.5. Alguns parâmetros são necessários para realizar essa análise. Esses parâmetros são a soma de quadrado do tratamento (SQ<sub>Trat</sub>), a soma de quadrado total (SQ<sub>Tot</sub>) e a soma de quadrado do resíduo (SQ<sub>Res</sub>) obtidos pelas expressões respectivamente:

$$SQ_{Trat} = \sum_{i=1}^a \frac{T_i^2}{b} - \frac{(\sum_{i=1, j=1}^{a,b} y_{ij})^2}{ab} \quad (19)$$

$$SQ_{Tot} = \sum_{i=1, j=1}^{a,b} y_{ij}^2 - \frac{(\sum_{i=1, j=1}^{a,b} y_{ij})^2}{ab} \quad (20)$$

$$SQ_{Res} = SQ_{Tot} - SQ_{Trat} \quad (21)$$

Tabela 3.5 – Tabela ANOVA para DIC.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	(a-1)	SQ <sub>Trat</sub>	$\frac{SQ_{Trat}}{a-1}$	$\frac{QM_{Trat}}{QM_{Res}}$
Resíduo	a(b-1)	SQ <sub>Res</sub>	$\frac{SQ_{Res}}{a(b-1)}$	
Total	ab - 1	SQ <sub>Total</sub>		

Legenda: FV= fonte de variação; GL= grau de liberdade; SQ= soma dos quadrados; QM= quadrados médios; F= parâmetro calculado para realização do teste F.

A resposta da Tabela ANOVA é o parâmetro F, obtido pela divisão do quadrado médio do tratamento pelo quadrado médio do resíduo, como indicado na Tabela 3.2. Obtido esse parâmetro é possível contrastá-lo com o valor de F tabelado com ( $p \leq 0,05$ ), indicado no Anexo I, e realizar o teste de hipóteses apresentado adiante. O objetivo do teste é verificar se existe diferença significativa entre pelo menos duas médias de tratamento.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a \quad (22)$$

$$H_1: \mu_i = \mu_j \text{ (pelo menos duas médias diferem entre si)}$$

A regra decisória para o teste F é se o valor  $F_{calculado}$  for maior que o valor  $F_{tabelado}$ , então rejeita-se  $H_0$ , e conclui-se que os tratamentos têm efeito diferenciado ao nível de significância em que o teste foi realizado ( $p \leq 0,05$ ). É necessário fazer um teste de contraste de médias, como o teste proposto por Tukey. Caso contrário, ou seja, caso  $F_{calculado}$  seja menor que o valor  $F_{tabelado}$ , então aceita-se a hipótese  $H_0$ , e todos os tratamentos realizados são estatisticamente iguais ao nível de significância estudado.

Essa metodologia foi utilizada apenas para os parâmetros do estado endurecido uma vez que essas propriedades apresentam grandes dispersões de valores, e em decorrência disso a norma brasileira estipula que para tais parâmetros sejam realizadas repetições com a utilização de mais de um corpo de prova, que estatisticamente representa as unidades experimentais.

A análise de variância não foi realizada para nenhum dos parâmetros do estado fresco por causa de duas justificativas: primeiramente porque a norma brasileira não determina que sejam feitas repetições nos ensaios para realização desses parâmetros, e porque foi observado na bibliografia internacional pesquisada, presente na revisão bibliográfica, que a ANOVA de fato não é realizada para parâmetros do estado fresco.

Para encerrar a análise ANOVA para o DIC é interessante calcular o coeficiente de variação do ensaio (CV) que indica o quanto o ensaio foi homogêneo. A expressão seguinte indica o cálculo desse coeficiente:

$$CV (\%) = \frac{\sqrt{QM_{Res}}}{\mu} * 100 \quad (23)$$

Valores de CV abaixo de 10% indicam que o ensaio apresentou alta precisão, enquanto valores de CV entre 10 e 30% indicam que o ensaio teve precisão média. Por fim valores de CV acima de 30% indicam baixa precisão experimental, e os resultados obtidos devem ser revistos e melhores analisados.

Conforme explicado anteriormente, sempre que a hipótese  $H_0$  for rejeitada pelo teste F é necessário realizar o teste de contraste de médias proposto por Tukey ( $p \leq 0,05$ ). O teste baseia-se no cálculo da diferença mínima significativa (DMS) obtida pela expressão:

$$DMS = q_{tab} * \sqrt{\frac{QM_{Res}}{b}} \quad (24)$$

em que:

$q_{tab}$  = amplitude total estudentizada usada por Tukey ( $p \leq 0,05$ ) apresentada no Anexo I.

A hipótese estatística proposta pelo Teste de Tukey é apresentada pela expressão a seguir:

$$H_0: \mu_i = \mu_j \text{ (médias iguais)} \quad (25)$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ (médias diferentes)}$$

A regra decisória para o teste de Tukey é caso  $|\mu_i - \mu_j| < DMS$ , aceita-se  $H_0$ , logo não existe diferença estatística entre os dois tratamentos analisados. Caso contrário,

rejeita-se  $H_0$  e conclui-se que os dois tratamentos analisados apresentam médias diferentes.

Para apresentar os resultados deve ser construída uma tabela com os tratamentos em ordem decrescente de médias, ou seja, do maior para menor. Na frente dos valores obtidos coloca-se uma letra maiúscula seguindo a ordem do alfabeto (A, B, C, ...) utilizando a seguinte regra: médias com letras distintas apresentam diferença estatística, enquanto médias com letras iguais apresentam médias estatisticamente iguais.

### 3.6.2. Discussão dos resultados obtidos para os parâmetros estudados

Um dos grandes problemas no estudo de argamassas é a falta de valores limites estipulados por norma, com exceção do parâmetro de resistência à aderência à tração cuja norma apresenta valores limites claros. Por isso, serão utilizados os valores encontrados por diferentes autores, e apresentados na revisão bibliográfica, para efeito de comparação com os valores obtidos nesta dissertação, após aplicado o tratamento estatístico.

Ainda assim, faltam regras claras para analisar se a argamassa apresentará um bom desempenho em serviço ou não, principalmente porque não fica claro para os pesquisadores da área quais parâmetros são mais importantes na análise de argamassas.

Em decorrência disso, dois trabalhos apresentados na revisão bibliográfica merecem destaque pela sua contribuição no estudo de argamassas e seus parâmetros. Os trabalhos citados, de Gomes e Neves (2002) e Mattana *et al.* (2012), serão destacados no texto a seguir, focando em como essas pesquisas serão utilizadas no presente trabalho.

Gomes e Neves (2002) estipulam seis parâmetros como necessários para uma correta dosagem de um traço de argamassa, que foram adaptados para uso nesta dissertação:

- (a) Teor máximo de finos (<0,075mm) de 12%;
- (b) Relação de adição de argilominerais em relação ao total de agregado no máximo de 5%;

- (c) Consumo de cimento conforme estipulado na Tabela 3.6;
- (d) Índice de consistência de  $260 \pm 10$  mm;
- (e) Teor de ar incorporado entre 6% e 17%;
- (f) Teor de retenção de água superior a 75%.

As argamassas analisadas serão classificadas como conforme (CONF) ou não conforme (NÃO) de acordo com os critérios estipulados por Gomes e Neves (2002). As argamassas classificadas como CONF devem atender aos seis parâmetros estipulado pelos autores.

Tabela 3.6 – Faixas de consumo de cimento em  $\text{kg/m}^3$  de argamassa

Fonte: Gomes e Neves (2002)

Tipo de argamassa	Uso Interno	Uso externo
Assentamento de blocos	150-180	160-190
Chapisco	380-430	410-470
Emboço	160-180	180-210
Reboco	160-170	170-190
Camada única	160-180	180-210
Base para cerâmica	180-210	190-220
Base para laminado	210-240	-
Assentamento	250-350	250-350

Um grande problema da metodologia proposta por Gomes e Neves (2002) é que nessa pesquisa não é considerado os parâmetros das argamassas no estado endurecido. Por isso, a metodologia de Mattana *et al.* (2012) também será empregada, uma vez que ela utiliza quase todos os parâmetros conhecidos para as argamassas. Os valores adaptados da pesquisa dos autores são destacados a seguir:

- Densidade de massa no estado fresco: entre 1400 a  $2000 \text{ kg/m}^3$ ;
- Teor de ar incorporado: limitados em 20%;
- Densidade de massa no estado endurecido: entre 1200 a  $1900 \text{ kg/m}^3$ ;
- Índice de vazios: limitados em 40%;
- Módulo de elasticidade: limitado em 12 GPa;
- Resistência à compressão: entre 1,5 a 9,0 MPa;
- Resistência à tração na flexão: entre 1,0 a 4,5 MPa;
- Coeficiente de capilaridade: limitado em  $12,5 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ ;

- Aderência à tração da argamassa: acima de 0,20 MPa para revestimento interno e 0,30 MPa para revestimento externo.

Após comparação e validação dos traços com os valores estipulados por Mattana *et al.* (2012), é possível dar pesos diferenciados aos ensaios de argamassa, com base em sua importância para a compreensão do desempenho das argamassas utilizando um método nomeado Análise Hierárquica de Pesos (AHP). A escala de importância utilizada é determinada de acordo com a norma americana ASTM E 1765 (AMERICAN..., 2002) que é utilizada para análise de decisões relacionadas a investimentos na área de construções, através de abordagem objetiva e técnica.

A Tabela 3.7 exemplifica a relação entre parâmetros utilizados, onde se aplica a regra de relação entre o parâmetro A e o parâmetro B. Para definir qual propriedade era mais importante que a outra, Mattana *et al.* (2012) utilizaram um enfoque técnico, buscando referências na literatura e com a experiência dos autores na tecnologia de argamassas, utilizando conceitos ligados ao de gestor da indústria, que fundamenta seus conhecimentos para chegar a decisões finais dentro do ambiente de trabalho.

Deve-se notar que a Tabela 3.7 faz referência a “A” sendo mais importante que “B”, e quando ocorre o contrário, ou seja, “A” é menos importante que “B”, é só usar o valor invertido do presente na tabela. Assim por exemplo, em vez de usar o valor 5, caso aconteça a situação descrita acima usa-se 1/5.

Tabela 3.7 – Escalas de importância baseada na ASTM E 1765 (AMERICAN..., 2002).

Fonte: Mattana *et al.* (2012).

Escala de comparação	Valor associado
A igual importância que B	1
A pouco mais importante que B	3
A mais importante que B	5
A muito mais importante que B	7
A extremamente mais importante que B	9

A seguir é detalhado o procedimento de Mattana *et al.* (2012) que será aplicado nesta dissertação:

Primeiro passo: Criar a relação entre os parâmetros estudados baseado na Tabela 3.7.

Segundo passo: Com a realização da relação entre os parâmetros estudados, monta-se uma matriz de decisão e executa-se o cálculo do peso relativo para cada parâmetro de análise. Para isso, considera-se a soma individual de cada um dos critérios, dividindo-o pela soma geral de todos os critérios e multiplicando por 100. Assim cada parâmetro recebe um percentual de importância na análise do desempenho das argamassas.

Terceiro passo: Na sequência, os resultados de cada ensaio são divididos pelo maior valor encontrado para aquele parâmetro entre todas as argamassas estudadas. Assim, os dados ficam normalizados numa escala de 0 a 1 para todos os ensaios considerados.

Observação: Usualmente os parâmetros apresentam comportamento melhor, quando apresentam valores maiores, como é o caso dos parâmetros de resistência, por exemplo. Porém alguns ensaios apresentam melhor desempenho quanto menor for o seu valor, como é o caso de densidade de massa no estado fresco e endurecido, índice de vazios, módulo de elasticidade e coeficiente de capilaridade. Para esses parâmetros, a análise hierárquica deve ser feita de forma diferenciada, devendo ser utilizado o inverso dos valores obtidos na hora de normalizar os dados. Assim é realizada uma correção na aplicação do método, uma vez que os traços com menores valores, e que apresentam melhor desempenho para os ensaios destacados acima, passam a ter os maiores valores numéricos e recebem dados normalizados mais próximos de 1. O contrário também ocorrerá: os traços com maiores valores obtidos nesses parâmetros, passam a apresentar menores valores numéricos com o uso do valor inverso, e, portanto, recebem os dados normalizados mais baixos.

Quarto passo: O peso de cada ensaio obtido pelo segundo passo é multiplicado pelos dados normalizados obtidos pelo passo três. Realiza-se o somatório de todas as propriedades para cada argamassa estudada, obtendo um valor que pode variar de 0 a 100%.

Quinto passo: Conclui-se qual é o melhor traço analisado, que será aquele que obtiver a maior nota entre as proporções de estudo.

Como não foram realizados todos os ensaios para todas as proporções estudadas, é necessário realizar uma modificação na metodologia proposta por Mattana *et al.* (2012). A seguir são destacadas as metodologias utilizadas para cada

conjunto de traços estudadas nesta dissertação, bem como as matrizes de decisão encontradas.

Metodologia 01: Aplicada em todos os traços estudados (TR+SX+EST) com a utilização dos ensaios de densidade de massa no estado fresco, retenção de água, teor de ar incorporado, densidade de massa no estado endurecido, índice de vazios, resistência à compressão em CP's prismáticos, resistência à tração na flexão e coeficiente de capilaridade, com os pesos atribuídos conforme matriz de decisão da Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Matriz de decisão para os traços analisados pela metodologia 01.

Parâmetro estudado	Densidade de massa fresca (a)	Retenção de água (b)	Teor de ar incorporado (c)	Densidade de massa endurecida (d)	Índice de vazios (e)	Resistência à compressão (f)	Resistência à tração na flexão (g)	Coefficiente de Capilaridade (h)
(a)	1	5	3	1	3	3	7	5
(b)	1/5	1	1/3	1/5	1/3	1/3	1	3
(c)	1/3	3	1	1	1	3	5	3
(d)	1	5	1	1	1	3	5	5
(e)	1/3	3	1	1	1	1	5	3
(f)	1/3	3	1/3	1/3	1	1	5	5
(g)	1/7	1	1/5	1/5	1/5	1/5	1	1
(h)	1/5	1/3	1/3	1/5	1/3	1/5	1	1
∑ peso	3,21	21,33	7,20	4,93	7,87	11,73	30	26
Total	112,27							
%	2,86%	19,00%	6,41%	4,39%	7,01%	10,45%	26,72%	23,16%

Conforme é possível identificar com análise da Tabela 3.8, na metodologia 01 os ensaios de maior relevância foram os de resistência à tração na flexão, o de capilaridade e o de retenção de água.

Metodologia 02: Aplicada aos traços TR+SX utilizando todos os parâmetros destacados na Metodologia 01 mais o ensaio de resistência de aderência à tração e módulo de elasticidade aproximado obtido pelo ensaio de compressão em CP's cilíndricos, conforme pesos estipulados na Tabela 3.9.

Com a mudança imposta pela metodologia 02, os ensaios de maior importância passam a ser o de resistência à aderência, que predomina de forma significativa sobre os outros, seguido pelos ensaios de resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e coeficiente de capilaridade. Os ensaios de densidade de massa, no estado fresco e endurecido, são os que apresentam menores valores significantes na



análise de desempenho de argamassas, seguidos pelo teor de ar incorporado que apresenta significância um pouco maior.

Tabela 3.9 – Matriz de decisão para os traços analisados pela metodologia 02.

Ensaio	Densidade de massa fresca (a)	Retenção de água (b)	Teor de ar incorporado (c)	Densidade de massa endurecida (d)	Índice de vazios (e)	Módulo de elasticidade (f)	Resistência à compressão (g)	Resistência à tração na flexão (h)	Resistência à aderência (i)	Coefficiente de Capilaridade (j)
(a)	1	5	3	1	3	5	3	7	9	5
(b)	1/5	1	1/3	1/5	1/3	1	1/3	1	5	3
(c)	1/3	3	1	1	1	5	3	5	7	3
(d)	1	5	1	1	1	5	3	5	7	5
(e)	1/3	3	1	1	1	5	1	5	7	3
(f)	1/5	1	1/5	1/5	1/5	1	1/3	1	5	1
(g)	1/3	3	1/3	1/3	1	3	1	5	7	5
(h)	1/7	1	1/5	1/5	1/5	1	1/5	1	3	1
(i)	1/5	1/3	1/3	1/5	1/3	1/5	1/5	1	1	1/5
(j)	1/9	1/5	1/7	1/7	1/7	1	1/7	1/3	5	1
∑ peso	3,9	22,5	7,5	5,3	8,2	27,2	12,2	31,3	56,0	27,2
Total	201,4									
%	1,90	11,20	3,70	2,60	4,10	13,50	6,10	15,60	27,80	13,50

Com a análise dos traços aplicando a metodologia de Mattana *et al.* (2012) obteve-se uma identificação de quais proporções estudadas apresentaram melhores desempenho e vida útil.

### 3.6.3. Correlação de parâmetros utilizando Pearson

Quando se trabalha com diferentes propriedades, que apresentam relação entre si, um dado interessante a ser analisado é a correlação que existe entre esses dois parâmetros. Alguns exemplos de aplicações possíveis a serem discutidas na análise de parâmetros de argamassa são: verificar se existe relação entre o índice de vazios e a densidade de massa no estado endurecido, ou ainda, verificar se existe tendência de correlação entre índice de vazios e resistência mecânica. Todas essas análises podem ser feitas com auxílio de ferramentas estatísticas, utilizando a teoria retirada de Gomes (1987).

O primeiro passo para analisar a correlação estatística entre dois parâmetros é construir um diagrama de dispersão, plotando uma das variáveis no eixo X e outra no eixo Y. Assim, é possível analisar se existe uma relação entre as duas variáveis, e se essa relação segue uma tendência linear, quadrática ou cúbica, por exemplo. Para

medir essa correlação é possível utilizar o coeficiente de correlação de Pearson, usualmente representado pela letra “r”.

Para calcular esse coeficiente, inicialmente é necessário calcular a covariância de duas variáveis de estudo, que representa as duas propriedades a serem correlacionadas. A covariância pode ser calculada com aplicação da expressão:

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum X_i Y_i - n * \mu_x * \mu_y}{n - 1} \quad (26)$$

sendo:

Cov (X,Y)= covariância das variáveis X e Y;

$\sum X_i Y_i$ = produto dos pares de valores observados para as variáveis X e Y;

n= números de pontos analisados;

$\mu_x$ = média geral da variável X;

$\mu_y$ = média geral da variável Y.

Após o cálculo da covariância das duas variáveis é possível obter o coeficiente de Pearson utilizando a expressão indicada a seguir:

$$r = \frac{Cov(X, Y)}{S_x S_y} \quad (27)$$

em que:

r= coeficiente de Pearson;

$S_x$ = variância da variável X.

$S_y$ = variância da variável Y.

O valor do coeficiente de Pearson varia entre -1 e 1, e apresenta fácil compreensão, motivo pelo qual é amplamente utilizado em pesquisas experimentais. Caso o valor do coeficiente seja -1, encontra-se um relacionamento linear negativo, ou seja, os pontos estão todos alinhados e quando X aumenta, o parâmetro Y decresce, e vice-versa. A mesma análise pode ser feita quando o coeficiente encontrado é igual a 1, onde ocorre um relacionamento linear positivo perfeito e o crescimento dos parâmetros X e Y é diretamente proporcional. Conseqüentemente, valores próximos de 0, tanto positivos quanto negativos, indicam fraca correlação

entre os parâmetros analisados. O uso do coeficiente de Pearson é de extrema simplicidade e apresenta uma resposta interessante para os parâmetros tecnológicos analisados para as argamassas desta dissertação.

#### 3.6.4. Utilização de rede simplex

Com a utilização dos traços TR00, TR01, TR02, SXac, SXah, SXch e SXach foi possível realizar a análise dos parâmetros tecnológicos estudados em rede simplex. Essas análises foram realizadas para os principais parâmetros no desempenho de argamassas.

A rede simplex utilizada nesta dissertação tinha como vértices os três aglomerantes analisados, sendo  $X_1$  a cal hidratada,  $X_2$  a argila e  $X_3$  o resíduo de mármore. Os traços devem ser analisados de forma a respeitar as proporções apresentadas na expressão a seguir e Figura 3.12, adaptada da metodologia de Destefani e Holanda (2011):

$$X_1 + X_2 + X_3 = 1 \quad (28)$$

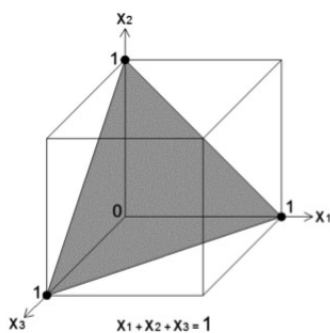


Figura 3.12 – Representação da rede simplex para três componentes.

Fonte: Destefani e Holanda (2011).

Para determinação da superfície de resposta das propriedades analisadas foram adotados modelos numéricos, destacados a seguir: modelo linear, com três pontos apresentado na Figura 3.13 (a); modelo quadrático com seis pontos conforme Figura 3.13 (b); e modelo cúbico simples, com sete pontos mostrado na Figura 3.13 (c). Os pontos presentes nos modelos estão relacionados com os traços estudados conforme a Tabela 3.10.

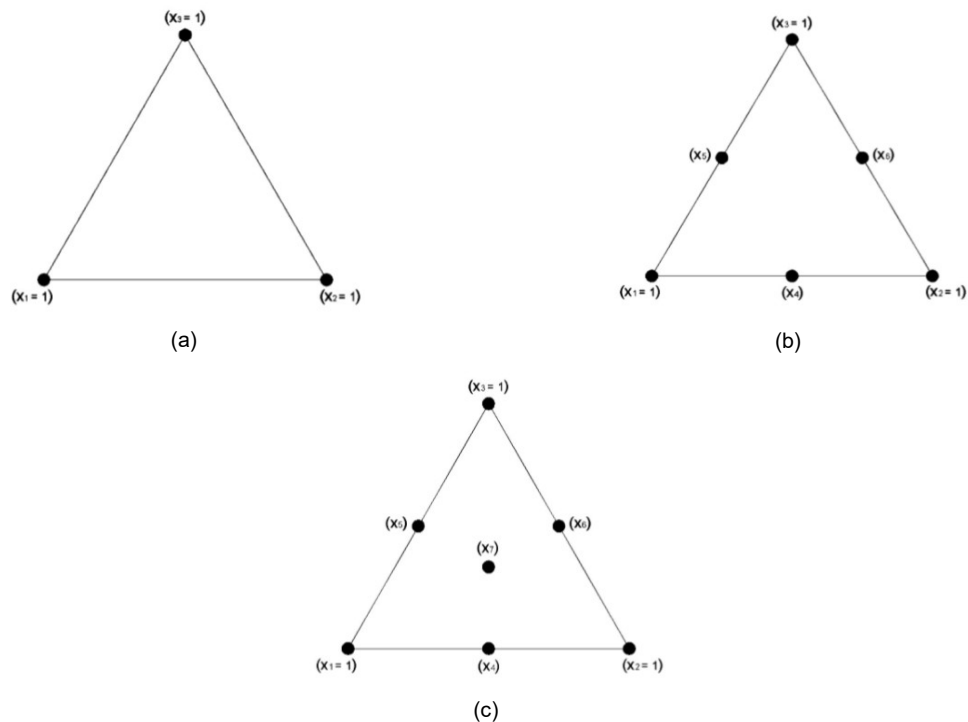


Figura 3.13 – (a) Modelo linear, (b) Modelo quadrático, (c) Modelo cúbico simplex para rede Simplex.

Fonte: Destefani e Holanda (2011).

Tabela 3.10 – Relação entre os pontos da rede simplex e os traços estudados

Ponto do Modelo	Traço correspondente	Cal Hidratada: Argila: Pó de mármore
X <sub>1</sub>	TR00	1:0:0
X <sub>2</sub>	TR01	0:1:0
X <sub>3</sub>	TR02	0:0:1
X <sub>4</sub>	SXah	½:½:0
X <sub>5</sub>	SXch	½:0: ½
X <sub>6</sub>	SXah	0: ½:½
X <sub>7</sub>	Sxach	1/3:1/3:1/3

As expressões a seguir representam os modelos linear, quadrático e cúbico simples, respectivamente:

$$y_{linear} = b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 \quad (29)$$

$$y_{quadrático} = b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_{12} * X_1 * X_2 + b_{13} * X_1 * X_3 + b_{23} * X_2 * X_3 \quad (30)$$

$$y_{cúbico} = b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_{12} * X_1 * X_2 + b_{13} * X_1 * X_3 + b_{23} * X_2 * X_3 + b_{123} * X_1 * X_2 * X_3 \quad (31)$$

Com a aplicação da metodologia das redes simplex, com uso do software Surfer, da empresa Golden Surfer, é possível obter as regiões ótimas para os parâmetros destacados no texto acima. Analisando a região ótima de todos os parâmetros em conjunto, utilizando o modelo que apresentou maior ajuste (linear,

quadrático ou cúbico simplex) foi possível definir quais regiões apresentaram a melhor proporção de cal hidratada, argila e resíduo de mármore, sendo dessa maneira possível analisar a viabilidade da substituição parcial, ou até total, do aglomerante cal hidratada conforme proposto neste trabalho.

### 3.7. Análise financeira dos custos do cimento e da cal hidratada

A análise financeira envolvera a mesma metodologia utilizada por Junior *et al.* (2006), em que os autores verificaram o preço da cal hidratada em relação ao preço do cimento Portland, como forma de comprovar que os dois materiais apresentam valores parecidos quando se considera R\$/kg. Os valores encontrados pelos autores foram destacados na Tabela 2.3.

Realizou-se uma pesquisa em materiais de construção da cidade de Campos dos Goytacazes, onde foi realizada esta dissertação, com o intuito de verificar que na cidade o preço por kg de cimento é próximo ao preço por kg de cal hidratada. Os materiais orçados foram a cal hidratada CH-III e o cimento CII-E-32. O objetivo dessa análise é justificar de maneira econômica o aditivo desenvolvido, uma vez que o preço da cal hidratada causa um impacto financeiro no preço final da argamassa tão grande quanto o preço do cimento.

## 4. Resultados e Discussões

### 4.1. Caracterização dos materiais estudados

#### 4.1.1. Caracterização física

A Tabela 4.1 indica os parâmetros físicos obtidos para os três materiais estudados; destaca-se que o Índice de plasticidade foi obtido através da aplicação da expressão (01), enquanto a Figura 4.1 ilustra as curvas granulométricas desses materiais, a partir do qual foi possível obter o teor de finos (<0,075mm).

Tabela 4.1 – Parâmetros físicos obtidos para os aglomerantes estudados.

Parâmetro	Cal hidratada	Argila	Resíduo de mármore
Limite de Liquidez (%)	54,5	44,8	NP
Limite de Plasticidade (%)	28,2	21,3	NP
Índice de Plasticidade (%)	26,3	23,5	NP
Densidade real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,37	2,58	2,75
% finos (<0,075mm)	97	74	95

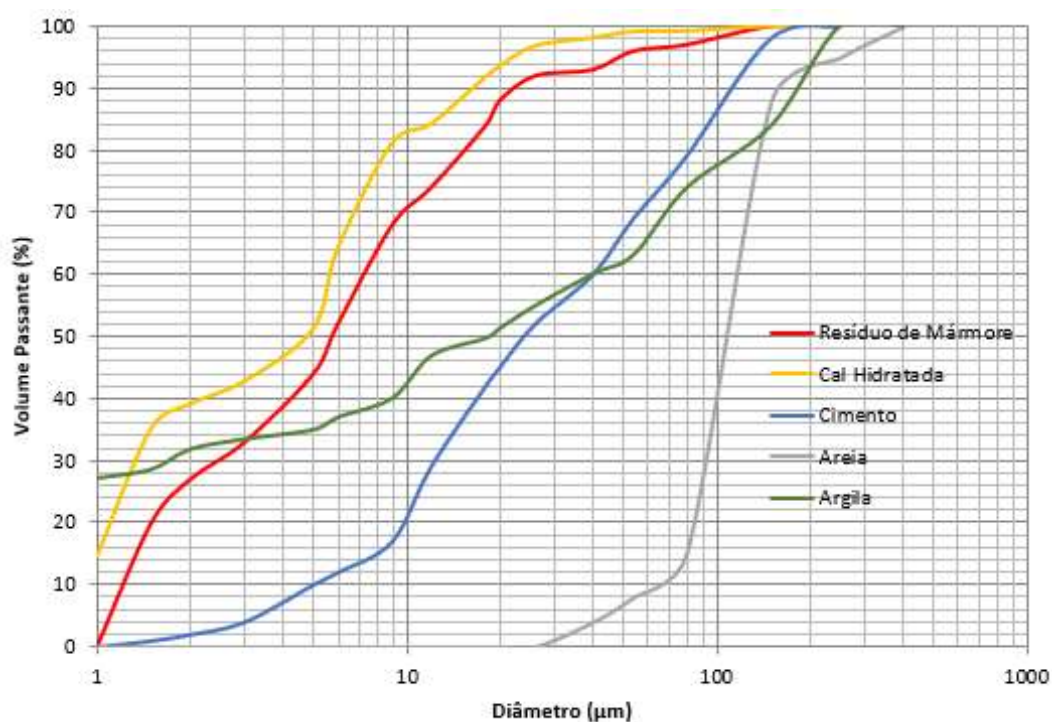


Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos materiais estudados.

Comparando os resultados dos materiais é fácil constatar pela granulometria que a argila apresenta as partículas mais grosseiras, enquanto a cal hidratada apresenta as partículas mais finas. Esse fato também pode ser compreendido analisando o teor de finos de cada um dos materiais, em que se constata que a argila apresenta teor de

finos de aproximadamente 74%, enquanto o resíduo de mármore e a cal hidratada apresentam teores muito próximos, respectivamente, de 95% e 97%. Utilizando apenas esse critério, uma conclusão possível é que argamassas contendo apenas argila iriam precisar de maiores quantidades de água para obter os mesmos parâmetros de trabalhabilidade do que argamassas contendo apenas cal hidratada ou resíduo de mármore, já que a argila apresenta granulometria mais grosseira. Essa informação foi comprovada nos ensaios de *flow table* e *squeeze flow*.

Uma análise precipitada com base apenas nos parâmetros de granulometria levaria a conclusão errônea de que a argila é um pior substituto para a cal hidratada do que o resíduo de mármore. Porém, os demais parâmetros de classificação dos materiais pesquisados, bem como as propriedades tecnológicas das argamassas devem ser analisadas. Observa-se também que, conforme metodologia de Gomes e Neves (2002), o teor de finos das argamassas deve ser fixado em 5%, logo, ao usar cal hidratada e resíduo de mármore sem restrições, pode ser que essa regra não seja atendida, como será melhor abordado na sequência do texto.

Ao analisar a granulometria da cal hidratada, verifica-se que ela atende aos requisitos da NBR 7175 (ABNT, 2003) de finura para se enquadrar na classificação de CH-III. Os critérios, destacados na revisão bibliográfica, são de que CH-III precisam ter mais de 0,5% de material retido na peneira de 0,600mm e mais de 15% de material retido na peneira de 0,075mm de abertura, ou colocando a informação de outra forma, essa classe de cal hidratada precisa ter mais de 99,5% de material passando na peneira 0,600mm e mais de 85% de material passando na peneira de 0,075mm. Conforme observado na curva granulométrica do material presente na Figura 4.1 a cal em estudo apresenta 100% de material passante na primeira abertura destacada e 95% passante na segunda, atendo as restrições normativas.

Fazendo uma comparação dos resultados encontrados para a argila em estudo nesta dissertação com os resultados abordados na bibliografia, percebe-se que os valores obtidos são coerentes, uma vez que Alexandre (2000) concluiu que a quantidade de finos das argilas varia de acordo com a profundidade de onde as argilas são extraídas, podendo apresentar diferentes granulometrias. O autor, por exemplo, encontrou valores na ordem 97% para algumas amostras e na ordem de 72% para outras, enquanto Vieira (2001) encontrou valores de 70% e 98% para as duas argilas

estudadas por ele. Sendo assim, o teor de fino obtido, 71%, encontra-se numa faixa possível de valores. Esses dados foram apresentados nas Figuras 2.4 e 2.6.

A granulometria do resíduo de mármore também pode ser comparada com os autores estudados na revisão bibliográfica. Corinadelsi *et al.* (2010), por exemplo, na caracterização do seu resíduo obteve  $D_{90} = 50 \mu\text{m}$ , ou seja, 90% do material estudado passava pela peneira com 0,050 mm. Isso quer dizer que, mesmo sem ser possível detalhar o valor preciso do teor de finos dos autores, esse valor foi superior a 90%. Uma comparação mais minuciosa com os valores bibliográficos torna-se complexa, já que as técnicas de beneficiamento do mármore variam de uma indústria para outra, gerando grande dispersão de dados bibliográficos. Ilustrando a informação acima, destaca-se a pesquisa de Buyuksagis *et al.* (2017), em que os autores utilizaram um resíduo de granulometria mais grosseira, conforme Tabela 2.20. Assim, conclui-se que os valores encontrados para a granulometria do resíduo são coerentes, devido à grande dispersão das técnicas de beneficiamento de mármore disponíveis. A granulometria do resíduo de mármore apresenta maior similaridade com a cal hidratada, do que com o cimento e a areia. Dessa forma, substituir o resíduo por cal hidratada é mais efetivo do que substituir pelos outros componentes da argamassa, do ponto de vista granulométrico.

A massa específica obtida para os materiais estudados foi de  $2,37 \text{ g/cm}^3$ ,  $2,58 \text{ g/cm}^3$  e  $2,75 \text{ g/cm}^3$  para a cal hidratada, a argila e o resíduo de mármore, respectivamente, sendo que a ordem destacada acima indica a ordem crescente de densidade para os materiais estudados. Os valores obtidos são coerentes com os valores encontrados na bibliografia de cerca de  $2,60 \text{ g/cm}^3$  para a argila de Campos dos Goytacazes, embora para o resíduo de mármore os valores encontrem-se ligeiramente acima dos valores encontrados por Ergün (2011), Vardhan *et al.* (2015) e Buyuksagis *et al.* (2017) de  $2,68 \text{ g/cm}^3$ ,  $2,60 \text{ g/cm}^3$  e  $2,72 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente.

Os limites de Atterberg analisados na pesquisa, principalmente o Índice de Plasticidade, pode levar a algumas conclusões importantes sobre os materiais analisados. A cal hidratada e a argila apresentaram Índice de Plasticidade bem próximos, 26,3% e 23,5%, respectivamente, sendo a cal pouco mais plástica que a argila. Conforme discutido na revisão bibliográfica, esse fato já era esperado e é um dos grandes motivos para o uso empírico da substituição da cal hidratada por argila em obras de construção civil no Brasil (GOMES E NEVES, 2002; GOMES ET AL.,



2012; ANDRES *ET AL.*, 2016). Os valores de Índice de Plasticidade obtidos para a argila estudada estão de acordo com os valores obtidos por Vieira e Pinheiro (2011), que foram de 24% e 27%; por Candido *et al.* (2013), de 20%; e dos valores obtidos pelos estudos clássicos de Alexandre (2000) e Vieira (2001), demonstrados nas Tabelas 2.7, 2.9 e 2.11.

Ainda sobre os limites de Atteberg, é importante salientar que o resíduo de mármore estudado apresentou características não plásticas, uma vez que não foi possível obter os limites de liquidez e plasticidade utilizando a metodologia proposta pelas normas brasileiras. Esse fato é ruim do ponto de vista da utilização desse material como substituição à cal hidratada, uma vez que a não obtenção de índices plásticos pode evidenciar pouca capacidade de aglomeração para esse material, podendo prejudicar as propriedades de aderência ao substrato. Mesmo assim, conclusões acerca da substituição da cal por calcário não devem ser tomadas apenas com o estudo de parâmetros de plasticidade, sendo necessário analisar as demais propriedades de caracterização dos materiais em estudo, comparando-as, e avaliar as características das argamassas confeccionadas com os materiais destacados.

#### 4.1.2. Caracterização química e mineralógica

A Tabela 4.2 indica a caracterização química dos aglomerantes estudados, enquanto a Figura 4.2 mostra os picos obtidos através da difração de raios-x, bem como os minerais detectados na análise para os materiais citados.

Analisando a caracterização química dos três aglomerantes em estudo, pode-se fazer as seguintes observações: a cal hidratada é composta predominantemente de CaO, que corresponde a um total de 94,7%; a argila estudada é composta majoritariamente de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que correspondem a respectivamente 48,45 e 28,45% da composição do material; e, por fim, o resíduo de mármore apresenta principalmente CaO com 70,21% e MgO com 10,56%, apresentando, ainda, 4,74% de SiO<sub>2</sub> e 9,98% de perda ao fogo. Dessa forma, fica fácil concluir, que por um critério puramente químico, o resíduo de mármore apresenta maior possibilidade de substituição da cal hidratada, uma vez que sua composição se aproxima em parte a desse aglomerante. Por outro lado, a substituição pela argila estudada fica comprometida quimicamente, ainda que os demais parâmetros devam ser analisados antes de uma conclusão mais apurada.

Tabela 4.2 – Análise química dos aglomerantes estudados.

Porcentagem (%)	Cal Hidratada	Argila	Resíduo de Calcário
SiO <sub>2</sub>	1,65	48,45	4,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	28,45	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,82	5,87	1,35
CaO	94,7	5,5	70,21
MgO	-	-	10,56
K <sub>2</sub> O	1,21	2,73	1,46
TiO <sub>2</sub>	-	1,45	-
SO <sub>3</sub>	0,54	0,66	1,3
ZrO <sub>2</sub>	0,01	0,19	-
MnO	-	0,15	-
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0,04
CuO	-	-	0,03
SrO	0,26	-	0,03
PF	0,4	6,21	9,98

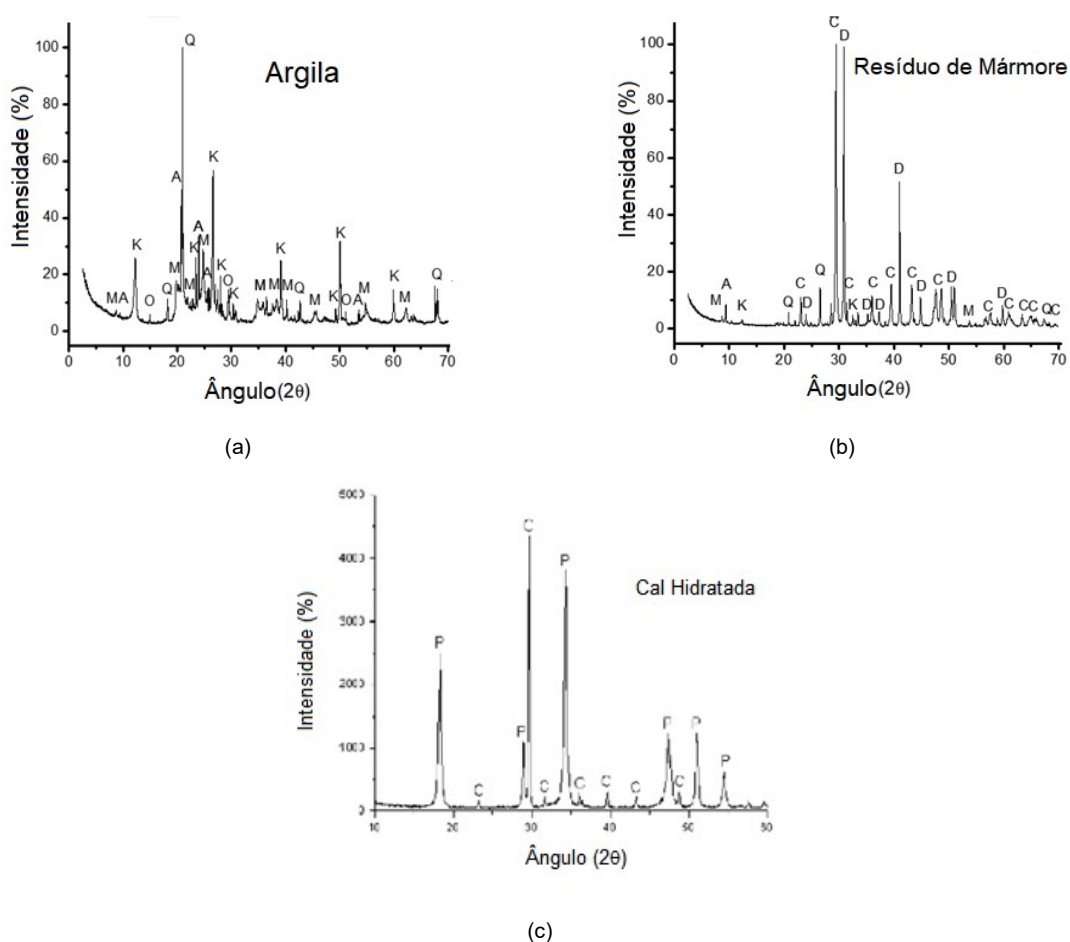


Figura 4.2 – Difratoograma de raio-X obtido para (a) argila, (b) calcário proveniente do beneficiamento de mármore e (c) cal hidratada.

Legenda: A – aluminita; C – calcita; D – dolomita; K – caulinita; M – muscovita; O – ortoclácio; P – portlandita; Q – quartzo.

Tomando como base a NBR 7175 (ABNT, 2003) comprova-se que a cal utilizada neste estudo atende aos requisitos químicos para ser classificada como CH-III, isto é, o material apresenta em sua composição mais de 88% de óxidos totais não voláteis (CaO+MgO), conforme abordado na bibliografia, apresentando 94,7% desse tipo de óxidos em sua composição.

Analisando os resultados obtidos por Alexandre (2000), Vieira (2001), Vieira e Pinheiro (2011), Candido *et al.* (2013), Coutinho e Vieira (2016) e Areias *et al.* (2017), conforme abordado no item revisão bibliográfica nas Tabelas 2.8, 2.10 e 2.12, verifica-se que a argila estudada nessa dissertação apresenta composição química similar as demais argilas estudadas em Campos, com predominância dos óxidos SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Um dado interessante que comprova essa afirmação é que em todas as pesquisas citadas, a soma dos percentuais desses dois óxidos ficou em torno de 75%, semelhante ao valor obtido pela argila estudada, de 76,9%.

Relacionando a análise química obtida para diferentes resíduos de mármore, já apresentada na Tabela 2.17, é possível concluir que os valores obtidos nesta pesquisa diferem dos encontrados na bibliografia internacional, uma vez que nessas pesquisas os óxidos de CaO e MgO somados ficaram em torno de 50-55%, enquanto na presente pesquisa ficaram em 80,77%. Os resíduos estudados por Ergün (2011), Vardhan *et al.* (2015) e Buyuksagis *et al.* (2017) apresentaram teores elevados de perda ao fogo, variando entre cerca de 37% a 46%. Para o resíduo analisado nesta pesquisa, os valores obtidos foram de 9,98%, bem abaixo dos encontrados nos estudos destacados. Isso pode ser atribuído à diferença das rochas que são utilizadas como matéria-prima nas diferentes indústrias de rocha ornamental.

Os valores encontrados para o resíduo de mármore de Cachoeiro de Itapemirim - ES são extremamente positivos, já que indicam maior similaridade com a cal hidratada, material a ser substituído. Apenas para fazer uma comparação, tomando como base a NBR 7175 (ABNT, 2003) para que um material seja classificado como CH-III é necessário que apresente teor de óxidos voláteis maior do que 88% e que apresente teor de CO<sub>2</sub> em depósito menor que 15%. Sabendo que a quantidade de dióxido de carbono presente em um material apresenta relação direta com sua perda ao fogo, conclui-se com isso que dos resíduos analisados o que está mais próximo de ser classificado como CH-III quimicamente, é o resíduo de mármore utilizado nesta

pesquisa. Por isso, conclui-se que a análise química encontrada para o calcário apresentou valores positivos.

Os principais minerais encontrados na análise mineralógica dos aglomerantes estudados nessa pesquisa são destacados a seguir: para a cal hidratada houve grande predominância da portlandita e calcita, similar a análise química encontrada; para a argila houve predominância de caulinita e quartzo, com traços de muscovita e outros minerais, coerente com a análise química do material; e para o resíduo de mármore grande quantidade de calcita e dolomita, e pequena presença de quartzo, também apresentando boa correlação com a análise química realizada para o material. Analisando as características mineralógicas dos três materiais estudados, chega-se à mesma conclusão da análise química: existe certa relação entre as características da cal hidratada e do resíduo de mármore; ambos apresentam calcita por exemplo, porém não existe boa relação entre a mineralogia da cal hidratada com a argila estudada, o que pode dificultar a substituição de um material pelo outro.

Comprovam-se os resultados da pesquisa de Silva (2014) e Cho (2017) que destacaram que, mineralogicamente, a cal hidratada é composta por portlandita, podendo haver traços de calcita em sua composição, conforme já ilustrado na Figura 2.3. Também se comprovam os resultados encontrados por Alexandre (2000), Vieira (2001), Vieira e Pinheiro (2011), Candido *et al.* (2013), Coutinho *et al.* (2016) e Areias *et al.* (2017) que concluíram que as argilas da baixada campista são compostas predominantemente por caulinita, com traços de quartzos, montmorilonita e outros argilominerais. Esse dado é ilustrado nas Figuras 2. 5, 2.7 e 2.9.

Os resultados obtidos por Corinaldesi *et al.* (2010), Ergün (2011) e Vardhan *et al.* (2015), sendo os dois últimos apresentados nas Figuras 2.24 e 2.25, respectivamente, são também comprovados com os resultados do resíduo de mármore, já que se verifica a grande predominância dos minerais calcita e dolomita em todos esses resíduos citados. Conforme destacado na revisão bibliográfica, esse fato já era esperado uma vez que o mármore é uma rocha calcária, e, portanto, seria incoerente se a composição desses resíduos fosse diferente das que foram encontradas.

Assim é possível concluir que todos os aglomerantes estudados apresentam coerência com os estudos internacionais e regionais realizados com esses materiais. Percebe-se uma maior coerência da substituição da cal hidratada por resíduo de mármore, uma vez que os dois apresentam características químicas e mineralógicas

muito próximas, além de apresentarem semelhanças granulométricas, fato que não ocorre com a argila. Entretanto, é necessário destacar que, em termos de plasticidade, a argila apresenta grande semelhança com a cal hidratada, enquanto o calcário não apresenta plasticidade. Uma solução que combine os dois materiais para substituir a cal hidratada pode ser a solução técnica mais viável, fato que será analisado com os parâmetros tecnológicos dos traços de argamassa estudados, conforme a sequência do texto.

## 4.2. Parâmetros tecnológicos das argamassas

### 4.2.1. Ensaio de consistência (*flow table*)

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os resultados obtidos para os principais parâmetros tecnológicos das argamassas estudadas nesta pesquisa, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

Os resultados indicados nas Tabelas 4.3 e 4.4 correspondem ao valor de abatimento da mesa de consistência de  $260 \pm 5$  mm, uma vez que esse é o valor que a NBR 13276 (ABNT, 2016) estipula como padrão para argamassas mistas de múltiplo uso. O procedimento utilizado para realização do ensaio também seguiu a referida norma.

Analisando os resultados obtidos para os índices de consistência dos traços TR00, TR01 e TR02, que representam o traço de referência com cal hidratada, o traço com 100% de substituição por argila e o traço com 100% de substituição por calcário, respectivamente, é possível concluir que o aglomerante que necessita de menores quantidades de água para manter-se na faixa de trabalhabilidade recomendada pela norma brasileira é o resíduo de mármore (TR02). Isso é evidenciado pela relação de água/materiais secos, que para o referido traço é de 0,170, abaixo do traço de referência que vale 0,188. É possível notar que o TR01 apresentou o maior valor de relação água/materiais secos, valendo 0,208. Esse fato já era esperado, porque conforme destacado nos resultados de caracterização física dos aglomerantes estudados a argila foi o material que apresentou as partículas mais grosseiras, demandando maior teor de água para manter o índice de consistência em  $260 \pm 5$  mm.

Tabela 4.3 – Principais parâmetros tecnológicos das argamassas estudadas.

Parâmetro	TR00	TR01	TR02	SXac	SXah	SXch	SXach
Relação água/materiais secos	0,188	0,208	0,170	0,197	0,194	0,171	0,188
Índice de consistência (mm)	260±5						
Densidade no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	1886	1958	1983,3	1961	1934	1977,8	1978,8
Teor de ar incorporado (%)	8,11	4,84	8,93	7,12	6,87	8,55	6,34
Retenção de água (%)	92,49	96,31	92,66	94,12	93,57	92,21	89,35
Densidade no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	1827	1696	1838	1869	1897	1853	1869
Resistência à tração na flexão (MPa)	1,41	1,16	1,49	1,33	1,39	1,45	1,52
Resistência à compressão em CP prismático (MPa)	4,35	4,22	4,59	4,68	4,46	4,60	5,19
Resistência à compressão em CP cilíndrico (MPa)	4,27	2,35	5,09	3,74	-	-	-
Módulo de elasticidade teórico (GPa)	11,82	10,74	14,98	9,15	7,14	12,15	12,13
Coefficiente de Capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	13,88	12,67	12,53	9,42	7,03	12,37	7,07
Absorção de água por capilaridade aos 90 minutos (g/cm <sup>2</sup> )	1,72	1,34	1,40	1,11	0,83	1,36	0,88
Absorção de água por imersão (%)	15,30	17,60	14,08	14,02	15,87	13,52	14,92
Índice de vazios (%)	26,88	30,07	25,90	25,64	27,52	24,84	26,27
Resistência de aderência (MPa)	0,321	0,318	0,218	0,312	0,306	0,228	0,243

Tabela 4.4 – Principais parâmetros tecnológicos das argamassas estudadas.

Parâmetro	EST1:1	EST1:2	EST2:1	EST1:3	EST3:1	EST2:3	EST3:2
Relação água/materiais secos	0,198	0,200	0,185	0,200	0,177	0,194	0,186
Índice de consistência (mm)	260±5						
Densidade no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	1974,1	1977,2	1973	1968	1965,3	1970,3	1979
Teor de ar incorporado (%)	5,91	5,29	7,01	5,03	6,93	5,94	6,54
Retenção de água (%)	94,73	95,81	93,81	96,13	93,27	95,03	94,10
Densidade no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	1713	1650	1737	1636	1811	1689	1651
Resistência à tração na flexão (MPa)	1,3	1,15	1,23	1,10	1,32	1,22	0,81
Resistência à compressão em CP prismático (MPa)	4,87	3,77	4,05	3,58	4,05	4,47	2,84
Coefficiente de Capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	11,5	11,4	10,2	11,1	10,77	9,03	12,2
Absorção de água por capilaridade aos 90 minutos (g/cm <sup>2</sup> )	1,38	1,36	1,22	1,37	1,11	1,01	1,26
Absorção de água por imersão (%)	15,88	16,56	13,96	16,07	13,76	16,10	16,00
Índice de vazios (%)	27,57	28,06	25,59	27,71	24,71	27,97	27,71

Entre os traços SX, os que apresentaram maiores valores de teor de água/material seco foram os dois traços que tinham em sua composição argila (SXac e SXah), apresentando valores de teor de água superiores ao traço de referência TR00 e ao traço apenas com calcário TR02, porém apresentando valores inferiores ao traço com apenas argila (TR01), demonstrando que os resultados apresentam coerência, uma vez que esses traços apresentam menores teores de argila que o TR01. A escala do menor teor de água para o maior teor de água é destacada a seguir: TR01 – SXch – TR00, SXach – SXah – SXac – TR02.

Analisando os traços EST, e colocando-os em uma escala de menor para os maiores teores de água/material seco obtém-se: EST3:1 – EST2:1 – EST3:2 – TR00 – EST2:3 – EST1:1 – EST1:2, EST1:3. Conforme é possível observar, o traço que apresentou menores teores de água é o EST3:1, que é o traço com os menores teores em massa de argila entre os traços EST estudados. O oposto também é verificado, os traços com maiores teores de água são os EST1:2 e EST1:3, justamente os que apresentam maiores quantidades de argila em sua composição.

Vale ressaltar que não se deve concluir que uma argamassa é mais ou menos trabalhável apenas com base no teor de água que determinada proporção utiliza para se adequar a um índice de consistência. Uma explicação para isso é realizada a seguir: analisando apenas o que acontece com os traços TR01 (100% argila) e TR02 (100% resíduo de mármore). Para manter o índice de consistência de  $260 \pm 5$  mm, o que proporcionaria as mesmas características de trabalhabilidade, o traço TR01 necessitou de maiores quantidades de água, o que altera a relação água/cimento e pode prejudicar as características de resistência mecânica. Entretanto, se ambas argamassas apresentaram o mesmo comportamento nas propriedades mecânicas, isso indica que o fato de TR01 precisar de mais água não prejudica no desempenho dessa argamassa, uma vez que nenhuma propriedade foi alterada.

Na bibliografia, inclusive, é possível obter o comportamento oposto, ou seja, em algumas pesquisas foram obtidas argamassas com propriedades tecnológicas melhores mesmo com o uso de maiores teores de água. Isso quer dizer que apenas o parâmetro de teor de água em argamassas não é conclusivo para identificar se uma argamassa será ou não mais viável que a outra, e mesmo que apresente um bom entendimento da trabalhabilidade dos materiais empregados, esse teor de água não deve ser considerado como medida absoluta para trabalhabilidade das argamassas, principalmente porque as argamassas apresentam o mesmo índice de consistência. Sendo assim, ensaios adicionais, como o do *squeeze flow*, devem ser realizados a fim de melhorar as discussões e as conclusões sobre trabalhabilidade de argamassas.

Destaca-se ainda que, caso o teor de água/material seco fosse tomado como única medida de trabalhabilidade, as argamassas com teores menores de água do que o traço TR00 seriam classificadas como satisfatórias, enquanto as demais proporções seriam descartadas. Assim, os traços TR01, SXch, EST3:1, EST2:1 e

EST3:2 seriam validados, enquanto os demais seriam considerados como inadequados por apresentarem piores parâmetros de trabalhabilidade.

É interessante comparar os valores de teor de água/material seco para o traço de referência obtidos nesta dissertação com os de outros pesquisadores já destacados nas Tabelas 2.4 e 2.5. Nessas tabelas observa-se que Silva *et al.* (2011) e Mattana *et al.* (2012) obtiveram em suas pesquisas uma relação de 0,240 e 0,230 para 270 mm de índice de consistência, enquanto Kazmierczak *et al.* (2016) obtiveram 0,198 para um índice de 260±5mm e Gomes e Neves (2002) obtiveram 0,180 para um índice de 254mm. Conclui-se que o valor de 0,188 é coerente para um índice de 260±5mm obtido para o traço de referência, o que valida os valores obtidos para os demais traços estudados na pesquisa por apresentarem resultados próximos.

#### 4.2.2. Squeeze Flow

O procedimento para realização do ensaio de squeeze flow seguiu as recomendações da NBR 15839 (ANBT, 2010), que apresenta os detalhes da realização desse ensaio.

As Figuras 4.3 e 4.4 indicam as curvas de carga x deslocamento obtidos no ensaio citado para as proporções utilizadas nesta pesquisa, de acordo com as duas velocidades de carregamento: 0,1 mm/s, nomeada como velocidade lenta, e 3mm/s, nomeada como velocidade rápida.

Tomando como base o gráfico típico apresentado por Azevedo *et al.* (2017) na Figura 3.4 e iniciando a análise pela Figura 4.3, que destaca os traços estudados na velocidade mais lenta, é possível concluir que todos os traços de argamassa estudadas apresentam pequena região I, que é praticamente desprezível em comparação com as regiões II e III para as proporções analisadas. É impossível definir visualmente as regiões II e III dos traços em estudo, porém é fácil perceber que as curvas mais à esquerda, próximas do eixo de referência Y apresentam a região II com maior predominância, enquanto as argamassas que apresentam sua curva mais à direita, afastadas do eixo Y, apresentam maior predominância na região III.

Sabe-se que argamassas com maior predominância da curva carga x deslocamento na região II apresentam melhores parâmetros de trabalhabilidade do

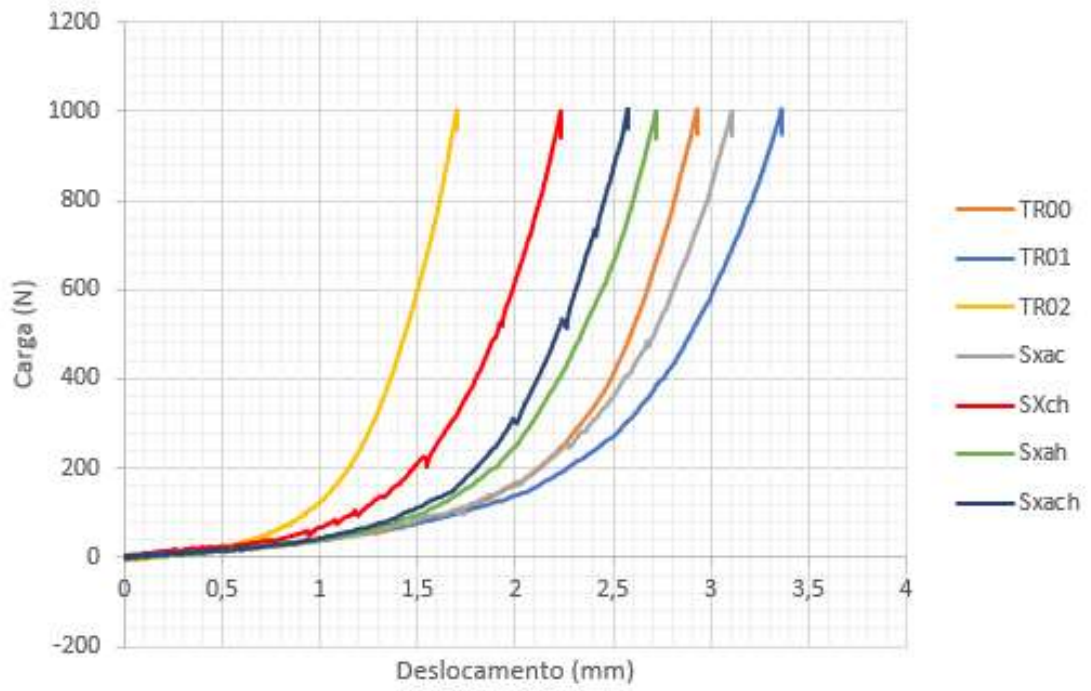


que argamassas cujas curvas predominam na região III. Através da Figura 4.3 (a) comprova-se que o traço com melhor trabalhabilidade é o TR02, enquanto o que apresenta piores parâmetros é o TR01. Fazendo uma escala crescente de trabalhabilidade obtém-se: TR01 – SXac – TR00 – SXah – SXach – SXch – TR02. Segundo esse critério, os traços com pior trabalhabilidade que o de referência (TR00) são as proporções SXac e TR01. Relembrando a análise realizada com o *flow table* é possível perceber que nesse conjunto de traços os únicos que apresentavam melhores “trabalhabilidade” que o de referência eram SXch e TR02.

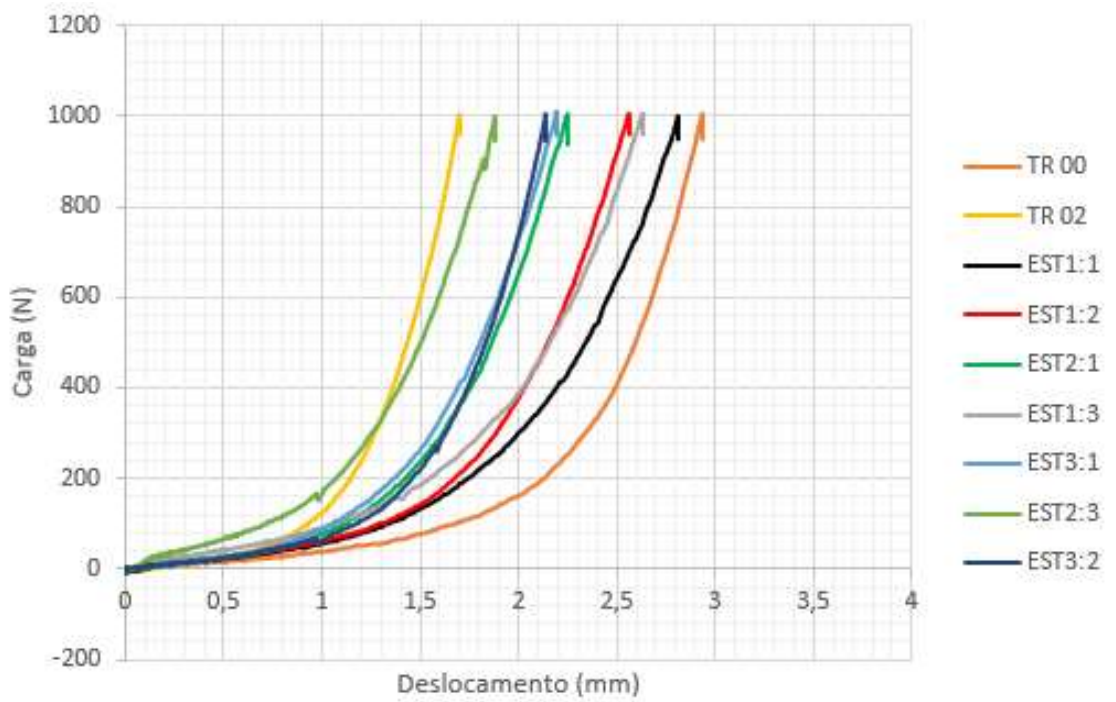
A Figura 4.3 (b) indica os traços EST, além de demonstrar o traço TR00 (referência) e o TR02, que apresentou melhor trabalhabilidade entre todas as proporções estudadas. Como é possível concluir pela análise do gráfico, todas as proporções de traço EST estudadas apresentaram melhor comportamento à trabalhabilidade do que os traço de referência, enquanto na análise pelo *flow table* apenas as proporções EST3:1, EST2:1 e EST3:2 obtiveram essa característica.

Analisando a velocidade rápida, indicada na Figura 4.4 (a) e (b), observa-se que nessa velocidade a discrepância entre o comportamento de trabalhabilidade das argamassas estudadas é maior. O traço TR02 passa a apresentar trabalhabilidade acentuadamente maior do que as outras proporções, enquanto o traço TR01 apresenta características de trabalhabilidade piores. Em função disso, percebe-se que a argamassa contendo apenas argila deve ser desencorajada do ponto de vista da trabalhabilidade, porque seu gráfico fica muito discrepante em relação as demais proporções, conforme Figura 4.4 (a). Esse comportamento provocado pela incorporação de argila pode ser atribuído a granulometria do material que, conforme destacado na Figura 4.1, foi muito discrepante em relação a cal hidratada e ao resíduo de mármore. As demais proporções podem ser utilizadas sem prejuízo das propriedades de trabalhabilidade.

Sobre a Figura 4.4 (b) observa-se que as proporções EST3-1, EST3-2 e EST2-1 apresentaram comportamento de trabalhabilidade superior ao traço de referência, resultado equivalente ao encontrado pelo ensaio de *flow table*.

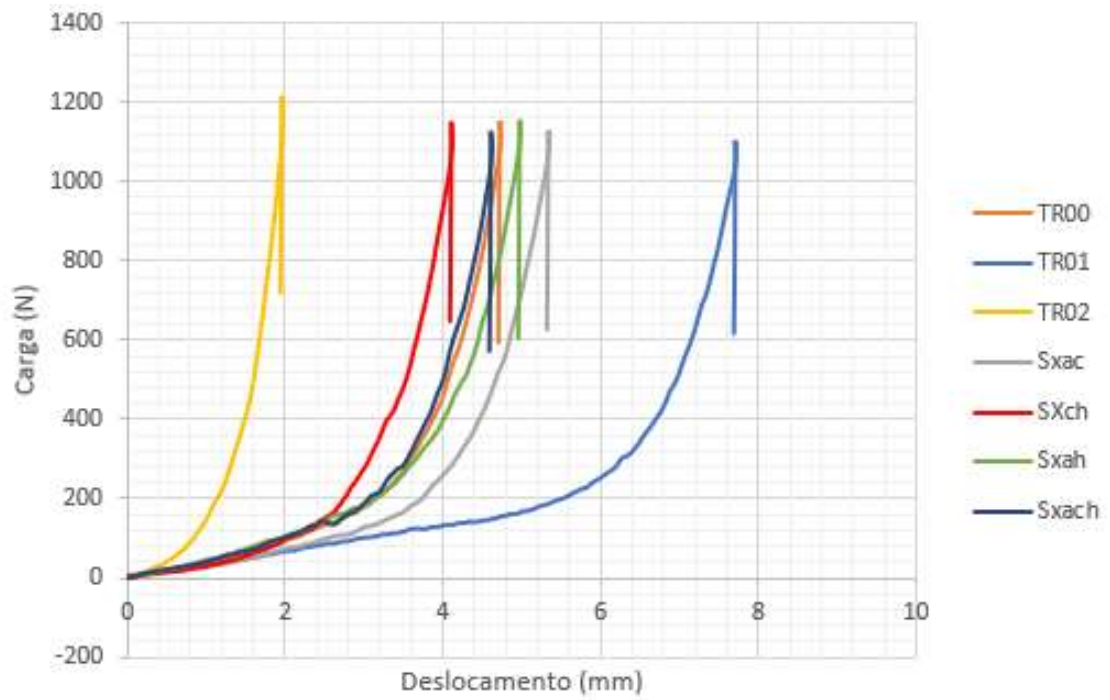


(a)

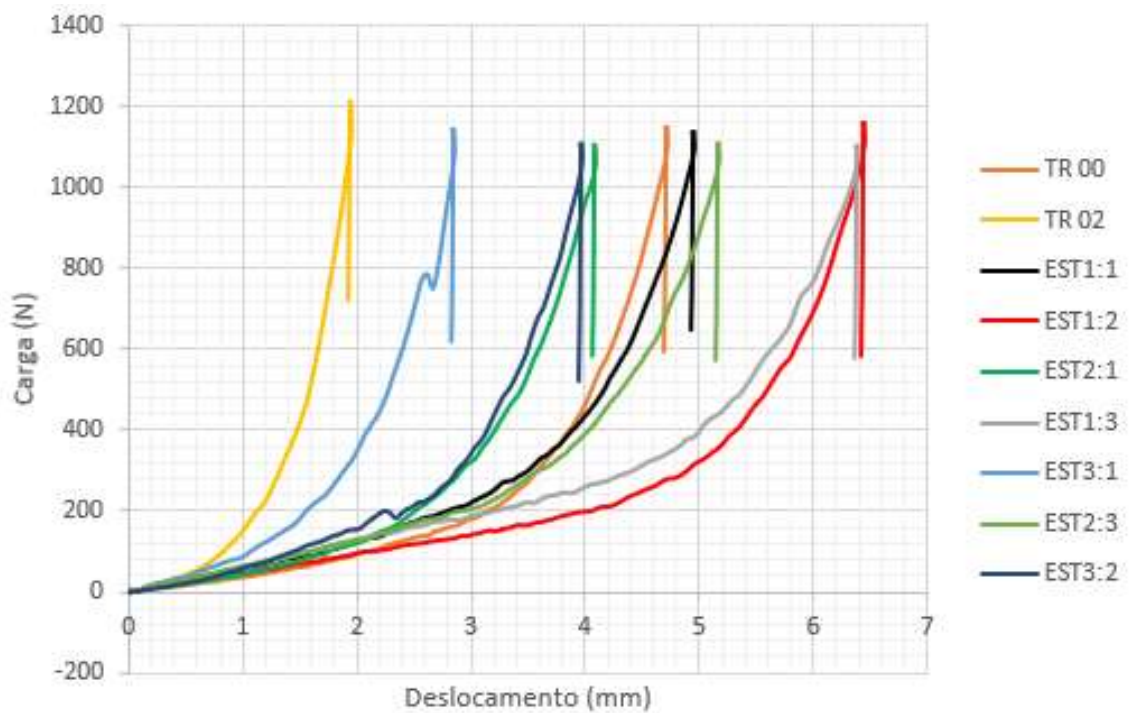


(b)

Figura 4.3 – Curva carga x deslocamento velocidade lenta (0,1mm/s) para (a) traços REF e SX e (b) traços EST.



(a)



(b)

Figura 4.4 – Curva carga x deslocamento velocidade rápida (3mm/s) para (a) traços REF e SX e (b) traços EST.

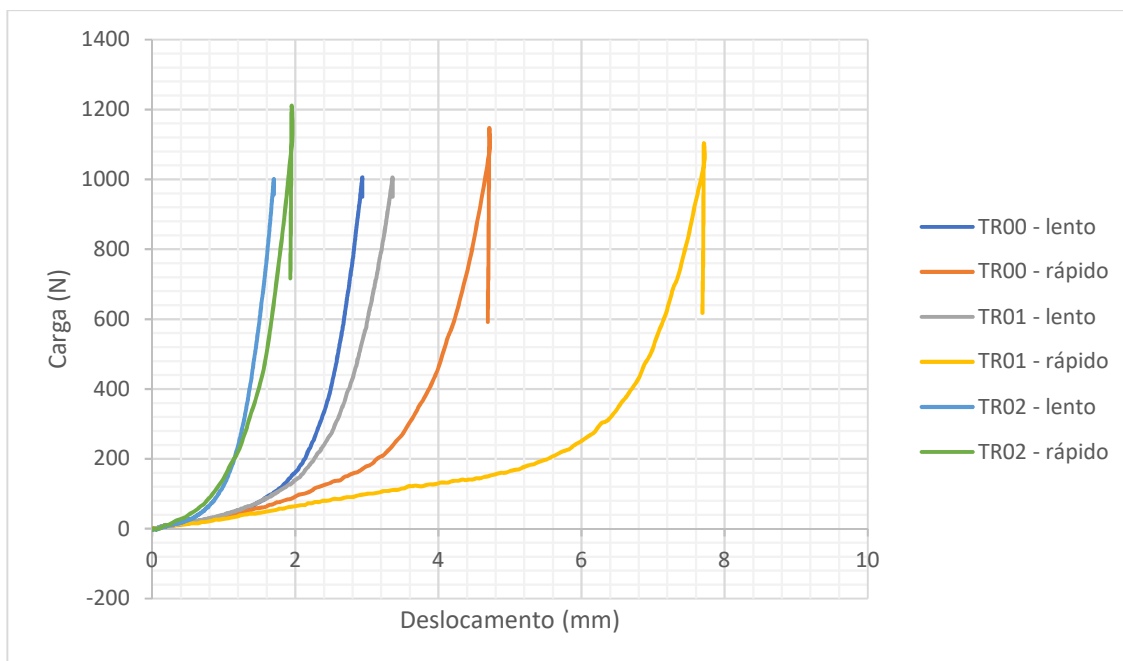


Figura 4.5 – Curva carga x deslocamento comparando a velocidade lenta e rápida para os traços TR00, TR01 e TR02.

Conclui-se que a análise de trabalhabilidade considerando a velocidade mais rápida é mais interessante para descrever o comportamento de argamassas de múltiplo uso em decorrência dos dois motivos citados a seguir: (i) a maior velocidade na execução do ensaio leva a um critério mais restritivo, uma vez que menos argamassas são validadas quando contrastadas ao traço de referência; sabendo que a velocidade de aplicação de argamassas em canteiros de obra é extremamente variável, mudando em função do operador, das condições climáticas, da hora do dia e de inúmeras outras variáveis, é sempre mais interessante considerar na análise o critério mais conservador obtido com 3mm/s de velocidade; (ii) fazendo uma comparação dos resultados obtidos entre o ensaio de consistência pela mesa de abatimento com os resultados encontrados pelo *squeeze flow*, comprova-se uma maior correlação obtida com o emprego da maior velocidade, o que é fundamental uma vez que na maioria dos estudos de argamassas apenas o *flow table* é realizado. A Figura 4.5 indica os gráficos obtidos para as duas velocidades estudadas, com os traços TR00, TR01 e TR02, destacando a análise realizada no texto acima.

A melhoria nas propriedades de trabalhabilidade em decorrência da incorporação do resíduo de mármore também foi obtida no trabalho de Vardhan *et al.* (2015), em que os autores destacam que em função do processo industrial que origina

o material, envolvendo laminação das chapas, é conferido ao resíduo maior superfície específica, com grãos mais arredondados e uniformes, gerando menor atrito interno nas argamassas, que auxiliará na propriedade descrita.

Em função do que foi apresentado nos ensaios de *flow table* e de *squeeze flow*, comprova-se que argamassas com altos teores de argila devem ser evitadas, entretanto proporções contendo mistura de argila com resíduo de mármore são soluções viáveis. As proporções TR00, TR02, SXac, SXah, SXch, SXach, EST2-1, EST3-1 e EST3-2 são consideradas satisfatórias através da análise de parâmetros de trabalhabilidade, enquanto as demais não.

#### 4.2.3. Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado

Os resultados desse ensaio, realizado de acordo com os procedimentos da NBR 13278 (ABNT, 2005) foram indicados nas Tabelas 4.3 e 4.4. Os cálculos foram realizados com a aplicação das expressões (03), (04) e (05).

Analisando a densidade de massa no estado fresco para apenas os traços TR, verifica-se que o traço com menor densidade foi o TR00 (referência) com 1886,0 kg/m<sup>3</sup>, enquanto o traço com maior densidade foi o TR02 (resíduo) com 1983,3 kg/m<sup>3</sup>, refletindo a tendência encontrada para a massa específica dos aglomerantes citados, em que o resíduo de mármore apresentou massa específica de 2,75 g/cm<sup>3</sup> e a cal hidratada de 2,37 g/cm<sup>3</sup>.

De uma forma geral, pode-se considerar que a substituição da cal hidratada pelo resíduo de mármore e argila provocou aumento na densidade de massa no estado fresco das argamassas avaliadas. Esse aumento ficou em torno de 4 a 5% e não representa prejuízos significativos nessa propriedade, que apresenta baixa importância no desempenho das argamassas conforme citado por Mattana *et al.* (2012). De qualquer maneira, a análise hierárquica de pesos estipulada pelos referidos autores irá determinar o nível de significância dessa propriedade das argamassas avaliadas.

Verificando os resultados obtidos pela bibliografia internacional, destacadas nas Tabelas 4.3 e 4.4, percebe-se que os valores de densidade no estado fresco ficam em torno de 2000 kg/m<sup>3</sup>, com exceção do trabalho de Palomar *et al.* (2015) e Palomar

e Barluenga (2017), que obtiveram 1630 kg/m<sup>3</sup>, justificado pelo fato dos autores terem utilizado argila expansiva como agregado miúdo. Observa-se que os valores alcançados neste trabalho apresentam coerência com os valores obtidos pelos autores pesquisados, inclusive sendo obtidos densidades menores, o que é vantajoso.

A mesma conclusão é obtida ao analisar o trabalho de Gomes e Neves (2002), que focou em argamassas com incorporação de argilominerais, presente na Tabela 4.14. Os valores encontrados pelos autores ficaram na faixa de 1750-1850 kg/m<sup>3</sup>, próximos aos obtidos nesta dissertação.

Analisando o teor de ar incorporado dos traços TR e SX percebe-se que o traço TR01 apresenta o menor índice, com 4,84%, e o traço TR02 apresenta o maior teor de ar incorporado, sendo 8,93%. Avaliando os traços SXah e SXch, com ar incorporado de 6,87% e 8,55%, e o traço de referência com 8,11% é possível concluir que à medida que se substitui a cal hidratada por resíduo de mármore ocorre aumento no teor de ar incorporado, enquanto à medida que se substitui por argila ocorre redução nessa propriedade. Esse fato é coerente com o que foi verificado nos ensaios de trabalhabilidade da argamassa, em que a incorporação do resíduo auxiliou na melhoria da trabalhabilidade e a incorporação da argila prejudicou essa propriedade. Comprova-se a teoria apresentada por Mattana *et al.* (2012), de que argamassas com maior teor de ar incorporado apresentam melhor trabalhabilidade.

Comparando os valores com a bibliografia internacional apresentadas nas Tabelas 2.4 e 2.5, observa-se que as argamassas estudadas apresentam teores de ar incorporado acima dos teores obtidos pelos autores, que foram entre 1% e 5%. Isso indica que as argamassas analisadas nesta dissertação, em teoria, apresentam melhores parâmetros de trabalhabilidade do que as argamassas estudadas pelos outros autores. Porém, devem ser verificadas as propriedades de resistência, uma vez que conforme destacam Mattana *et al.* (2012), argamassas com altos teores de ar incorporado em geral apresentam baixas resistências mecânica, ainda que apresente bons índices de trabalhabilidade. Essa análise deve ser realizada com maior atenção principalmente para os traços que contem grandes teores de resíduo de mármore, como TR02, SXac, SXch, EST2-1 e EST3-1, já que esses são os traços com maiores teores de ar incorporado.

#### 4.2.4. Retenção de água

O ensaio de retenção de água foi realizado seguindo a metodologia presente na NBR 13277 (ABNT, 2005). Os resultados calculados pelas expressões (06) e (07) encontram-se nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Observa-se que os traços contendo em sua composição maiores teores de argila apresentaram melhorias na retenção de água quando comparadas ao traço TR00, que apresentou 92,49%. Exemplificando esse fato, destacam-se os traços TR02 com 96,31%, SXac com 94,12%, SXah com 94,12%, EST1-3 com 96,13%, EST1-2 com 95,81% e EST2-3 com 95,03%. Os traços contendo resíduo de mármore praticamente mantiveram os teores de retenção em relação ao traço TR00, conforme observa-se com TR02 e SXch, com 92,66% e 92,21%, respectivamente.

Uma explicação possível para a melhoria provocada pelas argamassas com argila é atribuída ao fato da argila apresentar atividade superficial em decorrência dos argilominerais que o compõe, o que faz com que esse material apresente atração elétrica às partículas de água (BERTHONNEAU *ET AL.*, 2017; TAN *ET AL.*, 2017). E função disso, a maior retenção de água foi obtida com a proporção que apresentava apenas argila em sua composição.

De uma maneira geral, pode-se considerar que todas as proporções estudadas apresentaram excelentes parâmetros de retenção de água. Essa propriedade é de suma importância, uma vez que argamassas que não apresentam retenção de água, usualmente perdem muita água para o substrato sobre o qual estão aplicadas, causando problemas na resistência da argamassa por falta de água para hidratação do cimento. Em função disso, o traço SXach não é recomendável para aplicação em argamassas de múltiplo uso, uma vez o teor de retenção de 89,35% é muito abaixo do TR00, sendo a única proporção abaixo de 92%.

Comparando os valores obtidos de retenção de água com os estudos apresentados resumidamente nas Tabelas 2.4 e 2.5, percebe-se que os materiais utilizados nesta pesquisa apresentaram comportamento muito superior aos estudados por Silva *et al.* (2011) e Mattana *et al.* (2012), que apresentaram retenção de água de 46,22% e 64,03%. Destaca-se que os referidos autores utilizaram o mesmo traço de referência utilizado nesta dissertação, na proporção 1:1:6 com cimento CP-II, cal CH-

III e areia natural e de britagem como agregados, ambos com  $D_{max}=2,4mm$ . Mesmo utilizando a mesma composição básica, o traço TR00 e os demais analisados nesta pesquisa, apresentaram retenção de água mais satisfatória, embora não se possa apresentar uma justificativa plausível para isso uma vez que não se conhece os detalhes da pesquisa realizada por Silva *et al.* (2011) e Mattana *et al.* (2012).

Os demais trabalhos presentes nas Tabelas 2.4 e 2.5, Kazmierczak *et al.* (2016) e Gomes e Neves (2002), apresentaram teores de 97% e 91% para retenção de água da argamassa de referência, respectivamente. Destaca-se que essa faixa de valores apresenta coerência com as porcentagens encontradas nesta dissertação.

Analisando com maior detalhe os resultados encontrados para Gomes e Neves (2002) baseando-se apenas nos traços que continham em sua composição materiais argilosos, sem apresentar cal hidratada, presentes na Tabela 2.14, percebe-se que a retenção de água encontrada pelos autores variou entre 62 a 91%, apresentando grande discrepância de resultados. Portanto, o fato dos valores obtidos para argamassas estudadas ficarem na faixa de 89,35% e 96,31% é benéfico, porque além de apresentarem maiores teores de retenção de água, indicam uma menor variação entre as proporções estudadas, indicando que, nesse critério, os três materiais estudados apresentaram excelente desempenho.

#### 4.2.5. Densidade de massa no estado endurecido

O ensaio densidade de massa no estado endurecido foi realizado seguindo a metodologia presente na NBR 13280 (ABNT, 2005). Os resultados encontrados com a aplicação das expressões (08) e (09) foram destacados nas Tabelas 4.3 e 4.4. Por se tratar de um parâmetro no estado endurecido foram realizados o tratamento dos dados com análise de variância considerando um delineamento inteiramente casualizado (DIC) realizado com 95% de nível de confiança ( $p \leq 0,05$ ), com posterior contrastes de médias pelo teste de Tukey.

A Tabela 4.5 apresenta a ANOVA para o parâmetro densidade de massa no estado endurecido, enquanto a Tabela 4.6 apresenta o teste de Tukey para o mesmo parâmetro. Para a ANOVA foram utilizadas 4 repetições, correspondente a quantidade de corpos de prova, e 14 tratamentos, correspondendo à soma dos traços TR, SX e



EST. Assim são obtidas 56 unidades experimentais. Os valores de  $F_{tab}$  e  $q_{tab}$  para o cálculo do DMS são indicados no Anexo I.

Tabela 4.5 – ANOVA para DIC da densidade de massa no estado endurecido ( $p \leq 0,05$ ).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamentos	13	0,53732113	0,04133239	35,5549057	1,97*
Resíduo	42	0,04882478	0,00116249	-	-
Total	55	0,58614591	-	-	-
CV (%)				1,91	

Tabela 4.6 – Teste de Tukey para contraste de médias da densidade de massa no estado endurecido ( $p \leq 0,05$ ).

Tratamento	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Tukey
EST1-3	1,636	A
EST1-2	1,65	A
EST3-2	1,651	A
EST2-3	1,689	AB
TR01	1,696	AB
EST1-1	1,713	AB
EST2-1	1,737	BC
EST3-1	1,811	CD
TR00	1,827	D
TR02	1,838	D
SXch	1,853	D
Sxac	1,869	D
Sxah	1,897	D
Sxach	1,898	D
DMS		0,086

Analisando os resultados obtidos nas Tabelas 4.5 e 4.6 é possível verificar que os traços estudados apresentam diferença estatística, o que quer dizer que entre os 14 traços analisados, pelo menos dois são diferenciados. Um importante ponto a ser lembrado é que o coeficiente de variação para o ensaio foi de 1,91%, o que representa que os resultados obtidos são altamente confiáveis.

Para fazer a diferenciação utilizou-se o teste de Tukey, onde foi possível concluir que os traços com menores densidades são o EST1-3, EST1-2, EST3-2, EST2-3, TR01 e EST1-1, com densidade variando entre 1637 kg/m<sup>3</sup> até 1713 kg/m<sup>3</sup>. O teste de Tukey comprova estatisticamente que a utilização de altos teores de argila na argamassa provocou redução da densidade de massa no estado endurecido,

quando se compara com o traço de referência e com os demais traços contendo cal hidratada.

Sobre os traços com maiores valores de densidade, que com base na análise proposta são as proporções EST3-1, TR00, TR02, SXch, SXac, SXah e SXach identifica-se que os traços com resíduo de calcário e com cal hidratada predominaram, complementando a informação destacada no parágrafo anterior.

Essa tendência pode ser justificada pelo fato de a argila apresentar as partículas mais grosseiras entre os materiais analisados. Em função disso, as argamassas com maiores teores de argila apresentam maior teor de vazios o que provoca redução na densidade das argamassas (MATTANA *et al.*, 2012). Essa correlação entre as duas propriedades será avaliada na sequência do texto.

A mesma conclusão é encontrada por Gomes e Neves (2002) que obteve densidade de massa no estado endurecido de  $1790 \text{ kg/m}^3$  para seu traço de referência e cerca de  $1650 \text{ kg/m}^3$  para os traços em que os autores utilizaram materiais argilosos, conforme Tabela 2.14. A conclusão encontrada nessa pesquisa sobre a densidade de massa pode também ser estendida à pesquisa de Gomes e Neves (2002), fundamentando-a melhor. Pode ser realizada uma comparação com o trabalho de Andres *et al.* (2016) que também realizaram estudos com argamassas de argila, obtendo densidade de  $1572 \text{ kg/m}^3$  e  $1700 \text{ kg/m}^3$ , o que evidencia novamente o que foi discutido anteriormente.

É importante que argamassas apresentem baixos valores de densidade por dois motivos: primeiro porque argamassas com menores valores de densidade contribuem de forma menos significativa para o peso próprio das edificações, o que é vantajoso do ponto de vista estrutural, e segundo porque quanto menor for a densidade de uma argamassa no estado endurecido, maior será o seu rendimento na hora da aplicação, conforme destacaram Mattana *et al.* (2012). Porém deve-se avaliar o índice de vazios para o material, conforme destacado.

Comparando os valores encontrados nesta dissertação, que variaram entre  $1636 \text{ kg/m}^3$  até  $1922 \text{ kg/m}^3$  com os obtidos por outros pesquisadores analisados, presentes nas Tabelas 2.4 e 2.5, verifica-se que os resultados encontrados se mostram satisfatórios, uma vez que a maioria dos autores obteve densidade por volta de  $1800 \text{ kg/m}^3$ . A exceção foi a pesquisa de Palomar *et al.* (2015) e Palomar e

Barluerga (2017) em que as densidades encontradas ficaram bem abaixo dos encontrados nesta pesquisa, mas esse fato é justificado uma vez que os referidos autores utilizaram argila expandida como agregado miúdo.

#### 4.2.6. Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado seguindo o procedimento presente na NBR 13279 (ABNT, 2005) e utilizando uma prensa universal de ensaios. Os cálculos foram realizados aplicando a expressão (10) e os resultados já foram indicados nas Tabelas 4.3 e 4.4. A seguir é apresentada a ANOVA e o Teste de Tukey para esse parâmetro, indicados, respectivamente, nas Tabelas 4.7 e 4.8. Salienta-se que foram utilizados 5 CP's para cada proporção, portanto foram realizadas 5 repetições, e que foram utilizados 14 traços diferentes, totalizando 70 unidades experimentais.

Tabela 4.7 – ANOVA para DIC da resistência à tração na flexão ( $p \leq 0,05$ ).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamentos	13	2,4552154	0,1888627	7,6109802	1,89*
Resíduo	56	1,3896124	0,0248145	-	-
Total	69	3,8448279	-	-	-
CV (%)				12,18	

Tabela 4.8 – Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à tração na flexão ( $p \leq 0,05$ ).

Tratamento	Média (MPa)	Tukey
SXach	1,52	A
TR02	1,49	AB
SXch	1,45	AB
TR00	1,41	ABC
SXah	1,39	ABC
Sxac	1,33	ABC
EST3-1	1,32	ABC
EST1-1	1,3	ABC
EST2-1	1,23	ABC
EST2-3	1,22	ABC
TR01	1,16	BCD
EST1-2	1,15	BCD
EST1-3	1,1	CD
EST3-2	0,81	D
DMS		0,348

Observando a Tabela 4.7 comprova-se que ao menos duas médias das resistências analisadas para as argamassas diferem estatisticamente entre si. Conforme é possível conferir pelo teste de Tukey na Tabela 4.8, existem realmente médias diferentes entre si. Com base nesse teste os traços podem ser divididos em dois grupos: um primeiro que apresentou os melhores parâmetros de resistência representados pela letra A, ao qual fazem parte SXach, TR02, SXch, TR00, SXah, SXac, EST3-1, EST1-1, EST2-1 e EST2-3 e um segundo grupo com os piores parâmetros representados pela letra D, correspondente às argamassas TR01, EST1-2, EST1-3 e EST3-2.

Com base no teste de Tukey, existem evidências estatísticas para afirmar que a substituição da cal hidratada pela argila provoca prejuízo nas propriedades de resistência à tração na flexão das argamassas, portanto, a substituição total é desencorajada. Porém a substituição de teores por volta de 50% de argila é possível, conforme observado nos traços SXah, EST3-1 e EST2-1, já que não houve diferença estatística em relação ao traço de referência. Esse fato pode ser justificado pela granulometria da argila que, conforme já abordado anteriormente, é mais grosseira que os demais aglomerantes e tende a provocar na argamassa maior teor de vazios.

Não existem evidências estatísticas de que a substituição de cal hidratada por resíduo de mármore provoca mudanças nas propriedades de resistência à tração na flexão, conforme comprovado pelo teste de Tukey.

Analisando os valores encontrados na bibliografia destaca-se: Silva *et al.* (2011) e Mattana *et al.* (2012) encontraram 0,78 e 1,07 MPa, enquanto Kazmierczak *et al.* (2016) obtiveram 0,80 (MPa) e Gomes e Neves (2002) com 0,69 MPa para suas argamassas de referência. Palomar *et al.* (2015) e Palomar e Barluenga (2017) obtiveram valores variando entre 1,59 a 2,22 MPa, enquanto Palomar e Barluenga (2018) obtiveram 2,34 MPa. Assim, com exceção de alguns traços estudados por Palomar *et al.* (2015), Palomar e Barluenga (2017) e Palomar e Barluenga (2018), os valores encontrados nesta dissertação, que variaram entre 0,81 a 1,52 MPa mostraram-se compatíveis com as demais pesquisas analisadas. A dispersão dos resultados é fato já conhecido para as propriedades no estado endurecido, conforme destacado por Mattana *et al.* (2012). Essa informação pode ser comprovada pelo CV de 12,18% obtido no ensaio, representando média variação experimental.

Analisando os resultados para as argamassas com materiais argilosos estudados por Gomes e Neves (2002), verifica-se que os valores encontrados ficaram na faixa de 0,50 a 0,88 MPa, enquanto Andres *et al.* (2016) encontraram 0,50 e 0,80 MPa para argamassas com dois tipos diferentes de argila. Isso comprova que argamassas com materiais argilosos apresentam baixa resistência à tração na flexão. Essa característica não deve ser vista apenas como um fator negativo, pois argamassas com baixa resistência à tração apresentam menores módulos de elasticidade, auxiliando na capacidade de absorver deformações.

#### 4.2.7. Resistência à compressão em CP prismático

O ensaio de resistência à compressão foi realizado seguindo o procedimento presente na NBR 13279 (ABNT, 2005), sendo que os parâmetros de resistência foram obtidos com aplicação da expressão (11). Os valores obtidos encontram-se nas Tabelas 4.3 e 4.4, juntos às demais propriedades encontradas para as argamassas em estudo.

De forma similar à análise realizada para resistência à tração na flexão, foram utilizadas 5 repetições para 14 traços diferentes, totalizando 70 unidades experimentais. Os dados obtidos para ANOVA e Tukey estão indicados nas Tabelas 4.9 e 4.10, respectivamente.

Tabela 4.9 – ANOVA para DIC da resistência à compressão em CP prismático ( $p \leq 0,05$ ).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamentos	13	24,044624	1,8495865	9,6075269	1,89*
Resíduo	56	10,780802	0,1925143	-	-
Total	69	34,825426	-	-	-
CV (%)				10,29	

Conforme Tabelas 4.9 e 4.10, à análise dos resultados por ANOVA indica que os tratamentos realizados foram estatisticamente significativos, e o teste de Tukey demonstrou que os traços com melhores parâmetros à compressão foram os SXach, SXac, SXch, TR02, EST2-3, SXah e TR00 representados pela letra A, não apresentando diferença estatística e podendo ser considerados iguais. Já os traços com piores resultados, identificados pela letra E, foram TR01, EST1-2, EST1-3 e

EST3-2. Além disso, o coeficiente de variação de 10,29% indica que o ensaio apresentou média variação dos resultados.

Tabela 4.10 – Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à compressão em CP prismático ( $p \leq 0,05$ ).

Tratamento	Média (MPa)	Tukey
SXach	5,19	A
SXac	4,68	ABC
SXch	4,6	ABC
TR02	4,59	ABC
EST2-3	4,47	ABCD
SXah	4,46	ABCD
TR00	4,35	ABCD
EST1-1	4,17	BCD
EST2-1	4,05	BCD
EST3-1	4,05	BCD
TR01	3,80	CDE
EST1-2	3,77	CDE
EST1-3	3,58	DE
EST3-2	2,84	E
DMS		0,969

Os traços problemáticos TR01, EST1-2, EST1-3 e EST3-2, são praticamente os mesmos que apresentaram menores parâmetros de resistência à tração na flexão, e mesmo tendo alcançado em geral bons parâmetros de densidade no estado endurecido e de retenção de água já se tornam desaconselháveis para o desenvolvimento do aditivo proposto, uma vez que apresentaram os piores índices para uma propriedade muito importante, que é a de resistência. A explicação para a queda na resistência nesses traços pode ser atribuída a argila.

Fazendo análise comparativa com as Tabelas 2.4 e 2.5, verifica-se que a maioria dos autores encontraram valores entre 2,41 a 5,20, valores estes coerentes com os obtidos nesta dissertação. Exceção deve ser feita aos trabalhos de Palomar *et al.* (2015), Palomar e Barluenga (2017) e Palomar e Barluenga (2018) que utilizaram baixíssimos teores de água/materiais secos na composição das suas argamassas, o que causou diminuição no índice de consistência e aumento da resistência dos traços estudados.

O trabalho de Gomes e Neves (2002) destacado na Tabela 2.14 também serve de comparação para os resultados obtidos, bem como o trabalho de Andres *et al.*

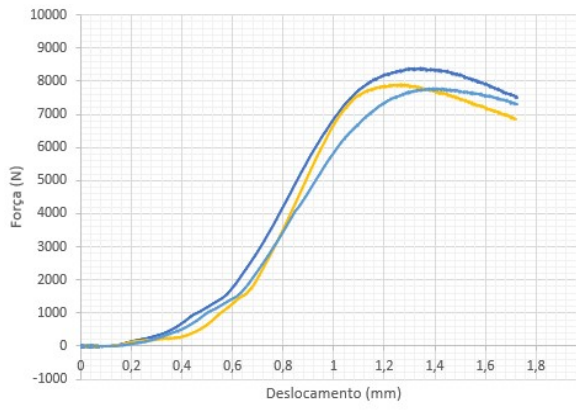
(2016) presente na Tabela 2.16. Os referidos autores estudaram argamassas contendo apenas materiais argilosos e encontraram os seguintes valores: Andres *et al.* (2016), entre 1,05 e 1,23 MPa e, Gomes e Neves (2002) entre 3,0 e 4,7 MPa, com apenas um traço apresentando 6,2 MPa de resistência. Assim percebe-se que o trabalho de Andres (2016) apresentou argamassas com parâmetros de resistência inferiores aos encontrados nessa pesquisa, enquanto o de Gomes e Neves (2002) encontrou valores mais próximos, apresentando ainda um traço com resistência superior aos encontrados para as proporções estudadas. Diante da grande variação dos resultados obtidos pela bibliografia mundial, já esperado por se tratar de uma propriedade do estado endurecido, comprovado pelo CV de 10,29% do ensaio, conclui-se que os resultados foram coerentes com os valores presentes na bibliografia. Uma justificativa para valores tão baixos encontrados por Andres *et al.* (2016) pode ser atribuída ao elevado fator água/materiais secos utilizado pelos autores.

#### 4.2.8. Módulo de elasticidade

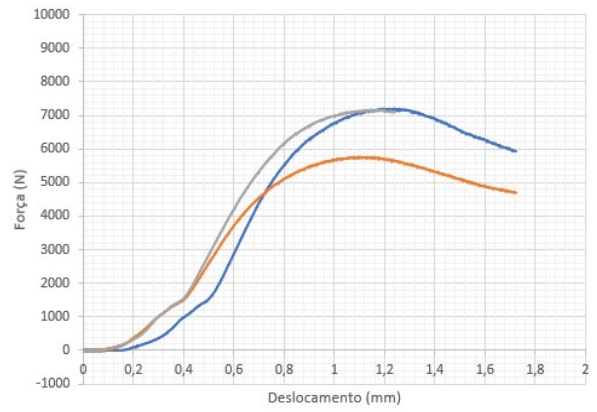
O diagrama carga x deformação foi plotado para as argamassas dos traços TR e SX com a intenção de se obter o módulo de elasticidade dessas argamassas, o que permite a discussão a respeito da capacidade que esses materiais apresentariam em serviço de absorver deformações. Esse parâmetro é de suma importância para argamassas de revestimento e assentamento, sendo um dos importantes papéis desempenhados por eles em serviço, como destacam Mattana *et al.* (2012).

A Figura 4.6 apresenta os gráficos para as argamassas TR e SX, sendo que para montagem dos gráficos foram utilizados três CP's dos cinco disponíveis, sendo priorizado os que apresentaram melhores ajustes entre si.

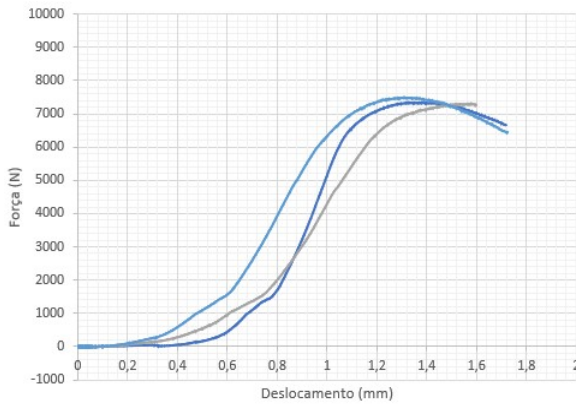
Para obtenção do módulo de elasticidade teórico foi realizada a regressão da região linear do gráfico utilizando o Excel. Os valores encontrados para os três CP's de cada proporção analisada, bem como a média dos valores encontram-se apresentados na Tabela 4.11. Os valores das médias já foram apresentados na Tabela 4.3.



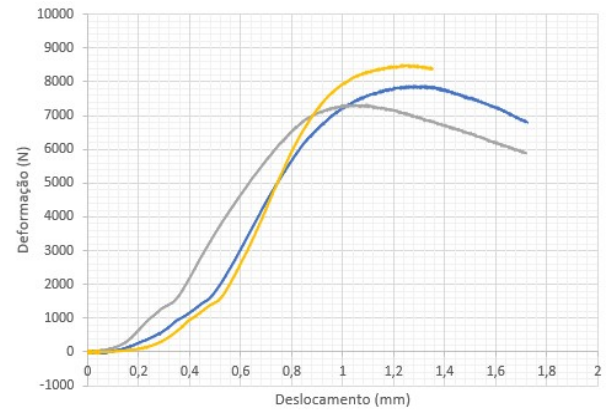
(a)



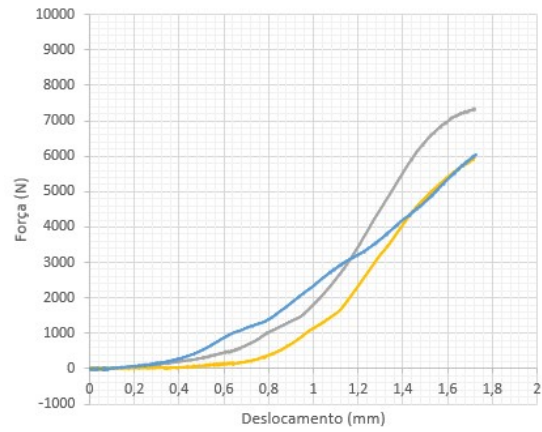
(b)



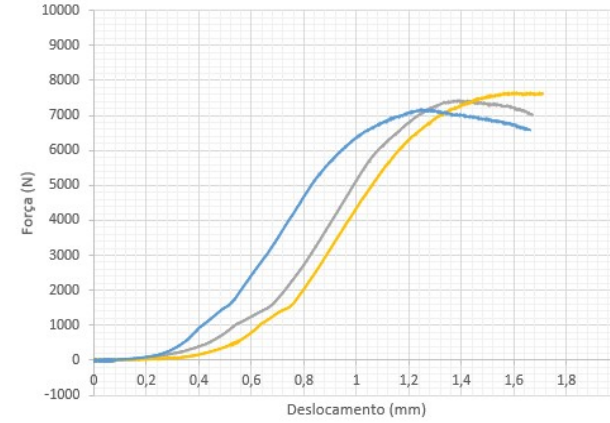
(c)



(d)

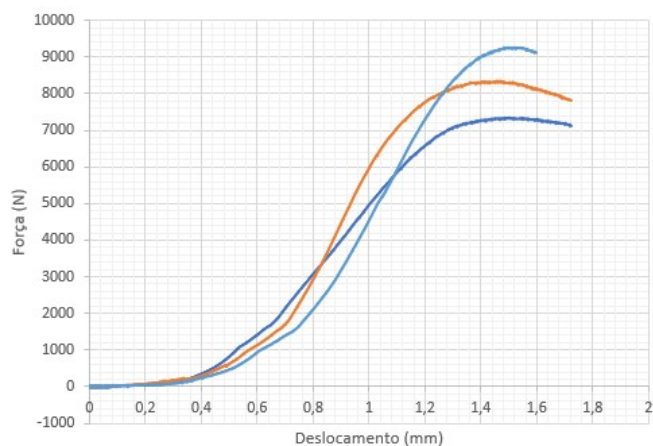


(e)



(f)





(g)

Figura 4.6 – Curva tensão x deformação para as proporções (a) TR00; (b) TR01; (c) TR02; (d) SXac; (e) SXah; (f) SXch e (g) SXach.

Tabela 4.11 – Módulos de elasticidade teóricos obtidos para as argamassas estudadas.

Argamassa	CP01 (GPa)	CP02 (Gpa)	CP03 (Gpa)	Média (Gpa)
TR00	12,86	12,13	10,48	11,82±1,22
TR01	10,91	11,36	9,95	10,74±0,72
TR02	12,72	14,53	17,68	14,98±2,51
SXac	8,75	9,09	9,61	9,15±0,43
SXah	8,23	7,15	6,03	7,14±1,10
SXch	10,23	12,67	13,54	12,15±1,72
SXach	12,77	12,49	11,12	12,13±0,88

Avaliando os resultados obtidos percebe-se que as argamassas com menor módulo de elasticidade teórico são as SXah, SXac e TR01, representando dessa forma as argamassas com melhor desempenho na acomodação de deformações. Um fato em comum entre essas argamassas é que todas levam em sua composição pelo menos 50% da argila, o que destaca que esse material reduz rigidez das argamassas.

O traço contendo apenas resíduo de calcário, ou seja, o traço TR02, foi o que apresentou maior módulo de elasticidade, representando o traço com pior capacidade de acomodação de deformações. Isso pode ser atribuído ao fato do aglomerante utilizado ter sido um material que não apresentou plasticidade. Sendo assim, a argamassa contendo apenas esse material como aglomerante, traço TR02, foi justamente a que apresentou características menos plásticas, logo apresentou um comportamento menos deformável, podendo ser considerado a proporção com maior

rigidez entre as argamassas avaliadas. Em função disso, essa proporção deve ser descartada na produção de argamassas de múltiplo uso.

Relacionando o módulo de elasticidade obtido ao coeficiente angular da reta presente na região elástica das curvas apresentadas, é possível verificar a coerência dos resultados obtidos, uma vez que as curvas dos traços SXah e SXac foram as que apresentaram menor inclinação. Verifica-se também a coerência dos dados obtidos, ainda que teóricos, quando comparados aos trabalhos pesquisados na revisão bibliográfica. Avaliando as Tabelas 2.4 e 2.5 é possível perceber a grande dispersão nos dados obtidos para o módulo de elasticidade, que com base no trabalho de diferentes autores, variou num intervalo de 4,1 a 16,3 GPa. Dessa maneira, os valores teóricos obtidos nesta pesquisa, num intervalo entre 7,14 a 14,98 GPa, apresentam coerência no que versa sobre a possibilidade da variação desse parâmetro.

#### 4.2.9. Resistência à compressão em CP cilíndrico

Para o ensaio de resistência à compressão em corpo de prova cilíndrico foi utilizada o procedimento presente na NBR 5739 (ABNT, 2007). Os parâmetros calculados através da expressão (17) encontram-se indicados na Tabela 4.3.

Para a ANOVA e o teste de Tukey foram utilizadas 3 repetições, representado pela quantidade de corpos de prova utilizados, para os traços TR00, TR01, TR02 e SXac, totalizando assim 4 tratamentos e 12 unidades experimentais básicas. Foram escolhidos os três traços de referência e o traço SXac que apresentou as melhores propriedades entre as proporções avaliadas. As Tabelas 4.12 e 4.13 apresentam, respectivamente, os resultados da análise de variância e do teste de Tukey para a resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos.

Tabela 4.12 – ANOVA para DIC da resistência à compressão em CP cilíndrico ( $p \leq 0,05$ ).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamentos	3	18,497267	6,1657556	164,52983	4,07*
Resíduo	8	0,2998	0,037475	-	-
Total	11	18,797067	-	-	-
CV (%)				5,51	

Tabela 4.13 – Teste de Tukey para contraste de médias da resistência à compressão em CP cilíndrico ( $p \leq 0,05$ ).

Tratamento	Média (MPa)	Tukey
TR02	5,09	A
TR00	4,27	B
SXac	3,74	B
TR01	2,35	C
DMS		0,663

A análise dos resultados obtidos com CP's cilíndricos indica que existem diferenças significativas entre os tratamentos estudados e que o ensaio apresentou bons parâmetros de precisão, conforme observado pelo coeficiente de variação de 5,51%. Verificando os resultados obtidos pelo teste de Tukey destaca-se que há três conjuntos de dados: o grupo A composto por TR02, o grupo B composto por TR00 e SXac e o grupo C, que engloba o traço TR01. Assim, analisando os resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão em corpos de prova prismáticos, verifica-se que existe diferença entre os valores obtidos.

Essa diferença pode ser justificada analisando o processo de moldagem dos corpos de prova cilíndricos. Durante a confecção dos CP's que foram utilizados para mensurar os parâmetros descritos, observou-se grande dificuldade em moldar o traço TR01, que apresentou péssimos parâmetros de trabalhabilidade conforme já destacado. Ao mesmo tempo observou-se grande facilidade na moldagem do traço TR00. Essa é a possível causa para dispersão dos dados analisados, e pode ser considerado um importante parâmetro para relacionar a trabalhabilidade das argamassas com a resistência à compressão.

O processo de moldagem dos CP's prismáticos envolve o uso de uma fôrma com facilidade de aplicação da argamassa, sendo utilizada o golpeamento provocado pela mesa de consistência como forma de aplicação de energia para compactação das argamassas seguindo metodologia da NBR 13276 (ABNT, 2005). Dessa maneira, a argamassa é bem compactada e consegue se espalhar adequadamente sobre os moldes utilizados. Já na moldagem dos CP's cilíndricos, seguindo a metodologia da NBR 5739 (ABNT, 2007), que utiliza uma fôrma que dificulta o espalhamento da argamassa, a energia de compactação utilizada corresponde à aplicação de golpes com um martelo padrão, ilustrado na Figura 3.1 (a). Assim, argamassas com melhor trabalhabilidade apresentam processo de moldagem mais eficiente, enquanto

argamassas com pior trabalhabilidade apresentam moldagem ineficaz, o que causa um impacto nos valores de resistência encontrados na compressão desses CP's. A Figura 4.7, retirada do site de um fabricante, ilustra os moldes prismáticos e cilíndricos tipicamente utilizados na confecção dos CP's.



(a)



(b)

Figura 4.7 – (a) Molde para CP prismáticos e (b) Molde para CP cilíndrico.

Fonte: Catálogo comercial da Metal Cairo LTDA.

Em função do que foi apresentado no parágrafo anterior, é possível compreender a diferença entre os resultados obtidos analisando a resistência à compressão em CP's prismáticos e cilíndricos. Uma vez que o padrão estipulado pela NBR 13281 (ABNT, 2005) são os CP's prismáticos, esses resultados serão utilizados na análise do desempenho das argamassas, embora os resultados obtidos com CP's cilíndricos tenham sido primordiais para o entendimento da relação que existe entre trabalhabilidade e resistência mecânica.

#### 4.2.10. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado seguindo o procedimento descrito na NBR 15259 (ABNT, 2005), de onde podem ser retirados dois parâmetros importantes para mensurar o fenômeno da capilaridade em argamassas: o coeficiente de capilaridade, calculado pela expressão (12), e a absorção de água por capilaridade aos 90 minutos, obtido pela expressão (13). No estudo dos dois parâmetros foram utilizados 3 CP's, tendo sido realizado o ensaio para as 14 proporções estudadas, dando um total de 42 unidades experimentais básicas. Os parâmetros calculados foram incluídos nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Inicialmente será realizada a discussão para o parâmetro do coeficiente de capilaridade e, em seguida, será abordada a outra propriedade. A Tabela 4.14 apresenta ANOVA para o primeiro parâmetro, enquanto a Tabela 4.15 apresenta o teste de Tukey realizado. Destaca-se que o experimento pode ser caracterizado como de alta confiabilidade em função do coeficiente de variação de 8,32%.

Tabela 4.14 – ANOVA para DIC do coeficiente de capilaridade ( $p \leq 0,05$ ).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamentos	13	164,587174	12,6605518	15,669046	2,09
Resíduo	28	22,6239333	0,80799762	-	-
Total	41	187,211107	-	-	-
CV (%)				8,32	

Tabela 4.15 – Teste de Tukey para contraste de médias do coeficiente de capilaridade ( $p \leq 0,05$ ).

Tratamento	Média ( $\text{g}/\text{dm}^2\text{min}^{1/2}$ )	Tukey
SXah	7,03	A
SXach	7,07	A
EST2-3	9,03	AB
SXac	9,42	AB
EST2-1	10,2	BC
EST3-1	10,77	BC
EST1-3	11,1	BC
EST1-2	11,4	BCD
EST1-1	11,5	BCD
EST3-2	12,2	CD
SXch	12,37	CD
TR02	12,53	CD
TR01	12,67	CD
TR00	13,88	D
DMS		2,673

Analisando ANOVA verifica-se que ao menos duas médias de tratamento apresentam valores diferentes. Verificando o teste de Tukey conclui-se que todos os tratamentos apresentaram desempenho superior ou igual ao traço de referência, indicado que o parâmetro de capilaridade foi beneficiado com os tratamentos propostos.

Os piores resultados foram encontrados para as proporções EST1-2, EST1-1, EST3-2, SXch, TR02, TR01 E TR00, representados pelo grupo D. Assim sendo, é possível concluir que os traços contendo apenas um aglomerante, referenciados pela

sigla TR, estão incluídos no grupo com pior desempenho quando submetidos à ação da capilaridade. Isso pode ser explicado através da compreensão do fenômeno da capilaridade.

Sabe-se que a ascensão de água por capilaridade ocorre quando algum líquido, usualmente a água, movimenta-se por tubos ou poros capilares. Em argamassas esses poros correspondem aos poros com diâmetro entre  $0,01\mu\text{m}$  a  $10\mu\text{m}$ . O fenômeno pode ser explicado da seguinte maneira: as moléculas do líquido são atraídas pelas moléculas presentes nos poros da argamassa, que por serem muito finas agem como se fossem um tubo, por causa das interações intermoleculares. Desse modo, o líquido fica “grudado” na parede. O que causa o movimento ascendente é que a molécula presente no tubo, imediatamente acima da superfície do líquido, atrai a molécula do líquido que começa a subir alinhando-se à molécula que o atraiu. Quando isso acontece, a molécula imediatamente acima atrai o líquido restante e, assim, o ciclo se repete, provocando, desta forma, o movimento ascendente. Além disso, capilaridade também pode ser definida como um fenômeno de atração e repulsão, que ocorre no contato de líquidos com um sólido, fazendo com que este líquido suba ou desça sobre a superfície sólida. A tendência de os líquidos subirem nos tubos capilares é chamada de capilaridade ou ação capilar, sendo isso consequência da tensão superficial dos líquidos.

Este fenômeno é pouco estudado para argamassas de múltiplo uso, porém apresenta grande importância para compreensão e previsão da durabilidade das argamassas, já que representa um dos mais importantes parâmetros de durabilidade para argamassas. Sabe-se que a sucção capilar é um dos mecanismos de transporte mais importantes de entrada de agentes agressivos nos poros das argamassas e, por isso, o estudo dessa propriedade está sendo destacado.

Diante de tudo que foi discutido, entende-se que os traços TR, contendo em sua composição apenas um aglomerante foram os traços com pior compensação granulométrica. Em função disso, esses traços apresentaram a maior quantidade de poros capilares, o que ocasionou maior ocorrência do fenômeno de capilaridade para as proporções TR00, TR01 e TR02.

Avaliando os traços do grupo A pelo teste de Tukey, que apresentaram menor ocorrência do fenômeno de capilaridade são, as proporções SXah, SXach, EST2-3 e

SXac, que podem ser definidos como traços com boa compensação granulométrica entre os aglomerantes, apresentando menor quantidade de poros capilares.

As Tabelas 2.4 e 2.5 indicam os valores de coeficiente de capilaridade encontrados por outros autores analisados na revisão bibliográfica. Esses valores devem ser multiplicados por 10 a fim de compatibilizar com as unidades utilizadas nessa dissertação. Assim, destaca-se que as diferentes pesquisas analisadas apresentaram o coeficiente variando entre 5,0 e 26,4 g/dm<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>. Avaliando a Tabela 2.14, que indica o coeficiente de capilaridade obtido por Gomes e Neves (2002), verifica-se que os autores obtiveram valores entre 5,4 a 9,90 g/dm<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>. Por isso, destaca-se que os valores encontrados nesta pesquisa, que variaram no intervalo de 7,03 a 13,88 g/dm<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>, encontram-se coerentes com os pesquisados pela bibliografia internacional.

Após a análise do coeficiente de capilaridade foi avaliada também a absorção de água por capilaridade após 90 minutos, que é o tempo total de ensaio realizado. Observa-se nas Tabelas 4.16 e 4.17, que indicam a ANOVA e o teste de Tukey, que os dados obtidos para esse ensaio apresentam um coeficiente de variação de 9,98%, indicando alta precisão nos resultados. Além disso, os tratamentos realizados mostraram-se significativos pela análise de variância, o que indica que ao menos dois pares de médias analisados diferem estatisticamente entre si.

Tabela 4.16 – ANOVA para DIC da absorção de água por capilaridade aos 90 minutos (p≤0,05).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamentos	13	2,15049914	0,16542301	10,8002753	2,09
Resíduo	28	0,42886354	0,01531656	-	-
Total	41	2,57936269	-	-	-
CV (%)				9,98	

Novamente, analisando o teste de Tukey, destacam-se dois grupos de tratamentos: o grupo A, composto por SXah, SXach, EST2-3, SXac e EST3-1 que apresentaram os melhores desempenhos, representado pelos menores valores de absorção, e o grupo E, em que estão incluídos os traços SXch, EST1-2, EST1-3, EST1-1, TR02 e TR00, apresentando os maiores valores de absorção por capilaridade, e conseqüentemente os piores parâmetros obtidos na análise.

Tabela 4.17 – Teste de Tukey para contraste de médias da absorção de água por capilaridade aos 90 minutos ( $p \leq 0,05$ ).

Tratamento	Média (g/cm <sup>2</sup> )	Tukey
SXah	0,83	A
SXach	0,88	AB
EST2-3	1,01	ABC
SXac	1,11	ABCD
EST3-1	1,11	ABCD
EST2-1	1,22	BCD
EST3-2	1,26	CD
TR01	1,34	CD
SXch	1,36	CDE
EST1-2	1,36	CDE
EST1-3	1,37	CDE
EST1-1	1,38	DE
TR02	1,4	DE
TR00	1,72	E
DMS		0,368

O grupo com os melhores indicadores é praticamente o mesmo obtido pela análise de coeficiente de capilaridade, demonstrando que existe uma boa relação entre esses dois parâmetros, uma vez que o cálculo dos dois é realizado com o mesmo conjunto de dados. Analisando o grupo com os piores desempenhos, percebe-se que existe maior disparidade, embora o traço de referência tenha novamente obtido os piores valores absolutos, o que em teoria valida todas as proporções analisadas.

O grande destaque deve ser feito ao traço TR01, que havia obtido um dos piores desempenhos analisando o coeficiente de capilaridade, porém quando se analisa a absorção de água aos 90 minutos verifica-se que o referido traço apresentou valores intermediários. Isso pode ser justificado pelo fato da capilaridade nesse traço apresentar valores mais expressivos após os 10 minutos de ensaio, uma vez que a discrepância obtida pelo coeficiente de capilaridade foi maior do que a obtida pela absorção de água aos 90 minutos, quando se realiza um contraste com as demais proporções estudadas. Pensando numa explicação com base na granulometria da argila, que apresenta as partículas mais grosseiras entre os aglomerantes avaliados, conclui-se que esse material apresenta significativa quantidade de poros ativos, porém esses poros apresentam diâmetros maiores do que os poros presentes nas argamassas dos outros aglomerantes. Assim, a força de sucção capilar no poro é menor, e a água demora mais a percolar. Uma vez iniciado o processo de percolação,



acentuado após 10 minutos de realização dos ensaios, o fenômeno da capilaridade atinge valores significativos em função da grande quantidade de poros capilares presentes na argamassa TR01.

A análise apenas do coeficiente de capilaridade já representa bons parâmetros de desempenho e durabilidade para as argamassas. Porém, é recomendada a análise complementar da absorção de água por capilaridade aos 90 minutos, porque essa análise é obtida com os mesmos resultados do coeficiente de capilaridade e principalmente porque fornece importantes e discussões para as proporções de argamassas analisadas.

No que diz respeito ao desempenho das proporções estudadas, todas apresentam bons parâmetros de durabilidade quando comparados ao traço de referência.

#### 4.2.11. Absorção de água por imersão e índice de vazios

O ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios utilizou como base o procedimento prescrito na NBR 13279 (ABNT, 2005). Os dois parâmetros descritos pela norma foram calculados através da aplicação das expressões (15) e (16) e seus valores estão apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4. Para esse ensaio foram utilizados 4 CP's, tendo sido realizado 14 tratamentos, conforme os traços propostos nessa dissertação. Utilizou-se para base da análise estatística 56 unidades experimentais.

A análise de variância e o teste de Tukey para contraste das médias para a porcentagem de absorção de água por imersão, realizado com 95% de grau de confiança, são apresentados nas Tabelas 4.18 e 4.19, respectivamente. Destaca-se que para esse primeiro parâmetro o ensaio e as análises podem ser descritos como de alta precisão, uma vez que o coeficiente de variação foi e 3,03%.

Tabela 4.18 – ANOVA para DIC da absorção de água por imersão ( $p \leq 0,05$ ).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamentos	13	66,3817941	5,10629185	23,4392087	1,97*
Resíduo	42	9,14980795	0,21785257	-	-
Total	55	75,531602	-	-	-
CV (%)				3,03	

Tabela 4.19 – Teste de Tukey para contraste de médias da absorção de água por imersão ( $p \leq 0,05$ ).

Tratamento	Média (%)	Tukey
SXch	13,52%	A
EST3-1	13,76%	AB
EST2-1	13,96%	AB
SXac	14,02%	AB
TR02	14,08%	AB
SXach	14,92%	BCD
TR00	15,30%	CD
SXah	15,87%	CDE
EST1-1	15,88%	CDE
EST3-2	16,00%	DE
EST1-3	16,07%	DE
EST2-3	16,10%	DE
EST1-2	16,56%	EF
TR01	17,60%	F
DMS		1,176

Pela análise das Tabelas 4.18 e 4.19 verifica-se que os tratamentos realizados são estaticamente significativos e que se enquadram em dois grupos principais: o grupo que apresenta os menores valores de absorção de água, composto pelos traços SXch, EST3-1, EST2-1, SXac e TR02, agrupados na letra A, e os grupos com os piores índices de absorção de água, representados pelas letras E e F, onde se enquadram os tratamentos SXah, EST1-1, EST3-2, EST1-3, EST2-3, EST1-2 e TR01.

O parâmetro de absorção de água por imersão é de grande valia na análise do desempenho de argamassas de múltiplo uso, uma vez que simula a exposição de argamassa à chuva, à umidade excessiva, à ação proveniente de limpeza e lavagem, entre outros. A norma utiliza uma metodologia para simular condições extremas, em que a argamassa fica totalmente imersa em água, porém fornece um excelente parâmetro para compreensão do material numa situação de serviço.

Como a argila é um material que apresenta instabilidade em presença de água em função de sua atividade superficial promovida pelos argilominerais que a compõe, os materiais confeccionados com esse componente costumam absorver e eliminar água com facilidade, causando o desempenho encontrado para a absorção de água por imersão. Deve-se considerar também que, por apresentar a granulometria mais grosseira, a argila proporcionou os maiores valores de índices de vazios, conforme será discutido mais adiante, gerando grandes valores de absorção.

Por outro lado, o resíduo de mármore é um material extremamente fino e com as partículas muito uniformes e arredondadas, conforme destacaram Vardhan *et al.* (2015). Isso provocou melhorias nas propriedades de índice de vazios que refletiram em baixos teores de absorção de água por imersão.

Com base no teste de Tukey, conclui-se que a incorporação de resíduo de mármore provoca melhoria no desempenho de durabilidade das argamassas, enquanto a incorporação de argila leva ao caminho contrário.

Como visto nas Tabelas 2.4, 2.5 e 2.14, não é usual os autores realizarem análise com base nos parâmetros de absorção de água por imersão, sendo mais utilizado o parâmetro de índice de vazios, que podem ser considerados como equivalente um ao outro.

A abordagem do parâmetro índice de vazios será discutida com base nas Tabelas 4.20 e 4.21, que apresentam a ANOVA e o teste de Tukey. O coeficiente de variação de 2,82% destaca a alta precisão do ensaio e dos resultados obtidos com ele.

Tabela 4.20 – ANOVA para DIC do índice de vazios ( $p \leq 0,05$ ).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamentos	13	108,144191	8,31878392	14,3087269	1,97*
Resíduo	42	24,4178904	0,58137834	-	-
Total	55	132,562081	-	-	-
CV (%)				2,82	

Conforme verifica-se pela ANOVA da Tabela 4.20, os tratamentos são estaticamente significativos. Além disso, através do teste de Tukey na Tabela 4.21 é possível notar que o tratamento com apenas aglomerante argila, TR01, foi o que apresentou o maior índice de vazios, valendo 30,07%. Os tratamentos EST3-1, SXch, EST2-1, SXac, TR02 e SXach, agrupados pela letra A, apresentam os menores índices de vazios entre as proporções estudadas. Verifica-se que existe uma excelente correlação entre os parâmetros de absorção de água por imersão e índice de vazios, conforme explicado anteriormente e, conforme será destacado na sequência do texto, quando será calculado o coeficiente de correlação de Pearson.

Tabela 4.21 – Teste de Tukey para contraste de médias do índice de vazios ( $p \leq 0,05$ ).

Tratamento	Média (%)	Tukey
EST3-1	24,71%	A
SXch	24,84%	A
EST2-1	25,59%	AB
SXac	25,64%	AB
TR02	25,90%	ABC
SXach	26,27%	ABCD
TR00	26,88%	BCD
SXah	27,52%	BCD
EST1-1	27,57%	CD
EST3-2	27,71%	CD
EST1-3	27,71%	CD
EST2-3	27,97%	D
EST1-2	28,08%	D
TR01	30,07%	E
DMS		1,921

Comprova-se, assim, que a incorporação do resíduo de mármore causa redução no índice de vazios das argamassas, enquanto a substituição de cal hidratada por argila produz o efeito oposto. As análises são comprovadas pelo teste de Tukey.

Verificando os valores de índice de vazios encontrados nas referências bibliográficas, conforme constantes nas Tabelas 2.4, 2.5 e 2.13, identifica-se que a variação desse parâmetro ficou entre 28-36%, com exceção dos trabalhos de Palomar *et al.* (2015), Palomar e Barluenga (2017) e Palomar e Barluenga (2018), que obtiveram valores em torno de 17% em decorrência do uso de argila expansiva em seus traços. Pode-se considerar que os valores obtidos nesta pesquisa, com variação entre 24,71% a 30,07% se enquadram dentro dos resultados esperados conforme a bibliografia.

#### 4.2.12. Ensaio de aderência à tração

O ensaio de aderência à tração em argamassas foi realizado seguindo o proposto na NBR 13528 (ABNT, 2010), tendo sido realizado nos traços TR00, TR01, TR02, SXac, SXah, SXch e SXach.

Para cada traço foram escolhidos os CP's prova que mais se enquadraram na metodologia estatística aplicada. Para isso foram produzidos de 14 a 16 CP's no intuito

de apresentar margens para eventuais problemas metodológicos ou erros experimentais. Os CP's que apresentaram ruptura no chapisco, na cola ou no substrato foram descartados, mantendo apenas os resultados cuja ruptura ocorreu na argamassa, uma vez que o objetivo do ensaio é avaliar o esforço de tração nesse material. As formas de ruptura mencionadas são indicadas na Figura 3.11, enquanto os resultados obtidos para esse ensaio estão indicados na Tabela 4.3 e melhor detalhados no Anexo II. As Tabelas 4.22 e 4.23, indicadas a seguir, apresentam os resultados da ANOVA e do Teste de Tukey para o parâmetro destacado. Conforme mencionado, foram utilizados 12 CP's para cada um dos 7 traços avaliados, totalizando 84 unidades experimentais.

Tabela 4.22 – ANOVA para DIC da aderência à tração ( $p \leq 0,05$ ).

FV	GL	SQ	QM	Fcal	Ftab
Tratamentos	6	0,1322985	0,0220498	4,9979128	2,25*
Resíduo	77	0,339708	0,0044118	-	-
Total	83	0,4720066	-	-	-
CV (%)				24,28	

Tabela 4.23 – Teste de Tukey para contraste de médias de aderência à tração ( $p \leq 0,05$ ).

Tratamento	Média (MPa)	Tukey
TR00	0,321	A
TR01	0,318	AB
SXac	0,312	AB
SXah	0,306	AB
SXach	0,243	BC
SXch	0,228	C
TR02	0,218	C
DMS	0,077	

A primeira análise que deve ser indicada é a respeito da variação dos parâmetros obtidos durante a execução do ensaio. Conforme melhor visto no Anexo II, e com base no coeficiente de variação de 24,28%, é possível identificar que os resultados de aderência apresentam grande dispersão de dados em função dos seguintes motivos: diferença na aplicação da argamassa por parte do operador; exposição ao meio ambiente (chuva, umidade, insolação, variação de temperatura) que atua de forma diferenciada nos revestimentos ensaiados em decorrência da posição geográfica e da diferença cronológica da execução dos ensaios; diferença

nos mecanismos de interação com o substrato, por mais que tenham sido utilizados os mesmos materiais e traços para o chapisco e o mesmo tipo de bloco cerâmico como substrato; dentre outros.

Sobre os tratamentos, é possível perceber com base na Tabela 4.22 que os traços empregados foram significativos, isto é, apresentam diferença estatística, por mais que os valores absolutos das resistências aparentam ser próximos. Analisando a Tabela 4.23 percebe-se que as proporções TR00, TR01, SXac e SXah apresentam os melhores parâmetros de aderência, enquanto as proporções SXach, SXch e TR02 apresentam os piores parâmetros de aderência, sendo que essas proporções são desencorajadas para argamassas de múltiplo uso.

Constata-se pelo teste de Tukey que a incorporação do resíduo de calcário provoca decréscimo nas características de aderência da argamassa, o que pode ser justificado pela falta de plasticidade encontrado para o resíduo que, portanto, não apresenta características colantes de aglomeração. Já a argila não provoca mudanças na característica de aderência das argamassas quando comparado ao traço de referência.

Com base nos valores mínimos da NBR 13281 (ABNT, 2005) todas as argamassas podem ser utilizadas como revestimento interno, já que para todas as proporções utilizadas a resistência foi superior a 0,20 MPa. Entretanto apenas as argamassas do grupo A, com aderência superior a 0,30 MPa, podem ser utilizadas como revestimento externo.

Comparando com outros trabalhos sobre argamassa, destacados nas Tabelas 2.4 e 2.5 verifica-se que a aderência apresentou valores na ordem de 0,25 MPa, atingindo o valor máximo de 0,41 MPa na pesquisa de Palomar *et al.* (2015) e Palomar e Barluenga (2017). Assim destaca-se que os valores obtidos são condizentes com a realidade encontrada pelas Referências bibliográficas.

#### 4.2.13. Questionário de aplicação da argamassa

Conforme relatado no tópico de metodologia, durante a execução dos revestimentos para o ensaio de aderência, foi aplicado um questionário utilizando o mesmo padrão de Gomes *et al.* (2012) cujo respondente foi o técnico que realizou a

execução do ensaio. A motivação para aplicação do questionário foi complementar as informações obtidas pelos ensaios de trabalhabilidade, utilizando uma ferramenta embasada na experiência do operador e na aplicação real do material estudado. A Tabela 4.24 apresenta os resultados do questionário para as proporções de argamassa estudadas.

Tabela 4.24 – Respostas do questionário para medir a trabalhabilidade das argamassas utilizando a metodologia de Gomes *et al.* (2012).

Argamassa	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)
TR00	Bom	Excelente	Bom	Excelente	Excelente
TR01	Mau	Excelente	Bom	Suficiente	Suficiente
TR02	Bom	Mau	Bom	Excelente	Bom
SXac	Bom	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
SXah	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
SXch	Excelente	Mau	Suficiente	Suficiente	Suficiente
SXach	Bom	Suficiente	Bom	Bom	Bom

Sendo os códigos utilizados apresentados a seguir: (i) manuseio da argamassa, (ii) facilidade de aderência com o substrato, (iii) facilidade de aperto, (iv) facilidade de regularização e (v) opinião geral sobre a trabalhabilidade.

A análise dos resultados obtidos pelo questionário não é simplória, porém é melhor compreendida quando separada pelos critérios analisados.

O primeiro critério, por exemplo, buscou mensurar as características de manuseio da argamassa, ou seja, essa característica buscou medir a facilidade com que a argamassa foi aplicada, sendo considerada uma medida empírica de trabalhabilidade. Avaliando os resultados obtidos percebe-se que a única argamassa que apresentou desempenho excelente foi a argamassa SXch. Relacionando esse resultado com o que foi concluído através dos ensaios de *flow table* e *squeeze flow* percebe-se que o traço SXch foi um dos que apresentaram as melhores características de trabalhabilidade, perdendo apenas para o traço TR02, que foi considerado como bom no critério (i). Uma explicação possível para o fato da argamassa TR02 não ter apresentado desempenho excelente, o que era esperado com base nos ensaios de trabalhabilidade previamente realizados, foi o fato do resíduo de calcário não ter apresentado plasticidade, como visto nos ensaios de caracterização pelos limites de Atterberg presentes na Tabela 4.1. Isso impactou negativamente no critério (i), e no critério (ii), como será discutido na sequência, uma

vez que a argamassa produzida utilizando apenas como aglomerante esse resíduo também apresentou baixa plasticidade.

Além do traço TR02, as argamassas TR00, SXac, SXah e SXach também apresentaram um desempenho bom com base na avaliação do critério (i). Por isso esses traços foram avaliados como tendo boa trabalhabilidade. O comportamento oposto foi observado pela argamassa TR01, contendo argila em sua composição, que foi o traço com maiores dificuldades de ser manuseado, sendo o único traço considerado com mau manuseio. Esse fato também já era esperado com base nos ensaios de trabalhabilidade, que levaram à conclusão de que o traço TR01 apresenta os piores parâmetros de trabalhabilidade entre as proporções analisadas.

Sobre o critério (ii) que mediu a facilidade de aderência da argamassa com o substrato, verificam-se os seguintes comportamentos: as proporções TR00, SXac e TR01 apresentaram desempenhos excelentes, enquanto as proporções TR02 e SXch apresentaram maus desempenhos. Esse parâmetro pode ser empiricamente relacionado à quantidade de argamassa que fica aderida ao substrato durante o processo de chapagem da argamassa: traços com excelente aderência ao substrato apresentam quase nenhuma queda de material após serem chapadas, enquanto traços com má aderência apresentam queda excessiva de material após o processo de chapagem. Também é interessante notar que entre os traços com excelente aderência ao substrato, tanto o traço TR00 quanto o SXac apresentaram altos valores de resistência à aderência, obtendo índices acima de 0,30 MPa. A exceção fica no traço TR01, que mesmo apresentando excelente aderência ao substrato não apresentou desempenho tão alto na aderência à tração. O fato do traço TR01 ter apresentado esse resultado para o critério (ii) pode ser explicado pela alta plasticidade da argila, único aglomerante utilizado nessa proporção, que agiu no sentido de auxiliar a capacidade de aderência ao substrato. De uma forma geral, a argila proporcionou ao traço TR01 capacidade aglutinação, agindo no sentido de aumentar a capacidade de cola da argamassa. O oposto foi verificado com o traço TR02, que por ser constituído apenas de resíduo de mármore apresentou má capacidade de colagem ou aderência ao substrato, uma vez que, conforme relatado, o resíduo apresenta característica não plástica.

O critério (iii) apresenta grande relação com o critério (ii), uma vez que o aperto da argamassa é realizado logo na sequência da chapagem do material e tem o



objetivo de provocar maior aderência entre a argamassa e o substrato. Embora tenham sido separados os dois critérios, verifica-se uma relação entre esses dois parâmetros. Uma vez que no processo de aperto é mais difícil que a argamassa fique aderida ao substrato, já que está sendo provocada uma tensão sobre o material, verifica-se que os resultados obtidos foram de certa forma piorados. Assim, das argamassas com parâmetros excelentes pelo critério (ii), apenas ao traço SXac manteve como resposta a atribuição excelente, ao passo que os traços TR00 e TR01 foram rebaixados para bom desempenho no critério (iii). Pode-se afirmar que a pequena tensão aplicada na argamassa não agiu apenas no sentido de atrapalhar as proporções estudadas, já que para as argamassas TR02 e SXah, que haviam obtido o parâmetro mau no critério (ii) passaram a apresentar como resposta desempenhos bom e suficiente, respectivamente, na avaliação do critério (iii). Os resultados obtidos pelo parâmetro (iii) foram mais homogêneos do que dos outros dois critérios.

O critério (iv) avalia a facilidade de regularização que os traços estudados apresentaram. A regularização, também chamada de acabamento, é realizada transcorrido um determinado tempo com o intuito de deixar a argamassa “puxar” e apresentar maior firmeza para o recebimento do acabamento. Nessa etapa a argamassa já não é tão fluida, apresentando comportamento intermediário entre os estados fresco e endurecido. Avaliando os resultados é possível verificar que as proporções TR00, TR02 e SXac receberam a avaliação excelente enquanto as argamassas TR01 e SXch receberam como avaliação suficiente. É importante ressaltar que no critério (iv) todas as argamassas apresentaram desempenho aceitável, sendo que a escala suficiente, bom e excelente foi estabelecida apenas para destacar qual argamassa apresentou melhor ou pior desempenho em relação as outras proporções.

Por fim, o critério (v) pode ser descrito como uma ponderação das características observadas nos quatro primeiros critérios. Sendo assim, as proporções TR01 e SXac receberam a avaliação suficiente, enquanto os traços TR00 e SXac apresentaram um desempenho excelente, destacando que foram as melhores proporções na ponderação dos critérios estabelecidos. Resguardado a análise individual de cada critério detalhado, todas as proporções avaliadas podem ser empregadas de maneira adequadas como argamassas de múltiplo uso.

#### 4.2.14. Correlação entre parâmetros do estado endurecido

A análise da correlação entre as propriedades do estado endurecido será realizada através do coeficiente de Pearson, através da aplicação das expressões (26) e (27). Para isso é necessário relacionar as duas propriedades avaliadas num gráfico de dispersão, onde optou-se por fixar o parâmetro índice de vazios no eixo Y, uma vez que se entende que essa é a variável dependente. As outras propriedades foram plotadas no eixo X, por se tratarem de variáveis independentes. Por questões de simplificação, optou-se por utilizar como traços a serem analisados os TR + SX, uma vez que os traços EST apresentam relações apenas entre a argila e o resíduo de mármore tornando os gráficos mais confusos e mais carregados de informações.

Quando a tendência entre as duas variáveis é perceptível no gráfico de dispersão, o valor do coeficiente pode ser calculado a fim de verificar a relação entre as duas propriedades. A relação entre a densidade de massa no estado endurecido com o índice de vazios, ilustrada na Figura 4.8, exemplifica um caso em que as variáveis apresentam correlação negativa entre si, perceptível pelo  $r = -0,7523$ . Isso indica que, estatisticamente, quanto maior a densidade de massa no estado endurecido, menor o índice de vazios do material, o que é coerente com a discussão realizada no tópico 4.2.

A correlação não obteve valores maiores porque a densidade de massa no estado endurecido é prejudicada na moldagem dos corpos de prova, que varia em função da trabalhabilidade das argamassas. Além disso, o fato de terem sido utilizados três materiais como variável atrapalha que haja uma relação linear entre as propriedades destacadas.

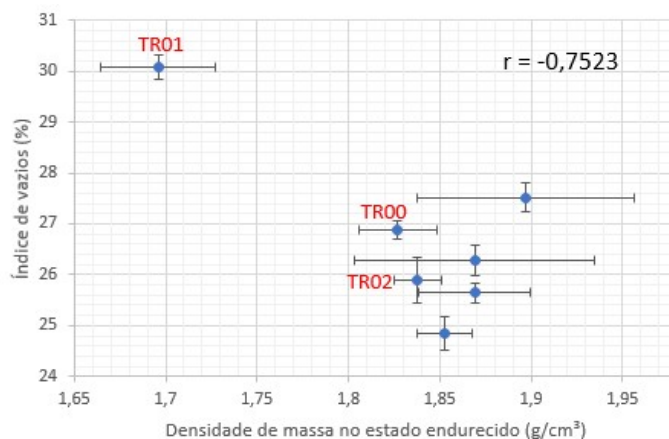


Figura 4.8 – Correlação entre índice de vazios e densidade de massa no estado endurecido.

A Figura 4.9 indica a relação entre as propriedades de resistência mecânica e índice de vazios, com um coeficiente  $r$  de Pearson de  $-0,8399$ . Isso indica que as duas propriedades apresentam boa relação e que, portanto, pode-se considerar que quanto o menor o índice de vazios de uma argamassa, maior a sua resistência mecânica, resguardados as igualdades estatísticas obtidas por ANOVA e por Tukey. Destaca-se que a relação relatada acima é muito conhecida para materiais cimentícios e, portanto, já era esperada. Conclui-se que, a respeito da resistência à compressão, vale para argamassa a mesma tendência conhecida para o concreto.

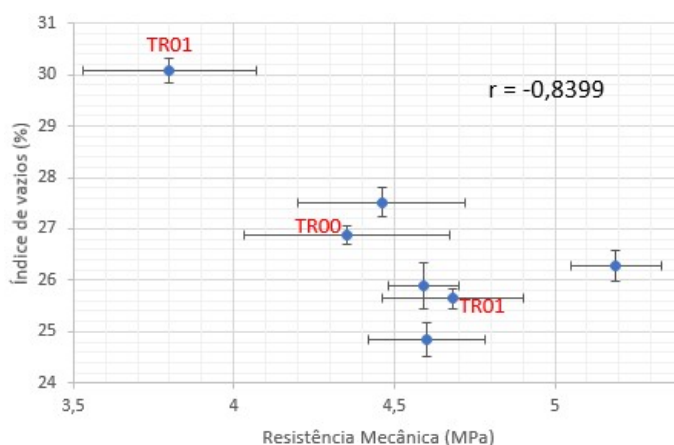


Figura 4.9 – Correlação entre índice de vazios e resistência mecânica.

A correlação entre índice de vazios e coeficiente de capilaridade é apresentada na Figura 4.10. Conforme observado pela tendência do gráfico, e com base no coeficiente de correlação de  $-0,0012$ , percebe-se que a correlação entre os dois parâmetros pode ser classificada como nula. Ou seja, as duas propriedades não interagem entre si, não tendo relação nenhuma. Isso já era esperado porque como se verifica na bibliografia e conforme foi apresentado na seção 4.2, o coeficiente de capilaridade apresenta estreita relação com os poros ativos, que são espaços presentes no interior da argamassa com diâmetro variando entre  $0,01\mu\text{m}$  e  $10\mu\text{m}$ , não apresentando uma relação direta com todos os vazios presentes nas argamassas, que usualmente apresenta maior volume de poros acima da faixa destacada. Não é porque uma argamassa apresenta altos teores de capilaridade que, conseqüentemente, a argamassa apresentará altos valores de índice de vazios, pois a distribuição do tamanho dos poros está altamente relacionada ao fenômeno da capilaridade. É possível que uma determinada argamassa apresente excessiva quantidade de poros com diâmetro acima de  $10\mu\text{m}$ , apresentando elevado índice de

vazios, mas apresenta baixa quantidade de poros entre 0,01µm e 10 µm e, por isso, não seja verificada a ocorrência de capilaridade para esse material destacado.

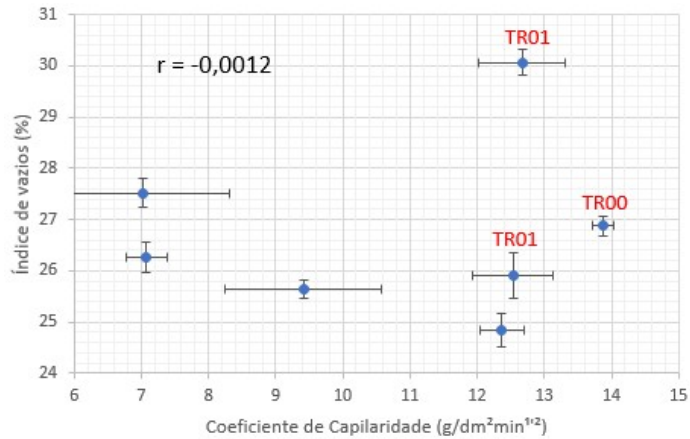


Figura 4.10 – Correlação entre índice de vazios e coeficiente de capilaridade.

Verifica-se a relação entre absorção de água por imersão e índice de vazios, conforme apresentado na Figura 4.11, com coeficiente de correlação de 0,9895, obtendo dessa forma altos valores de correlação. O resultado já era esperado uma vez que os dois parâmetros são obtidos pelo mesmo ensaio, sendo calculados pelo mesmo conjunto de dados. Mesmo assim é interessante frisar que o resultado está de acordo com a teoria apresentada para argamassas e outros materiais cimentícios, em que quanto maior o índice de vazios maior a absorção de água por imersão daquele material. Destaca-se que essa correlação ilustra um exemplo de correlação positiva, também chamada de direta.

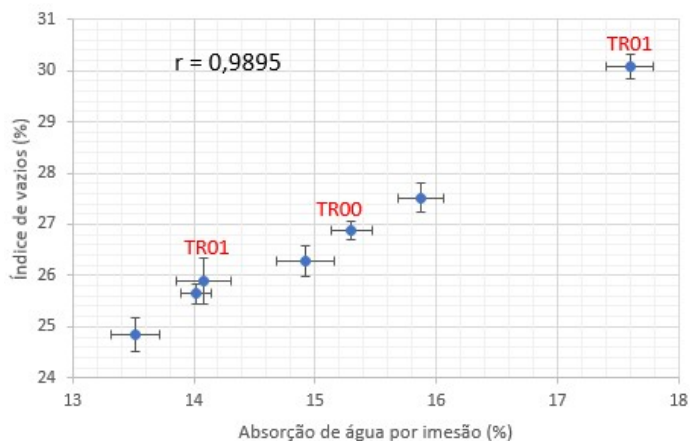


Figura 4.11 – Correlação entre índice de vazios e absorção de água por imersão.

### 4.3. Tratamento dos dados obtidos

- Utilizando como referência o trabalho de Gomes e Neves (2002)

Como abordado na metodologia, uma das formas de verificar se os traços estudados apresentaram bom desempenho em serviço é através da aplicação da metodologia de Gomes e Neves (2002), que baseou seu estudo na dosagem racional de argamassas. Os autores propuseram a aplicação de seis princípios detalhados a seguir para analisar se um determinado traço estava ou não bem dosado. A verificação da aplicação desses princípios para os traços estudados é indicada na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Validação dos princípios estipulados por Gomes e Neves (2002) nos traços estudados

Argamassa	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
TR00	CONF	CONF	CONF	CONF	CONF	CONF
TR01		NÃO			NÃO	
TR02		CONF			CONF	
SXac		CONF			CONF	
SXah		CONF			CONF	
SXch		CONF			CONF	
SXach		CONF			CONF	
EST1-1		CONF			NÃO	
EST1-2		NÃO			NÃO	
EST2-1		CONF			CONF	
EST1-3		NÃO			NÃO	
EST3-1		CONF			CONF	
EST2-3		NÃO			NÃO	
EST3-2		CONF			CONF	

Os princípios propostos pelos autores foram: (a) Teor máximo de finos (<0,075mm) de 12%; (b) Relação de adição de argilominerais em relação ao total de agregado no máximo de 5%; (c) Consumo de cimento conforme estipulado na Tabela 25; (d) Índice de consistência de 260±10 mm; (e) Teor de ar incorporado entre 6% e 17%; (f) Teor de retenção de água superior a 75%.

Algumas ponderações devem ser realizadas para analisar os critérios estipulados, conforme texto que segue:

O primeiro critério, codificado pela letra (a) avaliou o teor de finos máximo nas argamassas fixadas em 12%. O teor crítico de finos, ou seja, o maior teor de materiais

finos, foi apresentado pela argamassa TR00, uma vez que nessa argamassa utilizou-se 100% de cal hidratada como aglomerante. Como observado pela Tabela 4.1, esse aglomerante apresenta o maior teor de finos, de 96%, entre os materiais estudados. A argamassa com o maior valor do critério (a) foi a TR00, que apresentou 96% x 12,5% de finos, já que 12,5% foi a porcentagem de cal hidratada no traço de referência 1:1:6. Assim, o teor crítico obtido para as argamassas estudadas foi de 12%. Por causa disso, todas as proporções apresentam validade em relação ao parâmetro (a).

O critério (b) abordou a relação de argilominerais presentes na proporção total do material. Sabendo que apenas a argila contribui com a quantidade de argilominerais na argamassa foi necessário realizar um cálculo baseado na análise química da argila e com base nas proporções desse material em cada argamassa. Destaca-se primeiramente que como o traço base foi 1:1:6 (cimento: aglomerante: areia natural), a porcentagem máxima de argila encontrada nas argamassas foi de 12,5% no traço TR01. É interessante destacar também que os traços TR00, TR02 e SXch apresentaram 0% de argila e, conseqüentemente, 0% de argilominerais, uma vez que se utilizou apenas cal hidratada e resíduo de mármore nessas proporções.

Entende-se que a argila utilizada não é composta 100% de argilominerais, uma vez que se detectou a presença de quartzo nesse aglomerante. Como forma de simplificação será considerado que a argila apresentou 51,55% de argilominerais, já que com base na análise química desse material, presente na Tabela 4.35, o material apresentou 48,45% de SiO<sub>2</sub> atribuído ao quartzo. Em função disso, para obter a porcentagem de argilominerais presente na composição da argamassa foi multiplicado a porcentagem de 51,55% pela porcentagem de argila na composição total da argamassa. No caso do traço TR02, por exemplo, obtém-se 12,5% x 51,55% = 6,44% de argilominerais. Devido a esse teor, o traço não atende ao requisito estipulado pelo critério (b). A Tabela 4.26 a seguir auxilia a compreensão dos cálculos efetuados para cada um dos traços.

Para avaliar o consumo de cimento, especificado pelo código (c), foi realizado um cálculo estimativo como segue: foi verificado que para praticamente todas as proporções analisadas utilizou-se 150 g de cimento, 150 g de aglomerante (cal hidratada, argila, resíduo de calcário, ou mistura dos três), 900 g de areia e relação de água/material seco variando entre 0,170 a 0,208, conforme detalhado na Tabela 4.25. Essa massa foi utilizada para moldar três CP's prismáticos de 40x40x160mm.

Verifica-se que para ocupar um volume de  $7,68 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ , correspondente ao volume dos três corpos de prova moldados, foram utilizados aproximadamente 0,15 kg de cimento. Obviamente, por apresentarem densidades diferentes, determinados traços de argamassa apresentaram sobra de material, porém essa perda foi muito pequena e, portanto, o consumo de cimento avaliado corresponde a uma boa aproximação para as argamassas desta dissertação. O consumo foi encontrado dividindo 0,15 kg de cimento pelo volume ocupado na moldagem, que foi de  $7,68 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ . Assim obtém-se um consumo de  $195,3 \text{ kg/m}^3$ . Analisando os valores presentes na Tabela 3.2, verifica-se que as argamassas avaliadas apresentam consumo coerentes com as faixas para emboço e camada única de uso externo, apresentando uma faixa levemente acima do uso recomendado por Gomes e Neves (2002) para assentamento de blocos externos. Conclui-se que as argamassas avaliadas apresentam validação nesse parâmetro.

Tabela 4.26 – Cálculo da quantidade de argilominerais na composição das argamassas

Argamassa	Porcentagem de argila (%)	Fator de multiplicação (%)	Total de argilominerais calculados (%)
TR00	0	x 51,55	0
TR01	12,5		6,44
TR02	0		0
SXac	6,25		3,22
SXah	6,25		3,22
SXch	0		0
SXach	4,17		2,15
EST1-1	12,5 x 71		4,55
EST1-2	12,5 x 83		5,35
EST2-1	12,5 x 55		3,51
EST1-3	12,5 x 88		5,66
EST3-1	12,5 x 44		2,86
EST2-3	12,5 x 78		5,04
EST3-2	12,5 x 62		3,96

O critério (d) foi abordado no tópico 4.2.1, onde foi detalhado que as argamassas estudadas utilizaram uma relação de água com o intuito de obedecer ao índice de consistência especificado pela NBR 13276 (ABNT,2016), que coincide com a faixa de valores estipuladas por Gomes e Neves (2002). Todas as proporções estudos foram válidas.

O critério (e) também já foi discutido no tópico 4.2.3, enquanto o critério (f) foi detalhado no item 4.2.4. Esses parâmetros não voltaram a serem discutidos. Os traços TR01, SXach e EST2-3 foram invalidadas no critério (e) sobre teor de ar incorporado, enquanto todas as proporções atenderam ao critério (f), de retenção de água acima de 75%.

Ficam inválidas com base na pesquisa de Gomes e Neves (2002) adaptada para a presente pesquisa os traços TR01, EST1-1, EST1-2, EST1-3 e EST2-3.

Uma ponderação deve ser realizada sobre o trabalho desses autores, uma vez que eles priorizam a análise das argamassas baseando-se em parâmetros do estado fresco. No tópico a seguir será realizada a análise dos traços conforme a metodologia de Mattana *et al.* (2012), que utilizam em suas análises os principais parâmetros para argamassas, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

- Utilizando como referência a metodologia de Mattana (2012)

Primeiramente foi realizado uma análise baseada nos valores limites estipulados por Mattana *et al.* (2012) a fim de verificar se os resultados das argamassas estudadas estavam dentro dos limites estipulados pelos autores para aplicação da metodologia proposta por eles. Os ensaios avaliados, bem como os limites utilizados, foram destacados na revisão bibliográfica e são resumidos no texto a seguir:

- Densidade de massa no estado fresco: entre 1400 a 2000 kg/m<sup>3</sup>;
- Teor de ar incorporado: abaixo de 20%;
- Retenção de água: acima de 75%;
- Densidade de massa no estado endurecido: entre 1200 a 1900 kg/m<sup>3</sup>;
- Índice de vazios: abaixo de 40%, sendo que os valores do parâmetro de absorção de água por imersão não foram utilizados na análise de Mattana *et al.* (2012);
- Módulo de elasticidade: abaixo de 12 GPa, sendo que foram toleradas as argamassas com módulo teórico pouco acima desse valor;



- Resistência à compressão: entre 1,50 e 9,00 MPa, sendo que foram utilizados para análise os valores obtidos com CP's prismáticos. Os valores dos CP's cilíndricos não foram utilizados na análise pela metodologia de Mattana *et al.* (2012);

- Resistência à tração na flexão: entre 1,00 e 4,50 MPa;

- Coeficiente de capilaridade: abaixo de  $12,5 \text{ g/dm}^2\text{min}^{1/2}$ , sendo que não foram utilizados os valores obtidos pela absorção de água por capilaridade aos 90 minutos, uma vez que esse parâmetro representa o mesmo fenômeno da capilaridade;

- Aderência à tração: Mattana *et al.* (2012) estipulam que os valores devem ficar no intervalo entre 0,10 e 0,30 MPa, porém, como a NBR 13281 (ABNT, 2005) recomenda valores acima de 0,20 MPa para uso interno e 0,30 MPa para uso externo, prevaleceu o critério na norma.

Assim, tomando como base os valores contidos nas Tabelas 4.3 e 4.4, obtém-se as Tabelas 4.27 e 4.28, onde são destacados quais traços apresentaram conformidade e não conformidade com os valores estabelecidos por Mattana *et al.* (2012).

Através da análise das Tabelas 4.27 e 4.28, verifica-se que os traços invalidados foram as proporções TR00, TR01, TR02, SXch, SXach e EST3-2. As demais argamassas estudadas apresentaram valores coerentes com os intervalos propostos por Mattana *et al.* (2012).

Conforme relatado na metodologia, Mattana *et al.* (2012) utilizaram em sua pesquisa a Análise Hierárquica de Pesos (AHP) para classificar as proporções estudadas por ele numa escala de importância através da aplicação de cinco passos simples. O método dos autores foi adaptado para estudo dos traços desta dissertação, o que resultou em duas diferentes metodologias, numeradas como 1 e 2.

Tabela 4.27 – Análise da metodologia de Mattana *et al.* (2012) nos traços TR e SX.

Parâmetro	TR00	TR01	TR02	SXac	SXah	SXch	SXach
Densidade no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	CONF						
Teor de ar incorporado (%)	CONF						
Retenção de água (%)	CONF						
Densidade no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	CONF						
Resistência à tração na flexão (MPa)	CONF						
Resistência à compressão (MPa)	CONF						
Módulo de elasticidade teórico (GPa)	CONF	CONF	NÃO	CONF	CONF	NÃO	NÃO
Coefficiente de Capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	NÃO	NÃO	NÃO	CONF	CONF	CONF	CONF
Índice de vazios (%)	CONF						
Resistência de aderência (MPa)	CONF						

Tabela 4.28 – Análise da metodologia de Mattana *et al.* (2012) nos traços EST.

Parâmetro	EST1-1	EST1-2	EST2-1	EST1-3	EST3-1	EST2-3	EST3-2
Densidade no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	CONF						
Teor de ar incorporado (%)	CONF						
Retenção de água (%)	CONF						
Densidade no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	CONF						
Resistência à tração na flexão (MPa)	CONF						NÃO
Resistência à compressão (MPa)	CONF						
Coefficiente de Capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	CONF						
Índice de vazios (%)	CONF						

A primeira metodologia foi aplicada em todos os traços avaliando os parâmetros de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, teor de ar incorporado, retenção de água, densidade de massa no estado fresco e endurecido, coeficiente de capilaridade e índice de vazios. Para atingir essa finalidade foi utilizada a matriz de decisão indicada na Tabela 3.8, que apresenta a porcentagem de importância para os ensaios descritos acima. Na seção metodologia já foram realizados os passos 1 e 2 do que foi proposto por Mattana *et al.* (2012).

A aplicação do passo 3 consistiu em normatizar os resultados obtidos para os ensaios avaliados nas proporções estudadas. Para isso os resultados obtidos foram divididos pelo valor do maior parâmetro encontrado, de forma a criar uma escala de 0 a 1. A interpretação da escala deve ser realizada da seguinte maneira: quanto mais próximo de 1, melhor o desempenho da argamassa naquela propriedade. Essa definição é bem aplicada para parâmetros como resistência à compressão, resistência à tração na flexão, teor de ar incorporado e retenção de água, mas para as demais

propriedades avaliadas, a escala proposta não faria muito sentido, uma vez que quanto menor for o valor encontrado para essas propriedades, melhor o desempenho das argamassas. Para os ensaios de densidade de massa no estado fresco e endurecido, índice de vazios e coeficiente de capilaridade, foi necessário realizar uma correção da escala, que para as propriedades destacadas, foram avaliadas e normalizadas com os valores inversos.

Realizando o que foi apresentado no parágrafo anterior, obtém-se a Tabela 4.29, que apresenta a normalização dos parâmetros estudados, já considerando a inversão dos dados para os parâmetros em que isso foi necessário.

Tabela 4.29 – Parâmetros utilizados na metodologia 01 normalizados conforme Mattana *et al.* (2012)

Parâmetro	TR00	TR01	TR02	SXac	SXah	SXch	Sxach	EST1-1	EST1-2	EST2-1	EST1-3	EST3-1	EST2-3	EST3-2
Densidade no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	1,000	0,963	0,951	0,962	0,975	0,954	0,953	0,955	0,954	0,956	0,958	0,960	0,957	0,953
Peso	2,86%													
Teor de ar incorporado (%)	0,908	0,542	1,000	0,797	0,769	0,957	0,710	0,662	0,592	0,785	0,563	0,776	0,665	0,732
Peso	6,41%													
Retenção de água (%)	0,960	1,000	0,962	0,977	0,972	0,957	0,928	0,984	0,995	0,974	0,998	0,968	0,987	0,977
Peso	19,00%													
Densidade no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	0,895	0,965	0,890	0,875	0,862	0,883	0,875	0,955	0,992	0,942	1,000	0,903	0,969	0,991
Peso	4,39%													
Resistência à tração na flexão (MPa)	0,928	0,763	0,980	0,875	0,914	0,954	1,000	0,855	0,757	0,809	0,724	0,868	0,803	0,533
Peso	26,72%													
Resistência à compressão (MPa)	0,838	0,813	0,884	0,902	0,859	0,886	1,000	0,938	0,726	0,780	0,690	0,780	0,861	0,547
Peso	10,45%													
Coeficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	0,506	0,555	0,561	0,746	1,000	0,568	0,994	0,611	0,617	0,689	0,633	0,653	0,779	0,576
Peso	23,16%													
Índice de vazios (%)	0,919	0,822	0,954	0,964	0,898	0,995	0,941	0,896	0,881	0,966	0,892	1,000	0,883	0,892
Peso	7,01%													
Total (%)	82,58	76,96	86,43	87,11	92,83	85,82	95,54	82,95	78,04	82,92	77,17	83,57	84,67	69,89

Em seguida realizou-se o passo quatro, em que o peso de cada ensaio obtido na segunda etapa foi multiplicado pelos valores normalizados no terceiro passo. Também foram somadas todas as porcentagens obtidas, gerando um valor numa escala entre 0 e 100%. Afim de evitar uso de tabelas excessivas, as contas indicadas pelo passo quatro também foram apresentadas na Tabela 4.29.

O último passo da metodologia consiste em avaliar os valores obtidos. As argamassas com maiores notas foram as proporções SXach, SXah e SXac com 95,54%, 92,83% e 87,11% respectivamente. Entende-se que os valores obtidos que esses três traços apresentaram o melhor desempenho em serviço, uma vez que ao avaliar o conjunto de todas as propriedades, essas proporções apresentam os resultados mais satisfatórios. Como regra decisória para concluir se um traço poderá ou não ser aplicado como argamassa de múltiplo uso será utilizado o valor obtido pelo traço de referência contendo apenas cal hidratada, uma vez que o objetivo do estudo é criar um aditivo que substitua esse material. Assim, argamassas com mais de 82,58% são encorajadas, enquanto as que apresentarem análise hierárquica de notas abaixo desse valor são descartadas.

Em função disso, as proporções TR01, ES1-2, EST1-3 e EST3-2 são inválidas seguindo a metodologia de Mattana *et al.* (2012).

A segunda metodologia foi utilizada com o intuito de verificar a interferência de dois importantes parâmetros na Análise Hierárquica por Pesos: a aderência à tração de argamassa e o módulo de elasticidade teórico. Uma vez que não foi possível obter esses dois parâmetros para todas as argamassas avaliadas, a segunda metodologia foi utilizada na avaliação dos traços TR e SX apenas.

Os passos 1 e 2 foram realizados na seção Metodologia, sendo apresentados na Tabela 3.9, que indica a matriz de decisão para os traços avaliados pela metodologia 02, indicando o peso de cada parâmetro avaliado.

O passo 3 consistiu na normalização dos parâmetros tecnológicos obtidos sendo realizado da mesma forma que na metodologia 01. Para os parâmetros resistência à compressão, resistência à tração na flexão, aderência com o substrato, teor de ar incorporado e retenção de água, a normalização foi realizada dividindo todos os resultados obtidos pelo maior valor observado para aquele parâmetro, obtendo um valor entre 0 e 1. Não foi necessário nenhum tratamento adicional para

essas propriedades, uma vez que a relação delas é direta, ou seja, quanto maior o valor observado, melhor o desempenho da argamassa. Para as propriedades cuja lógica é o oposto, como é o caso do módulo de elasticidade teórico, das densidades, do coeficiente de capilaridade e do índice de vazios, a normatização foi realizada com os valores inversos dos resultados obtidos. Os resultados estão indicados na Tabela 4.30.

Tabela 4.30 – Parâmetros utilizados na metodologia 02 normatizados conforme Mattana *et al.* (2012)

Parâmetro	TR00	TR01	TR02	SXac	SXah	SXch	SXach
Densidade no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> )	1,000	0,963	0,951	0,962	0,975	0,954	0,953
	1,900						
Teor de ar incorporado (%)	1,000	0,597	1,101	0,878	0,847	1,054	0,782
	3,700						
Retenção de água (%)	0,960	1,000	0,962	0,977	0,972	0,957	0,928
	11,200						
Densidade no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> )	0,928	1,000	0,923	0,907	0,894	0,915	0,907
	2,600						
Resistência à tração na flexão (MPa)	0,928	0,763	0,980	0,875	0,914	0,954	1,000
	15,600						
Resistência à compressão (MPa)	0,838	0,813	0,884	0,902	0,859	0,886	1,000
	6,100						
Coeficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	0,506	0,555	0,561	0,746	1,000	0,568	0,994
	13,500						
Índice de vazios (%)	0,924	0,826	0,959	0,969	0,903	1,000	0,946
	4,100						
Módulo de elasticidade (GPa)	0,604	0,665	0,477	0,780	1,000	0,588	0,589
	13,500						
Aderência à tração (MPa)	1,000	0,990	0,679	0,971	0,954	0,710	0,757
	27,800						
Total (%)	84,93	82,08	76,55	89,12	94,91	78,54	85,43

O passo 4 consiste em unir os dois passos anteriores, onde multiplicou-se o peso de cada propriedade avaliada pelo valor normatizado daquela respectiva propriedade. Em seguida, realizou-se o somatório de todas as propriedades avaliadas, conforme Tabela 4.30, obtendo um valor entre 0% e 100%.

O passo 5 consiste na avaliação dos resultados encontrados pela Análise Hierárquica dos Pesos. Percebe-se que a inclusão dos parâmetros aderência e módulo de elasticidade nas argamassas provoca mudanças significativas nos

resultados encontrados. Tomando como referência a nota 84,93% obtida para o traço TR00, verifica-se que as proporções TR01 e TR02 são desencorajadas, além da proporção SXch.

As proporções SXah, SXac e SXach, por sua vez, apresentaram excelentes notas na AHP, alcançando 94,91%, 89,12% e 85,43%, respectivamente, e são encorajadas na utilização de argamassas de múltiplo uso.

- Utilizando como referência a análise estatística de contraste com TR00

Conforme abordado no tópico 4.2, em que foram discutidas as proporções estudadas e verificadas os contrastes em relação ao traço de referência, algumas conclusões são tomadas: sobre os parâmetros de trabalhabilidade e de ar incorporados ficam invalidadas as proporções TR01, SXch, EST1-1, EST1-2, EST1-3 e EST2-3; sobre a densidade de massa no estado fresco todos os traços ficam validados; sobre a retenção de água exclui-se o traço SXach; sobre a densidade de massa no estado endurecido todas as proporções obtiveram comportamento estatístico igual ou superior ao TR00; sobre os parâmetros de resistência mecânica invalidam-se as proporções EST3-2, EST1-3, EST1-2 e TR01; sobre o módulo de elasticidade invalidam-se as proporções TR02, SXch e SXach; sobre a capilaridade todas as argamassas obtiveram comportamento superior ao traço de referência; sobre a absorção de água por imersão e índice de vazios excluem-se os traços TR01, EST1-2, EST2-3, EST1-3 e EST3-2; e sobre a aderência com o substrato invalidam-se as proporções TR02, SXch e SXach.

Assim os traços que apresentaram desempenho igual ou superior ao traço TR00 foram SXac, SXah, EST2-1 e EST3-1. Essas argamassas são encorajadas como forma de substituição ao traço convencional com cal hidratada.

#### 4.4. Análise dos traços estudados por rede simplex

A realização da análise da região ótima foi realizada nas proporções TR00, TR01, TR02 juntamente com as proporções SX, com a utilização dos modelos linear, quadrático e cúbico simples para verificação de qual desses apresentou melhor ajuste das propriedades de durabilidade da argamassa. A análise foi realizada com auxílio do software Surfer.

A propriedade de trabalhabilidade foi avaliada através de dois ensaios: o *squeeze flow*, que por apresentar um caráter qualitativo inviabiliza a aplicação da metodologia em rede simplex; e o *flow table* que foi fixado em  $260\pm 5$  mm, impossibilitando o uso da metodologia já que todas as argamassas avaliadas apresentaram o mesmo valor numérico.

Conforme observado na AHP, os parâmetros de densidade de massa no estado fresco, teor de ar incorporado e densidade de massa no estado endurecido apresentaram pouca relevância na análise do desempenho de argamassas de múltiplo uso, e por isso essas propriedades não foram avaliadas em rede simplex.

Os parâmetros usados na metodologia foram: retenção de água, resistência mecânica através do ensaio de compressão, módulo de elasticidade, coeficiente de capilaridade, índice de vazios e aderência.

As regiões encontradas foram incluídas no Anexo III, juntamente com as tabelas de ajuste dos modelos linear, quadrático e cúbico simples. As expressões obtidas para cada um dos parâmetros considerando os três modelos analisados também são indicadas no Anexo III. Destaca-se que todos os parâmetros foram melhores ajustados pelo modelo cúbico simples. A Figura 4.12 destaca a região ótima para cada parâmetro estudados, enquanto a Figura 4.13 faz a sobreposição de todas as regiões ótimas obtidas.

Conforme é possível identificar pelas figuras destacadas, o traço SXac encontra-se localizado na região ótima, o que indica que essa proporção atende de maneira satisfatória as seis propriedades avaliadas. Embora não tenha sido destacado nas figuras, os traços EST2-1 e EST3-1 também se enquadram na região ótima da Figura 4.13, indicando que essas proporções apresentam excelente desempenho para argamassas de múltiplo uso.

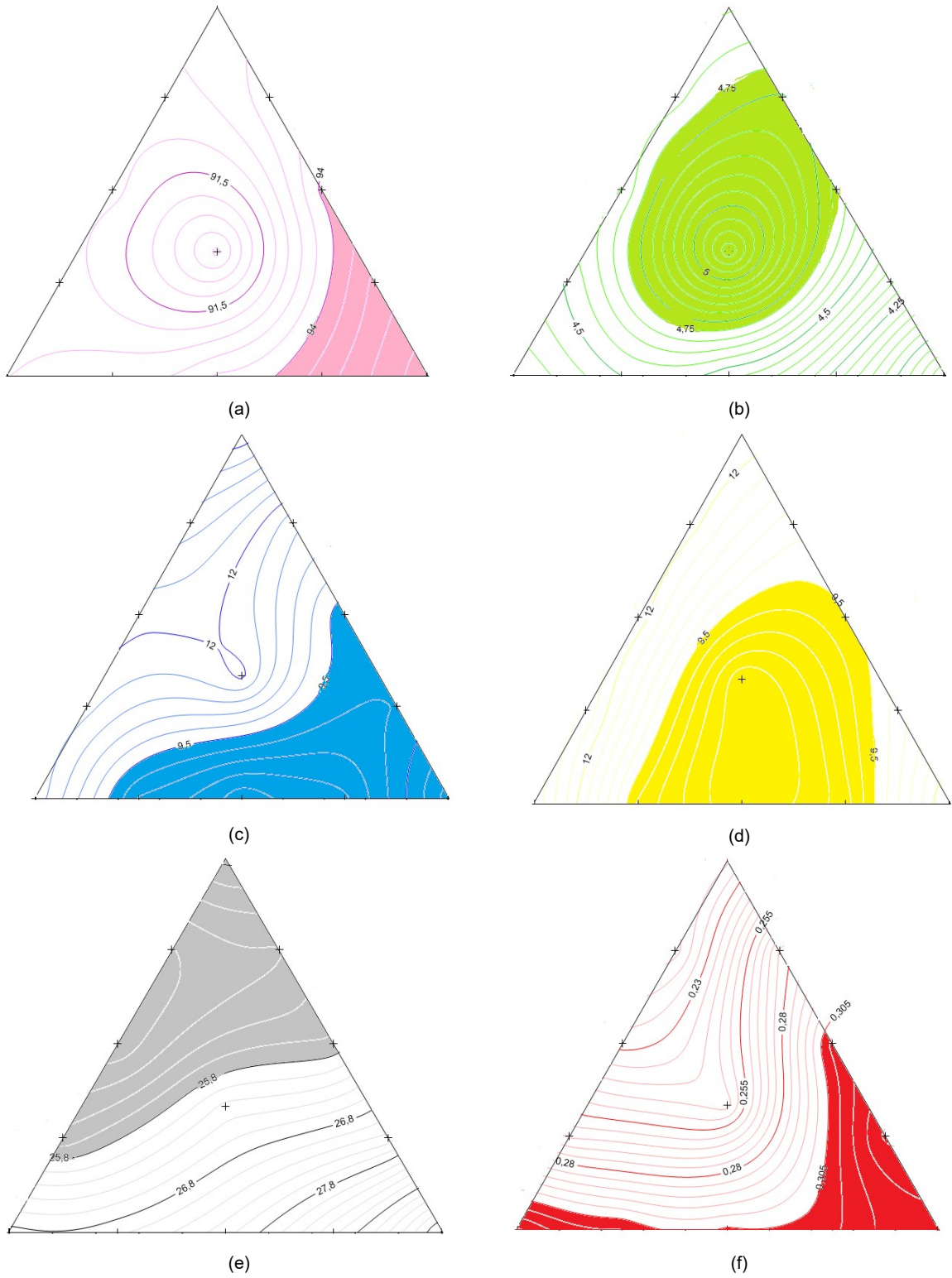


Figura 4.12 – Região ótima para os parâmetros (a) Retenção de água, (b) Resistência à compressão, (c) Módulo de elasticidade, (d) Coeficiente de capilaridade, (e) Índice de vazios e (f) Aderência com o substrato.



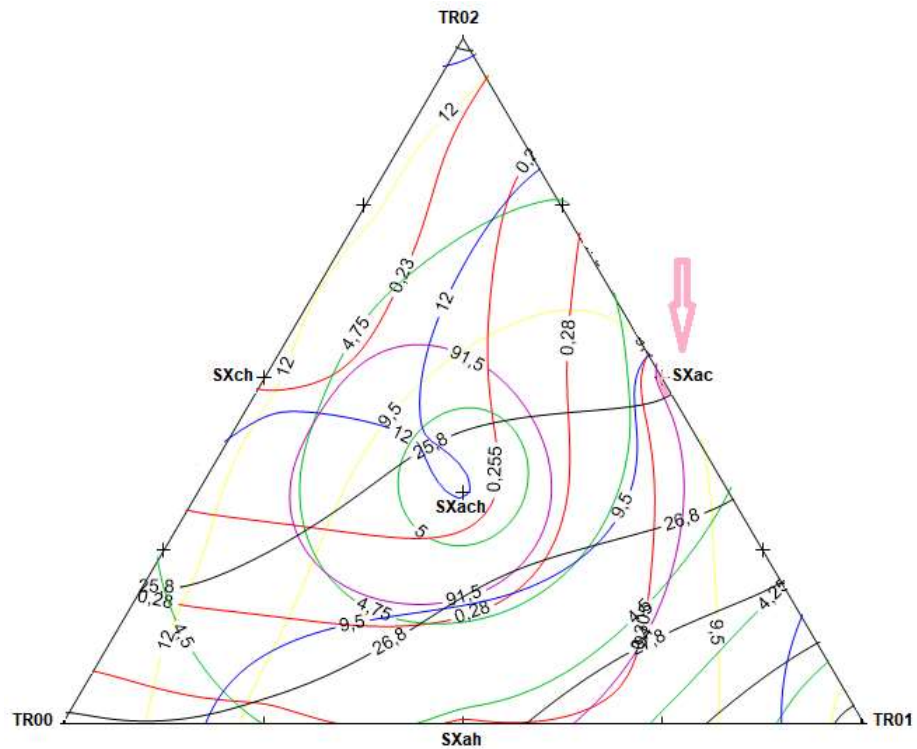


Figura 4.13 – Sobreposição das regiões ótimas obtidas pelos parâmetros avaliados.

#### 4.5. Resumo das análises realizadas

Com base em todas as metodologias propostas para verificação da possibilidade de criar um aditivo para argamassas de múltiplo uso, utilizando uma composição de argila com calcário, objetivando a substituição da cal hidratada, destaca-se:

- Pela metodologia de Gomes e Neves (2002) são válidas as proporções TR01, TR02, SXac, SXch, SXah, SXach, EST2-1, EST3-1 e EST3-2.
- Pela metodologia de Mattana *et al.* (2012) são válidas as proporções SXac, SXah, EST1-1, EST1-2, EST2-1, EST1-3, EST3-1 e EST2-3.
- Pela Análise Hierárquica de Pesos são válidas as argamassas TR00, SXac, SXah, SXach, EST1-1, EST2-1, EST3-1 e EST2-3.
- Pelo contraste de média com o traço de referência ficam validadas, além do TR00, os traços SXac, SXah, EST2-1 e EST3-1.
- Pela análise em rede simplex, a região ótima engloba as proporções SXac, EST2-1 e EST3-1.

Com base no que foi apresentado fica constatado que as argamassas SXac, EST2-1 e EST3-1 possibilitaram melhorias tecnológicas em relação ao traço TR00,

além das melhorias ambientais e econômicas já abordadas. Isso quer dizer que é possível substituir 1 parte de cal hidratada por 0,44 a 0,55 partes de argila e 0,45 a 0,56 partes de resíduo de calcário.

Salienta-se que a metodologia proposta com base no balanço estequiométrico teórico entre cargas de argila e resíduo de mármore mostra-se adequado, em função dos traços EST2-1 e EST3-1 obtidos como resultados possíveis.

#### 4.6. Análise financeira dos custos do cimento e da cal hidratada.

Uma análise financeira dos custos do aglomerante cal hidratada foi realizada, seguindo a mesma metodologia do trabalho de Junior *et al.* (2006). O grande objetivo dessa análise foi de demonstrar que o preço da cal hidratada (aglomerante substituído) causa um grande impacto no preço final das argamassas, uma vez que conforme destacado pelos autores o preço/kg da cal hidratada chega a ser maior que o preço/kg do cimento.

Para a realização dessa comparação foram orçados o preço de 1 saco de 20 kg de cal hidratada CH-III da marca utilizada na confecção das argamassas estudadas nesta dissertação, bem como o preço de 1 saco de 50 kg de cimento Portland CPII-E-32, também respeitando a marca utilizada nesta dissertação, em três materiais de construção distintos da cidade de Campos dos Goytacazes, local onde foi realizada essa pesquisa. A Tabela 4.31 apresenta os resultados obtidos na análise.

Tabela 4.31 – Preço do cimento e da cal hidratada em diferentes materiais de construção da cidade de Campos dos Goytacazes

Material analisado		Material de Construção I	Material de Construção II	Material de Construção III	Média do preço
Cal hidratada CHIII	Preço do saco de 20 kg	10,90	12,25	11,90	-
	Preço/kg	0,545	0,612	0,595	0,584
Cimento Portland CPII-E-32	Preço do saco de 50 kg	22,50	18,95	20,75	-
	Preço/kg	0,45	0,379	0,415	0,415

Analisando a Tabela 4.31 é fácil perceber que o preço/kg médio do cimento na cidade de Campos foi de 0,415, enquanto o da cal hidratada foi de 0,584. Isso

comprova a teoria apresentada durante a dissertação de que a cal hidratada causa um grande impacto no preço final da argamassa, sendo um dos responsáveis para esse material de construção constituir um dos elementos mais caros dentro de uma obra de construção civil. Embasado nestes valores é possível comprovar que a criação do aditivo proposto, com uso de argila e resíduo de mármore, apresenta grande vantagem econômica.

Apenas para ilustrar o fato destacado, no traço 1:1:6 com cal hidratada, a cada 1kg de argamassa usa-se 125g desse aglomerante, o que representa em média um gasto de  $0,125 \times 0,584 = 0,073$  reais. Dessa maneira, a cada 1kg de argamassa, utilizando o aditivo proposto, seriam economizados 7,3 centavos. Pode parecer pouco, mas se for considerada a quantidade de argamassa utilizada para uma obra de médio porte, verifica-se que a econômica com o material será real.

Destaca-se, por fim, que para resultados mais conclusivos a respeito do impacto econômico da criação do aditivo contendo argila e resíduo de mármore seria necessário calcular os custos relativos ao transporte dos dois materiais citados, uma vez que a argila estudada encontra-se na cidade de Campos dos Goytacazes-RJ e o resíduo é proveniente da cidade de Cachoeiro de Itapemirim-ES.

## 5. Conclusões

As principais conclusões desta dissertação são apresentadas nos tópicos a seguir:

- Sobre a caracterização física dos aglomerantes estudados, verificou-se que a cal hidratada e o resíduo de mármore apresentaram análise granulométrica relativamente próxima, e que a argila apresentou partículas muito mais grosseiras que os dois materiais avaliados. Esse fato mostrou-se um problema em algumas das propriedades avaliadas para as argamassas. Sobre o teor de finos ( $<0,075\text{mm}$ ), verificou-se que o resíduo de mármore e a cal hidratada apresentam teores de finos próximos, respectivamente de 95% e 97%. A argila por sua vez apresentou menor teor de finos, com 74%. O grande problema encontrado na caracterização física do resíduo foi a ausência de plasticidade verificado para o material, o que impactou a capacidade de aderência das argamassas confeccionadas com esse aglomerante. A argila e a cal hidratada apresentaram teores de plasticidade próximos, sendo que o IP encontrado para os dois materiais foi de 23,5% e 26,3%, nessa ordem. Por fim, a massa específica dos três materiais comprovou que a cal hidratada foi o aglomerante mais leve utilizado, seguido pela argila e pelo resíduo de mármore.

- Sobre a caracterização química e mineralógica dos aglomerantes estudados, verificou-se que a cal hidratada apresentou como principais minerais portlandita e calcita com 94,7% de CaO. Já o resíduo de mármore apresentou como principais minerais a calcita e a dolomita, possuindo 70,21% de CaO e 10,56% de MgO. Isso indica que ambos materiais apresentam certa similaridade do ponto de vista químico e mineralógico, o que já era esperado pela consulta da bibliografia. A argila, por sua vez, apresentou como principais minerais a caulinita e o quartzo, conforme verificado pela bibliografia para a argila da baixada campista, apresentando ainda 48,45% de  $\text{SiO}_2$  e 28,45% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Isso indica que a argila não apresenta boa relação química e mineralógica com o aglomerante a ser substituído. Destaca-se que a análise química dos três materiais se mostrou coerente com a análise mineralógica obtida.

- Sobre o ensaio de consistência padronizou-se que todas as proporções estudadas teriam o mesmo índice de consistência de  $260 \pm 5$  mm, conforme recomendação na norma que prescreve o ensaio. Em função disso a argamassa que precisou dos maiores teores de água foi o TR01, traço contendo como aglomerante apenas argila, enquanto a proporção TR02, com resíduo de mármore como aglomerante unitário, necessitou das menores quantidades de água para manter o

índice de consistência proposto. Isso levou a uma discussão a respeito da trabalhabilidade das argamassas, uma vez que alguns autores consideram que argamassas com mesmos índices de consistência apresentam a mesma trabalhabilidade, enquanto outros autores consideram que quanto maiores os teores de água necessários para a argamassas, pior a trabalhabilidade da argamassa em questão. Essa informação foi comprovada pelo ensaio de *squeeze flow*. Destaca-se que o fato da argamassa TR01 ter necessitado de maior quantidade de água pode ser atribuído a presença de argila com partículas mais grosseiras, e a característica que esse material apresenta em função da estrutura dos argilominerais que compõe o material. Entre os traços estequiométricos os que apresentaram os maiores teores de água foram EST1-2 e EST1-3, justamente os com maiores teores de argila.

- A respeito do ensaio de *squeeze flow*, verificou-se que o uso da maior velocidade de ensaio (3mm/s) prescrita pela norma é mais efetiva na comparação entre os traços estudados, enquanto a velocidade mais baixa (0,1mm/s) mostrou-se uma análise mais conservadora. A avaliação do ensaio comprovou que, de fato, a proporção TR01 apresenta os piores índices de trabalhabilidade, enquanto a proporção TR02 apresenta os melhores índices desse parâmetro, tirando dessa maneira a dúvida levantada pelo ensaio de *flow table*. Os traços EST1-2 e EST1-3 apresentaram parâmetros de trabalhabilidade ruins conforme esperado pelo ensaio de *flow table*.

- Analisando a densidade de massa no estado fresco, verificou-se que a menor densidade entre os traços TR e SX foi obtida pelo TR00, sendo 1886,0 kg/m<sup>3</sup>, e que a maior densidade foi obtida pelo TR02 com 1983,3 kg/m<sup>3</sup>. Verifica-se, dessa maneira, uma relação com a massa específica obtida para os materiais cal hidratada e argila, que apresentaram o menor e o maior valor dessa propriedade. O aumento provocado pela densidade foi de 4 a 5% em relação ao TR00, destacando que essa propriedade não foi prejudicada. Analisando o teor de ar incorporado, verifica-se que o traço TR01 apresentou o menor teor de ar incorporado, com 4,84% e o traço TR00 apresentou o maior teor de ar incorporado com 8,93%. Entre os traços EST, todas as proporções apresentaram teor de ar incorporado relativamente parecido. Verifica-se, dessa maneira, que os tratamentos propostos foram efetivos, uma vez que foram obtidos traços com maior teor de ar incorporado que o TR00, mostrando melhorias nessas propriedades. Os valores foram comparados aos obtidos por outros pesquisadores e

apresentaram coerência de dados. Todas as argamassas respeitaram o limite máximo de densidade de 2000 kg/m<sup>3</sup> e teor de ar incorporado abaixo de 20%.

- Sobre a retenção de água, verificou-se que todas as proporções analisadas apresentaram altos parâmetros de retenção de água, na ordem de 90% a 95%. A argamassa SXach foi a única que apresentou retenção abaixo de 90%. Todas as proporções apresentaram desempenho adequado, uma vez que o limite mínimo utilizado na pesquisa foi de 75% e todas apresentaram retenção acima desse valor.

- A respeito da densidade de massa no estado endurecido verificou-se através de ANOVA e Tukey ( $p \leq 0,05$ ) que os traços EST1-3, EST1-2, EST3-2, EST2-3, TR01 e EST1-1 apresentaram as menores densidades, indicando os melhores desempenhos nessas propriedades, enquanto os traços EST3-1, TR00, TR02, SXch, SXac, SXach e SXah apresentaram os valores mais altos de densidade. Todas as proporções tendem ao limite de 1900 kg/m<sup>3</sup> utilizado nesta dissertação.

- A respeito da resistência à tração na flexão verificou-se que as proporções SXach, TR02, SXch, TR00, SXac, SXah, EST3-1, EST1-1, ES2-1 e EST2-3 apresentaram os melhores desempenhos nessa propriedade com base na ANOVA e Tukey ( $p \leq 0,05$ ) e que os traços TR01, EST1-2, EST1-3 e EST3-2 apresentaram piores desempenhos nessa propriedade, devendo ser evitados. O limite mínimo utilizado nessa pesquisa de 1,0 MPa não foi atingido por nenhuma das proporções estudadas.

- A respeito da resistência à compressão em CP's prismáticos, verificou-se pela ANOVA e pelo Teste de Tukey que as argamassas SXach, SXac, SXch, TR02, EST2-3, SXah e TR00 apresentaram os melhores desempenhos enquanto os traços TR01, EST1-2, EST1-3, EST3-2 apresentaram novamente os piores desempenhos, reforçando a conclusão encontrada com base na análise da resistência à tração na flexão. Todas as argamassas obtiveram resistência superior a 1,50 MPa, sendo consideradas satisfatórias.

- Sobre o módulo de elasticidade teórico calculado com base no ensaio de compressão em CP's prismáticos, verificou-se que as argamassas SXah e SXac apresentaram os menores valores de módulo de elasticidade, demonstrando as melhores capacidades de acomodação de deformação, indicando os melhores desempenhos. O pior resultado foi obtido pelo traço TR02, com 14,98 GPa. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato do resíduo de calcário não ter

apresentado plasticidade, dando origem a argamassas mais rígidas. O valor limite de 12 GPa, utilizado nesta pesquisa, não foi atendido pela argamassa destacada, que foi invalidada.

- Sobre o ensaio de compressão em CP's cilíndricos e sua relação com o ensaio de compressão em CP's prismáticos, verificou-se que os resultados obtidos para as duas geometrias não são equivalentes, sendo que com os CP's cilíndricos observou-se maior dispersão de dados. Esse fato foi atribuído as dificuldades de moldagem dos CP's em função da fôrma utilizada, dificuldade essa não encontrada pela fôrma dos CP's prismáticos. Dessa forma, a argamassa com menor trabalhabilidade (TR01) apresentou maior dificuldade de moldagem e menor valor de resistência, enquanto argamassas mais trabalháveis, como TR00, TR01 e SXac, apresentaram valores relativamente maiores de resistência à compressão.

- No ensaio de capilaridade, utilizando as análises por ANOVA e Tukey ( $p \leq 0,05$ ), observou-se que, para o parâmetro coeficiente de capilaridade, os piores resultados foram obtidos pelas proporções EST1-2, EST1-1, EST3-2, SXch, TR02, TR01 e TR00, enquanto para o parâmetro absorção de água por capilaridade aos 90 minutos os piores resultados foram encontrados para as proporções SXch, EST1-2, EST1-3, EST1-1, TR02 e TR01. Percebe-se que a proporção TR01 apresenta resultados ruins para o coeficiente de capilaridade, mas não tão ruins para a absorção aos 90 minutos. Isso pode ser justificado pelo fato da capilaridade nesse traço apresentar valores mais expressivos transcorridos 10 minutos de ensaio, destacando que o traço TR01 apresenta significativa quantidade de poros ativos, porém esses poros têm diâmetro maiores do que os das outras proporções, uma vez que a argila apresenta as partículas mais grosseiras entre os aglomerantes avaliados. Os melhores desempenhos no coeficiente de capilaridade foram obtidos pelas argamassas SXah, SXach, EST2-3, SXac enquanto na absorção de água aos 90 minutos foram obtidos pelas mesmas proporções, com acréscimo do traço EST3-1. Destaca-se que as proporções TR00, TR01 e TR02 apresentaram coeficiente de capilaridade acima de  $12,5\text{g}/\text{dm}^2\text{min}^{1/2}$ , limite máximo estipulado nesta dissertação, apresentando desempenho inadequado à capilaridade.

- Sobre o ensaio de absorção de água por imersão, obtêm-se dois coeficientes: o teor de absorção de água por imersão, em que os traços SXch, EST3-1, EST2-1, SXac e TR02 apresentaram os menores teores e, portanto, os melhores desempenhos, ao

passo que as proporções EST1-2 e TR01 obtiveram os piores desempenhos, e o parâmetro índice de vazios. Esse segundo parâmetro apresentou melhor desempenho pelos traços EST3-1, SXch, EST2-1, SXac, TR02 e SXach, e pior desempenho com o traço TR01, com teor de vazios de 30,07%. A justificativa para o traço contendo apenas argila ter apresentado o maior índice de vazios pode ser encontrada na análise granulométrica desse material que apresentou as partículas mais grosseiras. Destaca-se que todos os traços apresentaram teor de vazios abaixo de 40%, valor limite estipulado para essa propriedade neste trabalho.

- Foram realizadas algumas correlações destacadas a seguir: entre os parâmetros de índice de vazios e densidade de massa no estado endurecido, em que se percebeu que maiores densidades representam menores números de vazios; entre índice de vazios e resistência à compressão, em que foi concluído que à medida que o material apresenta um maior teor de vazios, sua resistência mecânica cai, mesma tendência verificada em outros materiais cimentícios; entre índice de vazios e coeficiente de capilaridade, em que detectou-se a falta de relação entre os dois parâmetros, já que a capilaridade se relaciona apenas com os poros ativos do material, e não com todos os vazios presentes no material; e entre índice de vazios e absorção de água por imersão, onde concluiu-se que os dois parâmetros apresentam forte correlação, já que a medida que uma propriedade aumenta a outra também apresenta acréscimo. Essa última correlação pode ser justificada pelo fato dos dois parâmetros serem obtidos pelo mesmo ensaio. As correlações foram testadas pelo parâmetro de Pearson.

- No ensaio de aderência verificou-se que todas as argamassas ensaiadas podem ser utilizadas pelo menos em uso interno, já que todas as resistências obtidas foram acima de 0,20 MPa. Verificou-se que a falta de plasticidade do resíduo de mármore provocou prejuízos à aderência desse material ao substrato, conforme observado pelos valores obtidos pelo traço TR02 no ensaio e por um questionário aplicado ao operário que realizou os ensaios. A argamassa contendo em sua composição apenas argila (TR01) apresentou bons parâmetros de aderência, bem como a argamassa apenas com cal hidratada (TR00), que obteve os maiores índices nesse ensaio. O traço SXac também apresentou resultados muito satisfatórios, apresentando resistência de 0,312 MPa. O questionário aplicado comprovou os resultados obtidos no ensaio de aderência.



- A primeira metodologia utilizada para verificação das proporções estudadas foi baseada no trabalho de Gomes e Neves (2002), em que os autores utilizam como parâmetros o teor máximo de finos (<0,075mm) limitado em 12%, a adição de argilominerais limitada em 5%, consumo de cimento das argamassas, o índice de consistência em  $260 \pm 10$ mm, o teor de ar incorporado entre 6% e 17% e a retenção de água superior a 75%. Aplicando essa metodologia, focada nos parâmetros do estado fresco, as proporções TR01, EST1-1, EST1-2, EST1-3 e EST2-3 não são recomendadas para argamassas de múltiplo uso.

- A segunda metodologia utilizada foi a comparação com os limites estipulados por Mattana *et al.* (2012). Não são recomendadas as proporções TR00, TR01, TR02, SXch, SXach e EST3-2. Através da Análise Hierárquica de Pesos (AHP) aplicada em duas metodologias invalidam-se as argamassas TR01, TR02, SXch, EST1-2, EST1-3 e EST3-2, que obtiveram notas menores que o traço de referência.

- Através da análise da rede simplex dos parâmetros retenção de água, resistência à compressão, módulo de elasticidade, coeficiente de capilaridade, índice de vazios e aderência verificou-se que as proporções SXac, EST2-1 e EST3-1 enquadram-se na região ótima de sobreposição de todos esses parâmetros.

Assim, a conclusão final desta dissertação, é que argamassas contendo apenas argila em sua composição como aglomerante são desencorajadas, uma vez que essas argamassas apresentam problemas de trabalhabilidade e excessivo índice de vazios, o que compromete seu desempenho em serviço. Argamassas contendo apenas resíduo de mármore também não são recomendadas, uma vez que ficou constatado que mesmo apresentando bons parâmetros de resistência e de trabalhabilidade, essas argamassas apresentaram problemas de aderência com o substrato e na capacidade de absorver deformações.

Sobre o aditivo, que é o objetivo desta dissertação, pode-se destacar que a argamassa SXac, e as argamassas EST2-1 e EST3-1, indicam as proporções mais indicadas, já que além de gerar vantagens econômicas e ambientais, proporcionam melhorias tecnológicas. Assim, a cada 1 parte de cal hidratada na argamassa é possível substituir por 0,44 a 0,55 partes de argila e 0,45 a 0,56 partes de resíduo de calcário.

## 6. Sugestões para trabalhos futuros

Em função do que foi apresentado, algumas sugestões são feitas para verificações em trabalhos futuros:

- Verificação da interferência da granulometria da argila e do resíduo de calcário estudado nas propriedades das argamassas, uma vez que nesta dissertação foi fixada como referência o material passante na peneira #100;

- Verificação da metodologia utilizada em outras proporções de argamassa, tomando como referência por exemplo o traço 1:2:9 (cimento: aglomerante: areia);

- Verificação da interferência do uso de outros tipos de materiais nos parâmetros tecnológicos das argamassas, podendo ser variado o tipo de cimento empregado (CP-III, CP-IV, CP-V), o tipo de cal hidratada utilizada (CH-I ou CH-II), o tipo de agregado miúdo (usar areia de britagem em vez de areia natural, por exemplo), ou ainda variar o tipo de argila analisada, retirando o material de outra jazida;

- Realizar a instrumentação dos corpos de prova com o objetivo de obter as deformações sofridas por eles e calcular o módulo de elasticidade real das proporções analisadas, comparando com os módulos de elasticidade teóricos utilizados nesta dissertação.

## 7. Referências Bibliográficas

ABIROCHAS (2017) *Relatório Anual e Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2016*, Associação Brasileira de Rochas, pg. 1-13.

AGUILAR, R; MONTESINOS, M.; UCEDA, S. (2017) *Mechanical characterization of the structural componentes of Pre Columbian earthen monuments: Analysis of bricks and mortar from Huaca de la Luna in Perú*, Case Studies in Construction Materials, v.6, p. 16-28.

ALEXANDRE, J. (2000) *Análise de Matéria-Prima e Composições de Massa utilizada em cerâmicas vermelhas*, Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

AL-MULALI, M. Z.; AWANG, H.; KHALIL, H.P.S.A.; ALJOURNALY, Z. S. (2015) *The incorporation of oil palm ash in concrete as a means of recycling: A review*, Cement & Concrete Composites 55 (2015) 129–138.

ANDRES, D. M.; MANEA, D.L.; FECHETE, R.; JUMATE, E. (2016) *Clay Mortar Performance Improvement by Modifying the Physical Characteristics of Wheat Straw*, Procedia Technology, v. 22, p. 335-342.

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, v. 77, p. 472-478.

AREIAS, I.O.R.; VIEIRA, C.M.F.; MANHÃES, R.S.T.; INTORNE, A.C. (2017) *Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha*, Cerâmica 63 (2017) 343-349.

AREL, H.S. (2016) *Recyclability of waste marble in concrete production*, Journal of Cleaner Production 131 (2016) 179-188.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984) Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm: determinação da massa específica. Método de ensaio: NBR 6508. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2003) Cal hidratada para argamassas - Requisitos: NBR 7175. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água: NBR 13277. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (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.

\_\_\_\_\_. (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.

\_\_\_\_\_. (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido: NBR 13280. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos: NBR 13281. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (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.

\_\_\_\_\_. (2007) Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 5739. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2009) Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica: NBR 9778. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2010) Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração: NBR 13528. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2010) Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*: NBR 15839. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2016) Determinação do limite de liquidez - Método de ensaio: NBR 6459. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2016) Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2016) Determinação do limite de plasticidade - Método de ensaio: NBR 7180. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2016) Análise Granulométrica - Solo: NBR 7181. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. (2016) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e 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, 148, 59–368.

BASTOS, P.K.X., COUTO, M.L. (2009) *Influência de condições de produção de argamassas em obras na classificação segundo a NBR 13281*, VII SBTA, p. 22-33.

BERTHONNEAU, J.; HOOVER, C.G.; GRAUBY, O.; BARONNET, A.; PELLENQ, R. J.-M.; ULM, F.J. (2017) *Crystal-chemistry control of the mechanical properties of 2:1 clay minerals*, Applied Clay Science, v. 143, p. 387-398.

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, v.15, n.6, p.639–645.

BOROZNOVSKAYA, N.N.; ZYRYANOVA, L.A.; KORNEVA, A.P. NEBERA, T.S.; IVANOVA, M.O. (2017) *Crystallochemical aspect of clay and clayish matter minerals luminescence*, Applied Clay Science 145, 11–16.

BUYUKSAGIS, I.S.; UYGUNOGLU, T., TATAR, E. (2017) *Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar*, Construction and Building Materials 154, 734–742.

CANDIDO, V.S., PINHEIRO, R.M., MONTEIRO, S.N., VIEIRA, C.M.F. (2013) *Desenvolvimento de adoquim cerâmico com argilas caulínicas, chamote e argilito*, Cerâmica 59 (2013) 310-316.

CARASEK, H. (2004) *Patologia das Argamassas de Revestimento*, Livro Materiais de Construção, Volume 01, IBRACON.

CARASEK, H., ARAÚJO, R.C., CASCUDO, O., ANGELIN, R. (2016) *Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento*, Revista Matéria, v.31, nº3, 714-732.

CARASEK, H. (2017) *Argamassas*, Livro Materiais de Construção, capítulo 26, Volume 01, IBRACON, 8ª Edição.

CARDOSO, F.A., PILEGGI, R.G., JOHN, V.M. (2010) *Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização*, 1ª edição, CONSITRA.

CARVALHO, J. D. N. (2008) *Sobre as origens e desenvolvimento do concreto*, Revista Tecnológica, v.17, p. 19-28.

CASTRO, T.R., MARTINS, C.H. (2016) *Avaliação da adição de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em argamassas mistas*, Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 137-151.

- CHEN, Q., ZHU, R., FU, H., MA, L. (2018) *From natural clay minerals to porous silicon nanoparticles*, *Microporous and Mesoporous Materials* 260 (2018) 76–83.
- 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 J. Chem. Eng.*, 34(5), 1385-1392.
- CONTE, A. M.; CORDA, L.; ESPOSITO, D.; GIORGI, E. (2017) *Characterization of mortars from the medieval Abbey of Cerrate (southern Italy)*, *Journal of Archaeological Science: Reports*, v. 12, p. 463-479.
- CORINALDESI, V., MORICONI, G., NAIK, T.R. (2010) *Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete*, *Construction and Building Materials* 24, 113–117.
- COUTINHO, N.C., VIEIRA, C.M.F. (2016) *Caracterização e Incorporação de cinza de resíduo sólido urbano em cerâmica vermelha*, *Cerâmica* 62, 249-255.
- 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* 138, 204–213.
- DANTAS, A.P.A., ACCHAR, W., LEITE, J.Y.P., ARAÚJO, F.S.D. (2010) *Utilização de resíduos de rochas ornamentais na produção de cerâmica branca*, *Holos*, Ano 26, Vol 1.
- DESTEFANI, A.Z., HOLANDA, J.N.F. (2011) *Utilização do planejamento experimental em rede simplex no estudo de resíduo de rocha ornamental como filler para obtenção de máxima compactidade*, *Cerâmica* 57, p. 491-498.
- DOWLING, A., O'DWYER, J., ADLEY, C.C. (2015) *Lime in the limelight*, *Journal of Cleaner Production* 92 (2015) 13-22.
- ELSEN, J. (2006) *Microscopy of historic mortars—a review*, *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 1416–1424.
- ERGÜN, A. (2011) *Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete*, *Constructions and Buildings Materials*, 25, 806-812.

FIGUEIREDO, M.G., VARUM, H., COSTA, A. (2011) *Caracterização das técnicas construtivas em terra edifi cadas no século XVIII e XIX no centro histórico de São Luís (MA, Brasil)*, Arquitetura Revista, Vol. 7, n. 1, p. 81-93.

GAMA, A.J.A., FIGUEIREDO, J.M.R., CARTAXO, J.M., GAMA, M.A., NEVES, G.A., FERREIRA, H.C. (2017) *Influência das variáveis de processo do hidrociclone para tratamento de argilas esmectíticas*, Cerâmica 63, 336-342.

GARCÍA-ESPARZA, J.A., PARDO, F., PALMERO, L.M. (2017) *A multi-analysis characterization of medieval and vernacular coating mortars is rural Valencia (Spain)*, Journal of Cultural Heritage.

GEORGE, P.A.O., GUTIÉRREZ, A.S., MARTÍNEZ, J.B.C., VANDECASTEELE, C. (2010) *Cleaner production in a small lime factory by means of process control*, Journal of Cleaner Production 18,1171-1176.

GOMES, F. G. (1987) *Curso de Estatística Experimental*, 12ª edição.

GOMES, M.I., GONÇALVES, T.D., FARIA, P. (2012) *Evaluación de la influencia del contenido de agua en la trabajabilidad del mortero de tierra*, Apuentes, vol. 25, nº2, 258-277.

GOMES, A.O., NEVES, C.M.M. (2002) *Proposta de método de dosage racional de argamassas contendo argilominerais*, Ambiente Construído, v.2, n.2, 19-30.

GUTIÉRREZ, A.S., CANEGHEM, J.V., MARTÍNEZ, J.B.C., VANDECASTEELE, C. (2012) *Evaluation of the environmental performance of lime production in Cuba*, Journal of Cleaner Production 31 (2012) 126-136.

HAMIDI, S., MARANDI, S.M. (2018) *Clay concrete and effect of clay minerals types on stabilized soft clay soils by epoxy resin*, Applied Clay Science 151, 92–101.

JUNIOR, L.P., BRENNAND, F., SILVA, A.J.C., OLIVEIRA, R.A. (2006) *Estudo sobre a qualidade da cal produzida em Pernambuco e suas influências nas argamassas*, Ambiente Construído, v. 11, p.4299-4308.

KALAITZAKI, P.M., BAKILAS, A., KARATASIOS, I., KILIKOGLU, V. (2005) *Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete*, Cement and Concrete Research 35, 1577–1586.

- KAZMIERCZAK, C.S., ROSA, M., ARNOLD, D.C.M. (2016) *Influência da adição de filler de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento*, Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 7-19.
- LIMA, J. (2013) *O contributo das argamassas de barro para a qualidade do ambiente interior dos edifícios: o caso das argilas do sotavento algarvio*, 2º Congresso Internacil de Habitação no espaço Lusófono, 1-11.
- MATIAS, G., FARIA, P., TORRES, I. (2014) *Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review*, Construction and Building Materials 73, 125–136.
- 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, v. 12, n. 4, p. 63-79.
- MOLNAR, L.M., MANEA, D.L. (2016) *New Types of Plastering Mortar Based on Marble Powder Slime*, Procedia Technology 22, 251 – 258.
- MOTTA, J.M.F., OLIVEIRA, R.A., CARNEIRO, A.M.P. (2016) *Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria*, Revista Matéria, v. 21, nº4, pg. 1105-1116.
- MORAIS, D.M., SPOSTO, R.M. (2017) *Propriedades Tecnológicas e Mineralógicas das Argilas e suas Influências na Qualidade de Blocos Cerâmicos de Vedação que Abastecem o Mercado do Distrito Federal*, Cerâmica Industrial, 11, 35-38.
- NDZANA, G.M., HUANG, L., WANG, J.B., ZHANG, Z.Y. (2018) *Characteristics of clay minerals in soil particles from an argillic horizon of Alfisol in central China*, Applied Clay Science 151, 148–156.
- NEHDI, M.L. (2014) *Clay in cement-based materials: Critical overview of state-of-the-art*, Construction and Building Materials 51, 372–382.
- OLIVEIRA, R. A.; REGO, W.A.; FERREIRA, S. R. M.; MOTA, J. M. F. (2009) *Manifestações patológicas em revestimentos de argamassas com saibros*, X COMPAT – Chile.
- OLIVEIRA, H.A., SANTOS, C.P., OLIVEIRA, R.M.P.B., JESUS, E., MACEDO, Z.S. (2017) *Avaliação do potencial de argilas de Sergipe e Alagoas na produção de agregados para uso em concreto*, Cerâmica 63, 318-328.



- PAIVA, S.C, GOMES, E.A.O, OLIVEIRA, R.A. (2007) *Controle de qualidade da cal para argamassas - metodologias alternativas*, Revista Ciência e Tecnologia, vol.1, 1-11.
- PALOMAR, I., BARLUENGA, G., PUENTES, J. (2015) *Lime–cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance*, Construction and Building Materials 75, 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 139, 334–341.
- PALOMAR, I., BARLUENGA, G. (2018) *A multiscale model for pervious lime-cement mortar with perlite and cellulose fibers*, Construction and Building Materials 160,136–144.
- QUARCIONI, V.A., ZUQUIM, M.P.S., MENEZES, P.M.L., CHOTOLI, F.F. (2011) *Caracterização microestrutural de argamassas selecionadas de cimento e cales hidratadas cálcica e dolomítica por microscopia óptica*, IX SBTA, p. 22-37.
- RAMOS, I.S., ALEXANDRE, J., ALVES, M.G., VOGEL, V., GANTOS, M. (2008) *A indústria cerâmica vermelha de Campos dos Goitacazes e a inclusão social das artesãs da baixada campista através do projeto Caminhos de Barro*, Cerâmica 54, 280-286.
- SCHJONNING, P., MCBRIDE, R.A., KELLER, T., OBOUR, P.B. (2017) *Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents*, Geoderma 286, 83–87.
- SCHMID, T., DARIZ, P. (2016) *Chemical imaging of historical mortars by Raman microscopy*, Construction and Building Materials 114, 506–516.
- SHAIKH, S.M.R., NASSER, M.S., HUSSEIN, I., BENAMOR, A. (2017) *Influence of polyelectrolytes and other polymer complexes on the flocculation and rheological behaviors of clay minerals: A comprehensive review*, Separation and Purification Technology 187, 137–161.
- SILVA, A.P., SILVA, B.M., CARNEIRO, A.M.P. (2005) *Estudo de argamassas de cimento, cal hidratada e areia natural compostas como resíduo de lodo proveniente das estações de tratamento de água – ETA’s*, VI SBTA, p. 262-275.

SILVA, N.G., COSTA, M.R., KANNING, R., VASCO, C. (2009) *Caracterização de argamassas industrializadas dos estados do Paraná e Santa Catarina segundo a NBR 13281/2005*, VIII SBTA, p. 1-15.

SILVA, N.G., CAMPITELI, V.C., GLEIZE, P.J. (2011) *Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia de britagem de rocha calcária*, IX SBTA, p. 21-33.

SILVA, B.A., PINTO, A.P.F., GOMES, A. (2014) *Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars*, Construction and Building Materials 72, 208–218.

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 13, 87–95.

SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. (2013) *Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks*. Journal of Environmental Management, 131, 1 - 6 p.

TAN, X., LIU, F., HU, L., REED, Y. (2017) *Evaluation of the particles size of four clay minerals*, Applied Clay Science 115, 313-324.

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 96, 615–621.

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 56, 83-90.

VIEIRA, C. M. F. (2001) *Caracterização das argilas de Campos dos Goytacazes visando à Fabricação de Revestimento Cerâmico Semi-Poroso*, Tese de Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

VIEIRA, C.M.F., PINHEIRO, R.M. (2011) *Avaliação de argilas caulínicas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha*, Cerâmica 57, 319-323.

WELLS, J.C. (2010) *Characterization of the mortars of el Castillo de San Cristobal*, Journal of the American Institute for Conservation, Vol. 49, No. 1, 27-44.

XIAO, W.L., JIANG, L.J., LI, M., ZHAO, J.Z. (2015) *Effect of clay minerals on the effective pressure law in clay-rich sandstones*, Journal of Natural Gas Science and Engineering 27, 1242-1251.

ZHANG, Z.Y., HUANG, L., LIU, F., WANG, M.K. (2016) *Characteristics of clay minerals in soil particles of two Alfisols in China*, Applied Clay Science 120, 51–60.

ZHOU, C.H., ZHAO, L.Z., WANG, A.Q., CHEN, T.H. (2016) *Current fundamental and applied research into clay minerals in China*, Applied Clay Science, 119, p. 3-7.

## Anexo I – Tabelas para análises estatísticas

Tabela I.1- Limites unilaterais de F ao nível de 95% de confiança

Fonte: Gomes (1987)

$n_2/n_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	20	24	30	40	60	120	$\infty$
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	9,59	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
$\infty$	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.

Tabela I.2- Valores da amplitude total estudentizada (q), para uso no teste de Tukey, ao nível de 95% de confiança.

Fonte: Gomes (1987)

$n_2 \backslash n_1$	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
$\infty$	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 resíduo.

Anexo II – Valores obtidos no ensaio de aderência à tração.

Argamassa TR00									
Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência	Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência
1	<b>246,4</b>	<b>0,125</b>	<b>Chapisco</b>	<b>DESCARTADO</b>	9	712,3	0,363	Argamassa	UTILIZADO
2	667,8	0,340	Argamassa	UTILIZADO	10	489,5	0,249	Argamassa	UTILIZADO
3	549,6	0,280	Argamassa	UTILIZADO	11	725,4	0,369	Argamassa	UTILIZADO
4	510,5	0,260	Argamassa	UTILIZADO	12	726,5	0,370	Argamassa	UTILIZADO
5	764,3	0,389	Argamassa	UTILIZADO	13	635,3	0,324	Argamassa	UTILIZADO
6	608,1	0,310	Argamassa	UTILIZADO	14	648,2	0,330	Argamassa	UTILIZADO
7	<b>91,8</b>	<b>0,047</b>	<b>Cola</b>	<b>DESCARTADO</b>	15	<b>451,2</b>	<b>0,230</b>	<b>Argamassa</b>	<b>DESCARTADO</b>
8	530,9	0,270	Argamassa	UTILIZADO	16	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>
Média final					0,321				

Argamassa TR01									
Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência	Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência
1	787,5	0,401	Argamassa	UTILIZADO	9	<b>260,1</b>	<b>0,132</b>	<b>Chapisco</b>	<b>DESCARTADO</b>
2	<b>1058</b>	<b>0,539</b>	<b>Substrato</b>	<b>DESCARTADO</b>	10	589,3	0,300	Argamassa	UTILIZADO
3	392,2	0,200	Argamassa	UTILIZADO	11	690,2	0,352	Argamassa	UTILIZADO
4	413,4	0,211	Argamassa	UTILIZADO	12	508,3	0,259	Argamassa	UTILIZADO
5	789	0,402	Argamassa	UTILIZADO	13	476,2	0,243	Argamassa	UTILIZADO
6	<b>290,3</b>	<b>0,148</b>	<b>Chapisco</b>	<b>DESCARTADO</b>	14	743,2	0,379	Argamassa	UTILIZADO
7	422,7	0,215	Argamassa	UTILIZADO	15	695,2	0,354	Argamassa	UTILIZADO
8	<b>40,2</b>	<b>0,020</b>	<b>Cola</b>	<b>DESCARTADO</b>	16	665,3	0,339	Argamassa	UTILIZADO
Média final					0,318				

Argamassa TR02									
Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência	Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência
1	365,1	0,186	Argamassa	UTILIZADO	9	405,2	0,206	Argamassa	UTILIZADO
2	239,2	0,122	Argamassa	UTILIZADO	10	802,1	0,409	Argamassa	UTILIZADO
3	<b>147,9</b>	<b>0,075</b>	<b>Argamassa</b>	<b>DESCARTADO</b>	11	<b>72,5</b>	<b>0,037</b>	<b>Substrato</b>	<b>DESCARTADO</b>
4	290,6	0,148	Argamassa	UTILIZADO	12	323,2	0,165	Argamassa	UTILIZADO
5	433,2	0,221	Argamassa	UTILIZADO	13	<b>338,8</b>	<b>0,173</b>	<b>Chapisco</b>	<b>DESCARTADO</b>
6	<b>925,3</b>	<b>0,471</b>	<b>Argamassa</b>	<b>DESCARTADO</b>	14	405,3	0,206	Argamassa	UTILIZADO
7	340,3	0,173	Argamassa	UTILIZADO	15	604,3	0,308	Argamassa	UTILIZADO
8	410,7	0,209	Argamassa	UTILIZADO	16	518,2	0,264	Argamassa	UTILIZADO
Média final					0,218				

Argamassa SXah									
Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência	Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência
1	623,4	0,317	Argamassa	UTILIZADO	9	573,4	0,292	Argamassa	UTILIZADO
<b>2</b>	<b>418,7</b>	<b>0,213</b>	<b>Argamassa</b>	<b>DESCARTADO</b>	<b>10</b>	<b>276,2</b>	<b>0,141</b>	<b>Chapisco</b>	<b>DESCARTADO</b>
3	493,1	0,251	Argamassa	UTILIZADO	<b>11</b>	<b>756,3</b>	<b>0,385</b>	<b>Argamassa</b>	<b>DESCARTADO</b>
4	709,3	0,361	Argamassa	UTILIZADO	12	632,1	0,322	Argamassa	UTILIZADO
5	692,3	0,353	Argamassa	UTILIZADO	13	634,2	0,323	Argamassa	UTILIZADO
<b>6</b>	<b>337,9</b>	<b>0,172</b>	<b>Chapisco</b>	<b>DESCARTADO</b>	<b>14</b>	<b>732,1</b>	<b>0,373</b>	<b>Argamassa</b>	<b>DESCARTADO</b>
7	620	0,316	Argamassa	UTILIZADO	15	489,5	0,249	Argamassa	UTILIZADO
<b>8</b>	<b>469,1</b>	<b>0,239</b>	<b>Argamassa</b>	<b>DESCARTADO</b>	16	549,2	0,280	Argamassa	UTILIZADO
Média final					0,255				

Argamassa SXch									
Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência	Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência
<b>1</b>	<b>209</b>	<b>0,106</b>	<b>Argamassa</b>	<b>DESCARTADO</b>	9	416,3	0,212	Argamassa	UTILIZADO
2	460,1	0,234	Argamassa	UTILIZADO	10	634,5	0,323	Argamassa	UTILIZADO
3	310,8	0,158	Argamassa	UTILIZADO	11	560,1	0,285	Argamassa	UTILIZADO
4	516,2	0,263	Argamassa	UTILIZADO	12	516,7	0,263	Argamassa	UTILIZADO
5	578,4	0,295	Argamassa	UTILIZADO	13	255,4	0,130	Argamassa	UTILIZADO
<b>6</b>	<b>200,7</b>	<b>0,102</b>	<b>Chapisco</b>	<b>DESCARTADO</b>	14	423	0,215	Argamassa	UTILIZADO
<b>7</b>	<b>118,7</b>	<b>0,060</b>	<b>Chapisco</b>	<b>DESCARTADO</b>	15	440,1	0,224	Argamassa	UTILIZADO
8	270,9	0,138	Argamassa	UTILIZADO	16	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>
Média final					0,228				

Argamassa SXac									
Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência	Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência
<b>1</b>	<b>280,1</b>	<b>0,143</b>	<b>Chapisco</b>	<b>DESCARTADO</b>	9	530,2	0,270	Argamassa	UTILIZADO
2	645,1	0,329	Argamassa	UTILIZADO	10	570,6	0,291	Argamassa	UTILIZADO
3	820,3	0,418	Argamassa	UTILIZADO	11	870,3	0,443	Argamassa	UTILIZADO
4	350,1	0,178	Argamassa	UTILIZADO	12	700,1	0,357	Argamassa	UTILIZADO
5	320,5	0,163	Argamassa	UTILIZADO	13	563,2	0,287	Argamassa	UTILIZADO
<b>6</b>	<b>980,3</b>	<b>0,499</b>	<b>Argamassa</b>	<b>DESCARTADO</b>	14	490,2	0,250	Argamassa	UTILIZADO
7	730,1	0,372	Argamassa	UTILIZADO	<b>15</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>
8	760,9	0,388	Argamassa	UTILIZADO	<b>16</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>
Média final					0,312				

Argamassa SXach									
Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência	Nº	Carga (N)	Tensão (MPa)	Ruptura	Consequência
<b>1</b>	<b>120,1</b>	<b>0,061</b>	<b>Chapisco</b>	<b>DESCARTADO</b>	<b>9</b>	<b>908,2</b>	<b>0,463</b>	<b>Argamassa</b>	<b>DESCARTADO</b>
2	410,2	0,209	Argamassa	UTILIZADO	10	568,1	0,289	Argamassa	UTILIZADO
3	520,3	0,265	Argamassa	UTILIZADO	11	403	0,205	Argamassa	UTILIZADO
4	338,9	0,173	Argamassa	UTILIZADO	12	490,2	0,250	Argamassa	UTILIZADO
5	617,3	0,314	Argamassa	UTILIZADO	13	389,3	0,198	Argamassa	UTILIZADO
6	370,4	0,189	Argamassa	UTILIZADO	14	506,3	0,258	Argamassa	UTILIZADO
<b>7</b>	<b>150,2</b>	<b>0,076</b>	<b>Chapisco</b>	<b>DESCARTADO</b>	15	630,1	0,321	Argamassa	UTILIZADO
8	482,2	0,246	Argamassa	UTILIZADO	<b>16</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>
Média final					0,243				



## Anexo III – Análise em Rede Simplex para os parâmetros de argamassa.

### - Retenção de água (%)

$$y_{linear} = 92,49 * X_1 + 96,31 * X_2 + 92,66 * X_3$$
$$y_{quadrático} = 92,49 * X_1 + 96,31 * X_2 + 92,66 * X_3 - 3,32 * X_1 * X_2 - 1,46 * X_1 * X_3 - 1,46 * X_2 * X_3$$
$$y_{cúbico} = 92,49 * X_1 + 96,31 * X_2 + 92,66 * X_3 - 3,32 * X_1 * X_2 - 1,46 * X_1 * X_3 - 1,46 * X_2 * X_3 - 101,979 * X_1 * X_2 * X_3$$

### - Resistência à compressão (MPa)

$$y_{linear} = 4,35 * X_1 + 3,80 * X_2 + 4,59 * X_3$$
$$y_{quadrático} = 4,35 * X_1 + 3,80 * X_2 + 4,59 * X_3 + 1,54 * X_1 * X_2 + 0,52 * X_1 * X_3 + 1,94 * X_2 * X_3$$
$$y_{cúbico} = 92,49 * X_1 + 96,31 * X_2 + 92,66 * X_3 - 1,46 * X_1 * X_2 - 3,32 * X_1 * X_3 - 1,46 * X_2 * X_3 + 13,4776 * X_1 * X_2 * X_3$$

### - Módulo de elasticidade (GPa)

$$y_{linear} = 11,82 * X_1 + 10,74 * X_2 + 14,98 * X_3$$
$$y_{quadrático} = 11,82 * X_1 + 10,74 * X_2 + 14,98 * X_3 - 16,56 * X_1 * X_2 - 5 * X_1 * X_3 - 14,84 * X_2 * X_3$$
$$y_{cúbico} = 11,82 * X_1 + 10,74 * X_2 + 14,98 * X_3 - 16,56 * X_1 * X_2 - 5 * X_1 * X_3 - 14,84 * X_2 * X_3 + 98,8612 * X_1 * X_2 * X_3$$

### - Coeficiente de capilaridade (g/dm<sup>2</sup>min<sup>1/2</sup>)

$$y_{linear} = 13,88 * X_1 + 12,67 * X_2 + 12,53 * X_3$$
$$y_{quadrático} = 13,88 * X_1 + 12,67 * X_2 + 12,53 * X_3 - 24,7 * X_1 * X_2 - 3,62 * X_1 * X_3 - 12,72 * X_2 * X_3$$
$$y_{cúbico} = 13,88 * X_1 + 12,67 * X_2 + 12,53 * X_3 - 24,7 * X_1 * X_2 - 3,62 * X_1 * X_3 - 12,72 * X_2 * X_3 - 37,7424 * X_1 * X_2 * X_3$$

### - Índice de vazios (%)

$$y_{linear} = 26,88 * X_1 + 30,07 * X_2 + 25,90 * X_3$$
$$y_{quadrático} = 26,88 * X_1 + 30,07 * X_2 + 25,90 * X_3 - 3,82 * X_1 * X_2 - 6,20 * X_1 * X_3 - 9,38 * X_2 * X_3$$
$$y_{cúbico} = 26,88 * X_1 + 30,07 * X_2 + 25,90 * X_3 - 3,82 * X_1 * X_2 - 6,20 * X_1 * X_3 - 9,38 * X_2 * X_3 + 21,8424 * X_1 * X_2 * X_3$$

### - Aderência com substrato (MPa)

$$y_{linear} = 0,321 * X_1 + 0,318 * X_2 + 0,218 * X_3$$
$$y_{quadrático} = 0,321 * X_1 + 0,318 * X_2 + 0,218 * X_3 - 0,054 * X_1 * X_2 - 0,166 * X_1 * X_3 + 0,176 * X_2 * X_3$$
$$y_{cúbico} = 0,321 * X_1 + 0,318 * X_2 + 0,218 * X_3 - 0,054 * X_1 * X_2 - 0,166 * X_1 * X_3 + 0,176 * X_2 * X_3 - 1,020 * X_1 * X_2 * X_3$$

Tabela III.1 – Análise dos modelos linear, quadrático e cúbico simples para o parâmetro retenção de água.

Traços estudados		TR00	TR01	TR02	SXac	SXah	SXch	SXach
Resultado experimental		92,49	96,31	92,66	94,12	93,57	92,21	89,35
Modelo linear	Resultado obtido	92,49	96,31	92,66	94,485	93,4	92,575	93,819
	Erro associado	0	0	0	-0,36	-0,83	-0,36	-4,47
	Soma dos erros ao quadrado	20,935						
	Erro total	4,575						
Modelo quadrático	Resultado obtido	92,49	96,31	92,66	94,12	93,57	92,21	93,126
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	-3,78
	Soma dos erros ao quadrado	14,262						
	Erro total	3,776						
Modelo Cúbico Simples	Resultado obtido	92,49	96,31	92,66	94,12	93,57	92,21	89,35
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	0,0004
	Soma dos erros ao quadrado	0,0000017						
	Erro total	0,0004						

Tabela III.2 – Análise dos modelos linear, quadrático e cúbico simples para o parâmetro resistência à compressão.

Traços estudados		TR00	TR01	TR02	SXac	SXah	SXch	SXach
Resultado experimental		4,35	3,80	4,59	4,68	4,46	4,60	5,19
Modelo linear	Resultado obtido	4,35	3,80	4,59	4,195	4,075	4,47	4,246
	Erro associado	0	0	0	0,48	0,39	0,13	0,94
	Soma dos erros ao quadrado	1,29024						
	Erro total	1,1359						
Modelo quadrático	Resultado obtido	4,35	3,80	4,59	4,68	4,46	4,60	4,6911
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	0,50
	Soma dos erros ao quadrado	0,2489						
	Erro total	0,4989						
Modelo Cúbico Simples	Resultado obtido	4,35	3,80	4,59	4,68	4,46	4,60	5,19
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	0
	Soma dos erros ao quadrado	0,0000007						
	Erro total	0,00027						

Tabela III.3 – Análise dos modelos linear, quadrático e cúbico simples para o parâmetro módulo de elasticidade.

Traços estudados		TR00	TR01	TR02	SXac	SXah	SXch	SXach
Resultado experimental		11,82	10,74	14,98	9,15	7,14	12,15	12,13
Modelo linear	Resultado obtido	11,82	10,74	14,98	12,86	11,28	13,40	12,51
	Erro associado	0	0	0	-3,71	-4,14	-1,25	-0,38
	Soma dos erros ao quadrado	32,6131						
	Erro total	5,7108						
Modelo quadrático	Resultado obtido	11,82	10,74	14,98	9,15	7,14	12,15	8,467
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	3,66
	Soma dos erros ao quadrado	13,4038						
	Erro total	3,6611						
Modelo Cúbico Simples	Resultado obtido	11,82	10,74	14,98	9,15	7,14	12,15	12,1304
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	0,0004
	Soma dos erros ao quadrado	0,00000016						
	Erro total	0,0004						

Tabela III.4 – Análise dos modelos linear, quadrático e cúbico simples para o parâmetro coeficiente de capilaridade.

Traços estudados		TR00	TR01	TR02	SXac	SXah	SXch	SXach
Resultado experimental		13,88	12,67	12,53	9,42	7,03	12,37	7,07
Modelo linear	Resultado Obtido	13,88	12,67	12,53	12,6	13,275	13,205	13,027
	Erro associado	0	0	0	3,180	6,245	0,835	5,957
	Soma dos erros ao quadrado	85,291						
	Erro total	9,235						
Modelo quadrático	Resultado Obtido	13,88	12,67	12,53	9,42	7,03	12,37	8,467
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	1,397
	Soma dos erros ao quadrado	1,960						
	Erro total	1,400						
Modelo Cúbico Simples	Resultado Obtido	13,88	12,67	12,53	9,42	7,03	12,37	7,068
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	0,002
	Soma dos erros ao quadrado	0,000014						
	Erro total	0,0012						

Tabela III.5 – Análise dos modelos linear, quadrático e cúbico simples para o parâmetro índice de vazios.

Traços estudados		TR00	TR01	TR02	SXac	SXah	SXch	SXach
Resultado experimental		26,88	30,07	25,90	25,64	27,52	24,84	26,27
Modelo linear	Resultado Obtido	26,88	30,07	25,90	27,985	28,475	26,390	27,617
	Erro associado	0	0	0	2,350	0,955	1,550	1,347
	Soma dos erros ao quadrado	10,627						
	Erro total	3,2599						
Modelo quadrático	Resultado Obtido	26,88	30,07	25,90	25,64	27,52	24,84	25,4611
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	0,81
	Soma dos erros ao quadrado	0,6543						
	Erro total	0,80891						
Modelo Cúbico Simples	Resultado Obtido	26,88	30,07	25,90	27,64	27,52	24,84	26,2701
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	0,00062
	Soma dos erros ao quadrado	0,00000038						
	Erro total	0,00062						

Tabela III.6 – Análise dos modelos linear, quadrático e cúbico simples para o parâmetro aderência com substrato.

Traços estudados		TR00	TR01	TR02	SXac	SXah	SXch	SXach
Resultado experimental		0,321	0,318	0,218	0,312	0,306	0,228	0,243
Modelo linear	Resultado Obtido	0,321	0,318	0,218	0,268	0,320	0,270	0,286
	Erro associado	0	0	0	0,044	-0,014	-0,042	-0,043
	Soma dos erros ao quadrado	0,00566						
	Erro total	0,07524						
Modelo quadrático	Resultado Obtido	0,321	0,318	0,218	0,312	0,306	0,228	0,281
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	0,04
	Soma dos erros ao quadrado	0,00143						
	Erro total	0,03778						
Modelo Cúbico Simples	Resultado Obtido	0,321	0,318	0,218	0,312	0,306	0,228	0,243
	Erro associado	0	0	0	0	0	0	0,000009
	Soma dos erros ao quadrado	0,000000009						
	Erro total	0,000009						

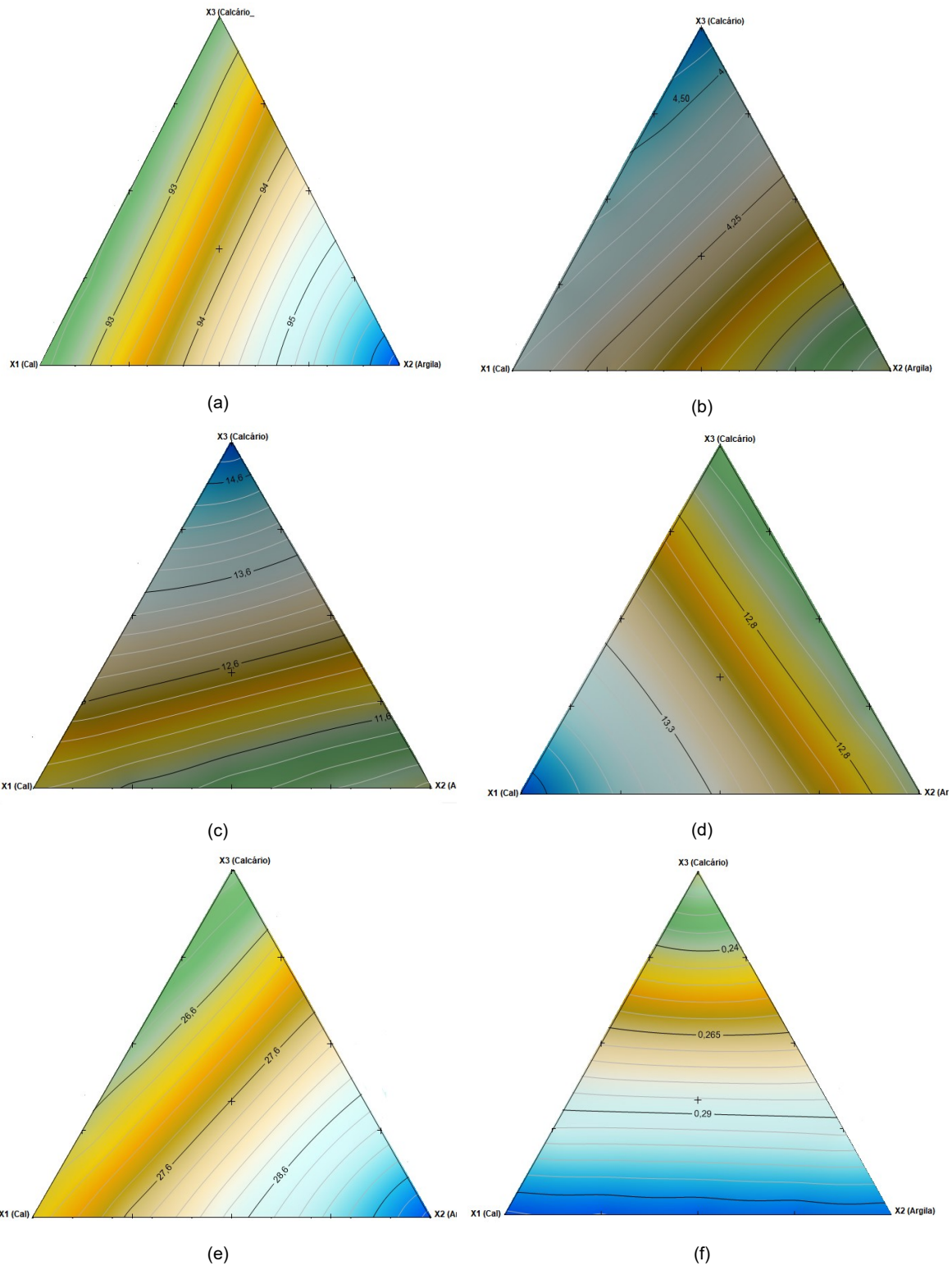


Figura III.1 – Ajuste linear para os parâmetros (a) Retenção de água, (b) Resistência à compressão, (c) Módulo de Elasticidade, (d) Coeficiente de Capilaridade, (e) Índice de vazios e (f) Aderência com o substrato.

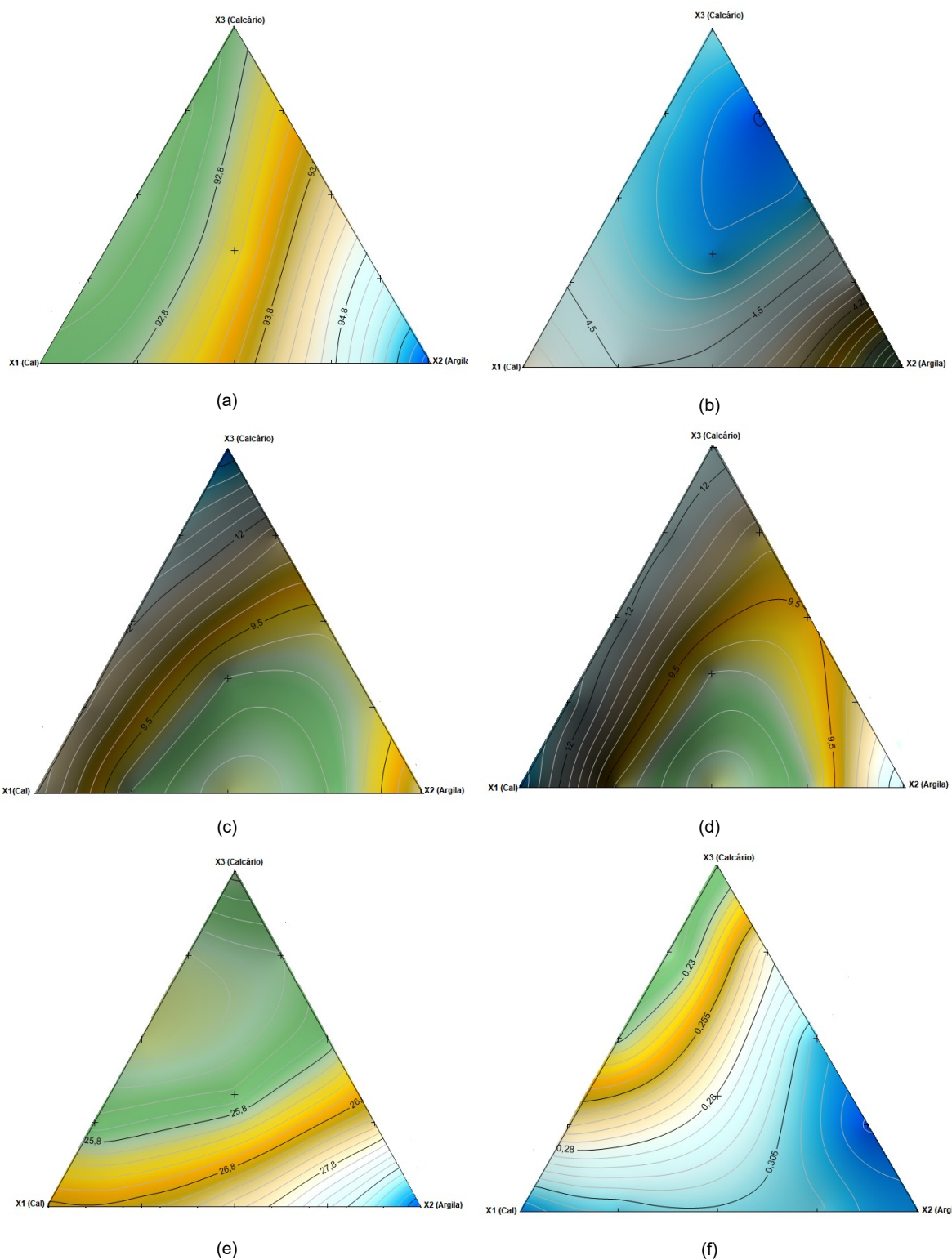


Figura III.2 – Ajuste quadrático para os parâmetros (a) Retenção de água, (b) Resistência à compressão, (c) Módulo de Elasticidade, (d) Coeficiente de Capilaridade, (e) Índice de vazios e (f) Aderência com o substrato.

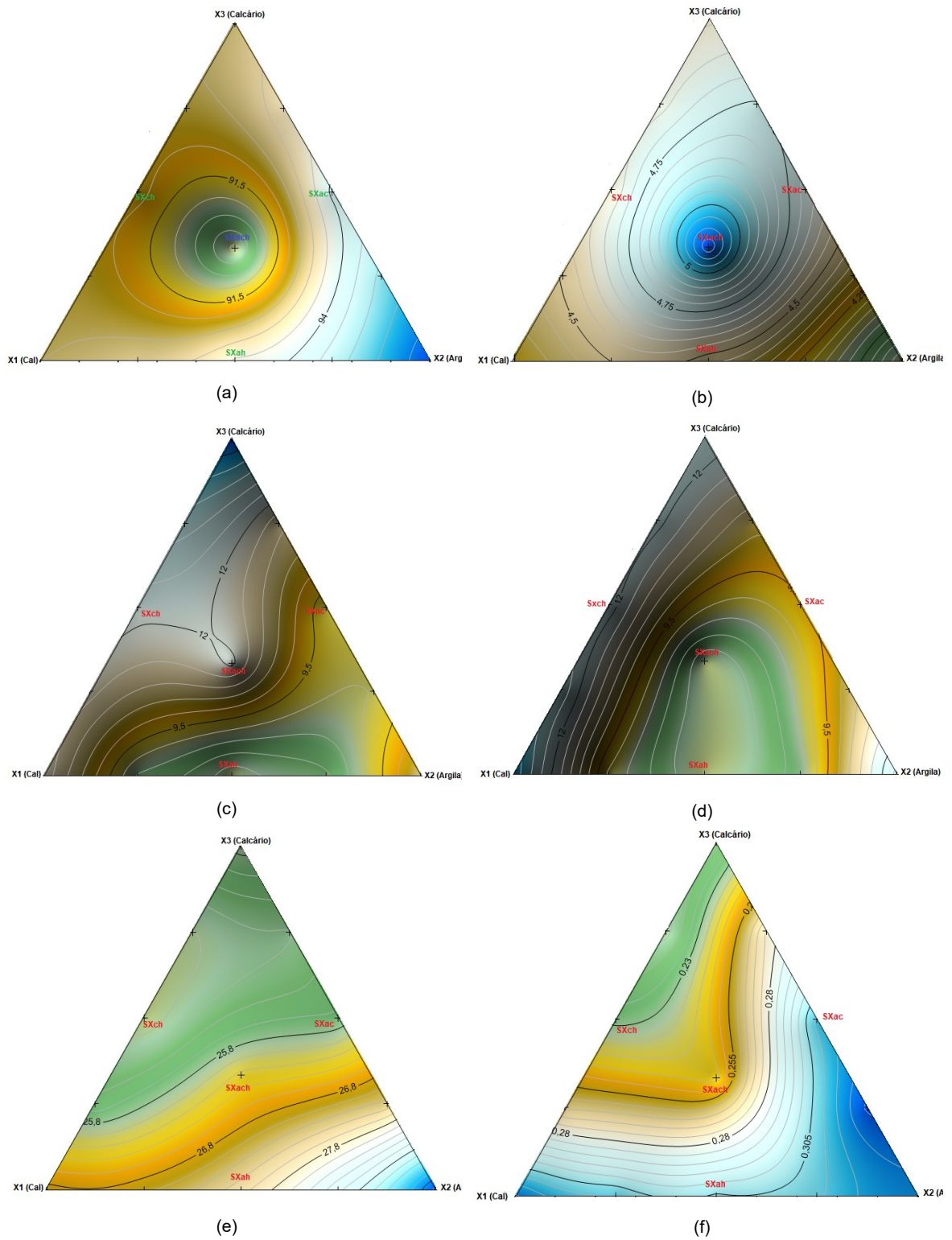


Figura III.3 – Ajuste cúbico completo para os parâmetros (a) Retenção de água, (b) Resistência à compressão, (c) Módulo de Elasticidade, (d) Coeficiente de Capilaridade, (e) Índice de vazios e (f) Aderência com o substrato.