



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

INGRIDY RANYELLI QUITÉRIA SALES NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE
ARGAMASSA DE REVESTIMENTO POR MEIO DO ENSAIO DE
CISALHAMENTO DIRETO**

Recife, PE

2018



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

INGRIDY RANYELLI QUITÉRIA SALES NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE
ARGAMASSA DE REVESTIMENTO POR MEIO DO ENSAIO DE
CISALHAMENTO DIRETO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof. Dra. Stela Fucale Sukar
Co-Orientador: Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva

Recife, PE

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco – Recife

N244a

Nascimento, Ingridy Ranyelli Quitéria Sales

Avaliação do comportamento reológico de argamassa de revestimento por meio do ensaio de cisalhamento direto. / Ingridy Ranyelli Quitéria Sales Nascimento. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2018.

111 f.: il.

Orientadora: Dra. Stela Fucale Sukar

Co-orientador: Dr. Angelo Just da Costa e Silva

Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.

1. Argamassa de Revestimento. 2. Cisalhamento Direto. 3. Resistência à Compressão Simples. 4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). I. Engenharia Civil – Dissertação. II. Sukar, Stela Fucale (orient.). III. Costa e Silva, Angelo Just (co-orient.). IV. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. V. Título.

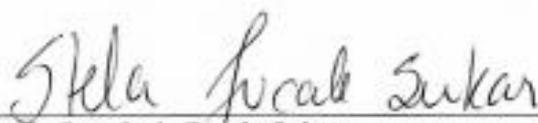
CDD: 691.5

INGRIDY RANYELLI QUITÉRIA SALES NASCIMENTO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE
ARGAMASSA DE REVESTIMENTO POR MEIO DE ENSAIO DE
CISALHAMENTO DIRETO**

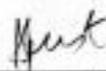
BANCA EXAMINADORA:

Orientador(a)



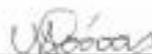
Prof. Dra. Stela Fugale Sukar
Universidade de Pernambuco

Co-orientador(a)



Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva
Universidade Católica de Pernambuco

Examinadores



Prof. Dra. Yêda Vieira Póvoas
Universidade de Pernambuco



Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira
Universidade Federal de Pernambuco

Recife, PE
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre me deu forças para concluir os desafios da vida.

À Professora Stela Fucale e ao Professor Angelo Just, pela orientação, toda dedicação e apoio para concluir o trabalho.

À Universidade de Pernambuco e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PEC-POLI) pela oportunidade em realizar o mestrado, a todos os professores e, em especial, à D. Lúcia Rosani, pelo apoio e críticas construtivas que muito contribuíram ao término da jornada.

Aos Professores Yêda Vieira Póvoas e Silvio Romero de Melo Ferreira, pelas relevantes observações solicitadas durante à qualificação.

À toda minha família, em especial à minha filha Laura, que me oferece forças diárias para a conclusão de mais uma etapa na vida, ao meu marido Telmo, por todo apoio em tudo que faço profissionalmente, à minha mãe Angelita, ao meu pai Baltazar, aos meus irmãos Fábio e Neto, a todos que de alguma maneira contribuíram para que esse sonho fosse realizado.

A todos os amigos que sempre me dão incentivos na minha vida, em especial à minha amiga Joelly Andrade, por me dá forças e conselhos, quando mais precisei em seguir em frente nos meus desafios.

Ao meu amigo e aluno Yuri Alencar, por contribuir na realização dos ensaios e em ser meu amigo nos desabafos da vida.

Aos amigos mestrados da Pós-graduação em Engenharia Civil (PEC-POLI), em especial, Carolina Buarque, Elayne Martins, Henrique Almeida, João Guilherme Pinho e Tiana Ximenes, por todo apoio, compartilhar sabedoria, paciência, alegria, conselhos. Vocês foram tudo para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

As argamassas de revestimento desempenham funções relevantes às atividades da construção civil, protegendo os elementos de vedação do ambiente construído da ação direta dos agentes agressivos, auxiliando no isolamento termo acústico e estanqueidade das vedações, regularizando superfícies, servindo de base adequada para o recebimento de outros revestimentos, além de contribuir para a estética da edificação. O estudo do comportamento das argamassas no estado fresco tem sido objeto de diversas pesquisas recentes no Brasil, em campo e em laboratório. A pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento reológico de argamassa de revestimento por meio de ensaio de cisalhamento direto, o qual é usualmente empregado na área de Geotecnia. Foram consideradas diferentes combinações de traços e materiais de composição para as argamassas produzidas. No programa de investigação experimental, primeiramente, foram realizados os ensaios de caracterização física, mecânica e química dos aglomerantes e agregados utilizados nas dosagens dos traços. Em seguida, foram dosados os traços de argamassas constituídas de cimento: cal: areia, em proporções distintas (TR1 = 1:0:6, TR2 = 1:0,5:6; TR3 = 1:1:6; TR4 = 1:1,5:6), os quais foram submetidos ao ensaio de mesa de consistência (*flow table*), a fim de manter a trabalhabilidade dos traços, padronizando a metodologia de dosagem. Foram conduzidos ao ensaio de cisalhamento direto, em corpos de prova no estado fresco, em diferentes tensões normais (10, 37 e 50 KPa), a uma velocidade cisalhante de 0,2 mm/min, para avaliar os parâmetros de resistência. Também foram realizados ensaio de resistência à compressão simples e ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para análise da estrutura das argamassas em estado endurecido. A caracterização dos materiais utilizados encontrou-se dentro dos limites normativos e aptos para a comercialização. Os traços de argamassa apresentaram, como resultado do ensaio de *flow table*, valores constantes e iguais a 245 ± 5 (mm); este valor se mostrou satisfatório para a realização do ensaio de cisalhamento direto. No ensaio de cisalhamento direto, observou-se que o método permitiu identificar aumento das tensões cisalhantes, coesão, ângulo de atrito e deslocamentos horizontais à medida que se incrementou o uso da cal na mistura, indicando sua sensibilidade e grande potencial de utilização para essa avaliação em argamassas. O TR3 enquadrou-se dentro dos limites normativos e obteve classificação P4, considerado o traço mais adequado para o uso de revestimento, devido à sua capacidade de deformação, evitando futuras fissuras. Tais características como: coesão entre os materiais, presença da cal na dosagem dos traços e formação de cristais do cimento no estado endurecido, também foram observadas nas imagens obtidas com a MEV. As imagens obtidas por meio de MEV mostraram-se que a adição da aglomerante cal na dosagem dos traços aumentou a porosidade, ocasionando perda de resistência à compressão; maior aderência entre os materiais utilizados na dosagem dos traços, formando flóculos entre eles; formação de cristais resultante da hidratação do cimento; fissuras no traço que apresentavam maiores teores de cal.

Palavras-chave: Argamassa de revestimento. Cisalhamento direto. Resistência à compressão simples. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

ABSTRACT

The coating mortars perform functions relevant to civil constructions, protecting the sealing elements of buildings from the direct action of aggressive agents, aiding in the acoustic insulation and sealthightness, regularizing surfaces, serving as an adequate base for the reception of other coatings, besides contributing to the aesthetics of the building. The study of the coating mortars behavior in its fresh state has been the object of many researches in Brazil, in field and in laboratory. The present research aims to analyze the rheological behavior of coating mortars using the direct shearing test, usually applied in the Geotechnical field. Different combinations of trace and composing materials were considered to the coating mortar produce. In the investigation experimental program, physical, chemical and mechanical characterization tests of the aggregates and binders were developed, used in the traces' dosage. Then, the study was developed with three mixes of mortar of cement:lime:sand in different proportions (TR1 = 1:0:6, TR2 = 1:0,5:6; TR3 = 1:1:6; TR4 = 1:1,5:6), which were submitted to the consistence test (flow table test), as a way to maintain a standard of workability, standardizing the methodology of the dosage. It was conducted to the direct shear test, in fresh state body proof, in different normal stress (10, 37 and 50 KPa), in a shear speed of 0,2mm/min to evaluate resistance parameters. Also, resistance to the simple compression tests and electron microscopy of sweep tests were made to the analyzes of the mortar structure in its hardened state. The characterization tests of the cement were provided by the manufacturer and were approved to be marketed. The traces of the mortar presented, as the result of the flow tablet test, constant values of 245 ± 5 (mm). This value is satisfactory to the development of the direct shear test. On the direct shear test, it was observed that the method allowed to identify the increase of growing shear stresses, cohesion, friction angle and horizontal displacement as the lime were added in the mixture, indicating its sensibility and great potential of use to this evaluation in mortar. The TR3 fit into the normative limits and got P4 classification, considering the more suitable trace to the use of coating, because of its deforming capacity, avoiding future cracks. These characteristics, such as: cohesion between materials, the presence of lime in the dosage of traces and crystal formation of the cement in its hardened state were also observed on the images obtained on MEV. The images provided by the MEV showed me that the addition of the lime aggregates in the dosage of the trace increased its porosity, creating loss of resistance to compression; bigger adhesion between materials used in the dosage of the traces, creating flocs between them; crystal formation as a result of the hydration of the cement; cracks in the trace that presented bigger lime content.

Keywords: Coating mortar. Rheological behavior. Direct shear test. Simple compression strength. Scanning electron microscopy (SEM).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluidos submetidos à força de cisalhamento	21
Figura 2 - Comportamento reológico (tensão x cisalhamento)	22
Figura 3 – Fluidos submetidos ao fenômeno da dilatação	25
Figura 4 – Ensaio de mesa de consistência (<i>flow table</i>)	31
Figura 5 – Equipamentos utilizados no método de ensaio dropping ball	32
Figura 6 – Equipamentos utilizados no método de ensaio penetração de cone	33
Figura 7 – Equipamentos utilizados no método de ensaio squeeze-flow	35
Figura 8 – Estágios obtidos graficamente com o ensaio de squeeze-flow	36
Figura 9 – Caixa bipartida utilizada no ensaio de cisalhamento	38
Figura 10 – Amostra moldada antes de ser submetida ao ensaio de cisalhamento direto	39
Figura 11 – Amostra moldada após ensaio de cisalhamento direto	39
Figura 12 – Envoltória gráfica da resistência de cisalhamento baseado no critério de Mohr-Coulomb	40
Figura 13 – Regressão linear dos parâmetros (tensão cisalhante x tensão normal)	40
Figura 14 – Tensão cisalhante (KPa) x Deslocamento horizontal (mm)	41
Figura 15 – Programa de Investigação	47
Figura 16 – Amostras das areias (fina e grossa)	50
Figura 17 – Materiais utilizados na preparação das argamassas de revestimento	51
Figura 18 – Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria dos agregados miúdos	53
Figura 19 – Granulometria dos agregados miúdos (areia grossa)	53
Figura 20 – Arrasamento e pesagem para determinação da massa unitária dos agregados miúdos	54
Figura 21 – Mistura dos materiais durante a preparação dos traços de argamassa	56
Figura 22 – Traço (TR2) de argamassa de revestimento finalizado	56
Figura 23 – Etapas do ensaio de mesa de consistência (<i>flow table</i>)	59
Figura 24 – Etapas de moldagem da argamassa de revestimento na caixa de cisalhamento	60
Figura 25 – Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto	62
Figura 26 – Linha do tempo das etapas de dosagem e ensaios da argamassa de revestimento	63
Figura 27 – Corpo-de-prova após finalização do ensaio de cisalhamento direto	64
Figura 28 – Moldagem e ensaio de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova	65
Figura 29 – Rompimento e dados computacionais de um cp no ensaio de compressão simples	65
Figura 30 – Amostra de argamassa (TR1) extraída para a análise da MEV	67
Figura 31 – Processo de metalização das amostras (TR1 e TR4)	67
Figura 32 – Amostras (TR1 e TR4) antes e depois do processo de metalização das amostras	68
Figura 33 – Equipamento utilizado na microscopia eletrônica de varredura	68
Figura 34 – Curva granulométrica (areia fina e areia grossa)	72
Figura 35 – Tensão cisalhante x deslocamento horizontal – TR1 (a), TR2 (b), TR3 (c) e TR4 (d)	77
Figura 36 – Tensão cisalhante x deslocamento horizontal – 10 KPa (a), 37 KPa (b) e 50 KPa (c)	79
Figura 37 – Tensão cisalhante x tensão normal – TR1 (a), TR2 (b), TR3 (c) e TR4 (d)	81
Figura 38 – Análise microestrutural ampliada 25x (a), 50x (b), 500x (c) e 1000x (d) – TR1 (1:0:6)	85
Figura 39 – Análise microestrutural ampliada 500x (a) e 3500x (b) – TR1 (1:0:6)	86
Figura 40 – Análise microestrutural do TR2 ampliada 100x (a), 500x (b), 1000x (c) e 2500x (d)	87
Figura 41 – Estrutura porosa do TR2 (1:0,5:6)	87
Figura 42 – Eletromicrografia da argamassa de revestimento TR3 (1:1:6)	88
Figura 43 – Eletromicrografia da argamassa de revestimento TR4 (1:1,5:6)	88
Figura 44 – Poros da amostra do TR4 através de análise eletromicrográfica	91

Figura 45 – Eletrografia do TR4 analisando a ligação entre os aglomerantes	91
Figura 46 – Etapas do processo da determinação do teor de material pulverulento dos agregados	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais modelos reológicos	22
Tabela 2 – Métodos mais utilizados para avaliar a reologia das argamassas	29
Tabela 3 – Índices de consistência de argamassas em estado fresco	30
Tabela 4 – Valores da velocidade, tensões normais e dimensões da caixa bipartida aplicados ao ensaio de cisalhamento direto	42
Tabela 5 – Valores de coesão e ângulo de atrito obtidos da regressão linear	44
Tabela 6 – Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CII Z-32 utilizado na pesquisa	48
Tabela 7 – Características do agregado miúdo (areia ensacada fina)	50
Tabela 8 – Características do agregado graúdo (areia ensacada grossa)	50
Tabela 9 – Nomenclatura e traços das argamassas de revestimento	57
Tabela 10 – Caracterização física do cimento CII Z-32	69
Tabela 11 – Características físicas e químicas da cal CH-I utilizada nas dosagens	70
Tabela 12 – Distribuição granulométrica das areias fina e grossa	72
Tabela 13 – Massa específica encontradas nas referências	74
Tabela 14 – Relações de massa dos traços ensaiados	75
Tabela 15 – Densidade de massa das argamassas em estado fresco	76
Tabela 16 – Valores de tensões cisalhantes x deslocamento horizontal	78
Tabela 17 – Valores de coesão e ângulo de atrito obtidos na regressão linear	81
Tabela 18 – Valores da resistência à compressão simples das argamassas de revestimento	82
Tabela 19 – Eletromicrografias das amostras do TR1, TR2, TR3 e TR4	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações iniciais	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivo geral	16
1.3.2	Objetivos específicos	16
1.4	Metodologia	16
1.5	Estrutura da dissertação	18
2	COMPORTAMENTO REOLÓGICO EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO	20
2.1	Comportamento reológico dos materiais	20
2.1.1	Modelos reológicos	22
2.1.1.1	Newtonianos	23
2.1.1.2	Não-Newtonianos	23
2.2	Reologia aplicada em argamassas de revestimento	26
2.3	Métodos de ensaio para analisar o comportamento reológico das argamassas no estado fresco	27
2.3.1	Mesa de consistência “ flow table ”	29
2.3.2	Penetração de uma esfera padrão “ dropping ball ”	31
2.3.3	Ensaio de penetração de cone	33
2.3.4	Reômetros “squeeze-flow”	34
2.3.5	Cisalhamento direto	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	Introdução	46
3.2	Aquisição de materiais	47
3.2.1	Cimento	48
3.2.2	Cal hidratada CH – I	49
3.2.3	Agregado miúdo	49
3.2.4	Água	51
3.3	Ensaio de caracterização física, química e mecânica dos materiais	51
3.3.1	Ensaio de caracterização da cal hidratada (CH-I)	52
3.3.2	Agregados miúdos	52
3.3.2.1	Análise granulométrica	52
3.3.2.2	Massa unitária	54

3.3.2.3	<i>Massa específica real</i>	54
3.3.2.4	<i>Teor de material pulverulento</i>	54
3.4	Produção das argamassas de revestimento: preparação e dosagem	55
3.5	Ensaio de mesa de consistência (<i>flow table</i>)	57
3.6	Ensaio de cisalhamento direto	59
3.7	Ensaio de resistência à compressão simples	64
3.8	Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)	66
3.8.1	Preparação das amostras	66
3.8.2	Metalização	67
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
4.1	Caracterização dos aglomerantes e agregados	69
4.1.1	Cimento	69
4.1.2	Cal hidratada CH - I	70
4.1.3	Agregados miúdos (areia fina e areia grossa)	71
4.1.3.1	<i>Análise granulométrica</i>	71
4.1.3.2	<i>Massa unitária</i>	73
4.1.3.3	<i>Massa específica</i>	73
4.1.3.4	<i>Teor de material pulverulento</i>	74
4.2	Caracterização dos traços	74
4.3	Parâmetros da argamassa por meio do ensaio de cisalhamento direto	76
4.4	Resistência à compressão simples da argamassa de revestimento	82
4.5	Análise microestrutural da argamassa de revestimento	84
5	CONCLUSÕES	92
5.1	Principais conclusões	92
5.2	Sugestões para futuras pesquisas	95
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A – Valores obtidos no ensaio de cisalhamento direto – TR1 (1:0:6)	103
	APÊNDICE B – Valores obtidos no ensaio de cisalhamento direto – TR2 (1:0,5:6)	104
	APÊNDICE C – Valores obtidos no ensaio de cisalhamento direto – TR3 (1:1:6)	105
	APÊNDICE D – Valores obtidos no ensaio de cisalhamento direto – TR4 (1:1,5:6)	106
	ANEXO A – Ensaio de granulometria dos agregados miúdos (areias fina e grossa)	107
	ANEXO B – Ensaio de massa específica real dos agregados (areias fina e grossa)	108
	ANEXO C – Ensaio do teor de material pulverulento das areias fina e grossa	109

1 INTRODUÇÃO

São abordados aspectos referentes à argamassa de revestimento, principalmente no que se refere ao estado fresco, bem como tecnologias aplicadas na área da Geotecnia às argamassas de revestimento, otimizando sua utilização em situações práticas. O capítulo expõe também os objetivos, metodologia, estrutura da dissertação e justificativa.

1.1 Considerações iniciais

As argamassas de revestimento são definidas na Engenharia Civil como materiais obtidos pela mistura homogênea de aglomerante (cimento e cal), agregado miúdo e água, com ou sem aditivos e adições, podendo ser dosada em obra ou industrializada (NBR 13281, 2005).

Segundo Sousa e Aquino Filho (2013), as argamassas de revestimento exercem diversas funções, tais como: protege os elementos de vedação dos edifícios da ação direta dos agentes agressivos; auxilia no isolamento termo acústico e estanqueidade das vedações; regulariza a superfície dos elementos de vedação, servindo de base adequada ao recebimento de outros revestimentos; além de contribuir para a estética da edificação.

Devido a essas funções relevantes à Construção Civil, é comum o investimento em novas tecnologias que tentam otimizar ainda mais o desempenho das argamassas. Segundo Carasek (2010), as formas de aplicação das argamassas de revestimentos nas obras ainda são consideradas muito rudimentares, dificultando seus resultados eficazes ao longo da vida útil das edificações. Dessa forma, afirma Sousa (2005), que o interesse em um melhor conhecimento das propriedades dos elementos constituintes e uma possível inserção de novos materiais no processo produtivo vêm motivando também avanços no estudo das argamassas de revestimento.

A importância do estudo do comportamento das argamassas no estado fresco vem conseguindo seu espaço, isso deve-se a condição ao qual o material é aplicado. O conhecimento do comportamento das argamassas em seu estado fresco possibilita uma moldagem adequada do material, além de permitir a redução de ocorrência de manifestações patológicas (fissuração, deslocamento e eflorescência) após o endurecimento dos revestimentos (CARDOSO, 2009).

Na análise de argamassas de revestimento em seu estado fresco, surge como alternativa a utilização do ensaio de cisalhamento direto aplicado, corriqueiramente, para a caracterização geotécnica de solos. As argamassas durante o ensaio estão submetidas diretamente a uma força de cisalhamento aplicada na mistura (ARAÚJO et al., 2017). Apesar dos parâmetros (coesão e ângulo de atrito) obtidos com os ensaios de cisalhamento direto não poderem afirmar uma trabalhabilidade das argamassas, estudos exploratórios anteriores indicam a utilização do ensaio para as argamassas em seu estado fresco (SOUSA, 2005; LU e WANG, 2011; SOUSA e AQUINO FILHO, 2013; CARASEK et al., 2016; ARAÚJO et al., 2017).

1.2 Justificativa

O desenvolvimento de uma boa e adequada mistura de argamassa, tornando o produto no estado fresco homogêneo, é fundamental para possibilitar uma aplicação produtiva e minimizar, sobretudo as falhas de moldagem. Segundo Antunes (2005), essas falhas são causadas por defeitos na interface substrato/argamassa, originados durante a aplicação do material no estado fresco contra o substrato. A aderência da argamassa ao substrato está diretamente ligada à sua energia de lançamento, de modo que esse comportamento reológico da argamassa, quando não adequado, propicia a criação de vazios na região da interface que permanecem após o endurecimento, reduzindo a área de contato entre o substrato e a argamassa.

A trabalhabilidade é uma das características mais relevantes das argamassas, e a ausência dela acarreta diminuição da aderência, levando o revestimento a uma pequena vida útil (SOUSA e BAUER, 2002). Uma das maneiras de se combater esse problema é utilizar uma argamassa de revestimento mais trabalhável, isto é, com facilidade de espalhamento.

Segundo Santos (2011), a trabalhabilidade pode ser considerada uma propriedade subjetiva das argamassas, pois não existe uma condição homogênea da argamassa padrão, já que são caracterizadas pela consistência e plasticidade, dessa forma favorecendo a mobilidade e coesão na área de aplicação.

Uma argamassa trabalhável apresenta uma facilidade de manuseio e aplicação, ao ponto que essa propriedade apresenta uma tensão limite que permite a sua aderência com o substrato, evitando o deslizamento do material ao local aplicado (SOUSA e BAUER, 2002).

Apesar de existirem ensaios que comprovem a trabalhabilidade das argamassas, em determinadas avaliações, os resultados são ainda muito empíricos, os quais são avaliados qualitativamente, pois muitas vezes são testados com a experiência dos funcionários envolvidos na sua utilização. Segundo Sousa e Bauer (2002), devido às particularidades da argamassa durante sua aplicação, o material pode ser considerado complexo, com uma quantidade vasta de variáveis envolvidas.

Um dos ensaios que avalia a trabalhabilidade de uma argamassa é a mesa de consistência, ensaio conhecido como *flow table* segundo a NBR 13276 (ABNT, 2005), mostrando ser bastante empírico aos seus resultados, tornando-se insuficiente para definir se uma argamassa é trabalhável ou não. De maneira análoga, sem resultado mais satisfatório, a trabalhabilidade muitas vezes é determinada pela experiência do profissional que irá aplicá-la.

Segundo Cardoso (2009), embora as argamassas apresentem comportamentos reológicos complexos, outros ensaios utilizados para sua caracterização são simples, tanto quanto a mesa de consistência, tais como o método do dropping-ball especificado segundo a norma BS 4551 (BSI, 2005) e do penetrômetro segundo a norma ASTM C780 (ASTM, 2012) que avaliam a consistência desses materiais de acordo com o conceito de trabalhabilidade, onde há níveis de consistência pré-estabelecidos que permitem a aplicação.

O déficit atual do estudo no meio científico torna necessárias pesquisas sobre o comportamento das argamassas no estado fresco, pois a evolução de suas características específicas, associadas à grande variabilidade de materiais, influenciam o comportamento reológico do material, assunto o qual não se tem grande domínio.

Diante dessa lacuna encontrada quanto aos ensaios quantitativos que caracterizam o comportamento reológico das argamassas, é que se baseia a presente pesquisa, utilizando-se de ensaio aplicado corriqueiramente, em outras áreas da engenharia, no caso a Geotecnia, de forma que seja possível a adequação ao estudo de argamassa de revestimento em seu estado fresco.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa consiste em analisar o comportamento reológico de argamassas de revestimento em seu estado fresco, a partir do uso de equipamento de cisalhamento direto e avaliar a microestrutura e a resistência à compressão simples no estado endurecido.

1.3.2 Objetivos específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral proposto, são desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Analisar as características físicas e químicas dos materiais utilizados nas argamassas de revestimento em estudo;
- ii. Avaliar o comportamento reológico de argamassa de revestimento em diferentes combinações de traços e materiais de composição;
- iii. Verificar a eficácia do ensaio de cisalhamento direto utilizado em solos em diferentes traços empregados para produção das argamassas de revestimento no estado fresco;
- iv. Analisar a resistência dos traços de argamassa de revestimento, no estado endurecido, através do ensaio de resistência à compressão simples;
- v. Analisar microestruturalmente os corpos-de-prova dos traços ensaiados, no estado endurecido.

1.4 Metodologia

Para atingir os objetivos propostos, a pesquisa apresenta diferentes etapas, sendo resumidas a seguir:

i. Revisão bibliográfica

Esta etapa se caracteriza pelo levantamento de informações realizadas a partir de pesquisas, embasando o tema abordado. Tais informações foram adquiridas por meio de: teses, dissertações, revistas, bibliografias, artigos em periódicos, entre outros.

Os assuntos abordados, como referencial teórico, estão voltados para o comportamento reológico das argamassas de revestimento, analisando-se a validação da utilização do ensaio de cisalhamento direto aplicado em solos em argamassas de revestimento em seu estado fresco.

ii. Aquisição e caracterização dos materiais (agregados e aglomerantes)

Os materiais utilizados nos ensaios de laboratório foram adquiridos em armazéns de materiais de construção, apresentando selos do controle de qualidade na sua fabricação. Uma vez adquiridos para a produção de argamassas de revestimento mistas (cimento, cal hidratada, areia e água), estes são avaliados tanto às suas características Físicas, Químicas e Mecânicas, através das especificações expostas no próprio material ou dados fornecidos pelos fabricantes, quanto pela realização de ensaios na pesquisa que comprovem a qualidade dos materiais utilizados. Os ensaios de caracterização Física, Química e Mecânica dos materiais utilizados na dosagem dos traços foram baseados em literaturas pesquisadas.

iii. Definição dos traços e realização das dosagens

Os traços utilizados na pesquisa foram determinados com o auxílio de especialista da Região no assunto, literaturas sobre o tema e com base no que se aplica nas obras localizadas na Região Metropolitana de Recife (RMR), os quais têm proporções distintas da aglomerante cal, que é utilizada na dosagem a fim de proporcionar uma maior trabalhabilidade das argamassas em seu estado fresco.

Foram estabelecidos traços distintos e adequados de argamassas de revestimento, observando suas propriedades quanto à trabalhabilidade, que atendam às especificações normativas. Todas as dosagens foram desenvolvidas mantendo a mesma metodologia, sendo essa padronização controlada pelo abatimento na mesa de consistência (*flow table*).

iv. Realização do ensaio de cisalhamento direto de solos aplicado à argamassa de revestimento em estado fresco

Uma vez dosados os traços de argamassa de revestimento, estes foram submetidos ao ensaio de cisalhamento direto utilizado na Geotecnia para solos, com diferentes tensões normais, avaliando-se suas características reológicas com diferentes proporções de materiais.

v. Execução de ensaio de compressão simples nas amostras de argamassas de revestimento em estado endurecido

As amostras de argamassa foram moldadas nos mesmos traços investigados no ensaio de cisalhamento direto, a fim de serem realizados ensaios de resistência à compressão simples para as idades de 7, 14 e 28 dias, no estado endurecido.

vi. Realização de ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostras de argamassa de revestimento

Foi realizada a análise microestrutural das amostras de argamassa de revestimento no estado endurecido, provenientes de corpos de prova do ensaio de compressão simples endurecidos há 28 dias de cura, a partir do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

vii. Apresentação e análise dos resultados

Os resultados obtidos do programa de investigação laboratorial foram analisados e confrontados com os dados obtidos no estado da arte, a fim de inserir no meio científico a utilização do ensaio de resistência ao cisalhamento direto, voltado para área de solos, bem como, apresentar resultados idôneos ao comportamento reológico das argamassas de revestimento.

1.5 Estrutura da dissertação

A apresentação do trabalho está dividida em cinco capítulos:

O Capítulo 1 é composto pelas considerações iniciais, onde é feito um breve resumo das características da argamassa no estado fresco e da importância de se realizar mais pesquisas que ajudem a melhorar o seu desempenho. Dentro deste capítulo também estão definidos quais os objetivos gerais e específicos, qual a metodologia utilizada para atingir os objetivos e uma estruturação da dissertação.

O segundo Capítulo é voltado para as teorias reológicas, já que foi baseado na reologia que foram desenvolvidos vários estudos de materiais fluidos, os quais se assemelham ao estado fresco da argamassa, objeto dessa pesquisa. Nesse capítulo foram abordados a teoria da reologia e seus modelos existentes, a aplicação da reologia para argamassas e os métodos de ensaio utilizados para analisar seu comportamento reológico.

No terceiro Capítulo é explanado todo o desenvolvimento do programa experimental da pesquisa. A primeira parte descreve os materiais utilizados, detalhando os ensaios físicos, químicos e mecânicos para suas caracterizações; em seguida é detalhado o desenvolvimento dos traços e por fim é relatado todo o procedimento dos ensaios realizados na argamassa.

No quarto Capítulo são expostos e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados, além de fazer a correlação desses resultados com suas respectivas normas e com os resultados de outras pesquisas referenciadas.

O quinto e último Capítulo traz as considerações finais obtidas a partir das discussões dos resultados, bem como sugestões futuras para as posteriores pesquisas, a fim de dar continuidade ao trabalho proposto.

2 COMPORTAMENTO REOLÓGICO EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Neste capítulo são abordados os principais modelos e aspectos reológicos da argamassa de revestimento em seu estado fresco. Posteriormente, são apresentados os métodos de ensaio que avaliam o comportamento reológico das argamassas de revestimento, dando ênfase ao seu comportamento quando submetidas ao ensaio de cisalhamento direto, além de apresentar dados e parâmetros quantitativos obtidos nos estudos experimentais referente ao tema proposto.

Com o intuito de quantificar o comportamento da argamassa no seu estado fresco, faz-se necessário estudá-lo reologicamente. O estudo da reologia do material traz subsídios para melhorar sua aplicabilidade e, com isso, melhorar o desempenho durante sua vida útil.

2.1 Comportamento reológico dos materiais

A palavra Reologia tem origem grega, que significa *rheo* (fluxo) e *logos* (estudo), sendo definida pela primeira vez por Bingham e Crawford, os quais definiram a reologia semelhante ao fluxo de líquidos para materiais fluidos e deformáveis para os materiais sólidos (MARTIN, 1993).

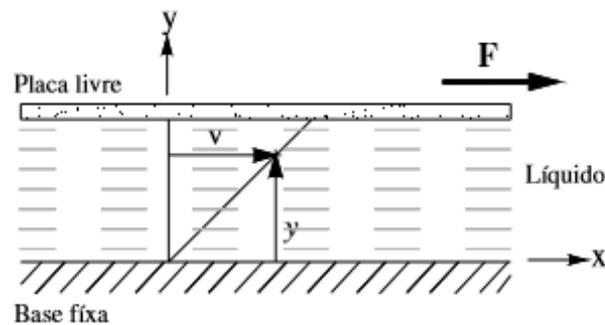
Segundo Costa (2006), a reologia também pode ser definida como uma ciência que estuda a deformação e escoamento da matéria. No caso dos fluídos, a aplicação de qualquer sistema de forças resulta em escoamento. Além disso, a retirada (alívio) do sistema de forças não resultará no retorno do corpo a seu estado indeformado. Em contrapartida, considerando um corpo sólido elástico, a aplicação de qualquer sistema de forças resultará em uma deformação, mas não em um escoamento. Neste caso, depois de retirar o sistema de forças, o corpo retornará a seu estado indeformado. Já considerando um corpo com comportamento plástico, ele escoará como um fluido se a força aplicada exceder algum valor crítico; caso contrário, o corpo se deforma como um sólido elástico (SOUSA, 2005).

Afirma o autor, que esta teoria foi estudada a partir de um modelo proposto por Newton, onde uma força de cisalhamento é aplicada em um fluido induzindo neste um gradiente de

velocidade. Nesta configuração, o fator de proporcionalidade entre a força e o gradiente é chamado de viscosidade.

A Figura 1, ilustra o esquema desenvolvido no experimento de Newton para a determinação da viscosidade dos fluidos.

Figura 1 - Fluidos submetidos à força de cisalhamento



Fonte: SOUSA (2005).

A viscosidade expressa a resistência do fluido ao escoamento devido à fricção interna que resulta quando uma película do fluido é forçada a mover-se em relação à outra adjacente (BARNES et al., 1989). Materiais altamente viscosos possuem um elevado atrito interno, fluindo com maior dificuldade do que materiais menos viscosos (NAVARRO, 1997).

Para a maior parte dos líquidos puros, e para muitas soluções e dispersões, a viscosidade (η) é uma grandeza bem definida a uma dada temperatura e pressão, independente da tensão de cisalhamento (τ) e da taxa de cisalhamento (dv/dy), desde que o fluxo seja laminar (MYSELS, 1959 apud SOUSA, 2005).

Alguns dos principais modelos reológicos utilizados para interpretar o comportamento de argamassas no estado fresco estão apresentados na Tabela 1, bem como as suas representações gráficas estão ilustradas na Figura 2. Todas as curvas podem ser descritas por uma das equações apresentadas na Tabela 1.

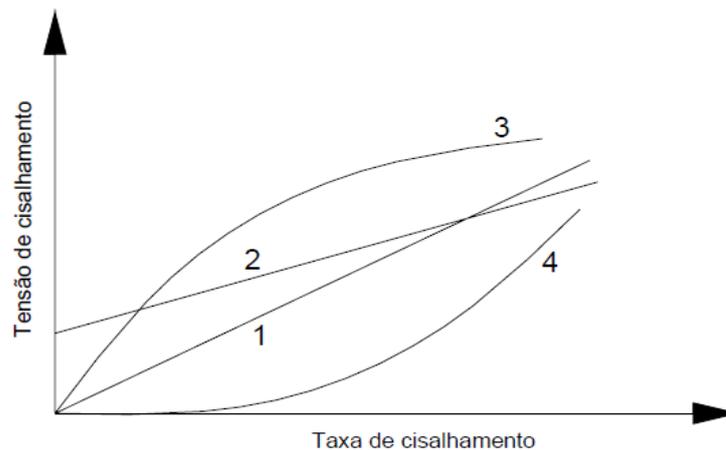
Tabela 1 – Principais modelos reológicos

Comportamento	Newtoniano	Não – Newtoniano		
Definição	Materiais que exibem uma relação linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento (Modelo 1). Tais modelos apresentam viscosidade constante a uma dada temperatura e pressão.	Materiais onde a viscosidade não é constante e depende da taxa de cisalhamento aplicada, a uma dada temperatura e pressão. Por exemplo:		
		Viscosidade ou Fluido de Bingham (Modelo 2)	Pseudoplástico (Modelo 3)	Dilatante (Modelo 4)
Modelos matemáticos	$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \gamma$	$\tau = \tau_0 + \eta_p$	$\tau = K \gamma^n$	

Fonte: SOUSA e BAUER (2002).

Legenda: τ = Tensão de cisalhamento; μ = Viscosidade absoluta; γ = Taxa de cisalhamento; η_p = Viscosidade Plástica; n = Índice de potência; K = Índice de consistência do fluido; τ_0 = Tensão de escoamento

Figura 2 - Comportamento reológico (tensão x cisalhamento)



Fonte: BARNES et al., 1989.

1 – Fluido newtoniano; 2 – Fluido de Bingham; 3 – Fluido pseudoplástico; 4 – Fluido Dilatante

2.1.1 Modelos reológicos

Os modelos reológicos objetivam transparecer características mais idôneas possíveis do material a ser observado, através da análise do seu comportamento fluido. Estes modelos resultam em curvas ajustáveis obtidas através de dados gerados por viscosímetros, a fim de descrever a forma de diferentes tipos de curvas de fluxo (KEALY, 2006 apud PEREIRA, 2011).

A seguir serão apresentados os modelos que se adequam as características reológicas das argamassas de revestimento.

2.1.1.1 Newtonianos

São denominados fluidos newtonianos todos os materiais que exibem uma relação linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento (denominada gradiente de velocidade), conforme mostrado na Figura 2. Esse tipo de fluido é conhecido como corpo viscoso ideal. Um material, que exibe este comportamento, não pode sustentar deformações prolongadas, pois essas são aliviadas pelo escoamento. A Equação da Tabela 1 do Modelo Newtoniano é utilizada para descrever tal comportamento.

2.1.1.2 Não-Newtonianos

Para várias classes de fluídos a viscosidade não é constante, dependendo da taxa de deformação a uma dada temperatura e pressão. Tais fluidos são chamados de não newtonianos. Para esses fluidos a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento não são lineares. Seguem os principais tipos.

I- Pseudoplasticidade

A pseudoplasticidade ocorre quando a viscosidade aparente do fluido diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, quando este é avaliado em uma condição de fluxo (conforme o fluxo ilustrado na Figura 1).

Os aglomerados originados pela atuação de forças atrativas entre as partículas (Van der Waals) podem ser considerados como uma das causas fundamentais para o fenômeno da pseudoplasticidade. A parte porosa dos materiais absorvem parte da água destinada para o afastamento das partículas, diminuindo a distância entre as mesmas e elevando as colisões entre as partículas, e conseqüentemente a viscosidade do fluido. Em contrapartida, quando esses aglomerados são submetidos às taxas de cisalhamento, os mesmos se rompem e liberam a água presente na mistura que antes era responsável pelo aumento da viscosidade, e que neste momento passa a contribuir para o afastamento entre as partículas e, conseqüentemente, diminuir a viscosidade (OLIVEIRA et al., 2000).

Esse comportamento pode ser explicado por uma das razões que se seguem (NAVARRO, 1997; BRETAS; D'AVILA, 2000; OLIVEIRA et al., 2000):

- ✓ Sistemas líquidos constituídos de moléculas grandes e flexíveis, que durante o repouso estão aleatórias, passando para uma orientação ordenada na direção do escoamento, assumindo uma forma quase linear;
- ✓ A existência de moléculas que, em repouso, se encontram altamente solvatadas ¹, que têm as camadas de solvatação destruídas pela ação do cisalhamento;
- ✓ A existência de partículas assimétricas que em repouso se posicionam de forma aleatória, e que durante o escoamento assumem uma orientação preferencial na direção do escoamento (caso de algumas suspensões);
- ✓ O tipo de interação entre as partículas (atração ou repulsão).

¹ Solvatação, entende-se pelo fenômeno que ocorre quando um composto iônico ou polar se dissolve em uma substância polar, sem formar uma nova substância. As moléculas do soluto são rodeadas pelo solvente. A solvatação acontece tanto em soluções iônicas quanto moleculares.

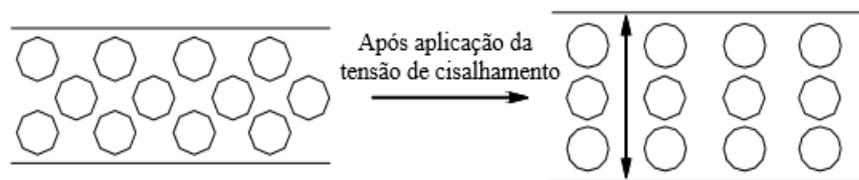
II- Dilatância

De acordo com Sousa (2005), a dilatância é um fenômeno inverso à pseudoplasticidade. Nesse tipo de comportamento, observa-se um aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento aplicada ao sistema, quando este é avaliado em uma condição de fluxo, apresentado na Figura 1. Segundo Navarro (1997), tal termo foi utilizado pela primeira vez por Reynolds ao observar que alguns sistemas se expandiam, volumetricamente, sob cisalhamento.

Os fluidos que apresentam este comportamento, quando em repouso, apresentavam uma quantidade mínima de vazios sendo o líquido existente suficiente apenas para preenchê-los.

Quando submetido a um cisalhamento suave, o líquido lubrifica as partículas, facilitando seus movimentos relativos, ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Fluidos submetidos ao fenômeno da dilatância



Fonte: NAVARRO (1997).

III- Viscoplasticidade

A viscoplasticidade é um fenômeno caracterizado pela existência de um valor limite para a tensão de cisalhamento (denominado de tensão de escoamento), o qual deve ser excedido para que o material apresente um fluxo viscoso. Esse modelo, representado pelo fluido de Bingham, é comum entre as composições altamente concentradas em que a interação partícula-partícula exerce um papel importante. Sistemas líquidos com concentração de sólidos elevada, favorecem a formação de uma estrutura espacial por parte das partículas antes dispersas (NAVARRO, 1997).

No caso das suspensões, a tensão de escoamento é originada pela aglomeração das partículas presentes no fluido, de modo a formar uma estrutura espacial rígida de partículas por toda a suspensão. Neste caso, a tensão de escoamento corresponde àquela necessária para quebrar essa

estrutura de partículas, associando um limite para a tensão de cisalhamento, pois com essa elevação o material apresenta um fluxo viscoso caracterizando uma tendência viscoplástica (plástico ideal). Vale salientar que a formação desse tipo de estrutura exige que a suspensão apresente uma concentração de sólidos mínima, que possibilite a conexão entre as partículas por todo o fluido. A tensão de escoamento também é decisivamente influenciada pelas forças atrativas as quais dificultam o deslocamento relativo entre elas na suspensão (OLIVEIRA et al., 2000).

2.2 Reologia aplicada em argamassas de revestimento

Segundo Bauer (2005), as argamassas são formadas de materiais como agregados, cimentos e água em proporções adequadas. Estas composições, na maioria das vezes, são suspensões concentradas de partículas sólidas (agregados), que apresentam diâmetros entre 100 μ m e 2mm aproximadamente, em um líquido viscoso (pasta de cimento), porém esta pasta não é um fluido homogêneo e sim composto de partículas em um líquido, no caso, a água.

As partículas grosseiras são submetidas ao atrito e impacto, enquanto a fração fina, cimento e cal, são afetadas por fenômenos de superfície e reações de hidratação quando sofrem cisalhamento no estado fresco. O comportamento reológico da argamassa se modifica devido aos fenômenos de dissolução, aglomeração, precipitação de fases hidratadas ligantes, alterações de pH e ação de aditivos. Com isso, corrobora-se a ideia que argamassa pode ser definida como um material cujas propriedades são determinadas pela interação de grãos grossos imersos em uma matriz fluida (CARDOSO, 2009).

Sua aplicação se justifica a partir do momento em que se pode classificar os materiais, analisar seus comportamentos frente a um campo de tensão, relacionar estes comportamentos com a estrutura de cada material, bem como prever o desempenho destes em outros estágios de tensão, deformação, tempo e temperatura (TANNER, 1998).

A utilização do ensaio de cisalhamento direto de solos aplicado em argamassa tanto no seu estado fresco como no endurecido, é objeto de estudo de diversos autores (BAUER, 2005; ALMEIDA et al.; 2013; SOUSA; AQUINO FILHO, 2013; CAMPOS et al., 2015; CARASEK et al., 2016; ARAÚJO et al., 2017), embora ainda seja um assunto pouco inserido no campo

científico para caracterização do comportamento reológico das argamassas, principalmente em seu estado fresco, tema abordado na pesquisa apresentada.

Os modelos ilustrados na Figura 2 apresentam uma relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento que se assemelha ao comportamento de argamassas em seu estado fresco, quando submetidas ao ensaio de cisalhamento direto. Em geral, o modelo mais utilizado para caracterizar o comportamento reológico de argamassas é o Fluido de Bingham (SOUSA; BAUER, 2002).

Sousa e Aquino Filho (2013) afirmam que trabalhabilidade das argamassas, de um modo geral, pode ser traduzida em termos de parâmetros como: consistência, plasticidade, coesão, exsudação, aspereza e capacidade de retenção de água e adesão. Essa propriedade do estado fresco das argamassas é muito importante, haja vista é necessário tê-la para um melhor manuseio do material. Ela apresenta certo grau de complexidade, pois é influenciada por inúmeros fatores, tanto internos (teor de água; proporção entre aglomerantes e agregado; natureza e teor dos plastificantes; distribuição granulométrica, forma e textura dos grãos dos agregados; natureza, teor e tipo de aditivos), quanto externos (tipo de mistura; tipo de transporte; técnica de execução do revestimento e características da base de aplicação).

A propriedade mais relevante da argamassa em seu comportamento reológico é a trabalhabilidade, a qual tem por definição:

Propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea (CARASEK, 2010, p.30).

2.3 Métodos de ensaio para analisar o comportamento reológico das argamassas no estado fresco

O comportamento reológico das argamassas se dá pela avaliação das propriedades do material em seu estado fluido. A avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco é bastante relevante, uma vez que sua aplicação se dá nessa condição. Segundo Carasek (2010), a trabalhabilidade é a propriedade relevante das argamassas em seu estado fresco, e avaliada como uma propriedade complexa, resulta da combinação de diversas características reológicas

da argamassa. Afirma a autora que apesar da experiência do pedreiro de reconhecer a trabalhabilidade de uma argamassa com facilidade é bastante complexo mensurá-la em laboratório.

De acordo com Antunes, John e Pillegi (2005), a trabalhabilidade em argamassa é uma propriedade de avaliação indefinível, arbitrária e pessoal, não caracterizada por si só, na medida em que depende de um julgamento subjetivo de quem a aplica, influenciado pela metodologia de dosagem e forma de aplicação.

Os estudos dos métodos para avaliação da trabalhabilidade das argamassas são baseados no comportamento reológico do material. Muitas vezes esses métodos são empíricos tentando chegar o mais próximo da realidade, porém seus resultados podem não apresentar dados factos. Diante dos métodos que apresentem dados factos é que se pretende identificar qual deles tem um grande potencial de avaliar o comportamento reológico das argamassas.

Os métodos mais utilizados para avaliação desse comportamento são: mesa de espalhamento, conhecido também como *flow table*, recomendado pela norma brasileira NBR 13276 (ABNT, 2005); penetração de uma esfera padrão, conhecido como *dropping ball*, recomendado pela norma internacional BS 4551 (BSI, 2005); os penetrômetros, conhecido como *penetração de cone*, recomendado pela norma americana ASTM C780 (ASTM, 2012); o *squeeze-flow*, recomendado pela norma brasileira NBR 15839 (ABNT, 2010) e como objetivo da pesquisa o ensaio pouco utilizado na área de argamassas, embora comumente utilizado em solos, vem apresentando resultados significativos e quantitativos para avaliar o comportamento reológico das argamassas, trata-se do ensaio de cisalhamento direto, baseado em recomendações orientadas pela norma brasileira NBR ISO 12957-1 (ABNT, 2013).

A Tabela 2 resume-se os métodos mais utilizados para avaliar o comportamento reológico das argamassas de revestimento em seu estado fresco.

Tabela 2 – Métodos mais utilizados para avaliar a reologia das argamassas

Método	Norma
Mesa de consistência (<i>flow table</i>)	NBR 13276:2005
<i>Dropping Ball</i>	BSI 4551:2005
Penetração de cone	ASTM C780:2012
<i>Squeeze-flow</i>	NBR 15839:2010
Cisalhamento direto	NBR ISO 12957-1:2013

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

2.3.1 Mesa de consistência “ flow table ”

Em contraste à complexidade do comportamento reológico apresentado pelas argamassas, elas são geralmente caracterizadas por ensaios simples, de fácil e rápida aplicação, como o índice da mesa de consistência (*flow table*), o qual consiste em avaliar a consistência do material de acordo com o conceito de trabalhabilidade (CAMARINI e ISHIKAWA, 2004; POLITO, 2008; CARASEK, 2010; MACIOSKI, 2014; ROCHA et al., 2015; CASALI et al., 2016).

O ensaio de *flow table* é empregado somente de forma descritiva, sem quantificações reais. Os valores obtidos com o ensaio caracterizam apenas a trabalhabilidade da argamassa, se conseguiu “traçar” uma boa argamassa para aplicação (SILVA, 2011). Embora seja um método empírico, é bastante utilizado no Brasil pela sua facilidade de execução e o espalhamento obtido é considerado com um parâmetro de trabalhabilidade da argamassa, podendo ajustar a dosagem de água no traço, a partir dos resultados obtidos.

Os valores do índice de consistência adotados pela NBR 13276 (ABNT, 2005) são de 260 ± 5 mm, caso a quantidade de água da mistura da argamassa não seja anteriormente fixada. Este resultado pode ser interpretado que quanto maior o valor do espalhamento mais fluido é o estado reológico da argamassa.

Esses valores apresentam-se bastante variáveis quando o assunto trata de pesquisa científicas. A trabalhabilidade da dosagem do traço pode ser fixada por meio do ensaio de consistência, permitindo uma flexibilidade na quantidade de água adotada de traço para traço, de modo que consiga manter um padrão de trabalhabilidade (CAMARINI e ISHIKAWA, 2004; ROCHA et

al., 2015; CASALI et al., 2016). A Tabela 3 apresenta os valores de índices de consistência adotados para argamassas de revestimento no estado fresco encontrados no estado da arte.

Tabela 3 – Índices de consistência de argamassas em estado fresco

Referência	Índice de consistência (mm)
Camarini e Ishikawa (2004)	240
Sousa e Aquino Filho (2013)	260
Macioski (2014)	245
Campos et al. (2015)	265
Rocha et al. (2015)	210
Casali et al. (2016)	212
Carasek et al. (2016)	348
NBR 13276 (ABNT, 2005)	260 ± 5

Fonte: A autora (2018).

A partir dos resultados de índices de consistência apresentados pelos autores na Tabela 3, observou-se que o ensaio de “flow table” não define completamente a trabalhabilidade, podendo argamassas com mesmos valores de índices de consistência apresentarem resultados práticos de aplicação completamente divergentes. Por essa razão, o ensaio de mesa de consistência é definido como um ensaio empírico e qualitativo, deixando a desejar nas propriedades das argamassas de revestimento em seu estado fresco, quando interpretados os resultados obtidos pelo ensaio que mede a sua consistência.

Afirmam Koehler, Fowler e Ferraris (2003), que os resultados obtidos de índice de consistência dissociam a contribuição de cada um dos parâmetros reológicos (viscosidade e tensão de escoamento), e são apresentados quantitativamente na forma de índice de consistência ou porcentagem de espalhamento e não em termos de unidades reológicas fundamentais.

Há uma dificuldade na caracterização da trabalhabilidade das argamassas em face aos resultados obtidos no ensaio de “flow table”, visto que um mero conhecimento da consistência é insuficiente para definir se a argamassa é trabalhável ou não. O ensaio não se mostra o mais sensível para avaliar a trabalhabilidade das argamassas, mesmo sabendo-se que é o ensaio usualmente utilizado para avaliar esta propriedade (MACIOSKI, 2014).

Conforme Sousa (2005), essa trabalhabilidade não pode ser associada ao escoamento, uma vez que aplicados os golpes à argamassa, a amostra é submetida a uma tensão superior à tensão de escoamento, caracterizando o ensaio como empírico, pois não permite uma avaliação real do material em função do tempo. As etapas do ensaio são ilustradas na Figura 4.

Figura 4 – Ensaio de mesa de consistência (*flow table*)



Fonte: SOUSA (2005).

2.3.2 Penetração de uma esfera padrão “ dropping ball ”

Outro método empregado para avaliar o comportamento das argamassas no estado fresco é a penetração de uma esfera padrão, conhecido como *dropping ball*, a qual sua forma de utilização é recomendada pela norma internacional BS 4551 (BSI, 2005).

O ensaio consiste na liberação de uma esfera (tamanho e peso normatizados) em queda livre, a uma altura normativa em uma amostra de argamassa, a qual penetrará na argamassa, obtendo-se o índice de penetração, que é definido como a profundidade que a esfera conseguiu atingir na argamassa após seu lançamento, segundo a norma BS 4551 (BSI, 2005). A Figura 5 mostra os equipamentos utilizados para realização do método ensaiado.

Figura 5 – Equipamentos utilizados no método de ensaio dropping ball



Fonte: SILVA (2011).

Este ensaio também apresenta resultados empíricos, se assemelhando à realidade dos dados obtidos no ensaio da mesa de consistência. Embora esteja relacionado à tensão de escoamento, considera-se relevante o impacto da bola na argamassa, logo a densidade da mistura influencia muito no índice obtido (CARDOSO, 2009).

Ainda segundo o Autor, esses resultados são expressos na forma de índice de penetração, não utilizando unidades fundamentais. É um ensaio geralmente relacionado à tensão de escoamento do material, mas deve-se levar em conta que existe a influência do impacto da bola no material e que a densidade da argamassa influi bastante na medida, como por exemplo, no caso de materiais com ar incorporado.

Há também a possibilidade de determinado material, sob a taxa de cisalhamento imposta, não permitir ou permitir minimamente a penetração da esfera, por apresentar alta viscosidade, ou seja, por ter comportamento dilatante, sua caracterização através desta técnica a inviabiliza por baixa fluidez, porém ao manuseá-la, em taxas de cisalhamento inferiores aos do ensaio, seu comportamento reológico torna-a propícia para determinadas aplicações (CARDOSO, 2009).

De acordo com Gomes (2013), o “dropping ball” é um dos ensaios mais utilizados para definir o comportamento das argamassas no estado fresco, pois assim como o “flow table”, utiliza-se relações com sua consistência. Porém, embora estes ensaios sejam de fácil execução e baixo custo apresentam limitações conceituais para caracterização da argamassa, pois não consideram sua natureza multifásica e reativa.

Para Cardoso (2009), é impossível que o comportamento complexo de um material seja descrito por um único valor de medida, mas deve ser medido por um perfil reológico e, preferivelmente,

simulando as solicitações práticas reais, visto que o comportamento pode variar em função das características da solicitação.

2.3.3 Ensaio de penetração de cone

O método consiste em determinar a carga, a deformação imposta à amostra e a tensão de ruptura, à medida que ocorre a penetração de um cone lançado de uma altura padrão sobre a argamassa moldada (SOUSA, 2005). Toda execução do ensaio é referenciada a partir da norma internacional ASTM C780 (ASTM, 2012).

A energia dissipada na queda é imposta à argamassa, restringida pela viscosidade do material e pelo aumento da área de contato (atrito) com a argamassa (HOPPE FILHO, 2008).

O método de ensaio tem objetivo equiparado com o *flow table*, os quais se caracterizam em determinar a consistência da argamassa em seu estado fresco. Segundo Carasek et al. (2016), a correlação entre os resultados obtidos em sua pesquisa, utilizando o ensaio de *flow table* e *penetração de cone*, foi muito boa, resultando no índice de correlação ($R^2 = 0,99$), atestando que a utilização desses métodos para a determinação da consistência de uma argamassa é satisfatória. A Figura 6 ilustra uma argamassa de revestimento submetida ao método de ensaio de penetração de cone.

Figura 6 – Equipamentos utilizados no método de ensaio penetração de cone



Fonte: SOUSA e BAUER (2003).

2.3.4 Reômetros “squeeze-flow”

Este ensaio analisa o escoamento do material decorrente da aplicação de um deslocamento de duas placas paralelas sobre a amostra no estado fresco, ocasionando deslocamentos no seu interior, devido aos esforços de cisalhamentos radiais. É relevante observar que os resultados estão atrelados à consistência do material, relacionado com sua trabalhabilidade, facilitando sua aplicação no canteiro de obras, por exemplo (MATTANA, 2013).

No que se refere à propriedade reológica de uma argamassa, essencialmente a viscosidade plástica e a tensão de escoamento devem ser adequadas para a finalidade de utilização desta argamassa, de modo a facilitar o seu manuseio e, também, minimizar os efeitos prejudiciais devido à retração, ocasionada pela duração excessiva para aplicação do material (SILVA, 2011).

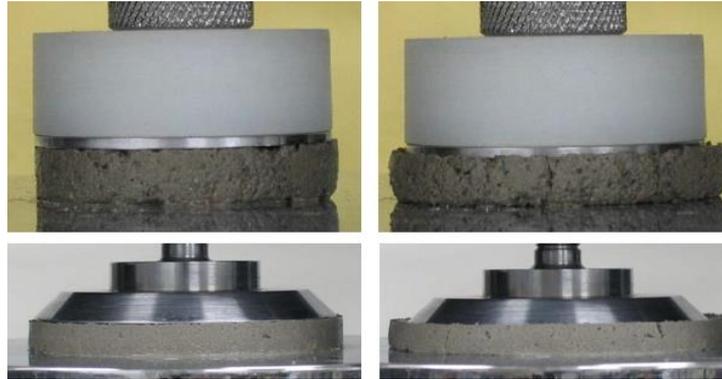
Cardoso, Pillegi e Jonh (2010) consideram que o método avalia não só o comportamento reológico das argamassas, como também é aplicável em outros materiais de construção. A técnica é bastante interessante para caracterização das argamassas, pois as mudanças geométricas inerentes ao ensaio relacionam com as etapas de execução de revestimento aplicado em um substrato, mencionando-as como: espalhamento, nivelamento e acabamento.

Afirmam ainda os autores, que a versatilidade e a praticidade do método de squeeze-flow permite que argamassas diferentes ou seus materiais constituintes sejam avaliados da maneira mais adequada.

As configurações geométricas utilizadas para avaliação do comportamento reológico das argamassas de revestimento consistem em amostras com 10 mm de altura e 101 mm de diâmetro, baseadas nas recomendações da norma brasileira NBR 15839 (ABNT, 2010).

Primeiramente, é aplicada uma força ao material e sua deformação é registrada. Posteriormente, o material é submetido a um deslocamento efetuado com velocidade constante e registra-se então a força (ENGMANN, SERVAIS e BURBIDGE, 2005). A Figura 7 ilustra as etapas presentes no ensaio de *squeeze-flow*.

Figura 7 – Equipamentos utilizados no método de ensaio squeeze-flow



Fonte: CARDOSO (2009).

A velocidade de deslocamento recomendada é da ordem de 0,1 mm/s, tanto por ser uma velocidade em que os fenômenos em situações práticas ocorrem como também, por ser facilmente realizada pela grande maioria dos equipamentos encontrados nos laboratórios onde se realizam as pesquisas (CARDOSO, PILLEGI e JONH, 2009).

De acordo com Cardoso, Pillegi e Jonh (2009), velocidades acima desse valor não refletem a realidade encontrada na prática, além do que favorecem a separação de fases das argamassas em seu estado fresco. A utilização de velocidades mais elevadas, na faixa entre 1 e 3 mm/s, são interessantes por avaliarem o material sob uma condição diferente de sollicitação, em contrapartida não são velocidades encontradas na prática. A limitação da velocidade está mais correlacionada ao porte do equipamento e ao limite estabelecido à capacidade ao qual ele suporta.

O material é sensível à velocidade ao qual é submetido no ensaio do *squeeze-flow*. A velocidade do ensaio depende da reologia do material, podendo ser claramente observada sua heterogeneidade com o aumento da velocidade de deslocamento (PERROT et al., 2007). A reologia da pasta é muito sensível ao conteúdo de água. No entanto, a homogeneidade da pasta é um parâmetro relevante para a qualidade das argamassas em seu estado endurecido, garantindo a eficiência do processo.

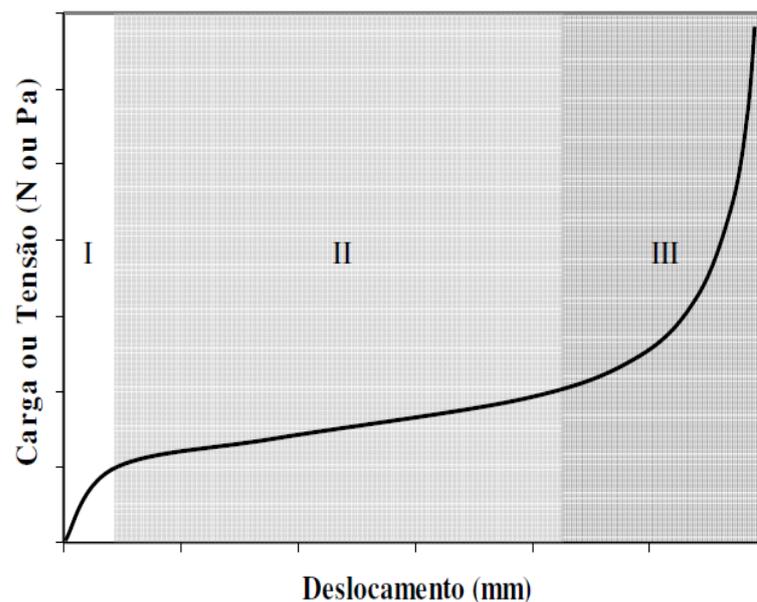
As pesquisas desenvolvidas por Cardoso, Pillegi e Jonh (2009) comprovaram que a mistura de argamassa contendo menor quantidade de água em sua mistura necessitaram de uma maior velocidade de deslocamento, pois necessitaram de maiores cargas para se deformarem, isso

pôde ser justificado pelo fato da quantidade de água na pasta presente na mistura não estar em quantidade suficiente, apresentando uma elevada viscosidade, não sendo capaz de manter os agregados afastados e lubrificados, gerando altos níveis de atrito e um comportamento do tipo dilatante.

De maneira oposta, os autores confirmaram pelos resultados dos ensaios de *squeeze-flow*, que uma maior quantidade de água na mistura da dosagem das argamassas necessita de velocidades de deslocamento menores, ocorrendo sua deformação submetidas a menores cargas, ficando a argamassa com um aspecto mais homogêneo, após o término do ensaio.

Os resultados obtidos com o ensaio permitem gerar um gráfico de carga x deslocamento, apresentando 3 (três) regiões bem definidas, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 – Estágios obtidos graficamente com o ensaio de squeeze-flow



Fonte: CARDOSO, PILLEGI e JONH (2009).

Segundo Cardoso, Pillegi e Jonh (2010), na primeira região (I) o material se comporta como um sólido, sofrendo pequenas deformações. As deformações são elásticas e lineares. Nesse estágio a espessura da camada das argamassas ensaiadas é máxima, pois sofreram pequenas deformações.

Na região seguinte da Figura 8 (II), as deformações são intermediárias, justificadas pelo fato da força que mantinha o material elástico, fluir por deformação plástica ou viscosa dependendo das suas características, sendo assim, as argamassas sofrem grandes deformações sem aumento significativo da força para ocorrer o deslocamento. Nesse momento, a argamassa atinge uma grande área aplicada, resultante das deformações, favorecendo a produtividade dos funcionários.

Já na terceira região (III) da Figura 8, que ocorrem grandes deformações, e para que se alcance esse estágio, a carga será elevada para conseguir romper as partículas que estão unidas, dificultando as deformações. As forças de atrito são predominantes nesse estágio. Essa fase, para acabamento das argamassas, tende a ser dificultada devido às altas cargas envolvidas.

De acordo ainda com os citados autores, o ensaio é capaz de detectar pequenas alterações nas características reológicas dos materiais, fornecendo como resultados gráficos um perfil do comportamento das argamassas de acordo com as solicitações impostas. O método proposto exhibe grande potencial para argamassas em seu estado fresco, além de servir como ferramenta para o controle de qualidade dos materiais submetidos ao ensaio.

Macioski (2014) concluiu a partir dos resultados obtidos que o ensaio de reologia por “squeeze-flow” foi mais sensível à variação da trabalhabilidade que o ensaio do índice de consistência pelo “flow table”, dessa forma o ensaio de “squeeze-flow” é considerado o ensaio mais adequado para avaliar o estado reológico das argamassas de revestimento.

2.3.5 Cisalhamento direto

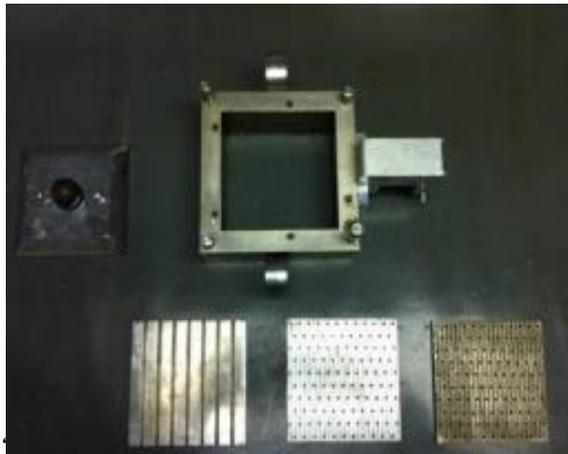
O ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento e se baseia diretamente no critério de Mohr-Coulomb (LAMBE, 1972 apud CAMPOS, 2014). É o ensaio mais comumente utilizado nacionalmente e internacionalmente, na área de Geotecnia, por ser de fácil e rápida aplicação, onde se determina, principalmente, a resistência ao cisalhamento de solos.

Segundo a norma americana ASTM D3080 (ASTM, 2011), o método de ensaio consiste no posicionamento de uma amostra no dispositivo de cisalhamento direto com aplicação de uma

tensão normal pré-determinada num plano e verifica-se a tensão cisalhante que provoca a ruptura em uma amostra prismática. A amostra é colocada em uma caixa bipartida, onde se aplica a força normal N , constante, aumentando-se progressivamente a força tangencial T e provocando-se o deslocamento de uma das partes da caixa em relação à outra, até a sua ruptura.

O equipamento empregado no ensaio de cisalhamento direto consiste em uma caixa bipartida (Figura 9), onde o corpo-de-prova é moldado entre duas pedras porosas, uma no topo e outra na base, de modo a facilitar a drenagem do material. A força normal é aplicada através de uma placa rígida de distribuição de carga e é possível manter o corpo-de-prova sob água, evitando a perda excessiva de umidade durante o ensaio em amostras saturadas.

Figura 9 – Caixa bipartida utilizada no ensaio de cisalhamento

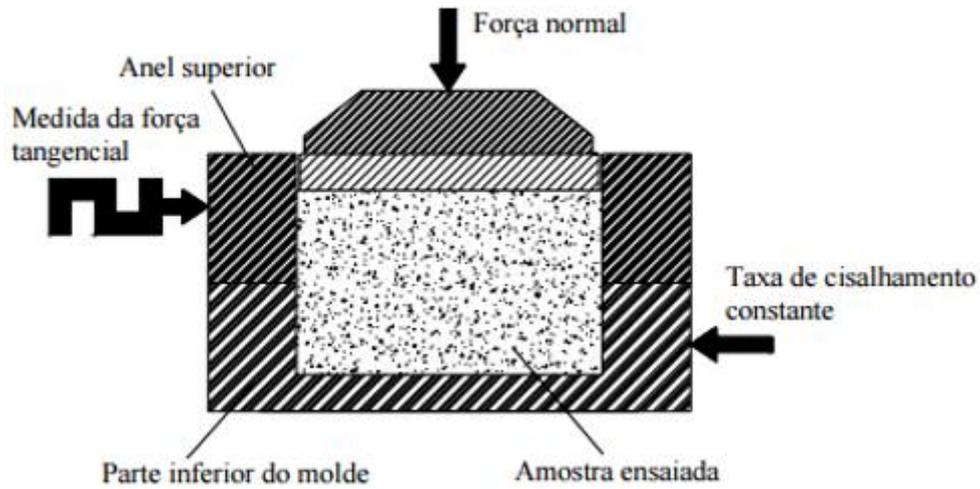


Fonte: ALMEIDA e SILVA (2012).

A tensão normal (σ) e a tensão de cisalhamento (τ) são obtidas segundo a divisão entre a força normal (F) e força tangencial (obtida durante o ensaio) pela área da seção transversal do corpo-de-prova (A) formado pela amostra ensaiada, ou seja, $\tau = \frac{F}{A}$. Essas tensões vão sendo alteradas durante o ensaio, visto que a área correspondente ao plano de ruptura vai sendo reduzida.

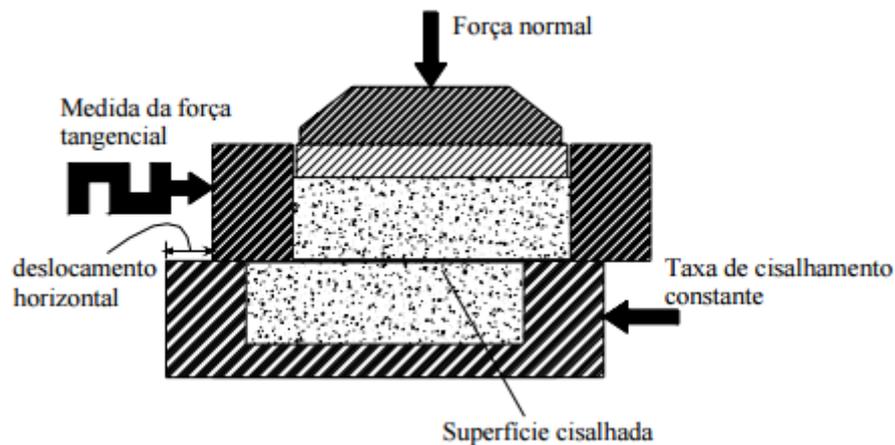
Segundo Almeida et al. (2013), é aplicada uma carga no dispositivo (tensão normal) com carregamento constante que promove um cisalhamento na amostra, essa taxa de carregamento constante garante que haja um fluxo homogêneo de carga. As Figuras 10 e 11 ilustram a amostra antes e depois de submetida ao ensaio de cisalhamento.

Figura 10 – Amostra moldada antes de ser submetida ao ensaio de cisalhamento direto



Fonte: SOUSA (2005).

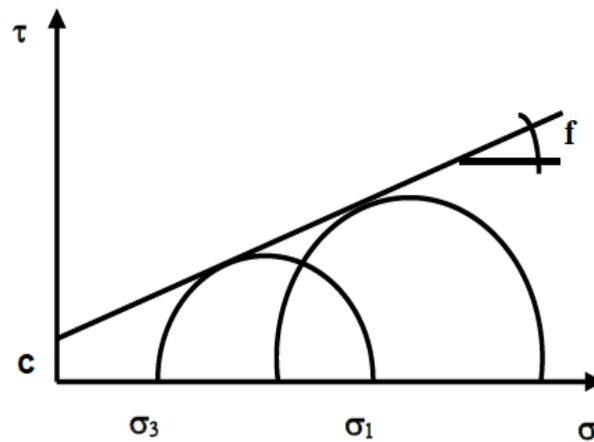
Figura 11 – Amostra moldada após ensaio de cisalhamento direto



Fonte: SOUSA (2005).

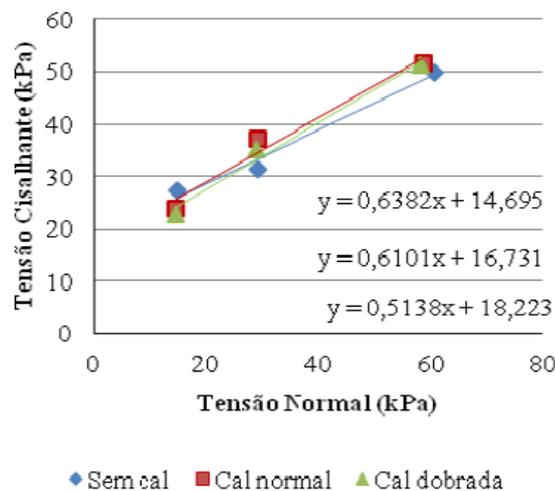
Durante o ensaio de cisalhamento direto, alguns dados são registrados e servem de parâmetros para interpretação dos resultados esperados. Realizando-se ensaios com tensões normais distintas, pode-se elaborar um gráfico com as tensões de ruptura para cada tensão normal, obtendo-se a envoltória de resistência baseada no critério de Mohr-Coulomb, ilustrada na Figura 12, que determina consequentemente, os valores do ângulo de atrito e coesão do material ensaiado, conforme mostra a Figura 13.

Figura 12 – Envoltória gráfica da resistência de cisalhamento baseado no critério de Mohr-Coulomb



Fonte: JUNQUEIRA (2010).

Figura 13 – Regressão linear dos parâmetros (tensão cisalhante x tensão normal)

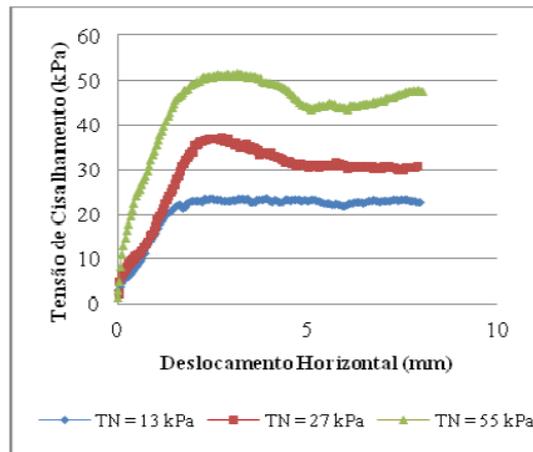


Fonte: SOUSA e AQUINO FILHO (2013).

Outros resultados obtidos no ensaio são a tensão cisalhante (τ), a qual pode ser representada em função do deslocamento horizontal, tensão esta que representa a tensão de ruptura da amostra, diferentemente da tensão residual (τ_{res}), que é registrada após a ruptura da amostra. O deslocamento vertical durante o ensaio também é registrado, indicando se houve diminuição ou aumento de volume da amostra durante o cisalhamento.

A Figura 14 mostra um exemplo de gráfico obtido durante o ensaio de cisalhamento direto, que apresenta os valores da tensão cisalhante (τ), tensão residual (τ_{res}) e o deslocamento horizontal, para diferentes tensões normais aplicadas.

Figura 14 – Tensão cisalhante (KPa) x Deslocamento horizontal (mm)



Fonte: SOUSA e AQUINO FILHO (2013).

Com intuito de avaliar o comportamento reológico das argamassas de revestimento através de ensaios que forneçam dados quantitativos e que possam ser interpretados para avaliar suas propriedades, o ramo científico da argamassa vem tentando inserir um ensaio de referência aplicado na área de solos, no caso, o ensaio de cisalhamento direto.

Por se tratar de algo inovador para as argamassas, o ensaio de cisalhamento direto aplicado na Geotecnia já é objeto de estudo para alguns autores (SOUSA, 2005; LU, WANG e RUDOLPHI, 2007; LU e WANG, 2011; ALMEIDA et al., 2013; SOUSA e AQUINO FILHO, 2013; CAMPOS, 2014; CAMPOS et al., 2015; CARASEK et al., 2016; ARAÚJO et al., 2017).

O ensaio de cisalhamento direto vem sendo mais utilizado no estado endurecido das argamassas de revestimento do que no seu estado fresco. Isso deve-se ao fato que no estado endurecido as argamassas podem ser avaliadas quanto à sua aderência ao substrato e os ensaios relevantes a essa propriedade geram dados quantitativos que podem ser comparados com os obtidos no ensaio de cisalhamento. Já no estado fresco, os dados obtidos com o ensaio de cisalhamento direto são interpretados entre as pesquisas realizadas, que não se tem um número significativo de publicações, por se tratar de um ensaio inovador nas áreas das argamassas em seu estado fresco.

De acordo com Sousa (2005), o ensaio de cisalhamento direto não é muito utilizado no estudo das argamassas de revestimento. Esse material, apesar das semelhanças com determinados tipos

de solos, possui características e parâmetros de interesse bastante diferenciados, os quais precisam ser melhor explorados.

Outro ponto a ser observado, é quanto as referências dos dados obtidos com outros métodos de ensaios para argamassas em seu estado fresco, por boa parte dos métodos normatizados se tratarem de dados empíricos e qualitativos, não se tem tanta veracidade aos dados gerados com os ensaios, conseqüentemente não podem ser comparados com os dados quantitativos obtidos com o ensaio de cisalhamento direto, pois poderiam gerar divergências nas interpretações.

Algumas variáveis são fixadas para dar prosseguimento ao ensaio, a Tabela 4 apresenta o estado da argamassa submetida ao ensaio, as dimensões da caixa bipartida, os valores dos parâmetros de velocidade do ensaio e as tensões normais normalmente empregados por alguns autores levantados da literatura para utilização do ensaio em argamassas de revestimento.

Tabela 4 – Valores da velocidade, tensões normais e dimensões da caixa bipartida aplicados ao ensaio de cisalhamento direto

Referência	Estado da argamassa	Dimensões da caixa cisalhante (mm)	Velocidade (mm/min)	Tensões normais (KPa)
Sousa (2005)	Fresco	60 x 60	1,52	25; 50 e 100
Lu e Wang (2011)	Fresco	56 x 56	1,00	0; 31 e 62
Almeida et al. (2013)	Endurecido	50 x 50	0,1	-
Sousa e Aquino Filho (2013)	Fresco	-	0,6	13; 27 e 55
Campos (2014)	Endurecido	80 x 80	0,5	10; 60; 90 e 150
Campos et al. (2015)	Endurecido	80 x 80	0,5	10; 60; 90 e 150
Carasek et al. (2016)	Fresco	50 x 50	0,77	13,5; 25; 50 e 100
Araújo et al. (2017)	Fresco	50 x 50	0,77	13,5; 25; 50 e 100
Esta pesquisa (2018)	Fresco	100 x 100	0,2	10; 37 e 50

Fonte: A autora (2018).

Percebe-se que os dados apresentados na Tabela 4 não seguem uma tendência entre os autores, isso deve-se ao ensaio de cisalhamento direto aplicado em solos ter que ser adequado aos estudos das argamassas de revestimento.

Para Campos (2014), a velocidade de carregamento depende da coesão da amostra e deve seguir valores de velocidade utilizados em ensaios realizados anteriormente, em outras pesquisas

realizadas. Afirma ainda a autora que a velocidade máxima a ser aplicada ao equipamento, para realização do ensaio nas argamassas em seu estado fresco deve ser de 1,0 mm/min.

Já para Sousa (2005), essa velocidade de carregamento está atrelada ao escoamento do material, o qual depende da trabalhabilidade do material. O valor identificado na sua pesquisa que garantiu o escoamento da argamassa ensaiada foi de 1,524 mm/min.

A utilização do ensaio de cisalhamento direto para argamassas de revestimento ainda é um método pouco utilizado, por isso não é determinante utilizar certa velocidade para cada estado de argamassa ensaiado, nem como definir se as velocidades utilizadas no ensaio são consideradas baixas ou altas na realização do ensaio.

De acordo com Almeida et al. (2013), a escolha da tensão normal utilizada no ensaio baseou-se no critério de se ter pelo menos um ponto próximo a tensão normal nula, que para seu objeto de estudo foi de 10 KPa, e as demais tensões aplicadas possuíram valores superiores a este, mas ainda considerados baixos, representados em seu trabalho por 60 KPa, 90 KPa e 150 KPa.

De acordo com Campos (2014), as tensões normais aplicadas são valores próximos da tensão nula, isso deve-se ao fato de que o sistema de revestimento quando aplicado ao substrato, está sujeito a ações de força normal nula. Recomenda ainda a autora que para cada amostra de traço ensaiada, ela deverá ser submetida a, no mínimo, três tensões normais distintas.

Embasado no estado da arte, percebe-se que a tensão cisalhante aumenta à proporção que crescem as tensões normais, justificado pela maior força vertical (tensão normal – σ) aplicada à amostra necessitando-se de uma maior tensão (tensão cisalhante – τ) para que ocorra a ruptura da amostra (LU e WANG, 2011; ALMEIDA et al., 2013; SOUSA e AQUINO FILHO, 2013; CAMPOS, 2014; CARASEK, 2016; ARAÚJO et al., 2017).

A coesão e o ângulo de atrito obtidos a partir da regressão linear formado pelas tensões cisalhantes máximas e tensões normais, apresentam valores que geram interpretações distintas entre os autores (SOUSA, 2005; SOUSA e AQUINO FILHO, 2013).

Entende-se por coesão a união e aglutinação dos compostos da argamassa de revestimento. Esta propriedade está diretamente ligada aos constituintes finos da mistura, pois ocorre o aumento da área específica dos sólidos, sendo a pasta responsável pela coesão das argamassas. Essa coesão pode ser alterada pela quantidade de água inserida na dosagem do traço (BOMBLEI, 1967).

De acordo com Sousa (2005), percebe-se que o teor de aglomerante presente nas argamassas exerce uma correlação direta com aumento da coesão. Já entre a coesão e o ângulo de atrito existe uma relação inversa. Valores acima de 8,0 kPa para a coesão e menores que 30° de atrito interno, parecem razoáveis para se caracterizar uma argamassa no estado fresco. Porém, afirma o autor que estimar valores de referência para auxiliar em uma definição de trabalhabilidade, no caso da coesão e do ângulo de atrito interno, ainda é cedo devido aos poucos estudos realizados.

Afirmam Sousa e Aquino Filho (2013) que, quanto maior a presença da aglomerante cal na dosagem dos traços das argamassas, maiores são os valores dos ângulos de atritos. Já os valores de coesão obtidos nos ensaios, onde a argamassa dosada apresentava maiores teores de cimento em relação aos agregados, praticamente não houveram modificações com a alteração da cal nos traços ensaiados. Em contrapartida, para os traços com menores proporções de cimento, a coesão foi diminuindo à medida que adicionava cal no traço das argamassas, portanto o ensaio de cisalhamento direto mostrou-se sensível às mudanças do teor da aglomerante cal.

A Tabela 5 apresenta os valores das coesões e dos ângulos de atrito obtidos através da regressão linear e apresentados pelos autores.

Tabela 5 – Valores de coesão e ângulo de atrito obtidos da regressão linear

Teor aglomerante/agregado	Traços	Coesão (Kpa)	Ângulo de atrito (°)
Rica em cimento (E4)	Cimento: areia: água	14,54	29,15
	Cimento: cal: areia: água	14,50	32,23
	Cimento: cal dobrada: areia: água	14,45	34,20
Pobre em cimento (E10)	Cimento: areia: água	18,22	27,19
	Cimento: cal: areia: água	16,73	31,39
	Cimento: cal dobrada: areia: água	14,70	32,55

Fonte: Adaptado de Sousa e Aquino Filho (2013).

Segundo Araújo et al. (2017), os parâmetros obtidos com o ensaio de cisalhamento direto, utilizando diferentes quantidades de água nos traços ensaiados, mostraram-se sensíveis às alterações da água, conclui o autor que a adição de água aos traços de argamassa, necessita de uma menor tensão cisalhante para romper a amostra. As retas resultantes da regressão linear das tensões cisalhantes máximas x tensões normais, mostraram-se mais inclinadas para as amostras mais saturadas, obtendo-se menores valores de coesão e maiores ângulos de atrito.

De acordo com os parâmetros obtidos através do ensaio de cisalhamento direto, afirmam Lu e Wang (2011) que, maiores relações de água/cimento na dosagem das argamassas, ocasionam uma diminuição na coesão, já os valores dos ângulos de atrito obtidos no ensaio de cisalhamento, praticamente não sofreram alterações nos diferentes traços ensaiados. Ainda afirmam os autores que, uma modificação nos volumes dos agregados resultou em valores crescentes de coesão e ângulo de atrito.

Diante de algumas divergências encontradas entre os valores obtidos com o ensaio de cisalhamento direto, sugere Almeida et al. (2013) que novos estudos sejam realizados adaptando o ensaio de cisalhamento direto aplicados à solos para às argamassas, oferecendo maior confiabilidade do método às argamassas de revestimento.

Mesmo com as divergências encontradas, existe a viabilidade da utilização do ensaio de cisalhamento direto para as argamassas de revestimento, a qual foi comprovada por Sousa (2005), Lu e Wang (2011), Almeida et al. (2013), Campos (2014) e Carasek et al. (2016), que demonstraram através do coeficiente de determinação (R^2), entre as variáveis das tensões cisalhantes e tensões normais, que por apresentarem valores próximos de 1,0 atestaram que o método de ensaio mostrou-se com grande potencial de ser utilizado no estudo das argamassas de revestimento nos estado frescos e endurecidos.

Comprovam os autores que os parâmetros obtidos com o ensaio de cisalhamento direto mostraram-se sensíveis às modificações realizadas nos traços das argamassas (LU e WANG, 2011; ALMEIDA et al., 2013; SOUSA e AQUINO FILHO, 2013; CAMPOS, 2014; CARASEK, 2016; ARAÚJO et al., 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se o programa de investigação adotado na pesquisa, visando atingir os objetivos propostos, abordando desde a aquisição e caracterização dos materiais utilizados, como o detalhamento das condições e descrição dos ensaios realizados durante o programa experimental.

3.1 Introdução

O programa de investigação experimental foi dividido em 06 (seis) etapas, conforme Figura 15. A primeira consistiu no levantamento de literatura nacional e internacional para desenvolvimento da revisão bibliográfica da dissertação.

A segunda correspondeu à definição, quantificação e aquisição dos materiais a serem utilizados na dosagem dos traços ensaiados, bem como a realização dos ensaios de caracterização Física, Química e Mecânica dos agregados e aglomerantes presentes nas misturas.

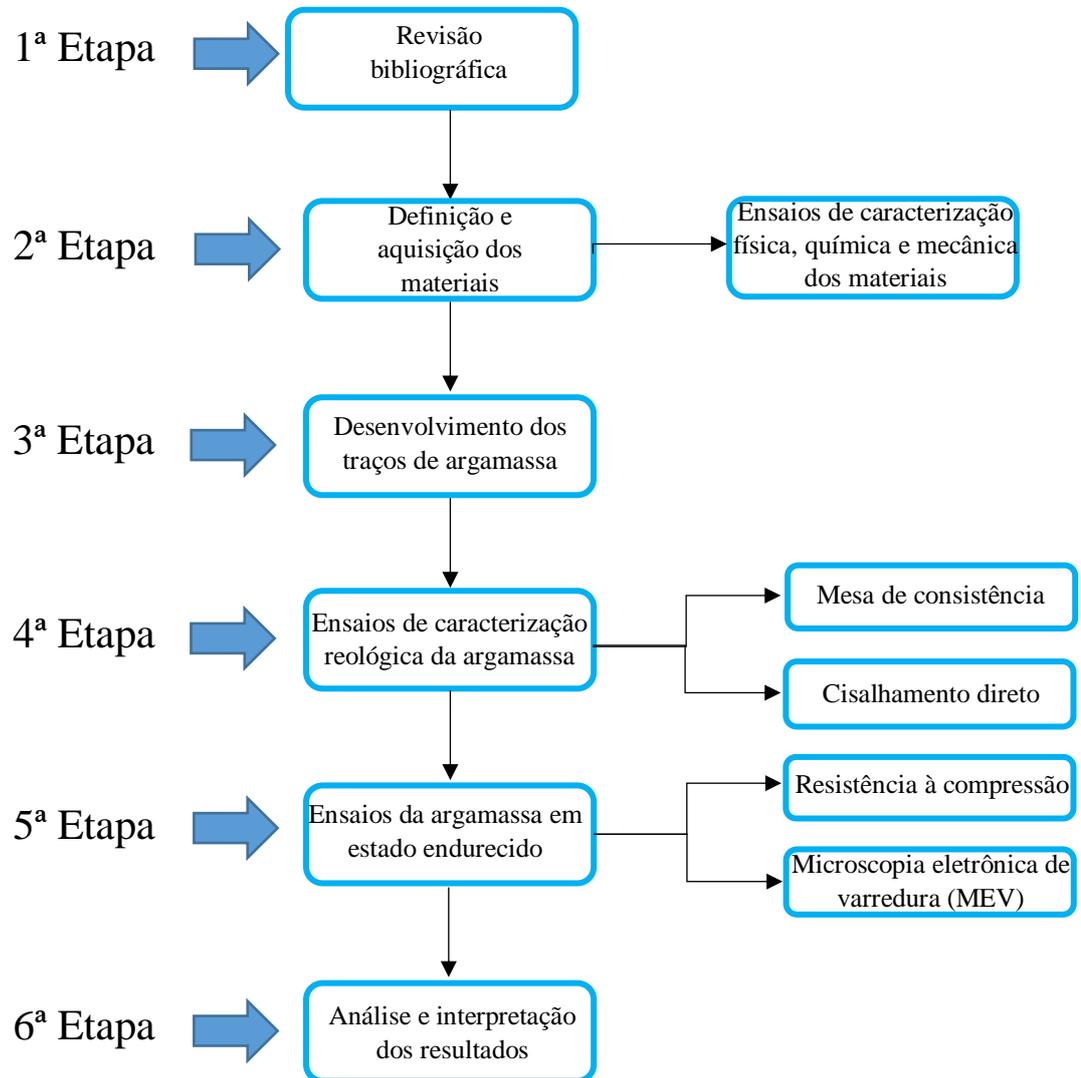
Na terceira etapa foram desenvolvidos os traços e dosagem de argamassa de revestimento, os quais foram, posteriormente, submetidos aos ensaios de caracterização reológica da argamassa.

Na quarta, foram realizados o ensaio de mesa de consistência das argamassas em estado fresco, conhecido também como “flow table”, o qual avaliou a consistência da mistura associada a trabalhabilidade e o ensaio mecânico de cisalhamento direto, aplicados à diferentes traços de argamassa de revestimento em seu estado fresco.

Na quinta fase, foram realizados os ensaios de caracterização das argamassas em seu estado endurecido. Primeiramente, os traços dosados foram submetidos ao ensaio de resistência a compressão simples e, posteriormente, foram detalhados sua microestrutura através do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A última etapa consistiu na análise e apresentação dos resultados obtidos nos ensaios realizados, os quais foram discutidos com base na literatura apresentada.

Figura 15 – Programa de Investigação



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

3.2 Aquisição de materiais

Os materiais foram adquiridos em armazém de material de construção na Região Metropolitana do Recife (RMR), todos com especificações normativas e com selos que garantem a sua qualidade utilizados nos ensaios. Os materiais utilizados na preparação das argamassas de revestimento estão descritos a seguir:

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado na dosagem das argamassas de revestimento foi o CII Z-32, classificado segundo a NBR 11578 (ABNT, 1991) como Cimento Portland composto com pozolana. Esse tipo de cimento é o mais utilizado em argamassas de revestimento, pois permite uma boa secagem e trabalhabilidade adequada a todos os tipos e fases de obra. Para cada 20 traços dosados consome-se 1 saco de cimento (50 Kg), sendo necessário cerca de 3 sacos para todo programa experimental.

As características Físicas, Químicas e Mecânicas do cimento utilizado na pesquisa foram fornecidas pelo fabricante, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CII Z-32 utilizado na pesquisa

Ensaio	Método de ensaio	Característica analisada	Idade	Unidade	Valor
Químicos	ABNT NBR (NM 11578:1991)	PF 950°C	-	%	6,58
		Fe ₂ O ₃	-	%	7,22
		Al ₂ O ₃	-	%	4,11
		SO ₃	-	%	2,87
		SiO ₂	-	%	20,18
		Na ₂ O	-	%	0,17
		K ₂ O	-	%	0,90
		CaO	-	%	56,54
		MgO	-	%	2,62
Resistência	ABNT NBR (NM 7215:1997)	Resistência à compressão	1 dia	MPa	7,86
			3 dias		22,6
			7 dias		28,5
			28 dias		36,7
Físicos e Mecânicos	ABNT NBR (NM 23:2001)	Massa específica	-	g/cm ³	3,02
	ABNT NBR (NM 11579:2012)	Índice de finura peneira nº 0,075 mm	-	%	1,90
	ABNT NBR (NM 11582:2016)	Expansibilidade Le Chatelier	-	mm	1,20
	ABNT NBR (NM 76:2015)	Blaine	-	cm ² /g	4636
	ABNT NBR (NM 65:2003)	Início de pega	-	min	198
	ABNT NBR (NM 65:2003)	Fim de pega	-	min	259

Fonte: Baseado em dados do fabricante (2018).

3.2.2 Cal hidratada CH – I

A cal hidratada utilizada nas dosagens dos traços foi a CH – I para argamassas, aprovada segundo às especificações das normas NBR 7175 (ABNT, 2003), obtendo-se características físicas e químicas, através dos ensaios realizados no Laboratório de Análises Químicas (LAQ) na UNICAP (Universidade Católica de Pernambuco).

A cal utilizada nas dosagens dos traços de argamassa possui selo de qualidade. Afirmam Paiva, Gomes e Oliveira (2007) que as cales que não apresentam selo de qualidade da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) não possuem qualidade para comercialização do produto no ramo da construção civil, pois suas propriedades afetam diretamente a durabilidade e eficiência das argamassas mistas de revestimento.

3.2.3 Agregado miúdo

Os agregados miúdos utilizados nos ensaios foram obtidos em empresa especializada no ramo, definidas no mercado como areias ensacadas, explorada de jazidas localizadas em Sirinhaém/PE, com dimensões granulométricas definidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009a), as quais são comercializadas como areia fina e areia grossa.

Passaram pelo processo de secagem, utilizando-se a estufa por 24h, com posterior peneiramento para utilização da fração passante na peneira de 2,38 mm (areia grossa) e na peneira de 1,19 mm (areia fina). Apresentaram umidade nos valores de 6,35% e 8,12%, para a areia fina e a grossa, respectivamente. As Tabelas 7 e 8 apresentam as características fornecidas pelo fabricante dos agregados miúdo e graúdo, enquanto a Figura 16 ilustra as areias (fina e grossa) utilizadas nas dosagens das argamassas.

Tabela 7 – Características do agregado miúdo (areia ensacada fina)

Método de ensaio	Granulometria (%)	Unidade	Areia fina
	4,75		-
	2,36		0,5
	1,18		1,3
	0,6	mm	10,3
ABNT NBR NM 248:2003	0,3		39,8
	0,15		32,1
	< 0,15		16,1
	Módulo de finura	-	1,50
	Dimensão máxima	mm	1,18
ABNT NBR NM 45:2006	Massa unitária	g/cm ³	1,50
ABNT NBR NM 52:2009	Massa específica	g/cm ³	1,70
ABNT NBR NM 46:2003	Material pulverulento	%	3,5
ABNT NBR 7218:2010	Teor de argila em torrões	%	-

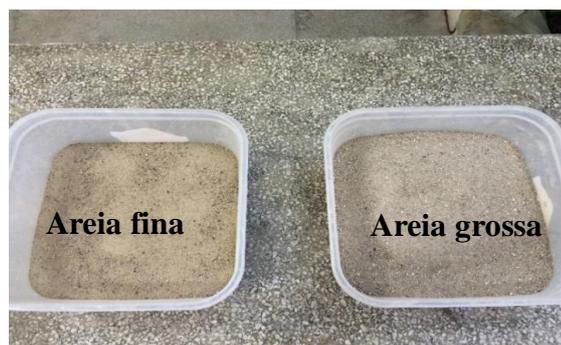
Fonte: Baseado em dados do fabricante (2018).

Tabela 8 – Características do agregado graúdo (areia ensacada grossa)

Método de ensaio	Granulometria (%)	Unidade	Areia grossa
	4,75		4,1
	2,36		8,4
	1,18		12,4
	0,6	mm	36,8
ABNT NBR NM 248:2003	0,3		25,4
	0,15		9,7
	< 0,15		3,1
	Módulo de finura	-	2,88
	Dimensão máxima	mm	4,75
ABNT NBR NM 45:2006	Massa unitária	g/cm ³	1,35
ABNT NBR NM 52:2009	Massa específica	g/cm ³	1,90
ABNT NBR NM 46:2003	Material pulverulento	%	0,7
ABNT NBR 7218:2010	Teor de argila em torrões	%	-

Fonte: Baseado em dados do fabricante (2018).

Figura 16 – Amostras das areias (fina e grossa)



Fonte: A autora (2018).

3.2.4 Água

A água utilizada na preparação das argamassas submetidas aos ensaios foi a fornecida pela empresa de abastecimento local – Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

Todos os materiais utilizados na dosagem dos traços para preparação das argamassas, encontram-se ilustrados na Figura 17.

Figura 17 – Materiais utilizados na preparação das argamassas de revestimento



Fonte: A autora (2018).

3.3 Ensaio de caracterização física, química e mecânica dos materiais

Os ensaios Físicos e Químicos de caracterização dos agregados (areia fina e grossa) e da aglomerante (cal) foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade de Pernambuco (UPE) e no Laboratório de Análises Químicas da Universidade Católica de Pernambuco (LAQ/UNICAP), respectivamente, a fim de ratificar os resultados cedidos pelos fabricantes.

Em contrapartida, alguns dos resultados dos ensaios Físicos, Químicos e Mecânicos de caracterização do cimento cedidos pelo fabricante, não houve a necessidade de realização desses ensaios na pesquisa desenvolvida, pois trata-se de um aglomerante com maior controle de qualidade na sua fabricação, exceto: massa específica, massa aparente, início e fim de pega,

visto que o tempo entre a dosagem dos traços e o início do ensaio de cisalhamento direto, passavam-se, aproximadamente 15 min, logo fez-se necessário confirmar os tempos de pega do cimento, a fim de não obter resultados divergentes entre os traços ensaiados.

3.3.1 Ensaio de caracterização da cal hidratada (CH-I)

Todos os ensaios de caracterização Física e Química da cal hidratada foram realizados no Laboratório de Análises Químicas (LAQ) na UNICAP, seguindo as orientações da NBR 7175 (ABNT, 2003). Todo procedimento normativo foi desenvolvido pelos técnicos responsáveis pelo laboratório e os resultados foram cedidos à autora da pesquisa.

Apesar da cal ensaiada possuir selo de qualidade que comprova sua aprovação para comercialização, foi necessária a realização dos ensaios na aglomerante utilizada na dosagem dos traços. Esses ensaios foram justificados por se tratar de um material que tem contribuição direta à trabalhabilidade da argamassa e sua qualidade afeta o desempenho e a durabilidade dos revestimentos (PAIVA, GOMES e OLIVEIRA, 2007).

Foram realizados os seguintes ensaios na aglomerante cal: massa unitária e específica; retenção de água, considerada uma das propriedades mais importantes da cal (PRIORI, 2006); finura, para indicar a quantidade de aglomerante retida nas peneiras de 0,6 e 0,075 mm; quantidade de CO₂, atestando o processo de produção da cal; quantidade de sílica e sólidos insolúveis, relacionada a pureza da cal e a umidade em diferentes instantes, para indicar a quantidade de água retida na mistura pela aglomerante, visto que esse valor está atrelado também a qualidade do material.

3.3.2 Agregados miúdos

3.3.2.1 Análise granulométrica

Os ensaios de granulometria dos agregados miúdos foram realizados de acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Todo procedimento normativo utilizado para a realização desses ensaios encontra-se no Anexo A.

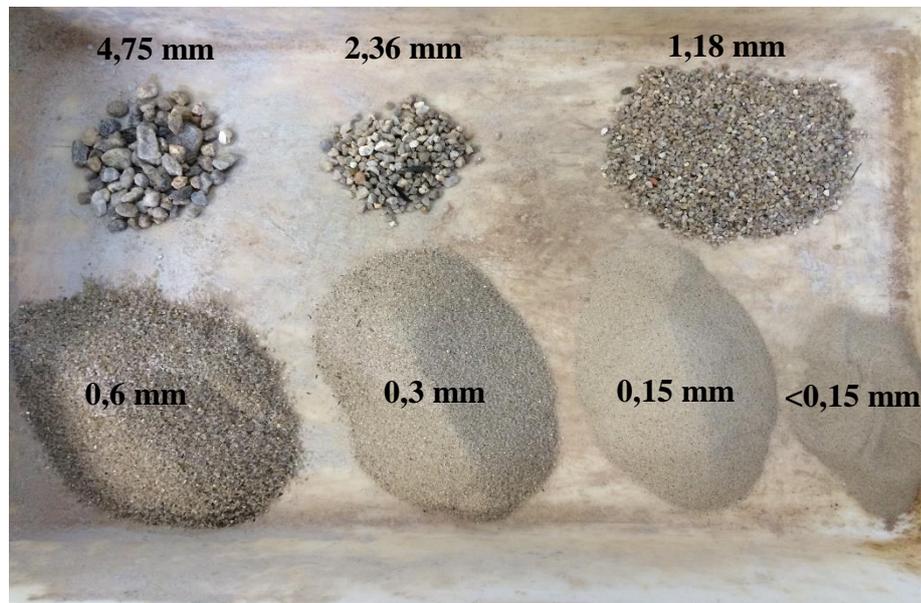
As peneiras de aberturas da malha 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm; 0,3 mm e 0,15 mm foram utilizadas para caracterização do agregado miúdo (Figura 18). O material da areia grossa retido em cada peneira encontra-se ilustrado na Figura 19.

Figura 18 – Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria dos agregados miúdos



Fonte: A autora (2018).

Figura 19 – Granulometria dos agregados miúdos (areia grossa)



Fonte: A autora (2018).

Após a realização de dois ensaios para cada tipo de agregado miúdo, adotou-se a média de cada distribuição granulométrica e depois formou-se as respectivas curvas granulométricas.

Os materiais retidos na peneira de 4,75 mm foram descartados para realização do peneiramento, visto que caracterizariam pedregulhos, o que não seria interessante tê-los na mistura das argamassas de revestimento.

3.3.2.2 *Massa unitária*

O ensaio de determinação da massa unitária dos agregados miúdos foi realizado de acordo com a norma NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para cada amostra de agregado foram realizados 02 (dois) ensaios, obtendo como resultado final a média entre eles. A Figura 20 mostra as etapas de arrasamento e pesagem para determinação da massa unitária dos agregados miúdos.

Figura 20 – Arrasamento e pesagem para determinação da massa unitária dos agregados miúdos



Fonte: A autora (2018).

3.3.2.3 *Massa específica real*

O procedimento do ensaio de determinação da massa específica foi feito em conformidade com a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009) e encontra-se detalhado no Anexo B. O procedimento foi repetido para obter-se a massa específica como sendo o valor da média de 02 (dois) ensaios realizados.

3.3.2.4 *Teor de material pulverulento*

O ensaio de determinação de teor de materiais pulverulentos foi executado de acordo com a norma NBR NM 46 (ABNT, 2003) e o Anexo C mostra seu detalhamento na realização do ensaio.

Utilizou-se cerca de 150 g de agregados miúdos. O ensaio foi repetido 02 (duas) vezes para cada tipo de agregado, e o teor de material pulverulento foi obtido através da média dos dois ensaios.

3.4 Produção das argamassas de revestimento: preparação e dosagem

O traço das argamassas de revestimento submetido aos ensaios da pesquisa foi desenvolvido nos Laboratórios de Mecânica dos Solos e Materiais de Construção, da Escola Politécnica de Pernambuco – UPE/POLI, utilizando-se os equipamentos necessários para realização dos ensaios.

Foram produzidos nesta pesquisa 04 traços (quatro) distintos, com proporções em volume diferentes da aglomerante cal, denominados na pesquisa como TR1 (1:0:6), TR2 (1:0,5:6), TR3 (1:1:6) e TR4 (1:1,5:6), a fim de proporcionar diferentes comportamentos de trabalhabilidade à mistura. Todos os traços foram definidos com suas proporções em volume e para os respectivos materiais: cimento: cal hidratada: areia (50% fina + 50% grossa).

Essa combinação de traços, com diferentes proporções da cal, teve como objetivo proporcionar uma maior variedade de combinações e submetê-las a ensaios, verificando a viabilidade de utilização do método de cisalhamento direto aplicado a solos em argamassas de revestimento em seu estado fresco.

O estado da arte (SOUSA, 2005; SILVA, 2011; ALMEIDA et al., 2013; SOUSA e AQUINO FILHO, 2013; MACIOSKI, 2014; CAMPOS, 2015; JAMARIM, 2015; CARASEK et al., 2016) mostra que o traço mais utilizado nas pesquisas em argamassa de revestimento é o TR3 (1:1:6), e foi com referência neste traço que se derivaram os demais traços da pesquisa.

Para o volume de agregados miúdos, utilizou-se uma mistura de 50% da areia fina e 50% da areia grossa, de modo a conseguir uma granulometria média da areia, definido como agregado miúdo.

Para a preparação dos traços, os aglomerantes (cal e cimento) foram primeiramente misturados, depois adicionou-se as correspondentes quantidades dos agregados miúdos e, em seguida, era

colocada certa quantidade de água do traço, misturando os materiais manualmente, de modo a proporcionar uma melhor homogeneidade da mistura (Figura 21).

Figura 21 – Mistura dos materiais durante a preparação dos traços de argamassa



Fonte: A autora (2018).

Posteriormente, o traço era colocado no misturador de argamassa, e era realizado sua mistura em duas velocidades distintas, primeiro na mais baixa ($v = 830$ rpm), indicado na própria argamassadeira utilizada, durante 30 seg, e posteriormente na mais alta ($v = 1680$ rpm) por mais 60 seg. O restante da água do traço dosado era colocado no momento da mistura na argamassadeira. A Figura 22 ilustra, por exemplo, uma amostra de argamassa de revestimento finalizado, no caso o TR2.

Figura 22 – Traço (TR2) de argamassa de revestimento finalizado



Fonte: A autora (2018).

É importante destacar que o padrão das misturas e a metodologia do ensaio é relevante durante o procedimento, visto que uma uniformidade de preparação do traço acarreta menor divergência aos resultados obtidos.

Buscou-se na pesquisa uma trabalhabilidade igual para todos os traços de argamassas. Sendo assim, foram utilizados diferentes volumes de água para cada um deles. Essa variação ocorreu pelo fato de cada traço apresentar volume de materiais secos diferentes e que as propriedades de diferentes proporções de cal influenciaram no volume de água necessário para a obtenção da trabalhabilidade desejada.

Desta forma, os traços propostos (TR1, TR2, TR3 e TR4) foram padronizados, sendo os materiais correlatos medidos em massa (g), obtidos após o cálculo da massa específica aparente dos materiais utilizados, transformando seus volumes em peso. A aglomerante cal e a quantidade de água utilizadas na mistura sofreram modificações quantitativas, porém a quantidade de cimento e das areias foram mantidas. A quantidade de cal utilizada na dosagem dos traços foi alterada visando atingir os objetivos da pesquisa e a quantidade de água foi modificada para chegar na trabalhabilidade fixada na pesquisa (245 ± 5 mm). A Tabela 9 mostra a quantidade dos materiais e cada nomenclatura utilizadas nos traços ensaiados.

Tabela 9 – Nomenclatura e traços das argamassas de revestimento

Nomenclatura dos traços	Traço em volume (cimento: cal: areia)	Materiais (g)					
		Cimento	Cal	Areia fina	Areia grossa	Água	a/c
TR1	1:0:6	212,78	-	705,00	786,00	300,00	0,92
TR2	1:0,5:6	212,78	78,61	705,00	786,00	310,00	0,95
TR3	1:1:6	212,78	157,21	705,00	786,00	320,00	0,98
TR4	1:1,5:6	212,78	235,83	705,00	786,00	325,00	0,99

Fonte: A autora (2018).

3.5 Ensaio de mesa de consistência (*flow table*)

Com as misturas preparadas, foram levadas para realização do ensaio de mesa de consistência, a fim de padronizar a trabalhabilidade das argamassas em estudo. A quantidade de água utilizada em cada traço foi controlada pelo índice de consistência da argamassa dos traços ensaiados com valores fixados em 245 ± 5 (mm). O valor fixado da trabalhabilidade foi atestado através do ensaio de mesa de consistência, o qual foi baseado na prática da utilização do traço

de revestimento em argamassa por mão-de-obra especializada e principalmente, com o intuito de proporcionar um traço mais consistente e viável a submissão do ensaio de cisalhamento direto. Esse valor de trabalhabilidade foi fixado (245 ± 5 mm) na pesquisa, pois valores acima deste não foram satisfatórios para a realização dos ensaios de cisalhamento direto nas argamassas de revestimento. Devido à alta trabalhabilidade da argamassa, durante o ensaio de cisalhamento direto, ocorreu a saída da água do traço e os parâmetros obtidos no ensaio mostraram-se incoerentes aos obtidos no estado da arte.

Afirmam Sousa (2005) e Aquino Filho e Sousa (2012), que durante o ensaio de cisalhamento direto em argamassas a consistência deve ser mantida constante ao se comparar diferentes traços de argamassa.

Todos os traços das argamassas ensaiados foram anteriormente testados e verificada a correspondente trabalhabilidade, de modo que, durante os ensaios não fossem obtidos valores de índices de consistência fora da faixa estabelecida. A temperatura do laboratório foi mantida em torno de 24°C e a aparelhagem utilizada no ensaio de consistência da argamassa de revestimento foi baseada segundo à NBR 7215 (ABNT, 1997).

Antes de iniciar o ensaio de determinação da consistência, a mesa e o molde tronco-cônico foram limpos, ficando a superfície dos materiais um pouco úmida.

O procedimento utilizado no ensaio baseou-se na NBR 13276 (ABNT, 2005), onde posicionou-se o molde tronco-cônico no centro da mesa. A argamassa foi distribuída em 3 (três) camadas proporcionais, onde para cada camada eram aplicados 15, 10 e 5 golpes, respectivamente, adensando o material a ser ensaiado. Em seguida, a argamassa era arrasada, preenchendo todo volume do molde. Posteriormente, foi acionada a manivela que está acoplada à mesa e aplicada 30 golpes à argamassa, que se espalhava. Foram realizadas 03 medições do diâmetro formado e os índices de consistência foram obtidos da média dos valores medidos, arredondando-os para o inteiro mais próximo. As etapas para determinação do índice de consistência da argamassa de revestimento são ilustradas na Figura 23.

Figura 23 – Etapas do ensaio de mesa de consistência (*flow table*)



Fonte: A autora (2017).

3.6 Ensaio de cisalhamento direto

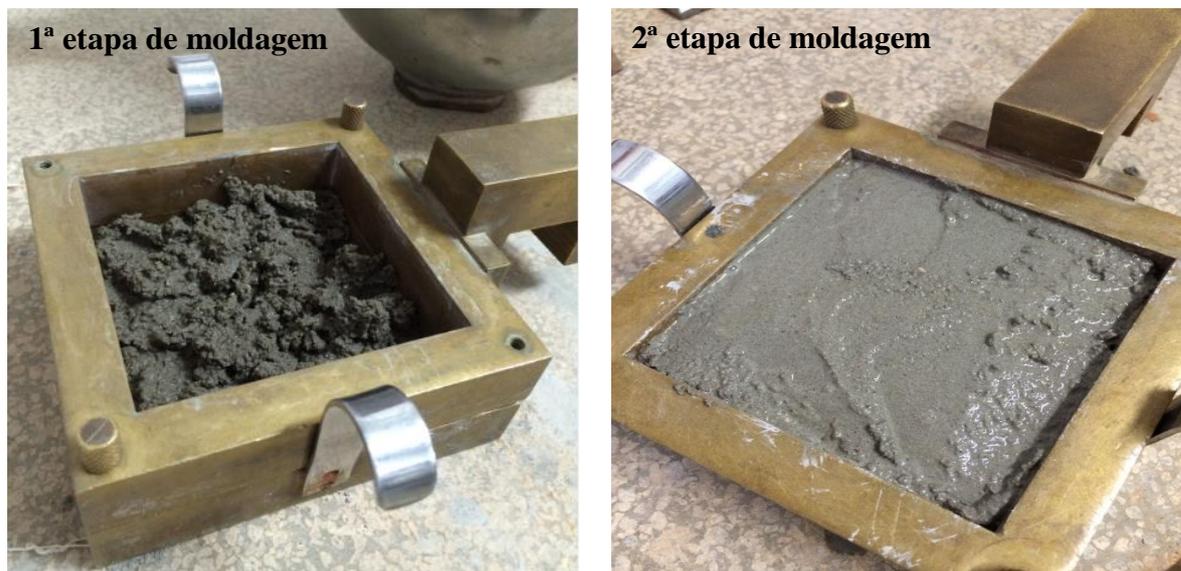
Após o ensaio de *flow table*, os diferentes traços de argamassa de revestimento foram submetidos ao ensaio de cisalhamento direto, normalmente aplicado em solos, como mencionado no capítulo de Revisão Bibliográfica. Utilizou-se a mesma batelada de argamassa para a realização dos ensaios de consistência e cisalhamento direto. Por ser um ensaio bastante utilizado em solos, porém inovador para as argamassas de revestimento em seu estado fresco, todo procedimento especificado na norma internacional ASTM D3080 (ASTM, 2011) foi seguido para fins da pesquisa, visto que não há norma brasileira que regulamente as condições e práticas a serem seguidas quando executado o ensaio de cisalhamento direto.

Os traços de argamassas foram moldados na caixa cisalhante (Lado = 0,10 m e Altura = 0,04 m) pertencente ao equipamento. A moldagem se deu de forma semelhante de traço para traço, mantendo-se as mesmas condições de moldagem, com intuito de tornar os ensaios uniformes quanto a sua execução, a qual se procedeu em 02 (duas) camadas sucessivas. A altura da 1ª camada não coincidia com o encaixe das duas partes da caixa bipartida, pois tal procedimento

poderia alterar os resultados das tensões cisalhantes, uma vez que facilitaria o rompimento da amostra.

As argamassas eram adensadas em cada camada, através de vibrações manuais com auxílio de uma espátula, à medida que era preenchida na caixa cisalhante bipartida, com intuito de preencher toda caixa, conforme ilustra a Figura 24.

Figura 24 – Etapas de moldagem da argamassa de revestimento na caixa de cisalhamento



Fonte: A autora (2018).

Após todo o preenchimento, era pesado o conjunto (caixa bipartida + argamassa), de modo que o peso do conjunto se mantivesse constante para o mesmo traço ensaiado, mantendo-se a padronização desejada, a fim de evitar as divergências nos resultados obtidos.

Após moldagem, as amostras de argamassa de revestimento foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto. O tempo decorrido entre a fase de consolidação e o início do ensaio foi de aproximadamente 10 min. Após a consolidação do corpo-de-prova, por meio da aplicação de uma tensão normal, aplicou-se uma tensão horizontal de cisalhamento, utilizando velocidade (v) constante de 0,2 mm/s, para ocorrer movimento relativo entre as duas metades da caixa.

Essa velocidade foi adotada na pesquisa, a fim de que a água presente no traço de argamassa não fosse drenada antes do final do ensaio, permanecendo na caixa bipartida durante todo o

processo, de modo que não ocorresse divergências nos resultados e por também se tratar de uma velocidade em que os fenômenos ocorrem em situações práticas.

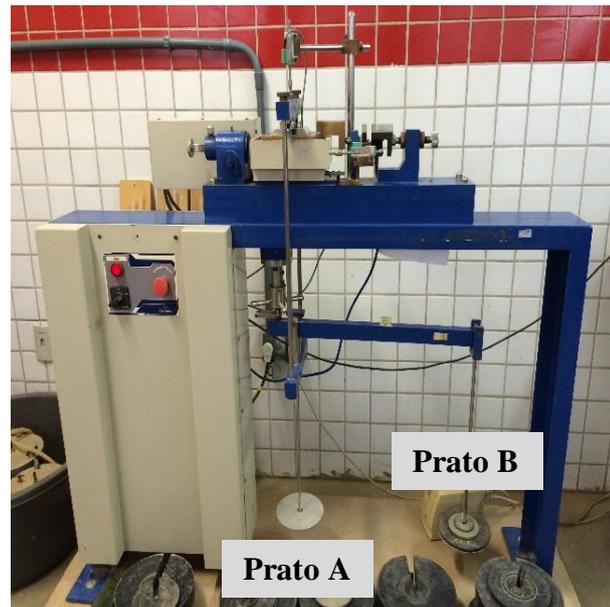
Outra justificativa para utilização dessa velocidade, é que traços de argamassa foram ensaiados, anteriormente, com uma velocidade de 0,5 mm/s, porém os parâmetros obtidos através do ensaio de cisalhamento direto não se mostraram satisfatórios, dessa forma, adotou-se uma velocidade menor para realização do ensaio, a fim de não descaracterizar a veracidade dos resultados obtidos com o ensaio de cisalhamento direto.

Segundo Lambe (1969) apud CAMPOS (2014), essa tensão de cisalhamento é registrada em função do deslocamento horizontal, e registra-se também o deslocamento vertical durante o ensaio para verificar qual o comportamento da argamassa durante o cisalhamento, se a mesma sofreu expansão ou retração, por meio de um extensômetro horizontal e outro vertical.

O equipamento de cisalhamento direto é normatizado segundo a norma americana ASTM D3080 (ASTM, 2011), sendo empregado especificamente para gerar parâmetros de tensão de cisalhamento, coesão e ângulo de atrito. O equipamento utilizado, na pesquisa, é acoplado a um software que geram gráficos de tensões cisalhantes x deslocamento para cada tensão normal aplicada. E através da regressão linear, originada pelas envoltórias de resistência segundo os critérios de Mohr-Coulomb, de cada tensão cisalhante máxima e das tensões normais submetidas são obtidos os valores da coesão e do ângulo de atrito, os quais são originados pela interceptação da reta na ordenada da tensão cisalhante quando a tensão normal for nula e pelo ângulo da inclinação da reta gerada pelos critérios de Mohr-Coulomb, respectivamente.

A força aplicada e sua respectiva tensão de cisalhamento são aferidas através de célula de carga, todos os dados obtidos no ensaio são armazenados e computadorizados eletronicamente. O equipamento é dotado de duas hastes acopladas aos pratos (prato A e prato B), onde para cada tensão ensaiada, os pesos colocados nos pratos eram diferentes, a fim de obter o valor da tensão normal desejada. A Figura 25 mostra o equipamento e os pratos utilizados no ensaio de cisalhamento direto.

Figura 25 – Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto



Fonte: A autora (2018).

Para realização dos ensaios foram preparadas argamassas com traços e proporções da aglomerante cal hidratada distintas TR1, TR2, TR3 e TR4, conforme já descritos na Tabela 9. Cada dosagem foi submetida a 03 (três) tensões normais diferentes ($\sigma_1 = 10$ KPa, $\sigma_2 = 37$ KPa e $\sigma_3 = 50$ KPa) para realização do ensaio de cisalhamento direto.

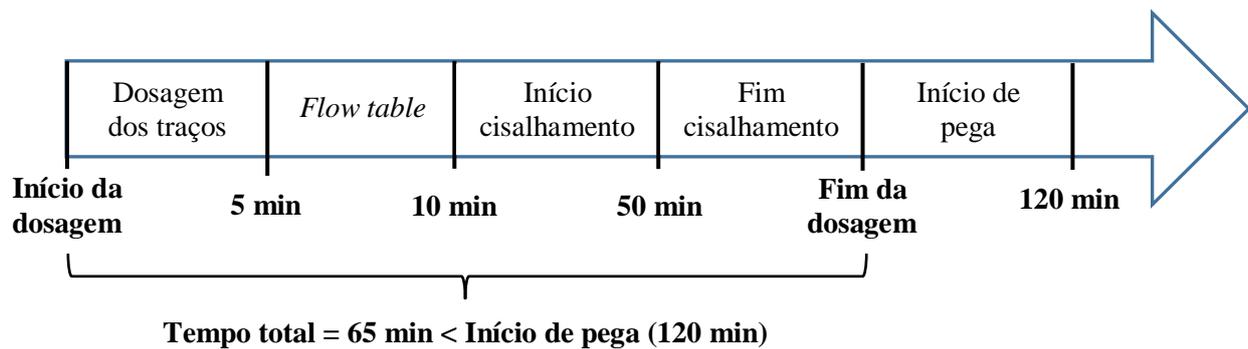
Inicialmente, as tensões normais estabelecidas nos ensaios de cisalhamento foram valores considerados corriqueiros ($\sigma_1 = 50$ KPa, $\sigma_2 = 100$ KPa e $\sigma_3 = 150$ KPa) para amostras de solo (PALMEIRA, 2001), porém os parâmetros obtidos com os resultados dos ensaios não se mostraram satisfatórios, a coesão apresentou valores negativos e os ângulos de atrito resultaram em valores elevados, o que não representava uma realidade encontrada na prática, além do que a água da argamassa exsudava da pasta, descaracterizando a veracidade dos resultados, dessa forma foram adotadas tensões normais mais baixas ($\sigma_1 = 10$ KPa, $\sigma_2 = 37$ KPa e $\sigma_3 = 50$ KPa). Os valores próximos das tensões normais ensaiadas foram encontrados no estado da arte (LU e WANG, 2011; SOUSA e AQUINO FILHO, 2013; CARASEK et al., 2016 e ARAÚJO et al., 2017). Os valores de tensão e deslocamento horizontal obtidos no ensaio de cisalhamento direto encontram-se nos Apêndices A, B, C e D.

Como o tempo total do ensaio de cisalhamento direto era em torno de 50 min para cada tensão normal aplicada, as propriedades das argamassas poderiam ser alteradas, influenciando na sua

trabalhabilidade. Assim, para não descaracterizar os resultados do ensaio de cisalhamento direto, cada traço dosado foi ensaiado apenas uma vez.

A Figura 26 ilustra uma linha do tempo das etapas de dosagem e ensaios da argamassa de revestimento, atestando que todo procedimento executado não ultrapassou o limite de início de pega do cimento.

Figura 26 – Linha do tempo das etapas de dosagem e ensaios da argamassa de revestimento



A pesquisa foi submetida a 04 (quatro) traços de argamassa distintos, e estes foram submetidos a 03 (três) tensões normais diferentes, totalizaram-se 12 ensaios de cisalhamento direto. Enfatizando-se que para cada traço preparado foi realizado o ensaio de mesa de consistência, mantendo-se o padrão de trabalhabilidade entre os traços.

Os teores da aglomerante cal foram modificados nos traços de argamassa a fim de observar seu comportamento nos diferentes traços e compará-los com os parâmetros obtidos no ensaio de cisalhamento direto.

O ensaio consistiu basicamente em determinar a tensão cisalhante máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$), o deslocamento horizontal, ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) das argamassas ensaiadas. Para cada tensão normal aplicada obtém-se um gráfico de tensão cisalhante (KPa) x deslocamento (mm).

A Figura 27 mostra como o corpo-de-prova ficou após finalização do ensaio, ficando evidente o seu deslocamento horizontal causado para ocorrer a ruptura cisalhante no material.

Figura 27 – Corpo-de-prova após finalização do ensaio de cisalhamento direto



Fonte: A autora (2018).

3.7 Ensaio de resistência à compressão simples

Após a dosagem dos traços, o restante da batelada da dosagem da argamassa foi destinado ao ensaio de cisalhamento direto, sendo necessário uma nova batelada para a moldagem dos corpos-de-prova com a finalidade de realizar o ensaio de resistência à compressão. Utilizou-se moldes cilíndricos de dimensões normativas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura (NBR 7215, 1997).

Foram moldados 06 (seis) corpos-de-prova para cada traço ensaiado, totalizando 24 corpos-de-prova, de modo que para cada idade fossem determinadas as resistências à compressão de 02 (dois) corpos-de-prova. As idades de rompimento deles foram de 7, 14 e 28 dias.

Após a dosagem dos traços, as argamassas foram colocadas em moldes, previamente limpos e untados com vaselina. Essa operação era a mais breve possível e não ultrapassou o início de pega do cimento (120 min), com duração aproximada de 15 min, executada em 4 (quarto) camadas iguais, adensadas com o soquete, aplicando-se 30 golpes por camada e por fim arrasada em movimentos vai e vem finalizando a moldagem dos corpos-de-prova para determinação da resistência da argamassa de revestimento (NBR 7215, 1997).

Após 48h de moldagem, os corpos-de-prova foram desmoldados e colocados no processo de cura ao ar livre, a uma temperatura ambiente de 26° C. Em seguida, nas idades de 7, 14 e 28 dias os mesmos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples. A Figura 28 mostra a moldagem dos corpos-de-prova e a submissão destes ao ensaio de resistência à compressão simples.

Figura 28 – Moldagem e ensaio de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova



Fonte: A autora (2018).

Para realização do ensaio utilizou-se a prensa EMIC, com capacidade máxima de 300 KN, apta à realização de ensaios à compressão simples de argamassas e seus resultados foram obtidos através do *software* Tesc. A Figura 29 mostra o rompimento de um corpos-de-prova (cp), seu estado após a finalização do ensaio, e os dados obtidos com o programa computacional.

Figura 29 – Rompimento e dados computacionais de um cp no ensaio de compressão simples



Fonte: A autora (2018).

3.8 Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizados nas amostras de argamassa de revestimento, para todos os traços investigados, após 28 dias de sua moldagem, com o intuito de observar a existência de mudanças em sua estrutura à medida que aumentava a proporção da aglomerante cal.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Dispositivos de Nanoestruturas (LDN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). As imagens geradas pela MEV foi uma ferramenta relevante, para constatar a influência entre os aglomerantes e agregados presente nos traços ensaiados.

Esta técnica de análise micromorfológica das amostras sólidas através de MEV, nos últimos anos, torna-se uma tendência aos materiais de construção civil, principalmente às argamassas e concretos (CORREIA et al., 2014).

O processo de visualização microestrutural das amostras utilizando um MEV, permite obter imagens em alta resolução da microestrutura analisada. A metodologia se dá utilizando feixes de elétrons, em vez de fótons utilizados em um microscópio óptico, dessa forma é que diferencia a qualidade das imagens entre os aparelhos (PEREIRA, SILVA e COSTA, 2013).

3.8.1 Preparação das amostras

As amostras submetidas às análises de MEV foram retiradas internamente dos corpos-de-prova moldados de cada traço, após submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples. As amostras eram desmoldadas e secas ao ar livre durante um período de 28 dias, e posteriormente eram extraídas para análise microscópica.

As amostras extraídas apresentaram superfície laminar, dimensões não superiores a 2 cm e espessura até 7 mm. Todas essas dimensões exigidas facilitaram o processo de preparação das amostras.

Os cuidados tomados durante a extração da amostra resumem-se em não ter contato físico entre os dedos e a amostra, de modo que a gordura presente nos dedos não interfira na qualidade e na interpretação das imagens. Foram usadas luvas plásticas durante a retiradas das amostras. A Figura 30 mostra as amostras do TR1 para análise da MEV.

Figura 30 – Amostra de argamassa (TR1) extraída para a análise da MEV



Fonte: A autora (2018).

3.8.2 Metalização

As amostras foram reduzidas ao tamanho do molde, posteriormente foram metalizadas com grafite. É importante a retirada de ar da amostra para que a metalização seja o mais uniforme possível, buscando-se uma melhor condutividade, o que afetará diretamente na qualidade das imagens. A Figura 31 mostra o momento que ocorreu o processo de metalização das amostras.

Figura 31 – Processo de metalização das amostras (TR1 e TR4)

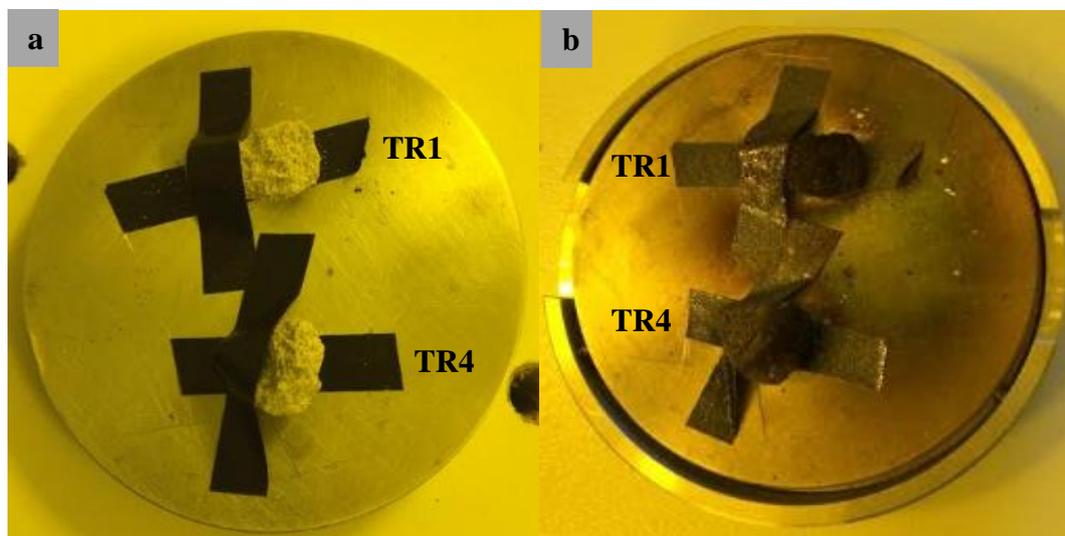


Fonte: A autora (2018).

As amostras em estudo para análise da MEV eram porosas, por serem argamassas de revestimento, fazendo com que o processo de retirada de ar fosse um pouco lento, tendo duração de 15 min, aproximadamente, porém sua finalização foi concluída e satisfatória para ser realizada a microscopia de varredura.

As Figuras 32a e 32b ilustram as amostras do TR1 e TR4 antes (esquerda) e depois (direita) do processo de metalização, sendo possível a identificação do recobrimento pelo grafite.

Figura 32 – Amostras (TR1 e TR4) antes e depois do processo de metalização das amostras



Fonte: A autora (2018).

Após o processo de metalização, as amostras foram submetidas à análise microscópica de varredura. O equipamento utilizado foi o JEOL JSM 6400 e funciona acoplado ao microscópio ilustrado na Figura 33, com capacidade de obter imagens ampliadas de até 300.000 vezes.

Figura 33 – Equipamento utilizado na microscopia eletrônica de varredura



Fonte: A autora (2018).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos na presente pesquisa. Primeiramente, são expostas todas as caracterizações (física, química e mecânica) dos aglomerantes e agregados presentes na dosagem dos traços. Posteriormente, faz-se uma análise dos traços investigados, utilizando-se como referência, o ensaio de cisalhamento direto e uma exploração microestrutural das imagens obtidas através da MEV.

4.1 Caracterização dos aglomerantes e agregados

4.1.1 Cimento

Os valores obtidos com os ensaios de caracterização física do cimento utilizado na pesquisa estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Caracterização física do cimento CPII Z-32

Método de ensaio	Característica analisada	Unidade	Valor
ABNT NBR NM 23:2001	Massa específica	g/cm ³	2,94
ABNT NBR NM 45:2006	Massa unitária	g/cm ³	1,54
ABNT NBR NM 65:2003	Início de pega	min	120
ABNT NBR NM 65:2003	Fim de pega	min	170

Fonte: A autora (2018).

O valor obtido da massa específica seguindo as orientações da NBR NM 23 (ABNT, 2001), foi de 2,94 g/cm³, esse valor se situou próximo ao valor obtido na referência de Sousa e Aquino Filho (2013), que foi de 3,05 g/cm³ para o mesmo tipo de cimento utilizado na pesquisa apresentada.

O valor obtido da massa unitária seguindo as orientações da NBR NM 45 (ABNT, 2006), foi de 1,54 g/cm³. Segundo Sousa e Aquino Filho (2013), o valor encontrado na pesquisa dos autores foi de 0,99 g/cm³ para o mesmo tipo de cimento utilizado na pesquisa.

O início e fim de pega foram ensaiados segundo a NBR NM 65 (ABNT, 2003), e obteve-se valores de 2h e 2h:50min, respectivamente. Os valores obtidos no ensaio enquadraram-se dentro

dos limites normativos (Início de pega $\geq 1h$ e Fim de pega $\leq 10h$) e foram compatíveis com os encontrados no estado da arte.

Os valores de início e fim de pega encontrados por Almeida et al. (2013) foram de 2h:25min e 3h:30min, por Campos (2014) foram de 2h:27min e 3h:3min e por Carasek et al. (2016) foram 2h e 20 min e 3h, respectivamente. Todos os valores foram próximos aos encontrado na presente pesquisa, utilizando o mesmo tipo de cimento (CP II Z-32).

Os valores disponibilizados pelo fabricante do cimento, encontram-se próximos ao obtidos na presente pesquisa. O valor da massa específica fornecida pelo fabricante foi de $3,02 \text{ g/cm}^3$ enquanto o valor obtido na pesquisa foi de $2,94 \text{ g/cm}^3$, atestando a veracidade dos dados do fabricante.

Embora os valores cedidos pelo fabricante do início e fim de pega do CP II Z-32, tenham sido diferentes dos obtidos nos ensaios da presente pesquisa, ambos se encontram dentro dos limites normativos, início de pega superior a 1h e fim de pega até 10h (NBR NM 65, 2003). Para o fabricante esses valores foram de 198 min e 259 min, enquanto os valores obtidos na pesquisa foram de 120 min e 170 min, para o início e fim de pega, respectivamente.

4.1.2 Cal hidratada CH - I

A Tabela 11 mostra os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da aglomerante cal.

Tabela 11 – Características físicas e químicas da cal CH-I utilizada nas dosagens

Característica analisada	Norma	Unidade	Valor	Limites (NBR 7175, 2003)		
				CH-I	CH-II	CH-III
Massa específica		g/cm^3	1,14	-	-	-
Massa unitária	ABNT NBR (NM 23:2001)	g/cm^3	0,92	-	-	-
Finura peneira nº 0,6 mm	NBR 9289	%	0,01	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
Finura peneira nº 0,075 mm	(ABNT:2000)	%	1,75	≤ 10	≤ 15	≤ 15
Anidrido Carbônico (CO_2)		%	16,36	≤ 7	≤ 7	≤ 15
SiO_2 + sólidos insolúveis	NBR 6473 (ABNT:2003)	%	4,74	-	-	-
Umidade		%	0,126	-	-	-
Retenção de água (25 min)	NBR 9290	%	93	≥ 75	≥ 75	≥ 70
Retenção de água (60 min)	(ABNT:1996)	%	80,5	≥ 75	≥ 75	≥ 70

Fonte: A autora (2018).

O valor da massa específica obtido na presente pesquisa foi de 1,14 g/cm³, valor semelhante ao encontrado na pesquisa de Carasek et al. (2016), que foi de 1,05 g/cm³. Já o valor da massa unitária obtido nos ensaios da aglomerante cal, que foi de 0,92 g/cm³, encontrou-se um pouco diferente dos encontrados nas pesquisas de Sousa e Aquino Filho (2013), Campos (2014) e Carasek (2016), que foram 0,38 g/cm³, 0,58 g/cm³ e 0,45 g/cm³, respectivamente.

O valor da umidade da aglomerante cal ensaiada na presente pesquisa foi de 0,126 %, valor bem próximo aos encontrados nas pesquisas de Paiva, Gomes e Oliveira (2007) e Campos (2014), que foram de aproximadamente 0,5 % e 0,65 %, respectivamente. Estes baixos valores caracterizam uma cal de boa qualidade.

Os demais valores apresentados na Tabela 11, encontram-se dentro dos limites normativos, caracterizando a aglomerante como uma cal hidratada tipo I (CH – I) e apta à comercialização, exceto para o teor de CO₂ que foi de 16,36 %, ultrapassando os limites normativos ($\leq 7\%$). Tal comportamento foi observado devido ao armazenamento inadequado do produto, fazendo com que, durante a dosagem dos traços, a aglomerante ficasse aberta, ocorrendo a reação com o CO₂.

Embora este valor esteja fora dos limites normativos, a cal utilizada nas dosagens dos traços ensaiados apresenta uma boa qualidade, devido aos demais resultados se encontrarem dentro dos limites especificados nas normas, principalmente, os índices de finura, os quais apresentam valores muito baixos, e que qualificam a cal como uma excelente aglomerante.

Teores elevados de CO₂ presente na cal podem ser justificados por falhas no processo de calcinação durante a sua fabricação, ou mal armazenamento da aglomerante, após sua utilização (PAIVA, GOMES e OLIVEIRA, 2007).

4.1.3 Agregados miúdos (areia fina e areia grossa)

4.1.3.1 Análise granulométrica

A Tabela 12 apresenta a distribuição granulométrica e os percentuais retidos e acumulados em cada peneira, das areias fina e grossa, respectivamente. A partir dos percentuais retidos

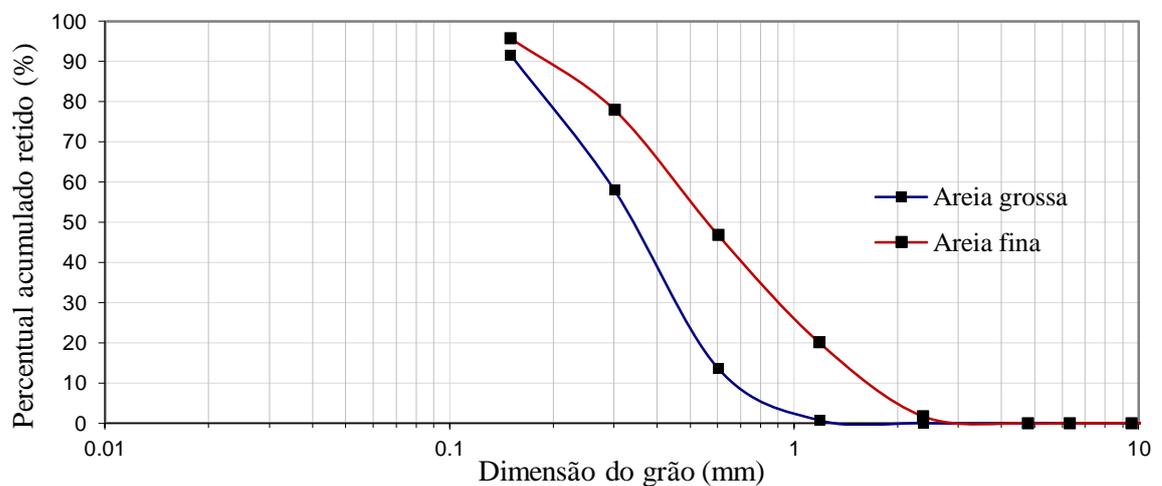
apresentados na Tabela 12 foram elaboradas as curvas granulométricas da areia fina e grossa que estão ilustradas na Figura 34.

Tabela 12 – Distribuição granulométrica das areias fina e grossa

Tipo de agregado:	Areia Fina	Areia Grossa
	MF = 1,64; Cu = 3,5; Cc = 1,03 DMC = 1,18 (mm)	MF = 2,43 Cu = 2,2; Cc = 1,00 DMC = 2,36 (mm)
Abertura da peneira (mm)	Percentual retida acumulada (%)	
75	0	0
50	0	0
37,5	0	0
25	0	0
19	0	0
12,5	0	0
9,5	0	0
6,3	0	0
4,75	0	0
2,36	0	2
1,18	1	20
0,6	14	47
0,3	58	78
0,15	92	96

Fonte: A autora (2018).

Figura 34 – Curva granulométrica (areia fina e areia grossa)



Fonte: A autora (2018).

Pelo comportamento das curvas e pelos coeficientes de uniformidade e curvatura, observou-se que os grãos se apresentaram uniformes e bem graduados (NBR 7211, 2005). O diâmetro máximo da areia fina foi igual a 1,18 mm, enquanto que o da areia grossa foi de 2,36 mm.

Segundo Silva (2011) e Campos (2014), os diâmetros máximos encontrados nos agregados miúdos utilizados em suas misturas de argamassas foram de 2,36 mm, e apresentaram valores semelhantes aos obtidos na pesquisa.

O módulo de finura obtido no ensaio de peneiramento foi de 1,64 (areia fina) e 2,43 (areia grossa), enquadrando-se nas classificações normativa vigente para a areia fina, enquanto que o valor do módulo de finura considerado como areia grossa na pesquisa diverge do especificado na norma (grãos que ficam retidos na peneira de 4,75 mm), o que pode ser justificado pelo rejeito do material retido na peneira 4,75 mm, o que possivelmente classificaria a areia utilizada no ensaio como grossa, segundo as especificações normativas (NBR 7211, 2005). Devido ao descarte do material grosso, a areia comercializada como grossa e utilizada nas dosagens dos traços é classificada como areia média, pois seu módulo de finura encontra-se situado na zona ótima, que estabelece valores limites entre 2,20 e 2,90, segundo a NBR NM 48 (ABNT, 2003).

4.1.3.2 Massa unitária

Os valores obtidos no ensaio para determinação da massa unitária da areia fina foram de 1,17 g/cm³ e para areia grossa foi de 1,28 g/cm³. Os valores situaram-se abaixo dos encontrados nas referências que tiveram como resultado mínimo 1,37 g/cm³ (SILVA, 2011) e máximo 1,56 g/cm³ (SOUSA e AQUINO FILHO, 2013), o que pode ser compreendido pelas diferenças granulométricas dos agregados miúdos explorados de jazidas distintas.

4.1.3.3 Massa específica

Os valores encontrados durante os ensaios foram de 2,62 g/cm³ (areia fina) e 2,66 g/cm³ (areia grossa), valores coerentes quanto às especificações dos agregados, uma vez que o volume de vazios da areia grossa é superior ao da fina, resultando em um volume real menor do agregado grosso em relação ao fino, conseqüentemente obtendo-se uma maior massa específica.

Os valores de massa específica obtidos nos ensaios se encontram próximos aos encontrados em bibliografias, conforme demonstra a Tabela 13.

Tabela 13 – Massa específica encontradas nas referências

Referência	Massa específica (g/cm³)
Autora (2018)	2,62 / 2,66 (fina e grossa)
Sousa (2005)	2,62
Silva (2011)	2,66
Sousa e Aquino Filho (2013)	2,61
Almeida et al. (2013)	2,62
Campos (2014)	2,68
Carasek et al. (2016)	2,73

Fonte: A autora (2018).

4.1.3.4 Teor de material pulverulento

Os valores obtidos do teor de materiais pulverulentos obtidos nos ensaios foram de 1,59 % (areia fina) e 0,94% (areia grossa), encontrando-se valores bem inferiores aos obtidos na pesquisa de Silva (2011), os quais foram de 4,38%. Esta discrepância pode ser justificada pelo fato do autor ter explorado os agregados miúdos do local com grande teor de materiais pulverulentos, diferentemente dos utilizados na pesquisa que foram adquiridos em armazéns de construção da região, comercializado como areia lavada, reduzindo esse teor de material pulverulento.

Valores semelhantes aos apresentados na pesquisa desenvolvida foram discutidos por outros autores. Afirmam Carasek et al. (2016), que os teores de materiais pulverulentos obtidos nos seus ensaios apresentaram valores de 0,6%, ficando próximo do valor da areia grossa. De maneira semelhante, Silva (2011) atesta que seus valores foram de 1,54%, o qual se aproximou do teor apresentado para a areia fina ensaiada.

4.2 Caracterização dos traços

A Tabela 14 apresenta a massa total das argamassas ensaiadas, além de suas relações de massa.

Tabela 14 – Relações de massa dos traços ensaiados

Traço	Traço em volume	Volumes (cm ³)						a/c
		Cimento	Cal	Areia fina	Areia grossa	Água	Total	
TR1	1:0:6	327,68	0	1.198,50	1.493,40	300,00	3.319,58	0,92
TR2	1:0,5:6	327,68	89,62	1.198,50	1.493,40	310,00	3.419,20	0,95
TR3	1:1:6	327,68	179,22	1.198,50	1.493,40	320,00	3.518,80	0,98
TR4	1:1,5:6	327,68	268,85	1.198,50	1.493,40	325,00	3.613,43	0,99

Fonte: A autora (2018).

A medida que a quantidade de cal aumenta nos traços, também aumenta a relação água cimento, a fim de obter a mesma trabalhabilidade entre os traços dosados. Esse acréscimo de água nas dosagens dos traços poderá afetar a resistência à compressão simples dos traços analisados.

Em análise ao TR2, observa-se que a adição da aglomerante no traço dosado contribui para um aumento de 2,62 % em seu volume, comparado ao volume total, já o volume de cimento tem contribuição em 9,58% em relação ao volume total da argamassa dosada. Esse volume maior do cimento em relação ao da cal, justifica-se pelo peso específico aparente do cimento ser maior que o da cal, portanto ser um material mais denso que a aglomerante.

Para o TR4, onde se utiliza maiores proporções da cal e água, a aglomerante tem uma contribuição de 7,44% e a água 9,00% em relação ao volume total do traço.

À medida que aumenta a quantidade da cal nas dosagens dos traços, diminui as suas densidades em massa, tal comportamento é justificado pela característica fina da aglomerante, pois a cal, presente nos traços, preenche os vazios presentes nas argamassas de revestimento, por outro lado, a porosidade das amostras ensaiadas aumentou, pelo acréscimo do volume de água em suas dosagens. A Tabela 15 apresenta a densidade de massa dos traços ensaiados das argamassas de revestimento em seu estado fresco e sua classificação normativa.

Essa densidade de massa está relacionada ao teor de ar incorporado na argamassa em seu estado fresco.

Tabela 15 – Densidade de massa das argamassas em estado fresco

Traço	Traço em volume	Densidade em massa (Kg/cm³)	Classificação das argamassas (NBR 13281, 2005)	Classificação das argamassas (NBR 13281, 2005)
TR1	1:0:6	1.961,56	Normal	D5
TR2	1:0,5:6	2.187,50	Normal	D6
TR3	1:1:6	2.150,00	Normal	D6
TR4	1:1,5:6	2.125,00	Normal	D6

Fonte: A autora (2018).

As argamassas de revestimento resultantes dos TR2, TR3 e TR4 se enquadraram na classificação D6, e todos os demais traços de argamassa foram considerados normais quanto a densidade em massa das argamassas em seu estado fresco (NBR 13281, 2005).

4.3 Parâmetros da argamassa por meio do ensaio de cisalhamento direto

As curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal das amostras de argamassas ensaiadas, para todos os traços propostos, estão apresentadas na Figura 35.

Evidenciou-se que as curvas de cisalhamento das amostras estudadas apresentam comportamento de pico à medida que se aumenta a tensão normal, ou seja, a tensão cisalhante aumenta até o ponto de ruptura, a partir do qual, com o aumento do deslocamento horizontal, ela apresenta-se praticamente constante, definida como tensão residual.

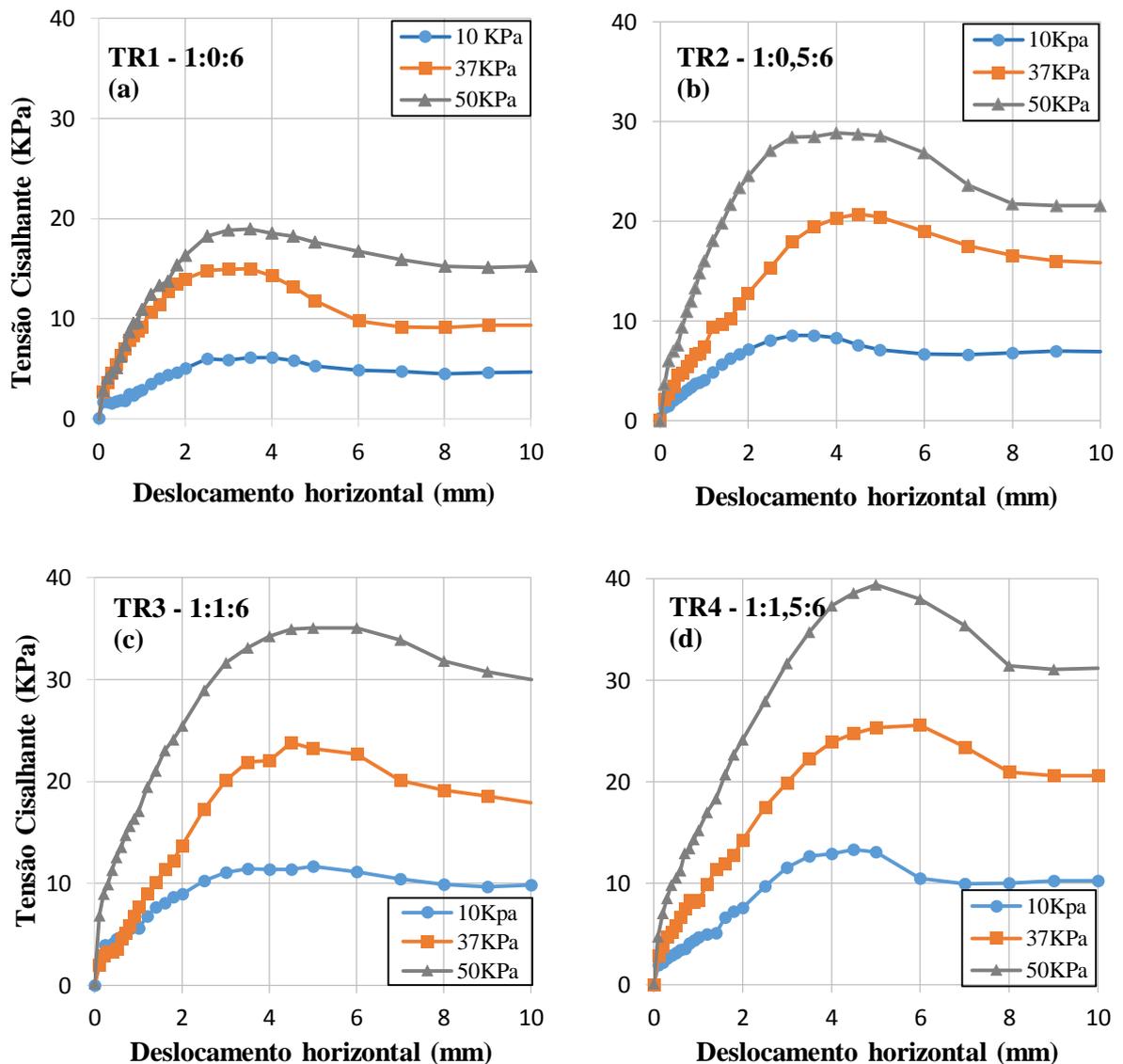
Para as tensões normais de 37 KPa e 50 KPa, foram necessários maiores níveis de deslocamento horizontal, no momento da ruptura da amostra. Nesse momento também foi observado que, para cada traço ensaiado com tensão normal de 10 KPa, os deslocamentos horizontais não ultrapassaram a metade do deslocamento total do ensaio (10 mm). Outro ponto relevante observado na Figura 35 é que, a adição da cal nos traços de argamassa de revestimento fez com que os valores das tensões cisalhantes atingissem o valor máximo para os mais elevados deslocamentos horizontais. Tais dados estão apresentados na Tabela 16.

Comprovou-se que a tensão cisalhante aumenta à medida que a tensão normal imposta à amostra cresce (Tabela 16), isto também pode-se ser comprovado segundo a referência embasada (LU e WANG, 2011; SOUSA e AQUINO FILHO, 2013; CAMPOS, 2014; CAMPOS et al., 2015).

Verificou-se também na Tabela 16, que para os diferentes traços ensaiados quando submetidos à uma tensão normal de 37 KPa, os deslocamentos horizontais alcançados no momento da ruptura das amostras foram crescentes à medida que adicionava a cal na dosagem dos traços.

Afirma Sousa (2005), que o ganho de tensão de cisalhamento inicial, é brando ao longo do deslocamento horizontal, isso é observado devido ao aumento gradativo no teor da aglomerante, influenciando no deslocamento horizontal, a qual a amostra se deforma mais, antes de atingir o ponto máximo da tensão cisalhante.

Figura 35 – Tensão cisalhante x deslocamento horizontal – TR1 (a), TR2 (b), TR3 (c) e TR4 (d)



Fonte: A autora (2018).

Tabela 16 – Valores de tensões cisalhantes x deslocamento horizontal

Nomenclatura dos traços	Traço em volume (cimento: cal: areia)	Tensão normal inicial (KPa)	Deslocamento Horizontal Ruptura (mm)	Tensão cisalhante (KPa)
TR1	1:0:6	10	4,00	6,13
		37	3,50	14,98
		50	3,50	18,94
TR2	1:0,5:6	10	3,00	8,58
		37	4,50	20,72
		50	4,00	28,87
TR3	1:1:6	10	3,50	11,42
		37	4,50	23,78
		50	5,00	35,08
TR4	1:1,5:6	10	4,50	13,29
		37	6,00	25,55
		50	5,00	39,42

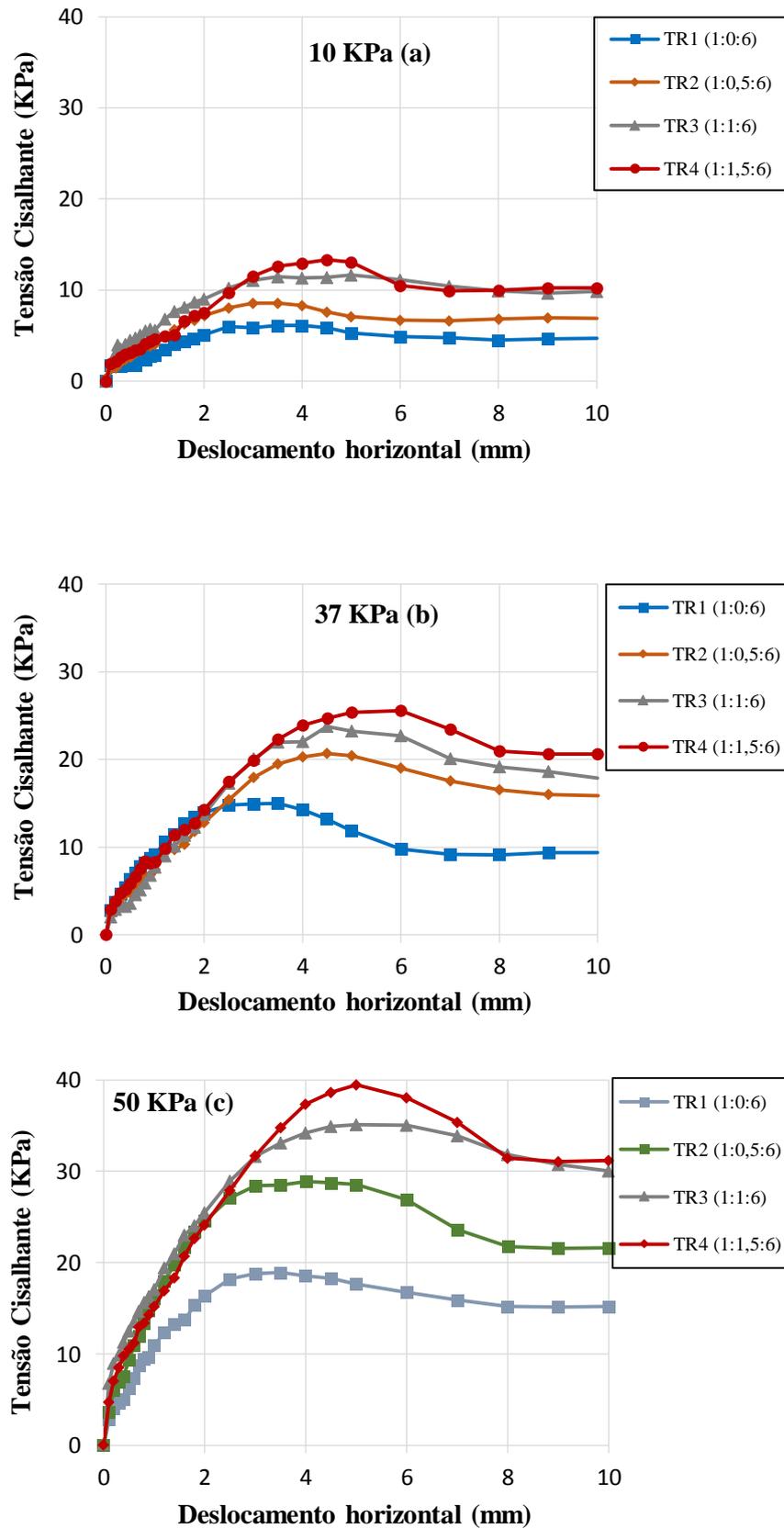
Fonte: A autora (2018).

Observou-se na Figura 36 que para uma mesma tensão normal, à medida que a quantidade da cal era acrescida no traço de argamassa a tensão de cisalhamento também aumentava, justificada pelo fato da quantidade de cal estar influenciando na união da mistura e a amostra necessitar de uma maior força para ocorrer sua ruptura. Este parâmetro de proporcionalidade entre aumento da cal e o aumento da tensão cisalhante também foi observada na pesquisa desenvolvida por Campos et al. (2014).

Para a tensão normal de 10 KPa, houve um aumento da tensão cisalhante em 54% entre os traços que não foi adicionada cal em sua mistura, no caso o TR1, e o traço que apresenta a maior quantidade da aglomerante em sua dosagem, no caso o TR4. Para as tensões normais de 37 KPa e 50 KPa esse aumento foi de 41% e 52%, respectivamente.

No que se refere aos resultados máximos da tensão cisalhante, estes foram correlacionados com as respectivas tensões normais, que resultou na equação de regressão linear, proposta por Mohr-Coulomb. Determinando-se os parâmetros de coesão e ângulo de atrito das misturas.

Figura 36 – Tensão cisalhante x deslocamento horizontal – 10 KPa (a), 37 KPa (b) e 50 KPa (c)



Fonte: A autora (2018).

A Tabela 17 apresenta os parâmetros de coesão e ângulo de atrito, obtidos pela regressão linear ilustrados na Figura 37.

Analisando-se os dados da Tabela 17, observou-se que quando a proporção de cal aumenta na composição das argamassas, os valores para o ângulo de atrito tendem a aumentar. Segundo Lu e Wang (2011), tanto o atrito interno quanto a coesão de uma argamassa dependem da distância entre as partículas que constituem a argamassa, fazendo com que uma mistura com maior quantidade de cal em seu traço, proporcione uma menor distância entre os grãos, dificultando o cisalhamento entre as camadas e, conseqüentemente, apresente um maior ângulo de atrito e aumente a coesão da pasta.

Essa relação direta entre a quantidade de cal e o ângulo de atrito também foi observada nas pesquisas de Sousa e Aquino Filho (2013), que comprovaram que quanto maior o teor de aglomerantes presentes na mistura dos traços de argamassa, identifica-se um importante aumento nos valores do ângulo de atrito.

A contribuição dos teores de aglomerante, nas propriedades no estado fresco das argamassas, pode se manifestar nos diferentes parâmetros, que governam uma condição de cisalhamento. A existência do teor de aglomerante deve estar presente nas misturas para minimizar o atrito entre os grãos de agregado e favorecer a coesão entre as partículas.

Com os resultados propostos, permitiu-se observar que a quantidade de cal inseridas nos traços TR2, TR3 e TR4, geraram valores gradativos de coesão aos respectivos traços, mesmo os traços apresentando quantidades de água diferentes e maiores, à medida que aumentava a proporção da cal, a coesão foi comprovada através do parâmetro obtido pelo ensaio de cisalhamento direto. Já afirmava Braida et al. (2007) que não existem coesão negativa.

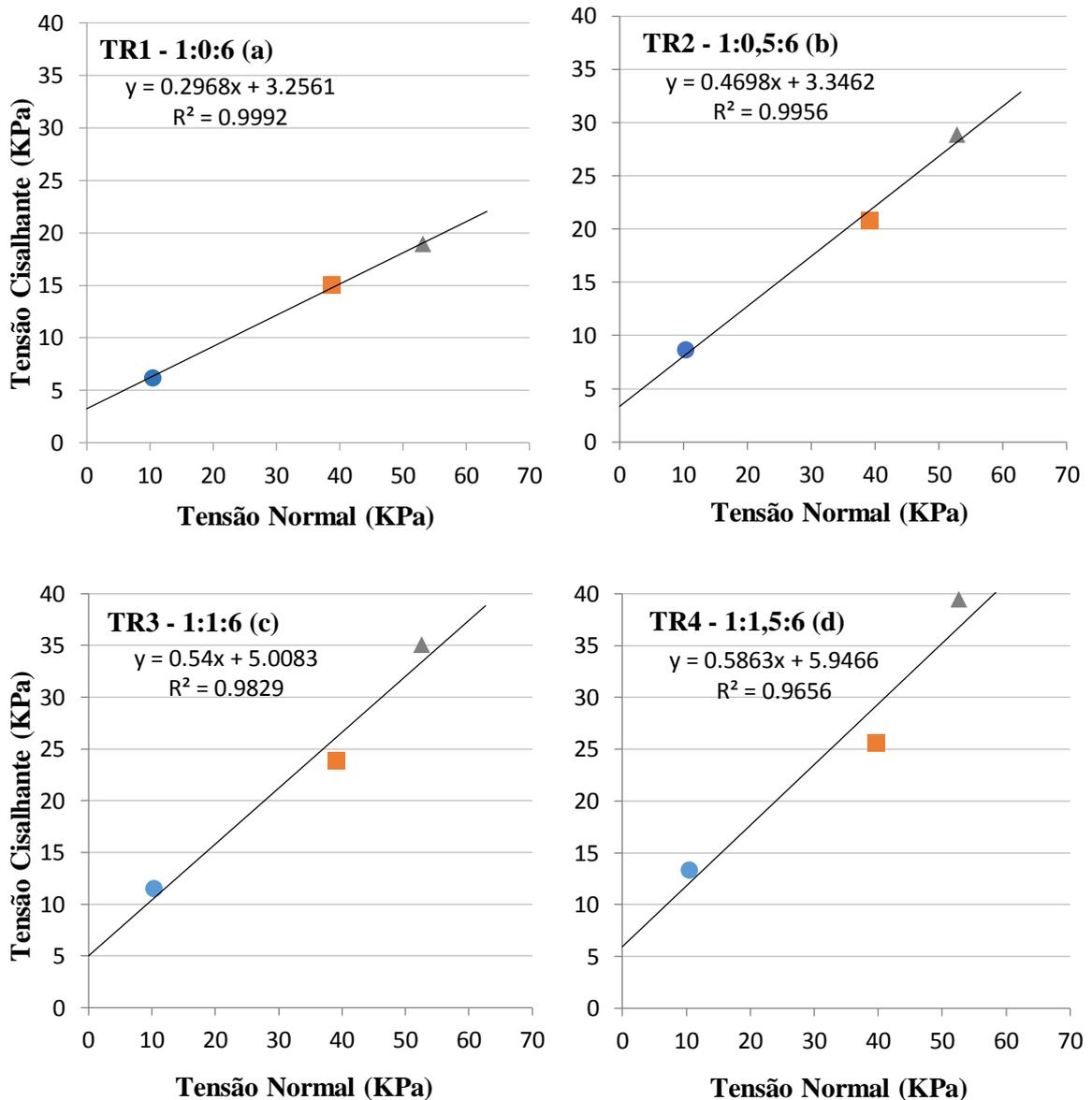
A Tabela 17 apresenta uma coesão de 3,26 KPa para o TR1 (1:0:6) próximo ao valor da coesão do TR2 (1:0,5:6), que foi de 3,35 KPa, não havendo grandes mudanças na coesão com a adição da cal no TR2, visto que no TR1 a mistura é considerada uma argamassa rica em cimento em relação ao TR2. De acordo com Sousa e Aquino Filho (2013), uma argamassa de revestimento rica em cimento na sua composição, mudanças no teor de cal não exercem influências no valor da coesão.

Tabela 17 – Valores de coesão e ângulo de atrito obtidos na regressão linear

Nomenclatura dos traços	Traço em volume (cimento: cal: areia)	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (ϕ)
TR1	1:0:6	3,26	16°
TR2	1:0,5:6	3,35	25°
TR3	1:1:6	5,00	28°
TR4	1:1,5:6	5,95	30°

Fonte: A autora (2018).

Figura 37 – Tensão cisalhante x tensão normal – TR1 (a), TR2 (b), TR3 (c) e TR4 (d)



Fonte: A autora (2018).

Como a finalidade da pesquisa é verificar a possível utilização do ensaio de cisalhamento direto aplicados em solos, ser utilizado para avaliar o comportamento reológico das argamassas de revestimento em seu estado fresco, os valores do índice de correlação (R^2) comprovam uma excelente relação linear entre as variáveis das tensões máximas cisalhantes e as tensões normais, o que atestam a viabilidade da utilização do ensaio de cisalhamento direto nas argamassas de revestimento em seu estado fresco, entre todos os parâmetros obtidos com o ensaio de cisalhamento direto.

4.4 Resistência à compressão simples da argamassa de revestimento

Os resultados da resistência à compressão simples aos 7, 14 e 28 dias dos traços dosados na pesquisa (TR1, TR2, TR3 e TR4) estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Valores da resistência à compressão simples das argamassas de revestimento

Nomenclatura dos traços	Traço em volume (cimento: cal: areia)	Resistência à compressão (MPa)					
		7 dias	14 dias	28 dias	Classe (NBR 13279)	a/c	Coesão
TR1	1:0:6	3,5	4,8	5,5	P4 (4,0 – 6,5)	0,92	3,26
TR2	1:0,5:6	7,0	8,9	7,0	P5 (5,5 – 9,0)	0,95	3,35
TR3	1:1:6	6,6	5,5	4,9	P4 (4,0 – 6,5)	0,98	5,00
TR4	1:1,5:6	2,8	4,0	3,6	P3 (2,5 – 4,5)	0,99	5,95

Fonte: A autora (2018).

Os valores obtidos da resistência à compressão simples aos 28 dias das argamassas de revestimento foram decrescentes no grupo das argamassas com adição da cal no traço, tal comportamento justifica-se pelo fato dos traços com maiores teores de cales apresentarem maiores quantidades de água em sua mistura, conseqüentemente aumenta a porosidade das argamassas e atesta sua perda de resistência à compressão, conforme valores apresentados na Tabela 18.

O TR1, traço sem adição da cal, apresentou valores crescentes de resistência à compressão simples nas diferentes idades. Observa-se que a dosagem da argamassa foi satisfatória, de acordo com os valores apresentados, pois quanto maior foi o tempo de cura ao ar livre da argamassa em seu estado endurecido mais elevado foram os valores de resistência à compressão

simples. A argamassa do TR1 foi classificada como P4, segundo os limites normativos da NBR 13279 (ABNT, 2005), considera-se uma argamassa adequada para aplicações em revestimentos, pois possui uma capacidade maior de deformação.

O TR2 (1:0,5:6) apresentou um valor de pico aos 14 dias (8,9 MPa), porém o valor voltou a decrescer aos 28 dias (7,0 MPa). A argamassa foi classificada, segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005), como P5, que atesta uma maior rigidez e resistência à argamassa em seu estado endurecido, sendo mais propícia ao aparecimento de patologias, como por exemplo, fissuras em revestimentos.

O TR3 (1:1:6), considerado o traço padrão na presente pesquisa, e o traço mais utilizado na prática e nas pesquisas observadas no estado da arte, apresentou valores decrescentes nas idades de 7, 14 e 28 dias, conforme mostra a Tabela 18. Apresentou valor de resistência à compressão simples aos 28 dias de 4,9 MPa, valor próximo ao encontrado na pesquisa de Campos et al. (2015), que foi de 4,11 MPa.

Já o valor de resistência à compressão simples de argamassa de revestimento dosada na pesquisa de Carasek (2011), segundo um traço de 1:1:6 em volume, foi de 7,24, enquadrando-se nos limites normativos, segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005), como classe P5. O traço ensaiado, na presente pesquisa, que se adequou à classificação P5 foi o TR2.

O TR4 (1:1,5:6) apresentou um valor de pico aos 14 dias (4,0 MPa), porém o valor voltou a decrescer aos 28 dias (3,6 MPa). A argamassa foi classificada, segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005), como P3, considerada uma argamassa menos resistente quando comparada às demais argamassas ensaiadas.

As classes das dosagens dos traços se dão de forma decrescentes, à medida que se adicionou cal nos traços, dessa forma a classificação das argamassas, foi de P5 (TR2) e P3 (TR4), atestando através dos dados expostos na Tabela 18, que a argamassa de revestimento utilizando o TR2 se mostra mais resistente que a do TR4.

Observa-se, aos 28 dias, que o traço TR1 apresentou aumento de resistência à compressão em 53%, quando comparado ao traço TR4, isso é justificado pela ausência da aglomerante cal,

embora a aglomerante seja responsável pelo ganho de resistência, a quantidade de água foi elevada à medida que adicionava cal, portando houve redução das resistências das argamassas aos 28 dias no TR2 em relação ao TR3 em 43% e de 36% do TR3 em relação ao TR4.

Sempre que há um aumento do traço em relação à quantidade do cimento, a resistência mecânica da argamassa também aumenta. Já nas argamassas de cal hidráulica e cal aérea, a tendência é verificar-se o contrário, pois quanto maior for a quantidade de cal, maior será a porosidade da argamassa (BALL, EL-TURKI e ALLEN, 2011).

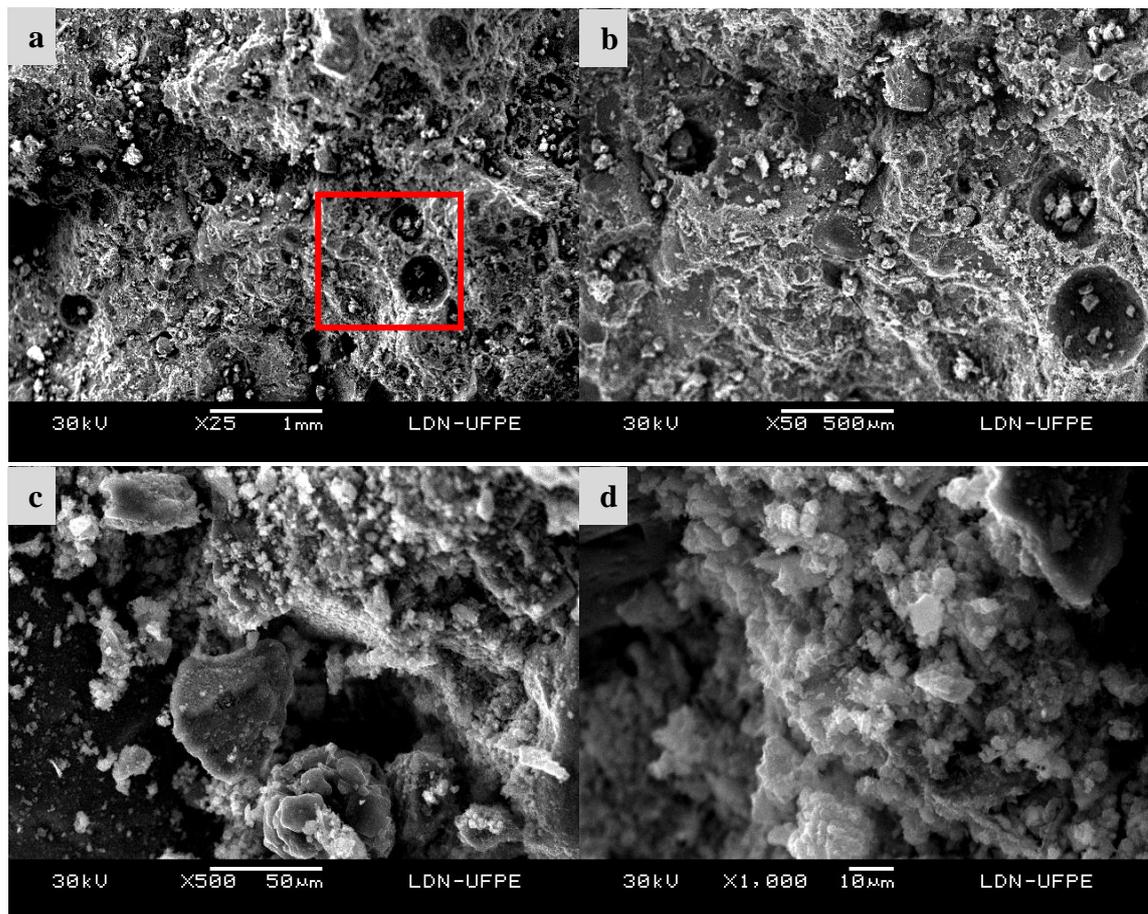
O traço TR4 apresentou menor resultado de resistência à compressão aos 28 dias comparado aos demais traços, o acréscimo da cal no TR4 em relação ao TR1 foi de 1,5 (em volume), ocasionando um excesso da aglomerante cal na dosagem do traço. Segundo Cincotto et al. (1985) apud Forti (2017), quando se utiliza pequenas quantidades da cal, que proporcionem um equilíbrio entre os traços, variando essa quantidade entre 0,25 e 1 (em volume), a cal auxilia no ganho de resistência.

Segundo Allen e Iano (2013), as argamassas mistas que apresentam maiores quantidades de cal em sua dosagem, perdem resistência à compressão e à tração aos 28 dias, ou seja, em seu estado endurecido, em contrapartida em seu estado fresco, as argamassas de revestimento tem ganho significativo em trabalhabilidade, retenção de água, plasticidade e elasticidade. Portanto, o ideal é encontrar o ponto de equilíbrio da adição da cal nas dosagens das argamassas mistas.

4.5 Análise microestrutural da argamassa de revestimento

Todas as amostras submetidas à análise microscópica se mostraram metalizada de forma adequada, atestando que o processo de metalização se deu adequadamente. As imagens das argamassas refletidas através dos elétrons apresentaram boa qualidade. A Figura 38 ilustra as imagens obtidas através da MEV do TR1, sendo ampliadas em 25x, 50x, 500x e 1000x.

Figura 38 – Análise microestrutural ampliada 25x (a), 50x (b), 500x (c) e 1000x (d) – TR1 (1:0:6)

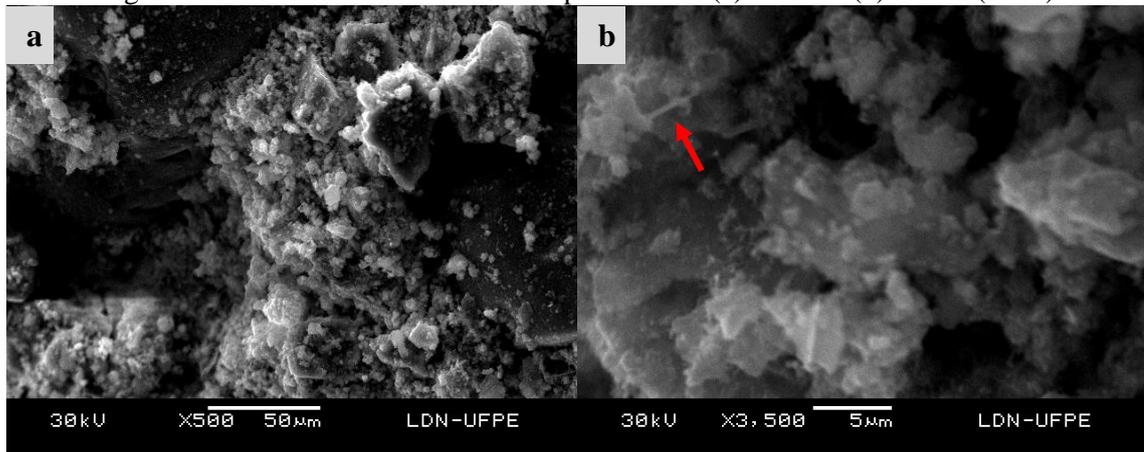


Fonte: A autora (2018).

Fica evidente nas imagens a ausência da cal na amostra analisada. Numa primeira análise, observa-se uma aderência entre os agregados e a pasta de cimento, porém o poro ampliado mostra os grãos de areia utilizado no traço. A Figura 38b deixa bem ilustrado a forma angular e as diferentes dimensões das areias utilizadas na dosagem das amostras. Por ser um traço dosado sem a presença da aglomerante cal, a quantidade de água utilizada na mistura foi menor do que nos demais traços ensaiados, dessa forma, apresenta-se com baixa porosidade, atestando sua maior resistência à compressão em relação ao TR4, este dosado com maior quantidade de água nos traços analisados.

Nas Figuras 39a e 39b ficam perceptíveis, novamente, a interação entre a pasta e os agregados, tornando a argamassa de revestimento mais resistente, corroborando-se com os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples. Na Figura 39b, está sinalizado o cristal, resultado do endurecimento da pasta, obtendo-se ganho de resistência ao TR1.

Figura 39 – Análise microestrutural ampliada 500x (a) e 3500x (b) – TR1 (1:0:6)



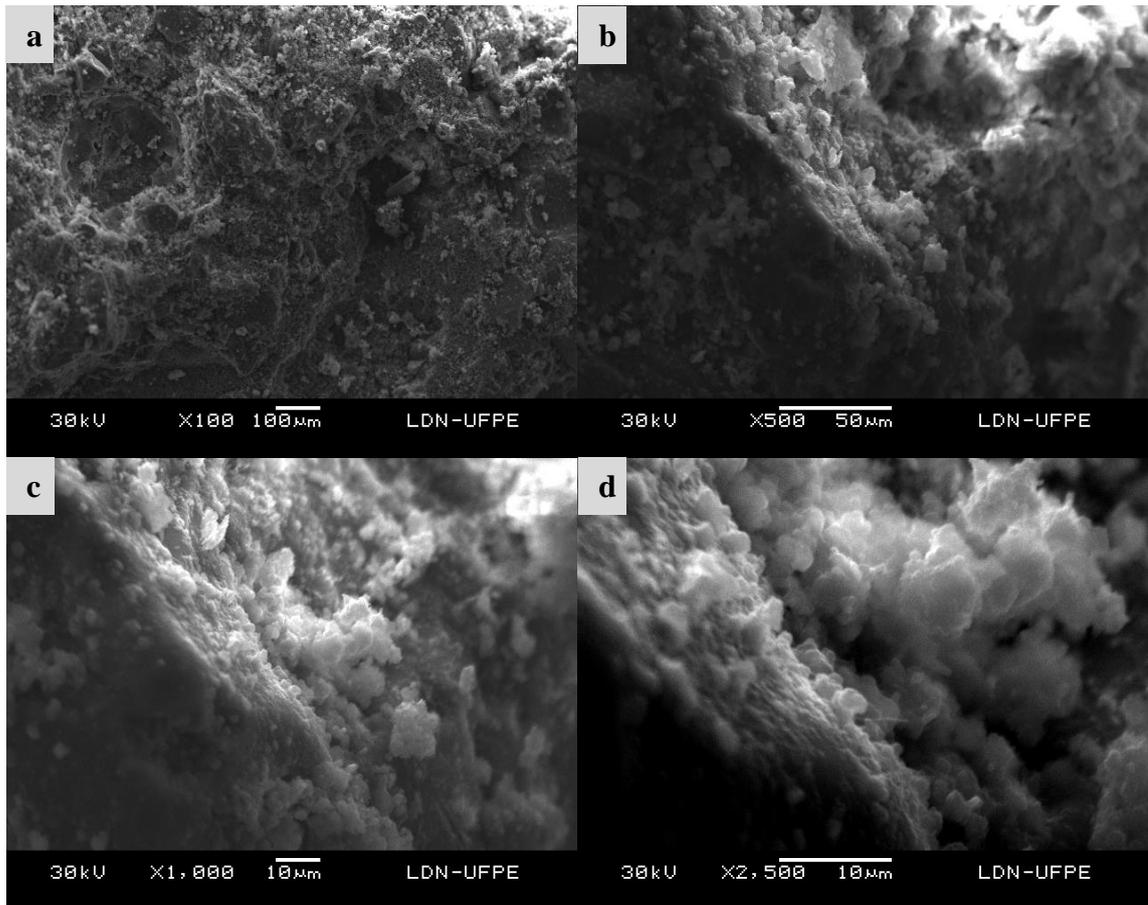
Fonte: A autora (2018).

Na análise microestrutural do TR2, conforme ilustrado na Figura 40, observou-se uma melhor aderência entre a pasta e os agregados, isso foi justificado pela presença da cal em sua dosagem. Os agregados (areias fina e grossa) presentes no traço apresentam uma superfície rugosa, ocorrendo uma penetração da pasta de cimento no interior do agregado, dessa forma, aumenta-se a coesão dos materiais que compõe o TR2. Esta característica corroborou-se aos resultados da coesão e do ângulo de atrito obtidos no ensaio de cisalhamento direto, que mostraram que o TR2 se apresentou mais coeso que o TR1 e o ângulo de atrito no TR2, mostrou-se maior que o TR1. Tal comportamento também foi observado por Gominho (2016).

Fazendo-se coerência aos resultados da coesão e do ângulo de atrito obtidos no ensaio de cisalhamento direto, o TR2 apresentou-se mais coeso que o TR1 e o ângulo de atrito no TR2, mostrou-se maior que o TR1. As Figuras 40a e 40b ilustram uma boa coesão entre os aglomerantes e os agregados, enquanto as Figuras 40c e 40d mostram a presença da aglomerante cal.

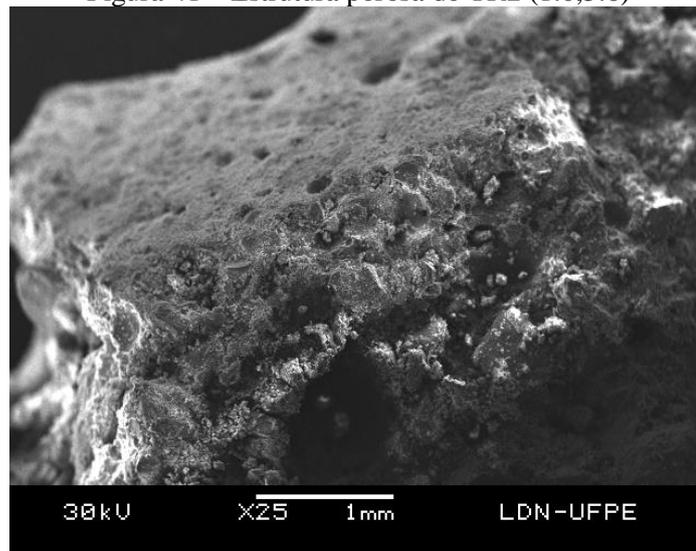
Apesar da coesão entre os materiais, a Figura 41 ilustra os poros na amostra analisada, isso deve-se a quantidade maior de água utilizada no TR2, aumentando a porosidade da argamassa de revestimento.

Figura 40 – Análise microestrutural do TR2 ampliada 100x (a), 500x (b), 1000x (c) e 2500x (d)



Fonte: A autora (2018).

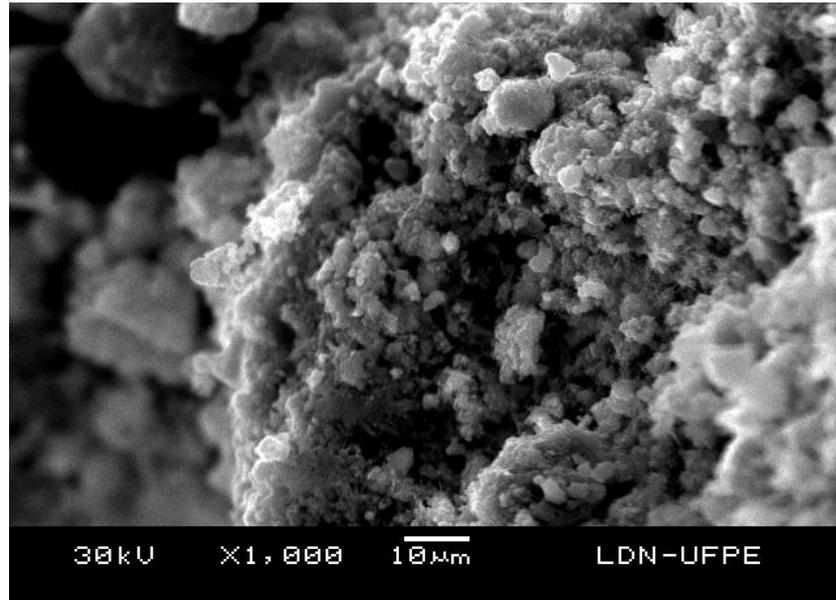
Figura 41 – Estrutura porosa do TR2 (1:0,5:6)



Fonte: A autora (2018).

A Figura 42 mostra a presença da aglomerante cal em maior quantidade, ilustra também a união entre os aglomerantes e os agregados presentes na dosagem do TR3, atestando que o traço TR3 (1:1:6) é o mais adequado para as argamassas de revestimento. Outro ponto observado através da análise eletromicrográfica é a presença de uma estrutura porosa, justificada pela maior quantidade de água presente na dosagem da argamassa.

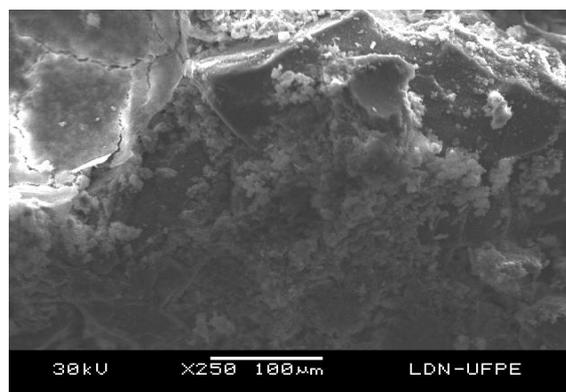
Figura 42 – Eletromicrografia da argamassa de revestimento TR3 (1:1:6)



Fonte: A autora (2018).

Apesar da boa coesão entre os aglomerantes e agregados no TR4, a amostra analisada microscopicamente apresenta fissuras em sua estrutura, melhor ilustrada na Figura 43. Essas falhas justificam-se pela maior quantidade de água presente na dosagem do traço, com isso corroboram-se os dados obtidos no ensaio de cisalhamento direto e resistência à compressão, os quais apresentaram maior coesão e menor resistência ao TR4 quando comparado aos demais traços analisados.

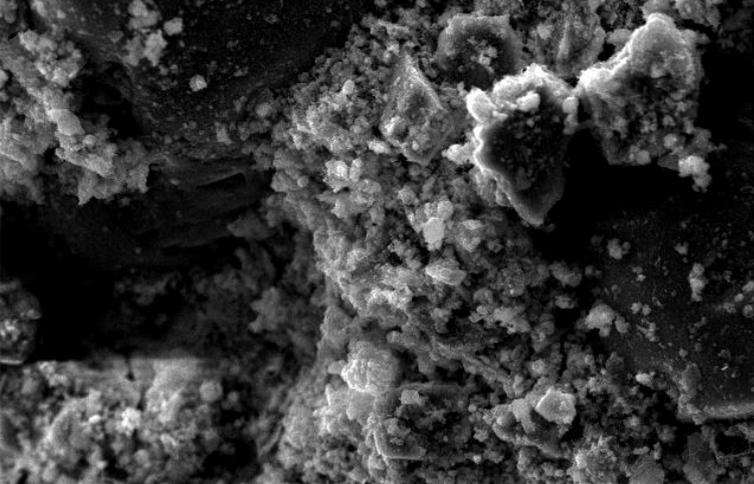
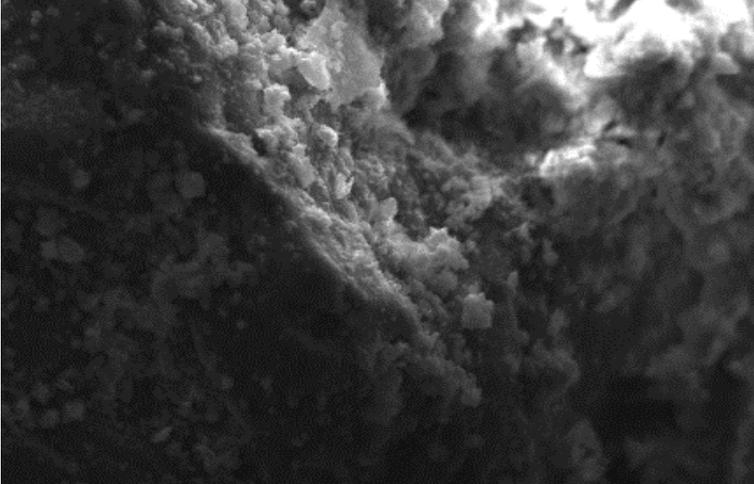
Figura 43 – Eletromicrografia da argamassa de revestimento TR4 (1:1,5:6)

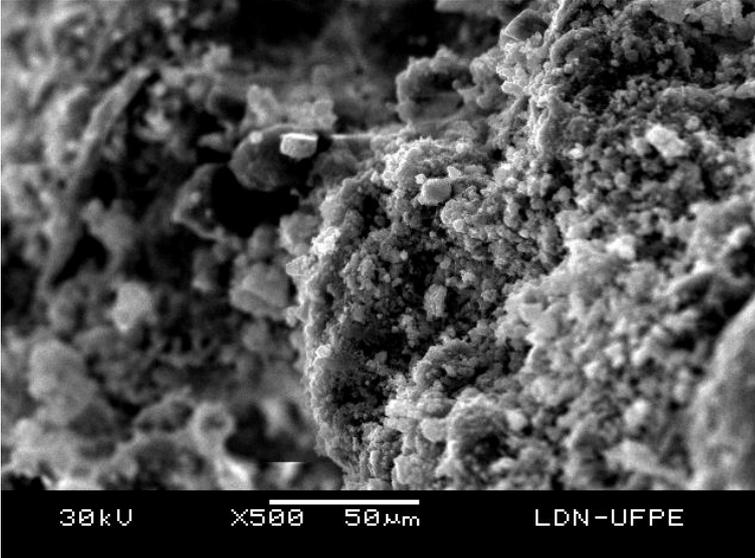
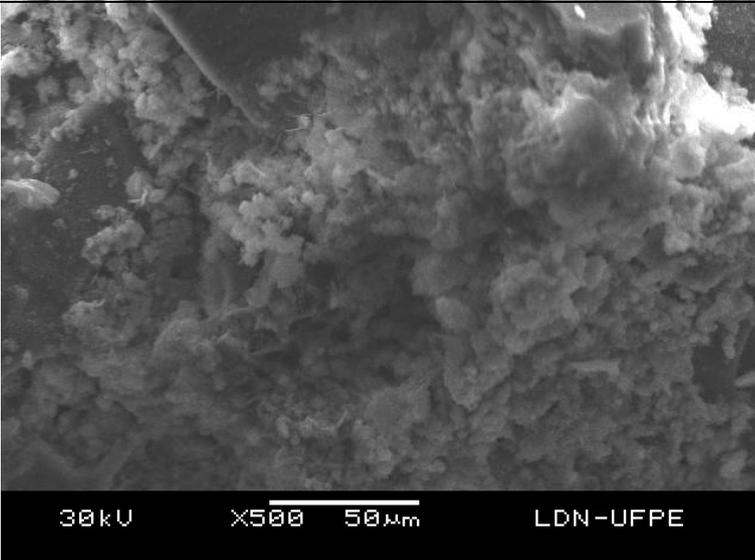


Fonte: A autora (2018).

A Tabela 19 apresenta imagens e características referente às amostras de argamassa dos traços analisados na MEV. Fica bem visível na análise microscópica eletrônica a presença e o teor crescente da aglomerante cal na dosagem dos traços.

Tabela 19 – Eletromicrografias das amostras do TR1, TR2, TR3 e TR4

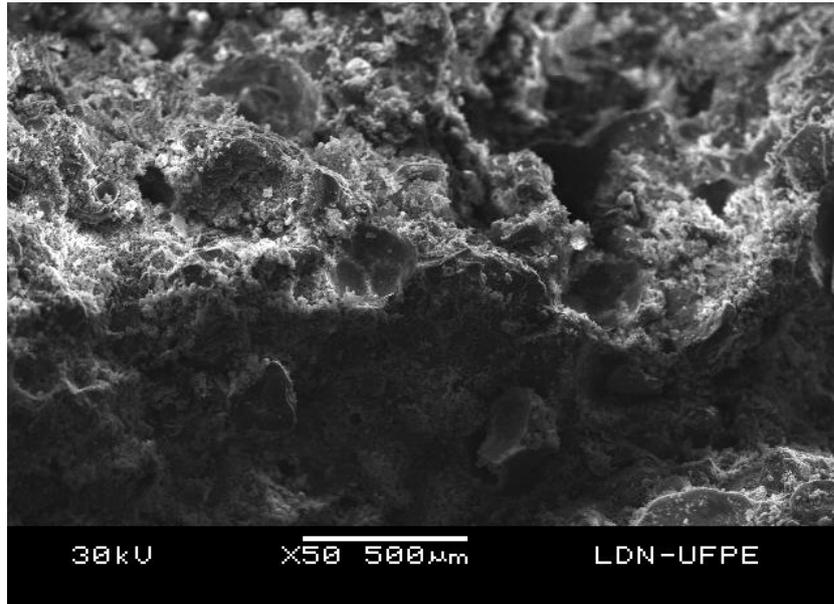
Traços	Análise microestrutural (MEV)	Características observadas
TR1 (1:0:6)		<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de cal; • Baixa porosidade; • Boa aderência entre os materiais; • Formação de cristais de cimento resultando no endurecimento da pasta.
TR2 (1:0,5:6)		<ul style="list-style-type: none"> • Presença da cal; • Coesão entre os aglomerantes e agregados; • Baixa presença de poros na amostra.

TR3 (1:1:6)		<ul style="list-style-type: none"> • Quantidade adequada da cal; • Traço padrão; • Maior volume de vazios; • Elevada coesão entre os aglomerantes e agregados.
TR4 (1:1,5:6)		<ul style="list-style-type: none"> • Presença elevada da cal; • Maior aderência entre os materiais; • Elevada porosidade; • Presença de cristal resultante do endurecimento da pasta.

Fonte: A autora (2018).

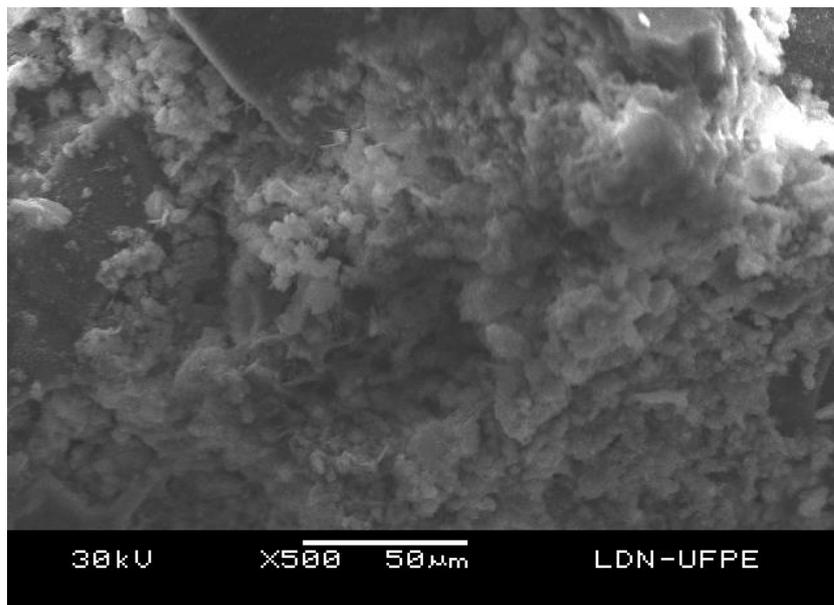
A Figura 44, ampliada em 50x, ilustra uma grande quantidade de poros na amostra analisada (TR4), contribuindo diretamente na perda de resistência da argamassa de revestimento aos 28 dias. Já a Figura 45, ampliada microscopicamente em 500x, mostra evidências das pontes de ligação entre a aglomerante cal e a pasta de cimento da mistura, atestando a contribuição da maior quantidade da cal no TR4, fazendo a ligação entre os aglomerantes utilizados nos traços (cimento e cal).

Figura 44 – Poros da amostra do TR4 através de análise eletromicrográfica



Fonte: A autora (2018).

Figura 45 – Eletrografia do TR4 analisando a ligação entre os aglomerantes



Fonte: A autora (2018).

5 CONCLUSÕES

São apresentadas as principais conclusões da pesquisa, com base na análise dos resultados obtidos na caracterização dos materiais e nos traços de argamassa desenvolvidos, bem como apresenta sugestões para futuras pesquisas.

5.1 Principais conclusões

Caracterização dos materiais utilizados na preparação dos traços aplicados nas argamassas de revestimento

A cal, classificada como CH-I, indicou elevadas retenções de água e baixos índices de finura, caracterizando-a como de boa trabalhabilidade e excelente qualidade, respectivamente, para as dosagens das argamassas de revestimento em estudo.

O cimento CII Z-32, aplicado na pesquisa, enquadrou-se dentro dos limites exigidos pelas normativas vigentes, no que se refere à massa específica e unitária; ao início e fim de pega; à resistência à compressão, para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias, assim como com valores semelhantes aos identificados em outros estudos da literatura apresentada.

As areias (fina e grossa) apresentaram curvas granulométricas com comportamento semelhantes, caracterizando os agregados miúdos como uniformes e bem graduados.

A adição de cal na preparação das argamassas de revestimento causou um maior consumo de água nas misturas (TR2, TR3 e TR4), comparado ao traço sem cal (TR1), visto que a trabalhabilidade era mantida em todos os traços ensaiados.

Todos os traços de argamassas de revestimento ensaiados foram classificados como D6 (NBR 13279, 2005), sendo considerados normais conforme a análise de densidade em massa no estado fresco. Tal aspecto leva a um ganho de produtividade em atividades da prática, por exemplo, em lançamento na execução dos serviços.

Comportamento reológico das argamassas de revestimento, em estado fresco, com base no ensaio de mesa de consistência (“flow table”) e ensaio de cisalhamento direto.

A consistência atingida foi uniforme na dosagem dos traços ensaiados, avaliada por meio do ensaio de *flow table*, fixando-se o índice de espalhamento dos traços em 245 ± 5 (mm). Embora seja compreensível, que uma avaliação isolada do ensaio de mesa de consistência, não seja suficiente para definir a trabalhabilidade de uma argamassa.

Os valores de tensão cisalhante aumentaram à medida que cresceu a tensão normal aplicada, em todos os diferentes traços ensaiados. Observou-se ainda que, para uma mesma tensão normal, as tensões cisalhantes cresceram à medida que foi adicionada cal na dosagem dos traços.

Os índices obtidos no ensaio (coesão, ângulo de atrito, tensão cisalhante e deslocamento horizontal de ruptura) se mostraram crescentes à medida em que se incrementa o teor da cal na dosagem das argamassas.

Os traços ensaiados e submetidos a tensão normal de 10 KPa mostraram-se muito sensíveis ao ensaio de cisalhamento direto, simples mudanças no procedimento de dosagem (temperatura do ambiente, metodologia de moldagem, tempo maior que 20 min para o início do ensaio) interferiram nos parâmetros obtidos no ensaio, tornando-se necessário uma nova dosagem da argamassa de revestimento.

As envoltórias de resistência permitiram mostrar que a medida que a proporção da cal aumenta na composição das argamassas, os valores para o ângulo de atrito e coesão tendem a aumentar, na faixa compreendida entre (56% - 88%) e (3% - 83%), respectivamente, quando se compara os TR2, TR3 e TR4 (proporções crescentes da cal) em relação ao TR1 (sem cal).

Com relação à viabilidade da utilização do método de cisalhamento direto em solo D 3080 (ASTM, 2011), adaptado para ser aplicado a argamassas de revestimento, em seu estado fresco, este mostrou-se com grande potencial. Isto se confirma, por exemplo, a partir da análise das envoltórias de resistência obtidas na pesquisa, que apresentaram coeficientes muito próximo de 1 (um), calculados a partir da regressão linear entre τ (tensão cisalhante) e σ (tensão normal), comprovando a qualidade dos resultados.

Mesmo apresentando valores que comprovem a viabilidade da utilização do ensaio de cisalhamento direto para argamassas em seu estado fresco, o mesmo se mostrou sensível às mudanças dos materiais presentes nos traços.

Deve-se reconhecer que estudos ainda são necessários para adaptar a metodologia utilizada na mecânica dos solos à realidade das argamassas de revestimento. Algumas variáveis não são definidas com muita clareza para tornar um ensaio normatizado, aceito ao ramo das argamassas de revestimento, como por exemplo: procedimento de moldagem do corpo-de-prova; quantidade do material a ser submetido ao ensaio; velocidade do ensaio; níveis de tensões normais. Pois qualquer modificação no procedimento do ensaio pode gerar divergências entre os parâmetros obtidos.

Um fator que pode modificar os resultados dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) é a dificuldade de se manter um padrão na quantidade de água utilizada em cada traço, pois como a trabalhabilidade das dosagens é controlada pelo ensaio “flow table”, esta quantidade de água muitas vezes pode modificar a resistência do traço e, conseqüentemente, os parâmetros obtidos a partir da regressão linear proposta pelo modelo do Mohr-Coulomb (envoltória de resistência).

Embora o ensaio forneça parâmetros quantitativos, não se tem na literatura ou mesmo em normativas, valores padrões de coesão que comprovem uma boa trabalhabilidade; assim como de valores de ângulos de atrito que demonstrem a interação entre as partículas do traço; valores de tensões cisalhantes máximas associada à resistência do material dosado; valores de deslocamento horizontal que ateste a aderência do material aplicado à um substrato. Diante dessas lacunas, o ensaio de cisalhamento direto não pode ainda ser considerado um ensaio normatizado para aplicação em revestimento de argamassas;

Comportamento das argamassas de revestimento, em estado endurecido, a partir da resistência à compressão simples e da análise microestrutural

As resistências à compressão simples das argamassas, em seu estado endurecido, para todos os traços analisados, apresentaram-se dentro dos limites normativos e atestam argamassas de boa qualidade e aptas para utilização em revestimentos.

O TR3 se enquadrou dentro dos limites normativos e foi classificada como uma argamassa P4, embora apresente valores de resistência inferiores a classificação P5, a argamassa dosada com o TR3 é considerada a mais adequada para o uso de revestimentos, devido à sua maior capacidade de deformação. Esta característica torna à argamassa de revestimento, em seu estado endurecido, menos propícia ao aparecimento de patologias, como por exemplo, fissuras.

Aos 28 dias de cura, a resistência à compressão simples das argamassas de revestimento, analisando-se àquelas com a presença de diferentes teores de cal (TR2, TR3 e TR4), mostrou-se decrescente com o aumento deste aglomerante. Tal fato foi associado ao aumento de porosidade nas amostras, decorrente de maior quantidade de água nas misturas com maiores teores de cales, cuja característica pôde ser também comprovada a partir da análise microestrutural, no ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Com relação aos aspectos microestruturais, a adição da aglomerante cal na dosagem dos traços aumentou a porosidade nas amostras de argamassa, ocasionando perda de resistência à compressão; uma maior aderência entre os materiais utilizados nos traços, formando flóculos entre eles; elevação da hidratação do cimento, favorecendo a sua cristalização; fissuras nas amostras referentes aos traços que apresentavam maiores teores da aglomerante cal.

5.2 Sugestões para futuras pesquisas

Baseado nos resultados obtidos e diante das dificuldades e questionamentos aparecidos ao longo da pesquisa, e a fim de dar continuidade ao tema proposto, sugerem-se como sugestões para futuras pesquisas:

Realizar ensaios, a partir da utilização do equipamento de cisalhamento direto, avaliando o comportamento reológico das argamassas de revestimento considerando os seguintes aspectos:

- substituir parte do volume do cimento, empregado na dosagem dos traços, por resíduos da construção civil;
- utilizar diferentes tipos de cales nos traços ensaiados, observando-se como fator determinante a qualidade da cal;

- comparar às argamassas de revestimento, em seu estado endurecido e fresco, dosadas com quantidades distintas de materiais entre os parâmetros obtidos, através dos parâmetros obtidos no ensaio de cisalhamento direto;
- avaliar os parâmetros quantitativos obtidos no ensaio de cisalhamento direto, e utilizar na prática as dosagens dos traços de argamassa, corroborando-se os valores gerados no ensaio com a eficácia e rendimento da utilização da argamassa em canteiros de obra, avaliando, principalmente, a trabalhabilidade dos traços ensaiados.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15839:** Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. **NBR ISO 12957-1:** Geossintéticos – Determinação das características de atrito – Parte 1: Ensaio de cisalhamento direto. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 11578:** Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 11579:** Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 11582:** Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **NBR NM 23:** Cimento Portland - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR NM 48:** Cimento Portland - Determinação do teor de escória granulada de alto-forno por microscopia. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 76:** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.
- _____. **NBR 6473:** Cal virgem e cal hidratada – Análise Química. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 9289:** Cal hidratada para argamassas – Determinação da finura. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 9290:** Cal hidratada para argamassas - Determinação de retenção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

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

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7218:** Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM C780:** Standard test method for preconstruction and construction evaluation of mortars for plain and reinforced unit masonry. Philadelphia, USA, 2012.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM 3080:** Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. USA, 2011.

BSI – British Standards Institution. **BS 4551:** Mortar – Methods of test for mortar and screed – Chemical analysis and physical testing. London, 2005.

ALLEN, E.; IANO, J. **Fundamentos da Engenharia de Edificações.** Ed. Bookman, 2013, Ed.5, p.1008.

ALMEIDA e SILVA, P. B. **Discussão e proposta de ensaio de cisalhamento direto de grande porte para obtenção de parâmetros de resistência de rejeito grosso de carvão mineral.** 2012. 65 f. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

ALMEIDA, R. S.; SILVA, F. G. S.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P. Avaliação da resistência ao cisalhamento em argamassa à base de cimento. **Iniciação Científica - CESUMAR**, v. 15, n. 1, p. 5-11, ISSN 1518-1243, jun. 2013.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa.** 2005. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANTUNES, R. P. N.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Influência da sequência de mistura nas propriedades reológicas de argamassa avaliadas por *squeeze-flow*. In: IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA), 2005, Florianópolis. **Anais...** p. 158-179. Santa Catarina, 2005. Disponível em: infoahb.org.br. Acesso em: 31 mai. 2017.

ARAÚJO, R. C.; CARASEK, H.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Caracterização reológica de argamassa de revestimento pelo método do cisalhamento direto. In: XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA), 2017, São Paulo. **Anais...** p. 1-9. São Paulo, 2017. Disponível em: gtargamassas.org.br. Acesso em: 16 jun. 2018.

BALL, R. J.; ADEL, ET.; ALLEN, G. C. Influence of carbonation on the load dependent deformation of hydraulic lime mortars. **Elsevier Science**, 3193-3199 p, 2011.

BAUER, E. **Revestimentos de argamassa – características e peculiaridades**. Brasília: Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM-UnB), Sinduscon, 2005. 92 p.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. E.; WALTERS, F. R. S. An introduction to rheology. **Elsevier Science**, 199 p, 1989.

BRETAS, R. E. S.; D'AVILA, M. A. **Reologia de polímeros fundidos**. São Carlos, SP: Ed UFSCAR, 2000. 196p.

BOMBLEI, J. P. Comportement rheologique des pâtes, morters et béton: mesure, évolution, influence de certains paramètres. **Revue des Matériaux de Construction “ Ciments et Bétons**, n. 617, fev. 1967.

BRAIDA, J. A; REICHERT, J. M; SOARES, J. M. D; REINERT, D. J. Resistência inter e intra-agregados em ensaios de cisalhamento direto de um nitossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.2, p.379-386, mar/abr. 2007.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Ed. Isaia, G. C. São Paulo: IBRACON, 2007, cap. 28, v.2, p.1712.

CARASEK, H. **Materiais de Construção Civil**. Ed. Isaia, G. C. São Paulo: IBRACON, 2010. cap. 26, v.2, p. 863-904.

CARASEK, H; ARAÚJO, R. C; CASCUDO, O; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**, v.21, n.3, p.714-732, fev. 2016.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G; JOHN, V. M. Rheological behavior of mortars under diferente squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, v.39, p.748-753, may. 2009.

CARDOSO, F. A; PILEGGI, R. G; JOHN, V. M. **Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento**: Manual de utilização. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2010. (Boletim Técnico).

CAMPOS, M. O. **Estudo da resistência de aderência à tração e ao cisalhamento de revestimentos de argamassa em substratos de concreto**. 2014. 321 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia, Estruturas e Construção Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

CAMPOS, M. O; CARASEK, H; OLIVEIRA, L; VARGAS, C. L; COSTA e SILVA, A. J. Determinação da resistência de aderência ao cisalhamento de revestimentos de argamassa pelo método do cisalhamento direto de solos. In: XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA), 2015, Rio Grande do Sul. **Anais...**Porto Alegre, RS, 2015.

CAMARINI, G.; ISHIKAWA, P. H. Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável – X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (claCS'04 – ENTAC'04), 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo, SP, 2004.

CASALI, J. M.; MIGUEL, T. F.; BETIOLI, A. M. Caracterização de argamassas de revestimento produzidas com substituição parcial e total do agregado miúdo natural pelo resíduo de areia de fundição fenólica. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat), 2016, Natal. **Anais...** p. 3322-3333. Natal, RN, 2016. Disponível em: cbecimat.com.br. Acesso em: 26 jun. 2017.

CAMARINI, G.; ISHIKAWA, P. H. Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável – X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (claCS'04 – ENTAC'04), 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo, SP, 2004. Disponível em: eng.ufjf.br. Acesso em: 08 jun. 2017.

CORREIA, S. L.; MATOS, B. W.; SANTOS, G.; DEZANET, A.; STRINGARI, D.; SCHACKOW, A.; SEGADÃES, A.M. Uso de análise de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para a caracterização de materiais de construção contendo rejeitos de tijolos. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais (CBECIMAT), 2014, Mato Grosso. **Anais...**Cuiabá, MT, novembro 2014.

COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos.** 2006. 131 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ENGMANN, J.; SERVAIS, C.; BURBIDGE, A. S. Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v.132, p.1-27, aug. 2005.

FORTI, E. Z. **Influência da cal hidratada nas características da argamassa de revestimento realizada em obra.** 2017. 74 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2017.

GOMES, V. L. L **Efeito da adição de diatomita no comportamento reológico e mecânico de argamassas colantes.** 2013. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

GOMINHO, M. S. L. A. **Caracterização microestrutural de argamassas.** 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** 2008. 247 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

JUNQUEIRA, P. J. B. **Envoltória de resistência do concreto compactado com rolo (CCR), incluindo o efeito escala.** 2010. 200 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

JAMARIM, V. M. **Estudo comparativo de propriedades físicas e mecânicas de argamassas produzidas com cal virgem, hidratada e líquida.** 2015. 52 f. Trabalho de conclusão de curso 2 (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

KOEHLER, E. P.; FOWLER, D. W.; FERRARIS, C. F. Summary of concrete workability test methods. **International Center for Aggregates Research**, v.105, 83p, 2003.

LU, G.; WANG, K.; RUDOLPHI, T. J. Modeling rheological behavior of highly flowable mortar using concepts of particle and fluid mechanics. **Cement & Concrete Composites**, v.30, p.1-12, jun. 2007.

LU, G.; WANG, K. Theoretical and experimental study on shear behavior of fresh mortar. **Cement & Concrete Composites**, v.33, p.319-327, sep. 2011.

MATTANA, A. J. **Estudo de cales hidratadas de mercado: caracterização química, física e comportamento reológico da pasta.** 2013. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MACIOSKI, G. **Avaliação do comportamento de argamassas estabilizadas para revestimento.** 2014. 150 f. Trabalho final de curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

MARTIN, A.N. **Physical Pharmacy: Physical Chemical Principles in the Pharmaceutical Sciences.** Ed. Lea & Febiger, 1993, Ed.4, p.622.

NAVARRO, R. F. **Fundamentos de reologia de polímeros.** Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul - UCS, 1997. 300 p.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico.** São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224p.

PAIVA, S. C.; GOMES, E. A. O.; OLIVEIRA, R. A. Controle de qualidade da cal para argamassas – metodologias alternativas. **Revista Ciência & Tecnologia**, v.1, n.1, p.1-11, julho-dezembro 2007.

PALMEIRA, E. M. **Notas de aula do curso de resistência ao cisalhamento de solos.** Brasília: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), 2001, 515p.

PEREIRA, E.; SILVA, I. J.; COSTA, M. R. M. M. Preparação de amostras para análise em microscopia eletrônica de varredura em interfaces de revestimentos cerâmicos. **Revista de Engenharia & Tecnologia**, v.5, n.1, p.44-52, abril 2013.

PEREIRA, R. J. P. **O Desempenho reológico e mecânico de argamassas de revestimento reforçadas com fibras**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2011.

PERROT, A.; LANOS, C.; MELINGE, Y.; ESTELLÉ, P. Mortar physical properties evolution in extrusion flow. **Rheologica Acta**, v.46, p.1065-1073, 2007.

POLITO, G. **Avaliação da introdução de cal hidratada nas argamassas aplicadas sobre blocos cerâmicos e sua influência no desempenho e morfologia**. 2008. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

PRIORI, L. Jr.; BRENNAND, F.; COSTA e SILVA, A. J.; OLIVEIRA, R.A. Estudo sobre a qualidade da cal produzida em Pernambuco e sua influência nas argamassas. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído (ENTAC), 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, SC, 2006. Disponível em: infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006. Acesso em: set. 2018.

ROCHA, L. S.; CURCIO, D. R.; SIGNORINI, V. B.; DUFAU, T. Dosagem e caracterização de assentamento e revestimento com agregados de resíduos da construção civil. In: IV Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil (ENARC), 2015, São Paulo. **Anais...** São Paulo, SP, 2015. Disponível em: eng.ufjf.br. Acesso em: 08 jun. 2017.

SANTOS, W. J. **Argamassa de alto desempenho**. 2011. 209 p. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído), Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2011.

SILVA, N. G. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. 2011. 329 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SOUSA, J. G. G. **Contribuição ao estudo das propriedades das argamassas de revestimento no estado fresco**. 2005. 233 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2005.

SOUSA, J. G. G.; AQUINO FILHO, L. P. B. Caracterização de argamassas no estado fresco aplicando técnica de cisalhamento direto. **Evolvare Scientia**, v.2, n.1, p.68-82, 2013.

SOUSA, J. G.G.; BAUER, E. Contribuição ao estudo da trabalhabilidade das argamassas mistas. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia (SBTA), 2003, São Paulo. **Anais...** p. 279-289, São Paulo, SP, 2003.

SOUSA, J. G.G.; BAUER, E. Estudo da reologia das argamassas de revestimento no estado fresco. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT), 2002, Natal. **Anais...** p. 571-577, Rio Grande do Norte, RN, 2002. Disponível em: www.ipen.br. Acesso em: 05 mai. 2017.

TANNER, R. I. **Engineering rheology**. Rev.ed. New York: Oxford Science Publications, 1998.

APÊNDICE A – Valores obtidos no ensaio de cisalhamento direto – TR1 (1:0:6)

TR 1 (1:0:6)					
$\sigma = 10$ KPa		$\sigma = 37$ KPa		$\sigma = 50$ KPa	
Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)
0.00	0.05	0.00	-0.05	0.00	-0.12
0.10	1.71	0.10	2.74	0.10	2.85
0.20	1.70	0.20	3.69	0.20	4.06
0.30	1.59	0.30	4.64	0.30	4.61
0.40	1.74	0.40	5.45	0.40	5.11
0.50	1.85	0.50	6.38	0.50	6.27
0.60	1.79	0.60	7.05	0.60	7.41
0.70	2.47	0.70	7.84	0.70	8.72
0.80	2.37	0.80	8.26	0.80	9.53
0.90	2.74	0.90	8.79	0.90	9.65
1.00	2.88	1.00	9.21	1.00	10.96
1.20	3.47	1.20	10.61	1.20	12.42
1.40	4.03	1.40	11.44	1.40	13.31
1.60	4.37	1.60	12.72	1.60	13.73
1.80	4.62	1.80	13.45	1.80	15.35
2.00	5.07	2.00	13.96	2.00	16.34
2.50	5.99	2.50	14.82	2.50	18.24
3.00	5.88	3.00	14.94	3.00	18.83
3.50	6.10	3.50	14.99	3.50	18.94
4.00	6.13	4.00	14.29	4.00	18.54
4.50	5.85	4.50	13.18	4.50	18.27
5.00	5.29	5.00	11.83	5.00	17.65
6.00	4.89	6.00	9.77	6.00	16.75
7.00	4.78	7.00	9.20	7.00	15.92
8.00	4.50	8.00	9.12	8.00	15.24
9.00	4.64	9.00	9.39	9.00	15.14
10.00	4.72	10.00	9.39	10.00	15.24

Fonte: A autora (2018).

APÊNDICE B – Valores obtidos no ensaio de cisalhamento direto – TR2 (1:0,5:6)

TR 2 (1:0,5:6)					
$\sigma = 10$ KPa		$\sigma = 37$ KPa		$\sigma = 50$ KPa	
Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)
0.00	0.31	0.00	0.05	0.00	0.00
0.10	1.29	0.10	2.15	0.10	3.64
0.20	1.48	0.20	2.72	0.20	6.02
0.30	2.07	0.30	3.49	0.30	6.97
0.40	2.35	0.40	4.61	0.40	7.61
0.50	2.61	0.50	4.75	0.50	9.40
0.60	3.07	0.60	5.45	0.60	10.96
0.70	3.36	0.70	5.99	0.70	12.00
0.80	3.72	0.80	6.66	0.80	13.34
0.90	3.86	0.90	6.83	0.90	14.82
1.00	4.08	1.00	7.44	1.00	16.03
1.20	4.89	1.20	9.40	1.20	18.05
1.40	5.65	1.40	9.73	1.40	19.80
1.60	6.29	1.60	10.30	1.60	21.68
1.80	6.66	1.80	11.77	1.81	23.41
2.01	7.19	2.00	12.76	2.00	24.59
2.50	8.05	2.50	15.38	2.50	27.10
3.00	8.58	3.00	17.93	3.00	28.42
3.50	8.58	3.50	19.49	3.50	28.51
4.00	8.33	4.00	20.28	4.00	28.87
4.50	7.56	4.50	20.72	4.50	28.76
5.00	7.08	5.00	20.40	5.00	28.54
6.00	6.71	6.00	19.00	6.00	26.88
7.00	6.63	7.00	17.51	7.00	23.61
8.00	6.80	8.00	16.54	8.00	21.77
9.00	6.96	9.00	16.00	9.00	21.59
10.00	6.89	10.00	15.84	10.00	21.60

Fonte: A autora (2018).

APÊNDICE C – Valores obtidos no ensaio de cisalhamento direto – TR3 (1:1:6)

TR 3 (1:1:6)					
$\sigma = 10$ KPa		$\sigma = 37$ KPa		$\sigma = 50$ KPa	
Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)
0.00	0.00	0.00	-0.08	0.00	0.19
0.15	2.65	0.10	2.01	0.10	6.83
0.24	3.95	0.20	2.89	0.20	8.98
0.30	3.55	0.30	3.30	0.30	9.88
0.40	4.06	0.40	3.24	0.40	11.32
0.50	4.53	0.50	3.58	0.50	12.53
0.60	4.76	0.60	4.54	0.60	13.54
0.70	5.11	0.70	5.11	0.70	14.72
0.80	5.51	0.80	5.88	0.80	15.64
0.90	5.71	0.90	6.77	0.90	16.30
1.00	5.59	1.00	7.69	1.00	17.09
1.20	6.80	1.20	8.98	1.20	19.42
1.40	7.67	1.40	10.10	1.40	21.01
1.60	8.09	1.60	11.35	1.60	23.05
1.80	8.65	1.80	12.25	1.80	24.09
2.00	8.98	2.00	13.74	2.00	25.46
2.50	10.24	2.50	17.26	2.50	28.95
3.00	11.10	3.00	20.09	3.00	31.64
3.50	11.42	3.50	21.95	3.50	33.12
4.00	11.35	4.00	22.05	4.00	34.21
4.50	11.38	4.50	23.78	4.50	34.93
5.00	11.64	5.00	23.22	5.00	35.08
6.00	11.13	6.00	22.66	6.00	35.04
7.00	10.43	7.00	20.08	7.00	33.85
8.00	9.91	8.00	19.14	8.00	31.80
9.00	9.68	9.00	18.58	9.00	30.75
10.00	9.82	10.00	17.88	10.00	30.01

Fonte: A autora (2018).

APÊNDICE D – Valores obtidos no ensaio de cisalhamento direto – TR4 (1:1,5:6)

TR 4 (1:1,5:6)					
$\sigma = 10$ KPa		$\sigma = 37$ KPa		$\sigma = 50$ KPa	
Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	τ cisalhante (KPa)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
0.10	1.95	0.10	2.91	0.10	4.75
0.20	2.21	0.20	3.81	0.20	7.05
0.30	2.61	0.30	4.75	0.30	8.51
0.40	2.93	0.40	5.14	0.40	9.85
0.50	3.14	0.50	5.81	0.50	10.52
0.60	3.41	0.60	6.63	0.60	11.24
0.70	3.56	0.70	7.53	0.70	12.98
0.80	4.11	0.80	8.36	0.80	13.42
0.90	4.39	0.90	8.19	0.90	14.30
1.00	4.65	1.00	8.31	1.00	15.24
1.20	4.98	1.20	9.87	1.20	16.96
1.40	5.11	1.40	11.36	1.40	18.33
1.60	6.61	1.60	11.98	1.60	20.73
1.80	7.22	1.80	12.73	1.80	22.66
2.00	7.55	2.00	14.27	2.00	24.12
2.50	9.70	2.50	17.49	2.50	27.91
3.00	11.55	3.00	19.88	3.00	31.69
3.50	12.64	3.50	22.30	3.50	34.77
4.00	12.92	4.00	23.92	4.00	37.37
4.50	13.29	4.50	24.72	4.50	38.61
5.00	13.07	5.00	25.35	5.00	39.42
6.00	10.47	6.00	25.56	6.00	38.02
7.00	9.91	7.00	23.42	7.00	35.38
8.00	9.98	8.00	20.95	8.00	31.42
9.00	10.21	9.00	20.59	9.00	31.05
10.00	10.21	10.00	20.59	10.00	31.21

Fonte: A autora (2018).

ANEXO A – Ensaio de granulometria dos agregados miúdos (areias fina e grossa)

Utilizou-se cerca de 3 kg para a realização dos ensaios nos agregados (areia fina e areia grossa). Após os agregados serem secos em estufa, à temperatura de 100°C, num intervalo de 24h, as amostras foram retiradas da estufa e esfriaram a temperatura ambiente.

As peneiras de aberturas da malha 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm; 0,3 mm e 0,15 mm foram utilizadas no ensaio granulométrico. As peneiras foram colocadas em ordem decrescente de abertura da malha, do topo para a base, e se iniciou o processo de peneiramento, agitando o material dentro das peneiras por 2 min, de modo que o material conseguisse parar na peneira que determinasse o tamanho correspondente aos grãos. Em seguida, era pesado todo material retido em cada peneira.

Após a realização de dois ensaios para cada tipo de agregado miúdo, adotou-se a média de cada distribuição granulométrica e depois formou-se as respectivas curvas. Além das curvas granulométricas, foram obtidas também a dimensão máxima característica (DMC), como sendo a abertura da malha em mm, que contenha uma percentagem retida acumulada igual ou inferior a 5% e o módulo de finura de cada agregado obtido através da soma das percentagens retidas acumuladas das peneiras dividida por 100, com aproximação de 0,01.

ANEXO B – Ensaio de massa específica real dos agregados (areias fina e grossa)

Colocou-se 500 g de agregado miúdo saturado em um frasco aferido, de capacidade de 500 cm³, e pesou-se o conjunto. Depois, foi colocada água até deixar o agregado submerso, e então o frasco foi agitado até a expulsão do ar. Após 1 (uma) hora, a água foi preenchida até a marca de 500 cm³ (Figura 21), e a massa do conjunto foi determinada. Em seguida, o agregado foi retirado e colocado em estufa a temperatura de 100°C. Após isso, foi determinada a massa específica do agregado miúdo, calculada através da relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis.

O procedimento foi repetido, para obter-se a massa específica como sendo o valor da média de 02 (dois) ensaios realizados.

ANEXO C – Ensaio do teor de material pulverulento das areias fina e grossa

Utilizou-se cerca de 150 g de agregados miúdos. Após secos em estufa, os agregados foram colocados em um recipiente transparente, e então a água foi adicionada. A mistura foi agitada e passada imediatamente através das peneiras de abertura de malha 0,075 mm, a fim de que passasse a água junto com os finos de tamanho menor que 0,075 mm. O que ficava retido era adicionado novamente ao recipiente com a amostra e o agregado era lavado (a) várias vezes até que água da mistura ficasse transparente (b). As Figuras 46a e 46b ilustram as etapas do processo de determinação do teor de material pulverulento dos agregados miúdos (areias fina e grossa).

Figura 46 – Etapas do processo da determinação do teor de material pulverulento dos agregados



Fonte: A autora (2018).

Por fim, o agregado lavado é colocado na estufa a uma temperatura de 100°C por 24 h. Calculou-se o teor de material pulverulento entre a relação da diferença da massa seca inicial (M_{si}) da amostra e a massa seca após a lavagem (M_{sf}) e massa seca inicial, segundo a equação:

$$\text{Teor MP (\%)} = \frac{M_{si} - M_{sf}}{M_{si}} \times 100$$

O ensaio foi repetido 02 (duas) vezes para cada tipo de agregado, e o teor de material pulverulento foi obtido através da média dos dois ensaios.