

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

José Pedro Marquezan de Oliveira

**INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE FINURA NAS PROPRIEDADES DE
ARGAMASSAS COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR**

Santa Maria, RS
2019

José Pedro Marquezan de Oliveira

**INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE FINURA NAS PROPRIEADES DE ARGAMASSAS
COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Eng. Dr Eduardo Rizzatti
Co-Orientador: Prof. Eng. Dr Gihad Mohamad

Santa Maria, RS
2019

Oliveira, José Pedro Marquezan
Influência do Módulo de Finura nas Propriedades de
Argamassas com Aditivo Incorporador de Ar / José Pedro
Marquezan Oliveira.- 2019.
129 p.; 30 cm

Orientador: Eduardo Rizzatti
Coorientador: Gihad Mohamad
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2019

1. Módulo de Finura 2. Propriedades de argamassas I.
Rizzatti, Eduardo II. Mohamad, Gihad III. Título.

José Pedro Marquezan de Oliveira

**INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE FINURA NAS PROPRIEADES DE ARGAMASSAS
COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR**

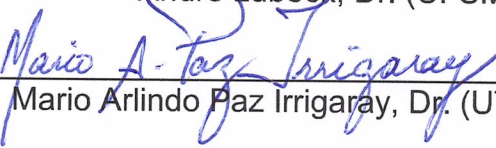
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 15 de agosto de 2019:

Eduardo Rizzatti, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Gihad Mohamad, Dr. (UFSM)
(Co-Orientador)

André Lübeck, Dr. (UFSM)


Mario Arlindo Paz Irrigaray, Dr. (UTFPR-PB)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Aos professores Eduardo Rizzatti e Gihad Mohamad pela oportunidade, orientação e confiança depositada em mim durante este trabalho.

A Universidade Federal de Santa Maria, pela disponibilidade de equipamentos e a infraestrutura do Laboratório de Materiais de Construção Civil.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, Diego, Marialva e Mauro pela ajuda nos momentos em que me afastei das atividades para dedicar tempo a esta pesquisa.

Ao meu amigo, Técnico em Edificações William Rossi, pelo empenho e tempo dedicado no auxílio técnico para a realização dos ensaios.

À empresa Supermix, unidade de Santa Maria, representada pela Engenheira Ana Carla Buzetto, pelo fornecimento de materiais fundamentais para a execução do trabalho.

Aos meus irmãos, Ronei e Leonardo, pela parceria de vida, que torna qualquer desafio mais fácil de ser encarado.

Aos meus pais, Onei e Rose, pelos exemplos de honestidade, persistência e apoio incondicional.

À minha noiva, Greice Tabarelli, pelo companheirismo, otimismo, paciência e incentivo ao longo desta jornada.

RESUMO

INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE FINURA NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR

Autor: José Pedro Marquezan de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Rizzatti
Co-Orientador: Prof. Dr. Gihad Mohamad

As características do agregado miúdo presente na composição de argamassas, influencia significativamente nas propriedades das mesmas, podendo alterar o rendimento de aplicação e desempenho no estado endurecido. Utilizando areias padronizadas, fornecidas pelo Instituto de pesquisas tecnológicas, foram determinadas quatro composições granulométricas com diferentes módulos de finura. A utilização destas 04 composições, em um traço inicial com a proporção de 1:1:6, em volume de cimento CII-F 40, cal hidratada CH-II, areia e dois teores de aditivo incorporador de ar, com relação constante de água/materiais secos, geraram oito tipos de misturas, nas quais foram realizados ensaios para avaliação das propriedades tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, objetivando avaliar a influência da variação do módulo de finura nas propriedades. No estado fresco, o aumento do módulo de finura ocasionou o aumento no teor de ar incorporado, diminuição na retenção de água, maior índice de consistência e menor energia necessária para o espalhamento. No estado endurecido, os efeitos observados com relação à resistência à compressão e aderência foram mais influenciados pela melhor distribuição granulométrica do que pela variação do módulo de finura. As permeabilidades a água e ao vapor foram maiores nas argamassas compostas com areia de maiores módulos de finura. Os valores de retração apresentaram uma tendência de redução conforme o aumento do módulo de finura.

Palavras chave: Módulo de finura, ar incorporado, propriedades de argamassas

ABSTRACT

INFLUENCE OF FINENESS MODULE ON MORTAR PROPERTIES WITH AIR INCORPORATING ADDITIVE

Author: José Pedro Marquezan de Oliveira

Advisor: Prof. Dr. Eduardo Rizzatti

Co-Advisor: Prof. Dr. Gihad Mohamad

The characteristics of the fine aggregate that are present in mortar composition significantly influence the properties of the mortars, and may change the application yield and performance in the hardened state. Using standardized sands provided by the Institute of Technological Research, four particle size compositions were determined with each one having different fineness modules. The use of these 04 compositions, in an initial proportion with a ratio of 1:1:6 that are given by volume of CPII-F 40 cement, CH-II slaked lime, sand and two levels of air-incorporating additive, with water/dry materials constant ratio were able to generate eight types of mixtures. Each of these tests was performed to evaluate the properties in both fresh and hardened state, also aiming to evaluate the influence of the variation of the fineness module on the properties. Related to the fresh state, the increase of the fineness module caused the increase in the entrained air content, decrease in water retention, higher consistency index and lower energy needed for spreading. Related to the hardened state, the observed effects regarding to the compressive strength and adhesion were more influenced by a better particle size distribution rather than by a variation of the fineness module. Permeability attributed to water and steam was higher in mortars composed of sand with larger fineness modules. Shrinkage indicators showed a decreasing trend as the fineness module increased.

Keywords: Fineness module, entrained air, mortar properties

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da molécula de incorporador de ar.	32
Figura 2 – Adsorção da molécula do tensoativo na interface ar / líquido.	33
Figura 3 – Formação de micelas após a saturação da interface ar / líquido.	34
Figura 4 – Consistência das argamassas.	37
Figura 5 – Equipamento utilizado no ensaio squeeze flow.	59
Figura 6 – Perfil reológico característico do ensaio squeeze flow.	60
Figura 7 – Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.	62
Figura 8 – Relação tempo para medição <i>versus</i> teor de ar incorporado.	63
Figura 9 – Dispositivos para ensaio de tração na flexão e compressão.	66
Figura 10 – Formas de ruptura no ensaio de aderência à tração.	68
Figura 11 – Sequência de ensaio de aderência à tração.	68
Figura 12 – Sequência de ensaio de absorção de água por capilaridade.	71
Figura 13 – Placas para ensaio de permeabilidade a água.	72
Figura 14 – Montagem para o ensaio de permeabilidade a água.	72
Figura 15 – Moldagem das amostras para ensaio de permeabilidade ao vapor.	74
Figura 16 – Conjunto para o ensaio de permeabilidade ao vapor.	75
Figura 17 – Montagem do conjunto para ensaio de permeabilidade ao vapor.	75
Figura 18 – Dimensões dos copos do ensaio de permeabilidade a água.	76
Figura 19 – Conjuntos de permeabilidade ao vapor.	77
Figura 20 – Moldagem de corpos de prova para variação dimensional linear. ...	79
Figura 21 – Medição da variação dimensional linear.	80
Figura 22 – Posicionamento dos pinos para medição da variação dimensional nas placas.	82
Figura 23 – Equipamento para medição da variação dimensional nas placas. ...	82
Figura 24 – Equipamento para medição da variação dimensional nas placas.	83
Figura 25 – Placas para variação dimensional com pinos laterais.	84
Figura 26 – Relação módulo de finura <i>versus</i> teor de ar incorporado.	89
Figura 27 – Tabela com índice de consistência e gráfico MF <i>versus</i> índice de consistência.	90
Figura 28 – Argamassas após ensaio de índice de consistência.	91
Figura 29 – Squeeze flow– Traços com 0,1% de aditivo incorporador de ar.	92
Figura 30 – Amostras no ensaio squeeze flow – Aditivo 0,1%.	93
Figura 31 – Squeeze flow – Traços com 0,4% de aditivo incorporador de ar.	94
Figura 32 – Amostras no ensaio squeeze flow – Aditivo 0,4%.	95
Figura 33 – Resumo dos resultados Squeeze flow.	96
Figura 34 – Tabela com a retenção de água e gráfico MF <i>versus</i> retenção de água.	97
Figura 35 – Módulo de finura <i>versus</i> resistência à tração na flexão.	99
Figura 36 – Módulo de finura <i>versus</i> resistência à compressão.	99
Figura 37 – Módulo de finura <i>versus</i> aderência à tração.	102
Figura 38 – Coeficiente de capilaridade <i>versus</i> módulo de finura.	106
Figura 39 – Absorção de água – Aditivo 0,1%.	109
Figura 40 – Permeabilidade a água – Aditivo 0,4%.	110
Figura 41 – Permeabilidade ao vapor de água x tempo – Aditivo 0,1%.	112
Figura 42 – Permeabilidade ao vapor de água x tempo – Aditivo 0,4%.	113
Figura 43 – Variação da umidade na sala de condicionamento.	114
Figura 44 – Variação da temperatura na sala de condicionamento.	115

Figura 45 – Variação dimensional ao 49º dia de cura e gráfico MF versus variação dimensional.	117
Figura 46 – Variação dimensional – 0,1% de incorporador de ar.	118
Figura 47 – Variação dimensional – 0,4% de incorporador de ar.	119
Figura 48 – Variação dimensional em placa – 0,1% de incorporador de ar.	121
Figura 49 – Variação dimensional em placa – 0,4% de incorporador de ar.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais fases anidras de um cimento Portland.	24
Tabela 2 – Variação nas propriedades das argamassas com a alteração da composição relativa de cimento e cal.	26
Tabela 3 – Influência da areia nas propriedades das argamassas.	31
Tabela 4 – Métodos de avaliação da consistência e plasticidade.	38
Tabela 5 – Classes de argamassas de acordo com a retenção de água.	39
Tabela 6 – Classes de argamassas de acordo com a densidade no estado fresco.	40
Tabela 7 – Classes de argamassas de acordo com a resistência à tração na flexão.	42
Tabela 8 – Classes de argamassas de acordo com a resistência à compressão.	42
Tabela 9 – Classes de argamassas de acordo com a resistência de aderência à tração.	42
Tabela 10 – Classes de argamassas de acordo com o coeficiente de capilaridade.	44
Tabela 11 – Caracterização do cimento.	47
Tabela 12 – Caracterização da cal hidratada.	48
Tabela 13 – Distribuição granulométrica da Areia #16.	49
Tabela 14 – Distribuição granulométrica da Areia #30.	49
Tabela 15 – Distribuição granulométrica da Areia #50.	50
Tabela 16 – Distribuição granulométrica da Areia #100.	50
Tabela 17 – Limites granulométricos – Porcentagem Retida Acumulada.	51
Tabela 18 – Composição granulométricas das areias (estimativa em %).	51
Tabela 19 – Distribuição granulométrica da Areia 1.	52
Tabela 20 – Distribuição granulométrica da Areia 2.	52
Tabela 21 – Distribuição granulométrica da Areia 3.	53
Tabela 22 – Distribuição granulométrica da Areia 4.	53
Tabela 23 – Módulo de finura, massa específica, massa unitária e índice de vazios.	54
Tabela 24 – Composição inicial dos traços com areia 3.	55
Tabela 25 – Dosagem Inicial com aditivo e areia 3.	56
Tabela 26 – Nomenclatura dos traços estudados.	57
Tabela 27 – Proporções finais de materiais das misturas testadas.	57
Tabela 28 – Tempo para medição x teor de ar incorporado.	63
Tabela 29 – Densidade no estado fresco e teor de ar incorporado.	87
Tabela 30 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão e compressão.	98
Tabela 31 – Resultados dos ensaios de aderência à tração.	101
Tabela 32 – Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios	104
Tabela 33 – Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade.	105
Tabela 34 – Comparação de resultados – Coeficiente de absorção por capilaridade.	107
Tabela 35 – Resultados dos ensaios de permeabilidade à água (tempo 10 min.).	108
Tabela 36 – Comparativo de resultados – Coeficientes de absorção.	111
Tabela 37 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor.	115

Tabela 38 – Comparativo de resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor.	116
Tabela 39 – Comparativo de resultados – Variação Dimensional.	120

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	JUSTIFICATIVA	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	ARGAMASSAS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL	21
2.2	AGLOMERANTES PARA ARGAMASSAS	23
2.2.1	Cimento	23
2.2.1.1	<i>Propriedades do cimento portland</i>	25
2.2.2	<i>Cal</i>	25
2.3	AREIA PARA ARGAMASSAS	27
2.3.1	Origem das areias	28
2.3.2	Parâmetros texturais das areias	29
2.3.2.1	<i>Composição granulométrica</i>	29
2.3.2.2	<i>Módulo de finura</i>	30
2.4	ADITIVOS INCORPORADORES DE AR	31
2.3.2	Formação e estabilização das bolhas de ar	35
2.5	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	36
2.5.1	Propriedades no estado fresco	36
2.5.1.1	<i>Trabalhabilidade</i>	36
2.5.1.2	<i>Retenção de água</i>	38
2.5.1.3	<i>Densidade de massa e teor de ar incorporado</i>	40
2.5.2	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	41
2.5.2.1	<i>Resistência</i>	41
2.5.2.2	<i>Retração</i>	43
2.5.2.3	<i>Absorção capilar</i>	43
2.5.2.4	<i>Permeabilidade</i>	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	MATERIAIS	47
3.1.1	Cimento	47
3.1.2	Cal	47
3.1.3.	Aditivo Incorporador de Ar	48
3.1.4.	Areia	48
3.2	PROCEDIMENTO DE MISTURA	54
3.3	DOSAGEM DOS TRAÇOS	55
3.4	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	57
3.4.1	Determinação do índice de consistência	58
3.4.2	Squeeze flow	58
3.4.3	Determinação do teor de ar incorporado e densidade no estado fresco	60
3.4.4	Retenção de água	64
3.5	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	65
3.5.1	Resistência à tração na flexão e compressão	65
3.5.2	Resistência de aderência à tração	67
3.5.3	Absorção de água por imersão e índice de vazios	69
3.5.4	Absorção de água por capilaridade	69

3.5.5	Permeabilidade a água pelo método do cachimbo	71
3.5.6	Permeabilidade ao vapor	73
3.5.7	Variação dimensional	78
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	87
4.1	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	87
4.1.1	Densidade de massa e teor de ar incorporado	87
4.1.2	Determinação do índice de consistência	89
4.1.3	Squeeze flow	91
4.1.4	Retenção de água	97
4.2	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	98
4.2.1	Resistência à tração na flexão e à compressão	98
4.2.2	Resistência de aderência à tração	100
4.2.3	Absorção de água por imersão e índice de vazios	103
4.2.4	Absorção de água por capilaridade	104
4.2.5	Permeabilidade à água	107
4.2.6	Permeabilidade ao vapor de água	112
4.2.7	Variação dimensional	117
4.2.7.1	<i>Variação dimensional linear</i>	117
4.2.7.2	<i>Variação dimensional em placas</i>	121
5	CONCLUSÕES	123
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	124
	REFERÊNCIAS	125

1 INTRODUÇÃO

Nos sistemas de alvenaria, as argamassas de assentamento devem garantir a distribuição das cargas entre os blocos. Elas devem apresentar boas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, sendo que a sua resistência à compressão é de fundamental importância para garantir o sustento da estrutura e de suas cargas de projeto. Já as argamassas utilizadas em sistemas de revestimento apresentam grande responsabilidade, tanto no aspecto estético quanto sobre a proteção da alvenaria.

Embora se observe o largo emprego de diferentes insumos nas composições de argamassas, existem poucas definições normativas. Disso resulta um significativo empirismo nas definições, especificações e produção dos sistemas de revestimento de argamassa. Concomitantemente a estes aspectos, constata-se uma freqüente incidência de manifestações patológicas que podem ser atribuídas à falta de conhecimento no tema.

Tristão (2005) comenta que a grande variabilidade de origens, minerais formadores, fenômenos de intemperismo, desintegração e processos de produção, gera agregados de diferentes propriedades. As diferenças nas propriedades dos agregados influenciam diretamente nas propriedades das argamassas, tais como, resistência mecânica, módulo de deformação e em outras propriedades no estado endurecido (BAUER, 2005). Uma boa distribuição granulométrica, por exemplo, pode garantir resistência interna da mistura, com capacidade de suportar as tensões internas surgidas em função da variação volumétrica, quando a argamassa está em processo de secagem, sendo responsável pela resistência à fissuração advinda da retração hidráulica (SANTOS, 2014).

No Brasil, não há referência para a caracterização de agregados destinados a produção de argamassas. Para a realização de ensaios de classificação, os procedimentos são baseados na norma NBR 7211:2005, a qual especifica os agregados para a produção de concretos.

O aditivo incorporador de ar é largamente utilizado na produção de argamassas, basicamente melhorando a trabalhabilidade da argamassa fresca e reduzindo o consumo de água na produção. Este tipo de aditivo é também empregado na produção de argamassas industrializadas estabilizadas, nas quais ele é empregado juntamente com aditivos estabilizadores de hidratação. Nestas

misturas, o tipo e quantidade de aditivo empregado, bem como sua interação com o cimento escolhido, interferem diretamente nas propriedades da argamassa (ROMANO, 2013).

Dada a importância de se estabelecer relações entre desempenho e redução de custos, aliado a variada gama de materiais que podem ser empregados na produção de argamassas, este trabalho objetiva a verificação experimental da influência do módulo de finura do agregado miúdo nas propriedades, tanto no estado fresco, quanto no endurecido, de argamassas mistas com adição de aditivo incorporador de ar.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Verificar a influência do módulo de finura do agregado miúdo nas propriedades de argamassas mistas de cimento Portland, cal, areia padronizada e aditivo incorporador de ar.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar as propriedades reológicas no estado fresco, através dos ensaios de densidade, teor de ar incorporado, índice de consistência e squeeze flow;
- Avaliar as propriedades, no estado endurecido, das argamassas compostas com areias de diferentes módulo de finura, através dos ensaios de resistência à tração na flexão, compressão, aderência, absorção de água, permeabilidade à água e ao vapor e variação dimensional;
- Verificar a existência de relações entre as variações nas propriedades com as variações da composição granulométrica da areia utilizada em cada traço.

1.2 JUSTIFICATIVA

O desempenho de argamassas de revestimento nas edificações está vinculado à correta aplicação dos insumos necessários à sua produção. As

propriedades do agregado miúdo podem influenciar nas propriedades da argamassa fresca e conseqüentemente nas propriedades no estado endurecido, como a retração e a permeabilidade. O estudo da influência de cada componente do traço é importante para que sejam entendidos os efeitos que as alterações destes componentes podem gerar no desempenho das argamassas. Diante disso, este trabalho busca contribuir, avaliando os efeitos que as alterações no módulo de finura do agregado miúdo podem gerar nas propriedades de argamassas mistas de cimento, cal e areia, com adição de incorporador de ar, vista a crescente utilização deste tipo de aditivo na busca de maior produtividade de argamassas industrializadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ARGAMASSAS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

As argamassas podem ser definidas como o material de construção obtido a partir da mistura de uma pasta com um agregado miúdo, podendo ainda haver o emprego de aditivos e adições (RECENA, 2012).

Segundo De Marco (2016), as argamassas mistas são constituídas de cimento, cal e areia, as quais, quando adequadamente dosadas, apresentam a combinação das vantagens das argamassas de cal e das argamassas de cimento. A presença do cimento confere à argamassa um aumento da resistência à compressão nas idades iniciais. A cal melhora a trabalhabilidade da mistura e a retenção de água, diminuindo os efeitos de retração na argamassa. As características das argamassas mistas variam em grande amplitude dependendo da proporção entre cal e cimento Portland, estabelecida na dosagem.

A NBR 13281:2005 define as argamassas como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosadas em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada). A mesma norma, ainda tipifica as argamassas nas seguintes classes:

- Argamassas para assentamento: podem ser para alvenaria de vedação, para a ligação de componentes como blocos e tijolos, sem função estrutural, argamassas para o assentamento em alvenaria estrutural, onde os blocos devem desempenhar função estrutural e argamassas para encunhamento, as quais são indicadas para o fechamento da alvenaria de vedação, após a última fiada;
- Argamassas para revestimentos de paredes e tetos: podem ser para revestimentos internos ou externos, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única);
- Argamassas de uso geral: Indicada para o assentamento de alvenaria, sem função estrutural, e revestimento de paredes e tetos internos e externos;
- Argamassa para reboco: Indicada para o cobrimento do emboço, propiciando uma superfície para acabamento;

- Argamassas decorativas: Podem ser do tipo fina, ou em monocamada, para fins decorativos.

Referindo-se ao desempenho nas edificações, as argamassas de revestimento, consideradas como um elemento de um sistema e não isoladamente como um material, levando em consideração sua interação com o substrato e com o ambiente, é possível admitir como funções primordiais as seguintes: impermeabilizar o substrato de aplicação, garantir bom acabamento ao paramento revestido, absorver as deformações naturais a que uma estrutura está sujeita e regularizar e/ou proteger mecanicamente substratos constituídos por sistemas de impermeabilização ou isolamento termo acústicos (RECENA, 2012).

De acordo com Veiga *et al.* (2004), os revestimentos exteriores influenciam na existência de condensações dentro da parede, na estanqueidade à água e no isolamento térmico do sistema, além de protegerem a estrutura e as alvenarias, proporcionando durabilidade à obra. Os revestimentos interiores, por outro lado, precisam garantir a regularidade, o aspecto estético, o conforto higrométrico, o conforto térmico e a acústica.

Conforme Santos (2012), as características de desempenho físico e mecânico traduzem a capacidade de resposta dos revestimentos, face às funções exigidas, logo, a qualidade e o comportamento das argamassas dependem dessas características. Essas propriedades são avaliadas por meio de ensaios e requisitos preestabelecidos por normas brasileiras, internacionais ou técnicas validadas por pesquisadores. É esperado que um revestimento argamassado possua, dentre outros, boa resistência mecânica e estabilidade, seja impermeável à água e permeável ao vapor, tenha boa aparência, seja durável, contribua para o conforto térmico e acústico dos ambientes, resista a impactos, ao fogo e a variações de temperaturas (CARASEK, 2010). Para isso, as propriedades das argamassas devem ser verificadas tanto no estado fresco como no endurecido, a fim de que, quando aplicadas, cumpram suas funções.

Com relação à forma de produção, as argamassas podem ser classificadas como industrializadas, semi-industrializadas ou dosadas em obra.

As *argamassas industrializadas* são aquelas que chegam à obra necessitando apenas do acréscimo de água para serem utilizadas. São produzidas por processos industriais bem controlados, dosadas em massa e fornecidas ensacadas. Existem no

mercado argamassas industrializadas à base de cimento Portland, aditivos e adições e outras que também utilizam cal na sua composição. O agregado empregado tanto pode ser uma areia natural como uma areia artificial obtida de operações de britagem de rochas (RECENA, 2012).

As argamassas industrializadas também podem ser do tipo estabilizada, a qual é dosada em centrais e apresenta capacidade de se manter trabalhável por períodos de até 72 horas. Este tipo de argamassa faz o uso de dois tipos de aditivos: aditivo estabilizador de hidratação, o qual é responsável pelo aumento de tempo em que a argamassa permanece trabalhável e aditivo incorporador de ar, responsável pela melhora na trabalhabilidade da argamassa no estado fresco. O uso destes aditivos, segundo Romano (2013), geram um lado negativo, como por exemplo, o uso de incorporadores de ar, que pode gerar maior porosidade na argamassa, deixando-a mais suscetível à ação da umidade e de agentes agressivos. Já os estabilizadores de hidratação, segundo Neville (2013), podem aumentar a retração plástica e a exsudação de água.

As *argamassas semi-industrializadas* misturas feitas a partir de cal e areia, e são denominadas intermediárias ou brancas. Estas misturas são comercializadas para posterior composição com cimento Portland na obtenção das argamassas finais (RECENA, 2012)

As argamassas dosadas em obras levam este nome por serem preparadas no próprio canteiro de obra, sendo compostas por materiais aglomerantes, agregados e água, podendo ou não ser aditivadas (RECENA, 2012).

2.2 AGLOMERANTES PARA ARGAMASSAS

2.2.1 Cimento

A NBR NM 02:2000 define Cimento Portland como um cimento hidráulico produzido pela moagem de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidratados e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio. Trata-se de um pó finamente moído (material pulverulento) com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água e depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, não se decompõe.

O cimento Portland é um produto multifásico, obtido a partir de argila e calcário (clínquer), composto pelas principais fases anidras, conforme Tabela 1 (NEVILLE, 1997). O cimento Portland é o principal composto das argamassas, promovendo a união entre os grãos do agregado, devido às suas propriedades aglomerantes (adesivas e coesivas). Além disso, o cimento também controla a resistência, a permeabilidade e a durabilidade da mistura (BAUER, 1995).

Tabela 1 – Principais fases anidras de um cimento Portland.

Composto	Composição	Nomenclatura
Silicato tricálcico (alita)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcio (belita)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de Neville (1997).

O termo hidratação, na química do cimento, refere-se à transformação que ocorre na mistura de um cimento anidro, ou algum de seus constituintes, com a água. Reações químicas se processam em diferentes taxas entre os minerais do clínquer, as diferentes formas de sulfato de cálcio, a cal livre, os álcalis e a água, elementos estes, que exercem influência um sobre o outro. Os produtos gerados nesta reação provocam mudanças físico-mecânicas no sistema, as quais implicarão na pega e endurecimento do mesmo (TAYLOR, 1990).

O tipo e a composição do cimento podem influenciar, dentre outras propriedades, na retração. Os valores de retração livre de argamassas são maiores para as misturas dosadas com os cimentos CP IV e CP V ARI RS, do que para os cimentos CP II e CP II F, de acordo com os estudos de Bolorino e Cincotto (1997 *apud* SALVADOR, 2005). Os autores observaram que painéis revestidos com argamassas de cimento CP V ARI RS apresentaram maiores índices de fissuras do que os painéis revestidos com argamassas de cimento CPIII, fenômeno justificado devido a velocidade de hidratação acelerada e conseqüente maior retração inicial.

2.2.1.1 Propriedades do cimento Portland

A *densidade aparente* é muito utilizada para calcular o consumo de cimento nas misturas dosadas com base no volume dos materiais. A NBR 16605:2017 descreve o processo de obtenção da massa específica a ser empregada no cálculo de dosagens de concretos e argamassas

O *tempo de pega* do cimento é o momento em que a pasta de cimento responsável pela aglutinação dos agregados, tanto nas argamassas quanto nos concretos, adquire consistência tornando-a inadequada para um trabalho. Trata-se do início das reações de hidratação (BAUER, 2000). Esta propriedade é avaliada segundo o procedimento descrito na NBR 16607:2018.

2.2.2 Cal

De acordo com Recena (2012), a capacidade de aglomeração da cal decorre do contato da pasta de cal (cal e água) com o ar, ou mais precisamente, com o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar, uma das características que permite classificá-la como um aglomerante aéreo. A estrutura original formada fundamental e preferencialmente pelo hidróxido de cálcio, mas também pelo hidróxido de magnésio é alterada por sua carbonatação, dotando a mistura, após a secagem, de resistência mecânica e estabilidade química. Além desse mecanismo de endurecimento citado, poderá haver ainda o aparecimento de produtos aglomerantes formados, oriundos da reação da cal com a sílica presente nos agregados ou em pozolanas intencionalmente incorporadas à mistura.

A Tabela 2 apresenta um resumo da variação nas propriedades das argamassas com a variação do teor de cal. Observa-se, por exemplo, que as propriedades de trabalhabilidade, plasticidade e retenção de água são positivamente influenciadas com o aumento relativo da quantidade de cal, bem como, a capacidade da argamassa absorver deformações.

Tabela 2 – Variação nas propriedades das argamassas com a alteração da composição relativa de cimento e cal

Propriedade	Aumento da proporção de cal
Resistência à tração	Decresce
Resistência à compressão	Decresce
Capacidade de aderência	Decresce
Durabilidade	Decresce
Impermeabilidade	Decresce
Resistência à altas temperaturas	Decresce
Resistências iniciais	Decresce
Retração na secagem inicial	Cresce
Retenção de água	Cresce
Plasticidade	Cresce
Trabalhabilidade	Cresce
Resiliência	Cresce
Módulo de elasticidade	Decresce
Retração na secagem reversível	Decresce
Custo	Decresce

Fonte: Adaptado de Tristão (1995).

A influência da cal sobre a consistência e a trabalhabilidade da argamassa é proveniente do estado de coesão interna que a cal proporciona, em função da diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão do agregado. Como as partículas da cal possuem elevada superfície específica e elevada capacidade de adsorção de água, as argamassas mistas são caracterizadas pela grande retenção de água (SALVADOR, 2005).

Como a cal aumenta a plasticidade da argamassa e este aumento tem influência direta na capacidade de espalhamento da argamassa sobre uma superfície, deduz-se que a cal melhora a extensão de aderência das argamassas. Esta extensão resulta na durabilidade adequada do revestimento. Também se verifica que as argamassas contendo cal ficam menos sujeitas ao fissuramento, devido ao aumento da capacidade de deformação (TRISTÃO, 2005). De acordo com Mosquera *et al.* (2002 *apud* SALVADOR, 2005), concluíram que as argamassas contendo cal apresentam maior deformação na ruptura que as demais, a partir de

um estudo comparativo entre argamassas comerciais diversas, com uma argamassa mista com traço 1:1:6, em volume de cimento, cal hidratada e areia).

A massa unitária é um parâmetro de qualidade da cal hidratada, pois uma cal com massa unitária elevada (superior a $0,70\text{kg/dm}^3$), denota a presença de materiais inertes que reduzem seu poder aglomerante (SILVA *et al.*, 2002).

2.3 AREIA PARA ARGAMASSAS

De acordo com Tristão (1995), são atribuídas à areia as funções de redução dos custos e também a de conferir às argamassas propriedades que a pasta não possui. A adição de agregado miúdo à pasta barateia o produto, pois diminui o consumo de cimento e cal. Além disso, reduz os movimentos de retração da argamassa.

O agregado também é responsável por garantir certa resistência interna da mistura, com capacidade de suportar as tensões surgidas em função da variação volumétrica, quando a argamassa está em processo de secagem. Dessa forma, a areia é parcialmente responsável pela resistência à fissuração advinda da retração hidráulica (CARASEK, 2007).

De acordo com Carasek (2007), a trabalhabilidade pode ser alterada de forma positiva, na medida em que decresce o módulo de finura do agregado, mantém-se a continuidade da granulometria e decresce o teor de grãos angulosos. O índice de vazios da areia e a área específica dos grãos são características que se relacionam diretamente com consumo de aglomerantes e água de amassamento.

A influência da areia sobre a retração das argamassas é marcante na medida em que a granulometria do agregado define o volume de vazios, o qual determina o volume de pasta necessário. A areia evita em parte as variações volumétricas, sendo aconselhável que a mesma possua uma granulometria contínua e com menor superfície específica.

A granulometria dos agregados para argamassas deve ser contínua, para obtenção de uma melhor trabalhabilidade, redução do volume de pasta e dos efeitos de retração por secagem e menor consumo de água nas argamassas (SALVADOR, 2005). Carneiro (1999) comprovou que as argamassas dosadas com areias de distribuições granulométricas contínuas, apresentam melhores características, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. A distribuição contínua resulta em

maior compacidade das argamassas, reduzindo o consumo de água de amassamento.

Haddad *et al.* (2016), concluíram que uma argamassa com menor módulo de finura, devido à maior superfície específica do agregado, necessita de uma maior demanda de água de amassamento, de forma a envolver todos os grãos e melhorar a consistência. Ao analisar a argamassa dosada com agregado de maior módulo de finura, os autores concluíram que os agregados com maior diâmetro, por possuírem menor superfície específica, demandaram uma quantidade menor de água para amassamento. A distribuição granulométrica descontínua também reduziu o atrito dos grãos do agregado, aumentando o valor de consistência. Neste caso, o aumento do módulo de finura, em argamassas dosadas com o mesmo teor de água, evidenciou o aumento do índice de consistência.

2.3.1 Origem das areias

Segundo Tristão (2005), a grande variabilidade das areias se deve às suas diferentes origens, tanto dos minerais formadores quanto dos fenômenos de intemperismo e desintegração, seguida de erosão dos materiais.

As principais classificações dos agregados são quanto à dimensão dos grãos, massa específica e produção. Quanto às dimensões são classificados em graúdos e miúdos, sendo o agregado miúdo definido como areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira de abertura 4,8 mm e ficam retidos na peneira de abertura 0,075 mm. Em função da massa específica (ME), as areias podem ser classificadas como:

- Leves – $ME \leq 2000 \text{ kg/m}^3$;
- Normais – $2000 < ME \leq 3000 \text{ kg/m}^3$;
- Pesadas – $ME > 3000 \text{ kg/m}^3$.

No que tange à produção, as areias podem ser naturais ou artificiais, sendo mais utilizadas as areias naturais provenientes dos leitos de rios, areia de cava ou de barranco e as areias eólicas. Dentre as areias naturais, a areia de leito de rio é a mais utilizada no país, enquanto que a areia artificial mais utilizada é a areia de britagem, também chamada de areia industrial. Geralmente, as areias naturais

tendem a ser arredondadas, ao passo que as areias industrializadas tendem a ser angulosas, mas que, algumas areias industrializadas ou britadas podem ser um pouco arredondadas ao invés de completamente angulares.

2.3.2 Parâmetros texturais das areias

Os parâmetros texturais dos grãos isolados das areias são o tamanho, a forma representada pelo arredondamento e esfericidade, a textura superficial e a composição mineralógica. Os tamanhos são normalmente expressos em termos de composição granulométrica obtida em ensaio de peneiramento, de acordo com os procedimentos da NBR NM 248:2003. Para expressar o arredondamento e a esfericidade dos grãos, existem vários métodos, uns por comparação visual com imagens de padrões definidos e outros métodos que quantificam estes coeficientes.

2.3.2.1 Composição granulométrica

Carneiro (1999) salienta a importância da distribuição granulométrica das areias, tanto para concreto quanto para argamassas, por isso os trabalhos estão sempre avaliando a variação da compactidade da mistura ou, em outras palavras, do índice de vazios da areia, com a distribuição granulométrica.

No método de ensaio NBR NM 248:2003, que determina a composição granulométrica de agregados para concreto para classificar as areias, as peneiras usadas são: 4,75 mm (nº 4), 2,36 mm (nº 8), 1,18 mm (nº 16), 600 µm (nº 30), 300 µm (nº 50), 150 µm (nº 100). Nesta série de peneiras, a relação entre a abertura de malhas é de 2, mas outras séries também são usadas na determinação da composição granulométrica.

Tristão (2005) cita que a determinação da composição granulométrica por peneiramento comumente apresenta os resultados como uma porcentagem em massa dos grãos retidos ou passando na peneira e enfatiza que é comum referir-se ao tamanho dos grãos através de diâmetros, mas que esta representação é relativa, visto que os grãos não são esféricos. Os materiais naturais raramente são sólidos regulares, e por isto a granulometria de uma partícula de forma irregular é mais bem expressa pelo valor de seu volume, pois o volume é independente da forma.

A granulometria da areia, segundo Carasek (2007) e Santos (2014), determina o volume de vazios que deverá ser preenchido pela pasta aglomerante, de forma que um aumento da pasta potencializa a ocorrência de retração da argamassa. A distribuição granulométrica das areias influencia a retração e conduz às classificações contínua, descontínua e uniforme:

- **Contínua:** Apresenta partículas de todos os diâmetros intermediários desde um valor mínimo até um valor máximo. A curva contínua é dita bem graduada quando as frações menores preenchem os espaços existentes entre as frações maiores, de forma a propiciar o menor volume de vazios possível, situação em que além de bem graduada, ela é dita densa ou fechada. A graduação é dita aberta quando não há quantidade suficiente de finos para preencher todos os vazios;
- **Descontínua:** quando falta alguma fração intermediária, cuja representação gráfica se dá através do patamar horizontal;
- **Uniforme:** quando a maioria das partículas pertence a somente uma fração granulométrica.

2.3.2.2 Módulo de finura

A NBR NM 248:2003, através do ensaio de composição granulométrica expresso em porcentagem retida e acumulada em cada peneira, determina como obter a dimensão máxima característica e o módulo de finura do agregado. A dimensão máxima característica é a abertura nominal (em mm) da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5% de massa. O módulo de finura é calculado como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Portanto, quanto mais grosso for o agregado, maior será o seu módulo de finura.

Na determinação do módulo de finura das areias, o cálculo é realizado até os grãos de diâmetro 0,150 mm, porque para diâmetros abaixo deste valor obter-se-ia valores negativos para o módulo de finura. Além disso, nas argamassas, o agregado miúdo concorre em maior proporção na mistura total dos materiais que no concreto, evidenciando que, como o teor de material abaixo da peneira 0,150 mm na argamassa seja maior do que para o concreto, o comportamento das argamassas em relação ao módulo de finura não seja o mesmo observado para concretos.

O módulo de finura, segundo Bauer (2005), influencia as propriedades da argamassa. Sabbatini (1998) apresenta uma sinopse qualitativa da influência dos parâmetros granulométricos nas principais propriedades das argamassas, conforme a Tabela 3. O termo “variável” é aplicável quando não existe uma influência definitiva ou quando essa influência depende de outros fatores.

Tabela 3 – Influência da areia nas propriedades das argamassas.

Propriedades	Características da areia		
	Quanto menor o Módulo de Finura	Maior descontinuidade da granulometria	Maior teor de grãos angulosos
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	Variável	Melhor
Resiliência	Variável	Pior	Pior
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistência Mecânica	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	Pior	Variável

Fonte: Adaptado de SABBATINI (1998).

Sabbatini (1998) também afirma que, em linhas gerais, a areia que apresenta melhor potencial de produzir uma argamassa adequada é a que tem granulometria contínua e classificada como média (módulo de finura entre 1,8 e 2,8) e com predominância de grãos arredondados.

2.4 ADITIVOS INCORPORADORES DE AR

Os aditivos incorporadores de ar são materiais orgânicos, geralmente empregados em forma de solução, usados intencionalmente para introduzir, em argamassas e concreto, um sistema de bolhas de ar microscópico que seja estável e uniforme.

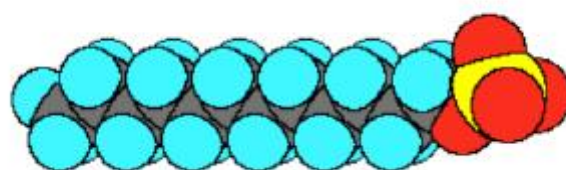
O ar incorporado é diferente do ar aprisionado, isto é, aquele gerado por inadequado adensamento ou compactação, que se encontra na forma de cavidades irregulares, com dimensões consideráveis, em argamassas e concretos (RIXON e MAILVAGANAN, 1999). Segundo Santos (2009), o ar incorporado é constituído por

bolhas discretas, quase esféricas, as quais não formam canais por onde o fluido possa escoar, de forma com que, não aumentam a permeabilidade do material poroso. No entanto, para Romano (2013), mesmo melhorando algumas propriedades elásticas, térmicas e acústicas, a incorporação de ar reduz a resistência mecânica e aumenta a permeabilidade das argamassas.

A melhora na trabalhabilidade das misturas é efeito principal do aditivo incorporador de ar quando utilizado em concretos e argamassas. Conforme Mehta (2008), o aditivo torna as partículas de cimento hidrofóbicas, logo, uma dosagem muito elevada pode causar um retardamento excessivo na hidratação do cimento, promovendo, além do incremento de ar, uma redução da resistência à compressão. A ação sobre a trabalhabilidade da argamassa é proporcionada por um efeito de rolamento de esferas. As pequenas bolhas esféricas funcionam como um agregado fino de baixo atrito e elasticidade considerável, aparentando como se a mistura tivesse excesso de agregado miúdo fino. Desta forma, pode-se reduzir a quantidade de areia durante as dosagens. Além disso, a mistura também se torna mais coesiva devido a nova tensão superficial das bolhas, que agem com a pasta de cimento. O manuseio da massa é facilitado pela grande quantidade de bolhas deformáveis, melhorando, assim, também a aplicação e o acabamento da argamassa (PAILLERE, 2011).

Os agentes incorporadores de ar são espécies químicas pertencentes à classe dos tensoativos, sendo fortemente adsorvidos nas interfaces ar/líquido ou sólido/líquido (RAMACHANDRAN, 1984). Apresentam na mesma molécula uma extremidade hidrofóbica (apolar) e uma extremidade hidrofílica (polar), sendo conhecidos como compostos anfifílicos (SALAGER, 1992). A Figura 1 ilustra a forma mais comum de representação desses aditivos.

Figura 1 – Representação da molécula de incorporador de ar.



Cauda Hidrofóbica

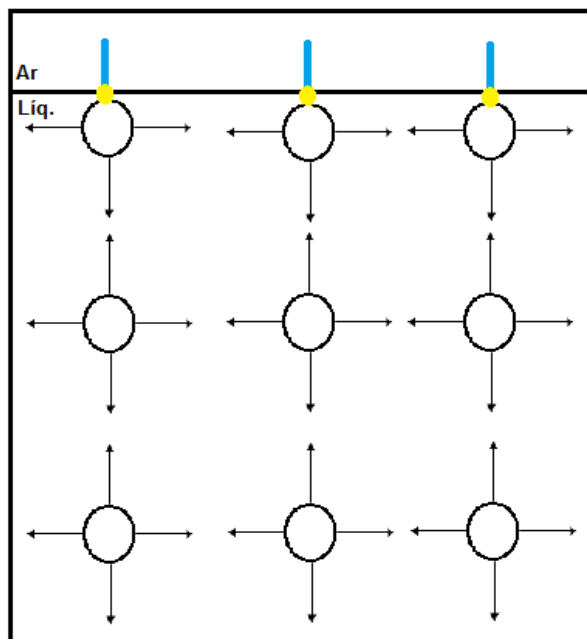
Cabeça Hidrofílica

A cauda geralmente é formada por uma cadeia relativamente longa de hidrocarboneto, com aproximadamente 8 ou 10 carbonos, necessários para que o tensoativo tenha uma influência significativa na tensão superficial (ALVES, 2002). Já a extremidade polar pode ser iônica (catiônica ou aniônica), não-iônica ou anfótera (ROMANO, 2011).

Assim, os incorporadores de ar demonstram forte tendência de migrar para interfaces, de maneira com que o seu grupo polar fique em contato com a fase líquida e seu grupo apolar fique orientado para o ar, solvente orgânico ou partícula (SALAGER, 2002).

Desta forma, a molécula satisfaz à sua dupla natureza, provocando, assim, forte adsorção em interfaces, atuando na redução da tensão superficial, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Adsorção da molécula do tensoativo na interface ar / líquido.



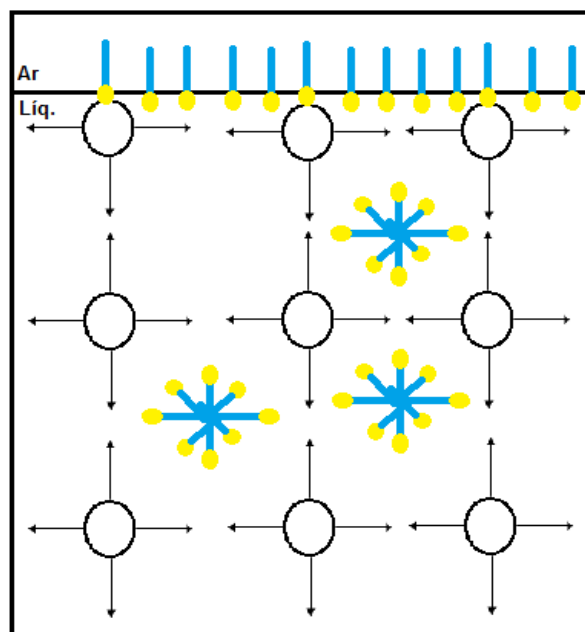
Fonte: Adaptado de Alves (2002).

A energia livre de uma molécula de incorporador de ar na superfície ou interface é inferior à energia da molécula solubilizada no interior da fase aquosa. Desta forma, a transferência do interior do meio líquido para a superfície (adsorção) ocorre de forma espontânea, alterando o ângulo de contato da gota (ROMANO, 2011).

Esta adsorção na superfície (líquido-ar) ou interface (líquido-líquido ou líquido-sólido) reduz a tensão superficial ou interfacial, a qual é responsável pela curvatura das interfaces, pela formação de gotas, pela instabilidade capilar e por inúmeros fenômenos de estabilização de interfaces (SALAGER, 1992).

Segundo Alves (2002), com o aumento da concentração total de tensoativo dissolvido em uma solução, a tensão superficial irá diminuir. Isso ocorre até que seja atingida uma acomodação máxima desse material na superfície. A partir desse momento, inicia-se uma aglomeração entre as moléculas na solução, formando estruturas chamadas micelas (Figura 3). Denomina-se concentração micelar crítica (CMC) a concentração a partir da qual inicia-se a formação de micelas, momento em que ocorre uma mudança brusca na tensão superficial ou em outra propriedade física da solução (condutividade, viscosidade, etc).

Figura 3 – Formação de micelas após a saturação da interface ar / líquido.



Fonte: Adaptado de Alves (2002).

As concentrações dos tensoativos usados como incorporadores de ar em concretos possuem, usualmente, um valor abaixo da concentração micelar crítica. A maioria dos detergentes funcionam como incorporadores de ar em concreto e/ou argamassas, porém, nem todos com a mesma eficiência (ALVES, 2002). Além disso,

as propriedades do sistema com ar incorporado dependem da natureza do tensoativo aplicado (RAMACHADRAN, 1984 *apud* ALVES, 2002). As substâncias químicas utilizadas para incorporação de ar se assemelham à muitas das que plastificam o cimento por adsorção, diferindo simplesmente pelo comprimento da parte hidrófoba da molécula, a qual, para produzir ar, necessita ser bastante comprida (COUTINHO, 1997 *apud* ALVES, 2002).

2.3.2 Formação e estabilização das bolhas de ar

Quando uma mistura é agitada, independente de possuir ou não aditivo incorporador de ar, o ar que está na superfície é trazido para dentro do líquido. Assim, devido a tensão superficial, é formada uma película entre a água e o ar, gerando as bolhas no interior do líquido. Quando a agitação é interrompida, as bolhas começam a colapsar rapidamente, buscando um estado de menor energia. Esta taxa de colapso das bolhas irá depender da viscosidade do meio líquido (quanto maior a viscosidade mais lenta a colapsoação); da temperatura, da presença de íons e da utilização de aditivos incorporadores de ar (ROMANO, 2011).

Ocorre que, conforme Romano (2013), as espumas instáveis, formadas sem o uso de aditivos, e as espumas estáveis, com o uso de aditivos, possuem as mesmas etapas. São diferenciadas pelo fato das estáveis possuírem uma taxa mais lenta de colapso, uma vez que a espécie química presente mantém a película superficial estabilizada por mais tempo.

Os aditivos incorporadores de ar são, segundo Rixon e Mailvaganam (1999), em sua maioria, tensoativos aniônicos que, quando adicionados às pastas de cimento dão um caráter hidrófobo às partículas do mesmo, uma vez que, tendem a se adsorver nestas partículas sólidas da pasta por meio de sua cabeça, parte polar, ficando com a cauda, que é a parte apolar, voltada para a fase aquosa. Os tensoativos que não foram adsorvidos e estão livres na fase aquosa formarão efetivamente as bolhas de ar. Assim, com a agitação da mistura, bolhas estáveis de ar se formarão devido à aglutinação das partes apolares dos tensoativos, mesmo que a quantidade de tensoativos livres não seja alta, apresentando um aspecto de esferas microscópicas (ROMANO, 2013). Ocorre, então, uma mudança na tensão superficial do líquido, promovendo maior capacidade de molhamento e espumante para a solução. Conforme Romano (2011), as bolhas de ar geradas sem utilização de aditivo para tal são instáveis e de colapso instantâneo. Alguns tensoativos que

foram adsorvidos ao cimento também podem participar da produção de bolhas, segundo Alves (2002). Quando isto acontece dá-se a chamada ligação “efeito ponte” a qual aumenta a estruturação do sistema, obtendo-se maior viscosidade das pastas do que quando não possuem ar incorporado.

As micelas agrupam dezenas ou centenas de moléculas do aditivo incorporador de ar em meio aquoso. Sua dimensão e geometria estão vinculadas à estrutura do aditivo e ao ambiente físico-químico. São compostas internamente de ar, ficando a parte apolar das moléculas orientadas para seu interior e a parte polar orientada para a superfície do líquido, assim, afetando a tensão superficial e a capacidade espumante dos aditivos (ROMANO, 2011).

Segundo Alves (2002), a estabilidade do ar produzido ocorre através de um filme que se forma na interface ar / líquido, pelas moléculas adsorvidas, onde a “cabeça” dos tensoativos fica orientada na fase aquosa. Estando as moléculas carregadas, as bolhas adquirem esta carga na superfície, de forma com que, quando duas bolhas se aproximam durante a mistura, ocorre uma repulsão eletrostática, a qual as mantém afastadas, evitando a coalescência e aumentando a estabilidade.

Segundo Mielenz (1968), a estabilidade do ar está atrelada também ao aprisionamento de grande parte das bolhas pelos agregados. As bolhas maiores são menos estáveis por possuírem maior força ascensional, o que orienta a subida para a superfície onde podem ser perdidas. Assim, procura-se evitar que pequenas bolhas se unam e formando bolhas maiores (ALVES, 2002).

2.5 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

As propriedades das argamassas no estado fresco influem diretamente no rendimento de aplicação da mesma, além de que, o comportamento da argamassa neste estado, apresenta correlações com características que serão verificadas no estado endurecido, interferindo no desempenho das funções de cada tipo de argamassa ao longo da sua vida útil.

2.5.1 Propriedades no estado fresco

2.5.1.1 *Trabalhabilidade*

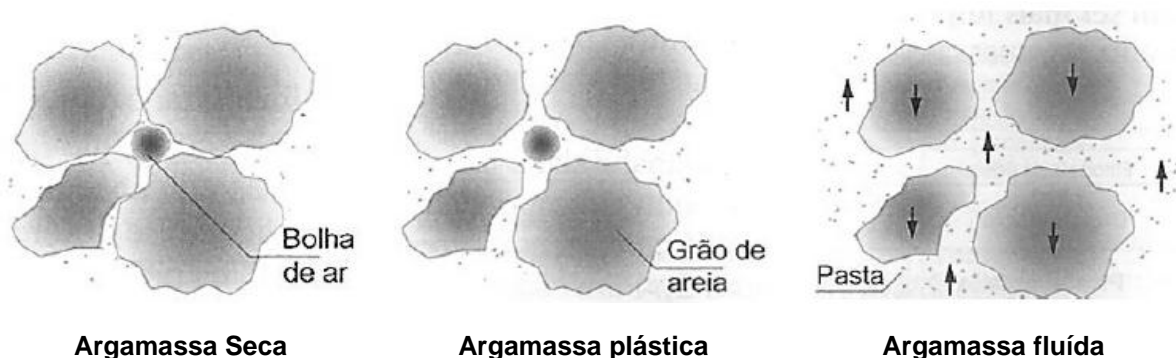
A trabalhabilidade de uma argamassa é um conceito subjetivo que deve ser entendido como a maior ou menor facilidade de dispor a argamassa em sua posição

final, cumprindo adequadamente sua finalidade, sem comprometer o bom andamento da tarefa em termos de rendimento e custo (RECENA, 2012).

Segundo Santos (2008), para a verificação de uma argamassa quanto à sua trabalhabilidade, deve-se observar os seguintes itens: que a penetração da colher de pedreiro seja fácil, sem ser fluída; que ao ser transportada a massa fique coesa, porém, sem aderir à colher ao ser lançada; que a distribuição da massa seja fácil e preencha todas as reentrâncias da base e que a massa não endureça rapidamente quando aplicada. Logo, trata-se de uma análise visual e qualitativa, resultante da junção de várias propriedades tais como: consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, exsudação, densidade de massa e adesão inicial (CARASEK, 2007).

Uma argamassa é dita seca quando aglomerante preenche o espaço existente entre os agregados, mas ainda permite o atrito entre eles, característico de uma massa áspera. O termo argamassa plástica, ocorre quando há uma fina camada de pasta aglomerante envolvendo a superfície dos agregados, conferindo boa adesão entre eles e possuindo uma estrutura pseudo-sólida. A argamassa fluída ocorre quando não há coesão interna, os agregados estão no interior a pasta aglomerante e possuem tendência à segregação. Os agregados não possuem nenhuma resistência ao deslizamento e a argamassa é tão líquida que não permite a execução do trabalho, pois se espalha (HADDAD, 2015). A Figura 4 esquematiza a classificação quanto à consistência das argamassas.

Figura 4 – Consistência das argamassas



Fonte: Adaptado de Haddad (2015).

A plasticidade é a propriedade que permite à argamassa deformar-se sem ruptura, quando submetida à ação de forças superiores às que promovem a sua estabilidade, mantendo a deformação após a retirada do esforço (CARASEK, 2007).

Na Tabela 4 são apresentados alguns métodos utilizados para a avaliação das argamassas quanto à consistência e plasticidade, bem como, os parâmetros reológicos que controlam os fenômenos.

Tabela 4 – Métodos de avaliação da consistência e plasticidade.

Método	Norma	Propriedade avaliada	Parâmetro reológico
Mesa de Consistência (flowtable)	NBR 7215:2019 NBR 13276:2005	Consistência e plasticidade	Viscosidade
Penetração do cone	ASTM C 780	Consistência	Tensão de Escoamento
Vane Teste	BS 1377 ASTM D 4648	Consistência	Tensão de Escoamento
Gtec teste	-	Consistência, plasticidade e coesão	Tensão de Escoamento e viscosidade

Fonte: Adaptado de Carasek (2007).

De acordo com Campos (2012), o tipo e quantidade de aglomerantes e agregados, bem como o tempo e intensidade da mistura e, ainda, o uso de aditivos, especialmente incorporadores de ar, influenciam na plasticidade, na consistência e na coesão da argamassa.

Segundo Cincotto (2013) *apud* Haddad (2015), a coesão é a tendência de adesão entre as partículas em função da força de atração existente entre elas. É oriunda das forças capilares e intermoleculares das argamassas. Os ensaios de escoamento sob compressão, *Squeeze Flow*, *Pull-off* e *Flow Test* são utilizadas para avaliação dessa propriedade.

2.5.1.2 Retenção de água

Segundo Recena (2012), a retenção de água é a capacidade de uma argamassa de liberar demoradamente a água empregada na sua preparação para o meio ambiente ou para substratos porosos, sendo uma característica verificada na

argamassa após a mistura, representando o comportamento inicial da argamassa durante o processo de endurecimento (CARASEK, 2007).

Flores-Colen (2009), sugere que uma menor capacidade de retenção de água aumenta o potencial de retração na secagem e diminui a resistência de aderência. A capacidade das argamassas em reter água é também de muita importância na garantia da aderência aos substratos, evitando o deslocamento de porções de argamassa empregadas em revestimentos de paredes e garantindo a homogeneidade das alvenarias pela manutenção da união dos vários elementos que a compõem na formação de um todo compacto (RECENA, 2012).

No caso de argamassas de revestimento, ao perder água muito rapidamente para o substrato, poderá faltar água para a adequada ligação dos elementos, pois parte dos aglomerantes foram dissipados juntamente com a água perdida, sendo necessário que haja uma adequada retenção de água para que as reações de hidratação possam ocorrer apropriadamente (CARASEK, 2007).

Tristão (1995) indica que a retenção de água nas argamassas de revestimento interfere no tempo disponível de aplicação, regularização e desempenho da argamassa. Esta propriedade também influi em algumas propriedades do estado endurecido, pois afeta as condições de hidratação do cimento e a carbonatação da cal, que são os responsáveis pela evolução do endurecimento da argamassa.

A NBR 13281:2005 classifica as argamassas de acordo com os valores obtidos, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Classes de argamassas de acordo com a retenção de água.

Classe	Retenção de água (%)
U1	≤ 78
U2	72 a 85
U3	80 a 90
U4	86 a 94
U5	91 a 97
U6	95 a 100

2.5.1.3 Densidade de massa e teor de ar incorporado

A densidade de massa da argamassa é um indicativo da compacidade resultante da proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto. (FREITAS, 2010). A NBR 13281:2005, classifica as argamassas, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 – Classes de argamassas de acordo com a densidade no estado fresco.

Classe	Densidade de massa no estado fresco (kg/m³)
D1	≤ 1400
D2	1200 a 1600
D3	1400 a 1800
D4	1600 a 2000
D5	1800 a 2200
D6	> 2000

Fonte: NBR 13281:2005.

O teor de ar incorporado é a relação da quantidade de ar existente em certo volume, isto é, a soma do ar aprisionado e do ar incorporado (SABBATINI e BAÍA, 2008 *apud* HADDAD, 2015). Essa propriedade pode ser determinada segundo a NBR 13278:2005.

O teor de ar incorporado influencia diretamente a trabalhabilidade e pode impactar nos valores de resistência mecânica das argamassas, contudo, pode beneficiar a sua deformabilidade. Além disso, esta propriedade contribui para o impedimento da passagem de água para o interior pelo fenômeno da capilaridade, pois as bolhas de ar incorporado podem interromper parte dos poros capilares das argamassas (FREITAS, 2010 *apud* HADDAD, 2015).

Segundo Beningfield (1988), se as argamassas receberem teores de ar incorporado entre 20 e 25% torna-se perceptível uma redução em suas resistências. Entre percentuais de 15 e 20%, para a maioria do tipo de ar incorporado, pode haver uma pequena redução das propriedades no estado endurecido, sendo assim, recomenda-se um máximo de 20% para o teor de ar incorporado.

2.5.2 Propriedades no estado endurecido

2.5.2.1 Resistência

A *resistência à compressão* é usualmente definida como a propriedade das argamassas de suportarem as ações de diferentes naturezas como as oriundas da abrasão superficial, do impacto e de movimentação higroscópica e/ou estrutural (HADDAD, 2015).

A *resistência de aderência* é a capacidade do revestimento em resistir às tensões normais e tangenciais que surgem à interface argamassa/substrato. Em outras palavras, é a capacidade do revestimento manter-se estável, sem fissuração e fixo ao substrato (ALVES, 2002).

Carasek (1996), afirma que é praticamente um consenso entre os autores que a aderência é essencialmente mecânica, em razão da penetração da pasta aglomerante ou da argamassa nos poros ou rugosidades do substrato. Candia (2000 *apud* Arnold, 2011) justifica que quando a argamassa, no estado fresco, entra em contato com a superfície absorvente (substrato), parte da água de amassamento penetra pelos poros e cavidades do substrato. Ali ocorrem os fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação, que irão exercer ação de ancoragem da argamassa à base.

Em argamassas para revestimento, o aumento da resistência mecânica torna os elementos muito rígidos e impede a deformação da estrutura promovendo a fissuração (SANTOS, 2014).

As Tabelas 7, 8 e 9, da NBR 13281:2005, classificam as argamassas de acordo com os valores de resistência à tração na flexão, compressão e aderência.

Tabela 7 – Classes de argamassas de acordo com a resistência à tração na flexão.

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)
R1	$\leq 1,5$
R2	1,0 a 2,0
R3	1,5 a 2,7
R4	2,0 a 3,5
R5	2,7 a 4,5
R6	$> 3,5$

Fonte: NBR 13281:2005.

Tabela 8 – Classes de argamassas de acordo com a resistência à compressão.

Classe	Resistência à compressão (MPa)
P1	$\leq 2,0$
P2	1,5 a 3,0
P3	2,5 a 4,5
P4	4,0 a 6,5
P5	5,5 a 9,0
P6	$> 8,0$

Fonte: NBR 13281:2005.

Tabela 9 – Classes de argamassas de acordo com a resistência de aderência à tração.

Classe	Resistência de aderência à tração (MPa)
A1	$< 0,20$
A2	$\geq 0,20$
A3	$\geq 0,30$

Fonte: NBR 13281:2005.

2.5.2.2 Retração

A retração é a consequência da redução volumétrica da pasta aglomerante, em função da perda de água, causando surgimento de tensões internas e consequente fissuração. Ela é responsável por efeitos deletérios à argamassa, pois causa fissuração e compromete a estanqueidade, o desempenho e a durabilidade das argamassas no estado endurecido (CARASEK, 2007).

A retração é influenciada pela granulometria, pois uma areia com granulometria contínua apresentará menor volume de vazios e, conseqüentemente, menos pasta de cimento para preencher os vazios e menos retração. Desta forma, argamassas muito ricas estarão mais sujeitas à retração (CARASEK, 2007).

Argamassas com grande teor de finos possuem grande superfície específica, requerendo grande quantidade de água de amassamento, o que causa muita retração acompanhada de fissuração (SANTOS, 2014).

Segundo Fiorito (2009 *apud* HADDAD, 2015), as argamassas perdem 80 a 90% de água evaporável aos sete dias, com permanência de 1% a 2% de umidade natural e a retração por secagem, aos vinte e oito dias, varia de 50% a 60% da retração total.

2.5.2.3 Absorção capilar

Segundo Mehta e Monteiro (2008 *apud* JANTSCH, 2015), os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratada. Esses vazios representam uma rede de caminhos interligados distribuídos aleatoriamente dentro do material, permitindo que qualquer elemento que penetre por esses vazios se espalhe rapidamente pela rede de capilares.

Quanto ao processo de entrada de água pelos poros capilares de um material, Crauss (2010) indica que este depende de algumas propriedades do próprio líquido, como viscosidade, densidade e tensão superficial, bem como de características do material absorvente, como sua estrutura porosa. Para conseguir criar uma descontinuidade na rede capilar, Neville (1997) recomenda que seja feito um bom proporcionamento da relação água/cimento e uma cura úmida prolongada.

Em traços de argamassas com mesma relação agregado/aglomerante, o aumento da relação cal/cimento, provocará também o aumento do coeficiente de

capilaridade, devido à diminuição do raio dos capilares, uma vez que haverá o incremento do teor de material fino, o qual é responsável pela redução do diâmetro do poro (SILVA, 2006).

O fenômeno da absorção capilar ocorre apenas quando a água entra em contato com um material hidrófilo, uma vez que a tendência da água é a de aumentar sua superfície de contato com esse tipo de material, formando um ângulo agudo. Na existência de poros capilares, as interações entre o líquido e a superfície do material determinam uma depressão que atrai a água para o interior desse poro (BERTOLINI, 2010 *apud* Jantsch 2015).

A NBR 13281:2005 estabelece classes de acordo com o valor obtido para o coeficiente de capilaridade, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 – Classes de argamassas de acordo com o coeficiente de capilaridade.

Classe	Coeficiente de Capilaridade (g/dm².min^{1/2})
C1	≤ 1,5
C2	1,0 a 2,5
C3	2,0 a 4,0
C4	3,0 a 7,0
C5	5,0 a 12,0
C6	> 10,0

Fonte: NBR 13281:2005.

2.5.2.4 Permeabilidade

A permeabilidade está relacionada à passagem de água pela camada de argamassa, que é um material poroso e permite a percolação desta tanto no estado líquido como no de vapor. O revestimento deve ser estanque à água, impedindo a sua percolação, mas deve ser permeável ao vapor para favorecer a secagem de umidade de infiltração ou decorrente da ação direta do vapor de água (BAÍÁ e SABBATINI, 2000).

A *permeabilidade à água* é expressa em termos da quantidade de água que passa através da superfície do material para um dado intervalo de tempo (SOUSA e FREITAS, 1998). Pode-se realizar o ensaio de permeabilidade à água pelo Método do Cachimbo (Tubo Karsten), o qual determina não apenas a quantidade de água que percola através do material, mas também o quanto de água é absorvida pelo revestimento (APPS, 2011).

A *permeabilidade ao vapor de água* refere-se ao fluxo de vapor de água que atravessa a argamassa, em condições de equilíbrio, por unidade de superfície e pressão de vapor (EMO, 2001 *apud* Jantsch, 2015). A permeabilidade ao vapor é uma característica desejável para qualquer material, segundo Neville (1997), considerando-se que o aprisionamento do vapor é um fator nocivo ao material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais empregados, o método de composição dos traços e mistura dos agregados, bem como, os procedimentos de ensaio que foram utilizados para avaliar o desempenho das argamassas.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

Neste estudo foi empregado o cimento do tipo CP-II F 40, do fabricante Votorantim S.A., todo de um mesmo lote de produção. Este tipo de cimento possui em sua composição adição de *filler* calcário em um teor entre 11 e 25% segundo a norma NBR 16697:2018. A resistência à compressão mínima de referência deste cimento é de 40 MPa aos 28 dias.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, tempo de pega, finura, determinação da massa específica e massa unitária do cimento empregado estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Caracterização do cimento.

Ensaio	Limites NBR 16697	Valores obtidos
Massa Unitária (kg/m³)	---	943
Massa específica (kg/m³)	---	3.111
Tempo de pega (min)	Início	≥ 60
	Fim	≤ 600
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	≥ 15
	7 dias	≥ 25
	28 dias	≥ 40

Fonte: Autor.

3.1.2 Cal

A cal empregada na elaboração dos traços foi do tipo hidratada CH-II, produzida pelo fabricante Irmãos Cioccarri & Cia Ltda. – Fida. Durante todo o estudo

foi utilizado o material de um único lote de produção. A análise química, apresentada na Tabela 12, foi informada pelo fabricante. As análises físicas, determinação da massa unitária, massa específica e teor retido na peneira #200, foram realizados pelo autor.

Tabela 12 – Caracterização da cal hidratada.

Ensaio	Valores
Massa Unitária (kg/m³)	565
Massa específica (kg/m³)	2.580
% Retida #200 (0,075 mm)	7,45
Análise química (%)	
CaO	46,66
MgO	28,78
CO₂	2,81

Fonte: Autor.

3.1.3. Aditivo Incorporador de Ar

O aditivo incorporador de ar empregado nos traços é fornecido pelo fabricante MC-Bauchemie Brasil, tendo como nome comercial “PowerMIX 411 BR”. Este aditivo é utilizado na produção de argamassas estabilizadas em usinas da região de Santa Maria/RS. Ele é fornecido na forma líquida e a recomendação do fabricante é que sua dosagem seja na faixa de 0,1% a 0,5% sobre o peso de cimento. A massa específica do aditivo é de 1,00 g/cm³.

3.1.4. Areia

A areia utilizada nas dosagens é fornecida pelo instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, sendo ela de origem natural (leito de rio) e fornecida em granulometrias individuais. A areia normal brasileira, como é identificada, é um material de referência utilizado por todos os laboratórios nacionais que realizam ensaios físico-mecânicos de cimentos Portland segundo a NBR 7215:2019.

As areias são fornecidas em embalagens de 25 kg, separadas nas seguintes frações granulométricas: grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100). Para cada granulometria da areia padrão, foi determinada a distribuição granulométrica, de acordo com NBR NM 248:2003. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 13 a 16. Todas as areias eram dos mesmos lotes, de forma a não ocasionar variações nas características devido a variações de lotes de produção.

Tabela 13 – Distribuição granulométrica da Areia #16.

Número	Peneiras Abertura (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada	% Passante
4	4,8	0	0	100
8	2,4	0	0	100
16	1,2	92,54	93	7,39
30	0,6	7,20	100	0,20
50	0,3	0,08	100	0,12
100	0,15	0,01	100	0,10
Fundo	---	0,10	---	---
Total		100,00	392,26	---
Diâmetro máximo do agregado: 1,2 mm			Módulo de finura: 3,92	

Fonte: Autor.

Tabela 14 – Distribuição granulométrica da Areia #30

Número	Peneiras Abertura (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada	% Passante
4	4,8	0	0	100
8	2,4	0	0	100
16	1,2	0,92	0,92	99,08
30	0,6	92,38	93,30	6,70
50	0,3	6,52	99,82	0,18
100	0,15	0,04	99,86	0,14
Fundo	---	0,14	---	---
Total		100,00	293,91	---
Diâmetro máximo do agregado: 1,2 mm			Módulo de finura: 2,94	

Fonte: Autor.

Tabela 15 – Distribuição granulométrica da Areia #50.

Número	Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada	% Passante
	Abertura (mm)				
4	4,8		0	0	100
8	2,4		0	0	100
16	1,2		0,00	0,00	100,00
30	0,6		5,95	5,95	94,05
50	0,3		92,28	98,23	1,77
100	0,15		1,39	99,62	0,38
Fundo	- - -		0,38	- - -	- - -
	Total		100,00	203,80	- - -
Diâmetro máximo do agregado: 0,6 mm				Módulo de finura: 2,04	

Fonte: Autor.

Tabela 16 – Distribuição granulométrica da Areia #100.

Número	Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada	% Passante
	Abertura (mm)				
4	4,8		0	0	100
8	2,4		0	0	100
16	1,2		0,00	0,00	100,00
30	0,6		0,00	0,00	100,00
50	0,3		8,46	8,46	91,54
100	0,15		85,91	94,37	5,63
Fundo	- - -		5,63	- - -	- - -
	Total		100,00	102,83	- - -
Diâmetro máximo do agregado: 0,3 mm				Módulo de finura: 1,03	

Fonte: Autor.

A norma NBR 7211:2009 (Agregados para concreto – Especificação) apresenta os limites de distribuição granulométrica para o agregado miúdo, conforme Tabela 17.

Tabela 17 – Limites granulométricos – Porcentagem Retida Acumulada.

Abertura das peneiras (mm)	9,5	6,3	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15
Limite ótimo	0	0	0 - 10	10 - 20	20 - 30	35 - 55	65 - 85	90 - 95
Limite Utilizável	0	0	0	0 - 25	5 - 50	15 - 70	50 - 95	85 - 100
Módulo de Finura (zona ótima)	2,20 – 2,90							
Módulo de Finura (zona utilizável)	1,55 – 3,50							

Fonte: Autor.

Para a composição das areias deste trabalho, procurou-se o enquadramento dentro dos limites granulométricos utilizáveis da NBR 7211:2009, mesmo sendo estes limites determinados para concretos. Primeiramente foi determinada a distribuição granulométrica teórica que resultassem em quatro valores distintos de módulo de finura: 1,47; 2,05; 2,48 e 2,97. Estes valores de módulo foram definidos por serem os possíveis de serem obtidos com as areias padronizadas, sendo que os dois valores intermediários ficaram dentro dos limites granulométricos utilizáveis segundo a norma. Posteriormente à estimativa das composições granulométricas, as areias foram misturadas, em porções de 2,0 kg e o ensaio de granulometria foi realizado novamente. A Tabela 18 apresenta as determinações das porcentagens teóricas das composições de areias, identificadas com os números de 1 a 4, bem como o módulo de finura teórico.

Tabela 18 – Composições granulométricas das areias (estimativa em %).

Fração	Areia 1	Areia 2	Areia 3	Areia 4
#16	0	5	15	25
#30	10	25	40	60
#50	25	40	25	7,5
#100	65	30	20	7,5
Total (%)	100	100	100	100
MF teórico	1,47	2,05	2,48	2,97

Fonte: Autor.

Nas Tabelas 19 a 22 são apresentados os resultados dos ensaios de distribuição granulométricas das areias 1, 2, 3 e 4, resultantes das composições com a frações pré-determinadas das areias padronizadas.

Tabela 19 – Distribuição granulométrica da Areia 1.

Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada	% Passante
Número	Abertura (mm)			
4	4,8	0	0	100
8	2,4	0	0	100
16	1,2	0,00	0	100,00
30	0,6	9,56	10	90,44
50	0,3	31,77	41	58,67
100	0,15	54,65	96	4,02
Fundo	---	4,02	---	---
Total		100,00	146,86	---
Diâmetro máximo do agregado: 0,6 mm			Módulo de finura: 1,47	

Fonte: Autor.

Tabela 20 – Distribuição granulométrica da Areia 2.

Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada	% Passante
Número	Abertura (mm)			
4	4,8	0	0	100
8	2,4	0	0	100
16	1,2	5,00	5	95,00
30	0,6	23,68	29	71,32
50	0,3	44,79	73	26,54
100	0,15	24,44	98	2,10
Fundo	---	2,10	---	---
Total		100,00	205,05	---
Diâmetro máximo do agregado: 1,2 mm			Módulo de finura: 2,05	

Fonte: Autor.

Tabela 21 – Distribuição granulométrica da Areia 3.

Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada	% Passante
Número	Abertura (mm)			
4	4,8	0	0	100
8	2,4	0	0	100
16	1,2	14,01	14	85,99
30	0,6	38,06	52	47,92
50	0,3	29,13	81	18,80
100	0,15	17,03	98	1,77
Fundo	---	1,77	---	---
Total		100,00	245,52	---
Diâmetro máximo do agregado: 1,2 mm			Módulo de finura: 2,45	

Fonte: Autor.

Tabela 22 – Distribuição granulométrica da Areia 4.

Peneiras		% Retida Média	% Retida Acumulada	% Passante
Número	Abertura (mm)			
4	4,8	0	0	100
8	2,4	0	0	100
16	1,2	23,19	23	76,81
30	0,6	56,80	80	20,02
50	0,3	12,82	93	7,20
100	0,15	6,59	99	0,60
Fundo	---	0,60	---	---
Total		100,00	295,37	---
Diâmetro máximo do agregado: 1,2 mm			Módulo de finura: 2,95	

Fonte: Autor.

Além dos ensaios para determinação da composição granulométrica, foram determinadas também as massas específicas, unitárias e o índice de vazios de cada areia composta. A Tabela 23 apresenta os resultados, determinados de acordo com as normas NBR NM 52:2009 e NBR NM 45:2006, respectivamente. Também são

apresentados os valores de módulo de finura estimados (teóricos) e os obtidos nos ensaios, onde se comprova que a distribuição granulométrica estimada resultou nos módulos pré-determinados para o trabalho.

Tabela 23 – Módulo de finura, massa específica, massa unitária e índice de vazios.

Amostra	MF Teórico	MF do ensaio	Massa específica (kg/m³)	Massa Unitária (kg/m³)	Índice de vazios (%)
Areia 1	1,47	1,47	2.611	1.318	50
Areia 2	2,05	2,05	2.618	1.373	48
Areia 3	2,48	2,46	2.618	1.394	47
Areia 4	2,97	2,95	2.611	1.369	48

Fonte: Autor.

As areias 1 e 4 ficaram além dos limites granulométricos normatizados, porém, foram aplicados neste estudo a fim de se utilizar valores de módulo mais amplos e não apenas dentro da faixa de 1,55 a 3,50. Procurou-se, também, manter uma variação próxima ao valor de 0,5 entre os módulos, de forma a possibilitar que as variações de comportamento das argamassas fossem mais abrangentes. Durante os ensaios, as areias foram misturadas imediatamente antes a moldagem de cada traço para garantir que o proporcionamento estava sendo realizado com a maior exatidão possível.

3.2 PROCEDIMENTO DE MISTURA

Para a mistura dos traços foi utilizado um misturador mecânico padrão, de acordo com a NBR 7215:2019. O procedimento de adição dos materiais foi o descrito na NBR 16541:2016 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para realização de ensaios. Este procedimento especifica a seguinte seqüência: primeiramente adiciona-se o material seco do traço na cuba do misturador e em seguida aciona-se o misturador na velocidade baixa, e também o cronômetro. Nos primeiros 10 segundos, deve-se adicionar 75% da água da mistura. Ao completar 30 segundos, muda-se a velocidade do misturador para alta, mantendo-a por mais 60 segundos. Transcorridos os 60 segundos na velocidade alta, o misturador deve ser desligado e toda a superfície interna da cuba e da pá devem ser raspados durante 90 segundos. Após este tempo, os 25%

restantes de água devem ser adicionados e o misturador ligado novamente por 60 segundos na velocidade baixa, concluindo-se assim o processo.

O aditivo incorporador de ar foi diluído na água inicial da mistura (os primeiros 75%), de maneira a manter o padrão de adição do aditivo incorporador de ar durante a mistura de todos os traços, garantindo-se que o aditivo fosse adicionado em sua totalidade na mesma etapa e misturado pelo mesmo tempo.

3.3 DOSAGEM DOS TRAÇOS

O número de misturas foi determinado de acordo com o número de módulos de finura obtidos. Também foi definido que seriam dosados dois teores de aditivo incorporador de ar para cada traço. Desta forma, como foram classificadas quatro areias com diferentes módulos de finura, totalizou-se oito traços. Assim, foi possível avaliar o comportamento da argamassa variando-se o módulo de finura em duas faixas de adição de incorporador de ar, uma próxima ao limite mínimo recomendado pelo fabricante e outra no limite máximo recomendado.

Como ponto partida, para a dosagem dos materiais, foi escolhida a areia 3 como padrão, já que esta composição teve distribuição granulométrica que ficou dentro da faixa ótima do módulo de finura. A dosagem foi realizada partindo-se do traço 1:1:6, em volume de cimento, cal e areia, respectivamente. Para maior controle de produção, os traços foram medidos em massa, partindo da relação de massa unitária e o volume pré-determinado de cada agregado. A proporção ficou conforme apresentado na Tabela 24. Como a norma NBR 16541:2016 estabelece a quantidade de 2,5 kg de massa seca para cada mistura, a proporção foi ajustada para esta quantidade.

Tabela 24 – Composição inicial dos traços com areia 3.

Unidade	Quantidade material		
	Cimento	Cal	Areia 3
Traço em volume	1	1	6
Traço em peso (kg)	0,943	0,565	8,364
Traço Unitário (kg)	1,000	0,599	8,870
Traço para 2.512,5g	240,00	143,80	2.128,70

Fonte: Autor.

Os valores de cimento, cal e areia foram fixados para todos os traços conforme a Tabela 24. A dosagem de água foi realizada partindo de uma relação água/materiais secos de 16,5%. Os resultados estão apresentados na Tabela 25, utilizando 0,1% e 0,4% de aditivo incorporador de ar, em relação à massa de cimento.

Tabela 25 – Dosagem Inicial com aditivo e areia 3.

TRAÇO	Índice de consistência NBR 13276	Teor de Ar incorporado NBR 13278
AREIA 3 + 0,1% AIA	208 mm	12,3%
AREIA 3 + 0,4% AIA	272 mm	23,4%

Fonte: Autor.

A quantidade máxima de aditivo incorporador de ar indicada pelo fabricante não foi a utilizada porque foi observado que a variação de 0,1% até 0,5%, utilizando as mesmas proporções do cimento, cal, areia e água, ocasionava uma variação significativa do índice de consistência, que poderia tornar a argamassa muito fluída para o maior teor alto de incorporador e muito seca para o teor menor. Assim, trabalhou-se com os teores de 0,1% e 0,4% em relação à massa de cimento.

A nomenclatura dos traços foi feita de acordo com a areia e o teor de aditivo empregado, conforme a Tabela 26.

TABELA 26 – Nomenclatura dos traços estudados

Módulo de Finura	Areia	Teor de Aditivo	Legenda – Traço
1,47	Areia 1	0,1%	A1-adt01
2,05	Areia 2	0,1%	A2-adt 01
2,46	Areia 3	0,1%	A3-adt 01
2,95	Areia 4	0,1%	A4-adt 01
1,47	Areia 1	0,4%	A1-adt 04
2,05	Areia 2	0,4%	A2-adt 04
2,46	Areia 3	0,4%	A3-adt 04
2,95	Areia 4	0,4%	A4-adt 04

Fonte: Autor.

Todas as composições são descritas pela nomenclatura da Tabela 26, correlacionando a areia e o teor de aditivo incorporador de ar empregado na mistura.

A Tabela 27 apresenta a proporção de cada insumo em cada traço. A composição de todas as areias foi realizada de acordo com as porcentagens apresentadas na Tabela 27.

TABELA 27 – Proporções finais de materiais das misturas testadas.

Traço	Cimento (g)	Cal (g)	Água (g)	AREIA (g)				Aditivo (g)
				#16	#30	#50	#100	
A1-adt01				0,00	212,87	532,17	1383,65	
A2-adt 01				106,43	532,17	851,48	638,61	0,24
A3-adt 01				319,30	851,48	532,17	425,74	
A4-adt 01				532,17	1277,22	159,65	159,65	
A1-adt 04	240	143,80	415,08	0,00	212,87	532,17	1383,65	
A2-adt 04				106,43	532,17	851,48	638,61	0,96
A3-adt 04				319,30	851,48	532,17	425,74	
A4-adt 04				532,17	1277,22	159,65	159,65	

Fonte: Autor.

Vale ressaltar que as proporções de cimento, cal, água e areia foram mantidas constantes em todas as composições. Para cada teor de aditivo (0,1% ou 0,4%) foram modificadas apenas as composições granulométricas das areias, de acordo com o módulo de finura estipulado.

3.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Para a caracterização das argamassas do estado fresco foram realizados os seguintes ensaios: Índice de consistência, squeeze flow, teor de ar incorporado, densidade no estado fresco e retenção de água.

3.4.1 Determinação do índice de consistência

O índice de consistência é um ensaio que avalia, em parte, a trabalhabilidade da argamassa, através da medida do seu espalhamento na mesa de consistência (*flow table*). O procedimento para este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 13276:2016 – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.

O ensaio foi realizado em ambiente com condições de temperatura e umidade controladas, de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $60\pm 5\%$, respectivamente. A aparelhagem utilizada para execução do ensaio foi: mesa de consistência (*flow table*), molde tronco cônico com abertura inferior com 125 mm de diâmetro e abertura superior com 80 mm de diâmetro, soquete metálico, misturador mecânico e paquímetro. Após a mistura da argamassa, o molde tronco-cônico era centrado sobre a mesa de consistência, previamente umedecida, e no seu interior era colocada a argamassa, em três camadas, com aplicação de 15, 10 e 5 golpes com o soquete metálico em cada camada. Após o rasamento da argamassa no topo do molde, este era retirado. Em seguida eram promovidos os ciclos de “queda” da mesa de consistência, 30 vezes em 30 segundos. Após a última queda, media-se o espalhamento da argamassa em três direções diversas utilizando-se o paquímetro. O índice de consistência corresponde à média das três medidas de diâmetro, é expresso em milímetros.

Para cada traço de argamassa, o ensaio para determinação do índice de consistência foi realizado em três dosagens distintas, para que um valor médio fosse obtido. Foi pré-determinado que fossem admitidas variações máximas de 5 mm para mais ou para menos entre as medidas, pois este valor está citado na NBR 16541:2016 como limite para os procedimentos de moldagem.

3.4.2 Squeeze flow

O ensaio *squeeze flow* consiste em medir o esforço de compressão axial necessário para comprimir uma amostra cilíndrica sob ação de duas placas paralelas, sendo este ensaio descrito na NBR 15839:2010 – Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Neste ensaio foi utilizada uma máquina universal de ensaios,

modelo *autograph AGS-X 5KN* pertencente à Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA – Campus Alegrete. Para realização do ensaio, a amostra de argamassa fresca foi colocada no interior do molde com 100 mm de diâmetro e 10 mm de altura, apoiado e centrado na base metálica de aço inoxidável da máquina de ensaio. Em seguida o molde era removido e o prato superior de aço inoxidável, com diâmetro de 100 mm, era aproximado até encostar na amostra, sem que houvesse aplicação de carga. Neste estudo, a carga máxima aplicada foi de 5 KN, carga máxima aplicável pelo equipamento. A velocidade de carga foi de 0,1 mm/s. A aquisição dos dados de força e deslocamento foi obtida pelo software *Trapezium X*. O equipamento utilizado é apresentado no esquema da Figura 5.

Figura 5 – Equipamento utilizado no ensaio squeeze flow.



Amostra para ensaio



Vista parcial do equipamento

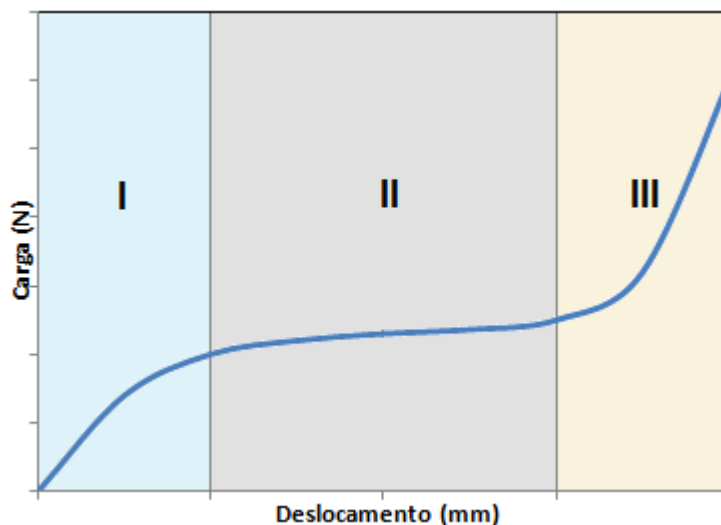


Vista geral do equipamento

Fonte: Autor.

O perfil reológico característico do ensaio está apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Perfil reológico característico do ensaio squeeze flow.



Fonte: Autor

A descrição do comportamento a partir do perfil reológico pode ser explicada de maneira simplificada como: no primeiro estágio (I), em pequenas deformações, o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear; no segundo estágio (II), a compressão resulta em uma deformação radial elongacional e de cisalhamento superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico e, assim, o mesmo flui por deformação plástica e/ou viscosa dependendo das suas características. Nesta etapa o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento, que é um comportamento que favorece a produtividade na aplicação de argamassas. No terceiro estágio (III), ocorre um aumento expressivo da carga necessária para prosseguir a deformação do material. A aproximação das partículas ou de outros constituintes de um sistema submetido a grandes deformações gera forças restritivas ao fluxo.

3.4.3 Determinação do teor de ar incorporado e densidade no estado fresco

A densidade da argamassa é o valor obtido pela relação entre a massa e volume da argamassa no estado fresco. O valor obtido no ensaio de densidade através da correlação com a densidade da argamassa no estado anidro resulta no teor de ar incorporado. Estes ensaios foram realizados de acordo com a NBR

13278:2005 – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. De acordo com esta norma, a densidade de massa, em kg/m^3 , é calculada pela Equação 1 e o teor de ar incorporado através da Equação 2:

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \times 1000 \quad (1)$$

onde:

m_c : massa do recipiente contendo a argamassa, em gramas

m_v : massa do recipiente vazio, em gramas

V_r : Volume do recipiente, em cm^3

$$A = 100x \left(1 - \frac{d}{d_t} \right) \quad (2)$$

onde:

d : densidade de massa (kg/m^3)

d_t : densidade de massa teórica da argamassa (kg/m^3) – calculada de acordo com a Equação 3.

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\frac{\sum m_i}{\gamma_i}} \quad (3)$$

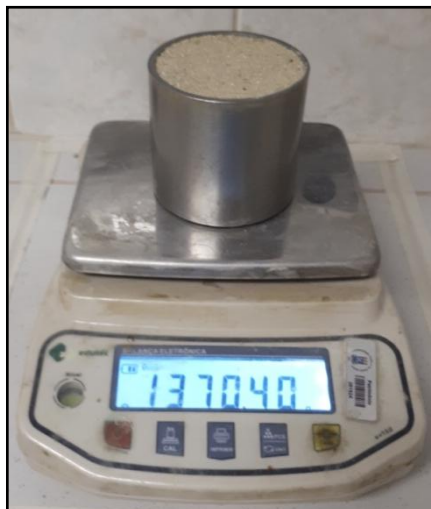
onde:

m_i : massa seca de cada componente da argamassa, mais a massa de água, em gramas

γ_i : massa específica de cada componente da argamassa (g/cm^3)

Na Figura 7 ilustra-se o modelo do recipiente de inox utilizado para a determinação da densidade de massa, com volume de 380 cm^3 e massa (tara) de $856,90 \text{ g}$.

Figura 7 – Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.



Fonte: Autor.

A densidade de massa fresca e o teor de ar incorporado foram determinados em três ensaios para cada traço, em moldagens distintas. Teve-se o cuidado de se realizar as três medições de densidade com a mesma mistura, mas sem a reutilização da argamassa fresca de uma pesagem para a outra, evitando a medição em porções já adensadas

Durante a realização dos ensaios, verificou-se que o tempo entre a finalização da mistura e a preparação da argamassa no recipiente para determinação na massa influenciava no resultado destas propriedades visto que o incorporador de ar acrescenta bolhas instáveis à mistura. A fim de evitar esta variável nas argamassas, foram realizados testes preliminares para a determinação do tempo padrão entre o término da mistura e início dos ensaios.

No estudo preliminar, foram dosados 04 traços de argamassas utilizando os mesmos agregados e aditivo incorporador de ar das misturas definitivas. Os traços escolhidos para o estudo prévio foram: A2-adt04, A3-adt01, A3-adt04 e A4-adt01. As pesagens para medição do teor de ar incorporado foram realizadas nos seguintes tempos após o término de mistura: 0, 1,5 e 3,5 minutos. Estes foram os tempos iniciais de colocação da argamassa no copo padrão para adensamento e pesagem. O tempo despendido para o processo de adensamento e rasamento das misturas, até a pesagem do conjunto do copo com a argamassa foi de aproximadamente 50 segundos. Sendo assim, foram padronizados os tempos de

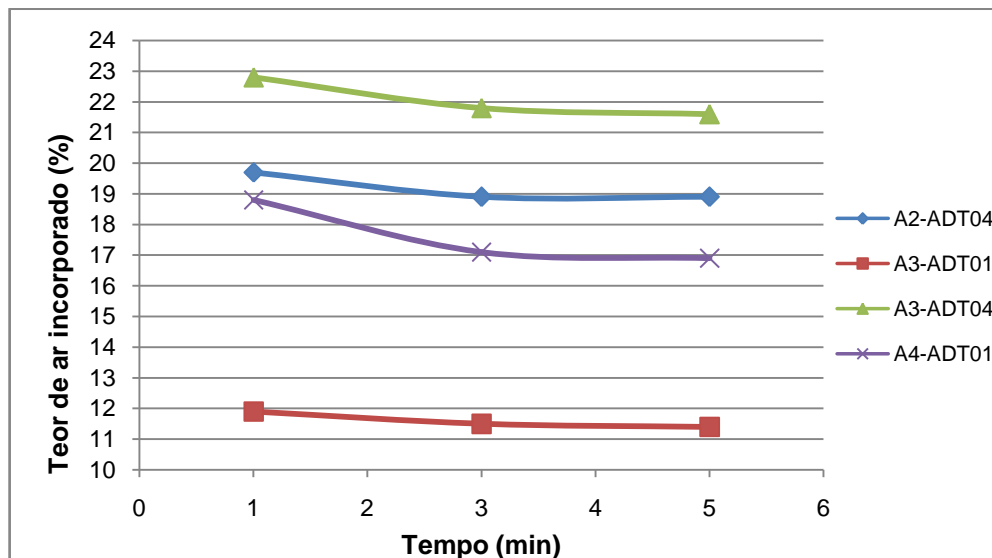
pesagem em 1, 3 e 5 minutos após o término da mistura. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 28 e no gráfico da Figura 8.

Tabela 28 – Tempo para medição x teor de ar incorporado.

Tempo (minutos)	Teor de Ar Incorporado (%)			
	Traço A	Traço B	Traço C	Traço D
1	19,7	11,9	22,8	18,8
3	18,9	11,5	21,8	17,1
5	18,9	11,4	21,6	16,9

Fonte: Autor.

Figura 8 – Relação tempo para medição *versus* teor de ar incorporado.



Fonte: Autor.

Foi constatado que entre a primeira e a segunda medição ocorreu, em todas as misturas, um decréscimo no valor do teor de ar incorporado, chegando ao máximo de 1,7% no traço A4-adt01. A diferença, entre a segunda e terceira tentativas resultou no valor máximo de decréscimo em 0,2%. Adotando os tempos iniciais de aplicação nos copos, verificou-se uma menor variação entre as medidas iniciadas após 1,5 e 3,5 minutos ao término da mistura. Devido a esta constatação,

foi adotado o intervalo de 2 minutos entre o término da mistura e início das moldagens ou ensaios no estado fresco, de forma a ser mantido um padrão para todos os traços.

3.4.4 Retenção de água

A determinação da retenção de água das argamassas foi realizada de acordo com a NBR 13277:2005 – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. A aparelhagem usada para este ensaio foi: funil de büchner modificado com bomba de vácuo acoplada, discos de papel filtro, soquete metálico e balança com resolução de 0,01 g.

O ensaio consiste, basicamente, em submeter uma amostra de argamassa fresca condicionada em um “prato” perfurado, a uma pressão negativa de 51 mm de mercúrio, durante 15 minutos, forçando a perda de água. Para isso, o prato foi colocado sobre o funil, procurando garantir a estanqueidade. O papel filtro foi umedecido e posicionado sobre o fundo do prato. Logo após, acionava-se a bomba de vácuo com uma pressão negativa de 51 mm de mercúrio durante 90 segundos. Em seguida, removeu-se o prato, retirou-se o excesso de água e o conjunto prato mais papel filtro úmido foi pesado na balança para registrar a massa (m_v). Então a argamassa foi colocada no prato, fazendo o adensamento com 37 golpes do soquete, sendo 16 desses aplicados à borda do prato e os outros 21 no centro. O excesso de argamassa foi retirado, deixando a superfície do prato plana. Esse conjunto foi pesado (m_a). Depois de colocar o prato no equipamento, foi aplicada uma sucção de 51 mm de mercúrio à amostra, durante 15 minutos. Posteriormente o prato foi retirado do funil e pesado (m_s). Através da aplicação dos resultados do ensaio na Equação 4 se obteve a retenção de água em porcentagem. A média dos resultados foi determinada a partir de três medições.

$$R_a = \left[1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF(m_a - m_v)} \right] \times 100 \quad (4)$$

Sendo:

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad (5)$$

onde:

m_a : massa do conjunto com argamassa, em gramas

m_s : massa do conjunto após a sucção, em gramas

m_v : massa do conjunto vazio, em gramas

m_w : massa total de água da mistura, em gramas

m : massa da argamassa industrializada ou soma dos componentes anidros, em gramas

AF: fator água/argamassa fresca

3.5 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, os ensaios realizados foram: determinação das resistências à tração na flexão e compressão aos 07 e 28 dias, resistência de aderência à tração em substrato padrão, absorção de água por capilaridade aos 28 dias, permeabilidade à água e ao vapor e medição da variação dimensional aos 01, 07, 14, 21, 28, 35 e 42 dias, tanto em barras quanto placas.

3.5.1 Resistência à tração na flexão e compressão

Para determinação da resistência à flexão e compressão, após a mistura a argamassa foi moldada em fôrmas prismáticas para corpos de prova com medida de 4x4x16 cm. O ensaio foi feito de acordo com a NBR 13279:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Foram moldados três corpos de prova prismáticos para cada idade de ensaio. Neste trabalho, estes ensaios foram realizados aos 07 e aos 28 dias de cura.

Os três corpos de prova prismáticos de uma amostra são submetidos ao ensaio de tração na flexão e, posteriormente, as seis peças geradas da ruptura deste ensaio foram submetidas ao ensaio de compressão axial. Os valores de resistência são as tensões médias dos resultados. A Figura 9 mostra os corpos de prova prismáticos de argamassa, bem como, os dispositivos utilizados para os ensaios de tração na flexão e compressão. O conjunto apresentado na figura foi colocado em uma prensa para as medições das cargas de rupturas.

Figura 9 – Dispositivos para ensaio de tração na flexão e compressão.



Tração na flexão

Compressão

Fonte: www.solotest.com.br, acesso em 02/05/2019.

A carga para ensaio de tração na flexão foi aplicada a uma taxa de 50 ± 10 N/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência à tração na flexão, para cada corpo de prova, é calculada de acordo com a Equação 6. O resultado é a média das determinações.

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{40^3} \quad (6)$$

onde:

R_f : resistência à tração na flexão, em MPa;

F_f : carga aplicada verticalmente no centro do corpo de prova, em Newtons;

L : distância entre os suportes, em mm

A aplicação de carga para o ensaio de compressão foi feita a uma taxa de carregamento de 550 ± 50 N/s, até a ruptura de cada corpo de prova. A Equação 7 foi utilizada para a determinação na tensão de ruptura de cada corpo de prova.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (7)$$

onde:

R_c : resistência à compressão, em MPa;

F_c : carga máxima aplicada, em Newtons;

1600: área da seção do dispositivo, em mm^2

3.5.2 Resistência de aderência à tração

Estes ensaios foram realizados de acordo com a NBR 15258:2005 – Argamassa para revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Os materiais necessários para execução do ensaio são: equipamento de tração, pastilhas metálicas, dispositivo de corte (furadeira mais a serra-copo), paquímetro, cola epóxi, substrato padrão e gabarito para moldagem da placa.

A aplicação da argamassa para o teste de aderência foi feita sobre substrato padrão de concreto, com medidas de 250x500x15 mm de largura, comprimento e espessura, respectivamente, fornecidos pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Para cada traço de argamassa, foi produzida uma unidade de conjunto substrato padrão com argamassa. A placa de substrato com argamassa foi moldada da seguinte forma: a argamassa, misturada de acordo com a norma de preparo (NBR 16541:2016) foi aplicada sobre o substrato padrão, manualmente com desempenadeira metálica, em duas camadas. A primeira camada com espessura aproximada de 5 mm, até o completo cobertura da superfície da placa, e a segunda camada até que a espessura ficasse em 18 ± 2 mm. Para atingir esta espessura, foi utilizado um gabarito de madeira. Os conjuntos permaneceram no ambiente do laboratório até a idade de ensaio, aos 28 dias. Transcorrido o tempo de cura, foram feitos cortes no revestimento para o ensaio de aderência, com uma serra-copo de 50 mm de diâmetro, de modo que foram realizados 10 cortes sobre a placa. Estes pontos estavam distantes de 40 mm entre si e de 20 mm das bordas. O corte foi realizado até a profundidade que perfurava a superfície do substrato em 1 mm. Feito isso, limpou-se a superfície da placa de modo a aplicar as pastilhas sobre os pontos de corte, pressionando-as para garantir o espalhamento da cola.

O equipamento de tração consiste em um dinamômetro de tração que permite a aplicação contínua de carga de forma centrada e ortogonal ao revestimento quando acoplado na pastilha metálica. Depois de acoplado, aplicou-se um esforço de tração constante até a ruptura do corpo de prova, gerando a carga máxima de tração (P). Com o paquímetro, mediu-se a espessura do revestimento no local da tração e o diâmetro do corpo de prova. Para calcular a resistência de aderência à tração de cada amostra, usou-se a Equação 8:

$$R = \frac{P}{A} \quad (8)$$

onde:

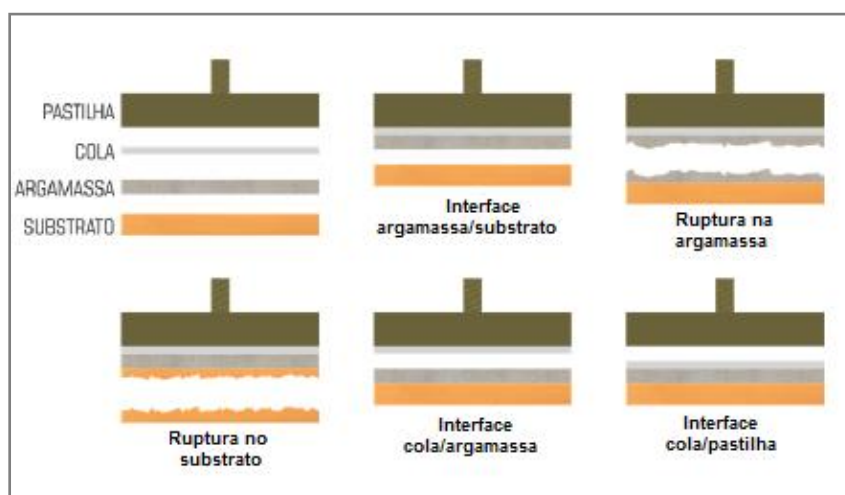
R: Resistência de aderência à tração (MPa)

P: Carga de ruptura (N)

A: Área do corpo-de-prova (mm²)

Foi registrada também a forma de ruptura, que poderia ser das seguintes formas: ruptura do substrato (S), ruptura na interface argamassa substrato (S/A), ruptura na argamassa (A) e ruptura na interface cola-argamassa ou cola-pastilha, sendo estes dois últimos tipos classificados como falha na colagem (F). Na Figura 10 ilustram-se as formas de ruptura e a Figura 11 a sequência de realização do ensaio.

Figura 10 – Formas de ruptura no ensaio de aderência à tração.



Fonte: Adaptado de Jantsch (2015).

Figura 11 – Sequência de ensaio de aderência à tração.



Placa antes do ensaio



Cortes com serra copo a seco



Colagem das pastilhas metálicas



Aplicação da carga de tração

Fonte: Autor.

3.5.3 Absorção de água por imersão e índice de vazios

Os ensaios para a determinação da absorção de água por imersão e índice de vazios foram realizados de acordo com os procedimentos descritos na NBR 9778:2005 – Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Para cada traço de argamassa foram moldados três corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm e os ensaios realizados aos 28 dias de cura.

A determinação da absorção de água (A) e índice de vazios são realizadas a partir das equações 9 e 10 respectivamente, as quais resultam de relações entre as massas dos corpos de prova secos em estufa e saturados após imersão e fervura.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (9)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (10)$$

onde:

A: Absorção de água por imersão (%)

I_v : Índice de vazios (%)

m_s : Massa da amostra seca em estufa, em gramas

m_{sat} : Massa da amostra saturada, em gramas

m_i : Massa da amostra imersa, em gramas

3.5.4 Absorção de água por capilaridade

As determinações da absorção de água por capilaridade foram realizadas de acordo com o procedimento da NBR 15259:2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Para estas determinações, foram moldados três corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm para cada traço de

argamassa, sendo que os ensaios foram realizados aos 28 dias de idade das amostras. A cura foi realizada ao ar ambiente com temperatura de $23\pm 2^\circ\text{C}$ e umidade de $65\pm 5\%$.

O ensaio consistiu em colocar os corpos de prova de argamassa, com face quadrada para baixo, levemente lixada e limpa com pincel, imersos em uma lâmina de água de 5 mm, sendo a massa dos corpos de prova foi verificada antes da imersão, após 10 minutos e após 90 minutos de imersão. A partir destes valores, calculou-se a absorção de água em cada tempo, a partir da Equação 11.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (11)$$

onde:

A_t : Absorção de água por capilaridade em cada tempo, em g/cm^2

m_t : massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas

m_0 : massa inicial do corpo de prova, em gramas

Por definição, o coeficiente de capilaridade (C) é igual ao coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das determinações realizadas aos 10 minutos e aos 90 minutos. De acordo com a NBR 15259:2005, para simplificação dos cálculos, o coeficiente de capilaridade é aproximadamente igual ao valor médio das diferenças de massa aos 10 minutos e aos 90 minutos, conforme a Equação 12.

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

onde:

C : coeficiente de capilaridade, em $(\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$

m_{10} : Massa do corpo de prova após 10 minutos, em gramas

m_{90} : Massa do corpo de prova após 90 minutos, em gramas

A Figura 12 ilustra a sequência de realização do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Figura 12 – Sequência de ensaio de absorção de água por capilaridade.



Corpos de prova antes do ensaio



Corpos de prova imersos



Corpos de prova após o ensaio

Fonte: Autor.

3.5.5 Permeabilidade a água pelo método do cachimbo

A norma NBR 14992:2003 compreende no Anexo G o ensaio de permeabilidade para argamassas de rejuntamento de placas cerâmicas. No entanto as normas internacionais NIT n.140 da CSTC e RILEM *Test Method* nº 11.4 propõem uma metodologia mais completa para o ensaio.

O ensaio do cachimbo ou tubo Karsten, é usado para determinar não somente a quantidade de água que percola através do material, mas também para descobrir o quanto dessa água é absorvida pelo revestimento. Para cada mistura de argamassa foi moldada uma placa com medidas de 265x500x25 mm. As placas foram executadas com auxílio de um gabarito de madeira, apoiados sobre uma chapa plana metálica. A Figura 13 ilustra a moldagem das placas.

Após as moldagens, foram colocados quatro pinos metálicos na superfície para a tentativa de realizar o ensaio de variação dimensional nas placas. Foi padronizado o tempo de 48 horas de cura inicial para a desmoldagem e movimentação das placas para a bancada onde ficaram durante o período de cura de 28 dias.

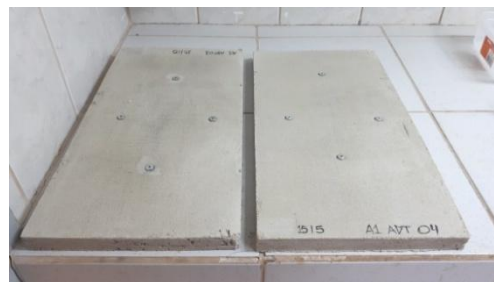
Figura 13 – Placas para ensaio de permeabilidade a água.



Moldes



Moldes com argamassa



Placas resultantes da moldagem

Fonte: Autor.

Em cada placa, aos 28 dias de cura, foram posicionados quatro tubos de vidro, com escala de 0 a 3,5 ml e marcações a cada 0,05 ml. Para fixação dos tubos de vidro nas placas, foi empregada cola de silicone, material de fixação utilizado no trabalho de Jantsch (2015), e que em comparação com outros produtos, como massa de calafetar e massa de modelar, apresentou melhor desempenho para a função de colagem e vedação.

Após o aguardo de 20 minutos para secagem da cola, os tubos foram preenchidos com água. Padronizou-se o tempo de 10 minutos para estabilização da quantidade de água na marcação “0” do tubo e início da cronometragem até que a água atingisse a marcação de 3,5ml ou 60 minutos de ensaio, o que ocorresse primeiro. A Figura 14 mostra o tipo de tubo de vidro utilizado e a montagem dos tubos para ensaio.

Figura 14 – Montagem para o ensaio de permeabilidade a água.



Tubo de vidro



Placas com os tubos para ensaio

Fonte: Autor.

As medições realizadas permitiram a avaliação do volume de água absorvido pelo revestimento em função do tempo, resultando no coeficiente de absorção de água (kg/m²) do material ensaiado. A Equação 13 é usada para calcular a absorção de água de uma fachada sujeita à ação de vento e chuva é a proposta por Künzel *et al.* (2004 *apud* JANTSCH, 2015):

$$A_{fachada} = C_{absorção} \times \sqrt{T_{chuva}} \quad (13)$$

onde:

$A_{fachada}$: Absorção de água (Kg/m²)

T_{chuva} : Tempo de ensaio (horas)

$C_{absorção}$: Coeficiente de absorção de água da camada superficial (kg/[m²x√h])

A Equação 14 pode ser utilizada para determinação do coeficiente de absorção:

$$C_{absorção} = \frac{X \times 10^{-3}}{d^2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{t} \right)} \quad (14)$$

onde:

$C_{absorção}$: Coeficiente de absorção de água da camada superficial (kg/[m²x√h])

X: Quantidade de água absorvida (ml)

t: Duração da leitura (horas)

d: Diâmetro da superfície em que é feito o contato da água com a argamassa (mm)

3.5.6 Permeabilidade ao vapor

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água foi realizado com base nos procedimentos descritos na norma EN 1015-19:2000. Este ensaio define um método para determinar o regime permanente da permeabilidade ao vapor de água do reboco e argamassas de reboco e a parte mais alta e mais baixa do intervalo higroscópico. Para a execução do ensaio foram produzidos corpos de prova em

forma de disco com espessura uniforme, que de acordo com a norma deveriam variar entre 10 mm e 30 mm. Nesta pesquisa a medida adotada para a espessura dos corpos de prova de argamassa foi de 20 mm e 150 mm de diâmetro. Para a moldagem das amostras circulares de argamassa, foram empregados anéis circulares de tubos de PVC, cortados com a medida de espessura esperada, colocados sobre uma chapa de aço plana com óleo mineral desmoldante aplicado na superfície. Em cada fôrma de PVC, foi feito um corte para facilitar a desforma da amostra, a qual foi realizada após o prazo de 48 horas de cura. Para a moldagem, o fechamento deste corte foi feito com fita adesiva. A Figura 15 ilustra a moldagem e as amostras resultantes do processo.

Figura 15 – Moldagem das amostras para ensaio de permeabilidade ao vapor.



Moldagem das amostras



Amostras após a desforma

Fonte: Autor.

Para execução deste ensaio, os corpos de prova, após a cura de 28 dias, foram colocados em “copos” teste circulares, formando o conjunto ilustrado na Figura 16. Deve haver uma vedação entre as paredes do copo e a amostra de argamassa, para que a pressão do vapor de água no interior dos modelos (a qual é constante por meio de uma solução salina saturada) seja diferente da existente no ambiente exterior. Neste trabalho, utilizou-se como material de vedação, a massa de vidraceiro. Este material apresentou melhor desempenho para espalhamento que a massa de calafetar que também foi testada.

Figura 16 – Conjunto para o ensaio de permeabilidade ao vapor.

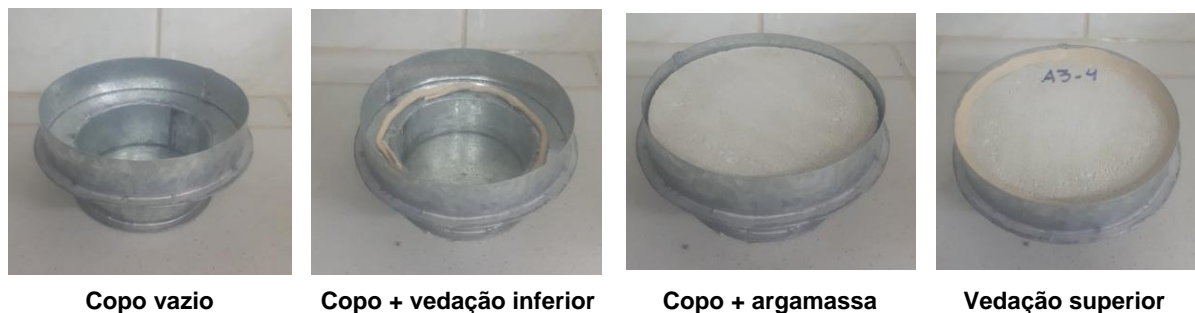


Legenda: (1) Corpo de prova de argamassa; (2) Material de vedação; (3) Copo de ensaio; (4) espaço de ar (1 cm); (5) solução salina

Fonte: Adaptado de Jantsch (2015).

Como procedimento de montagem, a solução foi colocada nos copos até atingirem um nível mínimo de 1 cm de espaçamento entre a solução e a amostra de argamassa. Essa folga é necessária para evitar o contato da solução com a argamassa durante o manuseio do copo. Após preencher o copo com a solução, foi colocada uma tira de massa de vidraceiro ao redor do anel interno do copo para promover a vedação entre o copo e a amostra. A amostra de argamassa foi então colocada no copo sobre o cordão de massa de calafetar e pressionada, garantindo a vedação na parte inferior. Depois, para promover a vedação entre a amostra e o ambiente, outro cordão de massa de vidraceiro foi colocado no espaço entre a borda do copo e a amostra. Para esta pesquisa, a orientação do corpo de prova de argamassa foi escolhida simulando o lado do reboco que estaria exposto ao vapor em uma aplicação real, ou seja, o lado da amostra que foi rasado ficou em contato com o ambiente salino. Na Figura 17 mostra-se a sequência do processo de montagem do conjunto.

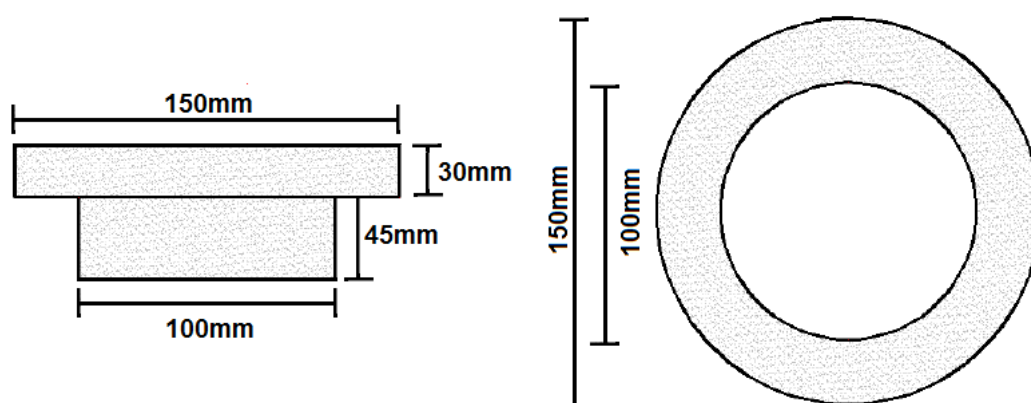
Figura 17 – Montagem do conjunto para ensaio de permeabilidade ao vapor.



Fonte: Autor

De acordo com a Norma EN 1015-19:2000, os copos de ensaio circulares devem ser feitos em material resistente à corrosão, possuindo uma abertura com área de 0,02 m², aproximadamente. Os moldes circulares adotados para a realização deste ensaio foram fabricados em chapa metálica galvanizada. As medidas dos copos utilizados estão representadas na Figura 18.

Figura 18 – Dimensões dos copos do ensaio de permeabilidade a água.



Fonte: Adaptado de Temp (2014).

A norma EN-1015-19:2000 define dois intervalos higroscópicos: um superior e outro inferior. No primeiro, utiliza-se a solução saturada de nitrato de potássio, no segundo, utiliza-se a solução saturada de cloreto de lítio, para controlar a pressão do vapor de água no interior do copo. Neste trabalho, optou-se por realizar a determinação da permeabilidade ao vapor de água para o intervalo higroscópico superior, utilizando a solução saturada nitrato de potássio. A solução salina foi adquirida na forma sólida e posteriormente saturada com água destilada à 30°C com ajuda de um agitador.

As amostras para as verificações de variação de massa decorrentes da permeabilidade ao vapor foram mantidas em uma sala com controle de umidade e temperatura, as quais foram ajustadas para 20°C e 50%, conforme especifica a EN-1015-19. O efeito esperado neste intervalo higroscópico é a perda de massa do conjunto devido à passagem de umidade da solução contida no copo através da argamassa, para o ambiente.

O número amostras de cada traço foi definido em três unidades. Isto porque havia limitação com relação ao número de copos disponíveis. Decidiu-se por fazer toda a moldagem, colocação das argamassas nos copos e medição das perdas de massa de maneira contínua, nas mesmas datas, para evitar variações referentes às condições de cura. As amostras foram mantidas em ambiente controlado durante o período de 15 dias das medições. Durante o período das pesagens foi feito monitoramento diário da temperatura e umidade da sala, acionando-se o condicionador de ar ou umidificador quando necessário. Nos resultados, são apresentados os valores de umidade e temperatura registrados durante o período destes ensaios. A Figura 19 mostra os conjuntos acondicionados durante o período de aquisição dos dados de variação de massa.

Figura 19 – Conjuntos de permeabilidade ao vapor.



Fonte: Autor.

A permeância ao vapor de água (Λ), que se refere ao o fluxo de vapor de água que passa por uma área sob condições de equilíbrio por unidade de diferença na pressão de vapor de água entre dois lados do mesmo material, é determinado, segundo a norma EM 1015-19:2000, de acordo com a Equação 15.

$$\Lambda = \frac{1}{\frac{A \cdot \Delta P}{\frac{\Delta G}{\Delta t}} - R_a} \quad (15)$$

onde:

Λ : permeância ao vapor de água (kg/m².s.Pa)

A: área da abertura inferior do copo de ensaio (m²)

ΔP : variação de pressão do vapor de água entre ar ambiente e a solução salina saturada (Pa)

$\Delta G/\Delta t$: fluxo do vapor de água (kg/s)

R_a : resistência ao vapor de água da folga de ar entre a amostra de argamassa e a solução salina (0,048x10⁻⁹ Pa.m².s/kg)

A permeabilidade ao vapor de água (π) é definida conforme a Equação 16.

$$\pi = \Lambda \cdot e \quad (16)$$

onde:

π : permeabilidade ao vapor de água (kg/m.s.Pa)

e: espessura do corpo de prova (m)

O coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (μ) é definido, segundo a norma EN 998-1 de acordo com a Equação 17.

$$\mu = \frac{1,94 \cdot 10^{-10}}{\Lambda} \quad (17)$$

onde:

μ : Coeficiente de permeabilidade (kg/m².s.Pa)⁻¹

Λ : permeância ao vapor de água (kg/m².s.Pa)

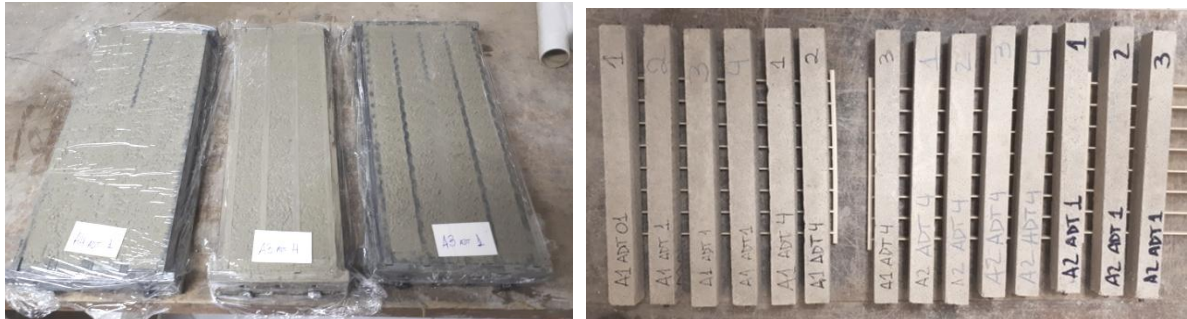
3.5.7 Variação dimensional

Os ensaios de variação dimensional (retração/expansão) foram realizados de acordo com os procedimentos da norma NBR 15261:2005 – Argamassas para

assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação na variação dimensional (retração ou expansão linear). Os corpos de prova para este ensaio são barras prismáticas com dimensões de 25x25x285 mm. Foram moldados quatro corpos de prova para cada traço.

Para moldagem das barras, após a mistura da argamassa, a mesma foi colocada no interior da forma, em duas camadas com a aplicação de 25 golpes com soquete metálico em cada camada, para adensamento da argamassa. A desmoldagem dos corpos de prova foi realizada após 48 horas de cura, sendo que durante este período os mesmos ficaram cobertos com filme PVC para evitar a perda excessiva de umidade para o ambiente. As barras possuíam pinos metálicos nas extremidades para acoplamento no equipamento de medição da variação dimensional. Na Figura 20 mostram-se os processos de moldagem.

Figura 20 – Moldagem de corpos de prova para variação dimensional linear.



Fonte: Autor.

As leituras de variação dimensional e de massa foram realizadas nos seguintes tempos após a desforma: 10 minutos (logo após a desforma), 24 horas, 7, 14, 21, 28, 35, 42 e 49 dias. O equipamento para leitura das variações é composto por um suporte e um relógio comparador digital com leitura de precisão igual a 10^{-3} mm. Durante todo o período de ensaio, o equipamento e as barras foram mantidos na mesma sala, nas mesmas condições de umidade e temperatura. A Figura 21 mostra o equipamento de medição utilizado, com a barra de calibração e com o corpo de prova prismático de argamassa.

Figura 21 – Medição da variação dimensional linear.



Processo de calibração (zero)



Medida no corpo de prova

Fonte: Autor.

Antes de cada leitura, o equipamento era zerado na barra metálica padrão. Então se fazia a medida colocando o equipamento nas extremidades dos pinos metálicos dos corpos de prova. As diferenças entre as medidas nos corpos de prova e na barra padrão, em cada data eram calculadas em relação às diferenças verificadas na data da desforma, obtendo assim a variação dimensional em cada data. A Equação 18 foi utilizada para determinação na variação dimensional, em mm/m.

$$\varepsilon = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (18)$$

onde:

ε é a variação dimensional em mm/m

L_i é a leitura na idade final em mm

L_0 é a leitura efetuada após a desforma em mm

Em cada data em que foram realizadas as leituras para verificação da variação dimensional, também foram verificadas as variações de massa. A partir dos valores obtidos nas pesagens e inseridos na Equação 19, obtiveram-se as variações de massa, em porcentagem.

$$\Delta_{mi} = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \quad (19)$$

onde:

Δ_{mi} é a variação de massa

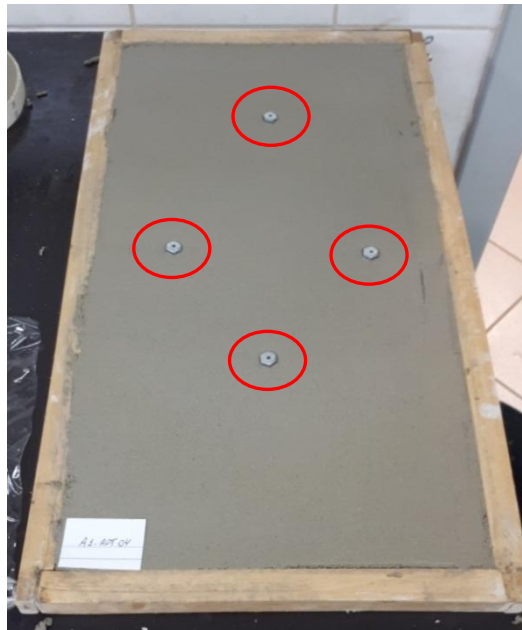
m_i é a massa na idade final, em gramas

m_0 é a massa após a desforma, em gramas

Também foi experimentada a medição da variação dimensional em placas de argamassa. Para isso, foram utilizadas as mesmas placas moldadas para o ensaio de permeabilidade à água, com dimensões de 265x500x25 mm. Logo após a moldagem, foram inseridos pinos metálicos na parte superior da placa, posicionados ortogonalmente nos sentidos longitudinal e transversal, conforme mostrado na Figura 22. A distância entre os pinos foi de 250 mm no sentido longitudinal da placa e 150 mm no sentido transversal. Estas medidas foram determinadas a partir das medidas encontradas na placa de gabarito, ou de zeragem, do equipamento. Os pinos metálicos foram feitos a partir de parafusos sextavados com comprimento de 18 mm na parte da rosca, sendo que esta parte ficou totalmente inserida na argamassa. Na parte superior, ou cabeça do parafuso, foram realizados furos de 2,0 mm de diâmetro em cada unidade, a fim de propiciar a medição da variação dimensional com o instrumento ilustrado na Figura 23.

Este equipamento é composto por um suporte com um relógio comparador digital acoplado a pinos e molas. Estes pinos eram inseridos em um gabarito metálico e o relógio zerado, em cada medição. Então os pinos eram inseridos nos furos realizados nos parafusos para medição da variação. As diferenças entre o valor da medição na amostra e no gabarito padrão, entre cada data, resultaram na variação dimensional medida.

Figura 22 – Posicionamento dos pinos para medição da variação dimensional nas placas.



Fonte: Autor.

Figura 23 – Equipamento para medição da variação dimensional nas placas.



Legenda: (1) Relógio comparador com suporte; (2) gabarito para marcação dos pinos na argamassa fresca; (3) gabarito padrão para a zeragem do relógio antes das medições

Fonte: Autor.

Conforme mostrado na Figura 23, o equipamento permite a verificação da variação dimensional em cinco distâncias padronizadas: 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm e 250 mm. Neste trabalho, os comprimentos utilizados foram de 250 mm para o sentido longitudinal e 150 mm para a distância transversal. A Figura 24 mostra em detalhe como era feito o apoio do equipamento para a medição das variações.

Figura 24 – Equipamento para medição da variação dimensional nas placas.



Acoplagem para medição



Detalhe dos pinos

Fonte: Autor.

Durante a execução das primeiras medições, imediatamente após a desforma, observou-se uma dificuldade para as medições nas placas. Após o procedimento para zerar o equipamento, quando instalado sobre os pinos das placas, se observava uma variação de medida decorrente das mínimas movimentações normais durante a leitura. Também foi constatado que após sucessivas medições em uma mesma posição, não haviam repetições nos valores encontrados, mostrando que estas medidas não eram confiáveis. Então, no mesmo dia da desforma, foram instalados pinos metálicos (parafusos) nas laterais das placas, possibilitando a leitura da variação dimensional com o mesmo equipamento empregado para as leituras nas barras. Os pinos foram fixados com cola epóxi e nas laterais das placas, conforme mostrado na Figura 25. Para cada placa, foram instalados quatro locais de medição (08 pinos). As datas de leituras foram as mesmas utilizadas para as barras: inicial (0), 24 horas, 7, 14, 21, e 28 dias após a desforma.

Figura 25 – Placas para variação dimensional com pinos laterais.



Colocação dos pinos laterais



Placa após a colocação dos pinos



Procedimento de leitura

Fonte: Autor.

As distâncias de colocação foram definidas de acordo com o limite do equipamento de medição, conforme mostrado na Figura 25. O primeiro ponto foi a 80 mm da borda da placa (pontos 1 e 4) e os pontos mais internos (2 e 3) ficaram distantes 100 mm da borda, que foi máximo possível para que o equipamento ficasse corretamente nivelado durante as medições.

O procedimento para o cálculo da variação dimensional das placas foi o mesmo adotado para as barras, porém com a mudança do valor de comprimento inicial das mediadas. Nas barras, o comprimento padrão entre as pontas dos pinos era de 250 mm e nas placas este comprimento foi de 265 mm, já que a colagem foi feita na superfície da borda da placa. A Equação 20 foi utilizada para o cálculo da variação dimensional em cada data.

$$\varepsilon_{\text{placa}} = \frac{L_i - L_0}{0,265} \quad (20)$$

onde:

ε é a variação dimensional em mm/m

L_i é a leitura na idade final em mm

L_0 é a leitura efetuada após a desforma em mm

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados com as argamassas conforme a metodologia apresentada no capítulo anterior. Primeiramente serão descritos os resultados dos ensaios no estado fresco, logo após o processo de mistura. Em seguida, serão apresentados os resultados dos ensaios no estado endurecido, realizados após a cura dos traços.

4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.1.1 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os resultados das determinações de densidade de massa fresca e do teor de ar incorporado estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Densidade no estado fresco e teor de ar incorporado.

Traço	Densidade fresca (kg/m ³)		Densidade teórica (kg/m ³)	Ar Incorporado (%)	
	Média	Desvio Padrão		Média	Desvio Padrão
A1-adt01	1939,63	8,47	2147,31	9,7	0,5
A2-adt01	1927,43	0,72	2150,75	10,4	0,0
A3-adt01	1907,33	1,36	2150,75	11,3	0,1
A4-adt01	1769,75	2,45	2147,31	17,6	0,3
A1-adt04	1776,71	1,34	2146,70	17,2	0,3
A2-adt04	1735,67	3,28	2150,14	19,3	0,3
A3-adt04	1655,75	3,22	2150,14	23,0	0,1
A4-adt04	1537,72	3,67	2146,70	28,4	0,3

Fonte: Autor.

A densidade de massa no estado fresco apresentou uma tendência de diminuição de valor conforme aumentou o módulo de finura das areias das misturas, devido ao aumento do teor de ar incorporado. Estas duas grandezas são vinculadas, visto que ambas são calculadas a partir da relação de massa e volume da mistura em um recipiente padronizado.

Considerando que todos os traços possuem a mesma proporção de agregados e água, a variação na densidade teórica foi pequena, somente devido às diferenças de massa específica das areias e dos teores de aditivo. Então, a determinação do teor de ar incorporado, teve relação direta com a variação da densidade no estado fresco.

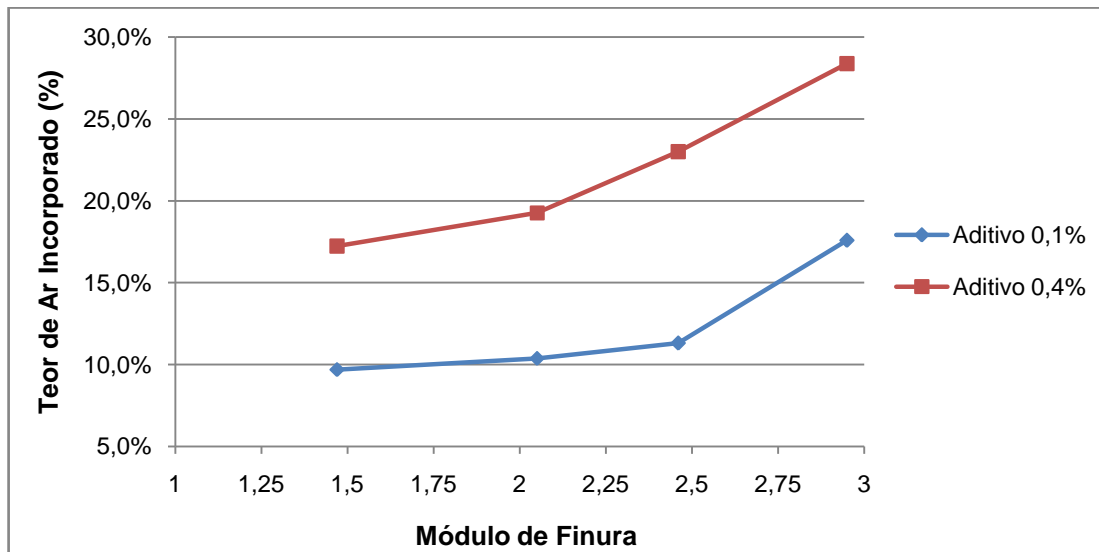
Com o aumento do módulo de finura, do traço A1-adt01 para A2-adt01, o teor de ar incorporado teve um aumento de 0,7%. Na mudança de areia do traço A1-adt04 para A2-adt04, o aumento do teor de ar incorporado foi de 2,1%. Entre os traços dosados com as areias 2 e 3, a influência da mudança do módulo de finura no teor de ar incorporado foi maior, sendo observado o aumento de 0,9% para as dosagens com menor teor de aditivo e 3,7% para as dosagens com maior de aditivo. O teor de ar aumentou mais significativamente no caso do aumento de módulo da das misturas com areia 3 para areia 4. No caso dos traços A3-adt01 e A4-adt01, o aumento foi de 6,3%. Para os traços A3-adt04 e A4-adt04, o incremento do valor de ar incorporado foi de 5,4%.

Ao se realizar a comparação do aumento do teor de aditivo incorporador de ar, para um mesmo traço, a variação foi mais significativa nas misturas compostas com as areias 3 e 4. Nestes traços, o aumento do teor de aditivo de 0,1% para 0,4% resultou em um aumento de 11,7% e 10,8% no teor de ar incorporado, respectivamente. Nos demais traços, dosados com as areias 1 e 2, o incremento no teor de aditivo resultou em um acréscimo de 7,5% e 8,9% no teor de ar incorporado.

Os resultados mostraram que o aumento do módulo de finura tornou as composições mais suscetíveis ao aumento do teor de ar incorporado como consequência do aumento da taxa de aditivo incorporador de ar.

O gráfico da Figura 26 apresenta a relação encontrada entre o módulo de finura da areia de cada traço e o teor de ar incorporado, para os dois teores de aditivos empregados.

Figura 26 – Relação módulo de finura *versus* teor de ar incorporado.



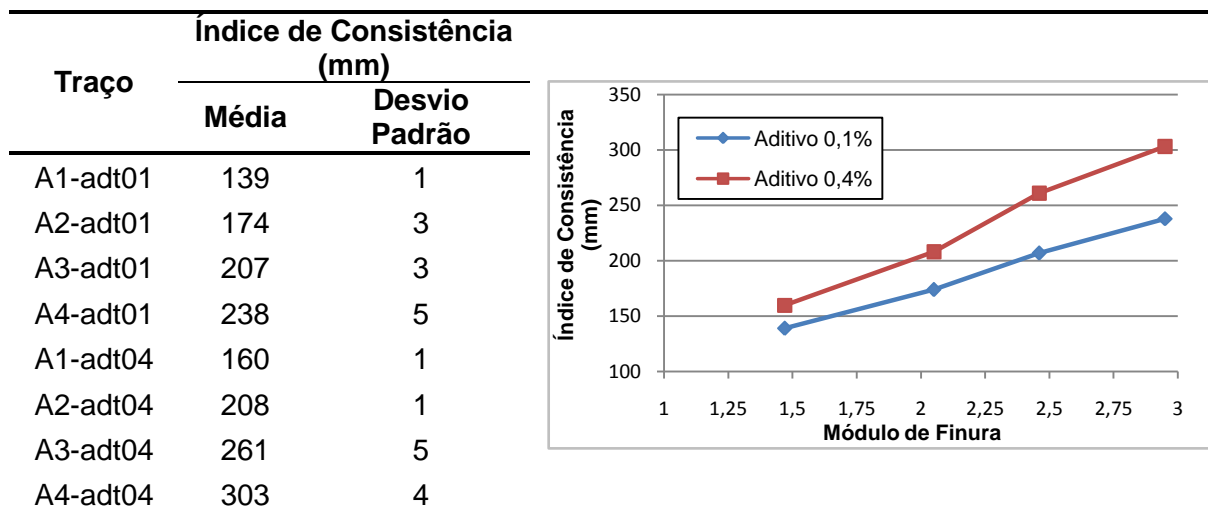
Fonte: Autor.

Independente do teor de aditivo empregado observou-se a tendência de aumento do teor de ar incorporado da mistura com o aumento do módulo de finura da areia. Este aumento pode estar relacionado à diminuição da superfície específica das areias conforme o aumento do módulo de finura. Esta hipótese sugere que quanto maior a superfície específica, menor é a quantidade de água livre na mistura para reagir com o aditivo incorporador de ar e, conseqüentemente, menor é a formação das bolhas de ar estáveis.

4.1.2 Determinação do índice de consistência

A determinação do índice de consistência foi realizada a partir da média dos resultados em três moldagens distintas. Os valores médios obtidos ensaios estão descritos na Figura 27, bem como, a relação da variação do índice de consistência com a variação do módulo de finura das areias de cada mistura.

Figura 27 – Tabela com índice de consistência e gráfico MF *versus* índice de consistência.



Fonte: Autor.

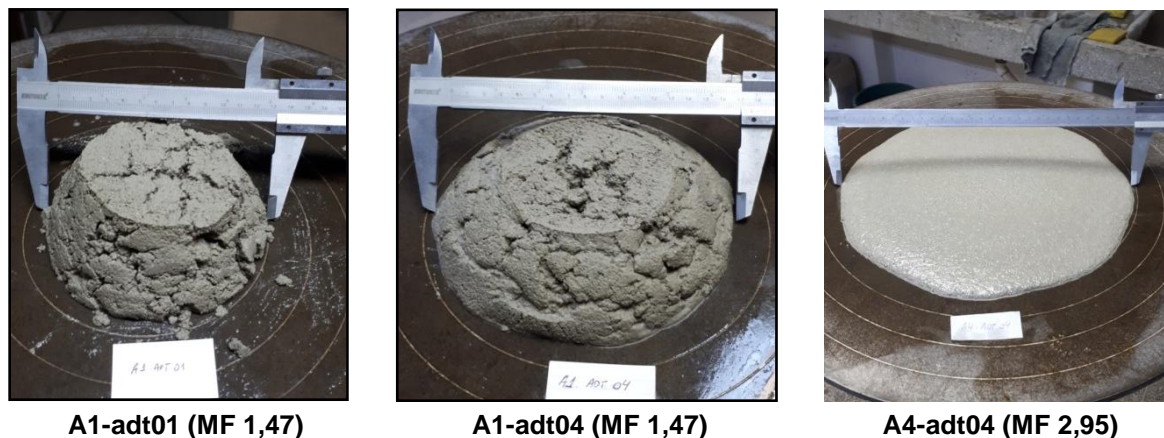
Os resultados evidenciaram um aumento do índice de consistência conforme o aumento do módulo de finura, para os traços dosados com os dois teores de aditivo. A taxa de aumento do índice de consistência foi um pouco superior para as argamassas dosadas com 0,4% de aditivo incorporador de ar do que para os traços dosados com o menor teor. Considerando os valores extremos de módulo de finura, nos traços com as areias 1 e 4, o aumento do índice de consistência foi de 99 mm para as misturas com 0,1% de aditivo e de 143 mm para as misturas com 0,4% de aditivo.

Na análise de traços com o mesmo tipo de areia, o aumento do teor de aditivo provocou o aumento da consistência em todos os casos. Este efeito pode ser atribuído ao fato de que o aumento do teor de aditivo e, conseqüentemente, da quantidade de bolhas na mistura, facilita a movimentação dos grãos de areia em contato com a pasta. O aumento do índice de consistência devido ao aumento na taxa de aditivo foi mais significativo em argamassas com maior módulo de finura. Os resultados evidenciaram diferenças de 21 mm para o aumento da taxa de aditivo nos traços dosados com a areia 1, 34 mm para os traços com areia 2, 54 mm para os traços com areia 3 e 65 mm para as dosagens com a areia 4. Pode-se concluir que argamassas com menor módulo de finura, sofrem menor influência do aumento do

teor de aditivo com relação à consistência, possivelmente pelo menor presença de água livre na mistura para a formação das bolhas de ar.

As argamassas A1-adt01 e A4-adt4, a primeira com menor módulo de finura e menor teor de aditivo e a segunda com maior módulo de finura e maior teor de aditivo, resultaram nos valores extremos entre a menor e a maior consistência. A argamassa A1-adt01 praticamente não apresentou espalhamento no mesa de consistência, com uma textura seca e conseqüentemente com baixa trabalhabilidade. Com o aumento do teor de aditivo, de 0,1% para 0,4%, esta argamassa já mostrou uma melhora significativa na coesão e na facilidade de espalhamento, devido a maior quantidade de bolhas de ar presentes na mistura, as quais diminuíram o atrito entre os grãos de areia. A argamassa A4-adt04 apresentou um grande espalhamento na mesa, mas também pouca coesão, devido à ausência de agregados com grãos mais finos. Na Figura 28 apresenta-se o aspecto visual de algumas das misturas após o ensaio.

Figura 28 – Argamassas após ensaio de índice de consistência.



Fonte: Autor.

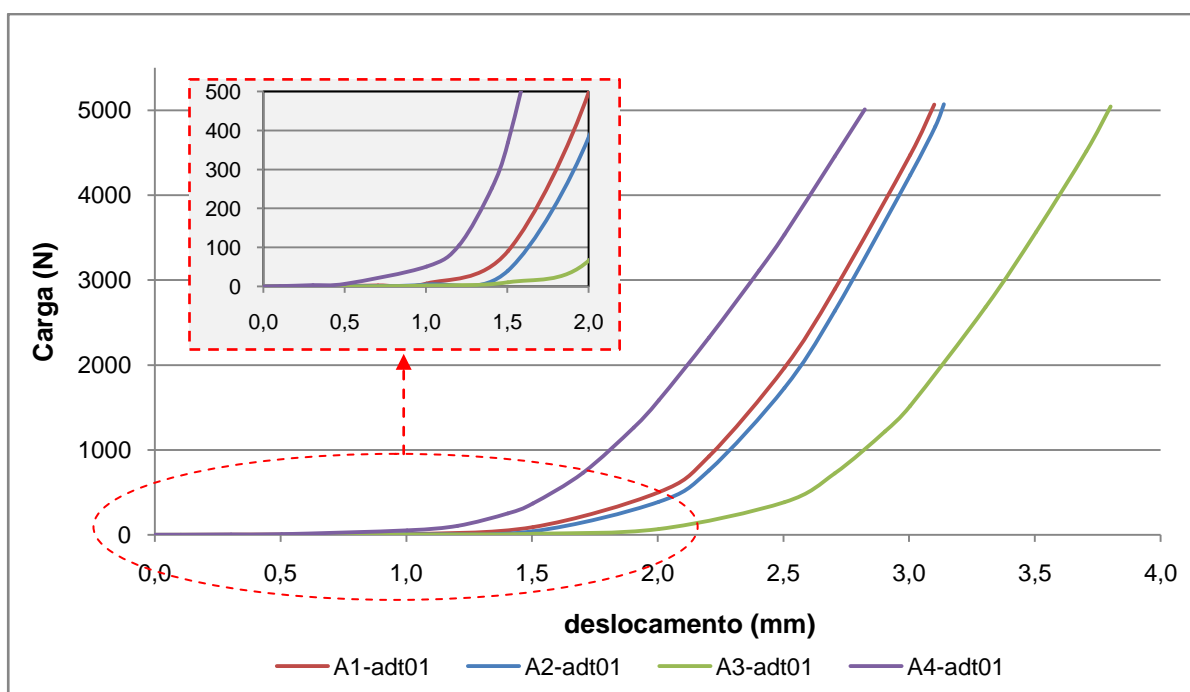
4.1.3 Squeeze flow

Os ensaios de squeeze flow foram realizados duas vezes para cada mistura. Os valores obtidos são resultantes da medição da força de aplicação em função do deslocamento. A velocidade de carregamento foi de 0,1 mm/s e o término do ensaio

foi estabelecido quando era atingida a carga máxima aplicável pelo equipamento, de 5 kN, ou o deslocamento máximo de 9 mm.

A Figura 29 apresenta gráfico dos resultados referentes às quatro misturas com a utilização de 0,1% de aditivo incorporador de ar. Nesta figura foi ampliada a porção inicial das curvas para facilitar a visualização.

Figura 29 – Squeeze flow – Traços com 0,1% de aditivo incorporador de ar.



Fonte: Autor.

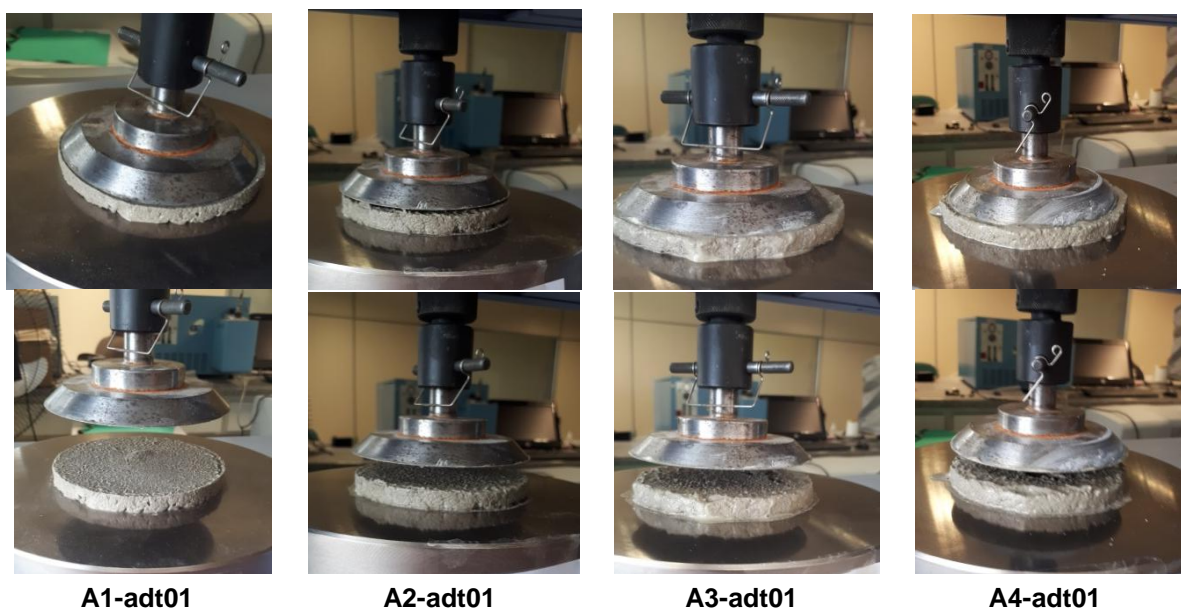
Entre os traços dosados com as areias 1, 2 e 3, foi observada uma tendência de melhora na trabalhabilidade, devido à menor necessidade de força necessária para a deformação da argamassa. Esta tendência não se repetiu com o aumento do módulo de finura do traço A3-adt01 para A4-adt01, já que no traço A4-adt01 foi observado um aumento significativo de força para o deslocamento e pouca deformação plástica. A argamassa A4-adt01, logo após 0,6 mm de deslocamento, necessitou a maior carga entre as demais para deformar a mesma medida, conforme se observa no detalhe da Figura 29. Esta situação pode estar relacionada à ausência de finos e a distribuição granulométrica descontínua, que ocasionou o

embricamento entre os grãos de areia já no começo da aplicação de carga. Para as argamassas dosadas com as areias 1, 2 e 3, observou-se uma zona de deformação plástica maior antes do embricamento. Esta zona de deformação foi observada até o valor próximo de 2,1 mm de deslocamento para os traços A1-adt01 e A2-adt01 e 2,6 mm para o traço A3-adt01.

A carga máxima de 5 kN foi atingida, para os traços A1-adt01, A2-adt01 e A3-adt01, com deslocamentos máximos de 3,04 mm, 3,16 mm e 3,80 mm, respectivamente. Nestes traços, o aumento do módulo de finura e a incorporação de ar promoveram uma melhora da trabalhabilidade, conforme também foi verificado no ensaio do índice de consistência. Porém, no traço A4-adt01, o deslocamento máximo foi de 2,82 mm. Este resultado comprova que devido a aproximação das partículas, o sistema foi conduzido a deformações que geraram forças restritivas ao fluxo.

Na Figura 30 apresentam-se as imagens obtidas durante a aplicação de carga e após a realização do ensaio, nos quatro traços com a adição de 0,1% de aditivo incorporador de ar.

Figura 30 – Amostras no ensaio squeeze flow – Aditivo 0,1%.

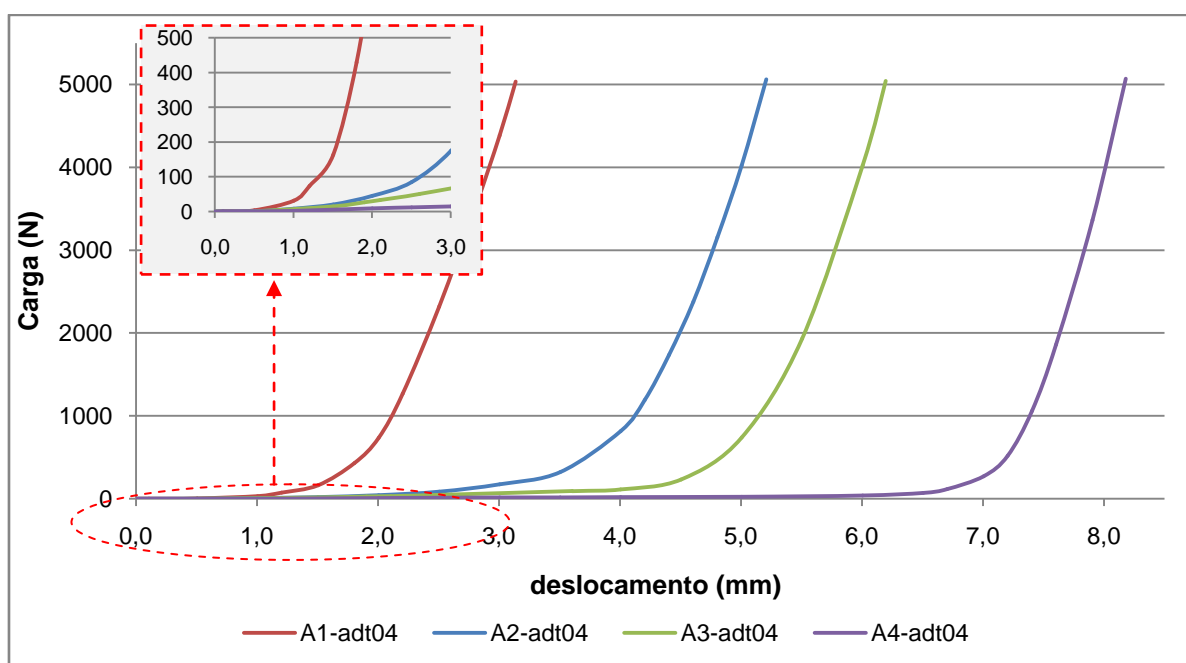


Fonte: Autor.

Através da observação da Figura 30, percebe-se a maior deformação ocorrida durante o ensaio na argamassa A3-adt01. Porém, ao término da aplicação da carga e retorno da placa superior à posição inicial, foi possível visualizar que parte do espalhamento ocorrido não permanecia, devido à alta coesão entre a pasta e os agregados desta mistura.

Na Figura 31 apresenta-se graficamente os resultados referentes às quatro misturas com a utilização de 0,4% de aditivo incorporador de ar. Nesta figura também foi destacada a porção inicial das curvas.

Figura 31 – Squeeze flow – Traços com 0,4% de aditivo incorporador de ar.



Fonte: Autor.

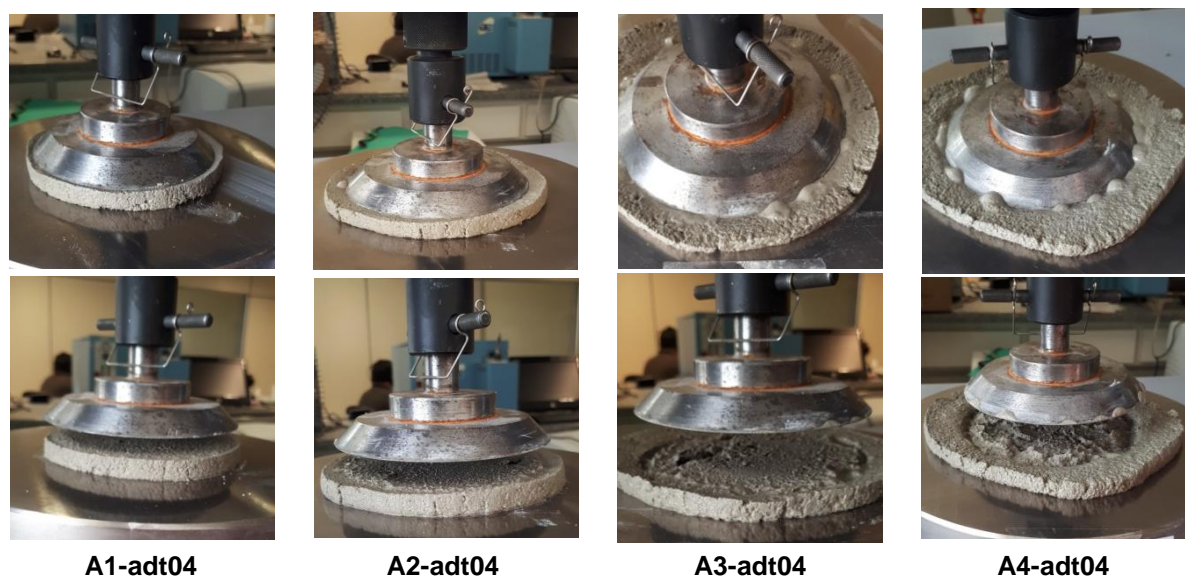
Nas argamassas dosadas com teor de aditivo incorporador de ar em 0,4%, foi observada, em todos os traços uma menor resistência ao carregamento de acordo com o aumento do módulo de finura, apontando a tendência de diminuição da coesão. A argamassa dosada com areia 4, que no caso do traço composto com 0,1% de aditivo gerou um embricamento com o menor deslocamento entre todos os traços, apresentou agora o maior deslocamento com o menor carga aplicada. Pode-se justificar este comportamento pelo fato de que o maior teor de aditivo gerou uma maior quantidade de bolhas, suficiente para “suprir” a ausência de finos e promover o deslizamento entre os grãos de areia.

É possível visualizar graficamente a grande fluidez obtida na argamassa com o maior módulo de finura, A4-adt04. A curva desta composição apresenta uma grande zona de deformação plástica, sendo que o embricamento foi observado quando o deslocamento do pistão atingiu 6,6 mm. Nas argamassas com areias 2 e 3, a diminuição na força requerida para sua deformação também pôde ser observada, porém, em uma taxa menor que a diferença entre os traços A3-adt4 e A4-adt04. Entre as misturas A1-adt04 e A2-adt04 também se pôde verificar uma significativa diminuição no deslocamento para o início da zona de embricamento, ou seja, o traço A1-adt04 apresentou um regime de deformação plástica significativamente menor do que o traço A2-adt04, chegando até o deslocamento de 1,6 mm, enquanto que para as misturas A2-adt04 e A3-adt04 o regime de deformação plástica foi até o deslocamento de 4,0 mm e 5,0 mm, aproximadamente.

Os deslocamentos máximos, com a carga de 5 kN, aumentaram de acordo com o aumento do módulo de finura, sendo de 3,14 mm para o traço A1-adt04, 5,20 mm para o traço A2-adt04, 6,19 mm para o traço A3-adt04 e 8,18 mm para o traço A4-adt04.

Na Figura 32 apresentam-se as imagens obtidas durante a aplicação de carga e após a realização do ensaio para os quatro traços com a adição de 0,4% de aditivo incorporador de ar.

Figura 32 – Amostras no ensaio squeeze flow – Aditivo 0,4%.

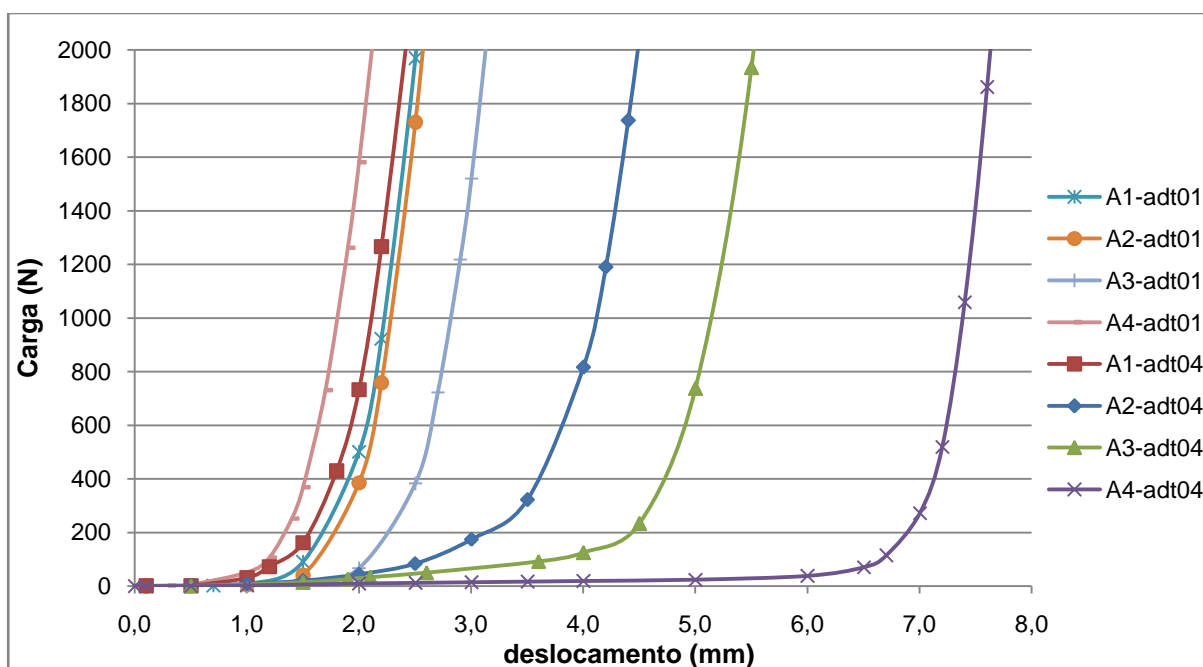


Fonte: Autor.

Após os ensaios, foi possível observar uma deformação mais acentuada do que as ocorridas nos traços com 0,1% de aditivo incorporador de ar, principalmente nos traços dosados com as areias 2, 3 e 4. Durante a aplicação das cargas, foram observadas bolhas na interface da amostra de argamassa com as placas da prensa, possivelmente, são as bolhas de ar do interior da argamassa que foram expulsas da mistura pela ação das forças decorrentes do carregamento.

Para a comparação dos resultados entre os dois teores de aditivos, em todos os traços, os resultados dos ensaios estão apresentados na Figura 33. Este gráfico foi apresentado com os deslocamentos até a carga de 2 kN, para melhor visualização das curvas.

Figura 33 – Resumo dos resultados Squeeze flow.



Fonte: Autor.

Comparando-se traços compostos com as mesmas areias, com o aumento do teor de aditivo incorporador de ar de 0,1% para 0,4%, foi observado o aumento na zona de deformação plástica, o que indica a diminuição da coesão.

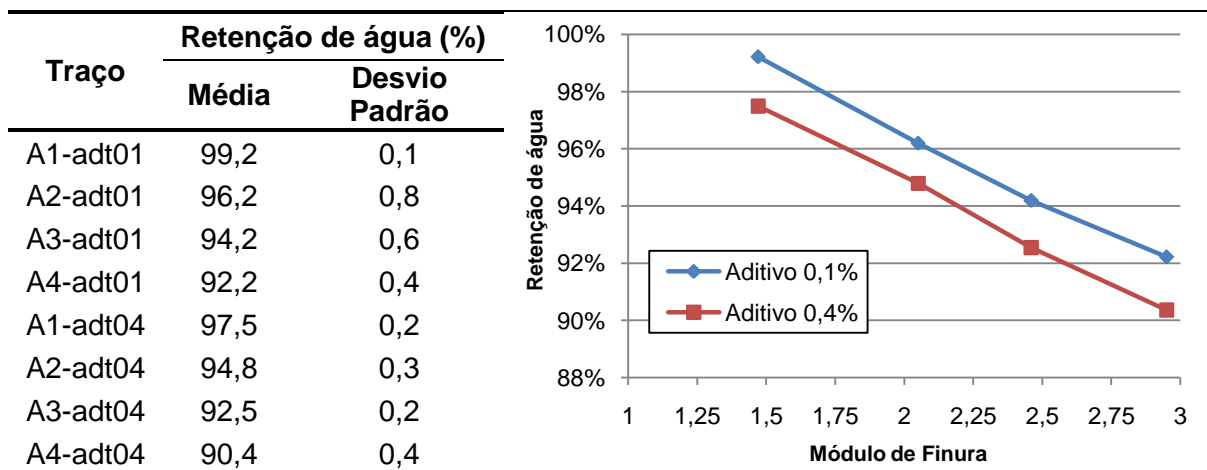
Contudo, esta lógica não se aplicou nos traços compostos com a areia de menor módulo de finura (areia 1). Nesta situação, a carga para deformação foi maior para o traço A1-adt04 do que para o traço A1-adt01. Este efeito pode ser atribuído a baixa trabalhabilidade, o que tornou mais difícil o processo de adensamento na

fôrma cilíndrica da amostra na máquina o ensaio, gerando vazios no interior da mistura.

4.1.4 Retenção de água

Os ensaios para determinação da retenção de água foram realizados três vezes para cada traço de argamassa. Os valores médios das retenções, em porcentagem, estão apresentados na Figura 34, bem como, o gráfico resultante da relação entre o módulo de finura da areia de cada traço com os resultados dos ensaios de retenção de água.

Figura 34 – Tabela com a retenção de água e gráfico MF *versus* retenção de água.



Fonte: Autor.

Os resultados mostraram, para os dois teores de aditivos incorporadores de ar, uma tendência de redução da retenção de água com o aumento do módulo de finura da areia. O aumento de perda de água pode ser atribuído a redução da quantidade de agregados mais finos na composição da areia, que reduz a superfície específica do agregado e aumenta a quantidade de água livre na mistura. As proporções de diminuição da retenção de água com o aumento do módulo de finura foram semelhantes para os traços dosados com o maior e menor teor de aditivo incorporador de ar.

Comparando a variação do teor de aditivo incorporador de ar de 0,1% para 0,4%, em traços com a mesma areia, constata-se que este aumento, para misturas

com qualquer uma das areias, provocou uma diminuição na retenção de água. Nos traços compostos com a areia 1 a redução na retenção de água foi de 1,7%. Já para os traços dosados com as areias 2, 3 e 4 a redução na retenção foi de 1,4%, 1,7% e 1,8%, respectivamente. As diferenças de redução da retenção de água, com o aumento do teor de aditivo incorporador de ar para traços de mesmas composições, não foram alteradas de forma significativa pela variação do módulo de finura das areias.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.2.1 Resistência à tração na flexão e à compressão

Os ensaios de tração na flexão e compressão foram realizados aos 7 e 28 dias de cura. Para cada traço, foram ensaiados três corpos de prova prismáticos 4x4x16 cm à flexão e, com as seis porções resultantes do processo do ensaio de tração na flexão, foram realizados os ensaios à compressão, com aplicação de carga em uma área de 16 cm². Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 30, em valores médios e com o coeficiente de variação obtido em cada ensaio, resultante da razão entre o desvio padrão e a média dos resultados entre os corpos de prova da amostra, em porcentagem.

Tabela 30 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão e compressão.

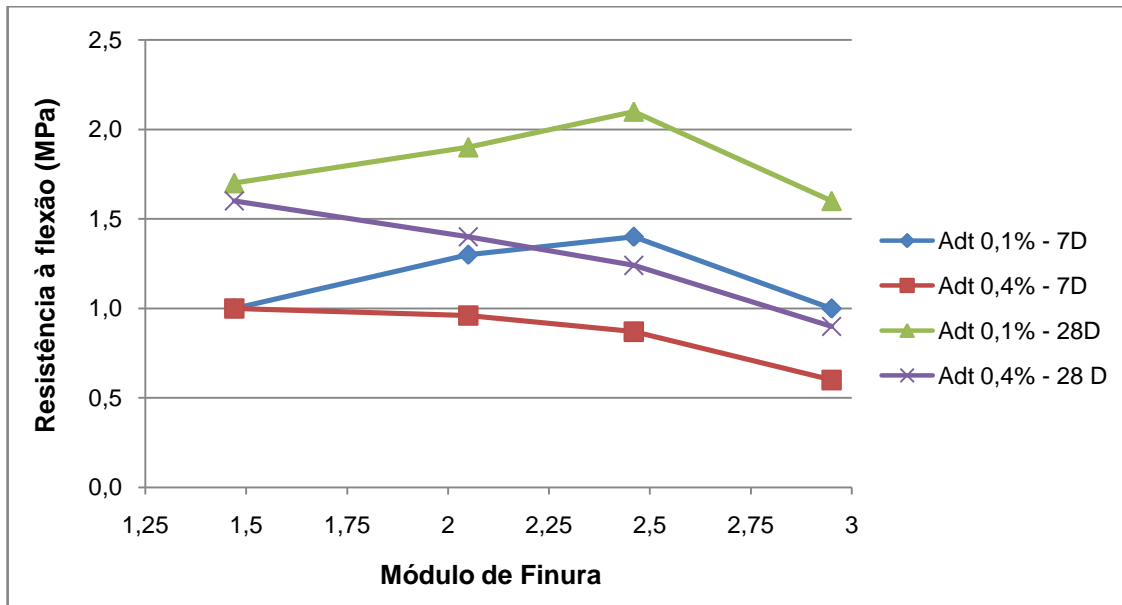
Traço	Tração na flexão				Compressão			
	07 dias (MPa)	C.V.* (%)	28 dias (MPa)	C.V.* (%)	07 dias (MPa)	C.V.* (%)	28 dias (MPa)	C.V.* (%)
A1-adt01	1,0	10,9	1,7	5,7	3,3	8,0	5,8	3,3
A2-adt01	1,3	5,1	1,9	5,4	3,7	6,4	6,1	3,8
A3-adt01	1,4	7,4	2,1	7,6	4,0	6,5	6,4	3,1
A4-adt01	1,0	6,6	1,6	10,4	2,5	6,2	4,2	2,5
A1-adt04	1,0	7,0	1,6	5,2	2,6	3,4	3,7	4,6
A2-adt04	1,0	3,5	1,4	7,9	2,0	10,1	3,4	6,7
A3-adt04	0,9	2,2	1,2	3,1	1,5	7,2	2,4	2,1
A4-adt04	0,6	16,8	0,9	15,1	0,8	17,6	1,5	4,4

* Coeficiente de variação.

Fonte: Autor.

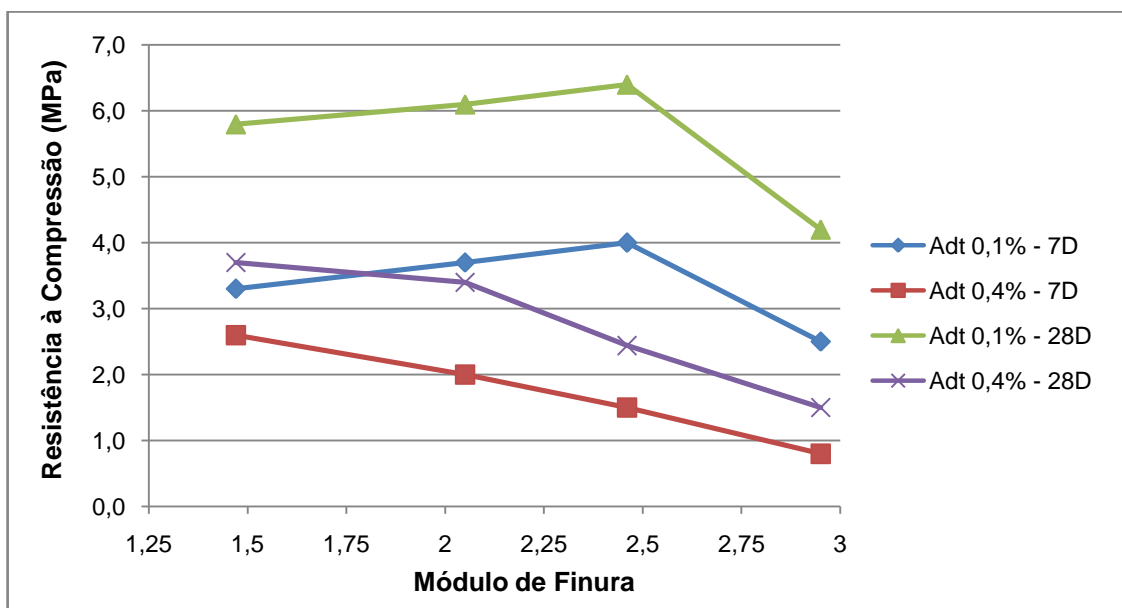
Os gráficos das Figuras 35 e 36 apresentam os resultados das relações da variação do módulo de finura com as resistências verificadas nos ensaios, para os dois teores de aditivos empregados neste trabalho.

Figura 35 – Módulo de finura *versus* resistência à tração na flexão.



Fonte: Autor.

Figura 36 – Módulo de finura *versus* resistência à compressão.



Fonte: Autor.

Os valores encontrados mantiveram um padrão de perfil de resistência entre os dois ensaios, tanto para a tração na flexão quanto para a compressão, bem como, também foi verificado o mesmo padrão para os ensaios aos sete e aos vinte e oito dias de cura. Porém, ao se comparar os resultados de resistência em relação ao teor de aditivo, o perfil de variação da resistência foi diferente entre os dois teores.

Nas argamassas A1-adt01, A2-adt01 e A3-Adt01, o aumento do módulo de finura das areias causou um aumento nos valores de resistência, possivelmente devido a melhor distribuição granulométrica das areias 2 e 3, que proporcionaram um preenchimento maior dos vazios com a distribuição mais contínua dos grãos. Esta justificativa também pode ser aplicada para explicar o decréscimo significativo entre os traços A3-adt01 e A4-adt1.

Nas argamassas dosadas com 0,4% de aditivo incorporador de ar, foi observado um decréscimo no valor de resistência com o aumento do módulo de finura, em todos os traços. A causa para este decréscimo de resistência pode ser atribuída à maior incorporação de bolhas de ar na mistura, as quais podem ter proporcionado um maior afastamento entre os grãos e o conseqüente aumento na fragilidade das argamassas. Mesmo na comparação com os traços A2-adt04 e A3-adt04, dosados com areias de melhor distribuição granulométrica, o incremento de bolhas de ar na composição foi suficiente para ocasionar a diminuição das resistências à flexão e à compressão, superando a ação positiva da melhor distribuição granulométrica. Estes resultados convergem com a conclusão feita por Romano *et al.* (2007), o qual constatou que o aumento na quantidade de poros, causado pelo aumento do teor de ar incorporado, reduziu significativamente os valores de tensão de ruptura das argamassas testadas.

4.2.2 Resistência de aderência à tração

Para cada traço de argamassa, foi realizada a aplicação de argamassa sobre substrato padrão de concreto. A espessura do revestimento variou entre 18 mm e 20 mm. Após 28 dias de cura em temperatura e umidade ambiente, foram realizados os ensaios de aderência à tração. Em cada substrato foram realizados dez pontos de arrancamento, conforme preconiza a NBR 15258:2005. Os resultados de resistência média, desvio padrão e forma de ruptura predominante, bem como, a classificação quanto a resistência de aderência estão apresentados na Tabela 31.

Vale ressaltar que as rupturas predominantes resultantes dos ensaios foram duas: na interface argamassa-substrato (S/A) e na camada de argamassa (A). Com relação aos valores obtidos nos ensaios, a NBR 13281:2005 classifica as argamassas de revestimento, com relação à resistência potencial de aderência à tração, nas classes A1 ($< 0,20$ MPa), A2 ($\geq 0,20$ MPa) ou A3 ($\geq 0,30$ MPa).

Tabela 31 – Resultados dos ensaios de aderência à tração.

Traço	Resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Ruptura predominante	Classe (NBR)
A1-adt01	0,22	0,04	S/A	A2
A2-adt01	0,37	0,04	A	A3
A3-adt01	0,41	0,03	A	A3
A4-adt01	0,37	0,04	A	A3
A1-adt04	0,24	0,03	S/A	A2
A2-adt04	0,34	0,04	A	A3
A3-adt04	0,31	0,04	A	A3
A4-adt04	0,22	0,03	A	A2

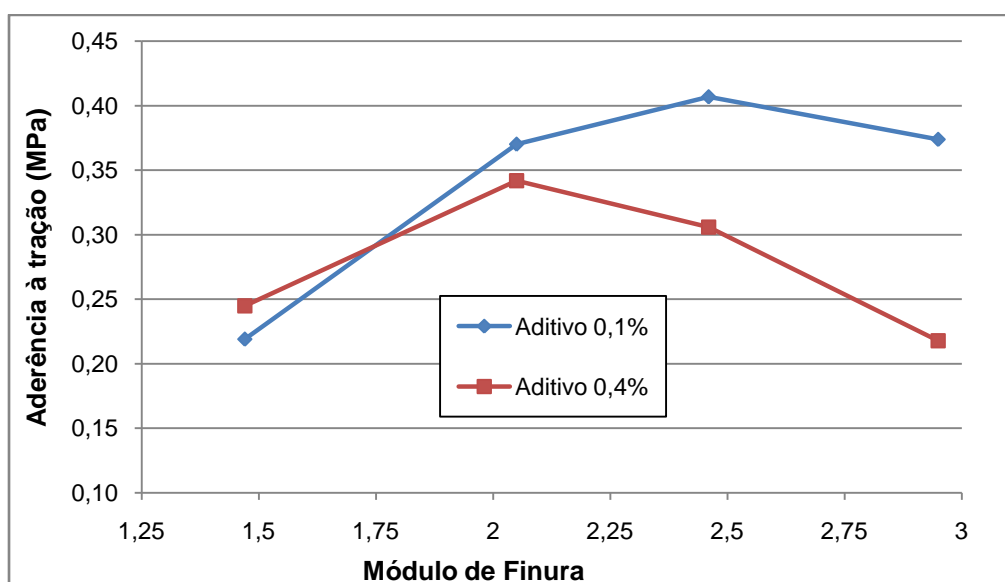
Fonte: Autor.

As rupturas analisadas foram na maioria dos casos do tipo coesiva, na camada de argamassa. Nos traços A1-adt01 e A1-adt04 foi verificada a ocorrência de ruptura predominante do tipo adesiva, na interface substrato-argamassa de revestimento, a qual ocorreu em 8 dos 10 corpos de prova ensaiados, sendo que dois apresentaram ruptura na camada de argamassa. Esta forma de ruptura pode ter sido ocasionada pelo fato destas argamassas apresentarem uma alta capacidade de retenção de água, impedindo a perda de água para o substrato. No caso do traço A1-adt01, outro fator que pode contribuir para esta forma de ruptura foi a dificuldade para o espalhamento da argamassa fresca sobre o substrato durante a aplicação, devido à sua baixa trabalhabilidade. Este fator pode ter gerado falhas na camada de argamassa, ocasionado espaços vazios entre a argamassa e o substrato. Nos demais casos, a forma de ruptura na camada de argamassa mostrou a capacidade que todas as misturas possuem de promover uma boa ancoragem no substrato.

A forma de ruptura observada nas placas revestidas com argamassas com areias de menor módulo converge com a conclusão de Isaia (2010), na qual afirma que a capacidade de aderência das argamassas, depende, além de outros fatores, da granulometria das areias. Argamassas com altos teores de areia fina prejudicam a aderência ao substrato, uma vez que os finos tamponam os poros da base e prejudicam o travamento da argamassa.

O gráfico da Figura 37 mostra a relação entre a variação do módulo de finura e resistência de aderência para os traços com os teores de aditivo incorporador de ar em 0,1% e 0,4%.

Figura 37 – Módulo de finura *versus* aderência à tração.



Fonte: Autor.

O perfil de variação da resistência de aderência à tração em relação à variação do módulo de finura da areia foi semelhante ao perfil obtido nos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão.

Porém, entre as misturas compostas com as areias 1 e 2, com dos dois teores de aditivo incorporador de ar, a diferença de resistência de aderência foi mais significativa do que a diferença de resistência entre as composições com estas areias nos ensaios de flexão e compressão. A causa da maior diferença entre os valores de aderência destes traços pode estar relacionada à forma de ruptura no

ensaio de aderência, pois no caso das misturas A1-adt01 e A1-adt4, a ruptura predominante se deu na interface substrato-argamassa, indicando uma deficiência de ancoragem da argamassa no substrato, enquanto que nas demais composições, a ruptura predominante foi na camada de argamassa, indicando uma relação entre a resistência mecânica da argamassa com a sua resistência de aderência. A partir dos pontos que representam os módulos das areias 2, 3 e 4, os perfis das curvas de variação da resistência de aderência em função da variação do módulo de finura, são semelhantes às variações da resistência à compressão, indicando a relação direta entre estas duas grandezas.

Nos traços com 0,1% de aditivo incorporador de ar, o aumento de resistência de aderência entre os traços A2-adt01 e A3-adt01 ocorreu devido a melhor distribuição granulométrica da areia 3 até o ponto de modificação da areia entre os traços A3-adt01 e A4-adt01, onde foi verificada uma queda significativa na resistência de aderência, provavelmente causada pelo alto teor de ar incorporado, alta porosidade e conseqüente baixa resistência interna.

Esta situação se repetiu para os traços com maior teor de aditivo, com a diferença que o decréscimo de resistência já ocorreu na mudança da areia entre os traços A2-adt04 e A3-adt04. Esta situação pode ser explicada, da mesma forma que nas resistências à tração na flexão e compressão, o maior número de bolhas de ar na argamassa conduziu a um afastamento dos grãos de areia e a fragilização do material. Este motivo, somado a uma distribuição granulométrica descontínua, também pode explicar a queda mais acentuada de resistência na mudança da areias entre os traços A3-adt04 para A4-adt04.

Analisando a variação do módulo de finura para um mesmo teor de ar incorporado, com a variação entre os traços A3-adt04 e A4-adt04 foram observados maiores decréscimos de resistência de aderência do que entre as argamassas dosadas com menores teores de aditivo, A3-adt01 e A4-adt01. A partir destes resultados, pode-se concluir que argamassas dosadas com maiores teores de aditivos incorporadores de ar são mais vulneráveis a variações de resistência de aderência devido a alterações no módulo de finura das areias.

4.2.3 Absorção de água por imersão e índice de vazios

A Tabela 32 apresenta os resultados das determinações da absorção de água por imersão e do índice de vazios. Para o cálculo destes valores, foram utilizados três corpos de prova prismáticos 4x4x16 cm para cada traço de argamassa.

Tabela 32 – Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão e índice de vazios.

Traço	Absorção (%)		Índice de Vazios – I_v (%)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
A1-adt01	18,9	0,3	32,1	0,4
A2-adt01	16,8	0,5	29,7	0,6
A3-adt01	17,5	0,5	30,5	0,7
A4-adt01	19,8	0,2	33,0	0,3
A1-adt04	24,1	1,3	37,4	1,3
A2-adt04	26,2	0,8	39,5	0,8
A3-adt04	28,7	1,5	41,8	1,7
A4-adt04	30,9	1,5	43,3	1,7

Fonte: Autor.

Os resultados mostraram que com o aumento do módulo de finura ocorre o aumento dos valores de absorção de água e índice de vazios, exceto para o caso da argamassa A1-adt01, a qual apresentou valor de absorção e índice de vazios superior às argamassas com as areias 2 e 3, com o mesmo teor de aditivo. A crescente dos valores observados entre os traços A2-adt01, A3-adt01, A4-adt01 e para todos os traços dosados com maiores teores de aditivo, pode estar relacionada ao aumento do teor de ar incorporado, que ocasionou uma estrutura mais porosa no estado endurecido. Para o caso da argamassa A1-adt01, a porosidade foi influenciada por vazios decorrentes da falta de adensamento na moldagem. Este fato justifica o valor de absorção e índice de vazios superior aos traços A2-adt01 e A3-adt01.

Com relação ao aumento da dosagem de aditivo incorporador de ar, em todos os casos foi verificado o aumento dos valores e absorção e de índice de vazios das amostras, com valores próximos a 10% de aumento.

4.2.4 Absorção de água por capilaridade

Os ensaios de absorção de água por capilaridade e determinação do coeficiente de capilaridade foram realizados, para cada traço de argamassa, em três

corpos de prova prismáticos 10x10x16 cm, aos vinte e oito dias de cura. Os resultados dos ensaios de absorção de água em 10 minutos e 90 minutos, além do coeficiente de capilaridade são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade.

Traço	Absorção em 10min. $A_{10}(\text{g/cm}^2)$	Absorção em 90min. $A_{90}(\text{g/cm}^2)$	Coeficiente de capilaridade – $C(\text{g/dm}^2.\text{min}^{1/2})$	
			Médio	Desvio padrão
A1-adt01	0,15	0,39	3,97	0,40
A2-adt01	0,09	0,28	3,14	0,42
A3-adt01	0,09	0,27	2,89	0,45
A4-adt01	0,04	0,15	1,82	0,37
A1-adt04	0,13	0,44	4,95	0,32
A2-adt04	0,10	0,35	3,91	0,38
A3-adt04	0,06	0,27	3,76	0,16
A4-adt04	0,14	0,41	4,32	0,35

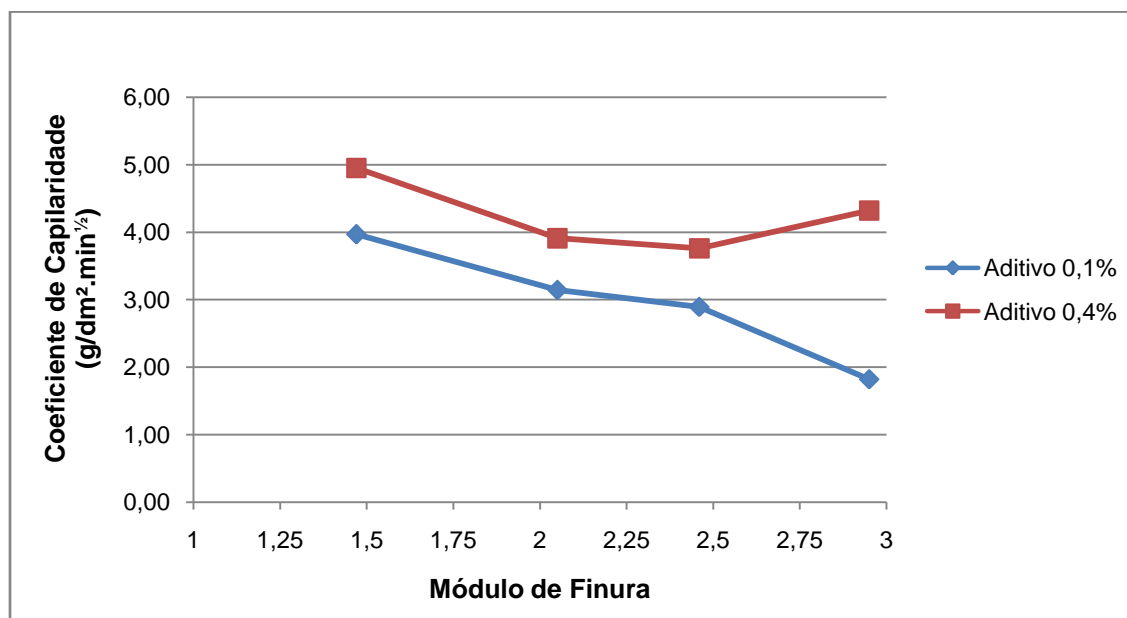
Fonte: Autor.

Os valores da absorção de água em cada tempo, bem como o coeficiente de capilaridade apontam para uma tendência de diminuição da absorção com o aumento do módulo de finura. Este padrão se repetiu para os dois teores de incorporador de ar, exceto na comparação entre os traços A3-adt04 e A4-adt04, onde foi verificado o aumento da absorção capilar com o aumento do módulo de finura das areias. Com o aumento do módulo de finura e o conseqüente aumento dos teores de ar incorporado, a redução da absorção capilar pode ter sido reduzida pela presença das bolhas de ar, as quais interromperam a conexão e conseqüente passagem de líquido pelos canais capilares.

Entre dos traços dosados com as areias de melhor distribuição granulométrica, areias 2 e 3, a redução da absorção capilar foi menor, para os dois teores de aditivo. Sendo assim, traços dosados com areias com melhor distribuição granulométrica, são menos suscetíveis às variações da absorção por capilaridade em decorrência da variação do módulo de finura.

A tendência de diminuição da absorção capilar com o aumento do módulo de finura pode se melhor visualizada no gráfico da Figura 38.

Figura 38 – Coeficiente de capilaridade *versus* módulo de finura.



Fonte: Autor.

Os traços dosados com maior teor de aditivo incorporador de ar apresentaram os maiores coeficientes de capilaridade. Durante os aumentos de módulo de finuras das areias 1, 2 e 3, o comportamento de decréscimo do coeficiente de capilaridade com o aumento do módulo de finura foi semelhante para os traços com ambos os teores de aditivo incorporador. Na mudança de areia entre os traços A3-adt01 e A4-adt01, a queda no valor do coeficiente de capilaridade foi mais significativo.

Contudo, entre os traços A3-adt04 e A4-adt04, a grande quantidade de ar incorporado na mistura A4-adt04 provocou um aumento da absorção capilar. Esta modificação na tendência de comportamento pode estar ligada ao fato de que a ausência de agregado mais fino e grande quantidade das bolhas de ar incorporadas pelo aditivo propiciou a aglutinação de bolhas menores, formando bolhas maiores e com menor pressão interna. Assim, após o endurecimento da mistura, os poros resultantes deste processo se interconectaram formando canais que permitiram a percolação da água com maior facilidade.

Na Tabela 34 apresenta-se a comparação entre os resultados encontrados neste trabalho com os resultados encontrado por Jantsch (2015), em um estudo feito

com argamassas industrializadas estabilizadas, além da classificação normativa da na NBR 13281:2005.

Tabela 34 – Comparação de resultados – Coeficiente de absorção por capilaridade.

Referência	Traço / Tipo de argamassa	Coeficiente de absorção [kg/(m ² x t ^{1/2})]	Classificação (NBR 13281:2005)
Este estudo	A1-adt01	3,33	C3 (2 - 4)
	A2-adt01	2,85	C3 (2 - 4)
	A3-adt01	2,53	C3 (2 - 4)
	A4-adt01	1,59	C2 (1 – 2,5)
	A1-adt04	4,48	C4 (3 - 7)
	A2-adt04	3,94	C4 (3 - 7)
	A3-adt04	3,33	C3 (2 - 4)
	A4-adt04	4,29	C4 (3 - 7)
Jantsch (2015)	Estabilizada 36 hs	0,5	C1 (≤ 1,5)
	Estabilizada 72 hs	1,1	C1 (≤ 1,5)

Fonte: Autor.

Analisando os valores encontrados por Jantsch (2015), os resultados de coeficiente de capilaridade para as duas argamassas estabilizadas produzidas com areia natural foram inferiores aos valores encontrados neste trabalho. Esta redução pode ser atribuída à formação de poros isolados pelo aditivo incorporador de ar em combinação com o aditivo estabilizador de hidratação. Com relação à classificação normativa, todas as argamassas apresentaram valores dentro dos parâmetros médios da norma, que compreende a escala de C1 para coeficientes inferiores ou iguais a 1,5, até C6 para coeficientes maiores que 10.

4.2.5 Permeabilidade à água

Durante a execução dos ensaios de permeabilidade à água, o consumo de água no cachimbo com escala para leitura ocorreu de forma mais rápida que o normalmente medido em argamassas comerciais. Jantsch (2015), ao realizar este ensaio em argamassas estabilizadas de 36 e 72 horas, verificou a duração de tempo de 900 minutos para que a água fosse totalmente permeada na placa de argamassa.

Neste trabalho, o menor tempo verificado, para a argamassa mais permeável, foi de dez minutos. Então, foi padronizado o tempo de dez minutos para as leituras referentes aos cálculos de coeficiente de absorção e a absorção de água, os quais estão apresentados na Tabela 35, bem como o desvio padrão resultante das variações na execução das leituras.

Tabela 35 – Resultados dos ensaios de permeabilidade à água (tempo 10 min.).

Traço	Volume percolado (ml)		Coeficiente de absorção [kg/(m ² x t ^{1/2})]	Absorção de água (kg/m ²)
	Média	Desvio padrão		
A1-adt01	2,53	0,14	13,67	2,28
A2-adt01	1,35	0,12	7,31	1,22
A3-adt01	1,98	0,10	10,69	1,78
A4-adt01	3,49	0,02	18,88	3,15
A1-adt04	2,10	0,07	11,37	1,90
A2-adt04	1,60	0,08	8,66	1,44
A3-adt04	3,38	0,14	18,27	3,05
A4-adt04	3,85	0,14	20,85	3,47

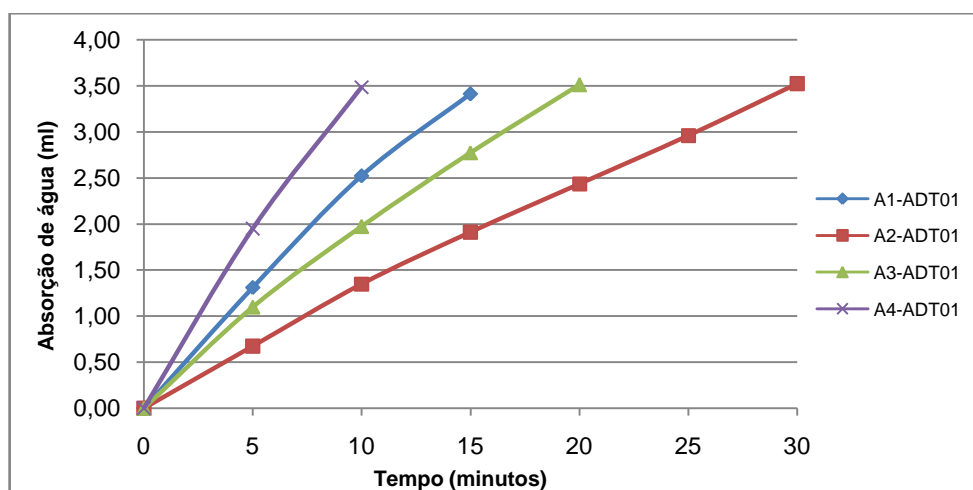
Fonte: Autor.

O perfil de variação de permeabilidade à água foi o mesmo para as argamassas dosadas com os dois teores de aditivo incorporador de ar, sendo que, nas argamassas compostas com maior teor de aditivo, foram obtidos coeficientes maiores do que nas argamassas dosadas com menores teores. A justificativa para o aumento da permeabilidade pode ser atribuído ao aumento do teor de incorporador de ar que, por sua vez, propiciou o aumento na porosidade, possibilitando que uma maior quantidade de água infiltrasse na placa de argamassa. Este comportamento se repetiu para quase todos os traços, exceto na comparação entre os traços A1-adt01 e A1-adt04, pois na placa moldada com o traço A1-adt01, os vazios decorrentes da falta de fluidez e coesão da argamassa fresca geraram falhas internas, por onde a água infiltrou. Por este motivo, com o aumento do teor de aditivo incorporador de ar, conseguiu-se a eliminação destes vazios, gerando uma redução da permeabilidade à água.

Em relação às variações dos módulos de finura, a permeabilidade à água foi reduzida com o aumento do módulo de finura das argamassas dosadas com a areia 1 para as argamassas dosadas com a areia 2, em ambos os teores de aditivo. Nesta situação, apesar de haver um aumento do teor de ar incorporado atrelado ao aumento do MF, a melhor distribuição granulométrica das areias dos traços A2-adt01 e A2-ad04 resultaram em agregados das placas de argamassa com maior área de contato entre si, dificultando a percolação da água. A partir do aumento do módulo de finura entre as areias 3 e 4, foi verificado o aumento da permeabilidade a água, pois com o aumento do módulo de finura e conseqüente aumento do teor de ar incorporado, o afastamento entre os grãos propiciaram a maior passagem da água.

O gráfico da Figura 39 apresenta as relações entre a absorção de água em função do tempo, para os traços dosados com 0,1% de aditivo incorporador de ar. As curvas obtidas foram resultantes das médias das leituras nos cachimbos aplicados em cada placa. Os tempos de leitura, para cada traço, foram medidos até o consumo de água atingir a marca mínima da escala, que era de 3,5ml.

Figura 39 – Permeabilidade a água – Aditivo 0,1%.



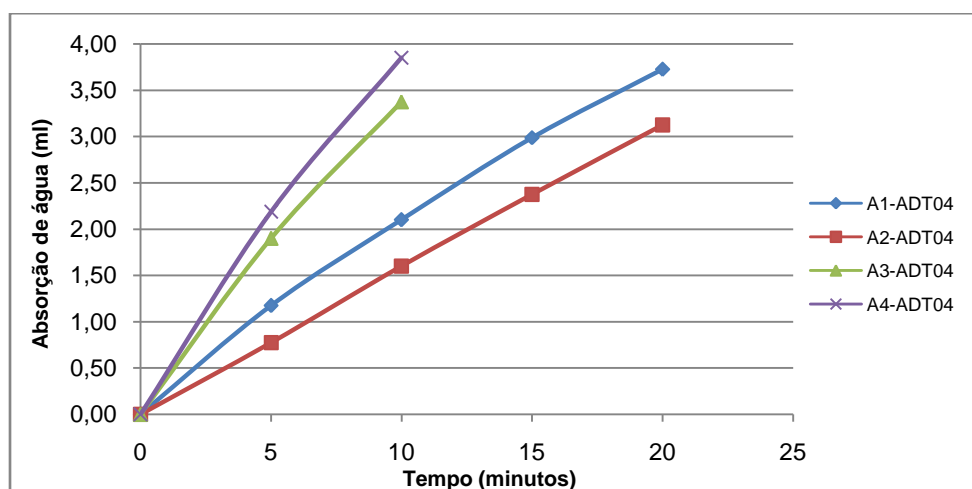
Fonte: Autor.

As curvas resultantes das leituras mostram a grande redução de permeabilidade à água obtida com o aumento do módulo de finura da areia 1 para a areia 2. No caso do traço A1-adt01, aos 15 minutos de ensaio já foi verificado o

consumo máximo possível de ser medido. Para os traços A2-adt01 e A3-adt01, os consumos máximos foram medidos aos 30 e 20 minutos, respectivamente, mostrando que com o aumento do módulo de finura, a permeabilidade a água também foi aumentada. Na análise do aumento do módulo de finura do traço A3-adt01 para o traço A4-adt01, o aumento da permeabilidade à água foi mais significativo, sendo que na placa produzida com o traço A4-adt01 o consumo total da água ocorreu aos 10 minutos de ensaio. A alta permeabilidade do traço A4-adt01 pode estar relacionada à alta porosidade decorrente da composição granulométrica descontínua e com grãos de areia de grande diâmetro.

O gráfico da Figura 40 é resultante das leituras realizadas nos traços dosados com 0,4% de aditivo. As leituras foram realizadas até a marca de 3,5ml de consumo para os traços A1-adt04 e A2-adt04. Para as misturas A3-adt04 e A4-adt04, foram empregados cachimbos com escala máxima de 4,0 ml, visto que nesta situação ocorreram os maiores consumos dentre todas as dosagens.

Figura 40 – Permeabilidade a água – Aditivo 0,4%.



Fonte: Autor.

Os resultados dos ensaios com teor de aditivo incorporador de ar em 0,4%, comprovaram a maior permeabilidade destas composições com relação aos traços dosados com o menor teor de aditivo, exceto no caso dos traços dosados com areia 1. O traço A2-adt04, por exemplo, teve o consumo máximo de água aos 20 minutos de ensaio, enquanto que no traço A2-adt01, com o menor teor de aditivo, o ensaio foi realizado até 30 minutos.

A redução da permeabilidade à água observada entre os traços A1-adt04 e A2-adt04 foi menor do que a obtida nos ensaios com as dosagens com menor teor de aditivo. Já o aumento da permeabilidade à água, observado entre traços A2-adt04 e A3-adt04, os quais são compostos com as areias de melhor distribuição granulométrica, foi mais significativa do que a diferença obtida nos ensaios com os traços dosados com menor teor de incorporador de ar. Pode-se dizer que as argamassas com maiores teores de aditivos incorporadores de ar em sua composição sofreram maiores variações de permeabilidade à água devido à variação do módulo de finura do que as argamassas dosadas com menores teores de aditivo.

A argamassa A4-adt04 apresentou o maior consumo de água em um menor tempo dentre todos os traços, devido ao seu alto teor de ar incorporado e baixo grau de compacidade dos agregados.

Na Tabela 36 apresenta-se a comparação entre os valores de coeficiente de absorção verificados nas amostras e os resultados encontrados por outros autores.

Tabela 36 – Comparativo de resultados – Coeficientes de absorção.

Referência	Traço / Tipo de argamassa	Coeficiente de absorção [kg/(m ² x t ^{1/2})]
Este estudo	A1-adt01	13,67
	A2-adt01	7,31
	A3-adt01	10,69
	A4-adt01	18,88
	A1-adt04	11,37
	A2-adt04	8,66
	A3-adt04	18,27
	A4-adt04	20,85
Duarte (2009)	Reboco exterior tradicional	< 1,5
Jantsch (2015)	Estabilizada 36 hs	0,8
	Estabilizada 72 hs	3,9
Flores-Colen (2009)	Reboco exterior tradicional	0,2 – 0,4
Gonçalves (2010)	Argamassa tradicional multicamada	0,3 – 2,68

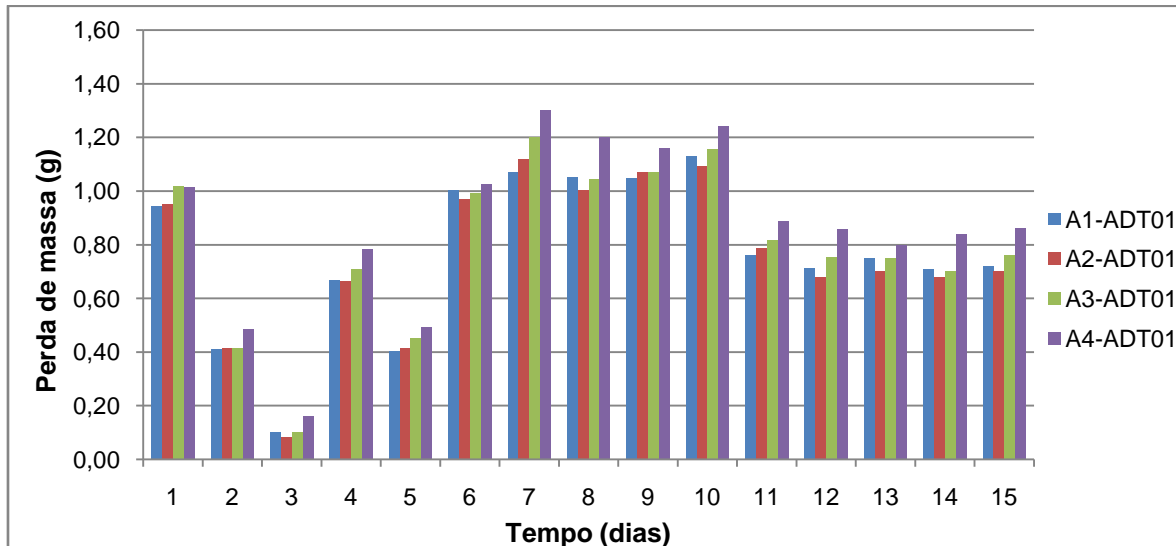
Fonte: Autor.

De acordo com os resultados de outros autores, os valores do coeficiente de absorção de água encontrados nesta pesquisa foram muito superiores aos valores obtidos nos outros ensaios, os quais utilizaram argamassas industrializadas ou traços convencionais para argamassas de revestimento. O emprego de areias convencionais, as quais possuem maior teor de agregados finos do que as areias padronizadas utilizadas nesta pesquisa conduziram a uma maior ocupação dos espaços vazios e, conseqüentemente, menos poros interligados por onde a água poderia permear.

4.2.6 Permeabilidade ao vapor de água

Os perfis de perda de massa durante os quinze dias de ensaio para os traços dosados com 0,1% de aditivo incorporador de ar estão apresentados na Figura 41.

Figura 41 – Permeabilidade ao vapor de água x tempo – Aditivo 0,1%.



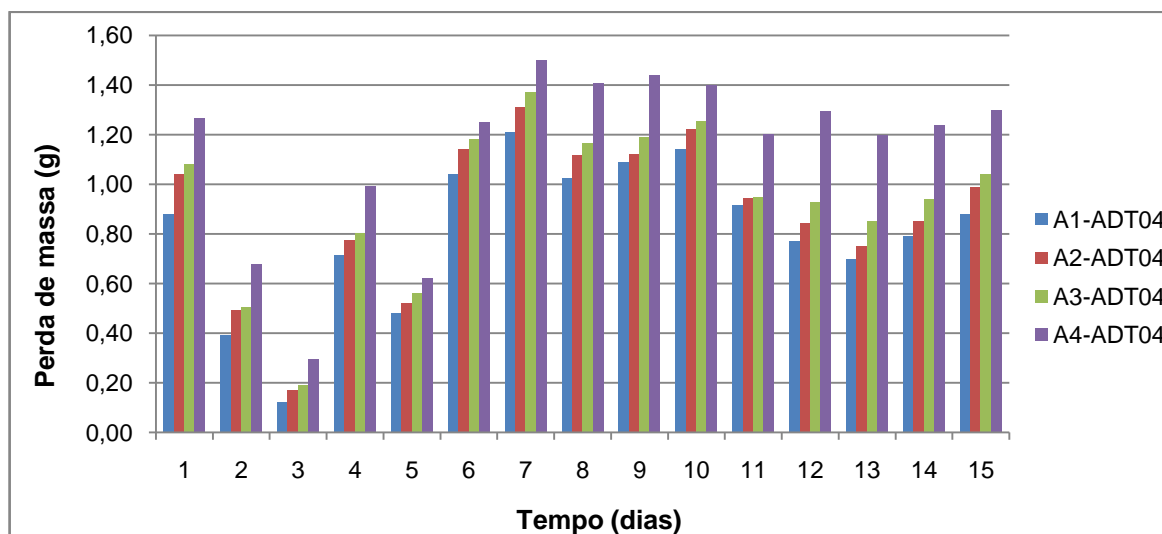
Fonte: Autor.

De acordo com os resultados dos ensaios, foi observada a tendência de aumento da permeabilidade ao vapor de acordo com o aumento do módulo de finura e conseqüente aumento do teor de ar incorporado. A exceção foi o com o traço A1-adt01, que na maioria dos dias apresentou um grau de perda de massa maior que

no traço A1-adt02, provavelmente devido aos vazios decorrentes da moldagem, causados por outros efeitos relacionados à argamassa fresca, conforme já discutido.

O mesmo comportamento verificado para as argamassas dosadas com 0,1% de aditivo incorporador de ar foi verificado para as argamassas dosadas com 0,4%, exceto para o caso do traço dosado com a areia 1, que seguiu o mesmo perfil que as demais. Nas argamassas dosadas com maior teor de aditivo, as taxas de perda de massa foram maiores, em todas as idades, que as taxas obtidas nas dosagens com menor teor de aditivo. A justificativa para o aumento permeabilidade destes traços, poder ser devido à maior porosidade gerada pela maior quantidade de incorporador de ar, que permitiu uma taxa maior de passagem de vapor pela argamassa. O gráfico da Figura 42 é resultante das medições de massa dos conjuntos compostos com as argamassas dosadas com 0,4% de aditivo incorporador de ar.

Figura 42 – Permeabilidade ao vapor de água x tempo – Aditivo 0,4%.



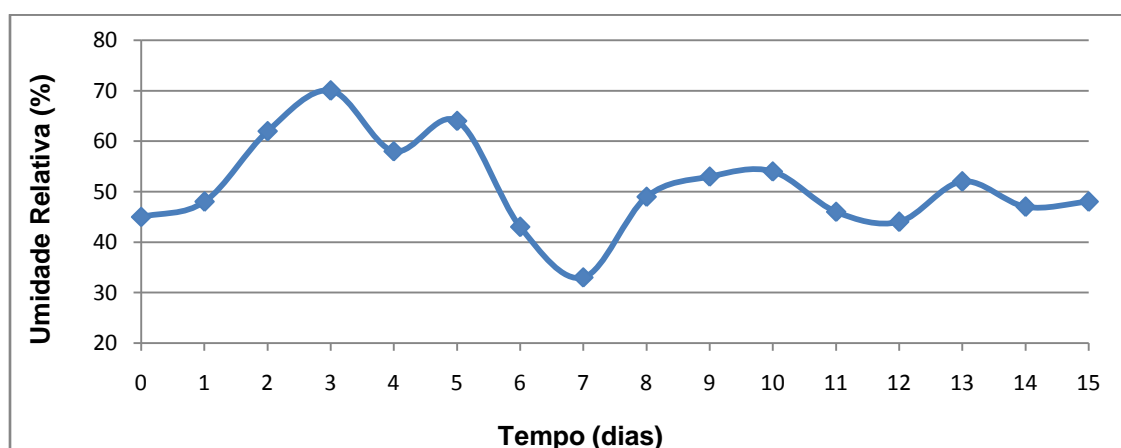
Fonte: Autor.

Entre as argamassas A2-adt04 e A3-adt04, foi observado um aumento menos expressivo na perda de massa do que entre as argamassas A3-adt04 e A4 adt04. A alta taxa de permeabilidade ao vapor da argamassa composta com a areia de maior módulo de finura pode ser explicada pela maior porosidade gerada pela ausência de finos, distribuição granulométrica descontínua e o alto teor de ar incorporado.

Assim como observado nos ensaios de permeabilidade a água, os resultados permitem concluir que nos traços dosados com maior teor de aditivo incorporador de ar, o aumento de permeabilidade ao vapor devido ao aumento do módulo de finura da areia ocorre a uma taxa maior do que o aumento da permeabilidade ao vapor em argamassas dosadas com menor teor de aditivo.

Também foram observadas as mínimas e máximas variações de massa, no 3º e no 7º dia, nas argamassas dosadas com os dois teores de aditivo. Através do monitoramento da temperatura e umidade da sala de condicionamento dos conjuntos, nestes dias ocorreram os valores extremos de umidade. No 3º dia, a umidade relativa do ar chegou ao valor de 70%, diminuindo a taxa de transmissão de vapor do ambiente interno do copo para o ambiente e, no 7º dia de ensaio, foi medido o menor valor de umidade relativa do ar, de 33%. A baixa umidade relativa externa ao conjunto da amostra fez com que ocorresse o aumento na taxa de passagem do fluxo de vapor interno do conjunto para o ambiente, ocasionando a maior perda de massa. Na Figura 43 mostra-se a variação da umidade diária verificada durante a realização das pesagens, realizadas diariamente nos mesmos horários.

Figura 43 – Variação da umidade na sala de condicionamento.

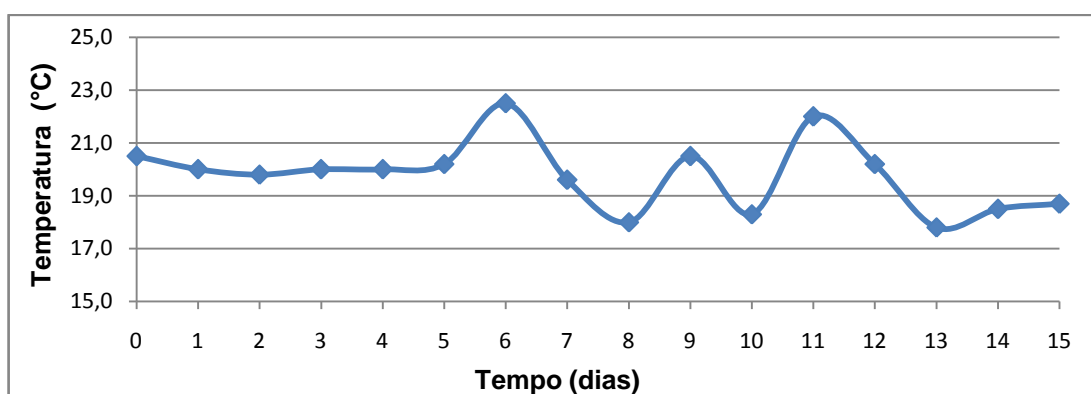


Fonte: Autor.

Vale ressaltar a importância de este ensaio ter sido realizado com o número total de amostras nas mesmas datas, de forma que todos os corpos de prova

sofreram a mesma variação de umidade e temperatura. Com este procedimento, apesar das variações de umidade detectadas, o padrão de perda de massa foi o mesmo para todos os traços. Já a variação de temperatura do ambiente é a apresentada na Figura 44.

Figura 44 – Variação da temperatura na sala de condicionamento.



Fonte: Autor.

Os valores calculados para perda de massa, permeância, permeabilidade e coeficiente de permeabilidade estão apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 – Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor.

Traço	Perda de massa (g)	Permeância – Λ (kg.m ² .s.Pa)	Permeabilidade – π (kg.m.s.Pa)	Coef.de Permeabilidade (kg.m ² .s.Pa) ⁻¹
A1-adt01	11,49	8,07E ⁻¹⁰	1,61E ⁻¹¹	0,240
A2-adt01	11,33	7,95E ⁻¹⁰	1,59E ⁻¹¹	0,244
A3-adt01	11,95	8,41E ⁻¹⁰	1,68E ⁻¹¹	0,231
A4-adt01	13,11	9,28E ⁻¹⁰	1,86E ⁻¹¹	0,209
A1-adt04	12,16	8,57E ⁻¹⁰	1,71E ⁻¹¹	0,226
A2-adt04	13,29	9,41E ⁻¹⁰	1,88E ⁻¹¹	0,206
A3-adt04	14,01	9,95E ⁻¹⁰	1,99E ⁻¹¹	0,195
A4-adt04	17,09	12,24 E ⁻¹⁰	2,45E ⁻¹¹	0,158

Fonte: Autor.

Os resultados totais de perda de massa dos conjuntos mostram a tendência de aumento da permeabilidade ao vapor com o aumento do módulo de finura e aumento do teor de ar incorporado nas misturas, com a exceção do aumento de módulo dos traços A1-adt01 para A2-adt01.

Na análise dos resultados, nota-se também a ordem de permeabilidade ao vapor. Para os traços dosados com menor teor de aditivo, a ordem de crescimento desta grandeza foi da argamassa A2-adt01, com menor índice, seguindo para as argamassas A1-adt01, A3-adt01 e A4-adt01. Para as argamassas dosadas com maior teor de aditivo incorporador de ar, o aumento da permeabilidade ao vapor ocorreu conforme o aumento do módulo de finura da areia em cada traço.

Na Tabela 38 são apresentados os valores médios de perda de massa, do 1° ao 15° dias de ensaio para fins de comparação com os valores encontrados nos trabalhos de Temp (2014) e Jantsch (2015). Vale ressaltar que na pesquisa de Temp (2014) a solução salina empregada foi o cloreto de lítio, a qual promove um aumento de massa do conjunto através do fluxo de vapor do ambiente para o interior do copo com a solução salina.

Tabela 38 – Comparativo de resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor.

Traço	Perda de massa (g)	Jantsch (2015)		Temp (2014)	
		Estabilizada 36 hs	Estabilizada 72 hs	Reboco Médio	Argamassa estabilizada
A1-adt01	11,49				
A2-adt01	11,33				
A3-adt01	11,95				
A4-adt01	13,11				
A1-adt04	12,16	9,69	8,27	0,70	0,62
A2-adt04	13,29				
A3-adt04	14,01				
A4-adt04	17,09				

Fonte: Autor.

Em comparação com os resultados de outros autores, os valores encontrados nesta pesquisa foram mais elevados. A explicação para os valores maiores de

permeabilidade ao vapor pode ser atribuída à falta de agregado mais fino nas areias padronizadas que foram empregadas nas moldagens, diferentemente das argamassas dos outros autores que utilizaram areia natural em sua composição, com maior teor de agregado miúdo de granulometria fina, o qual proporciona uma menor porosidade na argamassa.

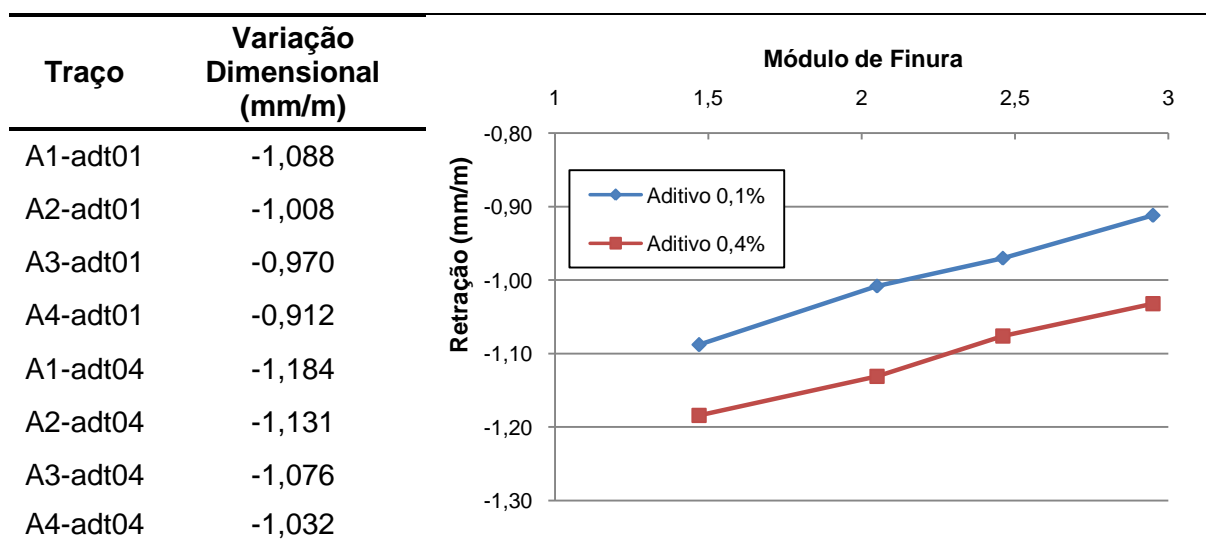
4.2.7 Variação dimensional

A variação dimensional, retração ou expansão linear, foi medida em barras de 25x25x285 mm, conforme a ABNT NBR 15261:2005. Também foi realizada a medição da variação dimensional em placas de argamassa, de forma experimental.

4.2.7.1 Variação dimensional linear

Para cada traço de argamassa foram moldadas 4 barras para monitoramento da variação dimensional durante 49 dias. As medidas foram realizadas no dia da desforma, 48 horas após a moldagem, considerada a medida 0, 24 horas após a desforma (medida 1) e semanalmente após a data da desforma, aos 7, 14, 21, 28, 35, 42 e 49 dias de cura. Os valores totais de retração, comparando as leituras do 1º e 49º dias de cura, estão apresentados na Figura 45.

Figura 45 – Variação dimensional ao 49º dia de cura e gráfico MF versus variação dimensional.



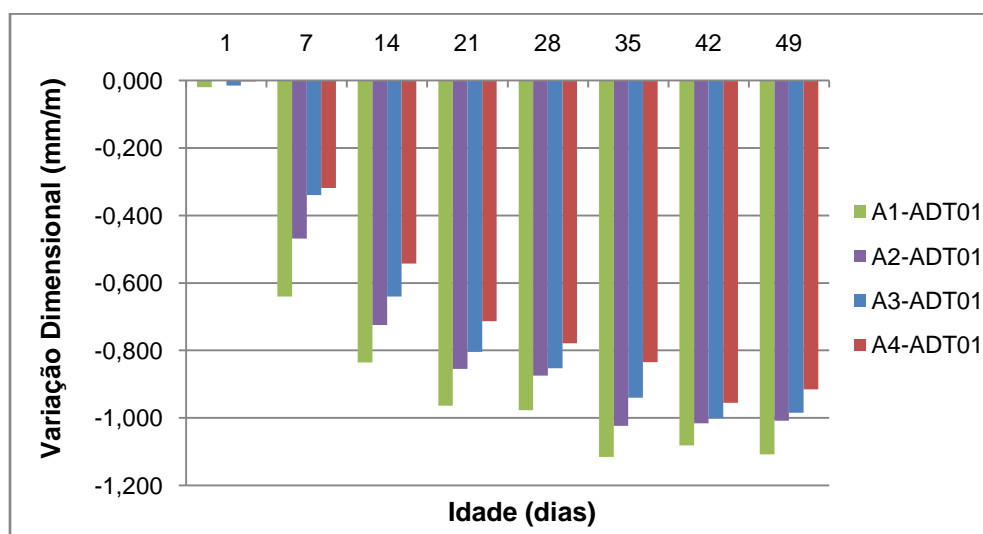
Fonte: Autor.

A variação dimensional foi de redução nas medidas ao decorrer do tempo, o que caracteriza a retração do material (sinal negativo no eixo vertical do gráfico). Observa-se uma maior variação dimensional nas argamassas dosadas com maior teor de aditivo incorporador de ar do que nas amostras com menor teor de aditivo. Este fato pode estar relacionado à capacidade de retenção de água, a qual apresentou valores maiores nas argamassas dosadas com menor teor de aditivo incorporador de ar do que nos traços dosados com maior teor de aditivo.

Analisando-se os valores de variação dimensional no 49º dia, o aumento do teor de aditivo do traço A1-adt01 para A1-adt04 gerou um aumento de 0,096 mm/m na retração. Para os aumentos de teores nos traços com as areias 2, 3 e 4, os aumentos foram de 0,123 mm/m, 0,106 mm/m e 0,120 mm/m, respectivamente. Sendo assim, pode-se concluir que a variação do módulo de finura não potencializa nem reduz a ação do aumento do teor de aditivo incorporador de ar na mistura, visto que os valores de aumento da retração foram semelhantes. Sendo assim, a diferença entre as variações causadas pelo aumento do teor de aditivo foi semelhante para as argamassas dosadas com os quatro tipos de areia, conforme ilustra o paralelismo das relações de retração e módulo de finura representado graficamente.

Os gráficos das Figuras 46 e 47 são resultantes das medidas de variação dimensional durante o período de monitoramento de 49 dias após a desmoldagem dos corpos de prova.

Figura 46 – Variação dimensional – 0,1% de incorporador de ar.

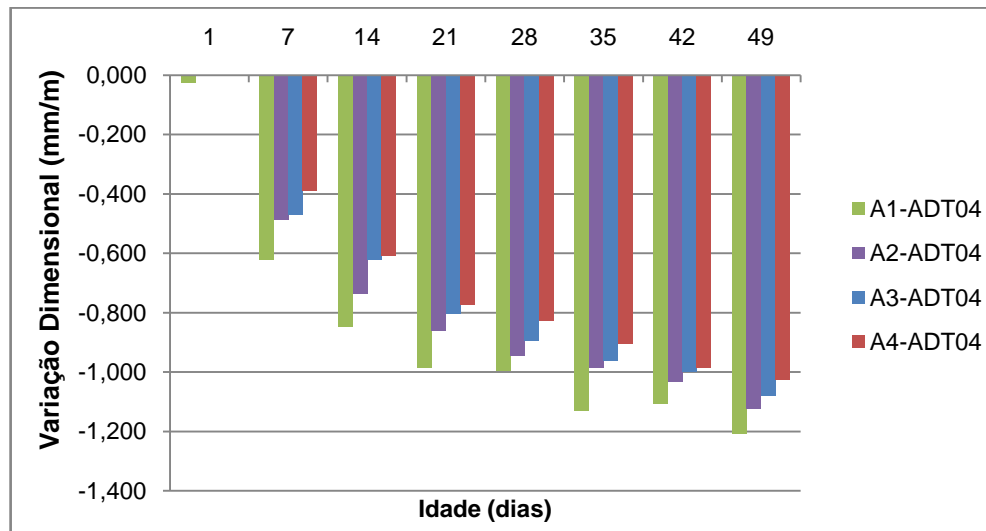


A partir da análise dos valores encontrados, verificou-se que com o aumento do módulo de finura da areia de cada mistura, ocorreram reduções nos valores de retração. Esta diminuição da retração aconteceu, ao mesmo passo em que a retenção de água também foi reduzida. Pode-se concluir que as reduções nos valores de retração, com o aumento do módulo de finura, aconteceram em paralelo com o aumento dos valores de ar incorporado de cada composição, também ocasionados pelo aumento do módulo de finura.

A estabilização da variação dimensional foi observada a partir do 35º dia de cura para os traços A1-adt01 e A1-adt02 e a partir do 42º dia para os traços A3adt1 e A4-adt1.

Para as argamassas dosadas com 0,4% de aditivo incorporador de ar, o perfil de comportamento foi semelhante ao das argamassas dosadas com 0,1%, conforme mostram os resultados na Figura 47.

Figura 47 – Variação dimensional – 0,4% de incorporador de ar.



Fonte: Autor.

A diferença observada entre os traços com os dois teores de aditivo é que em todas as verificações foram encontrados valores maiores de retração para os traços com maior teor de incorporador de ar. Além disso, até o 49º dia de medições, não foi observada uma tendência de estabilização das medidas, onde se pode concluir que em medidas subseqüentes poderiam ser medidas maiores diferenças nos valores de retração.

Para fins de análise de resultados, na Tabela 39 apresentam-se os valores encontrados neste estudo e alguns resultados de ensaios realizados pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria à construtoras e fabricantes de argamassa do Estado do Rio Grande do Sul. Estes ensaios foram solicitados para serem utilizados como critério de avaliação das argamassas produzidas pelas fábricas ou dosadas nos canteiros de obra.

Tabela 39 – Comparativo de resultados – Variação Dimensional.

Referência	Traço / Tipo de argamassa	Retração – 28 dias (mm/m)
Este estudo	A1-adt01	-0,977
	A2-adt01	-0,875
	A3-adt01	-0,853
	A4-adt01	-0,779
	A1-adt04	-0,996
	A2-adt04	-0,945
	A3-adt04	-0,893
	A4-adt04	-0,827
Ensaio LMCC	Industrializada Reboco Grosso	-0,760
	Industrializada Múltiplo Uso	-0,852
	Traço Obra A – 1:1:6	-1,011
	Traço Obra B – 1:1:5	-1,150
	Estabilizada 36 HS – Fábrica A	-0,323
	Estabilizada 36 HS – Fábrica B	-1,455

Fonte: Autor.

Considerando os resultados dos ensaios, os traços dosados nesta pesquisa apresentaram valores próximos às argamassas industrializadas “reboco grosso” e múltiplo uso. A primeira é produzida com areia calcária com módulo de finura igual a 2,3. Não há informações sobre as quantidades de aditivos e teores de ar incorporado destas misturas. As argamassas “traço obra A” e “traço obra B” foram produzidas com cimento CPIV, cal hidratada CH-II e areia natural de leito de rio, com módulo de finura próximo a 1,7, sem o emprego de aditivos. Entre os traços, a retração foi maior no “traço obra B”, o qual tinha resistência à compressão maior que o “traço obra A” devido à menor proporção de areia na composição. Com relação às argamassas estabilizadas, a argamassa “fábrica A” utiliza material proveniente de

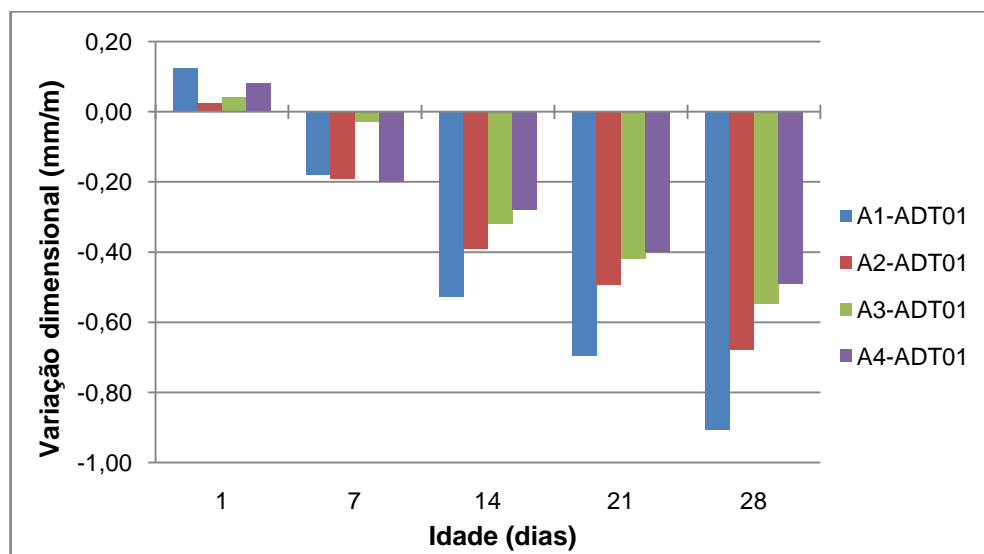
britagem como agregado, enquanto a “fábrica B” emprega areia natural, com módulo de finura menor do que o da areia artificial. Não há mais informações sobre os teores de ar incorporado, proporções de agregados, aditivos incorporadores de ar e estabilizadores de hidratação destes traços.

4.2.7.2 Variação dimensional em placas

Devido à grande variação observada entre as repetições das medições da variação dimensional das placas com pinos inseridos na sua superfície, os resultados destes ensaios foram desconsiderados. O encaixe do suporte do relógio comparador no pino não foi eficaz para a execução de medidas de variação de ordem de grandeza de 10^{-3} mm. Durante a realização das medições, não foram obtidos valores de forma repetitiva, de modo que não foi possível identificar um padrão de comportamento. No entanto, nas placas com pinos colados nas suas laterais, as medições puderam ser realizadas de maneira mais precisa, já que o sistema de acoplamento do instrumento de medição na placa ficou semelhante ao sistema empregado para as medições de variação dimensional em barras prismáticas.

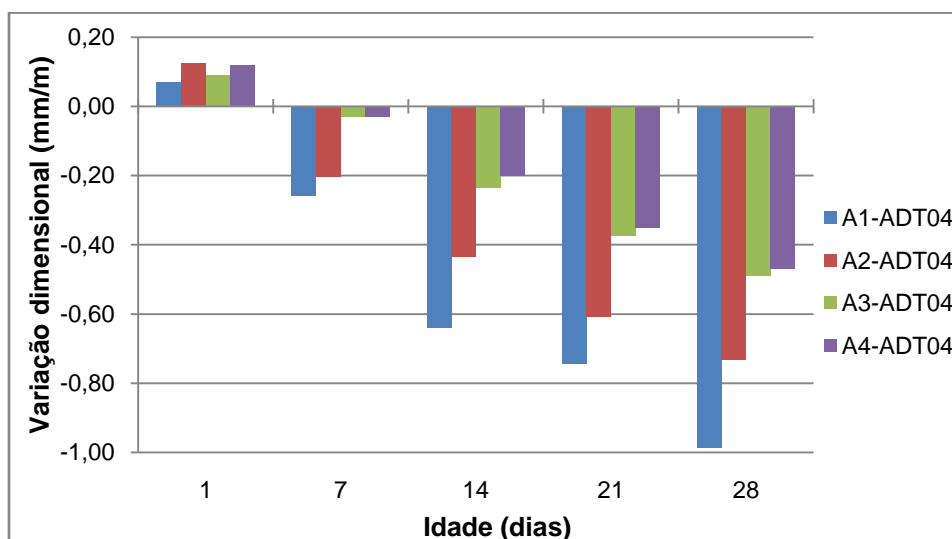
Os gráficos das Figuras 48 e 49 são os resultados da relação entre a variação dimensional e o tempo (em dias), medida semanalmente até 28 dias de cura.

Figura 48 – Variação dimensional em placa – 0,1% de incorporador de ar.



Fonte: Autor.

Figura 49 – Variação dimensional em placa – 0,4% de incorporador de ar.



Fonte: Autor.

Nas medições das variações dimensionais no primeiro dia após a desforma, os resultados mostram um efeito de expansão, já que foram obtidos valores positivos de variações. Porém, este resultado não condiz com o efeito natural do comportamento de argamassas que é o de retração por secagem. Então, é possível que na primeira leitura possa ter ocorrido uma interferência de movimentação por empenamento da placa, alterando a posição de medida dos pinos. Ao passar dos dias, deve ter ocorrido uma estabilização nesta movimentação, possibilitando as medições com a referência inicial. Contudo, as grandezas das medições servem apenas de caráter comparativo, pois a ordem de grandeza das medidas não permite garantir o caráter quantitativo dos resultados.

Ao comparar os resultados entre as argamassas dosadas com os dois teores de aditivo incorporador de ar, a partir do 7º dia de cura, observaram-se sempre maiores medidas de retração para as argamassas dosadas com maior teor de aditivo, assim como no caso das retrações medidas nas barras prismáticas.

Para o aumento do módulo de finura, também foi observado o mesmo perfil de variação da retração em corpos de provas prismáticos, pois as placas moldadas com traços de maior módulo de finura apresentaram menores valores de variação dimensional.

5 CONCLUSÕES

Conforme já demonstrado por outros autores, neste estudo também foi possível comprovar a influência das composições granulométricas do agregado miúdo, nas propriedades de argamassas mistas, com adição de aditivo incorporador de ar. O módulo de finura da areia influenciou significativamente na variação das características físicas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

No estado fresco, o aumento do módulo de finura propiciou o aumento no teor de ar incorporado, aumento do índice de consistência, diminuição da coesão e redução dos valores retenção de água. Estas variações se repetiram tanto para argamassas dosadas com menor teor de aditivo incorporador de ar, tanto para as argamassas dosadas com maior teor de aditivo.

No estado endurecido, com o aumento do módulo de finura, foi observada a redução nos valores de retração e aumento nos índices de permeabilidade à água e ao vapor.

Para os ensaios de resistência à tração, resistência à compressão e resistência de aderência à tração, o comportamento de variação foi diferente entre os traços dosados com 0,1% e 0,4% de teor de aditivo incorporador de ar. Para as argamassas com menor teor, a distribuição granulométrica contínua favoreceu o aumento da resistência. Nos traços com maior teor de aditivo, o aumento do módulo de finura ocasionou a redução nos valores de resistência, independentemente da distribuição granulométrica. Ainda assim, a redução da resistência foi menor entre os traços dosados com areias com maior variação de diâmetros de grãos. Também se verificou que, as argamassas dosadas com areias de maior módulo de finura, são mais suscetíveis às variações de resistência causadas pelo aumento do teor de aditivo em um mesmo traço.

Com relação aos índices de retração, o maior teor de aditivo incorporador de ar resultou em argamassas com maiores medidas de retração, provavelmente devido à menor capacidade de retenção de água no estado fresco destas composições.

Os resultados reafirmam a necessidade de maiores estudos e controles na produção de argamassas, dado o vasto mercado de aditivos incorporadores de ar e a crescente utilização deste produto para os fins de redução de custos e melhora da trabalhabilidade. Vale ressaltar que estes aditivos ainda podem ser associados a

outras adições, como aditivos inibidores de hidratação, utilizados na produção de argamassas estabilizadas.

As modificações de agregados, aglomerantes ou aditivos durante a produção de argamassas, as quais, muitas vezes ainda são realizadas de forma empírica, podem resultar em produtos com desempenho insatisfatório nas edificações. Portanto, faz-se necessário os estudos da influência de cada variável no processo produtivo, de forma a aprimorar o desempenho e a qualidade das argamassas utilizadas na construção civil.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de melhorar o entendimento da influência do módulo de finura nas propriedades de argamassas, com aditivos incorporadores de ar, como continuidade deste trabalho, sugere-se: Verificar as variações dimensionais com idades de cura superiores a 49 dias; Analisar as microestruturas das argamassas no estado endurecido e realizar a dosagem traços com teor intermediário de aditivo incorporador de ar para a verificação das propriedades nesta situação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 02**: Cimento, concreto e agregados – Terminologia – Lista de termos. Rio de Janeiro, 2000.

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

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

_____. **NBR NM 45**: Agregados – determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

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

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 13258**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

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

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

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

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

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15261:** Argamassa para revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). 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 16541:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16607:** Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

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

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento.** 2002. 189 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Universidade de Brasília, 2002.

APPS, C. A. C. P. **Avaliação da variabilidade da técnica de ensaio do tubo de Karsten na medição da permeabilidade à água líquida em revestimentos de ladrilhos cerâmicos e argamassas.** 2011. 156 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2011.

ARNOLD, D. C. M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas.** 2011. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UNISINOS, 2011.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Ed., 1995.

BAUER, L. A. FALCÃO. **Materiais de Construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Ed., 2000. 1 v. 471 p.

BAUER, E. **Revestimentos de Argamassa. Características e Peculiaridades.** 2.ed. Brasília: LEM-Unb; Sinduscon, 2005. 92p.

BENINGFIELD, N. **Air entrainment of mortar.** In International Brick/Block Masonry Conference, 8. Ireland, UK, 1988.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação.** 1996. 285 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 1996.

CARASEK, H. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007.

CARASEK, H. Argamassas, Cap 26. *In*: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades das argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia/Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 1999.

CRAUSS, C. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. 2010. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

DE MARCO, C. E. G. **Avaliação mecânica de prismas enchidos com argamassa/graute à compressão**. 2016. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

EN. EUROPEAN NORM. **1015-19**: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas. 2000.

FLORES-COLEN, I. **Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva**. 2009, 537 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.

HADDAD, L. D. **Estudo da influência da forma e da granulometria dos agregados nas propriedades das argamassas de revestimento**. 2015. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

HADDAD, L. D. ; COSTA, C. M.; LOPES, P. H. P.; CARVALHO, A. N.; SANTOS, W. J. **Análise da Influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento** – UFMG, 2016.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. 1v. 862p.

JANTSCH, A. C. A. **Análise do desempenho de argamassas estabilizadas submetidas ao tratamento superficial com aditivos cristalizantes**. 2015. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. IBRACON, 2008.

MIELENZ, R.C.; WOLKODOFF, V. E.; BACKSTROM, J. E.; FLACK, H. L. **Origin, evolution, and effects of the air void system in concrete: Part 1. Entrained air in unhardened concrete**. J. Am. Concr. Inst. 1968.

- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. Tradução Salvador E. Giannusso – São Paulo: Pini, 1997.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Editora Bookman, 2013. 1 v. 472 p.
- PAILLERE A. M. **Application of admixtures in concrete Britain**. RILEM, 2011.
- RECENA, F. A. P. **Conhecendo argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012.
- RIXON, R.; MAILVAGANAM, N. **Chemical admixtures for concrete**. London: E & FN SPON, 1999.
- ROMANO, R. C. O. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicadas em construção civil**. 2013. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- SALAGER, J. L. El mundo de los surfactantes. **Cuaderno FIRP**, Universidade de Los Andes, Merida, Venezuela, 1992. p. 3-4.
- SALAGER, J. L. Surfactantes – typos y usos. **Cuaderno FIRP**, Universidade de Los Andes, Merida, Venezuela, 2002. p. 1-54.
- SALVADOR, G. A. B. **Otimização da distribuição granulométrica do agregado miúdo para o uso na cidade de Sant’Ana do Livramento – RS**. 2005. 130 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissional). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- SANTOS, L. M. A. A. **Análise *in-situ* do comportamento mecânico de argamassas de revestimento de fachadas**. 2012. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2012.
- SANTOS, W. J. **Desenvolvimento de Metodologia de Dosagem de Argamassas de Revestimento e Assentamento**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2014.
- SILVA, A. S.; GREIZE, P. J.; ROMAN, H. R.; TRISTÃO, F. A. **Argamassas mistas de cimento e cal**. Florianópolis: UFSC, 2002.
- SILVA, N. G. **Argamassa de Revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária**. 2006. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- SOUSA, J. M.; FREITAS, V. P. Classificação dos materiais de construção face à capilaridade e permeabilidade líquida. *In: JORNADAS DE CONSTRUÇÕES CIVIS – Umidade na construção*, 6. 1998, Porto: FEUP, 1998.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. Ed. Academic Press, 1990.

TEMP, A. L. **Avaliação de revestimentos de argamassa à permeabilidade ao vapor de água.** 2014. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento.** 1995. 218 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento.** 2005. 286 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

VEIGA, M. R.; VIEGAS, J.; PINTO, A.; SOUSA, H.; FARIA, J. A. A envolvente dos edifícios. *In: CONGRESSO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO*, 2. 2004, Porto, 2004.