



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

Julia da Rosa Martins

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS À BASE DE SÍLICA
NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS ESTABILIZADAS

FLORIANÓPOLIS
2022

JULIA DA ROSA MARTINS

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS À BASE DE
SÍLICA NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS
ESTABILIZADAS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Senff

Coorientadores: Prof. Dr. Dachamir Hotza
Prof^ª. Dra. Janaíde Cavalcante Rocha

Florianópolis, fevereiro de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

JULIA DA ROSA MARTINS

Este Trabalho de Mestrado foi julgado adequado para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais e aprovado em sua forma final pela Comissão Examinadora e pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Luciano Senff
Orientador/Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Dachamir Hotza
Coorientador/Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Antonio Pedro Novaes de Oliveira
Avaliador/Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Victor Ferreira
Avaliador/Universidade de Aveiro

Nós certificamos que este trabalho é a versão final e original, que foi julgado adequado para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais.

Prof. Dr. Luciano Senff
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. João Batista Rodrigues Neto
Coordenador do PPGMAT
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, Fevereiro de 2022

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Luciano Senff, por toda dedicação durante o período de elaboração do trabalho. Também agradeço aos meus coorientadores, Dachamir Hotza e Janaíde Cavalcante Rocha, por todos os conhecimentos que foram passados e por toda ajuda prestada durante o mestrado.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro concedido, também aos laboratórios, LINDEN, NANOTEC e ValoRes, por disponibilizarem os equipamentos necessários para realização da pesquisa.

Aos colegas de laboratório, pela paciência e instrução dedicada, também pelas ajudas fornecidas durante o andamento dos estudos.

Resumo

As argamassas estabilizadas estão cada vez mais presentes nas construções, uma vez que podem de se manter em estado fresco por até 72 h, o que resulta em praticidades e benefícios às obras. Com o objetivo de avaliar como a alteração do potencial zeta causada pela adição de resíduos finos pode influenciar nas propriedades da argamassa estabilizada, avaliou-se o comportamento de pastas e argamassas para posteriormente relacioná-lo com os resultados obtidos nos ensaios de potencial zeta das partículas. Os resíduos utilizados no estudo foram a sílica e a cinza volante. Também foi avaliada a dispersão das partículas de cimento e de resíduos, com base no potencial zeta e velocidade de sedimentação dos materiais, assim como foram realizados ensaios em pastas para verificar somente o comportamento dos materiais finos (cimento e resíduos) e, por fim, foi avaliado o comportamento das argamassas estabilizadas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Em todas as etapas do trabalho foram preparadas amostras/pastas/argamassas contendo cada um dos resíduos e também somente cimento como material fino. Os efeitos do potencial zeta puderam ser observados na velocidade de sedimentação, onde a amostra contendo somente cimento apresentou baixo módulo de potencial zeta e alta velocidade de sedimentação e a amostra com cimento e cinza volante apresentou alto módulo de potencial zeta e baixa velocidade de sedimentação. Os potenciais zeta do cimento (-3,04 mV) e da sílica (-10,5 mV) estavam próximos ao ponto isoelétrico, fazendo com que a pasta com somente cimento e a pasta com cimento e sílica apresentassem aglomerados. Também foi possível observar a diminuição do tempo de início e fim de pega da pasta com cinza volante, cujo resultado pode-se relacionar com o elevado valor de potencial zeta negativo desse material (-20,3 mV). Em argamassas, foi possível perceber a influência direta do potencial zeta em aspectos como teor de ar incorporado, sendo que a argamassa com cinza volante, que apresentou potencial zeta altamente negativo quando comparada às demais, finalizou o período de estabilização com teores de ar incorporado de 5,85%. As argamassas com somente cimento e com cimento e sílica, que apresentaram menores valores em módulo de potencial zeta, finalizaram o período de estabilização com 10,12% e 8,25% de ar incorporado. A influência do baixo teor de ar incorporado foi notada nos ensaios de consistência, em que a argamassa com cinza volante apresentou valores de espalhamento significativamente menores após 72 h de estabilização. Em contrapartida, o elevado módulo de potencial zeta da cinza volante mostrou-se positivamente influente ao diminuir a coalescência de bolhas. No estado endurecido foi possível perceber a influência indireta causada pelo potencial zeta, sendo que o teor de ar incorporado e a coalescência de bolhas afetam as propriedades físicas e mecânicas.

Palavras-chave: Argamassa Estabilizada; Potencial Zeta; Resíduos.

Abstract

The ready-mix-mortars are increasingly present in buildings, since they can be kept in fresh state for up to 72 hours, which results in practicality and benefits to the works. Aiming to evaluate how the change in zeta potential caused by the addition of fine wastes can influence the properties of ready-mix-mortar, the behavior of pastes and mortars was evaluated to subsequently relate it to the results obtained in the tests of zeta potential of the particles. The wastes used in the study were silica and fly ash. The dispersion of the cement and waste particles was also evaluated, based on the zeta potential and sedimentation velocity of the materials, as well as tests were performed on pastes to verify only the behavior of the fine materials (cement and waste) and, finally, the behavior of the ready-mix-mortar was evaluated, both in the fresh and hardened states. In all stages of the study, samples/pastes/mortars were prepared containing each of the wastes and also only cement as fine material. The effects of the zeta potential could be observed in the sedimentation speed, where the sample containing only cement presented low zeta potential modulus and high sedimentation speed and the sample with cement and fly ash presented high zeta potential modulus and low sedimentation speed. A greater tendency to agglomeration can be noted in pastes that presented zeta potential values favorable for such, the paste with cement only and the paste with cement and silica fume. It was also possible to observe a decrease in the initial and final setting time of the paste with fly ash, whose result can be related to the high value of negative zeta potential of this material. In mortars, it was possible to realize the direct influence of zeta potential in aspects such as content of incorporated air, and the mortar with fly ash, which presented highly negative zeta potential when compared to the others, finished the stabilization period with contents of incorporated air of 5.85%. The mortars with only cement and with cement and silica, which showed lower values in zeta potential modulus, ended the stabilization period with 10.12% and 8.25% of incorporated air. The influence of the low content of incorporated air was noticed in the consistency tests, where the mortar with fly ash presented significantly lower spreading values after 72 hours of stabilization. On the other hand, the high modulus of zeta potential of the fly ash proved to be positively influential by reducing the coalescence of bubbles. In the hardened state it was possible to realize the indirect influence caused by the zeta potential, being that the content of incorporated air and the coalescence of bubbles affect the physical and mechanical properties.

Keywords: Ready-mix-mortars; Zeta potential; Wastes.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Camadas da argamassa de revestimento.	20
Figura 2 – Fluxograma para preparo e aplicação da argamassa convencional [OLIVEIRA 2006].	21
Figura 3 – Fluxograma para preparo e aplicação da argamassa estabilizada [OLIVEIRA 2006].	21
Figura 4 – Esquema de potencial zeta em partículas dispersas [GHOSH 2006].	30
Figura 5 – Relação entre o pH, potencial zeta e a estabilidade de uma suspensão [BRASEQ 2015].	31
Figura 6 – Esquema de tendência à atração e à repulsão de partículas.	33
Figura 7 – Situações envolvendo velocidade de sedimentação de partículas.	36
Figura 8 – Fluxograma das etapas desse trabalho.	39
Figura 9 – Fotografia mostrando o aspecto geral dos resíduos utilizados na preparação das amostras desse trabalho.	41
Figura 10 – Representação e dimensões do cone para ensaio de mini slump [MONTE e Figueiredo 2003].	44
Figura 11 – Fotografia mostrando o dispositivo com a agulha de Vicat utilizada nos ensaios de tempo de pega.	45
Figura 12 – Exemplo de ensaio de reometria em andamento.	46
Figura 13 – Informações do ensaio visual em argamassas.	49
Figura 14 – Fotografia mostrando o equipamento ZetaSizer Nano25 utilizado neste trabalho.	53
Figura 15 – Fotografia mostrando o equipamento LUMiSizer utilizado neste trabalho.	54
Figura 16 – Distribuição granulométrica das areias.	55
Figura 17 – Distribuição de tamanho de partículas dos materiais finos.	56
Figura 18 – Micrografia evidenciando a morfologia das partículas dos materiais finos utilizados.	56
Figura 19 – Variação do potencial zeta do cimento com a alteração do pH da solução aquosa.	57
Figura 20 – Resultados de espalhamento relativo obtidos no ensaio de mini slump das pastas com 0,8% de aditivo retardador.	60
Figura 21 – Resultados de espalhamento relativo obtidos no ensaio de mini slump das pastas com 1% de aditivo retardador.	60
Figura 22 – Fotografia mostrando o fenômeno de exsudação observado nas pastas com 1% de aditivo retardador.	61
Figura 23 – Resultados de espalhamento relativo obtidos no ensaio de mini slump das pastas com 1,2% de aditivo retardador.	61

Figura 24 – Resultados de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento obtidos nos ensaios de reometria.	63
Figura 25 – Resultados iniciais dos ensaios de reometria.	65
Figura 26 – Fotografias mostrando o aspecto visual das pastas com 72 horas de estabilização.	66
Figura 27 – Viscosidade plástica das pastas em função do tempo de estabilização.	66
Figura 28 – Tensão de escoamento das pastas em função do tempo de estabilização.	67
Figura 29 – Espalhamento em função do tempo.	68
Figura 30 – Teor de ar incorporado em função do tempo.	69
Figura 31 – Imagens do ensaio visual em argamassa sem adição de resíduos.	70
Figura 32 – Imagens do ensaio visual em argamassa com sílica.	71
Figura 33 – Imagens do ensaio visual em argamassa com cinza volante.	72
Figura 34 – Fotografia mostrando o aspecto da argamassa 100C ao longo do período de estabilização.	73
Figura 35 – Fotografia mostrando o aspecto da argamassa 50C50S ao longo do período de estabilização.	74
Figura 36 – Aspecto da argamassa 50C50Cv ao longo do período de estabilização.	74
Figura 37 – Resultados obtidos nos ensaios de tração na flexão.	75
Figura 38 – Fotografias mostrando os corpos de prova fraturados após os ensaios de resistência à tração na flexão - 28 dias.	76
Figura 39 – Fotografias mostrando os corpos de prova fraturados após os ensaios de resistência à tração na flexão - 56 dias.	76
Figura 40 – Resultados obtidos nos ensaios de compressão.	77
Figura 41 – Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo.	78
Figura 42 – Índice de vazios das argamassas.	79
Figura 43 – Relação entre índice de vazios e resistência mecânica.	79

Lista de tabelas

Tabela 1 – Aspectos a serem considerados na escolha dos materiais da argamassa [MACIEL, BARROS e SABBATINI 1998]	22
Tabela 2 – Variações de cimento Portland [SZLAK et al. 2003].	23
Tabela 3 – Características do agregado miúdo e sua influência sobre a argamassa de revestimento [SZLAK et al. 2003].	24
Tabela 4 – Fatores que influenciam a consistência e plasticidade das argamassas [BAUER 2005].	28
Tabela 5 – Classificação das argamassas de revestimento de acordo com as propriedades no estado endurecido.	29
Tabela 6 – Faixas de estabilidade de suspensões de acordo com o potencial zeta [OROPEZA 2011].	33
Tabela 7 – Parâmetros que influenciam na velocidade de sedimentação.	34
Tabela 8 – Hipóteses para a diferença entre as velocidades de sedimentação prática e teórica.	35
Tabela 9 – Poluição/contaminação ambiental por fonte de resíduo [PEREIRA 2002].	37
Tabela 10 – Dados técnicos dos aditivos informados pelo fabricante.	41
Tabela 11 – Métodos de caracterização dos materiais utilizados no estudo.	42
Tabela 12 – Composição das pastas.	43
Tabela 13 – Traços das argamassas após o ajuste de água e aditivo incorporador de ar.	47
Tabela 14 – Composição das amostras para ensaio de potencial zeta.	52
Tabela 15 – Composição das amostras para ensaio de velocidade de sedimentação.	52
Tabela 16 – Características físicas das areias.	55
Tabela 17 – Características físicas dos materiais finos.	56
Tabela 18 – Composição química dos materiais finos.	57
Tabela 19 – Potencial zeta das partículas em suspensão.	58
Tabela 20 – Velocidade de sedimentação das amostras em suspensão.	58
Tabela 21 – Tempo de início e fim de pega das pastas.	62
Tabela 22 – Relação de materiais utilizada nas pastas em volume.	63
Tabela 23 – Valores de tensão de cisalhamento obtidos no início dos ensaios de reometria.	65
Tabela 24 – Coeficiente de capilaridade das argamassas.	78

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
1.2	Organização do trabalho	17
2	ARGAMASSAS PARA REVESTIMENTO	19
2.1	Argamassas estabilizadas para revestimento	20
2.1.1	Composição	22
2.1.1.1	Aglomerante	23
2.1.1.2	Agregado miúdo	24
2.1.1.3	Água	25
2.1.1.4	Aditivos	25
2.1.1.4.1	Retardador e de pega	25
2.1.1.4.2	Incorporador de ar	26
2.2	Propriedades das argamassas	26
2.2.1	Propriedades no estado fresco	26
2.2.2	Propriedades no estado endurecido	29
2.3	Potencial zeta	30
2.3.1	Aglomerção de partículas	32
2.3.2	Velocidade de sedimentação	33
2.4	Influência da adição de resíduos sólidos	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Materiais	40
3.1.1	Aglomerante	40
3.1.2	Agregado miúdo	40
3.1.3	Resíduos	40
3.1.4	Aditivos químicos	41
3.2	Caracterização	41
3.3	Estudo em pastas	42
3.3.1	Composição e preparação das pastas	42
3.3.2	Mini slump	43
3.3.3	Tempo de pega	44
3.3.4	Reometria	45
3.4	Estudo em argamassas	46

3.4.1	Traço e preparação das argamassas	46
3.4.2	Avaliação de desempenho das argamassas no estado fresco	48
3.4.2.1	Índice de consistência	48
3.4.2.2	Teor de ar incorporado	48
3.4.2.3	Avaliação visual	48
3.4.3	Avaliação de desempenho das argamassas no estado endurecido	49
3.4.3.1	Propriedades mecânicas	49
3.4.3.2	Absorção de água e coeficiente de capilaridade	50
3.4.3.3	Índice de vazios	51
3.5	Estudo do comportamento das partículas	51
3.5.1	Composição e preparação das amostras	52
3.5.2	Potencial Zeta	53
3.5.3	Velocidade de sedimentação	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	Caracterização dos materiais	55
4.2	Avaliação do comportamento das partículas	57
4.3	Estudo em Pastas	59
4.3.1	Avaliação da fluidez ao longo do tempo	59
4.3.2	Avaliação do tempo de pega	62
4.3.3	Reometria	62
4.4	Estudo em Argamassa	68
4.4.1	Comportamento reológico das argamassas	68
4.4.2	Análise Visual	69
4.4.3	Propriedades físicas e mecânicas	75
4.4.3.1	Propriedades mecânicas	75
4.4.3.2	Propriedades físicas	78
5	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

A argamassa é um elemento construtivo essencial para qualquer edificação, podendo exercer diversas funções, como por exemplo, colante, revestimento e assentamento. Entende-se por argamassa o material de construção obtido a partir da mistura entre uma pasta e agregado miúdo, podendo conter ou não aditivos [RECENA 2007]. Sua utilização em construções é um costume muito antigo da humanidade, tendo sido encontrada em construções do século II AC, na Índia [ALVAREZ 2007].

Com o aumento do tamanho das construções e a necessidade de terminá-las rapidamente, desenvolveram-se as argamassas estabilizadas. Essas argamassas são preparadas em centrais e distribuídas nas obras de acordo com a necessidade da edificação. A utilização deste tipo de argamassa traz para a obra uma maior agilidade, além de possuir maior homogeneidade e traço mais preciso do que as argamassas produzidas na obra.

Compostas de aglomerante, agregado miúdo e aditivos, as argamassas estabilizadas podem ser mantidas no estado fresco por até 72 horas. Os tipos mais comuns de aditivos utilizados para esse tipo de argamassa são os que retardam o início da pega e os que permitem a incorporação de ar. Os aditivos que retardam a pega da argamassa permitem a trabalhabilidade do material por longos períodos de tempo. Os incorporadores de ar introduzem durante a mistura pequenas bolhas de ar que ficam dispersas na argamassa.

A incorporação de resíduos às argamassas estabilizadas pode ser uma alternativa para evitar o descarte e diminuir o impacto ambiental causado pela geração de resíduos. Em contrapartida, é preciso verificar a usabilidade das argamassas com resíduos incorporados, já que as características químicas e físicas dos resíduos podem influenciar nas propriedades da argamassa. Alguns exemplos de resíduos industriais que podem ser incorporados às argamassas são sílica, cinzas volantes, fillers e lamas. São considerados resíduos industriais aqueles provenientes dos ramos industriais, como metalúrgica, química, petroquímica, papelreira, alimentícia, etc. Esses resíduos podem ser cinzas, lodos, óleos, fibras, etc [CONSONI e CS 2018].

Um fator que pode ser alterado com a adição de resíduos às argamassas é o potencial zeta das partículas. O potencial zeta é o potencial eletrostático no plano de cisalhamento de uma partícula dispersa [DINGER 2006]. A interação entre as partículas é definida pela natureza e magnitude da carga superficial. Partículas com cargas de sinal contrário irão se atrair e partículas com carga de mesmo sinal irão se repelir. A força de atração ou repulsão entre partículas é definida pela magnitude da carga. Essas duas características da carga são dependentes do pH.

O ponto isoelétrico é o ponto em que as partículas apresentam cargas nulas. Quanto

mais próximo de 0 mV for o valor do potencial zeta, mais próximo ao ponto isoelétrico as partículas estão. Sem cargas atuando como forças repulsivas, outros fatores como a atração mássica atuarão na interação entre as partículas. Sempre que forças atrativas forem superiores às forças repulsivas, haverá tendência à aglomeração [OLIVEIRA et al. 2000].

Sabendo que o potencial zeta das partículas é um fator importante quando se trata de interação entre partículas finas e que a adição de resíduos influenciará nesse quesito, este trabalho de pesquisa tem por objetivo verificar de que forma a incorporação de resíduos influenciará no potencial zeta das partículas finas que compõem as argamassas estabilizadas e como esse fator modificará as propriedades do material no estado fresco e no estado endurecido.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Investigar como a alteração do potencial zeta causada pela adição de resíduos pode influenciar nas propriedades da argamassa estabilizada.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar como o potencial zeta pode influenciar na aglomeração e sedimentação das partículas menores que 150 μm que compõem a argamassa.
- Identificar como o potencial zeta influencia no tempo de pega, reologia, consistência e coalescência de bolhas das pastas e argamassas.
- Avaliar as propriedades no estado fresco, como tempo de pega, índice de consistência e teor de ar incorporado das argamassas com resíduos e verificar sua usabilidade.
- Avaliar no estado endurecido, após 28 dias de cura, as propriedades físicas (absorção de água e índice de vazios) e propriedades mecânicas (resistência à compressão e à flexão) das argamassas com resíduos e verificar sua usabilidade.

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, o objetivo geral, os objetivos específicos e a organização do trabalho.

Ao longo do segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, que contempla os conceitos necessários ao desenvolvimento da pesquisa. Dessa forma, abordam-se alguns conceitos em torno da argamassa estabilizada, como seus componentes e sua utilização.

O terceiro capítulo trata dos materiais e métodos, descrevendo a caracterização dos materiais que foram utilizados e as etapas do estudo. Também apresentam-se, neste capítulo, os ensaios que foram realizados em partículas, pastas e argamassas, bem como a metodologia adotada.

Após a apresentação dos materiais e métodos, mostram-se os resultados obtidos com os ensaios e as discussões realizadas com base nos conceitos da literatura. Por fim, é apresentada a conclusão do trabalho e as referências bibliográficas.

2 ARGAMASSAS PARA REVESTIMENTO

A argamassa é um elemento construtivo que possui diversas funções em uma edificação, podendo ser utilizada para assentamento, revestimento, colante para revestimentos cerâmicos, etc. Sua utilização em construções é um costume muito antigo da humanidade, tendo sido encontrada em construções do século II AC, na Índia [ALVAREZ 2007].

Por definição, as argamassas são materiais de construção obtidos a partir da mistura entre uma pasta e agregado miúdo, podendo conter ou não aditivos. As argamassas devem apresentar as seguintes propriedades [RECENA 2007]:

- Trabalhabilidade adequada à função a que se destinam;
- Eficiente capacidade de retenção de água;
- Durabilidade compatível com a vida útil prevista para a edificação;
- Estabilidade química frente aos agentes de deterioração e sem a ocorrência de alterações em seus constituintes representada por reações retardadas;
- Estabilidade física a partir de uma resistência mecânica compatível com as solicitações determinadas por ciclos alternados de molhagem e secagem;
- Capacidade de aderir ao substrato formando um sistema com resistência de aderência compatível com as solicitações;
- Módulo de elasticidade tão baixo quanto o necessário para dotar as argamassas de capacidade de absorver por deformação tensões internas geradas pela movimentação da estrutura e/ou dos materiais que a compõem.

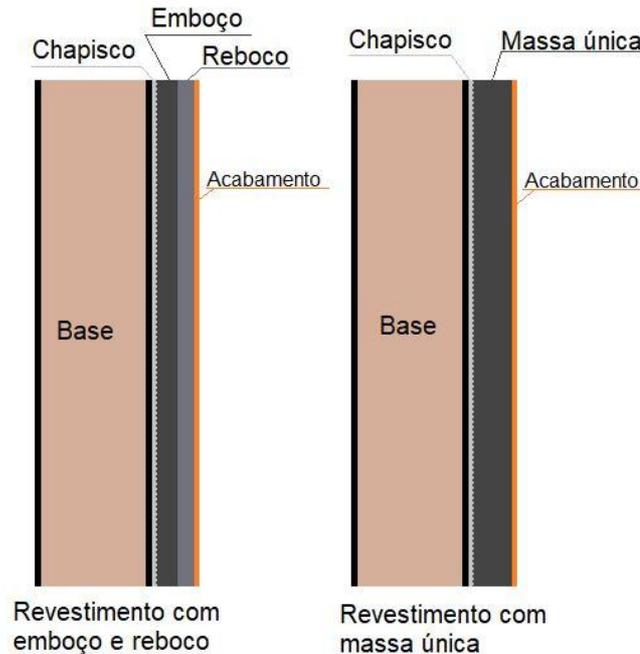
Quando utilizadas para revestimento, as argamassas podem ser empregadas para revestir paredes e tetos, recebendo um acabamento na sua superfície, como por exemplo tintas ou revestimento cerâmicos. A Norma NBR 13281 [ABNT 2005], que determina os parâmetros para que a argamassa possa ser considerada de revestimento, divide as argamassas de revestimento em externo e interno. São consideradas argamassas de revestimento interno aquelas que revestem ambientes internos de edificações. Já as de revestimento externo são utilizadas em ambientes que têm contato com o meio externo, como fachadas, muros, etc.

A argamassa de revestimento precisa desempenhar funções como proteção da alvenaria e estrutura e regularização da superfície dos elementos de vedação. Além das funções principais, a utilização da argamassa também contribui para isolamento acústico,

estanqueidade à água, proteção ao fogo e serve como base para acabamentos de superfície [CARASEK 2017].

O revestimento de argamassa pode ser constituído de chapisco, emboço e reboco ou apenas o chapisco e uma camada única [CARASEK 2017]. A Figura 1 mostra as camadas presentes no revestimento com várias camadas e no revestimento com a massa única.

Figura 1 – Camadas da argamassa de revestimento.



O chapisco, nos dois casos, é a camada que fica em contato com a base. Essa camada é aplicada para melhorar a aderência do substrato à base. O emboço é aplicado para regularizar a superfície com o chapisco. O reboco é a última camada aplicada, com aspecto superficial adequado para receber o acabamento. A massa única possui o aspecto superficial do reboco, podendo receber o acabamento, mas dispensa a aplicação do emboço e pode ser aplicada diretamente após o chapisco.

2.1 Argamassas estabilizadas para revestimento

Com a finalidade de agilizar o andamento das obras e garantir a padronização da argamassa utilizada, muitas vezes utiliza-se a argamassa estabilizada. A utilização da argamassa industrializada teve início na década de 50, partindo da ideia de fixação dos componentes e com a realização de misturas parciais ou totais em instalações industriais [NETO e DJANIKIAN 1999]. Nos últimos anos, a argamassa industrializada vem sendo utilizada consideravelmente em obras de grande porte, principalmente na região sul do Brasil [MACIOSKI et al. 2013].

A argamassa estabilizada é comprada pronta para ser aplicada e mantém-se no estado fresco por até 72 horas. Essa argamassa é dosada e preparada em central de acordo com as necessidades da obra. Em seguida é levada ao canteiro de obras, onde é armazenada e aplicada conforme o andamento da obra. As Figuras 2 e 3 comparam a logística e etapas necessárias envolvendo a utilização da argamassa convencional e a argamassa estabilizada.

Figura 2 – Fluxograma para preparo e aplicação da argamassa convencional [OLIVEIRA 2006].

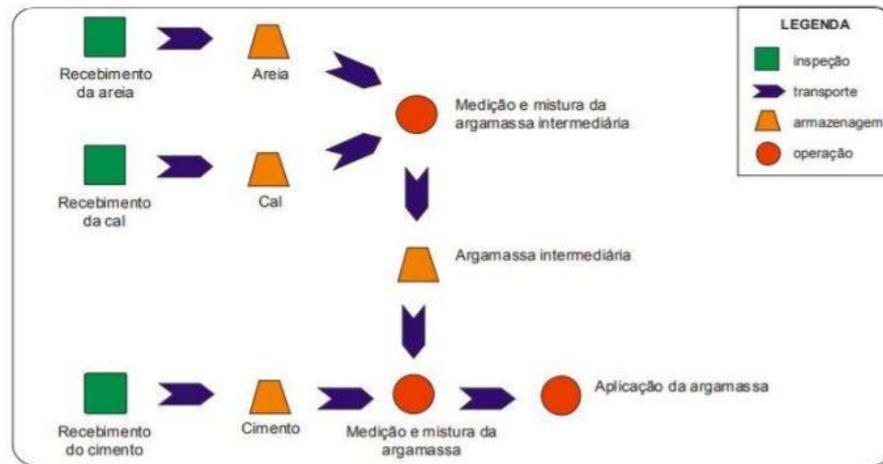


Figura 3 – Fluxograma para preparo e aplicação da argamassa estabilizada [OLIVEIRA 2006].



Há muitas vantagens em substituir a argamassa misturada em obra pela argamassa estabilizada, como por exemplo o aumento da produtividade do canteiro de obra, o aumento da precisão, a regularidade quanto a dosagem dos aditivos e a diminuição da insalubridade no manuseio de cimento e cal em pó na obra, etc [BAUER et al. 2015]. As principais propriedades para uma argamassa estabilizada são, entre outras, a boa trabalhabilidade, resistência mecânica uniforme, baixo risco de fissuração, etc.

Apesar das vantagens, a utilização da argamassa estabilizada exige um planejamento mais elaborado. É preciso saber a quantidade de argamassa que será utilizada, para evitar desperdícios ou falta de material. Também deve-se organizar a chegada da argamassa estabilizada, com as datas de aplicação e o período de estabilização.

Geralmente essas argamassas são compostas por aglomerantes, água, areia e aditivos. Neste caso, os aditivos são utilizados tanto para propriedades determinadas para cada tipo de argamassa estabilizada, quanto para deixá-la trabalhável por mais tempo.

2.1.1 Composição

Os materiais que compõem a argamassa determinam suas propriedades e características. Cada um dos materiais deve ser dosado de maneira que a argamassa atinja suas propriedades adequadas. Os principais materiais utilizados para a produção de argamassas de revestimento são cimento, cal, areia, água e aditivos. Também pode haver adições de outros materiais para complementar as propriedades da argamassa. A Tabela 1 resume os aspectos que devem ser considerados em cada um dos materiais que podem ser utilizados.

Tabela 1 – Aspectos a serem considerados na escolha dos materiais da argamassa [MACIEL, BARROS e SABBATINI 1998] .

Materiais	Aspectos a serem considerados na composição e dosagem
Cimento	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de cimento (características) e classes de resistência mecânica; - Disponibilidade e custo; - Comportamento da argamassa produzida com o cimento.
Cal	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de cal (características); - Forma de produção; - Massa unitária; - Disponibilidade e custo; - Comportamento da argamassa produzida com cal.
Areia	<ul style="list-style-type: none"> - Composição mineralógica e granulométrica; - Dimensões do agregado; - Forma e rugosidade superficial dos grânulos; - Massa unitária; - Inchamento; - Comportamento da argamassa produzida com areia; - Manutenção das características da areia.
Água	<ul style="list-style-type: none"> - Características dos componentes da água, quando essa não for potável
Aditivos	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de aditivos acrescentados à argamassa no momento da mistura ou da argamassa aditivada; - Tipo de aditivo (características); - Finalidade; - Disponibilidade e custo; - Comportamento da argamassa produzida com aditivo.
Adições	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de adição (características); - Finalidade; - Comportamento da argamassa produzida com adição; - Disponibilidade, manutenção das características e custo.

2.1.1.1 Aglomerante

O aglomerante recebe essa denominação devido à capacidade de unir os agregados, conferindo ao conjunto grande coesão e resistência [VARELA e VIEIRA 2005]. Por definição, são materiais pulverulentos, que ao serem misturados com a água formam uma pasta capaz de endurecer [HAGEMANN 2011].

Os aglomerantes são divididos em dois grupos, quimicamente inertes ou ativos [HAGEMANN 2011]. Os quimicamente inertes são aqueles cujo endurecimento se dá pela secagem, como por exemplo a argila. Já os quimicamente ativos são considerados aqueles que o endurecimento ocorre por meio de reações químicas.

Dentro do grupo dos aglomerantes ativos, existem outras duas classificações, que são aglomerantes aéreos e hidráulicos. Os aéreos são aqueles que só mantêm as suas propriedades na presença de ar, como a cal, por exemplo. Os aglomerantes hidráulicos são compostos por aqueles que conseguem conservar suas propriedades na presença de ar ou de água, mas seu endurecimento ocorre com a utilização de água. O principal aglomerante hidráulico utilizado na construção civil é o cimento.

O cimento Portland confere às argamassas resistência mecânica após o seu endurecimento. Como é composto por partículas finas, o cimento também contribui para a plasticidade da mistura no estado fresco. A quantidade de cimento não deve ser pouca a ponto de diminuir a trabalhabilidade e resistência mecânica, mas também não deve ser maior que o necessário, já que quanto maior a quantidade de cimento presente na mistura, maior é a retração por secagem [SZLAK et al. 2003]. As variações de cimento Portland são classificadas de acordo com suas características, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Variações de cimento Portland [SZLAK et al. 2003].

Denominação	Sigla	Norma
Portland comum	CP I	NBR 5732
Portland composto com escória	CP II-E	NBR 11578
Portland composto com pozolana	CP II-Z	NBR 11578
Portland composto com filler	CP II-F	NBR 11578
Portland de alto forno	CP III	NBR 5735
Portland pozolânico	CP IV	NBR 5736
Portland de alta resistência inicial	CP V-ARI	NBR 5733

Para argamassas, o ideal é que o cimento tenha pega e ganho de resistência de maneira mais lenta, assim evita-se o aparecimento de fissuras devido à retração por secagem, que ocorre com a perda de água para o ambiente [CARASEK 1996]. Como as características do cimento podem alterar as propriedades, deve-se escolher o cimento de acordo com as necessidades do material. Para argamassas estabilizadas, estudos apresentam como opções utilizadas por empresas: o CP II F-32, CP II Z-32 e CP IV-32 [CASALI et al.

2018, BELLEI et al. 2015].

Algumas argamassas podem ser compostas por mais de um tipo de aglomerante, como a combinação entre cimento e cal. O uso da cal confere à argamassa maior plasticidade, facilitando a aplicação. Também proporciona maior retenção de água, evitando que a retração por secagem aconteça de forma rápida e, conseqüentemente, evita o aparecimento de fissuras.

2.1.1.2 Agregado miúdo

São considerados agregados miúdos, de acordo com a Norma NBR 9935 [ABNT 2011], materiais granulares cujos grãos são menores que 4,75 mm e maiores que 150 μm .

As características dos agregados como, a dureza, a forma dos grânulos, a granulometria, a porosidade que afetam o comportamento da argamassa, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. A Tabela 3 mostra a relação entre as características dos grãos dos agregados miúdos e as propriedades da argamassa.

Tabela 3 – Características do agregado miúdo e sua influência sobre a argamassa de revestimento [SZLAK et al. 2003].

Propriedade	Quanto mais fino	Quanto mais descontínua for a granulometria	Quanto maior o teor de grãos angulosos
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	-	Melhor
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	-
Porosidade	-	Aumenta	-
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistência mecânica	-	Pior	-
Impermeabilidade	Pior	Pior	-

O agregado miúdo possui diversas funções, como redução do consumo de aglomerante, já que permite o preenchimento completo de vazios e aumento da resistência aos esforços de compressão, podendo aumentar a resistência de 4 MPa para até 30 MPa. A adição do agregado miúdo também diminui a retração da argamassa. Para que o agregado miúdo cumpra as suas funções adequadamente, é necessário que a granulometria seja contínua [DUBAJ 2000].

Também é importante que, para a utilização correta dos agregados, os mesmos estejam limpos de impurezas químicas, matéria vegetal e matérias finas de natureza argilosa [MARGALHA 2011].

2.1.1.3 Água

A água é adicionada à mistura para conferir trabalhabilidade, funcionando como um lubrificante entre as partículas e facilitando a movimentação entre os componentes sólidos. Também reage quimicamente com os aglomerantes, possibilitando o endurecimento e ganho de resistência mecânica da mistura [POSSER 2004].

A água potável é a considerada adequada para utilização em argamassas, já que a presença de impurezas pode influenciar negativamente na resistência mecânica e durabilidade. Água do mar ou salobra, por exemplo, pode aumentar o risco de eflorescência [POSSER 2004].

A quantidade de água utilizada é maior que a quantidade necessária para que as reações de hidratação ocorram. Parte da água excedente à hidratação é perdida por meio da evaporação e parte é absorvida pelo substrato [POSSER 2004].

2.1.1.4 Aditivos

Os aditivos são compostos utilizados para modificar algum aspecto da argamassa no estado fresco ou endurecido. São adicionados em pequenas quantidades às misturas, geralmente não ultrapassando o valor de 5% em relação à massa do aglomerante. As Normas NBR 11768-1 e NBR 16826 [ABNT 2019, ABNT 2020] apresentam alguns dos aditivos utilizados em argamassas e os requisitos.

Podem ser adicionados às argamassas aditivos plastificantes, colantes e impermeabilizantes. Em argamassas estabilizadas geralmente utilizam-se os aditivos incorporador de ar e retardador/estabilizador de hidratação.

2.1.1.4.1 Retardador e de pega

Os aditivos retardadores adiam o início da pega da argamassa, mantendo-a trabalhável por mais tempo. Esses aditivos formam uma camada de baixa permeabilidade em volta das partículas dispersas no material, impedindo assim o processo de hidratação [ISAIA et al. 2011].

Quando utilizados em excesso, os aditivos retardadores promovem o aumento da retração plástica e na exsudação de água, devido à maior quantidade de água livre no sistema [NEVILLE 2013]. Os aditivos retardadores também podem diminuir a resistência mecânica da argamassa no estado endurecido.

2.1.1.4.2 Incorporador de ar

O aditivo incorporador de ar é adicionado às argamassas estabilizadas com o intuito de melhorar a trabalhabilidade, principalmente pela isenção de cal na maioria das misturas propostas para tal produto [HERMANN e ROCHA 2013]. Com a incorporação do ar, também é possível obter maior volume de argamassa utilizando a mesma quantidade de material, além de menor massa específica.

Esses aditivos são materiais orgânicos, apresentados na forma de solução. Quando adicionados às argamassas produzem uma quantidade controlada de bolhas microscópicas de ar que se dispersam uniformemente pela mistura. As bolhas espalhadas pela argamassa atuam como um agregado fino de baixo atrito e elasticidade considerável, assim a mistura torna-se mais coesiva devido a tensão superficial gerada pelas bolhas [ANTONIAZZI et al. 2019]. Também há melhora na aplicação e acabamento com a incorporação de ar. Em contrapartida, a incorporação de ar reduz a resistência mecânica e aumenta a permeabilidade das argamassas [ROMANO 2013].

O teor de ar incorporado está diretamente ligado à quantidade de aditivo utilizado. Apesar disso, há um limite onde mesmo com a adição de mais aditivo não haverá aumento de ar incorporado [ALVES 2002].

2.2 Propriedades das argamassas

A argamassa possui duas estados de consistência, o estado fresco e o estado endurecido. A qualidade da argamassa depende das suas propriedades nos dois estados. As propriedades no estado fresco influenciam na aplicação, manuseio e aspecto final do produto, além de influenciarem nas propriedades no estado endurecido. A argamassa no estado endurecido deve apresentar propriedades adequadas para proteção da alvenaria, durabilidade e capacidade de receber e manter o acabamento na sua superfície.

2.2.1 Propriedades no estado fresco

O estado fresco é o momento entre a adição da água à mistura e o início da pega. Durante este período ficam evidentes as características reológicas e a consistência atingida pela mistura. O início da pega em argamassas se dá quando começam a ocorrer mudanças na microestrutura do material, sendo elas a cristalização de componentes, causando a perda da plasticidade conforme as reações acontecem. Devido à utilização de aditivos específicos, as argamassas estabilizadas podem se manter no estado fresco por até 72 horas.

Se tratando de reologia, a presença de partículas sólidas no fluido aumenta a resistência ao escoamento, elevando a viscosidade. Em argamassas há uma grande concentração de partículas no fluido, fazendo com que haja mais interações entre as mesmas. Essa condição faz com que a reologia das argamassas desvie do modelo ideal de Newton e assumam comportamentos não-lineares, como pseudoplásticos ou dilatantes [CARDOSO 2009]. As características reológicas da argamassa sofrem influências de fatores como: concentração volumétrica de sólidos, características do meio líquido, temperatura, características físicas das partículas e interação das partículas no meio [OLIVEIRA et al. 2000]. Pode-se representar o comportamento reológico das pastas e argamassas pelo modelo de Bingham, representado na Equação 2.1.

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Em que:

- τ - Tensão de cisalhamento (Pa);
- τ_0 - Tensão de escoamento (Pa);
- μ - Viscosidade plástica (Pa·s);
- $\dot{\gamma}$ - Taxa de cisalhamento (s^{-1}).

Durante o cisalhamento, os agregados miúdos presentes na argamassa estão sujeitos ao atrito e ao impacto, enquanto a fração fina (partículas com dimensões menores que 100 μm) é afetada por fenômenos de superfície e reações de hidratação [CARDOSO 2009].

Os materiais, o traço, o tipo de misturador e o tempo de mistura estão diretamente ligados ao desempenho das argamassas no estado fresco [HERMANN e ROCHA 2013].

A trabalhabilidade e o teor de ar incorporado são duas das principais propriedades que devem se manter dentro do limite apropriado para a utilização ao longo de todo o período em que a argamassa se encontra no estado fresco. A trabalhabilidade se refere ao comportamento das argamassas sob manuseio ou em situações de escoamento [SOUSA e BAUER 2002]. Essa propriedade depende e resulta de outras de propriedades do material, como consistência, plasticidade e coesão, por exemplo [CINCOTTO, SILVA e CARASEK 1995]. A quantidade de água utilizada, os aditivos e a granulometria dos materiais podem influenciar diretamente na trabalhabilidade da argamassa. A Tabela 4 mostra os fatores que podem afetar a consistência e plasticidade e, conseqüentemente, a trabalhabilidade das argamassas.

Tabela 4 – Fatores que influenciam a consistência e plasticidade das argamassas [BAUER 2005].

Fatores internos	Fatores externos
Teor de água muitas vezes definida em função da consistência necessária	Tipo de mistura
Proporção entre aglomerantes e agregado	Tipo de transporte
Natureza e teor dos plastificantes (cal, finos, argilosos, etc)	Tipo de aplicação no substrato
Distribuição granulométrica e forma e textura dos grãos do agregado	Operações de sarrafeamento e desempenho
Natureza e teor de aditivos	Características da base de aplicação – tipo de preparo, rugosidade, absorção, etc.

A incorporação de ar melhora a trabalhabilidade e reduz a densidade do material, mas em contrapartida pode haver a redução de algumas propriedades no estado endurecido, como a resistência mecânica [SILVA et al. 2009]. A adição de aditivos incorporadores de ar à argamassa introduz, por meio do processo mecânico de mistura, microbolhas de ar estáveis na argamassa [ANTONIAZZI et al. 2020]. Na região Sul do Brasil é comum que as argamassas estabilizadas apresentem teores de ar incorporado variando entre 15% e 24% [GUINDANI et al. 2018]. Esse valor pode variar ao longo do período de estabilização, ocorrendo redução da quantidade de bolhas presentes na mistura. Também é possível que haja a coalescência das bolhas, gerando um produto final não homogêneo e com as propriedades mecânicas reduzidas.

Podem-se citar alguns fatores que influenciam no teor de ar incorporado, como [ALVES 2002]:

- Dosagem e tipo de aditivo incorporador de ar;
- Relação água/cimento;
- Tipo de cimento;
- Tempo de mistura;
- Temperatura;
- Tipo e teor de agregado miúdo;
- Materiais finos.

Quanto maior o teor de ar incorporado, menor a massa específica da argamassa. Com uma argamassa mais leve, melhor será a trabalhabilidade a longo prazo e, conseqüentemente, menor será o esforço do profissional ao longo do período da sua aplicação. Assim haverá maior produtividade ao final da jornada de trabalho [CARASEK 2017].

2.2.2 Propriedades no estado endurecido

O estado endurecido é caracterizado pela argamassa solidificada. Nesse estado há a formação e evolução da porosidade e também desempenho mecânico. As propriedades no estado endurecido estão diretamente relacionadas às características dos materiais e aditivos utilizados, ao método de mistura e armazenamento, assim como aos aspectos da argamassa no estado fresco. Quando a argamassa apresenta problemas no estado fresco, há tendência de aparecimento de manifestações patológicas no estado endurecido. [JANTSCH et al. 2020]. Penetração de umidade, baixa resistência mecânica e aspecto visual não homogêneo são exemplos de problemas percebidos no estado endurecido provenientes de aspectos do estado fresco.

As características da resistência mecânica são uma relação das tensões de compressão, tração ou cisalhamento, as quais uma argamassa está submetida [LIRA 2017]. Os valores obtidos nos ensaios de resistência mecânica são uma maneira quantitativa de avaliar as características físicas das argamassas.

A Norma 13281 [ABNT 2005] classifica as argamassas de revestimento de acordo com as propriedades no estado endurecido, conforme o apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação das argamassas de revestimento de acordo com as propriedades no estado endurecido.

Resistência à compressão		Resistência à tração na flexão		Coeficiente de capilaridade	
Classe	MPa	Classe	MPa	Classe	$g/dm^2 \cdot \sqrt{min}$
P1	$\leq 2,0$	R1	$\leq 1,5$	C1	$\leq 1,5$
P2	1,5 a 3,0	R2	1,0 a 2,0	C2	1,0 a 2,5
P3	2,5 a 4,5	R3	1,5 a 2,7	C3	2,0 a 4,0
P4	4,0 a 6,5	R4	2,0 a 3,5	C4	3,0 a 7,0
P5	5,5 a 9,0	R5	2,7 a 4,5	C5	5,0 a 12,0
P6	$> 8,0$	R6	$> 3,5$	C6	$> 10,0$

Os vazios criados pela alta relação água/cimento é um fator que causa a diminuição da resistência mecânica das argamassas. O excesso de água adicionado à mistura não participa das reações de hidratação do aglomerante, criando caminhos na estrutura da argamassa para que haja a evaporação. Esses caminhos causam perda da resistência mecânica [KANNING 2013].

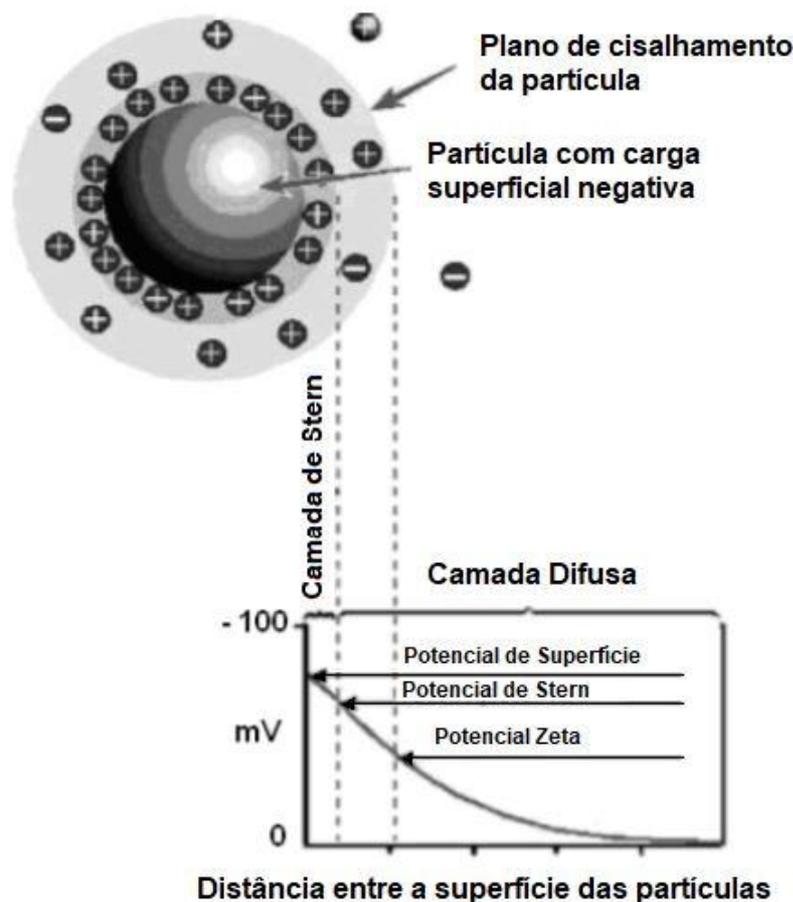
O alto teor de ar incorporado durante o estado fresco, resulta em argamassas endurecidas mais porosas. Apesar de menos densas, com melhores propriedades acústicas e elásticas, essas argamassas apresentam menor resistência mecânica e maior permeabilidade [ROMANO 2013].

2.3 Potencial zeta

Partículas dispersas em meio líquido podem interagir entre si. Em partículas com dimensões menores do que $100 \mu\text{m}$, as forças atuantes na superfície da partícula são as principais para a interação [LYRA 2010].

O potencial zeta é uma das forças de superfície que define a interação entre as partículas dispersas, e pode ser definida como o potencial eletrostático no plano de cisalhamento de uma partícula dispersa [DINGER 2006]. A natureza da carga e a magnitude do potencial zeta são muito importantes para definir o grau de interação e movimentação das partículas dispersas, além de influenciar na interação das partículas com aditivos utilizados em argamassas estabilizadas. A Figura 4 demonstra o potencial zeta em uma partícula dispersa.

Figura 4 – Esquema de potencial zeta em partículas dispersas [GHOSH 2006].

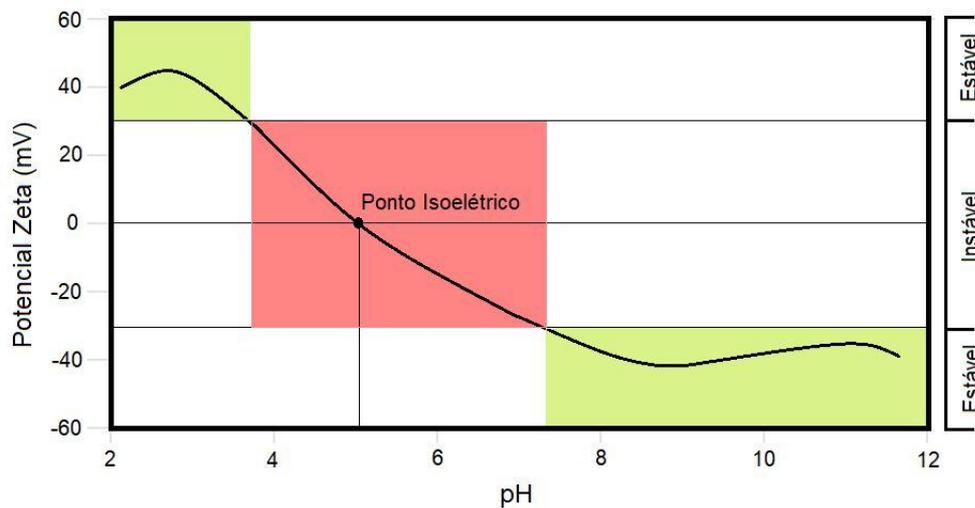


A superfície de uma partícula dispersa em meio líquido pode adquirir cargas por meio da ionização, da dissociação de grupos superficiais ou da adsorção de íons da solução na superfície não carregada da partícula. A região carregada ao redor da partícula pode ser dividida em duas camadas, a camada de Stern e a camada difusa. A camada de Stern é a região interna em que há contra-íons que interagem diretamente com as cargas superficiais

da partícula. A camada difusa é a região mais externa, onde os íons interagem com menos intensidade [ALMEIDA et al. 2008].

Tanto a magnitude quanto a natureza das cargas das partículas se alteram com a variação do pH do meio. Quando uma partícula está imersa em meio polar, ela apresenta cargas em sua superfície originadas da dissociação ou reação de grupos na superfície, como $-OH$ em óxidos, que reagem com íons hidroxônio (H_3O^+) e hidroxila (OH^-) da solução, sendo assim, o pH da solução tem papel fundamental nas cargas que envolverão a partícula. Buscando uma neutralidade elétrica, a carga de superfície da partícula é neutralizada por uma contra carga igual a partir dos íons da solução [VALENCIA 2017]. A Figura 5, mostra a relação entre o pH e a estabilidade de uma suspensão de forma genérica.

Figura 5 – Relação entre o pH, potencial zeta e a estabilidade de uma suspensão [BRASEQ 2015].



O ponto isoelétrico (PIE) é definido como o ponto em que as partículas possuem cargas nulas, nesse caso, somente as forças de atração mássicas atuarão entre as partículas, causando aglomeração. Quanto mais próximo ao ponto isoelétrico as partículas se encontrarem, menor será potencial zeta e maior será tendência à aglomeração.

Como o potencial zeta não pode ser medido diretamente, mede-se a mobilidade eletroforética da partícula dispersa e relaciona-se com o potencial zeta por meio da Equação 2.2 [INSTRUMENTS 2004].

$$\mu_e = \frac{2\varepsilon\zeta f(\kappa_a)}{3\eta} \quad (2.2)$$

Em que:

- μ_e - Mobilidade eletroforética;
- ε - Constante dielétrica;

- ζ - Potencial zeta;
- $f(\kappa_a)$ - Função de Henry;
- η - Viscosidade do meio.

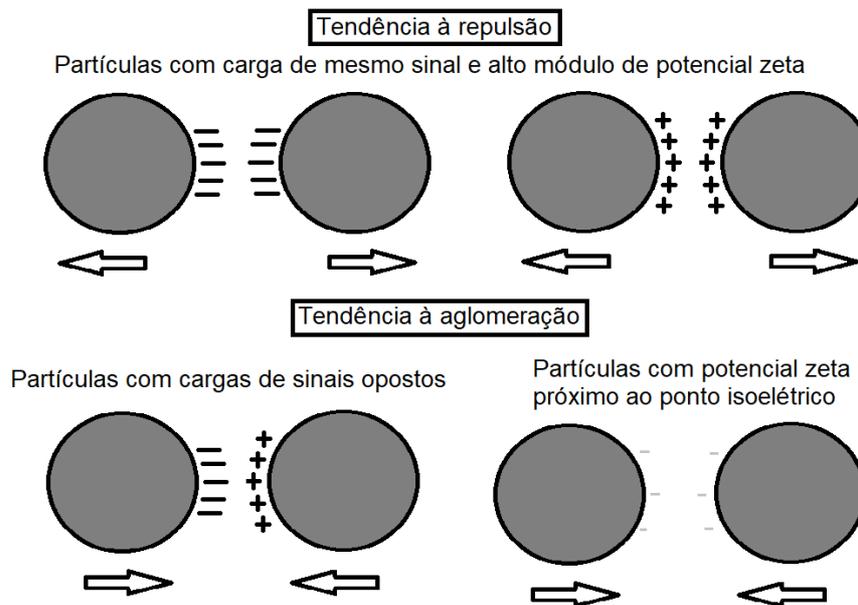
Para medir a mobilidade eletroforética, as partículas em suspensão são submetidas à ação de um campo elétrico. Então, obtém-se o potencial zeta por meio da velocidade da partícula sob atuação de um campo elétrico [ALMEIDA et al. 2008].

2.3.1 Aglomeração de partículas

Quando entram em contato com a água, as partículas de cimento tendem a se aglomerar. Esse fenômeno ocorre devido às forças de atração entre as partículas (forças de Van der Waals), forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e forte interação ou ligação envolvendo as moléculas de água ou hidratos [CASTRO e PANDOLFELLI 2009]. As forças de origem coloidal surgem a partir das interações mútuas entre as partículas de cimento e são influenciadas pela polarização da água. Quando as partículas apresentam forças atrativas superiores às repulsivas, há tendência à aglomeração [OLIVEIRA et al. 2000].

A aglomeração de partículas pode influenciar diretamente nas propriedades da argamassa estabilizada. Os efeitos da aglomeração de partículas podem ser observados na reologia do material, além de influenciar no empacotamento e, conseqüentemente, na microestrutura das argamassas [CASTRO e PANDOLFELLI 2009]. Tais alterações implicam em produtos finais com estrutura heterogênea e com maior incidência de defeitos. A natureza e a magnitude das cargas determinam se haverá tendência à atração ou à repulsão entre as partículas, como é exemplificado na Figura 6.

Figura 6 – Esquema de tendência à atração e à repulsão de partículas.



Partículas com cargas de mesmo sinal e com alto valor em módulo tendem a se repelir. Sempre que houver somente um tipo de material disperso, as cargas das partículas sempre terão a mesma natureza. Quando há dois ou mais materiais dispersos, pode ocorrer diferenças na natureza das cargas. Caso as partículas de um material tenham cargas positivas e de outro material presente na solução possuam cargas negativas, poderá ocorrer a hétero aglomeração.

Quanto mais afastado do ponto PIE, mais estável a solução será. A divisão entre uma solução estável e instável está no ponto $|30\text{mV}|$. Sendo assim, a solução com partículas com potencial maior que $+30\text{mV}$ ou menor que -30mV é considerada estável [INSTRUMENTS 2004]. A Tabela 6 mostra as faixas de estabilidade de acordo com o potencial zeta.

Tabela 6 – Faixas de estabilidade de suspensões de acordo com o potencial zeta [OROPEZA 2011].

Potencial Zeta (mV)	Comportamento de estabilidade dos colóides
0 até $ 5 $	Rápida coagulação ou floculação
$ 10 $ até $ 30 $	Instabilidade incipiente
$ 30 $ até $ 40 $	Estabilidade moderada
$ 40 $ até $ 60 $	Boa estabilidade
Mais de $ 61 $	Excelente estabilidade

2.3.2 Velocidade de sedimentação

O potencial zeta define o grau de atração ou repulsão entre as partículas e indiretamente pode influenciar na velocidade de sedimentação. De acordo com a Lei de

Stokes, os fatores inerentes às partículas que influenciam na velocidade de sedimentação são o diâmetro e a densidade da partícula, como pode-se perceber na Equação 2.3.

$$V = \frac{(d^2) * (\Delta\rho) * (g)}{18\eta} \quad (2.3)$$

Em que:

- V - Velocidade de sedimentação;
- $\Delta\rho$ - Diferença entre a densidade do material disperso e a densidade do meio;
- g - Aceleração da gravidade;
- η - Viscosidade do meio.

A lei de Stokes considera para o cálculo da velocidade apenas as características físicas da partícula, além de considerar todas as partículas como esferas de mesmo tamanho. A Tabela 7 lista os fatores que podem influenciar na velocidade de sedimentação e quais deles são ou não considerados na lei de Stokes.

Tabela 7 – Parâmetros que influenciam na velocidade de sedimentação.

Parâmetros considerados na Lei de Stokes	Parâmetros não considerados na Lei de Stokes
<ul style="list-style-type: none"> - Diâmetro das partículas; - Densidade das partículas; -Densidade do meio; -Viscosidade do meio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aglomeração/repulsão entre partículas; -Variação de tamanho entre as partículas; -Geometria das partículas.

A velocidade de sedimentação de partículas medida na prática pode apresentar valores diferentes aos obtidos com a lei de Stokes, visto que os parâmetros não considerados na lei de stokes podem resultar em alterações na velocidade de sedimentação. As diferenças entre a velocidade de sedimentação real e a velocidade de sedimentação calculada pela lei de Stokes, em resumo, podem levantar as hipóteses apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Hipóteses para a diferença entre as velocidades de sedimentação prática e teórica.

$V(\text{Real}) = V(\text{Teórica})$	$V(\text{Real}) > V(\text{Teórica})$	$V(\text{Real}) < V(\text{Teórica})$
<ul style="list-style-type: none"> - As partículas dispersas não apresentam interações entre si e/ou com o meio; -A geometria das partículas é esférica; - Não há muita diferença entre os tamanhos de partícula. 	<ul style="list-style-type: none"> - Há no material uma quantidade significativa de partículas com o tamanho maior que o tamanho médio; - As partículas formam aglomerados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presença significativa de carga entre as partículas; - A geometria não esférica das partículas; - Há no material uma quantidade significativa de partículas com o tamanho menor que o tamanho médio.

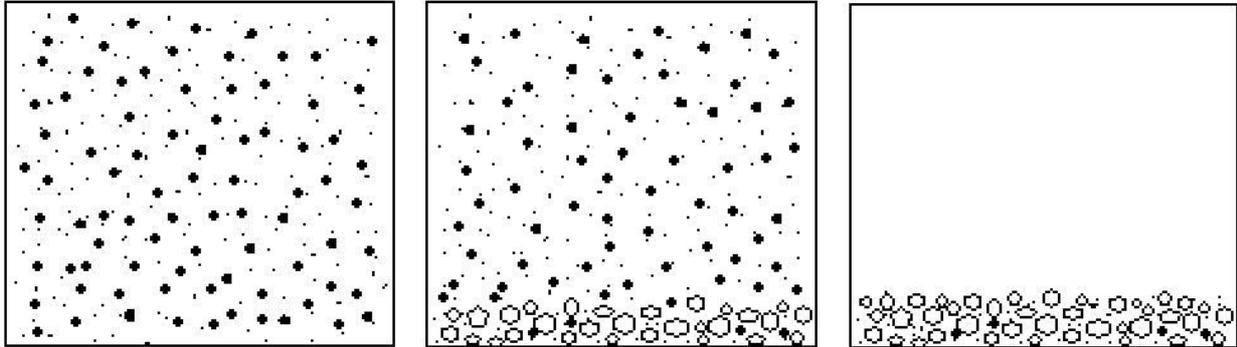
Sendo assim, para as amostras que apresentarem pouca variação entre o tamanho médio de partícula e geometria de partícula próxima à esférica, pode-se considerar que a diferença entre os resultados se dá majoritariamente pelo potencial zeta. A velocidade de sedimentação medida na prática com valores superiores à velocidade de sedimentação teórica pode ser relacionado com a aglomeração significativa de partículas (potencial zeta não interferindo no sistema). A velocidade de sedimentação medida na prática com valores inferiores à velocidade de sedimentação teórica pode estar ligada diretamente à repulsão entre as partículas (potencial zeta elevado).

De acordo com a Lei de Stokes, o aumento no diâmetro das partículas acarreta no aumento da velocidade de sedimentação [BALTAR 2010]. O potencial zeta é um fator crucial para determinar se haverá ou não a ocorrência de aglomeração de partículas. Caso ocorra a aglomeração, o diâmetro aumenta e, conseqüentemente, as partículas sedimentarão mais rapidamente.

Como conseqüência do aumento da velocidade de sedimentação devido à aglomeração, os aglomerados passam a sedimentar com mais facilidade, enquanto as partículas que não aglomeraram permanecem dispersas por mais tempo. A Figura 7 mostra 3 situações distintas exemplificando como a velocidade de sedimentação elevada de aglomerados pode influenciar em sistemas dispersos.

Figura 7 – Situações envolvendo velocidade de sedimentação de partículas.

- (a) Sistema sem formação de aglomerados
 (b) Sistema com parte das partículas aglomeradas
 (c) Sistema com todas as partículas aglomeradas



Um sistema com partículas completamente dispersas é representado na Figura 7a. Quando o potencial das partículas é elevado e de mesmo sinal, não há tendência à aglomeração e como resultado tem-se sistemas mais homogêneos.

A Figura 7b representa uma situação em que uma parcela de partículas que aglomera e sedimenta mais rápido e a outra parcela de partículas que permanecem dispersas. Isso pode ocorrer em situações em que há na solução dois ou mais tipos de materiais dispersos, um material com o potencial zeta elevado e outro com potencial zeta baixo, mas ambos com sinal de mesma natureza. Assim, as partículas do material com potencial zeta baixo aglomeram entre si e sedimentam mais rápido e as partículas do material com alto potencial zeta seguem dispersas e sedimentaram em velocidades mais baixas. Nesse caso, o sistema não ficará homogêneo.

Um caso em que todas as partículas do sistema tendem à aglomeração é representado na Figura 7c. Em casos em que há somente um tipo de material disperso, se as partículas apresentarem potencial zeta próximo ou no ponto isoelétrico, haverá uma tendência à aglomeração. Em casos em que há dois ou mais materiais dispersos, para que ocorra a aglomeração entre todas as partículas, ambos os materiais devem apresentar baixos valores de potencial zeta e/ou sinais opostos de carga. Dessa forma, pode ocorrer aglomeração entre as partículas de mesmo material, devido à baixa repulsão e, também, a heteroaglomeração entre as partículas de materiais distintos, devido à atração das cargas opostas.

A velocidade de sedimentação das partículas do sistema representado na Figura 7c será mais elevada que a velocidade de sedimentação dos outros sistemas representados. O sistema da Figura 7b tenderá a velocidades de sedimentação intermediárias, mesmo com os particulados formados, há uma parcela de partículas que permanece dispersa e sedimentará com velocidades menores, o que causa uma diminuição na velocidade do sistema como um todo.

2.4 Influência da adição de resíduos sólidos

A atividade industrial pode gerar resíduos sólidos, líquidos e gasosos. A destinação dos resíduos deve ocorrer de maneira adequada para que não ocorram danos ao meio ambiente. A poluição acontece quando os resíduos descartados modificam o aspecto estético, a composição ou a forma do meio físico. Considera-se que o meio está contaminado quando existe a mínima ameaça à saúde de homens, plantas e animais [PEREIRA 2002]. A interferência causada pela presença do resíduo pode afetar o solo, a água e o ar, como é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Poluição/contaminação ambiental por fonte de resíduo [PEREIRA 2002].

Geração de Resíduo	Poluição/contaminação		
	Solo	Água	Ar
Industrial	x	x	x
Doméstico	x	x	
Veículos			x
Irrigação e plantio	x	x	

A utilização de resíduos como matéria-prima para produção de outros materiais, além de diminuir o impacto ambiental causado pelo descarte, também reduz a extração de recursos naturais.

Um exemplo de resíduo que pode ser incorporado às argamassas é a cinza volante. Esse resíduo, que possui alto teor de sílica e alumina, é obtido por meio da queima de carvão mineral. As partículas de cinza volante apresentam formato esférico, com tamanhos variando entre 1 μm e 100 μm [CEZAR et al. 2011].

A sílica é outro exemplo de resíduo sólido utilizado na construção civil. Esse resíduo pode ser extraído de diversas fontes, como a casca de arroz e a cana-de-açúcar, por exemplo.

Há muitos estudos que avaliam como a adição de cinza volante ou de sílica afeta questões como trabalhabilidade, reologia, tempo de pega e resistência mecânica [CHANDRA, Hardjito et al. 2015, CHINDAPRASIRT e Rukzon 2008, KWAN e LI 2013]. Apesar dos diversos estudos que tratam da incorporação desses resíduos sólidos às argamassas, ainda há poucos estudos que investigam como esses resíduos influenciam no potencial zeta e quais as consequências disso.

Ao adicionar um resíduo à argamassa, pode-se alterar o pH do meio, mudando, assim, o potencial zeta das partículas de cimento. Da mesma forma, podem-se obter alterações nas propriedades por meio do potencial zeta das partículas de resíduos. Com uma quantidade significativa de resíduo adicionado, haverá na argamassa quantidade suficiente de partículas com potencial zeta capaz de alterar as propriedades tanto pela

natureza como pela intensidade da carga.

Um exemplo da influência do alto potencial zeta das partículas no estado fresco da argamassa é o impedimento da coalescência de bolhas. As bolhas de ar incorporam-se a carga das partículas que estão em contato. Assim, quando as bolhas se aproximam durante a mistura, ocorre a repulsão eletrostática, evitando a coalescência e mantendo o sistema mais estável [ALVES 2002].

A alteração do potencial zeta das partículas de uma argamassa pode interferir na interação com o aditivo incorporador de ar [CEPURITIS et al. 2017]. As partículas com elevado módulo de potencial zeta podem adsorver o aditivo, resultando em teores de ar incorporado mais baixos [DU e Folliard 2005]. A hidratação do cimento também é um ponto importante quando se trata de argamassa estabilizada, podendo sofrer alterações caso haja mudanças no potencial zeta do cimento, já que a hidratação precoce de suspensões de cimento Portland comum é dominado pelo potencial zeta negativo [ZINGG et al. 2008].

No caso da reologia, sabe-se que podem ocorrer variações reológicas entre o momento da mistura e a solidificação da argamassa. Essas variações são causadas por diversos fatores, como reações de hidratação, dissolução, ação de aditivos e aglomeração de partículas [CARDOSO 2009]. Como o potencial zeta está diretamente ligado ao fenômeno de aglomeração de partículas, pode-se considerar que o potencial zeta é um aspecto que deve ser avaliado quando se trata de reologia de pastas e argamassas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar o programa experimental que foi realizado durante este trabalho de pesquisa.

O programa experimental foi dividido em 5 partes, sendo a primeira parte a preparação a preparação dos resíduos. A segunda parte foi a caracterização química e física dos materiais utilizados. A terceira parte foi focada no estudo de pastas, em que se analisou o comportamento do cimento com o aditivo retardador, com a sílica e com a cinza volante. Propriedades que podem sofrer alterações com a mudança do potencial zeta das partículas que compõem as pastas foram avaliadas, tais como tempo de pega e reologia. Ao longo do estudo em pasta foi medido o pH das misturas. Foi possível medir o potencial zeta das partículas no pH em que estavam submetidas durante os ensaios com as pastas.

A quarta etapa foi realizada com as argamassas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Avaliou-se parâmetros como consistência, teor de ar incorporado, resistência mecânica, absorção de água, etc. Da mesma forma, o pH das argamassas também foi medido.

A quinta etapa foi a análise do potencial zeta das partículas. Com os dados de pH das pastas e argamassas foi possível obter o potencial zeta das partículas e, conseqüentemente, relacionar os resultados dos ensaios ao potencial zeta. A Figura 8 mostra o fluxograma das etapas que foram realizadas durante a pesquisa.

Figura 8 – Fluxograma das etapas desse trabalho.



3.1 Materiais

Para a realização deste estudo, foram utilizados os materiais descritos a seguir. A escolha dos materiais baseou-se em estudos anteriores na área de argamassa estabilizada.

3.1.1 Aglomerante

Como aglomerante, optou-se pela utilização do CP II F- 32, um cimento amplamente utilizado na produção de argamassas estabilizadas. De acordo com a Norma NBR 16697 [ABNT 2018], esse tipo de cimento é composto por clínquer e sulfatos de cálcio (75 à 89%) e material carbonático (11 à 25%).

Selecionou-se esse tipo de cimento por apresentar reduzido teor de adição, sendo um cimento mais puro, favorecendo assim a identificação dos efeitos isolados causados pelos diferentes materiais [GUINDANI et al. 2018].

3.1.2 Agregado miúdo

Utilizou-se como agregado miúdo a mistura entre duas areias: a natural fina e a natural média. A mistura das areias foi realizada em quantidades iguais de massa, ou seja, a mistura final foi consolidada a partir de 50% da massa da areia fina e 50% da areia média.

A mistura das duas areias foi realizada para obtenção de uma distribuição granulométrica mais contínua. De acordo com o descrito no item 2.1.1.2, a continuidade da distribuição granulométrica proporciona melhor trabalhabilidade, diminui a porosidade, melhora a resistência mecânica, etc.

3.1.3 Resíduos

Para esse estudo foram escolhidos dois resíduos, a sílica e a cinza volante. Os resíduos possuem características físicas e químicas diversas. Assim, pode-se observar como o potencial zeta pode influenciar em diferentes situações. A sílica e a cinza volante passaram pela estufa durante 24 horas, a uma temperatura de 105 °C, para eliminar a umidade residual. Após a secagem, os resíduos foram peneirados e a parte utilizada foi a passante na peneira de 0,074 mm. O peneiramento garante que as partículas utilizadas possuem as dimensões em que o potencial zeta é a principal força atuante na superfície. A Figura 9 mostra o aspecto dos resíduos.

Figura 9 – Fotografia mostrando o aspecto geral dos resíduos utilizados na preparação das amostras desse trabalho.



3.1.4 Aditivos químicos

Para manter as argamassas no estado fresco por 72 horas, foi adicionado às misturas o aditivo retardador MasterCast R 706 e como incorporador de ar foi utilizado o aditivo MasterAir 701. Os dados técnicos dos aditivos estão listados na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados técnicos dos aditivos informados pelo fabricante.

Aditivo	Base química	Densidade (g/cm^3)	pH	Sólidos
MasterCast R 706	Polissacáridos	1,175 – 1,215	7,5 - 9,5	32,70 – 36,40
MasteAir 701	Resinas Sintéticas	1,000 a 1,040	10 – 12	4,0 a 6,0

3.2 Caracterização

Caracterizou-se os materiais que foram utilizados neste trabalho de acordo com as informações descritas na Tabela 11. Os procedimentos experimentais de caracterização dos resíduos foram realizados após a secagem e peneiramento.

Tabela 11 – Métodos de caracterização dos materiais utilizados no estudo.

Material	Ensaio	Método	Norma
Cimento	Massa Específica	Frasco volumétrico de LeChatelier	NBR 16605 [ABNT 2017]
	Granulometria	Equipamento LUMiSizer	-
	Área Específica	Permeâmetro de Blaine	NBR NM 16372 [ABNT 2015]
	Composição Química	EDX	SHIMADZU modelo EDX – 700 HS
	Morfologia da partícula	MEV	-
Resíduos	Massa Específica	Picnômetro	NBR NM 52 [ABNT 2009]
	Granulometria	Equipamento LUMiSizer	-
	Área Específica	Permeâmetro de Blaine	NBR NM 16372 [ABNT 2015]
	Composição Química	EDX	SHIMADZU modelo EDX – 700 HS
	Morfologia da partícula	MEV	-
Agregado Miúdo	Massa Específica	Picnômetro	NBR NM 52 [ABNT 2009]
	Granulometria	Peneiramento	NBR NM 248 [ABNT 2003]

Para a granulometria do cimento e dos resíduos, optou-se pela utilização do equipamento LUMiSizer, presente no LINDEN (UFSC). O equipamento mensura o tamanho das partículas com base na densidade do material e na velocidade com que as partículas sedimentam em meio aquoso.

3.3 Estudo em pastas

Para compreender melhor a interação entre o cimento, os resíduos e o aditivo retardador, foi realizado o estudo em pastas. Posteriormente, os resultados obtidos no estudo em pastas serviram como base para a definição da quantidade de aditivo retardador utilizado nas argamassas, tempo para desmoldagem e ensaios mecânicos. Em uma etapa posterior, foi relacionado o comportamento das pastas ao potencial zeta das partículas.

3.3.1 Composição e preparação das pastas

A composição das pastas, apresentada na Tabela 12, mostra a quantidade de material que foi utilizado. As quantidades de aditivo retardador indicadas representam 0,8%, 1,0% e 1,2% em relação à massa de cimento de cada pasta.

Tabela 12 – Composição das pastas.

Pasta	Cimento (g)	Sílica (g)	Cinza Volante (g)	Retardador (g)	Água (mL)
100C(0,8R)	100	-	-	0,8	40
100C(1,0R)	100	-	-	1,0	40
100C(1,2R)	100	-	-	1,2	45
50C50S(0,8R)	50	50	-	0,4	40
50C50S(1,0R)	50	50	-	0,5	40
50C50S(1,2R)	50	50	-	0,6	45
50C50Cv(0,8R)	50	-	50	0,4	40
50C50Cv(1,0R)	50	-	50	0,5	40
50C50Cv(1,2R)	50	-	50	0,6	45

Os teores de aditivo retardador foram escolhidos com base no valor médio indicado pelo fabricante. O ideal é que as pastas se mantenham trabalháveis ao longo das 72 horas e, em seguida, iniciem a pega. Foi utilizado a mesma quantidade de água em todas as pastas para que fosse mantida a relação entre a quantidade de água e a quantidade de cimento e resíduo.

Todas as pastas avaliadas, sejam elas com adição de resíduo ou somente com o cimento, foram produzidas de acordo com as seguintes etapas:

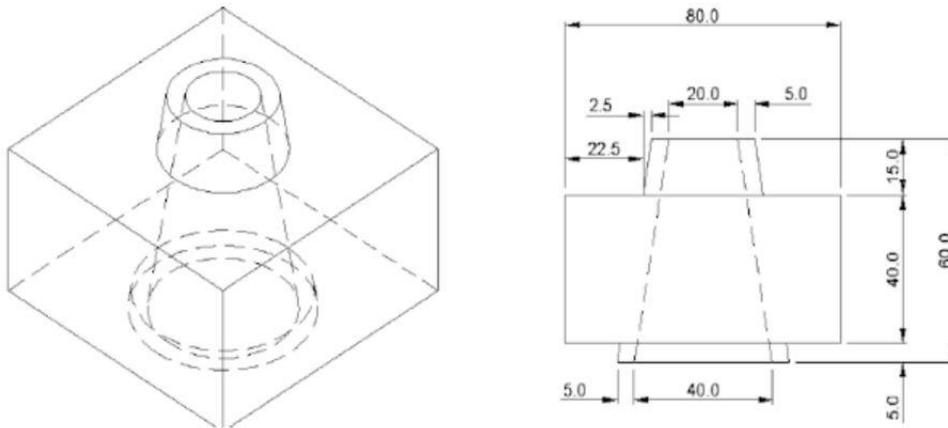
- Mistura do cimento e o resíduo manualmente durante 30 s;
- Adição de 90% da água e mistura no misturador durante 30 s;
- Adição o aditivo retardador juntamente com os 10% de água restantes;
- Mistura dos materiais durante 1 min.

As pastas foram produzidas e armazenadas ao longo das 72 horas em ambiente com temperatura controlada. O recipiente para armazenamento das pastas foram vedados e só foram abertos uma vez ao dia para os ensaios de mini slump e reometria. O pH de todas as pastas foi medido a cada 24 horas durante todo o período de estabilização.

3.3.2 Mini slump

Para verificar a mudança de consistência das pastas ao longo de 72 horas e avaliar a interação entre a fração de material fino que foi utilizada na argamassa e o aditivo retardador, foi realizado o ensaio de mini slump. Esse ensaio desenvolvido por Kantro [KANTRO 1980] consiste em posicionar um molde tronco cônico no centro de uma placa de vidro e posteriormente preenchê-lo com a mistura desejada. O molde é retirado da placa verticalmente, permitindo que a pasta em seu interior se espalhe sobre a superfície da placa. A Figura 10 mostra o esquema do equipamento utilizado para o ensaio.

Figura 10 – Representação e dimensões do cone para ensaio de mini slump [MONTE e Figueiredo 2003].



O espalhamento foi medido a cada 24 horas, partindo do momento em que a pasta foi preparada. Para o cálculo do espalhamento relativo, foi utilizada a Equação 3.1.

$$E(\text{relativo}) = \frac{E(t = x) - 40}{E(t = 0) - 40} * 100 \quad (3.1)$$

Em que:

- E(relativo) - Espalhamento relativo (%);
- E(t=x) - Espalhamento em um tempo determinado (mm);
- E(t=0) - Espalhamento inicial (mm).

As pastas foram mantidas em recipientes fechados ao longo das 72 horas, sendo misturadas a cada 24 horas antes de cada ensaio de mini slump. O pH das pastas foi acompanhado ao longo do período de estabilização.

Após os ensaios de mini slump, foram selecionadas uma pasta com cada um dos resíduos e uma pasta contendo somente cimento para os ensaios de tempo de pega e reometria. As pastas selecionadas foram as que apresentaram trabalhabilidade ao longo das 72 horas de estabilização e que apresentaram menos tempo para endurecer após o período de estabilização.

3.3.3 Tempo de pega

Seguindo os procedimentos descritos na Norma NBR 16607 [ABNT 2018], foi determinado o tempo de pega das pastas que apresentaram melhores resultados nos ensaios de mini slump. A medição foi realizada com a agulha de Vicat e foram obtidas informações

sobre o tempo de início e fim de pega. A Figura 11 mostra a agulha de Vicat utilizada para os ensaios de tempo de pega..

Figura 11 – Fotografia mostrando o dispositivo com a agulha de Vicat utilizada nos ensaios de tempo de pega.



Os tempos de início e fim de pega mensurados foram utilizados como parâmetros na etapa do estudo em argamassas, para datas de desmoldagem dos corpos de prova e realização de ensaios.

3.3.4 Reometria

Com o objetivo de verificar, por meio da tensão de cisalhamento, quais pastas apresentam aglomerados, foi realizado o ensaio de fluxo no reômetro rotacional. Realizou-se o ensaio no reômetro Haake Mars III presente no Nanotec (UFSC), com uma rampa de aceleração durante 1 minuto de 0 à 100 s^{-1} e, em seguida, submeter a uma desaceleração até 0 s^{-1} em 1 minuto.

Optou-se por utilizar a geometria de placas paralelas ranhuradas, para evitar que as pastas fossem para fora do porta amostras. A Figura 12 mostra, como exemplo, um dos ensaios de reometria em realizados.

Figura 12 – Exemplo de ensaio de reometria em andamento.



Os ensaios de reometria foram realizados com pastas que apresentaram os melhores resultados nos ensaios de mini slump e tempo de pega. O pH de cada uma das pastas foi medido a cada 24 horas durante todo o período de estabilização.

3.4 Estudo em argamassas

Para investigar as mudanças que a adição dos resíduos ocasiona, não só na parcela fina de materiais, mas na argamassa como um todo, foram realizados ensaios com a argamassa no estado fresco e endurecido.

Além de possibilitar que se verificasse as mudanças ocasionadas, os ensaios também permitiram conferir se as argamassas desenvolvidas estão dentro dos padrões exigidos para o uso.

3.4.1 Traço e preparação das argamassas

As argamassas foram preparadas com as quantidades de materiais indicados na Tabela 13. A quantidade de aditivo retardador foi definida de acordo com os resultados dos ensaios em pasta.

Tabela 13 – Traços das argamassas após o ajuste de água e aditivo incorporador de ar.

Argamassa	Cimento (g)	Resíduo (g)	Areia Média (g)	Areia Fina (g)	Inc. de Ar (g)	Retardador (g)	Água (mL)
100C	450	-	1350	1350	3,15	3,6	562,5
50C50S	450	450	1125	1125	3,15	3,6	535,5
50C50Cv	450	450	1125	1125	3,6	3,6	517,5

Durante a mistura das argamassas, foi ajustada a dosagem de água e aditivo incorporador de ar. A água foi ajustada para que o valor de espalhamento inicial da argamassa apresentasse o valor de 270+-10 mm. O teor de ar incorporado desejado para as argamassas logo após a mistura é de aproximadamente 25%, sendo assim, o aditivo incorporador de ar foi adicionado em pequenas quantidades, partindo do valor de 0,7% em relação a massa do cimento, até que o material estivesse com teores satisfatórios.

Considerando as particularidades da argamassa estabilizada, como a utilização de dois aditivos distintos e a mistura de duas areias diferentes para a obtenção do material, adaptou-se o procedimento de mistura de acordo com as etapas a seguir:

- Mistura somente das areias por 30 s em velocidade baixa;
- Acréscimo do cimento e dos resíduos e mistura por 30 s em velocidade baixa;
- Acréscimo de 440 mL da água e mistura por 30 s em velocidade baixa;
- Pausa de 1 min para remoção o material aderido às paredes da cuba;
- Acréscimo do aditivo incorporador de ar junto com 10 mL da água e mistura por 30 s em velocidade baixa;
- Acréscimo do aditivo retardador de hidratação junto com 10 mL e mistura por 1 min em velocidade alta;
- Pausa de 30 s para homogeneização manual;
- Finalização com 30 s de mistura em velocidade alta.

Todas as etapas de mistura foram realizadas na argamassadeira. Após preparo, as argamassas foram armazenadas em recipientes vedados e deixadas em ambiente com temperatura controlada durante todo o período de estabilização. Os recipientes só foram abertos uma vez a cada 24 horas para os ensaios de índice de consistência e teor de ar incorporado.

3.4.2 Avaliação de desempenho das argamassas no estado fresco

3.4.2.1 Índice de consistência

Logo após a preparação das argamassas, foram verificados os índices de consistência seguindo as etapas descritas na Norma NBR 13276 [ABNT 2005]. Primeiramente, o molde troncônico foi posicionado no centro da mesa para índice de consistência e, em seguida, o mesmo foi preenchido com argamassa, a partir de 3 camadas aproximadamente iguais. Aplicou-se em cada camada, com o soquete, 15, 10 e 5 golpes, respectivamente. Da mesma forma, foi realizado o rasamento do molde para retirada do excesso de argamassa e após a retirada do molde foram aplicadas 30 quedas na mesa no período de 30 segundos. Após as quedas, o espalhamento da argamassa foi medido com o paquímetro. Para cada argamassa, o procedimento foi repetido 3 vezes, para se obter uma média dos valores.

3.4.2.2 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado das argamassas foi mensurado de acordo com o procedimento recomendado pela Norma NBR 13278 [ABNT 2005]. Para a obtenção dos resultados, fez-se a comparação entre a densidade de massa e a densidade de massa teórica da argamassa, conforme descrito na Equação 3.2.

$$A = 100\left(1 - \frac{d}{dt}\right) \quad (3.2)$$

Em que:

- A - teor de ar incorporado (%);
- d - valor da densidade de massa da argamassa (g/cm^3);
- dt - valor da densidade de massa teórica da argamassa sem vazios (g/cm^3).

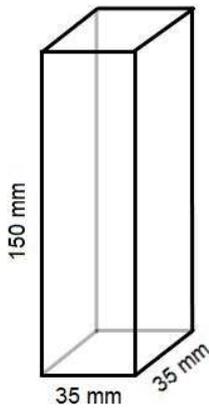
3.4.2.3 Avaliação visual

Para observar melhor o comportamento dos componentes da argamassa, foi verificado o perfil de cada uma das misturas, ao longo de 72 horas. Logo após a preparação das argamassas, foram preenchidos recipientes de vidro e a cada 24 horas foram realizados registros fotográficos para verificar o estado de cada amostra. As amostras de argamassa que ficaram contidas nos vidros não foram misturadas a cada 24 horas como nos outros ensaios, permitindo, assim, que fosse possível avaliar o comportamento dos componentes sem qualquer tipo de movimentação externa.

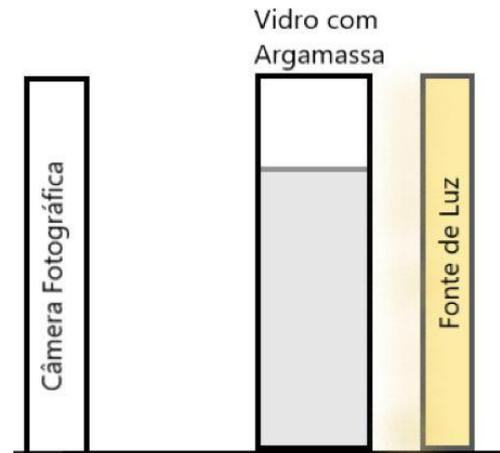
Os frascos que foram utilizados no ensaio são feitos de vidro, com 2mm de espessura e possuem as dimensões mostradas na Figura 13a.

Figura 13 – Informações do ensaio visual em argamassas.

(a) Dimensões do recipiente de vidro.



(b) Esquema do ensaio de avaliação visual.



Para melhor percepção do comportamento dos materiais constituintes das argamassas, foi posicionada uma fonte de luz atrás dos recipientes de vidro para os registros fotográficos, como é mostrado na Figura 13b. Desta maneira, a passagem da luz por meio das argamassas mostrou informações sobre a dispersão das amostras. Quanto mais uniforme a passagem de luz ao longo do perfil do recipiente, mais homogênea a amostra.

3.4.3 Avaliação de desempenho das argamassas no estado endurecido

3.4.3.1 Propriedades mecânicas

Seguindo os procedimentos descritos pela Norma NBR 13279 [ABNT 2005], foram realizados os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão. Foram preparados 6 CP's prismáticos de 40x40x160 mm de cada uma das argamassas. Todos os corpos de prova passaram pelo processo de cura em ambiente controlado antes do rompimento. O rompimento dos corpos de prova foi realizado utilizando a prensa SoloTest de dois módulos. Foram realizados os ensaios de resistência mecânica em 28 e 56 dias após o fim da pega, determinado nos ensaios feitos em pasta. Para os ensaios de resistência à tração na flexão foi utilizado o Módulo 1 da prensa, aplicando uma carga de 50 N/s até a ruptura do corpo de prova. Para a obtenção dos resultados, foram feitos cálculos por meio da Equação 3.3.

$$Rf = \frac{1,5 * Ff * L}{40^3} \quad (3.3)$$

Em que:

- Rf - resistência à tração na flexão (MPa);
- Ff - carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);
- L - distância entre os apoios (mm).

Para os ensaios de resistência à compressão foi utilizado o Módulo 2 da prensa, aplicando-se uma carga de 500 N/s até a ruptura do corpo de prova. Os resultados dos ensaios foram obtidos por meio da Equação 3.4.

$$Rc = \frac{Fc}{1600} \quad (3.4)$$

Em que:

- Rc - resistência à compressão (MPa);
- Fc - carga máxima aplicada (N).

3.4.3.2 Absorção de água e coeficiente de capilaridade

Para verificar as mudanças na absorção capilar que o acréscimo de resíduos causou na argamassa, foram seguidos os procedimentos descritos pela Norma NBR 9779 [ABNT 2012]. Foram preparados 3 corpos de prova de cada uma das argamassas, em moldes cilíndricos 50 x 100 mm. Após 28 dias do fim da pega, os CP's foram colocados na estufa durante 24 horas, com temperatura de 105 °C. Após os corpos de prova estarem secos e resfriados, foram colocados em contato com a água e suas massas foram medidas em 10 e 90 minutos. Também foi verificada a massa dos CP's em 3, 6, 24, 48 e 72 horas. Os cálculos de absorção de água por capilaridade foram feitos por meio da Equação 3.5.

$$C = \frac{M(sat) - M(s)}{S} \quad (3.5)$$

Em que:

- C - valor da absorção de água por capilaridade (g/cm^2);
- M(sat) - massa do corpo de prova saturado (g);
- M(s) - massa do corpo de prova seco (g);
- S - área da seção transversal do corpo de prova em (cm^2).

O coeficiente de capilaridade é o coeficiente angular da reta representada pela absorção de água por capilaridade (eixo das ordenadas) em função da raiz quadrada do tempo (eixo das abcissas). Foi calculado o coeficiente de capilaridade com base nos valores de absorção de água por capilaridade para os tempos compreendidos entre 10 minutos e 72 horas.

3.4.3.3 Índice de vazios

Para determinar a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, foi calculado o índice de vazios com base no procedimento descrito na Norma NBR 9778 [ABNT 2005]. O ensaio foi realizado com dois corpos de prova cilíndricos de cada tipo de argamassa, 28 dias após o fim da pega.

Primeiramente, os corpos de prova passaram pelo processo de secagem em estufa, durante 72 horas em temperaturas de aproximadamente 105 °C. Em seguida, os corpos de prova ficaram submersos em água durante 72 horas. Após o processo de saturação, os CP's foram submetidos à fervura durante o período de 5 horas. Sequencialmente, os corpos de prova foram pesados em balança hidrostática e, em seguida, os CP's foram enxugados com pano úmido e tiveram suas massas registradas. Para o cálculo do índice de vazios, utilizou-se a Equação 3.6.

$$Iv = \frac{M(sat) - M(s)}{M(sat) - M(i)} * 100 \quad (3.6)$$

Em que:

- Iv - índice de vazios (%);
- $M(sat)$ - massa do corpo de prova saturado (g);
- $M(s)$ - massa do corpo de prova seco em estufa (g);
- $M(i)$ - massa do corpo de prova após a fervura (g).

3.5 Estudo do comportamento das partículas

Em partículas menores que 100 μm predomina a atuação de forças de superfície, diferentemente de partículas maiores em que a força de atração predominante é a força de atração mássica [LYRA 2010]. Assim, a última parte do estudo teve como foco o cimento e os resíduos, que são os materiais que apresentam partículas menores que 100 μm .

O cimento, a sílica e a cinza volante podem apresentar diferentes potenciais zeta. Essa diferença pode ser um dos motivos para que as pastas e argamassas contendo cada um dos resíduos apresentem comportamentos diversos. Com isso, o objetivo dessa etapa consistiu em avaliar como a adição de resíduos causou alterações no comportamento das partículas menores que 100 μm do sistema por meio do potencial zeta.

3.5.1 Composição e preparação das amostras

Para os ensaios de potencial zeta, as amostras foram preparadas com a composição apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 – Composição das amostras para ensaio de potencial zeta.

Amostra	Quantidade de Material (g)	Água (mL)
Cimento	0,3	60
Sílica	0,3	60
Cinza	0,3	60

As amostras para as medidas de potencial zeta foram preparadas com água destilada. Os materiais sólidos foram pesados em balança de precisão e, em seguida, adicionados à água destilada.

Foi mantida a mesma proporção de massa de sólidos para volume de água em todas as amostras, já que a concentração de sólidos é um dos fatores que pode influenciar na medição de potencial zeta. As quantidades de materiais nas amostras foram definidas de acordo com ensaios anteriores já realizados pela autora.

Para os ensaios de velocidade de sedimentação foram preparadas as amostras indicadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Composição das amostras para ensaio de velocidade de sedimentação.

Amostra	Cimento (g)	Sílica (g)	Cinza Volante (g)	Água (ml)
Cimento	3	-	-	60
Cimento+Sílica	1,5	1,5	-	60
Cimento+Cinza	1,5	-	1,5	60

As amostras para o ensaio de velocidade de sedimentação tiveram as mesmas proporções de cimento e resíduos que as pastas e argamassas. Assim, foi possível relacionar melhor os resultados. As amostras também foram preparadas com água destilada.

Todas as amostras para medidas de potencial zeta e velocidade de sedimentação passaram por ultrassom antes de cada ensaio, com uma frequência de 40 kHz durante 10 minutos, para que as partículas presentes em todas as amostras ficassem igualmente dispersas.

3.5.2 Potencial Zeta

Com o auxílio do equipamento ZetaSizer Nano25, presente no LINDEN (UFSC), foram realizadas as medidas de potencial zeta para relacionar as cargas das partículas dispersas em água e sua relação com o pH do meio. As amostras da Tabela 14 foram submetidas ao ensaio para verificar a variação do potencial zeta com a alteração do pH do meio. Assim, foi possível observar em que faixa de pH há maior repulsão entre as partículas e relacionar o potencial zeta medido em cada um dos materiais com os valores de pH medidos nas pastas e argamassas. A Figura 14 mostra o equipamento que foi utilizado para os ensaios.

Figura 14 – Fotografia mostrando o equipamento ZetaSizer Nano25 utilizado neste trabalho.



O potencial zeta foi medido na faixa de pH entre 2 e 12. Para a titulação das amostras foi utilizado hidróxido de sódio (1M) e ácido clorídrico (0,5M).

3.5.3 Velocidade de sedimentação

Com o objetivo de relacionar a velocidade de sedimentação à dispersão das partículas em suspensão, foram realizados ensaios no equipamento LUMiSizer (Figura 15), disponível no laboratório LINDEN (UFSC).

Figura 15 – Fotografia mostrando o equipamento LUMiSizer utilizado neste trabalho.



O ensaio consiste em submeter as amostras à aceleração centrípeta, forçando as partículas dispersas a se aglomerarem na extremidade do porta amostra. O porta amostra fica localizado entre uma fonte de luz e um receptor. Conforme as partículas se movimentam e se acumulam, a passagem de luz através da amostra aumenta. Dessa forma, é possível obter a velocidade de sedimentação das partículas.

4 Resultados e Discussão

Ao longo deste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas etapas de caracterização, estudo em pasta, estudo em argamassa e estudo em partícula. Também será feita a análise e discussão dos resultados.

4.1 Caracterização dos materiais

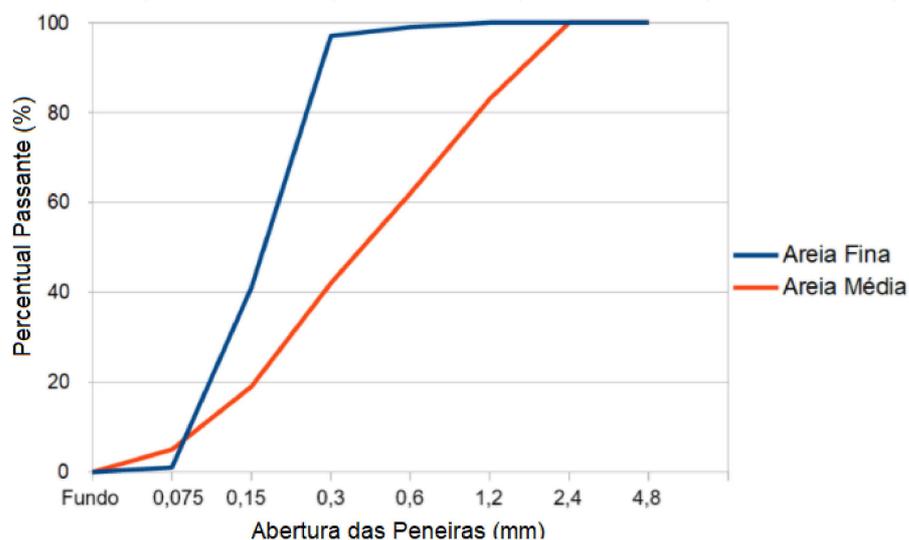
As areias utilizadas como agregado miúdo foram caracterizadas em relação a sua massa específica, módulo de finura e granulometria, conforme é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Características físicas das areias.

Abertura da Malha (mm)	Retido Acumulado (%)	
	Areia Média	Areia Fina
2,4	0,2	0,1
1,2	16,8	0,2
0,6	38,0	0,5
0,3	58,3	3,2
0,15	80,8	59,3
0,075	95,4	99,5
Massa Específica (g/cm^3)	2,57	2,61
Módulo de Finura	2,90	1,63

A distribuição granulométrica das areias está apresentada na Figura 16.

Figura 16 – Distribuição granulométrica das areias.

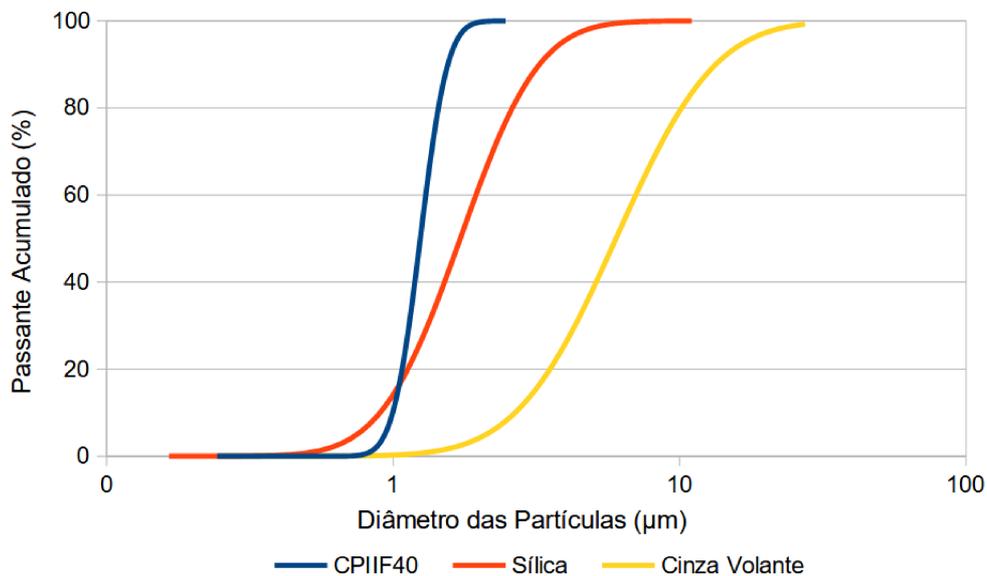


Os materiais finos utilizados (CP II F 40, sílica e cinza volante) foram caracterizados de acordo com suas características físicas e químicas. As características físicas estão apresentadas na Tabela 17. As curvas de distribuição granulométrica dos materiais finos estão apresentadas na Figura 17.

Tabela 17 – Características físicas dos materiais finos.

Material	Massa Específica	Área Específica de superfície (Blaine) (cm^2/g)	d10 μm	d50 μm	d90 μm
CP II F 40	3,09	4895	1,143	1,211	1,473
Sílica	2,66	3199	1,061	1,677	4,158
Cinza Volante	2,09	3103	2,697	6,336	11,888

Figura 17 – Distribuição de tamanho de partículas dos materiais finos.



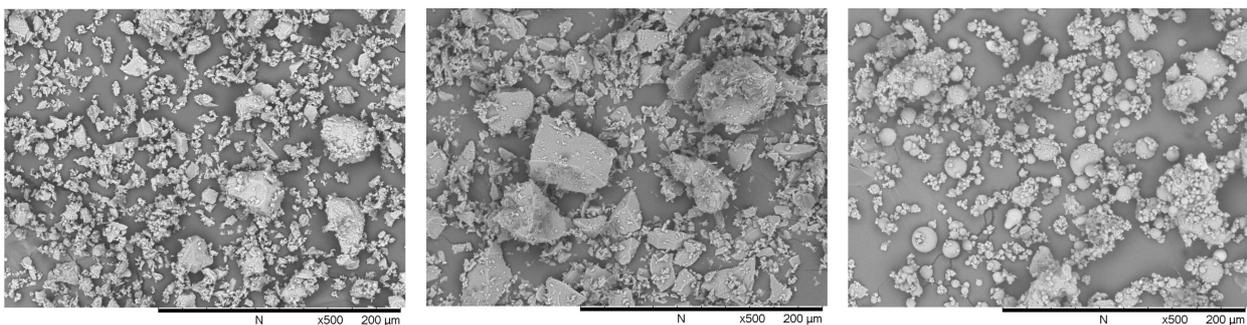
A morfologia das partículas do cimento, da sílica e da cinza volante foram observadas e fotografadas, como é apresentado nas Figuras 18a, 18b e 18c.

Figura 18 – Micrografia evidenciando a morfologia das partículas dos materiais finos utilizados.

(a) CP II F 40

(b) Sílica

(c) Cinza Volante



A composição química dos materiais finos utilizados no estudo está descrita na Tabela 18.

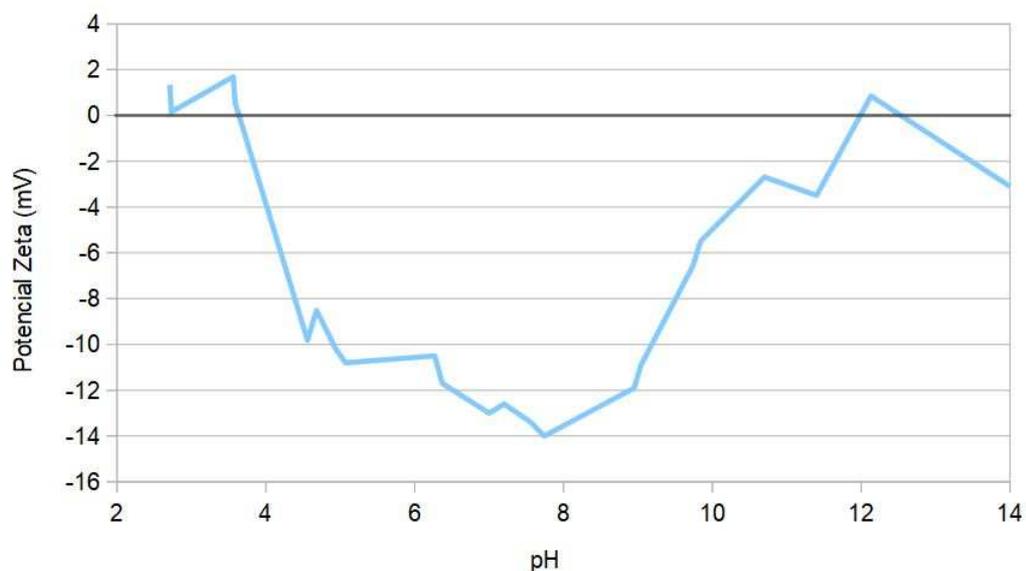
Tabela 18 – Composição química dos materiais finos.

Composição Química (Wt. %)			
Constituintes	CP II F 40	Sílica	Cinza Volante
CaO	69,743	-	3,422
SiO_2	17,456	95,442	61,989
SO_3	4,221	-	0,426
Fe_2O_3	3,408	0,04	3,045
K_2O	1,023	0,063	1,874
Al_2O_3	-	-	27,383
CO_2 (Perda ao fogo)	3,44	4,39	0,09

4.2 Avaliação do comportamento das partículas

Foram realizadas medidas na amostra composta somente por cimento CP II F 40 (100C) para identificar a variação do potencial zeta com a alteração do pH. Pode-se perceber uma tendência à diminuição da carga das partículas tanto em pH básico quanto em pH ácido. Em valores de pH neutro (próximo à 7) o cimento apresentou valores maiores de carga. A Figura 19 apresenta o gráfico de potencial zeta em função do pH do CP II F 40.

Figura 19 – Variação do potencial zeta do cimento com a alteração do pH da solução aquosa.



O pH observado ao longo das 72 horas de estabilização das pastas e argamassas foi 14. Não houve variação no valor do pH em nenhuma das misturas.

Para verificar como as partículas de cada material fino se comportam em situação semelhante à que estão submetidas nas pastas e argamassas, mediu-se o potencial zeta de cada material em pH igual à 14. Os valores de potencial zeta obtidos estão descritos na Tabela 19.

Tabela 19 – Potencial zeta das partículas em suspensão.

Amostra	Potencial Zeta (mV)	pH
Cimento	-3,04	14
Sílica	-10,5	14
Cinza Volante	-20,3	14

Quando submetidos ao pH 14, todos os materiais apresentaram potencial zeta negativo. O potencial zeta do cimento apresenta-se próximo ao ponto isoelétrico, fazendo com que as partículas tenham tendência à aglomeração. Dos resíduos ensaiados, a sílica apresentou valor de potencial zeta significativamente inferior ao valor obtido com a cinza volante.

Os valores de velocidade de sedimentação medidos em pH 14 na amostra de cimento e de cimento com resíduos estão descritos na Tabela 20.

Tabela 20 – Velocidade de sedimentação das amostras em suspensão.

Amostra	Velocidade de Sedimentação (μ/s)
Cimento	99,38
Cimento + Sílica	42,79
Cimento + Cinza	40,01

Pode-se perceber que a amostra de cimento, que apresentou potencial zeta próximo ao ponto isoelétrico, sedimentou mais rapidamente que as outras amostras. A alta velocidade de sedimentação pode estar relacionada ao baixo potencial zeta das partículas, fazendo com que haja mais aglomeração e, conseqüentemente, mais facilidade de sedimentação.

A amostra contendo cimento e sílica apresentou velocidade de sedimentação com valor intermediário. O valor baixo de potencial zeta apresentado pela sílica, apesar de mais distantes do ponto isoelétrico que o valor apresentado pelo cimento, ainda não é suficiente para que haja uma repulsão entre as partículas. É possível que tenha ocorrido, além da aglomeração entre as partículas de cimento, a aglomeração entre as partículas de sílica e entre as partículas de sílica e as partículas do cimento.

Na amostra de cimento e cinza volante os valores de velocidade de sedimentação inferiores podem ser consequência do módulo de potencial zeta elevado apresentado pela cinza. Nessa amostra, mesmo ocorrendo a aglomeração entre as partículas de cimento, o potencial zeta elevado pode ter diminuído a ocorrência de aglomeração das partículas da cinza volante entre si e também a aglomeração entre as partículas de cimento e

as partículas de cinza volante. Tal fato faz com que mesmo tendo parte do material disperso aglomerado e sedimentando mais rapidamente, as partículas mantidas dispersas sedimentam em velocidade menor, gerando assim uma menor velocidade de sedimentação do sistema como um todo.

O tamanho das partículas, apresentado na Figura 17, mostra que a cinza volante possui partículas significativamente maiores que as partículas de cimento e sílica. Quanto maior a partícula, mais rápida será a sua sedimentação.

Outro fator a ser considerado é a geometria das partículas. Como é possível observar nas Figuras 18a,18b e 18c, as partículas de cinza volante possuem formato esférico, enquanto as partículas de cimento e de sílica possuem formato mais angular. O formato esférico facilita a sedimentação, enquanto formas angulares oferecem mais resistência à sedimentação.

A cinza volante apresenta geometria e tamanho de partícula mais favoráveis à sedimentação que o cimento e a sílica. Mesmo com esses fatores, a amostra com cimento e cinza volante apresentou velocidade de sedimentação menor que as demais amostras. Assim, pode-se considerar a influência do elevado módulo de potencial zeta da cinza volante na diminuição da velocidade de sedimentação.

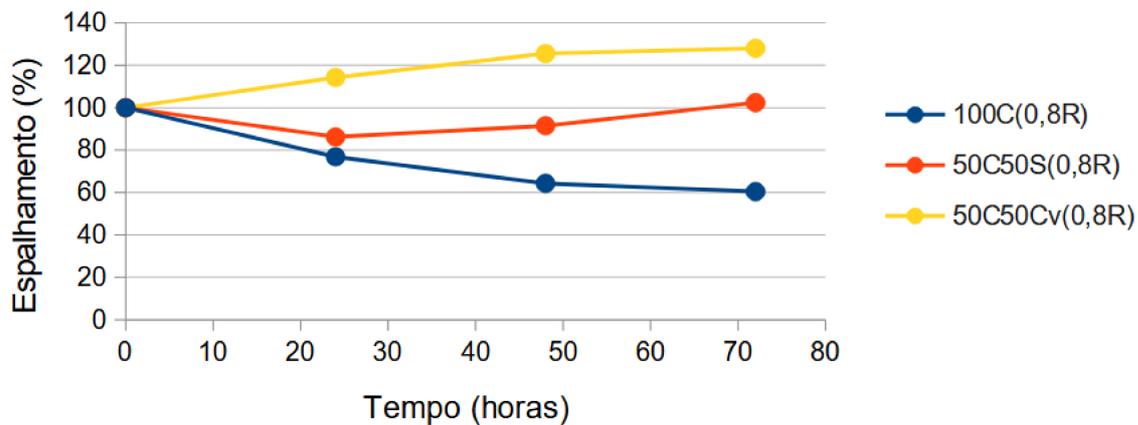
4.3 Estudo em Pastas

4.3.1 Avaliação da fluidez ao longo do tempo

Após os ensaios de mini slump, calculou-se o espalhamento relativo de cada uma das pastas. As porcentagens de aditivo retardador indicadas são em relação à massa de cimento em todas as amostras.

Para comparar a perda da fluidez, considerou-se o espalhamento inicial de cada uma das pastas como sendo 100% e o espalhamento dos dias posteriores foi calculado em relação ao inicial. Sendo assim, os resultados obtidos nos ensaios de mini slump focam em verificar a perda ou ganho de fluidez de cada pasta e não em comparar a fluidez entre as pastas. Os resultados são apresentados nas Figuras 20, 21 e 23.

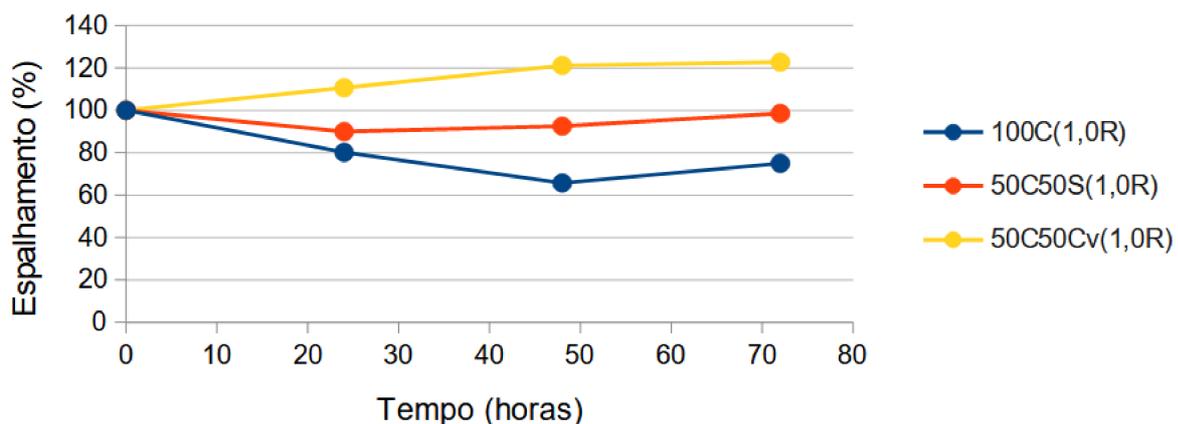
Figura 20 – Resultados de espalhamento relativo obtidos no ensaio de mini slump das pastas com 0,8% de aditivo retardador.



Com teores de aditivo retardador de 0,8%, todas as pastas se mantiveram trabalháveis ao longo das 72 horas. A Pasta 50C50Cv(0,8R) apresentou aumento de 28% de fluidez ao longo do tempo. A pasta 50C50S apresentou pouca variação de fluidez. A pasta 100C perdeu 40% da sua fluidez.

O espalhamento relativo das pastas com 1% de aditivo retardador está apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Resultados de espalhamento relativo obtidos no ensaio de mini slump das pastas com 1% de aditivo retardador.



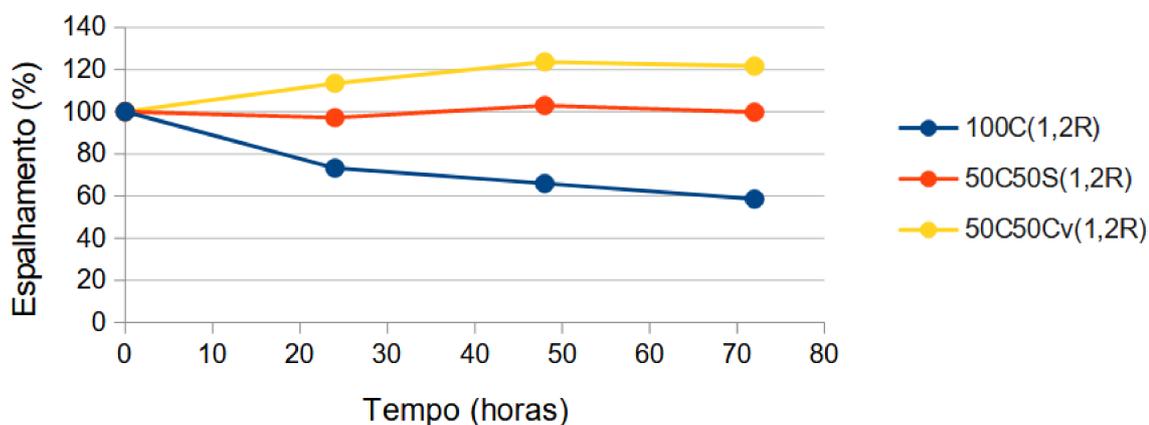
Para o teor de aditivo retardador de 1%, as pastas mantiveram o mesmo padrão de comportamento observado com os teores de 0,8%. Foi observado o fenômeno de exsudação nas pastas com 1% de aditivo retardador. A Figura 22 mostra, como exemplo, a exsudação na pasta 50C50S(1,0R) após 72 horas de estabilização.

Figura 22 – Fotografia mostrando o fenômeno de exsudação observado nas pastas com 1% de aditivo retardador.



Os resultados de espalhamento relativo das pastas com 1,2% de aditivo retardador estão apresentados na Figura 23.

Figura 23 – Resultados de espalhamento relativo obtidos no ensaio de mini slump das pastas com 1,2% de aditivo retardador.



As pastas com teor de aditivo retardador 1,2% apresentaram o mesmo padrão de comportamento das anteriores. A pasta com cinza volante 50C50Cv(1,2R) apresentou-se mais fluida ao final do período de estabilização, aumentando sua fluidez em 21,6%. A pasta com sílica 50C50S(1,2R) não apresentou mudanças significativas de fluidez ao longo do tempo. A pasta com cimento 100C(1,2R) apresentou perda de 40% de fluidez.

Para escolher os teores de aditivo que seriam melhores para utilização nas argamassas, levou-se em consideração a fluidez das pastas ao longo do tempo e também observou-se o comportamento das mesmas após o período de estabilização.

Apesar de mantida a fluidez ao longo do tempo, as pastas com 1% e com 1,2% de aditivo retardador apresentaram demora de cerca de 7 dias após a mistura para

endurecerem, enquanto as pastas com 0,8% de aditivo retardador endureceram 6 dias após a mistura. Nesse caso, optou-se por seguir o estudo utilizando 0,8% de aditivo retardador, já que com tempo de pega reduzido as argamassas produzidas podem ser desmoldadas em menos tempo e os ensaios de resistência mecânica, feitos 28 dias após o fim da pega das argamassas, podem ser realizados com antecedência.

4.3.2 Avaliação do tempo de pega

Após o ensaio de mini slump, fez-se o ensaio de tempo de pega das pastas com o teor de aditivo de 0,8%. O tempo de pega foi calculado em horas, considerando o momento da preparação das pastas como tempo inicial. As pastas ficaram armazenadas em recipientes fechados durante 72 horas, depois do tempo de estabilização, passou-se a medir o tempo de pega. A Tabela 21 mostra o tempo, em horas, passado do momento em que as pastas foram preparadas até o momento do início e fim da pega. Com base no tempo necessário para o fim da pega, pode-se definir o período para desmolde das argamassas e também para a realização dos ensaios mecânicos.

Tabela 21 – Tempo de início e fim de pega das pastas.

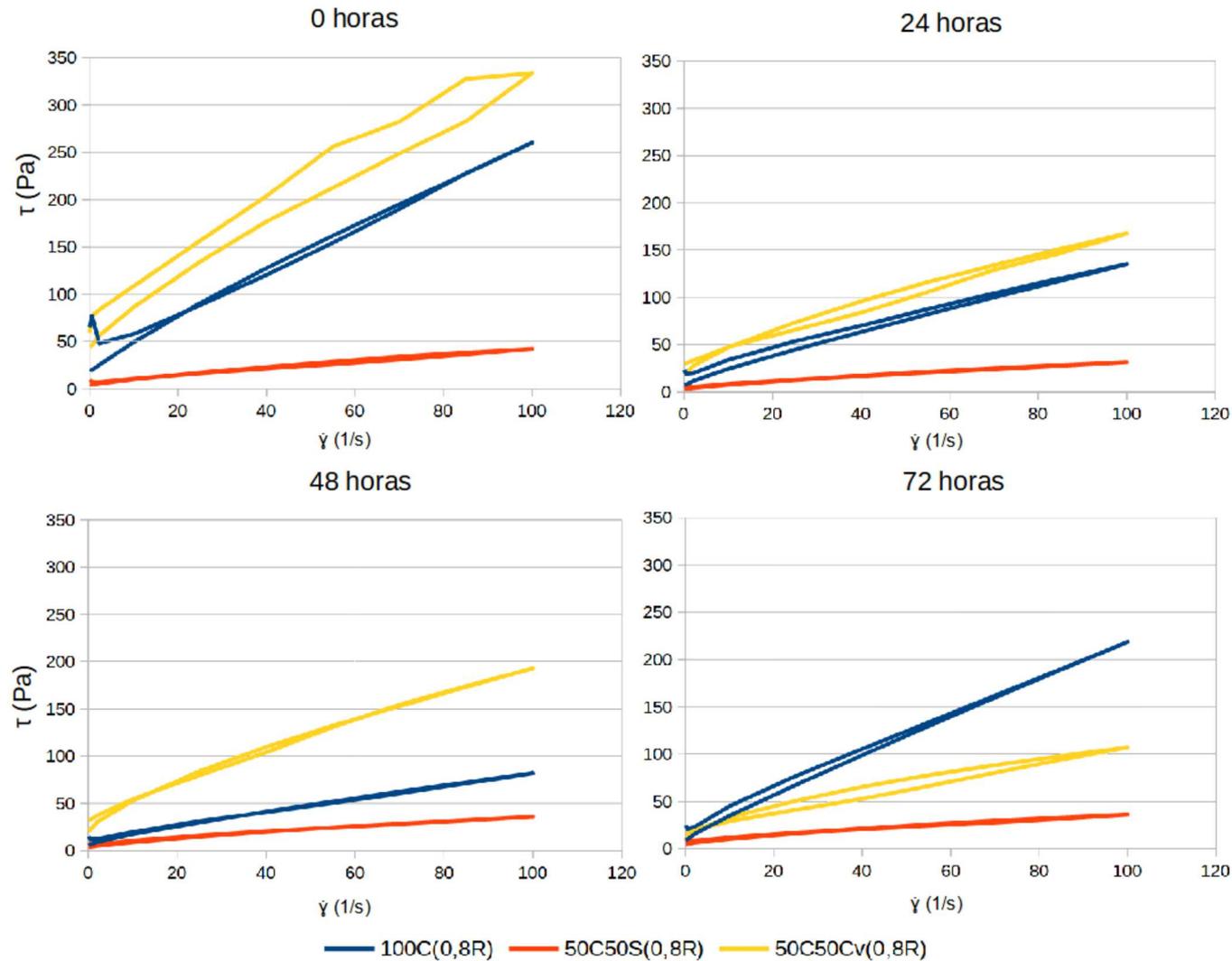
Pasta	Início da pega (horas)	Fim da pega (horas)
100C(0,8R)	123	142
50C50S(0,8R)	118	142
50C50Cv(0,8R)	118	123

A pasta com cinza volante apresentou tempo necessário para o fim da pega inferior às pastas 100C(0,8R) e 50C50S(0,8R). A hidratação precoce de suspensões de cimento Portland comum é dominado pelo potencial zeta negativo [ZINGG et al. 2008]. Além disso, o elevado potencial zeta negativo leva a uma formação acelerada da rede entre as partículas de cimento, de modo a que o tempo de pega da pasta de cimento seja reduzido [ERSOY et al. 2013]. Nesse caso, pode-se relacionar a valor ligeiramente inferior de tempo de fim de pega ao potencial zeta negativo elevado observado durante o estudo das partículas de cinza volante. Outros estudos também apresentaram a relação entre o tempo de pega reduzido e o potencial zeta altamente negativo das partículas presentes nas pastas [ERSOY et al. 2013, GBURECK, Probst e THULL 2002].

4.3.3 Reometria

Após os ensaios de reometria, obteve-se os resultados mostrados na Figura 24.

Figura 24 – Resultados de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento obtidos nos ensaios de reometria.



Pode-se notar que a pasta com cinza volante 50C50Cv(0,8R) apresentou valores de tensão de cisalhamento (τ) elevados com relação às outras pastas. Como a proporção de materiais foi feita em massa, a cinza foi adicionada em maior quantidade devido à sua massa específica baixa. Com mais volume de material fino, há mais partículas em relação à quantidade de água adicionada e mais atrito entre as mesmas, esse fato aumenta a tensão de cisalhamento (τ) [Filho et al. 2020]. A Tabela 22 mostra a relação de volume de material fino e água utilizados nas pastas.

Tabela 22 – Relação de materiais utilizada nas pastas em volume.

Pasta	Volume de material (cm^3)			
	Cimento	Sílica	Cinza Volante	Água
100C(0,8R)	32,36	-	-	40
50C50S(0,8R)	16,18	18,79	-	40
50C50Cv(0,8R)	16,18	-	23,92	40

A área de histerese, que está relacionada com a dispersão do material, é a área formada entre as curvas de subida e descida do ensaio de reometria [FRANÇA, Cardoso e Pileggi 2012]. Além da elevada tensão de cisalhamento, a área de histerese da pasta 50C50Cv(0,8R) em 0 horas também pode ter sido influenciada pela relação de material fino e água da mistura e/ou pelo processo de mistura que não suprimiu a energia requerida para homogeneidade da pasta. Em 24, 48 e 72 horas a área de histerese da pasta 50C50Cv(0,8R) não mostrou-se superior às demais, indicando que o resultado do ensaio em 0 horas pode, de fato, ter sofrido influência dos fatores citados.

Apesar da tensão de cisalhamento e área de histerese maiores, a pasta com cinza volante apresenta aumento da tensão de cisalhamento com o aumento da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) desde o início do ensaio em todos os tempos. Já as outras pastas apresentam tensões de cisalhamento maiores no início do ensaio. Com o aumento da taxa de cisalhamento há uma diminuição e em seguida volta a ocorrer o aumento da tensão de cisalhamento (τ). Esse comportamento é observado devido a quebra de aglomerados que ocorre no início do ensaio, gerando valores maiores de tensão de cisalhamento (τ) iniciais. Após a quebra dos aglomerados, a tensão diminui por um tempo e volta a aumentar com o aumento da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) [ROMANO et al. 2014]. As curvas mostrando o comportamento observado no início de cada ensaio são mostradas na Figura 25 e os valores de tensão de cisalhamento obtidos no início de cada ensaio estão descritos na Tabela 23.

Figura 25 – Resultados iniciais dos ensaios de reometria.

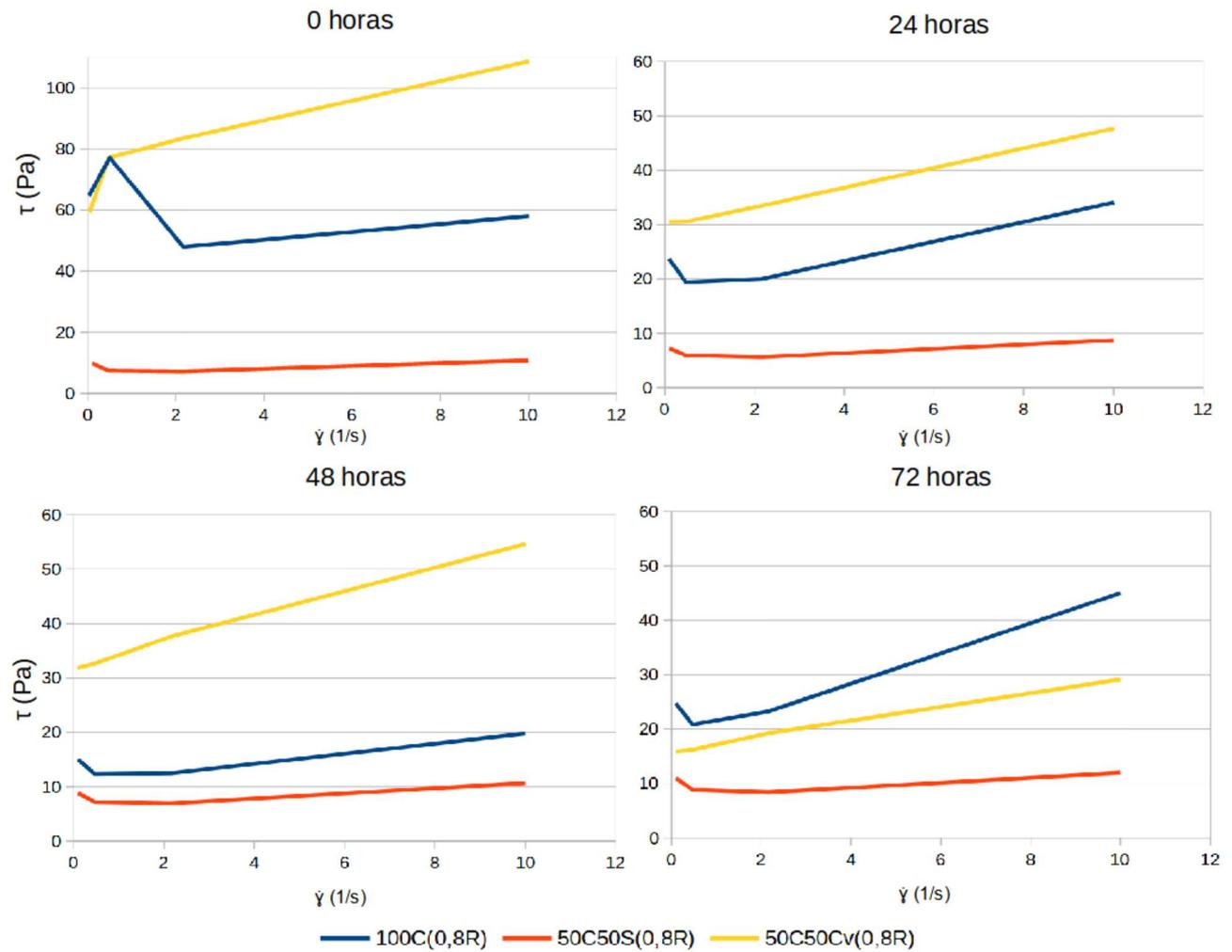


Tabela 23 – Valores de tensão de cisalhamento obtidos no início dos ensaios de reometria.

Pasta	$\dot{\gamma}$ (1/s)	0 horas	24 horas	48 horas	72 horas
		τ (Pa)	τ (Pa)	τ (Pa)	τ (Pa)
100C(0,8R)	0,1	64,70	23,62	14,98	24,58
	0,5	76,38	19,05	12,15	20,13
	2,0	44,71	18,36	11,65	20,04
50C50S(0,8R)	0,1	9,80	7,24	8,79	10,99
	0,5	7,53	5,97	7,22	8,87
	2,0	7,28	5,64	6,95	8,40
50C50Cv(0,8R)	0,1	59,15	30,33	31,77	15,78
	0,5	77,10	30,53	32,65	16,22
	2,0	83,43	33,47	37,62	19,24

A presença de aglomerados nas pastas é exemplificado na Figura 27a. Já na Figura 27b observa-se a pasta com cinza volante com aspecto mais homogêneo, sem a presença de aglomerados.

Figura 26 – Fotografias mostrando o aspecto visual das pastas com 72 horas de estabilização.



(a) Presença de aglomerados na pasta 50C50S(0,8R).

(b) Ausência de aglomerados na pasta 50C50Cv(0,8R).

Foi possível perceber como o potencial zeta, mensurado durante o estudo em partículas, influenciou no comportamento das pastas. A cinza volante apresentou o valor mais elevado, em módulo, de potencial zeta. A pasta com cinza volante 50C50Cv(0,8R) foi a única que não apresentou aglomerados ao longo do período de estabilização. Já as pastas 100C(0,8R) e 50C50S(0,8R) apresentaram maior tendência à aglomeração de acordo com os resultados obtidos no estudo em partículas. Esse comportamento pode ser observado ao longo do estudo em pastas, com a presença de aglomerados nas pastas.

A viscosidade plástica (Figura 27) e a tensão de escoamento (Figura 28) também foram avaliadas ao longo do período de estabilização das pastas.

Figura 27 – Viscosidade plástica das pastas em função do tempo de estabilização.

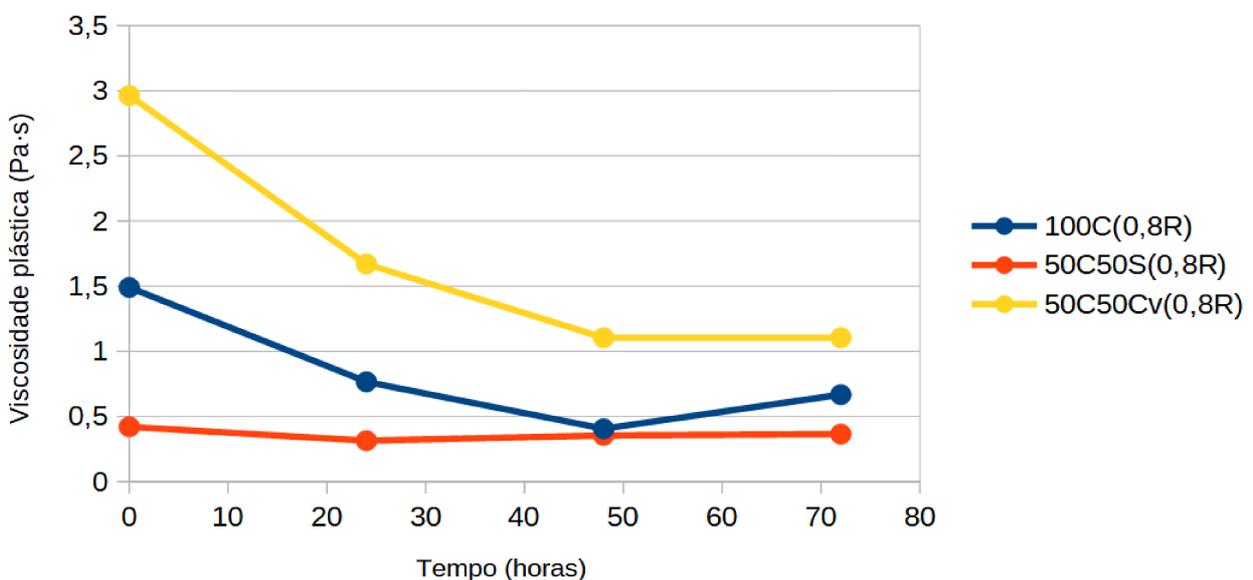
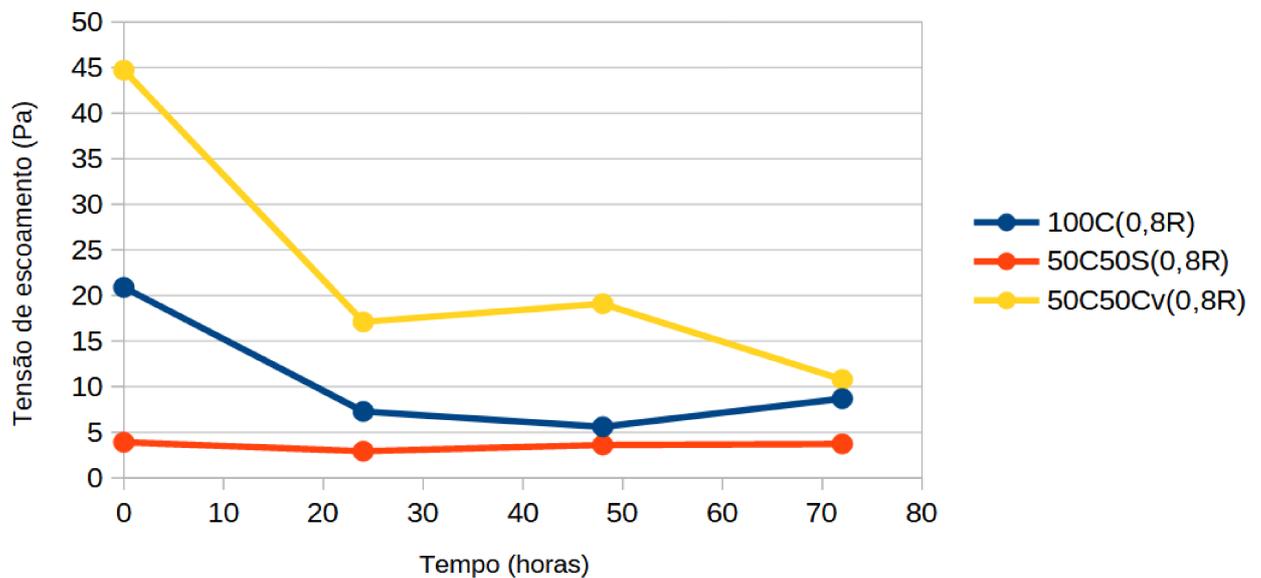


Figura 28 – Tensão de escoamento das pastas em função do tempo de estabilização.



O elevado valor potencial zeta diminui a interação entre as partículas, uma vez que a repulsão entre elas é maior. Alguns estudos relacionam a elevada carga das partículas com a diminuição da viscosidade e a tensão de escoamento [BJÖRNSTRÖM e CHANDRA 2003, FLATT e SCHÖBER 2012, ZINGG et al. 2008]. É possível observar um comportamento contrário ao esperado nas pastas estudadas, onde a pasta 50C50Cv(0,8R), que tem partículas com maior módulo de potencial zeta, mostrou maior tensão de escoamento e viscosidade do que as outras.

Assim como a tensão de cisalhamento, a tensão de escoamento e a viscosidade podem aumentar com aumento do volume de material fino em relação à água. Percebe-se que a pasta com cinza volante (50C50Cv(0,8R)), que possui, em volume, mais material fino que as demais pastas, apresentou valores maiores de viscosidade e tensão de escoamento.

Além da relação entre o volume de materiais finos e a água, a interação entre o aditivo retardador e a cinza volante pode ter contribuído para a discrepância de valores de viscosidade. Algumas pesquisas mostram que a viscosidade plástica das pastas de cimento pode variar entre 0,01 e 1 Pa-s e que a tensão de escoamento assume valores entre 10 e 100 Pa [BANFILL et al. 2003, BANFILL 2005]. No estudo realizado por Guindani [GUINDANI et al. 2018], cujo os materiais utilizados são parecidos química e fisicamente com os dessa pesquisa, pode-se perceber a influência da interação entre o aditivo retardador e a cinza volante para o aumento da viscosidade. No estudo as pastas contendo cimento e aditivo retardador apresentaram viscosidades próximas à 0,6 Pa-s após 48 horas de estabilização, sem muita alteração na viscosidade com a mudança do aditivo retardador. Já as pastas com cimento, cinza volante e aditivo retardador apresentaram valores de viscosidade entre 0,6 Pa-s e 1,4 Pa-s após 48 horas de estabilização. A grande variação de valores ocorrida com as pastas com cinza volante, mas não observada com a pasta contendo só cimento

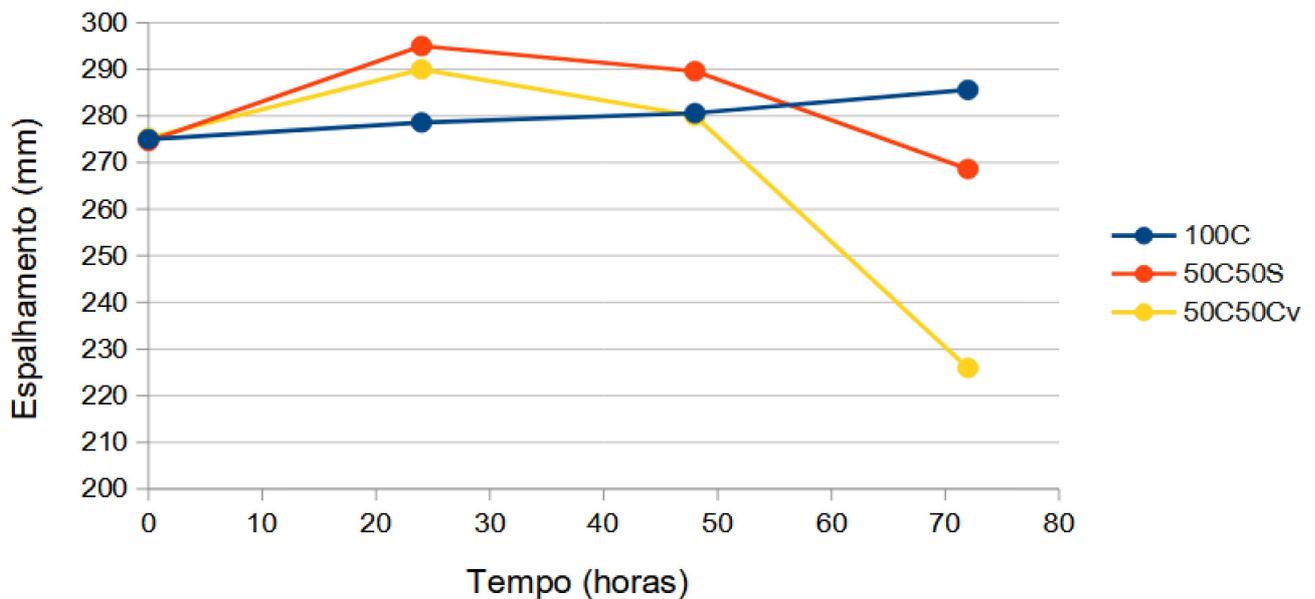
indica que a interação entre a cinza volante e o alguns tipos de aditivos retardadores pode causar aumento significativo na viscosidade.

4.4 Estudo em Argamassa

4.4.1 Comportamento reológico das argamassas

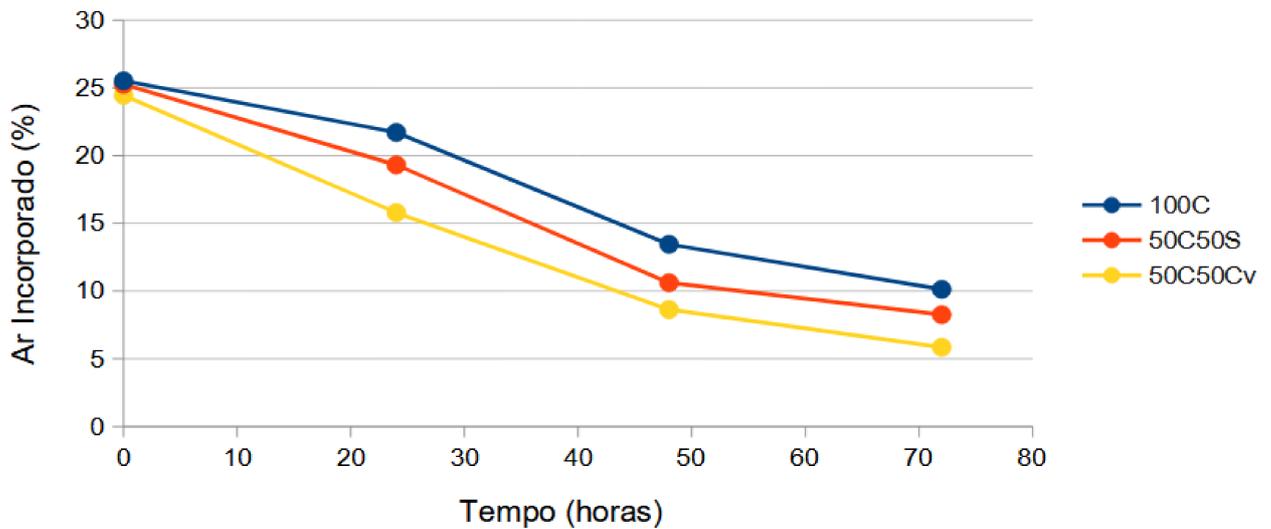
Durante o período de estabilização, foi medido o índice de espalhamento das argamassas a cada 24 horas a partir do momento da mistura (Figura 29). As medições foram realizadas na mesa para índice de consistência e com o molde troncônico.

Figura 29 – Espalhamento em função do tempo.



Após acompanhar as alterações no teor de ar incorporado das argamassas ao longo do período de estabilização, obteve-se os resultados da Figura 30.

Figura 30 – Teor de ar incorporado em função do tempo.



A argamassa com cinza volante (50C50Cv) apresentou teor de ar incorporado de 5,85% ao final da estabilização, enquanto a argamassa com somente cimento (100C) apresentou 10,12% e a argamassa com sílica (50C50S) apresentou 8,25%. Os resultados do estudo em partículas mostram que a mistura entre o cimento e a cinza volante apresentam um potencial zeta elevado. Além de definir a atração/repulsão entre partículas, as cargas superficiais também podem interferir na interação com o aditivo incorporador de ar [CEPURITIS et al. 2017]. As partículas com elevado módulo de potencial zeta podem adsorver o aditivo, resultando em teores de ar incorporado mais baixos [DU e Folliard 2005]. Pode-se relacionar indiretamente o efeito do alto módulo de potencial zeta com o menor índice de espalhamento da argamassa com cinza volante, já que o ar incorporado está ligado à trabalhabilidade [ROMANO 2013].

4.4.2 Análise Visual

Após avaliar o aspecto visual das argamassas ao longo das 72 horas de estabilização, foi possível perceber alterações no material, principalmente na movimentação e coalescência das bolhas de ar. As imagens foram tratadas e aplicou-se um filtro negativo para facilitar a visualização das bolhas de ar.

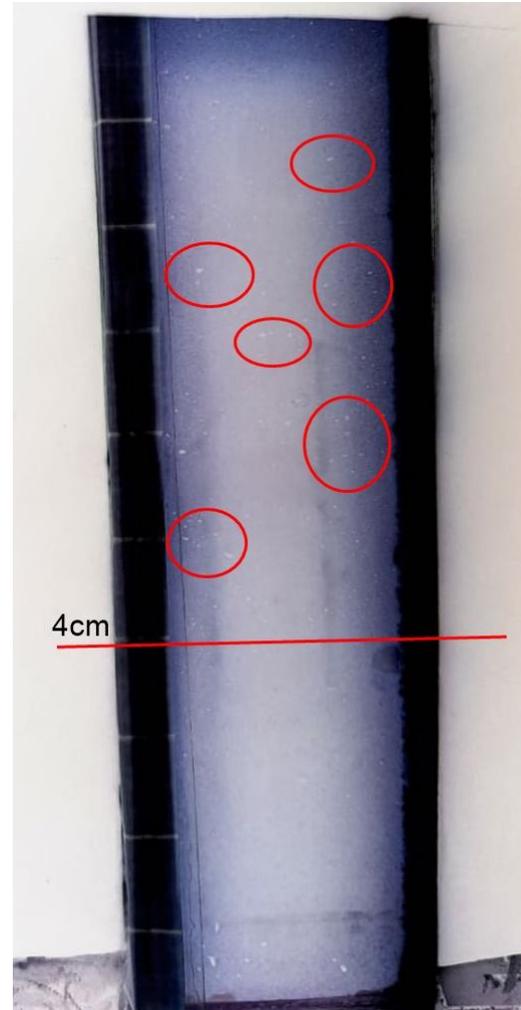
Pode-se perceber a presença de bolhas maiores na parte inferior do porta amostra em todas as imagens, possivelmente ocasionados pela dificuldade de assentar a argamassa no vidro.

Figura 31 – Imagens do ensaio visual em argamassa sem adição de resíduos.

(a) Aspecto da argamassa sem adição de resíduos logo após o preparo.



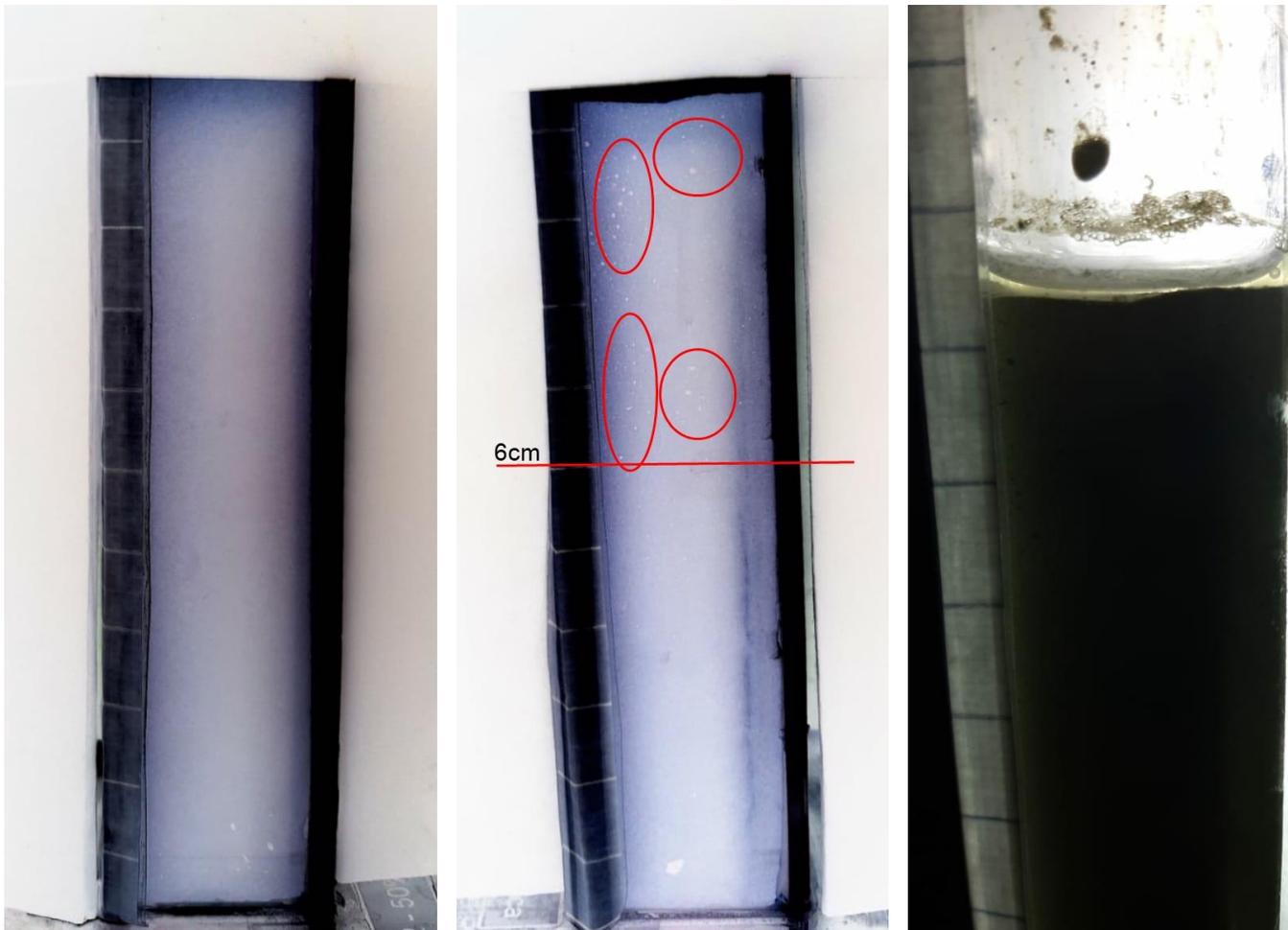
(b) Aspecto da argamassa sem adição de resíduos 72 horas após o preparo.



A Figura 31a apresenta bolhas menores e distribuídas ao longo do porta amostra. Após 72 horas, devido ao fenômeno de coalescência de bolhas, é possível notar a presença de bolhas maiores na parte superior do porta-amostra, como é mostrado na Figura 31b.

Figura 32 – Imagens do ensaio visual em argamassa com sílica.

- (a) Aspecto da argamassa com sílica logo após o preparo. (b) Aspecto da argamassa com sílica 72 horas após o preparo. (c) Água exsudada na argamassa com sílica 72 horas após o preparo.



Na Figura 32a é possível perceber que as bolhas são mais difíceis de serem visualizadas. Já na Figura 32b, as bolhas aparecem maiores e concentradas na parte superior do porta amostra. Na parte superior da Figura 32b pode-se notar uma parte escura causado pela passagem da luz na água exsudada, ilustrada na Figura 32c.

Figura 33 – Imagens do ensaio visual em argamassa com cinza volante.

(a) Aspecto da argamassa com cinza volante logo após o preparo.



(b) Aspecto da argamassa com cinza volante 72 horas após o preparo.



Nas Figuras 33a e 33b, pode-se notar que não há muitas alterações no aspecto da argamassa ao longo do tempo. Visualmente nota-se que, apesar de menos ar incorporado que as demais misturas, a argamassa com cinza mantém-se com a distribuição de bolhas homogênea e sem coalescência. A alta carga das partículas de cinza presentes na argamassa dificultam a coalescência das bolhas, já que as bolhas de ar incorporadas agregam a carga das partículas que estão em contato. Assim, quando as bolhas se aproximam durante a mistura, ocorre a repulsão eletrostática, evitando a coalescência e mantendo o sistema mais estável [ALVES 2002].

Ao longo do ensaio de avaliação visual, no qual as argamassas permaneceram armazenadas em recipientes de vidro (Figura 13), o fenômeno de exsudação foi observado somente na argamassa 50C50S após 72 horas de estabilização. Porém, notou-se que quando armazenadas em recipientes maiores e em maior quantidade para os demais ensaios no estado fresco, todas as argamassas (100C, 50C50S e 50C50Cv) apresentaram o fenômeno de

exsudação ao longo do período de estabilização. As fotos, presentes nas Figuras 34, 35 e 36, foram registradas em 24, 48 e 72 horas após o procedimento de mistura de cada argamassa, antes de cada processo de medição diária de espalhamento e teor de ar incorporado.

Figura 34 – Fotografia mostrando o aspecto da argamassa 100C ao longo do período de estabilização.

(a) 24 horas após o preparo.

(b) 48 horas após o preparo.

(c) 72 horas após o preparo.



A argamassa 100C não apresentou água em sua superfície 24 horas após a mistura (Figura 34a). Após 48 horas (Figura 34b), pode-se observar uma pequena quantidade de água exsudada. Ao final da estabilização, em 72 horas (Figura 34c), a argamassa 100C apresentou quantidade considerável de água exsudada.

Figura 35 – Fotografia mostrando o aspecto da argamassa 50C50S ao longo do período de estabilização.

(a) 24 horas após o preparo. (b) 48 horas após o preparo. (c) 72 horas após o preparo.



A argamassa com sílica apresentou sinais de exsudação 24 após a mistura (Figura 35a). Nota-se que a quantidade de água acumulada na superfície da argamassa fresca aumenta significativamente ao longo do período de estabilização. Com 72 horas após o preparo (Figura 35c) há uma camada de água cobrindo toda a superfície da argamassa.

Figura 36 – Aspecto da argamassa 50C50Cv ao longo do período de estabilização.

(a) 24 horas após o preparo. (b) 48 horas após o preparo. (c) 72 horas após o preparo.



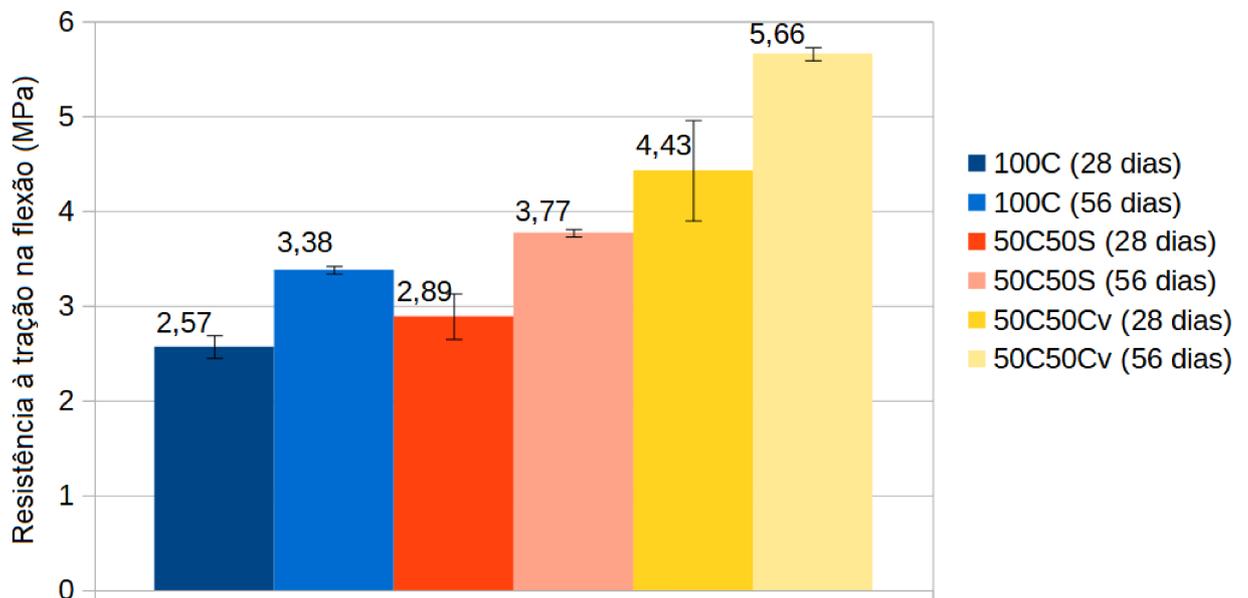
A argamassa com cinza volante 50C50Cv não apresentou sinais de exsudação 24 horas após a mistura (Figura 36a). Após 48 horas (Figura 36b), notou-se a presença de uma camada de água na superfície da argamassa 50C50Cv. Ao final da estabilização (Figura 36c, percebe-se que há uma diminuição na quantidade de água presente na superfície do material com relação ao observado em 48 horas.

4.4.3 Propriedades físicas e mecânicas

4.4.3.1 Propriedades mecânicas

Após os ensaios de resistência à tração na flexão, obteve-se os resultados presentes na Figura 37.

Figura 37 – Resultados obtidos nos ensaios de tração na flexão.



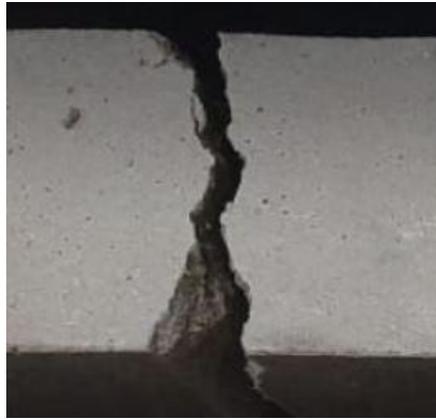
Com os ensaios feitos em 28 dias, a argamassa sem adição de resíduo (100C) apresentou a menor resistência mecânica. A adição de cinza volante, em 28 dias, aumentou a resistência mecânica da argamassa em aproximadamente 72%, enquanto a adição de sílica, após 28 dias, apresentou aumento próximo de 12,4%. Após os rompimentos dos corpos de prova, viu-se que as argamassas apresentavam fraturas distintas. A Figura 38 mostra um corpo de prova de cada argamassa após o rompimento.

Figura 38 – Fotografias mostrando os corpos de prova fraturados após os ensaios de resistência à tração na flexão - 28 dias.

(a) Fratura da argamassa 100C.



(b) Fratura da argamassa 50C50S.



(c) Fratura da argamassa 50C50Cv.



Nas argamassas 100C e 50C50S, antes do rompimento total dos corpos de prova, houve deformação. Já na argamassa 50C50Cv houve o rompimento do corpo de prova sem deformação.

Nos ensaios realizados com 56 dias, pode-se perceber um pequeno aumento na resistência das argamassas. Seguindo o mesmo padrão de comportamento, a argamassa com cinza volante apresentou-se aproximadamente 67,4% mais resistente que a argamassa com somente cimento (100C). A argamassa com sílica apresentou resistência 11,5% maior que a argamassa 100C. Apesar de valores de resistência mecânica próximos, pode-se notar que os corpos de prova das argamassas 100C e 50C50S não apresentaram deformação antes do rompimento, como havia sido observado nos ensaios aos 28 dias. A Figura 39 mostra a fratura no CP das argamassas 100C e 50C50S.

Figura 39 – Fotografias mostrando os corpos de prova fraturados após os ensaios de resistência à tração na flexão - 56 dias.

(a) Fratura da argamassa 100C.

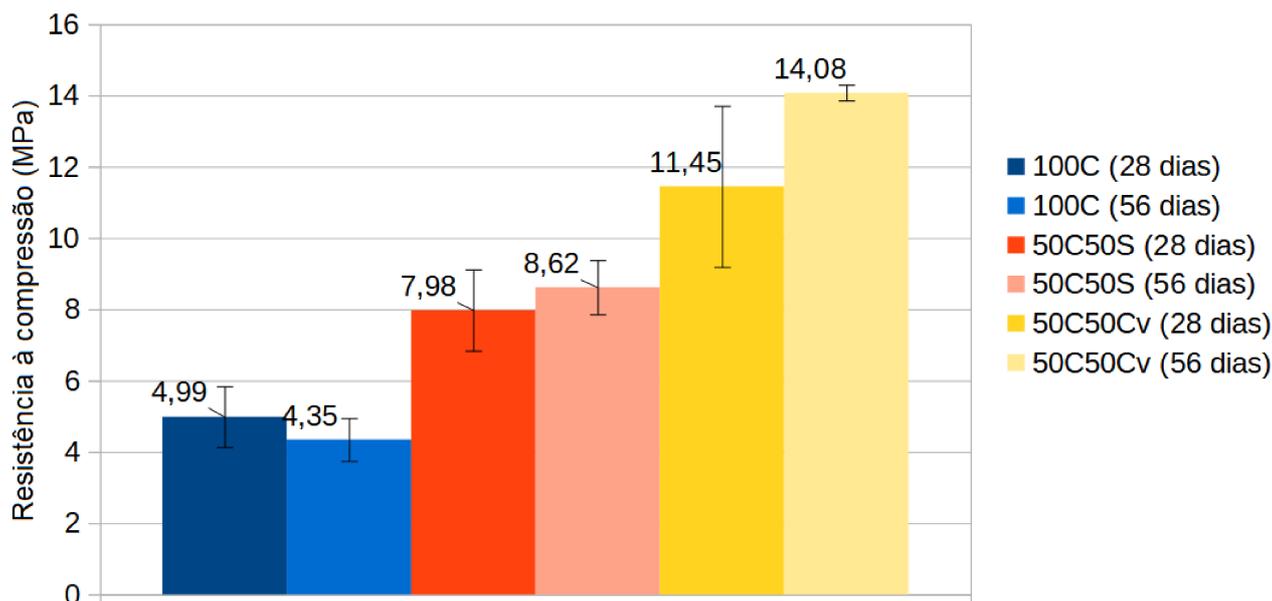


(b) Fratura da argamassa 50C50S.



Nos ensaios de resistência à compressão, o mesmo padrão foi mantido para ambas as idades definidas e testadas. A argamassa com cinza volante apresentou resistência mecânica significativamente maior que as demais, sendo mais que o dobro da resistência mecânica da argamassa 100C e aproximadamente 43% maior que a da argamassa com sílica (50C50S). Os resultados obtidos nos ensaios realizados estão descritos na Figura 40.

Figura 40 – Resultados obtidos nos ensaios de compressão.



Com idades de 56 dias, a argamassa 100C apresentou uma pequena redução na resistência média à compressão quando comparada à argamassa com 28 dias. A argamassa com sílica aumentou sua resistência mecânica média em 5%, enquanto a argamassa com cinza volante apresentou valores 22% maiores aos 56 dias.

A argamassa com cinza volante (50C50Cv) apresentou resistência à compressão aproximadamente 3 vezes maior do que a resistência à compressão da argamassa 100C. A argamassa com sílica (50C50S) mostrou-se 2 vezes mais resistente que a argamassa 100C.

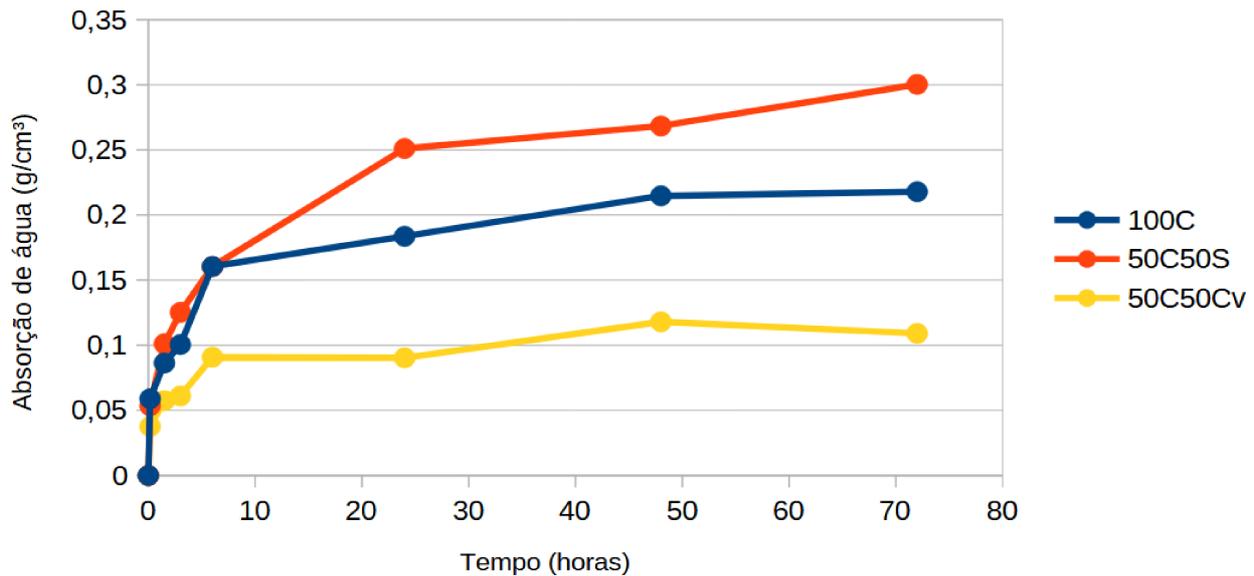
Pode-se perceber a relação entre o teor de ar incorporado e a resistência mecânica das argamassas. A argamassa 50C50Cv, em todos os ensaios, apresentou resistências mecânicas elevadas com relação às demais. Essa argamassa também foi a que apresentou teores mais baixos de ar incorporado ao final do período de estabilização. Outro fator que diferenciou a argamassa com cinza volante das demais foi a não ocorrência do fenômeno de coalescência de bolhas, observado durante a avaliação visual nas outras misturas.

Além do ar incorporado reduzir a resistência mecânica [ROMANO 2013], a coalescência das bolhas durante o período de estabilização nas argamassas 100C e 50C50S pode ter configurado defeitos nos corpos de prova, diminuindo ainda mais a resistência mecânica.

4.4.3.2 Propriedades físicas

Após os ensaios de absorção capilar, pode-se observar o comportamento das argamassas quando em contato com a água. Os resultados obtidos estão na Figura 41.

Figura 41 – Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo.



Além de ligação com a resistência mecânica, pode-se observar que o teor de ar incorporado também apresentou relação com a absorção de água. Após 72 horas em contato com a água, a argamassa com cinza volante, que apresentou teores mais baixos de ar incorporado, absorveu menos água que as demais. A argamassa 100C absorveu mais água que as demais, sendo que a mesma apresentou, durante os ensaios no estado fresco, maiores teores de ar incorporado.

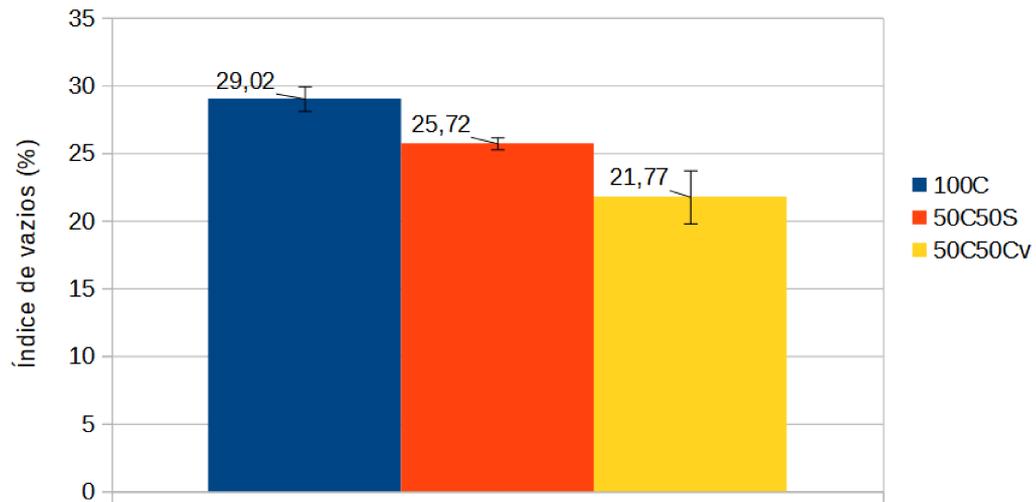
O coeficiente de capilaridade de cada uma das argamassas está descrito na Tabela 24.

Tabela 24 – Coeficiente de capilaridade das argamassas.

Coeficiente de Capilaridade ($g/dm^2 \cdot \sqrt{min}$)		
100C	50C50S	50C50Cv
12,9	10,6	3,0

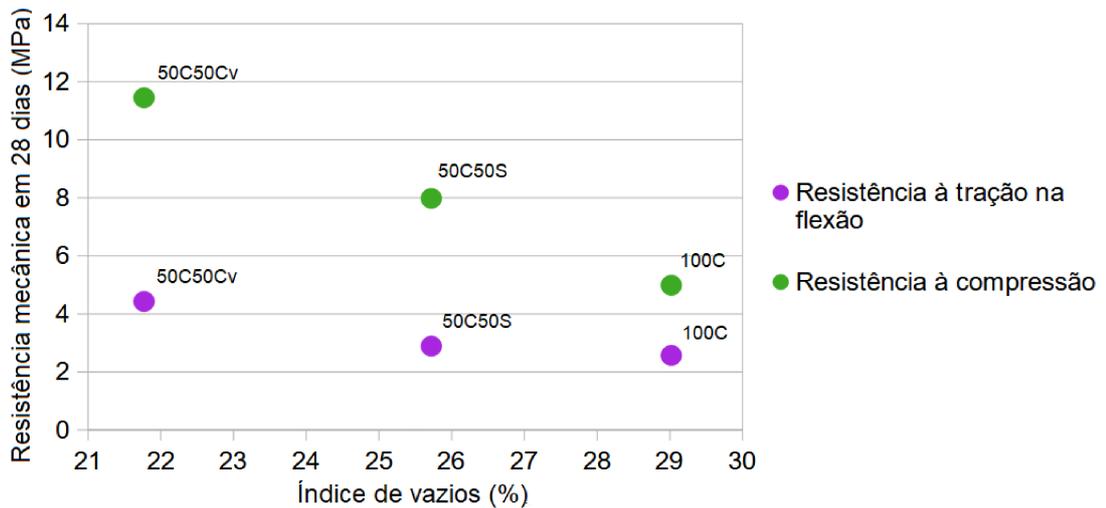
Com os ensaios de índice de vazios realizados, pode-se mensurar o índice de poros permeáveis de cada uma das argamassas. Os resultados obtidos estão na Figura 42.

Figura 42 – Índice de vazios das argamassas.



Como observado anteriormente neste trabalho, a argamassa 50C50Cv apresentou menos coalescência de bolhas e teor de ar incorporado inferior às demais. Esses fatores, além de influenciarem na resistência mecânica e nas propriedades no estado fresco, contribuíram para que a argamassa com cinza volante apresentasse índices de vazios e coeficiente de capilaridade significativamente menores. A Figura 43 mostra a relação entre a resistência mecânica das argamassas e o índice de vazios.

Figura 43 – Relação entre índice de vazios e resistência mecânica.



5 Conclusão

As alterações de potencial zeta ocasionadas pela adição de resíduos às argamassas estabilizadas mostraram-se relacionadas a uma série de aspectos das misturas. Pode-se perceber a influência da carga das partículas no comportamento das partículas em suspensão, nas pastas e nos estado fresco e endurecido das argamassas.

O cimento, durante o estudo em partículas, apresentou potencial zeta próximo ao ponto isoelétrico (-3,04 mV). Esse resultado mostra a tendência à aglomeração das partículas e refletiu em velocidade de sedimentação elevada (99,38 μ/s) em relação às demais amostras. A pasta que contém somente cimento (100C(0,8R)) apresentou nos ensaios de reometria a presença de aglomerados, o que significa que a pasta não é homogênea. A argamassa feita sem adição de resíduos (100C) mostrou-se a mais favorável à incorporação de ar, mantendo os maiores teores de ar incorporado ao longo do período de estabilização. Em contrapartida, pode-se observar a coalescência de bolhas, que deixou o material no estado fresco menos homogêneo. Nesse caso, o baixo potencial zeta não colaborou para que não houvesse repulsão eletrostática das bolhas. No estado endurecido pode-se perceber como o baixo potencial zeta das partículas de cimento influenciou indiretamente na resistência mecânica. Com maior teor de ar incorporado e a presença de defeitos causados pela coalescência de bolhas no estado fresco, a argamassa 100C apresentou os menores valores de resistência mecânica.

A adição de sílica mostrou-se prejudicial para a dispersão das partículas de cimento. Durante o estudo em partículas, a sílica apresentou baixo valor de potencial zeta (-10,5 mV), contribuindo negativamente para a dispersão do sistema. Além da aglomeração das partículas de cimento, também há tendência da aglomeração das partículas de sílica entre si e das partículas de sílica com as partículas de cimento. Como consequência, observou-se a presença de aglomerados durante os ensaios de reometria. Com base nos resultados obtidos no estudo em partícula e nas observações durante o estudo em pasta, pode-se concluir que a pasta 50C50S(0,8R) possui estrutura heterogênea. A argamassa com sílica, assim como a argamassa contendo somente cimento, apresentou coalescência de bolhas no estado fresco e menores valores de resistência mecânica. A repetibilidade do comportamento não favorável durante os estudos em pasta e em argamassa também estão indiretamente ligados ao baixo potencial das partículas de sílica e cimento do sistema.

Os valores de potencial zeta menores favorecem a aglomeração de partículas e teoricamente deveriam diminuir a fluidez das pastas e argamassas. Esse comportamento não foi observado na mistura com sílica, que apresentou mais tendência à aglomeração. Outros fatores inerentes aos materiais utilizados nas misturas influenciaram mais do que o

potencial zeta para aumentar a fluidez das pastas e argamassas em questão. Assim pode-se dizer que a carga entre as partículas do sistema nem sempre é determinante para a fluidez.

A incorporação de cinza volante mostrou-se vantajosa durante o estudo em partículas e o estudo em pasta. O potencial zeta elevado em módulo da cinza volante (-20,3 mV) contribuiu para a diminuição da velocidade de sedimentação das partículas e também evitou a formação de aglomerados, como foi observado durante o estudo em pasta. A pasta com cinza 50C50Cv(0,8R), apesar de mais consistente que as demais pastas, mostrou-se mais homogênea, sem a presença de aglomerados. Nesse caso, apesar do alto potencial zeta, a pasta com cinza apresentou-se menos fluida devido à baixa massa específica da cinza e conseqüentemente maior volume de cinza com relação à água utilizada. Quando adicionada à argamassa, o potencial zeta elevado da cinza apresentou influência negativa na incorporação de ar, porém influenciou positivamente evitando a coalescência de bolhas. Os resultados da argamassa com cinza no estado endurecido foram melhores quando comparados aos resultados das argamassas somente com cimento (100C) e com cimento e sílica (50C50S). Como são dependentes dos aspectos no estado fresco, pode-se dizer que os aspectos da argamassa no estado endurecido estão indiretamente ligados ao potencial zeta.

Em resumo, pode-se perceber como o potencial zeta pode modificar o comportamento das partículas em suspensão, causando alterações na velocidade de sedimentação devido à influência sobre a interação entre as partículas. Em pastas, o potencial zeta elevado em módulo não permitiu a formação de aglomerados na mistura e o potencial zeta predominantemente negativo diminuiu o tempo de pega. Em argamassa, o potencial zeta elevado e negativo mostrou-se propenso à adsorção do aditivo incorporador de ar, causando redução significativa no teor de ar incorporado. Em contrapartida, o elevado módulo de potencial zeta mostrou-se favorável ao impedimento da coalescência de bolhas. Considerando que o ar incorporado e a coalescência de bolhas influenciam nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas no estado endurecido, pode-se considerar a influência indireta do potencial zeta nesses fatores.

Referências

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. agregados-determinação da composição granulométrica. *NBR 248*, 2003. Citado na página 42.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. *NBR 9778*, 2005. Citado na página 51.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos–determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. *NBR 13279*, 2005. Citado na página 49.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. *NBR 13278*, 2005. Citado na página 48.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-preparo da mistura e determinação do índice de consistência. *NBR 13276*, 2005. Citado na página 48.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-requisitos. *NBR 13281*, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 29.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. agregado miúdo-determinação da massa específica e massa específica aparente. *NBR 52*, 2009. Citado na página 42.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. agregados – terminologia. *NBR 9935*, 2011. Citado na página 24.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. argamassa e concreto endurecidos-determinação da absorção de água por capilaridade. *NBR 9779*, 2012. Citado na página 50.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. cimento portland e outros materiais em pó - determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de blaine). *NBR 16372*, 2015. Citado na página 42.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. cimento portland e outros materiais em pó-determinação da massa específica. *NBR 16605*, 2017. Citado na página 42.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. cimento portland–determinação dos tempos de pega. *NBR 16607*, 2018. Citado na página 44.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. cimento portland–requisitos. *NBR 16697*, 2018. Citado na página 40.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. aditivos químicos para concreto de cimento portland parte 1: Requisitos. *NBR 11768-1*, 2019. Citado na página 25.

ABNT. Associação brasileira de normas técnicas. aditivos para argamassas inorgânicas — definição, classificação e métodos de ensaio. *NBR 16862*, 2020. Citado na página 25.

ALMEIDA, M. P. S. d. et al. Síntese e caracterização de nanopartículas de maguemitita recobertas com sílica funcionalizada com grupos amina. Universidade Federal de Goiás, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

ALVAREZ, J. A. S. Alvenarias e argamassas anteriores ao império romano. In: *2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa*. [S.l.: s.n.], 2007. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 19.

ALVES, N. J. D. Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento. 2002. Citado 4 vezes nas páginas 26, 28, 38 e 72.

ANTONIAZZI, J. P. et al. Incorporação de ar em argamassas estabilizadas: influência dos aditivos, agregados e tempo de mistura. *Ambiente Construído*, SciELO Brasil, v. 20, n. 3, p. 285–304, 2020. Citado na página 28.

ANTONIAZZI, J. P. et al. *O efeito dos aditivos incorporador de ar e estabilizador de hidratação nas propriedades das argamassas estabilizadas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2019. Citado na página 26.

BALTAR, C. A. M. Processos de agregação. In: . [S.l.]: CETEM/MCT, 2010. Citado na página 35.

BANFILL, P. F. et al. The rheology of fresh cement and concrete-a review. In: *Proceedings of the 11th international cement chemistry congress*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 50–62. Citado na página 67.

BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh mortar-a review. In: *6th Brazilian and 1st International Symposium on Mortar Technology*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 67.

BAUER, B. et al. Requisitos das argamassas estabilizadas para revestimento. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSA*, v. 11, 2015. Citado na página 21.

BAUER, E. Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades. *Brasília: LEM-UnB*, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 28.

BELLEI, P. et al. Estudo comparativo do desempenho no estado fresco e endurecido de argamassa estabilizadas de 36h e 72h. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSA*, v. 11, 2015. Citado na página 23.

BJÖRNSTRÖM, J.; CHANDRA, S. Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements. *Materials and Structures*, Springer, v. 36, n. 10, p. 685–692, 2003. Citado na página 67.

BRASEQ, C. *Potencial Zeta*. 2015. Disponível em: <http://braseq.blogspot.com/2011/06/potencial-zeta-tudo-o-que-voce-sempre.html>. Acesso em: 15 Maio de 2020. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 31.

CARASEK, H. Aderência de argamassas à base de cimento portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. *São Paulo*, v. 285, 1996. Citado na página 23.

- CARASEK, H. *Argamassas, Materiais de construção civil e princípio de ciência e engenharia dos materiais*. [S.l.]: Editor Geraldo C. Isaia. IBRACON, 3^a ed. v.2., 2017. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 28.
- CARDOSO, F. A. *Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 38.
- CASALI, J. M. et al. Influence of cement type and water content on the fresh state properties of ready mix mortar. *Ambiente Construído*, SciELO Brasil, v. 18, p. 33–52, 2018. Citado na página 23.
- CASTRO, A. D.; PANDOLFELLI, V. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Cerâmica*, SciELO Brasil, v. 55, n. 333, p. 18–32, 2009. Citado na página 32.
- CEPURITIS, R. et al. Influence of crushed aggregate fines with micro-proportioned particle size distributions on rheology of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, v. 80, p. 64–79, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 69.
- CEZAR, D. d. S. et al. Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento. Universidade Federal de Santa Maria, 2011. Citado na página 37.
- CHANDRA, L.; HARDJITO, D. et al. The impact of using fly ash, silica fume and calcium carbonate on the workability and compressive strength of mortar. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 125, p. 773–779, 2015. Citado na página 37.
- CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S. Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 22, n. 8, p. 1601–1606, 2008. Citado na página 37.
- CINCOTTO, M.; SILVA, M.; CARASEK, H. Argamassas de revestimento: propriedades, características e métodos de ensaios. *IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo*, 1995. Citado na página 27.
- CONSONI, A.; CS, P. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. *São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas–IPT/Compromisso Empresarial para Reciclagem–CEMPRE*, v. 4, p. 30, 2018. Citado na página 16.
- DINGER, D. Medidas de pontos isoelétricos sem o uso de analisador de potencial zeta. *Cerâmica Industrial*, v. 11, n. 3, p. 23–24, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 30.
- DU, L.; FOLLIARD, K. J. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and concrete research*, Elsevier, v. 35, n. 8, p. 1463–1471, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 69.
- DUBAJ, E. Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em porto alegre. 2000. Citado na página 24.
- ERSOY, B. et al. Effect of mixing water types on the time-dependent zeta potential of portland cement paste. *Science and Engineering of Composite Materials*, De Gruyter, v. 20, n. 3, p. 285–292, 2013. Citado na página 62.

FILHO, J. S. et al. Estudo da reologia de pastas cimentícias contendo resíduo de tijolo cerâmico moído e metacaulim. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 25, n. 1, 2020. Citado na página 63.

FLATT, R.; SCHÖBER, I. Superplasticizers and the rheology of concrete. In: *Understanding the rheology of concrete*. [S.l.]: Elsevier, 2012. p. 144–208. Citado na página 67.

FRANÇA, M. S. d.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Mixing behavior of mortars evaluated by rotational rheometry. *Ambiente Construído*, SciELO Brasil, v. 12, n. 2, p. 165–174, 2012. Citado na página 64.

GBURECK, U.; PROBST, J.; THULL, R. Surface properties of calcium phosphate particles for self setting bone cements. *Biomolecular engineering*, Elsevier, v. 19, n. 2-6, p. 51–55, 2002. Citado na página 62.

GHOSH, S. K. Functional coatings and microencapsulation: a general perspective. *Functional coatings*, Wiley Online Library, p. 1–28, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 30.

GUINDANI, E. N. et al. Argamassa estabilizada para revestimento: avaliação da influência da adição de finos nas propriedades do estado fresco e do estado endurecido. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 28, 40 e 67.

HAGEMANN, S. E. Materiais de construção básicos. *Rio Grande do Sul: Instituto Federal Sul-Rio-Grandense*, 2011. Citado na página 23.

HERMANN, A.; ROCHA, J. P. d. A. *Pesquisa de viabilidade da utilização da argamassa estabilizada modificada para revestimento sem a necessidade de aplicação do chapisco*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

INSTRUMENTS, M. Zetasizer nano series user manual. *MAN0317*, v. 1, p. 2004, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.

ISAIA, G. C. et al. Concreto: Ciência e tecnologia. *São Paulo: IBRACON*, v. 1, 2011. Citado na página 25.

JANTSCH, A. C. A. et al. Avaliação do comportamento de revestimentos em argamassas estabilizadas submetidas a tratamento superficial com aditivos cristalizantes. *Ambiente Construído*, SciELO Brasil, v. 21, p. 81–99, 2020. Citado na página 29.

KANNING, R. C. Utilização da cinza de folha de bananeira como adição de argamassas de cimento portland. 2013. Citado na página 29.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste—a miniature slump test. *Cement, Concrete and Aggregates*, ASTM International, v. 2, n. 2, p. 95–102, 1980. Citado na página 43.

KWAN, A.; LI, Y. Effects of fly ash microsphere on rheology, adhesiveness and strength of mortar. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 42, p. 137–145, 2013. Citado na página 37.

- LIRA, M. O. Aplicação da mev na investigação da distribuição de partículas de pet micronizado em argamassa para revestimento e assentamento. 2017. Citado na página 29.
- LYRA, J. S. *Estudo da influência de policarboxilato comercial na hidratação, reologia e físico-química de superfície do cimento*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 51.
- MACIEL, L. L.; BARROS, M.; SABBATINI, F. H. Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos. *São Paulo: EPUSP*, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 22.
- MACIOSKI, G. et al. Avaliação de propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas estabilizadas. *X Simpósio Brasileiro de Argamassas*, 2013. Citado na página 20.
- MARGALHA, M. G. Argamassas. 2011. Citado na página 24.
- MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. d. *Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 44.
- NETO, A. M.; DJANIKIAN, J. G. Aspectos de desempenho da argamassa dosada em central. 1999. Citado na página 20.
- NEVILLE, A. M. *Tecnologia do concreto*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. Citado na página 25.
- OLIVEIRA, F. d. Argamassa industrializada: Vantagens e desvantagens. *Civil Engineer Degree Dissertation, Anhembi Morumbi University, São Paulo*, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 21.
- OLIVEIRA, I. d. et al. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. *Fazendo arte editorial*, v. 224, p. 119–137, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 17, 27 e 32.
- OROPEZA, M. V. C. *Síntese e caracterização de nanopartículas núcleo-casca de poliestireno e polimetacrilato de metila obtidas por polimerização em emulsão sem emulsificante e fotoiniciada*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 33.
- PEREIRA, J. A. R. Geração de resíduos industriais e controle ambiental. *Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará. Pará*, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 37.
- POSSER, N. D. Proporcionamento de argamassas para reboco de recuperação. 2004. Citado na página 25.
- RECENA, F. A. P. *Conhecendo argamassa*. [S.l.]: Edipucrs, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 19.
- ROMANO, R. C. d. O. *Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 26, 29, 69 e 77.

- ROMANO, R. C. d. O. et al. Rheological characterization of cementitious suspensions mixed with lime or phyllites. *Ambiente Construído*, SciELO Brasil, v. 14, n. 1, p. 75–84, 2014. Citado na página 64.
- SILVA, N. G. da et al. Efeitos do ar incorporado nas propriedades do estado endurecido em argamassas de cimento e areia. 2009. Citado na página 28.
- SOUSA, J.; BAUER, E. Estudo da reologia das argamassas de revestimento no estado fresco. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT). Anais. Rio Grande do Norte, Brasil*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 571–577. Citado na página 27.
- SZLAK, B. et al. Manual de revestimentos de argamassa. *Associação Brasileira de Cimento Portland*, v. 104, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 13, 23 e 24.
- VALENCIA, G. A. *Estudo das características de dispersão de suspensões de carbonato de cálcio*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017. Citado na página 31.
- VARELA, N.; VIEIRA, F. S. Cimento: Uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas. In: *1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 23.
- ZINGG, A. et al. Adsorption of polyelectrolytes and its influence on the rheology, zeta potential, and microstructure of various cement and hydrate phases. *Journal of Colloid and Interface Science*, Elsevier, v. 323, n. 2, p. 301–312, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 38, 62 e 67.