

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS PATOS
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

VINICIUS DA SILVA VIEIRA

**ARGAMASSA À BASE DE CAL COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA PARA
APLICAÇÃO EM RESTAURO DE EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS**

PATOS - PB
2024

VINICIUS DA SILVA VIEIRA

**ARGAMASSA À BASE DE CAL COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA PARA
APLICAÇÃO EM RESTAURO DE EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – *Campus* Patos, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Diego de Paiva Bezerra

**PATOS - PB
2024**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CAMPUS PATOS/IFPB

V658a Vieira, Vinicius da Silva.

Argamassa à base de cal com adição de sílica ativa para aplicação em restauro de edificações históricas / Vinicius da Silva Vieira.- Patos, 2024.

76 f. : il., color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal da Paraíba, Campus Patos-PB, 2024.

Orientador(a): Prof. Me. Diego de Paiva Bezerra.

1. Materiais de construção - Argamassa 2. Argamassa - Revestimento 3. Argamassa-Evolução I. Título II. Bezerra, Diego de Paiva III. Instituto Federal da Paraíba.

CDU – 691.53

Ficha catalográfica elaborada por Lucikelly Oliveira CRB 15/574

DECISÃO 1/2024 - CBEC/DDE/DG/PT/REITORIA/IFPB

VINICIUS DA SILVA VIEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso

	Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Patos, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.
--	--

Aprovado em 08 de março de 2024

Banca Examinadora

(assinado eletronicamente)

Prof. Me. Diego de Paiva Bezerra (IFPB -
Campus Patos)

Prof. Dra. Luisa Eduarda Lucena de Medeiros
(IFPB - Campus Patos) Prof. Me. Leane

Priscilla Bonfim Sales (UFPB)

Patos - 2024

Documento assinado eletronicamente por:

- **Diego de Paiva Bezerra, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO**, em 08/03/2024 10:58:38.
- **Luisa Eduarda Lucena de Medeiros, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO**, em 08/03/2024 11:45:09.
- **Leane Priscilla Bonfim Sales, PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL**, em 09/03/2024 15:31:14.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 07/03/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código: 543601
Verificador: 351490c7a5
Código de Autenticação:



NOSSA MISSÃO: Ofertar a educação profissional, tecnológica e humanística em todos os seus níveis e modalidades por meio do Ensino, da Pesquisa e da Extensão, na perspectiva de contribuir na formação de cidadãos para atuarem no mundo do trabalho e na construção de uma sociedade inclusiva, justa, sustentável e democrática.

VALORES E PRINCÍPIOS: Ética, Desenvolvimento Humano, Inovação, Qualidade e Excelência, Transparência, Respeito, Compromisso Social e Ambiental

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus** por ter utilizado diversas pessoas para abençoar minha jornada acadêmica, por conceder-me esta oportunidade extraordinária e por guiar-me ao longo deste desafiador percurso, sempre oferecendo-me proteção diária e por mostrar-me que os planos divinos são superiores aos meus próprios objetivos.

A minha família, em especial aos meus pais **Ana Lúcia** e **Joaquim Neto**, às minhas irmãs, **Ana Livia**, **Samyra** e **Nathália**, por acreditarem no meu potencial e sempre me incentivarem a lutar por meus objetivos, assim como não mediram esforços para que eu chegasse a esta etapa de minha vida.

A todos os meus amigos, em especial **Emilly Oliveira**, **Lucas Marques**, **Marcelo Galdino**, **Maria Marques**, **Mariana Moura**, **Milena Medeiros**, **Milena Nery** e **Poliana Dantas**, por todo companheirismo e por me proporcionarem uma caminhada mais leve. A todos os meus amigos que fiz nessa jornada acadêmica, em especial a **Brena Felício**, **João Paulo**, **Maria Emelly** e **Vinicius Cruz**.

Ao meu grupo de pesquisa, os quais foram essenciais para a realização deste trabalho, **Aline Hipólito** e **Natany Medeiros**. Ao Laboratório IF Maker, em nome de **Gabriel Ferreira**, por todo suporte com a impressão de materiais em 3D. Aos Laboratórios de Materiais de construção civil da Unifip e do IFPB-PT em nome dos técnicos laboratoristas **Arnaldo Junior** e **Wendel Rodrigues** e ao Laboratório de Combustíveis e Materiais da Universidade Federal da Paraíba.

Aos professores **João Paulo** e **Priscila Maciel**, que além de orientadores em projetos de pesquisa, foram os principais incentivadores para o início da minha jornada acadêmica, exemplos de profissionais que são inspiração para mim. Aos professores que me orientaram em minhas pesquisas durante minha jornada acadêmica, **Alexandre Neves**, **Gracieli Louise**, **Jose Henrique**, **Luisa Eduarda**, **Raissa Silva** e **Susana Cristina**, agradeço pelos ensinamentos, conhecimentos compartilhados e pela cordialidade.

A coordenadora do curso **Hannah Dora**, por não ter medido esforços durante toda minha graduação, estando sempre disponível, as idas aos laboratórios, por toda doação e buscando sempre o melhor para o curso.

Ao meu orientador, **Diego Paiva** que me ajudou com muita dedicação, eternamente grato por todo apoio, pelos conselhos, atenção e paciência durante a graduação e para a realização do trabalho.

Aos membros da banca de defesa, **Luisa Eduarda** e **Leane Priscilla** pela grande gentileza de aceitarem o convite para auxiliarem no enriquecimento deste trabalho.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma para a construção deste trabalho.

RESUMO

Historicamente, o sistema de revestimento externo argamassado passou por processos evolutivos, inicialmente compostas por cal aérea e areia, entretanto, inconvenientes como a ausência de hidraulicidade e baixa resistência mecânica levou à adição de materiais pozolânicos. Nesse contexto, o objetivo do estudo foi analisar as propriedades mecânicas de misturas contendo cal hidráulica e sílica ativa (SA) no estado fresco e endurecido. Entretanto, o uso de SA em misturas à base de cal introduzem dinâmicas complexas nos mecanismos de endurecimento, os estudos acerca das suas reações com a cal são incipientes, representando um desafio para otimizar o desempenho dos materiais resultantes. A pesquisa foi realizada em três etapas: caracterização dos materiais, produção das misturas e ensaios no estado fresco e endurecido. As misturas analisadas foram fabricadas com um parâmetro de referência estabelecido a partir da análise bibliográfica, sendo a relação cal/agregado fixada em 1:3 em volume. Posteriormente, com intuito de analisar a influência da adição de SA, foram adicionados os percentuais de 10% (SA10), 20% (SA20) e 30% (SA30) de sílica em relação à massa de cal. Em seguida, as relações água/cal foram determinadas com base nos resultados do índice de consistência, mantendo-se o intervalo predefinido entre 250 e 265 mm para aceitação da mistura. Acerca do processo de cura, inicialmente, todas as amostras foram mantidas nas formas em ambiente laboratorial controlado. Após o período de sete dias, ocorreu a desforma dos CP, que foram envoltos em plástico filme, permanecendo nesse estado até as idades de ruptura (14, 28 e 56 dias). Analisando os resultados no estado fresco das misturas com adição de SA em comparação com a amostra de referência (REF), foi observado um aumento médio de 3,4% no espalhamento das misturas com adição de SA para uma mesma relação água/finos. Na análise do estado endurecido, observou-se que a adição de SA influenciou os valores de resistência à compressão, o menor declínio foi de 2,672% aos 14 dias para a mistura SA10 e o maior corresponde a 64,61%, aos 14 dias de cura para a amostra SA20. Os resultados indicaram que são necessárias investigações adicionais, que envolvem a investigação da cinética e natureza das reações químicas entre os componentes da mistura durante o processo de cura, além da variação das dosagens de SA e do processo de cura. Apesar dos desafios encontrados, a pesquisa revelou contribuições significativas nos âmbitos ao aprofundar o entendimento quanto à formulação de materiais voltados ao restauro, proporcionando avanços no conhecimento científico, contribuindo para a compreensão dos materiais de construção e suas aplicações práticas.

Palavras-chave: Argamassas históricas; Restauração; Adição pozolânica

ABSTRACT

Historically, the mortared external cladding system has undergone evolutionary processes, initially composed of aerated lime and sand, however, drawbacks such as the lack of hydraulicity and low mechanical strength led to the addition of pozzolanic materials. In this context, the aim of the study was to analyze the mechanical properties of mixtures containing hydraulic lime and active silica (AS) in the fresh and hardened state. However, the use of SA in lime-based mixtures introduces complex dynamics into the hardening mechanisms, and studies on its reactions with lime are incipient, representing a challenge for optimizing the performance of the resulting materials. The research was divided into three stages: characterization of the materials, production of the mixtures and tests in the fresh and hardened state. The mixtures analyzed were manufactured using a reference parameter established from the literature review, with the lime/aggregate ratio set at 1:3 by volume. Subsequently, in order to analyze the influence of the addition of SA, percentages of 10% (SA10), 20% (SA20) and 30% (SA30) of silica were added in relation to the mass of lime. The water/lime ratios were then determined based on the results of the consistency index, keeping the predefined range between 250 and 265 mm for acceptance of the mixture. Regarding the curing process, all the samples were initially kept in the molds in a controlled laboratory environment. After seven days, the CPs were unmolded and wrapped in plastic wrap, remaining in this state until the breaking ages (14, 28 and 56 days). Analyzing the results in the fresh state of the mixtures with added SA compared to the reference sample (REF), an average increase of 3.4% was observed in the spread of the mixtures with added SA for the same water/fines ratio. In the analysis of the hardened state, it was observed that the addition of SA influenced the compressive strength values, with the smallest decline being 2.672% at 14 days for the SA10 mix and the largest corresponding to 64.61% at 14 days of curing for the SA20 sample. The results indicate that further research is needed, involving the investigation of the kinetics and nature of the chemical reactions between the components of the mixture during the curing process, as well as varying the dosages of SA and the curing process. Despite the challenges encountered, the research revealed significant contributions in the areas of deepening the understanding of the formulation of materials aimed at restoration, providing advances in scientific knowledge, contributing to the understanding of the materials used in restoration.

Keywords: Historic mortars; Restoration; Pozzolanic addition

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de bordas obtidas no ensaio de índice de consistência: a) bordas desuniformes; b) bordas uniformes	21
Figura 2 - Esquema ilustrativo com as etapas de obtenção da sílica	27
Figura 3 - Fluxograma do programa experimental	35
Figura 4 - Frações de areia retidas nas malhas das peneiras	38
Figura 5 - Resultado do DRX para a sílica ativa	42
Figura 6 - Resultado do DRX para a cal hidráulica	43
Figura 7 - Densidade de massa no estado fresco	49
Figura 8 - Teor de ar incorporado	50
Figura 9 - Relação entre a densidade de massa no estado fresco e o teor de ar incorporado	51
Figura 10 - Resultados do ensaio de índice de consistência: a) amostra REF; b) amostra SA10; c) amostra SA20; d) amostra SA30	54
Figura 11 - Densidade de massa no estado endurecido	55
Figura 12 - Resultados do ensaio de teor de ar incorporado no estado endurecido	57
Figura 13 - Relação entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado no estado endurecido	58
Figura 14 - Ensaio de absorção de água por capilaridade a) perda de seção em 10 min; b) perda de seção em 90 min	60
Figura 15 - Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação química dos materiais pozolânicos segundo a NBR 12653 (2014)	9
Tabela 2 – Composição química dos materiais pozolânicos segundo a NBR 12653 (2014)	10
Tabela 3 – Propriedades físicas dos materiais pozolânicos	10
Tabela 4 - Denominações da cal	15
Tabela 5 - Exigências químicas das cales	16
Tabela 6 - Exigências físicas das cales	16
Tabela 7 - Tipos de cal hidráulica	17
Tabela 8 - Propriedades das argamassas no estado fresco e suas definições	19
Tabela 9- Principais resultados de espalhamento para o ensaio de índice de consistência	21
Tabela 10 - Propriedades das argamassas no estado endurecido e suas definições	23
Tabela 11 - Formas de sílica encontradas e características e descrição	28
Tabela 12 - Requisitos químicos e físicos da sílica ativa	29
Tabela 13 - Compostos possíveis de serem formados na atividade pozolânica	31
Tabela 14 – Ensaio de caracterização	37
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de massa específica e unitária do agregado miúdo	39
Tabela 16 - Propriedades físicas da SA	39
Tabela 17 - propriedades físico-química da SA	40
Tabela 18 - propriedades químicas da cal	40
Tabela 19 - Composição química da cal e SA determinada por fluorescência de raios X	41
Tabela 20 – Identificação e traços das misturas a serem estudadas	44
Tabela 21 - Ensaio nas amostras nos estados fresco e endurecido	44
Tabela 22 - Teste para definição da mistura de referência	46
Tabela 23 - Composição das misturas estudadas	53
Tabela 24 - Resultados da variância para a resistência à compressão de diferentes misturas	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.C.	Antes de Cristo
A/A	Água/Aglomerante
A/S	Água/Sólidos
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ACS10	Mistura de cal com adição de 10% de Sílica
ACS20	Mistura de cal com adição de 20% de Sílica
ACS30	Mistura de cal com adição de 30% de Sílica
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
ASTM	American Society for Testing and Materials
C2ASH8	Stratlingita
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio (Portlandita)
CaCO ₃	Carbonato de cálcio (Calcita)
C-A-H	Aluminato de Cálcio Hidratado
CaMg(CO ₃) ₂	Dolomita
CaO	Óxido de cálcio
C-A-S-H	Silicoaluminato de Cálcio Hidratado
CC	Caulim Calcinado
CH I	Cal hidráulica tipo 1
CH II	Cal hidráulica tipo 2
CH III	Cal hidráulica tipo 3
CL	Cal cálcica
CLANAP	Comércio Importação e Exportação Ltda
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
DRX	Difratometria de Raios X
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro III
FL	Cal formulada

FRX	Fluorescência de Raios X
GCC	Grupo Cimentos de Chihuahua
HL	Cal hidráulica
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
Labeme	Laboratório de Estruturas e Materiais
MC	Metacaulim
MgCO ₃	Carbonato de magnésio
MgO	Óxido de Magnésio
MPa	Mega Pascal
Na ₂ O	Óxido de sódio
NBR	Norma brasileira
NHL	Cal hidráulica natural
NM	Norma mercosul
°C	Grau Célsius
RCD	Resíduo de construção e demolição
REF	Amostra de referência
SA	Sílica Ativa
SiO	Óxido de silício
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Trióxido de Enxofre
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UR	Umidade Relativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
2.1 GERAL.....	4
2.2 ESPECÍFICOS.....	4
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
3.1 ARGAMASSAS HISTÓRICAS PARA REVESTIMENTO.....	5
3.2 ADIÇÕES POZOLÂNICAS NAS ARGAMASSAS À BASE DE CAL.....	7
3.3 ARGAMASSAS À BASE DE CAL.....	14
3.3.1 Tipos de Cales.....	14
3.3.2 Características das argamassas à base de cal para revestimentos.....	17
3.3.3 Propriedades no estado fresco das argamassas à base de cal.....	18
3.3.3.1 Trabalhabilidade.....	19
3.3.3.2 Densidade de massa.....	22
3.3.4 Propriedades no estado endurecido das argamassas à base de cal.....	22
3.3.4.1 Resistência Mecânica.....	23
3.3.4.3 Absorção de água por capilaridade.....	25
3.4 SÍLICA ATIVA.....	26
3.5 MECANISMOS DE ENDURECIMENTO DAS ARGAMASSAS À BASE DE CAL... 30	
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	34
4.1 ETAPA 1: MATERIAIS UTILIZADOS.....	36
4.2 ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	36
4.2.1 Análise física.....	37
4.2.2 Informações acerca da composição química.....	40
4.2.3 Análise mineralógica.....	41
4.3 ETAPA 3: ENSAIOS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO.....	43
4.3.1 Ensaio no estado fresco.....	45
4.3.2 Ensaio no estado endurecido.....	46
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	47
5 RESULTADO E DISCUSSÃO.....	48
5.1 DENSIDADE DE MASSA E TEOR DE AR INCORPORADO.....	48
5.1.1 Densidade de massa no estado fresco.....	48
5.1.2 Teor de ar incorporado no estado fresco.....	50
5.1.3 Relação entre a densidade de massa e teor de ar incorporado no estado fresco..	51
5.2 TRABALHABILIDADE.....	52
5.2 DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO ENDURECIDO E TEOR DE AR INCORPORADO.....	55
5.2.1 Densidade de massa no estado endurecido.....	55
5.2.2 Teor de ar incorporado no estado endurecido.....	56

5.2.3 Relação entre a densidade de massa e teor de ar incorporado.....	58
5.3 COEFICIENTE DE CAPILARIDADE.....	59
5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	61
6 CONCLUSÕES.....	65
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

As ações externas, impostas pelo tempo, faz com que inúmeros prédios históricos acabem perdendo sua utilidade ou até mesmo exaurirem sua vida útil, comprometendo seu desempenho e conseqüentemente seu uso (Almeida, 2019). Dessa forma, ao tratar-se de um sistema construtivo histórico, percebe-se que as alvenarias merecem atenção especial, pois muitas delas têm função estrutural, sendo responsáveis por manter a estabilidade do edifício (Loureiro, 2019).

Além disso, a importância do restauro também está intrinsecamente ligada à necessidade de conservar as raízes históricas de uma comunidade e oferecer uma conexão tangível com o passado (Mota, 2021). Entretanto, apesar da importância dessas edificações, o desenvolvimento de soluções técnicas inovadoras que atendam às exigências específicas com capacidade de solucionar e/ou prevenir a incidência de danos nos edifícios históricos ainda são escassos e incipientes (Stolz; Wasem, 2020). Ademais, o processo de restauro de edificações históricas apresenta inúmeros desafios, principalmente no que diz respeito à escolha dos materiais utilizados (Bauer; Souza; Mota, 2021), devido a necessidade de compatibilização dos materiais utilizados ao realizar a restauração de um revestimento histórico. Essa abordagem não apenas visa preservar a estética, mas também garantir a funcionalidade dos elementos arquitetônicos e/ou estruturais (Sales, 2022).

O sistema de revestimento externo argamassado tem sido utilizado desde o Egito antigo, passando por processos evolutivos ao longo do tempo (Almeida, 2019). Inicialmente as argamassas eram compostas principalmente por cal aérea e areia (Siqueira, 2021). Entretanto, essas misturas não apresentavam hidraulicidade, fator esse que motivou a busca por melhoria das características mecânicas e de durabilidade dos revestimentos (Matos, 2018).

Sales (2022) relata que eram adicionados elementos nas misturas com intuito de conferir características hidráulicas, como o uso de materiais pozolânicos. Desta forma, ao longo dos séculos, diversos tipos de adições foram utilizados com o intuito de melhorar as propriedades das argamassas (Magalhães, 2018). No entanto, foi com o surgimento do cimento Portland que ocorreu uma mudança significativa (Cruz, 2019). Comparado à cal, o cimento Portland proporciona um ganho de resistência mais rápido em um curto período (Almeida, 2019), porém, tratando-se de edificações históricas, a aplicação de revestimentos argamassados à base de cimento Portland pode trazer alguns malefícios (Stolz; Wasem, 2020).

Em obras de restauração e conservação o uso de cimento Portland apresenta incompatibilidade com o revestimento antigo, tendo em vista suas diferentes características

em relação ao original, como: alta rigidez, baixa porosidade e presença de sais (Seabra *et al.*, 2009). A sua aplicação atinge não somente as propriedades da argamassa, como também o valor histórico e cultural de uma região (Obrzut; Medeiros; Luso, 2020). Desta forma, a cal emerge como um aglomerante promissor. Contudo, a utilização da cal apresenta desafios notáveis, sendo a hidráulica e resistência uma questão crítica a ser abordada em argamassa à base de cal (Mattos, 2018). A importância de escolher cuidadosamente o aglomerante, considerando suas propriedades, ressalta a complexidade dos projetos de restauro, uma vez que a escolha inadequada pode comprometer a durabilidade e a autenticidade das estruturas históricas (Bauer, 2020).

Nesse contexto, ainda pode ser destacado que a produção da cal é geralmente mais sustentável em comparação com a do cimento Portland (Sales, 2022), já que a fabricação de cimento Portland envolve um processo de queima a temperaturas muito elevadas, que gera uma significativa emissão de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases de efeito estufa Campos *et al.* (2019). Por outro lado, a produção da cal, que envolve a calcinação de calcário, requer temperaturas mais baixas e, conseqüentemente emissões moderadas de CO₂, quando comparada a fabricação do cimento, resultando em menor consumo de energia e emissões reduzidas de CO₂ durante o processo de fabricação da cal. Desta forma, justifica-se a preferência de uso de argamassas à base de cal, tanto pela similaridade com os materiais originais, quanto pela sustentabilidade em torno do seu uso quando comparado ao cimento Portland (Souza, 2013; Breitenbach *et al.*, 2017; Mattos, 2018).

Nesse cenário, a sílica ativa (SA) emerge como uma adição de considerável potencial para a área de restauração. Esse emprego envolve a sua substituição parcial ao cimento Portland em argamassas de revestimento e assentamento de alvenaria, como evidenciado por Campos *et al.* (2019). Adicionalmente, suas propriedades exclusivas, caracterizadas por partículas de dimensões nanométricas e atributos singulares, abrem novas perspectivas para a restauração de estruturas históricas e elementos arquitetônicos (Magalhães, 2018).

Sob esta conjuntura, a integração da SA nas formulações de argamassas não apenas visa melhorar suas propriedades mecânicas e durabilidade, mas também oferece um caminho promissor para a redução do impacto ambiental associado à produção de materiais de construção (Magalhães, 2018). A crescente conscientização sobre a importância da sustentabilidade na indústria da construção tem direcionado o olhar para alternativas ecologicamente responsáveis, tornando a sílica um material alternativo nesse cenário (Bertequini; Machi; Doná, 2019).

Oliveira *et al.* (2023) mencionam que, devido ao tamanho reduzido das partículas de SA, sua adição promove um aumento na quantidade de finos na mistura final, resultando em um maior teor de exsudação. Desta forma, a influência da adição de sílica tem dois efeitos na composição da mistura, atuando como um efeito físico (fíler), preenchendo os espaços vazios oriundos do processo de hidratação do cimento (Liberalino *et al.*, 2020), e como efeito químico, devido a SA possuir alta reatividade com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), formando produtos de hidratação adicionais que contribuem para o desenvolvimento de propriedades aglomerantes (Magalhães, 2018).

Acerca da adição de SA em argamassas à base de cal, Mattos (2018) explica que existe uma interação entre a cal e a sílica, sendo capaz de influenciar positivamente tanto o processo de endurecimento, quanto a promoção de melhorias nas características mecânicas. Nesse contexto, entende-se que o uso de sílica em misturas à base de cal não só contribui para a otimização do processo de endurecimento, mas também fortalece as propriedades de e durabilidade das argamassas à base de cal, tornando-as mais duráveis e resistentes. Assim, a adição da SA torna-se uma escolha significativa na formulação de argamassas à base de cal.

Com base em estudos prévios, justifica-se o uso de argamassas à base de cal com SA. Acredita-se que essa aplicação representa um notável avanço no campo do restauro de edificações históricas, desempenhando um papel crucial na preservação de nossa herança cultural e arquitetônica. Entretanto, as reações de hidratação nas pastas à base de cal com a adição da SA introduzem dinâmicas complexas nos mecanismos de endurecimento. Os estudos quanto às reações pozolânicas com cal encontram-se ainda incipientes, desta forma a compreensão detalhada dos efeitos dessa interação torna-se um desafio relevante para a otimização do desempenho dos materiais resultantes.

Sob essa conjuntura, os resultados desta pesquisa oferecem valiosas perspectivas para profissionais e pesquisadores envolvidos na área de conservação do patrimônio, abrindo novas possibilidades para a aplicação sustentável e eficiente desta tecnologia promissora.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Analisar a influência da adição de sílica ativa nas propriedades da argamassas histórica à base da cal nos estados fresco e endurecido.

2.2 ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar os materiais constituintes, por meio de análises físicas, químicas e mineralógicas;
- b) Produzir diferentes misturas de argamassa, com adição de SA e sem adição;
- c) Avaliar o impacto da SA nas propriedades do estado fresco e endurecido do material.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo encontra-se estruturado em tópicos que subsidiaram a contextualização da pesquisa. Inicialmente, será explorado o histórico das argamassas para revestimento, desde suas origens até as formulações contemporâneas, seguido por um estudo do desenvolvimento das adições pozolânicas nessas argamassas. Em seguida, serão analisadas as características das argamassas à base de cal, incluindo tipos de cales, propriedades no estado fresco e endurecido, além da adição de sílica ativa em misturas à base de cal. Ainda em relação à temática serão abordados os mecanismos de endurecimento das argamassas.

3.1 ARGAMASSAS HISTÓRICAS PARA REVESTIMENTO

A NBR 13281 (ABNT, 2023) define a argamassa como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerantes inorgânicos (cimento ou cal) e água, com propriedades de aderência e endurecimento, preparada em obra ou fabricada em indústrias. Os registros do emprego da argamassa como material de construção são pré-históricos. De acordo com Siqueira (2021) as argamassas antigas, tinham a finalidade de assentar os constituintes e revestir a superfície do substrato, além de proporcionar um aspecto estético intrínseco. Quanto às funções dos revestimentos argamassados, Festa (2022) considera as principais funções como sendo:

- a) Proteger os elementos de vedação dos edifícios contra a ação direta dos agentes agressivos;
- b) Auxiliar as vedações quanto ao cumprimento de suas funções, como por exemplo quanto ao isolamento termoacústico e a estanqueidade à água e aos gases;
- c) Regularizar a superfície dos elementos de vedação, atuando como base regular e adequada ao recebimento de outros revestimentos;
- d) Contribuir para a estética da fachada.

De acordo com Almeida (2019), historicamente, o uso da cal na construção remonta a 6000 a.C., na Turquia, sendo a cal hidratada um dos materiais empregados desde a antiguidade. Schiller e Rocha (2019) explicam que devido ao consumo exacerbado da cal, várias fontes de matéria prima foram utilizadas para a sua produção, tais como conchas marinhas, corais e as rochas calcárias, que são materiais que apresentam alto índice de

carbonato de cálcio. No entanto, embora o índice de aplicação na construção civil fosse alto, as argamassas antigas à base de cal aérea apresentavam características inconvenientes como cura lenta, elevada porosidade, alta permeabilidade ao vapor d'água e baixa resistência mecânica, além de serem vulneráveis aos agentes atmosféricos (Loureiro, 2019). Esses fatores motivaram a busca por melhoria das características mecânicas e de durabilidade dos revestimentos.

Conforme destacado por Almeida (2019), durante a revolução industrial houve um processo de transição do uso da cal para o cimento, quando houve avanços nos processos de fabricação de novos materiais, incluindo o cimento Portland e outros ligantes de origem artificial. No entanto, quando se trata de edificações históricas, a aplicação de revestimentos argamassados à base de cimento Portland pode trazer alguns malefícios (Stolz; Wasem, 2020).

Nas obras de restauração e conservação, o uso de argamassas à base de cimento apresenta incompatibilidades em relação ao material original, devido a suas características diferentes, como alta rigidez, baixa porosidade e presença de sais, o que pode resultar em manifestações patológicas, como fissuras e eflorescências (Almeida, 2019; Bauer, 2021; Sales, 2022).

Os danos causados interferem na estética da construção, as argamassas, rebocos e demais acabamentos antigos constituídos da cal, acabam por interferir de forma significativa na preservação da estrutura (Almeida, 2019), uma vez que a argamassa acaba por sofrer deterioração perante a estrutura, atuando no desempenho e durabilidade do edifício, uma vez que fazem parte do envelope exterior e são submetidas constantemente a ações intensas do clima (Bauer *et al.*, 2020).

É importante considerar esses aspectos ao optar pelo tipo de argamassa a ser utilizado em projetos de conservação de edificações históricas, a fim de preservar sua autenticidade e evitar danos indesejados (Brito *et al.*, 2021).

As argamassas históricas desempenham funções importantes que devem ser mantidas mesmo quando a edificação necessitar passar por processos de intervenções (Almeida, 2019), desta forma, ao considerar tanto as demandas contemporâneas por soluções mais eficientes e sustentáveis quanto a necessidade de preservar e restaurar revestimentos históricos, a aplicação de misturas à base de cal em revestimentos antigos configura-se como uma escolha prudente e alinhada com os princípios da conservação patrimonial. Tendo em vista que quando trata-se de argamassas de reboco a compatibilidade entre os materiais é alcançada através da presença da cal como ligante, uma vez que a cal proporciona características como baixa retração e maior elasticidade (Obrzut; Medeiros; Luso, 2020).

Devido às limitações da aplicação de misturas à base de cal citadas anteriormente no que diz respeito às argamassas históricas¹, Lima (2021), explica que a cinza vulcânica era adicionada junto a cal aérea, areia e água, almejando-se conferir propriedades de endurecimento às argamassas de cal mesmo na presença de umidade, promovendo assim certa hidráulica ao conjunto. Nestas circunstâncias, essa prática ancestral era impulsionada pela necessidade de melhoria das características mecânicas e de durabilidade dos revestimentos (Mattos; Gonçalves, 2019). Outro impulso para a busca por novas formulações residia na limitação da aplicação de revestimentos à base de cal aérea, em locais com ausência de dióxido de carbono do ar para promover a carbonatação (Cincotto *et al.*, 2007). Desta forma, a inserção de pozolanas nas misturas de argamassas tinham como objetivo principal garantir a obtenção de propriedades que conferissem resistência, coesão e estabilidade às argamassas.

Almejando-se o aprimoramento das propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas à base de cal, são adicionados materiais pozolânicos às misturas (Duarte, 2022). A adição pozolânica surgiu a partir do interesse em conferir alguma hidráulica às argamassas formuladas a partir da cal aérea como aflomerante (Gonzaga, 2022), além disso, preocupações associadas à sustentabilidade das atividades de construção civil impulsionou o uso destes materiais cimentícios suplementares, uma vez que mesmo após a descoberta do cimento Portland como ligante hidráulico, os materiais pozolânicos continuam sendo amplamente utilizados atualmente (Siqueira Júnior, 2023). Essas considerações sobre os benefícios das adições pozolânicas estabelecem as bases para uma análise detalhada das propriedades e do desempenho das misturas à base de cal com adições pozolânicas em geral, destacando os avanços alcançados por meio dessa estratégia.

3.2 ADIÇÕES POZOLÂNICAS NAS ARGAMASSAS À BASE DE CAL

A incorporação de adições em argamassas para construção teve início na antiguidade (Magalhães, 2018; Mattos; Gonçalves, 2019; Siqueira, 2021), registros históricos indicam que, há 2000 anos, os romanos já utilizavam em suas construções uma cinza de origem vulcânica proveniente da localidade de Pozzuoli na Itália, o que conferiu a denominação

¹ O termo "argamassa histórica" refere-se às formulações tradicionais de argamassa que foram empregadas em construções antigas, levando em consideração técnicas e materiais específicos utilizados na época. Segundo Cruz (2019) essas argamassas são essenciais para a restauração e conservação de alvenarias históricas, visando preservar a autenticidade e a integridade das estruturas antigas.

“pozolana”² ao material (Cordeiro *et al.*, 2009). Conforme mencionado anteriormente, as argamassas históricas apresentavam alguns inconvenientes, diante disso, Lima (2021), explica que a cinza vulcânica era adicionada junto a cal aérea e areia e água, sendo a responsável por conferir propriedades de endurecimento às argamassas de cal mesmo na presença de umidade, promovendo assim certa hidráulidade ao conjunto.

Nessas circunstâncias, essa prática ancestral era impulsionada pela necessidade de melhoria das características mecânicas e de durabilidade dos revestimentos (Mattos e Gonçalves, 2019), outro impulso para a busca por novas formulações residia na limitação da aplicação de revestimentos à base de cal aérea em locais com ausência de dióxido de carbono do ar para promover a carbonatação (Mattos; Gonçalves, 2019). Dessa forma, a inserção de pozolanas nas misturas de argamassas tinham como objetivo principal garantir a obtenção de propriedades que conferissem resistência, coesão e estabilidade às argamassas.

Segundo o Mehta e Monteiro (2014), essa reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio tem como consequência a interferência em três aspectos da reação pozolânica. Primeiro, a reação é lenta; assim, as taxas de liberação de calor e desenvolvimento da resistência também são lentas. Em segundo, a produção de hidróxido de cálcio é substituída pelo consumo do mesmo, gerando uma melhoria na durabilidade da pasta hidratada em ambientes agressivos. E por último, os produtos da reação são muito eficientes para preencher espaços capilares, tendo como consequência direta a melhoria da resistência e impermeabilidade do sistema (Mehta; Monteiro, 2014).

Não obstante, os materiais, com natural desempenho pozolânico, não eram muito comuns na maior parte das regiões da antiguidade (Magalhães, 2019). Devido aos custos e dificuldades de transporte das pozolanas naturais deram origem à procura por alternativas de componentes artificiais. Nesse contexto, as pozolanas naturais, muitas vezes, foram substituídas por pozolanas obtidas da calcinação, a altas temperaturas, de determinados tipos de materiais naturais (Mehta; Monteiro, 2014).

As pozolanas são geralmente classificadas quanto à sua origem, para Abraão (2019) a classificação pode ser dividida em pozolanas naturais e artificiais. De acordo com o autor, as pozolanas naturais são naturalmente presentes em materiais de origem vulcânica e terras diatomáceas, não requerendo tratamento adicional, apenas moagem para manifestar atividade

² Pozolana é um material inorgânico, natural ou artificial, silicoso ou alumino-silicoso, que pode apresentar propriedades aglomerantes quando finamente moído e em presença de água e hidróxido de cálcio (Cordeiro; Toledo Filho; Fairbairn, 2009), ou com materiais que podem liberar hidróxido de cálcio (clínquer do cimento Portland) (Lima, 2021). A reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é chamada reação pozolânica (Mehta; Monteiro, 2014).

pozolânica. Por outro lado, as pozolanas artificiais são produzidas por meio de processos como tratamento térmico em argilas e rochas, ou podem ser derivadas de subprodutos de atividades industriais e agroindustriais, necessitando de tratamento externo para desenvolver atividade pozolânica (Abraão, 2019).

A norma NBR 12653 (ABNT, 2014) classifica os materiais pozolânicos em três classes, descritas na Tabela 1, e determina as exigências químicas e físicas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 1 – Classificação química dos materiais pozolânicos segundo a NBR 12653 (2014)

Classificação	Definição
Classe N	Pozolanas naturais e artificiais que são materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas
Classe C	Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas
Classe E	Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014).

Mehta e Monteiro (2014) mencionam que os materiais pozolânicos podem ser utilizados como adição mineral ou suplementação em materiais cimentícios. Os materiais precisam satisfazer requisitos físicos e químicos específicos para serem categorizados e reconhecidos como materiais pozolânicos. Para que um material seja classificado nesta categoria, há requisitos estabelecidos na NBR 12653 (ABNT, 2014). A Tabela 2 detalha a composição química que os materiais devem exibir para serem identificados como pozolânicos.

Tabela 2 – Composição química dos materiais pozolânicos segundo a NBR 12653 (2014)

Composição e propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	$\geq 50\%$
SO_3	$\leq 4\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
Teor de umidade	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
Perda ao fogo	$\leq 10\%$	$\leq 6\%$	$\leq 6\%$
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 12653 (2014)

As pozolanas naturais são primariamente compostas por (SiO_2 variando de aproximadamente 22% a 70%, Al_2O_3 em proporções menores, geralmente entre 4% e 10%, e Fe_2O_3 em uma faixa de 2% a 13% (Velosa, 2011). Há ainda a possibilidade da presença de outros componentes, tais como óxidos de cálcio, magnésio, sódio, potássio e trióxido de enxofre (Souza, 2013).

Além disso, existem as pozolanas artificiais, esses materiais são produzidos mediante o processamento de substâncias que possuem uma base siliciosa (Abraão, 2019). Essas substâncias são submetidas a temperaturas específicas de calcinação, sendo este um fator determinante da reatividade da pozolana (Souza, 2019b). A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas que os materiais pozolânicos devem ter para a sua classificação.

Tabela 3 – Propriedades físicas dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira com abertura de malha de $45\mu\text{m}$	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$
Índice de atividade pozolânica: – com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$
Com a cal aos 7 dias	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 12653 (2014).

A restrição da faixa granulométrica do material pode ser justificada pela combinação do efeito filer com a pozolana. Para uma adição possuir o efeito filer, a mesma deve apresentar uma granulometria próxima ou menor que a do cimento (Barbosa *et al.*, 2022).

Assim, a granulometria pode interferir na diminuição da porosidade e por consequência aumento da resistência à compressão (Mehta; Monteiro, 2014). Já o efeito químico está associado a capacidade de reação da adição mineral com o Ca(OH)_2 gerado durante a hidratação do cimento, para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional (Souza, 2019).

Assim, compreende-se que materiais com atividade pozolânica podem ser empregados em substituição aos aglomerantes, desempenhando um papel fundamental na redução dos custos energéticos de produção ou atuando em conjunto para aprimorar as propriedades mecânicas do produto final (Campos *et al.*, 2019).

O comportamento das argamassas voltadas para aplicação em edificações históricas, com ou sem adições (amostra de controle), pode variar em decorrência de diversos fatores, como por exemplo, o tipo de material em adição, aplicação de aditivos, as porcentagens de adição, o processo de fabricação, processo e tempo de cura. A adoção de materiais pozolânicos, tanto naturais quanto artificiais, em argamassas e concretos tem sido objeto de diversos estudos. Essas pesquisas destacam resultados que demonstram a viabilidade de sua utilização para fortalecer a resistência mecânica e prolongar a durabilidade, conforme apontado pelos autores consultados: Magalhães (2018), Sousa (2019), Mattos e Gonçalves (2019), Pontes, Campos e Dutra (2022), Siqueira Júnior, Nóbrega e Carneiro (2022), Siqueira Júnior (2023), Sales (2022), Barbosa *et al.* (2023), Ebrahimi *et al.* (2023) e entre outros.

Magalhães (2018) analisou a influência de adições pozolânicas em argamassa à base de cal aérea, os materiais estudados foram o pó cerâmico, metacaulim, cinzas volantes e sílica ativa, adicionados em uma proporção de 1:0,64:8,7; 1:0,56:8,75; 1:0,94:8,75 em massa, respectivamente. Comparando os resultados com a mistura de referência, a adição de Cinzas volantes, mostrou, no estado endurecido, bom desempenho em face da ação da água, boa resistência mecânica, adequada aderência, além de boa resistência à ação dos sais solúveis. Quanto às demais adições, ambas melhoraram o comportamento mecânico da mistura, no entanto, provocaram uma alta capacidade de absorção rápida de água por capilaridade, o que pode ser prejudicial para a proteção do substrato. Além disso, apresentaram uma permeabilidade ao vapor superior à composição de referência. Desta forma, as misturas demonstraram um desempenho global insatisfatório para uso e aplicação em alvenarias de edifícios antigos.

Mattos e Gonçalves (2019) analisaram a influência das condições de cura de argamassas de cal aérea com dois tipos de metacaulins, utilizados como substituto parcial da massa de cal (10%). Para a análise, foram realizados ensaios de resistência mecânica à flexão

e à compressão e, de composição mineralógica por difração de Raio-X (DRX), em corpos de prova com 28 e 180 dias de cura em ambiente interno, com umidade e temperatura constantes e, expostos ao ar livre, protegidos apenas da ação direta da chuva. A partir dos resultados obtidos, percebeu-se que houve uma dificuldade inicial de endurecimento da argamassa à base de cal aérea aos 28 dias na condição de cura interna, entretanto nas condições adotadas para a cura externa, que são as mais próximas da realidade de obra, foram as mais adequadas para argamassas de cal aérea com metacaulim nas composições propostas.

Sousa (2019b) avaliou a influência da reatividade de diferentes metacaulins na formação das hidrogranadas nas pastas de cal, e a interferência da composição química da pozolana na cristalização das fases cúbicas, com finalidade de contribuir para a utilização do material no restauro do patrimônio edificado. O teor de cal foi constante e a pozolânica foi acrescentada nas percentagens de 10, 20, 30, 40 e 50% em relação à massa de cal. A relação água/materiais secos foi 1,1 para todas as pastas. Foram usados dois tipos de cura: 27-28°C e UR de ~ 80%; e cura de 45 – 50°C (estufa). Com base nas conclusões, pode-se afirmar que há a influência do metacaulim nas pastas a base de cal, demonstrando-se favorável em virtude dos resultados obtidos nos estados fresco e endurecido estarem condizentes com as normativas.

Pontes, Campos e Dutra (2022) analisaram a potencialidade pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar residual e sua aplicação em sistemas cimentícios pós-processamento. Os resultados revelaram uma composição inicial de 56,18% de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, e valor do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal de 4,9 MPa, indicando uma possível baixa atividade pozolânica. Após o beneficiamento, o somatório progrediu para 72,74%, e apresentou IAP adequada conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014). Os testes mecânicos indicaram a viabilidade de substituir até 15% do cimento pela massa de cinza, mantendo níveis de resistência satisfatórios. Em resumo, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar estudada revelou-se um material alternativo economicamente vantajoso, contribuindo para a redução dos impactos ambientais na produção de cimento e promovendo a gestão apropriada de resíduos, podendo-se também ser aplicada em argamassas a base de cal, tendo em vista os resultados de IAP com a cal (Pontes; Campos; Dutra, 2022).

Siqueira Júnior, Nóbrega e Carneiro (2022) realizaram a avaliação da trabalhabilidade de pastas compostas de cal com metacaulim e resíduos de construção e demolição (RCD). A metodologia empregada consistiu na medida do espalhamento obtida através de ensaios como mini-slump onde foram realizadas misturas que incorporam até 50% em massa de RCD com 4 relações água/ligante distintas. Os resultados obtidos acerca da trabalhabilidade,

evidenciam a possibilidade de substituição de até 30% em massa de cal com metacaulim por RCD em pastas com relação água/ligante de 0,8 e 0,9.

Sales (2022) estudou o comportamento de pastas à base de cal hidratada com adição de Metacaulim (MC) e Caulim calcinado (CC), a produção das misturas foi realizada fixando a proporção 1:1:3 em volume. Foi utilizado cloreto de cálcio como aditivo em duas proporções: 5% e 10%. Acerca dos resultados, pode-se listar as principais conclusões, a mistura contendo apenas CC apresentou maior espalhamento e menor resistência ao cisalhamento do que a mistura contendo MC. As pastas tiveram boas resistências mecânicas, sendo que as com cal e caulim calcinado foram mais fortes devido à maior finura e amorficidade do cloreto de cálcio. Conclui-se que o cloreto de cálcio melhorou a resistência à compressão nas argamassas com MC, mas reduziu nas argamassas com CC.

Barbosa *et al.* (2023) analisou a adição de sílica ativa em misturas à base de cal hidráulica com a proporção 1:1:3 em volume. A pesquisa revelou que a adição de sílica ativa permite um aumento de mais de 50% na resistência mecânica das argamassas, entretanto a absorção de água também é aumentada nas misturas, apesar de causar aumento da resistência à compressão.

Ebrahimi *et al.* (2023) estudou diferentes formulações de argamassas à base de cal hidratada com substituição parcial de resíduos cerâmicos em pó em relação a massa de cal. Quanto às principais conclusões do estudo, comparando os resultados para as misturas com e sem substituição de cal, percebeu-se que para as argamassas de cal hidratada, as resistências à compressão e à tração são substancialmente melhoradas (até 10 vezes) com o aumento da taxa de substituição em até 70%. Com 80% de substituição, as resistências à compressão e à tração são um pouco reduzidas, indicando um nível de saturação em 70% de substituição. Por outro lado, a retração por secagem aumenta com a substituição da cal, atingindo níveis semelhantes aos das misturas de argamassa de cimento.

Siqueira Junior (2023) analisou as propriedades de misturas à base de cal hidráulica e metacaulim e resíduos de construção e demolição (RCD), a proporção entre os materiais foi de 0,5:0,5:3 e razão água/ligante = 0,8. O RCD foi beneficiado para obtenção de uma dimensão inferior a 75µm. Entre as misturas realizadas, a que se apresentou mais compatível com a de referência, com base em todos os resultados obtidos, foi a 10% RCD. No que concerne aos produtos formados ao longo do período de cura, verificou-se a formação de aluminato tetracálcico hidratado, monocarboaluminato, stratlingita, C-S-H e carbonato de cálcio.

A diversidade reflete o potencial desses materiais na busca por soluções mais eficientes e sustentáveis na construção civil, proporcionando não apenas melhorias nas propriedades mecânicas, mas também contribuindo para a redução de impactos ambientais associados à produção de cimento. Ao adotar uma abordagem que considera fatores específicos, como o tipo de adição, proporções ideais e condições de cura, é possível otimizar a utilização desses materiais em aplicações específicas, promovendo não só avanços significativos no desenvolvimento de argamassas de cal mais eficientes e sustentáveis, mas também oferecer uma alternativa viável para o restauro de edificações históricas.

A abordagem das propriedades das argamassas à base de cal é crucial para compreender seu comportamento em diversas aplicações construtivas. Neste contexto, a seção seguinte explorará detalhadamente os tipos de cales utilizados, as características específicas dessas argamassas para revestimentos, e as propriedades no estado fresco.

3.3 ARGAMASSAS À BASE DE CAL

A seção a seguir abordará os tópicos relacionados às características e propriedades das argamassas à base de cales. Primeiramente, serão discutidos os diferentes tipos de cales utilizados na composição das argamassas, destacando suas características distintas e suas aplicações específicas. Em seguida, serão exploradas as principais características das argamassas à base de cal para revestimentos, considerando aspectos como aderência, permeabilidade e resistência. Além disso, serão analisadas as propriedades no estado fresco das argamassas à base de cal, incluindo sua trabalhabilidade, consistência e tempo de pega, aspectos fundamentais para o sucesso da aplicação desses materiais em obras de construção e restauração.

3.3.1 Tipos de Cales

Historicamente, o conhecimento sobre a cal é muito antigo, seu uso como material construtivo foi muito comum entre as civilizações passadas, o que é comprovado através de vestígios arqueológicos e bibliografias (Ceretta *et al.*, 2022). A cal pode ser aérea ou hidráulica a depender da composição química de sua matéria prima, o calcário.

A cal aérea, também conhecida por cal hidratada (Zhang *et al.*, 2018), é obtida a partir de calcários puros, carbonato de cálcio (CaCO_3) queimados a no máximo 900 °C, com teor de impurezas inferior a 5%, ou carbonato de cálcio e magnésio (Braz, 2021). Trata-se de um

aglomerante inorgânico que misturado com água, forma uma pasta com propriedades aglomerantes (Cincotto *et al.*, 2007), cujo endurecimento se dá pela reação com o CO₂, e que após esta reação (carbonatação) não resiste bem em ambientes úmidos ou em contato permanente com água (Mattos e Gonçalves, 2019), ou seja, este tipo de cal não possui propriedades hidráulicas. A cal aérea também é conhecida por outras denominações, como descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Denominações da cal

Nome comum	Químico	Mineralógico	Fórmula
Calcário	Carbonato de cálcio	Calcita	CaCO ₃
Cal virgem	Óxido de cálcio	-	CaO
Cal hidratada	Hidróxido de cálcio	Portlandita	Ca(OH) ₂
Cal carbonatada	Carbonato de cálcio	Calcita	CaCO ₃

Fonte: Kanan (2008)

Ainda sob a perspectiva da matéria prima, a cal aérea pode ser calcítica, quando seu principal constituinte é a calcita, ou dolomítica quando há elevado teor de magnésio no calcário e seu principal constituinte é a dolomita CaMg(CO₃)₂ (Sales, 2022), Segundo Azevedo (2010) a distinção pode ser realizada em função do percentual de CaO, sendo a cal cálcica, quando contém de 90 a 100% de CaO e a cal dolomítica, quando contém de 58 a 65% de CaO.

A NBR 7175 (ABNT, 2003) classifica também as cals aéreas hidratadas em pó em três tipos: CH I, CH II e CH III, tendo como parâmetro de classificação o grau de pureza do material. Além das exigências de natureza química, são apontadas exigências físicas mínimas para seu emprego em argamassas para construção civil, conforme apresentado nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Exigências químicas das cales

Compostos	Limites			
	CH-I	CH-II	CH-III	
Anidro carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxido de cálcio e magnésio não tratado calculado (CaO+MgO)	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%	
Óxidos totais na base de não-voláteis	≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%	

Fonte: ABNT NBR 7175 (2003)

Tabela 6 - Exigências físicas das cales

Determinação	Limites			
	CH-I	CH-II	CH-III	
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm (nº 30)	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075 mm (nº 200)	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água	≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%	
Plasticidade	≥ 110	≥ 110	≥ 110	
Incorporação de areia	≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2	
Estabilidade	Ausência de cavidade ou protuberâncias	Ausência de cavidade ou protuberâncias	Ausência de cavidade ou protuberâncias	

Fonte: ABNT NBR 7175 (2003)

A cal hidráulica, por sua vez, compreende compostos hidráulicos e cal hidratada (Sales, 2022), é obtida por meio da queima de calcários margosos que contenham até 20% de argila, geralmente a uma temperatura em torno de 1200 °C, o que lhe confere a presença de compostos argilosos, tais como dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de Ferro III (Fe₂O₃) (Velosa, 2006), seguida da hidratação mediante a adição da quantidade apropriada de água para a reação com a cal virgem, mantendo, assim, os silicatos e aluminatos em sua forma anidra (Cincotto *et al.*, 2007). Possui também uma notável característica de endurecer ao entrar em contato com a água. O dióxido de carbono atmosférico também contribui para o seu endurecimento por reação com o hidróxido de cálcio (Braz, 2021).

Este tipo de cal consegue se desmembrar em três grupos, os quais são: A cal hidráulica natural (NHL), cal hidráulica (HL) e cal formulada (FL), como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Tipos de cal hidráulica

Tipo de cal	Principais características
NHL	Possui propriedades hidráulicas advindas do processo de queima de calcários argilosos ou silicosos.
HL	É composta por cal e materiais com propriedades pozolânicas, como cimento e pozolanas.
FL	Formada por cal cálcica (CL), ou NHL, mediante sua junção com um material com propriedades hidráulicas que pode endurecer através de hidratação ou carbonatação

Fonte: Adaptado de Almeida (2019)

A cal hidráulica possui maior permeabilidade quando comparado ao cimento Portland. Contudo, esse composto argamassado constituído de cal hidráulica apresenta também uma relativa dificuldade de caracterização (Almeida, 2019). Podendo ser empregadas em situações similares às do cimento, as cales hidráulicas podem ser indicadas em circunstâncias na qual não sejam necessárias altas resistências mecânicas, como por exemplo, em argamassas de revestimentos e de alvenaria (Cruz, 2019).

3.3.2 Características das argamassas à base de cal para revestimentos

As argamassas à base de cal podem ser compreendidas como uma mistura de cal, areia e água, em que a cal, na ausência do cimento, funciona como o aglomerante (Sousa 2014). Essas misturas apresentam uma série de características distintivas que as tornam particularmente adequadas para revestimentos em Construção Civil. Mesmo depois da revolução industrial e da descoberta do cimento Portland, as argamassas ainda são comumente utilizadas à base de cal, principalmente, para a recuperação em edifícios históricos, já que o objetivo é preservar a originalidade dos componentes utilizados na época da construção (Cruz, 2019).

Esse tipo de revestimento, possui como principal função atuar como uma proteção à alvenaria, absorvendo impactos e demais solicitações impostas no decorrer do tempo (Hughes, 2012). A cal confere flexibilidade à mistura, permitindo que ela se adapte de maneira mais eficaz às variações e movimentos naturais que ocorrem em edifícios ao longo

do tempo (Sousa 2014). Além disso, as argamassas também são responsáveis por atenuar inúmeras solicitações impostas pelo meio a edificação, como por exemplo, o ataque da umidade a alvenaria, que é extremamente prejudicial em virtude da mesma possuir uma alta taxa de porosidade, que causaria sua deterioração e desagregação com o tempo (Kanan, 2008).

Conseqüentemente, quando se compara as argamassas de cimento Portland com as argamassas de cal, as de cimento proporcionam uma menor permeabilidade, quando aplicadas em restauro de edificações antigas, pois essas detêm na sua composição sais solúveis, que na presença de umidade se depositam na parede (Cruz, 2019), fazendo com que ocorram manifestações patológicas que acabam deteriorando a alvenaria e o revestimento. O sistema de revestimento externo é constantemente exposto à ação de agentes climáticos de degradação, em que a radiação solar, a temperatura, a chuva dirigida e o vento podem ser considerados como os principais responsáveis pela degradação (Souza, 2019a), dessa maneira o revestimento possui função de proteger ou amenizar essas ações para os ambientes internos do edifício (Bauer *et al.*, 2020).

Entretanto, as argamassas de cal apresentam alguns inconvenientes como endurecimento lento, alta retração e baixa resistência (Nezerka *et al.*, 2014). Tais limitações são amenizadas com a inserção de pozolanas em sua composição, conferindo às argamassas de cal melhora no desempenho quanto à permeabilidade à água, durabilidade e resistência mecânica (Arizzi; Cultrone, 2018; Azeredo; Struble; Carneiro, 2015). É importante ressaltar que existem diferentes tipos de cales, cada um com características distintas que se adequam a diversas aplicações, contribuindo não apenas para a sustentabilidade, mas também para a eficiência e adequação às demandas construtivas. Dessa forma, a compreensão dos diferentes tipos de cales complementa a discussão sobre a preferência pelo uso de argamassas à base de cal.

3.3.3 Propriedades no estado fresco das argamassas à base de cal

As propriedades no estado fresco da argamassa à base de cal correspondem àquelas após o seu preparo até o tempo de fim de pega (Costa, 2019). A Tabela 8 apresenta as principais propriedades das argamassas para revestimento no estado fresco, em seguida estão descritas as principais características sobre trabalhabilidade e densidade de massa, propriedades indispensáveis de serem analisadas no estado fresco das argamassas.

Tabela 8 - Propriedades das argamassas no estado fresco e suas definições

Propriedades	Definições
Adesão inicial	Caracteriza o comportamento futuro do conjunto suporte argamassa e depende das características de trabalhabilidade da argamassa e quanto à porosidade e rugosidade do suporte onde a argamassa será aplicada.
Densidade de massa	A massa específica absoluta da mistura ligante/agregado, sendo desta forma o volume de material sólido não sendo considerados os vazios.
Exsudação	Tendência de desagregação da água (pasta) da argamassa, de forma que a água fica sobreposta aos agregados pelo efeito da gravidade.
Coesão	Referente às forças físicas de atração que existem entre as partículas sólidas da argamassa e às ligações químicas da pasta aglomerante.
Retenção de água	Definida como a predisposição de uma argamassa fresca reter a água de amassadura, quando exposta à sucção do suporte, mantendo sua trabalhabilidade e possibilitando o seu endurecimento normal.
Plasticidade	Propriedade na qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a diminuição ou retirada das tensões de deformação, é influenciada pelo teor de ar, natureza e teor de ligantes e pela intensidade de mistura das argamassas.
Consistência	Capacidade que a argamassa possui em manter sua fluidez durante o período de aplicação, sendo influenciada pela quantidade de água que é inserida na mistura. É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas.
Trabalhabilidade	Propriedade que define a facilidade com que as argamassas podem ser misturadas; transportadas; manuseadas para a execução apresentando consistência e plasticidade adequadas, além de uma elevada retenção de água; consolidadas e acabadas em uma condição homogênea.

Fonte: Diniz (2020)

O próximo tópico fornecerá uma análise mais detalhada de cada uma dessas propriedades estudadas durante a pesquisa.

3.3.3.1 Trabalhabilidade

Lima *et al.* (2023) define a trabalhabilidade como a capacidade da mistura ser facilmente manuseada e aplicada, sendo a propriedade fundamental a ser considerada no estado fresco. Ela desempenha um papel crucial na qualidade da aplicação, regularização da superfície e aderência ao substrato, além de assegurar a coesão entre os componentes da argamassa (Bauer *et al.*, 2015).

Para Capelinet *et al.* (2020), o comportamento e as propriedades das argamassas de revestimento no estado fresco são diretamente influenciados por fatores como a quantidade de água utilizada na mistura, uso de aditivos e adições, granulometria e formato das partículas empregadas. A quantidade adequada de água é essencial para proporcionar uma consistência adequada à mistura, facilitando sua aplicação e promovendo uma boa aderência ao substrato, conforme apontado por Bauer *et al.* (2015). A granulometria e o formato das partículas também desempenham um papel importante, pois afetam a compactação da argamassa e sua capacidade de preencher espaços vazios, influenciando diretamente a trabalhabilidade (Giordani; Masuero, 2019).

Segundo Magalhães (2018) as argamassas históricas devem apresentar uma trabalhabilidade adequada, permitindo uma fácil aplicação e moldagem nos substratos. Sua consistência e capacidade de se espalhar de maneira homogênea contribuem para um acabamento suave e uniforme. A trabalhabilidade é influenciada por diversos fatores, incluindo a densidade das argamassas (Bauer *et al.*, 2015).

Nesse contexto, Breitenbach *et al.* (2017) ressaltam que a densidade das argamassas tem um impacto direto no comportamento da mistura, afetando a trabalhabilidade, o espalhamento e a aderência entre a argamassa endurecida e o substrato. Portanto, é importante considerar a densidade como um fator a ser controlado durante a dosagem e preparação das argamassas de revestimento. Além disso, Santos, Silva e Mota (2021) explicam que a adição de cal em argamassas para revestimentos é capaz de melhorar o comportamento reológico da mistura, especialmente no que diz respeito à trabalhabilidade. A cal pode contribuir para a redução da viscosidade e aumento da plasticidade, facilitando a aplicação e moldagem da argamassa.

Acerca da quantidade de água de amassamento, é importante considerar a sua influência na trabalhabilidade das argamassas. Embora a NBR 13276 (ABNT, 2016) não menciona valores de referência para esse parâmetro, foram analisadas literaturas recentes que obtiveram resultados satisfatórios em misturas à base de cal na qual observou-se as diferentes perspectivas, conforme apresenta a Tabela 9.

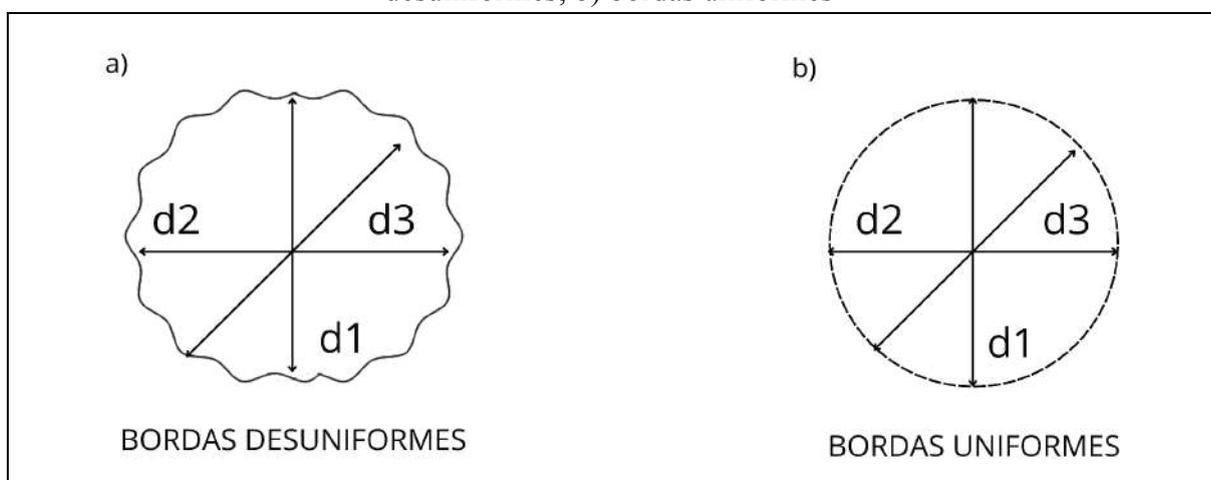
Tabela 9- Principais resultados de espalhamento para o ensaio de índice de consistência

Autor	Intervalo de espalhamento
Marvila <i>et al.</i> (2017)	260 mm \pm 5
Perin (2018)	240 \pm 10
Abraão (2019)	240 \pm 10
Pontes, Campos, Dutra (2022)	225 \pm 5
Amâncio <i>et al.</i> (2021)	260 mm \pm 5
Jesus (2023)	260 mm \pm 5
Lima <i>et al.</i> (2023)	260 mm \pm 5

Fonte: Autoria própria (2024).

Um aspecto crucial, conforme destacado por Martins (2009), é o aspecto visual das bordas das pastas submetidas a ensaios de espalhamento, uma vez que a espessura e conformidade das bordas desempenham um papel crucial na identificação de potenciais fenômenos de segregação ou exsudação. Conseqüentemente, caso as bordas apresentem variações ou irregularidades, pode-se indicar instabilidades na composição da argamassa. A Figura 1, ilustra o parâmetro utilizado para avaliação visual das bordas na amostra ensaiada, além de fornecer uma representação gráfica das características observadas. Esse aspecto visual complementa de maneira significativa as medições quantitativas obtidas nos ensaios, proporcionando uma abordagem abrangente na avaliação do comportamento da argamassa.

Figura 1 - Exemplo de bordas obtidas no ensaio de índice de consistência: a) bordas desuniformes; b) bordas uniformes



Fonte: Autoria própria (2024).

As medidas d1, d2 e d3 representam três medições ortogonais com auxílio de um paquímetro, conforme recomenda a NBR 13726 (ABNT, 2016), após as medições é calculado o índice de consistência da argamassa, que corresponde à média das três medidas de diâmetro, expressa em milímetros e arredondada ao número inteiro mais próximo.

Além da consistência, a densidade de massa surge como uma propriedade crucial, demandando estudos aprofundados para compreender seu impacto nas características finais do revestimento, que serão abordadas no subtópico a seguir.

3.3.3.2 Densidade de massa

A determinação da densidade de massa está relacionada à relação entre a massa de um determinado material e o volume ocupado por essa massa (Diniz, 2020). Esta propriedade pode ser determinada através da relação da massa da argamassa e seu volume, podendo ser absoluta ou relativa (Souza, 2021).

Essa propriedade é fundamental na dosagem das argamassas, na conversão da mistura em massa para mistura em volume e na determinação da densidade de massa. A densidade de massa varia de acordo com o teor de ar presente, especialmente quando incorporado por meio de aditivos, e com a massa específica dos materiais constituintes da argamassa, com destaque para o agregado (Perin, 2018).

Diversos estudos como os de Bomediano e Gomes (2019), Perin (2018), Santos *et al.* (2020) e entre outros têm se debruçado sobre a caracterização da densidade de massa em argamassas históricas, evidenciando a relevância dessa propriedade para a compreensão das características desses materiais. Bomediano e Gomes (2019) realizaram investigações em argamassas modificadas por polímeros, demonstrando a variabilidade da densidade de massa em diferentes contextos arquitetônicos. Por exemplo, Santos *et al.* (2020) identificaram que argamassas antigas frequentemente exibem uma densidade de massa mais baixa em comparação com as contemporâneas, sugerindo variações na composição e no processo de preparação.

Além disso, estudos como o de Perin (2018) têm destacado que a densidade de massa pode ser influenciada pela presença de agregados naturais e aditivos utilizados historicamente.

3.3.4 Propriedades no estado endurecido das argamassas à base de cal

Para Knob, Bellei e Barbisan (2019) as propriedades da argamassa no estado endurecido apresentam uma importância fundamental para o revestimento, pois, necessitam de resistência mecânica para a prevenção de fissuras, evitando manifestações patológicas decorrentes (Spósito, 2020). Após conhecer as propriedades, é possível realizar uma análise das características do revestimento. Na Tabela 10, estão dispostas as principais propriedades das argamassas para revestimento em seu estado endurecido.

Tabela 10 - Propriedades das argamassas no estado endurecido e suas definições

Propriedades	Definições
Retração	Resultado de um mecanismo complexo, associado com a variação de volume da pasta aglomerante que ocorre devido à perda rápida de água de amassamento e pelas reações na hidratação, gerando as fissuras nos revestimentos. As argamassas ricas em cimento apresentam maior probabilidade para o surgimento de fissuras durante a secagem.
Aderência	Relacionado a manter-se fixo ao substrato, apresentando resistência às tensões normais e tensões tangenciais que surgem na interface base/revestimento. Essa aderência deriva da conjunção de três propriedades da interface argamassa-substrato: a resistência de aderência à tração; a resistência de aderência ao cisalhamento; a extensão de aderência.
Resistência mecânica à compressão	Refere-se à propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos de diversas origens como: tensões de tração, compressão ou corte, sendo influenciada pelo endurecimento da argamassa, seus constituintes, suas características e sua pureza.
Resistência à tração	Predisposição da argamassa para resistir a uma força de tração aplicada perpendicularmente à sua superfície.
Resistência à flexão	Tensão de rotura de uma argamassa, determinada pela utilização de uma força de flexão em três pontos.

Fonte: Adaptado de Diniz (2020)

O tópico a seguir abordará uma análise mais detalhada de cada uma dessas propriedades estudadas durante a pesquisa.

3.3.4.1 Resistência Mecânica

De acordo com Souza (2021), a resistência mecânica da argamassa está diretamente relacionada a sua capacidade de suportar diferentes tipos de esforços mecânicos, sendo influenciada pelos materiais utilizados e pelas técnicas empregadas desde a preparação até o acabamento.

Uma vez que a argamassa tenha atingido o estado endurecido, estará sujeita a esforços mecânicos, e sua resistência dependerá principalmente do tipo de aglomerante utilizado, conforme apresentado por Alves (2019). Ainda segundo o autor, pode-se afirmar que embora a resistência mecânica não seja uma propriedade tão determinante como no concreto, é importante nas argamassas de revestimento devido a sua influência em outras propriedades, como elasticidade, capacidade de absorção e permeabilidade (associada à porosidade).

Rodrigues (2019) destaca a importância da argamassa possuir resistência para suportar movimentações na base, causadas, por exemplo, por recalques, variação dimensional devido a ciclos de umedecimento e secagem, ou dilatação e contração do revestimento devido a variações de temperatura. Essas solicitações podem levar a fissuras ou à falha na aderência entre a argamassa e a base, sendo necessário contar com a resistência mecânica das argamassas para combater esses problemas (Bauer *et al.*, 2020).

A investigação da resistência mecânica de argamassas tem levado a uma ampla gama de resultados, especialmente em termos de resistência à compressão e à flexão, ao incorporar materiais similares em sua composição. Estudos como os de Zhang *et al.* (2020), Fajardo *et al.* (2020), Bertequini, Machi e Doná (2019) dentre outros, têm revelado que a adição de componentes como pó cerâmico, metacaulim, cinzas volantes e SA, pode levar a aumentos significativos na resistência mecânica, conforme documentado por Zhang *et al.* (2020), a adição de SA proporcionou um melhoramento na resistência mecânica da argamassa aumentou mais de duas vezes e a porosidade total foi reduzida em aproximadamente 16%.

Fatores como a interação entre os componentes, a adequada cura das amostras e as técnicas de mistura também emergiram como determinantes-chave nos resultados de resistência mecânica, conforme apontado por Fajardo *et al.* (2020). Essas divergências de resultados sugerem que o aprimoramento da resistência mecânica em argamassas é um campo complexo, no qual fatores intrincados de composição e processamento desempenham um papel crucial em determinar o ganho ou queda de resistência (Zhang *et al.*, 2020).

3.3.4.2 Porosidade

A porosidade, pode ser definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total de sólidos, conforme conceituado por Silva (2021). De acordo com Magalhães (2018) a porosidade aberta refere-se à percentagem de volume de poros presentes no interior da argamassa que estão conectados ao exterior e a outros poros. Ainda segundo a autora, esse parâmetro é um dos principais mecanismos de degradação física, uma vez que possui impacto

direto na durabilidade das argamassas de revestimento, portanto, é importante entender esse aspecto.

Alves (2019) destaca que o teor de água pode ter um impacto direto na porosidade do material, uma vez que a quantidade de água pode modificar a distribuição espacial dos sólidos na argamassa. Outro fator preponderante é a granulometria dos agregados, Diniz (2020) ressalta que quanto mais descontínua for a granulometria do agregado miúdo, maior será a porosidade do material. Costa (2019) explica que as modificações na porosidade podem afetar a aderência inicial do revestimento de argamassa ao substrato, resultando em uma baixa capacidade de aderência da base. Portanto, a quantidade de água na mistura é considerada a principal ferramenta para controlar a reologia no preparo das argamassas.

Na pesquisa conduzida por Fraga *et al.* (2020), que observou que a incorporação da SA em seu estado natural resultou no aumento do tamanho dos poros e na redução do desempenho mecânico das pastas, devido à aglomeração das partículas desse material. Adicionalmente, as investigações realizadas por Amaral, Macioski e Medeiros (2021) ressaltam que a redução da porosidade e permeabilidade, a densificação da matriz cimentícia e a melhoria na zona de transição são aspectos decorrentes da combinação dos efeitos filer e pozolânico da SA. Esses efeitos favorecem a microestrutura dos materiais cimentícios, resultando em um aprimoramento do desempenho relacionado à durabilidade e propriedades mecânicas. Portanto, as análises sobre a porosidade nas argamassas históricas, especialmente quando a sílica é incorporada, têm contribuído para uma compreensão mais profunda da evolução desses materiais e de como as interações entre seus componentes influenciam suas características ao longo do tempo.

3.3.4.3 Absorção de água por capilaridade

A capacidade de absorção de água e a velocidade com que essa absorção ocorre são características importantes para avaliar a durabilidade das argamassas para revestimento. Isso permite avaliar a facilidade com que agentes agressivos podem penetrar no material, afetando sua durabilidade (Jesus, 2023). De acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005), a absorção de água é o coeficiente de capilaridade, que mede a velocidade de absorção, são calculados para os tempos de 10 e 90 minutos.

No entanto, no caso das argamassas de cal, a avaliação da velocidade de absorção é mais significativa quando realizada nos primeiros cinco minutos do ensaio, quando ocorre uma absorção rápida de água (Magalhães, 2018). Ainda segundo a autora, nessas argamassas,

os poros grandes predominam e são os principais responsáveis pela absorção rápida. Existe uma proporcionalidade entre a capilaridade e a quantidade de poros presentes na argamassa (Spósito, 2020). Consequentemente, a absorção de água por capilaridade pode contribuir para um desempenho inadequado do material, especialmente em relação a sua durabilidade, que é reduzida quando a capilaridade aumenta, conforme apontado por Rodrigues (2019).

Desta forma, é importante controlar adequadamente a dosagem de água na argamassa, pois isso pode evitar o surgimento de problemas patológicos, como fissuras e rachaduras causadas pela retração da argamassa (Bauer *et al.*, 2020). Silva (2021) destaca que o índice de absorção de água dos agregados miúdos pode afetar a dosagem de água na argamassa. Se adicionada em excesso, a água pode reduzir a resistência da argamassa, que pode ser um problema dependendo da aplicação em questão.

Magalhães (2018) realizou estudos acerca da influência de adições pozolânicas em argamassa à base de cal, destacando que a absorção de água é vital para a durabilidade das argamassas, pois influencia a penetração de agentes agressivos. Rodrigues (2019) observou que maior capilaridade resulta em maior absorção, prejudicando a resistência e durabilidade. Em contrapartida, Bauer *et al.* (2020) destacaram a importância do controle da dosagem de água para evitar fissuras e rachaduras. Silva (2021) discutiu a influência dos agregados na dosagem de água e resistência. Esses estudos coletivos destacam a importância da absorção de água nas argamassas e suas complexidades.

A fim de melhorar as propriedades das argamassas para revestimento, são adicionados aditivos e materiais auxiliares às misturas. Isso ocorre devido à baixa capacidade de absorção de energia das argamassas convencionais e a propensão à microfissuração, o que aumenta sua permeabilidade e susceptibilidade ao ataque de agentes agressivos, prejudicando sua durabilidade (Bomediano; Gomes; Fontanini, 2020). Esses fatores destacam a necessidade do uso de materiais pozolânicos naturais e artificiais em argamassas de cal, naturais e artificiais, esta temática tem sido abordada em diversos estudos, que demonstram resultados promissores para o aumento da resistência mecânica e durabilidade (Mattos; Gonçalves, 2019).

3.4 SÍLICA ATIVA

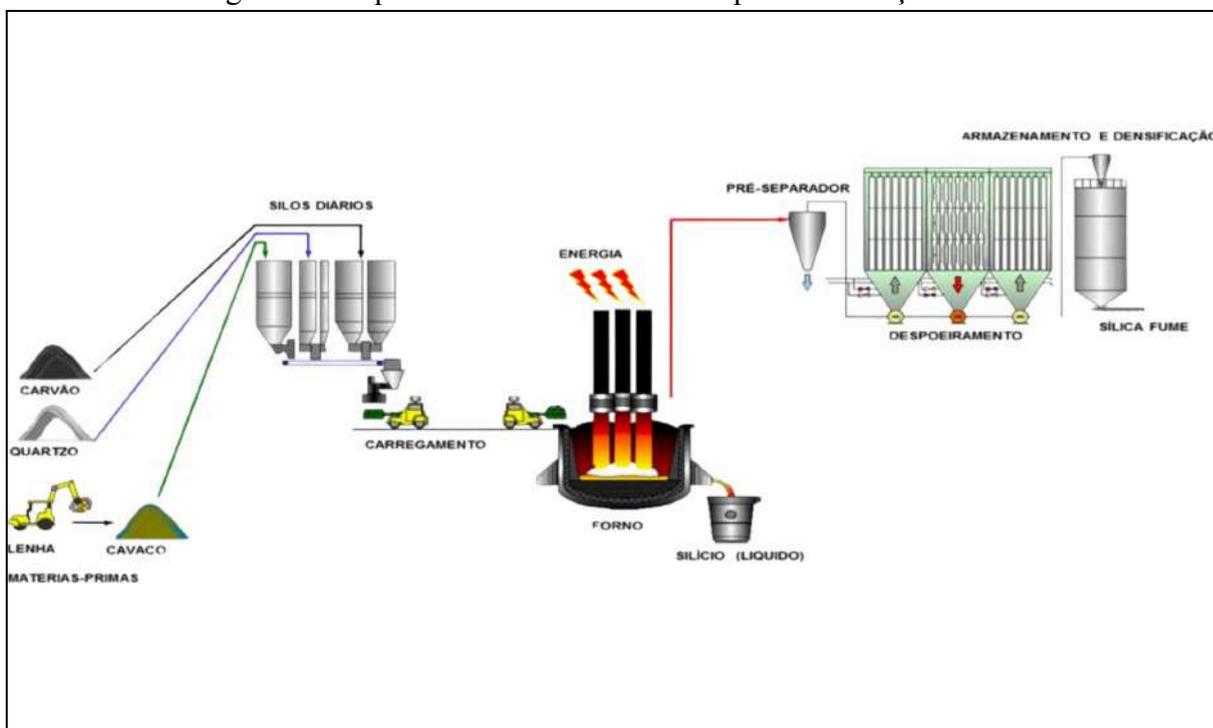
A SA ou microssílica é um material em pó, obtido como subproduto da fabricação do silício metálico e de ligas de ferro silício (Magalhães, 2018). O processo inicia-se pela função redutora de quartzo (minério de silício), cavaco (madeira) e carvão vegetal em fornos elétricos de redução (Oliveira; Santos; Oliveira, 2021) Segundo Bertequini, Machi e Doná (2019) a

produção de SA é realizada em fornos elétricos em temperaturas de aproximadamente 2000°C. No decorrer do processo, devido a redução do quartzo de alta pureza para silício, é gerado o gás monóxido de silício (SiO), que instantaneamente ao sair do forno se oxida formando partículas de SiO₂ (Freitas, 2019; Nogueira; Lopes, 2021), conforme Equação 1.



O óxido formado é recolhido ao passar por filtros especiais, e sua destinação final seria o descarte no meio ambiente, desta forma, uma a sua reutilização como agregado mineral em materiais de construção, é vista como uma opção sustentável para uma destinação final adequada. Na Figura 2, é apresentado o esquema da produção da SA, compreendendo etapas desde as matérias-primas utilizadas, o processo de combustão nos fornos e a obtenção do silício líquido, bem como o despoeiramento, obtendo a SA como resíduo da produção do silício metálico.

Figura 2 - Esquema ilustrativo com as etapas de obtenção da sílica



Fonte: Adaptado de Dow Corning Silício do Brasil (2014)

A SA tem sido empregada em composições de materiais cimentícios com o intuito de aumentar a compacidade e/ou a resistência devido a sua atividade pozolânica e a sua atuação

como filler promovida por sua granulometria muito fina (Romano *et al.*, 2008). A SA está disponível comercialmente em diversas formas, conforme descrito na Tabela 11.

Tabela 11 - Formas de sílica encontradas e características e descrição

Tipo de sílica ativa	Descrição
Natural	Pó muito fino baixa massa específica (192 a 300 Kg/m ³)
Densificada	A sílica ativa natural é compactada para ganho de densidade (500 a 700 Kg/m ³)
Forma de lama	A sílica ativa pré-misturada em água com teores de 40 a 60% da massa, massa específica aparente de 1300 kg/m ³ à 1400 kg/m ³ .
Pelotizada	Similar a sílica ativa densificada, porém é obtida com a adição de pequena quantidade de água suficiente para produzir micro pelotas com massa específica aparente em torno de 700 kg/m ³ .
Pré misturadas ao cimento	Mistura de 6,5 a 8 % de sílica ativa (natural, densificada ou pelletizada) ao cimento.

Fonte: Adaptado de Sugamoto (2007)

Para Fraga, Soares e Capuzzo (2021) a distinção da SA pode ser realizada em densificadas e não densificadas de acordo com suas densidades aparentes no estado solto, a SA em seu estado natural possui densidade entre 150 kg/m e 350 kg/m, já a densificada por ser submetida a beneficiamento por aglomeração de partículas, resultando em densidade entre 350 kg/m e 700 kg/m. Os autores destacam ainda que o tamanho e a área superficial dessas partículas influenciam diretamente na atividade pozolânica da SA.

Conforme apontado por Romano *et al.* (2008) a SA tem sido comercializada na forma densificada, devido à facilidade de manuseio, transporte e armazenamento. Apesar dessas vantagens operacionais, foi demonstrado que as SA densificadas (grânulos > 100 µm) apresentam menor atividade pozolânica que as mesmas matérias-primas não-densificadas (10-20 µm). Contudo, para alcançar esses efeitos a SA deve se encontrar desaglomerada e dispersa, expondo assim toda a sua superfície reativa, além de possibilitar que suas partículas preencham os espaços vazios no empacotamento dos materiais (Fraga; Soares; Capuzzo, 2021).

Quanto a sua composição química, normalmente a SA contém de 85 a 95% de SiO₂ amorfo, com algumas impurezas, como silício metálico e carbono (Romano *et al.*, 2008), distribuídos em um diâmetro médio de 0,1 µm e área superficial na ordem de 20.000 a 25.000 m²/kg (Souza; Davi; Fraga, 2022).

Na Tabela 12 são mostrados os requisitos químicos e físicos para a SF ser utilizada em materiais cimentícios, descritos na NBR 13956-1 (ABNT, 2012) que estabelece os requisitos e métodos de ensaios para o recebimento de sílica ativa destinada à utilização com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, bem como para emprego como adição durante a fabricação do cimento Portland.

Tabela 12 - Requisitos químicos e físicos da sílica ativa

Determinação	Unidade	Limite	Método de ensaio
SiO_2 ^{a*}	%	> 85,0	
Umidade ^{b**}	%	< 3,0	
Perda ao fogo ^{a*}	%	< 6,0	ABNT NBR 13956-2 (2012)
Equivalente alcalino em Na ₂ O ^{a*}	%		
Teor de sólidos na dispersão aquosa ^{c***}	%	Não pode variar mais do que ±2% do valor declarado pelo fabricante	
Índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias	%	> 105	ABNT NBR 13956-3 (2012)
Finura por meio da peneira 45µm	%	< 10,0	ABNT NBR 13956-4 (2012)
específica B.E.T. (opcional) ^{d****}	m ² g-1	15 < B.E.T. <30	ASTM C 1069

*a - A análise química, incluindo a perda ao fogo, deve ser realizada na base seca, ou seja, após a determinação do teor de umidade a (105±5) °C.

**b - Não se aplica à sílica ativa na forma de dispersão aquosa.

***c - Não se aplica à sílica ativa nas formas densificada e não densificada.

****d - O ensaio para a determinação da área específica, pelo método da ASTM C 1069, de acordo com o princípio proposto por Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T.), substituindo-se alumina e quartzo por sílica ativa, deve ser realizado pelo produtor quando solicitado pelo consumidor.

Fonte: ABNT NBR 13956 (2012)

Para Magalhães (2018) a elevada quantidade de SiO₂, e a sua finura são as principais razões de sua alta atividade pozolânica. Dessa forma, quanto menor o seu tamanho e maior a sua superfície específica, maior será a reatividade da SA.

As características intrínsecas da SA, analisadas por Romano *et al.* (2008), Amaral, Macioski e Medeiros (2021), Magalhães (2018), Magalhães e Muñoz (2019) e Souza, Davi e

Fraga (2022), têm uma relevância fundamental na formulação de misturas ideais para processos de restauração. Esses pesquisadores destacam que a combinação dos efeitos de preenchimento e de pozolanicidade da SA resulta em uma matriz densa e compacta, incrementando a resistência e a longevidade da mistura.

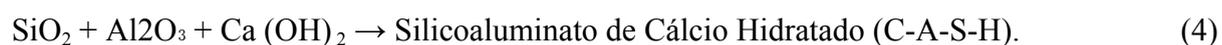
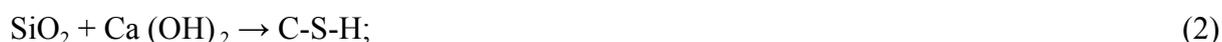
A habilidade de reduzir a permeabilidade, ressaltada por Souza, Davi e Fraga (2022), desempenha um papel crítico na salvaguarda contra a entrada de substâncias prejudiciais. Além disso, Amaral, Macioski e Medeiros (2021) afirmam que a SA também auxilia na diminuição de fissuras e na otimização da impermeabilidade, o que a torna uma escolha de valor inestimável para a preservação de estruturas históricas. Somados, esses fatores destacam o papel indispensável da Sílica Ativa na criação de misturas de restauração que atendam às exigências complexas dessa prática de conservação.

3.5 MECANISMOS DE ENDURECIMENTO DAS ARGAMASSAS À BASE DE CAL

Os mecanismos de endurecimento referem-se aos processos pelos quais a resistência de um material é aumentada, tornando-o mais difícil e menos propenso a deformações plásticas. O endurecimento das pastas e argamassas de cal ocorre devido a interação de Ca(OH)_2 ou Mg(OH)_2 com o CO_2 presente no ar, que é o fenômeno conhecido como carbonatação. O resultado dessa reação é a formação de CaCO_3 ou Carbonato de Magnésio (MgCO_3), dependendo do reagente utilizado (Sales, 2022). Ao introduzir pozolana nas pastas e argamassas de cal, o processo de endurecimento é influenciado tanto pela reação pozolânica quanto pela carbonatação, sendo estas fundamentais para o endurecimento e sua escolha determinada pelas condições específicas durante a cura (Faria Filho, 2022).

Conforme mencionado anteriormente, os materiais pozolânicos são constituídos principalmente de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , desta forma, a literatura consultada (Salles, 2022; Magalhães, 2018; Zhang *et al.*, 2020; Fraga; Soares; Capuzzo, 2021) entre outros autores, faz referência a uma série de compostos de hidratação possíveis de serem formados a partir das reações resultantes da interação da sílica e da alumina das adições pozolânicas com o Ca(OH)_2 .

De modo geral, conforme destacado por Magalhães (2018), as equações que expressam as reações que formam esses produtos estão representadas a seguir:



De acordo Sales (2022) o Ca(OH)_2 é consumido significativamente ao longo do tempo, e novos produtos são formados pela combinação do hidróxido remanescente com o Al_2O_3 e/ou outras fases presentes. Entre os novos produtos originados, destacam-se os CAH e os sílico-aluminatos de cálcio hidratados, como a stratlingita (C2ASH8). Esses compostos são essenciais para o desenvolvimento das propriedades mecânicas das argamassas (Magalhães, 2018). A Tabela 13 apresenta uma síntese dos compostos potencialmente formados durante a atividade pozolânica, desencadeada pela reação entre a cal e as adições pozolânicas.

Tabela 13 - Compostos possíveis de serem formados na atividade pozolânica

Composto	Fórmula química
Silicato de cálcio hidratado	CSH
Silicoaluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H)	C_2ASH_8 Stralingita ou Gehlenita
	C_3ASH_4 Katoita (Sílica hidrogranet)
	C_4AH_{13} (Aluminato tetracálcico hidratado)
Aluminato de cálcio hidratado	C_3AH_6 (Hidrogranada - Aluminato tricálcico hidratado)
	$\text{C}_2\text{AH}_{6,5}$
Monocarboaluminato de cálcio hidratado	$\text{C}_4\text{ACH}_{11}$

Fonte: Magalhães (2018)

Já o processo de endurecimento de argamassas à base de cal, com adição de SA se dá principalmente por meio das reações pozolânicas com o Ca(OH)_2 , resultando na formação do gel de CSH (Fraga; Soares; Capuzzo, 2021). Esse gel é um dos primeiros compostos a serem produzidos e desempenha um papel crucial na melhoria das propriedades das argamassas (Mattos, 2018).

Um dos fatores de grande influência na formação dos produtos de hidratação, que garantem o endurecimento e características das argamassas é a condição de cura. Em relação à cura de argamassas de cal aérea, vale ressaltar a ausência de uma normatização específica no contexto brasileiro. A norma nacional NBR 13279 (ABNT, 2005), que aborda ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, estipula as seguintes condições de cura para argamassas à base de cimento (com adições ou aditivos) e de cimento e cal (hidratada ou virgem): Permanência no molde por 48 ± 24 horas, seguida pela continuidade em condições ambientais de laboratório a uma temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e uma umidade relativa de $(60 \pm 5)\%$, até a data do ensaio.

Magalhães (2018) desenvolveu formulações de cal com pó cerâmico, metacaulim, cinzas volantes e sílica ativa para atender aos requisitos de desempenho de argamassas antigas. Os corpos de prova foram curados por 72 horas (com adição) e sete dias (sem adição) em ambiente laboratorial. Durante a cura, as condições ambientais foram monitoradas, mantendo temperatura e umidade relativa nos moldes em torno de $26 \pm 1^\circ\text{C}$ e $70 \pm 6\%$, respectivamente. Após a cura, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em ambiente externo, sujeitos às condições atmosféricas normais da região de Salvador, com temperatura do ar variando em torno de $26 \pm 5^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $78 \pm 20\%$.

Mattos e Gonçalves (2019) avaliaram dois tipos de cura para a idade de 180 dias de argamassas à base de cal com metacaulim, de acordo com os autores, as argamassas que passaram pelo processo de cura externa obtiveram melhor desempenho mecânico, quando comparadas com as formulações que foram curadas em ambiente interno (laboratório), sugerindo que a reação de carbonatação prevaleceu a pozolânica, ou seja, a quantidade de hidróxido de cálcio disponível não foi adequada para reagir com os silicatos e aluminatos do metacaulim. A partir dos resultados obtidos nas condições adotadas para a cura externa, que são as mais próximas da realidade de obra, conclui-se que estas foram as mais adequadas para argamassas de cal aérea com metacaulim nas composições propostas. No entanto, devido a cinética da reação pozolânica e de carbonatação, para potencializar o uso desta pozolana para aplicação in situ, os autores recomendam o uso de uma de manta geotêxtil com pulverização frequente de água, garantindo o teor de umidade nas idades iniciais.

A escolha adequada da proporção entre cal e areia desempenha um papel crucial na formulação de argamassas. Essa relação, expressa como a quantidade de aglomerante em relação ao agregado, pode variar, segundo Veiga (2017), de 1:1 a 1:2,5, incluindo também proporções de 1:3 e 1:4. A autora destaca que a proporção de 1:3 tem sido adotada como uma referência significativa. Em estudos recentes, como os conduzidos por Abraão (2019) e Siqueira Júnior (2023), a proporção de 1:3 foi explorada dentre diferentes combinações, evidenciando sua importância e presença na pesquisa científica relacionada a argamassas de cal. Essa seleção criteriosa da proporção entre cal e areia é essencial para alcançar propriedades desejadas na argamassa, garantindo sua eficácia e durabilidade em diversas aplicações.

Por outro lado, as proporções de substituição da cal por SA variam desde proporções sutis de 10% até 100%. Em um nível de substituição de 10%, a sílica ativa pode melhorar o comportamento reológico de pastas de cimento e concreto (Duval; Kadri, 1998), uma vez que

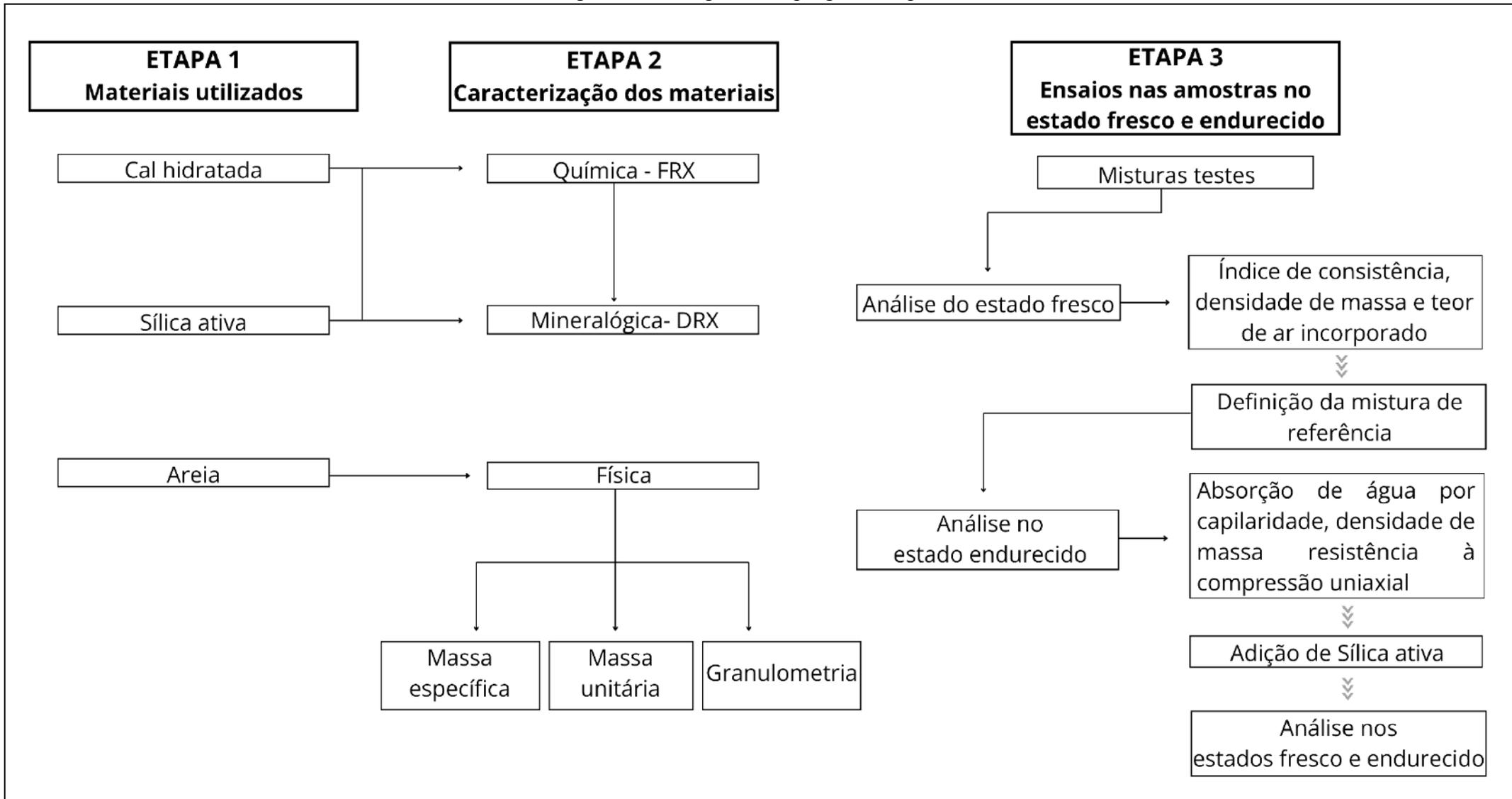
pequenas partículas podem penetrar entre os grãos de clínquer, aprimorando o empacotamento, simultaneamente, reduz-se o atrito entre as partículas (Abraão, 2019).

Salles (2022) afirma que um dos aspectos mais influentes no processo de endurecimento e nas características das argamassas é a sua condição de cura. A cura em argamassa à base de cal é um processo essencial para que se tenha o desenvolvimento adequado das propriedades físicas e mecânicas do material. Para Mattos e Gonçalves (2019), para as argamassas de cal aérea a cura seca favorece a reação de carbonatação e a cura úmida favorece a reação de hidratação, onde a cura seca envolve a não aplicação de água externa após a colocação do material e a cura úmida envolve manter a superfície do material úmida por um período de tempo após a aplicação.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a realização do presente estudo foi feito um programa experimental que tinha como objetivo investigar a influência da adição de sílica ativa nas propriedades de uma argamassa de restauro. O programa experimental consistiu de três etapas: materiais utilizados, caracterização dos materiais e ensaios nas misturas de argamassas, nos estados fresco e endurecido. A Figura 3 apresenta o fluxograma com essas etapas e a seguir estão descritas cada uma delas.

Figura 3 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autoria própria (2024).

As etapas do programa experimental que constituem a realização do presente estudo serão detalhadamente expostas a seguir. Cada fase do programa experimental será minuciosamente descrita, desde a seleção dos materiais e preparação das misturas até a execução dos ensaios no estado fresco e endurecido das argamassas à base de cal.

4.1 ETAPA 1: MATERIAIS UTILIZADOS

As argamassas foram confeccionadas com cal hidratada tipo CH-I e agregado miúdo convencional, obtidos em comércios locais, a água utilizada na mistura foi fornecida pelo laboratório de materiais de construção civil do IFPB *campus* Patos. A sílica ativa adicionada nas dosagens é de fabricação da empresa Grupo Cimentos de Chihuahua (GCC) denominada *Microsillex*, adquirida no Brasil através da empresa Comércio Importação e Exportação Ltda (CLANAP).

4.2 ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os procedimentos de caracterização física do agregado miúdo natural foram conduzidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), *campus* Patos. Já os ensaios de caracterização mineralógica para a cal hidráulica e sílica ativa foram realizados em parceria com o Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). As informações acerca da composição química da cal hidratada e da sílica foram retiradas do catálogo de seus respectivos fabricantes. A Tabela 14 apresenta as especificações dos ensaios e as normas a serem utilizadas.

Tabela 14 – Ensaios de caracterização

Análise	Ensaio	Norma
Física	Massa unitária – Areia	NM 52 (ABNT, 2002)
	Massa específica – Areia	NBR 52 (ABNT, 2002)
	Determinação da composição granulométrica – Areia	NBR 7211 (ABNT, 2022)
	Massa unitária – Cal hidratada	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
	Massa específica – Cal hidratada	NBR 9776 (ABNT, 1987)
Química	Fluorescência de Raios X (FRX) – Cal hidratada	-
	Fluorescência de Raios X (FRX) – Sílica ativa	-
Mineralógica	Difratometria de Raios X (DRX) – Cal hidratada	
	Difratometria de Raios X (DRX) – Sílica ativa	-

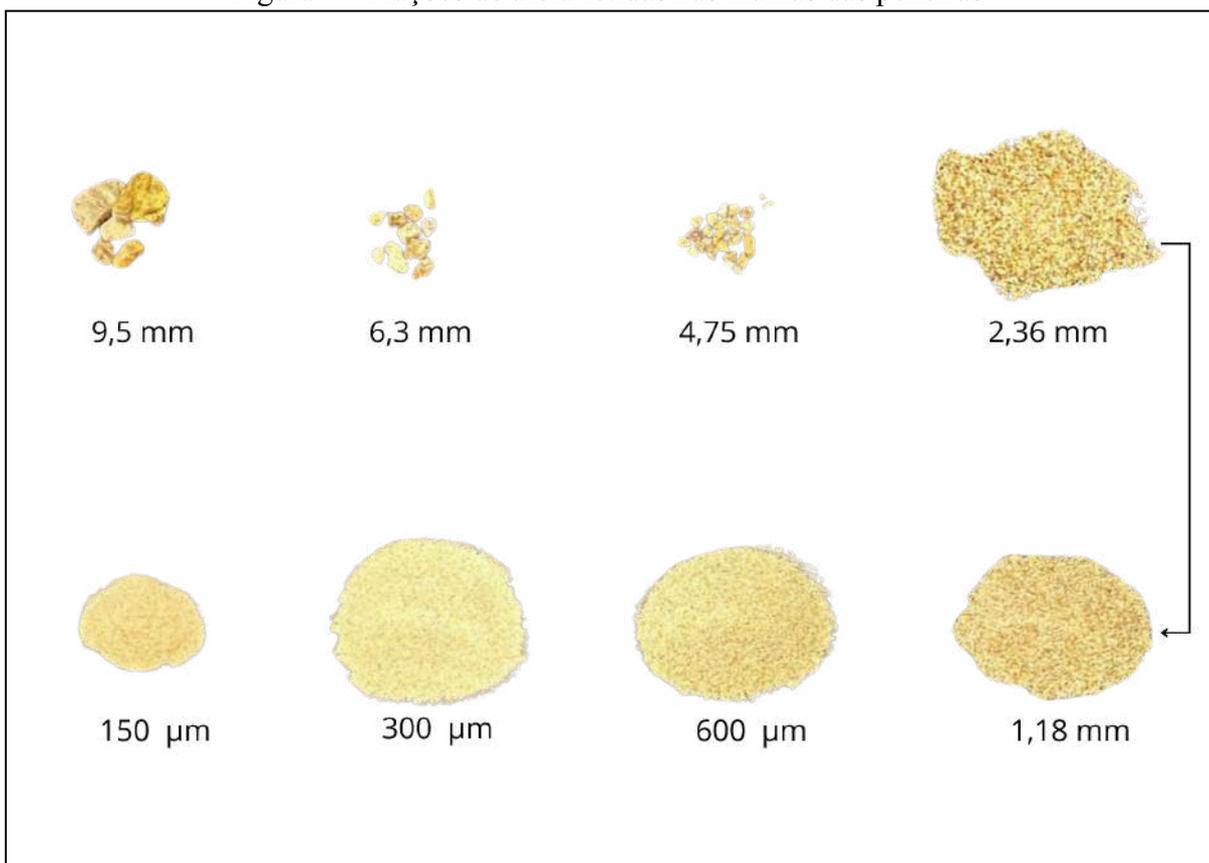
Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.1 Análise física

Na análise física foram verificadas a massa específica, massa unitária e granulometria da areia, a execução de ensaios foi realizada em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelas normas previamente detalhadas na Tabela 13. A amostra ensaiada de agregado miúdo, foi coletada de acordo com a NBR NM 26 (ABNT, 2009) e reduzida para ensaio de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001).

O ensaio de composição granulométrica seguiu a metodologia da norma NBR 7211 (ABNT, 2022). A granulometria de um agregado corresponde à distribuição das percentagens das partículas de determinadas dimensões que o compõem. O agregado miúdo natural desta pesquisa foi submetido à análise granulométrica por meio de peneiramento. A Figura 4 apresenta as frações retidas de areia.

Figura 4 - Frações de areia retidas nas malhas das peneiras



Fonte: Autoria própria (2024).

A Dimensão Máxima Característica corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira, da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada, em massa, igual ou imediatamente inferior a 5% da massa total da amostra (NBR 7211, 2022). Para a amostra ensaiada a dimensão máxima corresponde a 9,5 mm. Tendo em vista a ausência de normativas que especifiquem os requisitos exigíveis de agregados miúdos destinados à produção de argamassas, optou-se por realizar o beneficiamento da amostra, por meio de peneiramento, almejando-se tanto diminuir sua dimensão máxima característica, quanto a retirada de eventuais impurezas existentes na amostra. Uma vez que quanto maior a dimensão máxima característica do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume que tem de ser coberta pela pasta de ligante, para uma dada relação água/ligante.

A massa específica foi calculada a partir da relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Já a massa unitária foi obtida pela relação entre a massa da unidade de volume da areia, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis, a uma temperatura determinada, e a massa de um volume igual de água destilada, livre de ar, a uma temperatura estabelecida (NBR 52, 2002). A sua determinação é de fundamental importância

para a conversão do traço em massa para o traço em volume, comumente usados em obra, o que facilita as atividades em campo; esse parâmetro é, ainda, essencial para dosagem rigorosa em laboratório. Os resultados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de massa específica e unitária do agregado miúdo

Ensaio	Material
	Areia
Massa específica	2,60 g/cm ³
Massa unitária	1,2 g/cm ³

Fonte: Autoria própria (2024).

A massa específica e a massa unitária da cal, foram obtidas através das especificações do fabricante, é de 2.306kg/m³ e 2.563kg/m³, respectivamente. Já os parâmetros físicos da SA utilizou-se das informações contidas no catálogo do fabricante, apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades físicas da SA

Propriedades	ASTM C-618	Microsillex
Finura, passa na malha nº 325 (45µm)	ASTM C-430 ≥76,0	96
Densidade	ASTM C-604 Não se aplica	2,3%
Índice de atividade pozolânica até 7 dias	ASTM C-311 ≥75	105%

Fonte: Catálogo do fabricante

A NBR 13956-1 (ABNT, 2012) estabelece requisitos químicos e físicos para a SA ser utilizada como adição, conforme exposto anteriormente na Tabela 12, onde são abordados os possíveis compostos a serem formados a partir da atividade pozolânica no item 3.5. Em relação à finura, a norma estabelece que a porcentagem máxima permitida de material retido na peneira de 45µm é de 10,0%. No que diz respeito ao índice de atividade pozolânica até 7 dias, é exigido que seja igual ou superior a 105,0%. Diante desses critérios, os resultados obtidos na amostra estão em conformidade com as diretrizes estabelecidas, apresentando uma finura de 4,0% e um índice de atividade pozolânica de 105,0%, atendendo aos requisitos específicos estipulados

4.2.2 Informações acerca da composição química

As especificações químicas da SA foram retiradas do catálogo do fabricante da *Microsillex*, quanto à composição química foram comparados os valores fornecidos com os requisitos estabelecidos na NBR 12653 (ABNT, 2014) conforme apresentados anteriormente na Tabela 2, no tópico 3.2. A Tabela 17 detalha a composição química que os materiais devem possuir para serem classificados como pozolânicos.

Tabela 17 - propriedades físico-química da SA

Propriedades químicas	ASTM C-618	Microsillex
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	91,30
Umidade (%)	$\leq 3,0$	1,25
Perda ao fogo (%)	$\leq 10,0$	0,38

Fonte: Catálogo do fabricante.

Desta forma, a SA utilizada nas dosagens atende aos requisitos para ser considerada um material pozolânico tanto pela NBR 12653 (ABNT, 2014), quanto pela ASTM C-618, tendo em vista que as normativas estabelecem que a soma dos teores percentuais de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 deve superar o mínimo de 70%. Para a adição, a fração desses óxidos reativos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) em 91,30%, atende os requisitos supracitados. Além disso, a NBR 12653 estabelece o limite máximo de perda ao fogo em 6,0%, e para o teor de umidade o limite máximo é de 3,0% consequentemente, percebe-se que a SA em estudo atende os valores estabelecidos.

Já as especificações da cal utilizada na pesquisa, foram retiradas do catálogo da mineradora Camisa Mineração de Cal LTDA, conforme apresentado na tabela 18.

Tabela 18 - propriedades químicas da cal

Compostos	Quantidade (%)
Anidro carbônico (CO_2)	2,53
Óxido de cálcio e magnésio não tratado calculado ($\text{CaO} + \text{MgO}$)	7,45
Óxidos totais na base de não-voláteis	97,42

Fonte: Catálogo do fabricante.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que as amostras analisadas são típicas amostras de hidróxido de cálcio calcítico. A NBR 7175 (ABNT, 2003) estabelece limites para a classificação do tipo de cal, conforme os resultados apresentados para CO_2 , $\text{CaO}+\text{MgO}$ e óxidos totais na base de não-voláteis, pode-se afirmar que trata-se de uma cal tipo CH-I, uma vez que a amostra encontra-se dentro dos intervalos normalizados, respectivamente 5%, 10% e 90%.

As composições químicas na forma de óxidos da SA e da cal são apresentadas na Tabela 19, na qual é possível observar a predominância de SiO_2 , além do alto índice de CaO , possibilitando a formação de C-S-H, C-A-H, C-A-S-H, quando adicionada água a mistura, conforme apontado anteriormente nas equações 2, 3 e 4 apresentadas no tópico 3.4.

Tabela 19 - Composição química da cal e SA determinada por fluorescência de raios X

Material/ Composição química (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	TiO	Na_2O
SA	90,0	4,0	1,0	4,0	0,2	0,9	0,1	0,3	0,05
Cal	4,43	0,36	0,13	71,73	0,52	-	-	-	-

Fonte: Catálogo dos fabricantes.

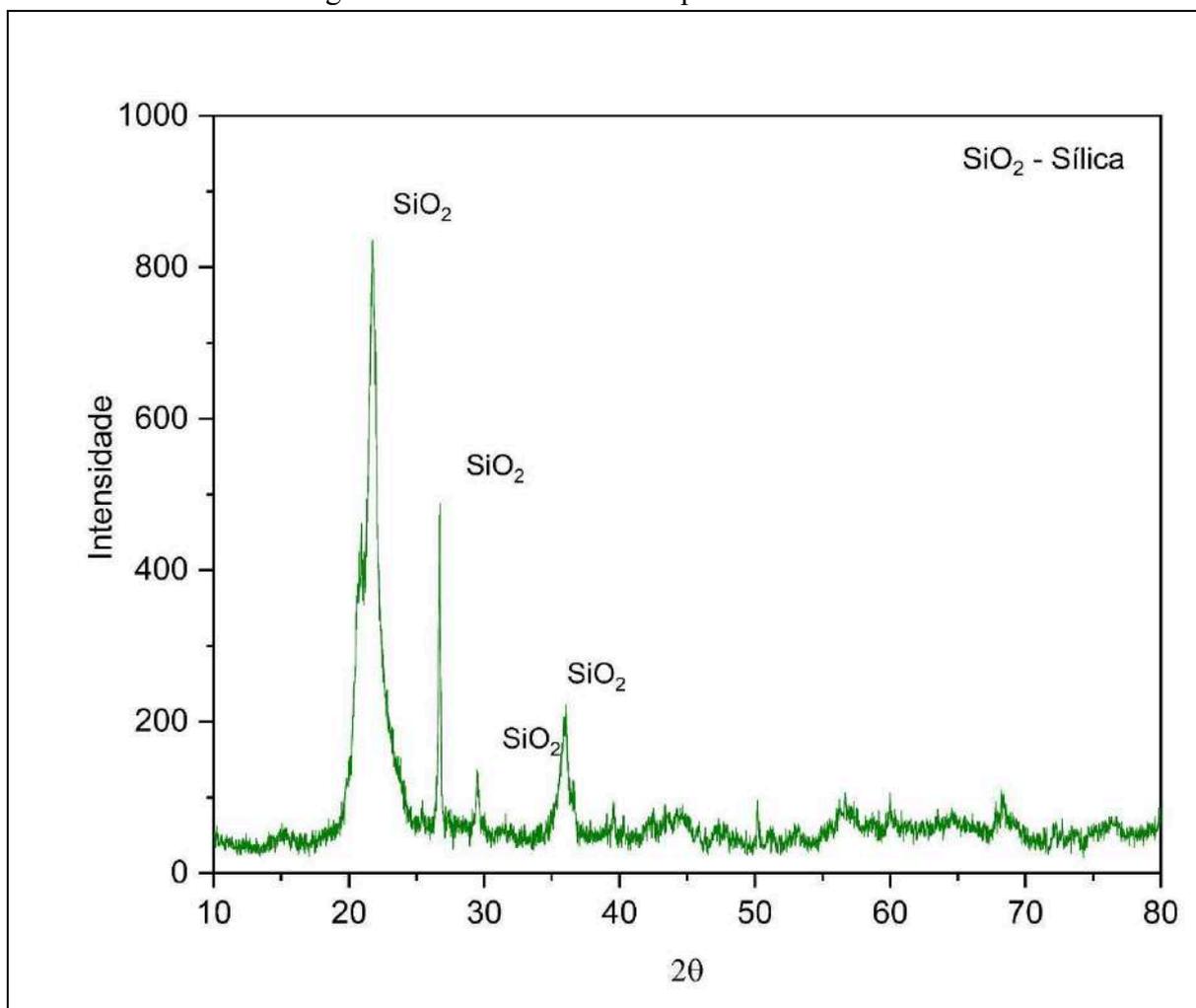
As normativas NBR 13956-1 (ABNT, 2012) e NBR 15894-1 (ABNT, 2010) preconizam, o percentual mínimo de SiO_2 , de 85% para SA, a fração deste óxido em 90,0% atende os requisitos mínimos por norma.

4.2.3 Análise mineralógica

O ensaio de Difração de Raio X (DRX) foi realizado para a amostra de sílica ativa. O ensaio de DRX utilizou o difratômetro da marca Siemens, modelo D5000 sob as seguintes condições de ensaio: radiação CuK , tensão de 40 KV, corrente de 30mA, com intervalo de medição para 2θ : 10 a 80° e passo $0,02^\circ/\text{seg}$.

Foi realizada a coleta do material passante da peneira nº 200 mm cuja abertura é de 0,075 mm, o destorroamento não ocorreu pois o material já estava na forma de finos, e com essa amostra foi feita a análise mineralógica. A identificação dos picos foi extraída do uso do software X'Pert High Core Plus e os resultados para a sílica e cal hidráulica podem ser vistos nas Figuras 5 e 6.

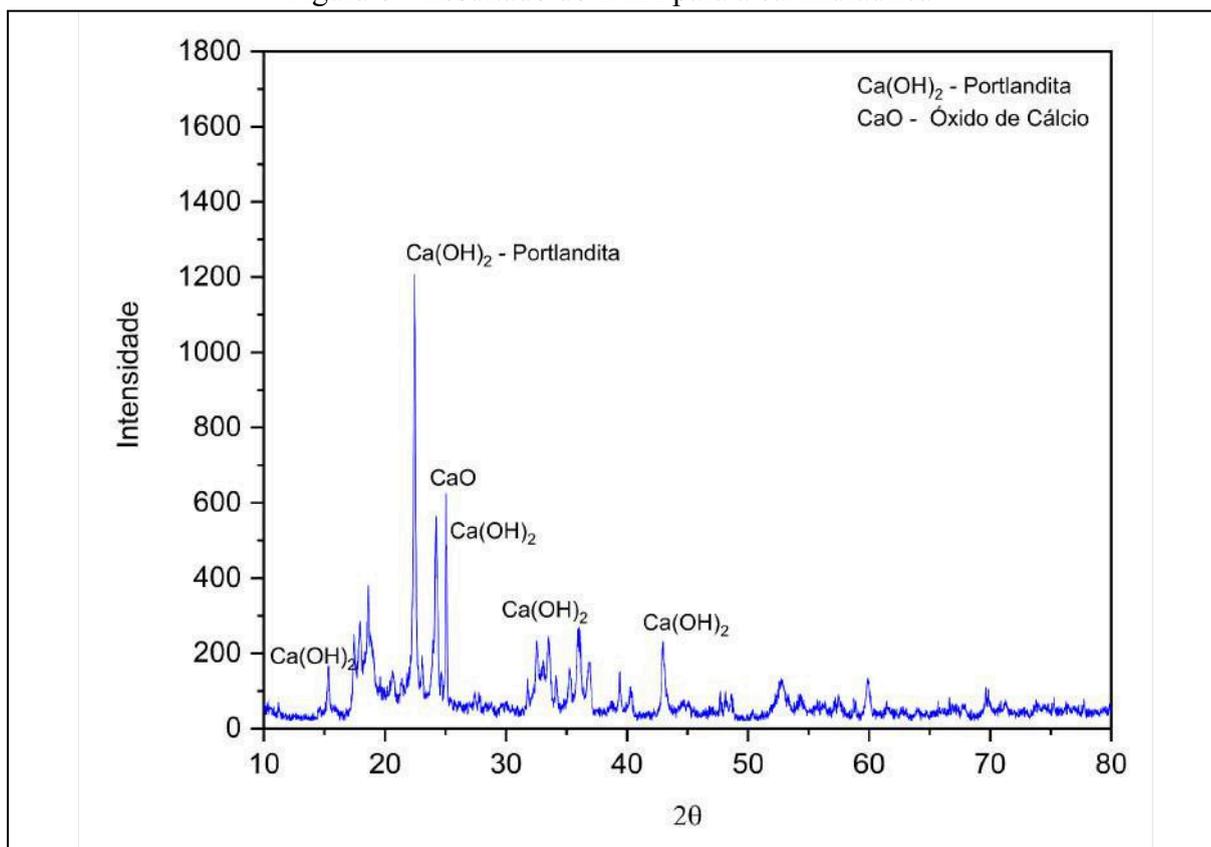
Figura 5 - Resultado do DRX para a sílica ativa



Fonte: Autoria própria (2024).

A sílica conforme a Tabela 18 possui um alto teor de dióxido de silício, cerca de 90,0%, comprovado no difratograma apresentado na Figura 5, observa-se a alta presença de dióxido de silício. Além disso, percebe-se que a amostra não apresenta formação nítida de halos que indiquem amorficidade. Após o entendimento das propriedades e características dos materiais utilizados nesta pesquisa, serão abordados no tópico seguinte o detalhamento dos ensaios realizados no estado fresco endurecido das misturas com e sem adição de sílica.

Figura 6 - Resultado do DRX para a cal hidráulica



Fonte: Autoria própria (2024).

Conforme apresenta a Figura 6, o difratograma da amostra de cal hidráulica é composto por picos de portlandita, ou hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), e óxido de cálcio (CaO). É importante destacar os potenciais riscos de contaminação do material. A presença de impurezas ou contaminantes, seja durante o processo de produção ou armazenamento, pode comprometer a qualidade e desempenho da cal hidráulica. Contaminações por elementos como sílica, sulfatos ou cloretos podem alterar as propriedades químicas e físicas da cal, resultando em uma menor capacidade de hidratação ou até mesmo em danos estruturais nas construções onde o material é aplicado (Velosa, 2006).

4.3 ETAPA 3: ENSAIOS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

A produção e estudo das misturas, foi realizada baseando-se no estudo Garijo *et al.* (2020) onde foram produzidas fixando-se a relação cal/agregado em 1:3 e relação água/aglomerante 0.9 ambas em volume. De forma análoga, no estudo de Magalhães (2018), foram caracterizadas formulações de argamassas à base de cal aérea, elaboradas com adições

pozolônicas, em especial a sílica ativa, com a relação cal/agregado/sílica ativa de 1:3:0,5. Ambos os trabalhos almejavam o cumprimento de requisitos de desempenho para argamassas antigas. Desta forma, foi estabelecido como parâmetro de referência, a composição de cal e areia, com traço volumétrico de 1:3 com intuito de observar a influência da adição de sílica ativa nos resultados até uma proporção de 1:3:0,3 em volume, ou seja, até à adição de 30% de SA, conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Identificação e traços das misturas a serem estudadas

Identificação	Amostra	Traço cal: areia: adição em massa
Amostra de referência	REF	1:8,75:0
Adição de 10% de sílica ativa	SA10	1:8,75:0,11
Adição de 20% de sílica ativa	SA20	1:8,75:0,21
Adição de 30% de sílica ativa	SA30	1:8,75:0,31

Fonte: Autoria própria (2024).

As misturas foram preparadas de acordo com a normativa brasileira referente às argamassas, NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo de mistura e determinação do índice de consistência (ABNT, 2016). No entanto, é importante ressaltar que essa norma não apresenta uma metodologia específica para a confecção de argamassas à base de cal aérea. Dentro desse contexto, os procedimentos de execução das composições a serem estudadas nesta pesquisa também foram embasados em publicações recentes que abordam experiências com argamassas de cal e adições.

As misturas de argamassa para revestimentos com e sem adição de SA foram avaliadas nos estados fresco e endurecido, os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do IFPB, no *campus* Patos, conforme as normas vigentes apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 - Ensaios nas amostras nos estados fresco e endurecido

Análise	Ensaio	Norma
Fresco	Densidade de massa e teor de ar incorporado	NBR 13278 (ABNT, 2005)
	Índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)
Endurecido	Resistência à compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)
	Densidade de massa	NBR 13278 (ABNT, 2005)
	Absorção de água por capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)

Fonte: Autoria própria (2024).

A apresentação detalhada da metodologia empregada para a análise nos estados fresco e endurecido das composições de argamassa será apresentada nos subtópicos a seguir.

4.3.1 Ensaio no estado fresco

Para argamassa no estado fresco foram realizados os ensaios de densidade de massa no estado fresco, por meio dos procedimentos estabelecidos na NBR 13278 (ABNT, 2005) e de índice de consistência segundo a NBR 13276 (ABNT, 2016). A normativa brasileira que regula o método de determinação do índice de consistência da argamassa não fornece valores de referência para este parâmetro. Portanto, o estabelecimento do intervalo de confiança para a obtenção do teor ideal de água nas misturas baseou-se nas literaturas recentes que tratam de argamassas de revestimento à base de cal, além de testes de tentativa e erro com o objetivo de ajustar a consistência.

Observou-se, assim, uma variação nos valores de espalhamento em função do tipo e percentual de adição nas composições analisadas. Para a definição do teor de água nas misturas foram realizados testes com a amostra de referência com a proporção 1:3 em volume de cal hidráulica e areia, em espalhamentos inferiores a 250 mm percebeu-se uma maior rigidez e menor trabalhabilidade da mistura, o que poderia dificultar sua aplicação em superfícies ou em espaços mais complexos, já em misturas com espalhamento superior a 260 mm \pm 5 observou-se que as misturas efetuadas evidenciaram consistência fluida e com presença de segregação.

Além disso, a análise da amostra de referência abrangeu a uniformidade e espalhamento das bordas da mistura ensaiada, mas também a presença de segregação e de exsudação, por meio de inspeção visual. Os resultados dos testes realizados para a definição da argamassa de referência estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Teste para definição da mistura de referência

A/C	Espalhamento (mm)	Segregação		Exsudação		Borda	
		Sim	Não	Sim	Não	Uniforme	Desuniforme
0,85	283	X		X			X
0,83	267		X		X		X
0,70	225	X			X		X
0,75	235	X			X	X	
0,78	240		X		X	X	
0,80	265		X		X	X	

Fonte: Autoria própria (2024).

A partir dos resultados dos testes de consistência e avaliação dos aspectos visuais das pastas, estabeleceu-se um espalhamento mínimo aceitável para o ensaio de 250 mm e o valor máximo de 265 mm. No caso de argamassas que apresentaram espalhamento fora desse intervalo, procedeu-se à elaboração de novas misturas, com ajuste no teor de água, assegurando a conformidade com os critérios estipulados. A amostra escolhida corresponde a uma relação A/C de 0,80 e um espalhamento de 265 mm em conformidade com a Tabela 22.

Para a análise da densidade de massa, foram realizados os procedimentos da NBR 13280 (ABNT, 2005). O teor de ar incorporado foi calculado a partir da densidade, quantidade de água e massa específica dos materiais. O tópico a seguir abordará sobre as análises realizadas nas amostras no estado fresco aos 14, 28 e 56 dias de cura.

4.3.2 Ensaio no estado endurecido

Para análise de densidade de massa no estado fresco, utilizou-se dos procedimentos descritos na NBR 13278 (ABNT, 2005), já os ensaios de resistência à compressão seguindo o estipulado na NBR 13279 (ABNT, 2005). Os corpos de prova (CP) foram moldados em formas cilíndricas com diâmetro interno $50 \pm 0,2$ mm e altura de $100 \pm 0,5$ mm.

Os CPs foram submetidos a dois processos de cura. Inicialmente, todas as amostras foram mantidas durante sete dias nas formas em ambiente laboratorial com umidade e temperatura ambiente, ficando cobertas com um pano úmido. Após este período, ocorreu a desforma dos corpos de prova e foram envoltos em plástico filme, permanecendo até a idade de ruptura.

A capacidade de absorção de água, bem como a velocidade com que ocorre esta absorção, constituem características relevantes para a análise da durabilidade das argamassas, uma vez que permite avaliar a maior ou menor dificuldade de penetração dos agentes agressivos. No presente trabalho, o referido ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos definidos na NBR 15259 (ABNT, 2005). Em geral, a absorção de água e o coeficiente de capilaridade, parâmetro que traduz a velocidade de absorção, são calculados para os tempos de 10 e 90 min (NBR 15259, 2005).

O próximo tópico abordará a análise estatística dos resultados dos ensaios no estado endurecido das misturas com adições de SA. Os resultados desses ensaios serão submetidos a uma análise de variância (ANOVA), que desempenhará um papel crucial na interpretação dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão uniaxial.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial foram submetidos ao tratamento estatístico por análise de variância (ANOVA). Esse método consiste em comparar três ou mais tratamentos e verificar se as variáveis respostas, medidas para diferentes níveis, se diferem entre si do ponto de vista estatístico.

A ANOVA desta pesquisa foi realizada com auxílio do software Minitab 19 e os resultados de média e desvio padrão foram obtidos pelo programa Excel. A análise estatística consistiu em comparar a variância das médias em um grupo de resultados e o principal fator analisado foi o Valor-p, para esse fator foi realizada as seguintes verificações:

- a) Valor-p $> 0,05$: não é estatisticamente significativo, pois o nível de significância será maior que 5%, obtendo uma confiabilidade do resultado menor que 95%. Dessa forma não é possível afirmar que existe uma relação entre a variável e a resposta;
- b) Valor-p $\leq 0,05$: é estatisticamente significativo, pois o nível de significância será menor ou igual a 5%, obtendo uma confiabilidade de resultado maior ou igual a 95%. Dessa forma é possível afirmar que existe uma relação entre a variável e a resposta.

Nesta pesquisa foi realizada a análise linear, verificando a relação das porcentagens de SA (Fator 1: 10%, 20% e 30%) com os resultados de resistência à compressão uniaxial.

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

A seguir serão abordados os resultados e discussões derivados das análises realizadas nas misturas de argamassas à base de cal hidráulica com e sem adição de sílica. Esses resultados foram obtidos por meio dos ensaios detalhados no Capítulo 4 (Programa Experimental). A avaliação do estado fresco compreende os ensaios de trabalhabilidade, densidade de massa e teor de ar incorporado, enquanto para o estado endurecido serão apresentados os resultados dos ensaios de densidade de massa, absorção de água por capilaridade e resistências à compressão uniaxial. Adicionalmente, serão discutidas as análises de variância referentes aos resultados de resistência à compressão, proporcionando uma compreensão aprofundada do desempenho das misturas estudadas.

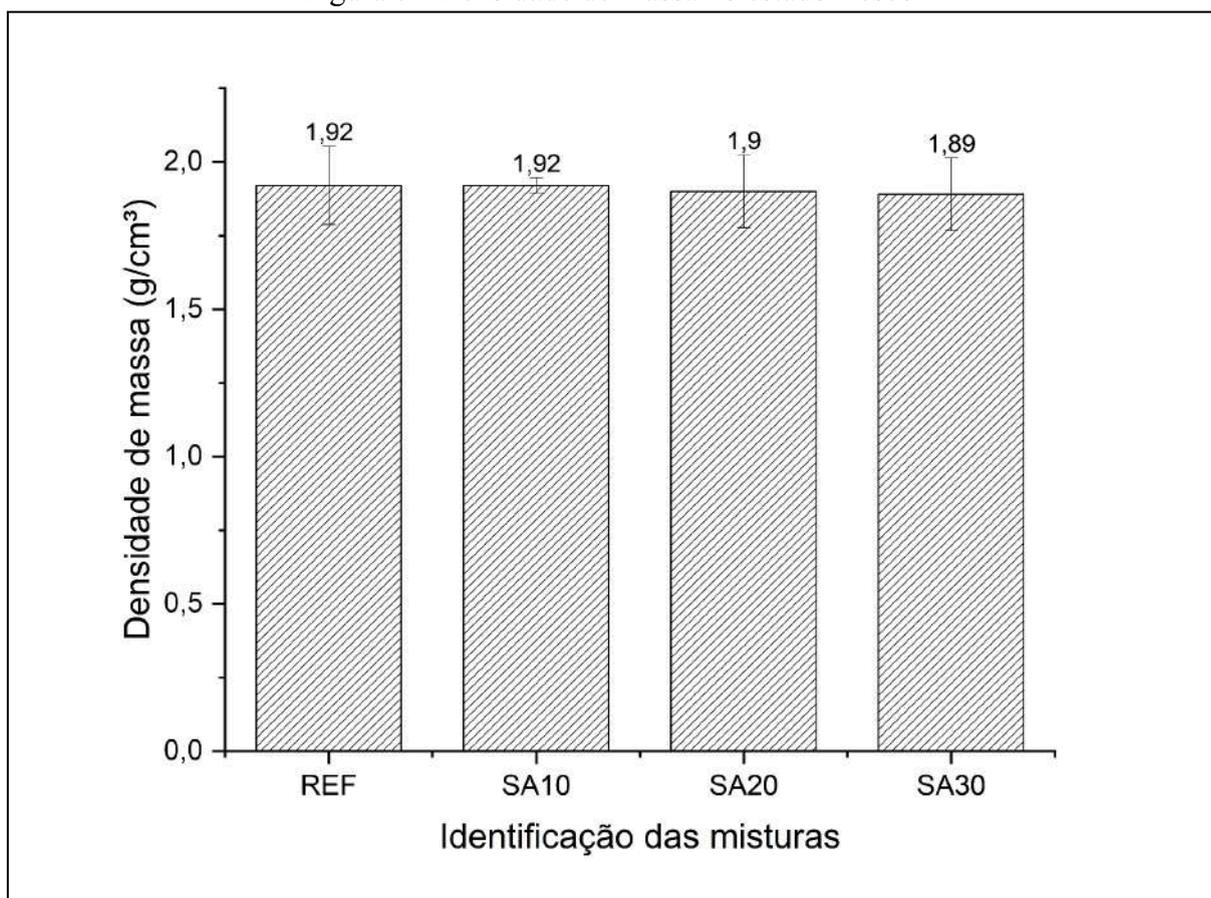
5.1 DENSIDADE DE MASSA E TEOR DE AR INCORPORADO

No contexto da análise das propriedades no estado fresco das misturas de argamassa à base de cal, a seção a seguir se aprofundará em três subtópicos específicos: a densidade de massa no estado fresco, o teor de ar incorporado e a relação entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado, buscando compreender como esses dois fatores se inter-relacionam e influenciam o comportamento das argamassas no estado fresco.

5.1.1 Densidade de massa no estado fresco

A Figura 7 apresenta os resultados do ensaio de densidade de massa no estado fresco.

Figura 7 - Densidade de massa no estado fresco



Fonte: Autoria própria (2024).

O gráfico apresentado na Figura 6 possui em seu eixo Y os valores de densidade de massa em ordem crescente para as misturas de argamassa à base de cal no estado fresco. No eixo X, estão apresentadas as misturas estudadas, são elas: REF, SA10, SA20 e SA30. Comparando os resultados das amostras REF com as demais amostras com adições de sílica, percebe-se que a amostra REF apresentou o valor mais alto de densidade de massa, registrando $1,92 \text{ g/cm}^3$. Por outro lado, as amostras com adições de SA20 e SA30 demonstraram valores ligeiramente mais baixos, com declínios de densidade correspondente a 1,04% e 1,56%, respectivamente. Para a mistura com 10% de sílica (SA10) não houveram mudanças no valor de densidade de massa.

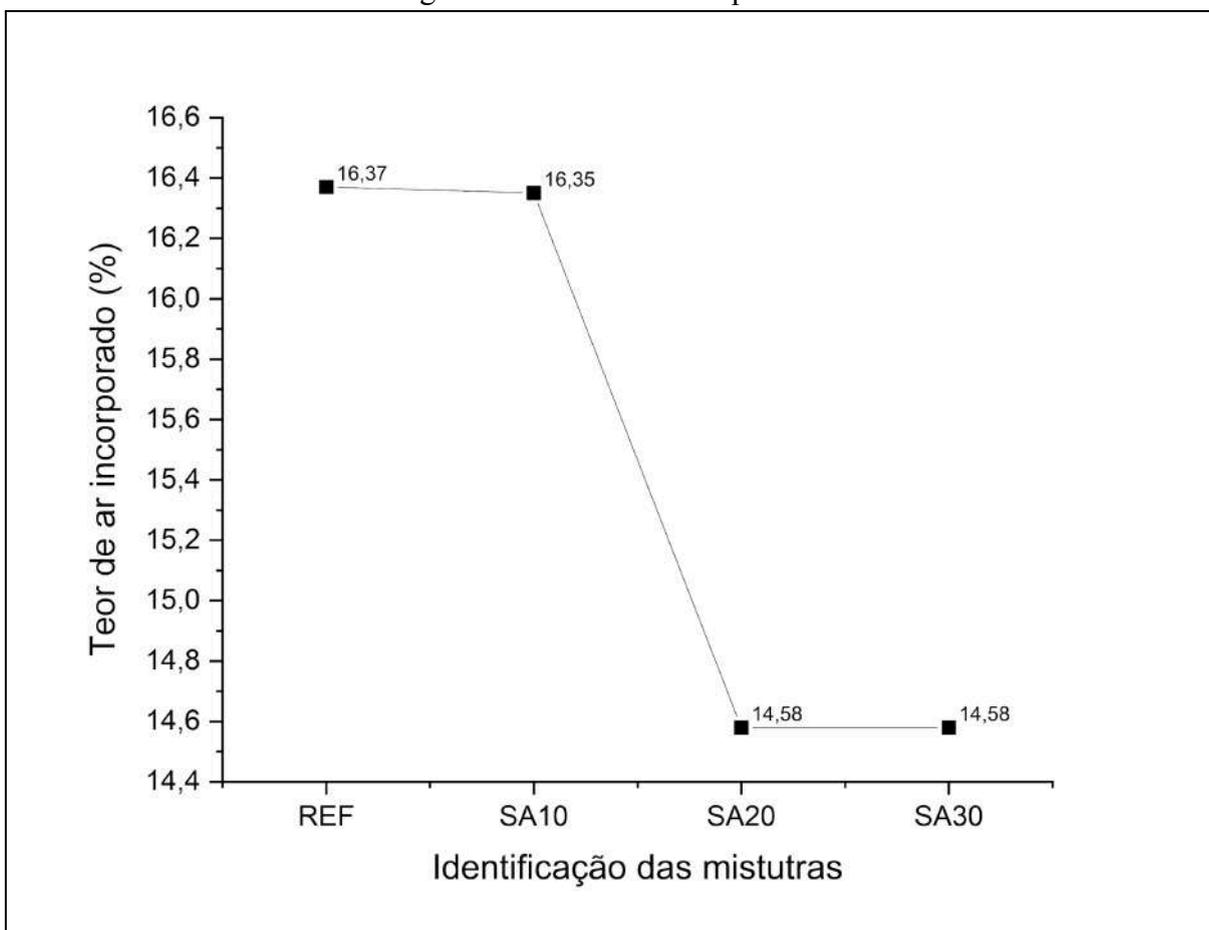
Esses resultados sugerem que a adição de sílica ativa (SA) não influenciou significativamente a densidade de massa das misturas em comparação com a amostra de referência (REF). De acordo com Souza (2023), esse comportamento de argamassas com adições pozolânicas contribui para o aumento na densidade de massa no estado fresco. Tendo em vista que a adição de SA em uma quantidade maior poderia aumentar o teor de partículas

finas e conseqüentemente a compactação do sistema e para o preenchimento dos espaços vazios.

5.1.2 Teor de ar incorporado no estado fresco

No que diz respeito ao teor de ar incorporado, os resultados do ensaio estão apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Teor de ar incorporado



Fonte: Autoria própria (2024).

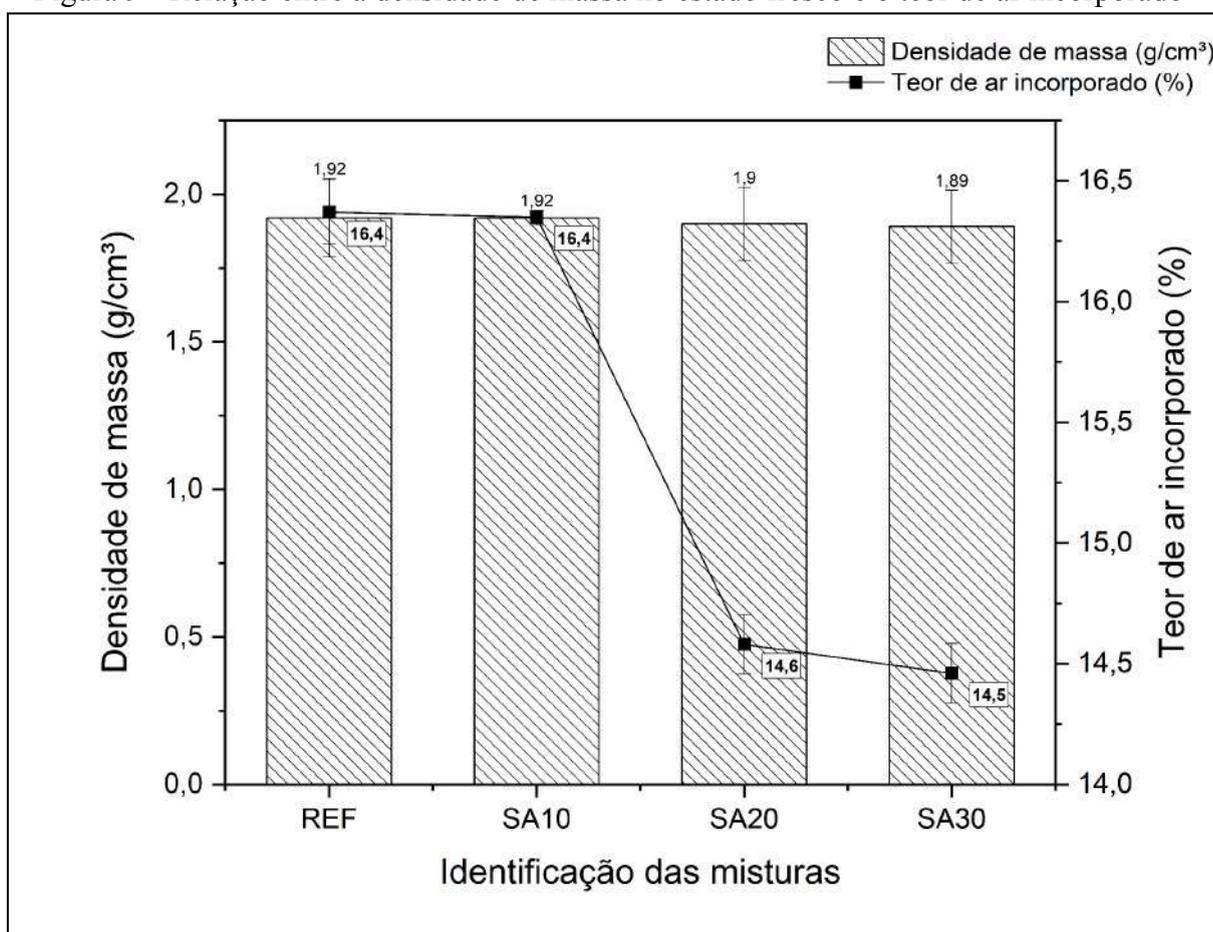
O gráfico da Figura 8 apresenta em seu eixo Y os valores de teor de ar incorporado em ordem crescente para as misturas de argamassa à base de cal no estado fresco. No eixo X, estão apresentadas as misturas estudadas (REF, SA10, SA20 e SA30). Acerca dos resultados, percebe-se que apenas para as misturas SA20 e SA30 houveram reduções nítidas do teor de ar incorporado, que correspondem a 10,93% e 11,67%, respectivamente. Os valores são

condizentes com o ensaio de densidade de massa no estado fresco, uma vez quanto maior a densidade de massa no estado fresco menor é o teor de ar incorporado (Souza, 2023).

5.1.3 Relação entre a densidade de massa e teor de ar incorporado no estado fresco

Na Figura 9 é apresentado o gráfico que relaciona a densidade de massa no estado fresco com o teor de ar incorporado para cada uma das misturas estudadas.

Figura 9 - Relação entre a densidade de massa no estado fresco e o teor de ar incorporado



Fonte: Autoria própria (2024).

Analisando o gráfico da Figura 9, onde no eixo X estão apresentadas as identificações das misturas, no eixo Y à esquerda apresenta em ordem crescente os valores de densidade de massa no estado fresco, enquanto o eixo Y à direita apresenta os valores do teor de ar incorporado para cada uma das misturas, as análises detalhadas desses dados foram previamente abordadas nos tópicos 5.1.1 e 5.1.2 deste capítulo.

Comparando os resultados entre as amostras em estudo, observou-se que o teor de ar incorporado reduziu proporcionalmente as reduções de densidade de massa. No geral, as misturas SA20 e SA30 apresentaram um comportamento semelhante tanto para a análise de densidade quanto para o teor de ar incorporado. Já a amostra SA10 comportou-se semelhante à amostra REF, tendo um declínio de 0,12% acerca da densidade de massa e o mesmo teor de ar incorporado.

O teor de ar incorporado de uma argamassa plástica depende de uma série de fatores, a saber, tipo de misturador, tempo de mistura, fator a/c, granulometria do agregado, viscosidade, velocidade de mistura, tamanho do recipiente de mistura em relação ao misturador, presença de aditivo incorporador de ar, dentre outros (Mansur; Mansur, 2006). Na situação em que nenhum agente é incorporado, os valores obtidos são geralmente muito baixos e praticamente independentes destes fatores.

Desta forma, a semelhança entre os resultados para todas as misturas estudadas pode ser justificada por vários fatores inter-relacionados. Primeiramente, a composição similar das misturas em termos de proporções de cal:areia:água e os baixos percentuais de adições de SA em relação a massa de cal, pode ter contribuído para características físicas e propriedades comparáveis. Além disso, o processo de mistura padronizado adotado para ambas as amostras garante a homogeneidade na distribuição dos materiais constituintes, incluindo a SA.

Nesse contexto, entende-se que o teor de ar incorporado é um parâmetro bastante influente na densidade de massa de argamassas à base de cal hidráulica. Além disso, o teor de ar é responsável por alterações na trabalhabilidade da mistura, pois quanto mais leve for a argamassa, maior a trabalhabilidade e o tempo em que se mantém trabalhável (Cintra; Paiva; Baldo, 2014). Isto possibilita reduzir o esforço durante a sua aplicação resultando em maior produtividade. Porém vale lembrar que o ar incorporado, que corresponde aos vazios formados pela entrada de ar no interior da argamassa, apesar de favorecer a sua trabalhabilidade, prejudica a resistência mecânica final (Mansur; Mansur, 2006). As análises quanto aos resultados do ensaio de índice de consistência realizado almejando-se compreender a trabalhabilidade das misturas em estudo serão abordados no tópico a seguir.

5.2 TRABALHABILIDADE

Na Tabela 23 estão apresentadas as diferentes composições de misturas que apresentam variações distintas nas relações entre água/aglomerante (A/A), A/S e da relação cal/sílica. Essas variações influenciam diretamente as propriedades reológicas e a consistência

das misturas, refletindo-se nos resultados do ensaio de espalhamento, para o intervalo predefinido entre 250 e 265 mm.

Tabela 23 - Composição das misturas estudadas

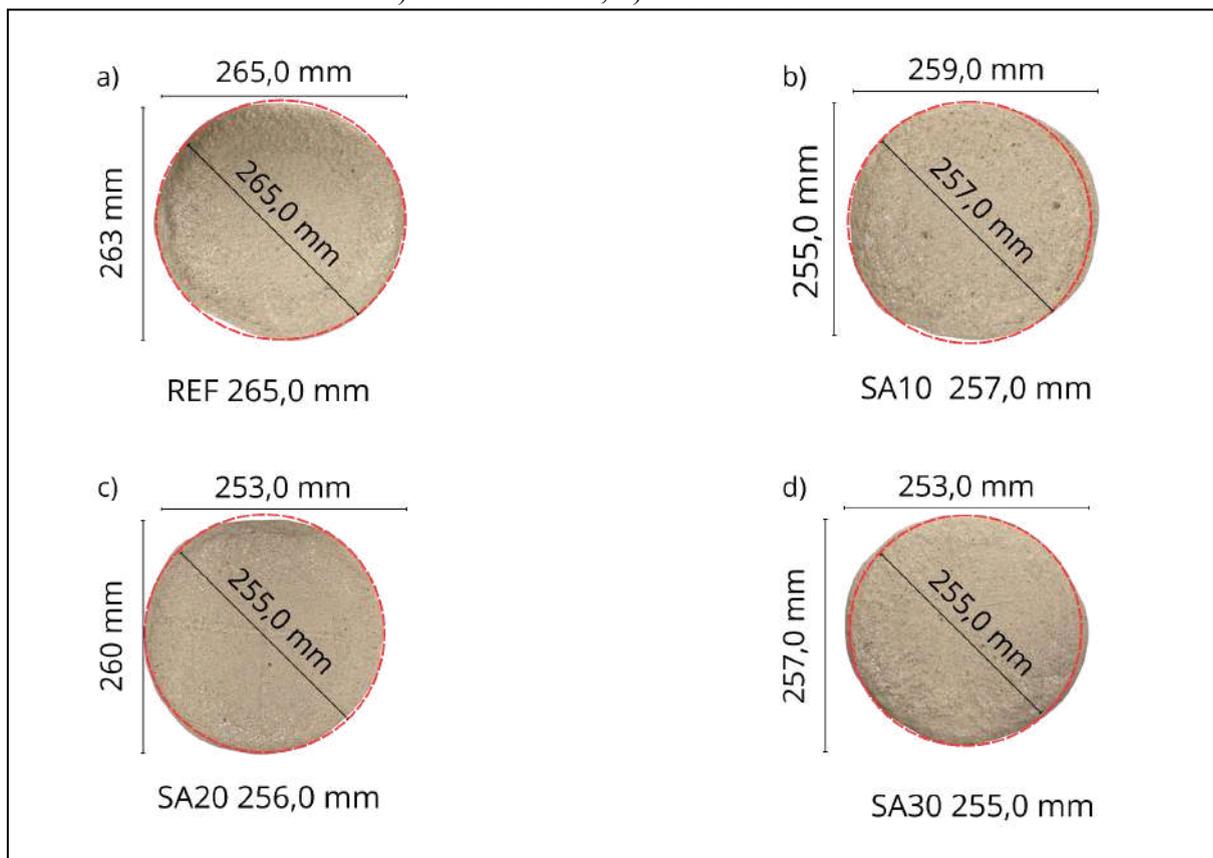
Mistura	Água (g)	A/A	A/S	Ca/Silica
REF	240,0	0,80	0,21	-
SA10	260,0	0,87	0,21	10,0
SA20	270,0	0,90	0,21	5,0
SA30	276,0	0,92	0,21	3,3

Fonte: Autoria própria (2024).

Da Tabela 23 observa-se que a adição de SA nas misturas interfere na quantidade de água necessária para obter-se um espalhamento dentro do intervalo fixado. A mistura REF, com uma relação A/A de 0,80, demonstra uma demanda de 240,0 g de água para atingir uma consistência pré-estabelecida. Em contraste, as misturas SA10, SA20 e SA30, que incorporam diferentes teores de sílica ativa, apresentam aumentos graduais nas relações A/A, exigindo quantidades proporcionais de água para manter a consistência desejada. Essa observação ressalta a influência direta da sílica ativa nas propriedades reológicas das misturas, evidenciando a necessidade de ajustes precisos nas proporções para atender aos requisitos de trabalhabilidade.

A Figura 10 apresenta os resultados obtidos do ensaio de trabalhabilidade das misturas referência e com adição de SA.

Figura 10 - Resultados do ensaio de índice de consistência: a) amostra REF; b) amostra SA10; c) amostra SA20; d) amostra SA30



Fonte: Autoria própria (2024).

A partir da análise da Figura 10, onde estão representadas a medição de três diâmetros ortogonais, para medir o espalhamento médio das misturas, além de círculos em vermelho que foram adicionados para facilitar a compreensão dos aspectos visuais acerca da uniformidade das bordas após o ensaio de trabalhabilidade na mesa de consistência. As misturas foram divididas nas figuras 10a, 10b, 10c e 10d, correspondendo às misturas REF, SA10, SA20 e SA30, respectivamente.

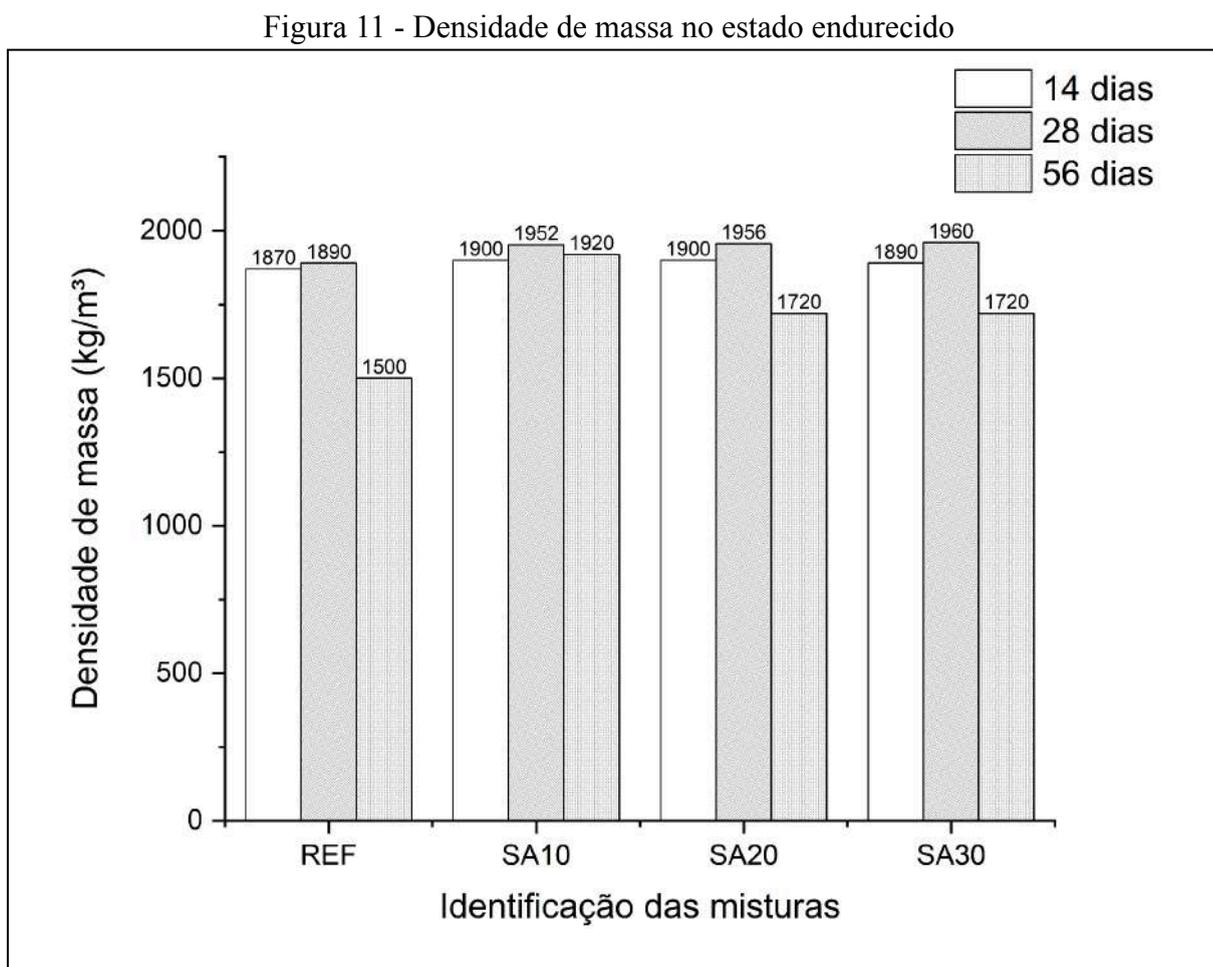
A partir da análise da Figura 10 percebe-se a influência da adição de SA nas misturas, para a relação água/sólidos (A/S) fixada em 0,21. Enquanto a amostra REF atingiu um espalhamento de 265 mm, as misturas com adição de sílica (SA10, SA20, SA30) apresentaram reduções graduais em seus espalhamentos. Os declínios percentuais nos espalhamentos para as misturas com adição foram de 3,02%, 3,40%, e 3,77%, respectivamente. Desta forma, pode-se afirmar que a SA exerce um impacto significativo na quantidade de água necessária para alcançar o espalhamento da amostra de referência.

5.2 DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO ENDURECIDO E TEOR DE AR INCORPORADO

Acerca da análise das propriedades no estado fresco das misturas de argamassa à base de cal, a seção a seguir se aprofundará em três subtópicos específicos: a densidade de massa no estado endurecido, o teor de ar incorporado e a relação entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado, buscando compreender como esses dois fatores se inter-relacionam e influenciam o comportamento das argamassas no estado endurecido.

5.2.1 Densidade de massa no estado endurecido

A Figura 11 apresenta a densidade de massa das argamassas aos 14, 28 e 56 dias de cura no estado endurecido.



Fonte: Autoria própria (2024).

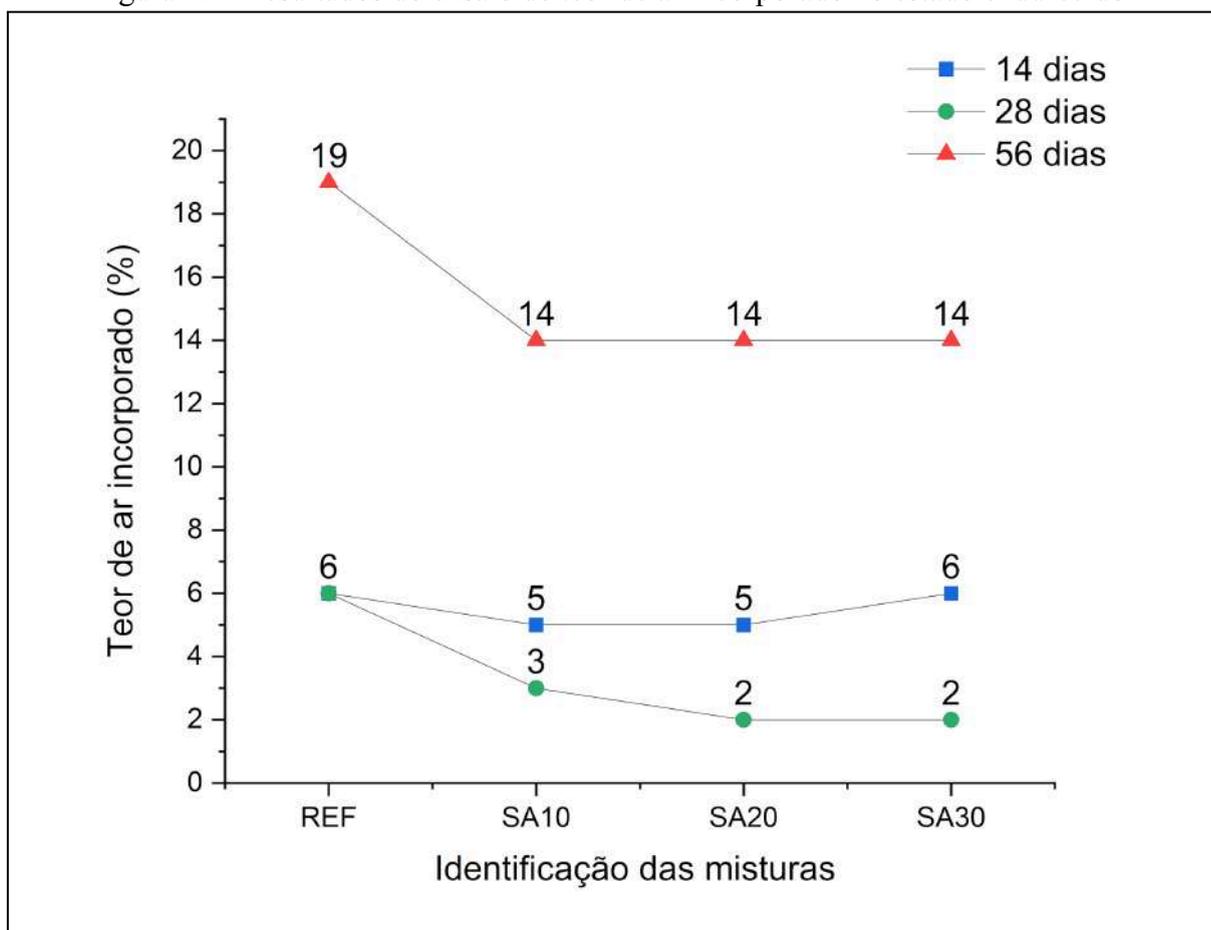
O gráfico da Figura 11 apresenta em seu eixo Y os valores de densidade de massa no estado endurecido em ordem crescente para as misturas de argamassa à base de cal apresentadas no eixo X. A distinção das idades de cura foi realizada por meio das hachuras identificadas no canto superior direito do gráfico. Analisando os resultados, percebe-se que para a idade de 14 dias de cura, observou-se leves aumentos de densidade, correspondente a 1,58% para as misturas SA10 e SA20, já para a mistura SA30 o aumento foi de 1,07%. Aos 28 dias de cura, as misturas continuaram a aumentar os valores de densidade de massa, os aumentos foram de 3,28%; 3,49% e 3,70%, correspondentes às misturas AS10, AS20 e AS30, respectivamente. Estes resultados justificam-se pelo efeito filler das partículas finas da SA, que propiciaram um maior empacotamento, preenchendo os vazios da mistura aglomerante/agregado.

Mattos (2018) já abordou essa questão ao afirmar que o aumento nos valores de densidade em argamassas com adições pozolânicas ocorre devido ao aumento no teor de finos, resultando em um maior grau de empacotamento nas argamassas. Segundo Magalhães (2018), a densidade de massa é um indicativo da compacidade do conjunto da mistura agregado/aglomerante.

5.2.2 Teor de ar incorporado no estado endurecido

A Figura 12 apresenta a densidade de massa das argamassas aos 14, 28 e 56 dias de cura no estado endurecido.

Figura 12 - Resultados do ensaio de teor de ar incorporado no estado endurecido



Fonte: Autoria própria (2024).

O gráfico da Figura 12 apresenta em seu eixo Y os valores dos teores de ar incorporado no estado endurecido em ordem crescente para as misturas de argamassa à base de cal apresentadas no eixo X. A distinção das idades de cura foi realizada por meio das hachuras identificadas no canto superior direito do gráfico. É interessante observar que, em geral, as misturas mantêm baixos valores ao longo do período de cura, aos 14 dias de cura houveram declínios para as misturas SA10 e SA20 correspondente a 16,6%, a mistura SA30 manteve o mesmo percentual que a amostra REF (6,0%), não apresentando declínios ou aumento no teor de ar incorporado, indicando uma boa compactação da mistura.

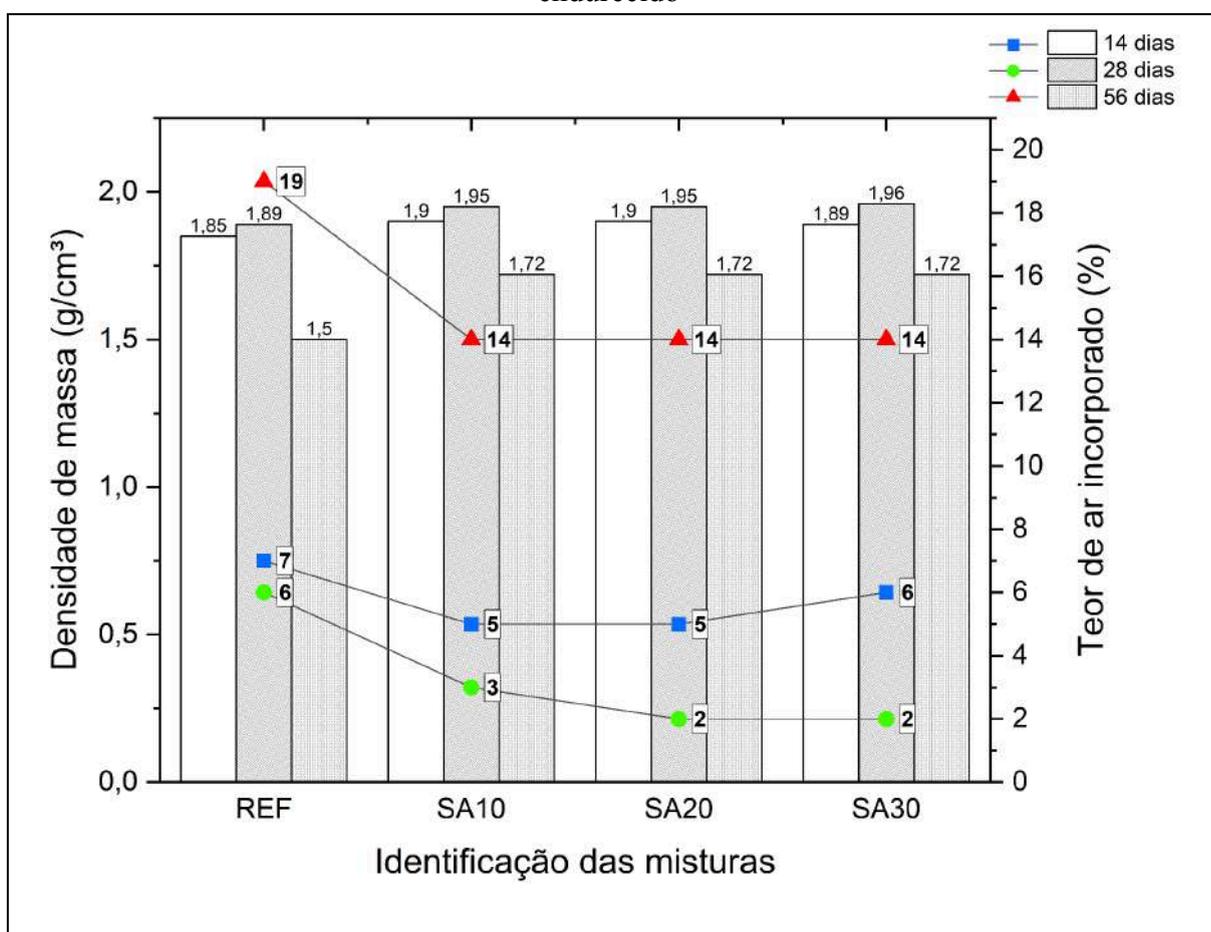
Já aos 28 dias de cura, todas as misturas apresentaram declínios, correspondentes a 50% para a mistura SA10 e 66,67% para as misturas SA20 e SA30. Entretanto, o teor de ar incorporado tende a aumentar ligeiramente aos 56 dias, cerca de 26,32% para todas as misturas contendo sílica, o que pode sugerir um ajuste na microestrutura da mistura durante o processo de cura. Esse aumento pode estar relacionado a evaporação da água em excesso e, a processos de carbonatação devido à evolução das propriedades da argamassa, onde ocorre o

consumo do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ devido a interação com o CO_2 presente no ar, resultando no endurecimento da mistura e, eventuais reações pozolânicas devido a presença de sílica.

5.2.3 Relação entre a densidade de massa e teor de ar incorporado

Na Figura 13 é apresentado o gráfico que relaciona a densidade de massa no estado fresco com o teor de ar incorporado para cada uma das misturas estudadas.

Figura 13 - Relação entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado no estado endurecido



Fonte: Autoria própria (2024).

Analisando o gráfico da Figura 13, onde no eixo X estão apresentadas as identificações das misturas, no eixo Y à esquerda apresenta em ordem crescente os valores de densidade de massa no estado endurecido, enquanto o eixo Y à direita apresenta os valores do teor de ar incorporado para cada uma das misturas no estado endurecido. A distinção das idades foi feita por meio de hachuras para os resultados de densidade de massa, e por curvas

para os resultados de teores de ar incorporado, ambos identificados no canto superior direito do gráfico. As análises detalhadas desses dados foram previamente abordadas nos tópicos 5.2.1 e 5.2.2 deste capítulo.

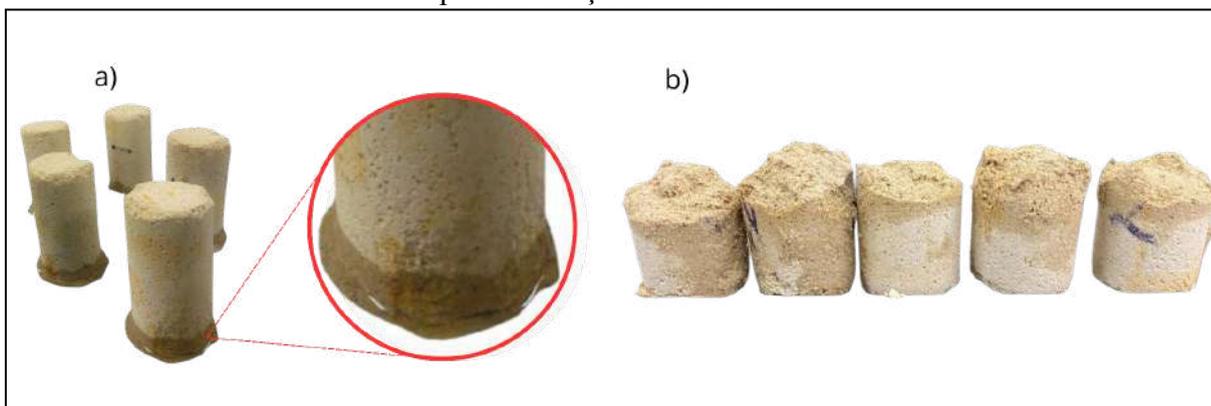
A análise conjunta dos resultados obtidos nos tópicos 5.2.1 e 5.2.2 revela uma relação significativa entre a densidade de massa no estado endurecido e o teor de ar incorporado das argamassas à base de cal. Ao longo do período de cura, observou-se um aumento gradual na densidade de massa para todas as misturas, indicando uma maior compacidade na estrutura aglomerante/agregado. Esse fenômeno pode ser atribuído ao efeito filler das partículas finas de sílica ativa, que promovem um maior empacotamento e preenchimento dos vazios na mistura (Romano *et al.*, 2008). Essa tendência é corroborada pela abordagem de Mattos (2018), que destacou o aumento na densidade em argamassas com adições pozolânicas devido ao incremento no teor de finos.

Paralelamente, a análise do teor de ar incorporado revelou padrões interessantes ao longo do processo de cura. Aos 14 dias, observou-se uma diminuição significativa nos teores de ar incorporado para as misturas SA10 e SA20, sugerindo uma boa compactação da mistura. Contudo, SA30 manteve-se estável, indicando uma dinâmica específica para essa composição. Aos 28 dias, todas as misturas apresentaram declínios nos teores de ar incorporado, evidenciando uma tendência de maior compactação e menor presença de vazios na estrutura. Aos 56 dias, houve um ligeiro aumento nos teores de ar incorporado para todas as misturas contendo sílica, sugerindo possíveis ajustes nas características da mistura durante o processo de cura, relacionados à evaporação da água em excesso, processos de carbonatação e reações pozolânicas devido à presença de sílica. Essa complexidade nos resultados ressalta a interação dinâmica entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado, indicando a necessidade de uma abordagem holística na interpretação das propriedades das argamassas.

5.3 COEFICIENTE DE CAPILARIDADE

Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade revelaram uma resposta atípica por parte das misturas em estudo. Durante o processo, observou-se uma significativa perda de seção nos corpos de prova da amostra de referência, apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Ensaio de absorção de água por capilaridade a) perda de seção em 10 min; b) perda de seção em 90 min



Fonte: Autoria própria (2024).

A perda de seção observada na Figura 14a ocorreu nos primeiros 10 min de ensaio, ao final do ensaio, passados 90 min houve uma perda significativa de material, apresentada na Figura 14b, atribuída à baixa hidraulicidade, ou seja, os corpos de prova não apresentaram resistência à água. Essa resposta inesperada impossibilitou a obtenção de conclusões definitivas quanto à eficácia da mistura, destacando a necessidade de investigações adicionais para compreender os desafios enfrentados durante o ensaio. As observações da perda de seção nos corpos de prova durante os ensaios suscitam diversas considerações relevantes para a compreensão do desempenho da mistura em estudo. A análise das hipóteses a seguir busca elucidar os fatores contribuintes para esse fenômeno.

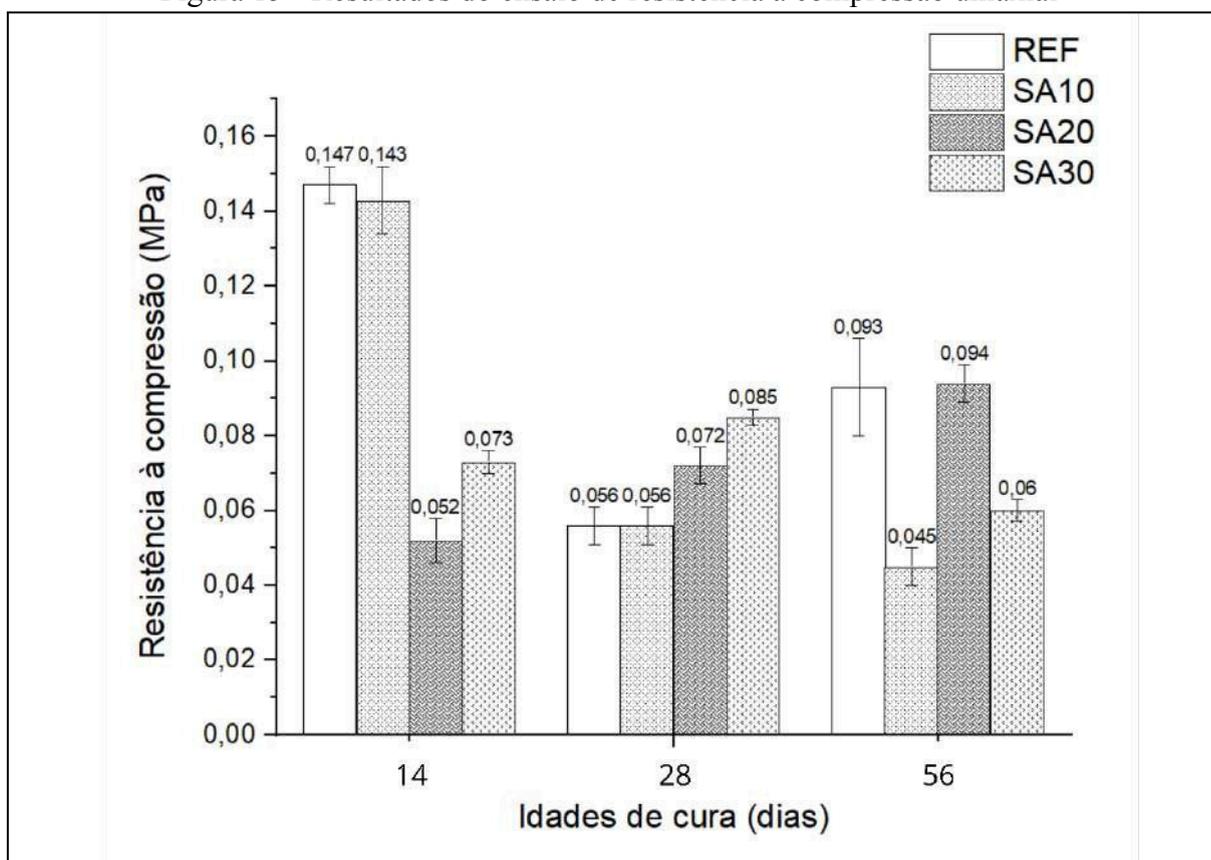
- a) Influência da composição da mistura: A presença de cal hidráulica na mistura, característica da amostra de referência, levanta questões sobre sua contribuição para a resistência à água. Como bem documentado na literatura, misturas à base de cal frequentemente apresentam baixa hidraulicidade, resultando em menor resistência à água. Esta característica pode ser um fator significativo na perda de seção observada.
- b) Efeito da adição gradual de sílica: Notavelmente, as amostras com adição de sílica em diferentes percentuais, mesmo com percentuais relativamente baixos (10%, 20% e 30%), não demonstraram resistência satisfatória à água. Isso sugere a necessidade de investigar se as proporções de sílica adicionadas foram insuficientes para conferir hidraulicidade ao conjunto. Desta forma, a quantidade de sílica pode ter sido insuficiente, especialmente evidenciada pela menor perda de seção na mistura com 30%, destaca a complexidade na formulação da mistura. Essa observação levanta

questões sobre a eficácia da sílica em proporcionar hidráulicidade, indicando a necessidade de otimização nas proporções utilizadas.

5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

Os resultados apresentados de forma gráfica na Figura 15 revelam os resultados das resistências à compressão para cada uma das misturas em estudo.

Figura 15 - Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial



Fonte: Autoria própria (2024).

O gráfico da Figura 15 apresenta em seu eixo Y os valores de resistência à compressão uniaxial em ordem crescente para as misturas de argamassa à base de cal apresentadas no canto superior direito do gráfico. No eixo X encontram-se a distinção das idades de cura. A partir da análise da Figura 15, torna-se evidente que os resultados obtidos refletem alterações na resistência das argamassas com adição, conforme a porcentagem de SA aumenta em comparação com a argamassa de referência. O ensaio de resistência à compressão uniaxial revelam uma dinâmica intrigante nas propriedades mecânicas das misturas ao longo do tempo de cura. Percebe-se que as maiores resistências à compressão uniaxial ocorreram nas amostras

REF e SA10, com 0% de SA (0,147 MPa) e com 10% de SA (0,143 MPa), ambos aos 14 dias de cura. Já para as amostras SA20 e SA30 esses valores foram respectivamente iguais a 0,052 MPa e 0,073 MPa.

De acordo com a Tabela 25, a composição SA10, os declínios da resistência à compressão foram 2,672% aos 14 dias, 0,53% aos 28 dias e 51,61% aos 56 dias de cura. Os resultados para a mistura SA20 revelou uma redução significativa para a idade de 14 dias correspondente a 64,61%, já para as idades de cura de 28 e 56 dias, houve um aumento de 28,57% e 1,07% respectivamente. Para o traço SA30, houve um aumento de resistência de 51,78% aos 28 dias de cura, para as idade de 14 e 56 dias, houveram reduções correspondentes a 50,46% e 35,48% respectivamente. Podendo a baixa resistência mecânica ser justificada por uma eventual contaminação do aglomerante utilizado, tendo em vista que a composição e qualidade dos materiais empregados desempenham um papel crucial na resistência da argamassa.

Contudo, os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão uniaxial não seguiram um padrão linear. Nesse contexto, faz-se necessário uma análise de significância dos resultados. Para isso, foi realizada a análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados da variância para a resistência à compressão de diferentes misturas

Análise linear - Resistência à compressão uniaxial aos 14 dias de cura					
Fonte	*GL	**SQ	***QM	Valor-F	Valor-P
Mistura	2	0,017794	0,008897	220,28	0,000
Erro	9	0,000363	0,000040		
Total	11	0,018157			
Análise linear - Resistência à compressão uniaxial aos 28 dias de cura					
Fonte	*GL	**SQ	***QM	Valor-F	Valor-P
Mistura	2	0,000003	0,000003	0,19	0,678
Erro	9	0,000090	0,000015		
Total	11	0,000093			
Análise linear - Resistência à compressão uniaxial aos 56 dias de cura					
Fonte	*GL	**SQ	***QM	Valor-F	Valor-P
Mistura	2	0,004378	0,002189	114,51	0,000
Erro	9	0,00172	0,000019		
Total	11	0,04550			

*Graus de liberdade; **Soma dos quadrados; ***Quadrado médio

Fonte: Autoria própria (2024).

Em relação a análise de variância (ANOVA) tanto para as amostras aos 14 dias de cura quanto para 56, foi possível identificar um Valor-P igual a 0, isso revela que as diferenças de porcentagens de SA utilizadas são significativas e devem ser levadas em consideração na análise da resistência à compressão uniaxial das amostras. Já para análise aos 28 dias de cura o Valor-p foi igual a 0,687, esse valor foi maior que 0,05 (5%).

Assim, pode-se afirmar que o fator adição de SA não possui influência no valor da resistência à compressão das misturas analisadas. Isso pode ser justificado pela natureza do processo de cura ao longo do tempo, onde a adição de SA impacta mais evidente nas fases iniciais e finais do desenvolvimento das amostras. Essa variação nos resultados ressalta a importância de avaliar diferentes intervalos de tempo durante a análise de resistência à compressão uniaxial.

Quanto aos critérios de aceitação da mistura, é relevante observar que a norma brasileira NBR 13281-1, que trata dos requisitos e métodos de ensaios para argamassas orgânicas de revestimento de paredes e tetos (ABNT, 2023), não inclui o ensaio de resistência à compressão como um requisito para classificação das argamassas destinadas a revestimentos de paredes. Essa ausência de requisitos específicos relacionados à resistência mecânica destaca a importância de considerar outros parâmetros para avaliar a adequação das argamassas para esse fim, tendo em vista que as argamassas de cal destinadas a paredes de edifícios devem ser similares ou o mais próximas possível das antigas, e cumprir determinadas características químicas, físicas e mecânicas. Ademais, a normativa não estabelece os tipos de aplicações para os quais os requisitos se aplicam, levantando questões sobre se os critérios se estendem às alvenarias antigas.

Sob essa conjuntura, buscou-se os requisitos estabelecidos no âmbito de estudos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Portugal, para aplicação de argamassas à base cal em paredes de edifícios antigos. Diante das respostas obtidas no ensaio de resistência à compressão uniaxial, pode-se afirmar que todos os resultados ficaram abaixo do mínimo estabelecido pelo LNEC, os valores limites de resistência à compressão variam de 0,4 MPa a 2,5 MPa, tanto para revestimento interior quanto exterior (Veiga; Carvalho, 2002). A constatação de que as misturas não atingiram esses patamares mínimos sugere a necessidade de ajustes substanciais para adequação às normativas do LNEC, ressaltando a importância de considerações adicionais na formulação das argamassas para garantir conformidade com os requisitos de aplicação em edifícios históricos.

6 CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho centraram-se, essencialmente, em contribuir para um maior conhecimento das propriedades de argamassas de cal e, na influência da adição de sílica ativa em razão da massa de cal. Assim, a caracterização das argamassas estudadas procurou avaliar a possibilidade da formulação de uma mistura adequada para o restauro de revestimentos externos de prédios históricos, de acordo com o estudo realizado, é possível destacar as seguintes conclusões:

- a) Acerca da análise dos resultados das misturas no estado fresco, observou-se que as argamassas com SA necessitaram de maiores quantidades de água em comparação com a argamassa de referência para atingir a mesma consistência (250 a 265 mm). Dessa forma, pode-se afirmar que a adição de sílica, embora em pequenos percentuais, impactou na trabalhabilidade das misturas, exigindo pequenos ajustes na relação água/materiais secos para garantir a consistência desejada;
- b) As argamassas contendo SA apresentaram maior densidade e compacidade pela ação dos finos da sílica. É possível notar um aumento superficial na densidade aos 28 dias de cura para as misturas com sílica, seguido por uma diminuição aos 56 dias, assim como o teor de ar incorporado, que manteve-se em baixos percentuais nas primeiras idades de cura e aumentou ligeiramente aos 56 dias. Esse comportamento pode ser atribuído a diversos fatores, como a reação pozolânica da sílica ativa ao longo do tempo, influenciando nas propriedades da mistura;
- c) A análise dos resultados das misturas no estado endurecido, revelou cenários distintos em relação à resistência mecânica. No geral, as argamassas com adição de sílica apresentaram uma perda considerável na resistência. O melhor resultado foi para amostra SA20, que apresentou um ganho de resistência de 1,07%, no entanto, os requisitos mínimos para aplicação em restauro não foram alcançados;
- d) Os resultados das misturas de argamassa à base de cal demonstraram um desempenho inferior em comparação com os padrões estabelecidos pela literatura. Essa discrepância sugere a necessidade de uma análise mais aprofundada das variáveis envolvidas no processo de fabricação das misturas, bem como uma investigação mais detalhada sobre as propriedades dos materiais utilizados;

- e) A comparação dos resultados revela que todas as misturas encontram-se abaixo dos valores mínimos considerados aceitáveis pelo LNEC para aplicação no restauro de revestimentos históricos;
- f) No que se refere à absorção de água por capilaridade, observou-se na amostra REF uma leve perda de seção ao final dos primeiros 10 minutos do ensaio. Ao término do ensaio, passando-se 90 minutos, ocorreu uma perda significativa de material, atribuída à baixa hidraulicidade da amostra. Essa observação destaca a importância de abordagens específicas para aprimorar a compreensão da hidraulicidade nas argamassas à base de cal, visando prevenir perdas de material em cenários semelhantes. Dada a característica desse tipo de argamassa, com a presença predominante de poros grandes, responsáveis pela rápida absorção, é crucial não apenas avaliar a taxa de absorção (aos 10 e 90 minutos), determinada pelo coeficiente de capilaridade, mas também analisar a quantidade total de água absorvida pela argamassa ao longo de um período condizente com as características do material ensaiado. Isso contribuirá para uma compreensão abrangente do comportamento hidráulico da argamassa, permitindo a aplicação de estratégias mais eficazes na prevenção de perdas de material e na otimização do desempenho do ensaio.

Ao término da análise experimental, evidenciou-se que, contrariamente às expectativas, os resultados obtidos neste estudo não atingiram os padrões desejados. Em particular, as misturas de argamassa à base de cal demonstraram um desempenho insatisfatório quando comparadas à literatura e às normas estabelecidas. A baixa resistência mecânica das misturas evidenciada nos ensaios de resistência à compressão uniaxial, indica uma vulnerabilidade significativa desses compósitos. A incapacidade de atingir níveis aceitáveis de resistência compromete diretamente a aplicabilidade dessas argamassas em aplicações estruturais e de restauro, onde a capacidade de suportar cargas e resistir a forças compressivas é essencial. A ausência de hidraulicidade nessas composições comprometeu a resistência à água, apresentando um desafio substancial para aplicações em restauração de revestimentos externos de edificações históricas. Esses resultados apontam para a necessidade premente de reavaliar e ajustar a formulação das misturas, explorando diferentes proporções de sílica ou mesmo considerando adições e aditivos complementares para fortalecer as propriedades mecânicas. As limitações encontradas representam um desafio crítico a ser superado para viabilizar o uso efetivo dessas argamassas em contextos de conservação e restauração.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Analisar detalhadamente a composição química e mineralógica dos materiais utilizados, a fim de comparar os resultados com o catálogo dos fabricantes dos materiais;
- b) Testar uma variação mais abrangente dos percentuais de sílica, ampliando o escopo da pesquisa para abranger uma variedade mais extensa de percentuais de sílica permitindo identificar padrões relacionados à quantidade de sílica e suas implicações nas propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas;
- c) Avaliar a influência da variação de condições de cura, como variações de umidade e temperatura, implicando em uma análise abrangente do desempenho a longo prazo das argamassas, especialmente em contextos de diferentes regiões climáticas;
- d) Explorar o comportamento das argamassas em aplicações específicas, como protótipos de revestimentos externos;
- e) Analisar a resistência das misturas ao ataque de sulfatos e cloretos, fornecendo diretrizes mais específicas para sua aplicabilidade prática;
- f) Utilização de diferentes materiais pozolânicos na composição de argamassas à base de cal voltadas ao restauro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, P. C. R. A. **Uso de pozolanas como material cimentício suplementares:** disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais. 2019. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

ALMEIDA, J. C. **Caracterização de argamassas históricas:** estudo de caso no mercado público no município de Jardim de Piranhas/rn. 2019. 51 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2019.

ALVES, P. A. **Análise da resistência à tração em argamassas de revestimento: uma revisão da literatura.** 2019. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2019.

AMARAL, M; MACIOSKI, G; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica da sílica ativa: análise em pastas cimentícias com diferentes teores de substituição. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 1-17, nov. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13023>.

American Society for Testing and Materials - ASTM, C. 1069, Standard Test Method for Specific Surface Area of Alumina or Quartz by Nitrogen Adsorption. 2014.

ARIZZI, A; CULTRONE, G. Comparing the pozzolanic activity of aerial lime mortars made with metakaolin and fluid catalytic cracking catalyst residue: A petrographic and physicalmechanical study. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 184, p. 382–390, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 13276:** Argamassa para revestimento de paredes e tetos –Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

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

_____. **NBR 13281-2:** Argamassa inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaio – Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro, 2023.

_____. **NBR 13956-3:** Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 3: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13956-4:** Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 4: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 13956:** Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 16972:** Agregados -Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **NBR 9776:** Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR NM 24:** Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 26:** Amostragem de agregados. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 27:** Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

AZEREDO, A. F. N. DE; STRUBLE, L. J.; CARNEIRO, A. M. P. Microstructural characteristics of lime-pozzolan pastes made from kaolin production wastes. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [S.L.], v. 48, n. 7, p. 2123–2132, 2015.

AZEVÊDO, A. L. C de. **Estabilização de solos com adição de cal:** um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BARBOSA, M. T *et al.* Lime-based mortars with added silica fume and bioproducts for restoration and preservation of heritage buildings. **Journal Of Building Pathology And Rehabilitation**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1-9, 10 mai 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41024-023-00283-5>.

BAUER, E *et al.* Degradação de fachadas revestidas em argamassas nos edifícios de Brasília, Brasil. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 23-43, out. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000400557>.

BAUER, E *et al.* Friction Influence between Particles in the Behavior of Flow of Lime-Rendering Mortars. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.L.], v. 27, p. 1–9, 2015.

BAUER, E *et al.* Relative importance of pathologies in the severity of facade degradation. **Journal Of Building Pathology And Rehabilitation**, [S.L.], v. 5, n. 1, 7 jan. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41024-020-0072-6>.

BERSH, J. D *et al.* Contribuição à análise de pastas de cal hidráulica e cal hidratada para reparos em revestimentos de fachadas de edificações históricas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES, 17., 2021, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2021. p. 763-770.

BERTEQUINI, A. B. T; MACHI, I. da S; DONÁ, W. Estudo de resistência à compressão do concreto reforçado com adição de sílica ativa. **Revista Engenharia em Ação**, Araçatuba, v. 4, n. 2, p. 18-34, dez. 2019.

BOMEDIANO, K. S; GOMES, C. E. M; FONTANINI, P. S. P. Propriedades da argamassa modificada com polímeros dispersíveis de etileno-acetato de vinila (EVA). **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 419-429, jul. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000300437>.

BRAZ, J. P. M. **Interface de argamassa de cal com suporte de pedra e tijolo maciço**. 2021. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Reabilitação de Edifício, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2021.

BREITENBACH, S. B *et al.* Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal. **Cerâmica**, [S.L.], v. 63, n. 367, p. 395-401, set. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633672182>.

BRITO, L. F. de M *et al.* Análise Técnica das Edificações Históricas. In: FARIAS, F. DE C.; SILVA, J. P. DA; MACIEL, P. DE S. (Org.). **Entre a Forma e a Memória: Análise e Mapeamento do Patrimônio Edificado da Cidade de Patos, Paraíba**. Curitiba: Appris, 2021. p. 88-122.

Disponível em:
<https://www.editoraappris.com.br/produto/5974-entre-a-forma-e-a-memria-anlise-e-mapeamento-do-patrimnio-edificado-da-cidade-de-patos-paraba>. Acesso em: 12 jul. 2023.

CAMPOS, M. A *et al.* Utilização de filler cerâmico e sílica ativa na composição de argamassa com baixo teor de cimento. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 5, n. 7, p. 9876-9890, 2019. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv5n7-160>.

CAPELIN, L. J *et al.* Avaliação dos efeitos da fibra de coco e da micro celulose cristalina nas propriedades de argamassas cimentícias. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 1-17, ago. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0876>.

CERETTA, C. C *et al.* Argamassa de cal em alvenaria: um exemplo de aplicação. In: XXVII SIMPÓSIO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 24., 2022, Santa Maria. **Anais [...]**. [S.L.]: Ufn, 2022. p. 1-8.

CINCOTTO, M. A; QUARCIONI, V. A; JOHN, V. M. (2007). Cal na construção civil. In: Geraldo C Isaia. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, v.1, 695-726.

CINTRA, C. L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus - Propriedades relevantes. **Cerâmica**, [S.L.], v. 60, n. 353, p. 69-76, mar. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132014000100010>.

CORDEIRO, G. C; TOLEDO FILHO, R. D; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, [S.L.], v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422009000100016>.

CORDEIRO, G. C *et al.* Ultrafine Grinding of Sugarcane Bagasse Ash for Application as Pozzolanic Admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 110-115, 2009.

COSTA, A. T. S. **Propriedades mecânicas de argamassas para revestimentos com incorporação de fibra de Carnaúba**. 2019. 49 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2019.

COUTINHO, J. S. **Materiais de construção 2**. Parte 1 - Ligantes e caldas. Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2002.

CRUZ, M. D. S. **Caracterização de argamassas históricas: estudo de caso do hospital do Tororó de Currais Novos/RN**. 2019. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2019.

DUARTE, L. G. **Avaliação da atividade pozolânica de resíduos agroindustriais em suspensões cal: resíduo**. 2022. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2022.

DINIZ, L. R. N. **Argamassa térmica contendo vermiculita: uma revisão sistemática sobre suas propriedades nos estados frescos e endurecidos**. 2020. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

Dow Corning Brasil. **Ciência e Sustentabilidade**. Dow Brasil, 2014.

DUVAL, R; KADRI, E. H. Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 28, n. 4, p. 533-547, abr. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(98\)00010-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(98)00010-6).

EBRAHIMI, M *et al.* Effect of ceramic waste powder as a binder replacement on the properties of cement- and lime-based mortars. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 379, p. 1-15, mai 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131146>.

FARIA FILHO, M. M de. **Substituição da cal hidratada por dregs, resíduo da indústria de celulose, na confecção de argamassas de múltiplo uso**. 2022. 108 f. Dissertação (Mestrado)

- Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2022.

FAJARDO, A. A *et al.* Estudo de argamassas estruturais com adição de sílica ativa proveniente de resíduos siderúrgicos dosada por empacotamento de partículas. In: ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO: CIRCULARIDADE E SUSTENTABILIDADE, 8., 2023, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** . Foz do Iguaçu: Enarc, 2023. p. 1-7.

FESTA, L. V. **Estudo de caso:** análise de revitalização de fachada em revestimento de argamassa. 2022. 122 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,, Porto Alegre, 2022.

FRAGA, Y. S. B *et al.* Efeito da ultrasonicação da sílica ativa e da nanossílica coloidal em pastas de cimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 25, n. 4, p. 1-16, out. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1147>.

FRAGA, Y. S. B; SOARES, L. M. G; CAPUZZO, V. M. S. Influência da densificação da sílica ativa nas propriedades de materiais cimentícios. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 229-242, set. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000300548>.

FREITAS, T. O. G. **Efeito do pó de vidro na mitigação da reação álcali-sílica de compósitos cimentícios de alto desempenho.** 2019. 151 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

GARIJO, L *et al.* Age effect on the mechanical properties of natural hydraulic and aerial lime mortars. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 236, p. 1-12, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117573>.

GIORDANI, C; MASUERO, A. B. Blended mortars: Influence of the constituents and proportioning in the fresh state. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 210, p. 574–587, 2019.

GONZAGA, N. L. **Aprimoramento de um método acelerado para avaliação da pozolanicidade de materiais cimentícios suplementares com base na NBR 5751/2015.** 2022. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

HUGHES, J. J; LINDQVIST, J. E. Repair mortars for historic masonry: the role of mortar in masonry: an introduction to requirements for the design of repair mortars. **Materials and Structures**, [S.L.], v. 45, n. 9, p. 1287–1294, 2012.

KANAN, M. I. **Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimentos à base de cal.** Brasília, DF: 172 p. Iphan / Programa Monumenta, 2008.

KNOB, G. P. L; BELLEI, P; BARBISAN, A. O. Viabilidade técnica da utilização do resíduo da construção civil para a produção de argamassa de revestimento. **Anais da Engenharia Civil/2595-1823**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 116-135, 2019.

LEA, F. M. The chemistry of pozzolanas. In: SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENTS, 1938, Stockholm, **Anais [...]** . Stockholm 1938. p. 460.

LIBERALINO, V. P. S. L *et al.* Avaliação da absorção por capilaridade em argamassas de revestimento com adição de sílica ativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 62., 2020, Florianópolis. **Anais [...]** . Florianópolis: Ibracon, 2020. p. 1-15.

LIMA, I. N. F de. **Caracterização in situ de rebocos de cais expostos a envelhecimento natural.** 2021. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica, 2021.

LIMA, K. P. B. A *et al.* Método alternativo para a determinação da consistência em argamassas de revestimento. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 1-11, 20 maio 2023. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i5.41715>.

LOUREIRO, A. M. S. **Argamassas históricas de Belém do Pará.** 2019. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geoquímica e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

MAGALHÃES, A. C. A. **Argamassa de cal com adições pozolânicas. Contribuição para o desenvolvimento de formulações para o restauro.** 2018. 312 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, A Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

MAGALHÃES, A. C; MUÑOZ, R. Avaliação da resistência aos sais de argamassas de cal com adições minerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 13., 2019, Goiânia. **Anais [...]** . Goiânia: Antac, 2019. p. 554-561.

MANSUR, A. A. P.; MANSUR, H. S. Avaliação do teor de ar incorporado em argamassas modificadas com poli (álcool vinílico). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., Foz do Iguaçu, 2006. **Anais [...]** Foz do Iguaçu, 2006.

MARTINS, E. J. **Procedimento para dosagem de pastas para argamassa autonivelante.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

MATTOS, F. C de. **Análise da influência da pozolana metacaulim no desempenho de argamassas de cal destinadas ao restauro de revestimentos externos de prédios históricos.** 2018. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

MATTOS, F. C; GONÇALVES, M. R. F. Argamassas de cal e metacaulim: influência das condições de cura. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 1-10, mai 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0857>.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: microstructure, properties, and materials. New York: **McGraw-Hill Education.** 2014.

NEŽERKA, V *et al.* Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v. 64, p. 17–29, 2014.

NOGUEIRA, A. V; LOPES, D. O. **Estudo da análise de comparação da sílica ativa e metacaulim no tratamento de agregado graúdo de concreto reciclado** – Para região de Anápolis. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 70p. 2021.

OBRZUT, L; MEDEIROS, A; LUSO, E. Caracterização experimental de argamassas de substituição à base de cal submetidas ao envelhecimento natural e artificial. In: CBPTA 2020. CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIAS DAS CONSTRUÇÕES, 4., 2020, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: Alconpat, 2020. p. 1-12.

OLIVEIRA, A. M; SANTOS, M. A dos; OLIVEIRA, A. P de. Um estudo da perspectiva do uso de resíduo industrial de silício como adição mineral em matrizes cimentícias: origem, processamento e propriedades. **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis**, Petrópolis, v. 15, n. 1, p. 103-119, ago. 2021.

OLIVEIRA, S *et al.* Estudo da adição de fibras de máscaras faciais N95, sílica ativa e pó de mármore em argamassa de alto desempenho. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 1-11, abr. 2023. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2023-0042>.

PERIN, L. **Avaliação de argamassas de revestimento contendo diferentes teores de aditivo incorporador de utilizados em substituição à cal**. 2018. 85 f. TCC - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2018.

PINHO, N. M. P. **Reabilitação de revestimentos à base de cal em fachadas de edifícios antigos**. 2023. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Reabilitação de Edifícios, no Ramo Não Estrutural, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2023.

PONTES, I. C; CAMPOS, L. F. A; DUTRA, R. P. S. Efeitos da adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades de argamassas cimentícias. **Cerâmica Industrial**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 1-8, 2022. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2022.006>.

RODRIGUES, G. S. **Análise da influência do vidro moído em propriedades físico mecânicas de uma argamassa de revestimento**. 2019. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade Maria Milza, - Governador Mangabeira, 2019.

ROMANO, R. C. O *et al.* Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa. **Cerâmica**, [S.L.], v. 54, n. 332, p. 456-461, dez. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132008000400011.7>.

SALES, L. P. B. **Influência do cloreto de cálcio nas propriedades reológicas de pastas de cal com adições pozolânicas**. 2022. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

SANTOS, A. M; SILVA, Â. J. C; MOTA, J. M. F. Influência da Adição de Cal Hidratada na Aderência do Preparo da Base Chapisco e Argamassa para Revestimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 1-15, mar. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13039>.

SANTOS, E. C *et al.* Caracterização das argamassas históricas de revestimento do cemitério em Francisco Santos - PI. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 9, p. 68969-68982, 2020. **Brazilian Journal of Development**. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n9-370>.

SCHILLER, A. P. S; ROCHA, L. A. L. Análise bibliográfica do uso de resíduos de construção e demolição em argamassa de restauração: Caçador. **Ignis**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 13-23, abr. 2019.

SEABRA, M. P *et al.* Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 1147–1153, 2009.

SILVA, D. N. **Caracterização do arisco**: análise de propriedades físicas para verificação de possibilidades de aplicação em argamassas. 2021. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universitário Christus, Fortaleza, 2021.

SIQUEIRA JÚNIOR, S. F de. **Estudo exploratório de propriedades de pastas de cal com metacaulim e resíduos de construção e demolição**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

SIQUEIRA JÚNIOR, S. F. de; NÓBREGA, A. F.; CARNEIRO, A. M. P. Avaliação exploratória da trabalhabilidade de pastas de cal com metacaulim e resíduos de construção e demolição. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1–11. DOI: 10.46421/entac.v19i1.2035. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2035>. Acesso em: 17 jan. 2024.

SIQUEIRA, N. L. C. **Incorporação do pó de conchas de Ostras provenientes do processo de ostreicultura na produção de argamassas para revestimentos**. 2021. 46 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Aquicultura, Centro de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

SOUSA, A. K. D. **Argamassas do Grupo Escolar Augusto Severo/RN**: Caracterização e Incidência de Manifestações Patológicas. 2014. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2014.

SOUZA, J. S. C. **A influência do metacaulim na cristalização das hidrogranadas nas pastas de cal**. 2019. 277 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019b.

SOUZA, J. S. C. **Estudo de argamassa à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.

SOUZA, J. S. **Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil de fachadas de edifícios**. Brasília, 2019. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019a.

SOUZA, M. C de; DAVI, A. de S; FRAGA, Y, S. B. Efeito da Sílica ativa nas propriedades do concreto leve com argila expandida. **Mix Sustentável**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 29-40, 1 dez. 2021. **Mix Sustentável**. <http://dx.doi.org/10.29183/2447-3073.mix2022.v8.n1.29-40>.

SOUZA, R. S de. **Avaliação da incorporação de Politereftalato de Etileno (PET) em argamassa**. 2021. 45 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Fluminense, Niterói, 2021.

SPÓSITO, F. A. **Análises não destrutivas de argamassas mistas de revestimento com incorporação de resíduos de PET**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. São Paulo, 2020.

STOLZ, C. M; WASEM, K. S. Manifestações patológicas em edificação histórica no Vale dos Sinos/RS. **Revista Tecnologia e Tendências**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 37-52, 15 set. 2020. Associação Pró-Ensino Superior em Novo Hamburgo. <http://dx.doi.org/10.25112/rtt.v11i1.2189>.

SUGAMOSTO, J. **Comparativo entre concretos produzidos com sílica ativa em pó e sílica ativa em forma de lama**. 2007. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior de Tecnologia em Construção Civil – Modalidade Concreto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

VEIGA, M. R.; CARVALHO, F. Argamassas de Reboco para paredes de edifícios antigos: requisitos e características a respeitar. Lisboa: LNEC, **Cadernos de Edifícios**, nº2, 2002, p. 39 - 54.

VEIGA, R. Air lime mortars: what else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? a review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 157, p. 132-140, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.080>.

VELOSA, A. L. Influence of pozzolanic additions to lime mortars for building conservation purposes. 3° Ed. LNEC, **Cadernos de Edifícios**, nº 2, 2011, p. 103-115.

VELOSA, A. L. P. L. **Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. Aveiro, 2006.

ZHANG, D *et al.* Assessment of the thermal and microstructural properties of metakaolin-air lime based materials at an early age, **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 191, 2020.

ZHANG, D *et al.* Comparative study on the properties of three hydraulic lime mortar systems: natural hydraulic lime mortar, cement-aerial lime-based mortar and slag-aerial lime-based mortar. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 186, p. 42-52, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.053>.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Patos - Código INEP: 25281925
	Br 110, S/N, Alto da Tubiba, CEP 58700-000, Patos (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0006-80 - Telefone: None

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC

Assunto:	TCC
Assinado por:	Hannah Dora
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Hannah Dora de Garcia e Lacerda, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CBEC-PT**, em 07/08/2024 07:10:18.

Este documento foi armazenado no SUAP em 07/08/2024. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1210385

Código de Autenticação: 565169b01b

