



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

JOÃO BOSCO ABRANTES JÚNIOR

PÓ DE MANDACARU COMO ADITIVO EM ARGAMASSA DE
CIMENTO: EFEITOS ANTES E APÓS ENVELHECIMENTO

JOÃO PESSOA – PB
2024

JOÃO BOSCO ABRANTES JÚNIOR

**PÓ DE MANDACARU COMO ADITIVO EM ARGAMASSA DE
CIMENTO: EFEITOS ANTES E APÓS ENVELHECIMENTO**

Tese apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPCEM) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), como um dos requisitos para obtenção do título de DOUTOR.

Área de Concentração: Desenvolvimento e Propriedade de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Heber Sivini Ferreira.

Coorientador: Prof^a. Dra. Gabriella Cavalcante de Souza.

**JOÃO PESSOA – PB
2024**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

Al61p Abrantes Júnior, João Bosco.

Pó de mandacaru como aditivo em argamassa de cimento
: efeitos antes e após envelhecimento / João Bosco
Abrantes Júnior. - João Pessoa, 2024.
154 f. : il.

Orientação: Heber Sivini Ferreira.

Coorientação: Gabriella Cavalcante de Souza.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Argamassa de cimento. 2. Aditivo. 3. Pó de
mandacaru. 4. Biopolímero. I. Ferreira, Heber Sivini.
II. Souza, Gabriella Cavalcante de. III. Título.

UFPB/BC

CDU 666.97(043)

Reitor da Universidade Federal da Paraíba

Prof.^a Dra. Terezinha Domiciano Dantas Martins

Diretor do Centro de Tecnologia

Prof. Dr. Marcel de Gois Pinto

Coordenador do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Prof. Dr. Daniel Macedo de Araújo

Orientação

Prof. Dr. Heber Sivini Ferreira

Coorientação

Prof.^a Dra. Gabriella Cavalcante de Souza



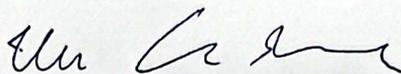
**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Ata da defesa de Tese de Doutorado apresentada pelo aluno JOAO BOSCO ABRANTES JUNIOR, no dia 19 de dezembro de 2024.

Às Oito horas e trinta minutos do dia 19 de dezembro de 2024, na sala de aula do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, localizada no Bloco Multimídia do Centro de Tecnologia, reuniram-se os membros da banca examinadora composta pelos Professores: Prof. Dr. HEBER SIVINI FERREIRA (Presidente, orientador); Prof^a. Dr^a. ALINE FIGUEIRÊDO DA NÓBREGA (Externa à Instituição); Prof^a. Dr^a. GABRIELLA CAVALCANTE DE SOUZA ALBUQUERQUE (Externa à Instituição); Prof. Dr. JOSENETO DE SOUZA (Externo à Instituição); Prof. Dr. NORMANDO PERAZZO BARBOSA (Externo à Instituição) e Prof. Dr. ULISSES TARGINO BEZERRA (Externo à Instituição), a fim de avaliarem a Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, com título "PÓ DE MANDACARU COMO ADITIVO EM ARGAMASSA DE CIMENTO: EFEITOS ANTES E APÓS ENVELHECIMENTO" de autoria do aluno JOAO BOSCO ABRANTES JUNIOR, matrícula 20211012606. A reunião foi aberta pelo Presidente da banca, que deu início aos trabalhos autorizando o candidato a iniciar sua apresentação. Concluídos os trabalhos de apresentação e de arguição, a Comissão Examinadora emitiu o seguinte parecer:

Aprovado, condicionado a uma nova reavaliação do texto com as correções indicadas pela banca examinadora, no prazo máximo de 90 dias.

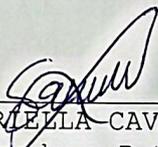
O aluno é obrigado a realizar as sugestões da banca. Para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora além do referido discente que apresentou a defesa de seu doutorado.



Prof. Dr. HEBER SIVINI FERREIRA
(Presidente, Orientador)



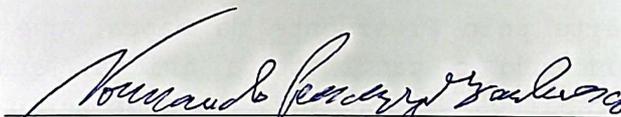
Prof^a. Dr^a. ALINE FIGUEIRÊDO DA NÓBREGA
(Examinadora Interna à Instituição)



Prof^a. Dr^a GABRIELLA CAVALCANTE DE SOUZA ALBUQUERQUE
(Examinadora Interna à Instituição)



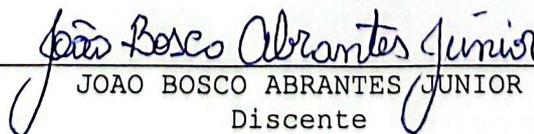
Prof. Dr. JOSENETO DE SOUZA
(Examinador Externo à Instituição)



Prof. Dr. NORMANDO PERAZZO BARBOSA
(Examinador Externo à Instituição)



Prof. Dr. ULISSES TARGINO BEZERRA
(Examinador Externo à Instituição)



JOAO BOSCO ABRANTES JUNIOR
Discente

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, João Bosco Abrantes e Maria de Fátima Vieira Brasil, por todo amor, dedicação e incentivo. A eles devo todas as minhas conquistas.

Aos meus filhos, presentes de Deus e fontes inesgotáveis de estímulo e força em minha vida.

A meus familiares e amigos presentes, que contribuíram para minha formação, oferecendo suporte nessa jornada..

DEDICO.

AGRADECIMENTO

A Deus, pela vida, pelas oportunidades e pela força nos momentos desafiadores. Sou grato pela saúde, discernimento e fé que me guiaram até aqui.

À Universidade Federal da Paraíba (UFPB), pela oportunidade de realizar este doutorado e por todo o suporte durante essa jornada.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPCEM), pelos ensinamentos, dedicação e compromisso com a formação dos alunos.

Ao Prof. Dr. Heber Sivini Ferreira, meu orientador, pela paciência, apoio e confiança. Sou eternamente grato por todo o aprendizado e por estar ao meu lado em todas as etapas desse processo.

À Prof^ª. Dra. Gabriella Cavalcante de Souza, coorientadora desta pesquisa, pela valorosa contribuição.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos e pela dedicação ao longo de minha vida. Seus exemplos de humildade, honestidade e perseverança foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Este sonho é fruto do amor, confiança e incentivo que sempre recebi de vocês.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esse trabalho se tornasse realidade. Meu sincero agradecimento.

RESUMO

A indústria da construção enfrenta desafios ambientais devido ao elevado consumo de recursos naturais e à grande geração de resíduos. Com o crescimento contínuo do setor, surge a necessidade de desenvolver materiais alternativos e processos mais sustentáveis. Nesse contexto, este estudo avaliou o uso do biopolímero em pó extraído da mucilagem do cacto Mandacaru como aditivo para argamassa de cimento, analisando seus efeitos nas propriedades do material em seu estado fresco e endurecido, antes e após o envelhecimento simulado por ciclos de choques térmicos. Foram realizados ensaios para verificar consistência, retenção de água, absorção de água, resistência mecânica (compressão e tração na flexão) e durabilidade. As amostras, produzidas com diferentes teores de aditivo, pó de Mandacaru e FLUX-40 (aditivo comercial à base de policaboxilato), foram classificadas como R, sem aditivo, e A, B, C e D, nas concentrações 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%, respectivamente. Os resultados indicaram que o pó de Mandacaru demonstrou potencial como plastificante em argamassas de cimento, influenciando na redução da absorção de água, sem comprometer a resistência mecânica e a durabilidade. A análise por DRX mostrou a ausência de estruturas cristalinas diferentes das fases de hidratação do cimento, com apenas alterações na intensidade dos picos. Nesse contexto, conclui-se que o pó de Mandacaru é uma alternativa sustentável como aditivo para argamassas de cimento, mantendo a resistência e durabilidade do material.

PALAVRAS-CHAVE: Aditivo, Argamassa, Biopolímero, Mandacaru, Cimento.

ABSTRACT

The construction industry faces environmental challenges due to the high consumption of natural resources and significant waste generation. With the sector's continuous growth, there is a pressing need to develop alternative materials and more sustainable processes. In this context, this study evaluated the use of powdered biopolymer extracted from the mucilage of the Mandacaru cactus as an additive for cement mortar, analyzing its effects on the material's properties in both fresh and hardened states, before and after simulated aging through thermal shock cycles. Tests were conducted to assess consistency, water retention, water absorption, mechanical strength, and durability. Samples, produced with different concentrations of additives—Mandacaru powder and FLUX-40 (a commercial polycarboxylate-based additive)—were classified as R (no additive), and A, B, C, and D, with concentrations of 0.0125%, 0.1%, 0.5%, and 1.0%, respectively. The results indicated that Mandacaru powder demonstrated potential as a plasticizer in cement mortars, influencing the reduction of water absorption, without compromising mechanical resistance and durability. XRD analysis revealed no crystalline structures beyond the hydration phases of cement, with only changes in peak intensity. In this context, it is concluded that Mandacaru powder is a sustainable alternative as an additive for cement mortars, maintaining the material's strength and durability.

KEYWORDS: Additive, Mortar, Biopolymer, Mandacaru, Cement.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	1
Lista de Gráficos.....	3
Lista de Quadros.....	4
1. INTRODUÇÃO	6
1.1 Hipóteses	9
1.2 Justificativa.....	9
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo Geral	12
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 Estrutura da Tese	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 Argamassa de Cimento.....	14
2.1.1 Classificação das Argamassas	14
2.1.2 Funções e Propriedades das Argamassas.....	16
2.1.2.1 Trabalhabilidade	18
2.1.2.2 Resistência Mecânica	19
2.1.2.3 Impermeabilidade	20
2.1.2.4 Durabilidade	22
2.2 Aditivos para Argamassa.....	24
2.2.1 Classe dos Aditivos	25
2.2.2 Mecanismos de Ação.....	26
2.2.2.1 Redutores de Água.....	26
2.2.2.1.1 Aditivos à Base de Lignossulfonato	28
2.2.2.1.2 Aditivos à Base de Naftaleno ou Melanina Sulfonato.....	29
2.2.2.1.3 Aditivo à Base de Policarboxilato	30

2.2.2.2 Retardadores do Tempo de Pega	31
2.3 Biopolímeros	32
2.3.1 Definição, Propriedades e Aplicações	33
2.3.2 Cactos como Fonte de Biopolímeros.....	34
2.3.3 Aditivos á Base de Cactos	37
2.3.4 Processos de Transformação da Mucilagem em Pó	38
2.3.5 Cacto Mandacaru	39
2.4 Métodos de Envelhecimento	41
2.4.1 Envelhecimento em Uso	42
2.4.2 Envelhecimento Natural	42
2.4.3 Envelhecimento Acelerado.....	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 Local de Desenvolvimento da Pesquisa	46
3.2 Descrição dos Materiais.....	46
3.2.1 Aglomerante	46
3.2.2 Agregado	47
3.2.3 Aditivo	48
3.2.4 Água	49
3.3 Produção das Amostras	50
3.3.1 Obtenção do Pó de Mandacaru.....	50
3.3.1.1 Coleta.....	51
3.3.1.2 Tratamento.....	51
3.3.1.3 Extração	52
3.3.1.4 Secagem.....	53
3.3.2 Preparação das Argamassas.....	55
3.3.2.1 Ensaio Preliminar	55
3.3.2.2 Dosagem	57

3.3.2.3 Mistura.....	58
3.3.3 Confeção das Amostras	59
3.4 Métodos de Análises.....	61
3.4.1 Estado Fresco.....	62
3.4.1.1 Índice de Consistência	62
3.4.1.2 Retenção de Água.....	64
3.4.2 Estado Endurecido	65
3.4.2.1 Resistência à Compressão	65
3.4.2.2 Resistência à Tração na Flexão	67
3.4.2.3 Absorção de Água por Capilaridade.....	68
3.4.2.3.1 Índices Físicos	71
3.4.3 Durabilidade	73
3.4.3.1 Envelhecimento Acelerado.....	73
3.4.4 Difração de Raios X	76
3.4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	77
3.4.6 Análise Estatística	78
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
4.1 Consistência por Espalhamento.....	80
4.2 Retenção de Água.....	81
4.3 Resistência à Compressão	83
4.4 Resistência à Tração na Flexão	84
4.5 Absorção de Água por Capilaridade.....	86
4.5.1 Índices Físicos	90
4.6 Durabilidade	92
4.6.1 Envelhecimento Acelerado.....	92
4.6.2 Resistência Mecânica	93
4.6.2.1 Resistência à Compressão	93

4.6.2.2 Resistência à Tração na Flexão	97
4.6.3 Impermeabilidade	99
4.6.3.1 Absorção de Água por Capilaridade.....	99
4.7 Difração de Raios X	102
4.8 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	106
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108
6. CONCLUSÃO.....	114
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
APÊNDICE	130
APÊNDICE I - PLANO SEQUENCIAL DE TRABALHO E ORÇAMENTO ...	Erro!
Marcador não definido.	
APÊNDICE II - ROTEIRO: PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS	Erro!
Marcador não definido.	
APÊNDICE III - ROTEIRO: ENSAIO PRELIMINAR.....	130
APÊNDICE IV - ROTEIRO: ENSAIO DE CONSISTÊNCIA	132
APÊNDICE V - ROTEIRO: ENSAIO DE RETENÇÃO DE ÁGUA	133
APÊNDICE VI – ROTEIRO: ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL.....	135
APÊNDICE VII – ROTEIRO: ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO	137
APÊNDICE VIII – ROTEIRO: ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	139
APÊNDICE IX – ROTEIRO: ÍNDICES FÍSICOS	141

Lista de Figuras

Figura 1: Defloculação das partículas de cimento devido a ação dos aditivos redutores de água.....	27
Figura 2: Defloculação (a) eletrostática e (b) estérica.....	28
Figura 3: Monômero do lignossulfonato.....	29
Figura 4: Monômeros (a) poli-naftaleno sulfonato de sódio e (b) poli-melamina sulfonato de sódio.....	29
Figura 5: Monômero de Policarboxilato.....	30
Figura 6: Mecanismo de defloculação eletroestérico.....	30
Figura 7: Cactáceas predominantes no semiárido brasileiro.....	36
Figura 8: Máquina Spray Drying.....	39
Figura 9: Cacto Mandacaru (Cereus Jamacaru).....	40
Figura 10: Cimento usado no estudo, Portland CPV – ARI.....	47
Figura 11: Sacos com areia lavada natural.....	48
Figura 12: Destilador.....	50
Figura 13: Esquema simplificado do processo de obtenção do pó de Mandacaru.....	50
Figura 14: Tratamento dos ramos do cacto Mandacaru. (a) ramos após remoção dos espinhos, (b) ramos seccionados, (b) retirada da pele da lâmina e (c) porções das lâminas após o corte.....	51
Figura 15: Bobona com as lâminas de cacto cortadas e água.....	52
Figura 16: Trituração e aquecimento da mistura água + cacto.....	52
Figura 17: Resfriamento da mistura (cacto + água) utilizando chiler.....	53
Figura 18: Filtração da mucilagem com panos.....	54
Figura 19: Obtenção do pó a partir da mucilagem utilizando o Spray Dryer.....	54
Figura 20: Execução do ensaio preliminar de compressão em máquina universal de ensaios.....	56
Figura 21: Mistura da argamassa.....	59
Figura 22: Corpos de prova moldados.....	60
Figura 23: Cura em água.....	60
Figura 24: Materiais utilizados no ensaio de índice de consistência.....	62
Figura 25: Ensaio para determinação do índice de consistência por espalhamento.....	63
Figura 26: Amostras para o ensaio de compressão axial.....	65

Figura 27: Máquina universal de ensaios utilizada no ensaio de compressão axial.....	66
Figura 28: Ensaio de compressão.	66
Figura 29: Amostras para o ensaio de tração na flexão estática.	67
Figura 30: Ensaio de tração na flexão estática.	67
Figura 31: Ensaio de absorção de água por capilaridade.	69
Figura 32: Amostras após o ensaio de absorção de água por capilaridade (a) em 10 min e (b) em 90 min.....	69
Figura 33: Rompimento por compressão diametral.	70
Figura 34: Determinação do peso imerso.	73
Figura 35: Câmara de choque térmico.....	74
Figura 36: Interior da câmara de Choque térmico.	75
Figura 37: Sistema de aquecimento e resfriamento da câmara.	75
Figura 38: Reservatório de água com gelo para arrefecimento.	76
Figura 39: Amostras rompidas diametralmente.....	90
Figura 40: Modificações físicas após envelhecimento acelerado.....	93
Figura 41: Imagens obtidas pelo MEV das amostras (a) sem aditivo, (b) com pó de Mandacaru e (c) com Flux-40.	106

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Resultados do ensaio de consistência das misturas aditivadas com pó de Mandacaru.	80
Gráfico 2: Comparação dos difratogramas das amostras aditivadas com pó de Mandacaru e FLUX-40 na concentração de 0,0125%.....	103
Gráfico 3: Comparação dos difratogramas das amostras aditivadas com pó de Mandacaru e FLUX-40 na concentração de 0,1%.....	104
Gráfico 4: Comparação dos difratogramas das amostras aditivadas com pó de Mandacaru e FLUX-40 na concentração de 0,5%.....	104
Gráfico 5: Comparação dos difratogramas das amostras aditivadas com pó de Mandacaru e FLUX-40 na concentração de 1,0%.....	105

Lista de Quadros

Quadro 1: Classificação das argamassas de revestimento.....	15
Quadro 2: Classificação da argamassa de assentamento e fixação de alvenaria.	15
Quadro 3: Critérios e classificação das argamassas.	15
Quadro 4: Agentes de degradação e suas naturezas.	23
Quadro 5: Classificação dos aditivos.	25
Quadro 6: Limites de composição do cimento Portland CPV – ARI.....	47
Quadro 7: Classificação das misturas e concentrações de aditivos.	49
Quadro 8: Quantidade de amostras para o teste preliminar.	55
Quadro 9: Resultados do ensaio preliminar de resistência a compressão por relação a/c.	57
Quadro 10: Combinações em proporções de volume e massa dos materiais utilizados na preparação das argamassas.	58
Quadro 11: Propriedades e métodos de análises.	61
Quadro 12: Traços em massa para preparação das argamassas para o ensaio de consistência.....	63
Quadro 13: Resultados do ensaio de retenção de água das misturas aditivadas com pó de Mandacaru.	81
Quadro 14: Resultados do ensaio de resistência a compressão aos 28 dias.	83
Quadro 15: Resultados do ensaio de resistência a tração na flexão aos 28 dias.....	85
Quadro 16: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias. ...	86
Quadro 17: Resultados do coeficiente de capilaridade aos 28 dias.	87
Quadro 18: Índices físicos.	91
Quadro 19: Resultados do ensaio de resistência a compressão após os ciclos de choque térmico.	94
Quadro 20: Comparação da resistência a compressão das amostras aditivadas com pó de Mandacaru - Envelhecida x 28 dias.....	95
Quadro 21: Resultados do ensaio de resistência a tração na flexão após os ciclos de choque térmico.	97
Quadro 22: Comparação da resistência a tração na flexão das amostras aditivadas com pó de Mandacaru – Envelhecida x 28 dias.	98
Quadro 23: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade após envelhecimento.....	99

Quadro 24: Comparação da absorção de água por capilaridade entre as amostras envelhecidas e aos 28 dias.....	101
Quadro 25: Picos identificados correspondentes as fases anidras e hidratadas.....	102

1. INTRODUÇÃO

A construção civil, uma das mais antigas atividades humanas, é um setor importante da economia, responsável pela elaboração e construção de estruturas físicas como edifícios, rodovias, pontes e muitas outras, essenciais para a sobrevivência e o desenvolvimento da sociedade.

A revolução tecnológica trouxe consigo novas técnicas e materiais pertinentes à engenharia (Porto; Kadlec, 2018). Ao longo do tempo, a indústria da construção evoluiu significativamente, incorporando avanços tecnológicos e técnicas construtivas mais sofisticadas, cruciais para sua transformação e execução dos serviços de forma mais rápida, segura e eficiente. Segundo Souza (2022, p.17), “as técnicas construtivas evoluíram, e constrói-se com grande velocidade usando uma variedade de materiais muito superiores aos nossos ancestrais”.

No entanto, junto com os avanços técnicos e tecnológicos, outros aspectos surgiram e tornaram-se um desafio para a construção civil, particularmente, merece destaque a questão da sustentabilidade. Arantes (2008) ressalta que as atividades relacionadas à construção civil promovem a degradação do meio ambiente devido ao consumo excessivo de recursos naturais e geração de resíduos.

Souza (2022) explica que os avanços na forma de construir estão intrinsecamente ligados à urgente preocupação pela preservação dos recursos naturais e desenvolvimento sustentável. Esta preocupação tem estimulado pesquisadores a investigar a viabilidade técnica, econômica e socioambiental de novos materiais para a cadeia produtiva da construção civil. Como resultado dessas investigações, surgem materiais de construção alternativos que satisfazem as necessidades atuais do setor.

Oliveira (2018), afirma que “a construção civil requer constantes mudanças de práticas construtivas e inovações tecnológicas, visando respeito ambiental e social, para atender um mercado consumidor cada dia mais globalizado, interessado e focado em sustentabilidade”. O conceito de sustentabilidade busca equilibrar as dimensões sociais, econômicas e ambientais das atividades realizadas na construção civil.

A dimensão social busca promover a inclusão e segurança dos envolvidos, considerando os impactos das construções nas comunidades locais, envolvendo a criação de emprego e renda. A dimensão econômica envolve a utilização eficiente dos recursos, a redução de desperdícios e a adoção de práticas que otimizem os custos, procurando garantir a viabilidade econômica dos serviços, considerando sua

rentabilidade a curto e longo prazo. Já a dimensão ambiental visa minimizar os impactos que podem ser gerados ao meio ambiente devido as construções. Nesse caso, procura-se reduzir os efeitos negativos que podem ser causados ao ecossistema devido ao uso de materiais derivados de fontes não renováveis como o petróleo e o seu descarte, o consumo descontrolado de energia e água, e a emissão de gases poluentes e de efeito estufa em processos específicos como na produção de materiais e insumos, além de promover a adoção de prática mais atraentes para a indústria da construção e incentivar uma construção mais consciente e sustentável.

Para Medeiros, Azzari, Aguirre (2022), a dimensão social aborda temas relacionados à satisfação das necessidades básicas das pessoas, à valorização das culturas locais, à melhoria do bem-estar presente e futuro e ao aumento da qualidade de vida pela redução da desigualdade social. Isto é, a dimensão social da sustentabilidade visa à construção de uma sociedade humana caracterizada pela inclusão, justiça e democracia. Por outro lado, a dimensão econômica refere-se ao modelo em que o crescimento econômico ocorre de forma ética e justa, mantendo a harmonia com as outras dimensões, garantindo a satisfação das necessidades humanas, boas condições sociais (equidade e coesão social) e a resiliência dos recursos naturais. Quanto à dimensão ambiental, esta trata dos aspectos concretos relacionados as limitações dos recursos naturais do planeta.

Logo, a busca por uma construção cada vez mais sustentável tem se tornado uma prioridade (Oliveira, 2015). Implementar a sustentabilidade na construção civil é um desafio que traz benefícios, uma vez que fomenta a inclusão social e melhoria nas condições de vida das comunidades envolvidas com oportunidades de negócios e geração de emprego e renda. Reduz custos operacionais, gera economia de recursos e valoriza as construções e empreendimentos no mercado. Além de promover a preservação do meio ambiente minimizando a degradação ambiental com o desenvolvimento de novos produtos para a construção, provindos de fontes alternativas e renováveis de matéria-prima.

Atualmente, a preocupação com o meio ambiente e a necessidade de reduzir custos e dependência de recursos não renováveis tem impulsionado o desenvolvimento e a utilização de materiais alternativos na indústria da construção civil. Diante disso, a procura por materiais de construção mais sustentáveis têm ganhado cada vez mais importância.

Materiais alternativos têm o potencial de reduzir custos na construção civil, pois podem resultar em: aquisição mais barata e de menor consumo energético durante a produção; maior durabilidade e resistência, reduzindo a manutenção ao longo do tempo; capacidade de reciclagem ou reutilização, contribuindo para a diminuição dos custos associados à gestão de resíduos; promoção de processos construtivos mais eficientes e redução do impacto ambiental em comparação com os materiais convencionais (Oliveira, 2015; Soares, 2017; Santos e Medeiros, 2020). Contudo, nem todo material alternativo é mais barato.

Souza (2019) afirma que a adoção de matérias-primas derivadas de recursos naturais facilmente renováveis, apresenta-se como uma excelente alternativa no momento atual. Neste sentido, os biopolímeros de origem vegetal estão em notável ascensão, apresentando-se como alternativa a polímeros derivados do petróleo.

Os biopolímeros, definido por Brito *et al.* (2011) como polímeros de origem natural, extraídos de fontes renováveis como plantas, têm despertado interesse como alternativa aos polímeros sintéticos derivados do petróleo, devido as suas propriedades e por apresentar algumas vantagens, por exemplo, além de reduzir a dependência aos recursos não renováveis, pode minimiza efeitos nocivos ao meio ambiente, como a emissão de gases poluentes e de efeito estufa e o descarte de resíduos sólidos.

Para Siman, Sanfelice (2018, p. 138), “polímeros biodegradáveis são fortes candidatos para substituir plásticos [...], pois podem ser degradados facilmente por microrganismos evitando assim possíveis contaminações”.

Dentre as fontes naturais de biopolímeros, os cactos têm se destacado como uma opção viável e promissora para a extração. Resistentes e adaptados a ambientes áridos, os cactos possuem características únicas, como alta capacidade de armazenamento de água em seus tecidos, o que lhe confere um potencial de alto valor agregado. No entanto, ainda são subutilizados como plantas ornamentais e fontes de alimentos para animais de rebanho. Conforme observado por Magalhães (2009), no nordeste do Brasil, os cactos são cultivados principalmente como fonte de alimento para rebanhos de gado e caprino.

O interesse pelos cactos como fonte de biopolímeros é devido às suas características. Isso levou a ideia de utilizá-los como aditivo na argamassa de cimento e investigar as propriedades resultantes do produto.

A argamassa, material de extrema importância para a construção civil, desempenha papel fundamental ao unir, revestir e assentar elementos. Quando

endurecida, ela se transforma em uma massa sólida e coesa que fornece aderência, estabilidade, resistência e durabilidade às estruturas, atendendo a diferentes aplicações na construção.

Na construção civil, a argamassa desempenha diversas funções que variam de acordo com o tipo de utilização. Conforme Carasek (2010), ela pode ser utilizada para o assentamento de tijolos e blocos, impermeabilização e regularização de superfícies, ou para dar acabamento às superfícies, seja ela texturizado, áspero ou liso.

A incorporação de aditivos à argamassa é uma prática comum que tem como finalidade obter o aprimoramento em funções específicas, como melhorar a trabalhabilidade, a aderência, a resistência e a durabilidade do material. Segundo Carasek (2010), o aditivo é utilizado para modificar as propriedades da argamassa de acordo com a função da aplicação.

Mediante o exposto, utilizar biopolímeros extraídos de cactos como aditivo nas argamassas para aprimoramento de suas propriedades surge como uma alternativa viável e promissora. Contudo, é necessário e importante a realização deste estudo para compreender a influência desses biopolímeros na argamassa e avaliar seu potencial como material aplicado a construção.

1.1 Hipóteses

Considerando os pontos abordados, surgem as seguintes hipóteses:

- i. Incorporar o pó do biopolímero obtido da mucilagem extraída do cacto Mandacaru (*Cereus Jamacaru*) pode preservar ou até melhorar as propriedades da argamassa de cimento, contribuindo com a resistência e durabilidade do material.
- ii. Este biopolímero pode ser utilizado como alternativa aos aditivos convencionais para argamassa, com potencial para redução de custos.
- iii. O uso deste material pode ajudar na redução de impactos ambientais e promover práticas mais sustentáveis, devido à sua origem natural e renovável.

1.2 Justificativa

O desenvolvimento e aperfeiçoamento de materiais são fatores importantes para a melhoria social, ambiental e econômico das nações (Pipolo, 2022). Segundo Souza (2022), o emprego de biopolímeros para alterações em materiais cimentícios já é consolidado, servindo como base para uma variedade de aditivos.

Considerando a necessidade de buscar alternativas para a indústria da construção, acredita-se, com base nas pesquisas de Pitt (2011), Souza (2019), Pipolo (2022), Souza (2022) e outros autores mencionados neste estudo, que o uso de biopolímeros extraídos de cactos como aditivos na argamassa pode representar uma abordagem inovadora para melhorar as propriedades desse material. Há diversos motivos que justificam a realização desta pesquisa:

(1) Sustentabilidade Ambiental

O biopolímero à base de cacto como aditivo para argamassa fornece uma abordagem sustentável, pois, além de utilizar uma fonte natural renovável de matéria-prima, pode substituir os aditivos sintéticos, reduzindo a dependência a recursos não renováveis. Os resíduos gerados no processo são orgânicos e podem ser aproveitados como fertilizantes, alimento para animais de rebanho ou matéria-prima para outros produtos. Os aditivos bioquímicos para materiais cimentícios, conforme destaca Pipolo (2022), têm sido bastante explorados pelo caráter sustentável, uma vez que são derivados de fontes renováveis.

Com base em Franchetti, Marconato (2006), Pitt (2011), Souza (2019) e Pipolo (2022), na produção de substâncias sintéticas podem surgir problemas ambientais como o consumo de recursos naturais, uma vez que a produção de substâncias sintéticas requer quantidades de recursos naturais não renováveis, contribuindo para a sua exploração excessiva, e a geração de resíduos causando poluição no solo, na água e no ar, pois os meios de fabricação envolvem processos químicos que podem gerar uma quantidade significativa de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, difíceis de tratar e dispor adequadamente.

Os biopolímeros obtidos de fontes naturais renováveis como os cactos, diferem dos polímeros sintéticos, uma vez que são obtidos de forma sustentável, por meio do cultivo, o que reduz a dependência de recursos não renováveis. Isso pode contribuir com a sustentabilidade na indústria da construção civil, ao mesmo tempo em que pode minimiza impactos ambientais. Guevara *et al.* (1997) e Nefzaoui, Ben Salem (2002) destacam que o cacto representa uma alternativa para a agricultura em regiões com

solos pobres ou em processo de empobrecimento. Ele é utilizado para prevenir a degradação do solo e controlar a desertificação.

Pipolo (2022) destaca que os aditivos biopoliméricos à base de cactos podem substituir parcialmente ou totalmente os aditivos sintéticos, reduzindo a dependência a materiais potencialmente prejudiciais ao meio ambiente e, desta forma, contribuir para a transição de materiais de construção alinhados às demandas atuais, como práticas construtivas mais sustentáveis.

Pérez (2014) e Pérez-Molphe-Balch *et al.* (2015) ressaltam que o cacto é uma planta resiliente, possui capacidade de se adaptar a situações difíceis como em ambientes áridos, e seu cultivo pode exigir menos recursos hídricos e energéticos em comparação com outras culturas. Além disso, pode reduzir a dependência de aditivos sintéticos, o que também pode contribuir para minimizar a degradação ambiental causada pela emissão de resíduos e descarte inadequado desses materiais.

É importante ressaltar que a adoção de métodos de produção mais sustentáveis e o desenvolvimento de alternativas ambientalmente amigáveis podem ajudar a mitigar impactos ambientais, além de promover práticas mais atraentes na indústria da construção.

(2) Sustentabilidade Social

O benefício social também é uma parte importante de uma abordagem sustentável. Neste sentido, essa pesquisa se justifica por oferecer a oportunidade de criar uma cadeia produtiva de aditivos provenientes de cactos. Esta cadeia envolve o cultivo, a colheita, o processamento e a distribuição, podendo gerar benefícios sociais significativos como a geração de emprego e renda nas diversas fases do processo produtivo, desde o cultivo e colheita dos cactos até o processamento para a síntese do biopolímero e obtenção do aditivo, assim como na distribuição e venda do produto. Esta iniciativa promove a inclusão social, oportunidades de negócio e desenvolvimento regional. Ao estimular o emprego e renda para os envolvidos na cadeia produtiva, contribui para o desenvolvimento econômico local e para a melhoria das condições de vida das comunidades envolvidas, estimulando também a criação de empreendimentos relacionados com a produção, processamento e distribuição dos biopolímeros.

De acordo com Souza (2019), além dos ganhos em performance do material com o aditivo à base de cactos, é importante destacar os benefícios sociais e econômicos associados a esse produto. O autor ainda resalta que o aditivo biopolimérico derivado

de cacto pode exercer um impacto social significativo, acrescentando valor e fortalecendo a cadeia produtiva.

(3) Inovação

Aditivos biopoliméricos extraídos de cactos para argamassa podem oferecer uma abordagem inovadora sob os seguintes aspectos:

- i. Ser uma fonte alternativa de aditivos para a indústria da construção que utiliza recursos naturais e renováveis para sua produção.
- ii. Resultar em estruturas mais eficientes em termos energéticos, com maior vida útil, reduzindo o consumo de recursos ao longo do tempo.
- iii. Explorar recursos subutilizados como produtos de alto valor agregado na indústria da construção. Os cactos geralmente são subutilizados, sendo usados apenas como plantas ornamentais ou fontes de alimentos.
- iv. Estimular a pesquisa e o desenvolvimento de novos produtos e materiais para a construção. Essa abordagem contribui para estudos científicos e tecnológicos para o avanço do conhecimento e a promoção de práticas mais atraentes na indústria da construção para a busca de alternativas mais responsáveis.

(4) Potencial de Mercado

Atualmente, é crescente a demanda por materiais alternativos na construção. A utilização de biopolímeros derivados de cactos na argamassa pode atender a essa demanda. A pesquisa pode fornecer informações importantes para o desenvolvimento de produtos inovadores e competitivos, abrindo oportunidades para novos negócios e investimentos nesse campo.

Neste sentido, esta pesquisa se justifica principalmente pela necessidade de explorar e compreender o potencial do biopolímero extraído do cacto Mandacaru como aditivo na argamassa, visando contribuir para a eficiência na indústria da construção, fornecendo uma alternativa inovadora para melhorar as propriedades desse material.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Investigar o uso do biopolímero extraído da mucilagem do cacto Mandacaru (*Cereus Jamacaru*), na forma de pó, como aditivo na argamassa de cimento, analisando

os efeitos causados nas propriedades do material em seu estado fresco e no endurecido, antes e após passar por envelhecimento acelerado por meio de ciclos de choques térmicos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- (1) Analisar os efeitos da adição do biopolímero nas propriedades da argamassa de cimento nos estados fresco e endurecido, e após envelhecimento;
- (2) Comparar a resistência e durabilidade das amostras aditivadas com pó de Mandacaru, em relação à amostra de referência (sem aditivo) e àquela com aditivo comercial à base de policarboxilato;
- (3) Investigar as características microestruturais das amostras de argamassas de cimento incorporadas com o biopolímero em pó extraído do cacto Mandacaru.

1.4 Estrutura da Tese

A estrutura deste trabalho está organizada em seis capítulos, os quais incluem:

Capítulo 1 – Introdução: aborda o contexto do tema à compressão da pesquisa, destacando a relevância e a justificativa do estudo, apresentando as hipóteses e os desafios existentes, assim como as possíveis contribuições, além de delinear os objetivos propostos e a estrutura da tese.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: faz uma revisão da literatura promovendo uma reflexão sobre o objeto de estudo com a finalidade de fornecer uma base teórica sólida e ampla para o desenvolvimento da pesquisa e argumentação do trabalho.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos: informa o local de desenvolvimento da pesquisa e a descrição detalhada dos materiais e métodos utilizados.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão: mostra as análises e discussões dos resultados obtidos com os ensaios.

Capítulo 5 – Considerações Finais: traz as últimas considerações sobre a pesquisa.

Capítulo 6 - Conclusão: apresenta as descobertas e percepções obtidas ao longo da pesquisa sobre os aspectos investigados, destacando as contribuições.

Capítulo 7 – Sugestão para Trabalhos Futuros: sugere temas para novas pesquisas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Argamassa de Cimento

Conforme a NBR 13281 (ABNT, 2023), argamassa é uma “mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânicos(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosado em obra ou em instalação própria (argamassa industrial)”.

Amplamente utilizado como componente principal em argamassas e concretos para unir materiais de construção, aglomerante é um material inorgânico, em forma de pó, que, ao ser misturado com água, forma uma pasta capaz de endurecer e adquirir resistência mecânica por meio de reações químicas (Neville; Brooks, 2013). Embora exista aglomerantes minerais, como o gesso e a cal aérea, o cimento Portland é o mais utilizado devido a sua capacidade de resistência. Os agregados são materiais granulares inertes adicionados à pasta para aumentar a resistência, reduzir a retração e conferir volume (Ribeiro, 2002). A água desempenha o papel crucial na reação química de hidratação do cimento, permitindo suas propriedades aglutinantes na argamassa (Pinheiro; Crivelaro, 2016).

As argamassas desempenham uma variedade de funções essenciais na construção, e muitas dessas funções podem ser aprimoradas pelo uso de aditivos.

2.1.1 Classificação das Argamassas

Existem diversos tipos de argamassas, cada uma com características e finalidades específicas que se adequam a diferentes aplicações na construção. Por isso é importante conhecer os principais tipos utilizados, bem como a diferença entre elas para fazer a escolha correta para o serviço determinado.

Várias são as classificações que podem ser apontadas para as argamassas. A NBR 13281, publicada em 2013, estabelece critérios de classificação para argamassas inorgânicas utilizadas em revestimento e assentamento na construção civil. Essas classificações visam assegurar que a argamassa usada atenda aos requisitos de desempenho específicos para cada tipo de aplicação, considerando fatores como altura da edificação e exposição às intempéries.

As argamassas de revestimento são classificadas conforme sua aplicação e altura da edificação (Quadro 1).

Quadro 1: Classificação das argamassas de revestimento.

Tipo	Descrição
ARV - I	Indicada para revestimentos internos de qualquer edificação e externos em edificações com altura até 10 metros.
ARV – II	Adequada para revestimentos internos de qualquer edificação e externos em edificações com altura entre 10 e 60 metros.
ARV – III	Destinada a revestimentos internos de qualquer edificação e externos em edificações com altura superior a 60 metros.
AET (Argamassa de Emboço Técnico)	Utilizada como primeira camada do revestimento em sistemas multicamadas, conforme a NBR 16648 (ABNT, 2018).

Fonte: Com base na NBR 13281 (ABNT, 2023).

Por outro lado, as argamassas para assentamento e fixação de alvenaria são classificadas de acordo com sua função (Quadro 2).

Quadro 2: Classificação da argamassa de assentamento e fixação de alvenaria.

Tipo	Descrição
AAV (Argamassa para Assentamento de Alvenaria de Vedação)	Utilizada no assentamento de blocos de vedação, como blocos cerâmicos ou de concreto.
AAE (Argamassa para Assentamento de Alvenaria Estrutural)	Empregada no assentamento de blocos destinados a suportar cargas estruturais.
AFA (Argamassa para Fixação de Alvenaria)	Utilizada para encunhamento, fixando a alvenaria à estrutura da edificação.

Fonte: Com base na NBR 13281 (ABNT, 2023).

A adoção desses critérios de classificação contribui para a padronização e melhoria da qualidade das argamassas utilizadas na construção civil, promovendo edificações mais seguras e duráveis.

De acordo com Recena (2012) e Dalago, Brandão (2017), as argamassas podem ser classificadas quanto a natureza do aglomerante, quanto ao tipo de aglomerante, quanto ao número de aglomerantes e quanto a sua utilização. O Quadro 3 contém resumidamente os critérios e a classificação das argamassas conforme supracitado.

Quadro 3: Critérios e classificação das argamassas.

Classificação	Tipo	Descrição
Quanto a natureza do aglomerante	Argamassa hidráulica	Preparada com aglomerantes que endurecem pela ação da água. Possui boa resistência a umidade.
	Argamassa aérea	Preparada com aglomerantes que endurecem pela ação do ar. Possui baixa resistência a umidade.
Quanto ao tipo de aglomerante	Argamassa de cal	Contém cal como aglomerante. É constituída por cal e areia.

	Argamassa de cimento	Utiliza cimento como aglomerante. É composta por cimento e areia.
	Argamassa de gesso	Usa gesso como aglomerante.
	Argamassa de cal e cimento	Emprega cal e cimento como aglomerantes.
Quanto ao número de aglomerantes	Argamassa simples	Possui apenas um aglomerante.
	Argamassa mista	Possui mais de um aglomerante, geralmente cal e cimento.
Quanto a utilização	Argamassa de assentamento	Utilizada para unir elementos de alvenaria, elevar paredes e preencher espaços.
	Argamassa de revestimento	Usada para revestir e cobrir imperfeições de superfícies como pisos, paredes e tetos.
	Argamassa para contrapiso	Serve para regularizar e nivelar pisos para receber acabamento.
	Argamassa colante	Preparada para fixar revestimentos cerâmicos e outros materiais. Possui alto poder de aderência.
	Argamassa de grauteamento	Produto de alta resistência com a função de preencher cavidade de estruturas.
	Argamassa de reparo e proteção	Destinada a reparos e proteção de estruturas de concreto.
	Argamassa refratária	Preparadas com agregados especiais como argila refratária e vermiculita, são usadas para resistir a elevadas temperaturas.

Fonte: Com base em Dalago, Brandão (2017).

Conhecer as argamassas e suas propriedades é importante para aplicação, uma vez que o uso adequado contribui para garantir qualidade, estabilidade, durabilidade, desempenho e segurança ao longo do tempo. De acordo com Lopes (2020), as dosagens e a escolha inadequada da argamassa podem gerar problemas de fissuras, trincas e fragilidade na adesão de tijolos e blocos, como também, deslocamento de revestimentos, acarretando retrabalho, maior tempo de obra e maior custo.

As argamassas têm suas propriedades específicas relacionadas aos tipos de materiais utilizados na sua composição (aglomerante e agregado), suas proporções, e o aditivo aplicado, se necessário (Lopes, 2020). Uma argamassa preparada para assentar blocos tem propriedades diferentes daquela preparada para fazer chapisco, mesmo sendo composta pelos mesmos materiais, suas proporções são diferentes.

2.1.2 Funções e Propriedades das Argamassas

Existem inúmeras utilidades para as argamassas dentro da construção, desde o assentamento de blocos até o revestimento e acabamento de paredes, pisos e tetos, o que faz dela um material versátil bastante utilizado na construção. Dentre suas

contribuições, esse material tem a finalidade de unir e fixar elementos, assentar revestimentos, preencher espaços, regularizar superfícies e dar acabamentos, proporcionando estabilidade e durabilidade a estrutura (Recena, 2012).

De acordo com Lopes (2020), para qualificar a argamassa ideal para seu tipo de aplicação a Associação Brasileira de Normas Técnicas estabelece parâmetros normativos para algumas propriedades do material como trabalhabilidade, retenção de água, teor de ar incorporado, resistência mecânica, aderência, entre outros. No estado fresco ela deve apresentar boa trabalhabilidade e capacidade de retenção de água adequada para garantir a hidratação do cimento, enquanto que no estado endurecido deve apresentar boa resistência mecânica, aderência e resiliência.

Suas características e propriedades de aderência e endurecimento tornam esse material indispensável para diversas atribuições na construção civil. Segundo Recena (2012) e Roque, Polesello (2019), como qualquer material empregado para compor um sistema, as argamassas desempenham funções definidas que, levando em consideração sua interação com o substrato e o ambiente, admite como principais serviços: assentamento de elementos de alvenaria; regularização, revestimento, acabamento e proteção de superfícies; reparo de estruturas e chumbamento de elementos. Para essas aplicações são importantes coesão, resistência, estabilidade, segurança, proteção, estética, desempenho e durabilidade das estruturas. O serviço de reparo é feito para recuperar estruturas danificadas e preencher falhas. E o chumbamento se destina a usa a argamassa para fixar elementos pré-moldados ou metálicos.

De acordo com Recena (2012), para cumprir suas funções as argamassas devem apresentar as seguintes propriedades: trabalhabilidade adequada a função que se destinam; capacidade de retenção de água; durabilidade compatível com a vida útil prevista; resistência frente a agentes de deterioração; resistência mecânica e estabilidade física; capacidade de aderir a substratos e; baixo módulo de elasticidade para promover a argamassa a capacidade de absorver deformações.

Para Roque, Polesello (2019), as características de desempenho das argamassas podem ser avaliadas quantitativamente e qualitativamente pelas propriedades em seus estados fresco e endurecido. Isso é, para garantir o desempenho esperado as argamassas devem oferecer propriedades específicas tanto no estado fresco quanto no endurecido.

Embora tenha sido elencado diversas propriedades das argamassas, neste estudo, nos concentraremos naquelas que são de interesse da pesquisa. No estado fresco, a

trabalhabilidade (índice de consistência e retenção de água), enquanto no estado endurecido, a resistência mecânica, a impermeabilidade e a durabilidade.

2.1.2.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade da argamassa é uma propriedade no seu estado fresco, que se refere à facilidade com que ela pode ser manuseada e moldada durante sua aplicação. Conforme Baía, Sabbatini (2008), a trabalhabilidade refere-se à harmonia das propriedades da argamassa, como coesão, consistência, plasticidade, viscosidade e adesão inicial. Na prática, ela define como as argamassas podem ser manipuladas, ou seja, misturadas, transportadas e aplicadas, garantindo um acabamento uniforme.

Uma argamassa com boa trabalhabilidade é aquela que apresenta uma consistência adequada, permitindo a execução dos serviços como assentamento de blocos, aplicação de revestimento e outras operações, de forma eficiente e com menor custo e esforço. Ainda, segundo Baía, Sabbatini (2008), uma argamassa com boa trabalhabilidade não deve ser muito fluída e nem endurecer rapidamente após a aplicação. Ela deve apresentar coesão e facilidade de espalhamento. Para Recena (2012, p. 37),

A trabalhabilidade de uma argamassa é um conceito subjetivo que dever ser entendido como a maior ou menor facilidade de dispor a argamassa em sua posição final, cumprindo adequadamente sua finalidade, sem comprometer o bom andamento da tarefa em termos de rendimento e custo.

A trabalhabilidade da argamassa está associada a algumas características específicas, tais como consistência, coesão, tempo de pega e retenção de água (Recena, 2012; Roque e Polesello, 2019). A consistência da argamassa refere-se à sua fluidez e capacidade de espalhamento. Uma argamassa com boa trabalhabilidade deve ser maleável o suficiente para ser espalhada e moldada, ao mesmo tempo que deve manter sua forma após aplicação. A coesão está relacionada à capacidade da argamassa de manter sua integridade estrutural e não se desagregar durante a aplicação. O tempo de pega é o período necessário para que a argamassa passe do estado fresco para o endurecido. Conhecê-lo permite controlar o tempo disponível para aplicar a argamassa antes que atinja o estágio não trabalhável. Se a pega for muito rápida, pode não haver tempo suficiente para realizar a tarefa adequadamente. Por outro lado, um tempo de

pega muito longo pode causar atrasos e custos adicionais. A retenção de água na argamassa trata-se da capacidade da argamassa manter a água misturada durante o processo de aplicação e secagem. Uma retenção adequada de água pode garantir uma mistura homogênea, facilitar a aplicação, melhorar as propriedades de aderência e resistência, além de prevenir fissuras e trincas decorrentes da retração excessiva. Conforme Schankoski *et al.* (2015), para não comprometer o desempenho, as argamassas devem apresentar níveis aceitáveis de retenção de água. A ASTM C 270 sugere que a retenção de água deve ser igual ou superior a 75%, sem limitar um valor máximo.

A retenção de água da argamassa é uma característica ligada à capacidade do material no seu estado fresco de manter sua trabalhabilidade mesmo quando exposta a situações que resultem na perda de água durante o processo de mistura, seja por evaporação ou pela absorção de água (Carasek, 2017).

Petrucci (1998) discute a importância da retenção de água na otimização da trabalhabilidade do material. Segundo o autor, a capacidade de retenção de água desempenha um papel importante nesse processo. Quando a água não é retida adequadamente, o material perde sua plasticidade em um tempo insuficiente para o manuseio adequado, resultando em menor resistência quando endurecida. Além de permitir uma retração excessiva do material durante a secagem.

A trabalhabilidade das argamassas foi avaliada por meio dos ensaios de consistência e retenção de água, de acordo com as normas NBR 13276 (ABNT, 2016) e NBR 13277 (ABNT, 2005), respectivamente. A trabalhabilidade da argamassa pode ser afetada pelo teor de água presente na mistura, e pela quantidade e tipos de agregados, aglomerantes e aditivos utilizados. Portanto, é importante ajustar a proporção dos materiais para obter a trabalhabilidade ideal para cada aplicação. Uma argamassa com boa trabalhabilidade facilita o trabalho, tornando-o mais rápido e eficiente. Petrucci (1998), menciona que, no que diz respeito a argamassas de cimento, é possível alcançar características de uma boa trabalhabilidade com o emprego de aditivos plastificantes.

2.1.2.2 Resistência Mecânica

Para Barros *et al.* (1998), resistência mecânica é a propriedade que confere a argamassa, em seu estado endurecido, a capacidade de suportar ações mecânicas, tais como esforços, impactos, abrasão superficial e variações dimensionais resultantes de

flutuações de temperaturas e umidade. A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABPC, 2002) define resistência mecânica como a capacidade com que as argamassas suportam carregamentos de diversas naturezas, que causam tensões internas de cisalhamento, tração e compressão.

De acordo com Sabbatini (1998), Baía, Sabbatini (2008) e Barrichello (2019), diversos fatores exercem influência sobre a resistência mecânica da argamassa. Dentre eles incluem o tipo de aglomerante, a granulometria e o tipo dos agregados, a relação água/cimento (a/c) e o traço da mistura. Além disso, é importante destacar que o método de preparação da argamassa também desempenha um papel importante no desempenho da sua resistência mecânica.

“O proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa, assim como inúmeras outras propriedades, também tem influência significativa sobre a resistência mecânica” (Roque e Polesello, 2019, p. 30). Manter um equilíbrio adequado entre o cimento e os agregados é importante. Uma quantidade adequada de cimento e agregados com granulometria bem distribuída e forma angulosa promovem uma boa resistência mecânica à argamassa. O excesso de água pode comprometer essa resistência e enfraquecer a argamassa. Além disso, a adição de aditivos na argamassa tem o potencial de modificar sua resistência mecânica e outras propriedades de acordo com a aplicação específica.

A resistência mecânica é uma das principais propriedades usadas para avaliar a qualidade e durabilidade das argamassas. Na condução deste trabalho, essa propriedade foi avaliada por meio de ensaios de resistência a compressão axial e tração na flexão estática, conforme definido nas normas NBR 7215 (ABNT, 2019) e NBR 13279 (ABNT, 2005). Os resultados desses ensaios permitiram determinar se a argamassa satisfaz os requisitos necessários de resistência e durabilidade para a aplicação específica.

2.1.2.3 Impermeabilidade

A impermeabilidade é uma propriedade, no estado endurecido, essencial para garantir a proteção das estruturas contra a ação da água e, conseqüentemente, sua durabilidade. Ela constitui na capacidade da argamassa evitar a penetração da água em sua estrutura.

Segundo a NBR 9575 (ABNT, 2010), impermeabilização é o processo utilizado na construção para tornar a argamassa resistente à penetração de água e proteger as construções contra a ação da umidade que pode comprometer sua integridade. A NBR 9779 (ABNT, 2012) argumenta que a resistência a absorção de água refere-se à capacidade da argamassa no estado endurecido resistir a movimentação da água através de seus poros.

Para Baía, Sabbatini (2008) e Cincotto *et al.* (1995), a permeabilidade da argamassa no estado endurecido é uma propriedade indesejada que pode ser potencializada com a existência de fissuras, facilitando ainda mais a absorção da água por capilaridade. Almeida (2020) afirma que a absorção de água por capilaridade é uma propriedade relacionada à movimentação da água através de pequenos espaços entre as partículas da argamassa, devido a sua estrutura porosa e as fissuras da camada em seu estado endurecido.

A impermeabilidade refere-se à capacidade da argamassa impedir a penetração de água. Isso é importante para sua aplicação em ambiente sujeitos a exposição constante de água como cozinhas, banheiros e reservatórios. Sendo a capilaridade o fenômeno no qual a água absorvida se move através dos poros da argamassa, a resistência a absorção de água por capilaridade é a característica da argamassa resistir a percolação da água absorvida. De acordo com Santos (2008) *apud* Roque e Polesello (2019, p. 31).

O fenômeno da capilaridade está diretamente ligado à estrutura de poros do material, que pode ser modificada por fatores como o tipo de cimento utilizado, a presença de aditivos ou adições, as características do agregado e a quantidade de água da mistura, mas principalmente pela forma de produção da argamassa e a execução do revestimento, que dependendo da energia de aplicação pode apresentar uma maior compacidade.

É importante ressaltar que a absorção de água pode levar a problemas como manchas, eflorescência, deterioração, deslocamento e perda de resistência mecânica, comprometendo a durabilidade do material. Verçoza (1983), Thomaz (1989), Caraseck, (2010) e Castros, Martins (2014), afirmam que a umidade devido a água absorvida pela argamassa pode causar manifestações patológicas como bolores (mofo), mancha, fissuras, trincas, eflorescência, entre outros danos que deterioram os elementos da construção com o tempo. Para Almeida (2020, p. 16), “a umidade é a principal

responsável pelas patologias nas construções e isso acontece durante toda a vida dos materiais em todo o seu conjunto”.

Tendo em vista evitar o surgimento de problemas patológicos que podem ser ocasionados pela umidade, Maccari (2010) aponta a impermeabilização como a melhor forma de prevenção. A impermeabilização é essencial na construção civil, tendo uma influência direta na qualidade e durabilidade das edificações NBR 9575 (2010). A investigação da impermeabilidade foi realizada por meio de ensaio de resistência a absorção de água por capilaridade, conforme definido pela norma NBR 15259 (ABNT, 2005).

2.1.2.4 Durabilidade

A durabilidade da argamassa é a capacidade do material resistir a fatores ou agentes que podem afetar sua integridade e desempenho, no seu estado endurecido ao longo do tempo.

Durabilidade é a capacidade de uma argamassa em manter sua estabilidade química e física ao longo dos tempos em condições normais de exposição a um determinado ambiente, desde que submetido aos esforços que foram considerados para seu projeto, sem deixar de cumprir as funções para as quais foi projetada (Recena, 2012, p. 39).

Os fatores ou agentes de deterioração referem-se a quaisquer elementos que afetam os componentes de uma construção, causando modificações nos materiais que resultam na redução do seu desempenho (Jonh; Sato, 2006 *apud* Bitencourt, 2014, p. 44). O autor ainda explica que:

A origem dos agentes de degradação é diversa: o meio ambiente (clima, poluição, ventos, componentes do ar), o carregamento da construção (cíclico ou contínuo), biológicos (fungos, bactérias, roedores, vegetais), produzidos pelo uso da construção (como o desgaste por abrasão, impactos, dentre outros.) ou até mesmo incompatibilidade química ou física entre materiais (corrosão eletrolítica) ou entre fases de um mesmo material (a reação álcali-agregado no concreto).

De acordo com Barros, Maciel, Sabbatini (1998), diversos elementos podem afetar a qualidade das argamassas. Esses fatores incluem a influência das condições ambientais, a ação de agentes agressivos, sejam eles de natureza biológica, química ou mecânica, bem como a forma como a execução e a cura são realizadas. As condições

ambientais podem expor a argamassa a umidade e variações de temperatura devido à ocorrência de chuvas, além da incidência à radiação solar. Os agentes químicos, tais como sais, ácidos e sulfatos, assim como os biológicos e as ações mecânicas, podem comprometer a durabilidade das argamassas. Além disso, o processo de cura desempenha papel fundamental na garantia da hidratação completa do cimento, e a execução adequada tem sua importância para assegurar a durabilidade. A seguir, o Quadro 4 contém os principais agentes de degradação e sua natureza.

Quadro 4: Agentes de degradação e suas naturezas.

Natureza	Agente
Mecânica	Carregamentos (esforços)
Física	Ondas mecânicas (vibrações e ruídos)
	Eletromagnético (radiação)
	Térmico
Química	Ácidos
	Bases
	Sais
Biológica	Seres vivos

Fonte: Com base em ISO (2001) *apud* Bitencourt (2014).

John, Sato (2006) *apud* Bitencourt (2014, p. 46) explica que:

os agentes de degradação geram alterações no material por meio de reações químicas, processos físicos e mecânicos, e agentes biológicos, resultando em perdas do desempenho de um produto. O entendimento dos mecanismos de degradação é a base científica para estimar a durabilidade, o que promove a definição de modelos de degradação, norteando medidas para a melhora da resistência dos materiais à degradação e amparando o desenvolvimento de ensaios de envelhecimento.

Bitencourt (2014) esclarece que conhecer a resistência ao desgaste de um material tem grande importância para a construção por duas razões: a primeira é permitir o uso destas informações para avaliar a viabilidade de aplicação do material, a segunda é possibilitar a comparação entre diferentes materiais em relação a durabilidade, o que facilita a escolha daquele mais adequado às condições impostas.

É interessante destacar que, além dos cuidados com a escolha adequada da argamassa para o serviço e a adoção de boas práticas construtivas, é importante a realização de manutenção periódica e eventuais reparos nas estruturas para garantir a longevidade das construções. Lara (2013, p. 89) explica que,

A durabilidade é, contudo, um termo pouco mensurável, pois afinal como responder com exatidão a pergunta: “Quanto tempo deve durar uma estrutura

de concreto?”. A determinação da durabilidade é complexa, pois depende dos cuidados dispensados na fabricação, do ambiente onde o concreto estará exposto e das próprias cargas a que ele estará submetido.

Roque, Polesello (2019, p. 31) afirma que,

“Recena (2012) e Baía, Sabbatini (2008), entendem por durabilidade a capacidade das argamassas manterem suas propriedades do estado endurecido diante das ações do meio ao longo do tempo, mantendo seu desempenho acima dos níveis mínimos especificados para o período de uso e vida útil predeterminado”.

É importante ressaltar que todas essas propriedades das argamassas dependem dos materiais que a constitui, bem como de suas proporções e do uso de aditivos específicos.

2.2 Aditivos para Argamassa

Além dos componentes tradicionais, aglomerante, agregado e água, a argamassa pode receber aditivos para melhorar suas propriedades e conferir características específicas para aplicação. Roque, Polesello (2019) explica que no Brasil os aditivos são regulados pela NBR 11768 (ABNT, 2011). Essa norma estabelece a classificação e os requisitos para a utilização de aditivos, podendo ser aplicada também a argamassas na ausência de uma normativa específica para o material.

A NBR 11768 (ABNT, 2019) define aditivo como um produto que é adicionado em pequena quantidade, não maior que 5% da massa do aglomerante, durante o processo de preparação da mistura, salvo algumas condições¹, com o objetivo de modificar algumas de suas propriedades, no sentido de melhor ajustá-las para atender condições específicas de uso no seu estado fresco e/ou endurecido.

Segundo a ASTM C125 (2015), aditivo é uma substância adicionada a argamassa ou concreto, juntamente com a água, agregados e aglomerante, durante ou antes do processo de mistura, com o objetivo de melhorar propriedades da argamassa ou concreto em seu estado fresco ou endurecido. Para Vieira *et al.* (2009, p. 12), aditivos são:

¹ A quantidade informada (5 %) pode ser superior para algumas aplicações, como em aditivos para concreto projetado ou compensadores de retração.

substâncias que quando misturadas na confecção de concretos e argamassas modificam as propriedades físico-química desses, com a finalidade de melhorar e facilitar a confecção, o lançamento e a aplicação, eliminando os efeitos indesejáveis como segregação, fissuração, bolhas, etc., melhorando as características de resistência mecânica, impermeabilidade, aparência e durabilidade.

2.2.1 Classe dos Aditivos

Segundo a NBR 11768 (ABNT, 2019), os aditivos podem ser classificados de acordo com a função que desempenham e os efeitos que proporcionam ao material. O Quadro 5 contém a classificação dos principais aditivos conforme a referida norma.

Quadro 5: Classificação dos aditivos.

Tipo		Características
AP	Acelerador de pega	Reduz o tempo de transição do estado plástico para o endurecido.
AR	Acelerador de resistência	Aumenta a taxa de desenvolvimento da resistência inicial sem modificar a do início de pega.
RPE	Retardador de pega	Aumenta o tempo de transição do estado plástico para o endurecido.
CH	Controlador de hidratação	Controla a hidratação do cimento.
IA	Incorporador de ar	Permite a incorporação em quantidade controlada de microbolhas de ar uniformemente distribuídas, que se mantém no estado endurecido.
RA	Redutor de água	Permite a redução de água sem modificar a consistência, ou modifica a consistência sem alterar a quantidade de água. Ainda pode apresentar efeitos secundários, (RP) e (AP).
RR	Redutor de retração	Possui como função principal a redução da retração autóloga, atuando na diminuição da tensão superficial da água presente na mistura.
RAC	Redutor de absorção capilar	Diminui a absorção capilar por efeito físico, quando a resistência à água sob pressão é limitada ou inexistente.
RP	Redutor de permeabilidade (impermeabilizante)	Diminui a permeabilidade capilar, por efeito de cristalização, onde os compostos que bloqueiam os poros são suficientemente estáveis para resistir à água sob pressão.

Fonte: Com base na NBR 11768 (ABNT, 2019).

Além dos aditivos aprestados no Quadro 5 existem outros chamados de aditivos especiais, utilizados em caso mais específicos. Seguem alguns exemplos: acelerador de pega para concreto projetado (APP), aditivos para concreto vibroprensado (CVP), incorporador de ar para concreto leve (IA-L), modificadores de viscosidade retentor de água (MV-RT), modificador de viscosidade antisegregante (MV-AS), redutor de água tipo 1/acelerador (RA1-A), redutor de água tipo 1/retardador (RA1-R), redutor de água tipo 2 (RA2), redutor de água tipo 2/retardador (RA2-R), redutor de água tipo 2/acelerador (RA2-A), redutor de corrosão (RC) (NBR 11768, ABNT, 2019).

Logo, em resumo, existem diversas classes de aditivos com diversos mecanismos de ação que podem ser empregados na preparação de argamassas, cada uma com funções específicas. Entre estas, destacam-se os aditivos retardadores e aceleradores de pega, que influenciam no tempo de endurecimento da argamassa, prolongando ou acelerando esse processo, respectivamente. Essas classes de aditivos proporcionam, respectivamente, maior tempo de trabalho e celeridade nas etapas de serviços. Por sua vez, os aditivos plastificantes ou redutores de água contribuem para melhorar a trabalhabilidade da argamassa ao reduzir a quantidade de água necessária, melhorando sua plasticidade para uma consistência desejada, facilitando seu manuseio. Os aditivos impermeabilizantes são empregados para proteger a argamassa contra a umidade e a deterioração, tornando-a mais resistente à penetração de água, reduzindo sua permeabilidade. Os aditivos redutores de retração ajudam a minimizar a retração da argamassa durante a cura, reduzindo assim o risco de fissuras. Por fim, os aditivos para melhorar a aderência têm como objetivo aumentar a ligação da argamassa com diferentes substratos, como tijolos, blocos, cerâmica, entre outros materiais.

2.2.2 Mecanismos de Ação

Os aditivos variam em sua composição, abrangendo surfactantes, sais e polímeros solúveis, e até minerais insolúveis. Eles funcionam por meio de processos nos quais interagem com os elementos da argamassa. Essas interações promovem modificações na microestrutura do material melhorando a trabalhabilidade, alterando o tempo de pega, controlando o desenvolvimento de resistência e aumentando sua durabilidade (Mehta; Monteiro, 2014). Dentre a variedade de aditivos descritos na NBR 11768 (ABNT, 2019), este estudo dará destaque aos redutores de água e retardadores de pega.

2.2.2.1 Redutores de Água

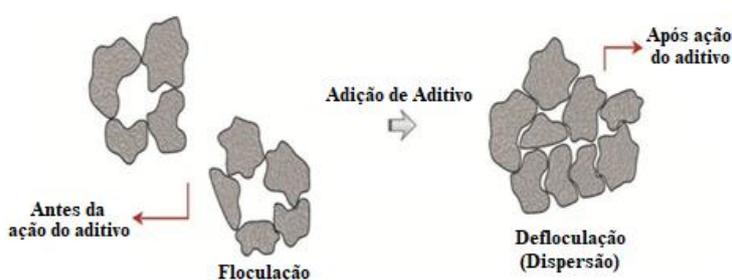
Os aditivos redutores de água são substâncias adicionadas à argamassa ou concreto com função de reduzir a quantidade de água necessária à mistura para manter a trabalhabilidade, ou melhorar a trabalhabilidade sem aumentar a quantidade de água, ao mesmo tempo que mantém ou até mesmo melhora suas características de resistência e durabilidade (NBR 11768, ABNT, 2019). A referida norma divide esses aditivos em

Tipo 1 (RA1) e Tipo 2 (RA2). Os redutores de água do Tipo 1 devem ter redução mínima de 8%, enquanto o Tipo 2 de 15%.

Isaia (2011) destaca que os lignosulfonatos² foram os primeiros aditivos comerciais redutores de água Tipo 1. Pesquisas na década de 1960 levaram ao desenvolvimento dos superplastificantes, aditivos redutores de água Tipo 2, capazes de reduzir até 40% de água na mistura (Ferraz, 2020). Ainda, segundo a autora, os condensados de formaldeído-sulfonatos de naftaleno (NSFC) e de melamina (MSFC)³ foram os primeiros aditivos Tipo 2. Eles melhoraram significativamente a durabilidade do concreto, permitindo sua produção com baixa relação a/c. Na década de 1990, os policarboxilato-poliéster emergiram como uma importante tecnologia de superplastificantes, substituindo o NSFC e o MSFC.

Souza (2022) explica que, quando o cimento entra em contato com a água, há uma tendência à floculação, resultando na retenção de água no interior da mistura, comprometendo a trabalhabilidade do material. Para contornar esse problema, muitas vezes é adicionado mais água à mistura. Hartmann; Helene (2003) complementam, ressaltando que a água aprisionada será liberada algumas horas após o início da hidratação, o que pode aumentar a porosidade e causar o surgimento de fraturas, reduzindo a resistência do material. Para prevenir esses problemas, usa-se aditivos redutores de água, que atuam diretamente nas partículas do cimento durante a hidratação, defloculando-as (Figura 1).

Figura 1: Defloculação das partículas de cimento devido a ação dos aditivos redutores de água.



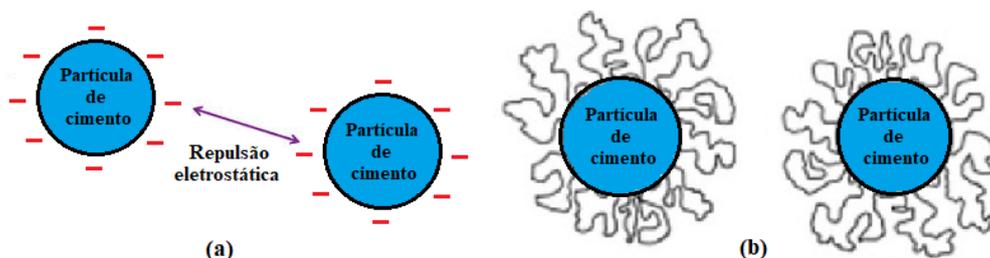
Fonte: Com base em Nunes (2001).

² Polímeros naturais polieletrólitos aniônicos solúveis em água, utilizados como aditivo Tipo 1.

³ Os NSFC e MSFC são polímeros sintéticos utilizados na construção, atuando como aditivos Tipo 2.

Esse processo libera a água aprisionada, reduzindo a quantidade necessária à mistura. Segundo Melo; Martins; Repette (2009), as deflocações eletrostática e estérica⁴ são os processos de deflocação mais importantes (Figura 2).

Figura 2: Deflocação (a) eletrostática e (b) estérica.



Fonte: Com base em Pandolfelli *et al.* (2000).

Jolicoeur; Simard (1998) e Hartmann; Helene (2003) explicam que a deflocação eletrostática ocorre devido à repulsão entre partículas carregadas negativamente devido à ionização dos grupos sulfônicos e carboxílicos presentes após dissolução em água. Isso caracteriza o principal mecanismo de ação dos aditivos lignossulfonato, naftaleno sulfonato de sódio e melamina sulfonato de sódio. Aditivos policarboxilato, além do efeito eletrostático, promovem dispersão por meio da repulsão estérica, criando uma barreira física que impede a aproximação das partículas.

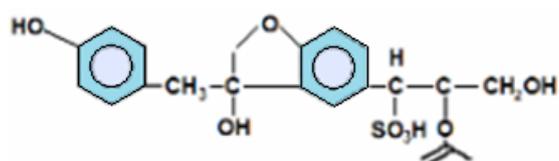
De acordo com Mehta; Monteiro (2014) e Neville (2016), para o aditivo promover a dispersão eficiente das partículas é fundamental a compatibilidade química e física entre o cimento e o aditivo, a adsorção do aditivo na superfície das partículas do cimento e a dosagem adequada do aditivo.

2.2.2.1.1 Aditivos à Base de Lignossulfonato

Utilizados como aditivos em diversos produtos, os lignossulfonatos (Figura 3) têm várias aplicações, incluindo seu uso como dispersantes em materiais como argamassa e concreto. Eles ajudam a melhorar a trabalhabilidade e retardar o tempo de pega.

⁴ Utilização de agentes químicos, como polímeros, para alterar a carga superficial das partículas, tornando-as repulsivas entre si para evitar a aglomeração.

Figura 3: Monômero do lignossulfonato.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

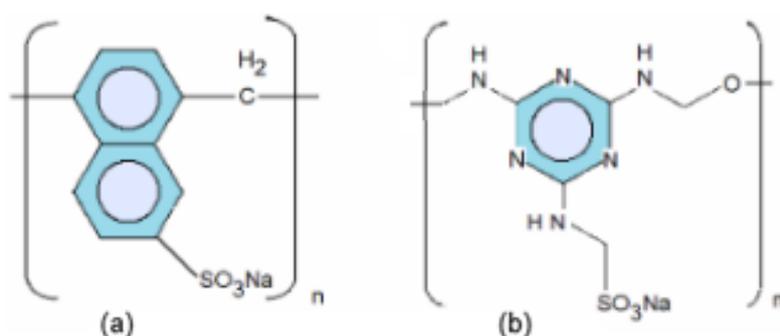
Os aditivos à base de lignossulfonatos são subprodutos da produção de celulose a partir de madeira e lignina. Segundo Mehta; Monteiro (2014), Melo; Martins; Repette (2009), Isaía (2011) e Neville (2016), esses biopolímeros possibilitam uma redução de até 5% no volume de água necessária para a preparação do material. Contudo, devido à presença de açúcares, podem surgir efeitos secundários, como o retardamento do tempo de pega e possível incorporação de ar.

Isaía (2011) explica que, ao entrar em contato com o sistema água-cimento, os grupos polares aniônicos interagem com as cadeias polares do lignossulfonato, levando à sua adsorção na superfície das partículas de cimento. Este processo gera um efeito repulsivo entre as partículas, promovendo assim a defloculação do sistema por meio de interações eletrostáticas.

2.2.2.1.2 Aditivos à Base de Naftaleno ou Melanina Sulfonato

Aditivos à base de naftaleno e melanina sulfonato (Figura 4) são comuns na indústria da construção e desempenham um papel importante na produção de concreto de alta qualidade, onde a resistência e a durabilidade são essenciais.

Figura 4: Monômeros (a) poli-naftaleno sulfonato de sódio e (b) poli-melanina sulfonato de sódio.



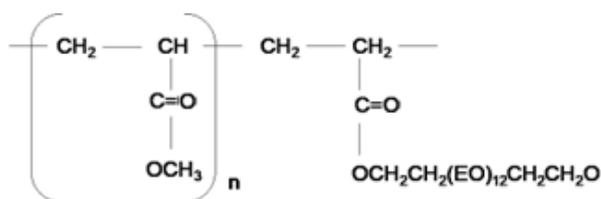
Fonte: Rixon (1999).

De acordo com Melo; Martins; Repette (2009), estes são polímeros sintéticos que possibilitam uma redução de até 12% na quantidade de água utilizada na preparação do concreto, sem afetar o tempo de pega, uma vez que não contêm açúcares. Durante sua ação, a defloculação ocorre por interação eletrostática, com pouca influência de repulsão estérica.

2.2.2.1.3 Aditivo à Base de Policarboxilato

Os aditivos à base de policarboxilato (Figura 5) são frequentes na construção. De acordo com Neville (2016), os policarboxilatos são biopolímeros solúveis em água, sintetizados por um processo complexo de polimerização que gera moléculas longas de alta massa molecular. Suas principais vantagens são melhorar a trabalhabilidade, retardar o tempo de pega e aumentar a durabilidade.

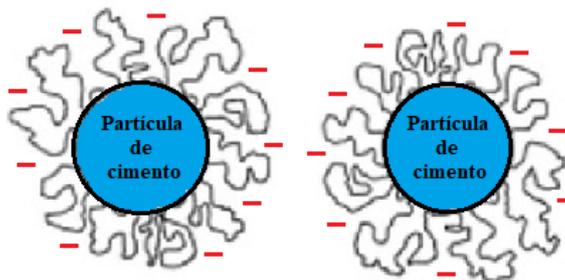
Figura 5: Monômero de Policarboxilato.



Fonte: Rixon (1999).

Melo; Martins; Repette (2009) afirmam que os aditivos à base de policarboxilato possuem um mecanismo de ação bastante eficiente, uma vez que engloba dois processos de defloculação, o estérico, provocado pelas longas cadeias do polímero, e o eletrostático, com menor incidência. O principal efeito consiste na melhoria da distribuição das partículas de cimento, o que melhora a hidratação.

Figura 6: Mecanismo de defloculação eletroestérico.



Fonte: Com base em Alcântara (2016).

Ferraz (2020) esclarece que os aditivos à base de policarboxilato demonstraram ser mais eficientes do que os aditivos à base de naftaleno sulfonato, que, por sua vez, são mais eficazes do que os aditivos à base de lignosulfonatos.

O FLUX-40, utilizado nesta pesquisa, é um aditivo comercial à base de policarboxilato. Ele é um superplastificante de pega normal, em pó, de cor branco leitoso, livre de cloretos, com ph entre 8 a 10 e densidade aparente de 1 a 1,06 g/cm³, indicado para aplicações que exigem alta resistência, desempenho e economia.

Segundo a Pluralquímica, seus principais benefícios são: alta poder de redução de água; produzir concreto de alta resistência; reduzir significativamente a porosidade do concreto; oferecer economia no consumo; por produzir concreto mais densos, ajuda a proteger a armadura; aumentar o tempo de pega da mistura; ser compatível com todos os tipos de cimento Portland disponíveis no mercado; ajudar a melhorar o acabamento do concreto; ajudar a produzir traços mais equilibrados, diminuindo a segregação e a exsudação; ajudar a produzir concretos com diferentes abatimentos e por oferecer rápida resposta plastificante, ajuda na produtividade.

Ainda, de acordo com a Pluralquímica, o FLUX-40 pode ser usado em diversos tipos de concreto, como pré-moldado; aparente; sujeitos a ambientes agressivos; virados na obra; pigmentados e revestimentos cimentícios. A dosagem recomendada varia entre 0,4% e 1,2% da massa de cimento. O processo de preparo deve iniciar misturando o aditivo aos agregados e cimento ainda secos, homogeneizando-os por três minutos. Em seguida, acrescenta-se a água e homogeneiza-se por mais cinco minutos.

O fabricante também destaca que o FLUX-40 não corrige erros de dosagens ou problemas nos materiais, como cimento insuficiente ou agregados de baixa qualidade. Em dias frios, é natural que haja um retardo no início da pega, enquanto em dias quentes e/ou com muito vento, é comum haver perda de Slump ou fissuração no concreto.

2.2.2.2 Retardadores do Tempo de Pega

Neville (2016) explica que retardadores de pega agem diretamente nas reações químicas de hidratação do cimento por defloculação e adsorção, sem modificar a composição dos produtos resultantes. São particularmente úteis em circunstâncias que demandam um tempo maior de manuseio, como na concretagem em áreas remotas, onde o concreto precisa ser transportado até o local, lançado e adensado.

Assim, o uso destes aditivos melhora as características de hidratação das pastas e sua condição de trabalhabilidade, possibilita a concretagem de grandes volumes e torna viável a atividade de concreteiras, possibilitando o transporte em caminhões-betoneira por longos períodos e distâncias.

Mehta; Monteiro (2014), Neville (2016), sugerem que os aditivos retardadores de pega, assim como os redutores de água, alteram o crescimento e a morfologia dos cristais, sendo adsorvidos pela membrana do cimento hidratado. Assim, os aditivos retardam o crescimento dos núcleos de hidróxido de cálcio, o que resulta em uma barreira mais eficaz à continuidade da hidratação do que em uma mistura sem aditivo. Ainda, de acordo com os autores, os retardadores funcionam ao atrasar a dissolução dos cátions e ânions do cimento, sobretudo aqueles com alta taxa inicial de dissolução.

Salvador (2011) *apud* Souza (2022), explica que as teorias para os mecanismos de retardo incluem: adsorção de compostos orgânicos nos grãos de cimento, impedindo a hidratação; formação de precipitados salinos insolúveis nos grãos de cimento; complexação e controle da nucleação dos hidratos.

Martínez; Cincotto (2013) destacam que o retardo da pega pode ser atribuído a uma menor densidade de cadeias laterais presentes na molécula do cimento, o que aumenta sua capacidade de adsorção na partícula de cimento. Moléculas com mais grupos carboxílicos não esterificados retardam as reações em maior proporção. Quando as cadeias laterais são mais curtas, a massa molecular do polímero é menor, resultando em um maior número de moléculas adsorvidas ao cimento quando comparadas com os aditivos que possuem cadeias laterais maiores, mesmo quando dosados em quantidades iguais.

Conforme Araújo (2019), a presença de açúcar na composição é responsável pela ação da maioria dos retardadores de pega. Garcia; Oliveira; Pandolfelli (2007), Mehta; Monteiro (2014) e Neville (2016) afirmam que os efeitos do açúcar variam de acordo com a quantidade utilizada. Uma quantidade pequena de açúcar, cerca de 0,05%, em relação à massa de cimento, age como retardador, causando um atraso na pega de cerca de quatro horas em comparação com a mistura sem açúcar. Por outro lado, uma quantidade maior de açúcar, entre 0,2 e 1% em relação à massa de cimento, poderá impedir a pega do cimento.

2.3 Biopolímeros

2.3.1 Definição, Propriedades e Aplicações

Biopolímeros são polímeros de origem natural, produzidos a partir de matéria-prima extraída de fontes renováveis como plantas e animais (Farias *et al.*, 2016). É importante ressaltar que biopolímeros também podem ser sintetizados a partir de materiais biológicos (Brito *et al.*, 2011).

Por ser uma fonte alternativa sustentável aos polímeros sintéticos derivados do petróleo e, devido às suas características e propriedades como biodegradabilidade, biocompatibilidade e versatilidade, os biopolímeros têm despertado interesse no meio acadêmico e se tornando atrativo para diversas aplicações (Brito *et al.*, 2011 e Habitzreuter *et al.*, 2022).

Meio as preocupações ambientais e à necessidade de reduzir a dependência de recursos não renováveis faz com que os biopolímeros sejam considerados uma alternativa amigável ao meio ambiente, podendo contribuir para minimizar impactos ambientais associados à sua produção e descarte.

A importância de usar biopolímeros como alternativa aos polímeros sintéticos reside, principalmente, por ser um material biodegradável, obtido de fontes naturais e renováveis, onde sua produção requer menor custo energético e gera menos emissão de gases causadores do efeito estufa, promovendo um ciclo mais sustentável ambientalmente, além de apresentar potencial para o desenvolvimento socioeconômico com geração de emprego e renda (Brito *et al.*, 2011).

Os biopolímeros apresentam potencial de aplicação em diferentes setores, como embalagens para alimentos e bebidas, produtos médicos hospitalares na fabricação de materiais para suturas e próteses e, eletroeletrônicos na produção de baterias, podendo ser explorado também na indústria da construção (Coltro, Sarantópoulos e Ildebrando, 2005; Brito *et al.*, 2011 e Habitzreuter *et al.*, 2022).

Como exemplo de produções colaborativas sobre o uso de biopolímeros na construção, podem ser citadas as pesquisas desenvolvidas por Shanmugavel *et al.* (2020), que investiga a interação do biopolímero de cacto com pasta de cimento para produção de concreto sustentável. Ramachandran (2021), que foca na estabilização de solo usando biopolímero bacteriano. Ni *et al.* (2021), que analisa a otimização de misturas de areia-argila com biopolímeros de goma Xantana. Benzerara *et al.* (2021), que trata do desenvolvimento de materiais de construção sustentáveis reforçados com fibras naturais e biopolímeros. Alqahtani (2022), que trabalha no desenvolvimento de

agregado à base de plástico PET compósito para concreto leve verde. Nwankwo *et al.* (2022), que utilizam biopolímeros em compósitos com fibras de vidro reforçadas com plástico (FRP) para reforçar estruturas de concreto. E, Losini *et al.* (2023), que avaliam o impacto dos biopolímeros nas propriedades higrotérmicas da taipa de pilão.

Embora apresente vantagens em relação aos polímeros sintéticos, é importante ressaltar que o estudo de biopolímeros com aplicação na construção civil ainda está em evolução. Impulsionado pela busca por alternativas mais ecológicas na construção, pesquisas na área pode levar a avanços, inovações e a promoção de uma economia circular e sustentável. Contudo, deve-se levar em consideração desafios como a eficiência e desempenho a que o produto é destinado, a viabilidade e o custo de produção, e a competição com produtos tradicionais comumente comercializados.

Como aplicação promissora na construção civil, este trabalho foca na utilização de biopolímeros derivados do cacto Mandacaru (*Creus Jamacaru*) como aditivo para argamassas, capaz de melhorar algumas propriedades como trabalhabilidade e impermeabilidade, sem prejudicar sua resistência mecânica e durabilidade, tornando-as mais eficientes e adequadas para aplicações na construção.

2.3.2 Cactos como Fonte de Biopolímeros

Os cactos, pertencentes à família das cactáceas, são plantas resilientes, nativas predominantemente das américas (Guerrero, 2019). Embora algumas espécies também possam ser encontradas em outras partes do mundo devido ao seu cultivo. Essas plantas exibem características distintas, como a capacidade de se adaptar a ambientes áridos e armazenar água em seus tecidos (Santos, 2014, Pérez-Molohe-Balch *et al.*, 2015 e Salengue, 2023). Atributos que conferem aos cactos a capacidade de exigir menos recursos hídricos e energéticos em comparação com outras culturas.

Outras particularidades dos cactos incluem folhas reduzidas a espinhos para minimizar a perda de água por transpiração e dissuadir animais herbívoros a se alimentarem de suas partes suculentas (Ribeiro, 2008 e Santos, 2014).

Devido às suas características e origem natural, os cactos surgem como fontes renováveis de biopolímeros, conforme caracterizado no estudo de Souza (2022), e têm despertado interesse no meio acadêmico. Chandra *et al.* (1998) indicam que os primeiros estudos foram realizados com a Palma Forrageira (*Opuntia Ficus-Indica*). Esses estudos envolveram a incorporação da mucilagem em pastas de cimento e de

fibras em argamassas e concreto, trazendo melhoria na trabalhabilidade, na resistência mecânica e na durabilidade.

Outros estudos, como os conduzidos por Hernández-Zaragoza *et al.* (2008), Monteiro (2015), Martínez e Molina *et al.* (2015) e Mandujano-Ruíz *et al.* (2017) apresentaram alterações nas propriedades da argamassa no seu estado fresco e endurecido. Hernández-Zaragoza *et al.* (2008) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de argamassas e concretos reforçados com fibras de cacto, encontrando que as fibras melhoraram significativamente a resistência à tração e a flexibilidade, além de reduzir a formação de microfissuras, melhorando a integridade estrutural ao longo do tempo. Martínez e Molina *et al.* (2015) demonstraram que a incorporação de fibras de cacto na argamassa aumenta a plasticidade e melhora o controle de retração e absorção de água, reduzindo a porosidade e aumentando a resistência mecânica e a durabilidade. O estudo abordou a sustentabilidade e o desempenho ambiental do uso de cactos, destacando que o cacto, uma planta de rápido crescimento, é uma alternativa sustentável e econômica para a construção. Mandujano-Ruíz *et al.* (2017) analisaram o impacto das fibras de cacto na resistência ao desgaste e nas propriedades térmicas de concretos, constando que as fibras não apenas aumentam a resistência ao desgaste, mas também melhoram o isolamento térmico, tornando os materiais mais adequados para climas extremos e construções de alta durabilidade. Monteiro (2015) estudou o uso da mucilagem de cacto como aditivo em misturas de concreto, revelando que a mucilagem atua como plastificante, melhorando a trabalhabilidade e a retenção de água do concreto fresco, além de contribuir para uma microestrutura mais densa e uniforme, o que aumenta a resistência mecânica e a durabilidade. Souza *et al.* (2019) exploraram as propriedades autoadensáveis de concretos modificados com mucilagem de cacto, descobrindo que a mucilagem melhora a fluidez e a estabilidade da mistura sem comprometer a resistência mecânica. Além disso, a mucilagem reduz a segregação e exsudação, resultando em um concreto de melhor qualidade.

Os biopolímeros derivados de cactos são extraídos na forma de substância gelatinosa denominada mucilagem, e podem ser empregados de duas formas distintas, em gel ou em pó. Conforme informado por Souza (2022), em virtude da mucilagem ser de natureza orgânica, sua forma de gel permite fácil deterioração. No entanto, a forma em pó surge como alternativa mais vantajosa, visto que, proporciona maior resistência no armazenamento e benefícios mais notáveis nas propriedades.

Segundo Cavalcante, Teles, Machado (2013), existe uma diversidade de espécies de cactos. De acordo com Costa Santos (2016), dentre as diversas espécies de cactos reconhecidas em ocorrência no semiárido do nordeste brasileiro, há predominância nas cactáceas do gênero *Cereus*, *Opuntia* e *Pilosocereus*, dos quais fazem parte o Mandacaru (*Cereus Jamacaru*), o Facheiro (*Pilosocereus pachycladus*), o Xiquexique (*Pilosocereus gounellei*), e a Palma Forrageira (*Opuntia fícus-indica*). A Figura 7 ilustra os cactos Mandacaru (a), Facheiro (b), Xiquexique (c) e Palma Forrageira (d) para simples conhecimento.



Fonte: Com base em Ferreira; Holanda; Cavalcante (2011) e Rodrigues (2016).

Apesar de apresentar relevante potencial em diversas aplicações nos mais variados setores, os cactos são comumente subutilizados, sendo usados como plantas ornamentais e fonte de alimento para criação de animais de rebanho (Magalhães, 2009, Souza *et al.*, 2012 e Costa Santos, 2016). Logo, diante da crescente demanda por materiais inovadores e mais sustentáveis na construção civil, explorar esse recurso como produtos de alto valor agregado na indústria da construção é desafiador e pode ser promissor, capaz de abrir oportunidades para novos negócios e investimentos nesse campo.

O desenvolvimento de biopolímeros a base de cactos com aplicação na construção civil é algo novo, e pesquisas nesse campo ainda estão em andamento. Sua viabilidade comercial vai depender de fatores como desempenho após aplicação, disponibilidade de recursos e fontes de matéria-prima, facilidade de produção e consumo, relevância ambiental e socioeconômica e competitividade com outros produtos.

Com base em Chiappero, Supische (2006) e Sáenz *et al.* (2013), as mucilagens extraídas de algumas espécies de cactos são ricas em biopolímeros e apresentam propriedades interessantes que as tornam valiosas em diversas aplicações. Dentre as principais propriedades dos biopolímeros obtidos dos cactos podemos destacar a

retenção de água, biodegradabilidade e biocompatibilidade (Food Ingredientes Brasil, 2014 e Vieira *et al.*, 2019). A capacidade da mucilagem dos cactos reter grande quantidade de água é característica essencial para a sobrevivência dessas plantas em ambientes áridos. Essa propriedade pode ser explorada em aplicações que requerem materiais resistentes a água.

Os biopolímeros obtidos da mucilagem dos cactos são naturais e possuem capacidade de serem biodegradáveis. Isso significa que, após seu descarte, podem ser decompostos naturalmente por microrganismo. Característica valiosa para aplicações em materiais como embalagens. Além disso, os biopolímeros podem ser biocompatíveis, característica que os tornam adequados para aplicações médicas como na fabricação de próteses, uma vez que podem ter baixa probabilidade de causar reações adversas no corpo humano.

As propriedades dos biopolímeros derivados de cactos podem variar com a espécie da cactácea e as condições naturais e de cultivo, como também com o método de extração. Além disso, é importante lembrar que o desenvolvimento e a aplicação de biopolímeros derivados de cactos ainda está em fase de pesquisas para maior compreensão de suas propriedades e seu potencial, a fim de melhor explorar suas aplicações.

2.3.3 Aditivos à Base de Cactos

De acordo com o que foi apresentado no estudo de Souza (2022),

“a utilização de aditivos naturais em materiais cimentícios não é recente, e já se consolidou como uma opção viável para minimizar os impactos ambientais causados principalmente pela produção de aditivos sintéticos, a exemplo dos redutores de água (tipo 1 e tipo 2), que, apesar de melhorarem as diferentes propriedades das argamassas e concretos, por vezes são poluentes e de elevado custo”.

Giammusso (1992) *apud* Souza (2022) indica que os romanos adicionavam cloreto de cálcio como acelerador de pega, e açúcar como retardador nos concretos e argamassas. Além disso, “no que tange aos insumos vegetais, a utilização desses materiais era recorrente em construções da antiguidade, entre eles está o uso do cacto ou a chamada palma forrageira, essa foi primitivamente utilizada pelos Astecas em argamassas de restauração” (Cárdenas; Arguelles; Goycoolea, 1998, *apud* Souza, 2022).

Pelo exposto, a busca por materiais de construção naturais, alternativos e eficientes não é recente, sendo uma preocupação antiga e crescente na indústria da construção. Os aditivos para argamassas desempenham um papel significativo na melhoria das propriedades e no desempenho desses materiais, sendo importante considerar não apenas a eficácia técnica, mas também os impactos ambientais e socioeconômicos.

Neste contexto, este estudo visa explorar a viabilidade e benefícios do aditivo a base do cacto Mandacaru para argamassas, uma alternativa eficiente e promissora aos aditivos tradicionais derivados de fontes não renováveis. Esses aditivos, além de serem renováveis, demonstram propriedades benéficas para as argamassas.

Diversos estudos, como os de Hernández-Zaragoza *et al.* (2008), Monteiro (2015); Mandujano-Ruíz *et al.* (2017), Martínez; Molina *et al.* (2015) e Souza *et al.* (2019), evidenciaram os benefícios dos aditivos a base de cactos, como aumento de resistência mecânica, diminuição de absorção de água, alterações na resistência à flexão e compressão, melhoria na trabalhabilidade e tempo de pega, controle de retração e absorção de água, e melhor adesão e resistência à penetração de água.

Deste modo, os aditivos para argamassa à base de cactos representam uma alternativa promissora na indústria da construção, melhorando as propriedades das argamassas e contribuindo para a preservação do meio ambiente ao reduzir a dependência de recursos não renováveis. Diante disso, é importante explorar o desenvolvimento desses aditivos para promover uma construção mais responsável.

2.3.4 Processos de Transformação da Mucilagem em Pó

Pelo fato da mucilagem ser um material orgânico, quando em sua forma natural de gel, possui elevada atividade em água com alta suscetibilidade ao ataque microbiano, o que resulta em rápida deterioração. Isso se torna um ponto negativo para o armazenamento do aditivo. Para resolver este problema, uma abordagem pode ser adotada, transformar a mucilagem em pó. Essa forma em pó possui menor atividade em água, o que contribui para uma vida útil mais longa (León-Martínez *et al.*, 2010).

A transformação da mucilagem extraída dos cactos em forma de pó pode ser realizada por diferentes métodos, que se baseiam em técnicas tradicionais de desidratação de alimentos que se mostram eficazes na preservação de materiais orgânicos. Os principais são *Spray Drying*, Liofilização e Secagem em Estufa.

A Secagem em Estufa baseia-se na remoção da água por aquecimento em estufa. É um método lento que pode levar de 3 a 24 horas em temperaturas variáveis conforme o material a ser desidratado. Em seguida, o material desidratado é moído em forma de pó fino (Souza, 2022).

Liofilização é um processo de secagem que ocorre por sublimação. Ele consiste em congelar o material inicialmente e, em seguida, colocá-lo no liofilizador, onde é submetido a condições muito baixas de pressões (quase vácuo), o que permite que o gelo presente no material passe diretamente do estado sólido para o gasoso (Souza, 2022). Isso remove a umidade do material sem causar danos significativos às suas estruturas.

No processo de secagem por *Spray Drying* (Figura 8), o líquido a ser seco é pulverizado em pequenas gotas através de um bico atomizador, ampliando sua área de superfície para facilitar a evaporação rápida da umidade. Essas gotas são então expostas a um fluxo de ar quente, causando a evaporação da umidade e a formação de partículas sólidas finas. Em seguida, as partículas são separadas do ar através de dispositivos e o resultado final é coletado na forma de um pó (León-Martinez *et al.*, 2010).

Figura 8: Máquina *Spray Drying*.



Fonte: Autor (2023).

2.3.5 Cacto Mandacaru

O cacto Mandacaru, cujo nome científico é *Cereus Jamacaru* (Figura 9), foi escolhido como fonte de matéria-prima para esta pesquisa, devido às suas mucilagens

ricas em biopolímeros. Por ser uma espécie nativa da caatinga do Brasil, encontrada principalmente nas regiões do Nordeste.

Figura 9: Cacto Mandacaru (*Cereus Jamacaru*).



Fonte: Autor (2023).

O Mandacaru é um cacto de porte grande, com tronco robusto, podendo atingir até 10 metros de altura. Essa planta possui ramificações em forma de braços que podem se desenvolver ao longo do tempo, e espinhos que ajudam na proteção contra predadores e a perda excessiva de água. Além disso, produzem flores atraentes e perfumadas que desabrocham geralmente durante a noite e frutos comestíveis (Leal Sales *et al.*, 2014).

Em razão da sua grande capacidade de armazenar água, o Mandacaru é usado como alimento para criação de rebanhos em tempos de secas. Além disso, possui também aplicações tradicionais e medicinais em algumas comunidades. Suas raízes e caule são conhecidos por suas propriedades diuréticas e benéficas para o coração. Também demonstra eficácia no tratamento de diversas doenças, como sífilis, diabetes, cálculos vesiculares e problemas uretrais. A planta também exibe propriedades vasodilatadoras e influencia a liberação de norepinefrina⁵ em terminações nervosas (Zara; Thomazini; Lenz, 2012). O cacto Mandacaru também é frequentemente empregado como planta ornamental devido à sua notável resistência a climas secos, sua aparência única e à presença de flores atraentes e perfumadas.

A escolha do cacto Mandacaru como fonte de matéria-prima para produção de aditivos para as misturas cimentícias está relacionada à quantidade de mucilagem extraída e a facilidade de acesso. Segundo Souza (2022), de acordo com a análise realizada pela EMBRAPA, “a mucilagem é composta principalmente de polissacarídeos

⁵ Fármaco utilizado para a elevação de pressão arterial.

com composição química semelhante à de pectinas $[C(H_2O)]_n$ ". Esses polissacarídeos são conhecidos por sua capacidade aglutinante.

Embora existam alguns estudos relacionadas a adição das mucilagens de cactos em pastas de gesso e cimento (Magalhães, Almeida, 2010, Silva, 2022), argamassa de cimento (Oliveira, 2018; Souza, 2022) e concretos (Huerta Maza, 2020 e SOUZA *et al.*, 2018), Souza (2022) destaca que não foram encontrados trabalhos na literatura sobre a utilização da mucilagem de cacto em argamassas de cimento com um comportamento similar ao do Mandacaru, e os métodos para extrair a mucilagem ainda são pouco explorados.

Contudo, Souza (2022), ainda destaca os métodos por congelamento, utilizado por Monteiro (2015), e por cocção, baseado nos estudos de Acosta, Barrita (2007), Magalhães (2009) e León-Martínez, Menez-Lagunas, Rodriguez-Ramirez (2010).

Na extração por congelamento, após coletado, limpo e tratado, o cacto é cortado em pequenos pedaços e congelado. O congelamento faz com que as células se rompam e liberem a mucilagem. Em seguida, os pedaços de cactos ainda congelados são colocados em peneiras largas para separação da mucilagem por descongelamento, descartando a parte sólida retida na peneira e aproveitando a parte líquida passante. Na cocção, o cacto após tratamento é triturado e, em seguida, cozido em água. O calor ajuda a quebrar as paredes celulares e liberar a mucilagem. A solução resultante é filtrada para separar a mucilagem da parte sólida do material.

Nesta investigação, foi adotado o método por cocção, considerado por Souza (2022) mais simples e eficiente. Acosta, Barrita (2007) ainda atentam para a relevância da conversão da mucilagem extraída em pó como forma de estabilização, devido à alta sensibilidade a ataques microbianos quando mantida no estado gelatinoso.

2.4 Métodos de Envelhecimento

Os revestimentos argamassados das fachadas das construções são componentes que ficam expostos ao ambiente e às mudanças climáticas. Processos naturais como umidade, variações de temperatura e radiação solar afetam a integridade desses elementos levando-os a degradação ao longo do tempo (Vieira, 2019).

As manifestações patológicas em fachadas, resultantes da influência dos fenômenos atmosféricos, vão desde um comprometimento estético, sem maiores riscos, passando por fissuras, infiltrações e manchamentos mais

acentuados, chegando até aos casos mais críticos de descolamentos e deslocamentos dos revestimentos (Freitas, Carasek e Cascudo, 2014, p. 2).

É importante conhecer o comportamento dos materiais de construção expostos a alterações climáticas para sua adequada aplicação, sem comprometer sua durabilidade. Para isso, é interessante compreender e utilizar métodos de envelhecimento. No entanto, é importante estabelecer parâmetros confiáveis que simulem de maneira adequada as condições reais às quais os materiais estarão expostos, garantindo que nenhuma degradação ocorra que não seja comparável àquela que ocorreria na exposição natural (Sentena, 2015).

Até agora nesta investigação, o autor não encontrou uma norma brasileira específica à abordagem de métodos macros para envelhecimento da argamassa, exceto, a NBR 15575-4 (ABNT, 2021), que trata da verificação do comportamento de sistemas de vedações verticais internas e externas a exposição de calor e choque térmico. No entanto, John, Sato (2006) *apud* Bitencourt (2014), apresentam em seu estudo algumas estratégias que podem ser aplicadas para estimar a durabilidade de um material dentro de um período de tempo razoável, são elas: envelhecimento em uso, envelhecimento natural, e envelhecimento acelerado.

2.4.1 Envelhecimento em Uso

O ensaio de envelhecimento em uso é um procedimento realizado para avaliar como um material se comporta ao longo do tempo quando submetida a condições reais de exposição e utilização. Para John; Sato (2006) *apud* Bitencourt (2014, p. 48), “a exposição de materiais em construções submetidas a condições reais de uso é uma forma interessante de acompanhar a degradação de produtos”. Contudo, os autores argumentam que, além de ser um processo lento, muitas vezes não é possível medir com precisão a intensidade dos fatores que causam a deterioração do material.

2.4.2 Envelhecimento Natural

O ensaio de envelhecimento natural consiste em expor amostras a processos naturais ao longo de um período prolongado de tempo para avaliar como elas se comportam e degradam sob essas circunstâncias. Esse tipo de ensaio usa as condições

naturais para entender como os materiais sofrem alterações devido a fatores como umidade, variações de temperatura, radiação solar, dentre outros.

John, Sato (2006) *apud* Bitencourt (2014), explicam que a exposição de amostras a condições naturais é uma técnica bastante comum. Neste ensaio, são constantemente monitoradas diversas condições como temperatura, umidade, radiação solar, ações do vento, entre outras. O indicador de degradação é avaliado periodicamente, o que possibilita a correlação entre os agentes de degradação e as alterações de desempenho dos materiais. É importante destacar que este método permite realizar comparações mesmo quando os ensaios são realizados em locais distintos. Contudo, é necessário salientar que além de ser um processo que requer bastante tempo, os fatores relacionados com o uso dos materiais na construção não são avaliados.

2.4.3 Envelhecimento Acelerado

O ensaio de envelhecimento acelerado é um processo pelo qual a argamassa sofre deterioração de forma mais rápida do que nas condições naturais e de uso. Esse envelhecimento pode ser causado por uma variedade de fatores, incluindo exposição a condições climáticas extremas, chuva ácida, variações de temperatura, umidade, radiação solar, entre outros (Silva *et al.* 2021).

“Os ensaios de envelhecimento acelerado são realizados em laboratórios, simulando a ação de agentes de degradação em intensidades muito superiores às esperadas em condições reais de uso” (John; Sato, 2006 *apud* Bitencourt, 2014, p. 47). Os autores também destacam que não existem ensaios de envelhecimento acelerado universais. Eles devem ser conduzidos através de uma combinação de eventos de degradação conforme as necessidades do estudo e as possibilidades de ensaios.

Existem vários equipamentos utilizados neste tipo de ensaio. Equipamentos que expõem a amostra a ciclos de calor, água e radiação UV (como Weather – Ometer) e às câmaras de C-UV, que combinam condensação com radiação ultravioleta, são utilizadas em estudos de polímeros. As câmaras de carbonatação acelerada, onde a umidade é controlada e o teor de CO₂ é superior ao da atmosfera (algumas vezes com valor até 100% acima dos encontrados na atmosfera), a pressão atmosférica ou até a alta pressão, permitem acelerar as reações de carbonatação de materiais cimentícios (John; Sato, 2006 *apud* Bitencourt, 2014, p. 47).

É importante destacar que os resultados dos ensaios de envelhecimento fornecem informações valiosas sobre a resistência, durabilidade e desempenho da

argamassa ao longo do tempo. Isso ajuda a selecionar os materiais mais adequados para diferentes aplicações. Além disso, esses ensaios auxiliam no desenvolvimento de novos materiais e na melhoria dos produtos existentes.

Segundo Medeiros (2018, p. 44 e 45),

O choque térmico diz respeito à variação brusca de temperatura em um determinado material. A ação deste fenômeno em materiais ou componentes das construções é amplamente estudada e sua reprodução em laboratório é feita através de métodos de ensaio de choques térmicos normatizados. [...] o choque térmico não é um fenômeno atípico, e pode ocorrer, principalmente, pelas condições de uso da edificação ou pela exposição ao meio ambiente (ciclos de chuva e aquecimento solar). A ocorrência do choque térmico na argamassa pode provocar tensões de tração e propagação de fissuras de ordem microscópica no substrato. Tensões estas prejudiciais a argamassa devido à sua baixa resistência a tração.

Em pesquisas conduzidas para avaliar o impacto do choque térmico na argamassa, Sentena (2018) e Hayashi *et al.* (1993) submeteram amostras a ciclos de choque térmico, aplicando de 30 a 100 ciclos. Durante o processo, monitoraram deformações superficiais e analisaram a resistência a tração, concluindo que o aumento no número de ciclos resulta em uma diminuição na resistência.

No estudo de Miranda, Selmo (2003), foram aplicados 10 ciclos descontínuos de choque térmico para avaliar o desempenho de argamassas produzidas com resíduos de demolição reciclados. Os autores constaram que o choque térmico influenciou no surgimento de fissuras de formas variadas.

Já nos estudos de Temoche (2009, 2019), foram aplicados 30 ciclos de choque térmico em minipainéis revestidos com argamassa de cimento e areia na proporção em volume de 1:4. Após testes de resistência, foi observado que a exposição a choques térmicos potencializa a degradação da argamassa, resultando na redução de sua resistência e durabilidade.

Portanto, constatado que, segundo os autores supracitados, o choque térmico afeta negativamente na resistência e durabilidade da argamassa, é importante destacar que este procedimento foi fundamental na verificação da manutenção das propriedades da argamassa ao longo do tempo, garantindo, assim, a sua qualidade.

Em resumo, a revisão bibliográfica realizada aborda elementos necessários para promover uma compreensão ampla e atualizada sobre diversos aspectos relacionados aos biopolímeros, sua fonte nos cactos, a argamassa de cimento Portland, o

envelhecimento de elementos de construção e os aditivos para argamassas. Os biopolímeros despertam interesse devido às suas propriedades renováveis e biodegradáveis, oferecendo uma alternativa promissora aos polímeros convencionais. A exploração dos cactos como fonte de biopolímeros representa uma abordagem inovadora para a produção de materiais biodegradáveis.

No contexto da construção, a argamassa de cimento Portland é amplamente utilizada, mas os desafios relacionados à sua resistência e durabilidade têm impulsionado a busca por soluções alternativas e mais eficientes. A realização de ensaios de envelhecimento acelerado, como ciclos de choques térmicos, é importante para avaliar o comportamento da argamassa ao longo do tempo, simulando condições adversas com a finalidade de antecipar possíveis problemas de degradação. A combinação entre biopolímeros e argamassas pode oferecer uma abordagem inovadora e inclusiva para o desenvolvimento de argamassas resistentes e duráveis, enquanto as técnicas de envelhecimento acelerado permitem avaliar o desempenho e a durabilidade do material, essencial para assegurar a confiabilidade da pesquisa.

Portanto, a integração de biopolímeros com argamassas, tendo o cacto como fonte de matéria-prima para extração do biopolímero, mostra-se como uma estratégia inovadora e promissora, com o potencial de transformar a indústria da construção, promovendo sustentabilidade socioeconômica e ambiental.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local de Desenvolvimento da Pesquisa

Sob a supervisão e orientação do professor pesquisador Dr. Heber Sivini Ferreira, e coorientação da Dra. Gabriella Cavalcante de Souza, a pesquisa foi conduzida no Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), *Campus* João Pessoa, e no Laboratório de Materiais do IFPB, *Campus* João Pessoa, durante o período de 14 de agosto de 2023 a 25 de outubro de 2024. Durante esse período, foram utilizados recurso e equipamentos disponíveis nos laboratórios dos departamentos de Engenharia de Materiais, Engenharia Química, Engenharia Mecânica e Engenharia Civil. As etapas da pesquisa foram realizadas nos seguintes laboratórios:

- (I) Laboratório de Purificação e Aspersão de Materiais Argilosos (LAPAMA) - Neste laboratório, ocorreu a pesagem, tratamento e secagem para obtenção do aditivo em pó.
- (II) Laboratório de Termodinâmica (LT) – Aqui foi realizado o processo de trituração do cacto.
- (III) Laboratório de Produtos Fermentados e Destilados (LPFD) – Neste laboratório, ocorreu o aquecimento do material triturado e extração da mucilagem.
- (IV) Laboratório de Materiais e Produtos Cerâmicos (LMPC) – Neste local, foram preparadas as argamassas e amostras necessárias para a pesquisa.
- (V) Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) – Este laboratório foi responsável pela realização dos ensaios de compressão axial.
- (VI) Laboratório de Materiais (LAB UA1) do IFPB – Neste laboratório foram realizados os ensaios de tração na flexão estática.
- (VII) Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) da UFPB – Foi neste laboratório que foram realizadas as análises MEV e DRX.

3.2 Descrição dos Materiais

3.2.1 Aglomerante

Na preparação das argamassas usadas na confecção das amostras analisadas nesta pesquisa, foi utilizado como aglomerante o cimento Portland CP V – ARI de alta resistência inicial, da marca Nacional, conforme ilustrado na Figura 10. Optou-se por utilizar esse tipo de cimento devido à sua capacidade de conferir uma rápida resistência a argamassa em um curto espaço de tempo.

Figura 10: Cimento usado no estudo, Portland CPV – ARI.



Fonte: Autor (2023).

O Quadro 6 apresenta os limites de composição do cimento Portland CPV – ARI em porcentagem de massa.

Quadro 6: Limites de composição do cimento Portland CPV – ARI.

Designação normatizada	Sigla	Classe de resistência	Componentes (% em massa)			
			Clinker + Sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland de alta resistência inicial	CPV	ARI	90 - 100	0	0	0 - 10

Fonte: NBR 16697, (ABNT, 2018).

A quantidade de aglomerante necessária para os ensaios de compressão e flexão foi calculada em unidades de massa, com base nas dimensões dos moldes cilíndricos e prismáticos usados na confecção dos corpos de prova, conforme estabelecido na NBR 13279 (ABNT, 2005). O cálculo levou em conta a massa unitária do cimento Portland CPV-ARI, de $1,35 \frac{g}{cm^3}$, o traço em massa, o tipo de amostras e as quantidades requeridas.

3.2.2 Agregado

A areia média de rio (Figura 11) foi o agregado utilizado na preparação das argamassas. Essa areia foi adquirida em uma loja de materiais de Construção na Cidade de João Pessoa-PB.

Figura 11: Sacos com areia lavada natural.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), antes de sua utilização na preparação da argamassa, a areia passou por um processo de secagem em estufa a uma temperatura em cerca de 105°C , pelo período de 24 horas. Esse procedimento foi realizado para evitar que a umidade presente na areia influenciasse nos resultados. Após a etapa de secagem, a areia foi resfriada a temperatura ambiente ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$) e, em seguida, peneirada em uma peneira nº 10, com abertura de 2,0 mm. Esse processo foi adotado para obter uma distribuição mais uniforme dos grãos de areia.

Posteriormente, realizou-se a determinação da massa unitária da areia baseado na NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para isso, um recipiente plástico tipo becker, com capacidade de 1.000 ml, foi pesado seco e preenchido com a areia previamente seca. Com base no resultado da pesagem e considerando que a massa unitária é definida como o quociente entre a massa do agregado e o volume ocupado no recipiente, conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), foi determinada uma massa de unitária de $1,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. A partir desse valor, e levando em conta o traço em massa, o tipo de amostras e as quantidades requeridas, foi possível calcular a quantidade de areia necessária para o estudo.

3.2.3 Aditivo

Foram utilizados dois tipos de aditivos para a preparação das argamassas e produção dos corpos de prova. O primeiro foi o biopolímero em pó extraído da mucilagem do cacto Mandacaru, obtido conforme mostrado no item 3.3.1. O segundo foi o superplastificante FLUX-40.

O FLUX-40 é aditivo comercial à base de policarboxilato, na forma de pó branco, com densidade aparente entre 1 e 1,06 g/cm³, livre de cloretos e com ph entre 8 a 10, indicado para aplicações que exigem alta resistência, desempenho e economia. Enquanto o pó de Mandacaru, aditivo investigado nesta pesquisa, tem a aparência muito fina com coloração marrom clara.

Atendendo a NBR 11768 (ABNT, 2019), que limita em 3% a dosagem de aditivos incorporadores de ar à argamassa, e 5% os demais, foram usadas dosagens dadas em percentuais de aditivos em relação a quantidade em massa de aglomerante.

Para facilitar o uso das informações em discussões futuras, as concentrações de aditivos utilizadas nas argamassas foram baseadas no estudo de Souza (2022) e classificadas neste trabalho como R, A, B, C e D. Essas designações refere-se às argamassas aditivadas com o pó de Mandacaru nas concentrações 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%, respectivamente. As aditivadas com FLUX-40, nas mesmas concentrações, foram nomeadas como A', B', C' e D'. A argamassa de referência é identificada como R (0% - sem aditivo). Os detalhes dessa classificação estão presentes no Quadro 7.

Quadro 7: Classificação das misturas e concentrações de aditivos.

#	Misturas				
Aditivadas com pó de mandacaru	R	A	B	C	D
Aditivadas com FLUX-40	R	A'	B'	C'	D'
Concentração de aditivo	0%	0,0125%	0,1%	0,5%	1,0%

Fonte: Com base em Souza (2022).

Considerando as concentrações de aditivos em relação a massa do aglomerante e a quantidade do cimento, a quantidade total de aditivo para o estudo foi calculada.

3.2.4 Água

A água utilizada nesta pesquisa foi fornecida pela rede de distribuição do Centro de Tecnologia da UFPB *Campus* João Pessoa-PB e passou pelo processo de destilação no laboratório LAPAMA (Figura 12).

Figura 12: Destilador.



Fonte: Autor (2023).

A quantidade em massa de água necessária na preparação das argamassas para a produção dos corpos de prova foi calculada com base na relação água/cimento de 0,42.

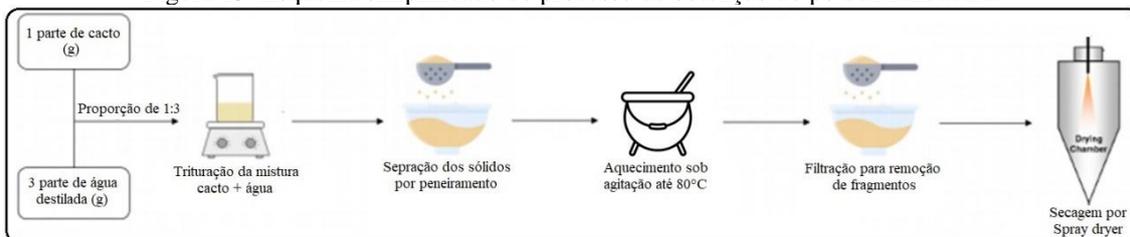
3.3 Produção das Amostras

3.3.1 Obtenção do Pó de Mandacaru

O aditivo em pó utilizado nesta pesquisa foi obtido a partir da mucilagem extraída do cacto da espécie *Cereus Jamacaru*, popularmente conhecido como Madacaru, coletado na rua Tito Silva, no bairro Castelo Branco I, em João Pessoa-PB.

De acordo com Souza (2022) e Silva (2022), o processo de obtenção desse aditivo envolve quatro etapas distintas: coleta ou colheita, tratamento, extração e secagem. A Figura 13 mostra de forma simplificada o esquema que representa o processo de produção do aditivo biopolimérico na forma de pó.

Figura 13: Esquema simplificado do processo de obtenção do pó de Mandacaru.



Fonte: Com base em Souza (2022).

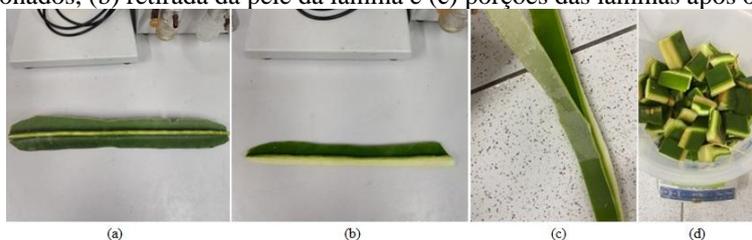
3.3.1.1 Coleta

Durante a coleta foram utilizados luvas para garantir a segurança, facão para o corte, e balde para o armazenamento e transporte. Foram priorizados para o corte os ramos sem deformidades, isentos de fungos e com aspectos jovens e suculento. Visando evitar o desperdício da mucilagem, a colheita foi feita com apenas uma única área de corte. Após a coleta, todo o material foi levado ao Laboratório LAPAMA e pesado.

3.3.1.2 Tratamento

Após a coleta, ainda no laboratório LAPAMA, deu-se início ao tratamento dos ramos coletados. O processo envolveu a remoção dos espinhos por meio de uma faca, e a eliminação de quaisquer impurezas presentes nas peças utilizando um pano limpo. Em seguida, os ramos foram seccionados ao longo do seu eixo longitudinal, separando as lâminas para facilitar a remoção da epiderme. Retirada a pele, as lâminas foram cortadas em porções menores, em preparação para o processo de trituração (Figura 14).

Figura 14: Tratamento dos ramos do cacto Mandacaru. (a) ramos após remoção dos espinhos, (b) ramos seccionados, (b) retirada da pele da lâmina e (c) porções das lâminas após o corte.



Fonte: Autor (2023).

As partes cortadas das lâminas foram pesadas e depois colocadas dentro de uma bombona de 30 litros. Junto com os segmentos de cacto cortados, que foram colocados dentro da bombona, adicionou-se água destilada na proporção de 3 partes de massa de água para cada parte de massa do cacto, ou seja, uma proporção de 3:1 em massa. A Figura 15 mostra a bombona contendo os pedaços de cactos juntos com a água.

Figura 15: Bobona com as lâminas de cacto cortadas e água.



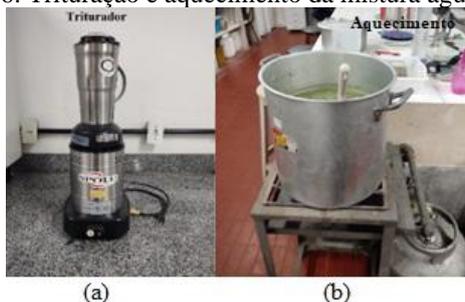
Fonte: Autor (2023).

3.3.1.3 Extração

A extração da mucilagem foi feita pelo método de cocção, fundamentado em Souza (2022) e descrito de forma detalhada a seguir.

Após a mistura na proporção em massa 3:1 entre água e cacto ser processada num triturador nas instalações do Laboratório de Termodinâmica (Figura 16a), o material resultante foi levado para o Laboratório LPFD, onde foi aquecido num caldeirão de alumínio usando um fogão a gás, até atingir a temperatura de 80°C (Figura 16b). O procedimento completo durou aproximadamente 1 hora e 20 minutos. Durante o aquecimento, o material foi continuamente mexido com uma colher grande para garantir um aquecimento uniforme e evitar que o material aderisse ao fundo do caldeirão.

Figura 16: Trituração e aquecimento da mistura água + cacto.



Fonte: Autor (2023).

Após essa etapa, ainda no LPFD, o material passou por um processo de resfriamento até a temperatura de, aproximadamente, 32°C, onde foi utilizado um *chiler* de imersão (Figura 17), e, em seguida, filtrado em uma peneira caseira de fibra de nylon. Esta ação permitiu assegurar a passagem da mucilagem para o interior da bombona, retendo os resíduos sólidos. O recipiente contendo o líquido extraído foi

devidamente vedado e o conteúdo foi então armazenado em um refrigerador, com temperatura aproximada de 5°C, por um período de 12 h, até ser conduzido ao processo de secagem.

Figura 17: Resfriamento da mistura (cacto + água) utilizando chiler.



Fonte: Autor (2023).

Vale ressaltar que o armazenamento não é uma etapa fundamental do processo. Ele foi necessário para conservar o material para a etapa subsequente, que estava programada para ocorrer no dia seguinte.

3.3.1.4 Secagem

A obtenção do pó da mucilagem foi realizada no Laboratório LAPAMA por meio do processo de *Spray Drying*, seguindo as seguintes condições operacionais: vazão de alimentação de $3 \frac{l}{h}$; vazão do soprador de secagem de $2,9 \frac{m^3}{min}$; pressão de 4; vazão do pulverizador de ar comprimido de $40 \frac{l}{min}$ e temperatura de entrada de 150°C, conforme recomendado por León-Martínez, Mendez-Lagunas e Rodríguez-Ramirez (2010).

De acordo com Masters (1991) e Shiga *et al.* (2001) conforme referenciado por Silva (2022), este método preserva as propriedades intrínsecas do material. A Figura 19 ilustra o esquema do processo de obtenção do pó de mucilagem por *Spray Dryer*.

Antes de iniciar o processo de secagem, foram medidos e registrados o volume e a massa da mucilagem extraída que estava armazenada. A partir dessas medidas, a densidade média foi determinada como sendo $1,007 \frac{g}{cm^3}$.

Após essa etapa, a mucilagem passou por dois processos de filtração usando panos limpos e secos (Figura 18), com o objetivo de remover eventuais partículas sólidas excedentes que venham a obstruir o bico injetor do *spray dryer*.

Figura 18: Filtração da mucilagem com panos.



Fonte: Autor (2023).

Em seguida, o material foi conduzido ao *Spray Dryer* para a produção do pó (Figura 19). O processo teve duração de 4 h e 20 min.

Figura 19: Obtenção do pó a partir da mucilagem utilizando o *Spray Dryer*.

Fonte: Autor (2023).

Após a conclusão de todos os processos, o pó resultante teve sua massa medida. Esse pó foi armazenado em recipientes hermeticamente fechados com a finalidade de evitar a presença de umidade, uma vez que a água pode influenciar na sua deterioração.

Durante o tratamento, retirada dos espinhos e da epiderme, foram verificadas alterações na coloração e indicação de oxidação de material orgânico. Durante a extração, foi observado que a mucilagem tinha uma aparência líquida, um pouco mais viscosa que a água, com odor peculiar e uma tonalidade verde claro. Após a secagem, o pó resultante apresentou uma textura granular bastante fina, com uma coloração marro claro.

Os rendimentos médios durante os processos de extração da mucilagem e sua transformação em pó foram determinados pelas equações abaixo, obtendo rendimento de 80% para a extração da mucilagem e 0,67% para transformação em pó.

$$\eta_{mucilagem} = \frac{m_{mucilagem}}{m_{total}} e \eta_{pó} = \frac{m_{pó}}{m_{mucilagem}}$$

Ao comparar o rendimento da transformação da mucilagem em pó obtido neste estudo com o obtido por Souza (2022), observou-se um desempenho 34% superior neste trabalho.

Apesar dos métodos utilizados serem semelhantes em ambas as pesquisas, o aumento no rendimento ocorreu devido a abordagens distintas em algumas fases. Neste estudo, optou-se por realizar o cozimento de uma só vez, reduzindo etapas e minimizando a perda de material. A cocção foi conduzida em três etapas (trituração, cozimento único e filtração dupla), resultando em uma maior extração de mucilagem, além de uma eliminação mais eficaz de resíduos sólidos que poderiam obstruir o bico injetor do *Spray Dryer*, evitando perdas de material. Logo, todo esse processo se mostrou eficaz, o que pode ser evidenciado pelo incremento de 34% no rendimento.

3.3.2 Preparação das Argamassas

3.3.2.1 Ensaio Preliminar

Este ensaio teve como objetivo definir a relação ideal de massa entre água e cimento (a/c) utilizada na preparação das argamassas usadas na confecção das amostras investigadas neste estudo. A definição da relação a/c foi feita através do teste de resistência a compressão axial em amostras de argamassas preparadas no traço 1:1,5, em volume cimento:areia, aos 28 dias de idade. Foi previsto a produção de três amostras para cada proporção a/c, sendo 0,35; 0,38; 0,40; 0,42 e 0,45 de massa de água em relação à massa do cimento, nomeadas respectivamente como Relação 1, Relação 2, Relação 3, Relação 4 e Relação 5. O Quadro 8 fornece a quantidade de amostras previstas.

Quadro 8: Quantidade de amostras para o teste preliminar.

Estado da Argamassa	Propriedade	Requisito	Método de Ensaio	Tipo de Amostra	Nº de Amostras	Idade
Endurecido	Resistência Mecânica	Resistência a compressão	NBR 7215/2019	Cilíndrica	15	28 dias
TOTAL					15	

Fonte: Autor (2023).

Antes da execução do ensaio, foram calculadas as quantidades em massa de cimento, areia e água a serem usadas no preparo das argamassas para confecção de três corpos de prova por traço. A definição da relação ideal a/c para o estudo seguiu os procedimentos estabelecidos na norma NBR 7215 (ABNT, 2019), abrangendo a preparação e mistura dos materiais, a produção das amostras, o processo de cura, bem como a realização dos testes e a análise dos resultados.

No estado fresco, a Relação 1 resultou em uma argamassa similar a farofa, mostrando uma consistência inadequada para o trabalho. A Relação 2 proporcionou uma argamassa ligeiramente mais maleável que a relação 1, permitindo certa manipulação. Na Relação 3 obteve-se uma argamassa com consistência mais adequada para o trabalho que as relações 1 e 2. A Relação 4 produziu uma argamassa com a melhor trabalhabilidade. Enquanto a Relação 5 resultou em uma argamassa com consistência um pouco mais maleável que a relação 4, ainda mantendo uma boa capacidade de ser trabalhada.

Como a relação a/c de 0,35 (Relação 1) resultou em uma argamassa não trabalhável, não foram produzidos corpos de prova para esta proporção. Deste modo, foram preparados um total de 12 amostras, três para cada relação a/c , que, após a cura completa de 28 dias completamente imersos em um tanque com água, foram conduzidos para a realização do teste de resistência a compressão axial em uma máquina universal de ensaio (Figura 20), no laboratório LABEME.

Figura 20: Execução do ensaio preliminar de compressão em máquina universal de ensaios.



Fonte: Autor (2023).

O ensaio foi conduzido com uma taxa de carregamento de 10 Kg/s aplicada sobre os corpos de prova até seu rompimento, obtendo os valores de resistência a compressão e calculado as médias em cada relação. O Quadro 9 fornece os valores de

resistência a compressão axial, em Mpa, de cada corpo de prova e as médias aritméticas das resistências obtidas em cada relação a/c.

Quadro 9: Resultados do ensaio preliminar de resistência a compressão por relação a/c.

a/c	Amostra	Resistência a compressão por corpo de prova (Mpa)	Média da resistência a compressão (Mpa)
0,38	1	25,90	29,57
	2	33,15	
	3	29,67	
0,40	1	33,63	26,46
	2	19,22	
	3	26,52	
0,42	1	33,73	37,97
	2	39,23	
	3	40,94	
0,45	1	16,75	24,94
	2	30,05	
	3	28,03	

Fonte: Autor (2023).

Com base na comparação dos resultados do teste de resistência à compressão axial, foi possível identificar que a relação a/c que proporcionou maior resistência da argamassa foi a de 0,42 (relação 4).

O Apêndice III deste trabalho contém um roteiro do ensaio preliminar que descreve com mais detalhes as atividades realizadas.

3.3.2.2 Dosagem

Os materiais utilizados na preparação das argamassas foram cimento CP-V, areia média, aditivos (pó em de Mandacaru e FLUX-40) e água, com proporções em massa. O traço utilizado foi 1:1,5 (cimento:areia, em volume), com relação a/c de 0,42, definida em ensaio preliminar.

Foram investidas cinco concentrações de aditivo, em relação a massa de cimento, denominadas como: R (0%), mistura sem aditivo; A e A', misturas com 0,0125%; B e B', misturas com 0,1%; C e C', misturas com 0,5% e; D e D', misturas com 1,0%. As misturas com pó de Mandacaru são identificadas por A, B, C e D, enquanto as aditivadas com FLUX-40 por A', B', C' e D'. As proporções de volume e massa dos materiais estão detalhadas no Quadro 10.

Quadro 10: Combinações em proporções de volume e massa dos materiais utilizados na preparação das argamassas.

Mistura	Proporção em volume (cimento:areia)	Proporção em massa (cimento:areia)	Aditivo (%)	a/c
R	1:1,5	1:1,7	0	0,42
A e A'	1:1,5	1:1,7	0,0125	0,42
B e B'	1:1,5	1:1,7	0,1	0,42
C e C'	1:1,5	1:1,7	0,5	0,42
D e D'	1:1,5	1:1,7	1,0	0,42

Fonte: Autor (2023).

Traços de alta resistência para argamassas, como 1:1,5, apresentam resistência de 35 a 40 MPa, o que não é comum em argamassas convencionais. Contudo, são empregados em aplicações específicas que demandam alto desempenho mecânico e durabilidade, como, por exemplo: no reparo de elementos estruturais, como pilares e lajes; na fixação de elementos estruturais pesados, como bases de máquinas industriais e; em revestimentos de alta resistência sujeitos a abrasão intensa ou impactos mecânicos.

As argamassas de alta resistência oferecem benefícios como elevada durabilidade, melhor desempenho contra desgaste e impactos, e maior compatibilidade com concretos. Embora o custo seja superior ao das argamassas convencionais, seu uso é justificado em situações onde a resistência mecânica e a durabilidade são indispensáveis.

3.3.2.3 Mistura

Este processo, fundamentado nos requisitos da NBR 16541 (ABNT, 2016), foi realizado utilizando um misturador mecânico, como detalhado a seguir (Figura 21).

A partir dos traços em massa definidos, os materiais, cimento, areia, aditivo e água foram pesados com aproximação de 0,01 g e colocados dentro do misturador. Primeiramente foram colocados os materiais secos (cimento, areia e aditivo) de acordo com as proporções definidas, e misturados com uma colher de pedreiro. Em seguida, foi adicionado água a mistura na proporção a/c definida, que passou por um novo processo de mistura com um misturador mecânico (Figura 21). A água foi adicionada gradualmente enquanto a mistura ocorria até obter uma massa com consistência uniforme. A mistura com o misturador se deu em duas etapas, a primeira em baixa velocidade, frequência de aproximadamente $140 \pm 5rpm$, durante 30 s. A segunda em velocidade alta, frequência de aproximadamente $285 \pm 5rpm$, durante mais 30 s.

Figura 21: Mistura da argamassa.



Fonte: Autor (2023).

3.3.3 Confeção das Amostras

Com o objetivo de produzir amostras padronizadas com as argamassas preparadas, fundamental para avaliar as propriedades e características desejadas, no que diz respeito aos ensaios no estado endurecido e pós envelhecimento, os corpos foram moldados seguindo as diretrizes prescritas pela NBR 7215 (ABNT, 2019) para as amostras utilizadas nos ensaios de resistência a compressão axial e absorção de água por capilaridade, e pela NBR 13279 (ABNT, 2005) para as amostras usadas nos testes de tração na flexão estática. O processo de produção dos corpos de prova abrange quatro etapas distintas: preparação, moldagem, desmoldagem e cura.

Antes de iniciar a moldagem, os moldes foram devidamente preparados. Esta etapa consistiu em limpar e depois em untar toda a superfície interna e o fundo das formas com uma leve camada de óleo. Após o amassamento da argamassa e com os moldes posicionados junto ao recipiente de mistura, foi feito o enchimento com o auxílio de uma espátula. Nos moldes cilíndricos, a argamassa foi introduzida em três camadas de alturas aproximadamente iguais, sendo compactada com trinta golpes por camada, utilizando um soquete para eliminar espaços vazios e garantir uma distribuição uniforme da argamassa dentro dos moldes. Já para os moldes prismáticos, estes foram levados a mesa de consistência e aplicado trinta golpes. Esta operação foi encerrada com o nivelamento do topo dos corpos de prova com uma régua deslizada sobre as bordas das formas.

Na etapa da moldagem, as argamassas preparadas foram inseridas em moldes com formas e dimensões específicas para atender aos padrões das normas NBR 7215 (ABNT, 2019) NBR 13279 (ABNT, 2005). Para os ensaios de resistência a compressão axial e absorção de água por capilaridade, foram utilizadas amostras de formato cilíndrico com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (Figura 22a). Já para o teste de

resistência à tração na flexão estática, os corpos de prova foram de formato prismático com 4 cm de aresta na base e 16 cm de comprimento (Figura 22b).

Figura 22: Corpos de prova moldados.



Fonte: Autor (2023).

Após completar o período inicial de cura de 48 h em um ambiente controlado de temperatura entre 23°C a 25°C, com a face superior protegida por uma placa de cerâmica plana, as amostras foram cuidadosamente retiradas dos moldes para evitar danos. Ao término do estágio de cura inicial, após o desmolde, os corpos de prova foram submetidos a uma fase final de cura em água (Figura 23), garantindo o desenvolvimento adequado da resistência mecânica. Devidamente identificados com o traço e o tipo de ensaio, as amostras foram imersas em câmara úmida, onde permaneceram por um período de 28 dias, idade proposta para os ensaios no estado endurecido.

Figura 23: Cura em água.



Fonte: Autor (2023).

Algumas amostras, após cura completa em água limpa destilada, passaram por um processo de envelhecimento acelerado por meio de uma câmara de choque térmico, para investigação da durabilidade.

Concluído todo o processo de produção, as amostras foram submetidas aos ensaios para avaliar suas propriedades, tais como resistência mecânica, impermeabilidade e durabilidade. Para cada traço, foram produzidos cinco corpos de prova, totalizando 25 corpos para cada ensaio.

Em síntese, para serem produzidas as amostras passaram por cinco etapas distintas: um ensaio preliminar, onde se determinou a proporção ideal de água/cimento; a dosagem, que definiu e mediu as quantidades apropriadas dos materiais ingredientes; a mistura, responsável por obter uma massa uniforme dos componentes; a moldagem, que conferiu formas e acabamentos padronizados aos corpos produzidos; e, por último, a cura, visando promover um endurecimento adequado e alcançar uma boa resistência.

É importante destacar que: a atenção com a dosagem, convertendo os traços em massa para permitir medições com a máxima precisão possível; a mistura de forma mecânica, seguindo as diretrizes da norma regulamentadora NBR 16541 (ABNT, 2016); a moldagem de forma adequada, conforme as orientações da norma NBR 7215 (ABNT, 2019), garantindo um amassamento eficiente; e a cura correta resultou em amostras de alta qualidade, isentas de falhas ou vazios.

3.4 Métodos de Análises

O Quadro 11 resume os ensaios realizados com as normas de padronização correspondentes.

Quadro 11: Propriedades e métodos de análises.

Estado da Argamassa	Propriedade	Ensaio	Norma
Fresco	Trabalhabilidade	Consistência	NBR 13276/2016
		Retenção de água	NBR 13277/2005
Endurecido	Resistência mecânica	Resistência a compressão axial	NBR 7215/2019
		Resistência à tração na flexão	NBR 13279/2005
	Impermeabilidade	Absorção de água por capilaridade	NBR 15259/2005
Pós envelhecimento	Durabilidade	Resistência a compressão	NBR 7215/2019
		Resistência à tração na flexão	NBR 13279/2005
		Absorção de água por capilaridade	NBR 15259/2005
	Estrutura cristalina	DRX	-
	Morfologia da microestrutura	MEV	-

Fonte: Autor (2023).

3.4.1 Estado Fresco

3.4.1.1 Índice de Consistência

A NBR 13276 (ABNT, 2016), estabelece o procedimento para determinar o índice de consistência de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos. A norma esclarece que o índice de consistência (IC) de argamassas é determinado através da medida do espalhamento de uma porção de argamassa inicialmente moldada em forma de tronco de cone sobre uma mesa de ensaio.

O valor ideal para o IC da argamassa vai depender do serviço a ser executado (assentamento, chapisco, revestimento, etc.) e das condições de trabalho, como também da experiência e sensibilidade do profissional que executa o serviço. Embora a NBR 13276 (ABNT, 2016) não defina um valor fixo ideal para o IC da argamassa, recomenda que o valor seja adequado às especificações técnicas e ao tipo de aplicação, por exemplo, argamassas destinadas a revestimento deve apresentar valores típicos de IC de 260 ± 5 mm. Para Carasek (2017), Medeiros (2018) e Cicero *et al.* (2022), o IC padrão é aquele que se encontra na faixa de $(230 - 260\text{mm}) \pm 10\text{mm}$.

Os materiais utilizados na condução deste ensaio foram: mesa para determinação do índice de consistência, misturador mecânico, molde tronco de cone, colher de pedreiro, soquete metálico, trema e bucha (Figura 24).

Figura 24: Materiais utilizados no ensaio de índice de consistência.



Fonte: Autor (2023).

As argamassas foram misturadas em um misturador mecânico planetário de bancada, conforme descrito na NBR 16541 (ABNT, 2016), de acordo com os traços em massa, mostrados na Quadro 12.

Quadro 12: Traços em massa para preparação das argamassas para o ensaio de consistência.

Mistura	Traço (cimento:areia, em massa)	Aditivo (%)	Relação a/c
R	1:1,7	0	0,42
A	1:1,7	0,0125	0,42
B	1:1,7	0,1	0,42
C	1:1,7	0,5	0,42
D	1:1,7	1,0	0,42

Fonte: Autor (2023).

Os ensaios para determinar os índices de consistência das argamassas (Figura 25), foram executados em uma mesa de espalhamento (*flow table*), no laboratório LABEME, conforme a norma NBR 13276 (ABNT, 2016). Antes de iniciar a execução do ensaio, fez-se a limpeza do molde e da superfície superior da mesa utilizando um pano limpo e úmido. Com o molde posicionado e firme no centro da mesa, o mesmo foi preenchido em três camadas consecutivas de argamassa, com alturas aproximadamente iguais, utilizando uma colher de pedreiro. A cada uma das camadas, foram aplicados quinze, dez e cinco golpes, respectivamente, com o soquete, para garantir a distribuição uniforme da argamassa no molde. Por fim, a superfície da argamassa foi nivelada passando uma régua metálica rente à borda do molde, e quaisquer resíduos em torno do molde foram removidos com um pano úmido.

Figura 25: Ensaio para determinação do índice de consistência por espalhamento.



Fonte: Autor (2023).

Em seguida, o molde foi retirado verticalmente e, de maneira uniforme, efetuado 30 golpes com a mesa em um intervalo de 30 s. Após o último golpe, foram medidos e registrados três diâmetros do espalhamento da argamassa, utilizando uma régua. A média aritmética das três medidas do diâmetro, calculada pela equação abaixo, correspondeu ao índice de consistência da argamassa para cada traço estudado.

$$IC = \frac{\sum_{i,n} D_i}{n}$$

3.4.1.2 Retenção de Água

Na execução dos ensaios de retenção de água das argamassas, foram empregados os seguintes materiais: (a) molde cilíndrico com 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura (dimensões internas); (b) placa plana; (c) peso de 2 kg e diâmetro de 110 mm; (d) espátula de aço; (e) colher de pedreiro (f) régua metálica; (g) papel-filtro (12 por determinação); (h) gaze de pano de algodão; (i) balanças com resoluções de 0,1 g e 0,01 g e (j) cronômetro.

Sendo as argamassas preparadas durante a realização de cada teste, com as quantidades de aditivos especificadas, e em conformidade com as diretrizes da norma NBR 13277 (ABNT, 2005), seguiu-se o procedimento a seguir para a execução do ensaio de retenção de água.

Antes de cada teste, pesou-se o molde, previamente seco e limpo, e 12 discos de papel-filtro, em uma balança com resolução de 0,01 g, registrando suas massas como M_m e M_{se} , respectivamente.

Utilizando uma espátula, encheu-se o molde com a argamassa, adicionando-a em pequenos incrementos até formar um pequeno excesso. O excesso foi nivelado com uma régua metálica, posicionada a um ângulo de 45° em relação à superfície da argamassa, com movimentos de vai e vem em toda a superfície em uma única passada, removendo apenas o excesso. Em seguida, passou-se a régua novamente, desta vez em sentido contrário, em um ângulo bem menor em relação à superfície, para alisá-la.

Após limpar as bordas do molde, pesou-se o conjunto molde com argamassa nivelada na balança com resolução 0,1 g, registrando sua massa como M_{ma} .

Sobre a superfície da argamassa, foram colocadas duas telas de gaze, seguidas pelo conjunto de 12 discos de papel-filtro e a placa plana, nesta ordem. Em seguida, o peso de 2 kg foi aplicado centralizadamente sobre a placa, e o cronômetro foi imediatamente acionado.

Após 2 min, o peso e a placa foram removidos. O conjunto de discos de papel-filtro foram retirados e levados à balança com resolução de 0,01 g para medir e registrar rapidamente a massa dos discos molhados (M_f). Daí então, a retenção de água (R_a) foi calculada usando a seguinte equação:

$$R_a = \left[1 - \frac{(M_f - M_{se})}{AFx(M_{ma} - M_m)} \right] \times 100$$

Onde,

M_m - Massa do molde vazio, em g.

M_{se} - Massa do conjunto de discos de papel secos, em g.

M_{ma} - Massa do molde com argamassa, em g.

M_f - Massa do conjunto de discos molhados de papel-filtro, em g.

M_w - Massa total de água acrescentada à mistura, em g.

M - Massa da argamassa (soma das massas dos componentes) em g.

AF - Fator água/argamassa fresca $AF = \frac{M_w}{M+M_w}$.

3.4.2 Estado Endurecido

Os ensaios apresentados a seguir foram realizados em um total de 45 (quarenta e cinco) corpos de provas, sendo 5 (cinco) corpos para cada concentração e tipo de aditivo, além de 5 (cinco) amostras sem conter aditivo.

3.4.2.1 Resistência à Compressão

Este ensaio, baseado na NBR 7215 (ABNT, 2019), buscou avaliar a capacidade das amostras de argamassas de suportar cargas de compressão paralelas ao eixo transversal das amostras moldadas em formato cilíndrico com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (Figura 26), conforme o procedimento descrito a seguir.

Figura 26: Amostras para o ensaio de compressão axial.



Fonte: Autor (2023).

Utilizando, na condução deste estudo, a máquina universal de ensaios apresentada na Figura 27.

Figura 27: Máquina universal de ensaios utilizada no ensaio de compressão axial.



Fonte: Autor (2023).

Inicialmente, foi feito a preparação da máquina de ensaio à compressão, limpeza e programação. Em seguida, as amostras, após a cura adequada e com as idades definidas no plano de trabalho, foram levadas a máquina de ensaios e submetidas a carregamentos progressivos e sem choques, à velocidade constante de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s, até a ruptura (Figura 28). É importante informar que as amostras foram posicionadas rigorosamente no centro do eixo de carregamento para evitar excentricidade de cargas.

Figura 28: Ensaio de compressão.



Fonte: Autor (2023).

Por meio dos ensaios, foi obtido para cada corpo de prova as resistências individuais à compressão (σ_{Ci}), registradas em MPa. Ainda, também foram registradas as magnitudes médias das resistências individuais a compressão (σ_C) de cada mistura, obtidas pela equação:

$$\sigma_C = \frac{\sum_{i,n} \sigma_{Ci}}{n}$$

Onde n representa a quantidade de amostras ensaiadas por mistura. Neste presente caso, $n = 5$.

3.4.2.2 Resistência à Tração na Flexão

Para avaliar a capacidade de carga que o material suporta em situações de tração na flexão até comprometer sua integridade, o ensaio de resistência à tração na flexão estática da argamassa foi realizado conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizando a máquina universal de ensaios, conforme descrito a seguir.

Após a preparação da máquina, as amostras, moldadas em formato prismático com 16 cm de comprimento e base quadrada de 4 cm de aresta (Figura 29), foram conduzidas à máquina de ensaios após a cura e nas idades estabelecidas no plano de trabalho.

Figura 29: Amostras para o ensaio de tração na flexão estática.



Fonte: Autor (2023).

As amostras foram posicionadas sobre dois suportes fixos, espaçados em 10 cm, e submetidas a carregamentos graduais aplicados em seu centro, de forma contínua à $50 \frac{N}{s}$ e se choques, até a ruptura (Figura 30).

Figura 30: Ensaio de tração na flexão estática.



Fonte: Autor (2023).

Durante os ensaios, as cargas individuais de resistência à tração na flexão (R_{fi}) foram registradas em Newton (N) e posteriormente convertidas em MPa utilizando a equação:

$$R_{fi} = \frac{1,5 \cdot F_t \cdot L}{40^3}$$

Onde,

R_{fi} → Resistência à tração na flexão para o corpo de prova, em (MPa).

F_t → Carga aplicada verticalmente no centro da amostra prismática, em (N).

L → Distância entre os suportes, em (mm).

A partir dos resultados individuais, as médias aritméticas para a resistência a tração na flexão (R_f) foram calculadas com base nos cinco corpos de prova ($n = 5$) ensaiados na mesma idade, conforme a equação:

$$R_f = \frac{\sum_n R_{fi}}{n}$$

3.4.2.3 Absorção de Água por Capilaridade

Neste ensaio, a capacidade de absorção de água da argamassa foi analisada seguindo as diretrizes estabelecidas na NBR 15259 (ABNT, 2005), optando por corpos de prova cilíndricos invés de prismáticos, estabelecendo uma relação com sua porosidade.

Utilizado para determinar a capacidade de absorção de água com o objetivo de avaliar a resistência do material à penetração de umidade, o ensaio de absorção de água foi executado em amostras cilíndricas de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Para a execução deste ensaio, foram empregados os seguintes materiais: estufa, bandeja para armazenamento de água, cronômetro, balança com resolução de 0,01 g, lixa grossa, pincel, pano e utensílios de uso geral de laboratório.

As amostras, em idades estabelecidas de acordo com o plano de trabalho, foram preparadas e conduzidas para o teste após passar por um período de secagem de, aproximadamente, 24 horas, em estufa a temperatura de $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$, para adquirirem

constância nas massas. As amostras foram, em seguida, resfriadas em dessecador a vácuo.

Em cada amostra, uma de suas faces foi lixada com uma lixa grossa para remover quaisquer resíduos de desmoldante e, em seguida, limpa com um pincel para garantir que não houvesse resíduos que pudessem afetar o estudo. Daí, a massa inicial m_0 de cada amostra foi então medida e registrada.

Em seguida, as amostras foram imersas em um recipiente de fundo plano, com uma lâmina de água (5 ± 1)mm, posicionadas com a face lixada para baixo, conforme ilustra a Figura 31.

Figura 31: Ensaio de absorção de água por capilaridade.



Fonte: Autor (2023).

Nos instantes 10 e 90 min após o contato com a água, as amostras foram retiradas da bandeja, enxugadas com um pano limpo e levadas para medições e anotações de suas massas, sendo m_{10} e m_{90} as massas em gramas nos instantes 10 e 90 min de imersão, respectivamente. Vale informar que, após a pesagem aos 10 min as amostras retornaram imediatamente à bandeja. A Figura 32 mostra as amostras após 10 e 90 min em contato com a água.

Figura 32: Amostras após o ensaio de absorção de água por capilaridade (a) em 10 min e (b) em 90 min.



Fonte: Autor (2023).

A absorção da água por capilaridade (A) foi calculada nos instantes 10 e 90 min como a razão entre a diferença de massas antes (m_0) e depois, aos 10 min (m_{10}) e 90

min (m_{90}) do ensaio, e a área da face imersa da amostra $\pi \frac{d^2}{4} = \pi \frac{5^2}{4} = 19,63\text{cm}^2$. Este valor, expresso em $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$, foi calculado pela equação:

$$A = \frac{m_t - m_0}{19,63}$$

Em seguida, também foi calculado o coeficiente de capilaridade (C) de cada amostra, expresso em $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}}$. Este, por definição segundo a NBR 15259 (ABNT, 2005), é uma grandeza igual ao coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das determinações realizadas aos 10 e 90 min, considerando a abscissa a raiz do tempo em minutos e, a ordenada, a absorção da água por capilaridade, $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$. Ainda, segundo a NBR 15259 (ABNT, 2005), o coeficiente de capilaridade conforme definido é aproximadamente igual ao valor médio das diferenças de massa aos 10 e 90 min.

$$C = (m_{90} - m_{10})$$

As médias aritméticas da absorção de água, e do coeficiente de capilaridade (C) de cada mistura foram calculadas e registradas. Por fim, segundo a norma NBR 7222 (ABNT, 2011), foi realizado o rompimento das amostras por compressão diametral para observação da ascensão da água no interior dos corpos (Figura 33).

Figura 33: Rompimento por compressão diametral.



Fonte: Autor (2023).

3.4.2.3.1 Índices Físicos

Os Índices Físicos, Absorção de Água por Imersão (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica Aparente (MEA), foram realizados com a finalidade de obter mais informações sobre a capacidade de impermeabilidade das argamassas estudadas, uma vez que são essenciais para garantir a qualidade e desempenho do produto, prevenindo problemas relacionados à absorção de água e durabilidade.

Absorção de Água por Imersão

O ensaio de absorção de água por imersão permite avaliar a capacidade da argamassa de resistir à penetração de umidade. Isso é importante para prevenir problemas como eflorescência, fissuras e deterioração ao longo do tempo. A absorção de água por imersão (AA) da amostra mede a relação entre a diferença do peso úmido (P_u) e do peso seco (P_s) com o peso seco, e foi determinada pela equação:

$$AA(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100$$

Porosidade Aparente

O ensaio de porosidade aparente permite avaliar a quantidade de vazios presentes na argamassa. Essa medida é importante uma vez que a porosidade afeta diretamente a permeabilidade e, conseqüentemente, a absorção de água e a durabilidade da argamassa. A porosidade aparente (PA) da amostra é uma medida que relaciona a diferença entre o peso úmido (P_u) e o peso seco (P_s), com a diferença entre o peso úmido e o peso imerso (P_i) em água.

$$PA(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \times 100$$

Massa Específica Aparente

O ensaio de massa específica aparente da argamassa foi realizado para determinar a densidade aparente do material. Esse ensaio é importante já que essa propriedade influencia diretamente no comportamento mecânico da argamassa. A massa

específica aparente (*MEA*) da amostra é a relação entre a massa do material e o volume que ele ocupa. Essa propriedade foi medida pela proporção entre o peso seco (P_s) com a diferença entre o peso seco e o peso imerso (P_i) em água, multiplicado pela densidade do líquido, no caso água ($\rho_l = 1,0 \frac{g}{cm^3}$), conforme a equação:

$$MEA(g/cm^3) = \frac{P_s}{(P_s - P_i)} \cdot \rho_l$$

Os ensaios de absorção de água por imersão, porosidade aparente e massa específica foram executados de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 1987). Para a realização desses ensaios, foram utilizados balança hidrostática de precisão, recipientes apropriados para imersão, estufa e dessecador a vácuo. As amostras, compostas por cinco fragmentos, um para cada tipo de argamassa, foram obtidas a partir dos corpos produzidos e rompidos. A execução dos ensaios seguiu, ordenadamente, os seguintes passos:

- (1) As amostras foram colocadas na estufa a uma temperatura de $(100 \pm 5)^\circ C$, para um período de secagem de 24 horas.
- (2) Após a secagem, as amostras foram resfriadas em um dessecador a vácuo e suas massas foram determinadas, designadas como pesos secos.
- (3) As amostras foram inseridas em água a uma temperatura de $(23 \pm 2)^\circ C$ por 24 horas. Posteriormente, foram retiradas, enxugadas com toalha limpa e absorvente para remover o excesso da água da superfície, e suas massas foram medidas, chamadas de massas úmidas.
- (4) Utilizando uma balança hidrostática, foram medidas as massas das amostras completamente imersas em água após, conhecidas como peso imerso.
- (5) Através das equações mencionadas, foram realizados os cálculos para determinar os valores de absorção de água por imersão, porosidade aparente e massa específica.
- (6) Por fim, os resultados obtidos foram analisados, conforme consta no capítulo 4, item 4.3.2.

Figura 34: Determinação do peso imerso.



Fonte: Autor (2023).

3.4.3 Durabilidade

Para a análise da durabilidade, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, tração na flexão e resistência a absorção de água por capilaridade, conforme descritos nos itens 3.4.1.2.1, 3.4.1.2.2 e 3.4.1.2.3 deste trabalho. Amostras contendo pó de Mandacaru e o aditivo comercial FLUX-40 foram submetidas a um processo de envelhecimento acelerado, através de ciclos de umidade e variações de temperatura (choque térmico). Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, tração na flexão e absorção de água foram então comparados entre as amostras contendo pó de Mandacaru após envelhecimento, as amostras com pó de Mandacaru aos 28 dias de cura e as amostras com o aditivo comercial após o envelhecimento.

3.4.3.1 Envelhecimento Acelerado

O ensaio de envelhecimento acelerado envolveu expor as amostras a condições controladas, simulando situações mais intensas que as reais de umidade e variações de temperatura, às quais as argamassas podem ficar sujeitas. Neste cenário, e para a execução deste ensaio, as amostras foram conduzidas a uma câmara de choque térmico disponível no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estrutura (LABEME) do departamento de Engenharia Civil da UFPB. A câmara de choque térmico consta de uma sala com espaço interno de 1,80 m de largura, 1,04 m de altura e 1,13 m de profundidade, composta com uma porta de duas folhas do tipo corta fogo, para garantir a vedação (Figura 35).

O processo de envelhecimento na câmara de choque térmico envolveu a combinação das condições simuladas de umidade e variação de temperatura. Esta

escolha permitiu realizar o envelhecimento da argamassa de forma prática num período de tempo reduzido, uma vez conhecida as limitações temporais inerentes a pesquisa acadêmica.

Figura 35: Câmara de choque térmico.



Fonte: Medeiro (2018).

Seguindo o método descrito na NBR 15575-4 (ABNT, 2021), após inseridos na câmara, posicionados a uma distância de aproximadamente 20 cm do sistema de aquecimento, as amostras foram submetidas à 17 ciclos de choques térmicos sob condições de umidade e variações bruscas de temperatura. Esse processo simula fatores de degradação e pode ser considerado como ensaio de envelhecimento acelerado, equivalente à ação do sol e da chuva em fachadas (Medeiros, 2018).

Como a câmara não contava com um sistema automatizado, os ciclos de choques térmicos foram realizados de forma descontínua. Durante a exposição ao calor, o sistema de aquecimento mantinha-se ligado até a câmara alcançar temperaturas de $(80 \pm 3)^{\circ}\text{C}$, mantendo-se nesse nível por um período de 1 hora. O processo todo demorava em torno de 4 h. Logo após esse intervalo, o sistema de umidade era acionado, e a câmara resfriada por meio de jatos de água aspergidos em seu interior até atingir a temperatura de $(28 \pm 3)^{\circ}\text{C}$. Este processo demorava em média 30 min. Ao fim do ensaio, foi verificado e registrado possíveis deteriorações, tais como o surgimento de fissuras e trincas.

A fase de aquecimento da câmara até atingir a temperatura de $80 \pm 3^{\circ}\text{C}$ durou em média 3 h e manteve-se nesse nível por 1 h. O processo de resfriamento, realizado através da molhagem, até que a temperatura diminuísse para $28 \pm 3^{\circ}\text{C}$, levou em torno

de 30 min (0,5h). Assim, cada ciclo de choque térmico teve a duração de 4,5 h e, como foram realizados 17 ciclos, o ensaio completo durou 76,5 h. A Figura 36 ilustra o interior da câmara de choque térmico em funcionamento.

Figura 36: Interior da câmara de Choque térmico.



Fonte: Autor (2023).

O sistema de aquecimento contou com um painel metálico composto por quatro aquecedores, cada um com uma resistência de 750 W de potência, totalizando 3000 W (Figura 37). Enquanto o sistema de arrefecimento (ou refrigeração) foi implementado por meio de uma tubulação de PVC perfurada, instalada horizontalmente na parte superior da câmara, possibilitando uma completa molhagem das amostras (Figura 37).

Figura 37: Sistema de aquecimento e resfriamento da câmara.



Fonte: Autor (2023).

A água utilizada no sistema de refrigeração para o resfriamento da câmara e molhagem das amostras vinha de um reservatório localizado acima do segundo lance da

escada, alimentado constantemente pelo sistema de abastecimento de água da UFPB. Dentro do reservatório, foi colocado gelo para dar celeridade ao processo de resfriamento (Figura 38). Desta forma, cada ciclo de aspersão, com duração de 30 min, utilizou 10 kg de gelo.

Figura 38: Reservatório de água com gelo para arrefecimento.



Fonte: Autor (2023).

Durante a fase de refrigeração, para que a temperatura da câmara atingisse os $(28 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ no intervalo de tempo considerado (30 min), era fundamental que a temperatura da água no reservatório fosse em torno de 20°C . Objetivo alcançado com a inserção do gelo no reservatório.

Após o período de exposição das amostras aos fatores degradantes da câmara, foi feita uma análise visual nas superfícies com a finalidade de observar possíveis desgastes e surgimento de eventuais alterações ou patologias relacionadas aos ciclos de choque térmico. Em seguida, procedeu-se à realização de ensaios de resistência a compressão axial, tração na flexão estática e absorção de água por capilaridade.

3.4.4 Difração de Raios X

O DRX foi realizado para investigar as características cristalinas e a composição mineralógica das argamassas em estudo, tanto com aditivo quanto sem. O objetivo deste ensaio foi analisar as mudanças estruturais que possam ocorrer na presença do biopolímero derivado do cacto Mandacaru e avaliar como ele pode influenciar a mineralogia da argamassa.

Para o ensaio de DRX, as amostras foram obtidas a partir dos fragmentos dos corpos após o rompimento, os quais foram triturados manualmente com almofariz e

pistilo e passado na peneira de malha #200 para obter um pó fino, o qual foi submetido à análise.

A análise de DRX foi realizada utilizando o equipamento LAB X XRD-6000 SHIMADZU, do laboratório LACOM da UFPB, com a emissão dos raios X proveniente de um tubo de Cu- α , com voltagem de 30k, corrente de 30 mA e comprimento de onda 1,5406 Å. A varredura foi realizada em um intervalo de 2θ , com parâmetros de 5° a 60° e velocidade de 2°/min com passo de 0,02°/min.

Por fim, os dados obtidos foram processados utilizando o software X'Pert HighScore Plus, para obter os resultados de estrutura cristalina das argamassas. Os graus de cristalinidade (% Xc) foram determinados calculando a diferença entre as áreas totais e as áreas dos picos, utilizando o OriginPro 2021 – *graphing and data analysis for science and engineering*.

3.4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

De caráter qualitativo, com o intuito de visualizar a matriz cimentícia e a forma como o pó de Mandacaru se encontra disposto, a análise morfológica foi feita em amostras de argamassas com e sem o aditivo, em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) FEI Quanta 450. Equipamento de alta resolução com sistema de emissão de elétrons do tipo FGE (Fonte por Emissão de Campo). O processo envolveu os seguintes passos:

- I. **Secagem:** pedaços dos corpos de prova, após os ensaios mecânicos, foram levados à estufa onde permaneceram por um período de 24 horas, a uma temperatura de 80 °C, para retirar a umidade.
- II. **Produção:** os corpos secos foram fragmentados com uma marreta e, em seguida, peneirado em uma peneira de malha 200. O pó obtido foi armazenado em tubos criogênicos de 2 ml, especificando o tipo de amostra em cada tubo.
- III. **Preparação:** as amostras foram metalizadas⁶ para viabilizar a obtenção de imagens no MEV. Nesse processo, em pequenas quantidades, as amostras foram fixadas ao porta-amostra com fita adesiva condutiva de carbono e recobertas por

⁶ Aplicação de uma camada fina de metal sobre a superfície da amostra para garantir uma boa condutividade.

pulverização catódica (sputtering) em uma câmara de com gás argônio por 3 min, para garantir uma boa condutividade. Antes da análise, foi feito vácuo para reduzir a dispersão de elétrons e melhorar a qualidade das imagens. O porta-amostra foi inserido na câmara do MEV e, em seguida, iniciado o processo de pressurização.

- IV. **Captura das imagens** – por fim, foi realizado a captura e registro das imagens com diferentes ampliações fotográficas.

3.4.6 Análise Estatística

Empregado para analisar dados e obter conclusões a partir deles, a análise estatística é amplamente utilizada em várias áreas da ciência. Existem diferentes tipos de análise estatística, e a escolha depende dos dados disponíveis e dos objetivos da pesquisa. Diante do exposto, dentre os diversos tipos de análises estatísticas que poderiam ser empregados, este estudo optou pela combinação da Análise de Variância (ANOVA) e o teste de Tukey.

Uma vez que a análise deste estudo tem como finalidade encontrar diferenças significativas entre grupos independentes e identificar as diferenças entre si, a combinação entre ANOVA e o teste de Tukey é a abordagem apropriada. Vale ressaltar que, em muitos casos, a ANOVA e o teste de Tukey são usados em conjunto para realizar comparações múltiplas entre médias de grupos.

A ANOVA é uma técnica bastante utilizada no meio acadêmico para analisar a variabilidade entre grupos de dados. Ela é usada para testar se há diferenças significativas entre as médias de três ou mais grupos independentes, rejeitando ou não a hipótese de igualdade. A ANOVA compara as variações dentro de cada grupo com as variações entre os grupos e avalia se as diferenças observadas são estatisticamente significantes ou se podem ter ocorrido apenas por acaso (Mosteller e Tukey, 1949). Se a variação entre os grupos for significativamente maior do que a variação dentro dos grupos, isso sugere que há diferenças nas médias.

Usado após a ANOVA, o teste de Tukey, também conhecido como teste de comparação múltipla de Tukey, é empregado quando a análise identifica diferenças significativas entre os grupos. Ele ajuda a identificar quais grupos específicos têm médias significativamente diferentes.

O teste de Tukey compara todas as combinações possíveis de pares de grupos, baseando-se na diferença mínima significativa (DMS) (Mosteller e Tukey, 1949). Esse teste fornece intervalos de confiança ajustados que permitem fazer comparações entre todas as combinações de grupos possíveis. Isso ajuda a evitar erros de comparação múltipla que podem ocorrer ao realizar várias comparações independentes.

Como exposto, a ANOVA e o teste de Tukey são métodos estatísticos distintos. Enquanto a ANOVA busca determinar se há alguma diferença global entre os grupos, o teste de Tukey procura identificar quais grupos são diferentes entre si quando há diferenças significativas detectadas pela ANOVA. Ambos são valiosos para compreender as relações entre grupos.

Para as análises dos dados obtidos durante os ensaios laboratoriais, foi empregado a Análise de variância, seguido do teste post-hoc de Tukey para comparação das variáveis. As análises foram realizadas utilizando como ferramenta estatística o software Origin 2018 – *Graphing and Analysis*, com nível de significância de 95%. Os resultados obtidos foram expressos em quadros. Vale destacar, para compreensão dos resultados, que as médias que apresentam as mesmas letras não possuem diferenças significativas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para investigar a influência do pó extraído do cacto Mandacaru na argamassa de cimento, a mistura de referência R, sem o aditivo, foi usada como base para a análise dos resultados, juntamente com o aditivo comercial FLUX-40.

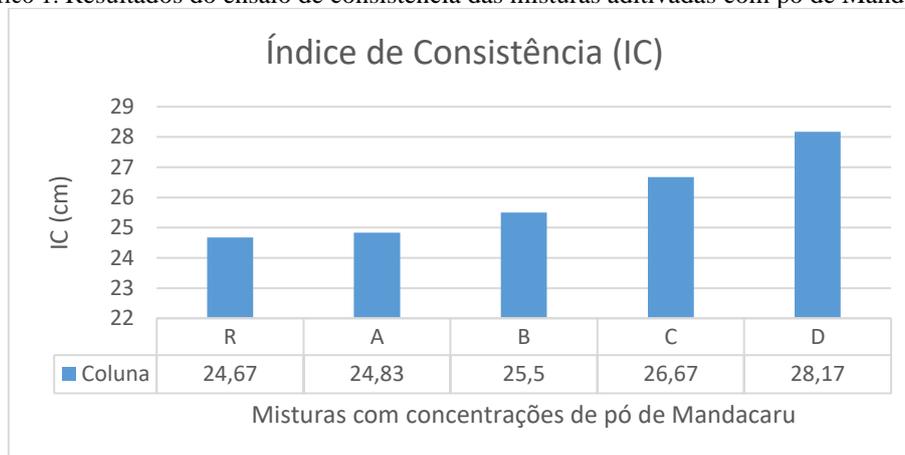
Durante as análises, as informações obtidas foram comparadas com a literatura existente. Como o desenvolvimento de biopolímeros à base de cactos para a construção é uma área emergente, ainda há poucas pesquisas específicas sobre sua aplicação em argamassas de cimento. Assim, as comparações foram feitas com pastas de cimento em vez de argamassas. As pastas são frequentemente usadas devido à sua simplicidade, sem precisar de agregados. Os mecanismos de ação dos aditivos podem ser observados diretamente nas pastas de cimento e aplicados a sistemas mais complexos, como as argamassas.

Vale destacar, que os resultados com pastas fornecem uma base sólida para compreender como o biopolímero pode influenciar as propriedades da argamassa, sendo uma etapa preliminar essencial para o desenvolvimento e a aplicação de novos materiais na construção.

4.1 Consistência por Espalhamento

O Gráfico 1 exibe os resultados do ensaio de índice de consistência (IC) determinados no espalhamento das argamassas. O IC foi determinado pela média aritmética de três diferentes diâmetros de espalhamento, expressos em centímetros.

Gráfico 1: Resultados do ensaio de consistência das misturas aditivadas com pó de Mandacaru.



Fonte: Autor (2023).

Com base nos dados apresentados, observa-se que as misturas R, A e B apresentam valores de IC próximos entre si, com médias de 24,67, 24,83 e 25,50 cm, respectivamente. As misturas C e D, com médias de 26,67 cm e 28,17 cm, respectivamente, apresentaram os maiores valores de IC. De acordo com Carasek (2017), Medeiro (2018) e Cicero *et al.* (2022), os valores de IC encontrados estão dentro da faixa padrão aceitável $(23,00 - 26,00\text{cm}) \pm 1\text{cm}$, exceto D, que apresentou um IC de 28,17 cm.

Na amostra aditivada com 0,0125% de pó de Mandacaru houve um pequeno aumento no espalhamento em comparação à mistura sem aditivo. Já com 0,1%, a mistura apresentou uma consistência mais fluida, resultando em maior espalhamento, sem comprometer a coesão. Com 0,5%, a mistura se tornou ainda mais fluida, aumento o espalhamento. Por fim, com 1,0%, a mistura apresentou a maior fluidez entre todas.

Esses resultados corroboram com os apresentados por Souza (2022), que observou um aumento no espalhamento de pastas de cimento com adição de aditivos em comparação à mistura de referência R. A autora também notou que o aumento no espalhamento foi proporcional ao incremento do percentual de aditivo nas misturas.

4.2 Retenção de Água

O Quadro 13 fornece os resultados do ensaio de retenção de água (R_a) para as diferentes amostras no estado fresco, assim como a diferença percentual da retenção de água em relação à mistura de referência (R).

Quadro 13: Resultados do ensaio de retenção de água das misturas aditivadas com pó de Mandacaru.

Mistura	Retenção de água (%)	Diferença percentual da retenção de água em relação a mistura R (%)
R	93,76	0
A	92,49	-1,27
B	91,05	-2,71
C	91,57	-2,19
D	93,04	-0,72

Fonte: Autor (2023).

Ao analisar os dados, observa-se que as misturas aditivadas com o pó extraído do Mandacaru não apresentaram diferenças significativas na retenção de água em

comparação com a mistura de referência. A mistura R teve a maior retenção de água (93,76%), enquanto as demais apresentaram valores ligeiramente menores.

A mistura A apresentou 1,27% a menos de retenção de água em relação a mistura R. A mistura B teve uma redução de 2,71%, sendo a menor retenção de água entre todas. A mistura C mostrou uma diferença de 2,19% menor. E, por fim, a mistura D registrou uma diferença de 0,72% menor, sendo a mais próxima da mistura R.

As variações na retenção de água entre as amostras foram pequenas, com valores que variaram de 93,76% na mistura R para 92,49% na mistura A, 91,05% na mistura B, 91,57% na mistura C e 93,04% na mistura D. A medida que a quantidade do biopolímero aumentava, a partir da mistura B, observou-se um aumento gradual na retenção de água, especialmente na mistura D. Isso sugere que a adição do aditivo em quantidades adequadas pode melhorar a retenção de água, embora a dosagem seja um fator crítico, já que excessos podem causar segregação e retardar o tempo de pega.

Esses resultados indicam que a inclusão do pó de Mandacaru nas misturas B, C e D resultou em um aumento gradual na retenção de água, com a mistura D apresentando o maior valor. Esse aumento pode ser atribuído à interação dos biopolímeros com o aglomerante da argamassa, alterando suas propriedades físicas e químicas. Segundo Souza *et al.* (2019), os biopolímeros formam filmes poliméricos ao redor das partículas de cimento, criando uma barreira que retém a umidade e retarda a evaporação da água. A eficácia dessa barreira depende da quantidade de biopolímero adicionado.

Além disso, os biopolímeros têm a capacidade de reter água e reduzir a quantidade absorvida (Casali, 2008; Schankoski, 2012). Segundo Casali (2008) e Alves (2002), eles também promovem a incorporação de ar na mistura, resultando em bolhas microscópicas que, ao liberar o ar aprisionado durante o processo de cura, aumentam a porosidade da argamassa e podem influenciar a retenção de água.

De maneira geral, os resultados sugerem que a incorporação do pó de Mandacaru não impactou negativamente a retenção de água da argamassa, indicando que o efeito foi positivo e não comprometeu suas propriedades. A quantidade do aditivo deve ser ajustada cuidadosamente, pois doses baixas podem não ter efeito, enquanto doses excessivas podem prejudicar a mistura. Para uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos e para determinar a dosagem ideal do biopolímero, são necessários estudos adicionais.

A retenção de água é um fator importante, pois afeta as reações químicas dos aglomerantes, que necessitam de uma quantidade adequada de água para sua completa e

correta hidratação (Semptikovski e Galuppo *et al.*, 2010). Além disso, a resistência mecânica, a aderência e a durabilidade das argamassas dependem diretamente dessa retenção (Krug, 2017). Como afirmam Knop *et al.* (2009) e Santos *et al.* (2010), a retenção de água durante a cura é fundamental para garantir que as argamassas atinjam seu desempenho ideal.

4.3 Resistência à Compressão

A seguir, o Quadro 14 apresenta os resultados obtidos no ensaio de compressão axial, realizado sob carregamento uniformemente progressivo, para nove tipos de misturas: R, A, B, C, D, A', B', C', D'. As misturas foram aditivadas da seguinte forma: R, 0% (sem o efeito de qualquer aditivo). A, B, C e D, aditivadas com pó de Mandacaru nas concentrações 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%, respectivamente. A', B', C' e D', aditivadas com o aditivo comercial Flux-40 nas mesmas concentrações de 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%. Os resultados são apresentados após 28 dias de cura.

Quadro 14: Resultados do ensaio de resistência a compressão aos 28 dias.

Mistura	Resistência Média (MPa)	Significância			Desvio padrão
R	36,54	a		c	2,27
A	46,82		b		2,05
B	42,59	a	b		3,64
C	41,19	a	b		3,94
D	40,25	a	b		4,02
A'	30,28			c	5,74
B'	37,09	a		c	6,22
C'	37,98	a		c	1,87
D'	38,81	a	b		3,52

Nota: médias com as mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor (2023).

Com base nos resultados apresentados, as misturas aditivadas com pó de Mandacaru mostraram aumento na resistência à compressão em comparação com a mistura R. A mistura A, com 0,0125% de pó de Mandacaru, obteve a maior resistência (46,82 MPa), significativamente superior à da Mistura R (36,54 MPa).

Por outro lado, as misturas aditivadas com o aditivo comercial FLUX-40 apresentaram resistências mais baixas do que as misturas aditivadas com pó de Mandacaru. A mistura A', com a menor concentração de aditivo comercial (0,0125%),

obteve a resistência mais baixa (30,28 MPa), inferior à da mistura R (36,54 MPa) e significativamente menor que as misturas A (46,82 MPa), B (42,59 MPa), C (41,19 MPa) e D (40,25 MPa). Mesmo com a maior concentração do aditivo (como na mistura D' com 1,0%), a resistência ainda ficou abaixo das misturas com pó de Mandacaru.

Ao comparar as misturas aditivadas com o pó de Mandacaru, verificou-se que a presença do pó em pequenas quantidades (como na mistura A) aumentou significativamente a resistência à compressão, sendo este o melhor desempenho entre todas as misturas. À medida que a concentração do pó de Mandacaru aumentou (nas misturas B, C e D), a resistência à compressão diminuiu, mas ainda se manteve superior à da mistura R.

Já as misturas aditivadas com o aditivo comercial demonstraram um efeito negativo na resistência. A mistura A', com 0,0125% de aditivo comercial, apresentou resistência de apenas 30,28 MPa, abaixo da mistura R. As demais misturas com aditivo comercial (B', C', e D') tiveram desempenho melhor do que a mistura A', sendo a mistura D' a que apresentou a maior resistência (38,81 MPa) entre essas, mas ainda inferior às misturas com pó de Mandacaru. Além disso, a resistência das misturas aditivadas com aditivo comercial aumentou proporcionalmente à concentração do aditivo.

Esses resultados estão em consonância com o estudo de Souza (2022), que também indicou um aumento na resistência à compressão das amostras com aditivo à base de cacto. Os achados também corroboram com os estudos de Hernández-Zaragoza *et al.* (2008), Monteiro (2015), Martinez, Molina *et al.* (2015), Mandujano- Ruíz *et al.* (2017) e Souza *et al.* (2019), que destacam o aumento da resistência à compressão em amostras com aditivos à base de cactos.

Contudo, entre as amostras aditivadas com pó de Madacaru, observou-se uma diminuição da resistência à medida que a concentração do aditivo aumentava. Souza (2022, p. 105) também observou esse efeito, afirmando que "o aditivo à base de cacto tem uma influência decrescente na resistência á compressão", situação contrária ao observado nas amostras aditivadas com o aditivo comercial. De maneira geral, os resultados foram satisfatórios, com as amostras apresentando excelentes resistências, o que corrobora em grande parte com a literatura revisada.

4.4 Resistência à Tração na Flexão

O Quadro 15 mostra os resultados do ensaio de tração na flexão realizado após 28 dias de cura. Esse teste foi conduzido sob carregamento uniformemente progressivo em nove tipos de amostras. Como já explicado, a mistura R, considerada como referência, não contém qualquer aditivo. As misturas A, B, C e D foram aditivadas com pó de Mandacaru nas concentrações 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%, respectivamente. E, as misturas A', B', C' e D', aditivadas com o aditivo comercial Flux-40 nas mesmas concentrações de 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%.

Quadro 15: Resultados do ensaio de resistência a tração na flexão aos 28 dias.

Mistura	Resistência Média (Mpa)	Significância	Desvio padrão
R	7,13	a	3,49
A	7,89	a	2,94
B	9,82	a	2,10
C	7,65	a	0,96
D	7,42	a	2,72
A'	7,65	a	1,69
B'	8,25	a	0,80
C'	8,37	a	0,75
D'	8,50	a	0,96

Nota: médias com as mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor (2023).

Com base nos resultados do Quadro 15, a mistura R, utilizada como referência para as misturas aditivadas, apresentou a menor resistência à tração na flexão, com um valor médio de 7,13 MPa.

Nas misturas aditivadas com pó de Mandacaru (A, B, C e D), as resistências médias foram superiores à da mistura R, mas sem apresentar diferenças estatisticamente significativas. A mistura B, com a maior resistência média (9,82 MPa), também não apresentou diferença significativa em relação às demais.

As misturas aditivadas com o aditivo comercial FLUX-40 (A', B', C' e D') apresentaram um aumento gradual na resistência à medida que a concentração do aditivo aumentou, variando de 7,65 MPa em A' a 8,50 MPa em D'. Contudo, essas diferenças também não foram significativas estatisticamente.

De modo geral, conforme a análise estatística pelo teste de Tukey, todas as misturas - tanto aquelas com pó de Mandacaru quanto as com o aditivo comercial - não diferem significativamente entre si. Isso indica que, apesar das diferenças numéricas, não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que os comportamentos são

distintos. Os resultados, no entanto, foram satisfatórios, pois demonstraram excelentes resistências à tração na flexão em todas as misturas.

4.5 Absorção de Água por Capilaridade

Conforme mencionado por Izaguirre *et al.* (2009) e Santana *et al.* (2016), os sistemas de impermeabilização são utilizados na argamassa com o propósito de prevenir danos decorrentes da chuva, umidade do solo, água de infiltração ou sob pressão, devido à alta capacidade de absorção de água por capilaridade.

De acordo com a NBR 16072 (ABNT, 2012), uma argamassa é considerada impermeável quando consegue reduzir em, no mínimo, 50% a absorção de água em comparação à argamassa de referência. Segundo a norma, a aprovação de um aditivo depende do seu desempenho em uma argamassa. Desse modo, é necessário comparar o desempenho entre uma argamassa convencional e outra com aditivo. Se a argamassa com aditivo apresentar melhoria no quesito absorção de água e mantiver os requisitos de resistência mecânica, ela será considerada impermeável (Santana *et al.*, 2016).

Os resultados do ensaio de absorção de água estão apresentados no Quadro 16. Nesse quadro, R corresponde às amostras sem o aditivo. A, B, C e D as amostras com pó de Mandacaru nas concentrações 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%, respectivamente. E, A', B', C' e D' as amostras com o aditivo comercial Flux-40 nas mesmas concentrações (0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%). O Quadro 16 apresenta os índices médios de absorção de água por capilaridade (A_t) medidos aos insistentes 10 e 90 min do ensaio, para amostras com 28 dias de idade.

Quadro 16: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias.

Mistura	10 min			90 min		
	A_{10} (g/cm ²)	Significância	Desvio padrão	A_{90} (g/cm ²)	Significância	Desvio padrão
R	0,02242	a	0,013	0,03362	a	0,022
A	0,01326	a	0,007	0,01732	a	0,016
B	0,01022	a	0,004	0,01634	a	0,006
C	0,01632	a	0,002	0,02448	a	0,007
D	0,02248	a	0,008	0,03982	a	0,010
A'	0,01300	a	0,006	0,01716	a	0,016
B'	0,01008	a	0,003	0,01616	a	0,005
C'	0,00980	a	0,003	0,01580	a	0,004
D'	0,01820	a	0,004	0,03200	a	0,013

Nota: médias com as mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor (2023).

Já o Quadro 17 contém os valores médios dos coeficientes de capilaridade das amostras analisadas.

Quadro 17: Resultados do coeficiente de capilaridade aos 28 dias.

Mistura	C_M $\left(\frac{g}{cm^2 \cdot min^{1/2}}\right)$	Significância		Desvio padrão
R	0,22	a	b	0,19
A	0,12	a	b	0,08
B	0,08	a	b	0,18
C	0,16	a	b	0,13
D	0,32	a		0,08
A'	0,08	a	b	0,08
B'	0,06		b	0,09
C'	0,04		b	0,09
D'	0,18	a	b	0,11

Nota: médias com as mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor (2023).

A análise dos resultados do ensaio de absorção de água, apresentados no Quadro 16, demonstra que a mistura R apresentou a maior absorção média aos 10 min, com 0,02242 g/cm², indicando maior porosidade. Aos 90 min, R manteve-se com a maior absorção, alcançando 0,03362 g/cm², confirmando sua menor resistência à penetração de água em comparação com as misturas aditivadas.

Nas misturas contendo pó de mandacaru (A, B, C e D), o melhor desempenho foi observado em B, com valores de 0,01022 g/cm² aos 10 min e 0,01634 g/cm² aos 90 min, sugerindo maior eficiência nessa concentração. Por outro lado, a mistura D mostrou absorção de 0,02248 g/cm² aos 10 min e 0,03982 g/cm² aos 90 min. Isso indica que concentrações mais elevadas de pó de Mandacaru podem não ser tão eficazes em reduzir a absorção de água.

As misturas com o aditivo comercial FLUX-40 (A', B', C' e D'), apresentaram resultados ligeiramente melhores. A mistura C' destacou-se com os menores valores de absorção, sendo 0,00980 g/cm² aos 10 min e 0,01580 g/cm³ aos 90 min, evidenciando seu bom desempenho. Já a mistura D' apresentou valores de 0,01820 g/cm² aos 10 min e 0,03200 g/cm² aos 90 min, ainda inferiores aos de R, mas superiores às demais misturas. De forma geral, tanto o pó de Mandacaru quanto o aditivo comercial FLUX-40 reduziram a absorção de água em relação à mistura R, com destaque para as misturas

B (0,1% de pó de Mandacaru) e C' (0,5% de FLUX-40). No entanto, pelo teste de Tukey a 5% de significância, essas reduções não foram estatisticamente significantes. As misturas aditivadas com o aditivo comercial mostraram desempenho ligeiramente superior, especialmente nas concentrações 0,1% (B') e 0,5% (C').

A análise dos resultados do coeficiente de capilaridade, apresentado no Quadro 17, reforça os achados no Quadro 16. A mistura R exibiu o maior coeficiente de capilaridade, com $0,22 \frac{g}{cm^2 \cdot min^{1/2}}$, indicando alta capilaridade e baixa resistência à penetração de água. Entre as misturas com pó de Mandacaru, a menor capilaridade foi registrada em B, com coeficiente de capilaridade de $0,08 \frac{g}{cm^2 \cdot min^{1/2}}$, sugerindo maior eficiência nessa concentração. Em contrapartida, a mistura D apresentou o maior coeficiente de capilaridade, com $0,32 \frac{g}{cm^2 \cdot min^{1/2}}$, indicando que concentrações mais altas podem aumentar a porosidade.

Nas misturas aditivadas com o aditivo comercial FLUX-40, a menor capilaridade foi observada em C', que apresentou coeficiente de $0,04 \frac{g}{cm^2 \cdot min^{1/2}}$, destacando-se como a mais eficiente na redução da capilaridade. A mistura D' teve um coeficiente de capilaridade de $0,18 \frac{g}{cm^2 \cdot min^{1/2}}$, o maior entre elas. De modo geral, o aditivo comercial mostrou maior eficácia em reduzir a capilaridade, especialmente na concentração de 0,5% (C').

Ambos os aditivos são eficazes em melhorar a resistência da argamassa à penetração de água, com o FLUX-40 apresentando resultados ligeiramente superiores. No entanto, concentrações mais altas de ambos podem não ser tão eficientes. Apesar das diferenças observadas entre os coeficientes de capilaridade serem numericamente relevantes, o teste de Tukey não revelou diferenças estatisticamente significativas em relação à mistura de referência. Por fim, a mistura B (com pó de mandacaru) atende aos critérios da NBR 16072 (ABNT, 2012), podendo ser classificadas como impermeáveis, o que demonstra o potencial do uso desse aditivo na formulação de argamassas. Isso, de certa forma, confirma o que foi observado no estudo de Souza (2022), no qual a adição de biopolímeros extraídos de cactos promoveu ação impermeabilizante nos corpos de prova para pequenos percentuais.

O comportamento impermeabilizante do aditivo extraído do cacto Mandacaru, pode ser compreendido a luz das observações de Izaguirre *et al.* (2009), Santana *et al.* (2016), Takagi (2004), Medeiros (2008) e Costa *et al.* (2009). Izaguirre *et al.* (2009)

explicam que aditivos de natureza polimérica habitualmente agem formando uma película hidrofóbica na estrutura porosa da argamassa, preenchendo parcialmente ou totalmente a maioria dos poros. Baumgart (1999), ressalta a importância de reduzir ao máximo a relação a/c, pois isso também contribui para a redução da porosidade.

Medeiros (2008) explica que os aditivos de base polimérica têm o efeito de revestir a superfície dos poros, alterando sua polaridade para que passem a repelir os líquidos. Seguindo essa mesma linha de pensamento, Costa *et al.* (2009) enfatizam que esses impermeabilizantes não apenas repelem a água das superfícies, mas também promovem o fechamento dos poros capilares por meio dos géis formados pelas reações, impedindo assim a penetração de água na argamassa.

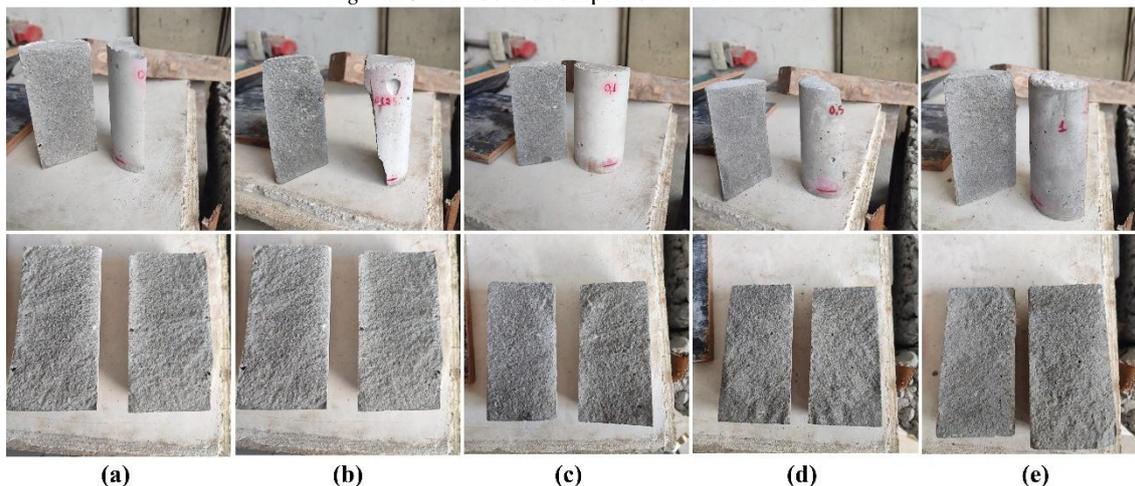
De acordo com Souza (2022), o comportamento da mistura D pode ser atribuído à variação na granulometria do agregado utilizado, juntamente com os métodos de mistura e moldagem empregados. Durante o processo de mistura para a moldagem das amostras da mistura D, é possível que tenha ocorrido uma falha de homogeneização, o que pode ter afetado a hidratação do cimento, resultando em um aumento no volume de capilares. Como explica León-Martínez *et al.* (2014), durante o processo de cura, é possível a formação de bolhas de ar, o que pode contribuir para o aumento da porosidade do material, elevando assim a absorção por capilaridade.

Contudo, os resultados obtidos indicam que a incorporação do biopolímero em pó extraído do cacto Mandacaru possui potencial de proporcionar efeitos impermeabilizante. No entanto, é importante ter cautela ao definir a dosagem a ser utilizada. As misturas A, B e C demonstraram valores inferiores aos da referência R, com a mistura B se destacando com o menor valor entre elas. Por outro lado, a mistura D apresentou um valor superior ao da referência R. De modo geral, as argamassas têm uma capacidade reduzida de absorver água por capilaridade, o que é importante para evitar problemas como eflorescência e deterioração dos materiais.

A observação da ascensão da água no interior das amostras, realizada através do rompimento por compressão diametral dos corpos, revelou que a incorporação do pó de Mandacaru teve um efeito benéfico no comportamento da absorção de água. Em todas as misturas, foi observado o mesmo padrão, caracterizado pela ausência de veios capilares na estrutura interna das amostras. A ascensão de água nas amostras, claramente visíveis nos corpos com teores percentuais de 0,5% e 1,0% de aditivo, conforme observado na Figura 33, foi meramente superficial.

A Figura 39 mostra as amostras: R, referência sem incorporação de aditivo; A, com 0,0125% de aditivo em pó; B, com 0,1%; C, com 0,5% e D, com 1,0%, rompidas por compressão diametral. Analisando as imagens constatou-se que não havia umidade no seu interior dos copos, indicando que a ascensão da água observada na Figura 33 foi apenas superficial.

Figura 39: Amostras rompidas diametralmente.



Fonte: Autor (2023).

É importante destacar que o ensaio de absorção de água pode fornecer informações importantes sobre a durabilidade da argamassa. Verçoza (1983), Thomaz (1989), Caraseck, (2010) e Castros, Martins (2014) explicam que materiais com alta absorção de água podem apresentar problemas com perda de resistência e desempenho ao longo do tempo.

4.5.1 Índices Físicos

Conhecer os índices físicos de um material, como a sua Absorção de Água (AA), Porosidade Aparente (PA) e Massa Específica (MEA), é valioso para avaliar com maior precisão sua resistência à penetração de água. Durante os ensaios, a imersão das amostras em água revelou variações em suas massas. Este comportamento pode ser atribuído à porosidade do material e à sua capacidade de reter líquidos. O Quadro 18 apresenta os resultados obtidos no teste de índices físicos, os quais incluem: absorção de água por imersão, porosidade aparente e massa específica.

Quadro 18: Índices físicos.

Mistura	Massas (g)		AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm^3)
R	P_s	61,0594	8,74	17,57	2,44
	P_u	66,3950			
	P_i	36,0280			
A	P_s	52,3831	7,66	15,57	2,41
	P_u	56,3967			
	P_i	30,6120			
B	P_s	49,1830	6,89	14,37	2,43
	P_u	52,5727			
	P_i	28,9790			
C	P_s	44,1051	7,79	15,73	2,40
	P_u	47,5413			
	P_i	25,6900			
D	P_s	57,4138	8,85	17,75	2,44
	P_u	62,4926			
	P_i	33,8720			

Fonte: Autor (2023).

A análise do Quadro 18, que apresenta os índices físicos das diferentes misturas, fornece informações sobre a estrutura interna e a resistência das argamassas à penetração de água. A mistura de referência (R), apresentou os maiores valores de AA, com 8,74%, e PA, com 17,57%, indicando maior porosidade e, conseqüentemente, maior suscetibilidade à absorção de água. Essa característica foi confirmada pelo ensaio de absorção de água por capilaridade, no qual a mistura R registrou o maior coeficiente de capilaridade e as maiores taxas de absorção de água aos 10 e 90 minutos.

Entre as misturas aditivadas, as amostras A, B e C apresentaram valores de absorção de água e porosidade aparente inferiores aos da referência, sugerindo uma redução na porosidade e na capacidade de absorção de água. A mistura B, em particular, exibiu a menor PA, com 14,37%, e AA, com 6,89%, resultados consistentes com o ensaio de capilaridade, no qual foi a mais eficiente em reduzir a absorção de água entre as misturas aditivadas com pó de Mandacaru. A mistura D, por outro lado, apresentou os maiores valores de AA (8,85%) e PA (17,75%) entre as aditivadas, aproximando-se dos valores da referência (R). Isso reflete sua menor eficiência em reduzir a porosidade e a absorção de água, como também evidenciado no ensaio de absorção de água por capilaridade, no qual a mistura D apresentou valores similares aos de R.

As diferenças na MEA entre as misturas foram pequenas, variando de 2,40 g/cm^3 (C) a 2,44 g/cm^3 (R e D), indicando que ela teve pouca influência nos índices de absorção de água e porosidade aparente. Contudo, as misturas com menor porosidade, como A e B, apresentaram a menor absorção de água com elevada massa específica, corroborando a relação entre esses fatores. Em termos percentuais, a mistura A reduziu

a AA em 12,36% e a PA em 11,38%, enquanto a mistura B obteve reduções ainda maiores, de 21,17% e 18,21%, respectivamente. Por outro lado, a mistura C reduziu a AA em 10,87% e a PA em 10,47%, enquanto a mistura D apresentou um aumento de 1,26% na AA e de 1,02% na PA.

De forma geral, os resultados indicam que o pó de Mandacaru foi eficiente na redução da porosidade e da absorção de água em concentrações mais baixas (particularmente em B), mas mostrou limitações em concentrações mais altas (D). Isso reforça a necessidade de otimizar a proporção do aditivo para obter os melhores resultados em termos de resistência à penetração de água.

De acordo com Santana *et al.* (2016), há uma relação direta entre porosidade e absorção de água: a diminuição da porosidade reduz os vazios na estrutura do material, contribuindo não apenas para a redução da absorção, mas também para o aumento da resistência mecânica e da durabilidade. Essa relação explica os resultados observados, em que as misturas A, B e C apresentaram menores valores de absorção e porosidade em relação à referência R. Por outro lado, o aumento na absorção e porosidade da mistura D pode estar relacionado à incorporação de ar durante o processo de cura, como sugerido por León-Martínez *et al.* (2014).

4.6 Durabilidade

A análise da durabilidade foi realizada por meio de uma comparação estatística entre os resultados dos ensaios de resistência mecânica e impermeabilidade realizados após o envelhecimento e aqueles obtidos aos 28 dias de idade. Essa abordagem permitiu avaliar a capacidade das argamassas de resistir aos fatores de degradação especificados.

4.6.1 Envelhecimento Acelerado

O processo de envelhecimento acelerado através da câmara de choque térmico contribuiu significativamente para a obtenção de resultados valiosos nos ensaios destinados a avaliar a resistência e durabilidade das argamassas.

No decorrer da realização dos ciclos de choque térmico, observou-se que a temperatura do ambiente externo influenciou nas variações de temperaturas interna da câmara. Nos ciclos realizados após o meio-dia (12 h), a câmara atingiu os 80°C mais rapidamente do que nos ciclos realizados no período anterior, pela manhã. No entanto,

durante o processo de resfriamento, ocorreu o oposto. Isso pode ser explicado pela intensa incidência do sol sobre a câmara durante a maior parte do dia, especialmente à tarde.

Ao examinar os efeitos visuais nas superfícies das amostras após os ciclos de choque térmico, pôde-se observar modificações físicas no material. Estas modificações abrangem alterações na coloração, como a manifestação de manchas na superfície, indicando a lixiviação do hidróxido de cálcio, e o surgimento de fissuras (Figura 40).

Figura 40: Modificações físicas após envelhecimento acelerado.



Fonte: Autor (2023).

Esses resultados sugerem que após os ciclos de choque térmico as amostras apresentaram desgastes físicos visivelmente perceptíveis com a manifestação de manchas na superfície e o surgimento de fissuras.

Outros parâmetros relevantes como a resistência à compressão, a resistência à tração e à resistência a absorção de água foram observados por meio de ensaios físicos, conforme descrito a seguir. Os resultados obtidos desses ensaios após o processo de envelhecimento acelerado foram essenciais para obter uma boa compreensão das propriedades e da qualidade do material.

4.6.2 Resistência Mecânica

4.6.2.1 Resistência à Compressão

O Quadro 19 apresenta os resultados do ensaio de resistência a compressão referente as misturas R, A, B, C, D, A', B', C' e D' após 17 ciclos de choque térmico. A

mistura R, utilizada como referência, não contém aditivo, enquanto as misturas A, B, C e D foram aditivadas com pó de Madacaru nas concentrações de 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%, respectivamente, e as misturas A', B', C' e D foram aditivadas com o aditivo comercial FLUX-40, nas mesmas proporções.

Quadro 19: Resultados do ensaio de resistência a compressão após os ciclos de choque térmico.

Mistura	Resistência Média (MPa)	Significância	Desvio padrão
R	31,88	<i>a</i>	4,08
A	36,97	<i>a</i>	5,38
B	34,99	<i>a</i>	2,67
C	32,91	<i>a</i>	4,14
D	31,80	<i>a</i>	2,93
A'	17,00	<i>b</i>	4,62
B'	34,88	<i>a</i>	4,17
C'	36,04	<i>a</i>	0,52
D'	37,91	<i>a</i>	1,90

Nota: médias com as mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor (2023).

Analisando os resultados apresentados no Quadro 19, observa-se que não há diferenças estatisticamente significativas entre as misturas pelo teste de Tukey a 5% de significância, exceto a mistura A'. Isso sugere que a adição do pó de Mandacaru, em qualquer das concentrações testadas, não comprometeu a resistência mecânica após o envelhecimento.

Entre as misturas com pó de Mandacaru (A, B, C e D), a mistura A destacou-se com o melhor desempenho, atingindo 36,97 MPa, seguida pela mistura B, com 34,99 MPa. Em contraste, as misturas C (32,91 MPa) e D (31,80 MPa) mostraram resistências mais próximas à referência. Com isso, observa-se uma tendência de redução na eficiência do aditivo em concentrações mais altas. Essa diminuição pode estar associada ao excesso de material orgânico, que pode comprometer a matriz da argamassa.

Já, entes as misturas aditivadas com FLUX-40 (A', B', C' e D'), a mistura A', com 17,00 MPa, foi significativamente inferior à referência, indicando que a menor concentração do aditivo comercial (0,0125%) não foi suficiente para proteger a argamassa contra os efeitos do envelhecimento. No entanto, as misturas B' (34,88 MPa), C' (36,04 MPa) e D' (37,91 MPa) mostraram desempenhos superiores ao da referência, aumentando com o aumento da concentração de aditivo, com destaque para a mistura D' (1,0%), que apresentou a maior resistência entre todas.

Tanto o pó de Mandacaru quanto o FLUX-40 demonstraram potencial para melhorar a durabilidade das argamassas, mas com comportamentos distintos. O pó de Mandacaru foi mais eficaz na concentração mais baixas (0,0125%), enquanto o FLUX-40 destacou-se na concentração mais altas (1,0%). As diferenças de desempenho reforçam a importância de ajustar a dosagem do aditivo.

Em resumo, as misturas A e D' foram as que apresentaram os melhores resultados de resistência à compressão após o envelhecimento. O desempenho inferior da mistura A' e a tendência de perda de eficiência em altas concentrações do pó de Mandacaru ressaltam a necessidade de otimização das proporções de cada aditivo para alcançar o melhor equilíbrio entre durabilidade e resistência mecânica.

Como o objetivo deste estudo é investigar a influência do pó de Mandacaru na argamassa, foi realizada a comparação entre as resistências à compressão das misturas com pó de Mandacaru após o envelhecimento com ela aos 28 dias. Os resultados, apresentados no Quadro 20, mostram as misturas R, A, B, C e D que representam as concentrações de 0%, 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%, respectivamente, tanto na condição envelhecida quanto aos 28 dias.

Quadro 20: Comparação da resistência a compressão das amostras aditivadas com pó de Mandacaru - Envelhecida x 28 dias.

Mistura	Condição	Resistência Média (MPa)	Significância				Desvio padrão	Redução percentual (%)
R	28 dias	36,54	a			d	2,27	12,75%
	Envelhecida	31,88			c		4,08	
A	28 dias	46,82		b			2,05	21,04%
	Envelhecida	36,97	a		c		5,38	
B	28 dias	42,59	a	b			3,65	17,84%
	Envelhecida	34,99			c		2,67	
C	28 dias	41,19	a	b			3,94	20,10%
	Envelhecida	32,91			c	d	4,14	
D	28 dias	40,25	a	b		d	4,03	20,99%
	Envelhecida	31,80			c		2,93	

Nota: médias com as mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor (2023).

A análise dos resultados apresentados no Quadro 20 demonstra o impacto do envelhecimento na resistência à compressão das misturas aditivadas com pó de Mandacaru. Ao comparar os valores obtidos aos 28 dias com aqueles após o envelhecimento, foram observadas reduções estatisticamente significativas nas

resistências de todas as misturas, evidenciando o efeito negativo do envelhecimento na durabilidade das argamassas.

A mistura R, sem o aditivo, reduziu de 36,54 MPa para 31,88 MPa após o envelhecimento, correspondendo a uma redução de 12,75%. Essa foi a menor redução percentual observada, sugerindo que a mistura sem o aditivo tem a menor vulnerabilidade às condições de choque térmico.

Entre as misturas aditivadas, A destacou-se por apresentar a maior resistência aos 28 dias (46,82 MPa). No entanto, sofreu a maior redução percentual (21,04%), chegando a 36,97 MPa após o envelhecimento, embora ainda tenha mantido a maior resistência absoluta entre todas as misturas. As misturas B e C, com resistências aos 28 dias de 42,59 MPa e 41,19 MPa, respectivamente, apresentaram reduções de 17,84% e 20,10%, atingindo valores de 34,99 MPa e 32,91 MPa após o envelhecimento, permanecem superiores a da mistura de referência envelhecida.

A mistura D apresentou comportamento próximo ao da mistura C, partindo de uma resistência de 40,25 MPa aos 28 dias, para 31,80 MPa após o envelhecimento, sofrendo uma redução percentual de 20,99%. Esse foi o menor valor de resistência entre as misturas, indicando a menor eficácia do pó de Mandacaru nessa concentração. Esses resultados sugerem que as misturas com maiores concentrações de pó de Mandacaru C (0,5%) e D (1,0%), resultaram em maior suscetibilidade aos efeitos do envelhecimento.

Ao analisar a significância estatística dos dados, observa-se que, apesar das reduções percentuais observadas, as misturas envelhecidas (exceto R) não diferem estatisticamente entre si, mostrando resistências agrupadas na mesma faixa de significância (c). Isso sugere que, embora o pó de Mandacaru contribua para o aumento da resistência aos 28 dias, ele não é suficiente para mitigar os impactos do envelhecimento de forma consistente.

Em síntese, os resultados indicam que o pó de Mandacaru tem efeito positivo na resistência inicial (aos 28 dias) das argamassas, especialmente em concentrações mais baixas, como nas misturas A e B. No entanto, sua eficácia em manter a resistência após o envelhecimento é limitada, exigindo otimizações para melhorar a durabilidade das argamassas expostas a condições adversas. Esses resultados refletem a necessidade de ajustar as proporções do aditivo, conforme a composição da argamassa, para maximizar os benefícios em termos de durabilidade e resistência mecânica.

4.6.2.2 Resistência à Tração na Flexão

O Quadro 21 mostra os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão das misturas R, A, B, C, D, A', B', C' e D' após ciclos de choque térmico. A mistura R, não contém aditivo, enquanto as misturas A, B, C e D foram aditivadas com pó de Madacaru nas concentrações de 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%, respectivamente, e as misturas A', B', C' e D foram aditivadas com o aditivo comercial FLUX-40, nas mesmas proporções.

Quadro 21: Resultados do ensaio de resistência a tração na flexão após os ciclos de choque térmico.

Mistura	Resistência Média (Mpa)	Significância	Desvio padrão
R	6,75	<i>a</i>	0,80
A	7,05	<i>a</i>	0,26
B	7,12	<i>a</i>	0,51
C	6,53	<i>a</i>	0,35
D	7,32	<i>a</i>	0,57
A'	5,85	<i>a</i>	0,74
B'	6,99	<i>a</i>	0,55
C'	7,24	<i>a</i>	1,69
D'	6,38	<i>a</i>	0,45

Nota: médias com as mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor (2024).

Os resultados do ensaio indicam que, mesmo havendo alterações numéricas nas resistências a tração na flexão, o teste de Tukey mostrou que não houve diferenças estatisticamente significativas entre elas. O desempenho da mistura R foi de 6,75 MPa, enquanto as misturas A, B, C e D, aditivadas com pó de Mandacaru, registraram resistências de 7,05 MPa, 7,12 MPa, 6,53 MPa e 7,32 MPa, respectivamente. Todas com um leve incremento em relação a mistura R, com exceção a mistura C (6,53 MPa), que teve uma pequena redução, ficando muito próximo a R. A mistura D, teve o maior incremento entre as misturas aditivadas com pó de Mandacaru.

Dentre as misturas aditivadas com o aditivo comercial FLUX-40 (A', B', C', D'), as misturas A' e D' apresentaram resistências médias de 5,85 MPa e 6,38 MPa, respectivamente, com A' sendo a menor entre todas, indicando que essas concentrações não são eficientes para melhorar a resistência sob condições adversas. As misturas B' e C', mostraram os melhores desempenhos, com resistências de 6,99 MPa e

7,24 MPa, respectivamente, as maiores entre as misturas com FLUX-40, com destaque para C'.

Em geral, todas as misturas, tanto aditivadas com pó de Mandacaru quanto com o aditivo comercial, apresentaram desempenhos semelhantes ao da mistura R, sem diferenças estatísticas significativas. O pó de Mandacaru (D) na concentração de 1,0% apresentou o melhor resultado em termos de resistência absoluta (7,32 MPa). A concentração 0,5% na mistura C', com o aditivo comercial, teve desempenho comparável, mas um pouco inferior ao de D. Embora não diferindo estatisticamente das demais, as misturas aditivadas não mostrou desvantagens em termos de melhoria de resistência.

Este estudo tem como finalidade investigar os efeitos do pó do cacto Mandacaru na argamassa de cimento. Para isso, foram comparadas as resistências à tração na flexão das misturas contendo pó de Mandacaru após envelhecimento com ela aos 28 dias. Os resultados, apresnetado no Quadro 22, incluem as mistura R, A, B, C e D, correspondendo às concentrações de 0%, 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%, respectivamente, em ambas as condições.

Quadro 22: Comparação da resistência a tração na flexão das amostras aditivadas com pó de Mandacaru – Envelhecida x 28 dias.

Mistura	Condição	Resistência Média (MPa)	Significância	Desvio padrão	Redução percentual (%)
R	28 dias	7,13	<i>a</i>	3,49	5,33%
	Envelhecida	6,75	<i>a</i>	0,80	
A	28 dias	7,89	<i>a</i>	2,94	10,65%
	Envelhecida	7,05	<i>a</i>	0,26	
B	28 dias	9,82	<i>a</i>	2,10	27,49%
	Envelhecida	7,12	<i>a</i>	0,51	
C	28 dias	7,65	<i>a</i>	0,96	14,64%
	Envelhecida	6,53	<i>a</i>	0,35	
D	28 dias	7,42	<i>a</i>	2,72	1,35%
	Envelhecida	7,32	<i>a</i>	0,57	

Nota: médias com as mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor (2024).

A análise estatística, com base no teste de Tukey a 5% de significância, dos resultados do ensaio de tração na flexão mostrou que não houve diferenças significativas entre as resistências das argamassas com pó de Mandacaru após envelhecimento e aos 28 dias. Isso sugere que, nas condições avaliadas, as

concentrações de pó de Mandacaru não alteraram significativamente a resistência à tração na flexão do material.

A mistura R apresentou resistência de 7,13 MPa aos 28 dias, reduzindo para 6,75 MPa após o envelhecimento, o que representa uma redução percentual de 5,33%. Esse resultado reflete uma boa estabilidade, com uma pequena diminuição na resistência. A mistura A, por sua vez, mostrou uma redução percentual maior, de 10,65%, passando de 7,89 MPa aos 28 dias para 7,05 MPa após o envelhecimento. Embora tenha apresentado uma ligeira melhoria na resistência aos 28 dias, o envelhecimento causou uma redução maior em comparação à R.

A mistura B registrou a maior resistência aos 28 dias (9,82 MPa), mas também teve a maior redução percentual (27,49%), caindo para 7,12 MPa após o envelhecimento. Esse comportamento demonstra menor estabilidade ao longo do tempo. Já a mistura C, com resistência de 7,65 MPa aos 28 dias, apresentou redução para 6,53 MPa após o envelhecimento, representando uma queda percentual de 14,64%.

Entre todas as misturas, a D demonstrou maior estabilidade, com resistências de 7,42 MPa aos 28 dias e 7,32 MPa após envelhecimento, o que equivale a uma redução percentual de apenas 1,35%. Esses resultados destacam a mistura D como a mais resistente ao efeito do envelhecimento, enquanto a mistura B apresentou o pior desempenho.

4.6.3 Impermeabilidade

4.6.3.1 Absorção de Água por Capilaridade

O Quadro 23 fornece os resultados obtidos no ensaio de resistência à absorção de água por capilaridade após 17 ciclos de choque térmico. R representa a mistura sem aditivos, enquanto A, B, C e D as aditivadas com pó de Madacaru nas concentrações 0,0125%, 0,1%, 0,5% e 1,0%, respectivamente, e A', B', C' e D as aditivadas com o aditivo comercial FLUX-40, nas mesmas proporções.

Quadro 23: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade após envelhecimento.

Mistura	10 min				90 min				
	A_{10} (g/cm^2)	Significância		Desvio padrão	A_{90} (g/cm^2)	Significância		Desvio padrão	
R	0,06122	a		0,013	0,18442	a		0,012	
A	0,04692	a	b	0,016	0,12184		b	c	0,031

B	0,05136	a	b		0,001	0,14528	a	b	c	0,025
C	0,05388	a		c	0,011	0,14792	a	b	c	0,022
D	0,03034		b	c	0,006	0,13808	a	b	c	0,042
A'	0,04660	a	b		0,015	0,18200	a	b		0,008
B'	0,04920	a	b		0,007	0,14400	a	b	c	0,027
C'	0,04940	a	b		0,014	0,14000	a	b	c	0,017
D'	0,03300		b	c	0,002	0,11680			c	0,052

Nota: médias com as mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor (2023).

A análise dos resultados apresentados no Quadro 23 permite avaliar a influência do pó de Mandacaru e do aditivo comercial FLUX-40 na durabilidade das argamassas, considerando os valores médios de absorção de água aos 10 min (A10) e 90 min (A90) e a significância estatística pelo teste de Tukey a 5%.

Aos 10 min, a mistura R apresentou a maior absorção (0,06122 g/cm²), indicando menor resistência. As misturas com pó de Mandacaru A (0,04692 g/cm²), B (0,05136 g/cm²) e C (0,05388 g/cm²) reduziram a absorção em relação a R, mas sem diferenças estatísticas significativas. A mistura D (0,03034 g/cm²) apresentou a menor absorção e foi estatisticamente diferente de R. Entre as misturas com o aditivo comercial FLUX-40, os valores variaram de 0,03300 g/cm² (D') a 0,04660 g/cm² (C'), desempenho similar ao pó de Mandacaru, com D' destacando-se pelo desempenho semelhante a D.

Aos 90 min, R novamente apresentou a maior absorção (0,18442 g/cm²), confirmando a menor resistência. As misturas com o pó de Madacaru (B, C e D) mostraram reduções numéricas, com valores entre 0,13809 g/cm² (D) a 0,14528 g/cm² (B), mas sem diferenças significativas. A mistura A (0,12184 g/cm²) apresentou absorção significativamente menor em relação a R. Nas misturas com FLUX-40, D' (0,11680 g/cm²) obteve o melhor desempenho, sendo estatisticamente diferente de R.

Tanto o pó de Mandacaru quanto o FLUX-40 apresentaram aumentos numéricos na resistência a absorção de água em relação à mistura R, com destaque para a concentração de 1,0% (D e D'), que mostraram os melhores desempenhos.

O Quadro 24 apresenta a comparação das resistências à absorção de água das misturas aos 28 dias e após os ciclos de choque térmico, com o objetivo de avaliar os efeitos do pó de Mandacaru na argamassa.

Quadro 24: Comparação da absorção de água por capilaridade entre as amostras envelhecidas e aos 28 dias.

Aos 10min							
Mistura	Condição	A_{M10} (g/cm ²)	Significância			Desvio padrão	Aumento percentual (%)
R	28 dias	0,02242	a			0,013	173,95%
	Envelhecida	0,06122		b		0,013	
A	28 dias	0,01326	a			0,007	253,85%
	Envelhecida	0,04692		b	c	0,016	
B	28 dias	0,01022	a			0,004	402,54%
	Envelhecida	0,05136		b		0,010	
C	28 dias	0,01632	a			0,002	230,15%
	Envelhecida	0,05388		b		0,011	
D	28 dias	0,02248	a			0,006	34,96%
	Envelhecida	0,03034	a		c	0,006	
Aos 90 min							
Mistura	Condição	A_{M90} (g/cm ²)	Significância			Desvio padrão	Aumento percentual (%)
R	28 dias	0,03362	a			0,022	448,54%
	Envelhecida	0,18442		b		0,012	
A	28 dias	0,01732	a			0,016	603,46%
	Envelhecida	0,12184			c	0,031	
B	28 dias	0,01634	a			0,006	789,11%
	Envelhecida	0,14528		b	c	0,025	
C	28 dias	0,02448	a			0,007	419,38%
	Envelhecida	0,14792		b	c	0,022	
D	28 dias	0,03982	a			0,010	32,54%
	Envelhecida	0,13808		b	c	0,042	

Nota: médias com as mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autor (2024).

Os resultados do Quadro 24 mostram que todas as misturas, exceto a D, apresentaram aumentos estatisticamente significativos na absorção de água após o envelhecimento em comparação aos 28 dias.

Apesar da mistura D ter apresentado maior absorção absoluta em relação à R aos 28 dias, ela sofreu o menor aumento percentual após os ciclos de choque térmico: 34,96% aos 10 min e 32,54% aos 90 min. Aos 10 min, a mistura R teve um aumento de 173,95%, enquanto as misturas com pó de Mandacaru (A, B e C) mostraram aumentos de 253,85%, 402,54% e 230,15%, respectivamente.

Aos 90 minutos, a mistura R apresentou um aumento de 448,54%, enquanto as misturas aditivadas com pó de Mandacaru (A, B, C e D) tiveram aumentos de 603,46%, 789,11%, 419,38% e 32,54%, respectivamente. Mais uma vez, a mistura D destacou-se com o menor aumento percentual (32,54%) e manteve a menor absorção após o envelhecimento.

O envelhecimento elevou significativamente a absorção de água em todas as misturas, mas a intensidade do aumento variou conforme a concentração de aditivo. A mistura D, com 1,0% de pó de Mandacaru, demonstrou maior resistência, fornecendo os menores aumentos percentuais na absorção de água.

4.7 Difração de Raios X

A análise por Difração de Raios X (DRX) foi importante para identificar as fases cristalinas presentes nas argamassas. A identificação foi feita pela comparação do padrão obtido no difratograma com o banco de dados de padrões cristalográficos do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

O padrão de difração é gerado quando raios X interagem com a estrutura cristalina, produzindo picos em posições específicas. O equipamento DRX fornece os dados em forma de um gráfico chamado difratograma, que mostra a intensidade (eixo y) em função do ângulo de difração 2θ (eixo x). O gráfico apresenta picos, cada um relacionado a um plano cristalográfico. As posições 2θ e as intensidades dos picos permitem identificar as fases cristalinas presentes. O Quadro 25 apresenta alguns dos principais padrões utilizados para as análises, com base no ICDD.

Quadro 25: Picos identificados correspondentes as fases anidras e hidratadas.

Mineral	Fórmula química	Representação	Cód. Ref. ICDD
Belita (Silicato dicálcio)	Ca_2SiO_4	B	00-024-0034
Calcita (Carbonato de Cálcio)	CaCO_3	C	00-024-0027
Etringita (Hidrato de hidróxido de sulfato de alumínio e cálcio)	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\cdot 26\text{H}_2\text{O}$	E	00-041-1451
Portlandita (Hidróxido de Cálcio)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	P	00-044-1481
Quartzo (Óxido de silício)	SiO_2	Q	00-033-1161

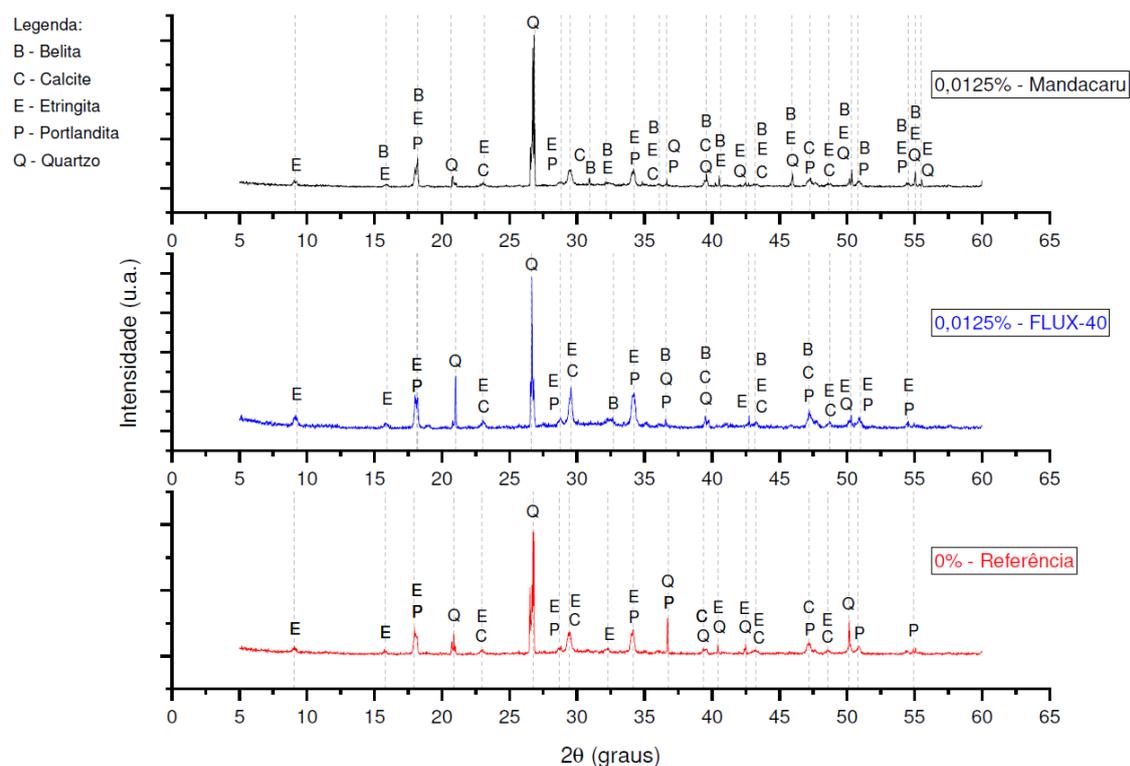
Fonte: Com base em Souza (2022).

Os minerais identificados nos gráficos foram Portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]; Quartzo [SiO_2]; Calcita [CaCO_3]; Etringita [$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\cdot 26\text{H}_2\text{O}$] e Belita [Ca_2SiO_4]. Segundo Richardson (2004), o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pela resistência e durabilidade da argamassa, é formado para reação dos silicatos presentes no cimento (C_3S e C_2S) com a água. A Portlandita é um subproduto dessa reação que desempenha um

papel importante na alcalinidade dos sistema. O Quartzo, agregado inerte, oferece resistência e estabilidade, aumentando a durabilidade. A Calcita, resultante da carbonatação do cimento, pode reduzir a resistência em excesso, mas também fornece cálcio adicional e diminui a permeabilidade. A Etringita, é importante para a resistência inicial, mas em excesso possa causar fissuras. A Belita é responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica e ao longo do tempo. Esses minerais influenciam diretamente a resistência mecânica e a durabilidade das argamassas.

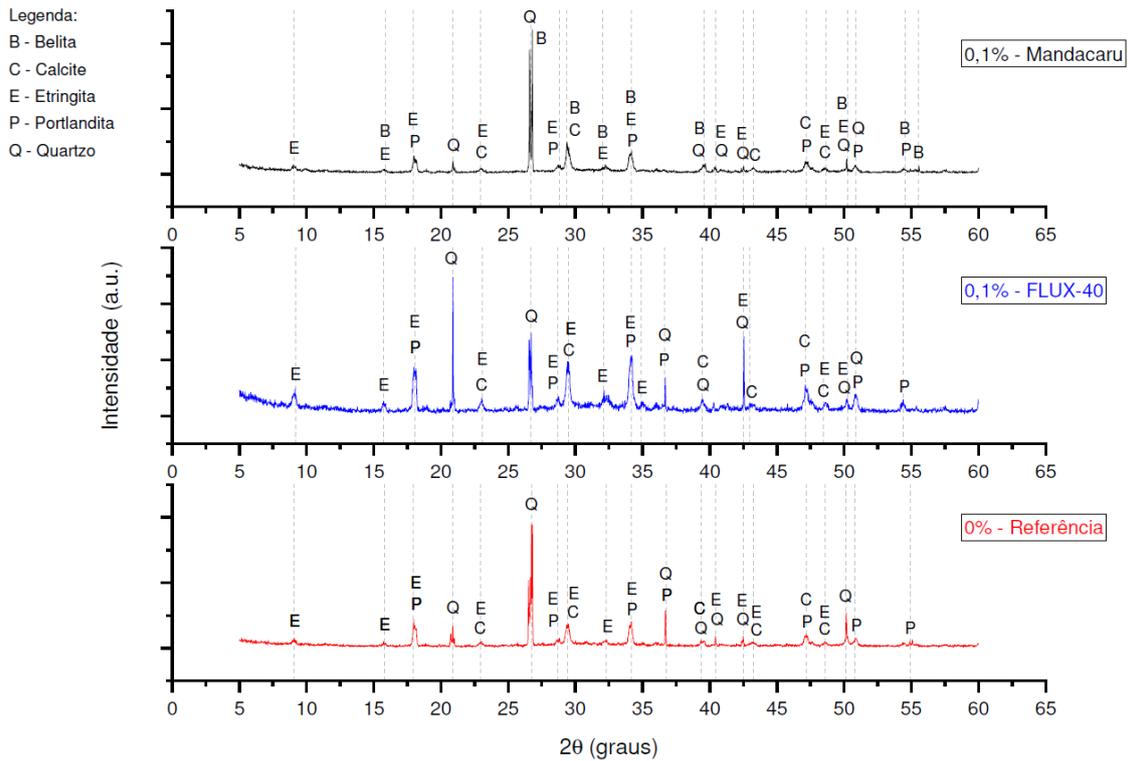
Os gráficos a seguir apresentam os resultados qualitativos da análise de DRX, comparando os difratogramas das amostras com a mesma concentração de aditivo e a referência, sem aditivo.

Gráfico 2: Comparação dos difratogramas das amostras aditivadas com pó de Mandacaru e FLUX-40 na concentração de 0,0125%.



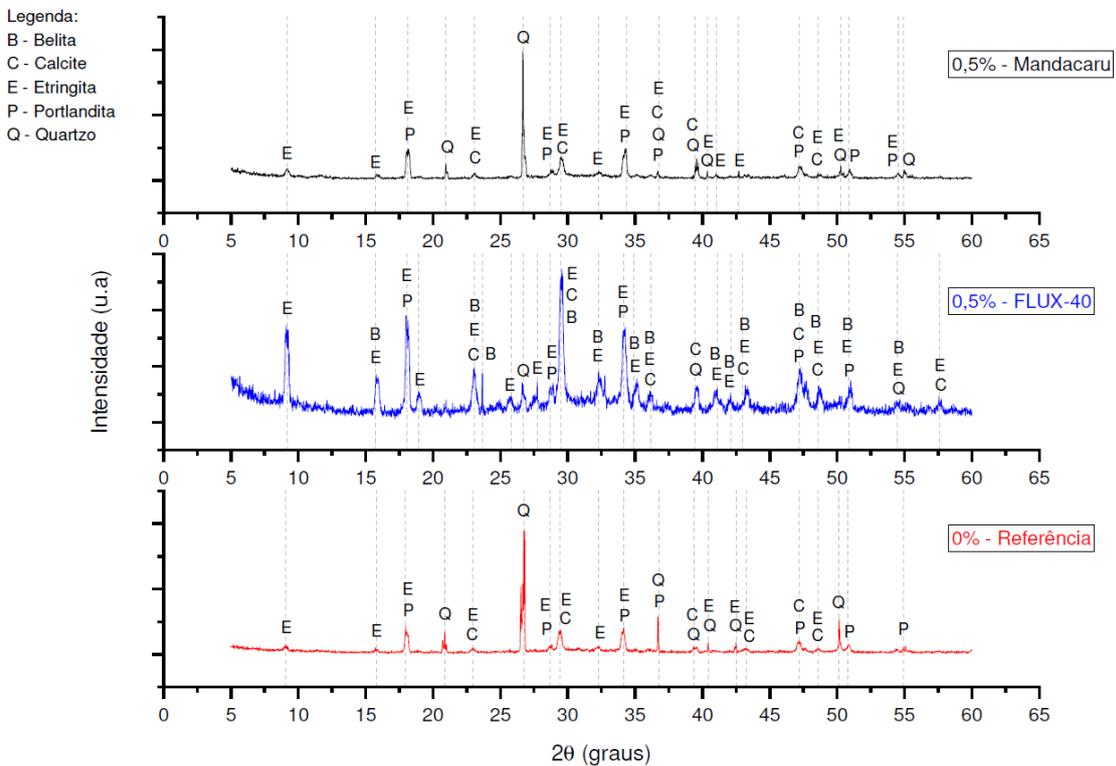
Fonte: Autor (2024).

Gráfico 3: Comparação dos difratogramas das amostras aditivadas com pó de Mandacaru e FLUX-40 na concentração de 0,1%.



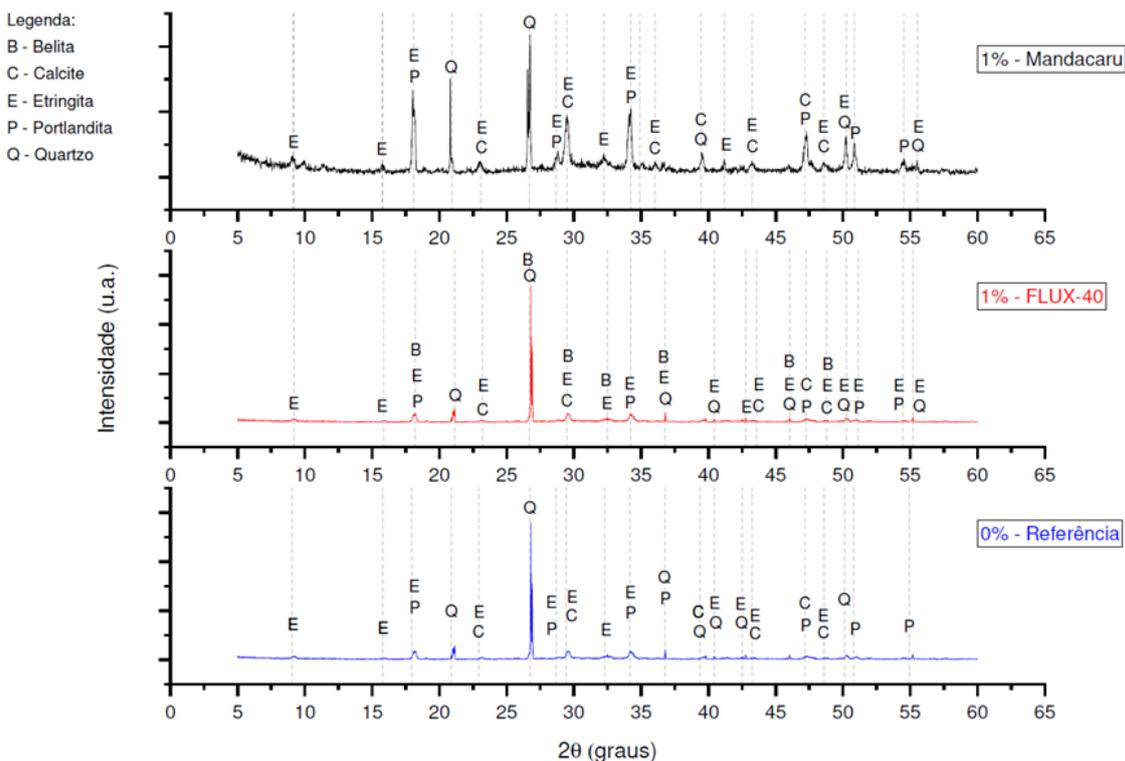
Fonte: Autor (2024).

Gráfico 4: Comparação dos difratogramas das amostras aditivadas com pó de Mandacaru e FLUX-40 na concentração de 0,5%.



Fonte: Autor (2024).

Gráfico 5: Comparação dos difratogramas das amostras aditivadas com pó de Mandacaru e FLUX-40 na concentração de 1,0%.



Fonte: Autor (2024).

Ao analisar os gráficos, observa-se que não há formação de novas estruturas cristalinas, apenas variações nas intensidades dos picos. De acordo com o que foi evidenciado por Souza (2022), as principais fases identificadas foram a Portlandita (P) e Etringita (E), ambas fundamentais para a resistência mecânica inicial das argamassas.

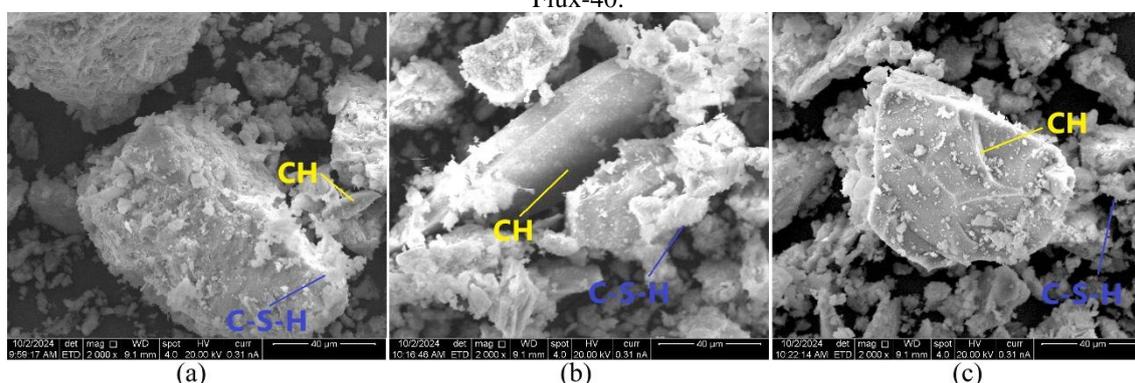
As amostras de referência (0%) e as aditivadas com pó de Mandacaru (0,5% e 1,0%) e FLUX-40 (0,1%) apresentaram ausência de Belita (Ca_2SiO_4), indicando que esta fase anidra pode ter sido consumida ou se encontra abaixo do limite de detecção do DRX. Essa ausência pode ser atribuída aos seguintes fatores: consumo completo pela hidratação, limitação do DRX, Influência dos aditivos.

As variações na intensidade, o deslocamento e o surgimento de picos nos difratogramas sugerem que os aditivos influenciam no processo de hidratação. Em concentrações baixas, a alteração na formação dos produtos hidratados é mínima, mas em concentrações mais altas, tanto o pó de Mandacaru quanto o FLUX-40 favorecem a formação de Etringita e Portlandita. Isso indica que esses aditivos podem modificar a microestrutura da argamassa, influenciando as fases hidratadas responsáveis pela resistência e durabilidade.

4.8 Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise qualitativa realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com ampliação de 2000x e escala de 40 μ m, complementou os resultados obtidos no DRX. Foi possível identificar, nas micrografias, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal responsável pela resistência mecânica da argamassa, caracterizado pela ausência de estrutura cristalina bem definida, o que o torna quase indetectável em difratogramas, conforme Mehta; Monteiro (2014). O hidróxido de cálcio (portlandita, CH), segundo produto de hidratação mais abundante na matriz cimentícia, também foi identificado. No entanto, a etringita (AFt), produto da hidratação dos aluminatos presentes no cimento, não foi identificada nas imagens, embora tenha sido detectado por Souza (2022). A Figura 41 ilustra as imagens capturadas pelo MEV das amostras com e sem aditivos.

Figura 41: Imagens obtidas pelo MEV das amostras (a) sem aditivo, (b) com pó de Mandacaru e (c) com Flux-40.



Fonte: Autor (2024).

É importante destacar que a MEV é uma técnica qualitativa, incapaz de fornecer conclusões definitivas sobre o efeito dos aditivos no interior das argamassas. Contudo, as micrografias permitem observar sua disposição no material cimentício e levantar algumas considerações. Nas imagens das amostras com aditivos (Figura 41b e 41c), observa-se uma matriz mais densa, indicando menor permeabilidade e sugerindo aumento na resistência mecânica.

Além disso, não foi observado degradação dos aditivos incorporados em nenhuma das amostras analisadas, indicando que as micropartículas identificadas

registramos os processos aos quais foram submetidas. Contudo, não é possível afirmar o mesmo para partículas que não puderam ser identificadas.

Por fim, a análise das argamassas por MEV corroborou os achados do DRX, evidenciando que, nas amostras analisadas, com e sem aditivo, não foram identificadas estruturas cristalinas diferentes das formadas pela hidratação do cimento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo destaca a relevância do estudo e aponta possíveis limitações. Ele também destaca o potencial do biopolímero para substituir aditivos convencionais utilizados em argamassa, promovendo um ciclo produtivo que pode gerar emprego e renda desde o seu cultivo até a sua aplicação e distribuição, reduzindo custos na indústria da construção. Além disso, devido à sua origem natural e renovável, a adoção deste produto na indústria da construção civil pode contribuir para a redução dos impactos ambientais no meio ambiente, promovendo práticas mais sustentáveis.

Quanto a Produção do Pó por *Spray Dryer* a Partir da Mucilagem Extraída por Cocção do Cacto Mandacaru.

O processo de cocção empregado na extração da mucilagem do cacto Mandacaru, assim como o método de secagem por pulverização (*Spray Dyer*) utilizado para obter o aditivo biopolimérico na forma de pó a partir da mucilagem extraída do cacto Mandacru, demonstraram ser eficazes. Isso foi evidenciado pela produção de 105 g de pó a partir de uma massa inicial de 6.350,52 g de partes coletadas do cacto. Este resultado superou as expectativas, uma vez que era esperado uma quantidade cerca de 34% menor, conforme indicado por estudos anteriores.

É importante destacar que os resíduos gerados no processo são orgânicos e podem ser aproveitados como fertilizantes, alimento para animais de rebanho ou matéria-prima para outros produtos.

Quanto aos Efeitos nas Propriedades da Argamassa de Cimento no Estados Fresco.

No estado fresco, o estudo indica que o pó do cacto Mandacaru exerceu um efeito plastificante e retardador de pega, aumentando à medida que a quantidade de pó incorporada aumentava. As consistências obtidas encontravam-se dentro da faixa aceitável de $(23,00 - 26,00\text{cm}) \pm 1\text{cm}$, e a retenção de água foi classificada como ótima de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2023). Esses resultados contribuem para a trabalhabilidade da argamassa.

Quanto aos Efeitos nas Propriedades da Argamassa de Cimento no Estado Endurecido aos 28 dias.

Aos 28 dias, as misturas com pó de Mandacaru apresentaram resultados satisfatórios nas resistências a compressão e à tração na flexão. Na compressão, o pó de Mandacaru mostrou-se mais eficiente que o aditivo comercial, especialmente na concentração 0,0125% (A). Na tração na flexão, apesar de aumentos numéricos, principalmente na concentração 0,1% (B), não foram observadas diferenças estatísticas significativas.

O pó de Mandacaru demonstrou potencial como aditivo para argamassas de cimento, melhorando a resistência mecânica aos 28 dias. Contudo, devido à ausência de alterações estatisticamente significativas na resistência a tração na flexão, consideramos a necessidade de mais estudos para confirmar sua eficácia.

Tanto o pó de Mandacaru quanto o aditivo comercial FLUX-40 reduziram numericamente a absorção de água em relação à mistura R, com o FLUX-40 mostrando maior eficácia, especialmente na concentração 0,5% (C).

Embora sem diferenças estatisticamente significativas, as concentrações 0,0125% (A), 0,1% (B) e 0,5% (C) apresentaram menor absorção de água que R, atendendo aos critérios da NBR 16072 (ABNT, 2012). Esses resultados indicam potencial impermeabilizante, mas estudos adicionais são necessários para aprofundar essa avaliação.

Quando ao Envelhecimento Acelerado das Amostras por Meio dos Ciclos Choques Térmicos.

Ao simular de forma acelerada os efeitos do envelhecimento natural através da alternância entre calor e umidade, foram observados desgaste físicos, como o surgimento de manchas na superfície e o desenvolvimento de fissuras.

Quanto aos Efeitos na Durabilidade da Argamassa de Cimento Após o Envelhecimento.

O uso do pó de Mandacaru como aditivo na argamassa proporcionou ganhos numéricos mas não estatisticamente significativos na resistência à compressão aos 28 dias, em relação a R, superando as argamassas com o aditivo comercial, especialmente a

concentração 0,0125% (A), com a maior resistência inicial (46,82 MPa). No entanto, após o envelhecimento, todas as misturas aditivadas sofreram reduções consideráveis na resistência, com perdas variando de 12,75% (mistura R, referência) a 21,04% (mistura A).

As misturas envelhecidas com pó de Mandacaru não diferiram estatisticamente entre si, indicando que o aditivo influenciou a resistência aos 28 dias, mas não proporcionou uma proteção suficiente contra os efeitos do envelhecimento. Concentrações mais altas do aditivo, como as misturas C e D, com 0,5% e 1,0%, respectivamente, não demonstraram benefícios na durabilidade, possivelmente à maior vulnerabilidade às condições de degradação é devido a natureza orgânica do aditivo.

Na resistência a tração na flexão, os resultados indicam que a mistura D, com 1,0% de pó de Mandacaru, apresentou o melhor desempenho em termos de durabilidade, com a menor redução percentual de resistência após envelhecimento. Apesar disso, a ausência de diferenças estatisticamente significativas sugere a necessidade de estudos complementares para avaliar outros aspectos.

Na resistência a absorção de água por capilaridade, a argamassa aditivada com pó de Mandacaru apresentou um potencial de durabilidade para a concentração 1,0% (D), reduzindo significativamente o aumento da absorção de água após o envelhecimento. O desempenho foi similar ao obtido com o aditivo comercial FLUX-40, sugerindo que o pó de Mandacaru pode ser uma alternativa sustentável.

Portanto, o pó de Mandacaru pode aumentar a resistência mecânica inicial da argamassa sem perdas na durabilidade. Investigações adicionais podem explorar a interação química dos aditivos com a matriz da argamassa para compreender os mecanismos que influenciam a resistência.

Quando a Influência nas Propriedades Físico-Químicas e Microestruturais das Argamassas.

As variações na intensidade, o deslocamento e o surgimento de picos nos difratogramas sugerem que o pó de Mandacaru influenciam no processo de hidratação, favorecendo a formação de Etringita e Portlandita, modificando a microestrutura da argamassa e influenciando as fases hidratadas responsáveis pela resistência e durabilidade.

Quanto ao Mercado de Aditivos para Argamassa no Brasil.

O mercado de aditivos para a construção civil no Brasil está em expansão. Como destaca Krauczuk *et al.* (2023), há um grande interesse da indústria da construção em solucionar questões relacionadas à produção de argamassas, dada a variabilidade do comportamento do material decorrente do uso de aditivos. O aumento das atividades de construção, os avanços tecnológicos, a busca por soluções que aprimorem o desempenho dos materiais, juntamente com a ideia de sustentabilidade, contribui para esse cenário.

“Nos dias atuais há uma grande busca de desenvolver materiais na qual possui parâmetros relevantes para o meio científico através de novas ideias e materiais “inovadores”, ou até mesmo substituir materiais existentes no mercado por restos de resíduos ou por outro material distinto a custo benefício dentro da construção civil” (ADRIANO *et al.*, 2021).

O aumento das atividades de construção, o desenvolvimento de novas tecnologias, a conscientização ambiental e a busca pela sustentabilidade estão a impulsionar a indústria e o mercado da construção civil, criando uma demanda por materiais inovadores, duráveis, com bom desempenho e ecoeficientes.

Atualmente, os aditivos disponíveis no mercado como redutores de pega, impermeabilizantes e inibidores de retração por exemplo, são geralmente produzidos a partir de polímeros sintéticos e compostos químicos, substâncias provenientes de fontes não renováveis e que podem causar danos a natureza e ao ser humano com a sua utilização e descarte.

Os desafios e oportunidades no mercado para aditivos à base de cactos estão relacionados com o desenvolvimento de novas tecnologias, com a diversificação de produtos para atender às diferentes necessidades, e com a sensibilização sobre a importância desses materiais para a qualidade e a sustentabilidade das construções. Dessa forma, os aditivos derivados de cactos apresentam-se como bastante promissores e com um bom potencial de mercado. No entanto, ainda são necessários mais estudos para aprofundar-se sobre o assunto, além de incentivo, investimentos e tecnologia.

Quanto ao Potencial Sustentável.

O Nordeste brasileiro surge como uma fonte promissora para a produção de biopolímeros sustentáveis a base de cactos. Dada a sua condição predominantemente

semiárida, com períodos prolongados de seca e elevadas temperaturas, o ambiente é ideal para o desenvolvimento das cactáceas.

A disponibilidade dessas plantas no Nordeste do Brasil e a sua coleta responsável para extrair a mucilagem e produzir biopolímeros têm o potencial de gerar benefícios socioeconômicos para a região, ao mesmo tempo que pode contribuir para o fomento de práticas sustentáveis. Isso ocorrer devido: a capacidade das cactáceas sobreviverem em solos áridos e carentes de recursos hídricos e energéticos, tornando-se, assim, fontes renováveis de matéria-prima para a extração de biopolímeros; a coleta e o cultivo de cactos poderem ser realizados sem causar danos significativos ao meio ambiente e às comunidades locais, ajudando a reduzir a dependência de recursos não renováveis; o processo de obtenção de biopolímeros consumir pequena quantidade de água e energia, produzindo poucos resíduos biodegradáveis e não gerando emissão de gases de efeito estufa; os biopolímeros extraídos dos cactos poderem ser aplicados em diversos setores, como embalagens, alimentos, medicamentos, construção civil, etc; o cultivo e a coleta dos cactos, bem como a extração de biopolímeros poderem representar atividades econômicas para as comunidades locais, promovendo a criação de empregos e a geração de renda, além de contribuir para valorização e preservação das espécies de cactos presentes na região.

É importante que a coleta de cactos e extração de biopolímeros devam ser conduzidos de forma responsável, assegurando a conservação das espécies e a preservação do ecossistema local. Estudos científicos, medidas de monitoramento das populações de cactos, implementação de áreas de coleta controlada e o desenvolvimento de técnicas de cultivo são fundamentais para garantir que essas atividades sejam realizadas de maneira ecologicamente equilibrada.

Isso pode ser especialmente relevante em regiões onde o cacto é abundante e pode representar uma alternativa sustentável aos aditivos convencionais. No entanto, mais pesquisas são necessárias para avaliar completamente o impacto do pó de cacto nas propriedades da argamassa.

Quanto as Limitações do Estudo.

Durante a realização deste estudo, foram encontradas algumas limitações. A complexidade da pesquisa, a disponibilidade de recursos, as condições de laboratório e a variação e interpretação dos resultados.

Por se tratar de algo inovador e pouco explorado, a investigação dos efeitos da incorporação de biopolímeros extraídos de cactos nas propriedades das argamassas exigiu uma série de testes e análises complexas, demandando tempo e equipamentos especializados. A obtenção adequada do pó em quantidade e qualidade suficientes para os experimentos foi um desafio, assim como garantir as condições de laboratório controladas de acordo com as normas específicas, especialmente ao simular o envelhecimento acelerado da argamassa por meio de choques térmico e garantir a reprodução fiel das condições encontradas no ambiente real.

A interpretação e extração das conclusões sobre os efeitos do biopolímero nas propriedades da argamassa exigiram uma análise cuidadosa dos resultados obtidos. Esta etapa pode ser influenciada, uma vez que materiais naturais, como o biopolímero, podem variar em composição e características, resultando em uma possível variação nos resultados experimentais, o que dificulta a obtenção de conclusões confiáveis. Isso pode sugerir uma inconsistência na qualidade das amostras ou na execução dos ensaios, afetando a confiabilidade dos resultados.

Estas foram as limitações observadas ao longo do estudo. É importante destacá-las aqui para que os pesquisadores interessados em conduzir estudos nessa área estejam cientes dessas limitações e possam mitigá-las da melhor maneira possível ao longo do processo de investigação.

6. CONCLUSÃO

A partir dos procedimentos abordados, foi possível verificar:

- (1) Efeito plastificante na argamassa em seu estado fresco, aumentando com o aumento da quantidade de pó incorporada.
- (2) Redução na absorção de água por capilaridade na concentração 1,0% (D) após o envelhecimento. Contudo, estudos adicionais são necessários para aprofundar essa avaliação.
- (3) Aumento numérico na resistência mecânica inicial (aos 28 dias) sem perda de durabilidade após o envelhecimento. Investigações adicionais podem explorar a interação química dos aditivos com a matriz da argamassa para compreender melhor os mecanismos que influenciam.
- (4) Ausência de novas estruturas cristalinas e variações na intensidade dos picos dos difratogramas, favorecendo a formação de Etringita e Portlandita, influenciando as fases hidratadas responsáveis pela resistência e durabilidade.

O pó de Mandacaru demonstrou potencial como plastificante em argamassas de cimento, influenciando na redução da absorção de água, sem comprometer a resistência mecânica e a durabilidade.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É praticamente impossível abranger todas as possibilidades de uma pesquisa em um único estudo. A pesquisa é um processo longo e complexo que pode abranger várias áreas do conhecimento e demanda muito esforço. As características e o comportamento de materiais podem ser analisados em diversos setores (alimentar, medicinal, construção civil, entre outros), dimensões (ambiental, social e econômico) e propriedades (químicas, físicas e mecânicas). Dada a diversidade e complexidade de aspectos a serem explorados, muitas vezes é necessário a colaboração e a realização de estudos complementares para aprofundar o entendimento. Essa abordagem pode desvendar novas oportunidades e gerar benefícios ambientais, sociais e econômicos. Com base nisso, seguem algumas considerações para orientar futuros estudos relacionados ao tema desta pesquisa:

- Avaliar propriedades de coesão e retração da argamassa com o uso de aditivo biopolimérico derivado de cactos.
- Estudar o potencial dos biopolímeros derivados de cactos como aditivo para melhorar as propriedades hidrofugantes do rejunte.
- Investigar a influência do biopolímero de cactos nas propriedades do concreto, incluindo ressitência e durabilidade.
- Realizar estudos sobre os mecanismos que alteram a retenção de água e outras propriedades da argamassa ao incorporada biopolímeros em pó extraídos de cactos.
- Examinar a interação química ente os aditivos biopoliméricos de cactos e a matriz da argamassa, para compreender os mecanismos que influenciam a resistência mecânica.

Explorar o potencial de produtos derivados de fontes naturais e renováveis, como os cactos, permite desenvolver soluções mais sustentáveis e eficientes para a construção civil. Além disso, ampliar o conhecimento sobre materiais alternativos, promovendo práticas mais responsáveis e ecológicas na indústria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, Andrés A. Torres; BARRITA¹, Prisciliano Felipe de J. Cano. Las bondades del nopal. *Construcción y Tecnología*, v. 233, p. 44 - 49, 2007.

ADRIANO, Alexandre Junior *et al.*. Análise mecânica da argamassa de reboco com diferentes aditivos. *Etic-encontro de iniciação científica-issn 21-76-8498*, v. 17, n. 17, 2021.

ALCÂNTARA, M. A. M. Estudo do concreto no estado fresco: fatores internos da consistência e da mobilidade, e a trabalhabilidade. Publicado em 6 de fevereiro de 2016. Disponível em: <https://www.arsaedificativa.com/2016/02/estudo-do-concreto-como-material.html>. Acesso em 13 de maio de 2024.

ALMEIDA, Eduardo Rangel de. Análise da eficiência dos aditivos impermeabilizantes em argamassa de assentamento. 2020.

ALQAHTANI, F. K. Development of composite PET plastic-based aggregate and its utilization in green lightweight concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06852-z>.

ALVES, N. J. D. Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento. Brasília, 2002. Dissertação de mestrado apresentada a Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. 175p.

AMARO, Rogério Roque. Desenvolvimento - um conceito ultrapassado ou em novo? Da teoria à prática e da prática à teoria. *Cadernos de estudos africanos*, n. 4, pág. 35-70, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 270: Mortar for

ARANTES, Luciana Coelho. *Construção sustentável*. 2008.

ARAÚJO, Márcia Christyne de Lima. Uso popular do açúcar cristal como retardador do tempo de início de pega e sua influência em pastas de Cimento Portland. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, ABCP. Guia básico de utilização do cimento Portland. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 11578: cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 11768: aditivos para concretos de cimento Portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 13276: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 13277: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, novembro de 2005.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 13281: argamassas inorgânicas – requisitos e métodos de ensaios – parte 1: argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 13281: argamassas inorgânicas – requisitos e métodos de ensaios – parte 2: argamassas para assentamento e fixação de alvenaria. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 13529: revestimento de paredes e tetos de argamassa inorgânica. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 13753: revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – procedimento. 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 15259: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 15575-1: edificações habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 15575-4: edificações habitacionais – desempenho parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 16072: argamassa impermeável. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 16541: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura para realização dos ensaios. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 16607: cimento Portland – determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 16972: agregados – determinação da massa unitária e do índice de vazios. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 5733: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 5735: cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 5736: cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 7200: execução de revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – procedimento. 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 7200: execução de revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – procedimento. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 7215: cimento Portland – determinação de resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 7222: concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 9575: impermeabilização: seleção e projeto. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 9778: argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 9779: argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 9779: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto - determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR NM 248: agregados - determinação da composição granulométrica. Norma do Mercosul, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR NM 45: agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2006.

ASTM C125 – 15a (2015), Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.

BAÍÁ, Luciana Leone Maciel; SABBATINI, Fernando Henrique. Projeto e execução de revestimento de argamassa. O nome da rosa, 2008.

BARRICHELLO, Laura Izabél Alegranzi. Resistência Mecânica de Argamassas Mistas com Utilização de Areia de Fundição. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, IJUÍ, 2019.

BARROS, Mércia M. S. B.; MACIEL, Luciana L.; SABBATINI, Fernando H.; Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos. 1998. 40 f. São Paulo. Escola Politécnica - Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 1998.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Uma breve história do cimento Portland. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2009.

BAUMGART, O. Aditivos para concretos, argamassas e caldas de cimento. 12ª ed revisada. Indústria e comércio S.A, 1999.

BENZERARA, M. *et al.*. Combined and synergic effect of algerian natural fibres and biopolymers on the reinforcement of extruded raw earth. Construction and Building

Materials, v. 289, p. 123211, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123211>.

BITENCOURT DA SILVA, Simone Campo. Estudo da degradação acelerada da argamassa em um sistema de revestimento cerâmico de fachadas. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, SC, 2014. 129 p.

BRITO, G. F. *et al.*. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. Revista Eletrônica de Materiais e Processos. v. 6.2, p. 127-139, 2011.

BRUNDTLAND, Gro Harlem; COMUM, Nosso Futuro. Relatório Brundtland. Nosso Futuro Comum: Nações Unidas, 1987.

C.C Santos, L.V. O. D. Valentina, S.C. Semptikovski e W.C. Galuppo, “Uso de Pó de Exaustão de Fundação em Substituição Parcial a Areia Natural no Concreto Convencional” In: 52º Congresso Brasileiro de Concreto, Porto de Galinhas– PE, 2010. Anais. Ref. 0487.

CARASEK, Helena. Argamassa. In: ISAIAS, G. C (Org.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2010. Vol. 1. P. 893 – 943.

CARASEK, Helena. Argamassas - Cap. 26. In: ISAIA, Geraldo C. (Org). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 3ª ed. v.2. 2017.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: Geraldo C. Isaia (Org./ Ed.). Livro Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 1ª ed., v. 2, cap. 26, IBRACON: São Paulo, 2007.

CARASEK, Helena. Patologia das argamassas de revestimento. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2010.

CASALI, J.M. Estudo da interação entre a argamassa de assentamento e o bloco de concreto para alvenaria estrutural: transporte de água e aderência. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

CASTRO, V. G. Cimento Portland. In: Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro [online]. Mossoró: Ed. UFERSA, 2021, pp. 13-21. ISBN: 978-65-87108-26-1. Disponível em: <<https://doi.org/10.7476/9786587108612.0002.>> Acesso em: 17 de agosto de 2023.

CASTRO. M. D; MARTINS. R. M. Análise e soluções terapêuticas das manifestações patológicas de infiltração de um edifício de mais de 20 anos – Estudo de caso. Pato Branco – PR, 2014. TCC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CAVALCANTE, A.; TELES, M.; MACHADO, M. Cactos do Semiárido do Brasil: Guia Ilustrado. Instituto Nacional do Semiárido. Campina Grande, 2013.

CHANDRA, S.; EKLUND, L.; VILLARREAL, RR Utilização de palma forrageira em argamassas e concretos. Pesquisa sobre cimento e concreto, v. 28, n. 1, pág. 41-51, 1998.

CHIAPPERO R. O.; SUPISICHE M. C. Arquitectura de tierra: breves consideraciones sobre la conservación y restauración. Buenos Aires: Nobuko, 2006.

CICERO, João Vitor. *et al.*. Avaliação do desempenho mecânico de argamassa com adição de cinzas da algaroba. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano. 07, Ed. 11, Vol. 10, pp. 23-40. Novembro de 2022. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/cinzas-da-algaroba>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/cinzas-da-algaroba.

CINCOTTO, Maria A. SILVA, Maria A. C.; CASCUDO, H. C. Argamassas de revestimento: Características, propriedades e métodos de ensaio. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. – (Publicação IPT 2378 – Boletim Técnico n. 68).

COLTRO, Leda; SARANTÓPOULOS, Claire I. G. L.; ILDEBRANDO A. Jesus Jr. Biopolímeros usados em embalagem: propriedades e aplicações. 2005.

CORRÊA, Lásaro Roberto. Sustentabilidade na construção civil. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

COSTA SANTOS, Dyego *et al.*. Principais cactáceas de ocorrência no semiárido brasileiro. 2016.

COSTA, Laureano Leite; DE PAIVA, Anabela Goçaves Correia; VIEIRA, José Barbosa. Impermeabilização com Rebocos Pré-Doseados em Revestimentos Exteriores Versus Impermeabilização com Rebocos Tradicionais. In: 3. er Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios: PATORREB 2009. Universidade do Porto, 2009. p. 603-608.

COUTINHO, Sandra Moscon; PRETTI, Soraya Mattos; TRISTÃO, Fernando Avancini. Argamassa preparada em obra x argamassa industrializada para assentamento de blocos de vedação: Análise do uso em Vitória-ES Made in site mortar x industrialized mortar for laying bricks: Review of their use in Vitória-ES. Teoria e prática na Engenharia Civil, v. 21, p. 41-48, 2013.

DALAGO, Jorge Henrique, BRANDÃO, Patrícia Ribeiro da Silva. Livro: Materiais de construção I. 2017. Disponível em: <[https://www.academia.edu/30952044/Materiais de Construcao I](https://www.academia.edu/30952044/Materiais_de_Construcao_I)>. Acesso em 23 de julho de 2023.

de concreto. Florianópolis, 2002. Editora Gráfica Palloti.

DEMO, P. Metodologia científica em ciências sociais. São Paulo: Editora Atlas A.S., 1995.

DOS SANTOS, Vanessa Sadinha. Cactáceas. 2014. Disponível em: <<https://www.preparaenem.com/biologia/cactaceas.htm>>. Acesso em: 09 de agosto de 2023.

FARIAS, Silvana Silveira *et al.*. Biopolímeros: uma alternativa para promoção do desenvolvimento sustentável. Revista Geonorte, v. 7, n. 26, p. 61-77, 2016.

Ferraz, Danila. Aditivos para concreto: uma história de êxito. Publicado em 30 de março de 2020. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/aditivos-para-concreto-uma-hist%C3%B3ria-de-%C3%AAxito-danila-ferraz>>. Acesso em: 13 de maio de 2024.

- FERREIRA, Inaldo Nascimento; DE HOLANDA CAVALCANTI, Laise. Myxomycetes associados a cactáceas no agreste e sertão de Pernambuco, Brasil. *Biotemas*, v. 24, n. 2, p. 1-11, 2011.
- FONSECA, João José Saraiva. Apostila de metodologia da pesquisa científica. João José Saraiva da Fonseca, 2002.
- FOOD INGREDIENTS BRASIL. Pectinas propriedades e aplicações. 2014. Revista FI. Nº 29. Disponível em: www.revista-fi.com. Acesso em: 12 nov. 2022.
- FRANCHETTI, Sandra Mara Martins, MARCONATO, José Carlos. Polímeros biodegradáveis – uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos. *Quim. Nova*, v. 29, n. 4, p. 811-16, 2006.
- FREITAS, J. G. DE; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 57-73, jan./mar. 2014.
- GARCIA J. R.; DE OLIVEIRA I. R.; PANDOLFELLI V. C.; Processo de hidratação e os mecanismos de atuação dos aditivos aceleradores e retardadores de pega do cimento de aluminato de cálcio, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos, 2007.
- GIL, Antônio Carlos. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GLASSER, FP Aspectos fundamentais da solidificação e estabilização do cimento. *Jornal de materiais perigosos*, v. 52, n. 2-3, pág. 151-170, 1997.
- GUERRERO, P.C.; MAJURE, L.C.; CORNEJO-ROMERO, A.; HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, T. Phylogenetic Relationships and Evolutionary Trends in the Cactus Family. *Journal of Heredity*, v. 110, n. 1, p. 4-21, 2019.
- GUEVARA, J.C. *et al.*. Reclamación de áreas degradadas del piedemonte de Mendoza, Argentina, mediante la plantacion de *Opuntia ficus indica* F. inermis. *Multequina*, v. 6, n. Ccv, p. 1–8, 1997.
- HABITZREUTER, Filipe; GABRIEL, Amanda Grizzo; SEMENSATO, Leonardo Henrique; SANTOS, Danilo Martins dos; FILHO, Sérgio Paulo Campana; "Biopolímeros, Processamento e Aplicações", p. 91 -132. In: *Nanotecnologia Aplicada a Polímeros*. São Paulo: Blucher, 2022. ISBN: 9786555502527, DOI 10.5151/9786555502527-03
- HAGEMANN, Sabrina Elicker. *Materiais de construção básicos*. Rio Grande do Sul: Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, 2011.
- HARTMANN, C. T.; HELENE, P. R. L. Avaliação de aditivos superplastificantes base
- HAYSCHI, Y.; AOYAMA, T.; MATSUYAMA, M. Technique of application of fiber materiais to exterior ceramic wall tiling. In: *Durability of Building materiais and components*. 1993.
- HEINEN, Patrícia *et al.*. Desempenho de argamassas de revestimentos do tipo estabilizada, industrializada ensacada e a fabricada in loco. *Anais da Engenharia Civil/2595-1823*, v. 2, n. 2, p. 19-33, 2018.

- HERNÁNDEZ-ZARAGOZA, J. B. *et al.*. Mortar improvement using nopal additive. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, v. 10, p. 120-125, 2008.
- HUERTA MAZA, Max Anderson. *Uso del extracto del mucilago del cactus como aditivo y su influencia en la consistencia y en la resistencia a la compresión del concreto*. 2020.
- ISAIA, G.C. *Concreto ciência e tecnologia*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.
- IZAGUIRRE, Ana; LANAS, Javier; ALVAREZ, José Ignacio. Effect of water-repellent admixtures on the behaviour of aerial lime-based mortars. *Cement and concrete research*, v. 39, n. 11, p. 1095-1104, 2009.
- JAHAN, Selim *et al.*. *Equipa do Relatório do Desenvolvimento Humano 2015*. Kinloch, A.J., *Adhesion and Adhesives*. 1987: Chapman & Hall. 441. FURTADO, Celso. *Desenvolvimento e subdesenvolvimento*. En: *Cinquenta anos de pensamento na CEPAL-Rio de Janeiro: Record/CEPAL*, 2000-v. 1, p. 239-262, 2000.
- JANTSCH, A. C. A. *Análise Do desempenho de argamassas estabilizadas submetidas a tratamento superficial com aditivos cristalizantes*. Santa Maria, 2015, *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)*. Universidade Federal de Santa Maria.
- JOLICOEUR, C.; SIMARD, M. A. *Chemical Admixture-Cement Interactions*:
- KNOP, Wanessa Rejane *et al.*. *Estudo da viabilização da incorporação do pó de exaustão em massa cerâmica*. *Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)* UDESC, Joinville, 2009.
- KRAUCZUK, CAROLINE *et al.*. *Análise do Uso de Diferentes Teores de Aditivo Incorporador de Ar em Argamassas com Vistas à sua Colocação no Mercado*. *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, v. 14, João Pessoa-PB, 2023.
- KRUG, Lucas Fernando, *et al.*. *Retenção de água em argamassas com substituição parcial de agregado miúdo por resíduo da construção civil*. XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. CRICTE 2017, 15 a 18 de novembro de 2017. Ijuí – RS, Brasil.
- LARA, Luiz Alcides Mesquita. *Materiais de construção*. Ouro Preto: IFMG, 2013.
- LEAL SALES, M. S.; MARTINS, L. V.; SOUZA, I.; MEIRELES DE DEUS, M. S.; PERON, A. P.; *Cereus jamacaru de candolle (cactaceae), o mandacaru do nordeste brasileiro*, *Publ. UEPG Ci. Biol. Saúde*, Ponta Grossa, v.20, n.2, p. 135-142, jul./dez. 2014.
- LEÓN-MARTÍNEZ, F. M.; MENDEZ-LAGUNAS, L. L.; RODRIGUEZ-RAMIREZ, J. *Spray drying of nopal mucilage (Opuntia ficus-indica): effects on powder properties and characterization*. *Carbohydrate Polymers*, v. 81, n. 4, p. 864-870, 2010.
- LOPES, Nathalia. *Votorantim Cimentos*. Mapa da obra, 2020. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/argamassas-tipos/>>. Acesso em 24 de julho de 2023.
- LOSINI, A. E. *et al.*. *Biopolymers impact on hygrothermal properties of rammed earth: from material to building scale*. *Building and Environment*, v. 233, p. 1-14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110087>.

MACCARI, Guilherme H. Argamassa de assentamento com saibro: um estudo das práticas na região de tubarão/SC. 2010. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Coordenação de Projetos e Novas Tecnologias de Edificações, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Tubarão, 2010.

MACHADO, Leonardo Tatsch. Caracterização de argamassas estabilizadas para revestimento. 2018.

MAGALHÃES, A. C. T. V. Estudo de Fibras Vegetais, Mucilagem de Cacto e Gesso em Componentes Construtivos. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Programa de PósGraduação em Arquitetura e Urbanismo, 2009. 123 p.

MAGALHÃES, Ana Cristina Tinôco Verçosa de; ALMEIDA, Jaime Gonçalves de. O uso da mucilagem de cacto em pastas de gesso: efeitos na absorção de água e na resistência à flexão estática. *Ambiente Construído*, v. 10, p. 139-151, 2010.

MANDUJANO-RUÍZ, Araceli *et al.*. Evaluación del comportamiento electroquímico del extracto de nopal (*Opuntia Ficus-Indica*) como posible inhibidor de corrosión. *Revista de Metalurgia*, v. 53, n. 4, p. e108-e108, 2017.

MARTÍNEZ, C.; CINCOTTO, M. A. Influência da estrutura molecular dos policarboxilatos na hidratação do cimento Portland. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p. 267- 283, jul./set. 2013. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

MARTINEZ-MOLINA, Wilfrido *et al.*. Cement-based, materials-enhanced durability from opuntia ficus indica mucilage additions. *ACI Materials Journal*, v. 112, n. 1, p. 165, 2015.

MEDEIROS, M. H. F. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos. 2008. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEDEIROS, Mohara Alves de *et al.*. Blocos EVA de vedação: compatibilização entre aspectos físicos, mecânicos e térmicos. 2018.

MEDEIROS, Rozélia; AZZARI, Rachel; AGUIRRE, Cibele. Sustentabilidade. 2022. Disponível em:
<<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/sustentabilidade/#:~:text=A%20dimens%C3%A3o%20social%20trata%20da%20iniquidade%20social%20no%20geral.>>. Acesso em 04 de agosto de 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2ª edição Brasileira. 4ª Edição em inglês. São Paulo. Brasil, 2014.

MELO, K. A.; MARTINS, V. C.; REPETTE, L. W. Estudo de compatibilidade entre cimento e aditivo redutor de água. Artigo publicado, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v.9, n.1, p.45-46, 2009.

MENDES, Marina Ceccato. Desenvolvimento sustentável. Centro de Divulgação Científica e Cultural da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, SP, 2008.

MIRANDA, L.; SELMO, S. Efeito de choques térmicos na fissuração de revestimentos de argamassas com RCD. In: Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassa, 5, São Paulo, 2003. Anais. São Paulo: ANTAC, 2003.

- MONTEIRO, A. G. de S. Desenvolvimento de Aditivo Plastificante e Retardador de Pega Para Gesso a Partir da Mucilagem da Palma Forrageira. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Paraíba. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. João Pessoa, 2015.
- MORETTI, Isabela. Delineamento de pesquisa: o que significa, tipos e como fazer. 2020. Disponível em: < <https://regrasparatcc.com.br/primeiros-passos/delineamento-de-pesquisa/> >. Acesso em 30 de julho de 2023.
- MOSTELLER, Frederick; TUKEY, John W. The uses and usefulness of binomial probability paper. *Journal of the American Statistical Association*, v. 44, n. 246, p. 174-212, 1949.
- NASCIMENTO, Elimar Pinheiro do. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. *Estudos avançados*, v. 26, p. 51-64, 2012.
- NEFZAOU, A.; BEN SALEM, H. *Opuntia Spp. -A Strategic fodder and efficient tool for combat desertification in the Wana Region*. [S.l: s.n.], 2002.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed. São Paulo: Bookman, 2013.
- NEVILLE, Adam Matthew. *Propriedades do Concreto*; Tradução: Ruy Alberto Cremonini. – 5ª ed. rev. Atual – Porto Alegre: Bookman, 523 p. 2016.
- NI, J. *et al.*. The optimisation analysis of sand-clay mixtures stabilised with xanthan gum polymers. *Sustainability*. v. 13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13073732>.
- NUNES, J. C. D. P. *Argamassa estabilizada pronta para uso - Sistema Mormix* Blumenau, 2010.
- NUNES, S. C. B. *Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades*. Pós-graduação em Estruturas de Engenharia Civil. 198 p., Universidade do Porto. Portugal, 2001.
- NWANKWO, C. O. *et al.*. Natural fibres and biopolymers in FRP composites for strengthening concrete structures: A mixed review. *Construction and Building Materials*, v. 363, p. 1-20, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129661>.
- OLIVEIRA, Gilson Batista. Uma discussão sobre o conceito de desenvolvimento. *Revista da FAE*, v. 5, n. 2, 2002.
- OLIVEIRA, Helen Caroline Macêdo de. *Incorporação da mucilagem de palma forrageira na elaboração de argamassa cimento portland*. 2018.
- OLIVEIRA, Rodrigo lied Nogueira. *Construção sustentável: um desafio possível*. 2018. Disponível em: <<https://monografias.brasilecola.uol.com.br/engenharia/construcao-sustentavel-um-desafio-possivel.htm>>. Acesso em 04 de agosto de 2023.
- OLIVEIRA, TYM de. *Estudo sobre o uso de materiais de construção alternativos que otimizam a sustentabilidade em edificações*. Trabalho de Conclusão do Curso (Curso de Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.
- PANDOLFELLI, V. C.; OLIVEIRA, I. R. de; STUART, A. R.; PILEGGI, R. G. *Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico*. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

PEREIRA, Caio. Tipos de cimento: Características e especificações. Escola Engenharia, 2013. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-cimento/>. Acesso em: 17 de agosto de 2023.

PEREIRA, João Victor Inácio. Sustentabilidade: diferentes perspectivas, um objetivo comum. *Economia Global e Gestão*, v. 14, n. 1, p. 115-126, 2009.

PÉREZ-MOLPHE-BALCH, Eugenio *et al.*. Cultura de tecidos de cactos ornamentais. *Scientia Agrícola*, v. 72, p. 540-561, 2015.

PETRUCCI, E.G.R. *Concreto de Cimento Portland*. 13 ed. São Paulo, SP. Globo. 1998. 307p.

phenomenology and physico-chemical concepts. *Cement and Concrete Composites*, v. 20, n. 2/2, p. 87-101, 1998.

PINHEIRO, António Carlos da Fonseca Bragança; CRIVELARO, Marcos. *Materiais de construção*. Editora Saraiva, 2016.

PIPOLO, Lisieux Feitosa Gondim *et al.*. Uso de biopolímeros em pastas de cimento: revisão sistemática da literatura. *Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, 2022.

PITT, Fernando Darci; BOING, Denis; BARROS, António André Chivanga. Desenvolvimento histórico, científico e tecnológico de polímeros sintéticos e de fontes renováveis. *Revista da UNIFEBE*, v. 1, 2011.

PLURALQUÍMICA. *Folheto Técnico FLUX novo*. Disponível em: <https://www.pluralquimica.com.br/wp-content/uploads/2019/11/FT-FLUX-novo.pdf>. Acesso em: 19 setembro de 2024.

policarboxilatos destinados a concretos. Artigo publicado, *Boletim Técnico Escola Politécnica Usp*, 2003.

PORTO, Gabriele de Bonis Patekoski; KADLEC, Thalita Malucelli de Moraes. Mapeamento de estudos prospectivos de tecnologias na revolução 4.0: um olhar para a indústria da construção civil. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PRUDÊNCIO JR, L. R.; OLIVEIRA, A. L., BEDIN, C.A. Alvenaria estrutural de blocos

RAMACHANDRAN, A. L. *et al.*. Multiscale study of soil stabilization using bacterial biopolymers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 147, n. 8, 2021. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002575.

RECENA, Fernando Antônio Piazza. *Conhecendo argamassa*. Ed. ipucrs, 2012.

REGANATI, Bruno. *Cimento Portland: tipos, composição e aplicação*. 2019. Disponível em: <https://www.concretousinado.com.br/noticias/tipos-cimento/>. Acesso em: 18 de agosto de 2023.

RIBEIRO, Carmen Couto. *Materiais de construção civil*. Editora UFMG, 2002.

RIBEIRO, Daniel Vêras (org.). *Princípios da ciência dos materiais cimentícios: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos* – 1.ed. – Curitiba: Appris, 2021.

- RIBEIRO, Daniel Vêras (org.). Princípios da ciência dos materiais cimentícios: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos – 1.ed. – Curitiba: Appris, 2021.
- RIBEIRO, Krukemberghe D. K. da Fonseca. Defesa dos vegetais. 2008. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/defesa-dos-vegetais.htm>>. Acesso em: 09 de agosto de 2023.
- RICHARDSON, I. G. Tobermorite/jennite- and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate, beta-dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaolinite, or silica fume. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 9, p. 1733-1777, 2004. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.05.034.
- Rixon, R., Mailvaganam, N., Chemical admixtures for concrete. London: E&FN SPON, 3rd edition. 1999.
- RODRIGUES, Thiane de Lima. Qualidade, atividade antioxidante e atividade da peroxidase durante a maturação de frutos de facheiro (*Pilosocereus Pachycladus* Ritter). 2016.
- ROQUE, D. C.; POLESELLO, EDUARDO. Análise das propriedades de argamassas estabilizadas para revestimentos em diferentes tempos ao longo do seu período de estabilização. Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas, v. 13, 2019.
- SABBATINI, Fernando Henrique. Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente. São Paulo, ABCP, 2.ed. 1998. 44p. (ET-91).
- SÁENZ, C. *et al.*. Opuntias as a natural resource. In: food and agriculture organization of the united nations. Agro-industrial utilization of cactus pear. Rome: FAO, 2013.
- SALENGUE, E. V. O que são os cactos? Bio Diverso das Crianças, Meio Ambiente, n.3, 2023. Disponível em: https://www.ufrgs.br/biodiversodascrianças/?page_id=473. Acesso em: 09 de agosto de 2023.
- SANTANA, Bruna Vieira; ALEIXO, Isabella Venâncio; JOFFILY, Irene de Azevedo Lima. Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimento com diferentes aditivos impermeabilizantes. Programa de Iniciação Científica-PIC/UnICEUB-Relatórios de Pesquisa, v. 2, n. 1, 2016.
- SANTOS, C. C. D. *et al.*. Uso de Pó de Exaustão de Fundição em Substituição Parcial a Areia Natural no Concreto Convencional. In: 52º Congresso Brasileiro de Concreto, Porto de Galinhas–PE. 2010.
- SANTOS, Marcos David; MEDEIROS, Fernanda Karolline. Avaliação do uso de materiais alternativos na construção civil brasileira. Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências. Anais do V CONAPESC. ISSN: 2525 – 3999. 2020.
- SCHANKOSKI, R. A.; PRUDÊNCIO, L.R. JR.; PILAR, R. Influência do tipo de argamassa e suas propriedades do estado fresco nas propriedades mecânicas de alvenarias estruturais de blocos de concreto para edifícios altos. *Revista Matéria*, v.20, n.4, pp. 1008 – 1023, 2015.
- SCHANKOSKI, R.A. Influência do tipo de argamassa nas propriedades mecânicas de alvenarias estruturais de blocos de concreto de alta resistência. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

SENTENA, J. A. A. Discursão sobre métodos acelerados para a avaliação do envelhecimento de revestimentos de argamassas submetidos a ciclos térmicos: aplicação em argamassa com filer de concreto. Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. UNISINOS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 152 f. São Leopoldo/Rio Grande do sul– 2015.

Sentena, J. A. A., Kazmierczak, C. D. S., & Krein, L. A. (2018). Degradação de revestimentos de argamassa com finos de resíduos de concreto por ciclos térmicos. *Ambiente Construído*, 18, 211-224.

SHANMUGAVEL, D. *et al.*. Interaction of a viscous biopolymer from cactus extract with cement paste to produce sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, v. 257, p. 119585, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119585>.

SHANMUGAVEL, D., SELVARAJ, T., RAMADOSS, R., RANIERI, S. Interação de um biopolímero viscoso de extrato de cacto com pasta de cimento para a produção de concreto sustentável. *Construção e Materiais de Construção*, 257. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119585>.

SILVA, Adriano de Paula et al. Desempenho da argamassa técnica decorativa antes e após envelhecimento acelerado em câmara de intemperismo. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, p. e13041, 2021.

SILVA FILHO, Joel Rubens da. Estudo da resistência mecânica de argamassas utilizadas para recuperação de estruturas de concreto. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SILVA, Carolina Dalva Dutra Monteiro; FERREIRA, Heber Sivini. Avaliação do comportamento das pastas de gesso com adição de pó de palma forrageira. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). João Pessoa-PB, 2022.

SILVA, L. S.; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. Manual de orientação. Florianópolis, 2001.

SILVA, N. G. Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica. 2011. 329 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2011.

SILVA, Simone Campos Bitencourt da. Estudo da degradação acelerada da argamassa em um sistema de revestimento cerâmico de fachadas. 2014.

SIMAN FILHO, Ademir José; SANFELICE, Rafaela Cristina. Estudo bibliográfico sobre polímeros ambientalmente sustentáveis. *Revista brasileira de ciência, tecnologia e inovação*, v. 3, n. 2, p. 131-148, 2018.

SINAPI. Relatório de insumos e composições. Junho de 2023. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/site/paginas/downloads.aspx>>. Acesso em 24 de julho de 2023.

SOARES, Mirla Rafaela Torres Pinto. Materiais alternativos para a construção civil na zona urbana. 2017.

SOUSA, Angélica Silva; DE OLIVEIRA, Guilherme Saramago; ALVES, Laís Hilário. A pesquisa bibliográfica: princípios e fundamentos. Cadernos da FUCAMP, v. 20, n. 43, 2021.

SOUSA, Rafael. “Sustentabilidade”; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/educacao/sustentabilidade.htm>. Acesso em 31 de março de 2023.

SOUZA, A. T.; CARVALHAIS, C. A.; SANTOS, W. J. Comparativo entre argamassas aditivadas e mista: análise dos aditivos incorporador de ar, retentor de água e plastificante. VI Congresso de Engenharia Civil. Juiz de Fora, 2019.

SOUZA, A. V. V.; SOUZA, D. D.; SILVA, N. B. G.; OLIVEIRA, F. J. V. Produção in vitro de mudas de coroa-de-frade (*Melocatus oreas* Miq. - Cactaceae): uma espécie nativa da Caatinga de potencial ornamental. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2012. 29 p. (Embrapa Semiárido. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 94).

SOUZA, Gabriella Cavalcante. Desenvolvimento de aditivo Biopolimérico à base de cactos *Opuntia Ficus indica* e *Cereus Jamacaru* e investigação da sua influência nas propriedades das argamassas. Tese de doutorado. Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). João Pessoa-PB, 2022.

SOUZA, Geraldo Fábio Alves de. Avaliação da utilização de aditivo biopolimérico extraído do cacto *Opuntia Ficus Indica* em pastas e microconcretos de cimento Portland. 2019. xvii, 108 f., il. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

TAKAGI, E. M.; JUNIOR, W. A.; OLIVEIRA, F. S. Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estruturas de concreto armado. 46º Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis, 2004.

TEMOCHE Esquive, J. F. Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa. 2009. Tese de doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

TEMOCHE Esquivel, J. F., & de Barros, M. M. S. B. (2019). Contribuição ao estudo do comportamento mecânico de argamassas cimentícias de revestimento após a ação do choque térmico. *Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada-UNG-Ser*, 2(1), 38-47.

THOMAZ, E. Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação. São Paulo: Pini; EPUSP; IPT, 1989.

TORRES-ACOSTA, Andres Antonio; DÍAZ-CRUZ, L. Alejandra. Concrete durability enhancement from nopal (*opuntia ficus-indica*) additions. *Construction and Building Materials*, v. 243, p. 118170, 2020.

unit masonry. Philadelphia, 1987.

VERÇOZA, E. J. Impermeabilização na construção. Porto Alegre: Editora Sagra, 1983. 151p.

VERGARA, S. C. Projetos e relatórios de pesquisa em administração. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

VIEIRA, Érica de Andrade *et al.*. Propriedades tecnológicas e antioxidantes de mucilagens de cactáceas nativas do semiárido paraibano. 2019.

VIEIRA, Júlia Graciele *et al.*. Síntese e caracterização da metilcelulose, a partir do bagaço de cana-de-açúcar, para utilização como aditivo na construção civil. 2009.

VIEIRA, Mauro Eugênio Lechi *et al.*. Análise de desempenho do revestimento monocamada antes e após o envelhecimento acelerado proposto pela câmara de intemperismo. 2019.

ZARA, R. F.; THOMAZINI, M. H.; LENZ, G. F.; Estudo da eficiência de polímero natural extraído do cacto mandacaru (*cereus jamacaru*) como auxiliar nos processos de coagulação e floculação no tratamento de água, REA – Revista de estudos ambientais (Online), v. 14, n. 2esp, p. 75-83, 2012.

APÊNDICE

APÊNDICE I – ROTEIRO DO ENSAIO PRELIMINAR

1. MATERIAIS UTILIZADOS

Máquina de ensaio de compressão.

2. EXECUÇÃO DO ENSAIO

Realize os ensaios de resistência a compressão axial em todos os corpos de prova produzidos em uma máquina específica para compressão.

3. RESULTADOS

- a) Registre os valores de resistência à compressão para cada amostra de relação água/cimento testada.

A máquina de ensaio utilizada expressa os resultados em kg. A obtenção da resistência a compressão em Mpa foi feita dividir os valores obtidos com a máquina pela área da base dos corpos de prova, de acordo com a equação: $R_i = \frac{Carga(kg) \times 10}{Área(m^2)}$.

- b) Faça uma média aritmética de cada relação a/c, e depois compare os resultados para identificar a relação água/cimento que proporciona a melhor resistência e características desejadas para a argamassa.

A média das resistências à compressão para cada relação a/c, em Mpa, foi obtida com a equação: $M_{Ri} = \frac{\sum n R_i}{n}$.

- c) Compare os resultados para identificar a relação água/cimento que proporciona a melhor resistência e características desejadas para a argamassa.

Na tabela abaixo anote os resultados obtidos com duas casas decimais.

a/c	Amostra	Resistência a compressão por corpo de prova (Mpa)	Resistência a compressão médio (Mpa)
0,38	1		
	2		
	3		
0,40	1		
	2		

	3		
0,43	1		
	2		
	3		
0,45	1		
	2		
	3		

Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE II – ROTEIRO DO ENSAIO DE CONSISTÊNCIA

1. MATERIAIS UTILIZADOS

Misturador mecânico, colher de pedreiro, espátula, molde troncônico, soquete metálico, mesa de espalhamento e trena.

2. EXECUÇÃO DO ENSAIO

Retire o molde verticalmente e, após, de maneira uniforme, efetue 30 golpes com a mesa em um intervalo de 30 s. Após o último golpe, utilizando uma trena, meça e registre três diâmetros em diferentes direções do espalhamento da argamassa. Expresse em centímetros com duas casas decimais (tabela 23).

3. RESULTADOS

Calcule a média aritmética dos diâmetros registrados para cada traço utilizando a equação abaixo. Essa média corresponde ao índice de consistência (IC) da argamassa em cada proporção estudada.

$$IC = \frac{\sum_{i,n} D_i}{n}$$

Misturas	Proporção (cimento:areia)	Diâmetro 1 (cm)	Diâmetro 2 (cm)	Diâmetro 3 (cm)	IC (cm)	Desvio Padrão
R	1:1,5					
A						
B						
C						
D						

Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE III – ROTEIRO DO ENSAIO DE RETENÇÃO DE ÁGUA

1. MATERIAIS UTILIZADOS

Balanças com resoluções de 0,1 g e 0,01 g, espátula, recipiente de mistura, molde cilíndrico com 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura (dimensões internas), régua metálica, placa plana, peso com 2 kg de massa e diâmetro de 110 mm, espátula de aço, papel-filtro (12 por determinação), gaze de pano de algodão, cronômetro.

2. EXECUÇÃO DO ENSAIO

Etapa 1: pese o molde seco e limpo na balança com resolução de 0,1 g e registre sua massa (M_m). Pese também os 12 discos de papel-filtro secos de uma vez na balança e registre sua massa (M_{se}).

Etapa 2: encha o molde com argamassa em pequenos incrementos, utilizando a espátula até formar um pequeno excesso. Rase o excesso com uma régua metálica, apoiando-a sobre a borda do molde, fazendo movimento de vai-e-vem em toda a superfície para eliminar o excesso e limpe as bordas.

Etapa 3: pese o molde com argamassa rasada na balança com resolução de 0,1 g e registre sua massa (M_{ma}).

Etapa 4: coloque sobre a superfície da argamassa duas telas de gaze, o conjunto de 12 discos de papel-filtro e a placa, nesta ordem. Aplique, centralizadamente, o peso de 2 kg, acionando imediatamente o cronômetro.

Etapa 5: após 2 min, retire o peso de 2 kg e a placa. Remova o conjunto de papéis-filtro e leve-os ao prato da balança. Pese rapidamente e registre a massa dos discos molhados (M_f).

Etapa 6: calcule a retenção de água (R_a) através da seguinte equação:

$$R_a = \left[1 - \frac{(M_f - M_{se})}{AFx(M_{ma} - M_m)} \right] x 100$$

Onde,

M_f - Massa do conjunto de discos molhados de papel-filtro, em g.

M_{se} - Massa do conjunto de discos secos, em g.

AF - Fator água/argamassa fresca: $AF = \frac{M_w}{M+M_w}$.

M_{ma} - Massa do molde com argamassa, em g.

M_m - Massa do molde vazio, em g.

M_w - Massa total de água acrescentada à mistura, em g.

M - Massa de argamassa, em g.

OBS: Antes de cada operação do ensaio, retire completamente a argamassa do molde e, utilizando um pano limpo e úmido, limpe-o, de maneira a deixar a superfície levemente umedecida.

3. RESULTADOS

Dados comuns a todos as misturas:

- Massa total de água acrescentada à argamassa - $M_w = 64,75g$
- Massa do molde vazio - $M_m = 701,00g$
- Massa do conjunto de discos secos - $M_{se} = 2,80g$

Misturas	Retenção de água (%)
R	
A	
B	
C	
D	

Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE IV – ROTEIRO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

1. MATERIAIS UTILIZADOS

Máquina de ensaio de compressão.

2. EXECUÇÃO DO ENSAIO

- a) Prepare a máquina de compressão antes de iniciar o ensaio. Limpe os pratos da prensa e programe a máquina, sua escala dinamométrica, bem como a velocidade de carregamento, para transmitir uma carga constante de compressão equivalente a $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s.
- b) Coloque o corpo-de-prova sobre o prato inferior da prensa, de maneira que fique centrado em relação ao eixo de carregamento e, em seguida, acione a máquina.

OBS: A máquina de ensaio de compressão deve aplicar cargas de maneira contínua, sem choques, à velocidade constante durante todo o ensaio.

2.2 RESULTADOS

- a) A partir dos diagramas tensão x deformação e quadros fornecidos pelo sistema operacional da máquina de ensaio, obtidos para cada amostra, registre os valores de resistência, anotando-os, em Mpa com duas casas decimais, na tabela abaixo.
- b) Determine a média aritmética da resistência das amostras em cada mistura e anote os valores na tabela abaixo.

OBS: As médias para cada mistura, em Mpa, foram obtidas por:

$$\sigma_c = \frac{\sum_n \sigma_{ci}}{n}$$

COMPRESSÃO				
Misturas/ Amostra	Resistência por amostra (Mpa) aos 28 dias	Média (Mpa)	Resistência por amostra (Mpa) após envelhecimento	Média (Mpa)
R	1			

	2				
	3				
	4				
	5				
A	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
B	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
C	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
D	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE V – ROTEIRO DO ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO

1. MATERIAIS UTILIZADOS

Máquina de ensaio de resistência á tração na flexão.

2. EXECUÇÃO DO ENSAIO

- a) Prepare a máquina de tração na flexão antes de iniciar o ensaio. Limpe os apoios e programe a escala dinamométrica, bem como a velocidade de carregamento, para transmitir uma carga constante de tração na flexão no ponto central da amostra equivalente a $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s.
- b) Coloque os corpos-de-prova na máquina de tração na flexão estática, fixando suas extremidades sobre os apoios da máquina, de maneira que fique centrado, ortogonalmente ao eixo longitudinal da amostra, o carregamento, e, em seguida, acione a máquina.

OBS: A máquina de ensaio de tração na flexão estática de três pontos deve aplicar cargas de maneira contínua, sem choques, à velocidade constante durante todo o ensaio.

3. RESULTADOS

- a) Determine a resistência à tração na flexão em Mpa com a equação e registre os resultados na tabela abaixo.

$$R_{fi} = \frac{1,5 \cdot F_t \cdot L}{40^3}$$

Onde,

R_{fi} → Resistência à tração na flexão para o corpo de prova, em (Mpa).

F_t → Carga aplicada verticalmente no centro da amostra prismática, em (N).

L → Distância entre os suportes, em (mm).

OBS: As medidas de resistências (R_{fi}), obtidas na máquina de ensaios são expressas em (N). Foram convertidas em Mpa utilizando a equação acima.

- b) Determine as médias aritméticas das resistências a tração na flexão em cada mistura com a equação a seguir e anote os valores na tabela abaixo.

$$R_f = \frac{\sum_n R_{fi}}{n}$$

TRAÇÃO NA FLEXÃO				
Misturas/ Amostra	Resistência por amostra (Mpa) aos 28 dias	Média (Mpa)	Resistência por amostra (Mpa) após envelhecimento	Média (Mpa)
R	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
A	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
B	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
C	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
D	1			
	2			
	3			
	4			
	5			

Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE VI – ROTEIRO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

1. MATERIAIS UTILIZADOS

Balança de precisão, lixa, pincel, recipiente aberto para armazenamento de água e toalha limpa absorvente.

2. EXECUÇÃO DO ENSAIO

- a) Seque as amostras em estufa a temperatura de $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, até a constância da massa.
- b) Resfrie as amostras em condições ambientes à temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$.
- c) Lixe a face base das amostras que ficaram dentro do recipiente com lixa grossa e, após, limpe com pincel.
- d) Meça a massa inicial (m_0) de cada amostra e anote em gramas com duas casas decimais.
- e) Marque nas amostras, com o auxílio de régua e lápis, o nível $(5 \pm 0,5)\text{mm}$ acima da superfície inferior (superfície que foi lixada e será inserida no recipiente).
- f) Posicione as amostras com a as faces lixadas dentro do recipiente de ensaio.
- g) Coloque água até o nível $(5 \pm 1)\text{mm}$ acima da face em contato com a água.
- h) Determine a massa de cada amostra, em gramas com duas casas decimais, aos 10 min (m_{10}) e aos 90 min (m_{90}).

OBS:

- Após a pesagem aos 10 min, as amostras devem retornar imediatamente ao recipiente de ensaio.
- As amostras devem ser previamente enxutas com pano úmido antes de cada pesagem.

3. RESULTADOS

- a) Registre as massas (m_{10}) e (m_{90}) obtidos por cada amostra na tabela abaixo.
- b) Calcule a absorção de água por capilaridade para cada tempo pela equação abaixo e anote na tabela abaixo.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{S} = \frac{m_t - m_0}{19,63}$$

Onde,

A_t → absorção de água por capilaridade para cada tempo, em $\left(\frac{g}{cm^2}\right)$.

m_t → massa da amostra em cada tempo, em (g) .

m_0 → massa inicial das amostras, em (g) .

S → área da base da amostra, $S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 2,5^2 = 19,63cm^2$.

t → corresponde aos tempos de 10 min e 90 min.

- c) Calcule o coeficiente de capilaridade para cada mistura pela equação a seguir e anote na tabela abaixo.

$$C = (m_{90} - m_{10})$$

Onde,

C → coeficiente de capilaridade, em $\left(\frac{g}{cm^2 \cdot min^{1/2}}\right)$.

m_{90} → massa da amostra com 90 min, em (g) .

m_{10} → massa da amostra com 10 min, em (g) .

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE							
Amostra	m_0 (g)	m_{10} (g)	m_{90} (g)	A_{10} (g/cm ²)	A_{M10} (g/cm ²)	A_{90} (g/cm ²)	A_{M90} (g/cm ²)
R1							
R2							
R3							
R4							
R5							
A1							
A2							
A3							
A4							
A5							
B1							
B2							
B3							
B4							
B5							
C1							
C2							
C3							
C4							
C5							
D1							
D2							
D3							
D4							
D5							

Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE VII – ROTEIRO DO ÍNDICES FÍSICOS

1. MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização desses ensaios, foram utilizados balança de precisão, balança hidrostática de precisão, recipientes para imersão, estufa e dessecador a vácuo.

2. PROCEDIMENTOS PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Baseado na NBR 9778 (ABNT, 1987), seguem as etapas e processos realizados para determinação da absorção de água por imersão, da porosidade aparente e da massa específica. A execução dos ensaios seguiu os seguintes passos:

Etapa 1: produção das amostras

As amostras, compostas por cinco fragmentos, um para cada tipo de argamassa, foram obtidas a partir dos corpos produzidos e rompidos.

Etapa 2: execução do ensaio

- a) Coloque as amostras na estufa, a uma temperatura de $(100 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, para um período de secagem de 24 horas.
- b) Após a secagem, resfrie as amostras em um dessecador a vácuo e meça suas massas em seguida, anotando-as como pesos secos.
- c) Insira as amostras em água, a uma temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Em seguida, retire-as, enxugue-as com uma toalha limpa absorvente para remover o excesso da água da superfície, e meça suas massas, anotando-as como massas úmidas.
- d) Utilizando uma balança hidrostática, meça as massas das amostras completamente imersas em água, anotando-as como peso imerso.

3. RESULTADOS

Calcule a absorção de água por imersão, a porosidade aparente e a massa específica para todas as amostras e anote-as na tabela abaixo.

Absorção de água por imersão (AA): $AA(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100$

Porosidade aparente (PA): $PA(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \times 100$

Massa específica (MEA): $MEA(g/cm^3) = \frac{P_s}{(P_s - P_i)} \cdot \rho_t$

Onde,

P_s → massa seca, em (g).

P_u → massa úmida, em (g).

P_i → massa imersa, em (g).

Misturas	Massas (g)		AA (%)	PA (%)	ME (g/cm^3)
R	P_s				
	P_u				
	P_i				
A	P_s				
	P_u				
	P_i				
B	P_s				
	P_u				
	P_i				
C	P_s				
	P_u				
	P_i				
D	P_s				
	P_u				
	P_i				

Fonte: Autor (2023).