

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



Tese

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE DA ARGAMASSA DE SANEAMENTO
BRASILEIRA USADA NA RESTAURAÇÃO DO REVESTIMENTO EXTERNO
DA CATEDRAL DE SÃO PEDRO, RIO GRANDE, RS, APÓS 25 ANOS DE
APLICAÇÃO**

JORGE LUIZ OLEINIK NUNES

Pelotas, 2022.

JORGE LUIZ OLEINIK NUNES

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE DA ARGAMASSA DE SANEAMENTO
BRASILEIRA USADA NA RESTAURAÇÃO DO REVESTIMENTO EXTERNO
DA CATEDRAL DE SÃO PEDRO, RIO GRANDE, RS, APÓS 25 ANOS DE
APLICAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves

Coorientador: Dr. André Tavares da Cunha Guimarães

Pelotas, 2022.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

N972a Nunes, Jorge Luiz Oleinik

Análise da integridade da argamassa de saneamento brasileira usada na restauração do revestimento externo da catedral de São Pedro, Rio Grande, RS, após 25 anos de aplicação / Jorge Luiz Oleinik Nunes ; Margarete Regina Freitas Gonçalves, orientadora ; André Tavares da Cunha Guimarães, coorientador. — Pelotas, 2022.

135 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. Prédios históricos. 2. Alvenaria de tijolos de barro. 3. Revestimento externo. 4. Argamassa de saneamento. 5. Retenção de íons cloreto. I. Gonçalves, Margarete Regina Freitas, orient. II. Guimarães, André Tavares da Cunha, coorient. III. Título.

CDD : 620.11063

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE DA ARGAMASSA DE SANEAMENTO
BRASILEIRA USADA NA RESTAURAÇÃO DO REVESTIMENTO EXTERNO
DA CATEDRAL DE SÃO PEDRO, RIO GRANDE, RS, APÓS 25 ANOS DE
APLICAÇÃO**

Data da defesa: 26/01/2022

Banca examinadora:

Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves (Orientadora)
Doutora em Engenharia, área de concentração Ciência e Engenharia de
Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

Dr. André Tavares da Cunha Guimarães (Coorientador)
Doutor em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Dra. Bianca Pereira Moreira Ozório
Doutora em Engenharia, área de concentração Estruturas, Escola de Engenharia
de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

Dra. Maria Tereza Fernandes Pouey
Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Porto Alegre, RS, Brasil.

Dr. Fábio Costa Magalhães
Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Porto Alegre, RS, Brasil.

Dr. Rafael de Ávila Delucis (suplente)
Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande - FURG e a Escola de Engenharia, responsáveis por minha formação profissional e que hoje tenho o privilégio de fazer parte desta instituição.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais – (PPGCEM) da UFPEL, docentes e colegas de curso pelo apoio e acolhimento recebido.

Ao Prof. Dr. César Augusto B. Bastos pela possibilidade do uso do Laboratório de Materiais e Construção da Universidade do Rio Grande, (FURG). Ao Prof. Dr. Jorge Luís Braz pela ajuda nas interpretações dos resultados dos ensaios.

Aos técnicos Júlio César Oliveira, Régis Pinheiro Maria e aos alunos Taiana Wang, Matheus Anderson e Bruna Vieira.

Ao meu coorientador Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães pela ajuda e apoio recebido.

Em especial, à Prof.^a Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves, orientadora e colega de docência, que me acolheu e com muita paciência e perseverança mostrou os caminhos da Engenharia de Materiais e como construir novos saberes – ela é uma amiga que encontrei na minha maturidade.

Aos componentes da banca examinadora, Prof.^a Dra. Bianca Pereira Ozório, Prof.^a Dra. Maria Tereza Fernandes Pouey e Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães e Prof. Dr. Rafael de Avila Delucis.

À minha família, meus pais Jorge *in memoriam* e Olga, minha irmã Carla e minha esposa Rosângela.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos idealizadores do projeto de recuperação do revestimento da Catedral, Prof. Claudio Renato Rodrigues Dias e Prof. Ronaldo Ortiz Cunha.

NUNES, Jorge Luiz Oleinik. **Análise da integridade da argamassa de saneamento brasileira usada na restauração do revestimento externo da catedral de São Pedro, Rio Grande, RS, após 25 anos de aplicação.** 135p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

RESUMO

As manifestações patológicas encontradas nas estruturas de alvenaria existentes em regiões da atmosfera marinha têm a umidade e os sais solúveis como os principais agentes de deterioração dos materiais de construção. Dentre as diversas técnicas e materiais utilizados para a recuperação dessas estruturas, tem-se a execução de revestimentos com argamassas de saneamento desenvolvidas na Alemanha, que são utilizados na Europa há mais de 50 anos com resultados altamente satisfatórios. As argamassas de saneamento, devido a sua elevada porosidade, permitem a cristalização dos sais no interior dos seus poros sem provocar danos ao revestimento, condição esta fundamental para a sua durabilidade e integridade. No Brasil ainda são insuficientes os estudos sobre novos materiais e técnicas construtivas referentes à recuperação de alvenarias degradadas por manifestações patológicas oriundas de salinização. No Rio Grande do Sul, a cidade de Rio Grande, a mais antiga do Estado, localizada na margem Sul do estuário que conduz ao oceano as águas da imensa Laguna dos Patos e seus afluentes, possui inúmeros prédios históricos com visíveis problemas de degradação das alvenarias ocasionadas por umidade e salinização. Esta constatação motivou alguns professores da FURG que, em 1994, iniciaram estudos para a identificação de prédios já degradados e para a obtenção de formas de recuperação dessas estruturas. Na ocasião, foi feito um levantamento preliminar das condições de degradação do prédio da Catedral, visando o conhecimento das causas e consequências das manifestações identificadas e a elaboração de um diagnóstico de restauração. Em especial, para a restauração do reboco das alvenarias do prédio da Catedral, o diagnóstico propôs a execução de testes com argamassas de saneamento alemãs, material convencionalmente usado na Europa, e o desenvolvimento de uma pesquisa para a obtenção de uma argamassa de saneamento produzida com matérias-primas nacionais com características similares as aplicadas na Alemanha. A experimentação das referidas argamassas de saneamento ocorreu durante a restauração dos revestimentos, interno e externo, da Catedral de São Pedro, no período de 1995 e 1996. Passados 22 anos de exposição a umidade e a salinização do entorno, em 2018 foi feita uma inspeção visual do revestimento externo da Catedral e identificou-se que este não apresentava pontos de degradação. Tal observação motivou o desenvolvimento da presente pesquisa que buscou analisar a situação da argamassa aplicada em 1995 frente a presença de seus maiores agressores, a umidade e os sais solúveis. O desenvolvimento do trabalho envolveu apenas o revestimento externo e se justifica por ser a superfície da fachada mais diretamente agredida pelo meio e,

também, por ter sido o único espaço autorizado pela Diocese da Catedral, tendo em vista que o prédio é tombado pelo IPHAN, desde 1938. Para a execução da pesquisa, identificou-se as fachadas leste e oeste como sendo as de atuação e nelas sete pontos críticos de umidade no revestimento. Nos referidos pontos, foram retiradas amostras, nas quais analisou-se o percentual de retenção de íons cloretos, utilizando para isto um potenciômetro com eletrodo de prata/ (cloreto de prata). A análise de sais abrangeu apenas os íons cloretos por constatação de maior incidência no meio, conforme descrito por Dias et al (1997). Nas amostras verificou-se a condição de integridade dos componentes originais da argamassa de saneamento a partir da observação das estruturas cristalinas, por difração de raio X (DRX), e da presença dos elementos constituintes, por fluorescência de raio X. Os resultados mostraram que a formulação proposta para a nova argamassa de saneamento cumpriu com a sua função de proteção retendo os íons cloreto nos seus poros e, também, que seus constituintes originais não se degradaram até o momento.

Palavras-chave: prédios históricos, alvenaria de tijolos de barro, revestimento externo, ambiente salinizado, argamassa de saneamento, retenção de íons cloreto.

NUNES, Jorge Luiz Oleinik. **Analysis of the integrity of Brazilian sanitation mortar used in the restoration of the external coating of the Cathedral of São Pedro, Rio Grande, RS, after 25 years of application.** 135p. Thesis (Doctorate in Materials Science and Engineering), Federal University of Pelotas, Pelotas, 2021.

ABSTRACT

The pathological manifestations found in existing masonry structures in regions of the marine atmosphere have moisture and soluble salts as the main agents of deterioration of construction materials. Among the various techniques and materials used for the repair of these structures, there is the execution of coatings with sanitation mortars developed in Germany, which have been used in Europe for over 50 years with highly satisfactory results. Sanitation mortars, due to their high porosity, allow the crystallization of salts inside their pores without causing damage to the coating, a condition that is essential for its durability and integrity. In Brazil, there are still insufficient studies on new materials and construction techniques related to the recovery of masonry degraded by pathological manifestations arising from salinization. In Rio Grande do Sul, the city of Rio Grande, the oldest in the state, located on the south bank of the estuary that leads the waters of the immense Laguna dos Patos and its tributaries to the ocean, has numerous historic buildings with visible problems of masonry degradation caused by moisture and salinization. This finding motivated some professors at FURG who, in 1994, began studies to identify buildings that were already degraded and to obtain ways of recovering these structures. On the occasion, they carried out a preliminary survey of the conditions of degradation of the Cathedral building, aiming to know the causes and consequences of the identified manifestations and the elaboration of a restoration diagnosis. In particular, for the restoration of the plastering of the masonry of the Cathedral building, the diagnosis proposed the execution of tests with German sanitation mortars, a material conventionally used in Europe, and the development of a research to obtain a sanitation mortar produced with domestic raw materials with characteristics similar to those applied in Germany. The experimentation of these sanitation mortars took place during the restoration of the internal and external coverings of the Cathedral of São Pedro, in the period between 1995 and 1996. After 22 years of exposure to humidity and salinization of the surroundings, in 2018 a visual inspection of the external cladding of the Cathedral and it was identified that it did not present any degradation points. This observation motivated the development of the present research, which sought to analyze the situation of the mortar applied in 1995 in the presence of its greatest aggressors, moisture and soluble salts. The development of the work involved only the external coating and is justified by the fact that the façade surface is more directly attacked by the environment and also for being the only space authorized by the Diocese of the Cathedral, considering that the building is listed by IPHAN, since 1938. For the execution of the research, the east and west facades were identified as being the ones in which the coating

was used and seven critical moisture points in the coating. At these points, samples were taken, in which the percentage of retention of chloride ions was analyzed, using for this a potentiometer with a silver electrode/(silver chloride). The analysis of salts covered only the chloride ions due to the finding of a higher incidence in the medium, as described by Dias et al (1997). In the samples, the integrity condition of the original components of the sanitation mortar was verified from the observation of the crystalline structures, by X-ray diffraction (XRD), and the presence of the constituent elements, by X-ray fluorescence. The results showed that the formulation proposed for the new sanitation mortar fulfilled its protection function by retaining the chloride ions in its pores and, also, that its original constituents have not degraded so far.

Keywords: historic buildings, clay brick masonry, external cladding, saline environment, sanitation mortar, chloride ion retention.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da cidade do Rio Grande no Rio Grande do Sul.	18
Figura 2. Comportamento higroscópico de materiais de construção.	35
Figura 3. Ilustração do fenômeno da higroscopicidade.	35
Figura 4. Fenômeno da capilaridade.	36
Figura 5. Curva de pressão capilar.	37
Figura 6. Ocorrência de condensações.	38
Figura 7. Imagem da Catedral de São Pedro na cidade de Rio Grande, RS. ..	66
Figura 8. Imagem atual do prédio da Catedral de São Pedro.	67
Figura 9. Medição com um termo-higrômetro das condições ambientais no interior da Catedral de São Pedro.	68
Figura 10. Retirada de amostras da argamassa do revestimento no interior da Catedral de São Pedro.	69
Figura 11. Distribuição granulométrica da areia calcária.	75
Figura 12. Distribuição granulométrica da areia quartzosa.	75
Figura 13. Parede com presença de umidade ascendente na fachada leste. ..	79
Figura 14. Parede preparada para a aplicação da nova argamassa de saneamento.	79
Figura 16. Imagem do corte hídrico executado nas alvenarias da Catedral de São Pedro.	80
Figura 17. Experimento feito com a nova argamassa de saneamento.	81
Figura 18. Imagem do prédio restaurado da Catedral de São Pedro.	83
Figura 20. Fachada lateral oeste da Catedral de São Pedro.	84
Figura 22. Etapas desenvolvidas na parte experimental da pesquisa.	86
Figura 26. Pontos críticos de umidade identificados na fachada leste da Catedral.	91
Figura 27. Pontos críticos de umidade identificados na fachada oeste da Catedral.	91
Figura 28. Remoção da camada de pintura no local de coleta das amostras. .	92
Figura 31. Preparação das amostras. (A) Pesagem em balança de precisão; (B) secagem em estufa; (C) resfriamento em dessecador.	95
Figura 32. Ensaio para determinação de cloretos totais. (A) Adição de ácido nítrico nas amostras; (B) Fervura da solução argamassa - ácido nítrico; (D) Resfriamento da solução fervida; (D) lavagem da parte inferior do vidro relógio e do Becker com água destilada.	95
Figura 33. Preparação das 7 amostras da argamassa de saneamento para o ensaio branco.	97
Figura 34. Potenciômetro utilizado para a determinação dos cloretos totais. ..	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Mecanismos de manifestação de umidade nas alvenarias.	34
Tabela 2. Tamanho de partícula do aglomerado das argamassas de saneamento alemãs.	52
Tabela 3 - Caracterização dos sais presentes nas paredes da Catedral de São Pedro, RS.	70

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials
DIN – Deutsches Institut für Normung
DRX – Difração de Raio X
FRX – Fluorescência de Raio X
IGS – Institut für Gebäude analyse und Sanierungsplanung
IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
NBR – Norma Brasileira

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS	13
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Geral.....	20
1.1.2 Específicos	21
1.2 Limitações da pesquisa	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Preservação do patrimônio arquitetônico	23
2.2 Revestimentos de prédios históricos	27
2.2.1 Características das argamassas dos revestimentos.....	31
2.2.1.1 Manifestações patológicas devido à presença de umidade	33
2.2.1.2 Manifestações patológicas devido à presença de sais solúveis	43
2.2.2 Restauro de revestimentos antigos	46
2.3 Argamassas de saneamento	50
2.3.1 Características das argamassas de saneamento estrangeiras.....	53
2.3.1.1 Trabalhabilidade e consistência.....	55
2.3.1.2 Plasticidade.....	56
2.3.1.3 Retenção de água.....	57
2.3.1.4 Teor de ar incorporado	57
2.3.1.5 Massa específica	58
2.3.1.6 Resistência mecânica	58
2.3.1.7 Difusão de vapor.....	59
2.3.1.8 Resistência à passagem dos sais.....	59
2.3.2 Pesquisas desenvolvidas com argamassas de saneamento	60
3. RESTAURO DO REVESTIMENTO DA CATEDRAL DE SÃO PEDRO	66
3.1 Diagnóstico preliminar sobre o revestimento das paredes da Catedral	70
3.2 Ações para a reconstituição da argamassa do revestimento	72
3.3 Obtenção e caracterização da nova argamassa de saneamento	74
4. MATERIAIS E MÉTODOS	84
4.1 Identificação dos pontos críticos de umidade nas fachadas	90
4.2 Coleta de amostras	91
4.3 Ensaio laboratoriais	93
4.3.1 Análise do teor de cloretos totais.....	94
4.3.2 Análise mineralógica das argamassas	98
4.3.3 Análise da composição química das argamassas.....	98

5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
5.1	Análise de retenção de íons cloretos na argamassa de saneamento	100
5.1.1	Considerando a penetração de sais no interior do reboco	100
5.1.2	Considerando a espessura do revestimento.	104
5.1.3	Considerando a relação cl/massa da argamassa.....	106
5.2	Mineralogia das argamassas de saneamento.	108
5.3	Composição química elementar da argamassa de saneamento	112
6.	CONCLUSÕES.....	113
7.	SUGESTÕES PARA ATIVIDADES FUTURAS	116
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
	APENDICE	128
	Relatórios dos ensaios de retenção de íons cloreto feitos nas amostras do revestimento da Catedral de São Pedro	128

1. INTRODUÇÃO

Os revestimentos exteriores e as suas várias camadas são elementos importantes das estruturas de alvenaria edificadas, não só com relação as técnicas utilizadas quando da sua execução, mas, também, devido a questões estéticas e históricas, constituindo assim um documento de identidade das tecnologias e materiais.

A argamassa tem sido usada por milhares de anos e é parte integrante da maioria das construções em alvenaria. Seu uso é difundido em todas as culturas onde a alvenaria é construída. Está presente na maioria dos mercados globais, patrimônio construído e, portanto, é um importante elemento a ser considerado na conservação de edifícios históricos. A efetiva dosagem de uma argamassa para reparo de alvenaria depende de uma compreensão clara de sua função. Os requisitos que cada tipo de argamassa deve atender em serviço depende de sua exposição ambiental e sua função na alvenaria (HUGHES, 2012).

Ainda segundo Hughes (2012), o local onde a edificação se encontra envolve questões como autenticidade histórica, estética, resistência a umidade, ataque de sais, integridade estrutural e vida útil. A conservação deste importante patrimônio requer um conhecimento profundo dos materiais e técnicas originais, de forma a possibilitar a concepção, quando necessário, de materiais de reparação e substituição compatíveis com os preexistentes, bem como com os substratos onde estes estão aplicados. Para uma argamassa de reparo, por exemplo, são requisitos básicos da cal utilizada a adesão, resistência mecânica, elasticidade, transmitância de água e vapor, comportamento de secagem e capacidade de lidar com contaminação por sais. As propriedades das argamassas podem ser ajustadas por vários ingredientes e para atender a diferentes requisitos técnicas.

As edificações históricas com idades avançadas e em perfeitas condições de estabilidade estrutural remetem a reflexões sobre os materiais e as técnicas construtivas utilizadas no passado (MAGALHÃES, 2002; VEIGA e CARVALHO,

2002; VELOSA, 2006; SANTIAGO, 2007; KANAN, 2008; RECENA, 2014), tendo em vista a necessidade de intervenções para a conservação e restauro desses prédios.

Nas edificações antigas os revestimentos de paredes, externos e internos, fazem parte de quase todas as intervenções realizadas, visto que estes, além de terem uma função protetora, também, possuem, muitas vezes, uma função decorativa e estética. Sendo, por isso, considerados testemunho de um tempo passado que, devido a sua importância histórica e técnica, devem ser preservados (AGUIAR e VEIGA, 2001). Esses revestimentos possuem características diferentes dos revestimentos modernos (em sua maioria, feitos à base de cimento), porque são muito porosos, devido à variada granulometria das areias que os compõem, e possuem uma camada mais externa pouco permeável que não compromete a saída d'água sob forma de vapor, em função do uso de aditivos. Portanto, as características dessas camadas facilitam a entrada de água para o interior da alvenaria e a saída da água sob forma de vapor para o exterior (VEIGA e TAVARES, 2002).

Os revestimentos externos são os primeiros a mostrar os sinais de degradação, afetando a estética e a função protetora da edificação. Por isso, as intervenções de conservação e restauro dos revestimentos de prédios antigos têm sido objeto de estudos e pesquisas.

Os materiais e métodos empregados para conservação e restauro desses revestimentos antigos variam conforme o tipo de deterioração. Em qualquer trabalho de restauro é necessária uma análise prévia e criteriosa do estado de conservação do revestimento e deve-se respeitar o seu funcionamento original, pois, caso contrário, podem surgir novas patologias, às vezes mais graves que as inicialmente encontradas.

No Brasil a colonização ocorreu pelo litoral e a grande extensão da costa brasileira, com 7048 quilômetros banhados pelo oceano Atlântico, propiciou que muitas edificações históricas se situassem em zona de atmosfera marinha, onde a agressividade do ambiente é intensa e o risco de deterioração para as estruturas edificadas é alto. Esta situação, justifica a grande importância de estudos sobre o desempenho e durabilidade de revestimentos de argamassa empregados nas construções antigas existentes ao longo da orla marítima.

Neste contexto, temos a cidade de Rio Grande, a mais antiga do estado do Rio Grande do Sul, que possui um acervo arquitetônico urbano edificado com singular beleza e importância, no qual a maioria das edificações está localizada em zona de atmosfera marinha.



Figura 1. Localização da cidade do Rio Grande no Rio Grande do Sul.
Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Rio_Grande_\(Rio_Grande_do_Sul\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Rio_Grande_(Rio_Grande_do_Sul)), em 18/08/2021

Convém salientar que é considerada zona de atmosfera marinha a faixa litorânea com extensão de até cinco quilômetros da maré média, ao interior do continente (ABNT NBR 6118: 2014 - Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento). Estas regiões estão sujeitas à ação de névoa salina, que se forma pelo impacto das ondas entre si ou contra a costa, cujo efeito hidrodinâmico forma o aerossol marinho que contém grandes quantidades de íons cloreto e sulfato, sendo assim um agente muito agressivo aos revestimentos de argamassa (MEIRA, 2004).

Os prédios que compõem o sítio histórico da cidade de Rio Grande, cuja volumetria de telhados e de fachadas permanece intacta, formam um conjunto homogêneo considerado um dos mais importantes do Estado. Muitas destas edificações já foram restauradas, tais como a Catedral de São Pedro, a Prefeitura, o Sobrado dos Azulejos, o antigo Quartel General, a Alfândega e a Câmara do Comércio, e outras ainda estão em processo de restauro ou aguardando projetos e recursos financeiros para a sua realização.

O prédio da Catedral de São Pedro, local de experimentação deste trabalho, no período de 1995 a 1996, passou por uma intervenção na qual foram restaurados os revestimentos, externo e interno, das paredes cujas alvenarias apresentavam alto grau de umidade e salinidade. Na ocasião, de forma inovadora, nas alvenarias afetadas foi utilizado um traço de argamassa de saneamento desenvolvido pelos professores Claudio Renato Rodrigues Dias e Ronaldo Ortiz Cunha, no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) em cooperação com o governo da Alemanha, através do *Institut Für Gebaude analyse und Sanierungsplanung (IGS)*. A referida argamassa foi utilizada com o propósito de atuar como uma barreira capaz de reter a migração de sais de cloreto, ocasionada pela constante presença de umidade nas paredes, e, também, visando a obtenção de um produto nacional para a recuperação de revestimentos de prédios históricos com propriedades similares as de produtos importados já consagrados, tais como as argamassas de saneamento alemãs.

A argamassa de saneamento utilizada foi formulada com cimento, cal hidratada, cinza de carvão mineral, areia quartzosa, areia calcária e aditivo incorporador de ar. A dosagem do traço seguiu parâmetros oriundos de argamassas de recuperação provenientes da Alemanha e nela foram feitos ensaios físicos e mecânicos de acordo com as normativas brasileiras. A sua aplicação como reboco de recuperação nas paredes da Catedral foi feita pelo autor da presente tese que a aplicou em três camadas com uma desempenadeira de madeira, tomando o cuidado de não pressionar muito para evitar a compactação e comprometer a porosidade da massa. Após a aplicação, nenhuma intervenção foi feita no reboco até os dias de hoje.

Passados mais de 25 anos de exposição à intempérie e a atmosfera marinha, em uma análise visual constatou-se que os revestimentos da Catedral

apresentavam-se em boas condições de uso e sem manifestações patológicas visíveis, indicando que a argamassa utilizada no restauro cumpriu com a sua função de saneamento e que os critérios adotados na sua formulação e aplicação foram corretos. Esse bom desempenho, despertou o interesse no desenvolvimento da pesquisa apresentada nessa tese que procurou comprovar a obtenção de uma argamassa de saneamento nacional para o uso no restauro de revestimentos antigos de prédios localizados em ambientes de atmosfera marinha.

A análise da integridade da argamassa de saneamento foi feita a partir da determinação do percentual de retenção de íons cloretos. A experimentação ocorreu somente no revestimento externo devido a facilidade de acesso aos pontos de maior presença de umidade nas fachadas e pela maior possibilidade de presença de íons cloreto por causa da ação direta da atmosfera marinha no entorno do prédio da Catedral. A utilização apenas dos pontos de maior presença de umidade para a coleta de amostras justifica-se por ser a água um veículo facilitador de migração de sais solúveis e, também, pela necessidade de evitar retirada de amostras de forma aleatória tendo em vista que o prédio da Catedral é tombado pelo IPHAN, desde 1938.

Para a definição dos pontos de coleta de amostras da argamassa utilizou-se uma câmera termográfica que detectou os locais com maior presença de umidade. Nas amostras extraídas foi feita a determinação do percentual de retenção de íons cloreto e a análise mineralógica da argamassa.

Quanto a originalidade do trabalho, salienta-se que esta encontra-se pautada na inexistência de estudos para avaliar o desempenho da argamassa de saneamento brasileira utilizada na reconstituição do revestimento da Catedral, a não divulgação dos resultados obtidos nessa tese e na possibilidade de obtenção de um novo produto para obras de restauro de revestimentos de prédios localizados em zonas de atmosfera marinha.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O presente trabalho teve como objetivo geral a determinação da atual condição de integridade da argamassa de saneamento brasileira aplicada como

reboco de recuperação no revestimento externo durante a restauração da Catedral de São Pedro, a partir da identificação do percentual de retenção de íons cloreto.

1.1.2 Específicos

Para atender o proposto no objetivo geral fez-se necessário o desenvolvimento das seguintes etapas:

- Identificar os pontos críticos de umidade no revestimento externo das fachadas do prédio da Catedral de São Pedro;
- Determinar o percentual de retenção de íons cloreto nas amostras extraídas da argamassa de saneamento;
- Analisar mineralógica e quimicamente as amostras, visando a observação da presença dos constituintes originais da argamassa.

Justificativa

O passado constitui uma sólida base para a elaboração do novo na sociedade. Representa um patamar de referência, um conjunto de permanências culturais por meio do qual os grupos sociais se reconhecem e se identificam, constroem e reconstróem os seus valores, suas identidades, suas trajetórias. Em particular, o patrimônio cultural edificado torna perceptível o passado ao exibir uma ordem do tempo no espaço da cidade, por meio de representações de diferentes tempos e formas (MEIRA, 2019).

Os revestimentos de paredes, pela sua exposição e funções protetoras são os primeiros elementos do edifício a sofrer degradação visível. As intervenções geralmente, consistem, na remoção do revestimento antigo e sua substituição por um novo revestimento. Esta prática resulta na eliminação de um testemunho das técnicas e estéticas ancestrais e, frequentemente, devido ao uso de produtos incompatíveis, na alteração radical do funcionamento da parede e numa repatologia, com aceleração da degradação. A principal causa da degradação das paredes antigas é a água. Por essa razão, o comportamento à água dos revestimentos antigos é um critério essencial para a seleção dos revestimentos de substituição, que devem ter características semelhantes aos antigos desse ponto de vista (VEIGA, 2002).

A Catedral de São Pedro é o prédio religioso mais antigo em funcionamento situada na faixa litorânea desde Laguna – SC até Montevideo no Uruguai. É considerada Patrimônio Histórico e Cultural da cidade do Rio Grande – RS e região, sendo preservada por lei. A sua imagem possui uma significância de símbolo histórico no município, tendo sido utilizada em várias campanhas culturais.

Passado todo este tempo de uso, foi possível verificar que a argamassa de saneamento produzida com matérias primas nacionais, aplicada como reboco externo da catedral, apresenta boas condições de conservação. O estudo da integridade desta argamassa brasileira, com propriedades similares as estrangeiras, justificam a importância desta pesquisa.

1.2 Limitações da pesquisa

No desenvolvimento da pesquisa ocorreram limitações devido ao tombamento do prédio pelo IPHAN. Em função disto, foram liberadas para o desenvolvimento do trabalho somente as fachadas leste e oeste da Catedral e a quantidade de amostras extraídas do revestimento externo foi limitada devido ao uso de técnica destrutiva para a sua retirada, que poderia provocar danos ao revestimento. Somaram-se a isto, a dificuldade de acesso aos laboratórios, que encontravam-se fechados, e aos equipamentos necessários a execução dos ensaios laboratoriais de fluorescência de raio X - FRX e difração de raio X - DRX, por causa da Pandemia COVID 19.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Preservação do patrimônio arquitetônico

O passado constitui uma sólida base para a elaboração do novo na sociedade. Representa um patamar de referência, um conjunto de permanências culturais por meio do qual os grupos sociais se reconhecem e se identificam, constroem e reconstroem os seus valores, suas identidades, suas trajetórias. Em particular, o patrimônio cultural edificado torna perceptível o passado ao exibir uma ordem do tempo no espaço da cidade, por meio de representações de diferentes tempos e formas (MEIRA, 2019).

Conservar a memória da produção arquitetônica humana torna-se, por sua vez uma atividade fundamental do ponto de vista científico, porque estamos lidando com exemplares, insubstituíveis, sobre os quais os erros conceituais ou técnicos não nos deixam margem para intervenções (OLIVEIRA, 2011).

A adoção de critérios de atuação, bem como o uso adequado de materiais e de técnicas apropriadas são cruciais para a conservação do patrimônio cultural em específico, o patrimônio arquitetônico. A carência de informação sobre as ferramentas, materiais e técnicas tradicionais utilizadas nos edifícios originais, desafia-nos a aprender mais sobre o conhecimento tradicional para, entre outros aspectos, estabelecer uma referência, a partir da qual possam ser definidos os critérios de compatibilidade. Daí que, tomando como exemplo o caso das tecnologias e materiais utilizados em edifícios históricos, pode-se cientificamente considerar como fundamental o respeito pelos critérios de reversibilidade e de compatibilidade com os materiais pré-existentes, dentre outros aspectos. No que diz respeito a estes critérios têm-se realizado estudos aprofundados sobre os aspectos construtivos e as técnicas utilizadas na composição desses elementos, o que tem viabilizado um significativo avanço no campo técnico-científico do conhecimento, a par dos expressivos contributos no âmbito da conservação do patrimônio. Todavia, muito ainda resta a conhecer acerca dos materiais e tecnologias construtivas, designadamente num quadro patrimonial, em que muitos dos edifícios históricos exibem uma variedade de elementos e tecnologias tradicionais (MENEZES e VEIGA, 2014).

De acordo com Meira (2019), restaurar não é voltar ao original, não é fazer tudo de novo, não é imitar a linguagem arquitetônica antiga nem copiar elementos do passado, como muitas vezes o público deseja. A restauração começou a se delinear como disciplina autônoma no século XIX, agregada aos avanços da química e da física, ao desenvolvimento da arqueologia, da história da arte e da arquitetura, entre outros fatores. A restauração é a disciplina que individualiza e legitima o modo de intervenção sobre os bens patrimoniais, que são continuamente sujeitos a diversos tipos de deterioração pela ação humana, pelo clima, por riscos naturais. Tem por finalidade a conservação de sua integridade para as futuras gerações.

Ainda segundo Meira (2019), a restauração é considerada um problema conceitual tem como ideias básicas os seguintes itens:

- A consciência da ação sobre conceitos atuais que poderão ser modificados no futuro;
- O respeito às modificações sofridas pelo edifício ao longo da sua história;
- A intervenção fundamentada na recuperação da imagem potencial remanescente nos fragmentos;
- A noção de limites para a restauração, fora dos quais se incorre em falsificação;
- A consciência da subjetividade da intervenção;
- A necessidade do uso de técnicas reversíveis;
- A consciência de que o tempo da intervenção é o atual, e não o da execução original, por parte do autor.

No processo de restauração há duas tendências básicas: livrar a edificação de quaisquer alterações posteriores e reproduzir sua feição original.

Violet le Duc, arquiteto francês do século XIX, sustentava que restaurar significa colocar-se no espírito do construtor e imaginar a solução que ele encontraria diante do problema colocado hoje. Seu objetivo: dar a edificação sua unidade estilística original. Ou, então, segundo o princípio instituído pela Carta de Veneza de 1964, valorizar as intervenções posteriores como registros do

tempo, procurando deixá-las á mostra como um retrato atravessado pela história (MEIRA, 2019).

O conceito de patrimônio é hoje exigente quanto à autenticidade do testemunho do tempo, exigindo que intervenções não destruam, em última análise, aquilo que é suposto conservarem. Isto é, o monumento, no seu sentido mais amplo, definido já desde 1964, na Carta de Veneza, como englobando a criação arquitetônica isolada, bem como o sítio rural ou urbano que testemunhe uma civilização particular, uma evolução significativa ou um acontecimento histórico. Essa noção estende-se não só as grandes criações, mas, também, as obras modestas que adquiram com o tempo um significado cultural (NADER, 2013).

Uma obra de arquitetura é o testemunho histórico acumulado e sedimentado do modo de vida do homem, não só daquele que a concebeu, mas igualmente dos que viveram através dos tempos e lhe conferiram novos usos e significados simbólicos. Como documento histórico, a obra de arquitetura manifesta uma evolução linear dos valores de uso por parte da sociedade e das formas de pensamento que ela transfere, ao mesmo tempo em que evidencia as qualidades presentes com o valor agregado de uma continuidade histórico-cultural que só se perde por destruição física (MEIRA, 2019).

A deterioração das alvenarias antigas é um problema contemporâneo. As propriedades dos materiais utilizados nas estruturas de alvenaria que irão determinar sua durabilidade, deterioração e grau de preservação, levaram ao aparecimento de diferentes abordagens no sentido de escolher a melhor tecnologia de restauração. O sucesso de qualquer restauração é amplamente determinado pela compatibilidade dos materiais que serão utilizados para sua execução, o que via de regra é um processo complexo. Uma das principais abordagens tecnológicas na ciência dos materiais de restauração é a busca pela composição ideal do material que será utilizado (KHARITONOV e SMIRNOVA, 2019).

No restauro contemporâneo, segundo Cunha e Dias (1997), a tecnologia moderna não pode ser negada, mas deve ficar integrada totalmente à original; pode-se produzir uma nova arquitetura, mas nunca apagar as marcas que contém o original.

Na restauração da Catedral de São Pedro, objeto de estudo desse trabalho, a conservação de sua integridade foi respeitada quanto a originalidade das peças e de determinados elementos arquitetônicos que formavam o marco inicial do conjunto, dentre eles beirais, semalhas, elementos ornamentais das torres, entre outros.

No Brasil, como parte de um capítulo da história intelectual e institucional da geração modernista, as ações de preservação do patrimônio edificado tiveram início em 30 de novembro de 1937, quando foi criado o Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (SPHAN), que representou um passo decisivo da intervenção governamental no campo da cultura.

A partir do SPHAN, as políticas de preservação no Brasil foram conduzidas por intelectuais de perfil tradicional, que atuaram no Estado em nome do interesse público e na defesa da cultura. Esses intelectuais, em seus campos de atuação, tinham posição de vanguarda, o que lhes conferia na área de patrimônio um perfil perfeitamente identificado com a política cultural cuja continuidade e prestígio durou cerca de 30 anos. Já na década de 70, essa política começou a ser criticada e seu caráter nacional contestado por se referir apenas às produções das elites. Foram, então, definidos novos valores e novos interesses, o que significou vincular a temática da preservação à questão do desenvolvimento, ganhando um espaço de resistência ao regime autoritário. Já na década de 80, na fase de abertura do regime militar, houve uma aceitação dos interesses populares no momento que a sociedade civil se reestruturava, tanto através dos mecanismos de representação política quanto através de novas formas de organização não governamentais. Foi nessa década que através de organismos internacionais de cultura, como a Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO), no Brasil foram tombados dez cidades e parques (CUNHA, 1999).

No período de atuação do SPHAN, o prédio da Catedral de São Pedro teve seu reconhecimento como a mais antiga Igreja do Rio Grande do Sul, sendo tombado em 1938, conforme processo 001-T-38 do Arquivo Central do IPHAN-RJ (MEIRA, 2019).

2.2 Revestimentos de prédios históricos

Os revestimentos de paredes de prédios históricos fazem parte de quase todas as intervenções realizadas em edificações antigas, visto que estes, além de terem uma função protetora, também, possuem, muitas vezes, uma função decorativa e estética. Sendo assim, testemunho de um tempo passado que, devido a sua importância histórica e técnica, deve ser preservado (AGUIAR, *et al.*, 2001).

O revestimento externo é a face mais visível de um edifício e, também, a que mais sofre ataques de elementos agressivos. Devido a intervenções realizadas ao longo do tempo, muitos destes revestimentos foram tratados sem nenhuma preocupação científica e, por isto, muitas técnicas construtivas utilizadas foram perdidas (VEIGA, 2002). Essa situação de desconhecimento de técnicas construtivas foi vivenciada durante a restauração da Catedral de São Pedro que, por inexistência de registro, teve a reconstrução de seus revestimentos com a proposta de uma nova argamassa.

Nos revestimentos antigos, as argamassas de cal aérea foram utilizadas por muito tempo, em diferentes estilos arquitetônicos e composições, podendo contar a história da construção, de modo peculiar, melhor que qualquer outro material (VEIGA, 2017).

Conforme Margalha (2011), os gregos foram os primeiros a utilizar a cal em argamassa de revestimento sendo que, inicialmente, a cal era misturada com areia. Segundo a autora, num determinado momento, os construtores gregos perceberam que essa argamassa apresentava instabilidade em presença de umidade e passaram a adicionar um ligante hidráulico, a pedra de Santorini (composto rico em sílicas), que é uma pozolana capaz de endurecer mesmo debaixo de água.

Em 2008, a pesquisadora Maria Isabel Kanan, que atuou como consultora técnica no restauro do revestimento da Catedral de São Pedro, afirmava em suas pesquisas que uma argamassa que sobreviveu a vários séculos ou décadas envelhece e traz mudanças em sua microestrutura, provocando alterações de natureza química e física ao longo do tempo, proporcionando dessa forma, modificações de acordo com as propriedades dos materiais e natureza, intensidade e frequência dos agentes de degradação. As observações de Kanan

(2008) foram reforçadas por Recena (2014) nas especificações para o desenvolvimento de um projeto de restauro, que foi elaborado pautado na especificação dos materiais, relacionando natureza e desempenho, tendo em vista que o material atual pode não reproduzir as características do original, e nem levar em consideração o efeito do tempo, do envelhecimento natural e das alterações espontâneas.

As observações de Kanan (2008) e Recena (2014) tiveram seu berço nas teorias de Veiga (2002), que afirmavam que o desenvolvimento do traço de uma argamassa de restauro de um prédio histórico, deve ter compatibilidade entre o original (antigo) e o novo. Segundo os autores, os critérios de compatibilidade abrangem diversos requisitos, as texturas e cores tão características, os materiais selecionados, a tecnologia usada – a boa arte de executar e aplicar, cujos segredos são, hoje, difíceis de penetrar -, o bom funcionamento global das paredes gerado pela compatibilidade de materiais e de soluções construtivas, merecem ser preservados, não só porque fazem parte da nossa história e da nossa memória coletiva e caracterizam ambientes, mas, também, porque são importantes objetos de estudo da própria história dos materiais e das tecnologias da construção.

Também, de acordo com Kanan (2008) e Recena (2014), as modificações sofridas pelas argamassas de revestimento ao longo do tempo são acompanhadas de rearranjos químicos e físicos na sua estrutura, bem como de alterações nas suas propriedades químicas e físicas. Várias reações estão envolvidas neste complexo processo e com elas a formação de produtos, que se distinguem pela ação benéfica (produtos de reação) ou nociva (produtos de degradação) sobre as características e propriedades da argamassa, e ainda os que resultam apenas da transformação de fases, sem implicarem necessariamente uma redução ou piora de suas propriedades (produtos de alteração). Os produtos de reação, são, entre outros, os da hidratação do ligante (cal aérea) ou, resultantes do desenvolvimento de reações de caráter pozolânico entre a cal e os minerais reativos dos agregados, ou ainda entre a cal e os materiais pozolânicos adicionados a argamassa. Dos produtos de degradação frequentemente encontrados em argamassas com idades avançadas, os mais correntes são os sais solúveis, os principais são os cloretos, sulfatos e nitratos. De um modo geral, a ação nociva destes compostos nas argamassas ocorre por

interação química entre os íons e os componentes das argamassas ou por interação mecânica com as paredes dos poros resultando em dilatações irreversíveis em cada ciclo de umidificação-secagem, que ao longo de vários ciclos provocam a degradação da argamassa.

O conhecimento de argamassas históricas remonta as indicações dadas por *Vitruvio*¹, arquiteto romano que viveu no século I a. C., no que diz respeito à constituição, finalidade e proporção entre os diversos ingredientes das argamassas de cal, presente na maioria dos monumentos anteriores ao século XX (SANTIAGO, 2007).

Com relação aos materiais utilizados, Rodrigues (2004) menciona que as argamassas aplicadas em edifícios antigos eram, geralmente, resultantes da mistura de cal aérea com agregados finos e/ou outras cargas, referindo-se a fragmentos de material cerâmico.

Os traços das argamassas de cal utilizadas nos revestimentos antigos eram definidos empiricamente. Neles buscava-se a máxima compacidade, ou seja, que a quantidade de cal adicionada preenchesse por completo os vazios dos grãos de areia. Assim, o traço dependia da granulometria e da forma dos grãos de areia utilizada e, também, da própria finura da cal. A eficiência máxima da argamassa de cal e areias bem graduadas e um pouco angulosas era obtida com um traço na proporção de 1:3, enquanto para as areias mais arredondadas (areias de rio) e com granulometrias muito descontínuas eram utilizados os traços 1:2 ou 1:1,5 (VELOSA, 2002).

Quando o suporte era úmido ou estava exposto a ambientes com presença de água (cisternas, porões, subsolos, etc.), usavam-se argamassas hidráulicas, sendo esta hidraulicidade conferida por pozolanas naturais ou artificiais (VELOSA, 2002).

Existe um consenso entre os pesquisadores que até o século XIX se utilizavam adições pozolânicas na fabricação de argamassas de cal, além de alguns óleos que conferiam propriedades hidrofugantes. Como exemplo, cita-se o relato de Kanan (2008) que diz que nos revestimentos existentes nas construções dos casarios coloniais da cidade de Salvador, BA, foram utilizadas adições de conchas marinhas moídas na argamassa.

¹VITRUVIO POLIO, M. L. **Los diez libros de arquitectura**. Trad., prologo e notas de Agustín Blaquez. Barcelona: Ibéria, 1955. L. II, cap. III, p. 40.

Nos prédios históricos, em geral, os revestimentos das paredes apresentavam grande diversidade de constituição e de acabamento, tendo naturalmente, variado ao longo dos séculos, com o tipo de paramento², com a localização das construções e com a sua tipologia (LEITE, 2015).

Os paramentos eram deixados com superfície grosseira, para facilitar a aderência das argamassas. A composição das argamassas variava com os materiais de suporte: alvenaria de pedra, alvenaria de tijolo maciço, taipa ou adobe, etc. Algumas pedras não eram consideradas aptas a ser rebocadas. Nos suportes de tijolos mais lisos, as juntas não eram preenchidas, para aumentar a rugosidade do paramento (MATEUS, 2002).

Na composição dos revestimentos antigos existiam as camadas de regularização e proteção (denominadas de emboço, reboco e esboço) e as camadas de proteção, acabamento e decoração (identificadas como barramento, pintura mineral simples ou de ornamentação, do tipo fingidos³ ou pintura mural (MARQUES, 2015).

As argamassas de cal e areia eram utilizadas nas camadas de regularização e proteção. Nessas, eventualmente, também, ocorriam adições minerais e orgânicas. O conjunto das três camadas (emboço, reboco e esboço) devia ter uma espessura da ordem de 15 a 30 mm. Quando a irregularidade das alvenarias exigia espessuras superiores, recomendava-se a execução prévia de uma camada com encasques em que se usavam fragmentos de tijolos ou de pedra, ou armava-se a camada de emboço com grandes inertes (fragmentos de tijolo, telhas ou pedra), ou com fibras vegetais (sisal) ou animais (pelo de cabra ou crina), ou ainda, com redes metálicas, para aumentar a resistência da camada e evitar sua fácil desagregação com o tempo (MATEUS, 2002).

As camadas internas do revestimento tinham traços mais ricos em ligante e granulometria da areia mais grosseira. Desse modo, a deformabilidade e a porosidade iam aumentando das camadas internas para as externas, promovendo um bom comportamento frente às deformações estruturais e a

²PARAMENTO, cada uma das superfícies de um elemento construtivo vertical, como paredes ou muros, pode ser de pedras regulares, irregulares, tijolos, etc.

³FINGIDOS, revestimento com caráter decorativo configurado por argamassa cimentícia, cuja composição, aplicação e tratamento final são realizados com intuito de simular revestimentos pétreos.

água. As camadas mais finas eram em maior número e permitiam uma melhor capacidade de proteção à água e uma durabilidade superior sem afetar a permeabilidade ao vapor de água. Essa porosidade tão importante das argamassas antigas era correntemente denominada por capacidade de respiração da parede (MATEUS, 2002).

O emboço era a primeira camada, a que estabelecia o contato com a parede e a que era, portanto, mais grosseira, com agregado de granulometria mais graúda, tinha a função principal de proteger a base do paramento e constituir um estrato com geometria adequada à aplicação das camadas seguintes. O traço da argamassa utilizada era 1 de cal em pasta: 2 a 4 de areia média (MATEUS, 2002; MARGALHA, 1998).

Durante a execução da camada do emboço, a argamassa era projetada com força e bem apertada com uma colher de pedreiro ou a talocha apresentando aspecto áspero, para melhor aderência das camadas subsequentes. Após, deixava-se secar por períodos que podiam atingir de três a seis semanas, para permitir a carbonatação da cal aérea antes da aplicação da próxima camada (RODRIGUES, 2004).

O reboco era a camada intermediária, de regularização, que servia de base ao acabamento. A dosagem era muito parecida com a do emboço, no entanto, o teor de ligante era reduzido do interior para o exterior (MATEUS, 2002; MARGALHA, 1998)

O esboço era a camada de preparação para o acabamento, de pequena espessura, com granulometria fina e, em geral, de textura lisa. Nos edifícios mais pobres podia não existir, neste caso o acabamento final era obtido com caiação aplicada diretamente sobre o reboco (MATEUS, 2002; MARGALHA, 1998).

2.2.1 Características das argamassas dos revestimentos

As argamassas dos revestimentos antigos possuem características diferentes das dos revestimentos modernos (em sua maioria, feitos à base de cimento), porque estas são bastante porosas devido a granulometria das areias. Da mesma forma que permitem com facilidade a entrada de água para o interior da alvenaria, a saída desta água, para o exterior sob forma de vapor também é muito fácil e rápida (VEIGA e TAVARES, 2002).

Apesar das argamassas de cal serem muito porosas, sua capacidade de resistência e proteção como revestimento eram garantidas pela seleção da matéria prima, pelo processo executivo de multicamadas, pelas espessuras adquiridas e porosidades adequadas que propiciavam que o sistema de poros evitasse a permanência prolongada da água, facilitando a evaporação para o exterior (MARQUES, 2005).

As propriedades das argamassas de cal aérea, tais como a trabalhabilidade, a capacidade de absorver deformações e a resistência aos agentes de deterioração do ambiente, são afetadas por vários fatores. Entre eles, a cura da argamassa, ou seja, sua completa carbonatação que é um processo crítico, já que dele depende a resistência final e a durabilidade. É desejável que a argamassa cure completamente e, dependendo da velocidade de reação de carbonatação, esse processo pode ocorrer em alguns meses ou mesmo demorar anos (KANAN, 2008).

Estas argamassas, em geral, apresentam elevada absorção capilar e elevada permeabilidade ao vapor de água, o que facilita a evaporação de água que possa existir no interior dos paramentos (CAVACO, 2005).

Esta condição de permeabilidade ao vapor de água é obtida pelos diferentes mecanismos de transporte de umidade que nela atuam. A difusão e os movimentos convectivos condicionam o transporte em forma de vapor enquanto a capilaridade, a gravidade e o efeito do gradiente de pressão controlam a transferência de umidade na fase líquida (FREITAS, 2008).

A identificação das manifestações patológicas nos revestimentos antigos, suas causas e consequências, é fundamental para a elaboração de um diagnóstico correto, que permita propor soluções de reparação adequadas. As principais causas de deterioração desses revestimentos são resultantes de fatores físicos, mecânicos, químicos ou biológicos, sendo a umidade a de maior incidência (MATTOS, 2018).

Considerando o objetivo desse trabalho, que busca identificar a integridade da argamassa de saneamento aplicada no restauro do revestimento da Catedral frente a presença de umidade e sais solúveis, a seguir será apresentada uma breve revisão sobre manifestações patológicas provenientes desses fatores.

2.2.1.1 Manifestações patológicas devido à presença de umidade

A umidade constitui uma das principais causas de degradação das edificações. A umidade se apresenta sob diversas formas de manifestação (condensações superficiais e internas, higroscopicidade, fuga nas instalações, umidade de construção e capilaridade/umidade ascendente), sendo a capilaridade o mecanismo que condiciona a umidade ascendente (FREITAS, 2008).

O conhecimento das diferentes formas de manifestação da umidade do ar é um dado essencial para elaboração de um correto diagnóstico que permita identificar claramente as causas que estão na base dos problemas e propor metodologias adequadas para os trabalhos de reparação. São várias as formas sob as quais as anomalias devidas à presença de umidade podem se manifestar. A cada tipo de causa correspondem, em geral, conjuntos bem definidos de sintomas que podem ser diagnosticados por inspeção visual, ensaios, análises *in loco* ou estudo das características dos materiais e dos locais. Muitos desses sintomas não são específicos de uma determinada anomalia, sendo necessário analisar o conjunto dos sintomas que levarão a um diagnóstico correto (HENRIQUES, 2001).

De acordo com Freitas *et al.* (2008), os mecanismos que condicionam o transporte da umidade em elementos de construção são complexos. A difusão e os movimentos convectivos condicionam o transporte em fase de vapor, enquanto a capilaridade, a gravidade e o efeito do gradiente de pressão controlam a transferência de umidade na fase líquida. Na prática, o transporte em fase líquida e em fase vapor ocorre em simultâneo e depende das condições de temperatura, umidade relativa, precipitação, radiação solar, pressão do vento (que definem as condições de fronteira) e das características dos materiais. Ainda, do ponto de vista físico, conforme os autores, existem três mecanismos fundamentais de fixação de umidade: higroscopicidade, capilaridade e condensação. Esses três mecanismos permitem explicar, na generalidade dos casos, a variação do teor de umidade no interior dos materiais de construção com estrutura porosa.

A tabela 1 apresenta, resumidamente, mecanismos de manifestação de umidade nas alvenarias e seus veículos de transporte (fases).

Tabela 1. Mecanismos de manifestação de umidade nas alvenarias.

Manifestação de umidade	Fases
Higroscopicidade dos materiais	Fase vapor
Condensações superficiais	Fase vapor/Fase líquida
Condensações internas	Fase vapor/fase líquida
Umidade de construção	Fase vapor/fase líquida
Umidade ascendente ou por elevação	Fase líquida
Umidade descendente	Fase líquida
Umidade por fuga nas canalizações	Fase líquida
Umidade por infiltrações	Fase líquida

Fonte: Bertolini (2010).

A **higroscopicidade** traduz o comportamento dos materiais em função das variações de umidade relativa do ar, caracterizado pela capacidade de fixar moléculas de água por adsorção e de as restituir ao ambiente em que se encontra.

Os materiais de construção podem apresentar vários graus de higroscopicidade, pelo que podem ser classificados em dois grandes grupos;

- Materiais higroscópicos – Quando a quantidade de água fixada por adsorção é relativamente importante (por exemplo, concreto celular e a madeira);
- Materiais não higroscópicos – Quando a massa é praticamente constante qualquer que seja a umidade relativa do ambiente onde se encontrem (por exemplo, o barro vermelho).

Os diversos materiais correntemente usados em Engenharia Civil são higroscópicos, isto é, quando são colocados num ambiente em que a umidade relativa varia, o seu teor de umidade também varia. O fenômeno é representado graficamente na figura 2 e é atribuído às forças intermoleculares ou de Van der Waals que atuam na interface sólido-fluido no interior dos poros

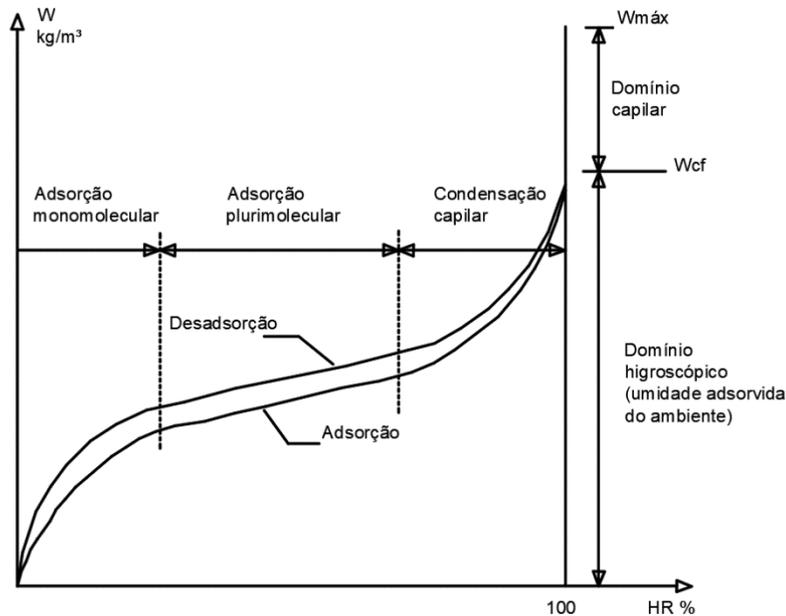


Figura 2. Comportamento higroscópico de materiais de construção.
 Fonte: Freitas *et al.* (2008).

A análise do gráfico da figura 2 permite verificar que na primeira fase ocorre a fixação de uma camada de moléculas de água na superfície interior dos poros (adsorção monomolecular), numa segunda fase, a deposição de várias camadas de moléculas (adsorção plurimolecular). Quando o diâmetro dos poros é suficientemente pequeno ocorre a junção das camadas plurimoleculares (condensação capilar), sendo este fenômeno descrito pela teoria de Kelvin mostrada na figura 3.



Figura 3. Ilustração do fenômeno da higroscopicidade.
 Fonte: Freitas *et al.* (2008).

Esta análise do fenômeno de higroscopicidade tem sido largamente confirmada pela experiência. No entanto, questões ligadas à influência da temperatura e a histerese das curvas de adsorção e desadsorção não estão ainda completamente resolvidas (FREITAS *et al.*, 2008).

A **capilaridade** é o fenômeno que ocorre quando um material poroso é posto em contato com água em fase líquida. Este fenômeno resulta de propriedades particulares de umidificação dos grãos sólidos, gerando-se a formação de interfaces curvas entre o fluido (água) e o ar contido no interior dos poros.

A umidificação do material por capilaridade pode ser ilustrada através da figura 4. Este fenômeno resulta de propriedades particulares de umidificação dos grãos sólidos, gerando-se a formação de interfaces curvas entre o fluido no caso a água e o ar contido no interior dos poros.

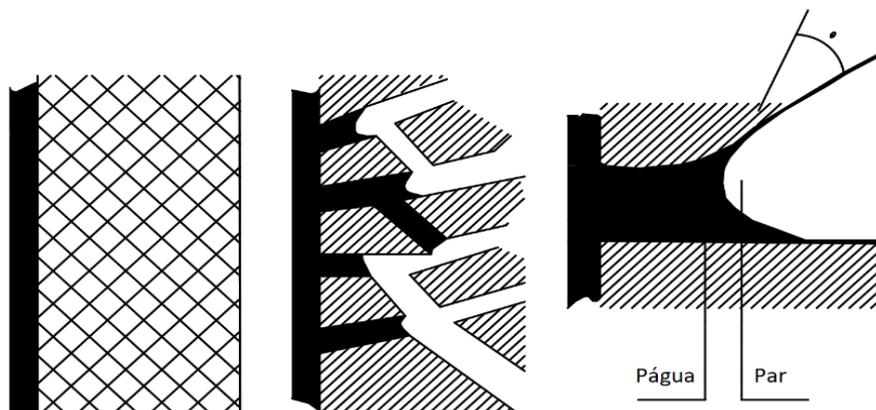


Figura 4. Fenômeno da capilaridade
Fonte: Freitas *et al* (2008).

Na interface líquido-gás, estabelece-se um gradiente de pressões denominado de pressão capilar (P_c) que é função da tensão interfacial (σ), dos raios de curvatura principais (R) e do ângulo de umidificação (θ), conforme apresentado na equação 1 (FREITAS *et al*, 2008).

$$P_c = P_{ar} - P_{\acute{a}gua} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \cos \theta h \quad [N/m^2] \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

P_c Pressão capilar

P_{ar} Pressão do ar

$P_{\acute{a}gua}$ Pressão da água

σ Tensão superficial

θh Ângulo de umidificação

; R_1 e R_2 são raios de curvatura.

Conforme a equação 1, a pressão capilar é função da temperatura e do teor de umidade, dado que σ varia com a temperatura e R com o teor de umidade. O desenvolvimento da curva de pressão capilar (sucção) depende da lei de distribuição, do raio dos poros e da sua variação. A sucção é tanto menor quanto maior for o teor de umidade e anula-se para um teor de umidade igual ao teor de umidade máximo (Figura 5).

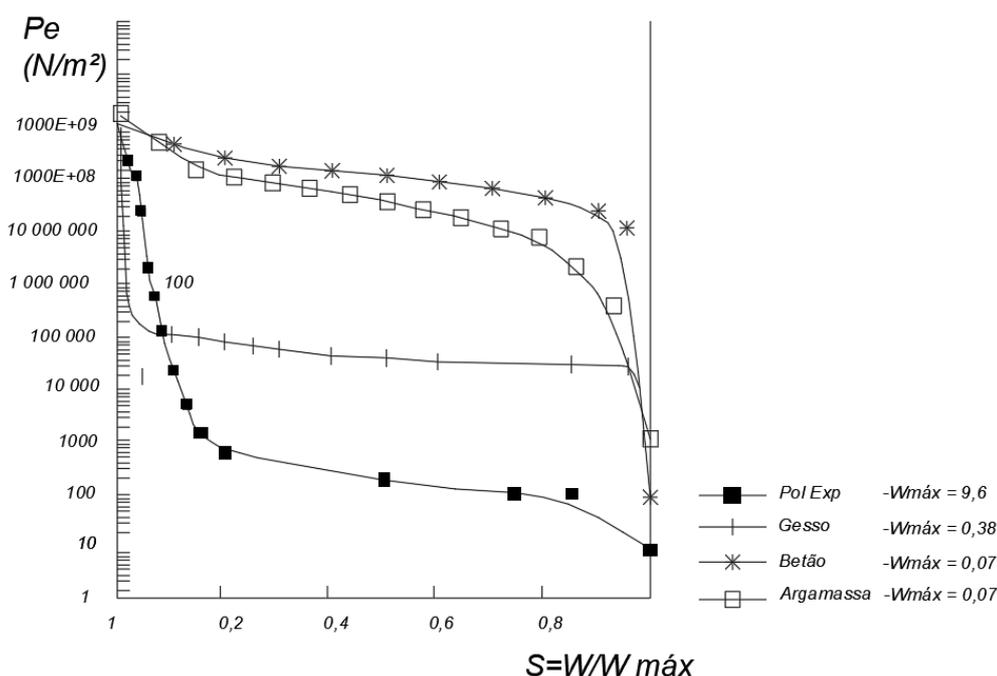


Figura 5. Curva de pressão capilar.
Fonte: Freitas *et al.* (2008).

Condensação é um o fenômeno da difusão de vapor que, segundo a teoria de Glaser (1967), para qualquer que seja o ponto no interior do elemento de construção, a pressão de vapor (P) tem de ser, necessariamente, menor ou igual à pressão de saturação (P_s). Quando a pressão é igual à pressão de saturação ocorrem condensações, isto é, o transporte que se fazia em fase vapor gera o aparecimento de uma fase líquida.

Conhecida a curva de distribuição de temperatura no interior de um elemento de construção pode-se determinar através do diagrama psicrométrico, se a curva das pressões de saturação (Figura 6) tem pontos coincidentes com a

curva das pressões instaladas e se haverá ocorrência de condensações internas.

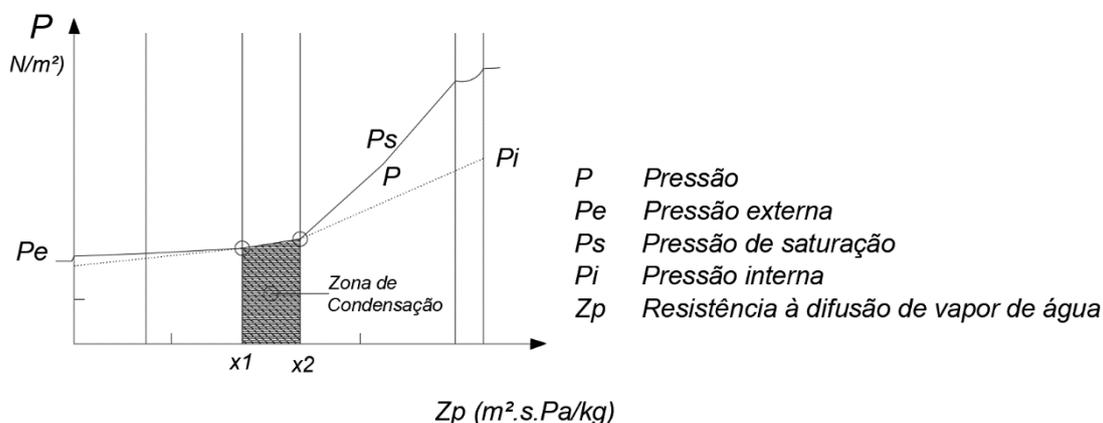


Figura 6. Ocorrência de condensações.
 Fonte: Freitas *et al* (2008).

Conforme Freitas *et al.* (2008), a alimentação do fluxo condensado pode advir do vapor contido inicialmente no interior do elemento, fundamentalmente, do fluxo que se desloca da zona quente para a zona fria dos elementos de construção. Quando as condensações não ocorrem na superfície dos elementos de construção denominam-se condensações internas. Num determinado ponto de um elemento de construção, sempre que a pressão parcial do vapor de água se iguala a pressão de saturação correspondente à temperatura nesse ponto, ocorrem condensações no interior do elemento. Como os teores de umidade gerados pela condensação são elevados, passa a haver fluxos de umidade em fase líquida.

Os três mecanismos descritos não são dissociáveis podendo ainda juntar-se a ação da gravidade e das pressões exteriores geradas pelo vento, o que torna muito complexo o estudo e a modelização do movimento global da água no interior de materiais de construção.

Com relação às **condensações superficiais**, estas ocorrem quando, a uma dada temperatura, o ar não pode conter uma quantidade de vapor de água superior à saturação. No inverno, a face interior dos elementos da construção está a uma temperatura θ_{si} inferior a temperatura a θ_i do ar interior (FREITAS *et al*, 2008). A expressão da equação 2 mostra a determinação da temperatura superficial interior dos elementos da construção.

$$\theta_{si} = \theta_i - U * R_{si} (\theta_i - \theta_e) \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

θ_{si} Temperatura superficial interior

θ_i Temperatura interior

U Coeficiente de transmissão térmica

R_{si} Resistência superficial interior

θ_e Temperatura exterior.

Conhecida a temperatura θ_i e a umidade relativa interior é possível caracterizar a pressão parcial de vapor interior e determinar, através do diagrama psicrométrico, a temperatura de saturação correspondente θ_{po} . Para que não exista lugar a condensações deve-se verificar a seguinte relação $\theta_{si} > \theta_{po}$.

Basicamente, existem três processos para evitar as condensações superficiais:

- Aumentar o isolamento térmico fazendo diminuir a temperatura superficial interior θ ;
- Aumentar os caudais de ventilação e a higroscopicidade dos revestimentos, o que permite reduzir a umidade relativa interior;
- Controlar a produção de água no interior.

A **umidade da construção** é gerada pela água utilizada para a colocação, ou cura dos materiais utilizados na realização da alvenaria, que em alguns casos pode permanecer na alvenaria por longo tempo. A absorção e perda da umidade nos materiais de construção está vinculada a porosidade aberta e a condição de poros interligados formando capilares (BERTOLINI, 2010).

No caso da porosidade fechada, em que os poros do material não se comunicam entre si, o material é impermeável, não permitindo a transferência de água no seu interior. Materiais com porosidade fechada são interessantes para a umidade ascensional pois constituem uma barreira hídrica (FREITAS *et al.*, 2008).

As condições ambientais influenciam as condições de secagem, que é ligada a temperatura, a umidade e a velocidade do ar. Se o ambiente é fechado ou é úmido, a secagem pode ser muito lenta. Também a aplicação precoce de revestimentos impermeáveis dificulta a evaporação da água da construção, e pode, além disso, causar o deslocamento e a degradação dos próprios revestimentos (HENRIQUES, 2001).

A **umidade ascendente ou por elevação** está ligada ao fenômeno da capilaridade resultante da presença de aquíferos superficiais, águas dispersas de redes hídricas ou redes de esgoto defeituosas, mais do que águas pluviais estagnadas. Muitas vezes, a umidade de elevação manifesta-se sob forma de manchas nas paredes, de modo diferenciado ao longo do tempo e de zona a zona. Este comportamento demonstra heterogeneidade dos materiais constituintes da alvenaria e, em particular, variações locais de porosidade. Este tipo de umidade é a mais frequente nos velhos edifícios, pois no passado as fundações enterradas eram raramente protegidas da elevação capilar da água contida no solo. A elevação capilar é causa de umidade insidiosa, porque é muito difícil removê-la (BERTOLINI, 2010).

Os materiais de porosidade aberta conduzem a água por capilaridade que é tanto maior quanto menor for a dimensão dos poros. A altura de progressão da umidade ascensional estabiliza quando o fluxo através seção absorvente é igual a evaporação total da parede, isto é, a quantidade de água que entra por absorção vai ser igual à quantidade de água que sai por evaporação. A espessura das paredes também condiciona a altura atingida pela umidade ascensional. Quando se passa de um aumento de espessura de 0,20 m para 1,00 m aumenta significativamente a altura atingida. Os materiais com porosidade fechada são interessantes para utilização em locais onde ocorre a umidade ascendente pois constituem uma barreira hídrica (FREITAS *et al.*, 2008). Ainda, segundo o autor, a água proveniente do solo pode provocar a degradação de paredes e pavimentos. A grande maioria dos materiais de construção possuem uma estrutura porosa que conduz a uma capilaridade elevada, fazendo com que a água possa migrar, por ascensão capilar, na ausência de qualquer barreira que iniba este deslocamento. Existem

basicamente duas fontes de alimentação de água: águas freáticas e águas superficiais.

Nos casos em que a umidade é proveniente de águas do lençol freático as manifestações de umidade ascendente apresentam-se mais estáveis ao longo do ano, em função do tipo de fonte de alimentação estar em atividade ao longo de todo o ano. A altura das manchas de umidade é maior nas paredes internas do que nas externas pelo fato das condições de evaporações serem menos favoráveis, na grande maioria dos casos por falta de ventilação dos ambientes (BERTOLINI, 2010).

Quando a umidade é proveniente de águas superficiais o nível que a umidade ascendente atinge apresenta variações durante o ano. A altura das manchas de umidade pode variar de parede para parede, sendo que neste caso o nível mais elevado atinge as paredes exteriores. A presença de sais também é outro fator importante a ser considerado pois provoca o aumento do nível da umidade ascendente (BERTOLINI, 2010).

A **umidade descendente** tem origem na água pluvial, que pode ser provocada por uma ação direta da água seguida de infiltrações devido a fissurações do reboco ou defeitos e erros de projeto de cobertura ou beirais.

A **umidade por fuga nas canalizações** é provocada por defeitos de construção ou de funcionamento de determinados equipamentos e/ou instalações. A detecção deste tipo de anomalia torna-se relativamente complexa uma vez que, muitas vezes, ocorrem manifestações em locais distintos da sua origem, atendendo ao fato de haver migrações de água no interior dos diversos elementos da construção.

A **umidade por infiltrações** resulta da absorção de água por capilaridade pelas estruturas porosas ou pela percolação através de zonas fissuradas. As infiltrações ocorrem em função das deficiências de concepção (projeto), execução ou falta de manutenção, entre as manifestações patológicas mais comuns podemos citar, fissuras, deterioração dos revestimentos, deficiência da fixação das caixilharias com a fachada, utilização de materiais com coeficientes de absorção de água muito elevados, etc. Deve ser levado em conta também que a pressão do vento faz com que a trajetória da água apresente uma

componente horizontal e atinja em zonas mais expostas, pressões de 2500 N/m² (FREITAS *et al.*, 2008).

Para diminuir o efeito da umidade nas paredes dos prédios históricos algumas providências devem ser tomadas, sendo indicado:

- Isolamento da fundação (umidade ascendente);
- Proteção contra vazamentos no telhado;
- Aumento da ventilação em paredes internas;
- Controle da umidade ambiental por desumidificadores;

No tocante aos revestimentos antigos são identificados como causas de deterioração: a umidade ascendente do solo e/ou proveniente da chuva; a presença de sais; o desgaste por abrasão eólica; impactos. Como consequência, surge como umas das principais formas de degradação a perda de aderência (separação ou descolamento) que pode ocorrer entre as diferentes camadas de um reboco ou entre o reboco e o substrato.

Em estudos realizados por Pavia (2006) para a dosagem de argamassas para reparos em alvenarias com forte presença de umidade, com foco na seleção de materiais compatíveis com os já existentes, os resultados analíticos e experimentais foram comparados com as teorias de conservação e restauro, a fim de estabelecer os parâmetros necessários de dosagem. O estudo conclui que devido aos ambientes úmidos e ricos em sais, com fluxo permanente de água, com sucessivos episódios de molhagem e secagem, as argamassas para este tipo de alvenaria devem ser hidráulicas. No trabalho, corroborando com o princípio de compatibilidade do teórico pensador do restauro Brandi (2004), o autor relatou que ligantes eminentemente hidráulicos, como o cimento Portland, não são suficientes para garantir a durabilidade das argamassas e que as argamassas de cal aérea reforçadas com pozolanas são as mais indicadas porque podem durar até 2000 anos.

Pavia (2006) ainda enfatizou que as argamassas de cal são física e quimicamente compatíveis com a maioria das rochas de carbonato e silicato, materiais comumente usados na construção das estruturas de alvenaria. Estas argamassas quando corretamente dosadas e aplicadas, não induzem a lixiviação de cal, ou danos por sais. Por fim o estudo orienta o preparo de argamassas que devem ser permeáveis, elásticas, atuando como um conduto

de umidade nas paredes, preservando assim a alvenaria dos danos produzidos pela umidade e sais.

2.2.1.2 Manifestações patológicas devido à presença de sais solúveis

Outro fator muito importante para a degradação de revestimentos antigos é a presença de sais, no entanto, o combate aos sais solúveis exige normalmente intervenções contra a água. Devido a higroscopicidade dos sais solúveis, quanto maior a presença destes, maior será o teor de umidade da parede (VEIGA, 2006).

De acordo com DIAS *et al.* (1998), as manifestações patológicas provocadas pelos sais solúveis ocorrem porque estes são passíveis de serem transportados com o movimento da água nas construções e, também porque a a hidratação dos sais, que provoca um aumento de volume, devido à incorporação de água as redes cristalinas. Em algum ponto da parede úmida existe um equilíbrio entre a umidade que entra e a que evapora. Ao evaporar a água é retirado do sal provocando a sua cristalização e pressões tais que resultam na desagregação da alvenaria e das argamassas de rejunte. Segundo os autores, no interior das paredes dos edifícios existem diversos sais solúveis em água, contidos nos materiais de construção ou provenientes do solo; estes sais dissolvidos são transportados para a superfície das paredes onde cristalizam sob a forma de fluorescências ou de criptoefluorescências, sendo que a primeira ocorre com a cristalização na superfície da parede e a segunda entre o substrato e o revestimento, respectivamente.

Com relação ao íon cloreto, objeto de análise nessa tese, o estudo de Magalhães *et al.* (2011) mostrou que estes podem estar presentes na superfície do material após terem sido transportados pela atmosfera carregada de sal marinho ou em contato com água contendo cloretos. A cristalização de sais destes íons ocorre com desenvolvimento de pressões de dilatação (expansão) e consequente degradação. É bastante comum encontrar nas argamassas os cloretos de sódio, de potássio, de cálcio ou de magnésio que em geral são bastante solúveis. Os autores ainda concluíram que outro sal que, também, pode estar presente em argamassas é o íon sulfato que, devido a sua interação com os compostos de cálcio da cal, dá origem ao gesso.

Para Magalhães *et al.* (2011), em ambiente urbano, devido à presença de gases poluentes de enxofre, é usual a ocorrência de incrustações negras no gesso cristalizado na superfície dos revestimentos e que, por outro lado, se a cristalização do gesso se der nos poros, o incremento de volume pode dar origem a fendilhação, escamação e ruptura da argamassa. Além do gesso, os sulfatos alcalinos tenardita (sulfato de sódio, Na_2SO_4) e a arcanita (sulfato de potássio, K_2SO_4) são compostos usuais nas argamassas antigas e são considerados extremamente nocivos porque podem sofrer várias fases sucessivas de cristalização, com conseqüente expansão e risco de erosão dos revestimentos. Os sulfatos de magnésio, epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), hexahidrite ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), kieserite ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), também, são compostos de ação bastante perigosa pois tem efeito erosivo ao cristalizar.

Em recente trabalho feito por Feijó *et al.* (2021), os pesquisadores realizaram uma comparação entre os danos causados por sais solúveis (cloreto de sódio, NaCl) na durabilidade de argamassas de cal com e sem adições de ferrocianeto de potássio $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ em sua composição. Os resultados mostraram que o uso de ferrocianeto de potássio desenvolveu uma melhor proteção durante o processo de cura, dificultando a entrada de sais já durante a secagem. Também, houve melhora no processo de carbonatação da argamassa e aderência ao substrato, sem causar danos estéticos aos materiais, desenvolvendo uma capacidade protetora contra a ação do cloreto de sódio, o que permite considerar este tratamento não apenas como um tratamento de choque, mas, também, como medida preventiva.

Complementando os agentes salinos identificados em argamassas, tem-se os íons nitratos que, em geral, tem origem no solo ou são o resultado da transformação das substâncias orgânicas secretadas por organismos ou microrganismos. Os nitratos mais correntes em argamassas são o nitrocalcite $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, nitromagnesite $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, nitratite $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, nitramite $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, que dão origem a eflorescências espessas fáceis de remover (SANTOS SILVA *et al.*, 2009).

A partir do surgimento de uma manifestação patologia específica (eflorescências/criptoeflorescências) outras surgirão por efeitos em cadeia, descamação, disgregações, desagregações, tumefações, fissuração (AGUIAR *et al.*, 2001).

Em especial, no caso das eflorescências e criptoeflorescências a água é, sem dúvida, o principal agente causador, visto que as umidades infiltradas nas paredes procuram e encontram pontos mais fracos (fendas e vazios) criando uma rede de percursos preferenciais no interior dos elementos, normalmente, através das juntas de argamassa entre pedras e tijolos. Por outro lado, a água que sobe por capilaridade, até alguns metros de altura, vai dissolvendo ao longo do seu trajeto os sais solúveis, provenientes do solo, das argamassas ou dos demais componentes da alvenaria, alterando a estrutura que compõe a parede, que vai ficando cada vez mais contaminada com sais dissolvidos (PINHO, 2000).

Quando as anomalias ocorrem de forma simultânea (uma ou mais), podem dificultar substancialmente o processo de diagnóstico numa situação real e, em certas circunstâncias torná-lo até inviável, como é o caso de existência de umidade de construção associada a qualquer outra forma de manifestação de umidade. Nesta situação, apenas a primeira daquelas anomalias (umidade de construção) poderá ser detectada, na medida em que seus sintomas ocultarão os das restantes (BERTOLINI, 2010).

Por fim, de extrema importância para essa tese, temos as manifestações patológicas nos revestimentos antigos em edificações inseridas em ambientes de atmosfera marinha. A agressividade desse meio está relacionada a ações físicas e químicas de salinização que atuam sobre as estruturas, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas e da retração hidráulica. O fenômeno conhecido como aerossol marinho contém grandes quantidades de íons cloretos e sulfatos, sendo assim muito agressivo aos revestimentos de argamassa. A presença dessas manifestações gera danos pelo excesso de umidade, de absorção e de evaporação cíclica por capilaridade, que reduzem a vida útil dos revestimentos e paredes das edificações (MEIRA, 2004).

Considerando o exposto acima e que no Brasil existem inúmeras edificações antigas em zona de atmosfera marinha que correm grande risco de deterioração, como foi o caso do revestimento do prédio da Catedral de São Pedro, percebe-se a importância de estudos para a obtenção de materiais e produtos para a restauração desses elementos arquitetônicos que representam a cultura de nosso país, principalmente aqueles que buscam o emprego de matérias-primas nacionais,

2.2.2 Restauro de revestimentos antigos

Os revestimentos antigos tinham funções basicamente semelhantes aos atuais, mas os requisitos necessários para cumpri-las eram significativamente diferentes, devido ao modo de funcionamento das paredes, dos materiais usados na execução das argamassas e dos elementos restantes da construção terem também características distintas. As paredes eram mais espessas, mais porosas e mais deformáveis que as atuais. Nelas a água penetrava mais facilmente, por ascensão capilar, através das fundações e, geralmente, não tinham cortes de capilaridade. A estanqueidade não era garantida, nem mesmo através do revestimento que devido a presença de materiais permeáveis ao vapor de água, tinha a função de rapidamente expulsar por evaporação a água absorvida (VEIGA, 2002).

Os materiais e métodos empregados para a conservação e o restauro de revestimentos antigos variam conforme o tipo de deterioração. Em qualquer trabalho de restauro é necessária uma análise prévia e criteriosa do estado de conservação do revestimento e deve-se respeitar o seu funcionamento original, deve haver compatibilidade entre os novos materiais utilizados e os antigos pois, caso contrário, podem surgir novas patologias, até mais graves que as inicialmente encontradas (VEIGA, 2003).

Conforme Arendt, (1995) os novos revestimentos utilizados para a conservação e o restauro de revestimentos antigos devem apresentar como características básicas:

- Elevada permissividade de dentro para fora;
- Porosidade fechada;
- Mínima absorção por capilaridade possível;
- Módulo de elasticidade e resistência deve ser menor que o do substrato;
- Acabamento final (pintura) a base de cal ou silicatos.

A restauração de edifícios históricos envolve, também, a tomada de decisão entre reparar ou substituir as argamassas. Ambos os processos de ação

e as questões que surgem são tratadas, a fim de definir e ilustrar melhor os requisitos técnicos para a escolha das argamassas a serem utilizadas para reparo ou substituição em monumentos e edifícios históricos (argamassas de alvenarias, rebocos). Os profissionais envolvidos nestas intervenções, em suas decisões devem levar em consideração, além dos requisitos técnicos, a estética da restauração e a durabilidade dos materiais (HEES, 2012).

De acordo com Groot (2012), os aspectos de durabilidade predominam em muitos casos para edifícios históricos, a decisão correta de uso depende da determinação das necessidades e dos requisitos funcionais para cada caso particular. Questões de conservação, autenticidade, compatibilidade histórica, estética, textura, densidade e cor.

Conforme Arendt (1995), quando se deseja executar trabalhos de restauração em revestimentos de prédios históricos, deve-se ter em mente a ideia de que os rebocos atuais não resolvem os problemas causados pela salinização. Diversas manifestações patológicas podem ocorrer devido à migração dos sais e sua posterior cristalização. Para resolver estes problemas deve-se fazer uma prospecção de toda alvenaria, com o objetivo de:

- Conhecer os mecanismos de ação dos sais;
- Identificar os tipos de sais, sua concentração e ocorrência;
- E, por fim, projetar um reboco especial de saneamento.

Onde há presença de sais e umidade e através de absorção e evaporação cíclicas, por capilaridade, a cristalização do sal degrada lentamente o revestimento. Então, pode-se afirmar que a água é o agente causador da degradação, pois, sem umidade não haveria transporte de sais. Por outro lado, com o aumento do teor de sais aumenta o teor de umidade na parede. Torna-se, então, evidente que para o tratamento correto das manifestações patológicas de paredes salinizadas é necessário um combate aos sais e uma barreira permanente contra a umidade (BERTOLINI, 2010).

As deteriorações causadas por alguns tipos de sais nos revestimentos de edifícios antigos são amplas e complexas. A profundidade destes problemas depende de muitos fatores. Alguns deles podem ser citados, tais como: natureza e característica do sal, presença acentuada de umidade, tipo de aglomerante da

argamassa, granulometria dos agregados, formas de contaminação. Além desses, a umidade relativa do ar, a variação térmica, predominância de ventos, orientação solar do edifício, porosidade do material, impermeabilização de fundações, entre outros. No entanto, nem sempre uma solução definitiva é possível. Neste caso, a adoção de processos paliativos pode aumentar a vida útil dos revestimentos, diminuindo, portanto, os custos de manutenção da edificação (NAPPI e LALANE, 2010).

Como solução para os problemas de salinização das alvenarias são utilizadas argamassas de saneamento constituídas de aglomerante (cal aérea e pouco cimento), agregados (areia quartzosa e areia calcária), água e aditivos (pozolanas, incorporadores de ar, hidrofugantes). Em situações de uso de argamassas para reparos a base de cimento que, em geral, causam mais deterioração a estrutura, devido a sua incompatibilidade com os materiais mais antigos, deve-se proteger os materiais originais utilizando-se uma argamassa com baixo consumo de cimento.

Em uma investigação experimental desenvolvida por Hong *et al.* (2014) para avaliar a penetração de cloretos em argamassas para reparos, foram utilizadas como adições a sílica ativa, a zeólita $M_{x/n} [(AlO_2)_x (SiO_2)_y] \cdot mH_2O$, e dispersão de polímero (etileno acetato de vinila – EVA) nas proporções de 0%, 10% e 15% com base nos pesos da mistura e do aglomerante. Os resultados do estudo mostraram que as argamassas de reparo que utilizaram a dispersão polimérica como adição apresentaram concentrações de cloretos mais baixas do que as outras misturas. Em particular, a concentração de cloretos da argamassa que recebeu adição com 15% de dispersão de polímero diminuiu em 95%, provavelmente devido ao aumento de sua porosidade.

Em outro trabalho, Arce *et al.* (2016) submeteram amostras de argamassas fabricadas com calcário e areia quartzosa, contaminadas com cloreto de sódio, sulfato de sódio, sulfato de cálcio, e nitrato de potássio a um ensaio de envelhecimento acelerado. Após a realização do ensaio, grandes quantidades de nitratos solúveis precipitaram na superfície dos materiais. Também ocorreu um notável amarelecimento da superfície, causando um efeito estético desagradável. O estudo conclui que as argamassas produzidas com calcário, sem filossilicatos, foram as que apresentaram maior resistência. Isso mostra boas propriedades mecânicas mas desempenho hídrico ruim. A longo

prazo a argamassa com maior porosidade apresentou melhor comportamento hídrico, mas, resistência mecânica menor.

Na tese desenvolvida por Mattos (2018), a pesquisadora analisou em laboratório a ação de sais de íons cloreto em três tipos de argamassas, sendo uma constituída de areia e cal aérea, e outras duas constituídas de areia, cal hidratada e dois diferentes tamanhos de partículas da pozolana metacaulim. A pozolana foi usada em substituição da cal hidratada e em ambos os traços na quantidade de 10% em peso. Para o ensaio foi utilizado uma solução de cloreto de sódio a 5% e uma câmara de corrosão Salt Spray Cíclico. Os corpos de prova ficaram no interior da câmara expostos a névoa salina por 336 horas. A análise da condição de degradação das argamassas foi feita comparativamente entre corpos de provas curados ao ar livre e corpos de prova curados na câmara de névoa salina. Para a mensuração dos danos, fez-se a determinação da resistência à compressão em corpos de prova com 120, 180 e 365 dias de cura. Os resultados mostraram que para os três tipos de argamassa o efeito da salinização foi danoso, visto que repercutiu em significativa redução de resistência, sendo que esta foi menor na argamassa pura (47,2%) e maior nas argamassas com os metacaulim (superior a 62%). Segundo a autora, a justificativa para a maior perda de resistência mecânica das argamassas com metacaulim esta, provavelmente, na produção de maior quantidade de sal de *Friedel* ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2$) formado pela reação da alumina das pozolanas com os íons cloretos da névoa salina.

Zizková *et al.* (2019) desenvolveram um estudo para a utilização de uma cinza volante, produzida a partir da queima de carvão mineral de central elétrica em Malta, utilizada como aterro em pedreiras desativadas em Benghazi (Líbia). A pesquisa abordou o potencial de uso das cinzas volantes na produção de materiais à base de cimento, em particular argamassas de reparação de revestimentos antigos, sendo esta usada em substituição ao cimento nas quantidades de 100%. O estudo mostrou que devido as propriedades pozolânicas da cinza, as argamassas de reparo melhoraram significativamente o desempenho do material em relação as agressões ambientais, principalmente em ambientes altamente salinizados. Da mesma forma, houve melhora nas propriedades físico-mecânicas devido ao melhor empacotamento da argamassa,

o que foi comprovado através de exame microscópico da microestrutura da argamassa.

2.3 Argamassas de saneamento

Para que um processo de intervenção seja bem-sucedido é preciso que se conheçam as propriedades das argamassas que serão aplicadas, bem como as características do substrato que irão revestir, principalmente quando se utiliza uma argamassa para reboco de recuperação.

No Brasil, ainda, é comum fazerem a recuperação de edificações do patrimônio histórico e cultural, atacados por umidade e salinidade, com argamassas tradicionais que não atendem aos requisitos das argamassas de recuperação. Em função disto, muitos profissionais do restauro se utilizam de produtos e de normas internacionais. A exemplo disto, cita-se o restauro da Catedral de São Pedro que, para a reconstituição dos revestimentos salinizados das paredes do prédio, se utilizou de dados internacionais e do Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (1995) para elaborar e aplicar uma nova argamassa de saneamento na recuperação do reboco. Salienta-se que no período de execução do restauro dos revestimentos o Caderno de Recomendações Alemão estava sendo usado no Brasil no desenvolvimento de várias atividades e pesquisas sobre restauro.

Conforme Arendt (1995), na Alemanha a recuperação de paredes degradadas pela umidade e salinidade com um sistema de revestimento de recuperação com argamassa de saneamento deve apresentar as seguintes propriedades:

- Capacidade de reter a água, em forma líquida, juntamente com os sais;
- Grande permeabilidade ao vapor, permitir uma secagem eficiente, ou seja, ser estanque como a argamassa de cimento e permeável ao vapor d'água como a argamassa de cal.

Deve ser feita uma escolha adequada dos materiais que compõe o sistema de recuperação, para que se obtenham os resultados desejados. Esse critério vale para os aglomerantes, agregados e, também, para os aditivos

hidrofugantes e incorporadores de ar. Utilizando-se esses aditivos, permite-se que a argamassa de saneamento se torne hidrorrepelente, retendo os sais e possibilitando a transposição do vapor d'água devido a sua elevada quantidade de poros. Na Alemanha nas primeiras 24 horas de aplicação da argamassa de saneamento como reboco de recuperação é obrigatória a verificação da quantidade de água absorvida (Arendt, 1995).

A incorporação de poros de ar estáveis na argamassa de saneamento se deve principalmente ao traço da mesma, pois são decisivos os aglomerantes utilizados e a granulometria da areia (Arendt, 1995).

Para os alemães é fundamental que as argamassas de saneamento, também, sejam produzidas em usinas, para garantir a sua uniformidade, e que os materiais utilizados para compor o sistema de revestimento de recuperação devem ser totalmente compatíveis entre si e com o substrato a revestir, a fim de que nenhuma reação provoque qualquer dano ou deterioração que possa afetar o seu desempenho.

Para Bianchini (1999), antes da aplicação de um Sistema de Revestimento em alvenarias contaminadas, deve-se medir o grau de umidade e a quantidade e tipo de sais prejudiciais (sulfatos, cloretos, nitratos) na alvenaria degradada. Após a identificação a argamassa antiga deve ser removida na área umedecida e no mínimo 80 cm acima dessa região. As juntas de assentamento das alvenarias devem ser raspadas até uma profundidade de 2 a 3 cm, de modo que a maior quantidade de sal presente na alvenaria seja retirada (Arendt, 1995). Sempre que possível, a limpeza da parede deve ser executada por meios mecânicos.

Segundo Seelee e Schulze (1998), um reboco de recuperação deve atender às seguintes solicitações básicas:

- Servir de depósito de “instância de evaporação” para a umidade existente na alvenaria e na superfície do reboco;
- Possibilitar a absorção e cristalização dos sais dissolvidos na parede no interior do reboco, sem que este seja danificado no processo.

Para tanto, os aglomerados utilizados nas argamassas de saneamento devem ter tamanhos de partículas que permitam que o reboco fique poroso sem

perder a sua condição estrutural, conforme apresentado na tabela 2, e em quantidades tais que evitem o esfarelamento (quando usado em pouca quantidade) ou o surgimento de trincas durante a cura (quando usado em muita quantidade) (DIAS e CUNHA, 1997).

Tabela 2. Tamanho de partícula do aglomerado das argamassas de saneamento alemãs.

< 2,5 mm	2,5 mm \geq X > a 4,0 mm	\geq 4,0 mm
10 a 20 %	30 a 40%	30 a 40%

Fonte: Dias *et al* (1998)

A distribuição granulométrica do agregado miúdo influencia diretamente no desempenho da argamassa, interferindo na trabalhabilidade e no consumo de água e aglomerantes, no estado fresco; no revestimento acabado, exerce influência na fissuração, na rugosidade, na permeabilidade e na resistência mecânica (ANGELIM *et al.*, 2003).

Como vantagem ao uso das argamassas de saneamento tem-se:

- Secam lentamente, possibilitando utilizar a execução conforme métodos da época;
- O reboco se auto recupera;
- Pela pequena velocidade de solidificação, recupera-se as fissuras que possam ocorrer;
- São permeáveis.

Como desvantagem ao uso das argamassas de saneamento tem-se:

- Menor capacidade de aderência;
- Elevada capacidade de absorver água;
- Baixa resistência nas idades iniciais;
- Formação de capilares durante a secagem;
- Formação de fissuras em situações de secagem rápida;

Para melhorar a aderência da argamassa de saneamento executa-se a escarificação das juntas de assentamento das alvenarias ou aplica-se chapisco em 50% da superfície a ser revestida Como a cura desta argamassa é lenta, é possível recuperar as fissuras iniciais umedecendo a superfície e corrigindo-as

manualmente. Para diminuir a capacidade de absorção de água são utilizados aditivos como incorporador de ar, que propicia o aumento da porosidade e diminui os capilares, e hidrofugantes para repelir a umidade.

Apesar das argamassas de saneamento apresentarem características semelhantes e de seguirem os mesmos princípios de funcionamento é aconselhável que se prepare uma dosagem específica para cada caso de reconstituição, levando em consideração a argamassa original do revestimento. O conhecimento do substrato original indicará parâmetros ligados a finura do aglomerante, tipo e tamanho de partícula do agregado que possibilitarão a obtenção de rebocos de recuperação eficientes.

As argamassas de saneamento produzidas com cal e cimento, devido a este último, são indeformáveis e impermeáveis e, por isto, quando em presença da umidade conduzem a formação e transporte de sais solúveis para o interior das paredes contribuindo para a sua degradação (RECENA, 2014). Para que elas sejam usadas, estudos devem ser feitos para intensificar a permeabilidade do vapor d'água no contato entre a parede e o revestimento.

Na Europa, as argamassas de saneamento são utilizadas há mais de 50 anos e a Alemanha é o país que mais aplica com eficiência rebocos de recuperação na restauração de revestimentos de prédios históricos e na construção civil em geral. As argamassas de saneamento alemãs são produzidas de forma industrializada e apresentam diversos traços para as mais variadas aplicações, sempre mantendo suas características básicas, ou seja, alta porosidade e permeabilidade ao vapor d'água (NAPPI e TONERA, 1997).

2.3.1 Características das argamassas de saneamento estrangeiras

Para um melhor entendimento das diretrizes estabelecidas na elaboração da argamassa utilizada para a recuperação do revestimento na Catedral, a seguir são descritas informações do Caderno de Recomendações Alemão que nortearam a proposta.

De acordo com a Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (1995), a composição básica de um sistema de revestimento de recuperação deve apresentar os seguintes constituintes:

- Aglomerante: cimento Portland com eventual adição de cimento branco;
- Carga: pó de calcário, eventualmente pó de quartzo;
- Inertes: areia quartzosa com granulometria escalonada;
- Agregados leves: pedras pomes, poliestireno expandido ou vidro expandido (perlita);
- Aditivo: metilcelulose (para aumentar a capacidade de retenção de água);
- Aditivo hidrofugante; aproximadamente 2,5% de estearatos de zinco, sódio ou chumbo;
- Aditivo incorporador de ar: 1% da massa de cimento de elementos tensálicos, por exemplo: acrilulfonatos de sódio, sulfonatos alquídicos com ligações de sílico inorgânico.

Segundo o Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (1995), um sistema de reboco de recuperação é composto por chapisco, emboço (reboco Base WTA) e argamassa de saneamento e essas camadas devem possuir as seguintes características:

- Chapisco: constituído por uma mistura fluída de cimento e areia que serve de ponte de aderência mecânica. Segundo a DIN 18550 (1985), o chapisco serve para melhorar a ancoragem mecânica do revestimento e também para regularizar a capacidade de absorção de água pelo substrato para que a cura da argamassa seja uniforme. Quando o chapisco é convencional, é aplicado em toda a superfície da alvenaria, havendo melhor aderência junto ao substrato, mas acarretando dificuldades para que o vapor de água passe da alvenaria para o revestimento, por ser o chapisco compacto nesse caso. Conforme Arendt (1995), as edificações afetadas por umidade e sais deverão ter aplicação de chapisco em 50% da superfície do substrato, de forma reticulada, para que não haja obstrução total da passagem de água. Se as alvenarias forem muito fracas e absorventes pode-se usar cal como aglomerante no chapisco, aplicando uma camada contínua. Essa camada é composta predominantemente de areia grossa de 3 a 5 mm de diâmetro.

- Reboco Base WTA (emboço): aplicado como camada regularizadora do substrato e/ou como depósito de sais do substrato. Conforme Arendt (1995), o reboco base é uma camada de nivelamento, mais barata, utilizada quando a superfície da alvenaria apresentar diferenças de planicidade que exijam camadas de reboco superior a 30 mm de espessura, ou se a alvenaria estiver fortemente contaminada por sais. Essa camada deve ser aplicada após a cura do chapisco, e pode servir também como depósito de sais quando a alvenaria estiver fortemente contaminada, devendo ser compatível com a argamassa de saneamento. Essa camada tem a finalidade de proteger, nas primeiras idades, a argamassa de saneamento da contaminação dos sais presentes.

- Argamassa de saneamento: as mais utilizadas são à base de cal aérea que reage através da carbonatação por dióxido de carbono do ar, propiciando uma maior formação de poros ao longo de seu endurecimento e uma cura lenta que possibilita a recuperação de possíveis fissuras formadas durante a sua aplicação.

2.3.1.1 Trabalhabilidade e consistência

Uma argamassa apresenta boa trabalhabilidade quando adere bem na colher de pedreiro, desliza sem dificuldade e adere bem nas superfícies verticais das paredes. Deve permanecer plástica pelo tempo necessário para os ajustes de alinhamento, prumo e nível das unidades.

Segundo Bianchin (1999), na Alemanha a trabalhabilidade das argamassas dos sistemas de revestimento de recuperação é determinada pela sua consistência. A consistência é a propriedade pela qual a argamassa tende a resistir as deformações que lhe são impostas. Ela pode ser considerada como a fluidez da argamassa e depende do teor da água de amassamento e do teor de ar incorporado. A consistência depende também do tipo e proporção dos aglomerantes e da superfície específica dos materiais empregados. O ensaio para determinação da trabalhabilidade e consistência segue a norma alemã DIN 18555. No ensaio o molde tronco/cônico e o tampo da mesa de consistência são previamente umedecidos. Esse molde deve ficar centralizado sobre o tampo da mesa de consistência e deve ser preenchido em duas camadas, sendo que cada uma deve ser adensada com 10 golpes com o uso de soquete. O excesso da

argamassa deve ser retirado, bem como as partículas do material que se encontram ao redor do molde. Após 30 segundos, o molde é retirado lentamente na vertical e são aplicados 15 golpes em 15 segundos no tampo da mesa de consistência. Imediatamente após o último golpe é feita a medida do espalhamento da argamassa em duas direções ortogonais entre si. Se a diferença entre os dois valores for inferior a 3 cm, a trabalhabilidade é considerada adequada.

No Brasil, conforme Cincotto *et al.* (1995), a trabalhabilidade depende e resulta de várias outras propriedades, tais como a consistência, plasticidade, adesão inicial, tixotropia, retenção e exsudação de água e massa específica. Segundo os autores, à medida que diminui o módulo de finura do agregado, mantendo-se a continuidade da granulometria e, diminui o teor de grãos angulosos, ocorre a melhora na trabalhabilidade da argamassa. O uso da cal, por exemplo, favorece a trabalhabilidade, enquanto os cimentos que possuem maior finura podem resultar em argamassas com maior trabalhabilidade e maior retenção de água.

Para a definição da trabalhabilidade utiliza-se a NBR 13276 (ABNT, 1995). Para a definição da consistência utiliza-se a NBR 13276 (ABNT, 1995), que determina como índice padrão das argamassas de revestimento o valor de 255 ± 10 mm, medida obtida após 30 golpes aplicados na mesa de consistência em 30 segundos sobre a qual está o molde tronco/cônico centralizado sobre um tampo da mesa.

2.3.1.2 Plasticidade

Assim como a consistência, a plasticidade é a propriedade que melhor expressa a trabalhabilidade de uma argamassa. A plasticidade é definida como a propriedade pela qual a argamassa tende a manter sua deformação, sem se romper, após a redução do esforço que a originou. Depende da natureza e do teor dos aglomerantes, do teor de ar, além do vigor que foi utilizado para realizar a sua mistura.

De acordo com Cincotto *et al.* (1995), vários fatores influenciam estas propriedades entre eles: relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante.

O Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91(1995), estabelece a consistência de 2 ± 5 mm, orientando-se pela norma alemã DIN 18555, medida obtida após 15 golpes em 15 segundos aplicados na mesa de consistência, sobre a qual está o molde tronco/cônico centralizado sobre o tampo da mesa. Segundo Bianchin, (1999), este valor não pode ser tomado como referência, porque no Brasil a aplicação é manual e na Alemanha é mecânica. No Brasil, a plasticidade é determinada pela NBR 13276 (ABNT, 1995).

2.3.1.3 Retenção de água

A retenção de água das argamassas no estado fresco é definida pela capacidade da argamassa de manter sua consistência ou trabalhabilidade quando submetida a solicitações que provocam perda de água, como evaporação, absorção pelo substrato ou sucção (CINCOTTO *et al.*, 1995). De acordo com os autores, os aglomerantes são os principais responsáveis pela retenção de água pelas argamassas, devido as suas áreas específicas. Desta maneira, contribui para melhorar a capacidade de retenção de água pela argamassa, a maturação prévia da pasta de cal ou mesmo a maturação da própria argamassa.

O Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (1995), determina que o ensaio para a determinação da retenção de água em argamassas de saneamento obedeça às recomendações da DIN 18555, que determina que sejam feitas medidas da massa de água retida após sucção feita com papéis filtrantes colocados sobre a argamassa por 5 minutos. Esse valor deve ficar acima de 85%. No Brasil, o ensaio é feito pela NBR 13277 (ABNT, 1995).

2.3.1.4 Teor de ar incorporado

De acordo com Mattos (2001), o aditivo incorporador de ar é o principal aditivo utilizado para melhorar a plasticidade das argamassas, da mesma forma que reduz a quantidade de água empregada. A melhora na trabalhabilidade ocorre porque o ar incorporado atua como lubrificante entre os grãos da mistura. Os incorporadores de ar também melhoram a capacidade de adesão inicial das argamassas, mas quando em excesso podem causar resultados insatisfatórios como a redução da aderência da resistência mecânica. Existe um teor ótimo de

aditivo a ser utilizado, a partir do qual as argamassas melhoram suas propriedades.

O Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (1995), determina que a incorporação de ar deve ser medida e que esta deve ser acima de 25% nos rebocos de recuperação. No Brasil, para determinar a incorporação de ar em argamassas frescas, existem dois métodos experimentais: um que utiliza um aparelho de pressão – método pressométrico e outro que utiliza a massa específica do material – método gravimétrico, normatizado pela NBR 13278 (ABNT, 1995).

2.3.1.5 Massa específica

A massa específica e o teor de ar incorporado influenciam diretamente na trabalhabilidade das argamassas (BIANCHIN,1999). Quando a massa específica diminui e aumenta-se o teor de ar incorporado as argamassas se tornam mais leves e mais trabalháveis. Quando a maturação da cal ocorre por pelo menos 24 horas, aumenta o teor de água retido, aumentando a massa específica das argamassas no estado fresco.

O Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (1995), não recomenda o valor da massa específica das argamassas no estado fresco para os rebocos de recuperação. No Brasil, o ensaio é feito pela NBR 13279 (ABNT, 1995).

2.3.1.6 Resistência mecânica

A resistência mecânica das argamassas de revestimento é determinada pela capacidade dessas argamassas de resistir as tensões de tração, compressão ou cisalhamento às quais estão sujeitas (CINCOTTO *et al*, 1995). Essas tensões se originam de solicitações decorrentes de fenômenos térmicos ou climáticos e, também, das condições de exposição das superfícies revestidas.

Conforme Taube *et al* (2003), as características e propriedades dos substratos, podem influenciar na resistência de aderência a tração (que é a principal solicitação de uma argamassa de revestimento) são: a matéria prima utilizada, a porosidade a capacidade de absorção de água e a textura superficial.

Scartezini e Carazek (2003) mostraram a necessidade de conhecer as condições de ancoragem das argamassas ao substrato ao estudarem a

resistência à tração dos revestimentos de recuperação. Em estudos feitos por esses autores com argamassas de revestimento, nas quais utilizaram uma solução de cal na proporção de 1% de hidróxido de cálcio em relação à massa de água, eles chegaram às seguintes conclusões:

- O formato do substrato é o maior responsável pelos diferentes resultados da resistência de aderência, ou seja, quanto maior rugosidade superficial apresentarem, melhor será a aderência.
- Os substratos que apresentam menor rugosidade o seu umedecimento e a aplicação do chapisco é fundamental para melhorar a aderência.

O Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (1995), recomenda apenas que a resistência a compressão para as argamassas de saneamento deve ficar entre 1,5 e 5 MPa. No Brasil a resistência mecânica à compressão das argamassas é determinada pela NBR 13279, (ABNT,1995) e a resistência a aderência é determinada pela ASTM E518.

2.3.1.7 Difusão de vapor

Para Arendt (1995), o coeficiente de difusão de vapor de água indica o grau de dificuldade que este encontra para se difundir no material, comparado com a dificuldade que ele teria para atravessar uma camada de ar estacionária de mesma espessura, com temperatura e pressão totalmente idênticas.

O Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (1995), estabelece um coeficiente resistência à difusão do vapor de água abaixo de 12 para argamassas de saneamento. No Brasil não existe nenhuma normatização.

2.3.1.8 Resistência à passagem dos sais

Segundo Guimarães (1994), a resistência aos sais, em particular ao ataque de sulfatos, está ligada a composição, à natureza dos materiais, a sua resistência ao desgaste superficial e à permeabilidade das argamassas e dos materiais a ela adjacentes.

O Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (1995), estabelece que o ensaio de resistência aos sais, deve seguir as recomendações da norma

alemã DIN 18555. Os corpos de prova ficam em contato com uma solução salina, se a argamassa de saneamento não for atravessada pela solução é considerada aprovada após 10 dias. No Brasil não existe nenhuma normatização.

2.3.2 Pesquisas desenvolvidas com argamassas de saneamento

A seguir apresenta-se em ordem cronológica as principais pesquisas desenvolvidas com argamassas de saneamento em nosso país.

No Brasil poucos estudos são encontrados sobre rebocos de recuperação de alvenarias que apresentam índice elevado de salinidade e umidade, adequados principalmente as áreas litorâneas. Uma das frentes dessa pesquisa refere-se ao desenvolvimento de rebocos de recuperação brasileiros. Similares aos existentes na Europa, estes rebocos terapêuticos buscam neutralizar os danos provocados pelo sal e umidade, permanecendo como rebocos finais de acabamento das alvenarias tratadas, não sendo, portanto, argamassas de sacrifício.

Um dos primeiros estudos sobre argamassas de saneamento integrou um projeto mais amplo iniciado em 1994 no Rio Grande do Sul por iniciativa da 12ª CR/IPHAN/RS e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, no qual foram feitos testes na Catedral de São Pedro em Rio Grande e no Mercado Público de Porto Alegre.

Em abril de 1995, a 11ª CR/IPHAN/SC com a cooperação internacional do Governo da Alemanha, mais especificamente do Institut Für Gebäudeanalyse und Sanierungsplanung – IGS sediado em Munique e do Forschungszentrum Geesthacht – GKSS também da Alemanha, iniciou uma pesquisa, no Quartel da Tropa da Fortaleza de Santa Cruz de Anhatomirim, Florianópolis, SC, que reunia as condições técnicas, geográficas e climáticas ideais para o desenvolvimento desta, dispondo de várias superfícies livres para testes por um período de tempo relativamente longo. Destas superfícies, em três alturas diferentes – 60, 120 e 180 cm – e profundidades variando de 0 a 15 cm, foram retiradas amostras de reboco e argamassa de assentamento, para análise laboratorial. Os resultados destas análises apontaram paredes umidíssimas, com valores entre 15 e 20% de umidade natural e presença de umidade ascendente. Com a presença dos técnicos alemães definiu-se 14 áreas testes de aproximadamente 2 m² e

procedeu-se então a remoção dos rebocos existentes e foram aplicados rebocos de recuperação especiais produzidos na Alemanha, Holanda e, também, no Brasil, que buscaram enfrentar o problema de alvenarias e revestimentos com altos teores de umidade e salinidade. As pinturas minerais, a base de cal e silicatos, complementaram esse sistema (NAPPI e TONERA, 1997 apud TONERA, 2010).

Ao final da década de 90, Bianchin (1999) desenvolveu um estudo sobre uma argamassa de recuperação para alvenarias degradadas por sais e umidade que atendesse as recomendações alemãs (WTA 2-2-91, 1995). Na época, para que se atingisse os objetivos foram utilizados dois traços de argamassa 1:1:6 e 1:2:9, constituídos de cimento: pasta de cal: areia seca, aditivo incorporador de ar em 5 teores (0 - 0,22% - 0,75% - 1,28% e 1,5%) e aditivo hidrofugante, também, em 5 teores (0 - 0,44% - 1,5% - 2,56% e 3%). As argamassas propostas foram analisadas no estado fresco (índice consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água) e no estado endurecido (absorção de água por imersão e capilar, densidade de massa, porosidade, resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, resistência aos sais e coeficiente de resistência à difusão de vapor). Através dos ensaios conclui-se que para todas as propriedades analisadas houve a influência do aditivo incorporador de ar, do aditivo hidrofugante e do traço e que, em quase todas as argamassas, houve a influência de um aditivo sobre o outro, mostrando a interação destas variáveis (incorporador de ar e hidrofugante) entre si. O estudo mostrou que é possível desenvolver uma argamassa que se propõe a dessalinizar edificações contaminadas por sais e umidade utilizando materiais nacionais. Pode-se observar, também, que na maioria dos ensaios das argamassas, tanto no estado fresco como no estado endurecido, ficou nítida a existência de um teor ótimo de aditivos, a partir do qual as propriedades mudam de tendência. No global, o teor ótimo para o aditivo incorporador de ar está em torno de 1% e do aditivo hidrofugante em torno de 2%, confirmando o que ARENDT (1995) recomenda.

Na sequência, destaca-se o estudo comparativo feito por Nappi (2002) sobre a degradação provocada por sais em diferentes tipos de argamassas. Os testes foram feitos com cinco argamassas, normalmente, utilizadas em reboco, sendo estas: I) cal hidratada e areia fina (traço 1:3), II) cimento, cal hidratada e

areia fina (traço 1:2:8), III) argamassa pré-misturada, produzida na Alemanha, de composição desconhecida e utilizada como emboço, nos experimentos da Fortaleza de Santa Cruz, na ilha de Anhatomirim, IV) a argamassa alemã RAJASIL, que obteve o melhor desempenho entre os rebocos aplicados na citada fortaleza e, também, ótimas características técnicas quando aplicada na Catedral de São Pedro, conforme divulgado por Dias e Cunha (1997) e V) uma argamassa confeccionada no Laboratório de Tecnologia do Restauro (LabRestauro) da Universidade Federal de Santa Catarina, sendo o traço composto por 22 gramas de cimento, 88 gramas de cal hidratada, 330 gramas de areia, 90 centímetros cúbicos de poliestireno expandido com diâmetro inferior a 1,2 mm, 1,0 grama de hidroxietil celulose HEC e 2,2 gramas de estearato de cálcio. Com as cinco argamassas foram produzidos corpos de prova cilíndricos (5 x 10) cm, em número de 3 para cada tipo de argamassa, que ficaram armazenados durante 45 dias para que se realizassem as principais reações químicas, e, também, executados emboços em alvenarias. Após a cura, os corpos de prova foram submetidos a uma umidificação com uma solução conjunta de cloreto, nitrato e sulfato, todos de sódio, respectivamente usadas nas quantidades de 35g, 15g e 5g, para cada litro de água, conforme indicação do item 5.3.9 Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (1995).

Passado o período de testes, verificou-se grande deterioração nas argamassas de cal hidratada e areia fina e de cimento, cal hidratada e areia fina (as mais utilizadas na prática em construções convencionais), ocasionados pelos altos níveis de concentração de sal. No entanto, no emboço, onde o nível de concentração foi muito maior, na argamassa alemã não houve qualquer dano porque este material é próprio para resistir à ação dos sais higroscópicos. A argamassa alemã RAJASIL também apresentou um bom comportamento. Quanto a argamassa produzida no LabRestauro, observou-se que não houve identificação de degradação o que a colocou no mesmo nível de qualidade da argamassa alemã.

Na sequência do estudo, foram moldados corpos de prova com os mesmos traços utilizados anteriormente, que depois de curados, foram mantidos sob umidificação em solução salina, conforme indicação do item 5.3.9 Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (1995). Os corpos de prova foram protegidos de circulação de ar mais intensa, através de uma caixa de vidro, com

aberturas para o ambiente capazes de permitir variação da umidade do ar e da temperatura. Passados dois anos, a degradação foi novamente avaliada e verificou-se que ocorreu alto grau de deterioração na argamassa alemã, possivelmente, de acordo com Nappi (2002), causada pela presença de microfibras na composição da argamassa, as quais podem ter propiciado uma maior absorção de água e de migração de sais.

Gewehr (2004), seguindo as sugestões feitas por Bianchin (1999) e as orientações do Caderno de Recomendações Alemão (WTA 2-2-91, 1995), analisou as propriedades no estado fresco e endurecido de uma argamassa de cimento, pasta de cal, areia seca, nos traços 1:2:9 sem e com aditivo e 1:1:6 sem e com aditivo. Os percentuais de aditivos utilizados foram 1% de incorporador de ar e 2% de hidrofugante medidos sobre a massa de cimento. As argamassas foram aplicadas na casa do Dr. Annes Dias, localizada na avenida João Pessoa, em Porto Alegre, RS. A aplicação ocorreu sob forma de quatro painéis no tamanho de 50 x 50 cm no porão do prédio histórico, tomando-se o cuidado de remover o reboco existente até a alvenaria, as juntas de assentamento foram raspadas com uma talhadeira até a profundidade de 3 cm e, posteriormente a alvenaria foi escovada. Foi feito um chapisco de cimento:areia, traço 1:3, de forma que cobrisse 50% da área de alvenaria onde seria aplicada, posteriormente, a argamassa de saneamento. O chapisco foi aplicado de forma reticulada, formando uma ponte de aderência entre a alvenaria e a argamassa de saneamento. No painel onde foi aplicada a argamassa convencional, o chapisco foi feito em 100% do substrato, como normalmente ocorre em obras. Os quatro painéis, contendo as argamassas convencionais e as argamassas de saneamento, foram monitorados, avaliando-se o seu desempenho através dos ensaios de salinidade após oito meses após de aplicação no porão da casa. Passado o período de exposição, em todos os traços observou-se a migração de sais do substrato para o revestimento, havendo maior incidência de sulfatos na argamassa do traço 1:2:9 do que no traço 1:2:6S (S=argamassa de saneamento), com os aditivos. Já no traço 1:1:6, sem aditivos, a incidência de sulfatos é menor do que no traço 1:1:6S, com aditivos. Deve-se lembrar que no traço 1:1:6S a incorporação de ar obtida nos ensaios foi de 19%, enquanto no traço 1:2:9S, foi de 14,5%. Para este tempo de oito meses de aplicação do tratamento verifica-se, portanto, que o traço 1:1:6S comportou-se melhor do que

o traço 1:2:9S em termos de maior concentração de sais na sua camada. Uma das causas deste resultado pode ser que a incorporação de ar no traço 1:1:6S foi, maior do que no traço 1:2:9S, há, portanto, maior porcentagem de poros de ar, facilitando a migração e o aprisionamento dos sais no interior da camada.

Posser (2004), também, desenvolveu uma argamassa de reboco de recuperação, utilizando materiais disponíveis no mercado nacional e as prescrições do Caderno de Recomendações Alemão. Para tanto, utilizou proporções de materiais, em massas, variando entre 1:0,1:3,85 e 1:1,1:7,35, sendo que a relação aglomerante/agregado foi fixada em 1:3,5. Este intervalo abrange proporções indicadas por FRÖSSEL (2001), utilizadas pelas indústrias alemãs de argamassas de reboco de recuperação. Foram feitas 26 diferentes proporções de materiais variando a relação cal/cimento entre 1,27 e 1,93, os teores de aditivo incorporador de ar entre 0,3 e 1,0%, aditivo hidrofugante entre 0,4 e 1,2% e aditivo retentor de água entre 0,4 e 1,2%, em massa, em relação a massa de cimento, sendo que estes intervalos compreendem aos teores utilizados pelas indústrias alemãs de argamassas de reboco de recuperação. Foi mantida fixa apenas a relação aglomerante/agregado. Nas argamassas foram analisadas propriedades no estado fresco (índice de consistência, trabalhabilidade, teor de ar incorporado, massa específica e retenção de água) e no estado endurecido (resistência a compressão, resistência a tração na flexão, absorção de água por capilaridade, altura de penetração de água, massa específica, absorção por imersão, porosidade, resistência aos sais e coeficiente de resistência a difusão de vapor). Os resultados obtidos indicaram que a argamassa com o traço 1:0,60:5,60 (cimento Portland pozolânico: cal hidratada: agregado miúdo), sendo o agregado miúdo composto por 94% de areia quartzosa e 6% de agregado leve (vermiculita expandida), e teores de aditivo incorporado de ar de 1,0%, teor de hidrofugante de 1,0% e 0,8% de retentor de água, foi a que apresentou o melhor desempenho, possivelmente, devido a elevada porosidade que foi superior a 40%, podendo ser utilizada como reboco de recuperação para o saneamento de edificações contaminadas por umidade e sais solúveis.

Loureiro (2013) desenvolveu uma pesquisa que teve como principal objetivo a identificação, caracterização e amenização da eflorescência salina, por meio de estudo de caso da alvenaria do transepto direito da Igreja de Santo

Alexandre, situada no centro histórico de Belém, PA. Para isto foram utilizadas técnicas laboratoriais com o intuito de entender as condicionantes favoráveis ao processo de eflorescência salina, os danos provocados aos materiais, os tipos de sais mais atuante e quais materiais seriam mais eficientes para a dessalinização. Os resultados mostraram que duas argamassas apresentaram resultados satisfatórios. Uma argamassa composta por bentonita e areia na proporção de 1:1 incorporou o sódio proveniente da halita (NaCl), principal sal responsável pela degradação por eflorescência salina, e a outra argamassa composta por caulim e areia na proporção 1:1 se mostrou eficaz na retirada do nitrato da alvenaria, sal proveniente de matéria orgânica também responsável pela eflorescência em edifícios históricos.



Figura 8. Imagem atual do prédio da Catedral de São Pedro.
Fonte: Autor, 2020.

O prédio da Catedral foi construído com fundações do tipo sapata corrida, onde foram utilizados tijolos de barro maciços e pedras. As paredes da edificação são de alvenaria com tijolos de barro maciço (em alguns locais assentados com barro e em outros assentados com argamassa a base de cal) revestidas com argamassa a base de cal e pintura com tinta, também, à base de cal. As esquadrias são de madeira pintada com tinta a óleo na cor verde colonial. No interior, as paredes do altar-mor são revestidas de escaiolas que datam de 1901. A portada de entrada possui uma verga em arco abatido talhada em gnaisse (Figura 8), pedra vinda de Portugal. A cobertura é com telhas portuguesas, sendo o telhado construído em duas águas com beirais singelos. O piso interno do nartéx é em ladrilhos hidráulicos e os demais em assoalho de madeira fixado sobre barrotes assentados diretamente no solo.

No ano de 1971, após a criação da Diocese do Rio Grande, os responsáveis pela Catedral preocupados com a integridade do prédio, que já apresentava visíveis danos, iniciaram um trabalho que culminou com o seu restauro no período de 1995 a 1996.

Para a elaboração do projeto de restauro do prédio foi feita uma inspeção preliminar em 1994, sob a orientação de Guimarães, que identificou danos acentuados na cobertura e nos revestimentos, externo e interno, das paredes da

Nártex¹: Termo arquitetônico, refere-se, em sentido lato, à zona de entrada de um templo, também outras designações podem surgir associadas a este termo, como pronaos, átrio, vestíbulo, galile ou paraíso.

Catedral. Dentre os danos, os revestimentos eram os que apresentavam sinais de deterioração avançada.

Para o conhecimento das condições ambientais do interior da edificação, na inspeção preliminar utilizou-se um termo-higrômetro (Figura 9) para medir a umidade relativa do ar e a temperatura no interior do prédio no período compreendido entre 15 de abril a 05 de julho de 1994. As principais observações registradas foram:

- Umidade relativa do ar, variando entre 72% e 100%, sendo que entre 64 observações, somente 11 foram de umidade abaixo de 80%;
- Temperatura com variação entre 28°C e 8°C, sendo que as maiores temperaturas ocorreram no período de 15 de Abril e 15 de Maio (média 20°C) e as menores ocorreram no período de 16 de Maio a 05 de Julho (variando estas entre 8°C e 15°C).



Figura 9. Medição com um termo-higrômetro das condições ambientais no interior da Catedral de São Pedro.
Fonte: Autor, 1994.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a edificação possuía uma elevada inércia térmica, fenômeno bastante característico para as construções da época, principalmente, em função da grande espessura das paredes e da pequena dimensão das aberturas, que dificultavam a troca de temperatura entre o interior e exterior e a ventilação da edificação, respectivamente. Esta última constatação permitiu compreender a importância que pode assumir o excesso de vapor de água nas edificações.

O excesso de umidade no interior das edificações ou é transportado para o exterior quer através da renovação do ar interior quer atravessando as paredes exteriores por difusão, ou condensa-se nos paramentos internos da envolvente exterior dos edifícios, primeiramente nas partes envidraçadas e, numa fase posterior, nas partes opacas. Em geral considera-se que, se não ocorrerem condensações superficiais, 95% da umidade produzida é evacuada através da renovação do ar e os restantes 5% atravessam as paredes exteriores por difusão podendo eventualmente provocar condensações no interior dessas paredes HENRIQUES, (1992).

Na sequência, fez-se uma inspeção visual nos revestimentos das paredes que revelou a ocorrência de umidade acentuada e disseminada. Esta análise propiciou a definição dos locais nos quais foram feitas prospecções para a retirada de amostras da argamassa do revestimento, que foram analisadas em laboratório. As amostras foram extraídas com uma broca de 12,5 mm e com três profundidades, considerando os intervalos de 0 a 2 cm, de 2 a 5 cm e de 5 a 10 cm. Também, foram extraídas amostras do conjunto argamassa-tijolo, utilizando-se de uma serra copo com 60 cm de diâmetro, com profundidades variando de 5 a 7 cm de comprimento. A figura 10 mostra o início das prospecções que ocorreram nas paredes no interior da Catedral.



Figura 10. Retirada de amostras da argamassa do revestimento no interior da Catedral de São Pedro.

Fonte: Autor, 1994.

No total foram coletadas 18 amostras, como se pode observar na tabela 3, que apresenta os resultados dos ensaios químicos, realizados no laboratório de química da Fundação Universidade de Rio Grande (FURG) para a determinação dos teores de sais solúveis.

Tabela 3 - Caracterização dos sais presentes nas paredes da Catedral de São Pedro, RS.

Amostra				Sal					
Número	Altura (m)	Prof. (cm)	Local/Material	Semiquantitativo (peso%)					
				Cloreto		Nitrato - R		Sulfatos	
1KB	1,30	-	Catedral	-	-	-	-	-	-
2 SP	1,80	0 a 2	Catedral	0,39	3	0,0265	1	0,226	2
3 SP	1,80	2 a 5	Catedral	0,18	3	0,0309	1	0,199	2
4 SP	1,80	5 a 15	Catedral	0,24	3	0,0298	1	0,249	3
5 SP	2,30	0 a 2	Catedral	-	-	-	-	-	-
6 SP	2,30	2 a 5	Catedral	-	-	-	-	-	-
7 SP	1,00	5 a 10	Catedral	-	-	-	-	-	-
8 KB	1,40	-	Confissões - Catedral	-	-	-	-	-	-
9 SP	1,40	0 a 2	Confissões - Catedral	0,32	3	0,3318	3	0,449	3
10 SP	1,40	2 a 5	Confissões - Catedral	-	-	-	-	-	-
11 SP	1,40	5 a 10	Confissões - Catedral	-	-	-	-	-	-
12 SP	1,80	0 a 2	Confissões - Catedral	-	-	-	-	-	-
13 SP	1,80	2 a 5	Confissões - Catedral	0,50	3	0,0318	1	0,099	2
14 SP	1,80	5 a 10	Confissões - Catedral	-	-	-	-	-	-
15 SP	1,40	2 a 5	Parede externa - Catedral	0,18	3	0,0265	1	1,860	3
16 SP	1,40	5 a 10	Parede externa - Catedral	0,16	3	0,0354	1	0,247	3
17 KP	-	-	Coro - Catedral	-	-	-	-	-	-
18 SP	1,00	0 a 2	Coro - Catedral	0,42	3	0,0352	1	1,535	3

Tipo de Corpo de Prova	Peso % Cloreto	Peso % Nitrato	Peso % Sulfatos	Escala Valores
EC=(KB) - Corpo de Prova	0,000 - 0,004	0,000 - 0,016	0,000 - 0,024	0 - min.
Extraído (cilindro)	0,004 - 0,030	0,016 - 0,050	0,024 - 0,077	1 - pouco
PB=(SP) - Perfuração com Broca	0,030 - 0,090	0,050 - 0,160	0,077 - 0,240	2 - médio
AS=(OP) - Amostra Superficial	0,090 - 0,280	0,160 - 0,500	0,240 - 0,710	3 - alto
S=(B) - Amostra de Solo				

Fonte: Dias *et al.* (1997), *adaptado de Arendt (1995).

3.1 Diagnóstico preliminar sobre o revestimento das paredes da Catedral

As informações obtidas no estudo inicial propiciaram a elaboração de um diagnóstico preliminar, a seguir apresentado, que norteou a elaboração da solução para os danos no revestimento.

: A análise visual das paredes definiu que a umidade nos revestimentos tinha como origem:

- Umidade ascendente, devido o contato das paredes com o lençol freático;

- Umidade de precipitação, causada por infiltrações na cobertura;
- Umidade higroscópica, geralmente causada por falhas no sistema de drenagem pluvial;
- Umidade por fuga nas canalizações;
- Umidade de condensação, provocada pela umidade ambiente e a precária ventilação (alta inércia térmica).

Na análise laboratorial das amostras dos revestimentos foi identificada elevada concentração de sais de cloreto, nitrato e sulfato, sendo os íons cloretos os de maior quantidade, com índice 3 (ou seja, cloreto acima de 0,16% em relação a massa do material), conforme dados extraídos da tabela 3 de Dias *et al* (1997), adaptado de Arendt (1995), que mostra o grau de sobrecarga dos principais sais higroscópicos. Conforme os autores, muitas construções antigas foram construídas com areia do mar e em muitas delas eram adicionados sais durante o processo de construção, principalmente nas argilas, onde se acreditava em um aumento de sua resistência, e, ainda, utilizava-se sal de cozinha como plastificante nas pinturas a base de cal. Ainda, segundo os referidos autores, os sais de cloretos presentes nos revestimentos eram decorrentes do ambiente marinho da cidade do Rio Grande, da presença de lençol freático superficial e dos compostos dos próprios materiais (areia, tijolos e da água) utilizados na construção da Catedral. Já os sulfatos tinham origem na matéria-prima, as argilas, ou no processo de fabricação dos tijolos, visto que durante a queima usava-se combustível a base de enxofre. E, os nitratos procedentes dos próprios materiais de construção, de outros materiais em contato com estes, oriundos do terreno, geralmente de substâncias orgânicas, ou da atmosfera, principalmente de ambientes marinhos.

Em função das conclusões acima e devido a inexistência de registros sobre a composição da argamassa utilizada no revestimento original, definiu-se que os revestimentos existentes não apresentavam condições de reparo, que deveriam ser totalmente substituídos e que testes com diferentes tipos de argamassas de saneamento deveriam ser feitos.

3.2 Ações para a reconstituição da argamassa do revestimento

A partir das considerações do diagnóstico preliminar, foram pesquisados diferentes tipos de argamassas de saneamento estrangeiras. Dentre estas, as escolhidas para testes de reconstituição do revestimento foram a holandesa da marca BremerMuschelkalk e as alemãs das marcas Bayosan Selfpor (SP-64), Rajasil, Salfpor-Spezialsanierputz, Bayosan ReinkalkSanierputz e Sanierputz-Jahn. E, por não existir no Brasil argamassa de saneamento comercial, foram utilizadas duas argamassas propostas pelas empresas Serrana S.A de Caxias do Sul, RS, e Dagoberto Barcellos S. A. de Caçapava do Sul, RS, elaboradas com composições de traços diferentes feitos de acordo com dosagens propostas pelo Dr. Claus Arendt do SGI.

As argamassas nacionais foram elaboradas com cal dolomítica hidratada, cinza de carvão mineral (fly-ash), cimento, areia calcária, areia quartzosa e os aditivos incorporador ar e hidrofugante. O emprego da pozolana cinza de carvão mineral (*fly ash*) teve por objetivo a redução de capilares derivados da presença do cimento e a, conseqüente, diminuição da cristalização dos sais na superfície do reboco.

O cimento utilizado foi o portland pozolânico CP IV-32, a cal dolomítica hidratada foi a CH-I e a cinza de carvão mineral foi fornecida pela empresa Dagoberto Barcellos S. A. As areia quartzosa foi proveniente da região de Pelotas e a calcária da região de Caçapava do Sul.

Os testes de qualidade das argamassas foram realizados nas paredes da Catedral identificadas visualmente com maior presença de umidade. As argamassas estrangeiras e brasileiras foram aplicadas de modo semelhante, sendo feito a aplicação em três camadas com o emprego de ferramentas exclusivamente de madeira (régua, desempenadeiras).

Nas paredes escolhidas para os testes com as argamassas foram demarcados quadros com área de cerca de dois metros quadrados (Figura 15), nos quais retirou-se todo reboco original e a argamassa de assentamento e rejuntamento dos tijolos foi escarificada até atingir-se 2 cm de profundidade. Na seqüência, escovou-se o local, molhou-se a superfície e aplicou-se um chapisco importado da marca Saniervorspritz-Bayosan para as argamassas estrangeiras e um outro de cimento e areia (traço 1:3), normatizado pela NBR 13276:1990,

para as argamassas nacionais. Após, preparou-se as argamassas de saneamento com as quantidades de água requerida para a sua plasticidade, fez-se a aplicação nos quadros e aguardou-se o tempo de cura de 30 dias.

Concomitantemente aos testes nas paredes da Catedral, no Laboratório de Materiais de Construção Civil da FURG foram moldados corpos de prova cilíndricos com as argamassas utilizadas, conforme a NBR 7215:1990. Os corpos de prova foram ensaiados para a determinação da absorção de água por imersão (NBR 15259:1990), índice de vazios (NBR 13278:1990) e massa específica (NBR 13280:1990). Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades físicas das argamassas de saneamento testadas.

Argamassas	Absorção d'água por imersão (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)
RAJASIL – 5B	13,13	20,17	1,93	1,74	1,54
RAJASIL – 5A	33,16	38,66	1,90	1,55	1,16
SELFOR – 1A	12,00	18,97	1,95	1,77	1,59
SELFOR – 1B	12,65	20,24	2,00	1,80	1,60
MUSCAFISKALA	11,29	21,20	2,38	2,09	1,87
JHAN-INF	8,42	14,75	2,06	1,91	1,76
JHAN-SUP	22,35	24,13	1,42	1,32	1,08
DAG.BARCEL	12,19	23,99	2,59	2,20	1,96
SERRANA AS	13,28	25,43	2,57	2,16	1,92

Fonte: Adaptado de Dias *et al.* (1997).

Na análise dos resultados da tabela 4, excetuando os traços das argamassas RAJASIL-5A e JHAN-SUP, foi observado que as demais argamassas testadas apresentaram propriedades físicas adequadas a condição de barreira para a migração dos sais, ou seja, apresentaram altos índices de vazios e baixo índice de absorção d'água, condições estas adequadas para uma argamassa de saneamento, na qual se busca a presença de poros fechados capazes de reter sais. Além disto, também, verificou-se que os traços das argamassas nacionais apresentaram resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios próximos aos valores obtidos nos traços das argamassas de saneamento RAJASIL-5B, SELFOR-1A e 1B e MUSCAFISKALA, indicando estarem estas adequadas ao uso como reboco de

recuperação porque atendiam minimamente as exigências das argamassas de saneamento estrangeiras

Passado o tempo de cura (30 dias), na visualização *in loco*, verificou-se que algumas argamassas em teste apresentaram elevada eflorescência, sendo a RAJASIL 5A e a SELFPOR – 1A as que apresentaram as maiores quantidades de sais em sua superfície externa. A justificativa para isto, possivelmente, está nos maiores valores de absorção d'água por imersão (Tabela 4) identificados nessas massas em relação ao índice de vazios, indicando a presença de maior quantidade de poros abertos. Também, foi possível observar que quando a umidade relativa do ar se aproximava de 100% ou em dias chuvosos havia uma redução do nível de sais superficiais, possivelmente, devido a sua dissolução. Com a umidade relativa de 75% começavam a aparecer sais também no reboco original acima dos rebocos aplicados como teste. Parece que as argamassas aplicadas como teste serviram de barreira e o sal aflorou em outro ponto mais propício. Foram observados também que caíram grandes pedaços do reboco original, que continham elevada quantidade de sais, situados acima destas argamassas. Tais fatos, conduziram a decisão de retirar toda a argamassa do revestimento, para evitar que os sais migrassem e provocassem degradação.

3.3 Obtenção e caracterização da nova argamassa de saneamento

A partir dos resultados obtidos nos testes com as argamassas estrangeiras e nacionais e as recomendações do Dr. Claus Arendt do SGI, foi definido que para a reconstituição dos revestimentos das paredes salinizadas da Catedral deveria ser usada uma argamassa nacional, elaborada a partir de ajustes feitos nas duas já testadas. Somou-se as justificativas acima, a possibilidade de obtenção de um produto específico e novo no mercado nacional, feito com matérias-primas regionais e de menor custo, se comparado com as argamassas de saneamento estrangeiras.

A definição da dosagem do traço da nova argamassa partiu do princípio básico da bibliografia internacional que diz respeito a que uma boa argamassa de saneamento constituída de areia com partículas angulosas deve possuir uma relação aglomerante: agregado na proporção de 1:3, ou seja, 25% constituído de aglomerante e 75% de agregados.

Na composição da nova argamassa permaneceram os mesmos materiais usados em testes, ou seja, cal dolomítica hidratada, cinza de carvão mineral (fly-ash), cimento, areia calcária, areia quartzosa e os aditivos incorporador ar e hidrofugante. Na sequência, são descritas as etapas executadas para o ajuste das matérias-primas.

O primeiro passo foi a definição da composição da areia conforme às normas BS 1200, ASTM C – 144 e NBR 7211:1990, que definem a composição granulométrica dos agregados para a composição das argamassas. Para tanto, foram feitos ensaios granulométricos dos dois tipos de areia: a calcária e a quartzosa. As figuras 11 e 12 apresentam a granulometria das areias ensaiadas.

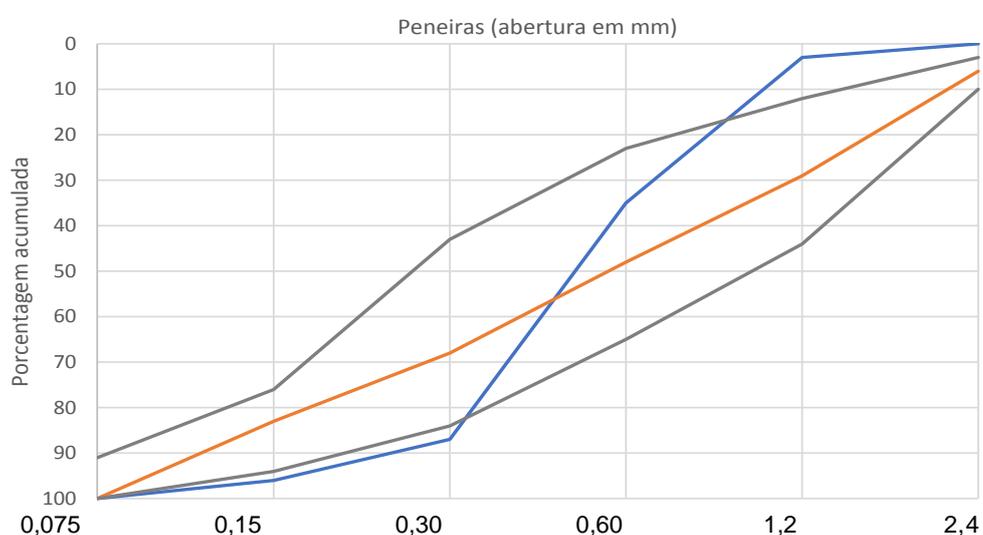


Figura 11. Distribuição granulométrica da areia calcária.
Fonte: Autor, 2020

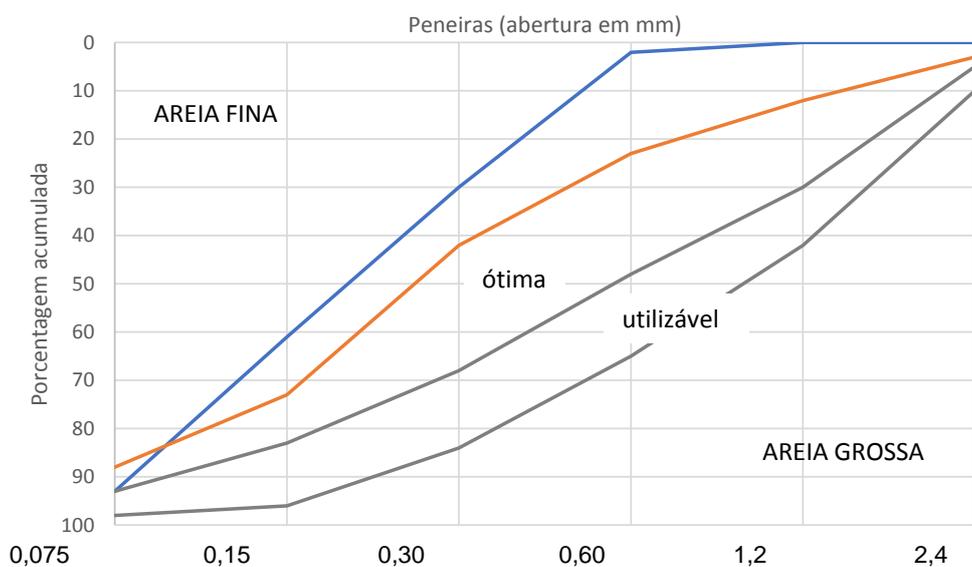


Figura 12. Distribuição granulométrica da areia quartzosa.
Fonte: Autor, 2020.

Com base nos resultados de granulometria das areias, buscou-se a composição de uma areia com características de distribuição granulométrica que proporcionasse à argamassa final uma porosidade adequada para garantir que os sais não cristalizassem na face externa, mas, entre o substrato e o revestimento. Na análise da distribuição granulométrica das areias ensaiadas verificou-se que estas apresentavam grande quantidade de finos ($< 0,3$ mm), o que é altamente prejudicial ao funcionamento de uma argamassa de saneamento. A solução adotada foi a retirada dos finos indesejáveis. Este processo se repetiu até se atingir a granulometria desejada, correspondente à faixa de tamanho de partícula da areia média, que é de 0,2 mm à 0,6 mm. Após, foram realizadas várias composições entre as areias calcária e quartzosa, sendo ao final obtida a composição granulométrica de 50% de areia quartzosa e 25% de areia calcária.

O cimento, a cinza, a cal dolomítica hidratada e os aditivos foram adquiridos dos mesmos fornecedores usados para os testes com as argamassas.

Para evitar a presença de possíveis partículas não hidratadas, durante o processo de fabricação da cal dolomítica hidratada, antes de seu uso, esta foi novamente extinta na obra.

Na composição do novo traço da argamassa os 25% de aglomerante foram compostos com 5% de cimento, 5% do compósito cinza-cal e 15% de cal dolomítica hidratada. Como o compósito cinza-cal possui 75% de cinza e 25% de cal, os 5% da mistura na argamassa correspondeu, respectivamente, a 3,5% de cinza e 1,5% de cal.

No traço, o percentual de cinza de carvão mineral (3,5%) do compósito cinza-cal, que é uma pozolana silicosa com as mesmas características de pega do cimento, foi agregado ao percentual do cimento (5%), resultando em um total de 8,5%. E, o percentual da cal (1,5%) existente no mesmo compósito foi adicionado ao percentual da cal dolomítica hidratada (15%), gerando um total de 16,5%. A tabela 5 apresenta a composição final da nova argamassa.

Tabela 5. Formulação da nova argamassa de saneamento (% em peso).

Aglomerante			Agregado		
Cimento	Cinza-cal		Cal dolomítica hidratada	Areia	
	Cinza	cal		Quartzosa	Calcária
5%	3,5%	1,5%	15%	56,25%	18,75%
8,5%			16,5%	75%	

Para se obter o traço unitário, dividiu-se o percentual do cimento (8,5%) pelos percentuais da cal (16,5%) e do agregado (75%), obtendo-se:

- 1: 1,9: 8,8 (cimento, cal, areia, respectivamente)

No qual, se somado os valores unitários do aglomerante ($1 + 1,9 = 2,9$) e mantido o valor do agregado (8,8) chegou-se a uma proporcionalidade de 3: 9, que ao ser dividida por 3 chegou próximo a recomendação da norma que é 1: 3, indicando que a dosagem proposta estava adequada ao uso como argamassa de saneamento.

Para o preparo da nova argamassa no canteiro de obras foi projetado um misturador especial com eixo vertical. Para tanto, retirou-se o funil de enchimento de uma betoneira, o tambor de mistura passou a funcionar horizontalmente e foram fixadas pás inclinadas na parte superior do tambor. Desta forma o movimento giratório era feito somente pelo tambor. As pás ficaram fixas. Buscou-se similaridade com as argamassadeiras que, devido as suas características, originam uma mistura homogênea e com muito ar incorporado. O tempo de mistura era de no mínimo cinco minutos. A quantidade de água utilizada na mistura correspondia a uma relação de água: aglomerante igual a 1:10.

A mistura das matérias-primas foi feita na seguinte ordem: primeiro as areias quartzosa e calcária, depois o cimento, a cinza-cal e a cal dolomítica hidratada e, por fim, a água misturada com os aditivos incorporador de ar e hidrofugante. Na argamassa usada para a execução do chapisco e do emboço utilizou-se o traço com aditivo incorporador de ar e na usada para o reboco usou-se o traço com aditivo hidrofugante.

Após a mistura, foram moldados doze corpos de prova cilíndricos, conforme a NBR 7215:1990, que foram secos em estufa a temperatura de 100° C por 24 horas e, posteriormente, caracterizados conforme as mesmas propriedades físicas das argamassas testadas na fase de diagnóstico. Outros

vinte e seis corpos de prova cilíndricos, moldados conforme NBR 7215:1990, foram secos ao ar livre pelo tempo de 30 dias e, também, foram caracterizados fisicamente. Os resultados obtidos foram comparados aos de sete diferentes tipos de argamassas de saneamento trazidas da Alemanha. A tabela 6 apresenta a análise comparativa feita entre os valores obtidas com a nova argamassa e o intervalo máximo e mínimo de valores obtidos com argamassas alemãs testadas nas mesmas condições.

Tabela 6 - Propriedades físicas da nova argamassa de saneamento e de parâmetros máximos e mínimos de argamassas de saneamento alemãs.

Argamassa		Absorção d'água p/ imersão (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)	Porosidade (%)
Nova	Seca em estufa	13,80	24,06	2,30	1,99	1,74	24,92
	Seca ao ar	12,54	22,54	2,29	1,99	1,78	22,8
Alemãs		20 – 23	20 - 38	-	1,3 – 1,7	1,1 - 1,5	≥ 40

Fonte: Dias *et al* (1997).

A análise comparativa dos valores obtidos não foi conclusiva em todos os parâmetros. Porém, permitiu ver que para o índice de vazios a nova argamassa de saneamento apresentou valores dentro do intervalo das argamassas industrializadas alemãs e que para a absorção d'água por imersão os valores obtidos foram muito baixos. A justificativa para a baixa absorção, possivelmente, está na presença da cinza de carvão mineral que atuou no refinamento dos poros e na redução da capilaridade da massa.

Os resultados foram tidos como satisfatórios e partiu-se para a aplicação da nova argamassa. Para tanto, sob a orientação dos professores Cláudio Renato Rodrigues Dias e Ronaldo Ortiz Cunha, dos técnicos Celso Luís da Silva Pedreira e Dílson Freitas Simões e do aluno bolsista Luís Claudio de Oliveira, do Departamento de Materiais e Construção da FURG, foram retirados todos os rebocos das alvenarias comprometidas pela umidade e salinidade (Figura 13). Os mesmos profissionais, também, especificaram os procedimentos a serem adotados para a execução dos novos revestimentos.



Figura 133. Parede com presença de umidade ascendente na fachada leste.
Fonte: Autor, 1995.

Durante a remoção dos rebocos, para impedir que os sais contidos nos resíduos do revestimento pudessem contaminar o solo e, também, novamente as paredes se reconduzidos pela umidade ascendente, utilizaram-se lonas plásticas para o seu armazenamento e retirada do local. Após esse procedimento, as juntas de assentamento das paredes foram escarificadas e raspadas até uma profundidade de 2 a 3 cm (Figura 14), deixando os tijolos salientes e significativa rugosidade nas alvenarias.

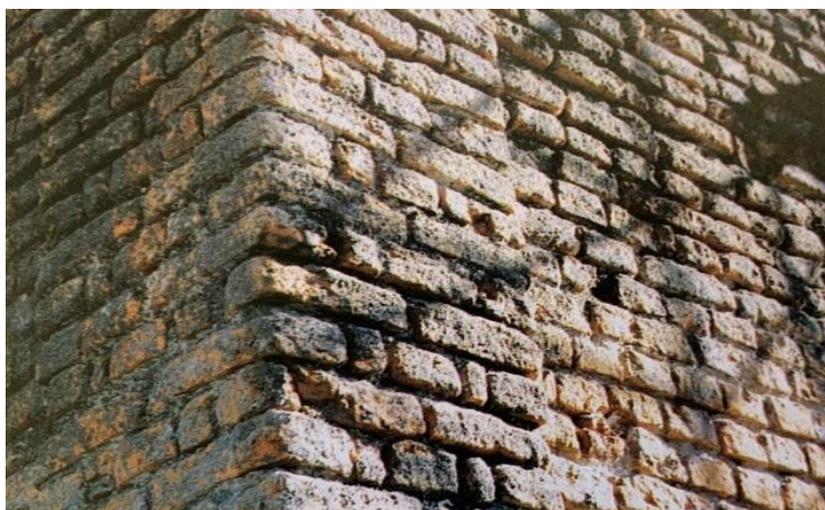


Figura 144. Parede preparada para a aplicação da nova argamassa de saneamento.
Fonte Autor (1995)

Conforme constatado na vistoria preliminar, para evitar futuros danos causados pela umidade ascendente, proveniente das fundações (Figura 15),

antes da execução do novo revestimento, executou-se nas alvenarias um corte hídrico no pé das paredes (Figura 16).



Figura 15. Umidade identificada nas fundações na fase de diagnóstico.
Fonte: Autor, 1995.



Figura 15. Imagem do corte hídrico executado nas alvenarias da Catedral de São Pedro.
Fonte: Autor, 1995.

O corte hídrico é uma barreira química aplicada por difusão executada no pé das paredes a uma altura de 15 cm. Para proceder à introdução e garantir uma boa distribuição do produto químico, executaram-se furos internos e externos nas paredes, afastados cerca de 10 a 20 cm e com uma profundidade de, aproximadamente, $1/3$ da espessura da parede. No caso de se perfurar apenas um dos lados da parede a profundidade era de $2/3$ da espessura. A perfuração foi executada com uma inclinação de 45° , para que o produto ficasse

retido no interior dos maciços até a sua total absorção, regra essencial para a eficiência e estanqueidade da barreira hídrica.

Em função de que a técnica de difusão do produto químico era por gravidade, nos furos foram introduzidas mangueiras plásticas com um funil na sua extremidade, por onde era vertido o produto químico (Figura 16).

Para garantir a eficiência da aplicação da nova argamassa nas paredes, fez-se uma experimentação (Figura 17) para verificar as condições de cura e a espessura das camadas do reboco. Durante a experimentação, verificou-se que era necessário um tempo maior de secagem para as camadas de argamassa aplicadas nas paredes internas e que a espessura final do reboco influenciava no tempo de cura. Em média, necessitava-se de um intervalo de quarenta minutos entre a execução das camadas do reboco nas paredes externas e de uma hora nas paredes internas.

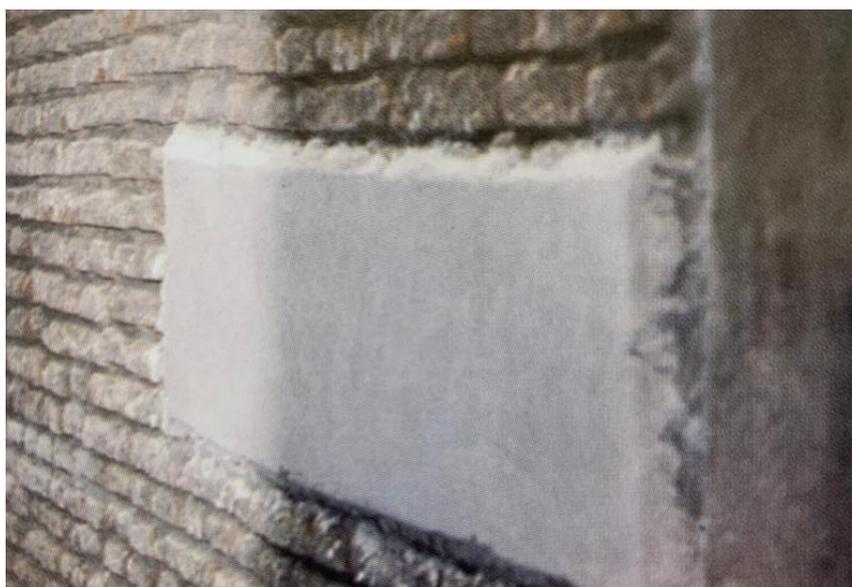


Figura 16. Experimento feito com a nova argamassa de saneamento.
Fonte: Autor, 1995.

Resolvidos os problemas de umidade ascendente e de cura das camadas do reboco, iniciou-se a execução do revestimento. Para a garantia de que a argamassa utilizada manteria as características necessárias, ou seja, para a segurança de que o traço definido fosse realmente seguido, criou-se uma ficha para o controle tecnológico na qual constavam as quantidades de cada matéria-prima para cada traço preparado.

A metodologia de aplicação da nova argamassa seguiu as recomendações dos consultores alemães, que determinaram que durante a aplicação da nova argamassa de saneamento as ferramentas utilizadas (régua e desempenadeira) fossem de madeira, para proporcionarem um acabamento próximo ao original. Além disto, também, foi recomendado que para melhorar a aderência da argamassa ao substrato fosse utilizado um chapisco de cimento e areia grossa com um cobrimento de 50% da área a ser rebocada.

Na sequência, foi indicada que a primeira camada, denominada de reboco de compensação ou primeira camada de recuperação, tivesse uma espessura mínima de 2 cm e que fosse executada sem pressa, respeitando o intervalo de secagem que não podia ser previamente estabelecido, pois o mesmo variava de acordo com as condições ambientais. Já para a segunda e última camada a determinação foi de ter a espessura máxima de 2,5 cm e, também, uma secagem lenta. Caso a última camada apresentasse espessuras maiores, fissuras provenientes da secagem poderiam ocorrer e deveriam ser corrigidas de imediato de forma manual, pressionando-se a argamassa com os dedos. Para evitar a secagem rápida das camadas, aspecto mais vivenciado na execução do revestimento externo, as paredes foram protegidas da incidência direta de raios solares com a utilização de um telheiro feito com chapas de aço e lonas plásticas, que era mantido até duas semanas após o término do reboco. Após a secagem da última camada, esta deveria ser alisada com uma desempenadeira de madeira, tendo o cuidado de não puxar a nata de cimento para a superfície e não interferir na porosidade fechada do reboco. Por último, a superfície do reboco deveria ser feltrada, utilizando a argamassa de saneamento misturada com uma pasta de cal na proporção de 1:1, e pintada com tinta à base de cal.

A figura 18 apresenta uma imagem externa do prédio da Catedral onde se vê os revestimentos restaurados.



Figura 17. Imagem do prédio restaurado da Catedral de São Pedro.
Fonte: Autor, 1996.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atender o objetivo da presente tese, que buscou obter informações sobre a integridade da argamassa de saneamento aplicada nas paredes externas da Catedral, inicialmente, fez uma inspeção visual das fachadas do prédio. O resultado mostrou ser possível atuar somente nas fachadas leste e oeste (Figuras 19 e 20) porque na fachada sul, por questões de tombamento, não foi permitida a retirada de amostras e na fachada norte não existe parede externa porque esta faz divisa com a Capela São Francisco de Assis.

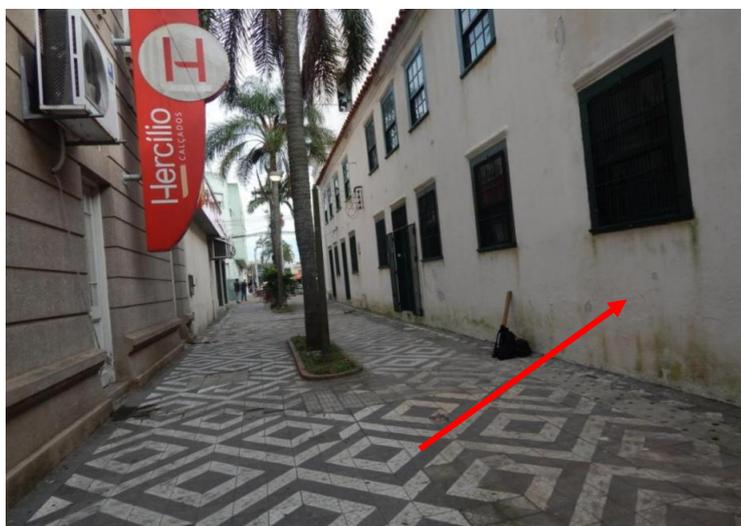


Figura 19. Fachada lateral leste da Catedral de São Pedro.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 18. Fachada lateral oeste da Catedral de São Pedro.
Fonte: Autor, 2018.

Definidas as fachadas de atuação, partiu-se para a análise visual das condições de trabalho, vindo a perceber que devido ao desenvolvimento urbanístico da cidade de Rio Grande, o prédio da Catedral encontra-se confinado entre construções de maior porte (Figura 21) que acabaram provocando sombreamento na maior parte do dia nas fachadas leste e oeste, vindo a acentuar a presença de umidade nas referidas fachadas.



Figura 21. Situação atual do entorno do prédio da Catedral de São Pedro.
Fonte: Google Maps, 2021.

O desenvolvimento desse estudo foi feito com procedimentos mencionados em normas nacionais e internacionais e nas situações de impossibilidade devido a inexistência de normas usou-se métodos devidamente fundamentados em referenciais bibliográficos. A metodologia proposta é a que se aplica em ações de restauro de revestimentos, onde ainda são escassas as informações a respeito da adequação e emprego de uma determinada argamassa para uma condição de serviço específica.

Dando continuidade à pesquisa, partiu-se para a definição das etapas necessárias para o desenvolvimento da parte experimental da tese, as quais encontram-se apresentadas no fluxograma da figura 22.

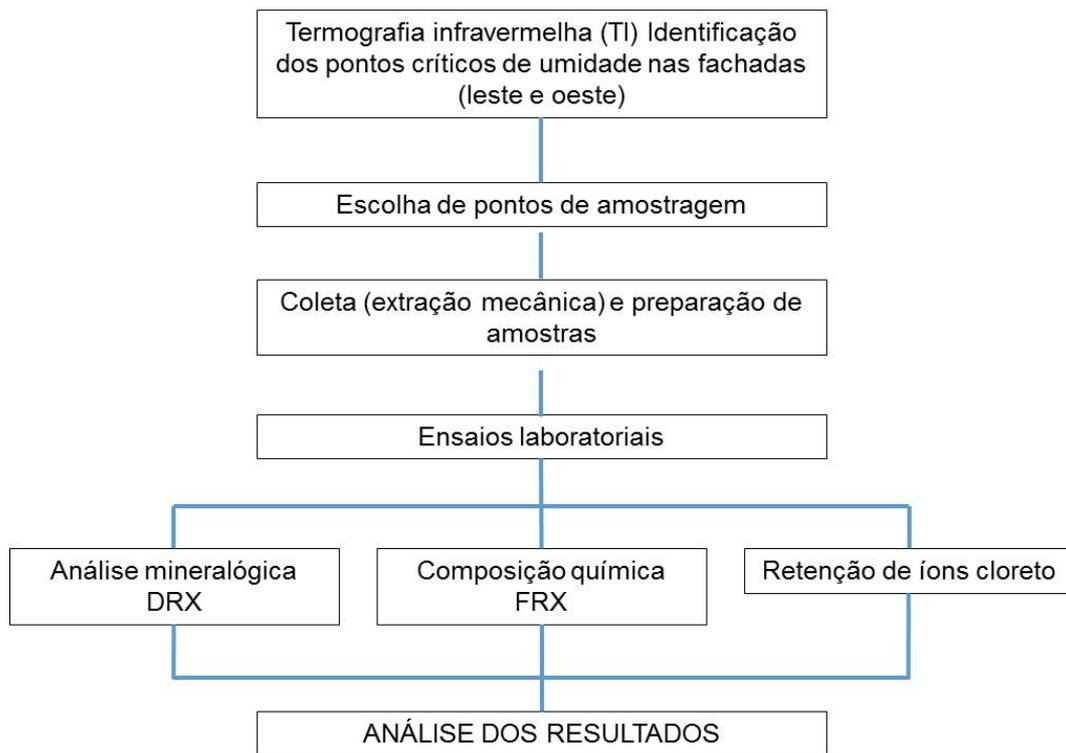


Figura 192. Etapas desenvolvidas na parte experimental da pesquisa.
 Fonte: Autor, 2020.

Para verificar possíveis efeitos danosos provocados pela condição urbana, relacionados a acentuada presença de umidade, foi feita uma análise das fachadas leste e oeste por Termografia Infravermelha (TI) com o emprego de uma câmera termográfica da marca FLUKE – VT04A.

A técnica TI tem tido diversas aplicações na construção civil para a detecção de manifestações patológicas como, por exemplo, em situações de infiltrações ou fugas de água; fendas estruturais; vazios no interior do concreto; corrosão de armaduras; entre outros. (MENDONÇA; AMARAL; CATARINO, 2010).

A avaliação de um sistema da construção civil pela TI parte do princípio de que os materiais que possuem discontinuidades apresentam um fluxo de calor não uniforme. Essas diferenças de fluxo de calor verificadas na superfície dos materiais mostram discrepâncias localizadas que podem ser associadas a anomalias ou discontinuidades no sistema. A identificação de uma variação de 1°C a 2°C com o uso de equipamentos de TI é, geralmente, indício de problemas. A variação de 4°C ou mais indica uma discontinuidade no corpo (CORTIZO, 2007).

A variação de temperatura no equipamento TI é representada por uma sistemática padronizada de cores. As cores mais próximas do violeta representam zonas mais frias e as cores mais próximas do vermelho/branco representam zonas mais quentes. As cores podem variar automaticamente dependendo do diferencial de temperatura dos corpos captados pela lente da câmera (mas nunca deixando de seguir o padrão). Desta forma, para uma mesma temperatura (por exemplo, de 20°C), o equipamento pode representá-la com uma cor azulada, bem como uma esverdeada, tudo dependerá de quais outros pontos estão sendo captados pela câmera naquele momento. As imagens obtidas permitem mapear os gradientes de temperatura e cor nas superfícies analisadas, sendo que as cores mais intensas em tom azul identificam os locais com menor temperatura e maior umidade.

A análise das condições da umidade das fachadas feita por TI vai de encontro aos cuidados cada vez mais necessários que devemos ter com os prédios históricos, tendo em vista que é um ensaio não destrutivo (END) capaz de detectar e caracterizar problemas ocorridos em elementos de construção e elementos estruturais.

As figuras 23 e 24 apresentam imagens fotográficas e termográficas dos pontos críticos de umidade encontrados nas fachadas leste e oeste, respectivamente.

Nas imagens termográficas, pela padronização das cores foi possível identificar a presença de umidade ascendente mais acentuada, em sete locais L1, L2, L3 e L4 e O1, O2 e O3. Outra ocorrência verificada pela cor nas superfícies, tanto nas imagens fotográficas como nas termográficas, foi a presença de umidade no entorno dos peitoris das janelas nos locais L2, L3 e O2, causada, possivelmente, pelo formato dos peitoris que, por não possuírem canais de drenagem, acabam retendo a água da chuva e, desta forma, acentuando a presença de umidade.

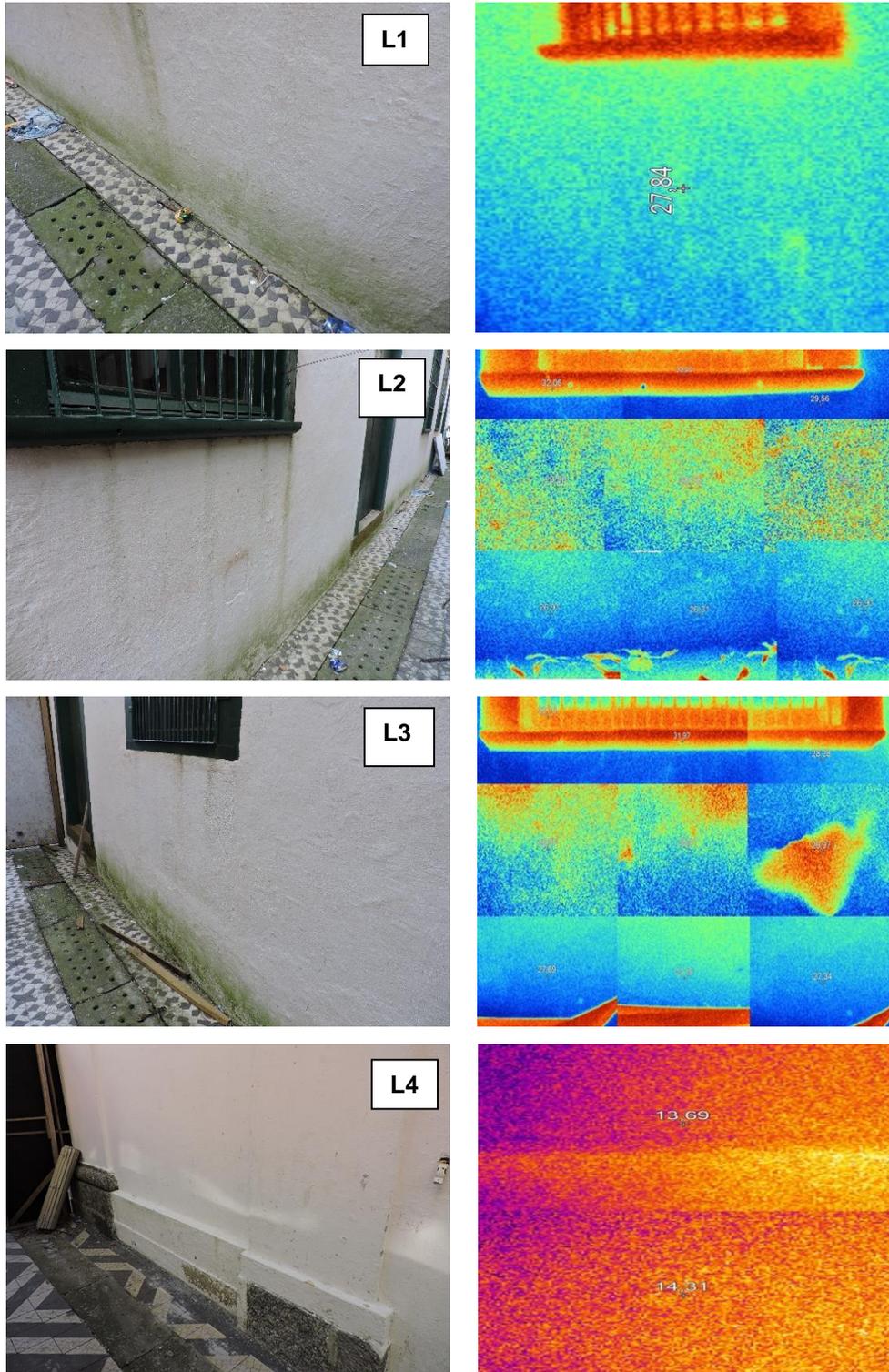


Figura 23. Imagens fotográficas e termográficas dos pontos críticos de umidade na fachada leste.

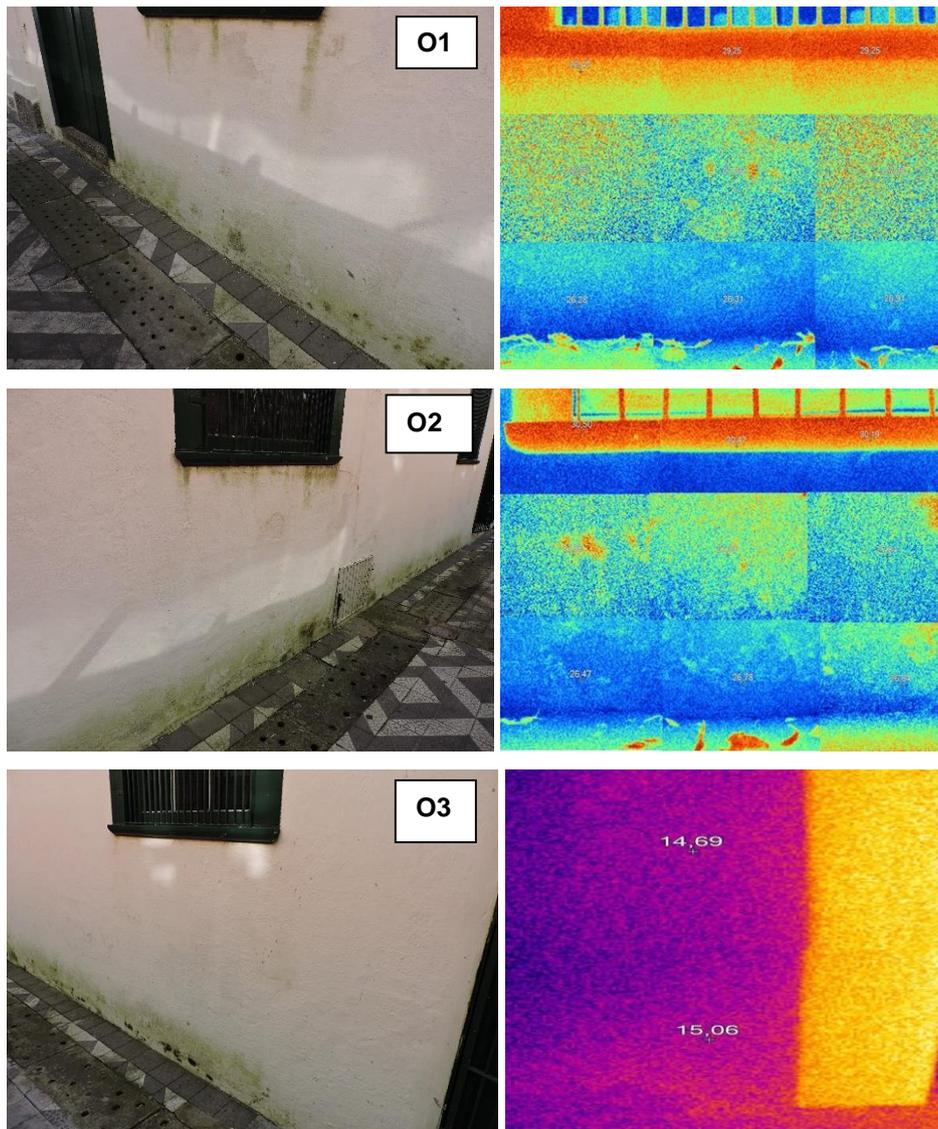


Figura 24. Imagens fotográficas e termográficas dos pontos críticos de umidade na fachada oeste.

Complementando a análise das fachadas da Catedral, utilizando-se da técnica TI, verificou-se a possível presença de danos devido a umidade na fachada oeste, tendo em vista estar está na pior condição insolação. A figura 25 mostra imagens, fotográfica e termográfica, da referida fachada, onde se verifica a presença disseminada de umidade, identificada pela predominância da cor violeta. Já no edifício lateral verifica-se a predominância da cor laranja, indicando uma baixa presença de umidade.

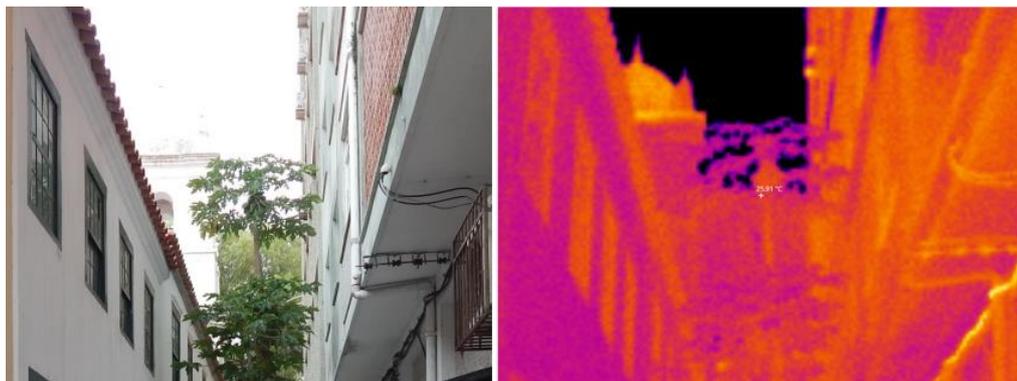


Figura 25. Imagens, gráfica e termográfica, da fachada oeste da Catedral.
Fonte: (2020).

A constatação de umidade na fachada oeste, conduziu a execução de um exame visual no revestimento para a identificação da presença de eflorescências e de desagregações na superfície do reboco. O resultado mostrou não existirem manifestações patológicas no reboco, indicando a inexistência de migração de sais para o exterior. O reboco apresentava-se íntegro.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento das etapas da pesquisa foi executada como descrito a seguir.

4.1 Identificação dos pontos críticos de umidade nas fachadas

Como já descrito acima, na visualização das fachadas com o emprego da técnica TI, identificou-se sete locais de maior presença de umidade, sendo quatro na fachada leste (Figura 26), identificados como L1, L2, L3 e L4, e três na fachada oeste (Figura 28), identificados como O1, O2 e O3.

Como já era esperado as condições de umidade nas fachadas são disseminadas, uma série de fatores contribuem para este fato como, idade da edificação, técnicas construtivas e materiais utilizados na época, as condições de confinamento atuais que se encontra a edificação, dentre outras.

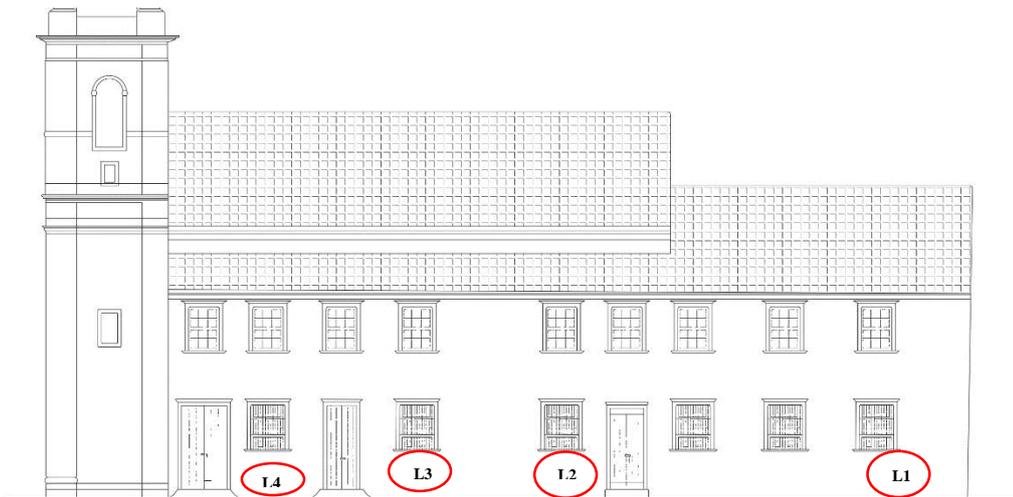


Figura 206. Pontos críticos de umidade identificados na fachada leste da Catedral.
Fonte: Autor, 2018.



Figura 217. Pontos críticos de umidade identificados na fachada oeste da Catedral.
Fonte: Autor, 2018.

4.2 Coleta de amostras

A retirada das amostras exigiu uma preparação previa do revestimento. Para isto, inicialmente, com o emprego de uma espátula, foi feita a raspagem da pintura mineral a base de cal até atingir a superfície do reboco (Figura 28).



Figura 228. Remoção da camada de pintura no local de coleta das amostras.
Fonte: Autor, 2018.

Para a retirada das amostras, em cada local de coleta foram feitos de 8 a 12 furos com profundidades variáveis até atingir-se o substrato (alvenaria), utilizando-se uma furadeira Hilti - modelo TE 50 (Figura 29), com coletor de pó, equipamento específico para a retirada de amostras pulverizadas.



Figura 29. Retirada de amostras na fachada leste - Local L1.
Fonte: Autor, 2018.

Durante a retirada de amostras verificou-se a falta de uniformidade da espessura dos revestimentos. Esta situação é bastante comum quando se trata

de prédios históricos, devido aos materiais e as técnicas construtivas utilizadas na época. Por isto, devido a irregularidade da espessura do reboco (Tabela 7), ocasionada pela falta de prumo e alinhamento do substrato, ocorreu variação na quantidade e na profundidade das amostras extraídas (Tabela 8).

Tabela 7. Espessura do revestimento dos locais de coleta nas fachadas.

Pontos de coleta	Fachada Leste				Fachada Oeste		
	L1	L2	L3	L4	O1	O2	O3
Espessura (mm)	64	52	50	23	68	80	18

Tabela 8. Quantidade e profundidade de extração de cada amostra nos pontos de coleta das fachadas leste e oeste.

Amostra	Profundidade do revestimento (mm)						
	Fachada leste				Fachada oeste		
	L1	L2	L3	L4	O1	O2	O3
1	4	5	7	5	8	6	4
2	10	14	20	15	21	16	14
3	18	24	29	24	29	25	25
4	25	35	36	31	36	34	32
5	35	43	45	38	44	42	-
6	46	49	53	44	53	49	-
7	71	57	58	-	63	57	-
8	-	-	63	-	75	67	-
9	-	-	-	-	-	76	-
10	-	-	-	-	-	83	-

As amostras extraídas foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas para o Laboratório de Química dos Materiais – LQM da FURG, onde foram devidamente preparadas para a realização de ensaios.

4.3 Ensaios laboratoriais

Nessa etapa do trabalho, considerando a idade do restauro do prédio da Catedral, a condição de agressividade salina do meio e a presença de umidade devido falta de sol nas fachadas em estudo, nas amostras extraídas foram feitos

ensaios laboratoriais capazes de identificar o grau de degradação do revestimento, a partir da análise do percentual de retenção de íons cloreto e da determinação da composição química e mineralógica da argamassa.

4.3.1 Análise do teor de cloretos totais

A análise do percentual do teor de cloretos totais foi feita conforme a metodologia adotada pela ASTM C 1152-90. Standard Test Method Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete – American Society For Testing of Materials - ASTM C 1152-90. 1990.

Para a realização do ensaio, inicialmente, as amostras foram pesadas (Figura 30A) e moídas em um almofariz com uso de um pistilo (Figura 30B). A moagem foi feita até que todo o material passou na peneira nº.20 de # 0,85 mm (Figura 30C).

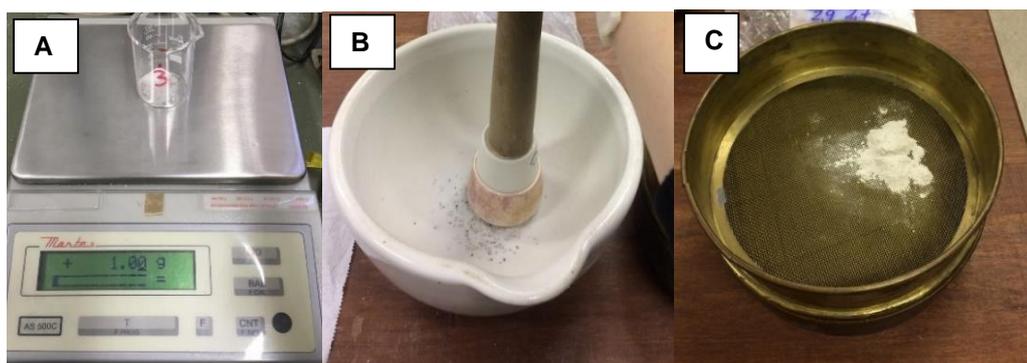


Figura 30. Preparação das amostras. (A) pesagem, (B) moagem e (C) peneiramento. Fonte: Autor, 2018.

As amostras moídas foram recolocadas em sua embalagem de origem (saco plástico) e misturadas manualmente com o auxílio de uma espátula, para homogeneizar a mistura. Na sequência, em uma balança de precisão da marca Bel L303IH, pesou-se aproximadamente 1 grama de cada amostra em um Becker de vidro de 50 ml (Figura 31A) e o material foi colocado em uma estufa da marca Dubesser SSD11La 100°C para secar por 24 horas (Figura 31B). O material seco foi posto em um dessecador (Figura 31C), para resfriar e não absorver a umidade do ambiente. Após o resfriamento, as amostras foram transferidas para um Becker de 150 ml e pesadas novamente na balança de precisão.

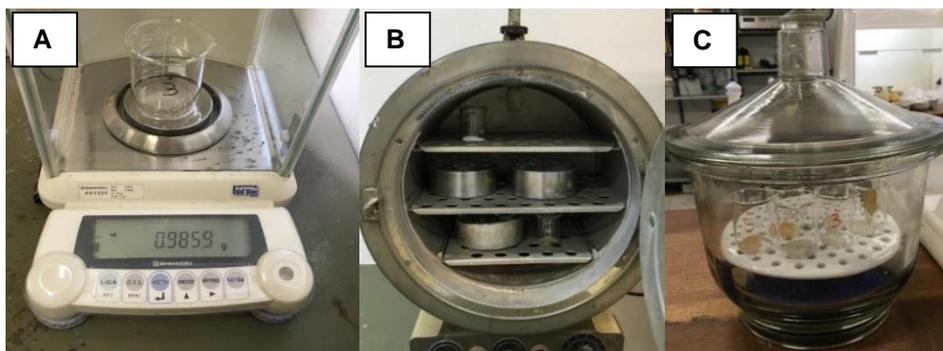


Figura 231. Preparação das amostras. (A) Pesagem em balança de precisão; (B) secagem em estufa; (C) resfriamento em dessecador.
Fonte: Autor, 2018.

Como o ensaio é realizado para cloretos totais, utilizando-se de uma pipeta adicionou-se 15 ml de ácido nítrico (Figura 32A) em cada uma das amostras da argamassa de revestimento. Para que a solução ácida atacasse a argamassa do revestimento e os cloretos retidos fossem liberados, tampou-se o Becker com um vidro de relógio e colocou-se água destilada na parte externa dele. O Becker tampado foi colocado para ferver em um misturador magnético da marca Fisatom 752A (Figura 32B). A finalidade de manter-se o Becker tampado é para a solução não evaporar e para que o cloreto evaporado se condense na face inferior do vidro.

As amostras depois de fervidas foram colocadas em um recipiente com água para esfriarem (Figura 32C). Após resfriadas, removeu-se a água na parte superior do vidro de relógio com papel absorvente e lavou-se a parte inferior do vidro de relógio e as paredes do Becker com água destilada (Figura 32D), sendo esta água conduzida para dentro do recipiente com a amostra, evitando-se, assim, a perda do material condensado. O ensaio foi feito com água destilada para evitar o risco da contaminação das amostras.



Figura 242. Ensaio para determinação de cloretos totais. (A) Adição de ácido nítrico nas amostras; (B) Fervura da solução argamassa - ácido nítrico; (C) Resfriamento da solução fervida; (D) lavagem da parte inferior do vidro relógio e do Becker com água destilada.
Fonte: Autor, 2018.

A determinação dos cloretos totais é feita medindo a diferença de potencial (mv) entre dois eletrodos, utilizando-se eletrodo de prata/cloreto de prata. No andamento do ensaio analisa-se como as leituras do potencial elétrico se comportam a cada adição de reagente de nitrato de prata. Quando se adiciona a quantidade suficiente de nitrato de prata para combinar-se com todos os íons cloretos presentes na solução ocorre o ponto de equivalência. No ponto de equivalência, o cloreto de sódio é totalmente consumido, e a diferença de potencial medida a partir desse ponto, corresponderá ao acúmulo do nitrato de prata na solução. Isso ocorre quando há um pico na medição, ou seja, uma grande variação na leitura de potencial, neste momento ocorrem mais três medições para confirmação e o ensaio é encerrado. Com os valores obtidos calcula-se as concentrações de cloretos.

Para a realização do ensaio foi necessário estabilizar o ph das amostras entre 2 e 3. Por isto, utilizando-se de uma pipeta graduada adicionou-se aproximadamente 32 ml de solução de hidróxido de sódio (NaOH). Após, verificou-se novamente o ph das amostras e para aquelas que estavam ainda com o ph acima de 3 adicionou-se mais ácido nítrico (HNO₃) e para as que estavam com o ph abaixo de 2 adicionou-se mais hidróxido de sódio (NaOH).

Como a amostra original pode conter uma concentração muito pequena de cloretos, deve-se adicionar 1 ml de cloreto de sódio (NaCl) para que o ensaio tenha eficácia. Quando for realizado o cálculo para a obtenção da quantidade de cloretos contidos na amostra, é descontado o que foi adicionado (1ml) do resultado.

Mesmo sendo utilizada água destilada é preciso descontar o teor de íons cloretos que a água contém. Por isso se realiza o ensaio no chamado “branco”, para cada ponto de coleta de amostra (Figura 33). Prepara-se o branco da mesma forma como descrito no preparo das amostras coletadas, a única diferença é que não se utiliza o material pulverizado, apenas ácido nítrico (HNO₃), hidróxido de sódio (NaOH) e cloreto de sódio (NaCl). O percentual de íons cloretos encontrados no branco é descontado de todas as amostras do ponto de coleta. Desta forma se descarta qualquer possibilidade de contaminação da água destilada utilizada nos ensaios.



Figura 253. Preparação das 7 amostras da argamassa de saneamento para o ensaio branco.
Fonte: Autor, 2018.

Para a realização do ensaio utilizou-se um potenciômetro da marca Ohaus ST2100F (Figura 34), existente no Laboratório de Química de Materiais - LQM da FURG, no qual como parâmetro considera-se como erro de ensaio 0,01% de massa de cloreto em relação a massa da amostra.



Figura 264. Potenciômetro utilizado para a determinação dos cloretos totais.
Fonte: Autor, 2018.

A determinação do percentual do teor de cloretos totais foi feita conforme a metodologia adotada pela ASTM C 1152-90, Standard Test Method Acid-Soluble Chloride In Mortar And Concrete – American Society For Testing of Materials, ASTM C 1152-90, 1990.

4.3.2 Análise mineralógica das argamassas

Para Bleicher e Sasaki, (2000) a fase cristalina das argamassas pode ser estudada através da difração de raios X (DRX), que é uma das técnicas de caracterização de materiais que permite determinar a composição mineralógica dos vários constituintes cristalinos.

A técnica DRX consiste na incidência de um feixe de raios X sobre o material a ser estudado e detecta-se os feixes de raios que emerge dele. Ao interagir com a estrutura atômica da amostra, o feixe de raios é difratado pelos seus átomos, como resultado, são transmitidas informações sobre a estrutura atômica dos mesmos, que determinam sua completa caracterização (CALLISTER, 2016).

Nesse trabalho, a técnica DRX foi utilizada para analisar a composição mineralógica da argamassa, buscando verificar se ocorreu degradação da estrutura cristalina dos seus constituintes em função da presença dos íons cloreto.

Os ensaios foram feitos no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul – CEMESUL da FURG em um equipamento da marca Bruker, modelo D8 Advance, com os seguintes parâmetros: voltagem de 40 kV, corrente de 40 mA, tubo de cobre (Cu) com comprimento de onda (λ): 1,541 Å. Os difratogramas foram registrados entre 3° e 90° (2θ).

4.3.3 Análise da composição química das argamassas

A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica não destrutiva baseada na medida da intensidade dos raios X característicos emitidos pelos elementos químicos constituintes da amostra. Através desta técnica pode ser feita uma análise qualitativa e também quantitativa sobre a constituição da matéria, permitindo determinar a composição química sem haver a sua destruição total ou parcial. Devido a essas características, ela vem sendo bastante utilizada em estudos do patrimônio cultural (ASFORA, 2010).

No trabalho o ensaio de FRX foi feito para analisar qualitativa e quantitativamente a presença dos principais elementos químicos da argamassa.

A composição química da argamassa foi determinada por fluorescência de raios X em um equipamento da marca EDX – 720 Shimadzu Scientific Instruments, existente no Laboratório de Caracterização de Materiais na Universidade Federal de Pelotas, UFPEL.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise de retenção de íons cloreto na argamassa de saneamento

5.1.1 Considerando a penetração de sais no interior do reboco

As figuras de 35 a 41 apresentam os perfis de íons cloreto obtidos nas 50 amostras extraídas nos sete pontos de coleta do revestimento externo da Catedral. Os perfis representam os percentuais de íons cloretos retidos no interior da argamassa e a sua posição na camada do revestimento, conforme descrito nos Relatórios do Apêndice 1. No gráfico, o tracejado vermelho indica a espessura máxima do reboco delimitado pela posição do substrato (alvenaria).

A figura 35 apresenta o **perfil de íons cloreto do ponto de coleta L1**. A análise do perfil ocorreu com amostras com profundidade de até 71 mm. No perfil observa-se que na profundidade de 4 mm ocorreram baixos valores de retenção, vindo estes a zerar na profundidade de 10 mm. Além disto, também, verifica-se a presença de um pico de maior retenção na profundidade de 25 mm que decresce até zerar na profundidade de 46 mm. Analisando-se a curva do perfil, verifica-se que a argamassa de saneamento não possibilitou a movimentação dos íons cloreto para a superfície externa e os manteve retido no seu interior.

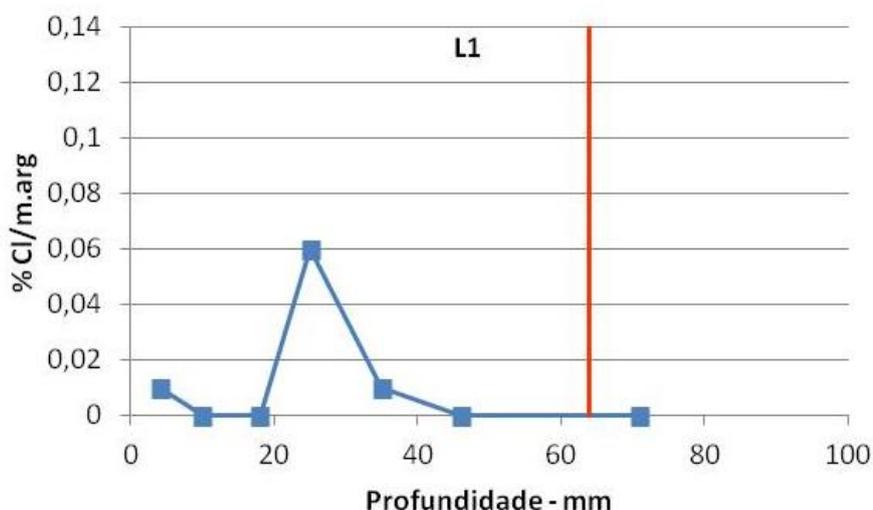


Figura 35. Perfil de íons cloretos das amostras extraídas no ponto de coleta L1.

A figura 36 apresenta o **perfil de íons cloreto do ponto de coleta L2**. A análise do perfil ocorreu com amostras com profundidade de até 57mm. O perfil obtido nesse ponto de coleta mostra que o pico de maior valor de retenção de íons cloreto encontra-se próximo a superfície do reboco, na profundidade de 5 mm, e que a partir desse ponto segue uma tendência de redução até zerar na profundidade de 49mm. Analisando-se a curva de movimentação, verifica-se que, embora tenha sido identificado elevado percentual de íons cloretos próximos a superfície, estes não se deslocaram para o exterior e todos os sais ficaram retidos no interior da argamassa de saneamento.

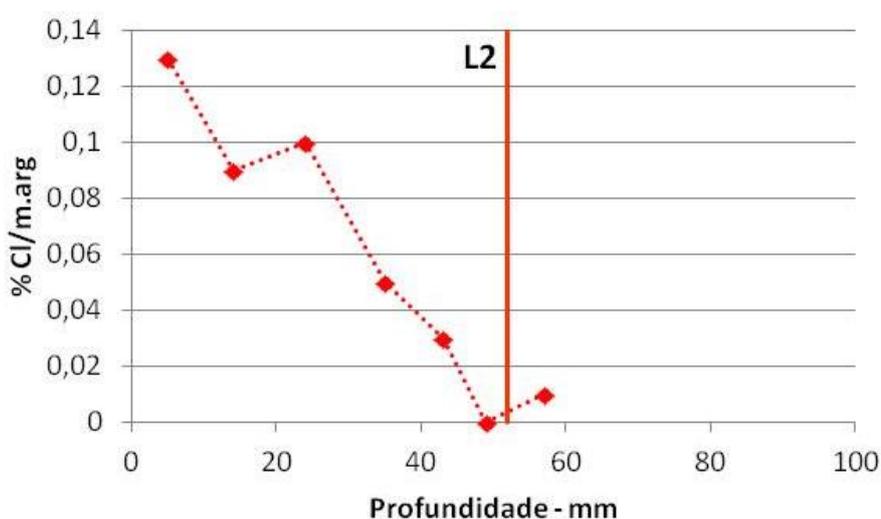


Figura 36. Perfil de íons cloretos das amostras extraídas no ponto de coleta L2.

A figura 37 apresenta o **perfil de íons cloreto do ponto de coleta L3**. A análise do perfil ocorreu com amostras com profundidade de até 63mm. No perfil em análise, o pico de maior retenção de íons cloreto encontra-se localizado a 7mm da superfície do revestimento e a partir desse ponto ocorre decréscimo gradual até zerar no interior do substrato na profundidade de 53mm. A curva de movimentação obtida mostra que houve baixo percentual de retenção dos íons cloreto e que ela ocorreu no interior da argamassa de saneamento.

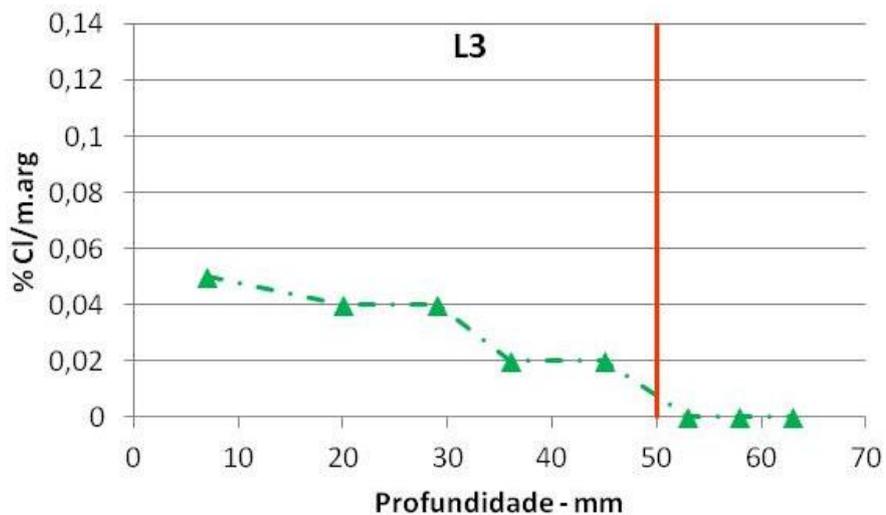


Figura 37. Perfil de íons cloretos das amostras extraídas no ponto de coleta L3.

A figura 38 apresenta o **perfil de íons cloreto do ponto de coleta L4**. A análise do perfil ocorreu com amostras com profundidade de até 44mm. A curva de movimentação observada mostrou que o percentual de retenção de íons cloreto foi muito baixo e com tendência a zerar junto ao substrato/alvenaria, ou seja, a retenção de íons cloreto ocorreu somente no interior da argamassa.

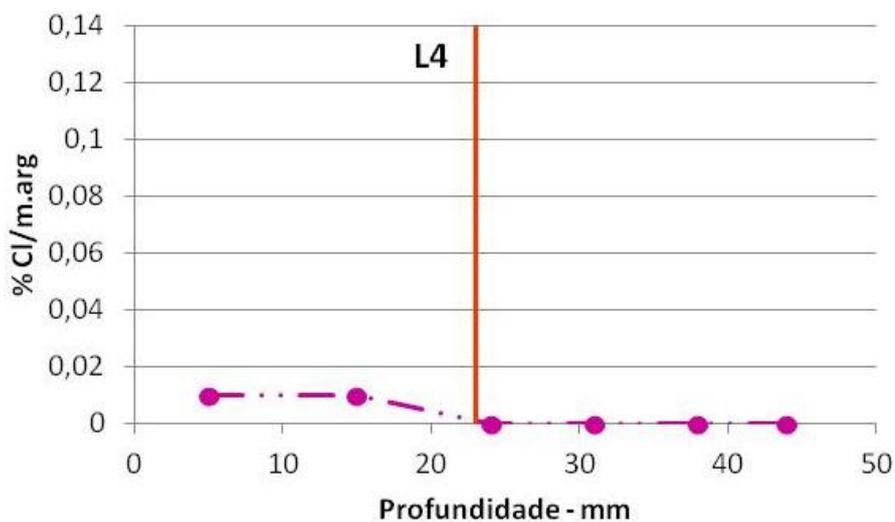


Figura 38. Perfil de íons cloretos das amostras extraídas no ponto de coleta L4.

A figura 39 apresenta o **perfil de íons cloreto do ponto de coleta O1**. A análise do perfil ocorreu com amostras com profundidade de até 75mm. Na curva de movimentação obtida, vê-se que os maiores valores de retenção de íons cloretos ocorrem no interior da argamassa, entre as profundidades de 44 e

53mm. A partir deste ponto os valores diminuíram gradualmente até zerar no interior do substrato/alvenaria. A análise do perfil obtido mostra que houve pouca retenção de íons cloretos e que esta ocorreu no interior da argamassa.

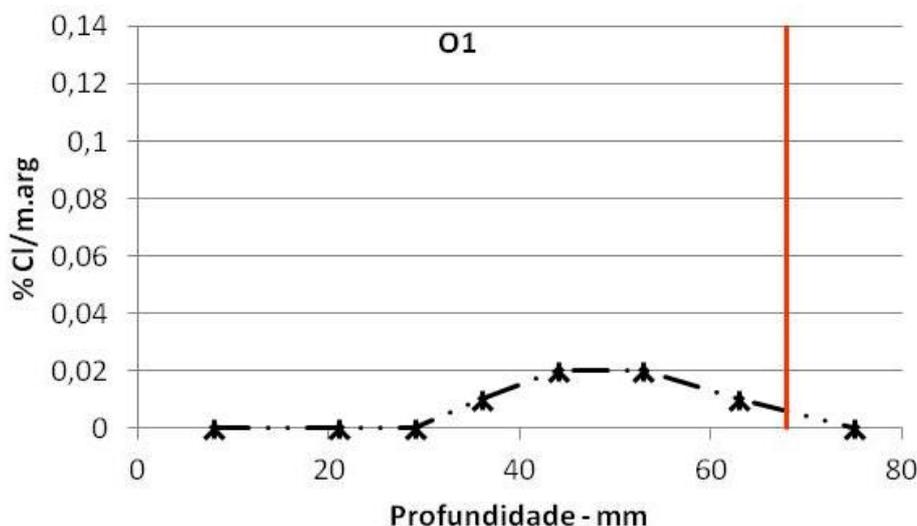


Figura 39. Perfil de íons cloretos das amostras extraídas no ponto de coleta O1.

A figura 40 apresenta o **perfil de íons cloreto do ponto de coleta O2**. A análise do perfil ocorreu com amostras com profundidade de até 83mm. Nesse ponto de coleta, a curva de movimentação dos íons cloretos mostrou baixos valores de retenção na superfície e um pico elevado na profundidade de 42mm. A partir deste ponto os valores tenderam a diminuir até zerar um pouco antes do substrato/alvenaria. Assim como nos demais pontos de coleta, o perfil originado demonstrou que a argamassa reteve em seu interior os íons cloretos.

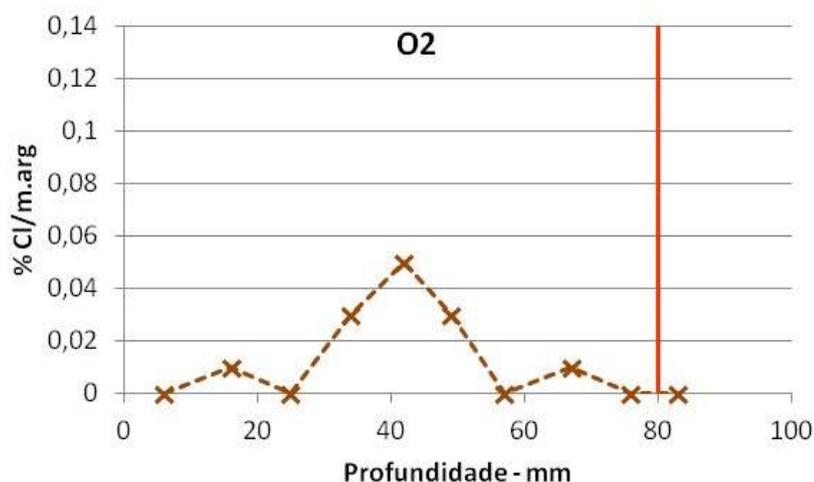


Figura 40. Perfil de íons cloretos das amostras extraídas no ponto de coleta O2.

A figura 41 apresenta o **perfil de íons cloreto do ponto de coleta O3**. A análise do perfil ocorreu com amostras com profundidade de até 32mm. Na análise da curva de movimentação desse ponto de coleta observou-se que a retenção de íons cloreto é maior na superfície na profundidade de 4 mm e que a partir deste ponto os valores diminuem gradualmente até zerar no substrato/alvenaria. Mesmo sendo a amostra de menor espessura ocorreu a retenção de íons cloreto.

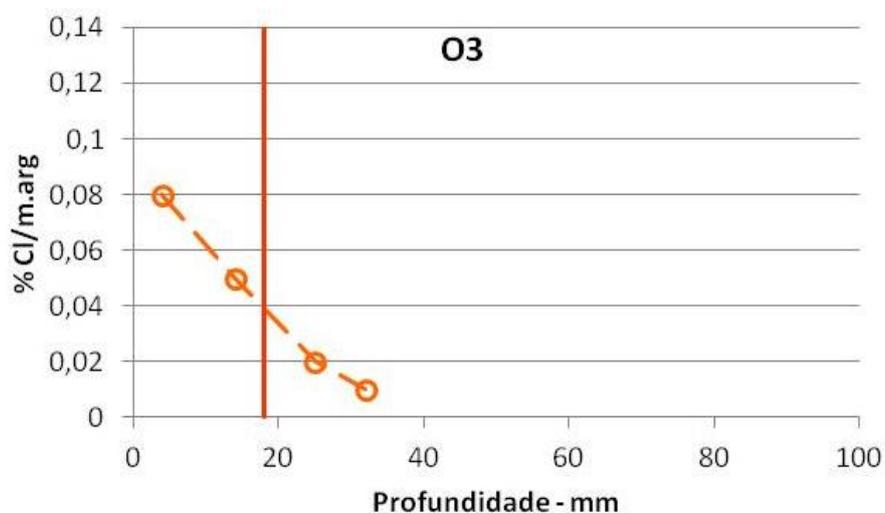


Figura 41. Perfil de íons cloretos das amostras extraídas no ponto de coleta O3.

A análise dos perfis de íons cloreto obtidos nos pontos críticos de umidade existentes nas fachadas leste e oeste, possibilitou concluir que a argamassa utilizada cumpriu com o seu papel de saneamento porque reteve os sais em seu interior, impedindo a movimentação para o exterior e a, conseqüente, degradação do revestimento.

5.1.2 Considerando a espessura do revestimento.

A figura 42 apresenta, comparativamente, as curvas obtidas nos perfis de íons cloreto obtidos nos sete locais de coleta. Já a figura 43 apresenta a correlação entre a espessura da amostra do reboco e a profundidade onde ocorreram os picos de retenção de íons cloreto.

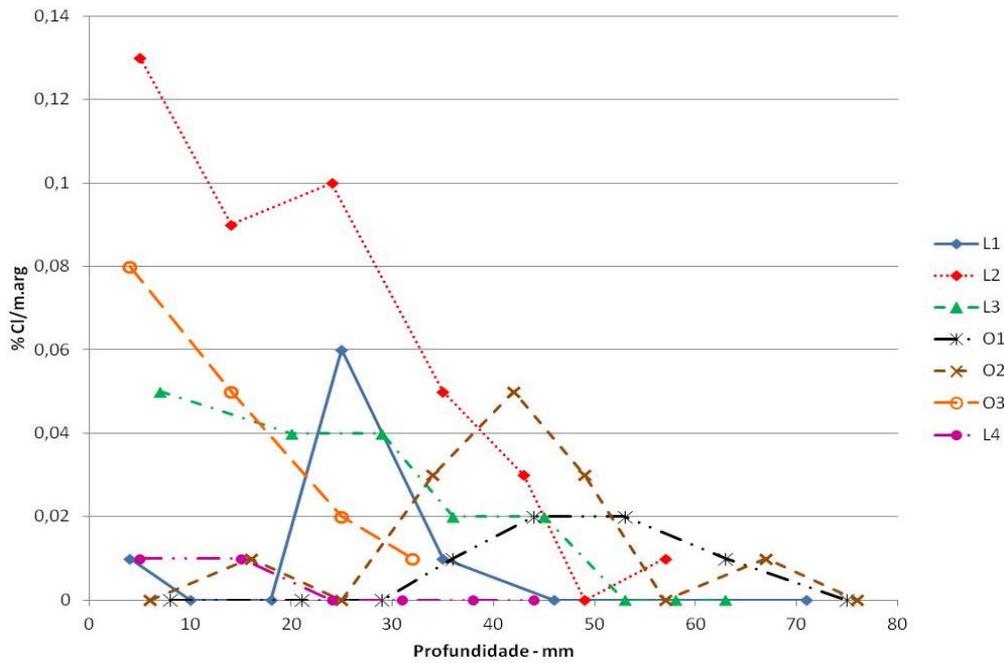


Figura 42. Análise entre os perfis de íons cloreto.

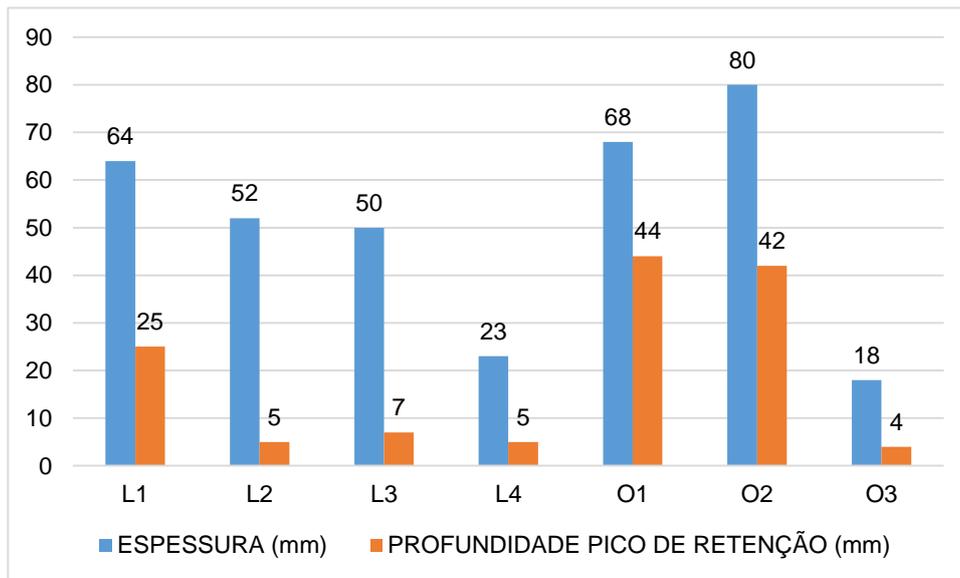


Figura 43. Correlação entre a espessura da amostra do reboco e a profundidade dos picos de retenção de íons cloreto.

Analisando-se as figuras 42 e 43, observa-se que a amostra L2 com espessura de reboco (52mm) e a O3 com espessura de reboco (18mm) foram as que apresentaram os maiores valores de retenção de íons cloretos, localizados na profundidade do reboco de 5mm e 4mm, respectivamente ou seja, muito próximo a superfície externa do reboco. Já a amostra L1 com espessura de reboco (64mm), a L3 com espessura de reboco (50mm) e a O2 amostra que

apresenta entre todas a maior espessura de reboco (80mm) apresentaram valores de retenção menores, localizados na profundidade do reboco de 25mm, 7mm e 42mm respectivamente. Observa-se que na amostra L3, também, um pico de retenção próximo a superfície externa do reboco. A amostra L4 com espessura de reboco (23mm) e a O1 com espessura de reboco (68mm) apresentam os menores valores de retenção entre todas, localizados na profundidade do reboco de 23mm e 68mm respectivamente.

Na correlação apresentada na figura 43, entre a espessura da amostra do reboco e a profundidade de ocorrência dos picos de retenção dos íons cloreto, observa-se que para as espessuras menores os picos ocorrem próximos a superfície externa e, à medida que a espessura aumenta, também, ocorre o aumento da profundidade de ocorrência dos picos de retenção de íons cloreto.

Estes resultados mostram que a espessura do revestimento e a porosidade são fatores determinantes na retenção dos sais e na condição necessária para que uma argamassa de saneamento possa ser considerada uma barreira efetiva. Além disto, os resultados, também, corroboram com as especificações do Caderno de Recomendações Alemão que definem que a eficiência das argamassas de saneamento está vinculada a maior formação de vazios durante o seu endurecimento, devido a carbonatação da cal, das reações químicas da sílica do cimento, das adições pozolânicas e do uso do aditivo incorporador de ar.

5.1.3 Considerando a relação cl/massa da argamassa

O ensaios para a determinação do percentual do teor de cloretos totais, foi feito no Laboratório de Química de Materiais – LQM, da FURG, conforme a metodologia adotada pela ASTM C 1152-90, Standard Test Method Acid-Soluble Chloride In Mortar And Concrete – American Society For Testing of Materials, ASTM C 1152-90, 1990.

A tabela 9 apresenta os percentuais de retenção dos íons cloreto coletados em diferentes profundidades da massa das amostras.

Tabela 9 - Percentual de íons cloretos identificados nas diferentes profundidades das amostras.

L1	Profundidade (mm)	4	10	18	25	35	46	71			
	Íons cloretos (%)	0,01	0,00	0,00	0,06	0,01	0,00	0,00			
L2	Profundidade (mm)	5	14	24	35	43	49	57			
	Íons cloretos (%)	0,13	0,09	0,10	0,05	0,03	0,00	0,01			
L3	Profundidade (mm)	7	20	29	36	45	53	58	63		
	Íons cloretos (%)	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00		
L4	Profundidade (mm)	5	15	24	31	38	44				
	Íons cloretos (%)	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00				
O1	Profundidade (mm)	8	21	29	36	44	53	63	75		
	Íons cloretos (%)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00		
O2	Profundidade (mm)	6	16	25	34	42	49	57	67	76	83
	Íons cloretos (%)	0,00	0,01	0,00	0,03	0,05	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00
O3	Profundidade (mm)	4	14	25	32						
	Íons cloretos (%)	0,08	0,05	0,02	0,01						

A tabela 10 apresenta o grau de sobrecarga dos íons cloreto utilizados como referência por Dias *et al.* (1997) adaptado de Arendt (1995), identificados nas amostras extraídas conforme a tabela 10.

Tabela 10 - Grau de sobrecarga dos íons cloreto utilizado por Dias *et al.* (1997), adaptado de Arendt (1995)

Amostras	% retenção íons cloreto	Índice
21	$0,000 < X \leq 0,004$	0 – Retenção mínima
18	$0,004 < x \leq 0,030$	1 – Retenção pequena
10	$0,030 < x \leq 0,090$	2 - Retenção média
01	$0,090 < x > 0,280$	3 – Retenção alta

Analisando-se a classificação das amostras na tabela 10, verifica-se que somente dois pontos de coleta apresentaram significativo valor de retenção, sendo estes o O3 (0,08%) e o L2 (0,13%), indicando que houve nessas amostras média e alta retenção de sais, respectivamente. Resumidamente, identificou-se que 78% das amostras apresentaram índice 1 (pequena e mínima de sais), 18% apresentaram índice 2 (retenção média de sais) e 4% apresentaram índice 3 (retenção alta de sais). Estes resultados permitem concluir que a nova argamassa apresentou um bom desempenho como barreira de proteção.

5.2 Mineralogia das argamassas de saneamento.

Os resultados da difração de raios X das amostras da argamassa extraída dos pontos críticos de umidade do revestimento externo da Catedral estão apresentados nas figuras de 44 e 50.

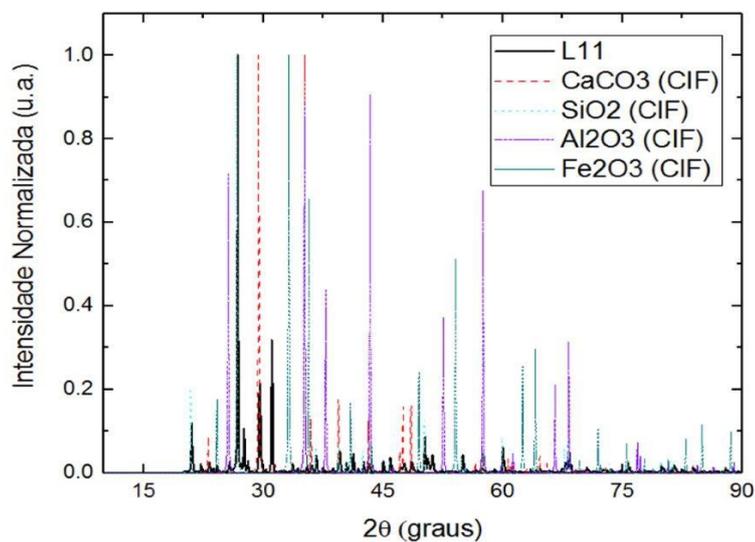


Figura 44. Difração de raio X da amostra L1. Carbonato de cálcio (CaCO_3), Sílica (SiO_2), Alumina (Al_2O_3), Óxido de ferro (Fe_2O_3).

Fonte: Autor (2019).

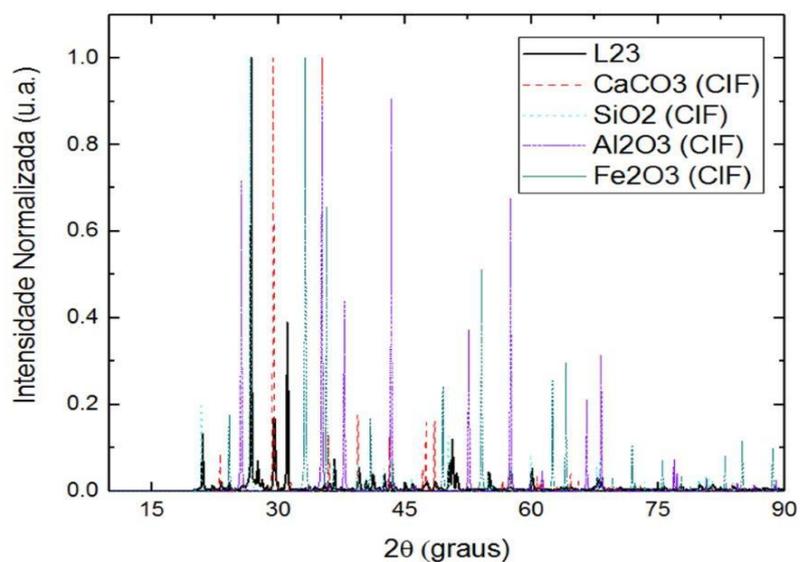


Figura 45. Difração de raios X da amostra L2. Carbonato de cálcio (CaCO_3), Sílica (SiO_2), Alumina (Al_2O_3), Óxido de ferro (Fe_2O_3).

Fonte: Autor (2019).

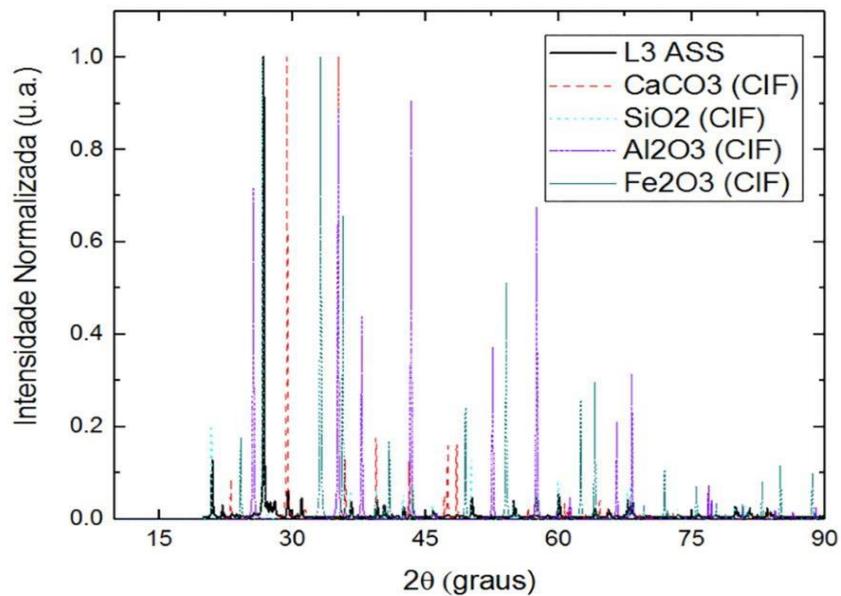


Figura 46. Difração de raio X da amostra do local L3. Carbonato de cálcio (CaCO_3), Sílica (SiO_2), Alumina (Al_2O_3), Óxido de ferro (Fe_2O_3).
 Fonte: Autor (2019).

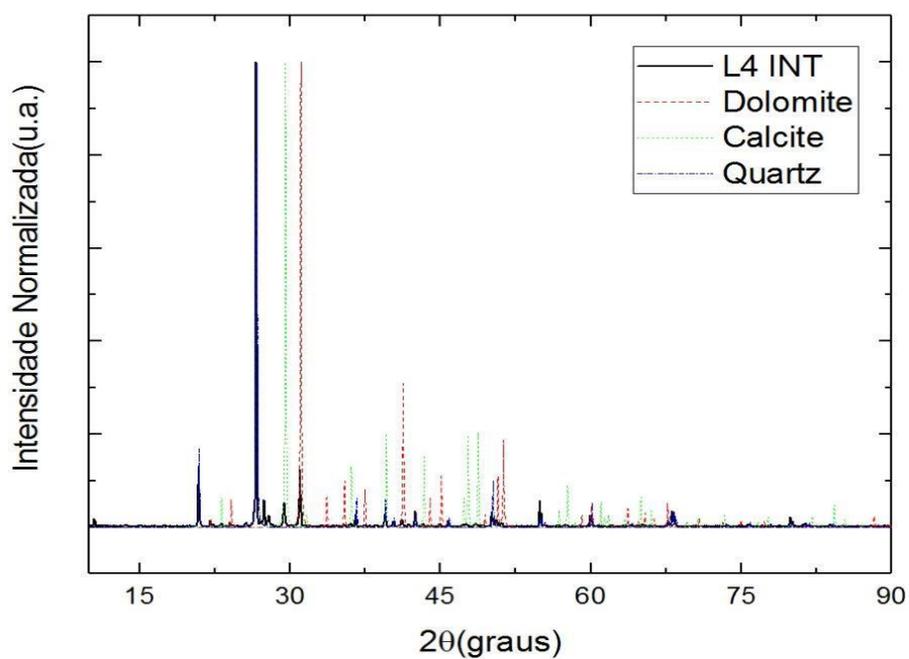


Figura 47. Difração de raio X da amostra L4. Dolomita, Calcita, Quartzo.
 Fonte: Autor (2019).

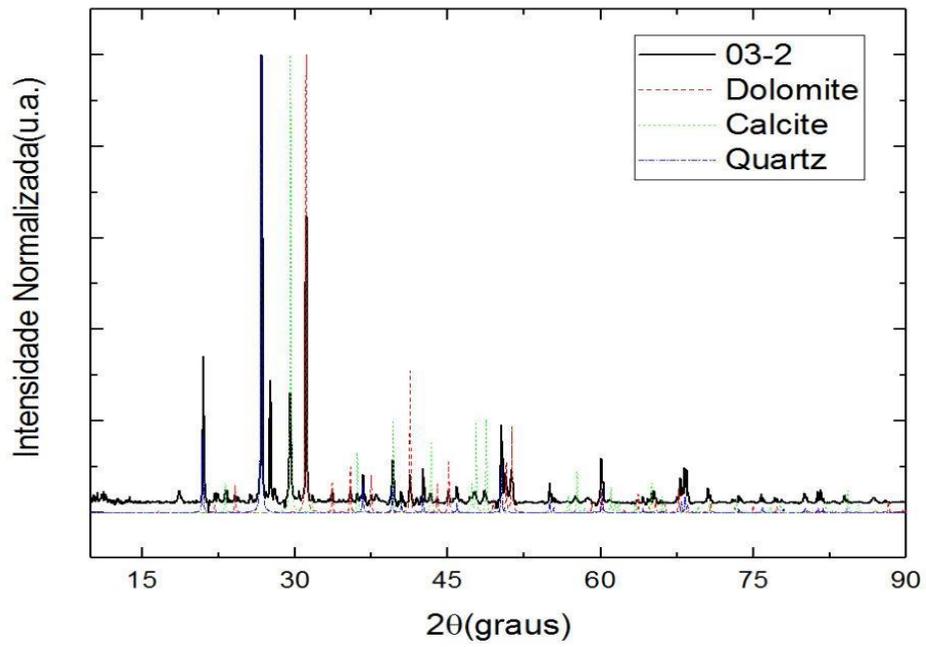


Figura 48. Difração de raios X da amostra O1. Dolomita, Calcita, Quartzo.
 Fonte: Autor (2019).

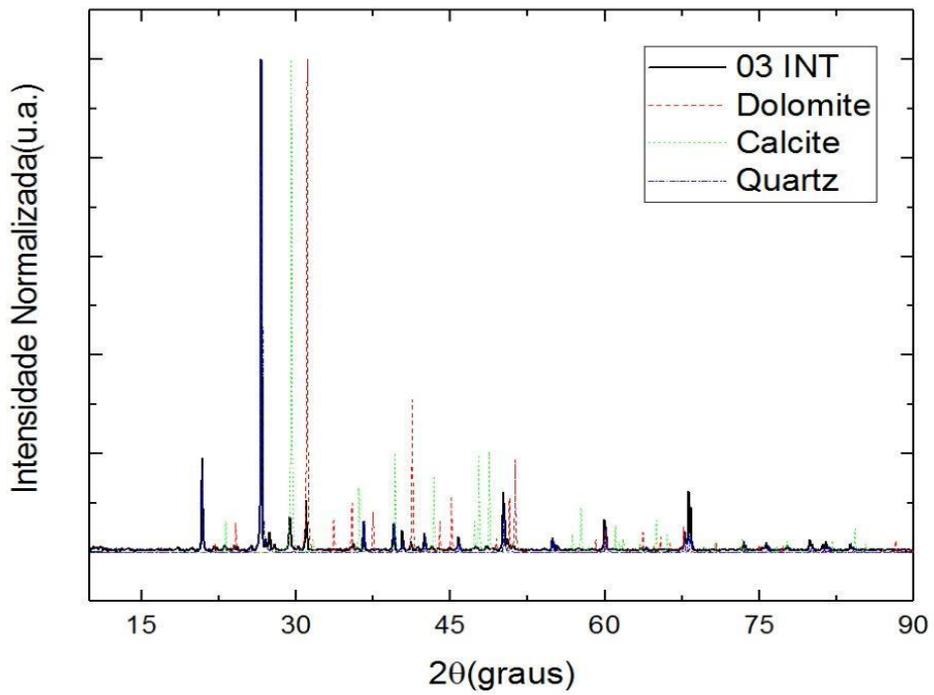


Figura 49. Difração de raio X da amostra O2. Dolomita, Calcita, Quartzo.
 Fonte: Autor (2019).

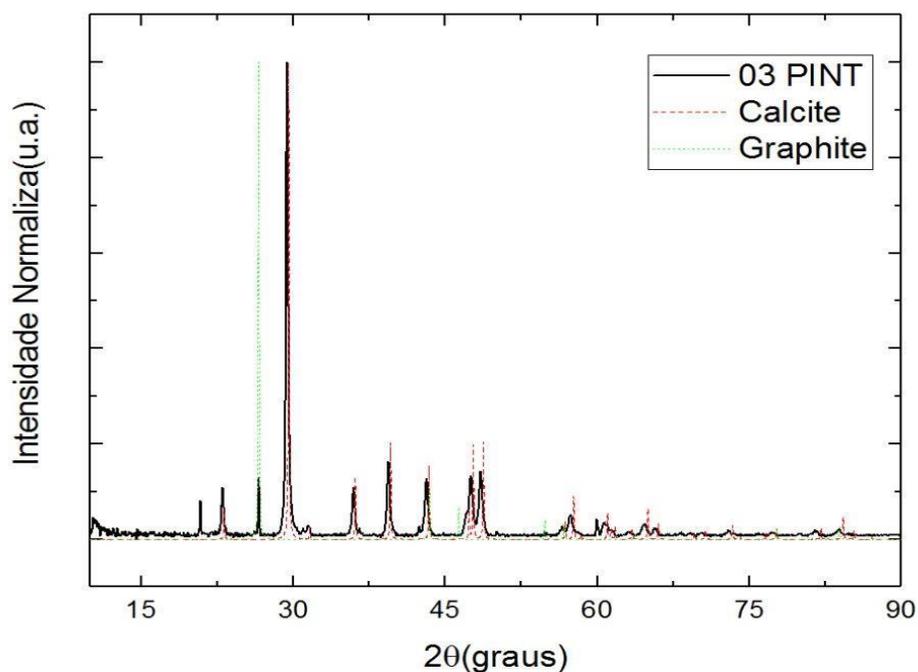


Figura 50. Difração de raio X da amostra O3. Calcita, Grafite.
Fonte: Autor (2019).

A DRX das amostras da argamassa extraída nos pontos críticos de umidade existentes no revestimento da Catedral identificou presença predominante de Calcita (CaCO_3) e Sílica (SiO_2), seguido de Alumina (Al_2O_3), Óxido de ferro (Fe_2O_3) e Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

Estes resultados indicam que os principais materiais sólidos (cal dolomítica hidratada, cimento, cinza de carvão mineral, areia quartzosa e calcária) utilizados na composição do traço da argamassa de saneamento utilizada na reconstituição do revestimento da Catedral mantiveram-se sem modificação nas suas estruturas cristalinas. A calcita, a alumina e o óxido de ferro são, possivelmente, provenientes do cimento e da cinza de carvão mineral⁴, a dolomita resulta da cal aérea e a sílica e a calcita provém das areias quartzosa e calcária e da cinza de carvão mineral.

Na análise não foi identificado a presença de sais de cloreto, possivelmente, pela baixa concentração identificada nas amostras.

⁴ Cinza de carvão mineral – Formada basicamente por compostos de silício e alumínio, baixos teores em ferro e menores quantidades por Mg, Ca, Ti, P, S, Na e K.
<https://ppgeq.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/Carlos%20Augusto%20Ferreira%20da%20Rocha%20Junior.pdf>, em 16/08/2021

5.3 Composição química elementar da argamassa de saneamento

Complementando, a análise da condição de integridade da argamassa, a tabela 11 apresenta a composição elementar dos principais constituintes da argamassa obtida nas amostras extraídas dos pontos críticos de umidade existentes no revestimento da Catedral.

Tabela 11– Composição química elementar.

AMOSTRA	Ca (%)	Si (%)	Al %	Fe %	K %
L1	39,666	38,357	10,731	5,994	4,153
L2	52,776	30,800	9,128	2,803	3,344
L3	54,220	29,688	8,621	2,898	3,017
L4	58,785	32,092	XXXX	3,464	4,497
O2	40,072	40,267	XXXX	10,987	5,001
O3	49,260	33,769	8,179	2,945	4,126

A análise dos resultados na tabela 11 mostra que o cálcio aparece em quantidade superior aos demais elementos, o que se justifica pela sua presença em vários dos componentes da argamassa, tais como a cal dolomítica, o cimento e a cinza de carvão mineral. O silício que aparece em segundo lugar em quantidade, também, tem sua presença justificada em vários componentes, tais como as areias, a cinza e o cimento. Já a alumina, que aparece em menor proporção, tem sua origem no cimento e o ferro, identificado em pequena quantidade, tem sua origem no cimento e, possivelmente, devido as condições de umidade do meio, também no processo de lixiviação dos minerais da argila dos tijolos da alvenaria. O potássio, tem sua origem na lixiviação dos minerais da argila dos tijolos da alvenaria ou, conforme estudos realizados por Zen (2016), na cinza de carvão mineral. E, o titânio é encontrado em pequenas quantidades no cimento e na cinza.

Na análise não foi identificado a presença de sais de cloreto, possivelmente, pela baixa concentração identificada nas amostras.

A identificação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos majoritários da argamassa permitiu concluir que a presença dos íons cloretos não provocou alterações químicas na sua estrutura atômica.

6. CONCLUSÕES

Especificamente, para os resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que:

1. Os objetivos da pesquisa foram atingidos, uma vez que foram comprovadas a integridade e a funcionalidade da argamassa, que atuou de forma eficaz na retenção dos sais nos seus poros. Passados mais de 25 anos de uso, em uma inspeção visual, foi possível verificar que a argamassa de saneamento brasileira aplicada como reboco de recuperação no revestimento externo da Catedral de São Pedro apresenta boas condições de conservação, não apresentando até o presente momento sinais de decomposição ou degradação.
2. A partir da análise dos perfis de retenção de íons cloreto foi possível observar que nas amostras da argamassa ocorreu deslocamento de sais no interior do reboco e que não há deslocamento para a superfície. Esta condição se justifica devido ao elevado índice de vazios identificado na argamassa aplicada (Tabela 6, Dias *et al.*, 1998), originados, possivelmente, pela adequada composição granulométrica da areia, carbonatação da cal aérea, pela presença da cinza de carvão mineral e pela utilização de aditivo incorporador de ar que possibilitou um refinamento dos poros.
3. Na análise das amostras extraídas nos sete locais de coleta, foi possível verificar que a espessura do revestimento e a porosidade são fatores determinantes para a retenção de íons cloreto. Este fato vai de encontro ao preconizado pelo Caderno de Recomendações Alemão e as recomendações de Arendt (1995), que indica que a durabilidade de uma argamassa de saneamento está vinculada a espessura, que melhora a distribuição dos poros, a maior formação de vazios durante o seu endurecimento, a carbonatação da cal, das reações químicas da sílica do cimento e das adições pozolânicas e do aditivo incorporador de ar.

4. Na análise da presença de íons cloreto em relação a massa da argamassa, foram obtidos valores pouco significativos, o que permite indicar a eficiência da argamassa utilizada no restauro do revestimento externo da Catedral como barreira de proteção. A pequena quantidade de cloreto e o formato do perfil indicam que a argamassa cumpre sua função
5. A análise em função dos índices de retenção proposto por Dias *et al.* (1997), permitiu concluir que a nova argamassa apresentou um bom desempenho como barreira de proteção, visto que 78% das amostras apresentaram índice 1 (pequena e mínima retenção de sais).
6. Na análise mineralógica da argamassa de saneamento as estruturas cristalinas dos principais constituintes da argamassa se mostraram inalteradas, indicando que a presença dos sais cloretos e cloretos livres não as degradou.
7. Na análise química da argamassa de saneamento identificou-se que os elementos químicos majoritários da massa da argamassa estão inalterados, indicando que a presença de íons cloreto e de cloretos livres não alterou a sua estrutura atômica.
8. A realização dos ensaios acima permitiu concluir que a argamassa utilizada no restauro da Catedral vem desempenhando uma eficiente condição de barreira contra a ação de seus maiores agressores, a umidade e os sais de cloreto.
9. Também, pode-se concluir que é possível a obtenção de uma argamassa de saneamento produzida com matérias-primas nacionais com propriedades de barreira ao deslocamento de sais, similares as das argamassas estrangeiras.

10. E, por fim, também, pode-se concluir que as boas condições de retenção de sais da argamassa utilizada na reconstituição do revestimento assumem maior relevância, quando se pensa em soluções para a execução de rebocos de recuperação do patrimônio edificado nacional localizado em ambientes de atmosfera marinha.

7.SUGESTÕES PARA ATIVIDADES FUTURAS

Considerando a necessidade do desenvolvimento de argamassas brasileiras para a recuperação de revestimentos históricos, sugere-se como continuidade desse trabalho:

1. A reprodução e caracterização do traço da argamassa de saneamento usada na reconstituição do revestimento da Catedral, visando a obtenção de uma ficha técnica completa.
2. A execução de experimentos com o traço da argamassa de saneamento aplicada no reboco da Catedral em paredes com graus diferentes de umidade e salinidade.
3. O desenvolvimento de novos traços de argamassa, considerando os resultados totais de caracterização (química, física e mecânica) da argamassa de saneamento da Catedral.
4. A execução de novos traços da argamassa de saneamento utilizando diferentes agentes de porosidade.
5. Analisar o uso nacional da argamassa em estruturas reais.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, F. W. A.; PINZ, F. P.; TORRES, A. S.; PALIGA, C. M. Potencial da Termografia Infravermelha na Detecção de Manifestações Patológicas Ocultas Ocasionadas pela Umidade Acidental em Paredes de Alvenaria Cerâmicas com Revestimento de Argamassa e Pintura. Revista de Arquitetura, IMED, V. 5, n.1, 2016.

AGUIAR, José; TAVARES, Martha; VEIGA, Maria do Rosário. Consolidação de revestimentos exteriores (rebocos e barramentos) de edifícios antigos – reflexões para um plano de estudo. Lisboa, 2001.

ANGELIN, R. R.; ANGELIN, S. C. M; CARASEK, H. Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa. SIMPOSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003. Anais, São Paulo: ANTAC 2003.

ASFORA, Viviane Khoury. Fluorescência de raios X por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas Nucleares. Recife, PE, 2010.

Associação Pró-Preservação do Patrimônio Histórico, Artístico e Cultural do Rio Grande – APHAC. Restauração e história: Capela de São Francisco de Assis – Rio Grande: Libretos Comunicação, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 15220 2005- Desempenho térmico de edificações.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13276:2005- Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13277:2005- Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação da retenção de água.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13278:2005- Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13279:2005- Argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos- Determinação da resistência na flexão e a compressão axial.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13280:2005- Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 15258:2005- Argamassa para revestimento de paredes e tetos- Determinação da resistência potencial de aderência à tração.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 15259:2005- Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 6118:2014- Projeto de Estruturas de Concreto Armado – Procedimento.

ASTM C 1152-90. Standard Test Method Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete – American Society For Testing of Materials - ASTM C 1152-90. 1990.

ARENDR, C. Métodos de tratamento de alvenarias deterioradas. A utilização de rebocos de recuperação e medidas de combate aos sais. In: Métodos de tratamento de alvenarias deterioradas. Tradução Hélio Adão Greven. In: Seminário sobre Recuperação de Obras Históricas de Engenharia e Arquitetura: avaliação do estado de conservação, análise, diagnóstico e terapia: Porto Alegre, UFRGS, 1995.

ARENDR, C. Métodos de tratamento de alvenarias deterioradas. Metodologia dos Exames e seu Significado para a Recuperação de Edificações Históricas. Tradução Hélio Adão Greven. In: Seminário sobre Recuperação de Obras Históricas de Engenharia e Arquitetura: avaliação do estado de conservação, análise, diagnóstico e terapia: Porto Alegre, UFRGS, 1995.

AGUIAR, José; TAVARES, Martha; VEIGA, Maria do Rosário. Consolidação de revestimentos exteriores (rebocos e barramentos) de edifícios antigos- reflexões para um plano de estudo, Lisboa, LNEC, Relatório 216/2001-NA.

ARCE, P. López; MENENDEZ, B.; HAMMOU, M. Tagnit; MERTZ, J.; D.KACI, A. Durability of Stone Repair Mortars Used in Historic Buildings From Paris. *Materials and Structures* (2016). 49;5097-5115

BLEICHER, L; SASAKI, J. M. Apostila de Introdução a Difração de Raios X em Cristais. UFC, 2000.

BERTOLINI, Luca. Materiais de Construção, Patologia, Reabilitação, Prevenção. São Paulo. Oficina de Textos. 2010.

BIANCHIN, Adriane Ciliato. Influência do proporcionamento dos materiais constituintes no desempenho de argamassas para reboco de recuperação de alvenarias contaminadas por umidade e sais. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 1999.

BRANDI, Césare. Teoria da Restauração. São Paulo, Ateliê Editorial, 2004.

CALISTER, William D. Jr., RETHWISCH, David G. - Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 9 ed. – Rio de Janeiro: LTC,2016.

CASAL, Milene Gil. Estudo e consolidação de argamassas de cal aérea e e areia fina com falta de adesão, Projecto final de Licenciatura em Conservação e Restauro, Universidade Nova, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2001.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, MARIA A. C.; CARASEK, H. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaios. São Paulo Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995 (Publicação IPT 2378).

CORTIZO, E. C. Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações: Ênfase em Edificações de Patrimônio Histórico. Tese de (Doutorado) – Universidade federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, 2007.

CUNHA, Ronaldo Ortiz. A política de preservação no Brasil. Associação Pró-Preservação do patrimônio Histórico, Artístico e Cultural do Rio Grande – APHAC. Restauração e história: Capela de São Francisco de Assis. Rio Grande, RS, 1999.

CUNHA, Ronaldo Ortiz; DIAS, Claudio Renato Rodrigues. Restauração da Catedral de São Pedro: Um resgate da história para a memória cultural da cidade. IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES. IV CONGRESSO DE CONTROLE DA QUALIDADE. CONPAT 97. – Porto Alegre, RS, Brasil, Outubro, 1997

DIAS, Claudio Renato Rodrigues; CUNHA, Ronaldo Ortiz. O Uso de Argamassa de Saneamento na restauração da catedral de São Pedro na Cidade do Rio Grande. IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. Anais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil, 1997.

FEIJOO, Jorge; ERGENÇ, Duygu; FORT, Rafael; BUERGO, Mónica Alvarez de. Addition of ferrocyanide-based compounds to repairing joint lime mortars as a protective method for pouros building materials against sodium chloride damage. Materials and Structures (2021).

FREIRE, T; SANTOS SILVA, A; VEIGA, M. R and BRITO, J. Characterization of Historical Gypsum Mortars. Actas da 1ª Historical Mortars Conference, Lisboa, Setembro 2008.

FRÖSSEL, F. Wenn das Haus nasse Füße hat Mauerwekstrockenlegung und Kellersanierung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2001.

GEWER, Ursula. Aplicabilidade e Eficiência de Dois Métodos de Saneamento de Paredes Degradadas por Umidade e Sais a Partir de uma Revisão

Bibliográfica e de um Estudo de Caso. Trabalho de Conclusão (Mestrado Profissional). Universidade Federal do Rio Grande do Sul-Porto Alegre-RS-2004.

GROOT, Gaspar. Performance Requirements for Renders and Plasters .RILEM TC 203 – RHM: Repair Mortars for Historic Masonry. Trondheim, Noroega, 2012.

GUIMARÃES, André Tavares da Cunha. Laudo Técnico de Vistoria da Catedral de São Pedro-Rio Grande-RS, 1994.

HENRIQUES, Fernando. Acção da Humidade em Paredes. Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, junho, 1992.

HEES, Rob Van. From Problem to Intervention: A Decision Process. RILEM TC 203 – RHM: Repair Mortars for Historic Masonry. Trondheim, Noroega, 2012.

HONG, Sunnam; PARK, Sun-Kyu. Load Capacity and Chloride Resistance of Circular Concrete Columns with Repair Mortars. Journal of Composite Materials. 2014, Vol. 48 (24) 3049 – 3060.

HUGHES, John J. The Role of Mortar in Masonry: An introduction to Requirements for the Design of Repair Mortars. RILEM TC 203 – RHM: Repair Mortars for Historic Masonry. Trondheim, Noroega, 2012.

KANAN, Maria Isabel. Manual de Conservação e Intervenção em Argamassas e Revestimentos a Base de Cal- Cadernos Técnicos Volume 8, 2008. Disponível em: <<http://portal.iphan.gov.br/baixafcdAnexo.do/id-4357>>. Acesso em: 03 NOV. 2015.

KHARITONOV, Aleksey; SMIRNOVA Olga. Optimization of Repair Mortar Used in Masonry Restoration – Spation nº 42, December 2019, pp.8 – 15.

LEITE, Maria Raquel Galvão; PÓVOAS, Rui Fernandes; VEIGA, Maria do Rosário; SILVA, Antônio Santos. Caracterização e Registro de Argamassas dos Séculos XIX e XX: São Luís do Maranhão e a Arquitetura Ludovicense. XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Porto Alegre- RS- 2015.

LOUREIRO, A. M. S. Argamassa de Saneamento para Dessalinização de Alvenarias Mistas de Edifícios Históricos de Belém. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Belém, PA, 2013.

MAGALHÃES, A. C. Patologia de rebocos antigos. Cadernos de Edifícios, Lisboa, LNEC, n. 2, p. 69-85, 2002.

MAGALHÃES, A. C.; SANTOS SILVA, A.; VEIGA, M. R. SBTA – IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Belo Horizonte - Minas Gerais – 2011.

MARGALHA, G. Argamassas. Universidade de Évora, 2011. Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Patrimônio.

MARQUES, S. M. F. **Estudo de Argamassas de Reabilitação de Edifícios Antigos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2005.

MARQUES, Vera; VELOSA Ana; COROADO, João; ROCHA, Fernando; COSTA, Cristiana. Conservação de Rebocos em Cabo Verde. XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Porto Alegre- RS – 2015.

MATEUS, J. M. Técnicas Tradicionais de Construção de Alvenarias. Lisboa. Livros Horizonte, 2002.

MATTOS, Flávia Costa de. Análise da Influência da Pozolana Metacaulim no Desempenho de Argamassas de cal Destinadas ao Restauro de Revestimentos Externos de Prédios Históricos. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

MEIRA, Ana Lúcia Goelzer. Das pedras aos lambrequins – A preservação do patrimônio arquitetônico e urbano no Rio Grande do Sul do século XX- São Leopoldo, RS. Ed. UNISINOS, 2019.

MEIRA, G. R; Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado. Santa Catarina, 2004. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina.

MENDONÇA, Luís Viegas; AMARAL, Miguel M. do; CATARINO, Pedro Soares. A termografia por infravermelhos com ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios. Lisboa, 2010.

MENEZES, M.; VEIGA. M. R. Conhecimento científico e tradicional: que articulações possíveis no campo da conservação do patrimônio cultural. Congresso Internacional de Viollet-le Duc à Carta de Veneza – Teoria e Prática do Restauro no espaço Ibero-Americano. LNEC, Lisboa, Novembro 2014.

NADER, Rodrigues Paula. Caracterização das Argamassas Históricas da Ruína de São Miguel Arcanjo/RS. Dissertação – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2013.

NAPPI, Sérgio C. B. Uma solução alternativa para prorrogação da vida útil dos rebocos com salinidade em edifícios históricos. Tese (Doutorado em

Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, 2002.

NAPPI, Sérgio C. B.; LALANE, Manuela M. A salinidade em edifícios antigos. Córdoba, CINPAR, 2010.

NAPPI, Sérgio C. B.; TONERA, R. Alvenarias degradadas por umidade e salinidade: estudo de caso na Fortaleza de Anhatomirim. IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. Anais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil, 1997.

OLIVEIRA, Mário Mendonça de. Tecnologia da Conservação e da Restauração- Materiais e Estrutura: Um Roteiro de Estudos. Salvador. EDUFBA. 2011.

PAVÍA, S. Repair Mortars for Masonry Bridges. Bridge and Infrastructure Research in Ireland: Symposium 2006. Dublin – October 2006. pp. 183 - 190

POSSER, Natalia Dilda. Proporcionamento de Argamassas para Reboco de Recuperação- Porto Alegre: PPGE/UFGRS, 2004. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RECENA, F. A. **Técnicas Aplicáveis a Trabalhos de Restauração de Prédios de Interesse Histórico e Cultural.** Porto Alegre: IPSDP, 2014.

RODRIGUES, Maria P. S. F. **Argamassa de Revestimento para Alvenarias Antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2004.

SCARTEZINI, L. M.; CARASEK, H. Avaliação da perda de água da argamassa fresca para o substrato por sucção capilar. In: Anais do V Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. São Paulo: 2003.

SANTIAGO, C. **Argamassas tradicionais de cal.** Salvador: EDUFBA, 2007.

SANTOS SILVA, A.; BORSOI, G.; MENEZES, A. P.; COUTO, S. Caracterização química, mineralógica e micro estrutural de amostras de revestimentos interiores da Igreja do Santíssimo Sacramento em Alcântara, Lisboa. Relatório LNEC 199/2009, Lisboa, junho de 2009.

SANTOS SILVA, A.; Cal dolomítica: o passado e o presente. Cal na Construção – V Jornadas Fical – Ambiente Construído – 2018.

SEELE, Jorge Hofer, SCULZE, Maria Cristina – Relatório Técnico do Projeto: Medidas de Combate à salinidade em Monumentos Históricos – “Rebocos de Recuperação e Sua Utilização em Prédios Históricos” – Estudo de caso: A

Edificação do Quartel das Tropas na Fortaleza de Santa Cruz – Ilha de Anhatomirim – Florianópolis, SC, 1998.

TAUBE, C. R.; GAVA, G. P.; COURI, P. S. M. F. Avaliação das propriedades de uma argamassa de revestimento industrializada em comparação a uma argamassa produzida em obra. In: Anais do V Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. São Paulo: 2003.

TONERA, R. Programa de Conservação e manutenção das Fortalezas da UFSC. Projeto Fortalezas Multimídia. VI Seminário Regional de Cidades Fortificadas e Primeiro Encontro Técnico de Gestores de Fortificações. Florianópolis, SC, 2010.

VEIGA, M. R.; AGUIAR, José. Definição de estratégias de intervenção em revestimentos de edifícios antigos. 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, FEUP, Porto, Março 2003.

VEIGA, M. R. Air lime mortars what else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions. A review. Construction and Building Materials, n. 157, p. 132-140, 2017.

VEIGA, M. Rosário – Argamassa de rebocos para paredes de edifícios antigos: Requisitos e características a respeitar, in: Cadernos de Edifícios, nº 2, Lisboa, LNEC, 2002.

VEIGA, M. Rosário; CARVALHO, Fernanda – Argamassas de reboco para paredes de edifícios. Requisitos e características a respeitar, Lisboa, LNEC, Outubro 2002. Cadernos de Edifícios, nº 2.

VEIGA, M. Rosário, TAVARES, Martha. Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura. Actas do Encontro A indústria das tintas no início do século XXI. Lisboa, APTETI, Outubro de 2002.

VEIGA, M. Rosário. Intervenções em revestimentos antigos: conservar, substituir ou destruir. 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de edifícios. Porto 20 e 21 de março de 2006.

VELOSA, A. L. P. L. Influência das Adições Pozolânicas em Argamassas de Cal para Conservação de Edifícios Antigos. Cadernos de Edifícios, Nº 2, LNEC, 2002.

VELOSA, A. L. P. L. Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas. Aveiro, 2006. 467 Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.

WTA 2-2-91 – Recomendações Alemãs para Sistemas de Rebocos de Recuperação. Métodos de Tratamento de Alvenarias Deterioradas. Tradução Hélio Adão Greven. In: Seminário sobre Recuperação de Obras Históricas de Engenharia e Arquitetura: Avaliação do Estado de Conservação, Análise, Diagnóstico e Terapia. UFRGS, Porto Alegre, abril/1995.

WTA 2-2-95 - Recomendações Alemãs para Sistemas de Rebocos de Recuperação. Métodos de Tratamento de Alvenarias Deterioradas. Tradução Hélio Adão Greven. In: Seminário sobre Recuperação de Obras Históricas de Engenharia e Arquitetura: Avaliação do Estado de Conservação, Análise, Diagnóstico e Terapia. UFRGS, Porto Alegre, abril/1995.

WTA Wissenschaftlich-TechnischArbeitsgemeinschaftfurBauwerkserhaltungundDenkmalpflege E. V. Sistema de Reboco de Recuperação – Caderno de Recomendações 2-2-91. In: Seminário sobre Recuperação de Obras Históricas de Engenharia e Arquitetura: Avaliação do Estado de Conservação, Análise, Diagnóstico e Terapia: Porto Alegre, UFRGS, abril/ 1995.

ZEN, B. P. Síntese de zeólitas a partir de cinzas de carvão e aplicação como adsorventes. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2016.

ZIZKOVÁ, Nikol; BORG, Ruben Paul; HODUL, Jakub; CERNÝ, Vit. Repair Mortars Containing Fly Ash and Crystalline Admixture. Waste Forum, 2019, Císlo 3. pp 254-266..

REFERENCIAS CONSULTADAS

- BEICHEL, Adolf. Restauração de Alvenaria Úmida com Salinidade. II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais. CETA/ANTAQ, Salvador, 1997.
- BUERGO, Monica Alvarez de; LIMÓN, Tereza Gonzales. Restauración de Edifícios Monumentales. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales – Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madri, 1994.
- CAMARGO, D. J. de; MOREIRAS, S. T. F. Estudo da Influência granulométrica do Agregado Miúdo para uso em Argamassas de Revestimento. Universidade Estadual de Maringá – Departamneto de Tecnologia – Umuarama, PR, 2017.
- CAVANI, Gilberto R.; ANTUNES, Rubiane P. N.; JOHN, Vanderlei M. Influência do teor de ar incorporado na trabalhabilidade das argamassas. Simpósio brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Salvador – BA, 1997.
- CINCOTTO, Maria Alba. Patologia das Argamassas de Revestimento: Análise e Recomendações. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT. São Paulo, SP, 1989.
- DIAS C. R. R.; CUNHA, R. O.; FERRARI, A. S. A utilização de rebocos de recuperação na capela São Francisco de Assis. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 1, p. 57-66, nov. 2000.
- EICHLER, Friederich. Patologia de la Construcción. Editorial Labor, Barcelona, 1973.
- FEILDEN, Bernard M. Conservation Historic Buildings. Oxford: Butterworth Architecture, 1994.
- FIORITO, A. J. S. I. Manual de Argamassas e Revestimentos: Estudo e Procedimentos de Execução. São Paulo, Pini, 1994.
- FISHER, R. Paredes. Editorial Blume, Barcelona, 1976.
- FÜLLER, Josef. Manual do Formador e Estucador. Biblioteca de Instrução Profissional. Editora Livrarias Aillaud e Bertrand. Lisboa, s. d.
- HUGHES, J. Compressive and flexural strength testing of brick masonry panels constructed with two contrasting traditionally produced lime mortars, RILEM, Delft, Janeiro 2005.
- LARSEN, Poul K. The Development and Testing of a Salt Extracting Mortar, 2001.

LUBELLI, Bárbara; HEES, Rob P. J. Desalination of Structures: Fine Tuning of Pore Size Distribution of Poultrices to Substrate Properties. *Journal of Cultural Heritage*, 2010.

LUXÁN, M. P. Características de las argamassas antigas desde la perspectiva de los revocos e su durabilidad, Encontro Sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Lisboa, Maio 2003.

MALINOWSKI, E. S. Historic mortars revived, Repair Mortars for HistoricMasonry, RILEM, Delft, Janeiro 2005.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais. Ed. Pini. São Paulo, 1994.

OLIVEIRA, Mário Mendoça de. Argamassas e Conservação de Edfícios. Métodos de Tratamento de Alvenarias Deterioradas. Tradução Hélio Adão Greven. In: Seminário sobre Recuperação de Obras Históricas de Engenharia e Arquitetura: Avaliação do Estado de Conservação, Análise, Diagnóstico e Terapia. UFRGS, Porto Alegre, abril/1995.

PAPAYIANNI, Ioanna. Criteria and methodology for manufacturing compatible repair mortars and bricks. *Compatible Materials Recommendations for the Preservation of European Cultural Heritage*. Atenas, 1998.

PETRUCCI, Eládio G. R. *Materiais de Construção*. Editora Globo – Porto Alegre, 1975.

PINHO, Fernando F. da Silva. *Paredes de Edifícios Antigos em Portugal*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC. Lisboa, 2000.

PINTO, J. A. N. *Elementos para dosagem de argamassas*, Santa Maria, Edições UFSM, 1986.

RUARO, Paulo; GREVEN, Hélio Adão; DAL MOLIN, Denise Carpena. Avaliação do Sistema Eletro-osmótico Ativo – SEOA na dessalinização de alvenarias de edificações históricas IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. Anais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil, 1997.

UEMOTO, K. L. *Patologia: Danos causados por eflorescências*. Tecnologia de Edificações. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT. São Paulo, SP, 1984.

VEIGA, M. Rosário. Argamassas para revestimentos de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações, 3º Encore, LNEC, Lisboa 2003.

VEIGA, M. Rosário. Protecção contra a água de paredes de edifícios antigos. Avaliação experimental da capacidade de protecção de argamassa de reboco com base em cal. Conservação e Reabilitação de Estruturas – REPAR 2000, LNEC, Lisboa, Junho 2000.

APENDICE

Relatórios dos ensaios de retenção de íons cloreto feitos nas amostras do revestimento da Catedral de São Pedro



RELATÓRIO

Ensaio – Teor de cloretos em revestimento e alvenaria da Catedral de Rio Grande.

Cliente – Eng. Jorge Nunes

Data – ago / 2018

Material – Amostras extraídas do ponto de coleta **L1** da fachada Leste, em 24/04/18.

Ensaios – ensaio de potenciometria com eletrodo de prata/cloreto de prata, com precisão de 0,01%.

Resultados:

Amostra	Teor de cloretos - %
Pintura	0,02
L1-1	0,01
L1-2	zero
L1-3	zero
L1-4	0,06
L1-5	0,01
L1-6	zero
L1-7	zero
L1-8 tijolo/argamassa	0,01
L1- 8 tijolo	zero

Rio Grande, 30 de agosto de 2018.

Resp. LQM – Prof. André Guimarães

Lab. de Química dos Materiais – LCC/LQM – (53) 32935336
Responsável – Prof. André Guimarães – (53) 991644316 – atcg@vetorial.net



RELATÓRIO

Ensaio – Teor de cloretos em revestimento e alvenaria da Catedral de Rio Grande.

Cliente – Eng. Jorge Nunes

Data – ago / 2018

Material – Amostras extraídas do ponto de coleta **L2** da fachada Leste, em 24/04/18.

Ensaios – ensaio de potenciometria com eletrodo de prata/cloreto de prata, com precisão de 0,01%.

Resultados:

Amostra	Teor de cloretos - %
Pintura	0,38
L2-1	0,13
L2-2	0,09
L2-3	0,10
L2-4	0,05
L2-5	0,03
L2-6	zero
L2-7	0,01

Rio Grande, 06 de setembro de 2018.

Resp. LQM – Prof. André Guimarães

Lab. de Química dos Materiais – LCC/LQM – (53) 32935336
Responsável – Prof. André Guimarães – (53) 991644316 – atcg@vetorial.net



RELATÓRIO

Ensaio – Teor de cloretos em revestimento e alvenaria da Catedral de Rio Grande.

Cliente – Eng. Jorge Nunes

Data – nov / 2018

Material – Amostras extraídas do ponto de coleta L3 na fachada Leste, em 24/04/18.

Ensaio – ensaio de potenciometria com eletrodo de prata/cloreto de prata, com precisão de 0,01%.

Resultados:

Amostra	Teor de cloretos - %
Pintura	0,05
L3-1	0,05
L3-2	0,04
L3-3	0,04
L3-4	0,02
L3-5 interface	0,02
L3-6 junta horizontal	zero
L3-6 tijolo	zero
L3-7 junta horizontal	zero

Rio Grande, 06 de novembro de 2018.

Resp. LQM – Prof. André Guimarães

Lab. de Química dos Materiais – LCC/LQM – (53) 32935336
Responsável – Prof. André Guimarães – (53) 991644316 – atcg@vetorial.net



RELATÓRIO

Ensaio – Teor de cloretos em revestimento e alvenaria da Catedral de Rio Grande.

Cliente – Eng. Jorge Nunes

Data – nov / 2018

Material – Amostras extraídas do ponto de coleta L4 da fachada Leste, em Nov/18.

Ensaio – ensaio de potenciometria com eletrodo de prata/cloreto de prata, com precisão de 0,01%.

Resultados:

Amostra	Teor de cloretos - %
L4-1	0,01
L4-2	0,01
L4-3	zero
L4-4	zero
L4-5	zero
L4-6	zero

Rio Grande, 17 de dezembro de 2018.

Resp. LQM – Prof. André Guimarães



RELATÓRIO

Ensaio – Teor de cloretos em revestimento e alvenaria da Catedral de Rio Grande.

Cliente – Eng. Jorge Nunes

Data – nov / 2018

Material – Amostras extraídas do ponto de coleta **O1** da fachada Oeste, em 24/04/18.

Ensaio – ensaio de potenciometria com eletrodo de prata/cloreto de prata, com precisão de 0,01%.

Resultados:

Amostra	Teor de cloretos - %
Pintura	0,04
O1-1	zero
O1-2	zero
O1-3	zero
O1-4	0,01
O1-5	0,02
O1-6	0,02
O1-7 arg. assentamento	0,01
O1-7 Tijolo	zero

Rio Grande, 06 de novembro de 2018.

Resp. LQM – Prof. André Guimarães

Lab. de Química dos Materiais – LCC/LQM – (53) 32935336
Responsável – Prof. André Guimarães – (53) 991644316 – atcg@vetorial.net



RELATÓRIO

Ensaio – Teor de cloretos em revestimento e alvenaria da Catedral de Rio Grande.

Cliente – Eng. Jorge Nunes

Data – nov / 2018

Material – Amostras extraídas do ponto de coleta **O2** da fachada Oeste, em 24/04/18.

Ensaio – ensaio de potenciometria com eletrodo de prata/cloreto de prata, com precisão de 0,01%.

Resultados:

Amostra	Teor de cloretos - %
Pintura	0,03
O2-1	zero
O2-2	0,01
O2-3	zero
O2-4	0,03
O2-5	0,05
O2-6	0,03
O2-7	zero
O2-8	0,01
O2-9 inferior - só tijolo	zero
O2-9 superior – tijolo e arg.	zero

Rio Grande, 06 de novembro de 2018.

Resp. LQM – Prof. André Guimarães

Lab. de Química dos Materiais – LCC/LQM – (53) 32935336
Responsável – Prof. André Guimarães – (53) 991644316 – atcg@vetorial.net



RELATÓRIO

Ensaio – Teor de cloretos em revestimento e alvenaria da Catedral de Rio Grande.

Cliente – Eng. Jorge Nunes

Data – nov / 2018

Material – Amostras extraídas do ponto de coleta **O3** da fachada Oeste, em nov/18.

Ensaio – ensaio de potenciometria com eletrodo de prata/cloreto de prata, com precisão de 0,01%.

Resultados:

Amostra	Teor de cloretos - %
Pintura	0,01
O1	0,08
O2	0,05
O3	0,02
O4	0,01

Rio Grande, 17 de dezembro de 2018.

Resp. LQM – Prof. André Guimarães