

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

ALEXANDRE MÁXIMO SILVA LOUREIRO

**ARGAMASSAS PARA DESSALINIZAÇÃO DE
ALVENARIA MISTA DE EDIFÍCIO HISTÓRICO DE
BELÉM**

BELÉM
2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

ALEXANDRE MÁXIMO SILVA LOUREIRO

**ARGAMASSAS PARA DESSALINIZAÇÃO DE
ALVENARIA MISTA DE EDIFÍCIO HISTÓRICO DE
BELÉM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Thais Alessandra Bastos Caminha Sanjad

Área de Concentração - Conservação, Restauro e Tecnologia

BELÉM
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Loureiro, Alexandre Máximo Silva, 1986-
Argamassas para dessalinização de alvenaria
mista de edifício histórico de Belém /
Alexandre Máximo Silva Loureiro. - 2013.

Orientador: Rômulo Simões Angélica;
Coorientadora: Thais Alessandra Bastos
Caminha Sanjad.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de
Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Belém,
2013.

1. Materiais-Deterioração. 2. Eflorescência.
3. Umidade. 4. Argamassa. 5. Bentonita. I.
Título.

CDD 22. ed. 620.1122

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

Argamassas para dessalinização de alvenaria mista de edifício histórico de Belém.

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.
Área de Concentração – Conservação, Restauro e Tecnologia.**

APROVADO EM: 05/09/2013.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica (Orientador)
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr^a. Thais Alessandra Bastos Caminha Sanjad (Coorientadora)
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Roberto de Freitas Neves (Membro Externo)
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Márcio Santos Barata (Membro Interno)
Universidade Federal do Pará

BELEM
2013

Aos meus amados e queridos pais,

Antônio e Leila

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado sabedoria e saúde para iniciar e concluir mais uma etapa de minha vida.

Aos meus pais, Antônio e Leila, por terem me dado todo apoio que necessitei durante todos esses anos, sempre incentivando minhas decisões corretas e repreendendo quando necessário, sendo os exemplos em quem me espelho.

Em especial à Amanda Pinto por compartilhar e dividir comigo os momentos mais importantes de minha vida com sabedoria, amor e paciência, sempre com palavras e atitudes que ajudaram a tornar os caminhos árduos mais agradáveis diariamente.

À professora Thais Sanjad por ter confiado no meu trabalho e pelas orientações e conselhos sempre muito pertinentes, mostrando que para atuar na área de preservação e restauração não somente o conhecimento é necessário, mas também o amor pelo que se faz.

Ao professor Rômulo Angélica por ter me orientado e ajudado nos momentos em que solicitei, sendo um grande profissional pelo seu comprometimento acadêmico e pela facilidade de explicar de forma simples conceitos complexos.

À professora Rose Norat, por ter me dado a oportunidade de conhecer o trabalho com restauração e preservação no DPHAC, além de sempre estar disposta a ajudar e auxiliar no que lhe for solicitado.

Ao professor Márcio Barata por ter auxiliado e norteado na etapa de aplicação das argamassas de dessalinização e por sempre estar interessado no andamento do trabalho e disposto a ajudar no que fosse necessário.

Ao professor Roberto Neves por ter fornecido gentilmente o caulim utilizado nesta pesquisa.

À todos que fazem parte do LACORE que colaboraram direta e indiretamente para conclusão do trabalho em especial: Flávia Palácios, Juliana Moreira, Mayra Martins, Paula Abreu, Stephanie Mendes e Virgínia Guerreiro.

À FAPESPA pela bolsa de mestrado concedida.

À SECULT que gentilmente autorizou a realização desta pesquisa, em especial à Thais Toscano.

Aos Professores da UFBA Mário Mendonça e Cybèle Santiago e ao químico Allard Monteiro que sempre foram solícitos quando necessário em minha estadia em missão de estudos na Bahia.

Aos laboratórios da UFPA e da UFBA que possibilitaram a realização das análises laboratoriais: Laboratório de Conservação, Restauração e Reabilitação (LACORE/UFPA), Laboratório de Caracterização Mineral (LCM/UFPA), Laboratório de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (LaMIGA/UFPA) e Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração (NTPR/UFBA).

RESUMO

Nos monumentos históricos de Belém as alvenarias estruturais, juntamente com os alicerces e pilares, são responsáveis pelo sustento da edificação (VASCONCELLOS, 1979). Estas alvenarias são constituídas de pedras e tijolos maciços assentados com argamassa de cal e podem apresentar diversas patologias dentre as quais se destacam a eflorescência salina e a ação da umidade. Estes dois agentes ocasionam destacamento de camadas, pulverização de argamassa, surgimento de fendas e aparência esbranquiçada nas alvenarias (HENRIQUES, 1994; CHAROLA, 2000).

A pesquisa tem como principal objetivo a identificação, caracterização e amenização da eflorescência salina, por meio do 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 atuantes e quais materiais são eficientes para dessalinização.

Primeiramente foi realizado o mapeamento da alvenaria e o mapeamento de danos para verificar a situação atual e as áreas mais degradadas. Posteriormente foi realizada a caracterização física, química e mineralógica: 1) caracterização física por meio de análise granulométrica por difração a laser, análise de traço e análise do teor de umidade da alvenaria, 2) caracterização química por meio de teste qualitativo e quantitativo de sais e 3) caracterização mineralógica por Difração de Raios-X.

A Difração de Raios-X também foi utilizada para avaliar a eficácia de quatro tipos de argamassas de dessalinização que continham argilas (Bentonita e Caulim) e areia em diferentes relações.

Ao final do trabalho verificou-se que as técnicas sugeridas para caracterização e mapeamento da alvenaria se mostraram eficientes e auxiliaram no diagnóstico correto da problemática existente. Além disso, chegou-se a conclusão de quais argamassas são mais recomendadas para dessalinização de alvenarias degradadas por eflorescência salina.

Palavras-chave: Eflorescência, Umidade, Dessalinização, Bentonita, Caulim.

ABSTRACT

In the historical monuments of Belém structural masonry, along with the foundations and pillars, are responsible for supporting the building (VASCONCELLOS, 1979). These masonry are made of stone and solid bricks with lime mortar setting and can present various pathologies among which stand out the action of salt efflorescence and moisture. These two agents cause detachment of layers, mortar spraying, the appearance of cracks in masonry, and whitish appearance (HENRIQUES, 1994; CHAROLA, 2000).

The research has as main objective the identification, characterization and attenuation of salt efflorescence, through study of the masonry of the right transept of the Church of St. Alexandre, located in historic downtown of Belém-PA. For this, laboratory techniques were used in order to understand the favorable process conditions of salt efflorescence, the damage to the materials, the kinds of salts and which materials are effective for desalination.

First was the mapping the masonry and mapping damage to verify the current situation and the most degraded areas. Was subsequently performed the physical, chemical and mineralogical characterization: 1) physical characterization by sieve analysis, trace analysis and analysis of the moisture content of the masonry, 2) chemical characterization through qualitative and quantitative testing of salts and 3) characterization mineralogy by X-ray diffraction.

The X-ray diffraction was also used to evaluate the efficacy of four types of desalination mortars containing clay (bentonite and kaolin) and sand in different ratios.

At the end of the study it was found that the suggested techniques for characterization and mapping of the masonry proved efficient and aided in the correct diagnosis of the existing problem. Moreover, the research showed which kinds of mortar are recommended to desalination of masonry damaged by salt efflorescence.

Keywords: Efflorescence, moisture, Desalination, Bentonite, Kaolin.

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

DRX: Difração de Raios-X

FRX: Fluorescência de Raios-X

IPHAN: Instituto de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

LACORE: Laboratório de Conservação, Restauração e Reabilitação

LaMIGA: Laboratório de Mineralogia Aplicada

LNEC: Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal

NTPR: Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração

UFBA: Universidade Federal da Bahia

UFPA: Universidade Federal do Pará

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Remoção do reboco de revestimento da Capela do São José Liberto.	15
Figura 2: Eflorescências situadas em alvenaria no porão do Arquivo Público do Estado do Pará.....	16
Figura 3: Composição dos materiais pétreos: (A) água, (B) água + sais solúveis, (C) água + sais solúveis + material poroso.	17
Figura 4: Momento em que há o transporte de sais solúveis para superfície através da água ocasionando a eflorescência.	17
Figura 5: Criptoflorescência: Acúmulo de sais na camada anterior a superfície.	19
Figura 6: Danos causados pela salinidade: Pulverização da argamassa (a), aparência branca nas paredes (b), destacamento de camadas (c) e surgimento de fendas (d).	19
Figura 7: Gradientes de umidade ao longo da largura da parede	24
Figura 8: Localização da Igreja de Santo Alexandre.	28
Figura 9: Remoção do reboco da alvenaria frontal da Igreja de Santo Alexandre.	29
Figura 10: Fachada pintada com tinta branca.	30
Figura 11: Igreja de Santo Alexandre interligada ao Palácio Episcopal.	30
Figura 12: Capela do transepto direito da Igreja de Santo Alexandre.	32
Figura 13: Identificação dos pontos de coleta, com base na Figura 12.....	32
Figura 14: Perfuratriz portátil e broca diamantada utilizada para coleta de argamassas.....	33
Figura 15: Localização em planta da alvenaria estudada.	41
Figura 16: Imagem retificada do transepto direito da Igreja de Santo Alexandre.	42
Figura 17: Mapeamento da Alvenaria a partir da foto retificada. Os elementos constituintes são os blocos de arenito ferruginosos (vermelho) e os tijolos cerâmicos maciços (amarelos) dispersos na argamassa (branco).....	42
Figura 18: Levantamento de danos da alvenaria do transepto direito da Igreja de Santo Alexandre.....	44
Figura 19: (a) Curva granulométrica dos grossos e (b) curva granulométrica dos finos da argamassa de assentamento.....	45
Figura 20: Difratoograma de Raios-X com a composição mineralógica da argamassa, exemplificada pela amostra ST3B.	46
Figura 21: Percentual do teor de umidade em cada ponto de coleta, caracterizando a umidade presente como ascendente.	47
Figura 22: Teste qualitativo de sais: (a) cloretos, (b) nitratos e (c) sulfatos.	48
Figura 23: Distribuição quantitativa do cloreto na alvenaria do transepto direito.	49

Figura 24: Difratoograma de Raios-X do caulim da Imerys. Os traços pretos correspondem a posição dos picos de um padrão (Ficha PDF) de caulinita....	52
Figura 25: Curva granulométrica do Caulim.....	53
Figura 26: Difratoograma de Raios-X da bentonita.....	54
Figura 27: Curva granulométrica da Bentonita.....	55
Figura 28: Curva granulométrica da Areia.....	56
Figura 29: Difratoogramas de Raios-X da Argamassa B_11: Antes de aplicação (vermelho) e Após aplicação (azul).....	57
Figura 30: Difratoogramas de Raios-X da Argamassa B_13: Antes de aplicação (vermelho) e Após aplicação (azul).....	57
Figura 31: Difratoogramas de Raios-X da Argamassa C_11 antes de aplicação (vermelho) e após aplicação (azul): presença do mineral nitratina após aplicação.....	58
Figura 32: Difratoogramas de Raios-X da Argamassa C_13: antes de aplicação (vermelho) e após aplicação (azul).....	59
Figura 33: Argamassas de dessalinização após sete dias: (a) C_11 e (b) C_13.....	60
Figura 34: Argamassas de dessalinização após sete dias: (a) B_11 e (b) B_13.....	60
Figura 35: Amostras das argamassas de dessalinização após a coleta: (a) B_11 e (b) C_11.....	61
Figura 36: Imagens antes e depois da aplicação das argamassas de dessalinização caulim no substrato após sua retirada: (a) C_11, (b) C_13, (c) B_11 e (d) B_13.....	62
Figura 37: Procedimento para dessalinização superficial de alvenaria com argamassa de bentonita.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais sais nas edificações históricas e suas prováveis origens.	18
Tabela 2: Análises Laboratoriais para caracterização física, química e mineralógica.	34
Tabela 3: Traços das argamassas de dessalinização.	40
Tabela 4: Análise química dos elementos maiores por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X da amostra de Caulim.	53
Tabela 5: Análise química dos elementos maiores por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X da amostra de bentonita.	55

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	Eflorescência salina em edificações antigas	17
2.2	Umidade em edifícios antigos.....	21
2.3	Métodos de recuperação existentes	25
3.	EDIFICAÇÃO ESTUDADA	28
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1	Materiais.....	31
4.2	Mapeamento da alvenaria	33
4.3	Procedimentos Laboratoriais	33
4.3.1	Determinação do Teor de Umidade.....	34
4.3.2	Análise Qualitativa de Sais Solúveis.....	35
4.3.3	Análise Quantitativa de Cloreto	36
4.3.4	Determinação do traço mais provável	36
4.3.5	Análise Granulométrica por Difração a Laser	37
4.3.6	Difratometria de Raios-X (DRX)	38
4.3.7	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)	38
4.4	Procedimento de intervenção	39
5.	RESULTADOS	41
5.1	A Degradação da Alvenaria Mista do Transepto Direito da Igreja de Santo Alexandre.....	41
5.1.1	Características da Alvenaria.....	41
5.1.2	Argamassa	44
5.1.3	Umidade	46
5.1.4	Sais.....	47
5.1.5	Teste Quantitativo de Sais – Cloreto	49
5.1.6	Discussões	50
5.2	APLICAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE DESSALINIZAÇÃO.....	52
5.2.1	Caracterização dos Materiais de Partida: Caulim, Bentonita e Areia... 52	
5.2.2	Argamassas.....	56
5.2.3	Efeitos Superficiais no Substrato.....	59
5.2.4	Discussões	63

6.	CONCLUSÕES.....	65
	REFERÊNCIAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

Em Belém do Pará, as alvenarias históricas são constituídas de tijolos maciços e pedras, assentados com argamassa de cal, sendo estas, em sua maioria, alvenarias estruturais, ou seja, aquelas que, além de possuírem função de vedação suportam por toda sua extensão cargas da construção (PETRUCCI, 1975).

Comumente se empregava a “pedra jacaré” (arenito ferruginoso), descritas também como “pedra areienta mineralizada de ferro” (CRUZ, 1898), tanto em alvenarias estruturais quanto para a construção de alicerces e pilares das edificações antigas de Belém.

Estas pedras possivelmente eram provenientes da pedreira do Guamá, localizada nas proximidades do rio, mencionada por Domingos Raiol, o Barão do Guajará (CRUZ, 1898). Juntamente com tijolos maciços, eram assentadas com argamassa de cal, areia e barro, sendo essa mistura também aplicada para rebocar as alvenarias, como citado por Wallace (1848 apud Cruz, 1898). Este autor afirma que as casas comuns eram “irregulares e baixas, e na sua maior parte, de alicerces construídos de uma pedra ferruginosa muito comum nos arredores da cidade, e paredes emboçadas”.

A cal presente nas argamassas era obtida por meio da calcinação de conchas coletadas nos chamados banco de conchas que se encontravam não só no continente como também ao longo do litoral. No largo da Sé, foram construídos fornos de cal, não havendo, entretanto, indicação do resultado de seu aproveitamento, muito embora tivesse sido amplo, dado o número de casas que se levantaram nos bairros da Cidade e da Campina, com as suas paredes feitas de cal e pedra, sólidas e bem construídas (CRUZ, 1898).

Estas argamassas antigas podem conter outros componentes, provenientes da própria matéria prima (gesso, barro, pó de tijolo, grude de gurijuba, etc.) ou provenientes de contaminação do material de origem (fragmentos de raízes, sais, etc.). Dentre essas impurezas, podem estar presentes os sais que provocam as eflorescências salinas, com destaque para os cloretos, pois na maioria das vezes a areia e a cal eram de origem marinha, que contém halita (cloreto de sódio). Mas não somente os cloretos são prejudiciais às argamassas: os nitratos, os sulfatos e os carbonatos também fazem parte dos sais encontrados em eflorescências nas alvenarias de edifícios históricos (CHAROLA, 2000).

Os prédios históricos de Belém estão passando por uma série de transformações e adequações para que possam receber novos usos e funções. Trata-se de um momento delicado, por duas razões principais: a) para que não se comprometa a unidade artística do monumento, e b) para que não haja comprometimento estrutural na edificação.

Em alguns casos estas intervenções podem acelerar o processo de degradação das alvenarias históricas como, por exemplo, a remoção do reboco das alvenarias. Esta prática pode ser observada em alguns projetos de intervenção de edifícios históricos de Belém, como na capela do São José Liberto (Figura 1), no Arquivo Público do Estado do Pará, na Igreja de Santo Alexandre, dentre outros.

Figura 1: Remoção do reboco de revestimento da Capela do São José Liberto.



Nestas edificações, também houve a inserção de ar condicionado, equipamento cada vez mais frequente não somente em edifícios históricos, mas em qualquer tipo de edificação por fatores climáticos da região, pois possibilita maior conforto térmico para os usuários.

No momento em que se retira o reboco das paredes e se climatiza artificialmente o ambiente, há uma alteração no micro clima que estava consolidado, reduzindo a umidade relativa do ar e possibilitando a rápida cristalização dos sais na

superfície do substrato, desta forma, acelerando o processo de degradação por salinização (Figura 2).

Figura 2: Eflorescências situadas em alvenaria no porão do Arquivo Público do Estado do Pará.



Estas eflorescências e criptoflorescências salinas provocam danos estéticos e estruturais ao substrato. Assim, torna-se de extrema importância a criação de uma tecnologia que possibilite a amenização do problema utilizando materiais regionais e economicamente viáveis. Isto possibilitará uma manutenção frequente evitando que este tipo de patologia comprometa obras de grande valor estético e histórico para o município de Belém.

O objetivo geral desta pesquisa consiste na identificação, caracterização e amenização do problema da eflorescência salina em edifício histórico em Belém do Pará.

Os objetivos específicos são:

- Entender as condicionantes favoráveis ao processo de eflorescência salina em alvenaria de edificação histórica de Belém, os danos provocados ao material e os tipos de sais mais atuantes;
- Avaliar meios de amenizar o processo de eflorescência por meio da aplicação de materiais capazes de remover o sal das camadas mais externas da alvenaria.

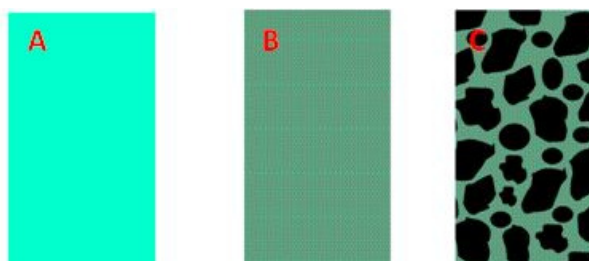
2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Eflorescência salina em edificações antigas

Segundo Charola (2000) os edifícios históricos, ao longo dos séculos, podem acumular sais solúveis em suas alvenarias provindos da poluição do ar, sais de degelo, solo, água do mar, tratamentos inadequados, ou interação entre materiais de construção. Estes sais tornam-se evidentes como eflorescências causando danos estruturais e estéticos a estas alvenarias.

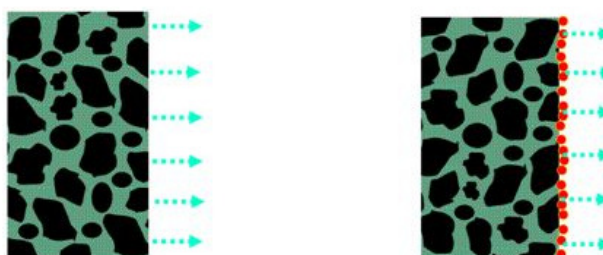
De acordo com Gonçalves (2006), os materiais pétreos são compostos basicamente de água, sais solúveis e material poroso (Figura 3). Estes sais no estado solúvel não provocam danos ao substrato, o problema ocorre no momento da cura destes materiais pétreos, pois há um processo de saída de água, possibilitando o transporte de sais que se acumulam na superfície da parede com posterior cristalização (Figura 4). Este tipo de patologia faz com que a alvenaria apresente manchas de umidade e material pulverulento e branco acumulado em sua superfície (GEWEHR, 2004).

Figura 3: Composição dos materiais pétreos: (A) água, (B) água + sais solúveis, (C) água + sais solúveis + material poroso.



Fonte: LNEC, 2006.

Figura 4: Momento em que há o transporte de sais solúveis para superfície através da água ocasionando a eflorescência.



Fonte: LNEC, 2006.

Dentre os principais sais existentes nas alvenarias das edificações históricas, Oliveira (2006) classifica como agentes patológicos, os cloretos (NaCl e CaCl_2), sulfatos (CaSO_4 , NaSO_4 e MgSO_4), nitratos (KNO_3 , NaNO_3 e $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) e carbonatos (CaCO_3). Estes sais possuem diversas origens (Tabela 1), sendo os cloretos os mais presentes nas alvenarias de edifícios históricos.

Tabela 1: Principais sais nas edificações históricas e suas prováveis origens.

TIPOS DE SAIS	FONTE PROVÁVEL
Cloretos	Material ou solo contaminado.
Nitratos	Presença de material orgânico (solo adubado ou contaminado (esgoto) ou dejetos de aves).
Sulfatos	Interação entre materiais novos e antigos (ex: Argamassa de cal reagindo com argamassa de cimento)
Carbonatos	Carbonatação da cal lixiviada da argamassa e de argamassa de cal não carbonatada.

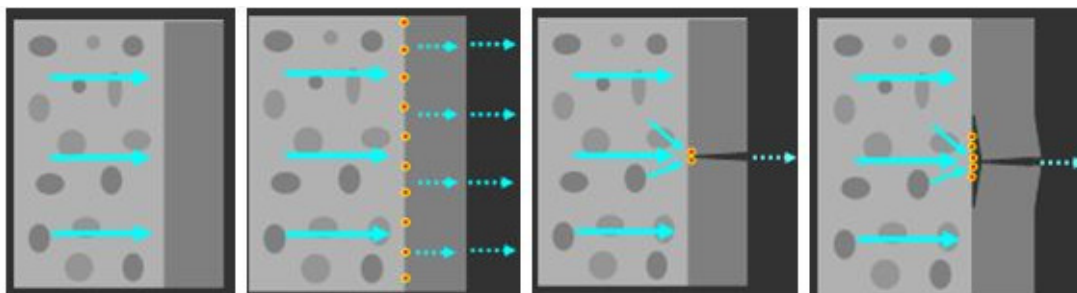
Fonte: GEWEHR, 2004

Os cloretos geralmente são de origem marinha, provenientes de materiais contaminados como a concha e a areia utilizada na produção da argamassa. A contaminação também pode ocorrer por umidade ascendente quando o solo contém este tipo de sal. Este problema torna-se mais comum nos edifícios históricos, principalmente pelo fato destas edificações não possuírem impermeabilização de suas estruturas por questões tecnológicas da época.

Oliveira (2011) também diz que outro fator que agrava a cristalização dos sais nos edifícios históricos é a inserção da climatização artificial, ocasionando a remoção da umidade do ar e, conseqüentemente, das paredes, acelerando o processo de cristalização. Por isso é importante verificar as condições em que o sal começa a se cristalizar, principalmente em qual umidade relativa ele começa a se formar. Por exemplo, o nitrato de sódio começa a se cristalizar somente quando a umidade relativa cai para 60%, pois seu equilíbrio ideal é de 75,4% a 20°C, sendo assim poderia ser evitada a patologia controlando a umidade relativa (CHAROLA, 2000).

Além da eflorescência pode ocorrer a criptoflorescência, quando os sais solúveis se acumulam em uma camada anterior a superfície (Figura 5).

Figura 5: Criptoflorescência: Acúmulo de sais na camada anterior a superfície.

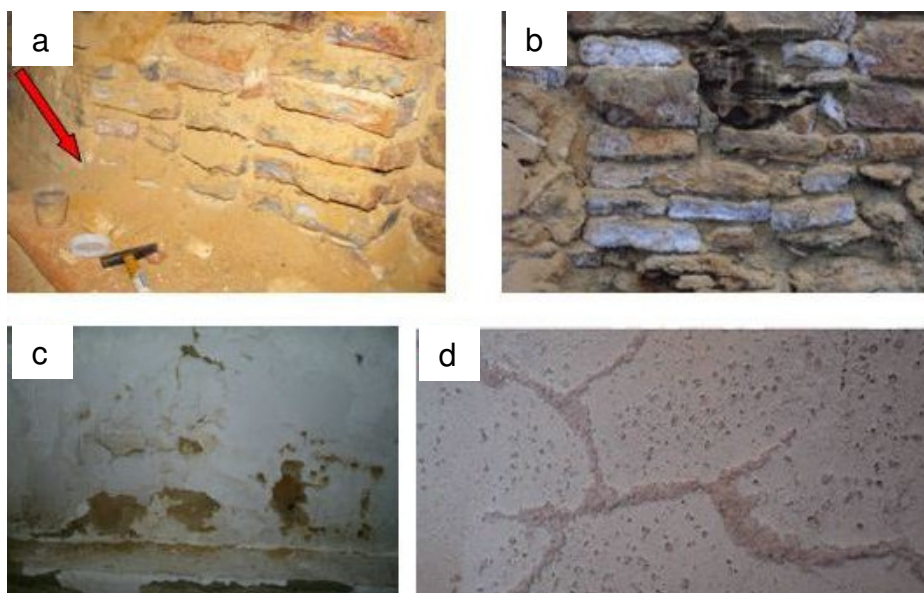


Fonte: LNEC, 2006.

Este tipo de patologia causa a obstrução dos canais porosos fazendo com que a capilaridade chegue até níveis mais altos na parede acima dos já existentes. Com a cristalização e conseqüente expansão, os sais destroem a estrutura do material e provoca o descolamento em placas ou em grumos (GEWEHR, 2004).

Os principais danos causados pela eflorescência e pela criptoflorescência são a pulverização da argamassa, aparecimento de camadas, aparência branca nas paredes e surgimento de fendas (Figura 6).

Figura 6: Danos causados pela salinidade: Pulverização da argamassa (a), aparência branca nas paredes (b), destacamento de camadas (c) e surgimento de fendas (d).



Charola (2000) em seus experimentos conclui que existem quatro estágios na cristalização dos sais:

1. Sais começam a se cristalizar nos poros grandes do material;

2. Cristais continuam a crescer ainda em solução. Neste momento pressões são geradas até prejudicar a estrutura onde estão crescendo, geralmente começam a surgir fissuras ao longo do material.

3. Fissuras induzidas anteriormente aceleram a evaporação da solução, isto faz com que cristais fibrosos comecem a crescer.

4. Crescimento fibroso se torna em um crescimento mais fino que levam a descamação da superfície.

Em outro experimento, Charola (2000) analisa os efeitos do cloreto de sódio em um material poroso. Percebeu-se que a halita se cristaliza na interface ar-solução e também dentro da solução. Observou-se também que o crescimento dos cristais de halita é lento se comparado aos outros sais e a forma dos cristais de halita é perfeitamente cúbica dentro da solução enquanto que na interface ar-solução os cristais de halita são mais finos (bigode de gato), ocasionando a pulverização e destacamento de camadas material.

Para que ocorra a eflorescência deve haver uma fonte de sais, uma fonte de umidade que sirva de transporte dos sais solúveis para superfície e a evaporação ou pressão hidrostática deve possibilitar a migração da solução de sais. Desta forma, para que haja degradação os sais devem estar dentro dos poros do material, e é necessário que haja presença de água e umidade (HENRIQUES, 1994).

A dilatação e contração, por influência da umidade e sais solúveis, modifica a superfície de contorno e afetam o espaço intergranular. Isto afeta a micrografia original do material, através do deslocamento dos grãos devido à mudança de umidade e a presença de sais. Estes sais dissolvidos exercem um efeito sobre os poros menores ampliando-os e fornecendo mais espaço para cristalização dos sais (CHAROLA, 2000).

O principal responsável pelo dano é a pressão de cristalização, mas neste tipo de problemática a pressão hidrostática também está presente e provoca danos. Estas pressões aumentam com a redução do tamanho dos poros, isto é, quanto menor o tamanho dos poros maior será a pressão e conseqüentemente o dano.

Quando se tem poucos poros pequenos, o material será mais resistente à cristalização, como por exemplo, o mármore. Estes sais se acumulam nas paredes dos poros causando tensões de cisalhamento devido mudança de temperatura e de umidade.

De acordo com Charola (2000), em uma parede com umidade ascendente os sais se cristalizam em diferentes alturas dependendo de sua solubilidade. Neste caso existem três zonas: a primeira possui menos danos do que a segunda, esta se localiza mais próxima ao solo; a segunda zona, logo acima da primeira, em geral encontra-se mais deteriorada; a terceira zona é a mais escura e marca o limite superior do aumento de umidade.

2.2 Umidade em edifícios antigos

Nos materiais porosos o principal agente de degradação é a água, podendo esta ser absorvida pelo material na forma líquida ou como vapor. Na forma líquida, a umidade pode chegar por capilaridade, enquanto que na forma de vapor a água pode chegar por condensação ou por higroscopicidade.

Em alvenarias a umidade aumenta o peso da parede, principalmente se sua porosidade for elevada, pois segundo Merino (1993) quanto maior a porosidade do material, maior pode ser seu peso. Quando esta água é absorvida, a alvenaria aumenta de volume, e logo que esta água evapora, a alvenaria retrai. Este ciclo sucessivo de aumento e retração de volume ocorre até que o material chegue à fadiga e comece a fissurar (GEWEHR, 2004).

Henriques (1994) destaca seis tipos de causas da umidade: umidade de construção, umidade de terreno, umidade de precipitação, umidade de condensação, umidade por fenômeno de higroscopicidade, umidade devida a causas acidentais. Estas estão descritas a seguir:

a) Umidade de construção:

As argamassas e outros materiais necessitam de água para sua preparação, e esta água evapora em três tempos: a água superficial evapora rapidamente, a água dos poros grandes evapora lentamente e a água dos poros pequenos é aquela que mais demora a evaporar podendo até levar anos para que isso ocorra.

Ao evaporar a água pode provocar expansões ou destaque de alguns materiais, ou mesmo pode propiciar condensação devida queda de temperatura da alvenaria. Isto implica no aparecimento de manchas de umidade e/ou condensação em função da variação de condutibilidade térmica do material.

Estas anomalias aparentes nas alvenarias devem cessar em um período curto de acordo com as características do edifício e de sua utilização, além disso, a o clima local onde a edificação encontra-se também influenciará neste período.

b) Umidade do terreno

Os materiais de construção utilizados, no presente ou no passado, possuem elevada capilaridade permitindo que a umidade possa migrar através dele (GEWEHR, 2004). A água do terreno penetra nas alvenarias por pressão hidrostática e por ascensão capilar (MERINO, 1993).

Segundo Henriques (1994) esta migração pode ocorrer tanto na vertical quanto na horizontal quando as seguintes condições estão reunidas:

- Existência de zonas das paredes em contato com a água do solo;
- Existência de materiais com elevada capilaridade nas paredes;
- Inexistência ou ineficiente aplicação de barreiras estanques nas paredes.

O nível de ascensão de água nas paredes vai depender porosidade do material, da quantidade de água em contato com a parede, das condições de evaporação desta água que migrou, espessura e orientação da alvenaria em questão (GEWEHR, 2004).

As anomalias devidas à presença de umidade do terreno caracterizam-se visualmente pelo aparecimento de manchas de umidade na zona das paredes junto ao solo, apresentando muitas vezes zonas erodidas na parte superior destas manchas, e acompanhadas em certos casos pela formação de eflorescências e criptoflorescências e de manchas de bolor ou vegetação parasitária, especialmente em lugares de pouca ventilação (HENRIQUES, 1994).

c) Umidade de precipitação

A ação da chuva continuada sobre a parede dá origem a formação de uma cortina de água que, ao escorrer pela superfície, pode penetrar nela por gravidade, em resultado da sobrepressão causada pelo vento ou por ação da capilaridade do material.

Addleson (1983) coloca que a penetração da chuva é mais comum através de aberturas existentes nas argamassas de revestimento ou no encontro desta com outro elemento construtivo, do que através da argamassa propriamente dita, quando não apresentar fissuras.

As anomalias devidas à ação da água da chuva manifestam-se através do aparecimento de manchas de umidade de dimensões variáveis, em correspondência com ocorrências de precipitação (HENRIQUES, 1994). Essas manchas tendem a desaparecer ao cessarem os períodos chuvosos, se tornando não visíveis quando o clima apresenta-se seco. Nestas zonas é frequente o aparecimento de bolores, eflorescências e criptoflorescências.

d) Umidade de condensação

Quando há um diferencial térmico entre a alvenaria da edificação e o ambiente em que ela está inserida, pode ocorrer a condensação em sua superfície. De acordo com Henriques (1994), as manifestações patológicas causadas pela condensação aparecem sob a forma de manchas de umidade e bolores, pois se criam condições necessárias para que haja a proliferação de vários tipos de microorganismos existentes no ar. Isto ocorre principalmente quando a umidade relativa for superior a 75%. Segundo Oliveira (2006), o mofo nas paredes surge após 75% de umidade relativa no interior dos ambientes.

e) Umidade devida a fenômenos de higroscopicidade

Este fenômeno está ligado a capacidade de um material em absorver água em função da umidade do ar (GEWEHR, 2004). Isto ocorre principalmente em materiais que apresentam sais em sua constituição, pois a existências destes sais possibilita a absorção da umidade do ar, quando a umidade relativa do ar está acima de 65-75% (HENRIQUES, 1994). Segundo Ulsamer (1995), a eflorescência é uma das principais manifestações patológicas por conta da higroscopicidade.

As anomalias devido a fenômenos de higroscopicidade são caracterizadas pelo aparecimento de manchas de umidade em locais com forte concentrações de sais, eventualmente associadas a degradação dos revestimentos das paredes.

f) Umidade devida a causas fortuitas

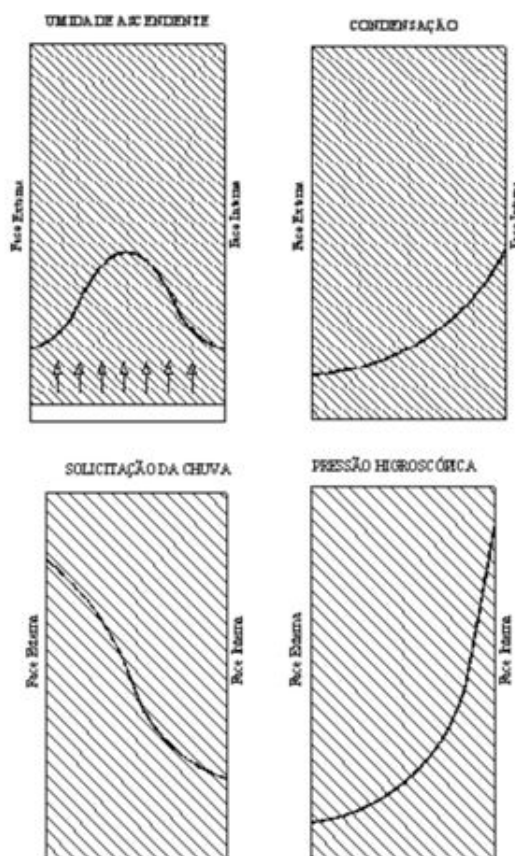
De acordo com Cabrita et al. (1993), entre as causas mais frequentes dessas anomalias, estão os problemas relacionados a canalização de água corrente, de esgoto, ou de águas pluviais. É difícil sistematizar todas as causas possíveis, mas de uma forma geral são decorrentes de defeitos de construção, falhas de

equipamentos ou de erros humanos, ocasionados por acidentes, falta de manutenção, dentre outros fatores (HENRIQUES, 1994).

As anomalias causadas por esta forma de umidade se mostram bem evidentes, sob a forma de manchas de umidade pontuais, associadas com o período de precipitação ou em caráter permanente quando houver o rompimento de canalizações, podendo haver migração da umidade quando a capilaridade dos materiais permitir (GEWEHR, 2004).

Seele (2000) ilustrou como se comportam os gradientes de umidade ao longo da largura da parede de acordo com as diferentes origens das umidades conforme a figura abaixo (Figura 7):

Figura 7: Gradientes de umidade ao longo da largura da parede



Fonte: Seele, 2000

Esta separação foi feita de forma utópica, uma vez que estes fenômenos não ocorrem de forma isolada, pois é frequente que dois ou mais fenômenos apareçam associados, por haverem condições propícias ou por um ser consequência do outro (HENRIQUES, 1994). Por exemplo, uma alvenaria com umidade ascendente pode

diminuir a resistência térmica do material possibilitando a ocorrência de condensação.

Por isso conhecer as formas de manifestações de anomalia e análises laboratoriais são dados essenciais para elaboração de um diagnóstico correto, que permita identificar claramente as respectivas causas e propor as soluções de reparação adequadas.

2.3 Métodos de recuperação existentes

A presença de sais e água nas alvenarias é responsável por grande parte das degradações que afetam as argamassas. De acordo com Bianchin (1999), conhecer as propriedades da argamassa e do substrato é de fundamental importância para que a intervenção seja bem sucedida, principalmente se tratando de argamassa de dessalinização.

De acordo com Posser (2004), no Brasil, os estudos sobre novos materiais e tecnologias construtivas referentes à recuperação de alvenarias que apresentam manifestação patológica ocasionada pela eflorescência ainda são insuficientes. Isto resulta no uso de técnicas e produtos inadequados que podem acarretar maiores danos às edificações.

Os métodos mais conhecidos de recuperação de alvenarias degradadas por umidade e salinidade são:

a) Barreiras físicas: este tipo de intervenção consiste na inserção de uma barreira física na alvenaria (hidrofugantes, manta asfáltica, chapa metálica, etc.) interrompendo o fluxo de sais e umidade oriundos da ascensão capilar. Ruaro (1997) critica a técnica por resolver somente uma parcela da problemática, uma vez que somente cessa a entrada de sais na alvenaria, não resolve o problema dos sais já existentes na parede e que continuarão atuando como agentes de degradação daquela parede.

b) Sistema de revestimento de recuperação (argamassa de saneamento): De acordo com Arendt (1995), o sistema é composto de chapisco, emboço e argamassa de saneamento que, pela sua porosidade, permite a cristalização de sais em seus poros sem provocar danos ao substrato, mas esta solução é temporária, pois há um limite para a saturação destes poros.

c) Compressas com argamassas de caulim e pedra-pomes artificiais: De acordo com Larsen (2001), consiste em uma argamassa que contém dois materiais, onde o caulim fornece uma contínua rede de finos poros capilares, permitindo a absorção do cloreto de sódio da alvenaria, enquanto que a pedra-pomes artificial forma uma rígida estrutura que previne a retração por secagem da argamassa.

d) Osmose induzida por lâmina d'água: para Ruaro (1977), deve ser na superfície da parede promovendo a extração dos sais pelo efeito osmótico (redução do teor de sais pela ação osmótica), com o cuidado de se coletar toda a água utilizada no processo. Esta água absorve os sais localizados na superfície da parede.

e) Compressas ou mantas de celulose pura: mantidas permanentemente úmidas, extraem os sais da parede pela ação osmótica. Segundo Arendt (1995), embora estas mantas tenham um poder de absorção grande, dependendo do tipo de manta, passa a ser uma técnica muito cara, e, portanto, utilizada nestes casos, somente em esculturas, relevos de pedras ou ainda em regiões de afrescos. Willimzip (2004) diz que no mercado alemão existem muitas possibilidades de mantas, como o uso de papel de jornais, papel reciclado, mantas de celulose limpa, celulose misturada com bentonita e areia, celulose com madeira e mantas aplicadas juntamente com eletricidade.

f) Compressas de reboco de pura cal: deve ser mantida permanentemente úmida. Pelo mesmo efeito dos dois processos anteriores, os sais são extraídos da parede, pois este sistema é altamente absorvente. Arendt (1995) lembra que em certas situações, a aplicação deve ser repetida para se ter resultados mais eficazes.

g) Sistema eletro-osmótico: em geral recomendado na secagem de paredes, mas por não se analisar corretamente a concentração de sais, os resultados com a eletro-osmose passiva podem se tornar duvidosos. O sistema passivo, segundo Ruaro (1997), portanto, deve ser criteriosamente aplicado, sob pena de que, se não houver controle adequado, não se obtenham resultados consideráveis.

h) Argamassa de dessalinização: São argamassas feitas de materiais hidrófilos nos quais a água presente na mistura penetra no substrato, dissolve os sais presentes e, logo em seguida, propicia o transporte capilar do substrato para a argamassa, desta forma conduzindo a extração do sal (BOURGES). Segundo Terheider (2002), o ideal é que os poros desta argamassa sejam mais finos do que os poros do substrato, fazendo com que a mistura aplicada exerça sucção capilar na alvenaria.

Dentre as diversas técnicas e materiais utilizados para o saneamento das edificações, escolheu-se a aplicação de argamassas de dessalinização por ser uma solução de fácil aplicação e custo reduzido.

Existem dois tipos de mecanismo de dessalinização por meio das argamassas de dessalinização: a advecção e a difusão. A Advecção nada mais é do que o transporte de substâncias (sais) em água em movimento (secagem da argamassa). A difusão por sua vez, é o transporte de íons de sal em um líquido da maior para a menor concentração (LUBELLI et al, 2009).

Estas argamassas de dessalinização foram desenvolvidas originalmente na Alemanha e têm sido utilizadas há mais de vinte anos na Europa apresentando resultados satisfatórios. Devido à sua elevada porosidade, estas argamassas especiais permitem a cristalização dos sais no interior dos seus poros, sem provocar danos ao revestimento e, por serem impermeáveis à água e permeáveis ao vapor, impedem a entrada da água da chuva permitindo a secagem eficiente do substrato.

Para isto Arendt (1995) diz haver a necessidade da criação de uma argamassa de dessalinização para paredes deterioradas por umidade e salinidade que tenha a capacidade de reter água no estado líquido, juntamente com os sais, e ao mesmo tempo permitir uma secagem eficiente, ou seja, ser estanque como a argamassa de cimento e permeável ao vapor d'água como a argamassa de cal.

3. EDIFICAÇÃO ESTUDADA

Os critérios de seleção da edificação basearam-se nos seguintes pontos: 1) valor histórico e artístico para o Estado, 2) presença de eflorescência salina, e 3) disponibilidade para coleta de amostras e para aplicação das argamassas de dessalinização.

Deste modo, foi selecionada a Igreja de Santo Alexandre, localizada no complexo Feliz Lusitânia, no centro histórico de Belém (Figura 8). Trata-se de uma construção jesuítica do século XVII, que passou por uma grande reforma no século XVIII. Este monumento possui peças importadas da Europa e outras produzidas pelos próprios jesuítas e índios no local da obra e trata-se de um exemplar da arquitetura jesuítica barroca, caracterizada como arte barroca com forte acento tropical. Chegou a quase ruína quando permaneceu fechada por cerca de 50 anos, fator que possibilitou a permanência dos principais traços originais da sua arquitetura.

Figura 8: Localização da Igreja de Santo Alexandre.



Fonte: Google Earth, 2012.

A Edificação passou por um processo de restauração em 1998 e adquiriu um novo uso que não o seu original: Museu de Arte Sacra do Pará. Para isto o espaço existente foi adaptado sem grandes mudanças estruturais, onde somente os

banheiros necessitaram da inserção de pastilhas cerâmicas nas paredes para que se adequasse ao uso.

Dentre as intervenções houve a remoção do reboco da face voltada para o interior da edificação de duas alvenarias com o intuito de revelar sua estrutura original: a alvenaria do transepto direito e a alvenaria frontal da igreja (Figura 9).

Figura 9: Remoção do reboco da alvenaria frontal da Igreja de Santo Alexandre.



Houve também a reintegração do forro feito de tábua corrida, preservando a leitura da iconografia jesuítica sem prejudicar a unidade artística do monumento. Outra solução tomada na restauração foi a demolição das escadas antigas para inserção de escadas metálicas, pelo fato das primeiras não serem da época da construção da edificação.

Sua fachada foi pintada da cor branca (Figura 10), apesar de as edificações do século XVII não possuírem esta coloração, que em geral era mais amarelada.

Figura 10: Fachada pintada com tinta branca.



A igreja está interligada com o Palácio Episcopal construído na segunda metade do século XVIII, representando uma mescla de estilos brasileiros: Proto-barroco, barroco tardio e neoclássico pombalino (Figura 11).

Figura 11: Igreja de Santo Alexandre interligada ao Palácio Episcopal.



Fonte: <http://servaltar-sstrindade.blogspot.com.br/2011/02/fotos-historicas.html>, 2012.

A Igreja de Santo Alexandre foi tombada pelo IPHAN em 1977, juntamente com o Complexo Feliz Lusitânia, e atualmente abriga o Museu de Arte Sacra do Pará. A igreja está sob responsabilidade do Governo do Estado do Pará através da Secretaria Executiva de Cultura.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Esta pesquisa terá dois focos principais: um voltado para compreensão do processo de degradação por salinização em alvenaria mista da edificação selecionada; e o outro para a argamassa de dessalinização que será produzida em laboratório com o intuito de amenizar a problemática da salinização.

Sendo assim será necessária a caracterização dos seguintes materiais para o desenvolvimento da pesquisa:

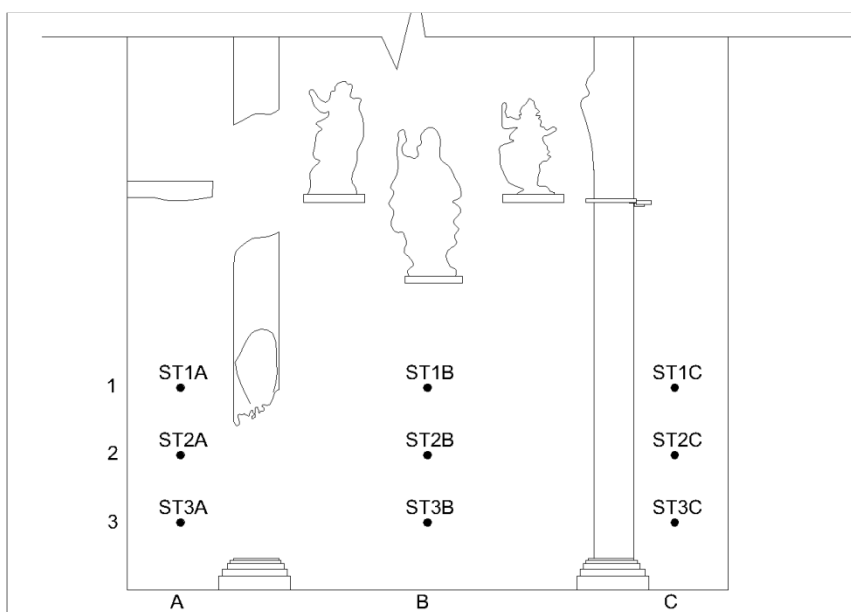
- 1) Argamassa antiga de alvenaria mista da edificação selecionada, degradada pela cristalização dos sais;
- 2) Sais presentes na alvenaria mista degradada por eflorescências;
- 3) Argilas comerciais (bentonitas e caulim) para produção, em laboratório, de uma argamassa de dessalinização para aplicação na alvenaria mista selecionada.

Foram feitos nove pontos de coleta de amostras: três em cada extremidade e outros três no centro da alvenaria mista da capela do transepto direito da Igreja de Santo Alexandre (Figura 12), recebendo nomenclatura de acordo com a sua localização (Figura 13). Vale lembrar que esta alvenaria encontra-se sem seu reboco de revestimento, retirado na intervenção no ano de 1998.

Figura 12: Capela do transepto direito da Igreja de Santo Alexandre.



Figura 13: Identificação dos pontos de coleta, com base na Figura 12.



As amostras foram coletadas com o auxílio de perfuratriz portátil de baixa rotação (Figura 14) e uma broca diamantada de 10 mm de diâmetro, possibilitando

análise não somente superficial, mas também de porções mais profundas da alvenaria. A perfuratriz portátil utilizada é de baixa rotação para evitar que houvesse perda de umidade do material coletado por conta do aquecimento da broca; e a broca do tipo diamantada para evitar que oxidação da mesma, contaminando os materiais coletados.

Figura 14: Perfuratriz portátil e broca diamantada utilizada para coleta de argamassas.



Nessas amostras foram determinados teor de umidade e sais, conforme será descrito posteriormente. A análise mineralógica por DRX e a análise do traço mais provável foram feitas apenas na amostra do ponto ST3B.

4.2 Mapeamento da alvenaria

O registro gráfico foi feito por meio de ortofotos, ou seja, fotografias com posterior retificação para retirada de distorções e perspectivas. Após retificação as imagens foram exportadas para o programa AUTOCAD para ser finalizada a representação gráfica da situação atual da alvenaria e de suas alterações.

4.3 Procedimentos Laboratoriais

Foram realizadas análises para a caracterização física, química e mineralógica das amostras de argamassa coletadas e também para caracterização das argamassas de dessalinização (Tabela 2).

Tabela 2: Análises Laboratoriais para caracterização física, química e mineralógica.

Material	Análise Física	Análise Mineralógica	Análise Química
Argamassa	Traço		Teste qualitativo de sais
Histórica	Análise Granulométrica por Difração a Laser Teor de umidade	DRX	Teste quantitativo de sais
Argilas	Análise Granulométrica por Difração a Laser	DRX	FRX
Areia	Análise Granulométrica por Difração a Laser		
Argamassa de Dessalinização		DRX	

Os ensaios para determinação do traço mais provável e determinação do teor umidade foram realizados no Laboratório de Conservação, Restauração e Reabilitação (LACORE) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

No Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará foram realizadas as seguintes análises, em seus respectivos laboratórios: 1) Análises de Difração de Raios-X (DRX) e Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) realizadas no Laboratório de Caracterização Mineral e 2) Análise granulométrica por difração a laser, realizada no Laboratório de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (LaMIGA).

Os ensaios para determinação qualitativa de sais solúveis e determinação quantitativa de cloretos foram realizados no Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração (NTPR) da Universidade Federal da Bahia.

4.3.1 Determinação do Teor de Umidade

Este ensaio tem como objetivo a determinação do teor de umidade em argamassas identificando qual tipo de umidade está presente na alvenaria a ser estudada (ascendente ou descendente). Este ensaio segue as recomendações do LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (HENRIQUES, 1994).

Procedimento:

1. Pesar a placa de petri limpa e seca em uma balança analítica (P).

2. Colocar a amostra na placa com uma espátula e pesar novamente (U).
3. Colocar na estufa por 24 horas à 75 °C.
4. Resfriar em dessecador.
5. Pesar o conjunto placa + amostra (S).

Cálculos:

$$\%U = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100$$

4.3.2 Análise Qualitativa de Sais Solúveis

Este tipo de ensaio tem como objetivo identificar os principais tipos de sais presentes na amostra de argamassa, com destaque para: cloretos, nitratos e sulfatos. Este ensaio segue as recomendações do LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (HENRIQUES, 1994).

Procedimento:

a) Para Nitratos:

1. Pesar aproximadamente 10 g da amostra moída para um béquer de 250 ml.
2. Colocar 100 ml de água deionizada.
3. Agitar com um bastão de vidro e filtrar para um papel de filtro em um funil.
4. Recolher o filtrado em erlenmayer.
5. Se o filtrado estiver turvo, centrifugar por 15 min.
6. Colocar um pouco do filtrado límpido numa placa de toque.
7. Adicionar três gotas do reativo: 1% Difenilamina em H₂SO₄.
8. Verificar o aparecimento de uma coloração azul indicativa de nitrato.
9. Fazer um teste em branco com água deionizada.

b) Para Cloretos:

1. Colocar um pouco do filtrado do item anterior em um tubo de ensaio.
2. Usar outro tubo para o teste em branco com água deionizada.
3. Adicionar aos tubos, três gotas de HNO₃ P.A.
4. Adicionar também três gotas da solução: 1% AgNO₃ em água deionizada.

5. Verificar o aparecimento de um precipitado branco (turvação).
6. Comparar com o ensaio em branco do outro tubo.

c) Para Sulfatos:

1. Colocar um pouco do filtrado do item 1 em um tubo de ensaio.
2. Usar outro tubo para o teste em branco com água deionizada.
3. Adicionar aos tubos, três gotas de HCl P.A.
4. Em seguida, adicionar três gotas da solução: 5% BaCl_2 em H_2O deionizada.
5. Verificar o aparecimento de uma turvação indicativa da presença de sulfato. Precipitado de BaSO_4 .
6. Comparar com o ensaio em branco.

4.3.3 Análise Quantitativa de Cloreto

Este ensaio tem como objetivo indicar o percentual de halita (cloreto de sódio) contido nas amostras de argamassa coletadas. Este ensaio segue as recomendações do LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (HENRIQUES, 1994).

Procedimento:

O procedimento utiliza os seguintes reagentes: 1) cloreto de sódio 100 mEq/L (100 mmol/L), 2) nitrato de mercúrio 1,1 mmol/L e ácido nítrico 0,9 mmol/L e 3) tiocianato de mercúrio 2 mmol/L, nitrato férrico 17 mmol/L e ácido nítrico 30 mmol/L.

Os íons cloreto presentes na amostra reagem com o tiocianato de mercúrio formando cloreto mercúrico e íons tiocianato. Os íons tiocianato reagem com os íons férricos formando tiocianato férrico de cor amarela, cuja intensidade de cor é diretamente proporcional à concentração de cloretos na amostra analisada. A leitura foi feita em Espectrofotômetro SpectroDirect - LOVIBOND para análise de águas da mar.

4.3.4 Determinação do traço mais provável

Este ensaio determina a proporção dos componentes da argamassa de cal analisada, ou seja, o ligante ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou $\text{Mg}(\text{OH})_2$ transformados em carbonatos) e os finos (argila e/ou silte) e os grossos (areia). Desta forma, pode-se chegar ao

provável traço empregado na argamassa aplicada. Este ensaio segue as recomendações do NTPR - Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração.

Procedimento:

1. Triturar a amostra de forma a não quebrar os grãos de areia, em um gral de porcelana.
2. Colocar para secar em estufa a temperatura de aproximadamente 60°C, por 24 horas.
3. Pesar cerca de 10 g da amostra em balança analítica.
4. Colocar em um béquer de 100 ml previamente pesado e depois umedecer com água deionizada.
5. Adicionar cerca de 50 ml de HCl 1:4.
6. Deixar em digestão até que todo o ligante tenha sido dissolvido. Para verificar se o ligante já foi dissolvido completamente, colocar umas gotas de HCl concentrado e observar se ainda há formação de bolhas. Em caso afirmativo, colocar mais ácido, até que isto não mais ocorra.
7. Adicionar cuidadosamente água deionizada sobre o material e agitar o béquer para que as partículas finas fiquem em suspensão.
8. Em seguida despejar cuidadosamente o líquido com o material suspenso sobre o papel de filtro, previamente pesado, tendo o cuidado para não deixar que as partículas maiores também passem.
9. Repetir o procedimento anterior até que a água de lavagem saia limpa.
10. Colocar o papel de filtro com os finos e o béquer com os grossos em estufa, a temperatura de 60°C por 24 horas.
11. Esfriar em dessecador e pesar em balança analítica.
12. Calcular a % de finos, % grossos e % ligante e o traço mais provável da argamassa.

4.3.5 Análise Granulométrica por Difração a Laser

Este tipo de análise tem como objetivo proporcionar informações sobre o tamanho dos grãos que compõem a argamassa, desta forma gerando uma curva granulométrica identificando quais os tipos de finos e grossos encontrados na amostra.

Após o ensaio de traço, os finos e os grossos da mesma amostra obtidos após a desagregação por ataque ácido, foram utilizados para análise granulométrica por difração a laser. As curvas granulométricas obtidas permitem verificar se os grãos correspondem a argila (0,01 a 2 d [μm]), silte (2 a 50 d [μm]) ou areia (50 a 1000 d [μm]).

Procedimento:

1. Colocar o material previamente separado no ensaio de traço em um recipiente e adicionar a eles água destilada;
2. Inserir duas gotas de pirofosfato, desta forma evitando que as partículas se aglomerem;
3. Deixar a solução reagir por 24 horas;
4. Após as 24 horas agitar a amostra para que a solução fique homogênea;
5. Despejar a solução no equipamento de leitura de granulométrica – Analyssete 22 – Wet Dispersion Unit da marca Fritsch;

4.3.6 Difractometria de Raios-X (DRX)

Este tipo de análise tem como objetivo identificar os minerais presentes na amostra de argamassa. As amostras foram pulverizadas e logo em seguida a compactadas em uma placa de alumínio para serem encaminhadas para o difratômetro.

As análises foram realizadas em um Difratômetro de Raios-X, modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da PANalytical, com goniômetro PW3050/60 (θ / θ), tubo de Raios-X cerâmico e anodo de Cu ($K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00 com foco fino (2200 W / 60 kV), e filtro $K\beta$ de Níquel. O detector utilizado é do tipo RTMS, X'Celerator. A interpretação dos difratogramas foi feita com o software High Score Plus, também da Panalytical.

4.3.7 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)

Foi utilizada a fluorescência de raios-X para análise química total, ou seja, identificação dos elementos presente e estabelecer a proporção destes elementos na amostra.

As análises foram realizadas em um Espectrômetro de Fluorescência de RaiosX, modelo Axios Minerals, da PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico anodo

de Ródio, e potência de 2,4 kW. As determinações foram feitas no programa IQ+ Semiquant. A aquisição dos dados foi feita com o software SuperQ Manager, e o tratamento dos mesmos com o software IQ+. A preparação das amostras para as análises foram realizadas a partir de pastilhas fundidas, com a utilização de 1 g de amostra para 6 g de Tetraborato de Lítio, que é o fundente.

4.4 Procedimento de intervenção

Em laboratório, foram elaboradas argamassas de dessalinização para amenizar a problemática ocasionada pela cristalização dos sais na alvenaria mista selecionada. Primeiramente foram selecionados os componentes das argamassas baseados na literatura e em recomendações do Prof. Mário Mendonça, da UFBA.

Optou-se pela aplicação de argamassas de dessalinização pela possível efetividade na remoção de sais localizados próximos a superfície. Este método de remoção de sais apresentou resultados satisfatórios na preservação de outras alvenarias históricas, além de ser um método não intrusivo e de fácil remoção (PUIM, 2010).

Os componentes selecionados para serem utilizados nas argamassas foram: caulim, bentonita e areia. A escolha da bentonita está relacionada à elevada capacidade de troca catiônica (CTC) da esmectita, sugerindo que houvesse incorporação dos íons dos sais presentes na alvenaria no seu espaço intercamadas. A escolha do caulim está associada a estudos que apresentam resultados satisfatórios (LUBELLI et al. 2009; LAZZARINI et al., 2007) sugerindo que, quando misturado a areia, é capaz de obter diferentes tamanhos de poros eficazes no transporte por capilaridade e, desta forma, incorporando sais na estrutura desta mistura. A areia é utilizada como agregado, por ser o material mais utilizado para esta finalidade.

Nas argamassas de dessalinização com caulim foi adicionada uma pequena quantidade de cal, na relação 1:0,03 (caulim:cal), com a finalidade de melhorar sua trabalhabilidade, visto que sem a cal tornava-se inviável a aplicação destas argamassas.

Após a seleção, foram elaboradas as misturas e as proporções entre os componentes para determinação dos traços das argamassas, podendo ser observado na Tabela 3:

Tabela 3: Traços das argamassas de dessalinização.

Sigla	Materiais	Traços
C_11	Caulim / Areia	1:1
C_13	Caulim / Areia	1:3
B_11	Bentonita / Areia	1:1
B_13	Bentonita / Areia	1:3

Foi feita a aplicação de uma fina camada (aproximadamente dois centímetros) das argamassas durante o período de um mês, efetuando sua troca a cada sete dias. Foram dosadas suas quantidades de sais antes e depois da aplicação, com o objetivo de avaliar a capacidade de retenção (adsorção) de sais de cada tipo de argamassa.

Posteriormente realizaram-se análises de Difração de Raios-X, verificando os resultados obtidos para que sejam indicadas as melhores argamassas de dessalinização com as suas respectivas recomendações.

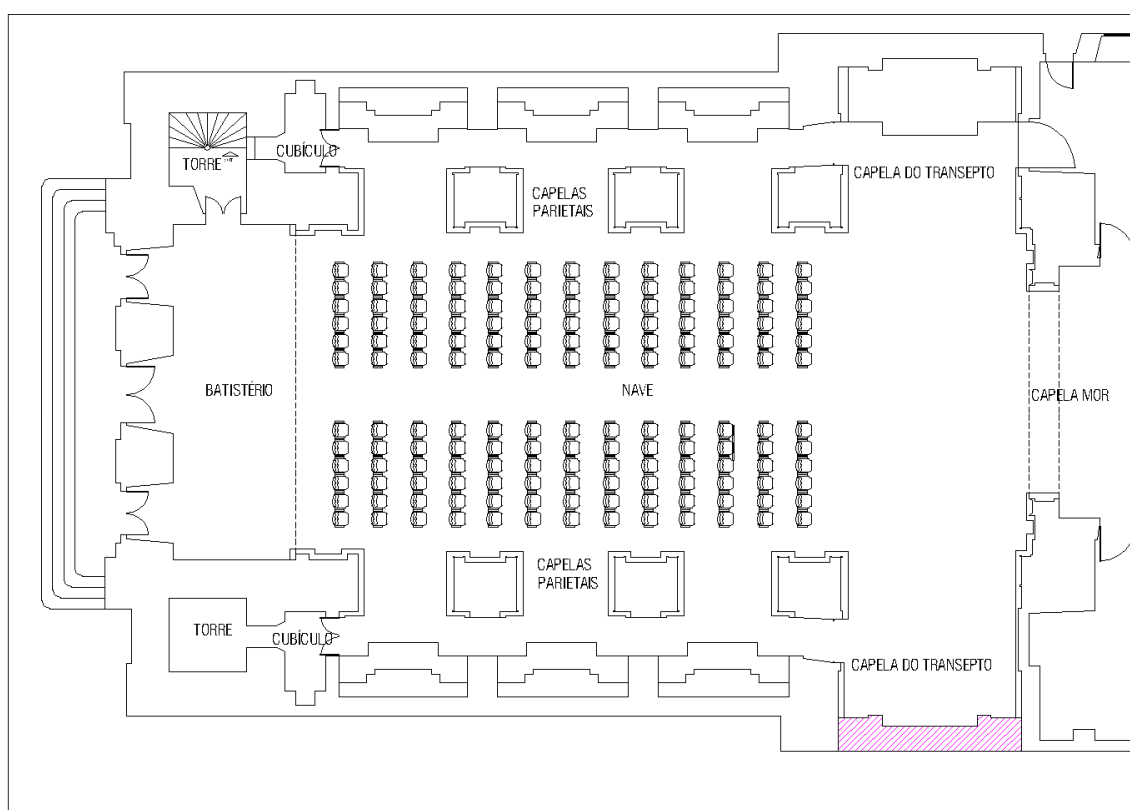
5. RESULTADOS

5.1 A Degradação da Alvenaria Mista do Transepto Direito da Igreja de Santo Alexandre

5.1.1 Características da Alvenaria

Para este estudo foi selecionada a alvenaria localizada no transepto direito da igreja de Santo Alexandre (Figura 15), pois visualmente se trata da alvenaria mais degradada pela presença de sais.

Figura 15: Localização em planta da alvenaria estudada.

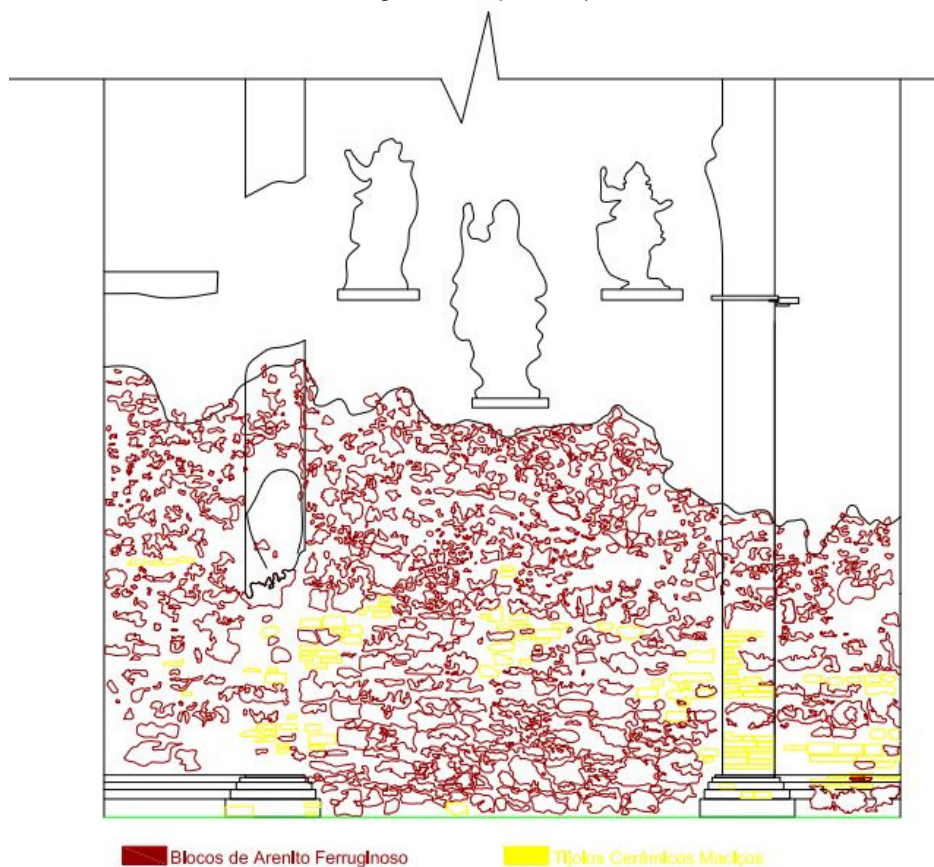


Trata-se de uma alvenaria do tipo mista, constituída de blocos de arenito ferruginoso (popularmente conhecida por pedra jacaré) e tijolos cerâmicos maciços, assentados com argamassa de cal (Figura 16 e Figura 17). Em alguns pontos da alvenaria podem ser vistos resquícios de conchas, material utilizado como matéria-prima para obtenção da cal.

Figura 16: Imagem retificada do transepto direito da Igreja de Santo Alexandre.



Figura 17: Mapeamento da Alvenaria a partir da foto retificada. Os elementos constituintes são os blocos de arenito ferruginosos (vermelho) e os tijolos cerâmicos maciços (amarelos) dispersos na argamassa (branco).



Na Figura 17 é apresentado o mapeamento gráfico, com os elementos constituintes representados em cores semelhantes as colorações reais: blocos de arenitos ferruginosos em vermelho e tijolos cerâmicos maciços em amarelo.

O mapeamento limitou-se até a altura de 3,50m por se tratar da região dada como limite da degradação, pois acima deste, constituintes da alvenaria encontram-se melhor conservados e com pouca influência das eflorescências salinas. Ou seja, quanto maior a altura menor a degradação dos constituintes.

Os tijolos encontram-se principalmente nas áreas da base dos pilares, nos arcos de descarga e na região central da alvenaria, enquanto os blocos de arenito encontram-se em maior número, em relação aos tijolos, e em toda a estrutura. Atualmente, sua espessura é de aproximadamente um metro. Conforme já descrito, anteriormente era revestida com argamassa de cal, areia e barro, sendo este reboco removido no projeto de intervenção de 1998.

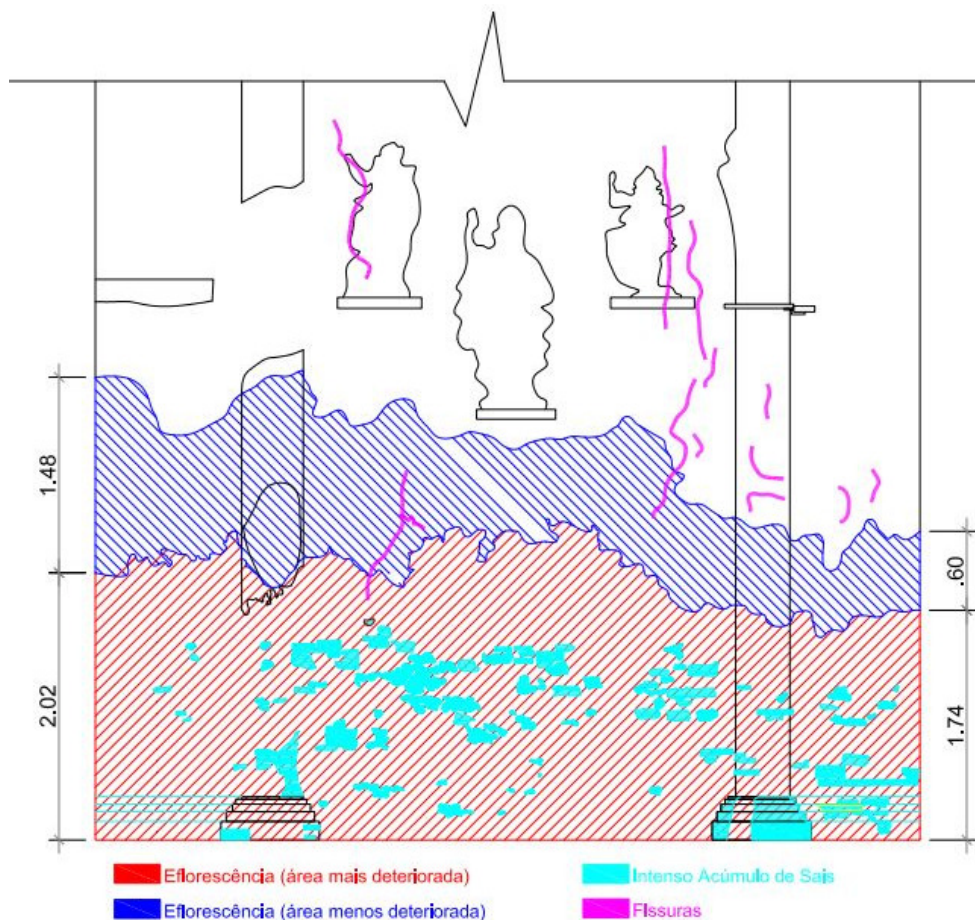
Na Figura 18 é apresentado o levantamento de danos da alvenaria, a partir do mapeamento da Figura 17.

De um modo geral o mapeamento indicou existência de zonas com diferentes níveis de alteração e áreas pontuais de acúmulo de sais cristalizados na superfície desfigurada dos materiais. A área mais degradada corresponde à parte inferior da alvenaria.

Os seguintes tipos de alterações podem ser descritos: fissuras, manchas de umidade e dissolução dos materiais. A dissolução dos materiais se manifesta de duas diferentes formas: 1) a argamassa apresenta maior grau de dissolução, com desagregação de seus constituintes tornando-os pulverulentos; 2) os blocos de arenito apresentam cavidades em sua superfície, enquanto que os tijolos se apresentam melhor conservados.

Na Figura 18, apesar de ter sido representado uma mudança abrupta de áreas, há na verdade uma mudança gradativa da região mais degradada para a região menos degradada.

Figura 18: Levantamento de danos da alvenaria do transepto direito da Igreja de Santo Alexandre.

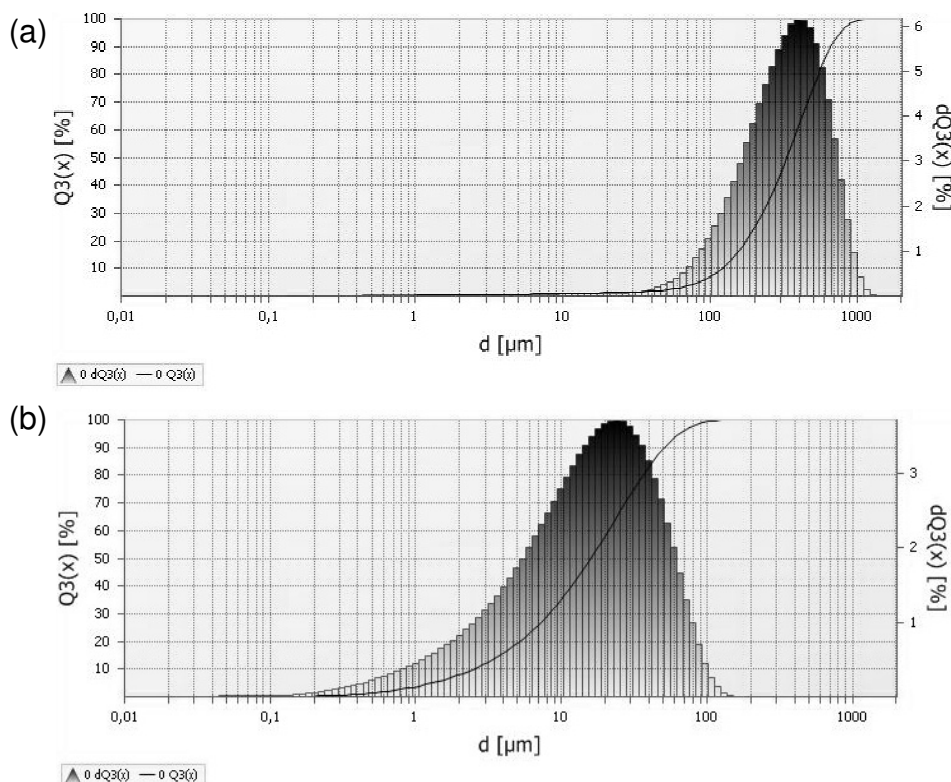


5.1.2 Argamassa

A média dos resultados obtidos nas análises indica como traço mais provável a relação 1:0,87:3,98 (cal:barro:areia). Esta proporção entre os materiais constituintes indica que se trata de argamassa forte e com pouca quantidade de finos (silte e argila), sendo a relação aglomerante:agregado de 1:4.

O agregado grosso da argamassa apresentou curva granulométrica característica de areia média ($D_{50} \sim 350\mu\text{m}$ ou 45#), unimodal e com pouca assimetria (Figura 19a), enquanto que o material fino apresentou $D_{50} \sim 16\mu\text{m}$ (silte fino a médio) (Figura 19b).

Figura 19: (a) Curva granulométrica dos grossos e (b) curva granulométrica dos finos da argamassa de assentamento.

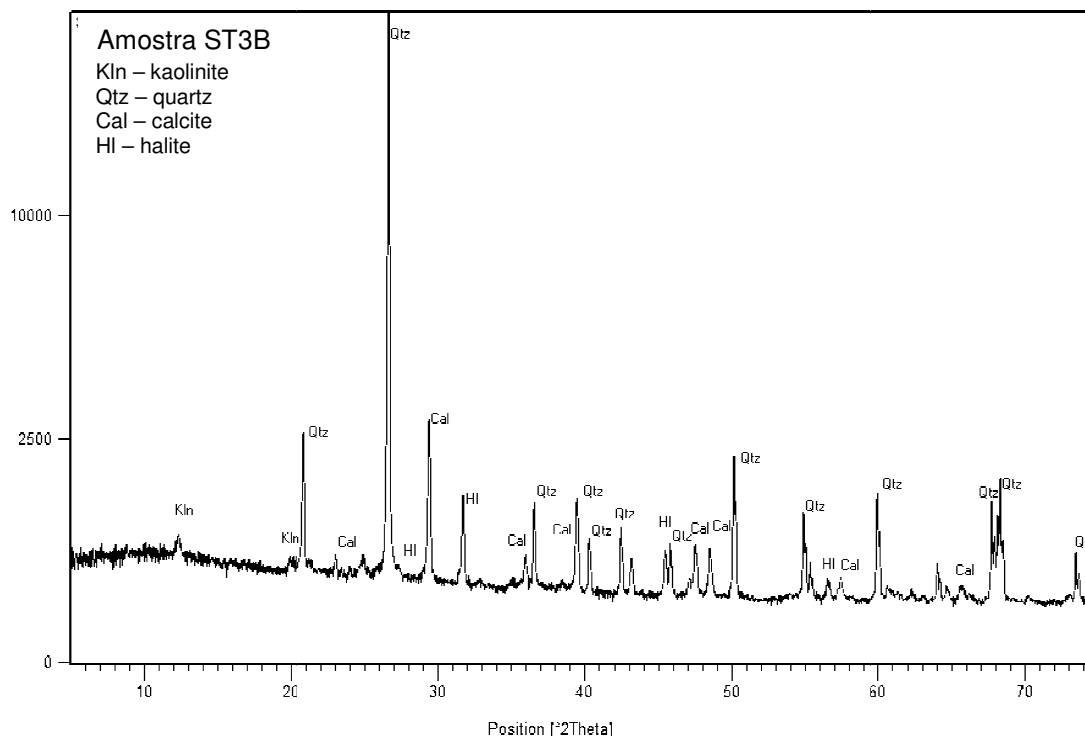


A curva granulométrica dos grossos frisa que a areia era o agregado mais utilizado nas argamassas antigas. Esta curva granulométrica se assemelha a faixa granulométrica da areia de edifícios históricos anteriores ao século XIX citados em estudo sobre argamassas tradicionais de cal do Brasil (SANTIAGO, 2007).

A curva granulométrica dos finos acusa a presença de resíduos na mistura, o silte, encontrado em proporção considerada desprezível, como foi observado na análise de traço. Este e outros resíduos eram comuns em argamassas antigas de cal, pois não havia preocupação com a limpeza dos materiais antes de sua aplicação na construção dos edifícios (KANAN, 2008).

Quanto a sua composição mineralógica, os resultados por difratometria de Raios-X da argamassa revelaram a presença de quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e halita (NaCl), segundo o difratograma da Figura 20.

Figura 20: Difratoograma de Raios-X com a composição mineralógica da argamassa, exemplificada pela amostra ST3B.



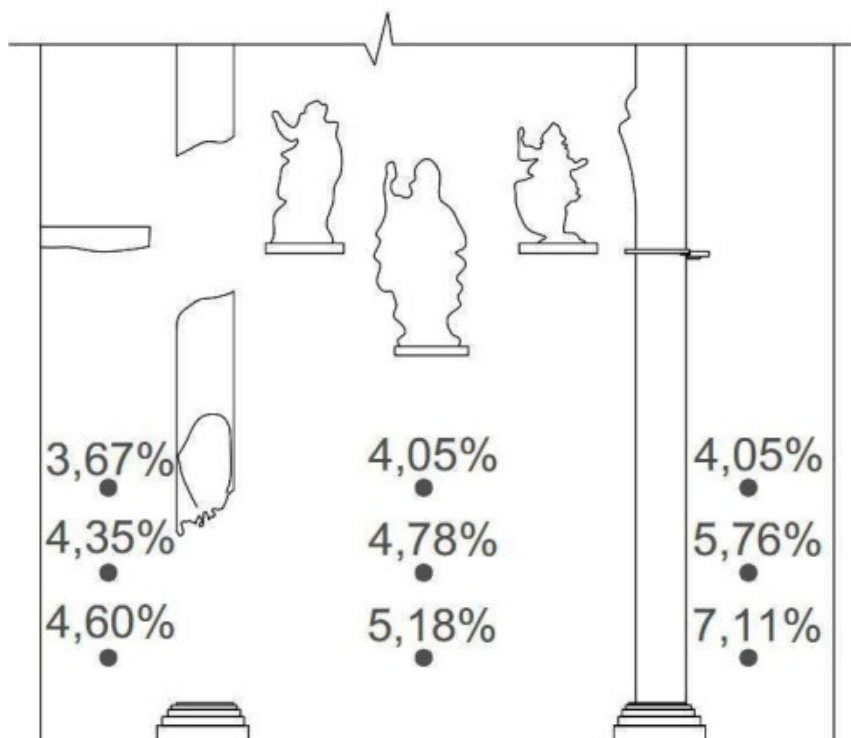
A composição mineralógica da alvenaria mostra, claramente, a natureza dos seus principais constituintes: o quartzo, proveniente da areia utilizada como agregado, a calcita proveniente das conchas utilizadas como aglomerante, e a caulinita proveniente do barro, também utilizado como aglomerante em algumas argamassas. A halita sugere a presença de um produto neoformado da eflorescência muito comum em difratogramas de argamassas antigas de cal (MOROPOULOU et al., 2000; LAZZARINI et al., 2007) e será melhor discutido posteriormente.

5.1.3 Umidade

Os resultados obtidos por meio dos cálculos de teor de umidade estão apresentados na Figura 21. O teor médio das 09 amostras analisadas é de 4,84%. Na figura observa-se, nitidamente, que em cada perfil vertical, os valores mais elevados encontram-se na base, diminuindo progressivamente para o topo, demonstrando que há ascensão da água na parede verticalmente. Assim, é possível classificar a umidade como ascendente.

Adicionalmente, observa-se também variações laterais da esquerda para a direita havendo acréscimo de um ponto percentual da lateral esquerda para o centro, e um acréscimo de aproximadamente três pontos percentuais da lateral esquerda para a lateral direita.

Figura 21: Percentual do teor de umidade em cada ponto de coleta, caracterizando a umidade presente como ascendente.

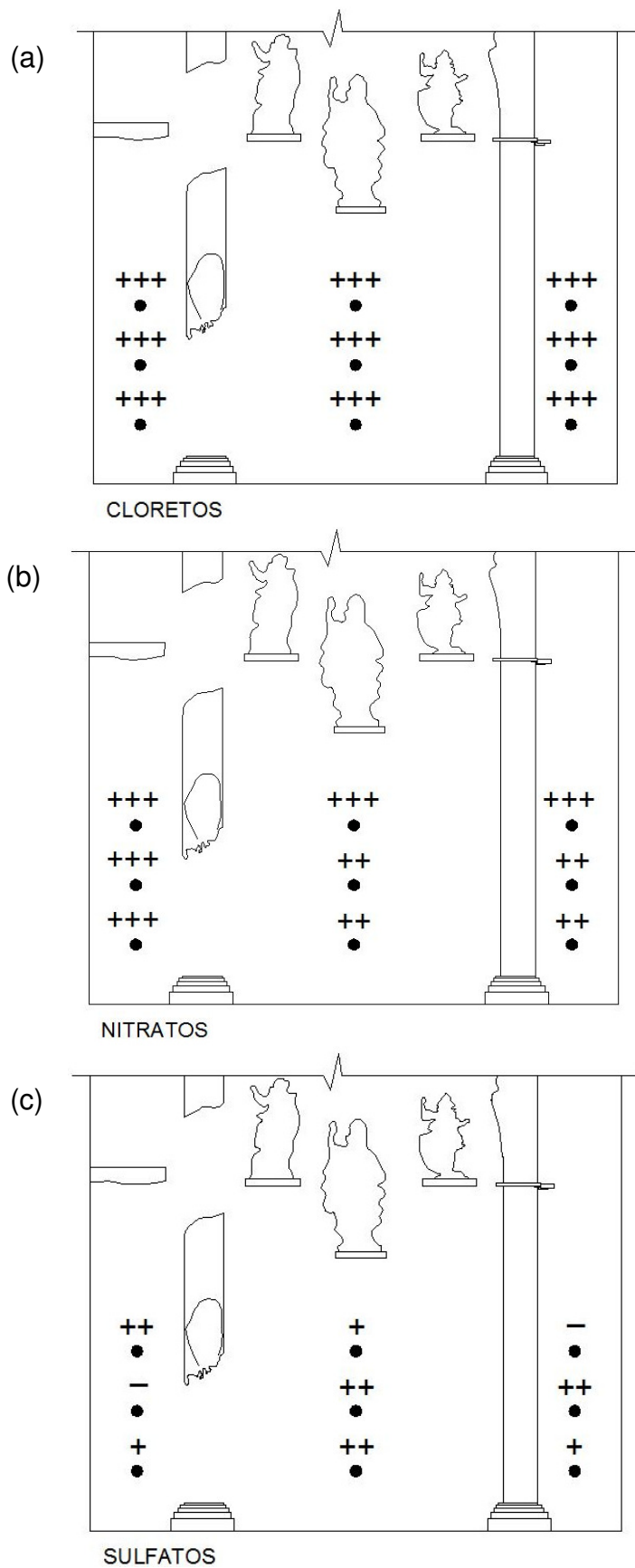


A umidade ascendente pode ter sido ocasionada pela presença de um jardim descoberto e junto à face externa da alvenaria, que foi inserido no projeto de intervenção de 1998, de modo que a água da chuva penetre no terreno, que por sua vez está em contato com a base da alvenaria.

5.1.4 Sais

Os sais identificados na alvenaria do transepto direito são cloreto, nitrato e sulfato e suas concentrações variam em relação aos pontos de coleta (Figura 22).

Figura 22: Teste qualitativo de sais: (a) cloretos, (b) nitratos e (c) sulfatos.



Legenda: - Ausência + Pequena Quantidade ++ Média Quantidade +++ Grande Quantidade

Comparando as figuras, observa-se claramente que os cloretos e os nitratos estão, relativamente, em maior quantidade em relação aos sulfatos, e possuem uma distribuição homogênea.

Os sulfatos estão distribuídos de forma heterogênea com pontos de média e pequena quantidade, além de dois pontos com ausência deste sal.

5.1.5 Teste Quantitativo de Sais – Cloreto

Os resultados da análise quantitativa de cloreto indicam uma distribuição praticamente homogênea em relação aos pontos coletados representados na Figura 23. O teor médio das nove amostras analisadas é de 0,26%, com variação de 0,22% a 0,29%. Aparentemente, a porção central da alvenaria apresenta maior concentração em relação às laterais.

Figura 23: Distribuição quantitativa do cloreto na alvenaria do transepto direito.



Provavelmente a homogeneidade na distribuição do cloreto está relacionada ao fato de ser um sal muito solúvel, deste modo sendo facilmente transportado para todas as regiões da alvenaria (BOURGÉS et al., 2008). Isto foi observado de maneira similar em experimento feito na igreja de St. George, na Austrália, onde foi verificada uma distribuição idêntica destes sais ao longo da alvenaria analisada (WEBER et al., 1996).

5.1.6 Discussões

Nesta etapa do trabalho, foi possível obter mapas e, por meio destes, identificar os principais agentes (processos) de degradações atuantes na alvenaria: ação da umidade e eflorescência. Estes dois agentes ocasionam destacamento de camadas e pulverização de argamassa (HENRIQUES, 1994; CHAROLA, 2000) mesmo se tratando de uma argamassa forte conforme foi constatado na análise de traço.

A região mais degradada encontra-se na parte inferior da alvenaria, como seria de se esperar, pelo contato com o solo e a falta de impermeabilização por questões tecnológicas da época.

Como a umidade está sempre presente na base, é possível que ocorram ciclos de cristalização e dissolução dos sais de forma recorrente (CHAROLA, 2000; KANAN, 2008), por este motivo a região encontra-se mais degradada. Esses ciclos podem estar relacionados, por exemplo, a variações climáticas sazonais, como a alternância dia-noite, ou anualmente, com a estação chuvosa e a estação seca.

Verifica-se que na lateral esquerda a degradação alcança uma altura de aproximadamente 3,50m enquanto que na lateral direita atinge 2,34m de altura. Comparando estes dados aos teores de umidade, observou-se que os locais mais úmidos estão menos degradados, enquanto que os locais menos úmidos estão mais degradados. Isto ocorre possivelmente por conta da solubilidade dos sais, ou seja, onde há menos umidade os sais cristalizam-se mais facilmente e conseqüentemente provocando maiores danos.

Os blocos de arenito ferruginoso podem ter funcionado como barreira para infiltração dos sais. Dessa forma, a cristalização dos sais teria iniciado pela argamassa, fator que pode ser visualizado in loco, uma vez que a argamassa encontra-se mais degradada se comparada aos blocos de arenito presentes na estrutura.

A presença de sal na edificação podem ter várias origens. No caso do cloreto de sódio pode ser proveniente da contaminação dos materiais utilizados na construção, uma vez que a areia e a cal utilizadas em argamassas antigas eram oriundas de ambiente marinho (CRUZ, 1898; FERREIRA, 1983).

Os sulfatos podem ser provenientes de intervenções recentes e correspondem à reação entre a argamassa de cal existente e a possível aplicação de argamassa de cimento (CHAROLA, 2000), uma vez que em algumas áreas são

observados resquícios de cimento assim como na alvenaria lateral junto à analisada. Provavelmente utilizou-se argamassa de cimento para reintegração do reboco de revestimento desta e de outras alvenarias no projeto de restauração da igreja em 1998, ou esta argamassa foi aplicada em alguma atividade de manutenção do edifício.

Além disso, há possibilidade da ocorrência de cloretos, nitratos e sulfatos em período posterior à construção através da umidade ascendente que carrega sais existentes no solo para os materiais da edificação (HENRIQUES, 1994): 1) Os cloretos podem ser oriundos de um depósito de sal situado próximo à edificação, 2) os sulfatos podem ser provenientes de construções contemporâneas próximas à edificação, 3) Os nitratos provenientes de material orgânico encontrado no solo por conta tubulações de esgoto danificadas próximas à edificação ou de excrementos nas alvenarias da edificação (urina).

O trânsito de veículos de grande porte e a possível acomodação do solo podem ter auxiliado no surgimento de fissuras na alvenaria, estando estas, dentre as principais causas deste dano nas edificações. Estas problemáticas, juntamente com a eflorescência e a presença de umidade, podem favorecer a degradação de regiões mais internas, uma vez que o substrato se torna mais exposto a degradação.

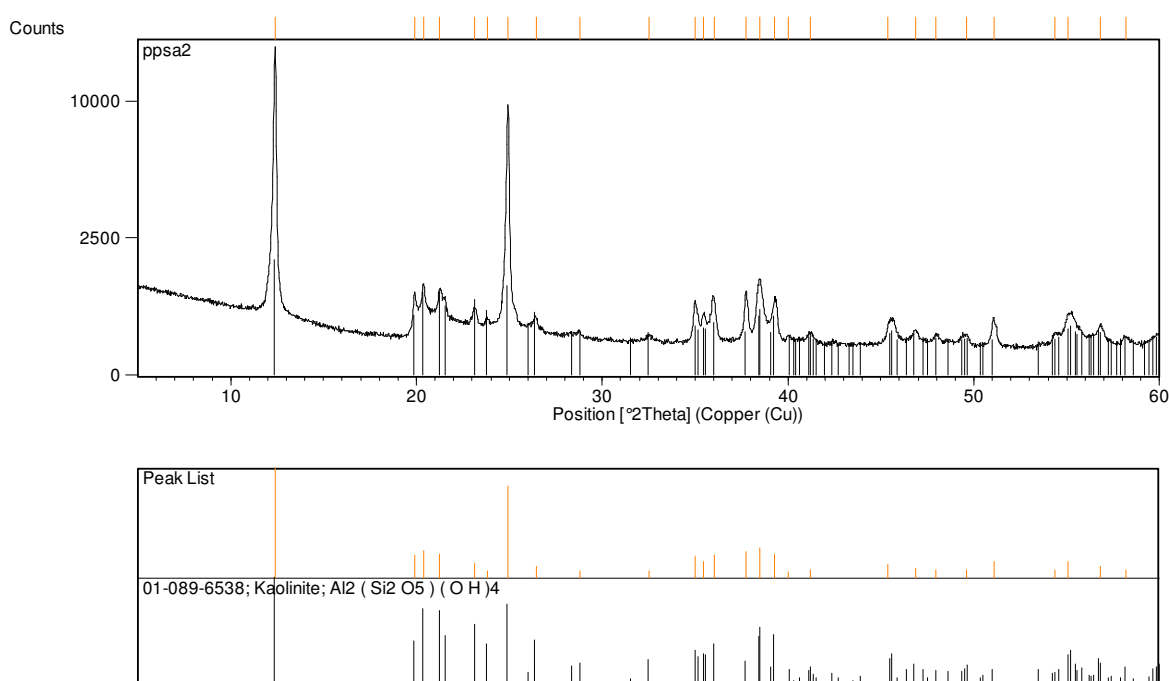
5.2 APLICAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE DESSALINIZAÇÃO

5.2.1 Caracterização dos Materiais de Partida: Caulim, Bentonita e Areia

O caulim utilizado para argamassa de dessalinização foi obtido da empresa Imerys, uma das principais produtoras de caulim para cobertura de papel da região. Os resultados das análises mineralógicas (DRX) e química (FRX) serão apresentados a seguir.

O difratograma de Raios-X da amostra de caulim está apresentado na Figura 24 e revela a dominância do argilomineral caulinita. Na parte inferior da figura é apresentado o padrão (ficha PDF) do mineral caulinita, confirmando a presença apenas desse mineral. É nítida a ausência de outros minerais que poderiam estar presentes no caulim, como quartzo, anatásio, micas, dentre outros. A explicação é porque esse é um caulim já beneficiado, e esses minerais, considerados como impurezas, foram removidos durante o processamento.

Figura 24: Difratograma de Raios-X do caulim da Imerys. Os traços pretos correspondem a posição dos picos de um padrão (Ficha PDF) de caulinita.



A análise química da amostra de caulim está apresentada na Tabela 4, juntamente com a proporção estequiométrica teórica do mineral caulinita. Observe o que já foi descrito anteriormente, que a amostra é constituída quase que exclusivamente de caulinita, e os teores dos outros elementos, como Fe₂O₃, TiO₂,

MgO, CaO, Na₂O, K₂O e P₂O₅ são extremamente baixos e associados a pequenas impurezas minerais que não detectados nas análises de DRX.

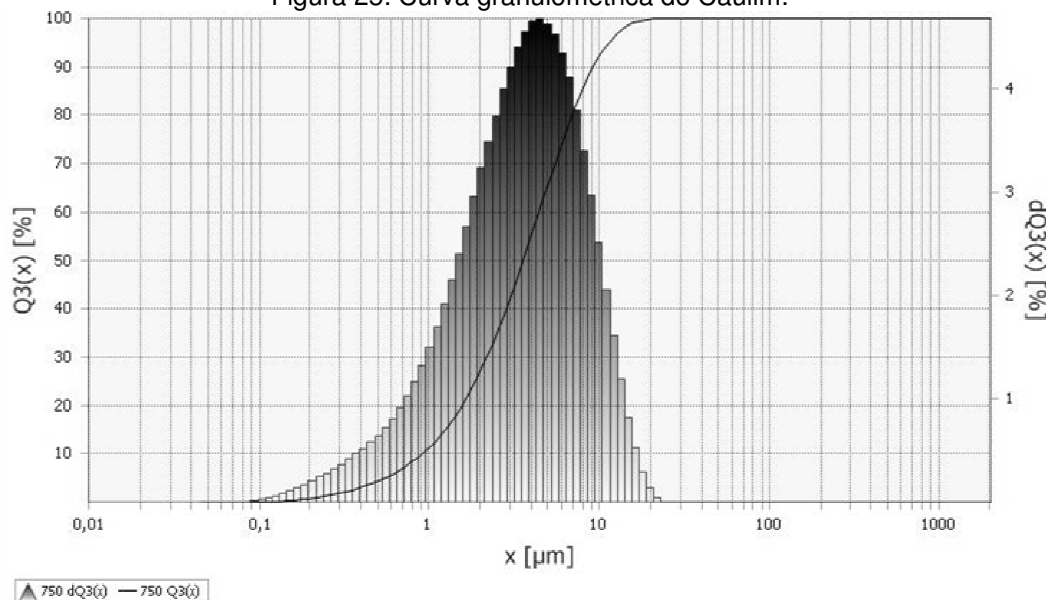
Tabela 4: Análise química dos elementos maiores por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X da amostra de Caulim.

Óxidos	Caulim	Caulinita Teórica
SiO ₂	44,66	46,54
TiO ₂	0,52	-
Al ₂ O ₃	40,00	39,50
Fe ₂ O ₃	0,42	-
MgO	0,041	-
CaO	0,003	-
Na ₂ O	0,14	-
K ₂ O	0,04	-
P ₂ O ₅	0,08	-
P.F.*	14,03	13,96

*P.F. = Perda ao fogo determinada com a queima a 1000 °C, após secagem a 105 °C.

A curva granulométrica do caulim é característica da fração argila (D50 ~ 3,30 μm), unimodal e com pouca assimetria (Figura 25), refletindo a composição mineralógica anteriormente descrita, dominada por caulinita.

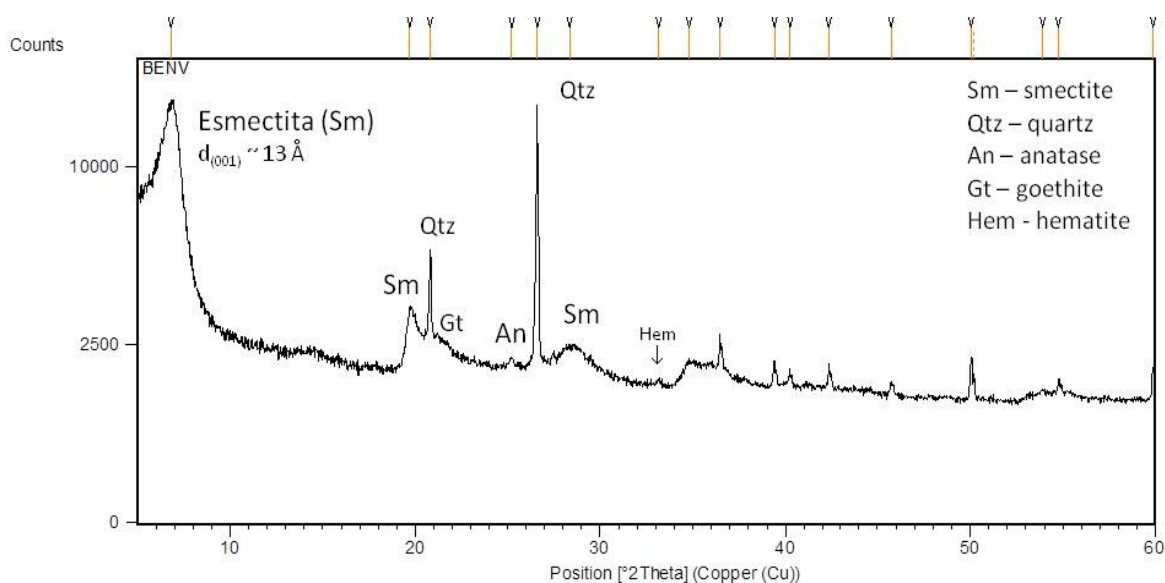
Figura 25: Curva granulométrica do Caulim.



O difratograma de raios-X da bentonita está apresentado na Figura 26. O pico principal no início do difratograma é característico da esmectita e representa a distância interplanar, que neste caso é de aproximadamente 13 Å. Esta é a distância

típica das bentonitas sódicas, que são as mais utilizadas comercialmente. As bentonitas cálcicas (que são a maioria das bentonitas brasileiras, sem ativação prévia com sódio) apresentam o valor da distância interplanar de aproximadamente 15 Å. Outros minerais identificados, em menor proporção, são: quartzo, goethita, hematita e anatásio.

Figura 26: Difratoograma de Raios-X da bentonita.



Os resultados da análise química da bentonita estão apresentados na Tabela 5. Foi observado que sua composição química está próxima a de uma esmectita, que é o principal argilomineral rico em SiO_2 e Al_2O_3 . Seu teor de Na_2O é superior ao teor de CaO , demonstrando que se trata de uma bentonita sódica, e o alto teor de Na_2O (2,86%) não é natural, mas proveniente do processo de ativação da bentonita. Nota-se também o teor elevado de ferro (8,39%). Este elemento pode estar na estrutura da esmectita, porém é mais provável que esteja associado aos minerais de ferro goethita e hematita, em pouca quantidade, refletindo a composição mineralógica anteriormente descrita. Ainda com base no difratograma de raios-x, verifica-se que o teor de 0,8% de TiO_2 está relacionado a presença de anatásio em pouca quantidade. O valor de perda ao fogo (PF) obtido (7,69%) equivale a perda de massa relacionada à perda de água e hidroxilas coordenadas e adsorvidas na estrutura da esmectita, além da goethita.

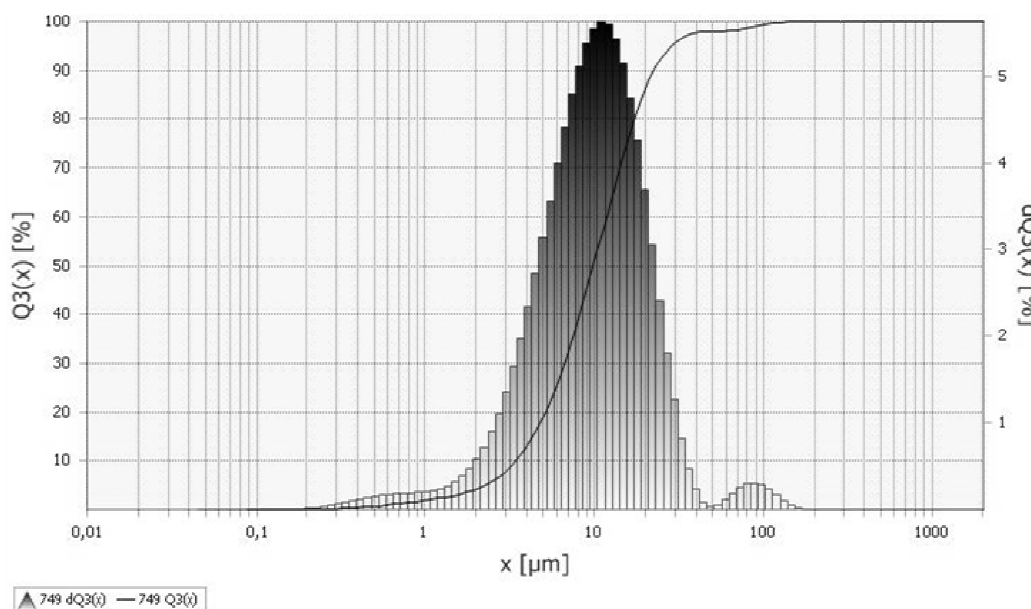
Tabela 5: Análise química dos elementos maiores por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X da amostra de bentonita.

Óxidos	%
SiO ₂	61,11
TiO ₂	0,80
Al ₂ O ₃	14,92
Fe ₂ O ₃	8,39
MgO	2,58
CaO	1,21
Na ₂ O	2,86
K ₂ O	0,33
P ₂ O ₅	0,11
P.F.*	7,69

*P.F. = Perda ao fogo determinada com a queima a 1000 °C, após secagem a 105 °C.

Em relação à análise granulométrica da bentonita, a curva acumulativa apresenta D50 ~ 10µm ou 1000# (silte fino), com ligeira tendência bimodal na fração mais grosseira (Figura 27), relacionada à presença quartzo e anatásio em pequena quantidade como foi revelado anteriormente na DRX. Deste modo, percebe-se que os picos elevados de quartzo não estão relacionados à sua quantidade e sim a boa cristalinidade do mineral na amostra.

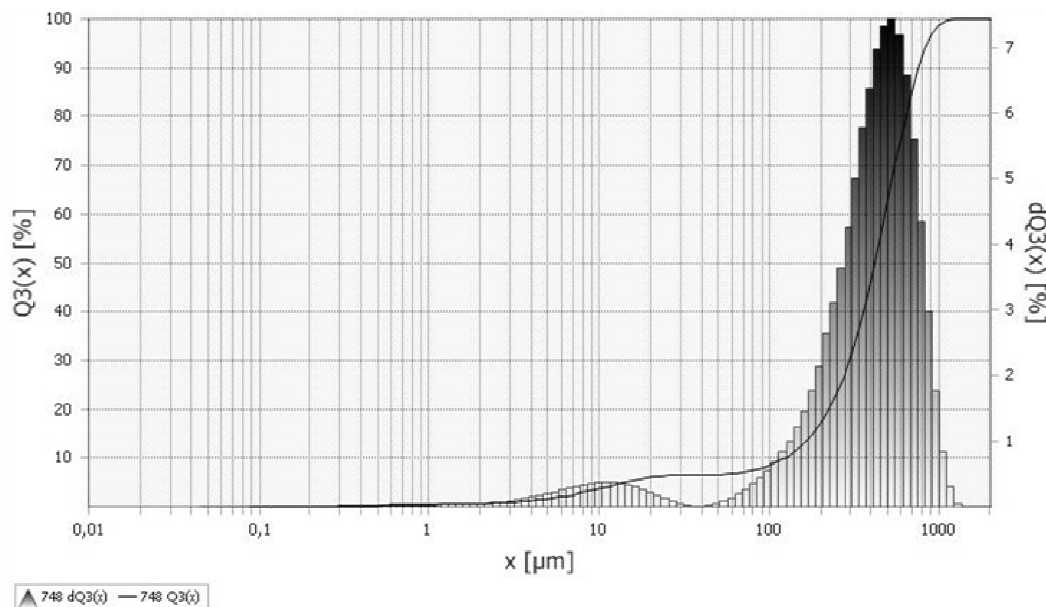
Figura 27: Curva granulométrica da Bentonita.



No caso da areia, não foram realizadas análises químicas e mineralógicas, por se tratar, naturalmente, apenas de quartzo. Foi feito somente o ensaio granulométrico (Figura 28), revelando o diâmetro médio (D50) de aproximadamente

410 μm ou 40#, equivalente a areia média, com leve tendência bimodal na fração mais fina.

Figura 28: Curva granulométrica da Areia.



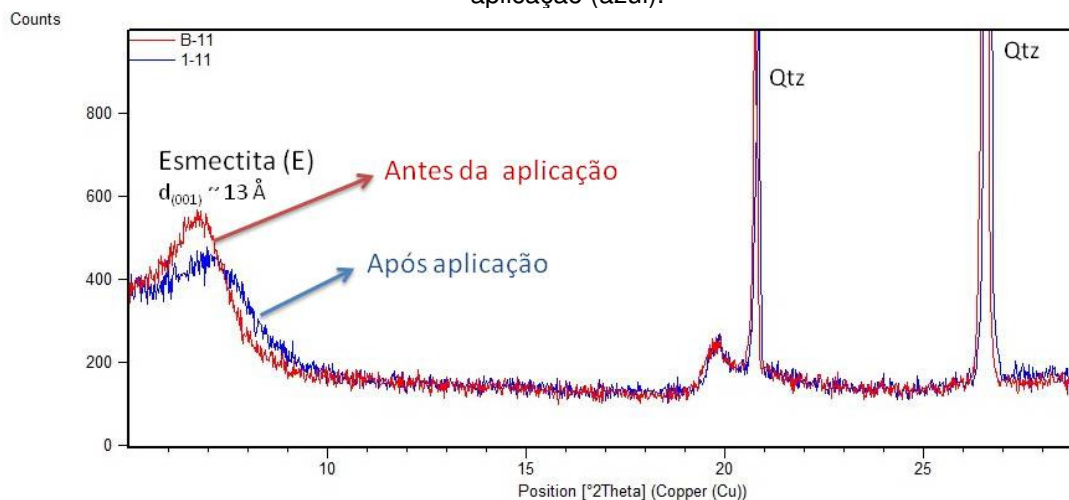
5.2.2 Argamassas

Dentro da presente proposta, as argamassas de dessalinização foram analisadas por difratometria de raios-x (DRX), antes e depois da aplicação na alvenaria estudada, com o principal objetivo de avaliar a sua capacidade de remoção dos produtos de eflorescência. Os resultados obtidos serão descritos a seguir:

a) Argamassa B_11:

Na comparação dos Difratogramas de Raios-X da Argamassa B_11 (bentonita e areia na relação 1:1) antes e depois da aplicação (Figura 29), observa-se que há um alargamento do pico $d_{(001)}$ de esmectita, além de um pequeno deslocamento para a direita (diminuição da distancia interplanar) sugerindo que houve perda de cristalinidade do mineral.

Figura 29: Difratogramas de Raios-X da Argamassa B_11: Antes de aplicação (vermelho) e Após aplicação (azul).

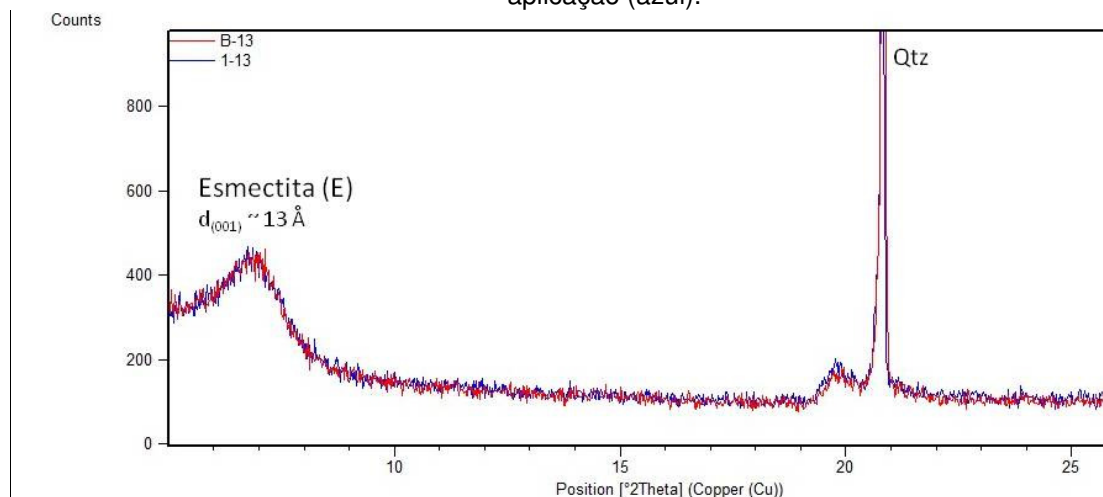


Isto indica a forte possibilidade uma modificação química na estrutura do argilomineral, que pode está relacionada à troca catiônica, ou seja, sugere que houve incorporação de sódio na estrutura (espaço intercamada) da esmectita.

b) Argamassa B_13:

Nos Difratogramas de Raios-X da argamassa B_13 (Figura 30), bentonita e areia na relação 1:3, verifica-se que não houve variação dos picos de esmectita, como descrito na amostra B_11, sugerindo que não houve troca catiônica e consequentemente não ocorreu modificação na estrutura do argilomineral.

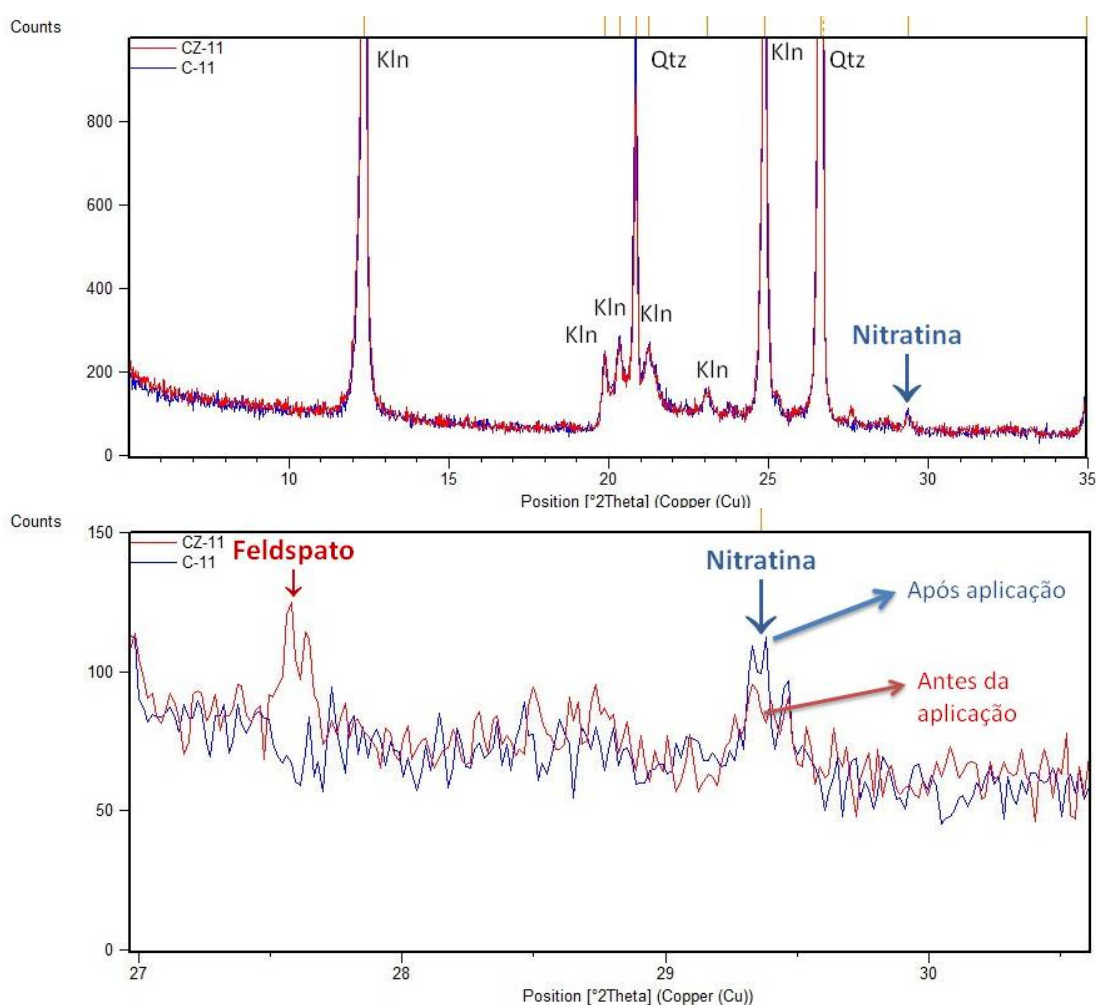
Figura 30: Difratogramas de Raios-X da Argamassa B_13: Antes de aplicação (vermelho) e Após aplicação (azul).



c) Argamassa C_11:

A comparação dos Difractogramas de Raios-X da amostra C_11 (Figura 31), caulim e areia na relação 1:1, mostra que não há diferenças nos picos de caulinita. Diferente da esmectita, a caulinita não é um argilomineral expansivo e, portanto, sua estrutura não modifica neste tipo de tratamento. A principal diferença observada, após a aplicação, foi a presença de Nitratina (NaNO_3). Trata-se de um sal comumente utilizado como fertilizante (adubo) na agricultura.

Figura 31: Difractogramas de Raios-X da Argamassa C_11 antes de aplicação (vermelho) e após aplicação (azul): presença do mineral nitratina após aplicação.

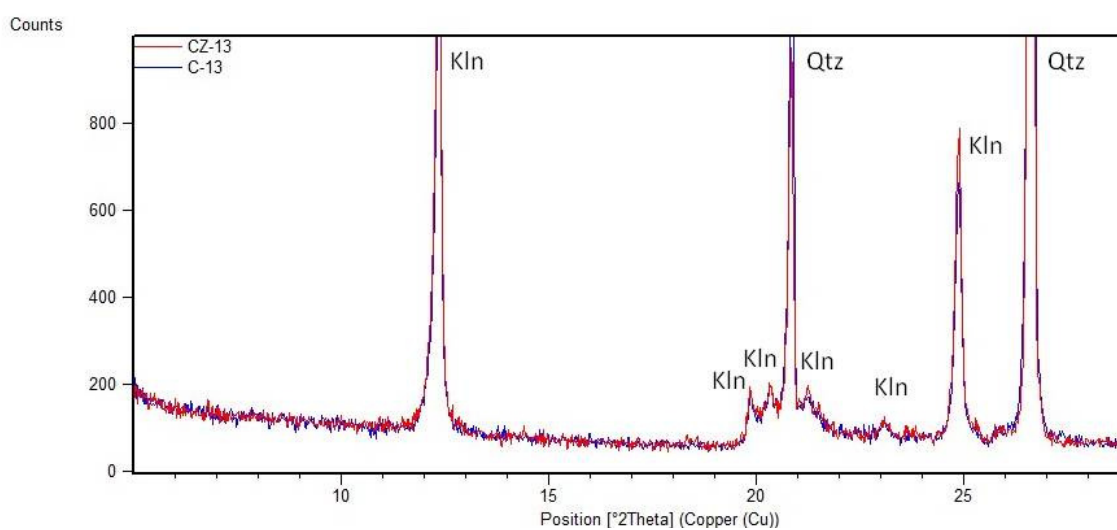


O Pico de feldspato possivelmente está relacionado a presença de um grão de clivagem ligado a areia, ou seja, junto com o grão de quartzo havia um grão de feldspato. Como foram feitas análises de porções distintas, é provável a ocorrência deste mineral apenas em uma das amostras, neste caso apenas na amostra de argamassa antes da aplicação.

d) Argamassa C_13:

Nos Difractogramas de Raios-X da argamassa C_13 (Figura 32), caulim e areia na relação 1:3, observa-se que não houve alteração na mineralogia da amostra após a aplicação. Isto indica um comportamento diferente da amostra C_11, na qual foi revelado o mineral nitratina.

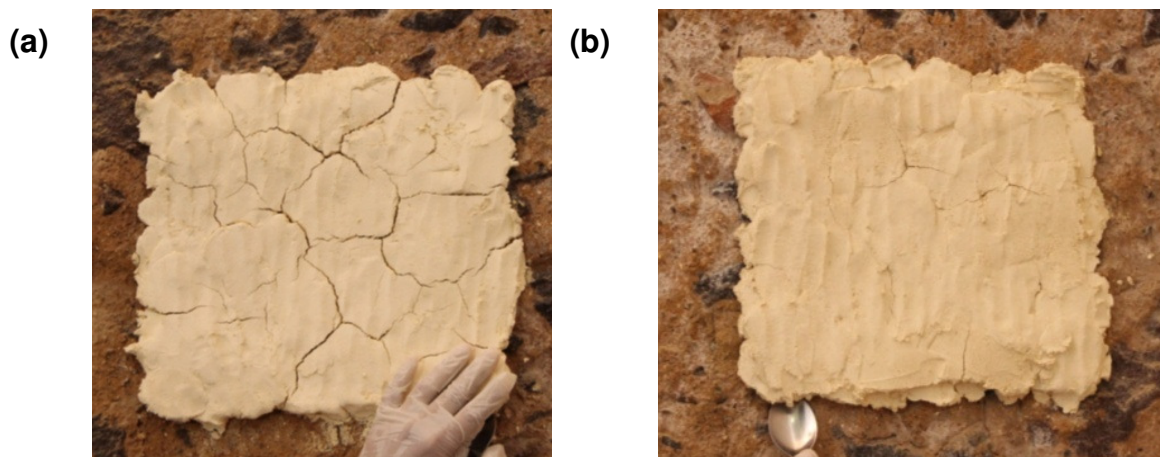
Figura 32: Difractogramas de Raios-X da Argamassa C_13: antes de aplicação (vermelho) e após aplicação (azul).



5.2.3 Efeitos Superficiais no Substrato

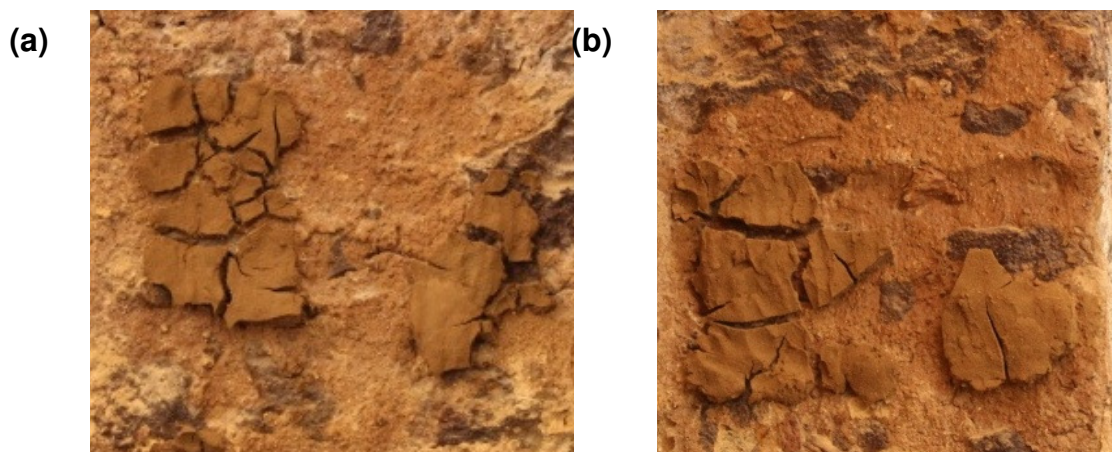
Após sete dias, no momento da coleta das argamassas de dessalinização, verificou-se que as misturas com caulim (C_11 e C_13) estavam com algumas rachaduras e sem nenhum destacamento (Figura 33). A argamassa C_11 foi a que apresentou mais rachaduras e com maior afastamento entre elas, possivelmente influenciada pela maior quantidade de argila se comparada à argamassa C_13.

Figura 33: Argamassas de dessalinização após sete dias: (a) C_11 e (b) C_13.



Por outro lado, as amostras com bentonita (B_11 e B_13) estavam mais de 50% destacadas da parede e com pequenas porções aderidas ao substrato. As pequenas porções ainda apresentavam grandes rachaduras e estavam parcialmente destacadas (Figura 34).

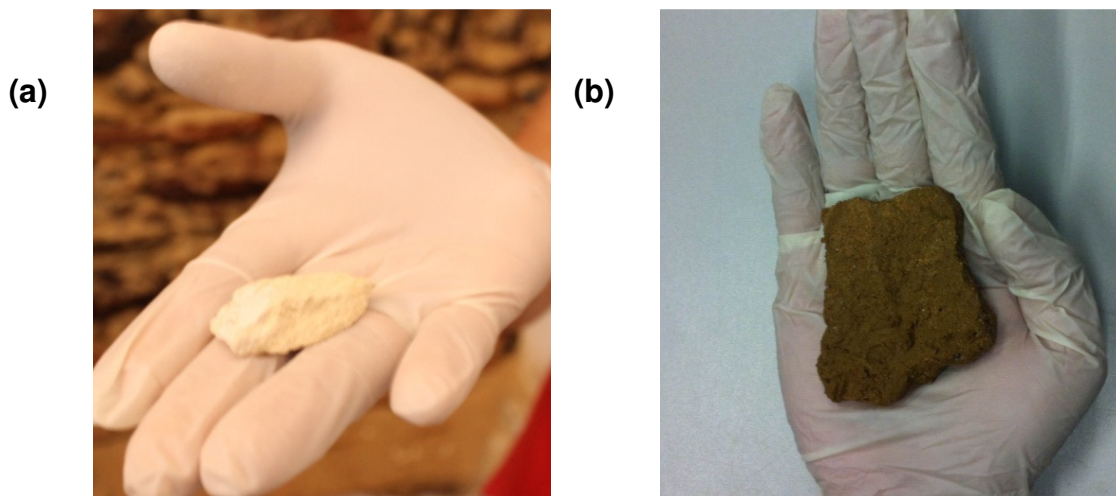
Figura 34: Argamassas de dessalinização após sete dias: (a) B_11 e (b) B_13.



Na retirada das argamassas, duas situações foram observadas: as argamassas com caulim ficaram completamente aderidas ao substrato, enquanto que as argamassas com bentonita desprenderam facilmente.

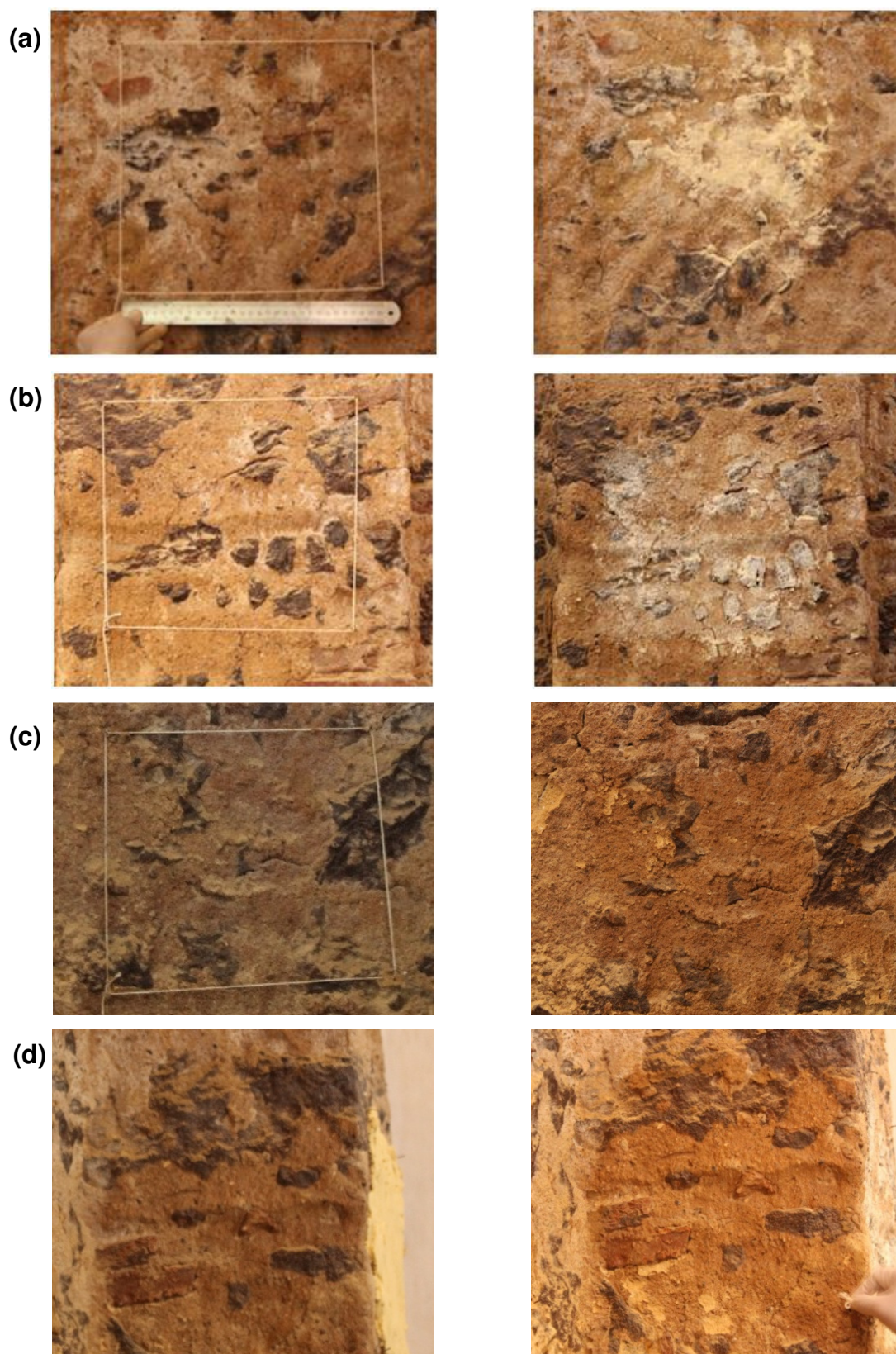
Isto pode ser visto melhor com as imagens das amostras após a retirada, onde as argamassas que continham caulim saíram em fragmentos pequenos, enquanto que as argamassas com bentonita saíram em placas (Figura 35).

Figura 35: Amostras das argamassas de dessalinização após a coleta: (a) B_11 e (b) C_11.



Visualmente, nos locais onde foram aplicadas as misturas com caulim, não pode ser visto se houve limpeza (remoção dos sais) pelo fato de ainda ficarem resquícios da argamassa no substrato. Em contrapartida, nos pontos onde foram aplicadas as argamassas com a bentonita houve uma melhora visual mais aceitável, tanto por não deixar resquícios, como também pela limpeza do local. Todas essas observações podem ser visualizadas na Figura 36.

Figura 36: Imagens antes e depois da aplicação das argamassas de dessalinização caulim no substrato após sua retirada: (a) C_11, (b) C_13, (c) B_11 e (d) B_13.



5.2.4 Discussões

A presença da nitratina descrita na amostra C_11 após aplicação, pode estar relacionada a presença de matéria orgânica, ou seja, trata-se de um nitrato incorporado pela argamassa proveniente do local (alvenaria) onde esta foi aplicada, uma vez que o teste qualitativo de nitratos da argamassa da alvenaria revelou a presença destes sais.

A perda de cristalinidade da amostra B_11 após aplicação sugere que houve troca catiônica entre a esmectita e a halita presente na alvenaria, sal encontrado em abundancia revelado no difratograma de raios-x e no teste qualitativo e quantitativo de cloretos da argamassa da alvenaria.

Verificou-se que as misturas contendo os mesmos materiais são influenciadas diretamente pela relação entre eles: as misturas na relação 1:1 funcionaram melhor se comparadas às misturas na relação 1:3. Isto pode ser explicado de duas formas:

a) no caso das argamassas com bentonita aquela cuja relação é 1:1 (bentonita:areia) possui maior quantidade do argilomineral esmectita, e conseqüentemente possuem maior possibilidade de troca catiônica se comparada a mesma mistura na relação 1:3.

b) no caso da argamassa com caulim na relação 1:1 (caulim:areia), possivelmente há formação de poros de menor diâmetro, que segundo Lubelli et al. (2009), são mais eficazes no transporte por advecção, ao contrário da mistura na relação 1:3 que forma poros de maior diâmetro. Este mesmo raciocínio pode ser aplicado para argamassa de bentonita, pois esta argila ajuda a diminuir o tamanho dos poros das argamassas (LUBELLI et al., 2009) aumentando o poder de sucção destas.

As argamassas com caulim (C_11 e C_13) apresentaram comportamento não aceitável: material de difícil retirada por conta de sua excessiva adesão ao substrato. Como consequência desta problemática, resquícios das argamassas permaneceram no substrato não podendo ser visto sua eficiência quando a limpeza. Mesmo após inúmeras tentativas não foi possível eliminar completamente os vestígios das aplicações.

Esta adesão excessiva foi possivelmente influenciada pela adição de uma pequena quantidade de cal nas amostras, para melhorar a trabalhabilidade das argamassas de caulim, conforme descrito nos Materiais e Métodos.

As argamassas com bentonita B_11 e B_13 tiveram comportamento semelhante e com resultados satisfatórios: material de fácil remoção e com melhora visual nas áreas onde foram aplicadas. No momento da coleta estas argamassas apresentavam-se parcial ou totalmente destacadas, fator que era esperado antes da aplicação por conta da excessiva retração da bentonita na secagem. As regiões de aplicação perderam a aparência esbranquiçada que apresentavam anteriormente de forma satisfatória, principalmente na argamassa da alvenaria, material mais comprometido visualmente.

6. CONCLUSÕES

A remoção do reboco e a climatização foram cruciais para degradação da alvenaria, pois tais intervenções alteram as condições microclimáticas pré-estabelecidas acelerando o processo de eflorescência que é favorecido pela ação de umidade ascendente.

A umidade ascendente provavelmente está relacionada à presença de um jardim nas adjacências da alvenaria, implicando também no transporte dos sais do solo para a estrutura, justificando a procedência de nitratos que são sais geralmente provenientes de matéria orgânica presente no solo.

No interior da alvenaria, os sais são transportados em forma de íons para a superfície do substrato e, neste momento, a água tende a evaporar. Quando a água evapora os íons cristalizam na superfície do substrato formando minerais que ocasionam pressões nos poros do material e conseqüentemente provocam a degradação: destacamento de camadas e pulverização de argamassa (HENRIQUES, 1994; CHAROLA, 2000).

Para amenizar esta problemática foram feitas aplicações das argamassas de dessalinização que possibilitariam a cristalização destes sais em seus poros evitando que a alvenaria fosse afetada (ARENDETT, 1995).

Por meio de análises mineralógicas por DRX, verificou-se que duas argamassas apresentaram resultados satisfatórios: a B_11 e a C_11. A argamassa B_11, composta por bentonita e areia na relação 1:1, incorporou o sódio proveniente da halita (NaCl), principal sal responsável pela degradação por eflorescência salina (CHAROLA, 2000). A Argamassa C_11, composta por caulim e areia na relação 1:1, se mostrou eficaz na retirada de nitrato da alvenaria, sal proveniente de matéria orgânica também responsável pela eflorescência em edifícios históricos (OLIVEIRA, 2006).

As duas argamassas citadas apresentaram eficiência quanto à dessalinização. Entretanto, dentre estas, somente a argamassa com bentonita apresentou resultado visual aceitável eliminando a aparência esbranquiçada da eflorescência e não deixando resquícios do material na alvenaria. Sendo assim, esta é a mais recomendada para aplicação em alvenarias que possuem a mesma problemática.

As alternativas sugeridas para caracterização e mapeamento se mostraram eficientes e auxiliaram no diagnóstico correto da problemática existente, norteando quais tipos de intervenções devem ser feitas para amenizar a degradação da

alvenaria. Além disso, por meio de DRX chegou-se a conclusão de quais argamassas são eficazes para dessalinização, atingindo aos objetivos pré-estabelecidos para este trabalho.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se a utilização de outros dois métodos antes e após a aplicação das argamassas de dessalinização: 1) Cromatografia iônica, para verificar a capacidade de absorção de sais e 2) Teste quantitativo de cloretos para verificar se a quantidade destes aumenta na argamassa após aplicação.

Na Figura 37 estão apresentadas as etapas para procedimento de dessalinização superficial com argamassa de bentonita que devem ser realizadas em alvenarias que possuem eflorescências salinas.

Esta pesquisa representa um passo importante para a conservação e restauração de alvenarias mistas degradadas por eflorescência salina, pois fornecem subsídios para caracterização e amenização do problema evitando perda ou descaracterização do patrimônio histórico edificado.

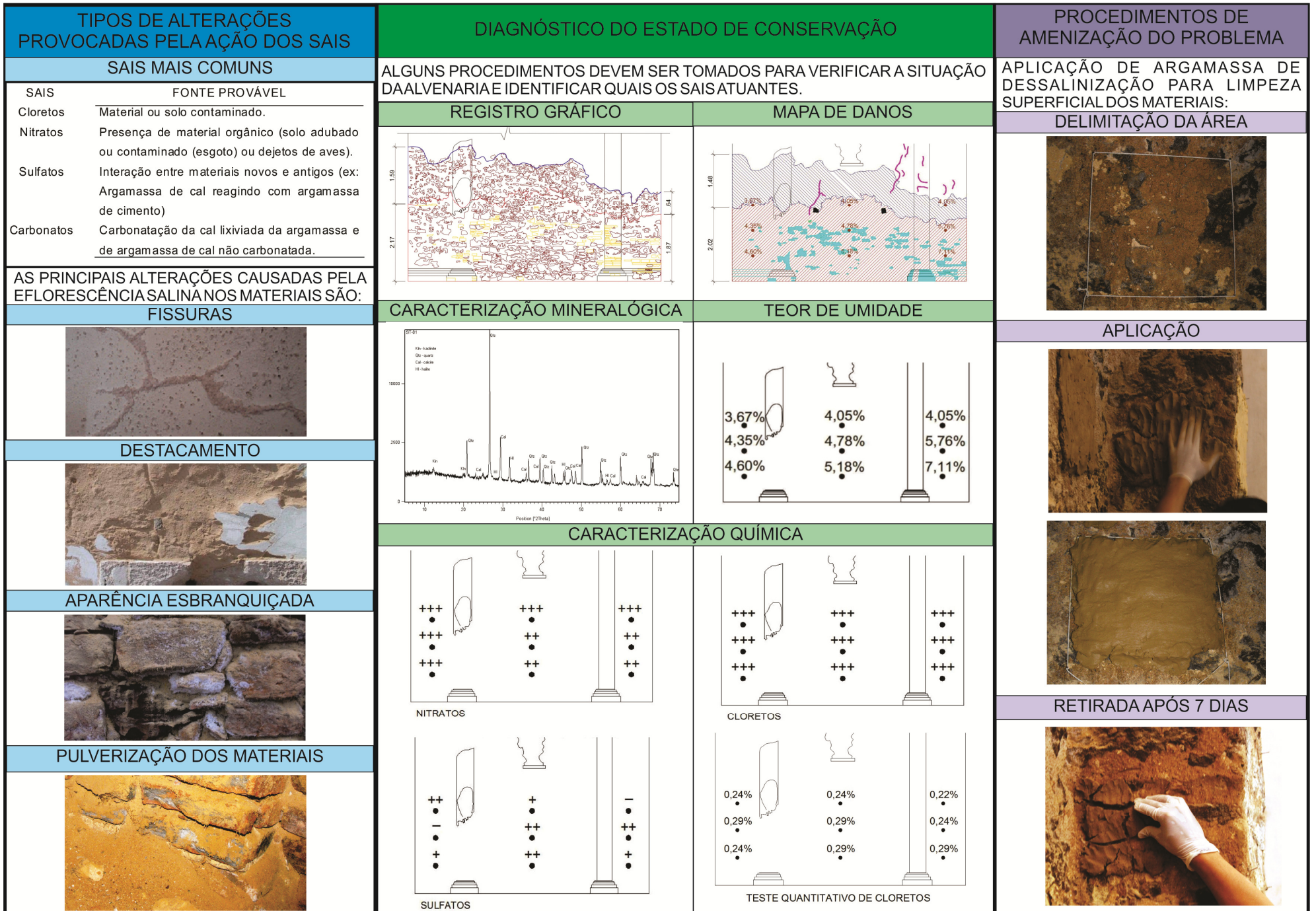


Figura 37: Procedimento para dessalinização superficial de alvenaria com argamassa de bentonita.

REFERÊNCIAS

ADDLESON, Lyall. **Building failures – a guide to diagnosis, remedy and prevention**. Londres: The Architectural Press LTDA, 1983.

ARENDRT, Claus. **Métodos de tratamento de alvenarias deterioradas. A utilização de rebocos de recuperação e medidas de combate aos sais**. Tradução Hélio Adão Greven. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

BIANCHIN, Adriane Ciliato. **Influência do proporcionamento dos materiais constituintes no desempenho de argamassas para reboco de recuperação de alvenarias contaminadas por umidade e sais**. 1999. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 1999.

BOURGES, Ann; VERGES-BELMIN, Vèronique. Comparison and optimization of five desalination system on the inner walls of Saint Philibert Church in Dijon, France. In: SALT WEATHERING ON BUILDINGS AND STONE SCULPTURES, 1, 2008, Copenhagen. **Anais...** Copenhagen: University of Cyprus, 2008. p. 29-40.

CABRITA, Antônio R.; AGUIAR, José; APPLERTON, João. **Manual de apoio à reabilitação dos edifícios do Bairro Alto**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993.

CHAROLA, Elena. Salts in the deterioration of porous materials: an overview. **Journal of the American Institute for Conservation**, USA, V. 39, p. 327 – 343, 2000.

CRUZ, Ernesto. **História de Belém**. Belém: Universidade Federal do Pará, 1898.

FERREIRA, Alexandre R. **Viagem filosófica ao Rio Negro**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 1983.

GEWEHR, Úrsula. **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**. Dissertação de mestrado, Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

GONÇALVES, Tereza D. **Cristalização de sais solúveis em materiais porosos**. Lisboa: LNEC, 2007.

HENRIQUES, Fernando. M. A. **Humidade em paredes**. Lisboa: LNEC, 1994.

KANAN, Maria I. **Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimentos à base de cal**. Brasília: IPHAN / Programa Monumenta, 2008.

LARSEN, Poul K. The development and testing of a salt extracting mortar. **Internationale Zeitschrift fur Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege**. Deutschland, heft 1, p. 79-83, 2001.

LAZZARINI, Lorenzo; BORRELLI, Ernesto; BOUABDELLI, Mohamed; ANTONELLI, Fabrizio. Insight into the conservation problems of the stone building “Bab Agnaou”, a XII cent. Monumental gate in Marrakech (Morocco). **Journal of Cultural Heritage**, Morocco, V. 8, p. 315 - 322, 2007.

LUBELLI, Barbara; HEES, Rob, P. J. Desalination of masonry structures: Fine tuning of pore size distribution of poultices to substrate properties. **Journal of Cultural Heritage**, Netherlands, V. 11, p. 10-18, 2010.

MERINO, F. L. **Humidades y eflorescências em obras de fábrica**. Madrid: Servicio de Publicaciones Del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1993.

MOROPOULOU, Antonia; BAKOLAS, Asterios. BIBIKOU, Katerina. Investigation of the technology of historic mortars. **Journal of Cultural Heritage**, Greece, V. 1, p. 45 – 58, 2000.

NAPPI, Sérgio C. B.; LALANE, Manuela M. **A Salinidade em Edifícios Antigos**. Córdoba: CINPAR, 2010.

OLIVEIRA, Mário M. **Tecnologia da conservação e da restauração: materiais e estruturas**. Salvador: EDUFBA, 2006.

PETRUCCI, Eladio G. R. **Materiais de Construção**. Porto Alegre: Editora Globo, 1978.

POSSER, Natália D. **Proporcionamento de argamassas para reboco de recuperação**. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

PUIM, Pedro G. A. C. **Controlo e reparação de anomalias devidas à presença de sais solúveis em edifícios antigos**. 2004. 95f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2004.

RUARO, Paulo; GREVEN, Hélio A.; DAL MOLIN, Denise. **Contaminação e patologias por sais em alvenarias portantes de edificações históricas**. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, 1997.

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

SEELE, Jörg. **Tópicos especiais em engenharia: restauro de edificações históricas**. Porto Alegre: UFRGS, 2000.

ULSAMER, Federico. **Las Humedades em la Construcción**. Barcelona: Grupo Editorial Ceac S.A., 1995.

VASCONCELLOS, Silvio de. **Arquitetura no Brasil: Sistemas Construtivos**. Belo Horizonte: Rona Editora, 1979.

WEBER, J. Gaggl, W.H.L. Szambelan, R. **Crystallization of sulphate salts induced by selective salt extration by poultices: results from a case study, in Origin, Mechanisms and Effects of Salts o Degradation os Monuments in Marine and Continental Environments.** Bari: Zezza Editor, 1996.

WILIMZIG, Markus. **Sais e umidade – os maiores causadores de danos nos materiais de construção.** Porto Alegre: IAB, 2004.