



**INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**  
Universidade Técnica de Lisboa

## **Controlo e reparação de anomalias devidas à presença de sais solúveis em edifícios antigos**

**Pedro Garoupa Albergaria de Chaves Puim**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**

### **Júri**

Presidente: Prof. Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues  
Orientador: Doutora Teresa Cláudio Diaz Gonçalves  
Co-Orientador: Prof. Doutor Augusto Martins Gomes  
Vogal: Doutor José Delgado Rodrigues

**Outubro de 2010**



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), na pessoa do seu Presidente, Engenheiro Carlos Alberto de Brito Pina, pelo estágio e pelas condições que me proporcionou para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Instituto Superior Técnico (IST), na pessoa do seu presidente, Professor Doutor António Manuel da Cruz Serra, pela oportunidade de realizar a presente dissertação.

À minha Orientadora, Doutora Teresa Diaz Gonçalves, pelo incansável acompanhamento dispensado e pela disponibilidade permanente, estímulo e exigência demonstrados ao longo deste trabalho, e ainda pela ajuda na revisão final do texto.

Ao meu Co-Orientador, Professor Doutor Augusto Gomes, pelos conselhos e orientações dados e pela atenção disponibilizada, e ainda pela ajuda na revisão final do texto.

Ao Núcleo de Materiais Pétreos e Cerâmicos do LNEC, na pessoa do seu Coordenador, Engenheiro João Manuel Mimoso, onde realizei este trabalho.

Aos colegas estagiários do LNEC, Idália Gomes, André Carneira, Vânia Brito e Sandra Couto, pelo companheirismo e espírito de ajuda demonstrados.

Aos meus pais, Arsénio Puim e Maria Leonor Bicudo, e à minha Avó, Leonor Garoupa, pelo permanente apoio, motivação e amizade incondicional.

À minha namorada, Pilar Damião, a par de tudo o mais, pelo acompanhamento e apoio ao longo desta jornada.

Ao meu irmão, Miguel Puim, e à sua namorada, Carolina Almeida, pela amizade e boa disposição.



## **Controlo e reparação de anomalias devidas à presença de sais solúveis em edifícios antigos**

### **RESUMO**

A acção dos sais solúveis é uma causa frequente de degradação dos edifícios antigos, reflectindo-se a vários níveis (e.g., estético, habitabilidade, segurança estrutural). Esta dissertação tem como objectivo efectuar a análise e sistematização de um leque abrangente de práticas actualmente utilizadas para controlo da degradação por sais solúveis. Neste âmbito, foi utilizada a análise documental de bibliografia posterior a 2000 e procedeu-se à análise crítica de métodos de controlo da degradação seleccionados: remoção mecânica de eflorescências; remoção de materiais contaminantes; compressas; remoção electroquímica de sais; microrganismos; modificadores de cristalização; rebocos; controlo ambiental; controlo da humidade ascensional; método do hidróxido de bário. Analisaram-se também algumas medidas práticas para prevenção do risco de ocorrência ou agravamento desta degradação. Adicionalmente, avaliou-se a complementaridade entre métodos, identificando eventuais benefícios de uma acção conjugada. A sistematização das práticas analisadas envolveu o seu enquadramento segundo três abordagens distintas: prevenção, correcção, e mitigação.

A dissertação permitiu tirar conclusões sobre: (i) a actuação face à degradação provocada por sais solúveis, a qual deve pautar-se por uma compreensão global do problema; (ii) a importância das medidas preventivas, como meio para evitar os danos e custos associados; (iii) a relevância dos métodos de controlo da degradação, nas vertentes correctiva e de mitigação; (iv) a experiência actual sobre a utilização prática dos métodos em edifícios, designadamente com relação ao número de casos de estudo existentes; (v) a necessidade de uma boa compreensão das práticas referidas, nomeadamente em relação às vantagens e inconvenientes, a qual pode ser facilitada pela sua sistematização.

**PALAVRAS-CHAVE:** sais solúveis; degradação; edifícios antigos; reabilitação; controlo; prevenção.



# **Control and repair of anomalies due to the presence of soluble salts in old buildings**

## **ABSTRACT**

The action of soluble salts is a common cause of the degradation of old buildings, reflecting on various levels (e.g. aesthetic, habitability, structural security). This dissertation has the objective of analyze and systematize various practices presently used to control the degradation by soluble salts. In this context, it was performed document analysis of articles published after the year 2000, and proceeded a critical analysis of the selected degradation control methods, namely: mechanical removal of efflorescence; removal of contaminating materials; poultices; electrochemical removal of salts; microorganisms; crystallization modifiers; plasters and renders; climate control; rising damp control; and the method of barium hydroxide. It was also, analyzed some practical measures for prevention of the risk of occurrence and worsening of degradation. Additionally, it is evaluated the complementarity between methods, identifying eventual benefits of combined measures. The systematization of the analyzed practices included their contextualization according three different approaches: prevention, correction, and mitigation.

This dissertation leads to some conclusions: (i) the action to be taken relatively to degradation by soluble salts, which should be considered and understood in its totality; (ii) the importance of preventive measures to avoid degradation and as means to avoid damages and related costs; (iii) the importance of the degradation control methods, in their corrective and mitigation extents; (iv) the practical application of these methods on buildings, in relation to the number of existing case studies; (v) the need for a better comprehension of the referred measures, namely regarding benefits and disadvantages, which may be facilitated by their systematization.

**KEY-WORDS:** soluble salts; degradation; old buildings; recovery; control; prevention.



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Âmbito, objectivos e metodologia.....	2
1.3. Delimitação do âmbito da tese .....	3
1.4. Estrutura da dissertação .....	3
<b>2. FUNDAMENTOS DA DEGRADAÇÃO POR CRISTALIZAÇÃO DE SAIS SOLÚVEIS</b> .....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Porosidade e higroscopicidade .....	5
2.3. Transporte de água líquida .....	6
2.4. Migração do vapor de água.....	8
2.5. Secagem .....	9
2.6. Sais solúveis.....	10
2.7. Origens da humidade .....	14
2.8. Degradação por sais solúveis .....	14
2.8.1. Generalidades .....	14
2.8.2. Influência dos sais nos processos evaporativos .....	15
2.8.3. Patologia.....	16
2.8.4. Mecanismos de degradação .....	18
<b>3. ACÇÕES PRÉVIAS: PREVENÇÃO E DIAGNÓSTICO DAS ANOMALIAS</b> .....	21
3.1. Prevenção de risco de ocorrência de degradação .....	21
3.1.1. Factor de risco: Aplicação de materiais de construção inadequados.....	21
3.1.2. Factor de risco: Entradas de água consequentes do mau estado da construção ....	22
3.1.3. Factor de risco: Ocorrência de cheias .....	22
3.1.4. Factor de risco: Alteração das condições ambientes interiores.....	23
3.2. Diagnóstico das anomalias .....	24
<b>4. ANÁLISE CRÍTICA DE MÉTODOS PARA CONTROLO DA DEGRADAÇÃO POR SAIS SOLÚVEIS</b> .....	25
4.1. Metodologia .....	25
4.2. Métodos de controlo da degradação.....	26

4.2.1.	Remoção mecânica de eflorescências.....	27
4.2.2.	Remoção de materiais contaminantes .....	29
4.2.3.	Compressas .....	31
4.2.4.	Remoção electroquímica de sais .....	35
4.2.5.	Microrganismos .....	38
4.2.6.	Modificadores de cristalização .....	41
4.2.7.	Rebocos .....	45
4.2.8.	Controlo Ambiental .....	52
4.2.9.	Controlo da humidade ascensional .....	56
4.2.10.	Método do Hidróxido de Bário.....	59
<b>5.</b>	<b>SISTEMATIZAÇÃO DOS MÉTODOS E ACÇÕES .....</b>	<b>63</b>
5.1.	Introdução.....	63
5.2.	Trabalhos anteriores .....	63
5.3.	Complementaridade entre Métodos .....	64
5.4.	Abordagens possíveis no combate à degradação .....	67
5.5.	Enquadramento proposto dos métodos de controlo da degradação .....	69
<b>6.</b>	<b>SUMÁRIO, CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>73</b>
6.1.	Sumário .....	73
6.2.	Conclusões.....	74
6.3.	Perspectivas futuras.....	75
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Porosidade aberta	6
Fig. 2 – Porosidade fechada	6
Fig. 3 – Ilustração do mecanismo da capilaridade	7
Fig. 4 – Fases de secagem de um material poroso	9
Fig. 5 – Eflorescências – Igreja de Santa Cruz, Coimbra, Fevereiro de 2004	17
Fig. 6 – Destacamento de pinturas – Mirante do Jardim da Damas, Palácio da Ajuda, Lisboa, Junho de 2002	17
Fig. 7 – Arenização de argamassas – Moinho de Maré dos Paulistas, Corroios, Dezembro de 2004	17
Fig. 8 – Manchas de humidade – Castelo de Terena, Évora, Junho de 2002	17
Fig. 9 – Patologia da degradação por sais	18
Fig. 10 – Princípios específicos de funcionamento dos rebocos face à cristalização de sais	48
Fig. 11 – Remoção mecânica após aplicação de métodos que promovem a formação de eflorescências	65
Fig. 12 – Aplicação de métodos de dessalinização após remoção de materiais contaminantes	65
Fig. 13 – Aplicação de rebocos após aplicação de compressas	65
Fig. 14 – Aplicação de métodos de dessalinização, ou de controlo ambiental após eliminação da humidade ascensional	66
Fig. 15 – Controlo da humidade ascensional face à aplicação rebocos de acumulação	66
Fig. 16 – Uso de compressas como meio de impregnação de substâncias utilizadas noutros métodos	67
Fig. 17 – Diagrama - síntese da sistematização proposta	69

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Possibilidades e riscos inerentes aos princípios específicos de funcionamento dos rebocos relativamente à cristalização de sais solúveis	49
Tabela 2 – Abordagens possíveis no combate à degradação por sais solúveis	67



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento do tema

A acção dos sais solúveis em edifícios antigos é hoje considerada uma das principais causas de degradação destes edifícios, causando problemas de variada ordem: ao nível estético, na diminuição das condições de habitabilidade, na perda de vestígios históricos e na possível diminuição da segurança estrutural do edifício.

A comunidade científica tem dado grande destaque ao estudo desta patologia, na tentativa de encontrar respostas eficazes para o problema. Este facto é demonstrado pelo elevado número de estudos publicados sobre a temática, tal como se verá ao longo da tese.

Os sais poderão ser provenientes dos próprios materiais de construção ou ter origem externa. Por si só são inofensivos, sendo necessária também a presença de água para que se dê degradação. Quando reunidas estas condições, os sais dissolvem-se e formam soluções salinas que migram no interior dos materiais porosos. A degradação pode ocorrer devido à cristalização dos sais no interior dos poros, gerando-se tensões internas disruptivas, ou na superfície do material, causando problemas estéticos e de salubridade. A cristalização processa-se, em geral, durante a secagem do material, devido à evaporação do solvente, podendo para alguns sais haver também influência da temperatura. As condições ambientes a que estão submetidos os materiais porosos influenciam, assim, a ocorrência e tipo de degradação e sua intensidade.

Embora a degradação por sais solúveis seja um problema muito frequente nas construções antigas, muitas vezes os técnicos que o tentam solucionar não possuem o conhecimento suficiente na área para darem uma eficiente resposta ao mesmo, como constatado por Gonçalves (2007). Assim sendo, ocorrem acções de controlo e reparação de anomalias que são mal planeadas ou deficientemente executadas e, por isso, podem levar ao agravamento do problema ou a reparações recorrentes que implicam gastos monetários avultados (Gonçalves *et al.* 2008). Há também o problema da perda progressiva e irreparável de material histórico, incompatível com uma adequada protecção do património arquitectónico, que é fundamental tendo em vista a preservação deste para as gerações futuras como referido na “Carta de Veneza” (ICATHM 1964).

Uma outra razão para o interesse deste tema, que se julga útil referir, são as alterações climáticas. Supondo correcta a tendência identificada (Gorman e Schneider 2009) de agravamento da ocorrência de períodos de elevada pluviosidade (causando muitas vezes cheias) seguidos de períodos de tempo muito seco, é lícito supor que será progressivamente intensificada a ocorrência de anomalias causadas pela cristalização de sais solúveis. Isto

tornará esta temática, cuja relevância é, como referido, já significativa e de cada vez maior actualidade.

Devido à importância e frequência da degradação por sais solúveis, e não obstante o incompleto estado de conhecimentos relativo ao tema, têm vindo a ser desenvolvidos ou propostos por investigadores ou técnicos envolvidos na conservação e reabilitação de edifícios, métodos variados de controlo e reparação. Muitos destes métodos foram publicados em revistas ou apresentados em congressos e outras reuniões científicas, mas, pela sua dispersão, esta informação não está facilmente acessível aos técnicos e investigadores que dela necessitem. Justifica-se, pois, fazer um levantamento dos vários métodos publicados, analisá-los e sistematizá-los. A presente dissertação pretende dar um contributo nesta direcção.

## **1.2. Âmbito, objectivos e metodologia**

Visando a melhoria do estado do conhecimento sobre os métodos de controlo da degradação por sais solúveis, esta dissertação tem como objectivo principal efectuar a análise e sistematização de um leque abrangente de práticas actualmente utilizadas para este fim, contribuindo também para a sua divulgação.

O trabalho foi realizado através do levantamento bibliográfico e posterior análise crítica de informação sobre o tema, baseando-se nos seguintes pontos principais:

- Estudo dos fundamentos e mecanismos subjacentes à acção dos sais nas construções antigas;
- Pesquisa bibliográfica de métodos de controlo e medidas preventivas e análise crítica das mesmas;
- Avaliação da complementaridade entre métodos, identificando e apreciando eventuais benefícios de uma acção conjugada de diferentes métodos;
- Sistematização dos métodos e medidas analisados, procurando tornar mais intuitiva e perceptível a sua aplicabilidade e potencialidades. Efectuou-se o enquadramento dos métodos de controlo e das medidas preventivas estudados em três categorias que correspondem a abordagens distintas do problema: prevenção, correcção e mitigação da degradação.

### **1.3. Delimitação do âmbito da tese**

Esta tese foca a degradação de edifícios antigos causada pela cristalização de sais solúveis. A degradação física dos materiais de construção porosos por este mecanismo resulta da introdução de pressões internas nos materiais durante o processo de cristalização. Contudo, a reactividade química entre alguns materiais de construção e os sais solúveis também poderá resultar na formação de compostos expansivos, como por exemplo a **etringite** (resultante da utilização de cimentos e cais hidráulicas com elevado teor de aluminatos de cálcio ou agregados reactivos, os quais poderão reagir com os sulfatos presentes em outros materiais da construção ou de origem externa). O estudo destes ou outros processos de degradação essencialmente baseados em reacções químicas não está, no entanto, no âmbito desta dissertação.

A tese foca em particular o caso dos edifícios antigos, ou seja, anteriores à utilização de betão armado.

Os microrganismos, a par da sua utilização para remoção de sais da superfície de materiais porosos (secção 4.2.5), poderão em alguns casos ser também utilizados para remoção de matéria orgânica (Ranalli *et al.* 2000). No entanto o estudo desta temática encontra-se fora do âmbito da dissertação.

O método para controlo da degradação baseado no uso de hidróxido de bário (secção 4.2.10) pode também ser usado para consolidação de materiais porosos (Matteini 2008). No entanto, o estudo desta temática e das reacções químicas que a proporcionam estão também fora do âmbito da dissertação.

Não obstante as delimitações acima mencionadas, a temática visada por esta dissertação é ainda muito vasta. Relativamente aos métodos de controlo, que constituem o tema fundamental da tese, optou-se, pois por focar prioritariamente os desenvolvimentos recentes, de modo a dar uma perspectiva actualizada do tema. Assim, o estudo deste tema assentou essencialmente em bibliografia publicada a partir do ano 2000.

### **1.4. Estrutura da dissertação**

Esta tese divide-se em seis capítulos, sendo o primeiro o presente capítulo introdutório, onde se faz o enquadramento do tema, se descreve e delimita o âmbito, se referem os objectivos, se refere a metodologia e se apresenta a estrutura da dissertação. Os restantes capítulos focam os assuntos que a seguir se indicam:

- **Capítulo 2 - Fundamentos da degradação por cristalização de sais solúveis**

Explicação de temas necessários à compreensão do fenómeno da degradação por sais solúveis em materiais porosos.

- **Capítulo 3 - Acções prévias: prevenção e diagnóstico das anomalias**

Descrição de medidas que visam prevenir o risco de ocorrência da degradação por sais solúveis na construção.

Indicação de procedimentos utilizados no diagnóstico de anomalias causadas pela acção dos sais.

- **Capítulo 4 - Análise crítica de métodos para controlo da degradação por sais solúveis**

Identificação e análise crítica de métodos actualmente utilizados para controlo da degradação causada pelos sais solúveis.

- **Capítulo 5 - Sistematização dos métodos e acções**

Referência a alguns trabalhos anteriores à presente dissertação que incluem levantamento e classificação de métodos para controlo da degradação por sais solúveis.

Identificação e apreciação de algumas situações em que poderão existir benefícios na conjugação de diferentes métodos de controlo da degradação por sais solúveis.

Sistematização das medidas e métodos analisados, respectivamente, nos Capítulos 3 e 4, por enquadramento dos mesmos em diferentes grupos, aos quais estão subjacentes abordagens de intervenção distintas.

- **Capítulo 6 - Sumário, conclusões e perspectivas futuras**

Apresenta um sumário do trabalho realizado, bem como as principais conclusões a que se chegou. Indica ainda alguns temas que poderão ser alvo de investigação futura, no seguimento do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

## **2. FUNDAMENTOS DA DEGRADAÇÃO POR CRISTALIZAÇÃO DE SAIS SOLÚVEIS**

### **2.1. Introdução**

A compreensão do fenómeno da degradação dos materiais construtivos porosos pela acção dos sais solúveis implica o conhecimento e domínio de várias temáticas relativas, designadamente: às propriedades dos sais solúveis, às possíveis origens da humidade presente nas construções, aos processos de transferência de humidade (no estado líquido e de vapor) em meios porosos, às características dos materiais construtivos, aos mecanismos de secagem dos mesmos e às diversas teorias explicativas dos mecanismos de degradação por sais solúveis. Esta multiplicidade de variáveis torna este tipo de patologia extremamente complexa, sendo, aliás, este um dos factores que dificulta a sua boa resolução.

### **2.2. Porosidade e higroscopicidade**

Nos materiais de construção porosos, a parte sólida que os constitui ocupa apenas uma percentagem do seu volume aparente, sendo a restante formada por pequenos vazios denominados poros, que podem encontrar-se interligados (porosidade aberta), (Fig.1), ou isolados (porosidade fechada), (Fig.2). A porosidade aberta permite a migração de humidade no estado líquido ou de vapor.

Exemplos de materiais porosos (com porosidade predominantemente aberta) utilizados na construção são as argamassas, o tijolo ou a pedra, ou seja, os materiais que normalmente constituem as alvenarias.

A dimensão dos poros presentes nos materiais de construção é variável, podendo estes classificar-se em três categorias: microporos, mesoporos e macroporos (por ordem crescente de tamanhos). Os microporos possuem raios inferiores a aproximadamente  $0.1 \mu\text{m}$ , os mesoporos raios entre cerca de  $0.1 \mu\text{m}$  e  $30 \mu\text{m}$ , e os macroporos raios superiores a cerca de  $30 \mu\text{m}$  (Gonçalves 2007, citando Hilbert *et al.* 1992). Nos microporos, o transporte de água líquida é impedido pelas elevadas forças capilares proporcionadas devido à sua muito reduzida dimensão. O transporte líquido por capilaridade é estabelecido por intermédio dos mesoporos. Os macroporos possuem preponderância significativa no transporte do vapor de água.

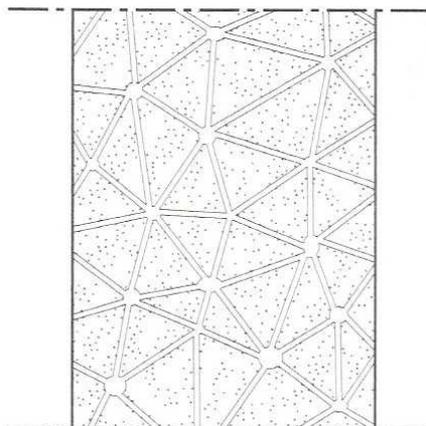


Fig. 1 – Porosidade aberta  
(Freitas et al. 2008)

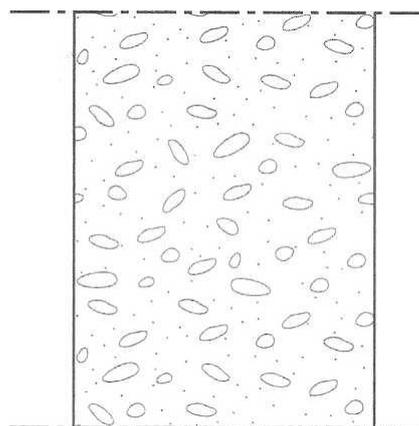


Fig. 2 – Porosidade fechada  
(Freitas et al. 2008)

A maioria dos materiais de construção porosos possui propriedades higroscópicas, as quais lhes permitem atrair e fixar humidade do ar segundo um processo denominado “adsorção”. A humidade adsorvida fica retida na superfície interior dos poros, formando-se uma camada de moléculas (de água) que aumenta de espessura em função do aumento da humidade relativa (HR) do ar ambiente.

### 2.3. Transporte de água líquida

Nos materiais de construção porosos, a capilaridade é o processo pelo qual se dá predominantemente a transferência de água no estado líquido. Este fenómeno poderá originar ascensão de água contrariamente à força gravítica ao longo dos capilares (poros de diâmetro muito reduzido) devido à subpressão capilar, a qual é quantificada pela Eq. 2.1.

$$P_c = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \cos \Phi$$

Eq. 2.1

$P_c$  - subpressão capilar (Pa)

$\sigma$  - tensão superficial do líquido (N/m)

$\Phi$  - ângulo de contacto

$r$  - raio do capilar (m)

A subpressão capilar é inversamente proporcional ao raio do capilar e decresce com a temperatura, uma vez que esta diminui a tensão superficial do líquido.

O ângulo de contacto é o ângulo formado entre o líquido e a superfície interna do capilar (Fig. 3). Quando este ângulo é inferior a  $90^\circ$ , a água é molhante da parede interna do capilar, dizendo-se que o material possui características hidrófilas. Isto ocorre quando as forças de adesão (atracção entre as moléculas do líquido e do material) se sobrepõem às forças de coesão no líquido, formando a superfície livre do líquido um menisco côncavo. Neste caso, o

mecanismo da capilaridade faz com que o líquido penetre no interior do capilar e suba até que o peso da coluna de água equilibre a sucção capilar. Inversamente, se o ângulo de contacto é superior a 90°, a água não é molhante da superfície interna do capilar, dizendo-se que o material possui características hidrófugas. Neste caso, a superfície livre do líquido forma um menisco convexo, não se verificando penetração de água no capilar.

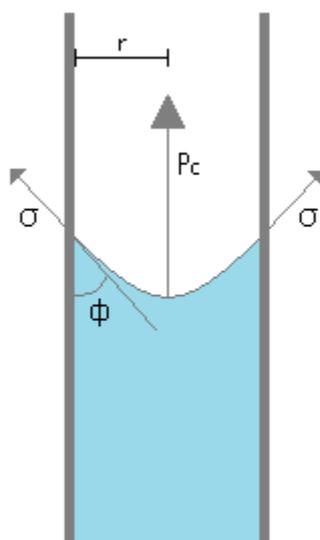


Fig. 3 – Ilustração do mecanismo da capilaridade

Em materiais de construção com porosidade aberta, dada a complexidade da rede de poros, a análise da capilaridade é feita macroscopicamente, podendo tal fazer-se em termos da quantidade de água absorvida (Eq. 2.2) ou da altura atingida pelo líquido no material (Eq. 2.3). Para o efeito, utilizam-se as expressões 2.2 e 2.3: uma para o cálculo da massa de água absorvida  $W(t)$  e outra para o cálculo da altura da ascensão capilar  $H(t)$ . Ambas são definidas em função do tempo e para um volume semi - infinito de um material poroso em absorção livre.

$$W(t) = A \cdot \sqrt{t} \quad \text{Eq. 2.2}$$

$$H(t) = B \cdot \sqrt{t} \quad \text{Eq. 2.3}$$

A - coeficiente de absorção de água ( $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2})$ )

B - coeficiente de penetração capilar ( $\text{m}/\text{s}^{1/2}$ )

t - tempo (s)

Embora, como referido, o transporte de água líquida ocorra predominantemente por capilaridade, há dois outros mecanismos que é importante referir, uma vez que podem originar a presença (e posterior migração por processos difusivos) ou o transporte de água líquida. São eles a condensação capilar e a difusão de superfície, respectivamente. A acção destes mecanismos será descrita na secção a seguir, pois eles têm origem na presença de vapor de

água no ambiente e, em particular, porque podem afectar a determinação da permeabilidade ao vapor de água dos materiais.

## 2.4. Migração do vapor de água

O vapor de água é capaz de penetrar e migrar através de materiais de construção porosos. A permeabilidade ao vapor de água destes materiais é variável, sendo maior perante a existência de elevada porosidade aberta.

A transferência de vapor no espaço poroso pode ser descrita como um processo termodinâmico de difusão resultante de diferenças de pressão de vapor.

O fluxo de vapor difundido através de um material poroso pode ser determinado através da expressão:

$$\vec{j} = - \pi \cdot \text{grad } p_v \quad \text{Eq. 2.4}$$

em que:

$p_v$  – pressão parcial de vapor de água (Pa)

$\pi$  – coeficiente de permeabilidade do material ao vapor de água (kg/(m.s.Pa))

A determinação laboratorial da permeabilidade de materiais ao vapor de água faz-se geralmente a temperatura constante, pelo método da cápsula. Neste tipo de método, uma placa do material é colocada à boca de uma cápsula contendo uma solução salina capaz de criar determinada HR à temperatura de ensaio. A ligação material/cápsula é vedada, de modo a que o transporte de vapor ocorra só através do material. O conjunto é armazenado numa câmara com temperatura e HR constantes, sendo periodicamente pesado até que o fluxo de vapor que atravessa o provete seja constante, o que indica que se atingiu o regime permanente. Quando a HR no interior da cápsula é inferior à do ambiente, o fluxo de humidade dá-se de fora para dentro da cápsula (método da “cápsula seca”). Quando a HR no interior da cápsula é superior à do ambiente, o fluxo de humidade dá-se de dentro para fora da cápsula (método da “cápsula húmida”).

Admitindo que o fluxo de vapor é unidireccional, a permeabilidade do material ao vapor de água é, neste caso, calculada através de:

$$j = \pi \cdot \frac{(p_{vi} - p_{ve})}{e} \quad \text{Eq. 2.5}$$

sendo:

$j$  – fluxo de vapor

$(p_{vi} - p_{ve})$  – diferença de pressão do vapor de água entre ambientes exterior e interior (Pa)

$e$  – espessura da amostra de material poroso (m)

$\pi$  – coeficiente de permeabilidade do material ao vapor de água (kg/(m.s.Pa))

Os resultados do ensaio de permeabilidade ao vapor de água poderão ser afectados pelos dois mecanismos referidos no final da secção anterior: a condensação capilar e a difusão de superfície. A **condensação capilar** (preenchimento total de capilares de pequeno diâmetro por água adsorvida) poderá verificar-se em materiais porosos higroscópicos quando a espessura da camada de água adsorvida é tal que acontece o preenchimento total dos poros de menor dimensão. A posterior migração por processos difusivos desta água líquida ocorre em direcção à face sujeita à menor HR, podendo pois incrementar os valores do fluxo de humidade. A **difusão de superfície** ocorre em materiais de construção porosos e higroscópicos sujeitos a um gradiente de HR, como acontece no ensaio de permeabilidade ao vapor de água. Deve-se à diferente espessura da película de água adsorvida (esta espessura aumenta com a HR do ambiente), que dá origem a um processo de difusão das moléculas de água adsorvidas na superfície do material. Também, neste caso, o transporte de água ocorre em direcção à face do material sujeita a menor HR, tendendo assim a difusão de superfície a aumentar também o valor do fluxo de humidade.

## 2.5. Secagem

A secagem dos materiais porosos poderá ser condicionada por factores externos, como as condições ambientes, ou por características inerentes ao próprio material, nomeadamente a permeabilidade à migração de humidade no estado líquido e de vapor.

Os materiais de construção porosos apresentam durante o seu processo de secagem duas fases (principais) distintas, variando nas mesmas a profundidade a que se posiciona a frente húmida no material. Em condições de temperatura e HR constantes, um provete, saturado com água pura, cujas faces estão todas seladas excepto uma para induzir transporte unidireccional de humidade, (Fig. 4), tem duas fases principais de secagem, como explicado por exemplo em (Gonçalves *et al.* 2008):

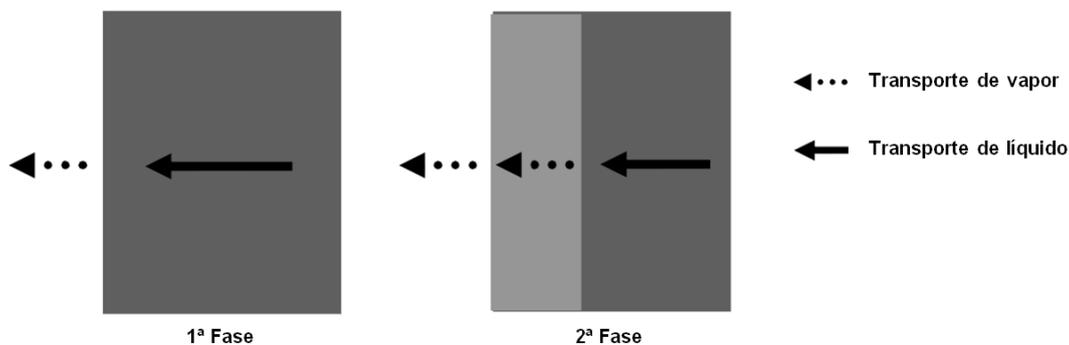


Fig. 4 – Fases de secagem de um material poroso  
Gonçalves *et al.* (2008).

**1ª Fase** – O teor de água do material poroso é inicialmente elevado. A frente húmida vai localizar-se na superfície do material em contacto com a atmosfera, dado existir continuidade da fase líquida e o fluxo líquido ser suficiente para satisfazer as exigências evaporativas. A taxa de secagem é constante.

**2ª Fase** – Com a redução do teor de água do material, a posição da frente húmida vai a partir de certo momento recuar para o interior do material, dado o fluxo líquido se tornar insuficiente para satisfazer as exigências evaporativas.

Da relação entre o fluxo líquido que alimenta a frente de secagem e o fluxo de evaporação que sai da mesma, é dado o posicionamento desta frente ao longo da espessura do mesmo. Em processos evaporativos, esta posição determina a localização e ocorrência da cristalização no material. A forma como decorrem os processos de secagem tem, por isso, uma influência decisiva na degradação por cristalização de sais solúveis. Esta influência é bastante complexa, pois os próprios sais podem afectar o balanço de fluxos e, logo, a posição da frente húmida durante a secagem, como se verá na secção 2.8.2.

## 2.6. Sais solúveis

Os sais solúveis são compostos iónicos (constituídos por catiões e aniões). O conhecimento da natureza, propriedades e proveniência dos sais é extremamente importante para perceber os processos de degradação por estes originados nas construções.

As origens dos sais contaminantes das construções poderão ser diversificadas. Apresentam-se algumas dessas possíveis proveniências:

- **cloreto de sódio** - água do mar (por exemplo, do nevoeiro salino) ou produtos salgados armazenados no edifício;
- **nitratos** - utilização de fertilizantes orgânicos usados em solos ou excrementos animais;
- **sulfato de sódio** - poderá provir de solos fertilizados ou de materiais cerâmicos (Gonçalves 2007, citando Schaffer 1932);
- **sulfato de magnésio** - poderá vir de materiais cerâmicos (Gonçalves 2007, citando Schaffer 1932);
- **sais carbonatos** - geralmente resultam da reacção, em presença de água, entre os álcalis presentes em materiais como o cimento portland e o CO<sub>2</sub> do ar (Gonçalves 2007, citando Arnold 1981).

Os sais também poderão formar-se por efeito da poluição nas construções, como é exemplo a formação de:

- **gesso** - A sulfatação de materiais carbonatados (ex: pedras calcárias) a partir do dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) existente em atmosferas poluídas, proporciona a formação de gesso

(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O). O gesso está presente (como um componente maioritário) nas crostas negras que se formam na superfície de construções de pedra (Goudie e Viles 1997).

- **nitratos** - reacções de diferentes óxidos existentes em atmosferas poluídas e vapor de água proporcionam a formação de produtos ácidos susceptíveis de causar a transformação de carbonato de cálcio (pouco solúvel) em nitrato de cálcio (mais solúvel) (Ranalli *et al.* 2000).

### Solubilidade

A solubilidade é a característica dos sais que lhes permite dissolverem-se em contacto com água, constituindo uma solução salina. Em termos quantitativos, a solubilidade define a máxima quantidade de sal que pode ser dissolvida numa certa quantidade de água a uma dada temperatura (Chang 1994). Quando numa solução se encontra dissolvida a máxima quantidade de sal a uma dada temperatura, esta diz-se saturada, podendo a partir desta concentração desencadear-se a formação de cristais. Em condições de não-equilíbrio, uma concentração de sal superior à de saturação (sobressaturação) pode ser atingida numa solução salina, tornando-a pouco estável e, como tal, muito susceptível à cristalização.

A presença em simultâneo de dois tipos de sais afecta o seu comportamento em solução, nomeadamente no que diz respeito à sua solubilidade individual (Charola 2000) podendo verificar-se duas situações:

- se dois sais não possuem nenhum ião em comum, a solubilidade dos dois aumenta, sendo o sal menos solúvel o que sofre maior aumento;
- se dois sais possuem um ião em comum, a solubilidade dos dois tenderá a decrescer, sendo a solubilidade do sal menos solúvel a que sofre maior abaixamento.

### Higroscopicidade

Os sais solúveis possuem características higroscópicas, que lhes permitem absorver humidade do ar sob determinadas condições ambientes. Estes sais podem dissolver-se na água assim atraída e, por este facto, são frequentemente designados deliquescentes. Neste âmbito, importa definir o conceito de humidade relativa de equilíbrio de um sal, que está subjacente ao fenómeno higroscópico.

A **humidade relativa do ar (HR)** é um parâmetro de medição da quantidade de humidade (vapor de água) presente no ar que expressa, em percentagem, a relação entre essa quantidade e a quantidade máxima de humidade que o ar pode conter a essa temperatura.

A **humidade relativa de equilíbrio de um sal (HReq<sup>sat</sup>)** corresponde ao valor da HR do ar abaixo da qual um cristal sólido está em equilíbrio com o ar a uma dada temperatura. Para:

- **HR = HReq<sup>sat</sup>** - o sal vai absorver humidade do ar, resultando, em condições de equilíbrio, numa solução saturada;

- **HR > HReq<sup>sat</sup>** - forma-se uma solução salina que será tanto mais diluída quanto maior a HR do ar; para HR=100% forma-se uma solução infinitamente diluída.
- **HR < HReq<sup>sat</sup>** - verifica-se a evaporação do solvente e cristalização do sal.

O conceito de humidade relativa de equilíbrio também se pode aplicar às soluções salinas (a HReq<sup>sat</sup> de um sal corresponde à HReq de uma solução saturada desse sal). A HReq de uma solução salina, saturada ou não, é sempre inferior à HReq da água pura, que é de 100% a qualquer temperatura. Para melhor compreender o abaixamento da HReq resultante da presença dos sais, recorre-se à noção de pressão (de saturação) do vapor, que corresponde à pressão do vapor em contacto com a sua forma líquida. A pressão de vapor é constante a temperatura invariável e aumenta com esta (Chang 1994). Uma solução salina em comparação com a água pura possuirá uma menor pressão de vapor da água, uma vez que os iões do sal tenderão a substituir moléculas à superfície do líquido, resultando numa menor taxa de evaporação. Assim, quanto mais concentrada em sal for a solução, menor será a sua pressão de vapor de água. A uma menor pressão de vapor corresponderá uma menor HR acima da superfície do líquido, dado esta HR corresponder ao quociente entre a pressão de vapor da água existente no ar pela pressão de vapor da água existente acima de uma superfície plana de água à mesma temperatura.

Do ponto de vista termodinâmico, os fenómenos de higroscopicidade desencadeados pelos sais solúveis em materiais porosos resultam do estabelecimento de um gradiente de pressão de vapor negativo entre o material e o ar circundante. Esta situação acontece quando o material está contaminado com uma solução salina (ou sal) cuja HReq é inferior à HR do ar. Como, neste caso, a HR do ar em contacto com o material é inferior à HR do ambiente circundante, gera-se um movimento difusivo de vapor do ambiente para o material que, portanto, absorve água em vez de secar (Gonçalves 2007).

Comparativamente, sais de diferentes naturezas diferem nas suas humidades relativas de equilíbrio. Os que apresentam baixos valores de HReq<sup>sat</sup> estarão mais propensos à dissolução (Goudie e Viles 1997), uma vez que mais facilmente serão atingidos valores iguais ou superiores de HR do ar.

Nos materiais de construção afectados por sais é frequente estarem simultaneamente presentes sais de vários tipos, sendo no entanto errado analisar o problema com base nos valores individuais da HReq dos diferentes sais. Isto porque há interacção entre estes sais, como referido, por exemplo, por Price e Brimblecombe (1994), o que poderá ter implicações nas propriedades da solução. Esta não possuirá em geral um único valor de HReq a uma dada temperatura, mas uma gama de valores que não terá forçosamente como limites os valores individuais da HReq de cada sal.

## Cristalização

A cristalização é o processo de formação de cristais a partir de uma solução salina (saturada ou sobressaturada). A cristalização inclui duas etapas principais:

**1ª) Nucleação** - formação de núcleos, por aglomeração de moléculas de soluto dispersas no solvente. A nucleação poderá ser potenciada caso existam partículas, por exemplo de pó, na solução. Os núcleos formados tornam-se estáveis quando atingem um certo tamanho crítico, caso contrário redissolvem-se;

**2ª) Crescimento do cristal** - crescimento subsequente dos núcleos estáveis formados.

Alguns sais originam apenas uma forma cristalina, outros poderão originar formas cristalinas distintas, em função das condições ambientes (temperatura e HR). Tomando como exemplo o sulfato de sódio, este poderá cristalizar como thenardite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  - forma anídrica), mirabilite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  - decahidrato) e heptahidrato ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ). As várias formas cristalinas de um sal poderão ser descritas por diagramas de fase, que são gráficos que mostram as condições (de temperatura e HR, por exemplo) de equilíbrio que propiciam a formação de cada fase. Em rigor, os diagramas de fase só mostram as fases de equilíbrio. Isto significa que, no exemplo referido do sulfato de sódio, o heptahidrato, que é uma fase metaestável, não é suposto aparecer. No entanto, na prática muitas vezes representam-se também as fases metaestáveis (usando linhas a tracejado, por exemplo).

Os sais, ao cristalizarem, apresentam uma determinada aparência (forma), a qual é designada de hábito. O mesmo sal pode cristalizar segundo diferentes hábitos, resultando este da influência de vários factores, entre os quais: as condições de crescimento, por exemplo a porosidade do substrato poroso e a taxa de fornecimento de solução, e a concentração da solução salina.

## Características electrolíticas

A dissolução de sais em água resulta na quebra do composto iónico em catiões (íons de carga positiva) e aniões (íons de carga negativa). A solução resultante permite a condução de electricidade e, por este facto, as soluções salinas são consideradas electrolitos (Chang 1994). Se colocados dois eléctrodos (pólo positivo e negativo) em contacto com uma solução salina, a condução de electricidade nesta é efectuada por movimento dos catiões e aniões em direcção ao eléctrodo de carga contrária. Quanto mais concentrada a solução, maior será a quantidade de íons suspensos e, como consequência, mais facilmente a corrente eléctrica percorrerá o líquido.

## 2.7. Origens da humidade

Os sais migram nos materiais de construção porosos dissolvidos em água, ou seja, sob a forma de soluções salinas. É devido ao seu papel de agente transportador que é importante, em processos de diagnóstico da degradação por cristalização de sais, conhecer as possíveis proveniências da água. Como mencionado, por exemplo, por Henriques (1994) ou Massari e Massari (1993), as principais origens da humidade presente em edifícios antigos são as seguintes:

- Na maior parte dos casos, a água provém do terreno onde está implantado o edifício, ascendendo por capilaridade através das fundações e paredes;
- Também é frequente em construções antigas a ocorrência de infiltrações de água das chuvas através de fendas existentes nos materiais, coberturas danificadas, juntas construtivas mal vedadas, caixilharia de janelas, etc;
- Causas acidentais, como a rotura de canalizações, podem também estar na origem do problema;
- A água pode estar contida nos próprios materiais utilizados na construção, como acontece por exemplo com a água utilizada na preparação de argamassas;
- As condensações são outra possível fonte de humidade, que poderá ter grande relevância em certos casos. Estas são originadas por vapor de água contido no ar que condensa ao contactar com superfícies frias ou no interior do material de construção;
- As características higroscópicas dos sais solúveis são também, frequentemente, a origem de problemas de humidade, como explicado na secção 2.6 desta dissertação, uma vez que os sais podem atrair grandes quantidades de vapor de água do ar.

## 2.8. Degradação por sais solúveis

### 2.8.1. Generalidades

A formação dos cristais salinos é responsável pela degradação do material poroso. A cristalização pode acontecer assim que se ultrapassa a saturação, pelo que importa referir os factores que influenciam a concentração das soluções salinas:

**Temperatura** - a solubilidade de alguns sais é muito dependente da temperatura (ex: sulfato de sódio), assim a variação da mesma poderá originar a saturação ou sobresaturação da solução e, em consequência, a cristalização do sal;

**Evaporação** - a evaporação de água de uma solução salina leva ao progressivo aumento da concentração da mesma;

**HR ambiente** - a humidade relativa ambiente influencia a concentração das soluções, uma vez que para valores superiores aos da  $HR_{eq}^{sat}$  (humidade relativa de equilíbrio de uma solução saturada) as soluções tenderão a ser cada vez mais diluídas, e para valores inferiores à mesma a solução poderá cristalizar.

Em materiais de construção porosos, quando a cristalização de sais ocorre na superfície exposta do material os cristais tomam a designação de eflorescências. Estas não acarretam directamente a deterioração do próprio material, causam, sim, problemas a nível estético das superfícies atingidas. Também poderão provocar ou agravar problemas de humidade nos materiais contaminados. Caso a cristalização ocorra no interior dos poros do material, os cristais formados designar-se-ão criptoflorescências (ou subflorescências). Estas vão exercer tensões internas nas paredes dos poros, podendo levar à rotura do material. Em qualquer dos casos, as eflorescências e criptoflorescências formadas poderão ciclicamente dissolver-se e recristalizar.

Quando a cristalização dos sais ocorre em consequência de processos evaporativos, ela dá-se na frente húmida, que é onde ocorre a evaporação. A localização da frente húmida determina assim a profundidade e a distribuição dos sais no material. Formar-se-ão eflorescências caso a solução salina atinja a superfície exposta do material evaporando na mesma, e criptoflorescências quando a frente húmida se localiza no interior do material, ocorrendo a cristalização no interior dos poros. A distribuição dos sais nos materiais de construção porosos é, portanto, afectada por qualquer factor que influencie a relação entre o fluxo líquido que alimenta a frente de evaporação e o fluxo de vapor que sai da mesma, uma vez que estes determinam a posição desta frente. Os principais factores de influência são as condições ambientes, os tipos de sais contidos, a concentração da solução e a permeabilidade do material à migração de humidade no estado líquido e de vapor.

### **2.8.2. Influência dos sais nos processos evaporativos**

A taxa de evaporação de água num material poroso é substancialmente afectada quando este se encontra contaminado por sais, tornando-se mais lenta (Gonçalves *et al.* 2006), o que condiciona a secagem do mesmo. As principais causas para esta redução da taxa de evaporação são, de acordo com o mesmo estudo, devido a:

- redução da humidade relativa de equilíbrio da solução em relação à da água pura (devido, como referido na secção 2.6, à presença dos sais), a qual se reflectirá num mais reduzido gradiente de pressão de vapor entre a superfície molhada e o ar circundante e num conseqüente abaixamento da taxa de evaporação;
- a hipótese do bloqueamento dos poros do material por deposição de cristais.

De acordo com Gonçalves *et al.* 2008, o posicionamento mais superficial da frente húmida no material, como consequência da baixa taxa de evaporação, poderá resultar no agravamento ou surgimento de problemas de humidade (a humidade induzida pelos sais é, em língua inglesa, correntemente designada *salt damp*). Os fenómenos de higroscopicidade são aqui encarados

como um caso particular que corresponde à criação de um gradiente negativo de pressão do vapor entre o material e o ambiente.

### **2.8.3. Patologia**

A acção de degradação causada pelos sais solúveis em materiais construtivos porosos envolve a existência simultânea de água e sais, bem como de condições ambientes susceptíveis de causar ciclos de cristalização/dissolução. Este tipo de degradação manifesta-se na construção por sinais diversos, tais como:

- eflorescências;
- manchas de humidade em superfícies;
- fendilhação de rebocos, argamassas e elementos constituintes de alvenarias (tijolo, pedra);
- arenização de argamassas;
- destacamento de revestimentos (rebocos, azulejos, pintura);
- pulverização de materiais pétreos e cerâmicos;

Como consequência destas manifestações, surgem anomalias de variada ordem nos edifícios antigos, nomeadamente: degradação estética, perda de material histórico, problemas de salubridade e enfraquecimento de elementos construtivos.

São apresentadas de seguida imagens (Fig.5,6,7,8, - imagens cedidas por Teresa Gonçalves) ilustrativas de algumas das manifestações de degradação causadas pelos sais em edifícios antigos.



Fig. 5 – Eflorescências – Igreja de Santa Cruz, Coimbra, Fevereiro de 2004.



Fig. 6 – Destacamento de pinturas – Mirante do Jardim da Damas, Palácio da Ajuda, Lisboa, Junho de 2002.



Fig. 7 – Arenização de argamassas – Moinho de Maré dos Paulistas, Corroios, Dezembro de 2004.



Fig. 8 – Manchas de humidade – Castelo de Terena, Évora, Junho de 2002.

A Fig. 9 esquematiza os vários factores envolvidos na patologia da degradação pelos sais solúveis e a forma como estes se interrelacionam.

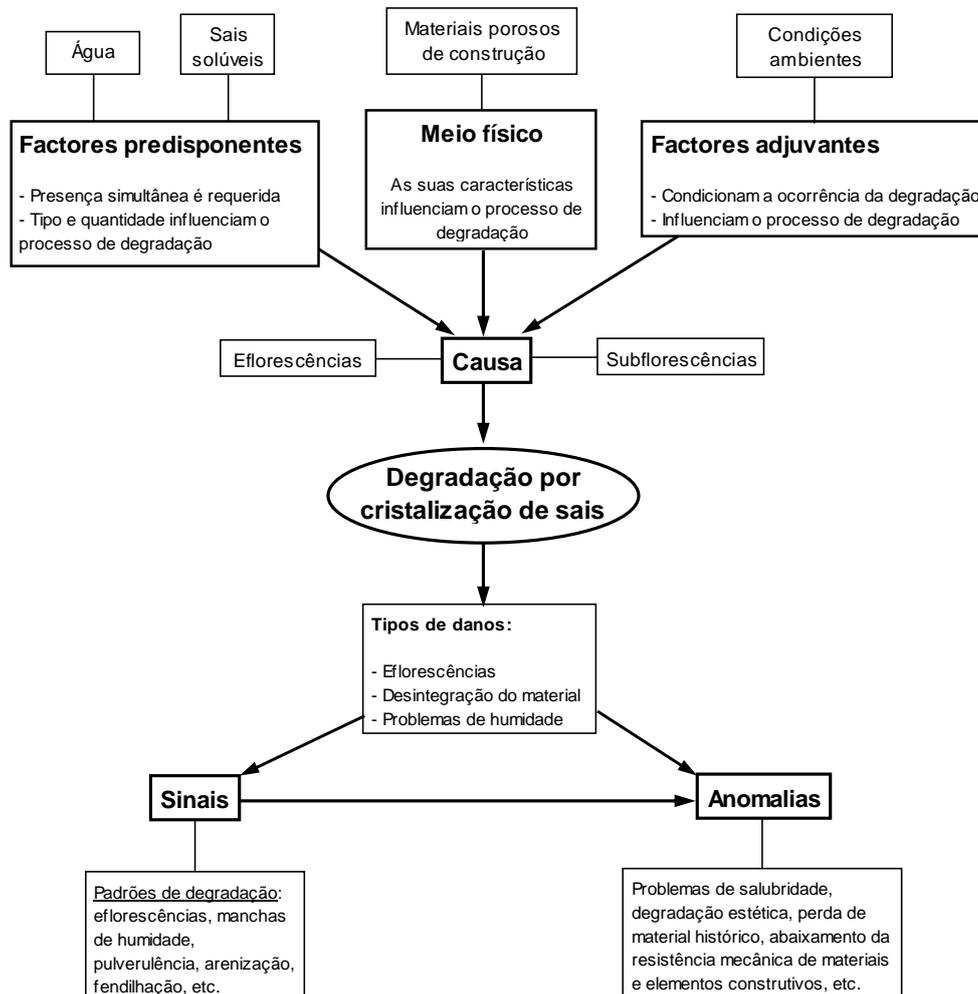


Fig. 9 – Patologia da degradação por sais  
Gonçalves e Rodrigues (2010).

#### 2.8.4. Mecanismos de degradação

É sabido que os sais são causadores de degradação física nos materiais de construção porosos. Contudo, a explicação do mecanismo de actuação dos mesmos ainda suscita bastante discussão na comunidade científica, tendo vindo a ser publicadas várias teorias explicativas do fenómeno. Nesta secção procura-se sumariar as três mais citadas.

Durante o processo da cristalização de sais no interior de materiais porosos, os poros vão confinar os cristais em crescimento, fazendo com que estes exerçam pressão sobre as paredes internas, o que, no limite, provoca a rotura do material. Esta é a chamada teoria da **pressão linear de cristalização**, que constitui actualmente o mecanismo explicativo da degradação pelos sais solúveis ao qual se atribui maior relevância. Correns (1949) publicou uma expressão

de suporte à mesma, que é ainda muito usada e discutida, para o cálculo da pressão exercida por um cristal em crescimento (Eq. 2.6).

$$\Delta p = \frac{RT}{V_c} + \ln\left(\frac{C}{C_s}\right) \quad \text{Eq. 2.6}$$

em que:

$\Delta p$  - pressão de cristalização;

R- constante dos gases perfeitos;

T- temperatura, em graus Kelvin;

$V_c$ - Volume molar do sal no estado sólido;

C- concentração da solução aquando da cristalização;

$C_s$ - concentração da solução na saturação.

A teoria da **pressão de hidratação** baseia-se, tal como explicado por exemplo por Goudie e Viles (1997), no facto de alguns sais hidratarem e desidratarem quando sujeitos a determinadas variações da temperatura e humidade relativa. A hidratação resulta num aumento de volume da estrutura cristalina por incorporação na mesma de moléculas de água, defendendo esta teoria que tal induz um aumento da pressão nas paredes dos poros. A teoria tem, no entanto, vindo a ser abandonada. Uma das razões é que nem todos os sais que é sabido causarem danos possuem formas hidratadas nas condições (de temperatura, HR e pressão) de interesse. Outra importante objecção é o facto de estudos (Rodriguez-Navarro *et al.* 2000) mostrarem que a hidratação do sulfato de sódio não se processa por incorporação directa de moléculas de água, mas por dissolução da forma anidra e posterior recristalização do sal na forma hidratada. Sendo provável que o mesmo ocorra para os outros sais, a pressão eventualmente induzida no material poroso seria na realidade uma pressão de cristalização e não de hidratação.

Cooke and Smalley (1968) propuseram a teoria da **dilatação térmica diferencial** como possível mecanismo de degradação de rochas por acção dos sais solúveis, esta baseia-se na existência de sais com coeficientes de dilatação superiores aos dos minerais constituintes das rochas (como referido em Goudie e Viles 1997). Esta teoria carece ainda de fundamentação, uma vez que não tem sido objecto de muitos trabalhos de verificação.



### **3. ACÇÕES PRÉVIAS: PREVENÇÃO E DIAGNÓSTICO DAS ANOMALIAS**

#### **3.1. Prevenção de risco de ocorrência de degradação**

Vários factores poderão contribuir para um maior risco de ocorrência de degradação pelos sais na construção e, como tal, deverão ser prevenidos sempre que possível. Matematicamente, o risco é igual à probabilidade de ocorrência multiplicada pela intensidade dos danos (Hartford 2008), enquadrando pois as duas características.

##### **3.1.1. Factor de risco: Aplicação de materiais de construção inadequados**

Uma selecção descuidada ou sem conhecimento de causa de materiais construtivos a utilizar em acções de manutenção ou reabilitação em edifícios antigos poderá despoletar a degradação por sais solúveis ou agravar o problema caso este já exista.

Alguns materiais usualmente utilizados (tijolos, argamassas, pedra) poderão estar contaminados com sais solúveis ou incluir constituintes que, após aplicação e reacção química com elementos externos, podem originar a formação de sais. Estes materiais, ao serem aplicados, estarão a contribuir, inadvertidamente para a introdução de novos sais na construção. Os casos mais correntes são a introdução na alvenaria pré-existente de:

- Sais provenientes da água do mar

A utilização de argamassas executadas com areias mal lavadas ou águas contaminadas poderá ser causa de contaminação, nomeadamente por cloreto de sódio;

- Sulfatos

Os materiais cerâmicos podem possuir sais, nomeadamente sulfatos;

- Álcalis

As argamassas (assentamento ou revestimento) ricas em ligantes hidráulicos contêm geralmente elevado teor de álcalis. Estes, ao reagir com o ácido carbónico resultante da dissolução de CO<sub>2</sub> do ar na água presente na alvenaria, originam a formação de carbonatos e bicarbonatos alcalinos.

A formação de sulfoaluminatos de cálcio (etringite) é um problema um pouco diferente, embora próximo. Neste caso, a degradação resulta de um processo essencialmente químico, e não mecânico, como é o caso do objecto desta tese, a degradação por cristalização de sais solúveis. A reacção química expansiva com efeitos destrutivos poderá resultar da utilização indevida de argamassas (cimentos, cais hidráulicas) com elevado teor de aluminatos de cálcio, ou de certos inertes, os quais serão capazes de reagir quimicamente com sulfatos existentes na construção.

Para além do perigo de poder introduzir sais na construção, os novos materiais, revestimentos em particular, poderão alterar o equilíbrio entre fluxos líquido e de vapor. Assim, podem modificar as condições de secagem, o transporte de soluções salinas e, conseqüentemente, a localização e intensidade da degradação por cristalização de sais. Podem assim suscitar a ocorrência ou agravamento de anomalias (Gonçalves e Rodrigues 2006).

Uma escolha inadequada dos revestimentos por pintura, por exemplo usando materiais com baixa permeabilidade ao vapor de água, pode agravar o problema da degradação superficial no elemento construtivo, dado que conduzirá a um posicionamento mais superficial no material da frente de secagem (Gonçalves *et al.* 2008). Em edifícios antigos é aconselhado (por técnicos nacionais inquiridos) o uso de tintas de silicato em superfícies húmidas e com sais (Brito 2009).

#### Prevenção do factor de risco

Face ao factor de risco apresentado neste ponto, considera-se assim essencial para a sua prevenção uma escolha criteriosa dos materiais de construção utilizados na manutenção ou reabilitação da construção antiga.

### **3.1.2. Factor de risco: Entradas de água conseqüentes do mau estado da construção**

A presença de água em edifícios antigos muitas vezes é conseqüência do mau estado da própria edificação e dos seus elementos e sistemas construtivos, tais como: cobertura, sistemas de drenagem de águas pluviais, sistemas de drenagem de águas residuais domésticas, caixilharias de portas e janelas, revestimentos exteriores. Se as construções forem sujeitas a uma adequada e regular manutenção, o risco de entrada de água e, em conseqüência, da ocorrência de problemas de degradação pela acção dos sais solúveis pode ser substancialmente reduzido.

#### Prevenção do factor de risco

Face ao factor de risco apresentado neste ponto, considera-se assim essencial para a sua prevenção uma manutenção regular da construção visando evitar entradas de água.

### **3.1.3. Factor de risco: Ocorrência de cheias**

A nível urbano, a deficiente drenagem de águas pela rede pública de esgotos em períodos de elevada pluviosidade, poderá ser responsável pela ocorrência de cheias, capazes de submergir parcialmente ou na totalidade elementos do edifício, como fundações e paredes. Os elevados teores de humidade proporcionados potenciam a acção de sais presentes na construção ou com outras origens e também poderão conduzir a um aumento em altura da humidade ascensional.

Em Gonçalves (2007) é apresentado um caso de estudo de um edifício “Casa do Despacho”, em Pereira, Coimbra, no qual os problemas de sais foram potenciados por cheias devidas a rotura de um dique na margem do rio Mondego.

#### Prevenção do factor de risco

Nem sempre são controláveis no edifício os factores de risco, os exemplos anteriormente apresentados, relativamente à deficiente drenagem pela rede pública de esgotos ou rotura de diques são exemplificativos do facto, exigindo uma intervenção mais global a nível urbano.

#### **3.1.4. Factor de risco: Alteração das condições ambientes interiores**

Qualquer intervenção que seja susceptível de interferir com as condições climáticas interiores (HR e temperatura) em edifícios contaminados por sais deverá ser devidamente estudada antes de executada ou implementada, uma vez que poderá despoletar ou agravar a degradação causada pelos sais. Isto é especialmente relevante quando existam elementos de valor, como pinturas murais ou esculturas, que estejam afectadas ou em risco de o ser.

A alteração das condições ambientes poderá ser consequência, por exemplo, de:

- remodelações construtivas (ex: abertura ou fecho de portas e janelas);
- introdução de aparelhos de ar condicionado, desumidificadores, aquecedores, etc.;

Exemplos:

Em casos em que exista abastecimento de sais por humidade ascensional nas alvenarias, a introdução de fontes de calor para aumento das temperaturas interiores em compartimentos poderá propiciar um aumento da taxa de evaporação. Isto não só aumenta a taxa de cristalização, como pode alterar o balanço entre o fluxo líquido e o de evaporação, gerando um recuo da frente húmida para o interior do material e, conseqüentemente, a formação de (destrutivas) subflorescências em vez de eflorescências. O uso de desumidificadores (redução da HR) poderá ter um efeito semelhante. Em Caetano (2006), o autor observou num edifício (Quinta do Conventinho, Loures) um agravamento da degradação causada pelos sais em superfície de parede contendo pintura mural, em face da utilização de desumidificadores, que potenciaram a evaporação na parede afectada por humidade ascensional.

- mudança do tipo de utilização dado ao edifício ou compartimento, o que poderá reflectir-se por exemplo na concentração do número de pessoas, proporcionando maior libertação de vapor de água e calor.

### Prevenção do factor de risco

Face ao factor de risco apresentado neste ponto, considera-se assim essencial para a sua prevenção a análise de potenciais riscos de degradação, face a alteração das condições ambientes (temperatura e HR) interiores em edifícios, proporcionadas por intervenções na construção.

### **3.2. Diagnóstico das anomalias**

É frequente que as acções levadas a cabo para controlo e reparação de anomalias devidas à acção de sais solúveis em construções antigas falhem no seu propósito ou venham até agravar o problema (Gonçalves 2007, Gonçalves *et al.* 2008). Uma das causas comuns é a falta de rigor no diagnóstico das anomalias, que poderá, obviamente, ter implicações na selecção do método utilizado para mitigação ou resolução das mesmas.

O diagnóstico deverá ser efectuado por técnicos com conhecimento desta complexa matéria, envolver o estudo das circunstâncias do edifício e, normalmente, também a realização de alguns ensaios (Gonçalves 2003, Gonçalves *et al.* 2006a). É, em geral, necessário analisar a envolvente ao edifício, efectuar o levantamento das anomalias, identificar e eventualmente caracterizar os materiais de construção afectados e identificar os sais intervenientes na degradação. Em certos casos, poderá ser vantajoso levar a cabo medições de temperatura e HR no edifício. Em todo o caso, estas acções devem em geral permitir a determinação das origens da humidade e/ou dos sais presentes no edifício, pois, como se verá nos próximos capítulos, o meio mais eficaz e geralmente mais simples de resolver o problema é eliminar um destes factores.

## 4. ANÁLISE CRÍTICA DE MÉTODOS PARA CONTROLO DA DEGRADAÇÃO POR SAÍS SOLÚVEIS

### 4.1. Metodologia

A metodologia utilizada nesta dissertação para o levantamento, descrição e análise crítica dos métodos de controlo de anomalias devidas à acção dos sais solúveis em edifícios antigos incluiu as seguintes etapas:

- 1) Numa primeira fase, foi realizada uma pesquisa bibliográfica que permitiu identificar um total de 10 métodos. A pesquisa focou publicações on-line, revistas científicas e livros e permitiu uma selecção de fontes para posterior análise documental. Como referido no subcapítulo 1.3, esta pesquisa teve o ano 2000 (inclusive) como referência temporal, tendo incidido essencialmente sobre publicações posteriores a esta data. A justificação para esta escolha prende-se com o facto de o volume de informação ser muito, consequência da abrangência e extensão da temática abordada nesta dissertação. Como tal, foi necessário fazer uma opção, a qual recaiu na tentativa de focar o que de mais recente se tem vindo a fazer nesta área. No entanto, pela sua relevância, incluíram-se também algumas publicações anteriores ao ano seleccionado.
- 2) Estudo aprofundado e análise crítica da informação seleccionada como relevante em relação aos métodos identificados. Recorreu-se também, sempre que necessário, a bibliografia básica ou complementar (sobre química, física ou tecnologias da construção), que permitisse uma boa compreensão dos métodos e princípios subjacentes.
- 3) Resumo dos vários métodos (com base na informação recolhida e analisada) de acordo com os seguintes tópicos:
  - Sumário  
Síntese da informação, efectuada com base nos parâmetros abaixo referidos e organizada sob a forma de quadro, tendo em vista uma rápida percepção da natureza das acções envolvidas, bem como das potencialidades e limitações subjacentes a cada método.
  - Âmbito do método  
Tópico no qual é feita uma contextualização do método quanto ao campo de acção no contexto da reabilitação.

- Descrição  
Tópico no qual são descritos os princípios em que o método assenta, o modo como a sua execução é levada a cabo e os efeitos esperados através da mesma.
- Factores de que poderá depender a eficácia da técnica  
Tópico no qual são apresentados os factores que poderão influenciar, de modo favorável ou negativamente, a acção proporcionada pelo método.
- Potencial do método como técnica de reabilitação  
Considerações relativas à aplicabilidade do método em face do estado actual do seu desenvolvimento, bem como às principais vantagens e limitações que o método apresenta.

#### **4.2. Métodos de controlo da degradação**

A degradação causada pelos sais solúveis é proporcionada pela presença simultânea de sais e água num meio poroso sob determinadas condições ambientes, como esquematizado na Fig. 9. Em conformidade, os princípios de funcionamento dos métodos utilizados no combate a este tipo de anomalia assentam no controlo de um ou mais destes quatro factores (sais, humidade, condições ambientes e meio físico). A pesquisa efectuada permitiu perceber que os métodos existentes assentam sempre num dos seguintes princípios de funcionamento:

- A** - Eliminação de sais solúveis
- B** - Eliminação da humidade
- C** - Alteração do comportamento dos sais solúveis
- D** - Controlo das condições ambientes
- E** - Alteração das características do meio físico (material poroso).

Nas próximas secções analisa-se cada um dos métodos identificados, com base na metodologia acima descrita. Os vários princípios de funcionamento referidos tornam o leque de opções existentes para controlo da degradação bastante abrangente, como se verá.

#### 4.2.1. Remoção mecânica de eflorescências

##### **SUMÁRIO**

**Método:** Remoção mecânica de eflorescências

**Princípio de funcionamento:** A – Eliminação de sais solúveis

**Descrição:** Escovagem de materiais construtivos porosos que apresentem eflorescências.

**Vantagens:**

- possibilidade de melhoria das condições estéticas e de salubridade
- facilidade de execução
- evita reabsorção pelo material poroso de eflorescências dissolvidas

**Limitações:**

- risco de danificação em materiais frágeis ou de alto valor arquitectónico
- a atenuação das consequências da degradação pelos sais na proximidade à superfície exposta, se o fornecimento de sal não for eliminado, será apenas temporária.

##### **Âmbito do método**

As inestéticas eflorescências são bastante comuns em edifícios antigos, nomeadamente nas suas paredes. A remoção mecânica de eflorescências, no âmbito da reabilitação de edifícios antigos afectados por sais, constitui um procedimento simples que requer material básico.

##### **Descrição**

Este método visa, não só reduzir os problemas (de salubridade e estéticos, por exemplo) decorrentes da presença das eflorescências, como também evitar a possível reabsorção pelo material poroso do sal presente nas mesmas. Estas podem, de facto, ser redissolvidas na água que ingresse na alvenaria, e voltar a cristalizar à superfície ou, o que poderá ter consequências mais graves ao nível da degradação do material, no interior dos poros.

A remoção mecânica de eflorescências na superfície de materiais porosos é efectuada por abrasão das mesmas, com recurso a escovas. Após a escovagem das áreas afectadas, torna-se necessário eliminar as eflorescências caídas nos pavimentos ou solo, de modo a evitar que os sais penetrem nestes e sejam reabsorvidos pelos elementos construtivos.

##### **Factores de que poderá depender a eficácia da técnica:**

###### ➤ **Natureza das eflorescências e características do material poroso**

Alguns tipos de eflorescências estão muito aderentes ao substrato, podendo a sua remoção ser bastante difícil.

Caso o material poroso que serve de substrato às eflorescências possua textura ou geometria irregular, este facto poderá dificultar a remoção do sal pelo método em causa, devido a uma menor acessibilidade dos filamentos da escova a determinadas zonas do material.

#### ➤ **Escovagem**

As escovas diferem no material e características dos seus filamentos. As mais apropriadas para remoção de eflorescências são compostas por filamentos duros mas de material não metálico (para salvaguarda do material poroso).

Em particular quando as eflorescências estão muito aderentes ao suporte, a eficácia da acção de dessalinização superficial dependerá em muito do esforço dispendido pelo utilizador.

#### **Potencial do método como técnica de reabilitação**

As técnicas de remoção mecânica de eflorescências apenas poderão ser executadas em superfícies de materiais porosos cuja fragilidade e valor não constitua um entrave, uma vez que a abrasão poderá provocar desintegração e perda de vestígios históricos.

Este método, de fácil execução, além de permitir eliminar as inestéticas eflorescências, tem como principal vantagem o facto de a remoção evitar uma eventual reabsorção dos sais pelo material poroso.

A remoção de sal conseguida por aplicação deste método dependerá directamente da percentagem que cristaliza como eflorescências e, como tal, a sua aplicação poderá ser algo limitada no objectivo de dessalinização. Muito do sal contaminante poderá encontrar-se no interior do material, não sendo possível por razões óbvias, a sua remoção pelo método aqui referido.

#### 4.2.2. Remoção de materiais contaminantes

##### **SUMÁRIO**

**Método:** Remoção de materiais contaminantes

**Princípio de funcionamento:** A – Eliminação de sais solúveis

**Descrição:** Remoção de materiais de construção, identificados como causadores da contaminação pelos sais solúveis.

**Vantagens:**

- eliminação definitiva da origem dos sais solúveis

**Limitações:**

- risco de persistirem sais que tenham sido transportados, introduzindo-se em materiais porosos adjacentes
- a facilidade de execução está dependente do tipo e localização dos materiais contaminantes na construção
- a remoção de certos materiais poderá não ser viável

##### **Âmbito do método**

Certos materiais de construção não deverão ser utilizados em acções de reparação ou de reabilitação em edifícios antigos, como já referido no subcapítulo 3.1, pelo facto de a sua constituição poder ser causa de contaminação por sais solúveis. Não obstante este facto, a utilização deste tipo de materiais de construção continua a verificar-se, devendo-se principalmente a descuido ou desconhecimento de quem as pratica. Daí que esta continue a ser uma causa frequente de degradação (Gonçalves 2007). Nestes casos poderá ser tentado o controlo da degradação por remoção dos materiais problemáticos (causadores de contaminação por sais), daí que este procedimento possa ser visto como um método no combate à acção nefasta dos sais.

##### **Descrição**

Identificado o material que está na origem do problema de contaminação por sais solúveis na construção, a sua posterior remoção requer diferentes trabalhos, dependendo estes, como é lógico, do material em causa (argamassa, tijolo, pedra, etc.) e da utilização dada ao mesmo. Trabalhos para remoção de materiais são comuns em reabilitação e, como é óbvio, não são exclusivos para os fins evidenciados no presente subcapítulo.

A remoção de materiais construtivos causadores de contaminação poderá constituir um procedimento relativamente simples, tratando-se de rebocos ou revestimentos. Estes, por encontrarem-se expostos e acessíveis, facilitam os trabalhos de remoção. Especial cuidado deverá ser requerido para que a sua remoção não danifique a alvenaria que os suporta, à qual

está subjacente muitas vezes valor arquitectónico, dada a sua antiguidade. Tratando-se o material causador de contaminação de elementos de alvenaria (pedra, tijolos) ou argamassas utilizadas no seu assentamento, a remoção dos mesmos e posterior substituição poderá ser trabalhosa ou mesmo inviável.

Após a remoção, há em geral necessidade de substituição dos materiais eliminados por alternativas que não apresentem riscos associados.

### **Factores de que poderá depender a eficácia da técnica**

#### **➤ Identificação dos materiais problemáticos e possibilidade de remoção**

Por razões óbvias, este método só será eficaz quando identificado cabalmente o material responsável pela contaminação por sais solúveis causadores da degradação. Isto obriga muitas vezes, como referido na secção (3.2), à realização de análises e ensaios.

#### **➤ Tipo de elemento construtivo**

O tipo de elemento construtivo onde está presente o material contaminante poderá influenciar a maior ou menor facilidade de execução dos trabalhos de remoção. Em alguns casos, estes poderão não ser viáveis, como, por exemplo, numa parede de alvenaria cujos elementos constituintes (pedra, tijolo) estejam a introduzir sais na construção. A remoção destes e sua substituição poderá não ser possível por motivos de segurança estrutural do próprio edifício. Também o valor arquitectónico da construção poderá não se coadunar com a remoção de materiais incorporados na mesma.

#### **➤ Contaminação de outros materiais adjacentes**

A degradação pelos sais poderá, em alguns casos, continuar a verificar-se na construção mesmo após a remoção do material identificado como contaminante, uma vez que existe a possibilidade dos sais originados por este poderem vir a ser transportados para o interior de materiais porosos adjacentes. Quanto maior o tempo de permanência dos materiais contaminantes na construção, maior é o risco desta eventualidade poder ocorrer. Deste modo, é importante que a remoção de materiais contaminantes seja, se possível, efectuada logo que identificados.

#### **➤ Escolha de materiais para substituição**

A escolha de materiais de construção na substituição dos que foram removidos deverá ser devidamente ponderada, de modo a evitar repetição de erros cometidos em reparações anteriores que conduziram à degradação por sais.

### **Potencial do método como técnica de reabilitação**

A viabilidade de tal procedimento dependerá da identificação e localização dos materiais de construção problemáticos.

A remoção de materiais problemáticos permite a eliminação da proveniência dos sais contaminantes que afectam a construção. Não existindo outras proveniências nem contaminação de elementos adjacentes, este método poderá pôr termo à degradação.

A remoção e substituição de materiais problemáticos poderá parecer uma solução dispendiosa, mas poderá revelar-se vantajosa em face dos potenciais e contínuos danos que uma eventual permanência dos mesmos acarretaria. E aos recorrentes gastos na tentativa de mitigação dos problemas encontrados.

#### **4.2.3. Compressas**

##### **SUMÁRIO**

**Método:** Compressas

**Princípio de funcionamento:** A – Eliminação de sais solúveis

**Descrição:** compressas com base em argila ou compostos de celulose são aplicadas na superfície do material poroso, proporcionando a remoção dos sais do substrato e sua acumulação na compressa por processos de difusão em meio líquido ou por capilaridade.

**Vantagens:**

- possível efectividade na remoção de sais localizados próximo da superfície
- método que tem dado bons resultados em vários casos de preservação de pintura mural
- método não intrusivo

**Limitações:**

- sais pouco solúveis são de difícil remoção
- remoção de sais a profundidade limitada relativamente à superfície do material
- a atenuação das consequências da degradação pelos sais na proximidade à superfície exposta, se o fornecimento de sal não for eliminado, será apenas temporária
- perigo de a água introduzida pelo processo poder originar migração de sais, com redistribuição dos mesmos a maior profundidade no material
- eficácia reduzida em superfícies com baixa absorção de água (vidradas ou pintadas, por exemplo)
- podem ter que se realizar aplicações sucessivas

## **Âmbito do método**

A aplicação de compressas em materiais porosos para extracção de sais contaminantes constitui um método utilizado na conservação de edifícios antigos, nomeadamente pinturas murais, e, por vezes, também tentado em alvenarias (pedra, tijolo). O elevado número de estudos existentes sobre a temática é sintomático da importância da mesma no contexto da preservação do património histórico.

## **Descrição**

Na composição das compressas são normalmente usadas argilas (bentonite, zeolite, atapulgite, sepiolite, caulinite) ou compostos de celulose. Estes constituintes são utilizados de forma singular ou misturados segundo determinadas proporções, sendo-lhes sempre adicionada água. Nestas misturas poderão ser também empregues certos tipos de agregados, designadamente areias de quartzo ou sílica expandida (Nunes e Rodrigues 2007).

Na busca de melhores soluções de dessalinização, diferentes composições para compressas têm vindo a ser testadas em estudos como os de Bourgès e Vergès-Belmin (2008) ou Lombardo e Simon (2006).

A natureza e as proporções dos constituintes das compressas determinam as propriedades fundamentais destas: trabalhabilidade e capacidade de retenção de água no estado fresco, retracção de secagem, adesão ao substrato, porosidade e porometria (Lombardo e Simon 2006, Bourgès e Vergès-Belmin 2008).

As compressas poderão ser aplicadas directamente sobre o material a dessalinizar ou, então, sobre um material previamente colocado, como o papel japonês. Esta camada intermédia visa permitir uma melhor adesão ao substrato, a protecção deste relativamente a detritos ou nós deixados pela compressa e evitar que o acto de remoção da mesma seja causador de danificação de materiais mais delicados (Lombardo e Simon 2006, Auras 2008, Brajer e Klens-Larsen 2008). A espessura da compressa aplicada deverá ser pequena (aproximadamente 2 cm), de modo a que o peso próprio não origine o seu destacamento (Vergès-Belmin 2006).

As compressas são classificadas segundo dois tipos: húmidas e de secagem. As primeiras retêm a água utilizada na sua preparação, sendo as perdas de água por evaporação evitadas pela colocação de um material protector sobre a compressa (ex: folhas de polietileno). Nas compressas de secagem, a água inicialmente contida evapora livremente após aplicação.

O transporte de iões do substrato para as compressas pode ocorrer por dois processos (Vergès-Belmin 2006, Lombardo e Simon 2006, Auras 2008):

- **difusão** - migração em meio líquido dos iões salinos contidos numa zona onde a sua concentração é maior (material poroso) em direcção a uma zona onde essa concentração é menor (compressa);
- **capilaridade** - sucção pela compressa das soluções salinas contidas no material poroso.

O processo de transporte por difusão é significativamente mais lento do que a capilaridade, proporcionando, comparativamente, uma acção de dessalinação menos rápida.

O tipo de transporte de sais que ocorre nas compressas húmidas e secas é distinto, prevalecendo, respectivamente, o transporte por difusão e por capilaridade (Auras 2008, Sawdy *et al.* 2008). Em qualquer dos casos, a extracção de sais do material poroso requer uma prévia dissolução dos mesmos. Esta dissolução poderá ser conseguida por intermédio da água contida na própria compressa ou ser potenciada efectuando uma pré - molhagem do material poroso (Vergès-Belmin 2006).

Após determinado período de aplicação, a remoção das compressas deverá ser efectuada encontrando-se estas ainda húmidas, de modo a facilitar tal procedimento (Nunes e Rodrigues 2007).

Os níveis de dessalinização conseguidos através deste método poderão ser optimizados por sucessivas aplicações, até ser verificada a estabilização do teor de sal nas compressas utilizadas (Nunes e Rodrigues 2007).

### **Factores de que poderá depender a eficácia da técnica**

#### ➤ **Substrato**

##### - distribuição de sal no substrato

A distribuição dos iões contaminantes no substrato a dessalinizar poderá influenciar a eficácia da dessalinização conseguida pela utilização de compressas (Schwarz *et al.* 2008, Auras 2008), uma vez que esta técnica só permite remover sais a pequena profundidade relativamente à superfície (poucos centímetros).

##### - molhagem

A molhagem do substrato (directamente ou por intermédio das compressas), efectuada para efeitos de dissolução dos sais contaminantes, pode introduzir uma quantidade de água excessiva que poderá ser contraproducente e contribuir para uma migração e deposição dos sais a maior profundidade. (Sawdy *et al.* 2008, Auras 2008).

- absorção da água pelo substrato

A superfície do material onde se aplica a compressa deverá ser capaz de absorver água. Caso contrário, será dificultada a dissolução de sais, resultando numa menor capacidade de dessalinização utilizando o método em causa (Schwarz *et al.* 2008).

➤ **Compressas**

- relação entre a porosidade da compressa e a do substrato

A compressa a aplicar deverá possuir poros com dimensão inferior aos do substrato a dessalinizar (Lombardo e Simon 2006, Vergès-Belmin 2006) de modo a ser conseguida uma melhor sucção capilar, uma vez que esta diminui com o aumento do raio do poro. Este factor só é, evidentemente, relevante caso a compressa seja de “secagem” (Sawdy *et al.* 2008). Já o estudo de Bourgès e Vergès-Belmin (2008) refere a necessidade de a distribuição de tamanhos de poros na compressa, coincidir com a do substrato de modo a maximizar a extracção de sal.

- adesão substrato/compressa

Uma boa adesão da compressa ao substrato é essencial para o estabelecimento dos processos de transporte capazes de remover os iões contaminantes do suporte (Lombardo e Simon 2006, Bourgès e Vergès-Belmin 2008, Auras 2008). A natureza da interface entre camadas determina, de facto, a continuidade líquida e a resistência introduzida ao transporte de líquido, sendo esta resistência maior no caso da existência de um espaço de ar entre camadas (Freitas 1992).

Compressas com maior capacidade de retenção de água permitem uma melhor adesão ao substrato em situações de aplicação vertical (Vergès-Belmin 2006), uma vez que estas compressas favorecem uma evaporação mais gradual.

- período de aplicação da compressa e número de repetições

O período de aplicação da compressa e número de repetições necessárias de tal procedimento influenciam o nível de dessalinização conseguido. A influência destes factores não é, contudo, consensual. Segundo, por exemplo, Auras (2008) ou Sawdy *et al.* (2008), a natureza da compressa tem relevância: para compressas “húmidas”, a necessidade de substituição depende da concentração de sal na compressa em face do transporte de sal até esta verificar-se por difusão; enquanto nas de “secagem” depende do posicionamento da frente de secagem (verifica-se a cristalização de sais na compressa enquanto a frente de secagem permanecer nesta).

### **Potencial do método como técnica de reabilitação**

A aplicação de compressas como método de dessalinização tem uma das suas mais importantes limitações na profundidade máxima a que se consegue remover sais (poucos centímetros). Este facto é evidenciado na generalidade dos estudos analisados (por exemplo Vergès-Belmin 2006 ou Sawdy *et al.* 2008). Esta profundidade de acção está muito condicionada pela profundidade de penetração de água da compressa ou da pré-molhagem que, por motivo do necessário retorno da água à compressa e da não redistribuição dos sais a uma maior profundidade, não deverá ultrapassar os 2 cm (Nunes e Rodrigues 2007). A pouca solubilidade de alguns sais também poderá dificultar a remoção. Por outro lado, a possível atenuação das consequências da degradação pelos sais na proximidade da superfície exposta poderá ser apenas temporária se o fornecimento de sal não for eliminado (Auras 2008). Assim, a aplicação da técnica das compressas por si só surtirá, na maior parte das vezes, efeitos “paliativos” no material contaminado por sais.

Este tipo de solução possui uma importante relevância na preservação de património histórico, nomeadamente pintura mural (Lombardo e Simon 2006).

#### **4.2.4. Remoção electroquímica de sais**

##### **SUMÁRIO**

**Método:** Remoção electroquímica de sais

**Princípio de funcionamento:** A – Eliminação de sais solúveis

**Descrição:** Aplicação de eléctrodos em número par (pólo positivo e negativo), gerando um campo eléctrico no material que induz a migração dos sais dissolvidos para os eléctrodos, onde são retidos e acumulados.

**Vantagens:**

- permite redução de sais contaminantes em elementos construtivos

**Limitações:**

- possível necessidade de molhagem das alvenarias, para dissolução dos sais contaminantes
- sais pouco solúveis são de difícil remoção
- risco de alteração do pH na envolvente aos eléctrodos
- método que carece ainda de testes sobre a sua aplicação prática em edifícios, dado o número reduzido de casos de estudo
- necessário repetir periodicamente se não forem eliminadas as fontes de sal ou humidade

## **Âmbito do método**

Os sais são compostos iónicos. Quando dissolvidos em água, a ligação entre iões é quebrada, ficando os mesmos (catiões e aniões) dispersos na solução salina (Ex:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ). Esta solução salina é capaz de conduzir electricidade, uma vez que os sais são electrólitos. Na tentativa de aproveitamento desta característica para o combate à degradação de materiais porosos por sais solúveis, têm vindo a ser desenvolvidos e testados os denominados métodos electroquímicos. Estes envolvem a aplicação de um campo eléctrico no material poroso capaz de promover a electromigração dos iões contaminantes para zonas de onde podem ser removidos. Esta técnica está bastante testada na prática para a remoção de cloretos do betão. Contudo, a sua aplicação a alvenarias contaminadas por sais solúveis é ainda bastante experimental. Os trabalhos de Friese (1988), Ottosen e Rørig-Dalgaard (2007), Ottosen *et al.* (2008), Rørig-Dalgaard *et al.* (2008), Ottosen e Rørig-Dalgaard (2009), fornecem bons indicadores da utilização do método no controlo da degradação pelos sais.

## **Descrição**

O método consiste em colocar no material poroso contaminado por sais um ou mais pares de eléctrodos. A aplicação de uma determinada corrente eléctrica, gerada por uma fonte de energia ligada ao par de eléctrodos de pólo negativo (cátodo) e positivo (ânodo), faz com que os catiões (iões de carga eléctrica positiva) e os aniões (iões de carga eléctrica negativa) contidos na solução salina se desloquem em direcção ao eléctrodo de sinal contrário. Os iões mobilizados ficarão retidos nos eléctrodos em material utilizado para o efeito (ex: compressas), que os acumulará. Este material contacta directamente com o material poroso, podendo assim ser conseguida uma redução do teor de sais contaminantes no segundo (Ottosen *et al.* 2008).

## **Factores de que poderá depender a eficácia da técnica**

A eficácia das técnicas de remoção electroquímica de sais poderá depender de muitas variáveis. Os artigos analisados permitiram identificar as seguintes:

### **➤ Teor de água do material poroso**

O transporte de sais por electromigração só é possível caso os mesmos se encontrem em solução. Assim, a existência de água e a quantidade da mesma no material poroso são factores determinantes na efectividade da remoção dos sais (Friese 1988, Ottosen *et al.* 2008, Rørig-Dalgaard *et al.* 2008). A molhagem dos elementos construtivos contaminados poderá assim ser necessária, caso a água contida nos poros seja reduzida ou inexistente. O teor de água mínimo, abaixo do qual será necessário adicionar água à alvenaria, varia um pouco para diferentes autores. De acordo com citações de Rørig-Dalgaard *et al.* (2008), temos, por exemplo, 2,5% para Larsen (1999) ou 3-4% (em massa) para Friese and Protz (2002). A

análise efectuada do método sugere, embora não tenha sido encontrada qualquer referência a esse facto na bibliografia, que o índice de saturação dos materiais poderá ser também um parâmetro crítico, mais relevante até do que o teor de água.

#### ➤ **Solubilidade dos sais**

Sais de diferentes tipos possuem solubilidade variável. Os mais solúveis estarão mais propensos à extracção por métodos electroquímicos, pois tenderão mais facilmente a dissolver-se, podendo assim ser mobilizados (Friese 1988, Ottosen *et al.* 2008, Rørig-Dalgaard *et al.* 2008).

#### ➤ **Concepção, aplicação e funcionamento dos eléctrodos**

##### - alterações do pH

A concepção e composição dos eléctrodos deverá permitir neutralizar ácidos (substâncias com excesso de iões  $H^+$  e pH inferior a 7) produzidos no ânodo, como de bases (substâncias com excesso de iões  $OH^-$  e pH superior a 7) no cátodo, ambos decorrentes da decomposição da água por efeito da passagem de corrente eléctrica (electrólise da água), de modo a que o ambiente envolvente aos eléctrodos seja protegido de alterações de pH (Ottosen *et al.* 2008). Caso contrário, de acordo com o mesmo estudo, os ácidos produzidos, poderão levar à degradação de argamassas, enquanto que uma crescente concentração de bases, poderá repercutir-se numa redução da fracção de corrente (eléctrica) transportada por outros aniões a serem removidos.

Segundo Rørig-Dalgaard *et al.* (2008), as alterações do pH (se não acauteladas), poderão também, por exemplo, provocar modificação da solubilidade dos pigmentos presentes em pinturas murais, ocorrendo assim o risco dos mesmos se dissolverem, sendo transportados pela acção dos eléctrodos.

Argilas especiais têm vindo a ser utilizadas na composição dos eléctrodos para neutralização dos ácidos e bases originados nos eléctrodos (Ottosen *et al.* 2008, Ottosen e Rørig-Dalgaard 2009). Estas são utilizadas na interposição do eléctrodo com o material a dessalinizar, servindo também para acumulação dos sais extraídos durante a aplicação do método em causa.

##### - intensidade de corrente eléctrica e período de aplicação da mesma

A intensidade de corrente eléctrica aplicada ao material contaminado, e o período de aplicação da mesma poderão influir nos resultados de dessalinação conseguidos (Friese 1988, Ottosen *et al.* 2008). Em Ottosen *et al.* (2008) seis unidades de eléctrodos aplicadas em parede de um edifício trabalharam a uma intensidade de corrente de 40 mA ao longo de dois períodos de dois meses.

### **Potencial do método como técnica de reabilitação**

O número de trabalhos recentes de aplicação de métodos electroquímicos em alvenarias de edifícios reais é aparentemente muito reduzido, constituindo o de Ottosen *et al.* (2008) o único caso de estudo encontrado. A maior parte dos restantes trabalhos analisados baseia-se em experiências laboratoriais sobre secção de parede de tijolo contendo pintura mural (Rörig-Dalgaard *et al.* 2008) ou sobre tijolos (Ottosen e Rörig-Dalgaard 2007, Ottosen e Rörig-Dalgaard 2009). Tais estudos indicam ser possível a redução da percentagem de sais solúveis em materiais porosos pelo método em causa. No entanto, são os sais contaminantes mais solúveis (ex: cloretos), que evidenciam níveis redução capazes de possibilitar um controlo dos efeitos nefastos.

A remoção de sais pelo método em causa poderá ter que ser repetida periodicamente caso exista uma contínua “alimentação” de sal e água ao material poroso.

#### **4.2.5. Microrganismos**

##### **SUMÁRIO**

**Método:** Microrganismos

**Princípio de funcionamento:** A – Eliminação de sais solúveis

**Descrição:** aplicação na superfície de material construtivo de microrganismos capazes de na sua actividade metabólica consumirem os sais contaminantes

**Vantagens:**

- método biológico compatível com o meio ambiente
- método que não provoca desgaste da superfície do material, o que o torna apropriado para materiais fracos e elementos valiosos
- método não intrusivo

**Limitações:**

- tratamento superficial
- número restrito de tipos de sais (nitratos, sulfatos) que os microrganismos poderão eliminar
- método que carece ainda de aplicação prática em edifícios (casos de estudo)
- necessário repetir periodicamente se não forem eliminadas as fontes de sal ou humidade

##### **Âmbito do método**

Têm vindo a ser desenvolvidos métodos biológicos para remoção de sais que recorrem a microrganismos capazes de utilizar o sal nas suas actividades metabólicas. Podem indicar-se alguns estudos, realizados sobre materiais pétreos: Ranalli *et al.* (1997) testaram o uso de bactérias cultivadas num suporte de sepiolite para remoção de sulfatos; Jain e Bhadauria

(2008) testaram a eficácia de vários tipos de micróbios na remoção de crostas negras (constituídas maioritariamente por gesso) em arenitos, dada a capacidade demonstrada pelos mesmos (em testes laboratoriais) de utilizar certos compostos (nitratos, sulfatos e carbono).

### **Descrição**

Microorganismos seleccionados são cultivados em meio que permita o crescimento da população microbiana. Estes microorganismos posteriormente são aplicados na superfície do material poroso. Esta aplicação poderá ser realizada de vários modos: spray, pincelagem, compressas ou, ainda, recorrendo a outros tipos de materiais capazes de transportar os micróbios, como certos solos ou geles. Os microorganismos são capazes de remover alguns tipos de sais existentes na superfície do material, utilizando-os na sua actividade metabólica. Posteriormente, o produto aplicado sobre o substrato é removido e a superfície é limpa.

### **Factores de que poderá depender a eficácia da técnica**

Os factores que poderão influenciar a eficácia do método são:

#### **➤ Tipo de microrganismos utilizados**

A remoção de sais dependerá da capacidade do ou dos microrganismos seleccionados em utilizar determinado sal na sua actividade metabólica. Alguns exemplos de organismos utilizados em estudos são: Ranalli *et al.* (2000) utilizaram o microrganismo *Desulfovibrio vulgaris* (colonizado em “Hydrobiogel-97”) para remoção *in situ* de sulfatos em pedra alterada ao ar livre em fachada de edifício (Taverna Nuova, em Popoli, Itália), tendo conseguido uma redução de 28% na área de teste; Jain e Bhadauria (2008) testaram vários microrganismos para remoção de crostas negras *in situ* num túmulo de arenito, salientando-se a utilização de *Pseudomas aeruginosa* (misturada em solo denominado “multani”) que foi a que melhores resultados surtiu, permitindo 75% de remoção na área de teste.

#### **➤ Suporte utilizado como transportador de células microbianas**

O tipo de material (matriz inerte) utilizado para transportar e aplicar os microrganismos na superfície contaminada deverá, segundo Ranalli *et al.* (2000), garantir uma adequada hidratação dos microrganismos, não interferir com o substrato (contaminando-o com iões) ou com o processo metabólico microbiano, bem como ser de fácil remoção e não tóxico. Em Ranalli *et al.* (1997) inocularam os microrganismos numa matriz de sepiolite, por este material garantir desenvolvimento de microfilmes microbianos com grande quantidade de biomassa activa por cm<sup>3</sup>, sendo o mesmo aplicado em amostras de material pétreo. No estudo de Jain e Bhadauria (2008) foram testados, a par da aplicação de microrganismos por spray e escovagem, dois tipos de matriz, o solo “multani” e um gel denominado “carbogel”. Segundo o mesmo estudo, estes dois suportes demonstraram ser capazes de uma melhor conservação da

humidade necessária à viabilidade e actividade das células bacterianas, em comparação com a aplicação por spray e a pincelagem.

➤ **Factores que podem influenciar a actividade metabólica dos microrganismos**

Vários factores poderão influenciar a actividade metabólica dos microrganismos: temperatura, humidade relativa, pH, condições aeróbias e anaeróbias (Ranalli *et al.* 2000). Como tal, o sucesso do método poderá depender das condições existentes *in situ*.

**Potencial do método como técnica de reabilitação**

Esta técnica tem como limitação o número muito restrito de sais que os microrganismos poderão ser capazes de eliminar. Contudo, nos estudos analisados (Ranalli *et al.* 1997, Ranalli *et al.* 2000, Jain e Bhadauria 2008), o método visou o tratamento de superfícies de pedra afectadas por formação de sais, advenientes da poluição atmosférica. Como tal, os microrganismos utilizados nestes estudos foram testados especificamente para determinados sais (nitratos e sulfatos de cálcio), demonstrando a prática em causa boas indicações na remoção dos mesmos.

Este método permite a remoção superficial dos sais contaminantes (Ranalli *et al.* 2000). Como tal, a acção proporcionada pode ser algo limitada nos casos em que também existir sais no interior do material. Além deste facto, a remoção de sais poderá ter que ser repetida periodicamente caso exista uma contínua “alimentação” de sal e água ao material poroso.

A dessalinização por este método não provocará desgaste da superfície do material, tornando-o apropriado para materiais fracos e elementos de elevado valor.

Este método biológico é compatível com o meio ambiente (Ranalli *et al.* 2000), não apresentando riscos para o mesmo.

De qualquer modo, a utilização de microrganismos face a problemas de sais encontra-se ainda num estado bastante preliminar de desenvolvimento. Nos estudos analisados (Ranalli *et al.* 1997, Ranalli *et al.* 2000, Jain e Bhadauria 2008), foram realizados testes essencialmente sobre pedra, não tendo sido testados outros materiais (argamassas, cerâmicos), que também são muito relevantes nos edifícios antigos.

#### 4.2.6. Modificadores de cristalização

##### **SUMÁRIO**

**Método:** Modificadores de cristalização

**Princípio de funcionamento:** C - Alteração do comportamento dos sais solúveis

**Descrição:** Os modificadores de cristalização são produtos que interagem com as soluções salinas, impedindo que a cristalização se dê ou fazendo com que ela aconteça de forma menos nefasta para o material.

**Vantagens:**

- método não intrusivo
- alguns tipos de modificadores podem promover a dessalinização dos elementos construtivos, em virtude de promoverem a formação de eflorescências em detrimento de subflorescências

**Limitações:**

- os estudos realizados abrangem um número reduzido de sais
- carece ainda de aplicação prática em edifícios (casos de estudo)
- necessário repetir periodicamente se não forem eliminadas as fontes de sal ou humidade
- não estão totalmente esclarecidos os potenciais problemas devidos à toxicidade de algumas substâncias utilizadas como modificadores de cristalização

##### **Âmbito do método**

Fruto do desenvolvimento científico, têm surgido técnicas inovadoras na procura de dar cada vez mais e melhores respostas aos problemas provocados pelos sais nas construções antigas, de que é exemplo o uso de modificadores de cristalização. Estes são substâncias químicas solúveis em água ou álcool capazes de interagir com as soluções salinas de modo a condicionar a ocorrência e o desenvolvimento do processo de cristalização dos sais solúveis. Os estudos já realizados sobre estes produtos são, na sua grande maioria, baseados em ensaios laboratoriais (Rodríguez-Navarro *et al.* 2002, Selwitz e Doehne 2002, Ruiz-Agudo *et al.* 2006, Marrochi *et al.* 2006, Lubelli e Hees 2007), os quais indiciam, em alguns casos, resultados promissores quanto à possível aplicação desta técnica no controlo da degradação de materiais porosos contaminados com sais.

##### **Descrição**

Sendo uma técnica ainda insuficientemente conhecida e sobre a qual existem muitas dúvidas e alguns resultados contraditórios ou pouco claros, crê-se que, de uma forma geral, é possível identificar quatro modos principais de actuação (Cardeira 2010):

- inibidores de cristalização

Poderão prevenir ou atrasar a nucleação, inibindo ou atrasando a taxa de crescimento dos cristais (Rodríguez-Navarro *et al.* 2002, Lubelli e Hees 2007). Este facto, segundo os mesmos estudos, terá implicações ao nível da concentração das soluções que percolam no interior do material poroso, permitindo que nas mesmas sejam atingidas níveis de sobressaturação mais elevados, comparativamente com outras sem a sua aplicação. Este aspecto poderá acarretar problemas colaterais, tal como sugerido por Rodríguez-Navarro *et al.* 2002 ou Lubelli e Hees 2007, uma vez que maior sobressaturação pode conduzir a maiores pressões de cristalização no interior dos poros do material.

- promotores de nucleação

Poderão promover a nucleação dos cristais, aumentando o número de cristais formados mas diminuindo o tamanho médio dos mesmos, gerando-se menores tensões no interior dos poros (Ruiz-Agudo *et al.* 2006).

- modificadores de hábito

A adsorção do modificador em faces específicas de um cristal em crescimento, poderá proporcionar a diminuição ou aumento da taxa de crescimento das referidas faces (Rodríguez-Navarro *et al.* 2002, Lubelli e Hees 2007). Podem conseguir-se assim formas cristalinas menos nefastas para o material.

- promovem o encaminhamento das soluções salinas à superfície exposta do material

Embora este modo de funcionamento não seja frequentemente indicado de forma explícita, vários estudos revelam que os modificadores podem alterar o balanço entre fluxo líquido e fluxo de evaporação no material poroso, promovendo a formação de (mais inócuas) eflorescências em vez de (mais destrutivas) subflorescências (Selwitz e Doehne 2002). Não é ainda totalmente claro se este efeito se deve simplesmente à alteração das propriedades das soluções salinas ou também à ocorrência de uma maior superfície efectiva de evaporação devido à presença de eflorescências ou à menor obstrução dos poros porque os cristais se formam mais lentamente, em menor número ou são mais pequenos (Selwitz e Doehne 2002, Lubelli e Hees 2007, Rodríguez-Navarro *et al.* 2002).

A grande maioria dos estudos existentes sobre a aplicação destas substâncias recai na acção de um determinado inibidor face a um determinado tipo de sal em determinado tipo de material poroso. O cloreto de sódio (NaCl) e o sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), dois dos tipos de sais com mais impacto na degradação de construções, têm sido os mais focados. O comportamento dos inibidores de cristalização não é, em particular, claro para misturas de sais, uma vez que não foi ainda realizado qualquer estudo sobre esta situação (Rodríguez-Navarro *et al.* 2006, Lubelli e Hees 2007).

Exemplos de algumas substâncias avaliadas como modificadores de cristalização:

- DTPMP e ATMP, testados com sulfato de sódio, por exemplo, por Ruiz-Agudo *et al.* (2006);
- Ferrocianeto de potássio, testado com cloreto de sódio, por exemplo, por Selwitz *et al.* (2002) ou Rodriguez-Navarro *et al.* (2002).

### **Factores de que poderá depender a eficácia da técnica**

A eficácia da utilização dos modificadores de cristalização na prevenção da degradação poderá depender de variáveis relacionadas com o modo de actuação do inibidor, das propriedades do meio físico onde o mesmo é aplicado e ainda das condições ambientes. Sumariam-se a seguir alguns destes factores:

#### ➤ **Composição química da substância utilizada como modificador**

##### - número de grupos funcionais presentes

Para que a aplicação de um modificador de cristalização num material contaminado resulte numa elevada capacidade de inibição da cristalização, a substância utilizada deverá possuir o maior número possível de grupos funcionais (Rodriguez-Navarro *et al.* 2006).

##### - pH da solução salina

Em alguns modificadores de cristalização, o nível de pH da solução reflectir-se-á na eficiência de alteração do processo de cristalização. Segundo o estudo de Ruiz-Agudo *et al.* (2006), os ambientes moderadamente alcalinos permitem a inibição da cristalização (do sulfato de sódio) para os modificadores testados (HEDP, ATMP, DTPMP). A composição do material poroso ao qual é aplicado o modificador poderá influenciar o pH da solução salina (Lubelli e Hees 2007). Daí que este factor deva ser controlado.

#### ➤ **Dosagem da substância química**

A dosagem de modificador de cristalização aplicada influencia a eficácia do mesmo (Selwitz e Doehne 2002, Marrochi-Assunta *et al.* 2006).

#### ➤ **Propriedades do meio físico onde o modificador de cristalização é aplicado**

Em materiais cuja distribuição de tamanho de poros propicie, durante a secagem, uma continuidade da fase líquida até à superfície pouco prolongada (ocorrendo apenas para elevados teores de líquido), a utilização de modificadores poderá ser limitada na acção de encaminhamento da solução até à superfície exposta, dada a propensão para a cristalização ocorrer no interior do material (Lubelli e Hees 2007).

### ➤ **Modo de aplicação**

O modo mais adequado de aplicação dos modificadores de cristalização nos materiais de construção porosos é ainda objecto de discussão, havendo, no entanto, indicações de que pode fazer variar a eficácia do método (Rodriguez-Navarro *et al.* 2006, Lubelli e Hees 2007). A aplicação por pincel, escovagem, por spray ou por intermédio de compressas são alternativas possíveis.

### **Potencial do método como técnica de reabilitação**

A utilização destas substâncias no “combate” à degradação provocada pelos sais solúveis é recente e vários aspectos necessitam ainda de mais investigação, nomeadamente no que se refere à aplicação em edifícios. Esta é essencial na busca de respostas quanto à real capacidade de desempenho do uso destas substâncias para os fins evidenciados nos ensaios laboratoriais (Rodriguez-Navarro *et al.* 2006). Também não estão totalmente esclarecidos os eventuais problemas devidos à toxicidade de algumas substâncias utilizadas como modificadores de cristalização.

Uma das potencialidades do método mais valoradas nos estudos analisados (Rodriguez-Navarro *et al.* 2002, Lubelli e Hees 2007, Ruiz-Agudo *et al.* 2006) prende-se com o facto da aplicação dos modificadores poder ser utilizada na dessalinação de elementos construtivos contaminados, uma vez que alguns modificadores promovem a formação de eflorescências em detrimento de subflorescências.

#### 4.2.7. Rebocos

### **SUMÁRIO**

**Método:** Rebocos

**Princípio de funcionamento:**

D - Alteração das características do meio físico

A - Eliminação de sais solúveis

**Descrição:** Os rebocos são em geral utilizados como modo de conviver com o problema da degradação (princípio de funcionamento D). Neste caso, a sua utilização, assentando embora no princípio de funcionamento geral acima mencionado, pode seguir diferentes princípios de funcionamento específicos que se adequam a diferentes tipos de exigências funcionais e que são os seguintes:

- Revestimentos selantes
- Revestimentos de bloqueio de sal
- Revestimentos de transporte de sal
- Revestimentos de acumulação de sal

Os rebocos também podem ser usados como método de dessalinização (princípio de funcionamento A).

**Vantagens:**

Dependendo do princípio específico de funcionamento do reboco:

- Protecção do suporte
- Salubridade de paramentos
- Protecção de elementos adjacentes
- Dessalinização do suporte

**Limitações:**

- Substituição periódica (mais frequente para rebocos sacrificiais tradicionais)
- Possível complexidade na escolha do tipo de revestimento mais apropriado
- Custo elevado de alguns sistemas de reboco industriais
- Impossibilidade óbvia de aplicação do método em alvenarias não revestidas

Dependendo do princípio específico de funcionamento do reboco:

- Risco de degradação superficial do reboco (sais e humidade)
- Risco de degradação do suporte
- Risco de destacamento do revestimento
- Risco de degradação de elementos adjacentes ou aumento do nível da humidade ascensional

## Âmbito do método

Os rebocos em alvenarias de edifícios possuem como funções principais a protecção do suporte (que, nos edifícios antigos, são muitas vezes alvenarias com carácter estrutural), contribuir para melhores condições de habitabilidade e permitir a execução de acabamentos.

Quando os sais solúveis estão presentes na construção, os rebocos, fazendo a transição entre a alvenaria e o meio exterior, vão condicionar a localização da deposição de sais ao longo da parede e, conseqüentemente, a intensidade e os padrões de degradação da mesma (Gonçalves 2007).

As alternativas existentes para revestimentos a utilizar em substratos contaminados por sais são actualmente bastante diversificadas, podendo passar pela aplicação de rebocos fabricados in-situ com composição similar à dos revestimentos pré-existent no edifício (em geral, rebocos de cal aérea), ou então pela aplicação de rebocos industriais pré-doseados.

Os rebocos são tradicionalmente usados, pela sua substituição periódica, como camadas “de sacrifício” que permitem o controle e mitigação da acção nefasta dos sais. Estes “**rebocos sacrificiais**” propiciam a cristalização salina na própria massa, salvaguardando assim outros elementos construtivos da acção dos sais.

Os custos associados a uma substituição frequente de rebocos no contexto da conservação de edifícios antigos não se coaduna normalmente, com os recursos hoje disponíveis. Por outro lado, as exigências funcionais colocadas aos rebocos são hoje mais severas em muitas situações (especialmente em casos em que a reabilitação inclui mudanças de uso como, por exemplo, a transformação em espaços museológicos). Estes factores pressupõem um melhor desempenho do reboco durante um maior período temporal. Nos últimos tempos têm assim surgido vários tipos de revestimentos industriais pré-doseados próprios para aplicação em paredes contaminadas por sais. Estes têm subjacente um melhor desempenho, maior vida útil e princípios específicos de funcionamento que permitem novas respostas aos problemas causados pelos sais (Gonçalves 2002). Isto é conseguido através de composições inovadoras, com introdução de agregados leves e vários adjuvantes, por exemplo hidrófugos.

A adequabilidade de uma solução de revestimento a um caso específico está hoje, assim, dependente do tipo de desempenho pretendido (Gonçalves e Rodrigues 2006): protecção do suporte (alvenaria); salubridade dos paramentos para melhoria da habitabilidade de espaços interiores; protecção de elementos adjacentes como esculturas ou pinturas murais.

## **Descrição**

A aplicação de rebocos é um procedimento usual na reabilitação de construções. Em termos gerais, envolve várias etapas. A primeira destas centra-se na preparação do suporte onde irá ser aplicado o revestimento, nomeadamente a sua limpeza. Segue-se a preparação da argamassa de reboco de acordo com as especificações próprias da solução adoptada. A posterior aplicação da solução de revestimento é executada segundo as camadas que a constituem, que deverão ser pelo menos três para rebocos correntes (Veiga 2006) e, no caso de produtos industriais, que normalmente são pré-doseados, aquelas que estiverem definidas na documentação técnica (Gonçalves 2002).

No caso de paredes húmidas e com sais, como referido na (secção 2.8.1), é o balanço entre o fluxo líquido que alimenta a frente de secagem e o fluxo de evaporação que abandona esta frente em direcção ao ambiente que determina a profundidade a que ocorre a cristalização. Os revestimentos podem afectar ambos os fluxos, o que permite obter diferentes **princípios específicos de funcionamento** (Gonçalves 2007). Descrevem-se a seguir os princípios fundamentais, fazendo notar que podem, no entanto, ocorrer comportamentos mistos:

- **Revestimentos Selantes**

A solução salina proveniente do suporte é impedida de atravessar o revestimento, já que este não admite transporte de humidade quer no estado líquido como de vapor. A cristalização dos sais, a ocorrer, terá lugar na interface suporte/revestimento à volta de “pontos de fuga”, originados por envelhecimento ou degradação localizada do revestimento, os quais permitem a evaporação do solvente. Pode ainda ocorrer em zonas adjacentes à área revestida.

- **Revestimentos de bloqueio de sal**

Estes revestimentos admitem transporte de vapor mas não de líquido (esta hidrorrepelência do reboco deriva em geral da utilização de hidrófugos na sua composição). A solução salina proveniente do suporte é assim impedida de atravessar por capilaridade o revestimento. No entanto, sendo este permeável ao vapor, a evaporação do solvente dá-se na zona da interface suporte/revestimento onde, portanto, ocorre a cristalização.

- **Revestimentos de transporte de sal**

Os revestimentos de transporte permitem o transporte de humidade na forma líquida e de vapor. A solução salina proveniente do suporte pode, portanto, ser transportada por capilaridade através do revestimento e, dependendo do balanço de fluxos, atingir a superfície exposta da parede, onde evapora, originando eflorescências.

- **Revestimentos de acumulação de sal**

Estes revestimentos equilibram as suas propriedades de transporte de líquido e de vapor de tal modo que as soluções salinas provenientes do suporte conseguem penetrar no revestimento sem que, contudo, a frente húmida atinja a superfície da parede. A evaporação e a cristalização acontecem assim na própria massa do reboco.

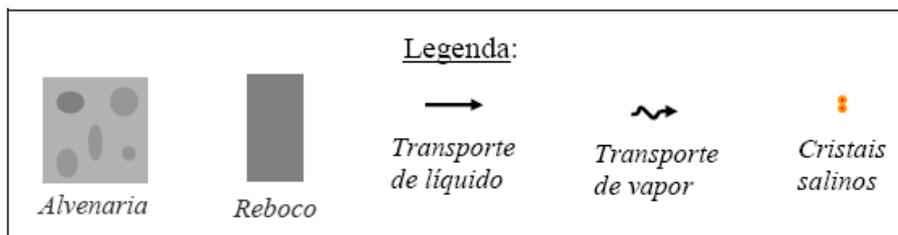
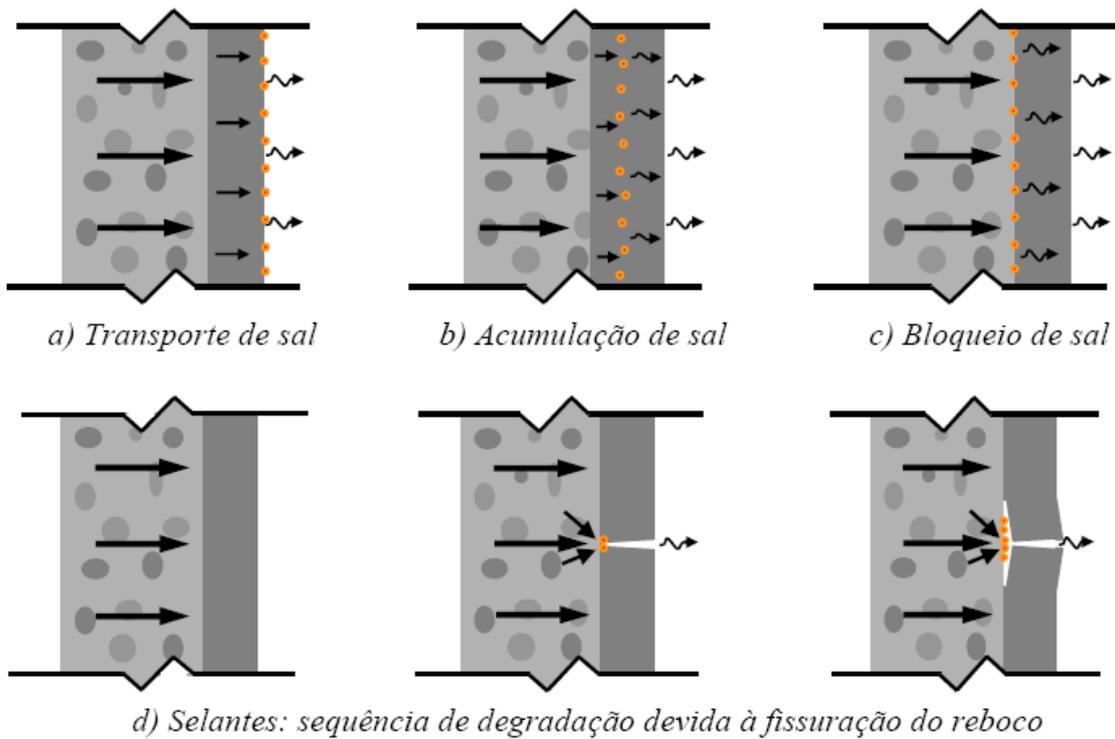


Fig. 10 – Princípios específicos de funcionamento dos rebocos face à cristalização de sais (Gonçalves e Rodrigues 2010).

Além da caracterização unidireccional acima efectuada, devem também ser tidos em conta os efeitos dos revestimentos em relação à migração das soluções em altura (ou lateralmente) na parede. De facto, a baixa ou inexistente taxa de evaporação permitida por certos tipos de revestimento (selantes, hidro-repelentes ou mesmo de acumulação) poderá potenciar, quando estes são aplicados em alvenarias sujeitas a humidade ascensional, mais elevadas alturas de ascensão capilar ou desvirtuamento dos percursos habituais da humidade, levando-a até zonas adjacentes permeáveis ao vapor, de modo a que, na globalidade, o fluxo líquido que penetra pela base da parede seja compensado pelo fluxo de evaporação que a abandona através da

superfície (Gonçalves e Rodrigues 2006). Deste modo, existirá o risco de as soluções salinas poderem contaminar zonas isentas de sais, arrastando a degradação para as mesmas. Os revestimentos de transporte constituem soluções adequadas quando é pretendido minorar este tipo de efeito (Groot *et al.* 2009).

O princípio específico de funcionamento a que um determinado revestimento obedece quando aplicado num substrato contaminado com sal, deverá, assim, permitir o cumprimento das exigências funcionais que lhe são aplicáveis relativamente à contenção/mitigação da acção dos sais na zona revestida, bem como não contribuir para o agravamento da degradação noutras zonas do edifício. As possibilidades, limitações e possíveis efeitos colaterais inerentes a um dado tipo de revestimento numa dada situação de aplicação deverão ser, portanto, devidamente equacionados. Na tabela 1 apresenta-se um sumário dos principais factores e situações identificados na pesquisa efectuada.

Tabela 1 – Possibilidades e riscos inerentes aos princípios específicos de funcionamento dos rebocos relativamente à cristalização de sais solúveis

<b>Princípio específico de funcionamento do revestimento:</b>	<b>Selante</b>	<b>Bloqueio de sal</b>	<b>Transporte de sal</b>	<b>Acumulação de sal</b>
<b>Possibilidades</b>				
Protecção do suporte			x	x
Obtenção de superfícies secas e isentas de sais	x	x		x
Protecção de elementos adjacentes			x	
<b>Riscos</b>				
Degradação superficial (sais e humidade)			x	
Degradação do suporte	x	x		
Destacamento do revestimento	x	x		x*
Degradação de elementos adjacentes ou aumento do nível da humidade ascensional	x	x		x

\* o revestimento pode atingir o limite de acumulação e subsequentemente fracturar na zona de deposição de sal

A resistência mecânica dos revestimentos é variável consoante os materiais que a constituem. Tomando o exemplo dos revestimentos tradicionais de cal aérea, estes são excelentes revestimentos de transporte, logo adequados para aplicação, por exemplo, em zonas que confinam com elementos de valor (evitando que a degradação por sais os atinja), ou para dessalinização do suporte. Contudo, estes rebocos têm uma baixa resistência mecânica, logo podem apresentar uma muito baixa durabilidade e desempenho não aceitável a nível de salubridade. Assim, actualmente alguns fabricantes procuram desenvolver revestimentos que aliem as boas capacidades de transporte das argamassas de cal, e uma maior resistência face às tensões internas introduzidas pelos sais nos poros das camadas superficiais do revestimento.

Face a problemas de sais na construção, os rebocos poderão assim ser utilizados:

- como modo de conviver com o problema da degradação, minimizando as suas consequências;
- para dessalinização, estando subjacente nestes casos a protecção do suporte (alvenaria). Logo, os dois tipos de reboco que podem ser usados para este fim são de transporte e de acumulação.

Estas duas vertentes de utilização dos rebocos sobrepõem-se em muitos casos.

### **Factores de que poderá depender a eficácia da técnica**

#### **➤ Escolha apropriada do revestimento**

Existindo vários tipos de revestimento (tradicionais ou industriais) com propriedades e características de funcionamento diversas, a sua escolha deverá ser cuidada e sustentada na análise e interpretação de um, por vezes vasto, conjunto de dados referentes às exigências colocadas e às características construtivas do edifício. Note-se ainda que o princípio específico de funcionamento de um dado revestimento não é uma característica intrínseca do revestimento, mas depende também de factores como as propriedades do suporte, da presença e propriedades de um eventual revestimento por pintura, da natureza e concentração dos sais, do teor de humidade do suporte e das condições ambientes (Gonçalves 2007).

#### **- suporte do reboco**

O tipo de suporte (nomeadamente a capacidade de sucção capilar do revestimento em relação a este e a continuidade hídrica proporcionada pela interface revestimento/suporte) poderá influenciar o princípio de funcionamento manifestado por um determinado reboco, como constatado por Gonçalves e Rodrigues (2010).

#### **- sais contaminantes**

A concentração da solução salina contaminante e o tipo de sais nela incluídos terá consequências na profundidade a que cristalizam os sais, bem como no nível de tensões por estes introduzido aquando da cristalização (Gonçalves e Rodrigues 2006).

#### **- humidade na alvenaria**

A existência e abundância de humidade nas alvenarias condicionam o fluxo líquido e a concentração da solução e, conseqüentemente, o comportamento do revestimento. Quanto maior o teor de humidade do suporte, maior o risco de que a frente húmida atinja a superfície. Por exemplo, os rebocos de acumulação, face a um volume de humidade elevado proveniente do suporte, poderão revelar-se ineficazes na sua acção. O fluxo de líquido libertado por evaporação permitido através destes rebocos poderá ser insuficiente face ao volume de humidade (Auras 2008), contribuindo para a degradação do suporte e arrastamento da mesma.

#### - condições ambientes

As condições ambientes também podem condicionar o desempenho do revestimento. De acordo com Groot *et al.* (2009) e Lubelli *et al.* (2009), rebocos cujo princípio de funcionamento propicie o transporte de soluções salinas do suporte até à superfície da parede não deverão ser aplicados em edifícios cujas condições climáticas interiores (HR e temperatura) favoreçam a ocorrência de ciclos de cristalização/dissolução. Isto porque os sais, quando se depositam preferencialmente na superfície da parede ou na sua proximidade, se encontram mais susceptíveis às condições ambientes existentes, contribuindo para um agravamento da degradação superficial do reboco. De acordo com estes autores, os revestimentos de acumulação constituem nestas situações uma solução com menores riscos.

As condições ambientes (HR) também poderão condicionar a taxa de evaporação da água (Gonçalves *et al.* 2006), afectando o posicionamento da frente húmida em profundidade e, consequentemente, o princípio de funcionamento do reboco.

#### ➤ **Aplicação do reboco**

Escolhido o sistema de revestimento mais adequado às exigências que lhe são imputadas, a sua correcta aplicação é igualmente preponderante para o seu bom desempenho. Em todo o procedimento de aplicação de um reboco (preparação do suporte, preparação do produto, aplicação da argamassa, acabamento) é requerida atenção e rigor de modo serem garantidos factores como (Gonçalves *et al.* 2008, Groot *et al.* 2009):

- boa adesão do revestimento ao suporte;
- ser evitada fendilhação do reboco, pois, como referido por Gonçalves *et al.* (2008), as fissuras dos revestimentos são normalmente pontos críticos onde a degradação por sais progride mais depressa;
- respeitar rigorosamente as especificações técnicas, nomeadamente quanto ao número de camadas constituintes da solução de revestimento e à espessura das mesmas;
- utilização de tintas como acabamento compatíveis com a solução de revestimento.

Caso algum destes aspectos não se cumpra, poderá contribuir para desvirtuar ou corromper o princípio de funcionamento que supostamente seria expectável.

#### **Potencial do método como técnica de reabilitação**

A utilização de rebocos em edifícios para efeitos de contenção e mitigação da degradação pela acção dos sais solúveis constitui um método correntemente utilizado. Se devidamente seleccionado e executado, o reboco poderá constituir uma solução eficaz nos seus propósitos. No entanto, a escolha do tipo de revestimento mais adequado a determinada situação poderá ser complexa, uma vez que dependerá da avaliação e interpretação dos vários factores de influência referidos, e ao bom conhecimento do leque de soluções tradicionais e industriais

existentes no mercado e das suas características, estas últimas nem sempre devidamente esclarecidas pelos fabricantes (Gonçalves 2002). Na perspectiva de facilitar a escolha do revestimento, sistemas de suporte de decisão, como o MDDS-COMPASS (Hees *et al.* 2009), estão a ser desenvolvidos. Até que tal desiderato seja cabalmente atingido, a realização de aplicações experimentais em obra é muito recomendável.

O custo de algumas soluções de reboco industriais é bastante elevado, facto este que deverá merecer acrescida ponderação na solução a implementar.

Os edifícios poderão não apresentar alvenarias com revestimento e, assim, não ter aplicação este tipo de técnicas.

#### **4.2.8. Controlo Ambiental**

##### **SUMÁRIO**

**Método:** Controlo ambiental

**Princípio de funcionamento:** D - Controlo das condições ambientes

**Descrição:** Implementação de condições de temperatura ou HR para valores otimizados em espaços interiores de edifícios, de modo a impedir ou minimizar a ocorrência e frequência de ciclos destrutivos de cristalização/dissolução dos sais.

**Vantagens:**

- não implica uma intervenção directa sobre os elementos contaminados, tornando-o adequado na preservação de elementos de elevado valor histórico e artístico.

**Limitações:**

- a previsão das condições ambientes óptimas poderá ser complexa
- na implementação de HR elevadas, haverá risco de desenvolvimento de fungos nocivos
- o método apenas é viável no interior de edifícios
- poderá ser necessária a compartimentação do interior do edifício para a implementação do controlo ambiental em zonas específicas
- o custo (equipamentos e sua manutenção) é geralmente considerado uma das maiores limitações; por este facto, os métodos de controlo ambiental só costumam ser aplicados a espaços de dimensão limitada onde existam elementos de valor

##### **Âmbito do método**

Como visto anteriormente nos subcapítulos 2.6 e 2.8.1, as condições termo-higrométricas ambientes e a sua variação são determinantes para o desenvolvimento da patologia dos sais solúveis em materiais de construção porosos, uma vez que interferem com a higroscopicidade dos sais e com a solubilidade das soluções salinas, factores estes condicionantes da

ocorrência e frequência dos ciclos cristalização/dissolução, causadores de degradação. As técnicas de controlo ambiental visam a determinação e implementação de condições ambientes, de HR e temperatura, capazes de impedir ou minimizar a ocorrência destes ciclos.

Os estudos encontrados sobre a implementação do controlo ambiental em espaços interiores de edifícios são vários, mencionando-se por exemplo os de Watt e Colston (2000), Saady e Price (2005), Konow (2006), Price (2006), Klenz-Larsen (2006), Klenz-Larsen (2007), ou Weber e Burszán (2008). Estes trabalhos denotam a importância do método no panorama das técnicas actualmente existentes para controlo da degradação causada pelos sais.

### **Descrição**

#### *Diagnóstico*

As condições climáticas existentes no interior de um edifício são consequência de diversos factores: temperatura e humidade na envolvente exterior; espessura das paredes exteriores (inércia térmica do edifício); ventilação existente; tipo de utilização dada ao edifício; características dos materiais construtivos; utilização de equipamentos de aquecimento ou de arrefecimento do ar; teor de humidade das paredes; incidência solar etc. A flutuação destas condições ambientes poderá desencadear ciclos de cristalização/dissolução dos sais contaminantes, podendo levar os materiais à degradação. Na tentativa de sustentar a ocorrência e frequência desses ciclos, a implementação de técnicas de controlo ambiental visa uma estabilização das condições ambientes para valores otimizados, pré-determinados.

As técnicas de controlo ambiental poderão ter dois objectivos distintos: implementação de condições ambientes (HR, temperatura) capazes de manter os sais em solução ou, pelo contrário, de os manter na forma cristalina. Estes intentos afiguram-se de fácil concretização, tratando-se de um único sal contaminante (bastando manter a HR do ambiente acima ou abaixo da  $HReq$  do sal), no entanto, a situação frequente em construções é a contaminação por misturas de sais, a qual eleva a complexidade do problema (Price 2000). De acordo com Price e Brimblecombe (1994), uma mistura de sais não possuirá um valor único de  $HReq$  a uma dada temperatura, mas uma gama de valores que não terá forçosamente como limites os valores individuais de  $HReq$  de cada sal.

O programa informático de modelação termodinâmica ECOS (Environmental Control Of Salts) (Price 2000) veio dar um contributo extremamente importante na previsão da gama de valores de HR e temperatura a que as misturas de sais poderão cristalizar. O desenvolvimento do ECOS, nomeadamente ao nível do interface gráfico do utilizador, resultou no software RUNSALT (Bionda 2002). O software utiliza dados relativos ao teor de diferentes tipos de iões ( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^-$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ) presentes na amostra. Estes dados são obtidos experimentalmente, por exemplo, por cromatografia iónica. Estudos que recorrem ao ECOS para previsão das condições ambientes ideais a implementar são cada vez mais frequentes,

podendo referir-se por exemplo os de Saudy e Price (2005), Price (2006) ou Klenz-Larsen (2007).

No entanto, a determinação das condições ambientes óptimas não deverá basear-se unicamente em modelos termodinâmicos. Saudy e Price (2005), por exemplo, referem a importância de efectuar a comparação de dados obtidos *in-situ* com as previsões termodinâmicas fornecidas pelo software, com vista à detecção e correcção de possíveis incongruências entre os mesmos.

Os dados obtidos *in-situ*, utilizados em estudos referentes a controlo ambiental (como por exemplo, Sawdy e Price 2005, Weber e Burszán 2008), poderão ser vários, tais como: dados de HR e temperatura conseguidos através de monitorização destes parâmetros em contínuo no interior do edifício (durante um período temporal pré-estabelecido), identificação de sais contaminantes (eflorescências e subflorescências) e quantificação dos teores destes nos materiais, bem como inspecções periódicas para documentação das anomalias e do estado (deliquescente ou cristalizado) dos sais solúveis. Da obtenção destes dados poderão advir custos significativos, uma vez que tanto a monitorização ambiental como as inspecções requerem tecnologia e peritos. Além do mais, tais procedimentos geralmente são desenvolvidos durante num período de tempo alargado.

Konow (2006) e, mais recentemente, Weber e Burszán (2008) utilizaram métodos para estimar as condições ambientes optimizadas que recorrem à monitorização das condições ambientes e à recolha periódica de detritos resultantes da degradação dos materiais pelos sais solúveis, relacionando as quantidades dos mesmos com as condições ambientes propiciadoras de tal situação.

### *Implementação*

Os meios e técnicas utilizados na implementação do controlo ambiental são muito variáveis, uma vez que, para além das questões relativas aos valores de temperatura e HR que se pretende atingir, cada edifício encerra especificidades próprias (arquitectura, pontos de ventilação existentes, condições ambientes interiores, localização da degradação no edifício, tipo de utilização dada ao edifício, etc.). A solução encontrada deverá ter em conta todos estes aspectos, de modo a cumprir com o máximo rigor possível as condições ambientes desejadas. Pode passar pela aplicação isolada ou em combinação de vários meios e acções, como sistemas de ar condicionado, desumidificadores, humidificadores, aquecedores, ventilação natural ou forçada, etc. Por vezes torna-se necessária a compartimentação de espaços interiores, de modo a tornar possível o controlo das condições ambientes em certas áreas de um edifício.

Uma subsequente monitorização das condições ambientes e da degradação é altamente recomendável e permitirá verificar se as medidas aplicadas estão a surtir o efeito desejado ou se há necessidade de reajustes das mesmas.

### **Factores de que poderá depender a eficácia da técnica**

#### **➤ Previsão das condições ambientes optimizadas**

Uma correcta definição das condições ambientes a implementar num edifício é vital para o êxito do método, caso contrário, o problema de degradação, ao invés de prevenido ou minorado, poderá ser agravado (Sawdy e Price 2006).

#### **➤ Limitações à implementação das condições ambientes definidas**

As condições ambientes optimizadas não são, na prática, muitas vezes facilmente aplicáveis ou até exequíveis, uma vez que certos aspectos poderão dificultar ou condicionar a sua implementação, por exemplo:

- Em edifícios em que seja necessária a implementação de uma elevada HR existe o perigo de que a mesma contribua para o desenvolvimento de fungos que podem ser nocivos para determinados materiais de construção (Bionda 2004).

- As condições ambientes adequadas ao controlo da degradação por sais poderão não estar de acordo com as condições desejáveis (ou até necessárias) ao tipo de utilização de um dado edifício ou compartimento (Sawdy e Price 2006).

- Pode tornar-se difícil a aplicação de controlo ambiental em edifícios que apresentem áreas contaminadas por diferentes sais ou misturas de sais, uma vez que as condições ambientes poderão ter que diferir entre espaços (Sawdy e Price 2006).

### **Potencial do método como técnica de reabilitação**

Os métodos de controlo ambiental, quando exequíveis e bem aplicados, poderão, por si só, ser capazes de conter a degradação causada pelos sais em edifícios. No entanto, a previsão das condições optimizadas poderá ser complexa e a sua implementação difícil. Os custos associados tanto ao diagnóstico como à implementação, incluindo a posterior monitorização, podem também ser elevados.

Meios actualmente existentes (nomeadamente, o modelo termodinâmico ECOS utilizando, por exemplo, dados de análise quantitativa de sais por cromatografia iónica) permitem fornecer mais fiáveis previsões das condições ambientes a implementar em edifícios, como sugerido por Price (2006).

Em edifícios afectados por um “abastecimento” contínuo de sais, a aplicação deste método poderá oferecer garantias de efectividade no controlo e mitigação da degradação. Por outro lado, o controlo das condições ambientes poderá ser a solução mais aconselhável quando existam elementos de elevado valor histórico e artístico, uma vez que não implica uma intervenção directa sobre o objecto. Assim, se tomadas medidas para minimizar o risco de erro na pré-definição das condições ambientes e uma posterior verificação dos seus efeitos na prática, o controlo das condições ambientes pode ser o melhor meio de garantir a não adulteração e a preservação das características originais dos objectos afectados.

#### 4.2.9. Controlo da humidade ascensional

##### **SUMÁRIO**

**Método:** Controlo da humidade ascensional

**Princípio de funcionamento: B** - Eliminação da humidade

**Descrição:** Eliminação ou redução do ingresso de humidade a partir da base das paredes. Existem diversas técnicas, tais como: redução da secção absorvente; introdução de barreiras estanques; injeção de produtos impermeabilizantes; electro-osmose; tratamento superficial do terreno contíguo ao edifício; execução de valas periféricas.

**Vantagens:**

- permite reduzir ou impedir o acesso de humidade, pelo que em alguns casos resolverá definitivamente o problema de degradação pelos sais
- pode eliminar a fonte de sal caso esta seja o terreno

**Limitações:**

- possível dificuldade de implementação dos métodos face a características próprias do edifício ou dos seus materiais
- custo elevado de algumas técnicas

##### **Âmbito do método**

Este subcapítulo incide nos métodos para controlo de humidade ascensional como meio para fazer face à degradação causada pelos sais. É claro que pode haver outras origens de humidade também relevantes para esta degradação, por exemplo a higroscopicidade ou as entradas de água consequentes de falta de manutenção da construção. Estas duas foram focadas anteriormente nesta dissertação, respectivamente pelo método de controlo ambiental (subcapítulo 4.2.8.) e nas medidas de prevenção (subcapítulo 3.1.2). Mas a ascensão capilar é provavelmente a mais frequente e, talvez, também a mais gravosa no caso dos edifícios antigos, sendo o seu controle geralmente uma das primeiras opções a considerar quando se pretende resolver problemas de cristalização de sais.

Os edifícios antigos possuem na sua constituição materiais cuja porosidade os torna permeáveis e com elevada sucção capilar. Estes materiais possibilitam que a humidade

proveniente do solo (águas freáticas ou superficiais) resultantes de escorrência de água da chuva ascenda por capilaridade através de fundações e paredes. A altura de humidade ascensional atingida depende do equilíbrio dinâmico entre o fluxo de líquido que se introduz na base da parede e o que se evapora através da sua superfície.

A humidade ascensional é uma das mais comuns origens da humidade em edifícios antigos e também uma das que mais frequentemente está associada à ocorrência de anomalias por cristalização de sais solúveis. Uma das razões para estar tantas vezes associada à degradação por sais é que ela permite a migração de soluções salinas provenientes do solo através da estrutura porosa dos elementos construtivos, levando à contaminação dos mesmos. Métodos que permitam a eliminação ou redução deste tipo de humidade poderão ser capazes de conter ou reduzir a degradação pelos sais. No entanto, a redução da humidade ascensional poderá em alguns casos contribuir para um agravamento da degradação. Isto porque uma menor quantidade de água ascendente pela parede poderá alterar a relação entre fluxo líquido e fluxo de evaporação. Deste modo, a frente húmida poderá recuar para o interior do material dado o fluxo líquido ser insuficiente para satisfazer as exigências evaporativas, o que poderá suscitar formação de criptoflorescências.

Há vários tipos de técnicas para controlo da humidade ascensional, explanadas, por exemplo, por autores como Massari e Massari (1993) ou Henriques (1994). Note-se que estas técnicas possuem um âmbito de aplicação mais lato do que o cingido por esta dissertação (controlo da degradação causada pelos sais solúveis), uma vez que a água é por si só causa de inúmeros problemas em edifícios.

A altura atingida pela humidade ascensional nas paredes de um edifício dependerá, entre outros factores, das condições ambientes de temperatura e HR, propriedades dos materiais relativas ao transporte hídrico (em particular, porosidade e sucção capilar), do teor de humidade e porosidade do solo e da taxa de evaporação permitida pela superfície das paredes (BRE 1989). Este último factor é muito condicionado pela existência e tipo de revestimentos, contaminação da parede pelos sais (que poderá afectar a evaporação e conseqüente secagem do material construtivo, como explicado em 2.8.2), radiação incidente e condições locais de ventilação (velocidade do ar).

### **Descrição**

O tratamento da humidade ascensional poderá passar pela aplicação de diversas técnicas (Massari e Massari 1993, Henriques 1994), tais como:

- Introdução de espaços vazios na base de uma parede, os quais reduzem a secção absorvente do elemento construtivo, limitando a quantidade de humidade que ascende e favorecendo a evaporação da mesma através dos vazios;

- Introdução de barreiras estanques na base da parede, interessando a totalidade da sua espessura (ex: membranas betuminosas, argamassas de ligantes sintéticos, folha de alumínio). A introdução de barreiras estanques poderá ser executada por introdução forçada de material no elemento construtivo, por preenchimento de troços da parede em que a alvenaria foi previamente removida (por demolição, corte com serra ou carotagens sucessivas);
- Injecção (por gravidade ou sob pressão) de produtos selantes ou hidrófugos em furos executados na base da parede, de modo a criar uma barreira;
- Criação de uma diferença de potencial susceptível de fazer cessar ou inverter o sentido de migração da humidade na parede (método da electro-osmose);
- Tratamento superficial do terreno contíguo ao edifício, para correcção de declives, de modo a afastar da construção água proveniente das chuvas;
- Execução de valas periféricas (com ou sem enchimento) na envolvente ao edifício, de modo a impedir que águas acedam lateralmente à construção;

### **Factores de que poderá depender a eficácia da técnica**

A eficácia está muito dependente da natureza e particularidades de cada técnica. As características da construção afectada por humidade ascensional, por exemplo, poderão condicionar a aplicabilidade e implementação dos métodos. Apresentam-se seguidamente alguns exemplos:

- Em edifícios antigos, a espessura das paredes e heterogeneidade dos materiais que as constituem podem dificultar a formação de uma camada impermeável ou hidrorrepelente contínua por injecção de produtos impermeabilizantes (Henriques 1994). A implementação de barreiras estanques a toda a espessura de um elemento construtivo também é difícil caso a mesma seja elevada (BRE 1989). Estes factores poderão contribuir, em alguns casos, para uma deficiente ou menos conseguida implementação do método, comprometendo a eficácia e propósito do mesmo.

- A implantação do edifício (ex: proximidade de outros edifícios) poderá ser impeditiva ou dificultar a execução de valas periféricas na envolvente do edifício.

- Certos métodos poderão adulterar o aspecto do edifício, como por exemplo a redução da secção absorvente. A introdução de barreiras estanques poderá também desvirtuar o fabrico histórico aplicado na construção (Lopez-Arce *et al.* 2008). Estes aspectos podem ser impeditivos da aplicação das referidas técnicas tratando-se de edifícios com valor arquitectónico.

- Alguns métodos poderão ter implicações estruturais, caso da redução da secção absorvente (Massari e Massari 1993, Henriques 1994). A implementação de barreiras estanques poderá em algumas construções oferecer riscos para a estabilidade da estrutura também devido a vibrações introduzidas (Henriques 1994). A utilização de barreiras estanques é também

desaconselhada em paredes que apresentem fissuras provocadas por assentamentos diferenciais do terreno (BRE 1989).

### **Potencial do método como técnica de reabilitação**

Os problemas de degradação causados pelos sais solúveis encontram-se frequentemente relacionados com a existência de humidade ascensional. Assim, a aplicação de técnicas para o seu tratamento poderá ser encarada como uma estratégia de actuação capaz de conter ou minorar a degradação pelos sais solúveis (caso proveniências alternativas de água não afectem os materiais de construção contaminados).

No entanto, o sucesso destas práticas em edifícios antigos poderá ser dificultado por certos condicionalismos das construções antigas (espessura elevada das paredes, heterogeneidade dos seus materiais constituintes, etc.). Noutros casos, poderão ainda existir entraves à aplicação de algumas técnicas por estas poderem desvirtuar o aspecto original do edifício, ou por a sua implementação poder constituir risco acrescido para a estabilidade da estrutura.

Não obstante, o tratamento da humidade ascensional em edifícios antigos poder ser em muitos casos de complexa resolução e execução, e de algumas técnicas adequadas para o efeito poderem exigir gastos monetários significativos, este tipo de práticas possui extrema importância no contexto do controlo da degradação por sais solúveis. Elas poderão ser impeditivas da contaminação por sais provenientes do solo onde se encontra implantado o edifício (origem frequente dos sais presentes nas construções). Por outro lado, a eliminação ou redução da humidade ascendente limita o factor predisponente água (Fig. 9) e, em consequência, a cristalização dos sais solúveis em geral.

#### **4.2.10. Método do Hidróxido de Bário**

##### **SUMÁRIO**

**Método:** Método do Hidróxido de Bário

**Princípio de funcionamento:** C - Alteração do comportamento dos sais solúveis

**Descrição:** Impossibilitar a ocorrência de ciclos de cristalização/dissolução do gesso, transformando-o num sal (sulfato de bário) que é praticamente insolúvel; inclui duas fases de aplicação de compressas: a primeira impregnada com carbonato de amónio e uma segunda com hidróxido de bário.

**Vantagens:**

- método que tem dado bons resultados em vários casos de preservação de pintura mural, existindo portanto experiência prática da sua utilização e eficácia

**Limitações:**

- só é aplicável a um tipo de sal em específico (gesso)
- tratamento superficial
- elevada toxicidade do hidróxido de bário

## **Âmbito do método**

O gesso (sulfato de cálcio) é um sal comum em elementos construtivos contaminados, e caracteriza-se por ser pouco solúvel, não obstante, pode causar danos significativos. O método do hidróxido de bário promove a protecção do material em relação à degradação causada pela cristalização do gesso. Este método pode também favorecer a consolidação do material poroso, estando no entanto esta aplicação fora do âmbito da dissertação, pelo que não se discutirá.

## **Descrição**

Este método promove a transformação do gesso que contamina o material poroso num sal (sulfato de bário) considerado insolúvel. Impossibilitando deste modo a ocorrência dos ciclos de cristalização/dissolução causadores de degradação (Matteini 2008).

O método envolve a aplicação de duas substâncias químicas, carbonato de amónio e hidróxido de bário, no material contaminado por sais de gesso. A aplicação das referidas substâncias é efectuada em separado, com recurso a compressas, e processa-se em duas fases (Weber 2004, Matteini 2008):

- 1) O carbonato de amónio é aplicado em primeiro lugar para promover a dissolução do gesso que é um sal pouco solúvel. Da reacção química entre as duas substâncias resulta o sulfato de amónio, que é um sal bastante solúvel, e carbonato de cálcio, que é inócuo. Posterior aplicação de compressa poderá ser utilizada na remoção de sulfato de amónio, este passo segundo Weber (2004) não é consensual, entre os profissionais que executam o método, havendo quem prefira deixar quantidade significativa do mesmo para a fase seguinte.
- 2) A aplicação do hidróxido de bário completa o procedimento. Este proporcionará a insolubilização do sulfato de amónio remanescente no material, transformando-o em sulfato de bário, sal este que possui solubilidade muito inferior ao gesso, sendo considerado praticamente insolúvel.

## **Factores de que poderá depender a eficácia da técnica**

### **➤ Sais contaminantes do material poroso**

A existência de outros sais contaminantes no material (sulfato de magnésio, nitratos ou cloretos) para além do gesso poderá, segundo Weber (2004), causar efeitos secundários ou uma menor eficácia da prática. De acordo com o mesmo autor, esta ocorrência deve-se a

possíveis reacções entre os referidos sais e as substâncias utilizadas no método, podendo destas resultar novos sais, ou suscitar alterações da solubilidade dos sais contaminantes.

➤ **Material contaminado**

Uma penetração reduzida das duas substâncias químicas (utilizadas no método) no material poroso poderá resultar numa menor eficácia da técnica (Pastuovic *et al.* 2006).

**Potencial do método como técnica de reabilitação**

O método do Hidróxido de Bário poderá possibilitar uma protecção superficial de elementos construtivos da degradação causada pelo gesso. A aplicação deste método é utilizada com sucesso na preservação de pinturas murais, nomeadamente em frescos (Matteini 2008). A aplicação desta mesma técnica foi tentada em portal de arenito calcário na igreja de S. Marko, em Zagreb, Croácia, mas os resultados foram pouco positivos devido a uma não homogénea e insuficiente penetração do hidróxido de bário no material (Pastuovic *et al.* 2006). Segundo Weber (2004) a rápida reacção do hidróxido de bário com o CO<sub>2</sub> (da qual resulta BaCO<sub>3</sub>), não permite uma boa penetração da substância no material poroso.

A grande limitação que este método apresenta prende-se com o facto de a insolubilização permitida ser específica para o gesso, sendo comum em construções a contaminação por misturas de sais.

Um facto que requer bastante cuidado na aplicação deste método é a elevada toxicidade do hidróxido de bário (Weber 2004).



## **5. SISTEMATIZAÇÃO DOS MÉTODOS E ACÇÕES**

### **5.1. Introdução**

Neste capítulo efectua-se uma análise global das medidas de prevenção (capítulo 3) e dos métodos de controlo (capítulo 4) da degradação devida a cristalização de sais solúveis, sendo apresentada uma proposta para o seu enquadramento numa lógica de combate à degradação.

Em primeiro lugar, discutem-se alguns trabalhos anteriores que incluem o levantamento e classificação de métodos para controlo da degradação por sais solúveis (secção 5.2).

A seguir, analisa-se a possível complementaridade entre métodos (secção 5.3), ilustrando essa análise com exemplos de aplicação prática mencionados na bibliografia.

Depois, descrevem-se, na secção 5.4, as abordagens possíveis no combate à degradação por sais solúveis: (i) prevenção; (ii) correcção; (iii) mitigação.

Finalmente, na secção 5.5, efectua-se a sistematização e classificação das medidas de prevenção e métodos de controlo em função do tipo de abordagem, apresentando-se um diagrama-síntese que sumaria o conteúdo referido.

### **5.2. Trabalhos anteriores**

Outros autores apresentaram já trabalhos de sistematização de métodos para controlo da degradação por sais solúveis.

Price (1995) discute diferentes maneiras para prevenir a degradação por sais: (i) remoção dos sais de materiais porosos; (ii) conservação passiva por controlo ambiental; (iii) medidas “activas”, que incluem a utilização de consolidantes, o método do hidróxido de bário, e os modificadores de cristalização. Dos métodos referidos, Price (1995) discute em particular o controlo ambiental.

Sawdy *et al.* (2008) dividem as opções para mitigação do problema de degradação em duas categorias: (i) os métodos de passivação, que incluem o controlo ambiental, e os métodos de conversão dos sais em compostos menos solúveis como o método do hidróxido de bário; (ii) os métodos de redução, que visam a dessalinização do objecto ou construção. Estes autores focam em particular estes últimos, nomeadamente a utilização de compressas.

Vergès-Belmin (2006) efectua uma descrição crítica de inúmeros métodos de dessalinização (remoção mecânica, dessalinização por banho, compressas, métodos eletroforéticos, métodos convectivos, desnitrificação biológica, dessalinização por microondas), alguns dos quais aplicáveis a objectos pequenos.

Borrelli (2006) apresenta um interessante artigo em que divide os métodos em: (i) métodos de dessalinização, por sua vez divididos em métodos de remoção de sais (lavagem com água) e métodos de redução, incluindo estes últimos os métodos de extracção de sal (compressas, camadas de sacrifício, utilização de rebocos porosos, vegetação *halophylous*, utilização de bactéria de redução de sulfato, método electroquímico); (ii) métodos de prevenção (redução de potencial entrada de água, estabilização climática, hidróxido de bário, inibidores de cristalização). Note-se que, embora de forma extremamente sumária, este autor refere praticamente todos os métodos mencionados nesta dissertação. Exceptua-se a remoção mecânica de eflorescências e a remoção de materiais contaminantes. Isto significa que nos últimos cinco anos não houve desenvolvimentos significativos nesta matéria.

A presente dissertação não segue as classificações propostas por estes autores. Procura sim, tendo em conta estas contribuições, abordar a resolução dos problemas de sais ao nível do edifício e sua envolvente, numa óptica global, que ultrapasse a do mero elemento construtivo ou zona degradada. Tendo em conta este objectivo, a temática é nas próximas secções analisada segundo diferentes perspectivas, que configuram três abordagens distintas do problema: prevenção, correcção e mitigação.

### **5.3 Complementaridade entre Métodos**

Existindo diversos tipos de métodos, cada um com as suas especificidades, potencialidades e limitações, a actuação perante os problemas de degradação por sais solúveis poderá passar pela utilização conjugada de diferentes métodos. Como exemplo, pode mencionar-se o estudo Lopez–Arce *et al.* 2009 que se baseia na análise de 24 edifícios na cidade de Adelaide, Austrália, sujeitos a reparações para tratar problemas de humidade e sais. Os autores evidenciam o facto da combinação de métodos ser, muitas vezes, a melhor estratégia para tratamento da degradação pelos sais.

De seguida, são mencionados alguns casos que sustentam o benefício da complementaridade:

- A remoção mecânica (escovagem) poderá suceder a aplicação de métodos que promovam/favoreçam a formação de eflorescências na superfície do material poroso, caso de certos modificadores de cristalização ou dos rebocos cujo princípio de funcionamento proporcione o transporte dos sais solúveis.



Fig. 11 – Remoção mecânica após aplicação de métodos que promovem a formação de eflorescências

- A remoção de materiais contaminantes poderá só por si ser insuficiente para pôr termo à degradação caso os sais tenham, entretanto, migrado para os materiais circundantes. Poderá pois ser necessária a utilização de técnicas complementares de dessalinização.

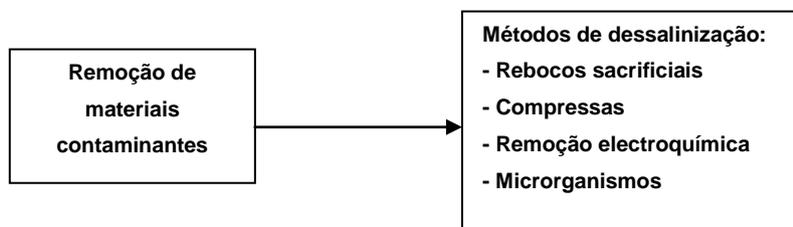


Fig. 12 – Aplicação de métodos de dessalinização após remoção de materiais contaminantes

- A dessalinização por intermédio de compressas poderá também ser utilizada de modo a criar melhores condições de aderência de rebocos em casos particulares e para áreas de dimensão limitada, como é sugerido por Vergés-Belmin (2006) a propósito da utilização de argamassas de reparação.

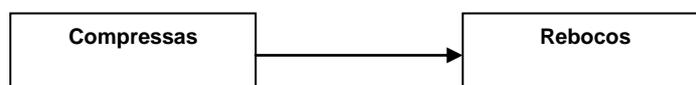


Fig. 13 – Aplicação de rebocos após aplicação de compressas

- A degradação pelos sais poderá subsistir após a eliminação da humidade ascensional que os transportou, se estes permanecerem no material, devido às propriedades higroscópicas dos sais, que podem originar a fixação de humidade do ar (Henriques 1994). Nestes casos, é recomendável utilizar medidas complementares, nomeadamente métodos de dessalinização para eliminação dos sais higroscópicos, ou métodos de controlo ambiental para evitar os ciclos destrutivos por dissolução/cristalização dos sais.

Por outro lado, quando é “cortada” a alimentação de água, o teor de humidade na parede diminui e, logo, a frente de evaporação tende a regredir. A tendência para formação de criptoflorescências (que danificam o material) pode assim aumentar. Para a protecção da alvenaria poderão usar-se rebocos de sacrifício (ou outros métodos de dessalinização) durante a fase de secagem da parede.

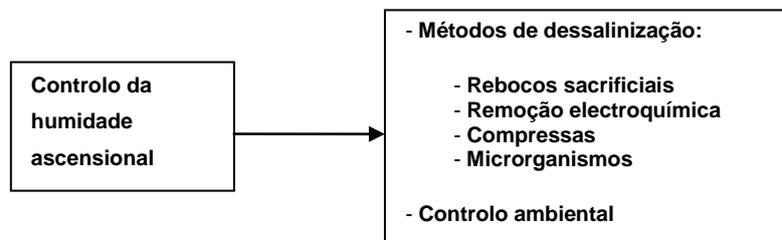


Fig. 14 – Aplicação de métodos de dessalinização, ou de controlo ambiental após eliminação da humidade ascensional

- A abundância em água poderá corromper o princípio específico de funcionamento dos rebocos de acumulação de sais (Gonçalves 2007), como explicado em 4.2.7, uma vez que a abundância de água tende a traduzir-se num posicionamento avançado da frente de evaporação, o que poderá resultar em comportamento de transporte de sais. Por outro lado, o fluxo de evaporação poderá ser insuficiente face ao volume de humidade, levando a uma extensão da zona degradada (ex: aumento da altura de ascensão capilar) ou contaminação de zonas adjacentes (Auras 2008). Daí que possa ser recomendável reduzir a humidade ascensional antes da aplicação deste tipo de rebocos.

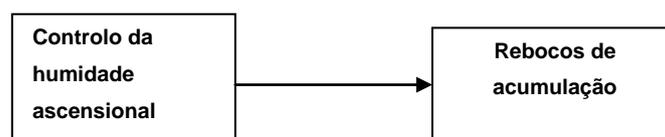


Fig. 15 – Controlo da humidade ascensional face à aplicação rebocos de acumulação

- As compressas poderão ser utilizadas não para dessalinização, mas como via química para a impregnação no material poroso de modificadores de cristalização (secção 4.2.6), das substâncias usadas no método do hidróxido de bário (secção 4.2.10) ou de microrganismos (secção 4.2.5).

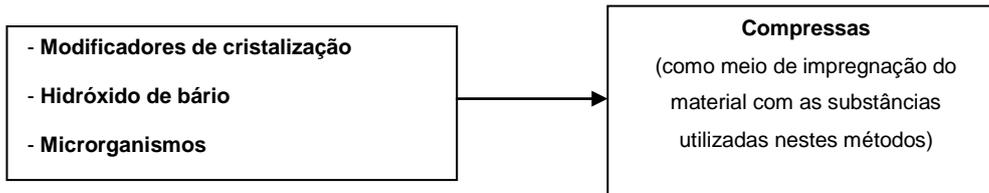


Fig. 16 – Uso de compressas como meio de impregnação de substâncias utilizadas noutros métodos

#### 5.4. Abordagens possíveis no combate à degradação

A degradação por sais solúveis pode ser abordada numa óptica preventiva ou numa óptica de controlo da degradação, sendo que pode (e é desejável) haver casos em que há uma abordagem mista incluindo medidas de prevenção e também de métodos de controlo. A abordagem de controlo da degradação pode integrar métodos correctivos e métodos de mitigação. Na tabela 2 apresenta-se um esquema desta classificação, incluindo as respectivas definições, após o que se discutem as características gerais e objectivos de cada um dos tipos de abordagem.

Tabela 2 – Abordagens possíveis no combate à degradação por sais solúveis

Abordagem		Definição
<b>Prevenção</b>		Medidas visando um menor risco de ocorrência da degradação.
<b>Controlo</b>	<b>Correcção</b>	Métodos que permitem a eliminação definitiva de um dos factores predisponentes da degradação (Fig. 9): - sais contaminantes; - água, evitando contacto da mesma com os sais.
	<b>Mitigação</b>	Métodos que permitem reduzir, atenuar ou suspender a degradação, o que poderá ser obtido pela: - redução da concentração dos sais contaminantes; - redução do teor de água; - alteração do comportamento dos sais solúveis; - implementação de condições ambientes (temperatura e HR) que impeçam a ocorrência dos ciclos de cristalização/dissolução.

- **Prevenção**

A abordagem preventiva integra medidas práticas que visam a minimização do risco, contribuindo para uma menor probabilidade de ocorrência de degradação e, na eventualidade desta vir a suceder, para minimizar a sua gravidade.

Na secção (3.1) desta dissertação, apresentaram-se três medidas preventivas gerais visando a minimização de risco de ocorrência de degradação por sais solúveis na construção:

- escolha criteriosa dos materiais de construção;
- manutenção regular da construção visando evitar entradas de água;
- análise de potenciais riscos associados à alteração das condições ambientes (temperatura e HR) interiores em edifícios decorrentes de intervenções nos mesmos.

- **Controlo da degradação**

A degradação pelos sais solúveis existindo, deverá ser controlada. Este objectivo poderá ser alcançado pelas duas vias, que abaixo se descrevem. A primeira e mais desejável envolve a erradicação definitiva do problema. Caso tal não seja possível ou conseguido, deve ser tentada uma segunda via, a da mitigação do problema.

**a) Correção**

A correção definitiva do problema de degradação causado pelos sais solúveis é possível por eliminação dos sais ou da água. Na prática, estes objectivos podem ser de difícil concretização mas deverá ser a abordagem primeiramente equacionada.

Uma solução definitiva para o problema causado pelos sais solúveis só é normalmente possível numa muito pequena percentagem de casos. As soluções correctivas passam pela eliminação de, pelo menos, um dos factores essenciais (factores predisponentes – Fig. 9) à degradação no material poroso: sais solúveis e água. Este objectivo poderá ser alcançável quando as origens dos sais contaminantes e/ou da água na construção sejam claras e possam ser eliminadas. Mas, mesmo nestes casos, a solução nem sempre é definitiva devido ao sal que pode restar nos elementos construtivos. A não ser que se consiga efectuar a remoção total deste sal por métodos de dessalinização.

**b) Mitigação**

Os métodos de mitigação visam o controlo dos problemas que advêm da acção dos sais solúveis, minimizando as suas consequências e tornando-as compatíveis com as condições de utilização do edifício. Trata-se, assim, de métodos que permitem “viver” com o problema da melhor maneira. Esta abordagem é a mais comum em edifícios com problemas causados pelos sais solúveis, dado que em grande parte dos casos não é possível eliminar o problema. A redução, atenuamento ou suspensão da degradação poderão ser proporcionados por redução do teor de sal do material, ou da água que o afecta, implementação de condições ambientes optimizadas, ou por alteração do comportamento/efeito dos sais solúveis.

## 5.5. Enquadramento proposto dos métodos de controlo da degradação

Propõe-se, a seguir, o enquadramento dos métodos de controlo da degradação por cristalização de sais solúveis, segundo as categorias correctiva e de mitigação. Este enquadramento não é, no entanto, totalmente rígido. Isto, não só porque um dos métodos pode, como se verá, ser classificado em ambas as categorias, dependendo nomeadamente das condições do edifício, como devido à possível utilização complementar de diferentes métodos. O enquadramento dos vários métodos e medidas é sintetizado no diagrama seguidamente apresentado (Fig. 17).

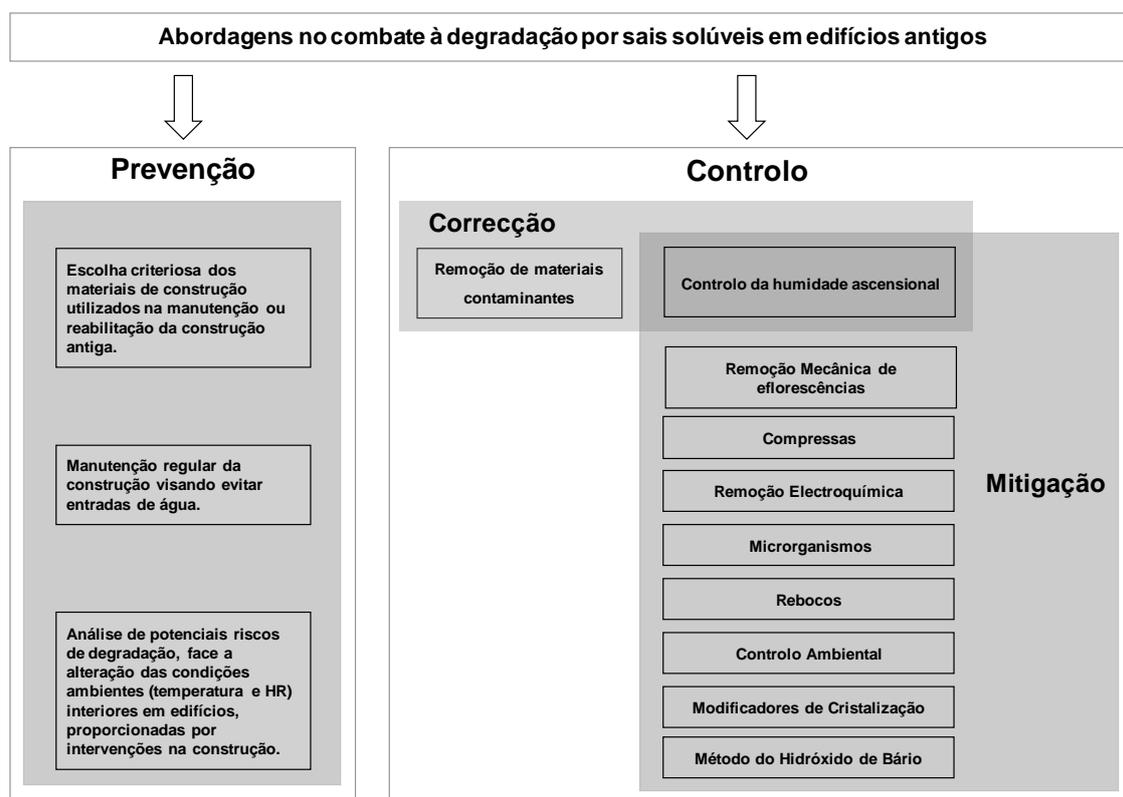


Fig. 17 – Diagrama - síntese da sistematização proposta

### Métodos de dessalinização

Os métodos de dessalinização, como a remoção mecânica (secção 4.2.1), as compressas (secção 4.2.3), os métodos electroquímicos (secção 4.2.4) e os métodos com base em microrganismos (secção 4.2.5), podem permitir uma redução do teor de sal do material. A redução será temporária se a alimentação de sal não for cortada, caso corrente em edifícios, sendo assim estes métodos considerados primeiramente como de mitigação.

### Remoção de materiais contaminantes

A remoção de materiais contaminantes (secção 4.2.2), pode eliminar definitivamente a “fonte” de sal causadora de degradação na construção, sendo assim considerado um método

correctivo. No entanto, não deve deixar de se ter em conta que, em alguns casos, a erradicação do sal (factor predisponente da degradação) por este método não será total, por ter ocorrido penetração nos materiais adjacentes.

#### Modificadores de cristalização

Os modificadores de cristalização (secção 4.2.6) na sua actuação, ao prevenirem ou atrasarem a nucleação, ao reduzirem as tensões geradas a nível dos poros, ao darem origem a hábitos menos destrutivos ou ao promoverem a formação de eflorescências em detrimento das subflorescências, podem atenuar a degradação vigente. Assim a aplicação de modificadores é considerado um método de mitigação.

#### Rebocos

Os rebocos (secção 4.2.7) são também métodos de mitigação pois, não resolvendo definitivamente o problema de degradação, permitem lidar com ele, tornando o desempenho do edifício ou elemento construtivo compatível com as condições de uso. Pela adequada selecção do tipo de reboco (transporte, acumulação, etc.) é possível dar resposta a exigências funcionais variadas.

Os rebocos por outro lado também podem ser usados especificamente como método de dessalinização de alvenarias contaminadas, de modo a resguardá-las da degradação. Existindo um “abastecimento” contínuo de sais à alvenaria, que é o caso corrente, este tipo de aplicação é considerado um método de mitigação.

#### Métodos de controlo ambiental

A implementação de condições ambientes optimizadas (secção 4.2.8) em construções contaminadas com sais, pretende diminuir o número e a frequência, ou até, se possível, suster os ciclos de cristalização/dissolução causadores de degradação nos poros do material. Uma vez que o seu efeito só dura enquanto se mantiver o controlo das condições ambientes, estes métodos não podem ser considerados correctivos. São, assim, métodos de mitigação.

#### Métodos controlo da humidade ascensional

A generalidade das técnicas de controlo da humidade ascensional (secção 4.2.9) aplicadas em edifícios visam eliminar a totalidade da humidade ascendente por capilaridade. Permitindo a erradicação dos factores predisponentes da degradação, água (proveniente do solo), e, simultaneamente, de eventuais sais nela dissolvidos. Como tal, este método poderá ser considerado correctivo, isto claro, perante condições termo-higrométricas não susceptíveis de desencadear ciclos de cristalização/dissolução de sais já contidos no material, e na ausência de outros tipos de humidade.

No entanto, muito frequentemente, o objectivo de correcção não é conseguido através das referidas técnicas, permanecendo alguma entrada de humidade na construção. Não obstante esta eventualidade, a técnica proporciona normalmente pelo menos uma redução da humidade

ascendente, podendo minorar a degradação. Pode pois ser considerada nestes casos um método de mitigação.

#### Método do Hidróxido de Bário

A aplicação do método do hidróxido de bário (secção 4.2.10) permite a transformação do gesso em sulfato de bário (sal praticamente insolúvel), evitando deste modo que o gesso tenha consequências destrutivas para o material. No entanto, como o método visa contaminação superficial ou pouco profunda (em relação à superfície exterior do material), este poderá não ser capaz de insolubilizar todo o gesso contaminante, especialmente a maiores profundidades. Por outro lado, o método não resolve a questão do fornecimento de gesso, que poderá continuar. Por isso é considerado um método de mitigação da degradação, neste caso, por cristalização de gesso.



## 6. SUMÁRIO, CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

### 6.1. Sumário

Nesta dissertação foi efectuado um levantamento e análise crítica de dez métodos utilizados no controlo da degradação causada pelos sais solúveis em construções antigas: remoção mecânica de eflorescências; remoção de materiais contaminantes; compressas; remoção electroquímica de sais; microrganismos; modificadores de cristalização; rebocos; controlo ambiental; controlo da humidade ascensional; método do hidróxido de bário. A par destes, também foram analisadas algumas medidas capazes de minimizar o risco de ocorrência de degradação face a factores que podem contribuir para o mesmo.

Para os métodos de controlo da degradação foram analisadas situações em que poderá existir benefícios na conjugação destes, visando esta a obtenção de melhores resultados face a problemas de degradação provocados pelos sais nas construções.

Para as várias práticas analisadas no contexto do combate da degradação causada pelos sais solúveis, foi efectuada a sistematização das mesmas. Esta integrou e contextualizou tanto métodos para fazer face à degradação existente na construção (segundo óptica correctiva e de mitigação), como também algumas medidas práticas para prevenção do risco de ocorrência ou agravamento desta degradação (óptica de prevenção). Com a inclusão destas últimas, foi pretendido fornecer uma visão mais abrangente do campo de possibilidades disponíveis para garantir a preservação e funcionamento adequado dos edifícios históricos.

Esta sistematização integra métodos de correcção, sendo assim é admitida a par da mitigação a possibilidade de solucionamento definitivo do problema. A opção por incluir métodos correctivos, não obstante de serem de muito difícil concretização e muitas vezes impraticáveis, deve-se ao facto de, em casos específicos, poderem estar reunidas as condições para a mesma ser tentada com sucesso. Os pressupostos para a correcção são a eliminação de um ou ambos dos factores predisponentes da degradação (água e sais), existindo métodos que, isoladamente ou em conjunto, poderão proporcionar tal objectivo.

Algumas das principais dificuldades encontradas na sistematização dos métodos estudados aconteceram:

- no encontrar uma adequada estruturação lógica, face à diversidade de práticas encontradas;
- na classificação dos métodos de controlo da degradação, como correctivos ou de mitigação, dadas as especificidades inerentes a cada construção, podendo o mesmo método funcionar como correctivo num caso e de mitigação noutro;
- no facto de alguns métodos estarem ainda em fase de desenvolvimento e como tal não terem ainda muitas provas dadas, tornando difícil o seu enquadramento em categorias de práticas.

O trabalho efectuado obrigou o estudo de mais de 60 publicações técnicas, entre livros, artigos científicos, teses e relatórios, uma vez que a informação sobre o tema tratado se encontra extremamente dispersa. Procurou-se sempre estudar os princípios subjacentes a cada método, o que frequentemente esbarrou no facto de se tratar de um tema multidisciplinar, envolvendo conceitos por vezes complexos de matérias que ultrapassam frequentemente o âmbito restrito da Engenharia Civil, como a Química ou a Física, e que para além do mais é ainda insuficientemente conhecido. Encontraram-se de facto vários aspectos contraditórios ou escassamente explicados, o que decorre muito da falta de consenso científico e explicações cabais sobre o tema. Por outro lado, o tema desta tese está intimamente relacionado com o desempenho das construções reais, o que obrigou a um constante esforço, em paralelo com o trabalho de pesquisa e teórico, de procurar perceber e considerar aspectos práticos da Engenharia.

## **6.2. Conclusões**

- **Actuação face a problemas existentes**

A degradação por sais solúveis assenta em processos complexos e ainda insuficientemente compreendidos, existindo métodos variados de controlo desta degradação. É pois necessário procurar compreender o problema na sua globalidade, em termos de diagnóstico das anomalias, das exigências funcionais aplicáveis e das soluções disponíveis, para assim poder definir a melhor intervenção. Esta deverá resultar em melhorias, e não proporcionar o agravamento dos problemas já existentes.

- **Importância das medidas preventivas da degradação**

Medidas preventivas poderão contribuir para minimizar o risco de ocorrência degradação por sais solúveis em edifícios, nomeadamente:

- escolha criteriosa de materiais de construção utilizados na manutenção ou reabilitação da construção antiga;
- manutenção regular da construção visando evitar entradas de água;
- análise de potenciais riscos de degradação, face à alteração das condições ambientes (temperatura e HR) interiores em edifícios, decorrentes de intervenções de variada ordem na construção.

A importância destas medidas gerais deve ser salientada pela possibilidade que representam de se evitar os danos e custos associados à ocorrência da degradação e à necessidade da sua resolução. Estas medidas deverão, pois, ser tidas em conta na generalidade dos edifícios antigos.

- **Importância dos métodos de controlo da degradação**

Existem diversos tipos de métodos de controlo da degradação, com diferentes princípios de actuação que assentam no controlo de um ou mais dos seguintes factores: sais, humidade, condições ambientes e meio físico. Na pesquisa efectuada identificaram-se 10 métodos principais cuja escolha dependerá da situação concreta de cada construção: remoção mecânica de eflorescências; remoção de materiais contaminantes; compressas; remoção electroquímica de sais; microrganismos; modificadores de cristalização; rebocos; controlo ambiental; controlo da humidade ascensional; método do hidróxido de bário. Os métodos de controlo podem ser divididos em correctivos, quando possibilitam solucionamento em definitivo do problema, e de mitigação, quando permitem um atenuamento, redução ou suspensão da degradação.

- **Aplicação prática dos métodos (casos de estudo)**

Em alguns métodos (caso dos modificadores de cristalização, remoção electroquímica de sais, microrganismos) a experiência prática da sua aplicação em edifícios (casos de estudo) é ainda insuficiente para que sejam comprovados as características e o modo de acção que evidenciam em testes laboratoriais. Este facto é essencial para a compreensão real das capacidades do método e das suas limitações.

- **Sistematização proposta**

Os problemas de degradação por sais devem ser considerados numa óptica global, tendo em conta todo o edifício e a sua envolvente, e não apenas o elemento construtivo ou material afectado, e tendo em conta as diferentes abordagens possíveis: prevenção, correcção ou mitigação. Perante um leque alargado e variado de práticas de combate à degradação pelos sais solúveis, a sistematização proposta pode tornar mais directa, intuitiva e perceptível, a aplicabilidade e potencialidades destas.

### **6.3. Perspectivas futuras**

Na presente dissertação foi pretendido fazer um levantamento, análise e sistematização de práticas actualmente utilizadas no combate à degradação pelos sais solúveis em edifícios.

Será pertinente com referência ao futuro, o acompanhamento e actualização de:

- desenvolvimentos dos métodos já existentes;
- casos de estudo onde sejam utilizadas as práticas mais recentes (como os modificadores de cristalização ou os microrganismos) que carecem ainda de testes “in situ”;
- o eventual surgimento de novos métodos que possam permitir ultrapassar algumas das limitações dos actuais;

- o surgimento de novas estratégias de intervenção por conjugação simultânea de várias práticas;

Em resumo, deverá ser perspectivada a actualização desta tese conforme o conhecimento que se vá constituindo e que à data da sua realização não estava ainda produzido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arnold A (1981) Nature of reactions of saline minerals in walls. In Ross MR (ed.) Proc. Int. Symposium Conservation of Stone II, Bologna: Centro per la Conservazione delle Sculture all Aperto, 13-23.

Auras M (2008) Poultrices and mortars for salt contaminated masonry and stone objects. In Proc. International Conference Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures, Copenhagen, Technical University of Denmark, 197-217.

Bionda D (2002) RUNSALT computer program. Retrieved from: <http://science.sdf-eu.org/runsalt/index.html> in 26/09/2010

Bionda, D. (2004): Salt deterioration and microclimate in historical buildings. Intermediary report of the project "Sustained care of sensitive historical monuments". Retrieved from: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=bericht&nr=374> in 10/05/2010.

Borrelli E, (2006) Desalination Systems: types, applications and efficacy. In Proc. Seminário Sais Solúveis em Argamassas de Edifícios Antigos. Danos, Processos e Soluções, Lisboa, LNEC, 133-140. Publicação CS 32.

Bourgès A, Vergès-Belmin V (2008) Comparison and optimization of fice desalination systems on the inner walls of Saint Philibert Church in Dijon, France. In Proc. International Conference Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures, Copenhagen, Technical University of Denmark, 29-40.

Brajer I, Klenz-Larsen P (2008) The salt reduction treatment on the wall paintings in Tirsted Church. In Proc. International Conference Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures, Copenhagen, Technical University of Denmark, 219-228.

BRE (1989) Rising damp in walls: diagnosis and treatment. BRE, UK. BRE Digest 245.

Brito VPS (2009) Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Caetano JI (2006) Ambientes favoráveis à formação de sais solúveis em pinturas murais restauradas: o caso da quinta do Conventinho em Frielas e das igreja de S. Francisco de Leiria. In Proc. Seminário Sais Solúveis em Argamassas de Edifícios Antigos. Danos, Processos e Soluções, Lisboa, LNEC, 35-47. Publicação CS 32.

Cardeira JMC (2010) Análise macroscópica do efeito de dois modificadores de cristalização com baixa toxicidade, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Chang R (1994) Química, Lisboa, McGraw-Hill.

Charola AE (2000) Salts in the deterioration of porous materials: an overview, Journal of the American Institute for Conservation 39, 327-343.

Cooke RU, Smalley IJ (1968) Salt weathering in deserts. Nature 220, 1226-1227.

Correns CW (1949) Growth and dissolution of crystals under linear pressure, Discussions of the Faraday Society 5, 267-271.

Freitas, VP, (1992) Transferência de humidade em paredes de edifícios – Análise do fenómeno de interface, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Freitas V, Torres M, Guimarães A (2008) – Humidade Ascensional, Porto, FEUP.

Friese P (1988) Removing of soluble salts and drying masonry by means of electrochemical techniques. In Proc. 6<sup>th</sup> International Congress on deterioration and conservation of stone, 624-632.

Friese, P, Protz, A (2002) Entsalzung von Mauerwerk und Wandmalerei – Transportmechanismen und Beispiele fuer die praktische Anwendung. Mauersalze und Architekturoberflaechen. Hochschule fuer Dildende Kuenste Dresden, 148-153.

Gonçalves TD (2002) Pesquisa de mercado sobre revestimentos para paredes sujeitas à acção de sais solúveis, Cadernos de Edifícios 2. Lisboa, LNEC.

Gonçalves, TD (2003) “Patologia e Reabilitação das construções. Edifícios antigos”. Salitre, Procos 025/14/13732 e 0205/533/340. Relatório 55/03-NCMC, Lisboa, LNEC.

Gonçalves TD, Rodrigues JD (2006) Rebocos para paredes antigas afectadas por sais solúveis (Plasters and renders for old salt loaded walls). In Proc. Seminário Sais Solúveis em Argamassas de Edifícios Antigos. Danos, Processos e Soluções, Lisboa, LNEC, 35-47. Publicação CS 32, LNEC.

Gonçalves TD, de Rooij M, Rodrigues JD (2006a) Alhos-vedros tide-mill: salt damage assessment, diagnosis and repair. In Proc. Seminário Sais Solúveis em Argamassas de

Edifícios Antigos. Danos, Processos e Soluções, Lisboa, LNEC, 157-166. Publicação CS 32, LNEC.

Gonçalves TD, Pel L, Rodrigues JD (2006) Drying of salt contaminated masonry: MRI laboratory monitoring, *Environmental Geology* 52, 249-258.

Gonçalves TD (2007) Salt crystallization in plastered or rendered walls, Tese de Doutoramento, LNEC e IST, Lisboa.

Gonçalves TD, Pel L, Rodrigues JD (2008) Worsening of dampness and salt damage after restoration interventions: use of water repellent additives in plasters and renders. In *Historical Mortars Conference. Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility*.

Gonçalves TD, Rodrigues JD (2010) Argamassas de Revestimento para Paredes Afectadas por Cristalização de Sais Solúveis: Influência do substrato. In *Actas do 3º Congresso Português de Argamassas de Construção*, Lisboa, LNEC, 18 e 19 de Março.

Gorman PA, Schneider T (2009) The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21<sup>st</sup>- century climate change. In *Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, no. 35.

Goudie A, Viles H (1997) *Salt Weathering Hazard*, Chichester, John Wiley & Sons.

Groot C, van Hees R, Wijffels T (2009) Selection of plasters and renders for salt laden masonry substrates, *Construction and Building Materials* 23, 1743–1750.

Henriques, F M.A. (1994) *Humidade em Paredes*. Lisboa, LNEC. Série "Conservação e Reabilitação".

Hilbert G, Müller-Rochholz J, Zinsmeister K (1992) Salzeinlagerung in Sanierputze. Teil 2: Salzeinlagerungsverhalten - Schlussfolgerungen für die Praxis (Salt deposits in restoration plasters and renders. Part 2: deposition of salt), *Bautenschutz & Bausanierung* 15, 78-80.

ICATHM - International Congress of Architects and Technicians of Historical Monuments (1964) International charter for the conservation and restoration of monuments and sites. In *Proc. II International Congress of Architects and Technicians of Historical Monuments*, Venice. The "Venice Charter".

Jain A, Bhadauria S (2008) Salts removal of sandstone by microbes: case study from Agra, India. In *Proc. from the International Conference Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures*, Copenhagen, Technical University of Denmark, 381-392.

Klenz-Larsen P (2006) Salt, Damp and Heat in Tirsted Church. In Simon S, Drdácý M (ed.) European Research on Cultural Heritage: State-of-the-art Studies, 5, Czech Republic, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 111-118.

Klenz-Larsen P (2007) The salt decay of medieval bricks at a vault in Brarup Church, Denmark, Environ Geol 52, 375-383.

Konow TV (2006) Salt deterioration in brick walls and the kinetics of salt transformation Analysed in situ in a Fortress Building of the 18<sup>th</sup> Century. In Simon S, Drdácý M (ed.) European Research on Cultural Heritage: State-of-the-art Studies, 5, Czech Republic, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 213-224.

Larsen PK (1999) Desalination of painted brick vaults, Ph.D Thesis Department of structural engineering and materials. Technical University of Denmark. Series R, 52.3, 62-67.

Lombardo T, Simon S (2006) Laboratory study on desalination by poultices. In European Research on Cultural Heritage: State-of-the-art Studies, 5, Czech Republic, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 275-286.

Lopez-Arce P, Doehne E, Greenshields J, Benavente, Young D (2009) Treatment of rising damp and salt decay: the historic masonry buildings of Adelaide, South Australia. In Materials and Structures 42, 827-848.

Lubelli B, van Hees RPJ (2007) Effectiveness of crystallization inhibitors in preventing salt damage in building materials. In Journal of Cultural Heritage 8, 223-234.

Lubelli B, de Rooij MR (2009) NaCl crystallization in restoration plasters, Construction and Building Materials 23, 1736-1742.

Marrocchi A, Taticchi A, Broggi, Minuti L, Santarelli ML (2006) New Products for the inhibition of salt efflorescences in masonries. In Proc. Seminário Sais Solúveis em Argamassas de Edifícios Antigos. Danos, Processos e Soluções, Lisboa, LNEC, 79-86. Publicação CS 32, LNEC.

Massari G, Massari I (1993) Damp Buildings - Old and New, Rome, ICCROM.

Matteini M (2008) Inorganic Treatments for the consolidation and protection of stone artefacts and mural paintings. In Conservation Science in Cultural Heritage, 8.

Nunes CL, Rodrigues JD (2007) Dessalinização por compressas. Guia para investigação e intervenção, Lisboa, LNEC. Relatório 45/2007-NCMC.

Ottosen LM, Rörig-Dalgård I (2007) Electrokinetic removal of Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> from bricks to avoid salt-induced decay, *Electrochimica Acta* 52, 3454-3463.

Ottosen, LM, Rörig-Dalgaard I, Villumsen, A (2008) Electrochemical removal of salts from masonry – Experiences from pilot scale. In Proc. from the International Conference Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures, Copenhagen Technical University of Denmark, 341-350.

Ottosen, LM, Rörig-Dalgård I (2009) Desalination of a brick by application of an electric DC field, *Materials and Structures* 42, 961-971.

Pastuovic' Z, Fazinic' S, Jaks'ic' M, Krstic' D, Mudronja D (2006) The use of the RBI nuclear microprobe in conservation process studies of a church portal, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 231, 546–552.

Price C, Brimblecombe P (1994) Preventing salt damage in porous materials. In Roy A, Smith P (ed.) Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress Preventive Conservation: Practice, Theory and Research, London, International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 90-93.

Price C (1995) Salt damage in monuments, and means of control. In J. Beavis and K. Barker (ed.), *Science & Site: evaluation and conservation*, Bournemouth, Bournemouth University School of Conservation Science, 229–237.

Price C (ed.) (2000) An expert chemical model for determining the environmental conditions needed to prevent salt damage in porous materials. Project ENV4-CT95-0135, final report, research report no. 11, Archetype Publications, London.

Price C (2006) Predicting environmental conditions to minimize salt damage at the Tower of London: a comparison of two approaches, *Environ Geol* 52, 369-374.

Ranalli G, Chiavarini M, Guidetti V, Marshall F, Matteini M, Zanardini E, Sorlini C (1997) The use of microorganisms for the removal of sulphates on artistic stone works, *Int. Biodeterior, Biodegradation* 40, 255-261.

Ranalli G, Matteini M, Tosini I, Zanardini E, Sorlini C (2000) Bioremediation of cultural heritage: Removal of sulphates, nitrates and organic substances. In Ciferri O, Tiano P and Mastromei G (ed.) *Of Microbes and Art - The Role of Microbial Communities in the Degradation and Protection of Cultural Heritage*, Kluwer Academic-Plenum Publisher, 231–245.

Risk management in civil engineering advanced course LISBON • LNEC • November 17-22, 2008 Abstracts SCIENCE-BASED MANAGEMENT OF CIVIL ASSET RISK Objectives,

Principles, Process and Analytical Techniques D. N. D. Hartford BA, BAI, MA, Ph.D, C. Eng FICE, FIEI, P.Eng, M. IVA Scientific Advisor: Safety and Risk Assessment, BC Hydro, Canada.

Rodríguez-Navarro C, Doehne E, Sebastián E (2000) How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials, *Cement and Concrete Research* 30, 1527-1534.

Rodriguez-Navarro C, Fernandez LL, Doehne R, Sebastian E (2002) Effects of ferrocyanide ions on NaCl crystallization in porous stone, *Journal of Crystal Growth* 243, 503-516.

Rodriguez-Navarro C, Fernandez LL, Sebastian E (2006) New developments for preventing salt damage to porous ornamental materials through the use of crystallization inhibitors. In *European Research on Cultural Heritage: State-of-the-art Studies*, 5, Czech Republic, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 329-340.

Rörig-Dalgaard I, Ottosen, LM, Christensen IV (2008) Desalination of a wall section with murals by electromigration. In *Proc. International Conference Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures*, Copenhagen, Technical University of Denmark, 361-372.

Ruiz-Agudo E, Rodriguez-Navarro, Sebastin-Pardo E (2006) Sodium Sulfate Crystallization in the Presence of Phosphonates: Implications in Ornamental Stone Conservation, *Crystal Growth & Design* 6 (7), 1575-1583.

Sawdy A, Price C (2005) Salt damage at Cleve Abbey, England Part I: a comparison of theoretical predictions and practical observations, *Journal of Cultural Heritage* 6, 125-135.

Sawdy A, Price C (2006) The Kinetics of salt weathering of porous materials. In Simon S, Drdácý M (ed.) *European Research on Cultural Heritage: State-of-the-art Studies*, 5, Czech Republic, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 225-238.

Sawdy A, Heritage A, Pel L (2008) A review of salt transport in porous media, assessment methods and salt reduction treatments. In *Proc. from the International Conference Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures*, Copenhagen, Technical University of Denmark, 1-27.

Schaffer R J (1932) *The weathering of natural building stones*. London, His Majesty's Stationery Office. Building Research Special Report 18. Reprinted, with slight amendments, 1933.

Schwartz, HJ, Stadlbauer E, Niemeyer R (2008) Diagnostic investigations to define the possibility and the effectiveness of desalination with the poultice - technique – a case of study. In *Proc. from the International Conference Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures*, Copenhagen, Technical University of Denmark, 237-247.

Selwitz C, Doehne E (2002) The evaluation of crystallization modifiers for controlling salt damage to limestone, *Journal of Cultural Heritage* 3, 205-216.

Van Hees R, Naldini S, Lubelli B (2009) The development of MDDS-COMPASS. Compatibility of plasters with salt loaded substrates, *Construction and Building Materials* 23, 1719–1730.

Veiga M R (2006) Comportamento de rebocos para edifícios antigos: exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos. In Proc. Seminário Sais Solúveis em Argamassas de Edifícios Antigos. Danos, Processos e Soluções, Lisboa, LNEC, 21-34. Publicação CS 32, LNEC.

Vergès-Belmin V (2006) Desalination of porous building materials: a review, *European Research on Cultural Heritage: State-of-the-art Studies*, 5, Czech Republic, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 249-274.

Watt D, Colston B (2000) Investigating the effects of humidity and salt crystallisation on medieval masonry, *Building and Environment* 35, 737-749.

Weber J (2004) Insolubilisation of sulphate salts by barium hydroxide, Background paper to a lecture at the Journée technique internationale, Paris, ICOMOS France, 2004.

Weber J, Burszán R (2008) Salt-induced decay of interior walls, and climate control. The case study of Virgil's Chapel, Vienna. In Proc. from the International Conference Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures, Copenhagen, Technical University of Denmark, 257-268.