



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE MATERIAIS
Núcleo de Cimentos e Materiais Cerâmicos

Proc. 0205/11/16161

DESSALINIZAÇÃO POR COMPRESSAS

Guia para investigação e intervenção

LISBOA • Fevereiro de 2007

I & D MATERIAIS
RELATÓRIO 45/2007 - NCMC

DESSALINIZAÇÃO POR COMPRESSAS

Guia para investigação e intervenção

DESSALINATION BY POUULTICING

Guide for research and application

Proc. 0205/011/16161

DESSALINIZAÇÃO POR COMPRESSAS

GUIA PARA INVESTIGAÇÃO E INTERVENÇÃO

RESUMO

Neste documento apresenta-se a técnica de dessalinização por compressas de materiais de construção porosos afectados pela acção de sais solúveis, analisando os aspectos que estão na base da sua acção dessalinizante.

A aplicação correcta dos métodos de dessalinização de materiais de construção é uma componente importante para o sucesso do tratamento a efectuar sobre superfícies salinizadas e a sua investigação deve constituir uma preocupação central da intervenção. Ela deve iniciar-se pela experimentação em laboratório, para selecção dos métodos que manifestem um bom desempenho e que deverão, então, ser objecto de outro nível de análise, correspondente à sua aplicabilidade em obra, para responder a necessidades concretas de intervenção.

O presente documento contém um método de estudo do processo de dessalinização por compressas, fornece directivas sobre como efectuar a selecção dos respectivos materiais e descreve os métodos de dessalinização a adoptar em função das características do substrato a dessalinizar e das condições de aplicação.

O presente documento visa constituir um guia, tanto para a investigação sobre o desempenho de compressas de dessalinização, como para a realização de tratamentos de dessalinização *in situ*.

Palavras-chave: dessalinização, compressas, sais solúveis, conservação

DESSALINATION BY POULTICING

GUIDE FOR RESEARCH AND APPLICATION

ABSTRACT

This work presents the technique of desalination by poulticing of porous construction materials affected by soluble salts focusing the basic parameters of its desalination action.

Research over desalination methods is of the outmost importance to achieve a successful treatment. It should begin with laboratory experimental research leading to in situ testing of the most promising methods.

This work proposes a method for the study of desalination by means of poulticing and seeks to present relevant directives over the materials selection for the poultices formulation as well as the desalination methods to adopt, considering the substrate characteristics and the application conditions.

This report aims at being a guide for the research in poultices, their action and use onsite.

Keywords: desalination, poultice, soluble salts, conservation

ÍNDICE GERAL

	Pág.
1. Introdução	1
2. Enquadramento dos métodos de dessalinização	1
2.1. Imersão	1
2.2. Métodos electroquímicos	2
2.3. Outros métodos	3
3. Definição e objectivo das compressas de dessalinização	4
4. Mecanismo de dessalinização por compressas	4
4.1. Processo físico	4
4.2. Tipos de compressa	6
4.3. Estrutura das compressas	7
4.4. Profundidade de acção	8
5. Materiais utilizados na preparação de compressas	10
6. Execução do tratamento	12
6.1. Caracterização do estado de conservação dos materiais a tratar	12
6.2. Preparação das superfícies a dessalinizar	12
6.3. Preparação e aplicação das compressas	12
6.4. Monitorização e duração do tratamento	13
6.5. Remoção e repetição do tratamento	15
6.6. Inspeção periódica das superfícies tratadas após o tratamento	16
7. Métodos de estudo e avaliação da acção de compressas	17
8. Conclusão	29
Referências bibliográficas	31

Índice de figuras

	Pág.
Fig. 1: Esquema do mecanismo de acção da compressa húmida e de secagem	1
Fig. 2: Esquema do mecanismo de dessalinização de uma compressa composta por duas camadas	1
Fig. 3: Ensaio de absorção de água por capilaridade de provetes em contacto com compressas húmidas	1
Fig. 4: Gráfico da absorção de água por capilaridade e de evolução da franja de água de um provete de calcário em contacto com uma compressa húmida de celulose	2
Fig. 5: Aplicação manual de uma compressa de dessalinização	3
Fig. 6: Aplicação de uma cobertura semi-permeável sobre a compressa para proporcionar uma secagem lenta	4
Fig. 7: Exemplo de amostragem periódica de diferentes compressas de dessalinização durante um ensaio experimental <i>in situ</i>	4
Fig. 8: Gráficos dos resultados obtidos durante a monitorização de um ensaio de dessalinização por compressas comparativo	4
Fig. 9: Gráficos dos resultados obtidos num tratamento de dessalinização composto por duas aplicações consecutivas de compressas	6
Fig. 10: Aspecto da superfície de uma compressa que esteve em contacto com o substrato salinizado após um ensaio de dessalinização <i>in situ</i>	7
Fig. 11: Proposta de procedimento de estudo da acção de compressas de dessalinização	8

DESSALINIZAÇÃO POR COMPRESSAS

GUIA PARA INVESTIGAÇÃO E INTERVENÇÃO

1. INTRODUÇÃO

O tema deste estudo é justificado pela enorme importância que têm os aspectos relacionados com a presença de sais solúveis nos materiais de construção e pela necessidade de se conseguirem avanços sustentáveis nas práticas de conservação que interferem com áreas de elevados teores de sais. É reconhecida a acção dos sais como agentes de degradação, mas é igualmente importante salientar que a sua presença limita ou anula, mesmo, a acção de outras medidas de conservação, como sejam a aplicação de consolidantes e hidrófugos.

O método de dessalinização mais generalizado no tratamento de superfícies arquitectónicas consiste na aplicação de compressas, nomeadamente por ser tecnicamente acessível e relativamente económico. Porém, as compressas utilizadas são raramente testadas antes da aplicação e as propriedades hídricas (mormente a absorção de água por capilaridade) dos substratos a dessalinizar não são habitualmente tidas em consideração na formulação da compressa e na forma da sua aplicação.

O método de dessalinização por compressas é utilizado há mais de 40 anos com base em fundamentos mais ou menos empíricos, mas, a partir da década de 1990, tem sido objecto de abordagens científicas (Windsheimer, Snethlage e Wihr, 1991; Ettl e Schuh, 1992; Grüner e Grassegger, 1996; Egloffstein e Auras, 2000; Wendler e Hestermann (2001); Auras e Melisa, 2002; WTA, 2003; Terheiden e Kaps, 2003; Lombardo e Simon, 2004). Porém, aspectos como a eficácia, a nocividade e os principais processos que medeiam o mecanismo da dessalinização constituem ainda temas mal esclarecidos.

O presente documento propõe directivas para a preparação de compressas de dessalinização e sua aplicação nas vertentes de investigação do seu desempenho e, sequentemente, da sua aplicabilidade em tratamentos *in situ*. O texto contém uma parte com fundamentos sobre o método, mas procura ser,

essencialmente, uma orientação para quem queira iniciar estudos com este procedimento de conservação ou, mesmo, um guia prático para aplicação a casos reais de dessalinização. A investigação que serviu de base a este documento foi realizada no âmbito de um estágio de licenciatura, cujos resultados estão incluídos no respectivo relatório (Paulos Nunes, 2005) e parcialmente divulgados em Paulos Nunes et al (2005) e Paulos Nunes e Delgado Rodrigues (em publicação).

2. ENQUADRAMENTO DOS MÉTODOS DE DESSALINIZAÇÃO

2.1. IMERSÃO

Em geral é relativamente fácil proceder à dessalinização de objectos de pequenas dimensões, que sejam transportáveis para o laboratório, onde possam ser tratados sob condições controladas e sobre todas as suas superfícies expostas. O método de dessalinização mais geralmente utilizado no tratamento de objectos móveis salinizados (e.g. pétreos, cerâmicos) é o método de imersão em água desmineralizada durante um determinado período de tempo, podendo o processo de dessalinização ser monitorizado através de medições condutimétricas da solução do banho. No caso da dessalinização de objectos cerâmicos, este método é realizado de diversos modos, como sejam (Buys e Oakley, 1999): imersão em água parada; imersão em água corrente; agitação da solução; aplicação de ondas ultrassónicas; e electrodiálise¹. A escolha da variante do método de imersão depende do tipo de cerâmica e do seu estado de conservação.

Freeland e Charola (2001) verificaram que após diversos ensaios de imersão de provetes cerâmicos salinizados com sulfato de cálcio (CaSO_4) e cloreto de sódio (NaCl) foi apenas possível extrair 50 e 96%, respectivamente, do total de sais armazenados na estrutura porosa dos materiais. Este estudo veio, ainda, enfatizar a influência das características intrínsecas dos sais na capacidade da sua extracção, pois, nos provetes contaminados com o sal mais solúvel (NaCl), foi possível extraí-lo quase na totalidade, enquanto que, nos provetes

¹ Este procedimento é geralmente realizado quando os materiais a dessalinizar são pouco porosos e, consequentemente, as outras técnicas de imersão exigem períodos de ensaio demasiado extensos. A introdução de eléctrodos na solução de imersão acelera o processo de difusão iónica e diminui consideravelmente a duração da dessalinização.

salinizados com sulfato de cálcio, foi apenas possível extrair metade do sal introduzido.

Fassina et al. (1996) descrevem o tratamento de dessalinização de lajes de mármore provenientes do pavimento da Igreja de S. Maria dei Miracoli (Itália). O processo consistiu na imersão das lajes em tanques de plástico com água desmineralizada e na monitorização da quantidade de sal extraído através da medição periódica da condutividade eléctrica e da quantificação dos principais aniões presentes (cloretos e sulfatos). Verificaram que a extracção de aniões sulfato era mais rápida e eficiente do que a de cloretos. Foram levados a concluir, por isso, que os sulfatos deveriam estar concentrados à superfície, enquanto que os cloretos estariam localizados nas zonas mais internas dos materiais, pois os seus resultados não encaixam na lógica que as respectivas solubilidades implicam.

Infere-se que a capacidade de extracção de sais de materiais porosos reside não apenas nas características dos sais, nomeadamente a solubilidade e a mobilidade iónica, mas também na sua localização no interior dos materiais salinizados.

2.2. MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS

Naturalmente, os métodos de imersão não são aplicáveis a superfícies arquitectónicas, como também não o são a objectos móveis em avançado estado de degradação, caso que ocorre frequentemente em materiais contaminados com sais solúveis. Assim, nestes casos, o tratamento de dessalinização é normalmente realizado através da aplicação de compressas; o mecanismo de dessalinização é, porém, muito mais lento do que o das técnicas de imersão, pois é utilizada menor quantidade de água como meio de mobilização e transporte dos sais e são impostas condições de aplicação que exigem períodos de secagem, que alternam com outros de humidificação.

Price (1996) realizou uma retrospectiva sobre a investigação realizada no âmbito da conservação da pedra durante os anos 1989-94 onde discute, entre outros temas, os métodos de dessalinização existentes. Afirma que a dessalinização de superfícies arquitectónicas é geralmente realizada através

da aplicação de compressas e que, mais recentemente, se começaram a desenvolver métodos electroquímicos de dessalinização.

Friese (1988) desenvolveu várias montagens com eléctrodos para a dessalinização electroquímica de alvenaria húmida. Os iões hidratados são mobilizados ao aplicar um campo eléctrico. O autor defende que a montagem do ensaio deve ser realizada em função das espécies iónicas que existam em maior quantidade nos materiais de construção. A velocidade do processo de dessalinização é proporcional à voltagem aplicada e depende do tamanho e distribuição dos poros e do teor em água dos materiais porosos.

Auras e Melisa (2002) realizaram um estudo em que efectuaram a comparação da acção de dessalinização de uma compressa de secagem e da mesma compressa continuamente húmida submetida à acção de campos eléctricos. O tratamento foi efectuado sobre uma superfície arquitectónica em alvenaria de tijolo e sobre uma superfície em alvenaria de arenito. Os resultados demonstraram a elevada eficiência dos tratamentos de dessalinização por compressas electroquímicas na extracção de sais em comparação com os tratamentos de dessalinização com compressas de secagem. Porém, tal como qualquer outro método de tratamento, a eficácia é fortemente influenciada pela natureza do material e dos iões salinos presentes. Outras vantagens em relação às compressas de secagem são:

- o facto de não apresentar riscos de degradação mecânica do substrato no processo de destacamento das compressas, uma vez que estas permanecem húmidas ao longo do ensaio;

- a possibilidade de monitorizar o processo de difusão iónica ao longo do tempo; e

- a diminuição dos períodos de aplicação.

A desvantagem que o tratamento electroquímico apresenta é o facto de provocar grandes variações dos valores de pH na vizinhança dos eléctrodos². As condições de elevada acidez e alcalinidade podem ser nocivas para determinados materiais pelo que, antes de iniciar um tratamento deste tipo, é

² Redução do pH na zona do ânodo e aumento na zona do cátodo

imprescindível estudar a nocividade deste factor para os materiais a tratar, a fim de se poder inferir sobre a sua aplicabilidade.

2.3. OUTROS MÉTODOS

Outros estudos de dessalinização de objectos móveis compreendem a utilização de vácuo (Friese, 1992) e de microondas (Minder-Heng et al, 1994) na exsudação da solução salina dos materiais. Contudo, estes métodos também não são aplicáveis a materiais mecanicamente fragilizados por comprometerem a sua integridade física ao submetê-los a pressão e a temperatura excessivamente elevadas, respectivamente.

A utilização de aditivos que actuam como inibidores de cristalização e/ou modificadores de hábitos de cristalização são um tema recente de investigação no âmbito da dessalinização.

Assumindo que o processo de formação de eflorescências de morfologia fibrosa à superfície dos materiais é um mecanismo eficiente e inócuo de extracção de sais solúveis dos materiais porosos, Pühringer e Weber (1990) propõem um método de extracção de sais de materiais de construção (betão e calcário) utilizando preparações tensioactivas³ e controlando a humidade relativa do ambiente, induzindo assim a cristalização de eflorescências fibrosas. As eflorescências formadas são facilmente removíveis por escovagem suave ou aspiradas sem causar a degradação mecânica do substrato. A desvantagem do método reside no risco de promover a dispersão da solução salina para o interior dos materiais de construção⁴ e a necessidade de utilizar energia para estabelecer o contacto entre os líquidos imiscíveis (solução salina e preparação tensioactiva). No caso de objectos móveis, o tratamento pode ser aplicado por imersão dos mesmos na preparação; no caso de superfícies arquitectónicas, é necessário recorrer a técnicas de sucção. Tal como no método de dessalinização por aplicação de compressas, a acção deste tratamento abrange apenas as camadas superficiais dos materiais

³ O princípio activo dos surfactantes na extracção de sais pode ser em parte explicado pela acção de separação das moléculas de água dos substratos minerais, presumivelmente como resultado do seu baixo índice de viscosidade e tensão superficial. Os surfactantes alteram não apenas a tensão superficial das soluções salinas como também a humidade de saturação. Assim, para utilizar preparações solúveis em água contendo surfactantes para a extracção de sais, é necessário que o teor de humidade do ambiente seja controlado em função deste factor.

⁴ Os riscos podem ser minimizados através da escolha do surfactante apropriado e da utilização de preparações apolares que não dissolvam os sais.

(aproximadamente 1-2cm de profundidade). Atendendo a este facto e somando os factores de risco associados ao tratamento proposto pelos autores referidos, nomeadamente devido à necessidade de implementação de técnicas de sucção (que no caso de materiais fragilizados é inaplicável), considera-se que o tratamento de dessalinização por aplicação de compressas em espaços arquitectónicos apresenta um menor potencial de nocividade e afigura-se igualmente eficaz.

Selwitz e Doehne (2002) concluíram que a adição de ferrocianeto de potássio previne a cristalização do cloreto de sódio, mas parece não ter influência na dissolução do sal e, como tal, não parece ser útil na dessalinização.

Rodriguez-Navarro et al. 2002) verificaram que a adição de ferrocianeto de potássio e sódio não influenciaram a evaporação de soluções salinas, mas induziram incrementos significativos na supersaturação crítica, favorecendo assim a formação de eflorescências em detrimento da formação de criptoflorescências. De acordo com Rodriguez-Navarro e colaboradores, estes resultados sugerem que a aplicação de compressas com ferrocianeto pode ser útil na dessalinização.

Outro método de dessalinização consiste na aplicação de rebocos com determinadas características que favorecem a extracção de sal dos materiais (Gonçalves, 2001). A substituição das argamassas degradadas das juntas por novas argamassas pode igualmente contribuir para a dessalinização dos materiais.

Traçado o panorama dos métodos de dessalinização actualmente estudados, considera-se que o tratamento por aplicação de compressas se apresenta, ainda, como um método com elevadas potencialidades na dessalinização de superfícies arquitectónicas, não apenas sob o ponto de vista técnico e económico, mas também de eficácia e nocividade.

A recomendação WTA⁵ (2003) é um documento de referência sobre a técnica de dessalinização por compressas, por definir um método coerente de

⁵ Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege. É uma associação internacional com fins não lucrativos cujo objectivo é promover a investigação na área da conservação do património arquitectónico bem como a sua aplicação prática.

planeamento e documentação dos tratamentos, e foi largamente tido em conta no presente documento.

3. DEFINIÇÃO E OBJECTIVO DAS COMPRESSAS DE DESSALINIZAÇÃO

O objectivo da aplicação de compressas de dessalinização é reduzir o teor de sal/sais das camadas superficiais dos materiais porosos através da sua migração para a compressa, a qual, ao atingir uma determinada concentração de sal, é removida e, caso necessário, substituída por uma nova.

As compressas de dessalinização são produtos de tratamento compostos de um ou mais materiais (e.g. minerais argilosos, celulose, sílica) e água e são aplicados sobre a superfície dos materiais durante um determinado período. Nos casos em que os materiais de construção possuem elevados teores de sais de baixa solubilidade (e.g. sulfato de cálcio CaSO_4), podem ser adicionados produtos que promovam a sua dissolução⁶ (De Witte e Dupas, 1992). Neste caso, o objectivo do tratamento coincide de algum modo com o do tratamento de limpeza, particularmente no que concerne a remoção de crostas negras (Castro e Delgado Rodrigues, 1988).

O tratamento de dessalinização por compressas pode também ser utilizado como técnica indirecta de amostragem de sais solúveis, pois que, através da análise do extracto solúvel das compressas, é possível identificar o tipo e a quantidade de sais presentes nas camadas superficiais dos materiais de construção.

A condição primária para a implementação de um tratamento de dessalinização é a de que não existam fontes de sais e humidade nos materiais de construção a tratar. Outra condição fundamental é a de que o teor de sais à superfície dos materiais porosos seja superior ao das camadas mais internas de material, o que, na generalidade dos casos, é a situação mais habitual. Ainda assim, considera-se que a investigação preliminar sobre a distribuição e a concentração de sais em profundidade nos materiais de construção é fundamental, e deve ser feita caso a caso, uma vez que elas dependem das condições ambientais onde os materiais se encontram.

⁶ Os aditivos podem incluir EDTA e os seus sais de sódio, bicarbonato de sódio, bicarbonato de amónio e carbonato de amónio.

A análise do teor de sais solúveis em profundidade nos materiais pode ser realizada com base no método ponderal descrito por Henriques (1994); este método é apresentado com o objectivo primário de avaliar o teor de humidade em profundidade nos materiais de construção, informação também pertinente para o estudo em questão. O método consiste na recolha de amostras da parede para posterior pesagem em laboratório no estado original e após secagem até massa constante. As amostras podem ser utilizadas posteriormente para identificação dos sais solúveis presentes.

4. MECANISMO DE DESSALINIZAÇÃO POR COMPRESSAS

4.1. PROCESSO FÍSICO

O mecanismo de dessalinização por compressas é um mecanismo de natureza física e tem como princípio o transporte dos sais solúveis presentes nos materiais porosos através da água introduzida pela compressa. Os iões dos sais solúveis dissolvidos pela água são posteriormente absorvidos em solução pela compressa, onde permanecem armazenados até à remoção da mesma.

A migração da solução salina depende de diversos factores: tensão superficial, pressão osmótica, adsorção dos sais às paredes dos capilares, forma e dimensão dos capilares. O transporte dos iões para a compressa pode ocorrer através do mecanismo de mobilidade independente dos mesmos e por via do movimento da solução. Existem dois mecanismos básicos que regem o movimento da solução salina:

- i. Fenómeno de capilaridade (gradiente de humidade); e
 - ii. Fenómeno de difusão (gradiente iónico).
- i. A migração da solução por capilaridade é determinada pela estrutura porosa⁷ dos materiais de construção. Torraca (1981) esquematiza o preenchimento progressivo dos espaços vazios dos materiais porosos por moléculas de água considerando quatro níveis de teor de humidade⁸ e

⁷ Porosidade, representatividade de eventuais famílias de poros, morfologia e dimensão dos poros.

⁸ Nível I - o material encontra-se completamente seco; Nível II - apenas os poros/fissuras de menor diâmetro estão preenchidos/as por moléculas de água; Nível III - os capilares encontram-se totalmente húmidos e os poros/fissuras de maior diâmetro apresentam um filme de humidade; Nível IV - tanto os capilares como os poros/fissuras de maior diâmetro se encontram totalmente preenchidos/as por moléculas de água.

afirma que o movimento de solução por capilaridade se processa a partir de uma zona de nível III para uma zona de nível inferior.

Segundo este esquema, inicialmente, após o contacto da compressa húmida (nível III-IV) com o substrato (nível I-II), a água migra por capilaridade da compressa para o material e, após um determinado período de tempo de contacto, estabelece-se um equilíbrio entre o teor de humidade do substrato e da compressa⁹. A partir deste momento, o teor de humidade da compressa irá progressivamente diminuir a uma taxa superior à do substrato. Quando o teor de humidade da compressa se encontrar abaixo do nível III (i.e. apenas os poros de menor diâmetro da compressa estão preenchidos por moléculas de água), a água migrará por capilaridade do substrato para a compressa; a evaporação de água ocorre na compressa e, como tal, os sais dissolvidos recristalizam nesta¹⁰.

O transporte da solução por capilaridade é considerado o processo mais eficiente no transporte de sais através de compressas. O coeficiente de absorção de água por capilaridade dos materiais constitui, assim, um parâmetro pertinente para poder inferir sobre a quantidade de água que se deve introduzir neles. Essa quantidade é controlável através da composição da compressa.

- ii. Em materiais porosos não saturados, o movimento dos iões ocorre na fase líquida, que ocupa uma fracção do volume total de espaços vazios do material. O movimento sucede como resultado da combinação dos processos de difusão e advecção. O fenómeno de difusão iónica é favorecido quando se estabelece o equilíbrio líquido entre a compressa e o substrato.

Dado que os iões são partículas electricamente carregadas, os seus movimentos podem ser influenciados pela presença de outras espécies iónicas através de ligações. Os iões positivos têm uma carga eléctrica mais densa do que os negativos e, como tal, são capazes de atrair um maior

⁹ O período de tempo após o qual se atinge um equilíbrio entre o teor de humidade da compressa e o teor de humidade do substrato depende das propriedades hídras e do nível de humidade de ambos os materiais.

¹⁰ A velocidade de evaporação da compressa deve ser mais lenta do que a do retorno da solução por capilaridade, senão os sais cristalizarão nos poros do substrato salinizado.

número de moléculas de água. Os iões positivos são, por isso, mais facilmente transportados pelas moléculas de água¹¹. O transporte de iões também pode ser afectado pelas eventuais reacções químicas que podem ocorrer no material após a dissolução dos sais. Os diferentes iões podem reagir na solução e formar novos compostos com diferentes constantes de solubilidade.

A migração da solução por difusão pode ser monitorizada aplicando um condutor eléctrico na amostra. Os resultados podem ser posteriormente analisados através das equações de Nernst-Planck-Poisson para calcular os coeficientes de difusão iónica de todas as espécies iónicas presentes no sistema (Samson et al. 2003).

Existe ainda um terceiro mecanismo de transporte que é consideravelmente menos eficiente do que os mecanismos descritos, além de ser de difícil controlo. Baseia-se na migração por convecção que é gerada pelo gradiente de temperatura entre a compressa e o substrato e é designado por transferência por convecção térmica. Num material poroso e húmido, a água migra das zonas de temperatura mais elevada para as zonas com níveis de temperatura inferior. Para que tal processo ocorra em benefício do processo de dessalinização é necessário que, na primeira fase de acção da compressa, i.e. humificação do substrato, a compressa se encontre a uma temperatura superior à do substrato a tratar, para que a água migre em profundidade. Segundo a recomendação WTA (2003), a diferença de temperatura entre a compressa e o substrato a dessalinizar deve ser de, no mínimo, 5°C. Na segunda fase, i.e., migração da solução salina para a compressa, deve ocorrer uma inversão dos valores de temperatura para que a solução migre para a compressa. Este é considerado o processo menos importante na extracção de sal.

A ocorrência eficaz dos mecanismos enunciados depende fundamentalmente do tipo de compressa, das características dos materiais porosos e dos sais presentes.

¹¹ No caso dos tratamentos de dessalinização com compressas sujeitas à acção de campos eléctricos, será de esperar que as zonas abrangidas pela acção do campo eléctrico negativo possuam maiores quantidades de iões e humidade do que as zonas abrangidas pela acção do campo eléctrico positivo.

4.2. TIPOS DE COMPRESSA

As compressas de dessalinização podem ser classificadas em dois tipos, que se distinguem mediante os mecanismos operados ao longo do período de tempo do tratamento (WTA, 2003):

Compressas húmidas

Entende-se por “compressa húmida” a que permanece humedecida durante a totalidade do processo de dessalinização. Neste caso gera-se um equilíbrio entre o teor de água da compressa e do substrato. Assim, o transporte de sal é dominado pelo processo de difusão iónica. Ao fim de um determinado intervalo de tempo estabelece-se um equilíbrio entre a concentração iónica da compressa e a do material pétreo e a compressa deve ser substituída. Para que a compressa permaneça húmida até se atingir o equilíbrio de concentração iónica, é necessário impedir que ocorra evaporação na sua superfície exposta – geralmente esta é protegida aplicando sobre a mesma uma cobertura impermeável (e.g. folhas de polietileno). Este tipo de compressas é aplicável nos casos em que os materiais de construção se encontrem extremamente húmidos e a possibilidade de secagem seja mínima.

Compressas de secagem

As “compressas de secagem” são aplicadas húmidas e deixadas secar sobre o substrato. O mecanismo de dessalinização processa-se em duas fases: na primeira fase, a humidade introduzida pela compressa no material de construção (absorção por capilaridade) solubiliza os sais e, ao atingir-se um equilíbrio entre o teor de água da compressa e o do material, inicia-se o processo de migração iónica por difusão do substrato para a compressa¹².

A segunda fase, ausente no caso da compressa húmida, inicia-se quando se gera um gradiente de humidade entre o substrato e a compressa que

¹² Nos casos em que a compressa possui um baixo teor de água ou o material pétreo possui um baixo coeficiente de absorção de água por capilaridade, ou as condições ambientais favorecem uma evaporação demasiado rápida dificultando a entrada de água em profundidade, pode ser recomendável a protecção da superfície da compressa mediante a aplicação de uma cobertura. Esta pode ser permeável ou semi-permeável e é aplicada sobre a superfície exposta das compressas para favorecer a entrada de humidade no material. A cobertura deve ser removida após se atingir o equilíbrio de humidade entre o material pétreo e a compressa.

resulta da evaporação da água da compressa – a humidade existente no material de construção migra para a compressa por capilaridade¹³.

Em ambos os casos enunciados pode ocorrer transporte iónico por convecção, desde que se verifiquem as condições requeridas.

Quando os sais presentes nos materiais de construção são relativamente pouco solúveis (e.g. gesso), pode ser aconselhável a combinação de compressas húmidas e de secagem. Primeiramente são aplicadas as compressas húmidas para dissolver os sais e, posteriormente, as compressas de secagem, para absorver os sais dissolvidos (WTA, 2003).

As compressas de secagem são consideravelmente mais eficientes na absorção de sais do que as compressas húmidas, pois não só ocasionam o processo de dessalinização por migração iónica, como também por absorção por capilaridade, sendo ainda que este último mecanismo é o mais eficiente no transporte dos sais.

Na Fig. 1 apresenta-se o mecanismo de dessalinização de uma compressa húmida e de uma compressa de secagem. O processo de dessalinização da compressa húmida faz-se em apenas uma etapa (II), enquanto que a compressa de secagem se processa em duas etapas (II-III), a primeira das quais corresponde ao processo de dessalinização da compressa húmida.

¹³ No caso de espaços sujeitos a elevadas taxas de ventilação pode ser recomendável a manutenção de uma cobertura semi-permeável sobre a superfície da compressa durante todo o ensaio para evitar a sua secagem repentina.

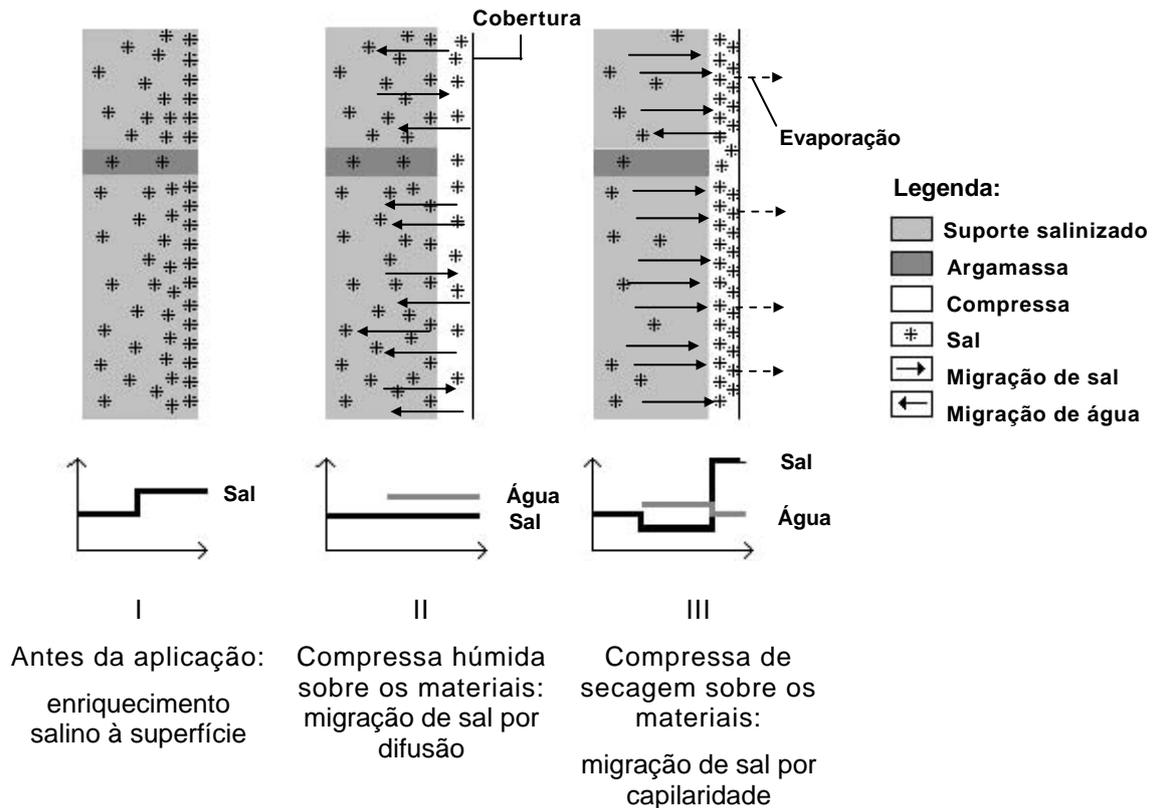


Fig.1: Esquema do mecanismo de acção da compressa húmida (II) e de secagem (II-III)

Nota: Os gráficos abaixo de cada imagem da figura fazem a correspondência directa entre a quantidade e a distribuição de sal e água nos materiais de construção e na compressa – o eixo das ordenadas corresponde à quantidade relativa de sal e água nos materiais de construção e o eixo das abcissas refere-se à profundidade do material

O processo de evaporação é um mecanismo muito importante na acção de dessalinização das compressas de secagem. A evaporação de filmes de humidade de superfícies porosas ocorre sempre que o ar em contacto com a superfície tenha humidade relativa inferior a 100%, no caso de água pura, e inferior à Humidade Relativa de equilíbrio da solução salina ou das combinações salinas presentes no substrato.

Quando o material se encontra húmido e se inicia o processo de secagem, a água do material migra continuamente para a superfície exposta e a taxa de evaporação é elevada. Quando o teor de humidade do material diminuir abaixo do teor de humidade crítica (nível III), o transporte da água líquida para a superfície deixa de ser possível e apenas ocorre o mecanismo de difusão de vapor. A taxa de evaporação diminui substancialmente nesta fase, apesar do teor de água poder ainda ser considerável.

4.3. ESTRUTURA DAS COMPRESSAS

As compressas de dessalinização podem ser compostas por mais do que uma camada de um determinado componente ou mistura de componentes com a finalidade de melhorar o seu desempenho. Neste caso, cada camada tem objectivos diferentes: a primeira camada, ou camada de contacto, visa promover a adesão entre a superfície da compressa e a do substrato; a segunda camada, ou camada de cobertura, tem a função de absorver os sais que posteriormente cristalizam na sua estrutura porosa em consequência da evaporação da água. Adicionalmente, uma compressa composta por duas camadas previne os sais de reentrarem no substrato (Storemyr, Wendler e Zehnder, 2001). Assim, considera-se que as compressas compostas por duas camadas podem aumentar consideravelmente a eficácia do tratamento de dessalinização.

A camada de contacto deve possuir uma textura fina e ter poros de menores dimensões do que os do substrato a dessalinizar. A camada de contacto assume o papel de intermediário de transporte de sal entre o substrato e a camada de cobertura, local onde ocorre a evaporação e onde deve ter lugar a cristalização dos sais absorvidos pela camada de contacto. O esquema da Fig.2 ilustra o mecanismo que se processa na segunda fase de dessalinização numa compressa de secagem composta por duas camadas.

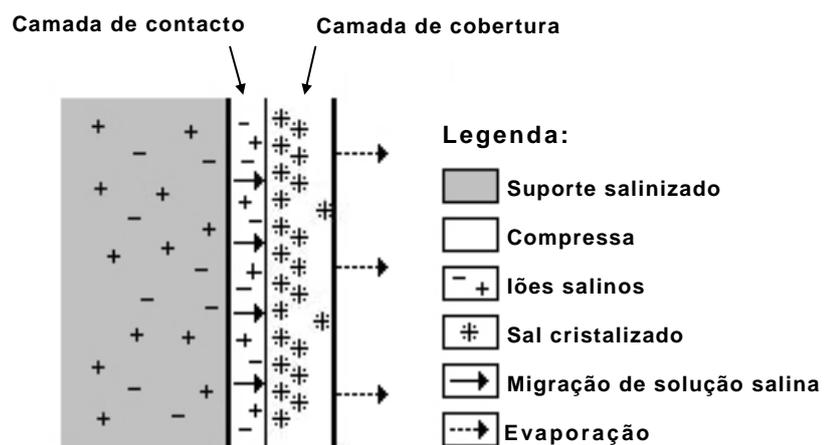


Fig. 2: Esquema do mecanismo de dessalinização de uma compressa composta por duas camadas

Como referido anteriormente, a segunda fase inicia-se quando o gradiente de humidade gerado entre a compressa e o suporte pétreo possibilita a migração de humidade e dos iões salinos para a compressa, em cuja superfície exposta ocorre a evaporação de água. Assim, após a primeira fase de solubilização dos sais existentes no suporte, os iões em solução são absorvidos pela camada de contacto que, idealmente, possui uma elevada capacidade de sucção capilar, em virtude da menor dimensão de alguns dos seus poros relativamente aos do substrato. A superfície exposta da camada de cobertura é o local onde deve ocorrer a evaporação e, dado que os poros desta camada têm maiores dimensões do que os da camada de contacto, a penetração de ar no sistema é mais fácil, resultando numa maior taxa de evaporação de água e promovendo assim a cristalização de sais na vizinhança da interface com a camada de contacto.

4.4. PROFUNDIDADE DE ACÇÃO

A profundidade da acção de um tratamento de dessalinização por compressas depende, nomeadamente, das características dos materiais de construção – designadamente da porosidade e da capacidade de absorção de água por capilaridade – do seu teor de humidade, da natureza dos sais presentes, da composição da compressa e das condições ambientais vigentes.

Estudos de avaliação de dessalinização por compressas, realizados por Auras e Melisa (2002) com recurso a métodos de exame e análise para a determinação da quantidade de sais solúveis em profundidade em materiais pétreos areníticos, demonstraram ser possível dessalinizar até a uma profundidade máxima de 1,5-2cm.

Estudos de carácter semelhante realizados por Lombardo e Simon (2004) na dessalinização de tijolo¹⁴ demonstraram ser possível dessalinizar até a uma profundidade máxima de 2cm, a partir da qual o teor de sais solúveis aumentava devido à humidade excessiva introduzida pela compressa, tendo os sais solúveis sido transportados para o interior do material.

Para determinar a profundidade de penetração da água de uma compressa à base de celulose em calcário, Bradley e Thickett (1992) realizaram medições

¹⁴ Porosidade acessível à água: 21,8%

que consistiram no seccionamento dos provetes após determinados intervalos de tempo em contacto com as compressas, e através da medição da condutividade eléctrica. A profundidade de penetração máxima atingida foi de 2cm, registada 180 minutos após o início do ensaio.

A profundidade de acção do tratamento de dessalinização depende fundamentalmente da profundidade de penetração da água da compressa no material de construção. Por outro lado, a entrada de humidade em profundidade pode comprometer o tratamento e constituir uma acção nociva por mobilizar os sais para as zonas mais internas dos materiais.

Assim, é pertinente estimar o limiar da acção de dessalinização com base nas características do material e da compressa. Na generalidade dos casos, para que esta acção seja fundamentada com base em parâmetros de eficiência e nocividade, considera-se que a profundidade de penetração de humidade não deverá ultrapassar 2cm, de forma a assegurar que a água introduzida retorne para o exterior do material durante o tratamento. A acção do tratamento não deverá deste modo atingir a profundidade a partir da qual passará a ser impossível o retorno dos iões salinos, pelos fenómenos de migração que são discutidos no ponto seguinte.

Um possível procedimento laboratorial para avaliar a profundidade de penetração de água de uma compressa e determinar a curva de incremento de massa dos provetes quando em contacto com compressas húmidas descreve-se a seguir:

- 1) As superfícies laterais dos provetes¹⁵ devem ser vedadas, a fim de impedir as trocas de humidade através destas superfícies, com um material transparente (e.g. *parafilme*) que permita a leitura da franja de água;
- 2) As compressas devem ser preparadas com uma espessura de, no mínimo, 1cm. A superfície exposta da compressa deve ser vedada com material impermeável (e.g. folha de alumínio) enquanto o processo de absorção de água se encontra em curso a fim de evitar perda de humidade por evaporação;

¹⁵ A geometria e as dimensões dos provetes devem ser as mesmas preconizadas para o ensaio de absorção de água por capilaridade.

3) Entre a compressa e a superfície de cada provete deve-se interpor uma interface (e.g. papel japonês) para possibilitar a sua pesagem isolada.

A Fig. 3 ilustra a preparação e a montagem adoptada para a execução do ensaio;

4) Os intervalos entre as pesagens iniciais devem ser estipulados mediante as propriedades da absorção de água por capilaridade dos provetes; é aconselhável a utilização dos mesmos intervalos de tempo utilizados na determinação da curva de absorção de água por capilaridade;



Fig. 3: Montagem do ensaio de absorção de água por capilaridade de provetes em contacto com compressas húmidas

As curvas de absorção de água por capilaridade e de profundidade de penetração da água podem ser representadas no mesmo gráfico (Fig. 4) e a sua análise permitirá determinar a quantidade de água que uma compressa deve conter de forma a garantir os parâmetros de eficácia e nocividade enunciados relativamente à profundidade de acção das compressas.

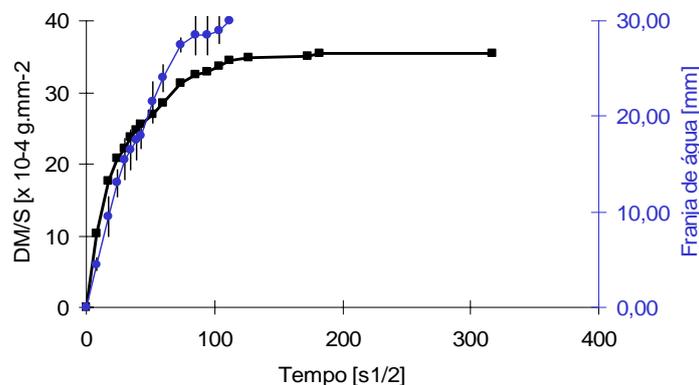


Fig. 4: Gráfico da absorção de água por capilaridade e de evolução da franja de água de um provete de calcário em contacto com uma compressa húmida de celulose

5. MATERIAIS UTILIZADOS NA PREPARAÇÃO DAS COMPRESSAS

As compressas de dessalinização podem ser constituídas por um ou mais componentes aos quais é adicionada água. Apresentam-se a seguir os principais tipos de materiais que podem ser utilizados na execução de compressas e as respectivas características associadas à sua acção:

Materiais porosos de origem orgânica com elevado coeficiente de absorção e retenção de água (e.g. celulose, géis aquosos);

Compostos minerais com elevado índice de superfície específica e boas propriedades de adsorção (e.g. minerais argilosos);

Agregados quimicamente inertes que visam a estabilização e produção de estruturas com elevado índice de porosidade e que reduzam o fenómeno de retracção da compressa durante a fase de secagem; adicionalmente podem aumentar a trabalhabilidade da compressa (e.g. areia de quartzo, sílica).

Na Tabela 1, nomeiam-se algumas vantagens e desvantagens de materiais empregues na execução de compressas de dessalinização.

A composição da compressa desempenha um papel decisivo nas propriedades de adesão, de absorção de água e de secagem e, conseqüentemente, na definição da acção da compressa. Uma mistura composta por diferentes componentes nas quantidades adequadas (e.g. fibras de celulose, minerais argilosos e sílica) pode proporcionar um tratamento mais eficaz, uma vez que se podem combinar todas as propriedades relevantes que uma compressa de dessalinização deve cumprir.

Tabela 1: Materiais geralmente utilizados na execução de compressas e respectivas vantagens e desvantagens

Composição da compressa	Vantagens	Desvantagens
Fibras celulósicas puras	pH neutro elevado índice de absorção de água boa trabalhabilidade (dependente do comprimento das fibras)	fraca estabilidade física biosusceptibilidade (microorganismos)
Minerais argilosos: e.g. bentonite, zeolite, atapulгите, sepiolite, caulinite	elevado índice de retenção de água (proporcionam uma secagem lenta)	elevada retracção e dureza após secagem pH elevado possível presença de impurezas possibilidade de remanescimento de resíduos de difícil remoção no material a dessalinizar (dependente da granularidade e tonalidade)
Agregados: e.g. areia de quartzo, sílica expandida (utilizáveis apenas como componentes de uma mistura)	retracção nula confere boa trabalhabilidade a materiais argilosos e celulósicos (dependente da granularidade)	quando presente em excesso pode formar estruturas demasiado porosas (secagem excessivamente rápida)

Para assegurar a qualidade, uma compressa de dessalinização deve cumprir os seguintes requisitos básicos:

1. Os componentes da compressa não podem conter sais solúveis nem compostos químicos reactivos – a eventual presença de sais solúveis na compressa deve ser determinada através de, no mínimo, 3 amostras representativas;
2. Deve ser empregue água desionizada de condutividade eléctrica inferior a $5\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.
3. A compressa deve apresentar um valor de pH entre 6 e 10 (medido a 25°C);
4. A compressa deve ser maleável, coesa, não deve provocar tensões na superfície do substrato e deve assumir uma boa aderência ao mesmo;
5. A espessura da compressa não deve ultrapassar 2cm;
6. A compressa deve ser desprovida de substâncias colorantes;

7. A compressa deve ser facilmente removível do substrato de modo a não causar danos na superfície.

6. EXECUÇÃO DO TRATAMENTO DE DESSALINIZAÇÃO POR COMPRESSAS

O método a adoptar para a realização de um tratamento de dessalinização *in situ* deve compreender os seguintes procedimentos:

- 1) Caracterização do estado de conservação dos materiais a tratar;
- 2) Preparação das superfícies a dessalinizar;
- 3) Preparação e aplicação das compressas de dessalinização;
- 4) Monitorização e duração do tratamento;
- 5) Remoção e repetição do tratamento;
- 6) Inspeção periódica das superfícies tratadas após a finalização do tratamento.

6.1. CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DOS MATERIAIS A TRATAR

A aplicação de compressas de dessalinização sobre os materiais a tratar deve ser antecedida pela caracterização do seu estado de conservação.

É importante realizar o mapeamento das formas de degradação e alteração, conjuntamente com a documentação fotográfica. Esta etapa, para além de ser pertinente na definição das condições de aplicação do tratamento, assegura a obtenção de informação útil para avaliar a eventual nocividade do mesmo.

A realização de ensaios de caracterização *in situ*, tais como a determinação do teor de sal e humidade em profundidade, absorção de água sob baixa pressão, medição da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, determinação do pH da superfície, etc. podem fornecer informação relevante para a realização do projecto de dessalinização.

6.2. PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES A DESSALINIZAR

Antes de iniciar a preparação das compressas, deve-se proceder à preparação das superfícies a tratar removendo todo o material desagregado através de meios mecânicos suaves (e.g. escovagem) para assegurar uma boa adesão entre o material a dessalinizar e a compressa. Nos casos em que a superfície

se encontre demasiado fragilizada, pode ser necessário proceder a um tratamento pré-consolidativo. Na dessalinização de alvenarias e caso existam juntas abertas entre os blocos a dessalinizar, aquelas devem ser vedadas antes do tratamento de dessalinização, para impedir que a evaporação ocorra pelas superfícies expostas nestas zonas.

6.3. PREPARAÇÃO E APLICAÇÃO DAS COMPRESSAS

Na execução de compressas com mais de um constituinte por camada, é muito importante que se proceda a uma perfeita amassadura dos materiais de modo a obter uma compressa tão homogénea quanto possível. Em primeiro lugar, devem-se juntar os materiais de granulometria mais fina e à preparação seca deve-se adicionar lentamente a água, à medida que se mistura.

Em geral, considera-se que se deve preparar, de cada vez, cerca de 0,3 m³ de compressa, de maneira a assegurar uma boa mistura dos componentes.

Ao aplicar uma compressa sobre um material poroso, é necessário assegurar que a mesma possui uma boa adesão à superfície a dessalinizar e que esta se mantém ao longo do processo de dessalinização.



Fig. 5: Aplicação manual de uma compressa de dessalinização

As compressas podem ser aplicadas manualmente ou com o auxílio de aparelhos de projecção. No caso de superfícies fragilizadas ou com relevos, é preferível a aplicação manual, que pode ser efectuada com o auxílio de uma colher de pedreiro (Fig. 5).

A pressão a imprimir deve ser suficiente para assegurar um bom contacto do

material da compressa com a superfície a tratar. No caso de superfícies muito texturadas e fragilizadas, não se deve exercer demasiada pressão, pois posteriormente isso pode dificultar o processo de remoção da compressa.

No caso de superfícies fragilizadas, a WTA recomenda a aplicação manual. Eggloffstein e Auras (2000) afirmam haver obtido uma melhor adesão das compressas à superfície da alvenaria quando estas foram aplicadas com um aparelho de projecção e que, em resultado, a quantidade de sal extraído foi

maior. Porém, advertem que, no caso de superfícies fragilizadas, este constituiu um procedimento nocivo por dificultar o posterior destacamento da compressa no final do ensaio.

Imediatamente após a aplicação das compressas deve-se observar e registar a progressão da mancha de humidade resultante da migração de água da compressa para o material, na vizinhança das superfícies não tratadas, caso existam. Se a mancha de humidade indiciar uma penetração superior a 2cm, o tratamento poderá resultar ineficiente pelas razões anteriormente referidas.

A interposição de folhas finas permeáveis (e.g. papel japonês) entre a superfície pétreo e a compressa pode minimizar a nocividade associada ao processo de destacamento. A WTA (2003) refere que uma desvantagem deste método é a diminuição da adesão da compressa à superfície do substrato. Contudo, podem existir casos onde se verifica o contrário: Lombardo e Simon (2004) concluíram que a interposição de folhas de papel japonês entre a compressa e o material de construção (tijolo) aumentou as forças de ligação entre os dois materiais. Este aspecto estará possivelmente relacionado com a textura da superfície – no caso de superfícies lisas, a interposição de folhas de papel japonês poderá proporcionar um melhor contacto entre a compressa e a superfície a dessalinizar; no caso de superfícies texturadas sucede o contrário pois a maleabilidade do papel que serve de interface pode não ser suficiente para contornar toda a superfície específica do material, dificultando assim o contacto da compressa com o material.

6.4. MONITORIZAÇÃO E DURAÇÃO DO TRATAMENTO

A WTA (2003) considera que o período de tempo de duração do tratamento de dessalinização deve ser de aproximadamente 3 a 6 semanas. No caso das compressas secarem demasiado rapidamente, recomenda a sua substituição precoce e a adopção de métodos que visem o aumento do tempo de secagem como, por exemplo, a protecção da superfície das compressas com uma cobertura semi-permeável (Fig. 6).

O tempo de duração do tratamento deve ser estimado em função das propriedades do material, mormente das propriedades de migração de água no espaço poroso, e do teor de sal que comporta. No caso de compressas húmidas, estas devem ser substituídas assim que o teor de sal extraído estabilize. No caso de compressas de secagem, estas devem ser substituídas antes da sua secagem completa para facilitar a remoção e para que a superfície a dessalinizar mantenha algum teor de humidade. O último aspecto é especialmente importante quando se pretende repetir o tratamento.



Fig. 6: Aplicação de uma cobertura semi-permeável sobre a compressa para proporcionar uma secagem mais lenta

A monitorização da secagem e da extracção de sal da compressa pode ser realizada através de amostragem periódica para posterior análise laboratorial (Fig. 7 e 8). As acções de inspecção periódica devem ser realizadas, no mínimo, semanalmente para permitir determinar o tempo de duração do ensaio de dessalinização. É importante realizar a observação visual da adesão da compressa ao substrato e avaliar o teor de humidade da compressa e o teor de sal absorvido (amostragem de no mínimo 25cm² da compressa). O teor de humidade da compressa pode ser determinado por pesagem antes e após a secagem completa em estufa e a determinação do teor de sal extraído pelas compressas pode ser realizado por análise química (e.g. análise do extracto solúvel da compressa por medição da condutividade eléctrica e/ou análise química quantitativa).



Fig. 7: Exemplo de amostragem periódica de diferentes compressas de dessalinização durante um ensaio experimental *in situ*

Uma vez que o processo de dessalinização é influenciado pelas características microclimáticas, o tratamento pode ser otimizado em função destas. A melhor época para a realização de um ensaio de dessalinização corresponde ao início da diminuição dos níveis de humidade relativa, o que, em Portugal, corresponde aproximadamente ao início da Primavera. Nestas condições, sabe-se que existe uma forte migração de humidade, e de sais, do interior dos materiais para a superfície, onde ocorre a evaporação. Presumindo que o enriquecimento salino à superfície é maior nesta época, será de esperar que seja possível extrair uma maior quantidade de sal.

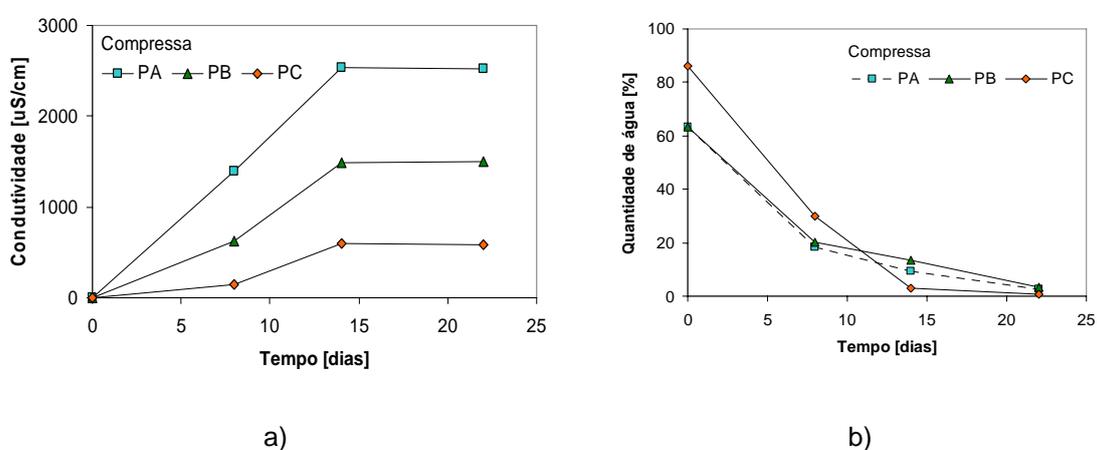


Fig. 8: Gráficos dos resultados obtidos durante a monitorização de um ensaio comparativo de dessalinização por compressas:
a) condutividade eléctrica do extracto solúvel das compressas ao longo do tempo;
b) teor de humidade das compressas ao longo do tempo (Paulos Nunes et al. 2005)

Quando a dessalinização por compressas é efectuada em laboratório, a massa dos materiais a dessalinizar deve ser estabilizada, antes de iniciar o tratamento, a um nível de humidade relativa elevado (e.g. 70%). No caso da dessalinização por compressas húmidas, a humidade relativa deve ser mantida constante. No caso de compressas de secagem, a humidade relativa deve descer ao longo do tempo de tratamento, monitorizando-se a secagem da compressa.

6.5. REMOÇÃO E REPETIÇÃO DO TRATAMENTO

A remoção das compressas de dessalinização é uma etapa que carece de cuidados especiais a fim de evitar danos na superfície do material.

A compressa deve ser removida antes da sua secagem completa uma vez que, deste modo, o processo de destacamento é mais fácil, pois a compressa

encontra-se mais maleável. Por outro lado, a superfície do material ainda se encontra húmida e, portanto, em melhores condições para receber um novo tratamento. Grandes áreas de superfícies cobertas com compressas devem ser cortadas em pequenas zonas e cuidadosamente destacadas com o auxílio de uma lâmina ou bisturi de maneira a não causar tensões no material. Após a total remoção das compressas, devem-se registar eventuais danos e alterações na superfície tratada, nomeadamente no que concerne o destacamento de material e as alterações colorimétricas.

As operações de dessalinização devem ser repetidas até que a quantidade de sal extraído pela compressa estabilize. Assim, devem ser realizadas, no mínimo, duas aplicações consecutivas de compressas de dessalinização.

A replicação do tratamento deve ser realizada imediatamente após a remoção de uma compressa e assim consecutivamente até que o teor de sal extraído pelas compressas estabilize (Fig. 9).

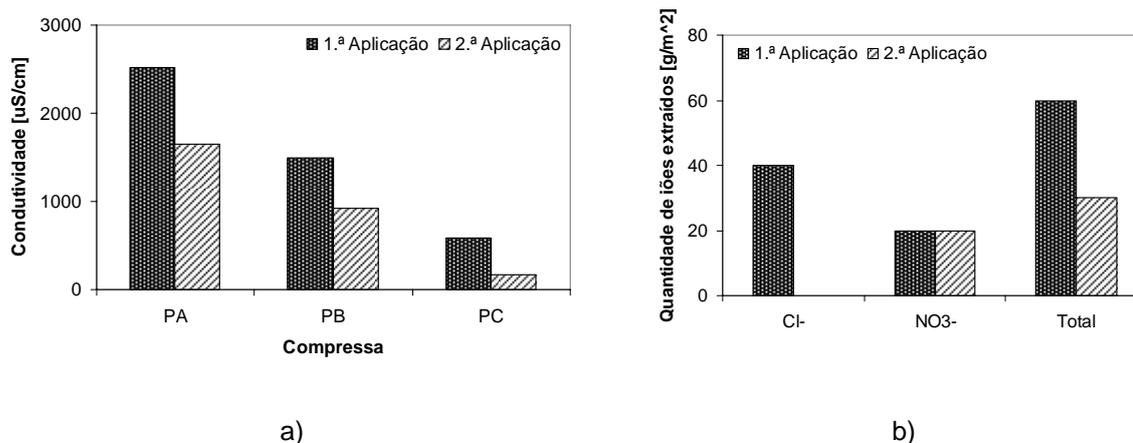


Fig. 9: Gráficos dos resultados obtidos num tratamento de dessalinização composto por duas aplicações consecutivas de compressas:
a) condutividade eléctrica do extracto solúvel das compressas;
b) quantidade de aniões cloreto (Cl⁻) e Nitrato (NO₃⁻) (Paulos Nunes et al. 2005)

Após a remoção da compressa deve-se observar a superfície que esteve em contacto como substrato salinizado e registar e quantificar o eventual destacamento de material (Fig. 10).

O tratamento não deve ser repetido se os níveis de sal extraído forem considerados muito baixos¹⁶ ou se se verificar que o tratamento provocou danos inesperados.



Fig. 10: Aspecto da superfície de uma compressa que esteve em contacto com o substrato salinizado após um ensaio de dessalinização *in situ* onde se pode observar que houve destacamento de alguns grãos e escamas de material pétreo

6.6. INSPECÇÃO PERIÓDICA DAS SUPERFÍCIES TRATADAS APÓS A FINALIZAÇÃO DO TRATAMENTO

Após a finalização do tratamento de dessalinização, os materiais devem ser inspeccionados periodicamente – inicialmente por períodos curtos (e.g. semanalmente) e depois por períodos longos (mensalmente e anualmente). A formação de eflorescências salinas sobre a superfície dos materiais dessalinizados indicará a necessidade de proceder à repetição do tratamento.

7. MÉTODOS DE ESTUDO E AVALIAÇÃO DA ACÇÃO DE COMPRESSAS DE DESSALINIZAÇÃO

Apresenta-se aqui um procedimento de estudo que permite, através do recurso a um conjunto limitado de ensaios, avaliar o desempenho de compressas de dessalinização.

A proposta de procedimento de estudo é entendida como um possível meio para a avaliação de tratamentos de dessalinização, e pode constituir um instrumento de apoio a tomadas de decisão baseadas na aplicabilidade das compressas, além de um possível ponto de partida para a definição de métodos consensualmente aceites.

¹⁶ Pode-se considerar que a quantidade de sais extraídos é baixa se a condutividade eléctrica do extracto solúvel de uma compressa, e.g. com 100cm² de área e espessura total preparada em 1l de água desmineralizada, for inferior a 100 S cm⁻¹

A dependência da eficácia e nocividade das compressas de dessalinização relativamente às características dos substratos em que são aplicadas leva a que uma compressa que não demonstre condições de aplicabilidade num determinado substrato possa revelar desempenho satisfatório noutra substrato e vice-versa. Assim, considera-se importante a criação de condições para que a informação obtida nos estudos laboratoriais e em casos reais de tratamento seja devidamente registada e disponibilizada para estudos futuros de novas compressas e intervenções.

Na Fig. 11 está sistematizada uma proposta de procedimento de estudo. Como considerações gerais são de referir a necessidade de caracterizar previamente os substratos a dessalinizar, que devem ser tão semelhantes quanto possível aos materiais a tratar; caracterizar previamente as compressas a aplicar; e avaliar o desempenho das compressas na dessalinização dos substratos.

Os resultados obtidos na caracterização das compressas de dessalinização podem levar à necessidade de modificar a sua composição, visando a possibilidade de incrementar o seu desempenho. Caso a compressa revele reduzida eficácia ou nocividade elevada, deve-se proceder ao estudo de uma nova compressa de dessalinização.

Com base na aplicação do procedimento proposto, as compressas que manifestem um bom desempenho podem ser objecto de outro nível de análise, correspondente à sua aplicabilidade em condições reais de obra para responder a necessidades concretas de intervenção.

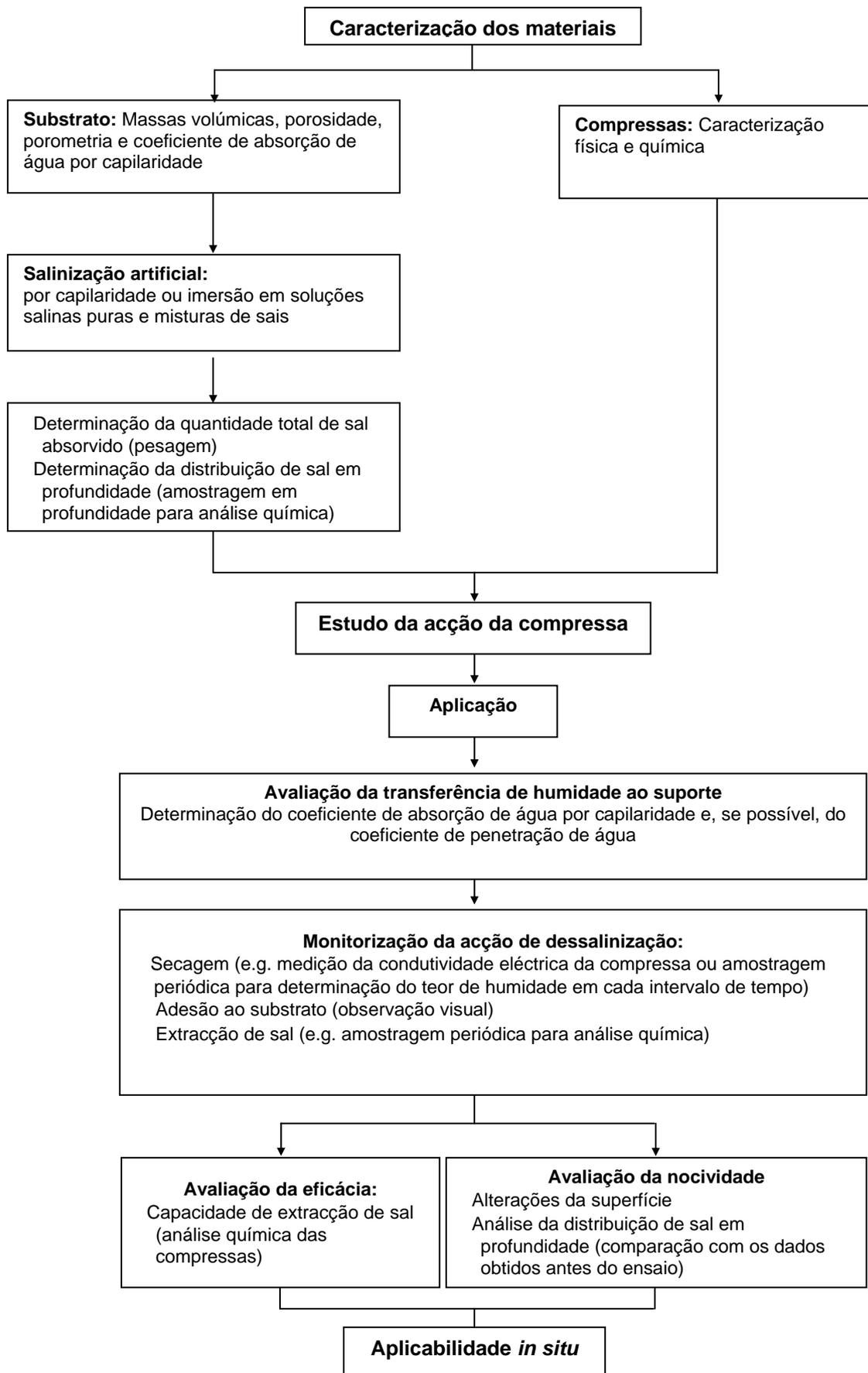


Fig. 11: Proposta de procedimento de estudo da acção de compressas de dessalinização

Para averiguar a aplicabilidade das compressas *in situ* pode-se adoptar o seguinte método:

- 1) Selecção de áreas representativas (no mínimo 3 por situação) das situações presentes mais relevantes, nomeadamente no que se refere aos tipos ou variedades dos materiais, formas de alteração e degradação, condições de exposição e localização arquitectónica;
- 2) Caracterização das áreas seleccionadas: estado de conservação (mapeamento das formas de degradação e alteração e documentação fotográfica); realização de ensaios de caracterização - e.g. avaliação do teor de sal em profundidade por amostragem, absorção de água a baixa pressão, medição da propagação de ondas ultrassónicas, medição do pH da superfície;
- 3) Tratamento das áreas seleccionadas de acordo com os procedimentos que se prevejam vir a ser utilizados em obra;
- 4) Monitorização do desempenho através de acções de inspecção periódica (no mínimo, semanalmente) que permitam determinar o tempo de duração óptimo da operação de dessalinização;
- 5) Avaliação do desempenho das compressas e selecção das que apresentaram melhores resultados.

A etapa de remoção das compressas deve ser precedida pelo registo da localização das áreas de onde são removidas para, após a análise química, realizar o mapeamento dos sais extraídos do monumento.

8. CONCLUSÃO

O método de dessalinização por compressas é, geralmente, o mais utilizado na dessalinização do património construído. A realização de um tratamento de dessalinização sem um estudo prévio pode resultar em danos ou afectar outras acções tal como no caso de tratamentos de consolidação ou hidrofugação.

A investigação laboratorial para a formulação de compressas é muito importante. Caso não exista a possibilidade de a realizar, a avaliação do desempenho das compressas de dessalinização sob condições reais

apresenta-se com elevado potencial informativo, não só no estudo da acção das compressas, como também na definição do projecto da intervenção.

O presente documento pode ser utilizado como um guia, tanto para a investigação sobre o desempenho de compressas de dessalinização como para a realização de um tratamento de dessalinização *in situ*.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Fevereiro de 2007

VISTOS

AUTORIA

O CHEFE DO NCMC



João Manuel Mimoso
Investigador Coordenador



Cristiana Lara Paulos Nunes
Licenciada em Conservação e Restauro
Bolseira do LNEC

A DIRECTORA DO DEPARTAMENTO
DE MATERIAIS



Adélia Rocha
Investigadora Coordenadora



José Delgado Rodrigues
Investigador Coordenador

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AURAS, M. and MELISA, G. (2002) – “Kompressenentsalzung: Wirkungsprinzip, Materialien, Anwendung, Fallbeispiele”. in *Bericht*, nº 14, Tangung: Institut für Steinkonservierung e. V., pp. 41-52.
- BOWLEY, M. J. (1975) – “Desalination of stone: a case study”. Garston: Building research Station, pp. 1-9.
- BRADLEY, S. M. and THICKETT, D. (1992) – “An investigation into the movement of moisture and soluble salts in stone. Preliminary observations and experiments”. in *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, (Eds. J. Delgado Rodrigues, F. Henriques, T. Jeremias), Lisbon: LNEC, pp. 417-424.
- BUYS, Susan and OAKLEY, Victoria (1999) – “Conservation and restoration of ceramics”. Oxford: Butterworth-Heinemann, pp. 97-98.
- CASTRO, E. et DELGADO RODRIGUES, J. (1988) – “Étude du nettoyage d'un monument en granite”. *Memória* nº 715, Lisboa: LNEC, pp. 3-4.
- DE WITTE, E. and DUPAS, M. (1992) – “Cleaning poultices based on E.D.T.A.”. in *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, (Eds. Delgado Rodrigues, F. Henriques, T. Jeremias) Lisboa: LNEC, pp. 1023-31.
- EGLOFFSTEIN, P. and AURAS, M. (2000) – “Kompressenentsalzung: ein Materialvergleich”. in *Bericht*, nº 10, Mainz: Institut für Steinkonservierung e. V., pp.63-73.
- ETTL, H. and SCHUH, H. (1992) – “Entsalzungsversuche an Sandstein”. in *Geowissenschaften*, nº 10, 57 pp.
- FASSINA, V.; ARBIZZANI, R. and NACCARI, A. (1996) - “Salt efflorescence on the marble slabs of S. Maria dei Miracoli church: a survey on their origin and on the methodology of their removal”. in *Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, (Ed. Riederer, J.), Berlin, pp. 523-534.
- FREELAND, J. and CHAROLA, E. (2001) – “Salts in ceramic bodies III. An experimental study on desalination”. in *Zurich International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, Nº 7, pp. 149-160.
- FRIESE, P. (1988) – “Removing of soluble salts and drying of masonry by means of electrochemical techniques”. in *6th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Torún: Nicholas Copernicus University, pp. 624-632.
- GONÇALVES, T. D. (2001) – “Revestimento de fabrico industrial para paredes sujeitas à acção de sais solúveis”. Relatório 264/01-S. Cer, Lisboa: LNEC, pp. 25-33.
- HENRIQUES, F. (1994) – *Humidade em Paredes*. 1.^a Ed., Lisboa: LNEC, pp. 56-57, 61-67.
- KOVATCHEVA-NINOVA, V.; NIKOLOVA, N. and MARINOV, M. (2002) – “Investigation on the adsorption properties of the natural adsorbents zeolite and bentonite towards copper ions”. in *Annual of the University of Mining and*

Geology St. Ivan Rilski, Vol. 44-45, part II, Sofia: Mining and Mineral Processing, pp. 93-97.

LAZZARINI, L. and LOMBARDI, G. (1990) – “Bentonite for cleaning and desalination of stones”. in *Proceedings of the 9th Triennial Meeting*, (Ed. Kristen Grimstad), Dresden: ICOM, pp. 336-339.

LOMBARDO, T. and SIMON, S. (2004) – “Desalination by poulticing: laboratory study on controlling parameters”. in *10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, (Eds. Kwiatkowski, D.), Stockholm, pp. 323-330.

MINDER-HENG, V. A.-J.; BERTEAUD and VERGÈS-BELMIN (1994) – “Migration de l'eau dans les roches sous microondes en vue du dessalement des pierres de taille”. in *Studies in Conservation*, n.º 39, pp. 121-31.

PRICE, C. A. (1996) – “Stone conservation. An overview of current research”. Santa Monica: The Getty Conservation Institute, pp.15-16.

PAULOS NUNES, C. L. (2004) – “Estudo de dessalinização por compressas: aplicação na torre zimbório da Sé de Évora”. Relatório de estágio de licenciatura, Lisboa: Universidade Nova de Lisboa

PAULOS NUNES, C. L., DELGADO RODRIGUES, J. and COSTA, D. M. R. (2005) – “Desalination by poulticing: application to the granitic tower of the Évora Cathedral”. in *Actes du Rencontre Internationale sur le Patrimoine Architectural Méditerranéen*, Meknès: Faculty of Sciences of the University Moulay Ismail

PAULOS NUNES, C. L. and DELGADO RODRIGUES, J. – “Experimental assessment of poultices for desalination of porous materials”. (em publicação)

PÜHRINGER, J. and WEBER, J. (1990) – “A model for salt extraction – some principles”. in *Proceedings of the 9th ICOM Meeting*, (Ed. Kirsten Grimstad), Vol. I, Dresden: ICOM, pp. 355-359.

SAMSON, E.; MARCHAND, J. and SNYDER, K. A. (2003) – “Calculation of ionic diffusion coefficients on the basis of migration test results”. in *Materials and Structures*, Vol. 36, No. 257, pp. 156-165.

SELWITZ, C. and DOEHNE, E. (2002) – “The evaluation of crystallization modifiers for controlling salt damage to limestone”. in *Journal of Cultural Heritage*, 3, pp. 205-216.

STOREMYR, P.; WENDLER, E. and ZEHNDER, K. (2001) – “Weathering and conservation of soapstone and greenschist used at Nidaros Cathedral (Norway). Preliminary summary of results – a work document”. in Report Nº2, Trondheim: European Heritage Laboratory, 13 pp.

RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; LINARES-FERNANDES, L.; DOEHNE, E. and SEBASTIAN, E. (2002) – “Effects of ferrocyanide ions on NaCl crystallisation in porous stone”. in *Journal of Crystal Growth*, 243, pp. 503-516.

TERHEIDEN and KAPS (2003) – “Experimental analysis of the influence of material characteristics on the ion transport in desalination processes”. in *Proceedings of EUROMAT, Symposium P2 – Materials and Conservation of Cultural Heritage*, Lausanne: EPFL TORRACA, Giorgio (1981) – “Porous building materials, materials science for architectural conservation”. Rome: ICCROM, 1st Ed., pp. 15, 30-33, 92-94.

WENDLER, E. and HESTERMANN, M. (2001) – “Weathering and conservation of soapstone and greenschist used at Nidaros Cathedral (Norway): Petrophysical properties and development of conservation materials”. München: Fachlabor für Konservierungsfragen in der Denkmalpflege, pp. 27 (work in progress documentation of international research project).

WINDSHEIMER, B.; SNETHLAGE R. and WIHR, R. (1991) – “Die entsalzung von steindenkmälern”. in *Forschungsbericht*, n°4, München: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege.

WTA-Merkblatt E 3-13-01/D (2003) – “Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen”. Referat 3 Naturstein, Freiburg: WTA Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, pp. 10-11.

