

ALTERAÇÕES DA PEDRA NATURAL NO PATRIMÓNIO CONSTRUÍDO DE REGIÕES COSTEIRAS

Carlos Alves

Centro de Investigação Geológica, Ordenamento e Valorização de Recursos (PEst-OE/CTE/UI0697/2011 da FCT).
DCT, Escola de Ciências. Universidade do Minho

Introdução

No que diz respeito aos materiais, a água pode causar deterioração (*e.g.* erosão, expansão), ser um meio de transporte de poluentes (*e.g.* sais, partículas) e promover a ação de outros agentes (sais, organismos). O ambiente costeiro é classicamente considerado particularmente agressivo para os materiais por causa das condições de maior humidades (Calvo 2006) e ainda em resultado dos efeitos de sais solúveis com origem nos corpos marinhos. No caso das pedras naturais podem ser encontradas referências nos livros de Heródoto (que notando a intensa deterioração das pirâmides atribuiu a mesma à influência da contaminação marinha) e em Vitruvius, que referia que as pedras brandas (fácies de cortar) seriam atacadas pelo sal nas regiões costeiras.

No presente artigo, após uma ilustração das alterações das pedras nas obras de construção, é apresentada uma revisão das possíveis vias de fornecimento dos poluentes salinos com origem marinha, procedimentos para avaliação da contribuição marinha para os processos da deterioração e do possível interesse destes estudos para a seleção dos materiais mais apropriados para as construções em regiões costeiras e para a conservação do património construído nessas regiões.

Alterações da pedra nas obras de construção

As diferentes feições resultantes da alteração dos materiais são frequentemente referidas como “doenças”, patologias, anomalias ou defeitos, estabelecendo-se algumas analogias com a epistemologia médica, desde o diagnóstico até ao tratamento (ver Smith e Prikryl 2007). Os diversos tipos de alterações que podem afetar a pedra aplicada no património construído histórico (Fig. 1a,c) e moderno (Fig. 1b,d) incluem simples alterações cromáticas como as provocadas pela formação de eflorescências salinas (Fig.1a) e efeitos erosivos (Fig. 1b-d) que podem causar irregularidades superficiais e a perda de elementos com valor decorativo. ICOMOS-ISCS (2008) apresenta uma proposta recente de classificação das alterações. Os processos de alteração podem, consequentemente, afetar algumas das exigências funcionais das pedras, por exemplo em revestimentos de paredes (Lucas 1990), nomeadamente de durabilidade, de conforto visual (regularidade e perfeição da superfície, homogeneidade de cor e de brilho). Em casos extremos de efeitos erosivos poderão até ser afetadas as exigências de estanquidade à água (ver Fig. 1d).

Os sais solúveis estão associados com a maioria dos processos de alteração com maior impacto erosivo e serão por isso objeto de especial atenção neste artigo. Os seus efeitos deteriorantes são atribuídos a processos físicos relacionados com a cristalização ou com a hidratação. Existem também referências a efeitos químicos dos sais por processos como a dissolução de fases mais suscetíveis às condições químicas criadas pelas soluções salinas (para uma revisão de efeitos químicos dos sais na pedra natural ver Alves 2009). Dado o especial impacto da poluição salina, as secções seguintes são focadas no estudo da mesma.

Vias de contaminação dos materiais de construção pela poluição salina com origem marinha

Os sais com origem marinha podem atingir os materiais através de diversas trajetórias representadas esquematicamente na Fig. 2.

a)



b)



c)



d)



Fig. 1: Exemplos de alterações da pedra em regiões costeiras: a) eflorescência salinas (manchas esbranquiçadas) em pedras vulcânicas; b) erosão por destacamentos da superfície de pedra calcária em construção moderna; c) erosão de pormenores decorativos em pedras graníticas; d) erosão de pedra calcária em construção moderna causando notáveis depressões superficiais.

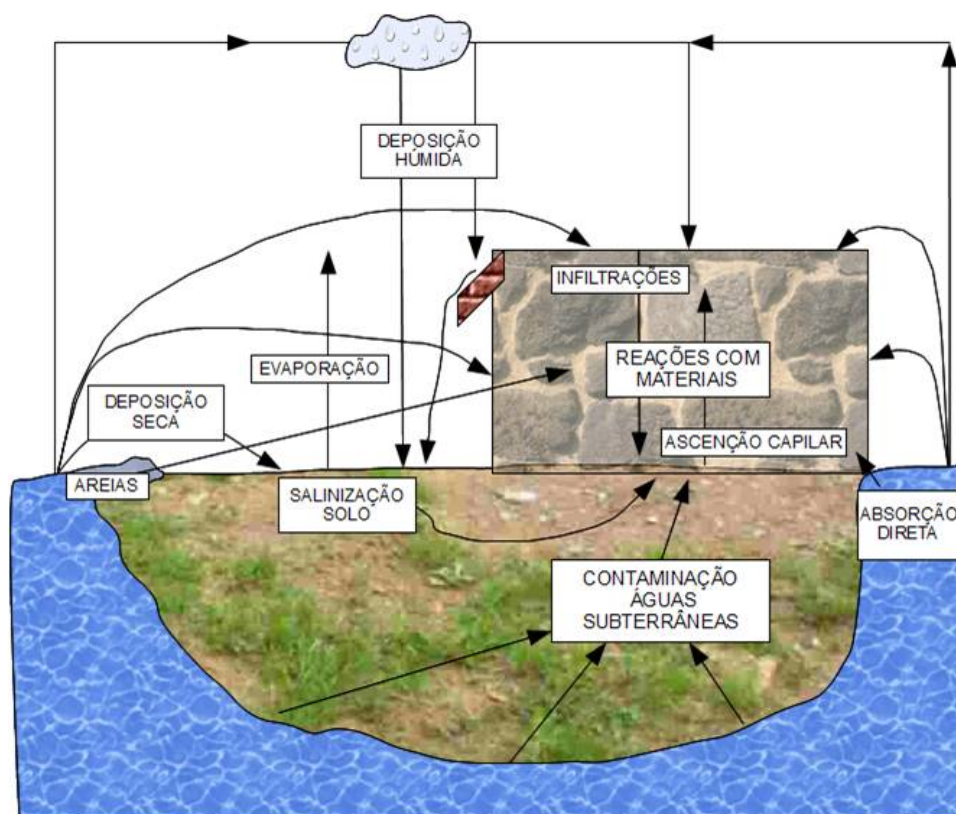


Fig. 2: Cartoon ilustrativo das vias de contaminação do património construído por sais de origem marinha.

As partículas do aerossol marinho podem depositar-se nos materiais de construção por via seca ou por via húmida. Experiências laboratoriais como a de Cardell *et al.* (2003a) permitiram observar os efeitos do aerossol marinho na alteração física de granitos e calcários e efeitos químicos por dissolução nestas últimas rochas. A deposição seca pode ocorrer nas superfícies expostas (onde será potencialmente mobilizada pela precipitação húmida) e nas zonas abrigadas. Nesta última situação a deposição seca será a única via de deposição atmosférica e não ocorre lixiviação por efeito da precipitação húmida, promovendo-se a acumulação de sais (a condensação pode fornecer a humidade necessária para a reatividade dos sais).

A extensão geográfica da contaminação por via atmosférica dependerá de várias características locais como o regime de ventos, a presença de obstáculos e a orientação das superfícies. Os dados do Instituto de Meteorologia sobre teor em cloreto na chuva apresentados em http://www.meteo.pt/resources.www/transf/composicao.atmosfera/compatm_00_cl.jpg, mostram diferenças marcadas entre estações como Angra do Heroísmo, Funchal e Viana do Castelo e as estações de Bragança e Castelo Branco. O mínimo do primeiro grupo está próximo dos 4 mg/L e há valores próximos de 16 mg/L. No segundo grupo o máximo está próximo dos 3 mg/L e a maioria das medições não ultrapassa os 2 mg/L.

Um estudo mais detalhado está disponível através do *National Atmospheric Deposition Program*, destinado a monitorizar características químicas da chuva nos EUA. Os valores de cloreto na precipitação em 2009 (Fig. 3) apresentados para estações mais próximas da costa podem atingir 3,20 mg/L na costa leste, 1,47 no sul (próximo do golfo da Califórnia) e 1,01 mg/L na costa oeste, enquanto num estado interior como o Dakota do Sul os valores representativos das estações não ultrapassam 0,07 mg/L. A Fig. 3 ilustra também a possível existência de fontes continentais para o cloreto.

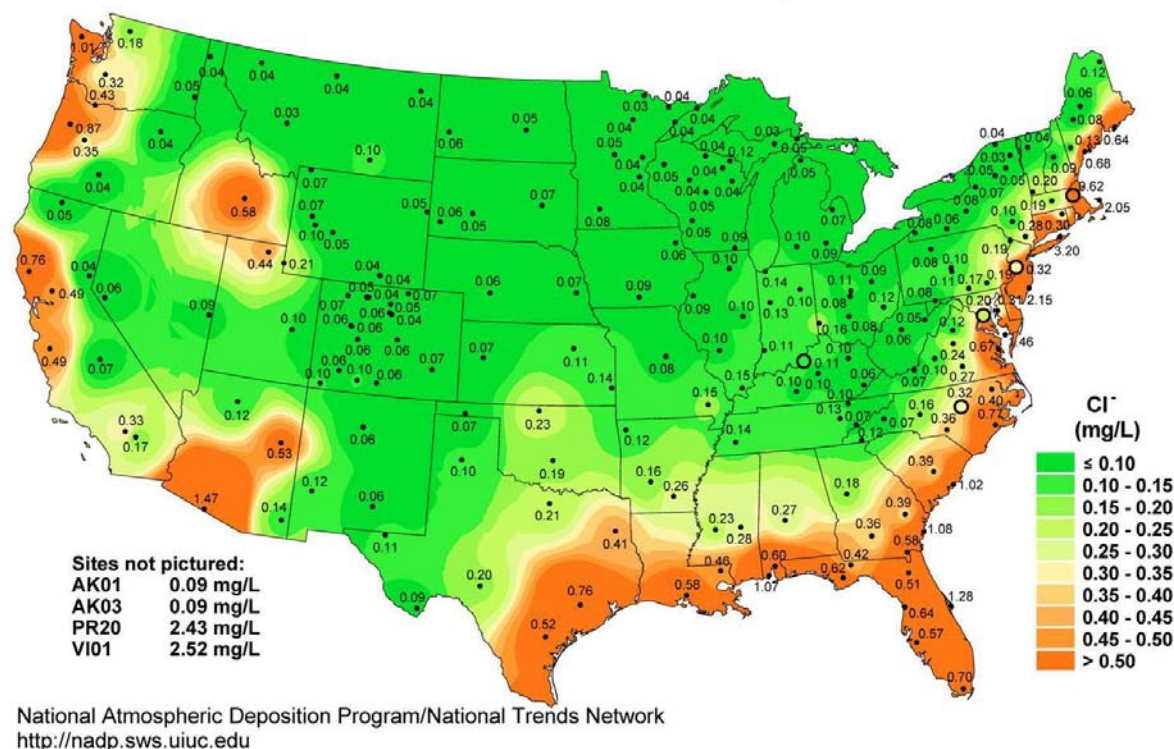


Fig. 3: Mapa de teores de cloreto na chuva nos EUA (2009). Mapa do National Atmospheric Deposition Program (NRSP-3). 2011. NADP Program Office, Illinois State Water Survey, 2204 Griffith Dr., Champaign, IL 61820. Obtido em <http://nadp.sws.uiuc.edu/maps/Default.aspx>

Oliveira *et al.* (2010) referem que as partículas marinhas constituíam uma porção importante (atingindo 32%) da fração mais grosseira do aerossol atmosférico da cidade do Porto (onde existiam outras importantes fontes de poluição). Meira *et al.* (2008) apresentam um modelo para previsão da deposição de sais com origem marinha conforme a distância para o interior baseado sobretudo na velocidade do vento. Stefanis *et al.* (2009) concluíram que a deposição do sal com origem marinha dependia da direção do vento e definiram uma zona de maior perigosidade.

Desta forma, a perigosidade de deterioração por efeito da poluição salina atmosférica com origem marinha será mais elevada nas zonas próximas das regiões costeiras. De acordo com o estudo de Mottershead *et al.* (2003), comparando duas estruturas históricas (uma costeira e a outra mais para o interior), as taxas de deterioração eram superiores na estrutura costeira. De acordo com Stefanis (2009), a deterioração das pedras associadas com a deposição atmosférica de sais será maior para maiores concentrações de sais. Costa *et al.* (2009) propõem uma zona de maior agressividade para os betões associada com os efeitos do aerossol marinho por volta da centena e meia de metros em relação à linha de costa.

As águas marinhas podem contaminar diretamente as estruturas de construção (Veneza é um exemplo) ou contaminar águas subterrâneas que posteriormente, por ascensão capilar, são capazes de fornecer poluentes salinos aos solos e aos materiais de construção. Os fornecimentos atmosféricos também podem contribuir para o enriquecimento de soluções do solo que posteriormente contaminam os materiais de construção por ascensão capilar (ver Chabas e Jeannette 2001). A concentração das soluções do solo vai depender do balanço entre os efeitos da precipitação húmida e seca, possível lixiviação por infiltração e escoamento superficial e os efeitos da evaporação. Goudie e Viles (1997) apresentam uma revisão dos processos associados com a perigosidade de contaminação salina das construções.

Existe ainda a possibilidade de contaminação salina pelo uso de águas marinhas ou areias das regiões costeiras na preparação de argamassas. Vitruvius aponta vários defeitos às argamassas preparadas com areias da praia como a formação de eflorescências e a fraca capacidade de carga. Bernabé (1996) detetou halite (cloreto de sódio) em argamassas preparadas com água do mar e areias do mar. Dias *et al.* (2008) propõem uma percentagem em massa de areia das regiões costeiras aceitável para preparar betão com teores em cloreto dentro dos níveis admissíveis mas referem que uma mistura preparada com areia saturada com água do mar mostrava claras evidências de corrosão. De acordo com Limeira *et al.* (2011) a areia marinha poderia ser usada como agregado fino para a produção de betão.

As contribuições de origem marinha podem ainda potenciar o efeito de outros poluentes pela interação com os materiais de construção (com libertação de substâncias) e a formação de novos sais, por exemplo a formação de carbonatos e sulfatos de sódio por reação entre o cloreto de sódio e argamassas (Gurrera *et al.* 1994).

Adicionalmente é necessário considerar os efeitos de sais com origem marinha no comportamento de outros sais. Assim, a posição de cristalização do gesso (sulfato de cálcio dihidratado) pode ser afetada pela presença de sais mais solúveis quer em termos de posição em altura (Zehnder, 1996) quer em termos de posição em relação à superfície de secagem (Silva *et al.* 1996). Num estudo de edifícios com tijolos, Larsen (2007) concluem que o cloreto de sódio promoveu, pela sua solubilidade, a mobilização do gesso e, pela sua deliquescente no intervalo de humidades relativas consideradas, ciclos de dissolução e cristalização e, desta forma, a deterioração dos tijolos.

Avaliação da contribuição marinha

Os possíveis estudos para avaliação da contribuição marinha e de outras possíveis fontes (naturais e antropogénica), incluem a identificação das fases cristalinas de neoformação consideradas representativas das fontes de poluição. Este tipo de estudo está limitado a condições favoráveis à individualização e separação das fases de neoformação (no caso dos sais solúveis as condições de humidade podem implicar a dissolução dos sais e a circulação de águas pode promover a lixiviação dos mesmos). As eflorescências constituem ocorrências favoráveis à caracterização mineraloquímica uma vez que os sais solúveis estão separados das fases iniciais dos materiais. Em algumas situações os sais podem concentrar-se em superfícies de separação no interior dos materiais formando criptoeflorescências (o que permite a proteção dos sais dos efeitos de lixiviação pela chuva).

Existem vários procedimentos geoquímicos para avaliação da contribuição marinha na contaminação salina das pedras começando pelos teores em cloreto e sódio (iões dominantes nas águas marinhas) na fração solúvel em água das patologias, no sentido em que teores mais elevados destes iões representariam exposição a concentrações mais elevadas.

Outro procedimento consiste na determinação de fatores de enriquecimento (FE) definíveis para qualquer substância "X" em relação ao ião de referência (sódio ou cloreto) considerando que não há perdas destes iões. Os valores de FE indicarão, em relação às águas marinhas consideradas, uma das seguintes situações para a substância "X": uma proporção semelhante (os teores na substância "X" são explicáveis por contribuições marinhas), enriquecimento (indicando outras fontes para a substância "X"), empobrecimento (indicando fixação da substância "X" ou fornecimentos adicionais substanciados ião de referência a partir de outras fontes). É também possível avaliar estas situações a partir de diagramas de dispersão projetando os teores de qualquer substância "X" contra o ião de referência.

Nesta mesma linha de uso de quocientes, consideram-se também as assinaturas de isótopos estáveis, que no caso da avaliação de contribuições marinhas envolvem geralmente isótopos de hidrogénio, oxigénio e enxofre mas também mais recentemente boro (ver Kloppmann *et al.* 2011).

Existem vários diagramas que permitem comparar as proporções de várias substâncias. Os diagramas ternários consideram conjuntos de três componentes (Fig. 4). No caso de estudos do património estes diagramas têm mostrado a possibilidade de distinguir várias tendências (Alves e Sequeira Braga 1994, Alves e Sequeira Braga 2000, Alves *et al.* 2000). Outra alternativa é o uso de diagramas de tipo Langelier-Ludwig (e.g. Silva *et al.* 1996) baseados nas projeções dois pares de componentes (em cada par o aumento de um componente implica a diminuição do outro). Um problema comum a estes diagramas é o número limitado de componentes que pode ser representada, obrigando por isso a criar associações. Na investigação da contribuição marinha é recomendável manter a individualização do sódio e do cloreto (íões dominantes nas águas marinhas).

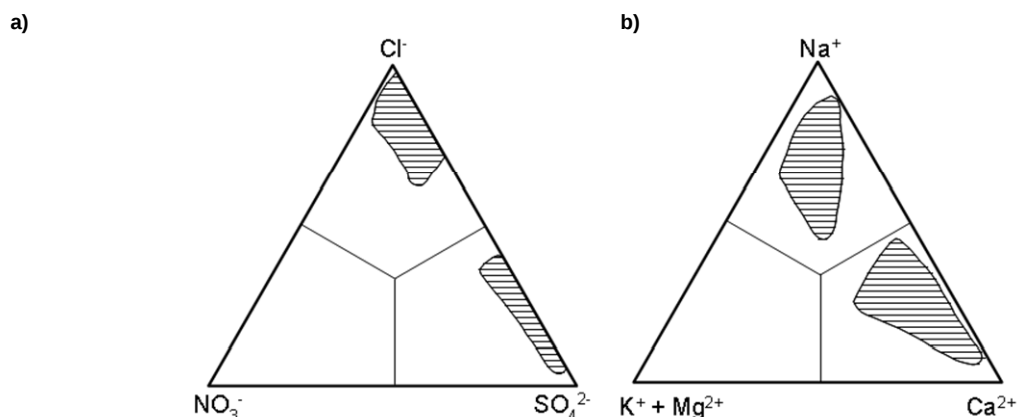


Fig. 4: Exemplo de diagramas ternários no estudo da fração solúvel em água de patologias das pedras, separando amostras com cloreto dominante de outras com sulfato dominante em a) e amostras com sódio dominante de outras com cálcio dominante em b). Preparado a partir de Alves *et al.* (2000).

Existem diagramas que permitem representar individualmente um maior número de substâncias como o diagrama de Stiff (utilizado no estudo de águas - ver Freeze e Cherry 1979) ou o diagrama radial mas um maior número de substâncias representadas aumenta a dificuldade da leitura do diagrama. O potencial destes diagramas está sobretudo na possibilidade de estudar padrões espaciais por exemplo numa área ou numa parede ou para comparar um pequeno número de amostras que mostrem perfis diferentes.

Em condições de amostragem favoráveis podem ser utilizadas técnicas estatísticas multivariadas (ver exemplos em Moropoulou *et al.* 1995, Torfs e VanGrieken 1997).

Todavia, existem várias dificuldades na interpretação dos resultados destas técnicas. As variações nos teores dos iões podem resultar de variações de porosidade ou da existência de vários episódios de poluição e do balanço entre os processos de acumulação e lixiviação. Várias fontes podem contribuir para os teores de um determinado ião (Arnold e Zehnder 1991, Arnold 1996). A evolução dos sistemas salinos no património construído permite a formação de novos sais a partir dos sais originais. Adicionalmente, associação não implica causalidade e há situações em que ocorrem vários sais dificultando a o estabelecimento de relações entre tipos de sais e deterioração. A não deteção dos sais solúveis não garante que estes não estão envolvidos nos processos de deterioração (dependerá da técnica utilizada e existe a possibilidade de lixiviação dos sais).

Tendo em consideração as questões anteriores, deve considerar-se sempre o estudo dos padrões de distribuição espacial dos produtos de alteração para avaliar as possíveis contribuições da contaminação com origem marinha nos processos de alteração dos materiais. Na Fig. 5 são ilustradas situações associadas com ascensão capilar, em que a deterioração se concentra numa altura definida pelo balanço com as condições de secagem (Fig. 5a), e situações atribuíveis a fornecimentos atmosféricos, em que é observada uma distribuição generalizada em altura (Fig. 5b).

a)



b)



Fig. 5: Ilustração de padrões de alteração típicos: a) ascensão capilar; b) alterações em construção recente de pedras calcárias em vários locais em altura (atribuído a fornecimentos atmosféricos) e com efeitos de ascensão capilar na base.

Considerações finais: Implicações

Retomando a analogia com os estudos médicos, nomeadamente em termos epidemiológicos (ver Mausner e Kramer 1984), as edificações existentes seriam vistas como experiências naturais de alteração dos materiais que permitiriam estudos observacionais retrospectivos sobre a suscetibilidade dos materiais, constituindo fontes de informações potencialmente relevantes para a seleção de materiais apropriados para, no caso em apreço, os ambientes costeiros e considerando também diferentes aplicações arquitetónicas. Por exemplo, a classificação de durabilidade das pedras apresentada em Miglio *et al* (2000), baseada na perda de massa no ensaio laboratorial de cristalização de sais, considera, entre outros fatores ambientais, a exposição ao ambiente costeiro (sendo as exigências mais elevadas para as pedras destinadas a estruturas localizadas em costeiras do que para as estruturas no interior), e distingue, também, diferentes localizações arquitetónicas (com maiores exigências para aplicações de tipo pavimentos e degraus de escadas). Smith *et al*. (2004) referem que os sais não pareciam acumular-se em áreas sujeitas a lavagem regular pela chuva mas que em áreas parcialmente abrigadas pequenas variações na exposição poderiam favorecer a acumulação de sais. Stefanis *et al*. (2009) referem diferenças na deposição de aerossóis marinhos em função da orientação das superfícies.

As considerações anteriores são ilustradas na Fig. 6a, onde é possível comparar os resultados de fachadas com diferentes orientações no mesmo monumento (é possível ainda observar na mesma fachada diferentes estados de alteração) e na Fig. 6b, onde é possível comparar a deterioração da superfície horizontal e de uma superfície vertical do mesmo bloco.



Fig. 6: Comparação de aspetos de erosão em diferentes fachadas do mesmo monumento (a) e em diferentes superfícies do mesmo bloco (b).

O estudo de obras recentes pode ter particular interesse para a avaliação da suscetibilidade dos materiais tendo em consideração que existe uma menor sobreposição de eventos poluentes. Cardell *et al.* (2003b) referem situações de erosão e fissuração de pedras calcária no prazo de 15 anos após colocação em obra. A observação de obras de construção situadas na costa portuguesa permitiu observar a sensibilidade de certas rochas sedimentares aos efeitos do ambiente costeiro, nomeadamente de certos calcários porosos, mesmo em construções modernas como é ilustrado nas Figuras 1 e 5. Para além das características intrínsecas dos materiais deverá considerar-se a preparação das superfícies das pedras. Urosevic *et al.* (2010) em experiências laboratoriais com aerossol marinho concluíram que o polimento de placas de travertino favorecia a durabilidade destas.

Todavia existem algumas limitações associadas com a ausência de estudos de caracterização dos materiais antes da sua aplicação em obra, a ausência de dados detalhados sobre a variação das condições climáticas na envolvente dos materiais e mesmo a ausência de informação sobre o momento em que as superfícies são expostas aos agentes. Nesse sentido, seria de particular interesse desenvolver estudos prospetivos envolvendo a caracterização dos materiais antes da sua utilização em obra, com registo das datas de aplicação e a observação ao longo do tempo do desempenho dos materiais (a formulação destes estudos prospetivos poderia beneficiar das informações obtidas com estudos retrospectivos para o mesmo local). Esta perspetiva prospetiva poderia ser também aplicada nas situações de substituição da pedra ou de intervenções em materiais existentes.

Existem várias medidas de intervenção possíveis tendo em vista a conservação ou a reabilitação do património afetado pela ação do ambiente costeiro. É recomendável realizar uma avaliação dos riscos de efeitos colaterais (também no tratamento da pedra será apropriado prestar atenção ao velho princípio *primum nil nocere*). Incluem-se nestas considerações medidas preventivas como o tratamento dos materiais para aumentar a sua resistência, a criação de barreiras de proteção contra os agentes poluentes (a barreira deverá ser colocada de forma a cortar o fornecimento do poluente, por exemplo na base no caso de poluição por ascensão capilar) e medidas de projeto arquitetónico visando a minimização da exposição aos agentes da deterioração (por exemplo a escolha da orientação dos elementos).

Um procedimento preventivo (Calvo 2004) que não implica a intervenção direta nos objetos afetados (e que é também aplicável a objetos já afetados por poluição) consiste no controlo das condições climáticas, nomeadamente da humidade relativa, para diminuir as condições de secagem para minimizar a cristalização dos sais no meio poroso dos materiais (Alves 2006) e para evitar os ciclos de cristalização dos sais (Arnold e Zehnder 1991, Larsen 2007). Todavia Alves e Sequeira Braga (1994) referem a ocorrência periódica de novos pontos de cristalização e avança da deterioração independentes de variações da humidade relativa e associadas com ciclos de infiltração, processo em que o controlo do clima atmosférico seria insuficiente para minimizar a deterioração a não ser pela manutenção de condições muito elevadas de humidade relativa de forma a evitar a cristalização dos sais.

Outras medidas de intervenção passam pela remoção dos sais e a aplicação de consolidantes (para evitar a continuação da deterioração) e hidrófugos (tendo em vista proteger o meio poroso da entrada de poluentes). Cardell *et al.* (2003b) propõem como política de conservação de materiais de construção expostos ao ambiente marinho a realização rotineira de operações de extração de sais e de consolidação. É necessário ter em consideração a distribuição do poluente e a penetração do produto utilizado, uma vez que, por exemplo, a aplicação de uma camada de proteção superficial em pedras cujo meio poroso já está contaminado por sais solúveis poderá revelar-se prejudicial se promover a cristalização de sais no interior do meio poroso.

As intervenções no património incluem operações de substituição da pedra que são comparáveis a transplantes. Para além da compatibilidade estética e funcional dos novos blocos será necessário considerar a sua potencial durabilidade (volta-se assim ao tema da seleção de materiais).

Por último, será também pertinente considerar a relevância destes estudos para a sustentabilidade dos da construção na medida em que contribuam para a diminuição de consumos associados com a reabilitação/manutenção do ambiente construído e pelas possíveis implicações para a seleção de materiais. Al-Agha (2006) refere a adoção de medidas de proteção tendo em consideração a existência de um ambiente agressivo para os materiais (ambiente costeiro da Faixa de Gaza) e de forma a minimizar o consumo de recursos naturais como a areia que constituem, adicionalmente, as formações geológicas das áreas de recarga dos aquíferos da região. Também a questão da aplicabilidade das areias marinhas será relevante para a sustentabilidade na medida em que se pondere a utilização destas em vez das areias de rio, preservando desta forma estas últimas (Dias *et al.* 2008).

Agradecimentos

Estes estudos beneficiaram de financiamentos nacionais e da União Europeia (FEDER) atribuídos pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) a vários projetos e ao Centro de Investigação Geológica, Ordenamento e Valorização de Recursos (CIG-R). O CIG-R é presentemente financiado por Fundos Nacionais através do projeto estratégico PEst-OE/CTE/UI0697/2011 da FCT.

Referências

- Al-Agha MR (2006) Weathering of building stones and its relationship to the sustainable management of the aggregate resources in Gaza Strip, Palestine. *Building and Environment* 41:676-686.
- Alves CAS (2006) Contribuição para o estudo da deterioração do afloramento rochoso na Fonte do Ídolo. *Monumentos* 24:197-201.
- Alves C (2009) Salt weathering of natural building stones: a review of the influence of rock characteristics. *Building materials: properties, performance and applications*. Nova Science Pub 57-94.
- Alves C, Sequeira Braga MA (1994) Niter and gypsum and their decay effects in a granitic monument of Braga (Portugal). *16th IMA General Meeting* p. 9.
- Alves CAS, Sequeira Braga MA (2000) Decay effects associated with soluble salts on granite buildings of Braga (NW Portugal). *Environmental Mineralogy: Microbial Interactions, Anthropogenic Influences, Contaminated Land and Waste Management* 181-199.
- Alves CAS, Sequeira Braga MA, Trancoso A (2000) Saline pollution in trachyte monuments of the Azores Islands (Portugal). *9th Int Cong Deterior Conserv Stone* v. 1 225-233.
- Arnold A (1996) Origin and behaviour of some salts in context of weathering on monuments. *Origin, Mechanisms, and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments*. Protection and Conservation of the European Cultural Heritage Research Report No. 4 134-139.
- Arnold A, Zehnder K (1991) Monitoring Wall Paintings Affected by Soluble Salts. *The Conservation of wall paintings*, Getty Conservation Institute, 103-135.
- Bernabé E (1996) *Les mécanismes d'altération des monuments historiques en environnement océanique et rural. Application à la conservation de l'église Saint Nonna de Penmarc'h et de la Basilique Notre-Dame du Folgoët*. Tese Dout Univ d'Aix-Marseille.
- Calvo A (2006) *Técnicas e Conservação de Pintura*. Livraria Civilização.
- Cardell C, Rivas T, Mosquera MJ, Birginie JM, Moropoulou A, Prieto B, Silva B, VanGrieken R (2003a) Patterns of damage in igneous and sedimentary rocks under conditions simulating sea-salt weathering. *Earth Surf Proc Landf* 28:1-14.
- Cardell C, Delalieux F, Roumpopoulos K, Moropoulou A, Auger F, Van Grieken R (2003b) Salt-induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France. *Constr Build Materials* 17:165-179.
- Chabas A, Jeannette D (2001) Weathering of marbles and granites in marine environment: petrophysical properties and special role of atmospheric salts. *Environ Geol* 40:359-368.
- Costa EAL, Campos VP, Silva Filho LCP, Greven HA (2009) Evaluation of the aggressive potential of marine chloride and sulfate salts on mortars applied as renders in the Metropolitan Region of Salvador – Bahia, Brazil. *J Environ Management* 90:1060-1068.
- Dias WPS, Seneviratne GAPSN, Nanayakkara SMA (2008) Offshore sand for reinforced concrete. *Constr Build Materials* 22:1377-1384.
- Freeze RA, Cherry JA (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall
- Goudie AS, Viles HA (1997) *Salt Weathering Hazards*. John Wiley & Sons.
- Gurrera MA, Raventos XD, Bou VE, Prada Perez JL, Rocaberra Viñas R, Valenciano Horta A (1994) Degradation forms and weathering mechanisms in the Berà Arch (Terragona, Spain). *3rd Int Symp The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin* 673-679.
- ICOMOS-ISCS (2008) *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*. http://www.international.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf

- Kloppmann W., Bromblet P, Vallet JM, Vergès-Belmin V, Rolland O, Guerrot C, Gosselin C (2011) Building materials as intrinsic sources of sulphate: A hidden face of salt weathering of historical monuments investigated through multi-isotope tracing (B, O, S). *Sci Total Environ* 409:1658-1669.
- Larsen PK (2007) The salt decay of medieval bricks at a vault in Brarup Church, Denmark. *Environ Geol* 52:375-383.
- Limeira J, Etxeberria M, Agulló L, Molina D (2011) Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand. *Constr Build Materials* 25:4165-4174.
- Lucas JAC (1990). *Exigências funcionais de Revestimentos de Paredes*. LNEC ITE25.
- Mausner JS, Kramer S (1984) *Introdução à epidemiologia*. Pinhão RAC, Trad Líng Portuguesa Fund Calouste Gulbenkian.
- Meira GR, Andrade C, Alonso C, Padaratz IJ, Borba JC (2008) Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone – A tool for corrosion studies. *Corrosion Sci* 50:2724-2731.
- Miglio BF, Richardson DM, Yates TS, West D (2000). Assessment of the Durability of Porous Limestones: Specification and Interpretation of Test Data in UK Practice. *Dimension Stone Cladding: Design, Construction, Evaluation, and Repair*, ASTM STP 1394, 57-70.
- Moropoulou A, Theoulakis P, Chrysophakis T (1995) Correlation between stone weathering and environmental factors in marine atmosphere. *Atmos Environ* 29:895-903.
- Mottershead D, Gorbushina A, Lucas G, Wright J (2003) The influence of marine salts, aspect and microbes in the weathering of sandstone in two historic structures. *Building and Environment* 38:1193-1204.
- Oliveira C, Pio C, Caseiro A, Santos P, Nunes T, Mao H, Luahana L, Sokhi R (2010) Road traffic impact on urban atmospheric aerosol loading at Oporto, Portugal. *Atmos Environ* 44:3147-3158.
- Silva B, Rivas T, Prieto B (1996) Relation between type of soluble salts and decay forms in granitic coastal churches in Galicia (NW Spain). *Origin, Mechanisms, and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments*. Protection and Conservation of the European Cultural Heritage Research Report No. 4 183-190.
- Smith BJ, Přikryl R (2007) Diagnosing decay: the value of medical analogy in understanding the weathering of building stones. *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation*, Geological Society Special Publications 271, 1-8.
- Smith BJ, Baptista-Neto JA, Silva MAM, McAlister JJ, Warke PA, Curran JM (2004) The decay of coastal forts in southeast Brazil and its implications for the conservation of colonial built heritage. *Environ Geol* 46:493–503.
- Stefanis N-A, Theoulakis P, Pilinis C (2009) Dry deposition effect of marine aerosol to the building stone of the medieval city of Rhodes, Greece. *Building and Environment* 44:260-270.
- Torfs K, Van Grieken R (1997) Chemical relations between atmospheric aerosols, deposition and stone decay layers on historic buildings at the mediterranean coast. *Atmos Environ* 31:2179-2192.
- Urosevic M, Sebastián-Pardo E, Cardell C (2010) Rough and polished travertine building stone decay evaluated by a marine aerosol ageing test. *Constr Build Materials* 24:1438-1448.
- Zehnder K (1996) Gypsum efflorescences in the zone of rising damp. Monitoring of slow decay process caused by crystallizing salts on wall paintings. *8th Int Cong Deterior Conserv Stone* 1669-1678.