INTEMPERISMO DE SAL EM ROCHAS ORNAMENTAIS EM UM PRÉDIO HISTÓRICO NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO: IMPLICAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS

SALT WEATHERING IN ORNAMENTAL STONES IN A HISTORICAL BUILDING IN THE CITY OF RIO DE JANEIRO: GEOMORPHOLOGICAL IMPLICATIONS

MÉTÉORISATION PAR LE SEL DANS DES ROCHES ORNEMENTALES DANS UN BÂTIMENT HISTORIQUE DANS LA VILLE DE RIO DE JANEIRO: IMPLICATIONS GÉOMORPHOLOGIQUES

JOSÉ ANTÔNIO BAPTISTA NETO

Depto. Geologia e Geofísica /Universidade Federal Fluminense (UFF) - jabneto@id.uff.br

BERNARD J. SMITH
(*IN MEMORIAM*)

JOHN J. MCALISTER

School of Geography/Queen's University, Belfast, Irlanda do Norte, Reino Unido – BT7 1NN.

MARIA AUGUSTA MARTINS DA SILVA

Departamento de Geologia e Geofísica/Universidade Federal Fluminense (UFF) - mariaaugustasilva0@gmail.com

ANDRÉ LUIZ CARVALHO DA SILVA

Faculdade de Formação de Professores (FFP). Depto de Geografia /Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) - andrelcsilva@ig.com.br

Resumo: O sal tem sido apontado como o principal agente de intemperismo de rochas ornamentais em áreas urbanas em todo o mundo. Na Cidade do Rio de Janeiro, os prédios históricos se encontram em avançado estado de degradação, em que parte das rochas que formam suas fachadas se apresenta bem intemperizada. O objetivo deste trabalho é o de entender os processos de intemperismo de sal numa das principais igrejas históricas da Cidade do Rio de Janeiro (a igreja de São Francisco de Paula), demonstrando as implicações geomorfológicas de estudos sobre o intemperismo de sal em ambientes urbanos. A metodologia utilizada consistiu, basicamente, de mapeamento das principais formas de intemperismo dos blocos de rocha mais alterados, análises físico-químicas e MEV nos fragmentos de rochas da construção. Por meio deste estudo, ficou evidente que, apesar da proximidade do mar e de sua influência natural sobre os processos de intemperismo das rochas ornamentais, o intemperismo associado à poluição ambiental de áreas urbanas exerce forte influência sobre essas rochas. Este tipo de intemperismo "antropogênico" atua, concomitantemente, com os processos naturais, acelerando-os e intensificando a degradação pelo intemperismo do sal. A destruição das rochas em fachadas de prédios históricos, diferentemente do que ocorre nas rochas em ambiente natural, apresenta grandes implicações geomorfológicas, principalmente quando se considera a importância história e cultural destas construções.

Palavras-chaves: intemperismo de sal, processos geomorfológicos, poluição urbana, rochas ornamentais.

Abstract: The salt has been pointed out as one of the main causes of deterioration of stonework in urban areas all over the world. In the city of Rio de Janeiro the historical buildings are in advanced stage of desintegration, where part of the rocks that compose the facades are strongly decomposed. The aim of this paper is to understanding the salt weathering processes in one of the main historical church in Rio de Janeiro city (São Francisco de Paula church), demonstrating the geomorphological implications of the salt weathering in the urban environment. The methodology comprised mapping of the main weathering forms of blocks most altered, physico-chemical analysis and SEM in rock fragments of the building. Through this study it was evidenced that despite of the proximity of the sea and its influences on the natural processes of weathering of the stonework, the weathering associate with the environmental pollution in urban areas exerts strong influences on the rocks. This type of "anthropogenic" weathering acts concomitantly with the natural processes speeding up the processes that would take more time to occur. The destruction of these rocks on the historical building facades, differently from the rocks in the natural environment presents great geomorphological implications, especially because the history and cultural importance of these buildings.

Keywords: salt weathering, geomorphological processes, urban pollution, building stones.

Résumé: Le sel est considéré le principal agent d'altération des roches ornementales dans les zones urbaines patout dans le monde. Dans la ville de Rio de Janeiro les bâtiments historiques sont dans un état de dégradation avancé, où une partie des roches qui forment leur façade se présentent très météorisées. L'objectif de ce travail est de comprendre les processus de météorisation par le sel dans une des principales églises historiques de la ville de Rio de Janeiro, l'église de São Francisco de Paula, en présentant les implications des études géomorphologiques sur la météorisation par le sel en milieu urbain. La méthodologie a consisté principalement de l'identification des principales formes de météorisation de blocs de roches plus altérées, des analyses physico- chimiques et MEB dans des fragments de roche de l'immeuble. Grâce à cette étude, il était évident que, malgré la proximité de la mer et de son influence naturelle sur les processus d' altération des roches ornementales, la météorisation associée à la pollution de l'environnement dans les zones urbaines a une forte influence sur ces roches. Ce type d'altération "anthropique" se déroule concomitamment aux processus naturels, en les l'accélérant et provoquant l'intensification de la dégradation par la météorisation par le sel. La destruction de ces roches sur les façades des bâtiments historiques, contrairement à ce qui se passe sur des roches dans le milieu naturel, présente des fortes implications géomorphologiques, surtout si l'on considère l'importance historique et culturelle de ces bâtiments.

Mots clés: météorisation par le sel, processus géomorphologiques, pollution urbaine, roches ornementales.

INTRODUÇÃO

O poder do intemperismo de sal como processo geomorfológico tem sido sugerido tanto com base em investigações de campo em diversos ambientes (tropicais, áridos, costeiros e urbanos, entre outros) quanto em investigações decorrentes de simulações em laboratório (Rodriguez-Navarro e Doehner, 1999). O sal tem sido apontado como o principal agente de intemperismo de rochas ornamentais em áreas urbanas, em todo o mundo (Smith e Magee, 1990; Kuchitsu et al., 1999; Bai et al., 2003; Cardell et al., 2003; Lopez-Arce e Garcia-Guinea, 2005; Baptista Neto et al., 2006; Smith et al., 2007). No ambiente urbano, o sal pode ter diferentes origens: tratamento inadequado das rochas, poluição do ar, descongelamento de superfícies cobertas por neve e solos. A umidade e a ascensão das águas do lençol freático são fontes que precisão ser consideradas. Alguns materiais podem, inclusive, conter sais em sua composição.

Em áreas costeiras, a deposição de sal na fachada de prédios e monumentos históricos é derivada, principalmente, dos aerossóis marinhos (Zezza e Macri, 1995; Moropoulou et al., 1995; Cardell et al., 2003). A ação mecânica do processo de cristalização do sal pode exercer pressão capaz de destruir até mesmo as rochas mais resistentes (La Iglesia et al., 1994; Goudie e Viles, 1997). Os sais podem causar danos por meio de uma grande variedade de formas, mas, obviamente, eles podem migrar em solução para dentro dos poros da rocha, onde, então, podem cristalizar pela evaporação. O contínuo crescimento dos cristais tende a provocar uma pressão no interior das rochas, o que pode, eventualmente, gerar forças suficientes para romper muitos tipos de rochas, sobretudo se elas já estiverem enfraquecidas por outros processos (Smith et al., 2007). A maior ou menor resistência a este mecanismo é condicionada pela durabilidade das rochas, que depende de suas próprias propriedades intrínsecas (mineralogia, textura e estrutura) e do ambiente em que estão expostas (poluição do ar,

proximidade com o litoral etc.) (Cardell et al., 2003). A combinação destes fatores leva a diferentes padrões de degradação da rocha (Fitzner et al, 1995).

A Cidade do Rio de Janeiro (Figura 1) possui um dos mais importantes patrimônios arquitetônicos do Brasil, por ter sido a capital da colônia e, posteriormente, a capital do império. No entanto, muitos destes prédios se encontram em avançado estado de degradação, com partes das rochas de suas fachadas se apresentando bem intemperizadas. O objetivo deste trabalho é entender os processos de intemperismo do sal em uma das principais igrejas históricas da Cidade do Rio de Janeiro – a igreja de São Francisco de Paula (figuras 1 e 2) –, demonstrando as implicações geomorfológicas do intemperismo causado pelo sal em ambientes urbanos próximos ao litoral.

Caracterização ambiental da área

A área metropolitana do Rio de Janeiro está próxima ao mar, e, em função desta característica geográfica, apresenta uma grande concentração de umidade atmosférica. Ventos úmidos vindos do oceano propiciam um elevado índice pluviométrico (1000 a 1500 mm/ano), com chuvas concentradas, principalmente, entre os meses de dezembro e abril.

O relevo acentuado e a maritimidade contribuem para amenizar a sensação térmica em meio a elevadas temperaturas, na Cidade do Rio de Janeiro, que apresenta uma temperatura média anual entre 200C e 250C. O relevo pouco recortado permite uma grande penetração de ventos para o interior do estado, facilitando a dispersão de sais marinhos e poluentes atmosféricos.

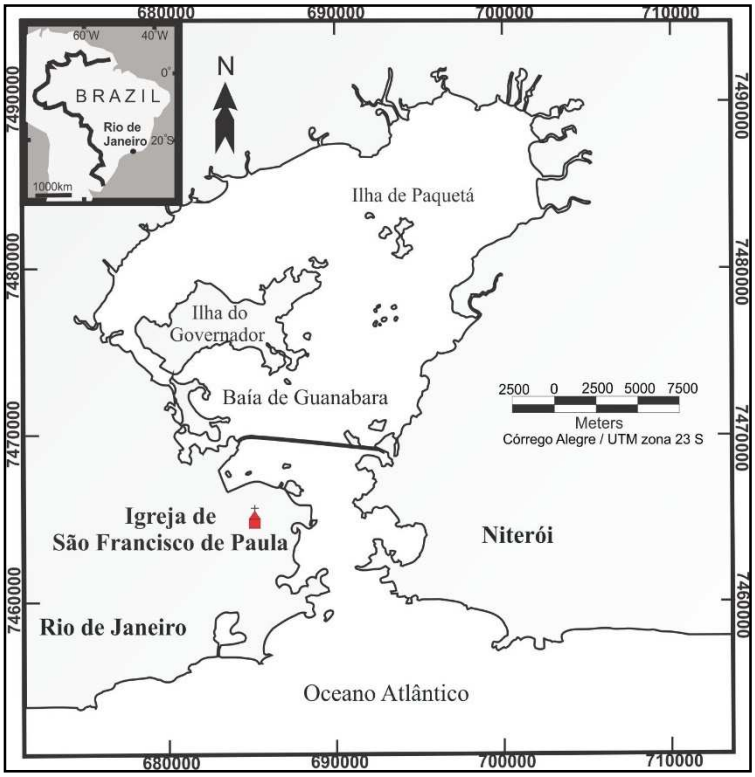


Figura 1 – Área de estudo mostrando a localização da igreja de São Francisco de Paula, na área central da Cidade do Rio de Janeiro.

Os níveis de poluição atmosférica desta área foram revistos por Moreira-Nordemann et al. (1988). Estes autores identificaram elevados níveis de emissão de enxofre, na área urbana, na sua maioria, depositados localmente como consequência da circulação de ventos, que atuam entre as construções e em direção às encostas. Esta área apresenta um grau de poluição maior do que os centros de São Paulo e Belo Horizonte. A deposição total de enxofre foi estimada em 6gr/m2/ano, e a concentração média de bióxido de enxofre excede a 90mg/m2. Estes valores foram encontrados em cinco das sete estações de monitoramento localizadas na Floresta da Tijuca, no centro da Cidade do Rio de Janeiro, que apresentou pH entre 4.16 e 6.05 (Moreira-Nordemann, et al., 1988).

No referido estudo, os autores sugerem também uma alta taxa de deposição de sódio (2.2 t/km2 /ano) e de cloro (4.2 t/ km2 /ano), presumindo que eles ocorram na forma de NaCl, originando-

se do sal da água marinha. Lamentavelmente, poucas são as informações disponíveis sobre outros poluentes ácidos. No entanto, Moreira-Nordemann et al. (1988), baseando-se em um estudo realizado pela antiga Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA), em 1985, revelam uma emissão dos componentes de enxofre dentro da Cidade do Rio de Janeiro e afirmam que 35% desta emissão à atmosfera são provenientes de veículos automotores.

A igreja de São Francisco de Paula localiza-se na rua do Teatro, no largo de São Francisco, na parte central da Cidade do Rio de Janeiro (figuras 1 e 2), numa região cercada por altos prédios (o que dificulta a circulação do ar), e cujo entorno, até recentemente, servia como terminal de ônibus municipais. A sua construção teve início em 5 de janeiro de 1759. Em 1801, foi terminada a parte de alvenaria, passando-se, depois, à parte artística, concluída em 7 de março de 1865. A igreja de São Francisco de Paula é um exemplo típico da arquitetura colonial brasileira, construída em alvenaria, e tendo sua fachada revestida por blocos de granito (Figura 2).



Figura 2 – Igreja de São Francisco de Paula, vista do alto (A). Fachada da igreja revestida, em grande parte, por blocos de granito (B).

Os elevados níveis de emissão pelos automóveis são refletidos na aparência física de muitas construções, no centro urbano, onde a intensidade do tráfego é, com frequência, canalizada através das ruas, cercadas por altos prédios. A poluição tende a se

concentrar e a persistir nestes corredores, sendo o seu efeito, em longo prazo, mais perceptível a partir da presença de uma camada de fuligem em muitos prédios, principalmente próxima ao nível da rua. Associada a esta fuligem, é possível observar a desintegração granular e esferoidal nas rochas, em especial, nos antigos prédios eclesiásticos e governamentais, que representam as construções mais bem preservadas, no centro da Cidade do Rio de Janeiro (Smith & Magee, 1990).

Metodologia

Com o objetivo de caracterizar os principais agentes que afetam o intemperismo das rochas ornamentais da fachada da igreja de São Francisco de Paula, foram coletadas amostras de rochas com considerável grau de intemperismo ou que apresentavam ocorrência de crostas. No laboratório, os fragmentos de rochas foram submetidos a diferentes análises para a identificação dos principais componentes responsáveis pela alteração deste material. Devido à dificuldade de se trabalhar com amostras de rochas em prédios históricos, só foi possível coletar pequenos fragmentos (geralmente, <2cm de diâmetro de crosta), na superfície das rochas.

Nas áreas mais degradadas da fachada da igreja São Francisco de Paula, foram conduzidos mapeamentos detalhados, com o intuito de classificar as principais formas de intemperismo. Estes mapeamentos permitiram a identificação e o registro do tipo e extensão dos processos intempéricos e a confecção de mapeamento em detalhe, facilitando a identificação dos diferentes produtos do intemperismo.

Pequenas lascas de rocha e crostas negras foram montadas em stubs de alumínio separados e, posteriormente, revestidos de ouro para a análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Para tal, foi utilizado um equipamento de modelo Joel Winsen JSM 6400, com o objetivo de identificar possíveis sais na superfície das

rochas e nas crostas. As amostras analisadas foram trituradas num moinho de ágata e fracionadas numa peneira de malha de 63μm. Cerca de dois gramas de cada amostra foram agitados em uma solução contendo 10 ml de água deionizada, por duas horas. Em seguida, as amostras foram colocadas em repouso, por doze horas, em temperatura ambiente. Na etapa seguinte, as amostras foram centrifugadas e passadas em um filtro de 0.2μm. Os cátions Na, K, Mg, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu e Zn foram analisados, utilizando-se um espectrofotômetro de absorção atômica (AAS). Uma chama de ar/acetileno foi empregada para atomizar as soluções de amostra. Cada amostra foi analisada pela cromatografia de íons (IC, Dionex DX 500) para os íons F, Cl, NO3, PO4 e SO4, com limite de detecção para cada íon inferior a 0.5ppm.

Apresentação e discussão dos dados

A implantação de medidas visando à preservação das rochas ornamentais em prédios históricos requer um conhecimento em detalhe do estado de intemperismo dos blocos de rochas na construção do edifício. O mapeamento das formas é um método que permite o registro do tipo, extensão e distribuição da degradação aparente do intemperismo. Este procedimento requer uma classificação esquemática de suas formas. Na literatura, existem várias formas de classificação dos tipos de intemperismo presentes em fachadas de rochas (Fitzner et al., 1995; Fitzner et al., 2003; Silva e Roeser, 2003; Warke et al., 2003). Neste caso, foi utilizada a classificação proposta por Fitzner et al. (1995), que apresentou um dos mais detalhados métodos de classificação e mapeamento das formas de intemperismo. Segundo estes autores, estas formas são resultantes dos processos de degradação que ocorrem na superfície das rochas, iniciados e controlados pela interação dos vários fatores de intemperismo. Estes fatores e os processos associados podem, normalmente, ser identificados e quantificados somente em larga escala e num período longo de investigação. As rochas ornamentais

em monumentos e fachadas de prédios históricos, assim como outros materiais na superfície da Terra, são sujeitas à interação de um sistema complexo e aberto na natureza. Assim, uma correlação genética clara entre fatores, processos e formas de intemperismo pode ser estabelecida de modo restrito. No entanto, a associação das formas de intemperismo, com a análise laboratorial, pode proporcionar um entendimento detalhado da interação entre estas partes (fatores, processos e formas de intemperismo), nas fachadas dos prédios históricos. Por meio do mapeamento das áreas revestidas com rochas ornamentais, pode-se constatar um elevado grau de intemperismo em grande parte da fachada da igreja (Figura 3). A alteração dos blocos de rocha se apresenta mais intensa próxima ao nível da rua. A forma de intemperismo mais abrangente corresponde à desintegração granular, seguida pela esferoidal, e mesmo à associação destas duas formas (Figura 3), que são típicas do intemperismo causado pela ação do sal, como ressaltam Smith e Magee (1990).

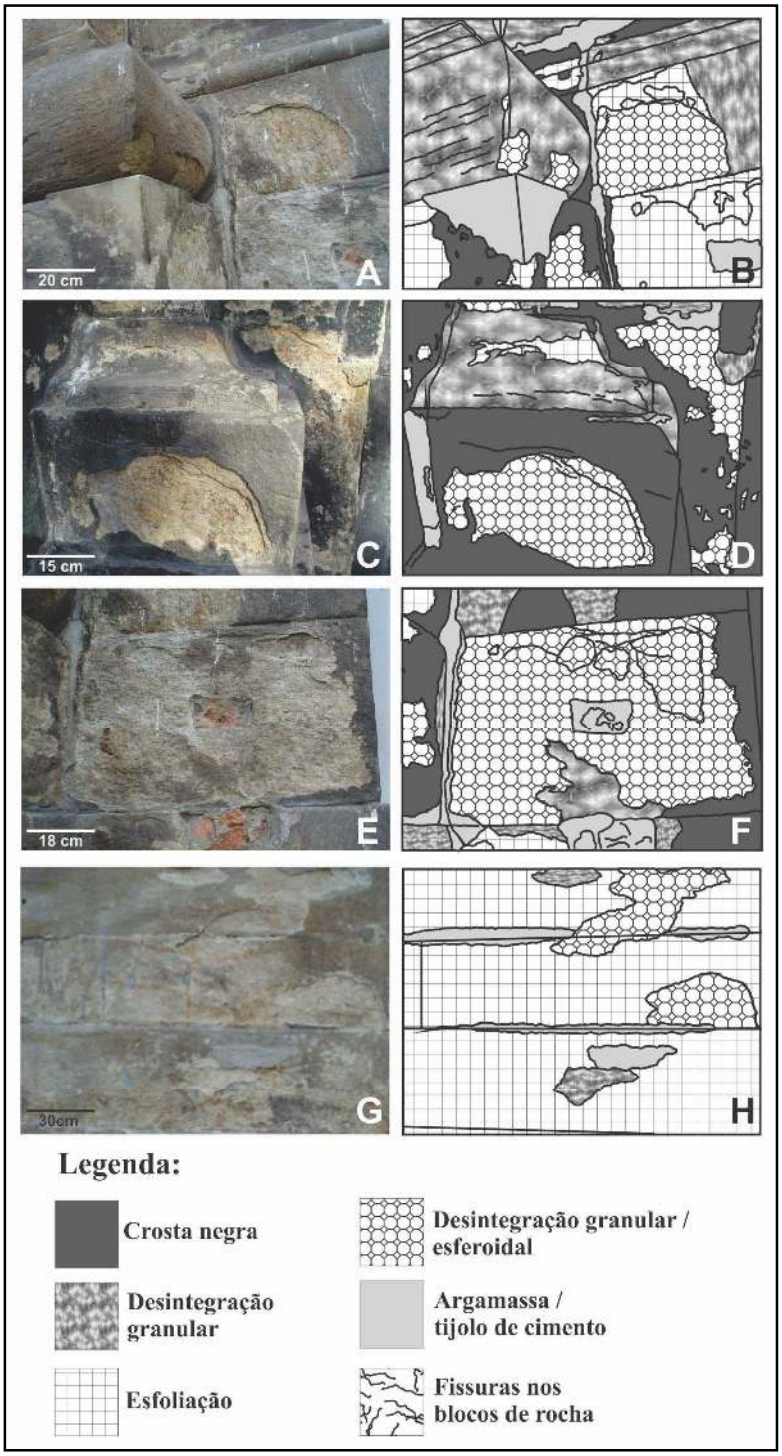


Figura 3 – Mapeamento das principais formas de intemperismo nos blocos de rocha da fachada da igreja de São Francisco de Paula.

As amostras dos fragmentos de rocha intemperizadas, analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), permitiram identificar grande quantidade de sais, com destaque para a halita e a gipsita (Figura 4). Os cristais de halita ocorrem tanto na superfície da rocha, quanto em forma de cristais entre as placas de mica, o que comprova a efetiva ação deste sal na desintegração das rochas. De acordo com Cardell et al (2003), o stress físico resultante da cristalização do sal, nos poros das rochas, é o mais importante mecanismo de deterioração de rochas ornamentais. Já a gipsita ocorre, principalmente, nas áreas afetadas pela presença de crostas negras ou em fraturas das rochas.

A existência de grande quantidade de fontes potenciais de sais nos prédios, em áreas urbanizadas, torna ainda mais complexa a identificação dos agentes responsáveis pelos efeitos do intemperismo. Em muitas cidades, uma fonte importante deste fenômeno tem relação com a ascensão da água subterrânea, que pode produzir uma mistura complexa de sais, dependendo da química desta água, e cujos efeitos são concentrados na base do prédio. Esta é uma das principais fontes de halita para o ambiente urbano (Goudie e Viles, 1997). Outra importante fonte potencial de sais, neste ambiente (particularmente, em regiões costeiras), é o aerossol marinho. A distribuição deste aerossol, num prédio, é compatível com aquelas oriundas da poluição atmosférica, porque, como aerossol, elas são também carreadas pelo fluxo de ar e depositadas em diversos tipos de estruturas. A química destes sais, no entanto, é muito diferente, uma vez que estes podem conter uma mistura de sais, incluindo sulfato de cálcio e até mesmo sais mais solúveis, como a halita (cloreto de sódio), o cloreto de magnésio e outros, que até podem ser dominantes.

Outra fonte importante de sais para o ambiente urbano está relacionada à poluição atmosférica referente à exaustão de veículos. Os resultados das análises com o MEV mostram uma grande quantidade de ocorrências de cinzas de combustíveis fósseis (Figura 4), que representam uma fonte potencial para a ocorrência

de gipsita (CaSO4.2H2O). Para Duffy et al. (1993), a gipsita é o mais agressivo entre todos os sais, e tem sido largamente identificada em monumentos rochosos de diversas partes do mundo (Cardell et al., 2003; Torok, 2003) – em especial, na Cidade do Rio de Janeiro. Durante os eventos de chuva, as argamassas ricas em cálcio são sujeitas a processos de dissolução. Quando a chuva cessa, aumentam as concentrações de enxofre no meio ambiente, nas formas gasosas e particuladas, e, com isso, a quantidade de cálcio disponível nas construções (Smith e Magee, 1990; Baptista Neto et al., 2006; Smith et al., 2007). Os sulfatos são absorvidos pela camada úmida. Após a evaporação, é formado o CaSO4.2H2O, na superfície da rocha e internamente, por meio do preenchimento das microfraturas e poros (Duffy et al., 1993). Na área de estudo, a gipsita (Figura 4) representa um dos minerais mais observados, na superfície das crostas negras, formadas na superfície das rochas.

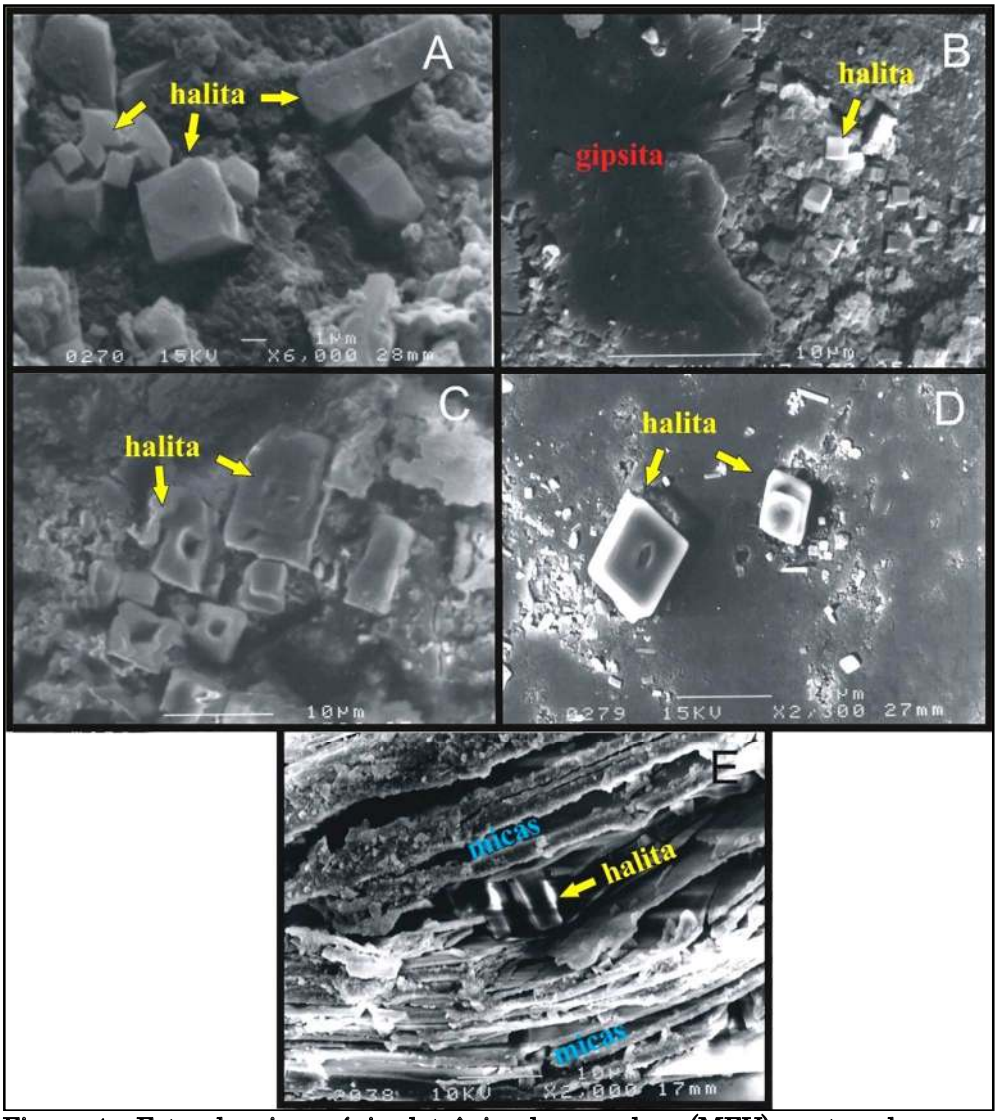


Figura 4 – Fotos do microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostrando a acumulação de cristais de halita (A, B, C, D), na superfície da rocha e entre os planos de clivagem das micas, causando deformação e quebra (E) e a formação de cristais de gipsita em associação com a halita (B).

A consequência desse grande número de fontes de sais é que, em qualquer superfície de rocha, é possível encontrar uma mistura de tipos diferentes de sais. Evidências experimentais (Rodriguez-Navarro e Doehne, 1999) têm demonstrado que, quando a superfície de uma rocha é umedecida com soluções contendo uma mistura de vários sais e posteriormente é seca, a decomposição é,

muitas vezes, mais rápida do que aquela experimentada quando se utilizam soluções contendo um só tipo de sal. Este sinergismo é, normalmente, explicado a partir das propriedades dos diferentes tipos de sais envolvidos e a capacidade de cada um se expandir nos poros e zonas de fratura dentro das rochas, bem como pelas diferentes exposições em condições ambientais variadas. Este mecanismo é particularmente importante, em prédios históricos localizados em ambientes poluídos, nos quais uma mistura de sais pode, por exemplo, explorar uma faixa ampla de possibilidades de pontos de hidratação/desidratação. Isto significa que processos relativos à expansão-contração podem ser detonados em consequência de diferentes condições de tempo, e não somente por condições específicas relacionadas com combinações de temperatura e umidade relativa. Tal mecanismo já havia sido observado anteriormente, na Cidade do Rio de Janeiro (Baptista Neto et al., 2006; Smith et al., 2007; Smith e Magee, 1990), onde a gipsita e a halita são encontradas juntas (Figura 4), sendo a gipsita na superfície e a halita (mais solúvel) penetrando nos espaços porosos e nas fraturas com mais facilidade.

As análises de cromatografia de íons e absorção atômica demonstraram as altas concentrações de diversos elementos que comprovam a importância dos sais nos processos de intemperismo, assim como corroboram as demais análises realizadas neste estudo. Os elementos que apresentaram grandes concentrações foram: SO4, NO3, Cl, Ca e Na (Tabela 1). A Figura 5 mostra as principais correlações dos elementos analisados, demonstrando a ocorrência de alguns sais como: halita (NaCl), gipsita (CaSO4), bichofita (MgCl), nitrotina (NaNO3), silvita (KCl), arcanita (KSO4) e langbeinita (KMg).

A halita tem sido reconhecida como um sal capaz de causar danos em vários tipos de rochas empregadas em construções (Evans, 1970; Chapman, 1980; Winkler, 1994). Contudo, experimentos em laboratório comparando os efeitos sobre a rocha de diferentes tipos de sais mostram que a cristalização da halita

(NaCl) produz uma desagregação inferior àquela causada por outros sais, como os sulfatos, carbonatos ou nitratos (Kwaad, 1970; Goudie et al., 1970; Smith e McGreevy, 1983, 1988; Goudie, 1986, 1993; Desarnaud et al., 2011). As análises com o MEV permitiram verificar a ocorrência de cristais de gipsita entre os planos de clivagem das micas, causando deformação e quebra destes minerais (Figura 4E). Este sal é considerado um dos principais responsáveis pela degradação das rochas ornamentais em prédios e monumentos históricos, devido, principalmente, à sua mobilidade entre as microfraturas das rochas (Schaffer, 1932; Evans, 1970; Cooke, 1979; Sperling e Cooke, 1985; Goudie e Viles, 1997; Baptista Neto et al., 2006; Desarnaud et al., 2011).

Tabela 1 – Concentrações (ppm) dos principais elementos detectados no material removido da fachada da igreja de São Francisco de Paula.

sample	F (ppm)	Cl (ppm)	NO_3 (ppm)	PO_4 (ppm)	SO_4 (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)
1	1.11	13.4	28.8	0	133.5	0.7	0.25
2	2.71	431.8	414.8	0	279	0	0.55
3	0	24.5	49.8	35.1	176.3	1.5	0.2
4	0	344.1	1147.3	0	2750.4	0.05	0.6
5	0	396.3	1160.1	0	7693.7	0.05	0.45
6	0	415	1162.2	0	6944.6	0.05	0.55
7	0	1646	3096.3	0	7835.1	0.1	0.2
8	0	89.3	194.9	0	3713.5	0	0.5

Tabela 1 (continuação) – Concentrações (ppm) dos principais elementos detectados no material removido da fachada da igreja de São Francisco de Paula.

Sample	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Cr (ppm)	Ni (ppm)	Ca (ppm)	Mg(ppm)	Na (ppm)	K(ppm)
1	0,3	0	0	0	0	50,5	5,5	4,5	6
2	0,25	1,05	0,25	0	0	305	19	135	65
3	0,6	2,85	0,25	0	0	75	7	25	75
4	0,2	0,9	0,45	0	0,35	1160	33,5	300	220
5	0,1	4,35	0,8	0	1	3600	42,5	200	220
6	0,75	2,75	0,65	0	0,45	2850	26	200	205
7	0,05	1,7	1	0	1,05	3950	125	750	460
8	0,35	1,7	0,2	0	0	1345	17	95	125

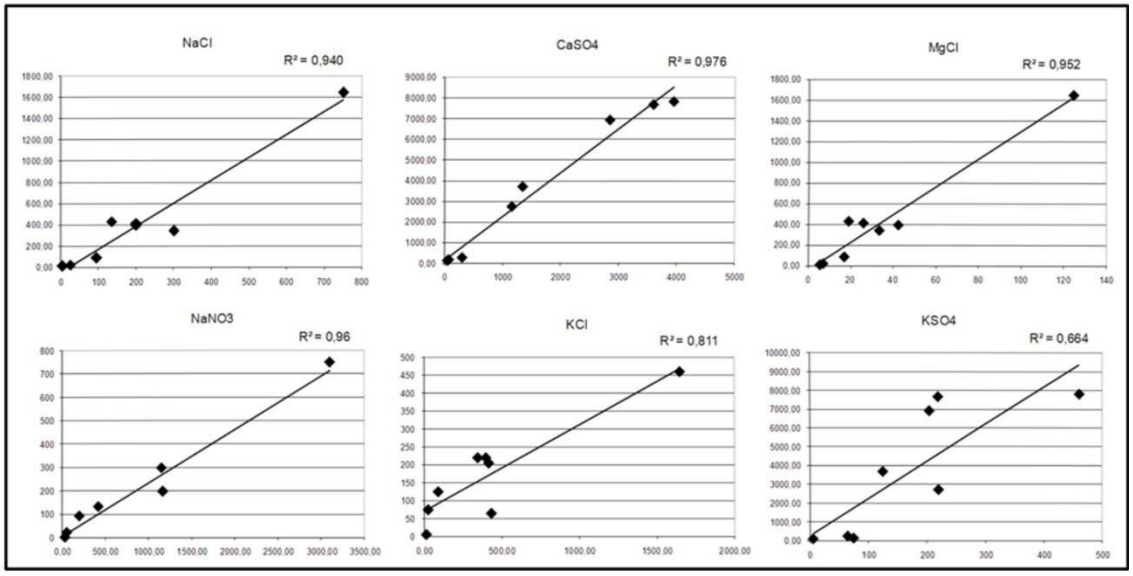


Figura 5 – Correlação entre alguns elementos químicos.

A degradação de rochas em ambiente urbano e sua relevância para o intemperismo das rochas

O estudo das formas e processos relacionados ao intemperismo tem despertado pouco interesse da comunidade científica no Brasil. Entre os geomorfólogos, este tema é, comumente, tratado como um fenômeno relacionado à geologia ou no âmbito da pedologia. Estudos envolvendo os processos erosivos tendem a negligenciar o papel do intemperismo diante da ação dos rios, do vento, do gelo e das ondas em remover os materiais da superfície rochosa por onde atuam.

O entendimento do papel do intemperismo, no âmbito da geomorfologia urbana, requer, necessariamente, um conhecimento de física, química e, cada vez mais, de biologia, que são campos de conhecimento pouco explorados no treinamento dos geomorfólogos. Isto pode, contudo, ser superado por meio de iniciativas e cooperações de caráter interdisciplinar, envolvendo projetos de pesquisa que permitam uma troca de conhecimentos visando ao desenvolvimento de estudos acerca do papel do intemperismo no

ambiente urbano. Uma das dificuldades em relação a este campo de conhecimento decorre do fato de que a maioria dos processos de intemperismo é "oculta", considerando-se que eles ocorrem numa escala microscópica e, quase sempre, internamente na rocha, o que dificulta a observação e a medição do avanço da frente de intemperismo e dos processos associados.

Os processos naturais de intemperismo, pelo menos na perspectiva humana, ocorrem muito lentamente. Isto, de novo, dificulta a mensuração e requer tanto um longo período de observação quanto técnicas muito acuradas para se detectarem mudanças nas propriedades estruturais das rochas. Sendo assim, o produto final nem sempre reflete a influência de mais de uma condição ambiental. Esta sobreposição não é incomum, na geomorfologia. No entanto, difere de muitos processos erosivos, em que as mudanças ambientais podem resultar numa aceleração ou redução de mecanismos fundamentalmente similares. Os efeitos das mudanças ambientais no intemperismo podem estimular mecanismos relacionados a processos completamente distintos. Sobrepostos a essas complexidades temporal e espacial, em que o intemperismo pode, por exemplo, ser condicionado por pequenas mudanças relacionadas a microclimas, as variações no grau de abrigo da chuva e o padrão detalhado do fluxo de ar sobre o afloramento também representam variáveis em potencial. Finalmente, após toda esta complexidade aqui apresentada, deve-se considerar também a necessidade de se conhecerem as propriedades das rochas e se identificarem aquelas que reflitam as mudanças promovidas pelo intemperismo.

Por conta dessas complexidades mencionadas, não é surpreendente que os estudos de intemperismo se baseem, frequentemente, em experimentos de laboratório para analisarem os processos de degradação sob condições controladas (Goudie e Viles, 1997; por exemplo). No caso das pesquisas envolvendo o intemperismo de sal, simulações em laboratório têm sido empregadas para acelerar a degradação da rocha, ao mesmo tempo

em que são isolados, simultaneamente, os efeitos da temperatura e da umidade, propriedades das rochas e tipos de sal. O uso destas simulações voltadas para o entendimento do intemperismo em ambientes desérticos quentes foi, recentemente, revisado por Smith et al. (2007). Estes autores destacaram os avanços obtidos com as simulações, mas também ressaltaram que estas permaneciam como uma abstração da realidade em relação ao intemperismo natural das rochas.

Contudo, estudos envolvendo construções históricas em áreas urbanas têm aumentado de modo significativo, e são importantes instrumentos para o entendimento não somente do nível de degradação das rochas em ambientes urbanizados, como também dos processos de intemperismo das rochas em geral e, em especial, daqueles associados à cristalização de sais. Smith et al. (2003) chamaram a atenção para as vantagens de se utilizarem prédios, em oposição a simulações em laboratórios sob condições controladas. Destacaram que o "laboratório urbano" permite evitar questionamentos relacionados, por exemplo, ao regime de temperatura, ao tipo de sal e às condições ambientais.

O estudo de rochas usadas na construção, todavia, permite o isolamento de grande quantidade de variáveis que controlam o intemperismo. Diferentemente dos afloramentos de rochas naturais, é possível, em prédios, conhecer com precisão a idade de exposição destas a determinadas condições. O uso de edificações de diferentes idades permite estabelecer sequências de degradação e, assim, conhecer a história do estresse sofrido pelas rochas ornamentais nestes prédios (e quando estas ainda se encontravam sob condições naturais). O estresse sofrido por estas rochas inicia-se antes mesmo do seu emprego na construção de prédios e monumentos. O histórico de estresse começa na fase de pré-utilização da rocha, associada à mineração e ao corte. Soma-se a isto o histórico de estresse inerente à pós-utilização da rocha, influenciado por fatores como as técnicas usadas na construção e a exposição da rocha ornamental a condições ambientais prévias,

incluindo-se, neste caso, os diferentes regimes de poluição (Warke, 1996).

Pesquisas dessa natureza têm crescido conforme a tendência dos pesquisadores de selecionarem determinados tipos de rochas em função das suas propriedades físicas e químicas, o que permite comparações entre áreas com diferentes condições ambientais. Em contraste, os arquitetos tendem a utilizar rochas de diferentes características, selecionadas, prioritariamente, por razões estéticas. Desta forma, torna-se possível discriminar controles distintos em função das propriedades das rochas, mesmo expostas às mesmas condições ambientais. Em alguns casos, rochas adjacentes podem interagir de forma adversa. Por exemplo, em atmosfera urbana rica em enxofre, a sulfatação do carbonato de cálcio em gipsita pode representar um dos mais danosos agentes do intemperismo de sal (Smith et al, 2007), e, como foi constatado, neste estudo, devido à ação da água da chuva que lava a superfície da rocha, deslocando os contaminantes para suas partes mais internas, intensificando a degradação pela cristalização de sais em seu interior.

Conclusões

Com base em observações de campo e análises laboratoriais, além de um amplo levantamento bibliográfico sobre o tema em questão, verificou-se a importância do intemperismo do sal na degradação de rochas ornamentais em prédios históricos na Cidade do Rio de Janeiro, utilizando-se, como estudo de caso, a igreja de São Francisco de Paula.

As rochas graníticas e gnáissicas, em ambientes urbanos, são submetidas a um estresse resultante da exposição da rocha a uma grande variedade de poluentes, que atingem concentrações elevadas nestes ambientes. A destruição dessas rochas em fachadas de prédios históricos, diferentemente das rochas no ambiente natural, é mais intensa e rápida, apresentando, portanto, grandes

implicações geomorfológicas, sobretudo quando se considera a importância história e cultural dessas edificações.

A proximidade com o mar e a sua influência natural sobre os processos de intemperismo, associadas à influência de diversos poluentes ambientais comumente concentrados nas grandes cidades, são fatores que contribuem para a intensificação dos processos responsáveis pela degradação das rochas ornamentais. O fornecimento de cinzas de combustíveis fósseis pelos veículos automotores e a formação de crostas de sais (como a gipsita e a halita) sobre a fachada dos prédios produzem diversas formas de intemperismo, tais como a desintegração granular e esferoidal e a esfoliação, entre outras. Portanto, por meio deste estudo, foi possível constatar que esse tipo de intemperismo ocorrido em ambiente urbanizado – e, portanto, "antropogênico" – atua, concomitantemente, com os processos naturais, acelerando-os e intensificando a degradação pelo intemperismo do sal.

Agradecimentos

Este projeto contou com o apoio financeiro de um programa de cooperação científica financiado pelo Conselho Britânico e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e com o apoio financeiro da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ). Os autores agradecem à técnica Júlia Simpson pelas análises no IC e aos técnicos da Electron Microscope Unit da Universidade de Queen's, em Belfast, na Irlanda do Norte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAI, Y.; THOMPSON, G. E.; MARTINEZ-RAMIREZ, S.; BRUEGERHOFF, S. *Mineralogical study of salt crust formed on historic building stones. The Science of the Total Environment*, 302: 247-251, 2003.

BAPTISTA NETO, J. A.; SMITH, B. J.; MCALISTER, J. J.; SILVA, M. A. M.; CASTANHEIRA, F. "Surface modification of a granite building stone in central Rio de Janeiro." In: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(2): 1-14, 2006.

CARDELL, C.; DELALIEUX, F.; ROUMPOPOULOS, K.; MOROPOULOU, A.; AUGER, F.; VAN GRIEKEN, R. *Salt-induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France. Construction and Building Materials*, 17: 165-179, 2003.

CHAPMAN, R. W. "Salt weathering by sodium chloride in the Saudi Arabian desert." In: *American Journal of Science*, 280: 116-129, 1980.

COOKE, R. U. *Laboratory simulation of salt weathering processes in arid environments, Earth Surface Processes*, 4: 347-359, 1979.

_____. *Salt weathering in deserts. Proceedings of the Geologist Association*. London, 92: 1-16, 1981.

DESARNAUD, J.; BERTRAND, F.; SHAHIDZADEH-BONN, N. "Dynamics of salt crystallization." In: IOANNOU, I.; THEODORIDOU, M. (eds). *Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures*. SWBSS, Chipre, 23-30, 2011.

DOEHNE, E. "In situ dynamics of sodium sulfate hydration and dehydration in stone pores: observation at high magnification using Environmental Scanning Microscopy." In: FASSINA, V.; OTT, H.; ZEZZA, F. (eds). *Proceedings of IIIrd International Congress on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*. CMU. Venice, 143-150, 1994.

DUFFY, A. P.; COOPER, T. P.; PERRY, S. H. *Repointing for conservation of historic stone building in Trinity College Dublin. Material and Structures*. Rilem, Paris, 26, pp. 302-306, 1993.

EVANS, I. S. "Salt crystallization and rock weathering: a review." In: *Revue de Geomorphologie Dynamique,* 19: 155-177, 1970.

FITZNER, B.; HEINRICHS, K.; KOWNATZKI, R. *Weathering forms – classification and mapping/Verwitterungsformn-Klassifizierung und Kartierung. Denkmalpflege und Naturwissenschaft*, Naturstein-Konservierung, vol. 1. Berlin: Verlag Ernst & Sohn. P. 41-88, 1995.

_____; _____; LA BOUCHARDIERE, D. "Weathering damage on Pharaonic sandstone monuments in Luxor-Egypt." In: *Building and Environment*, 38: 1089-1103, 2003.

GOUDIE, A.; COOKE, R.; EVANS, I. S. *Experimental investigation of rock weathering by salts*. Area, 4: 42-48, 1970.

_____; VILES, H. *Salt weathering hazards*. John Wiley & Sons, London, UK. 256p, 1997.

_____. *Laboratory simulation of the wick effect in salt weathering of rock. Earth Surface Processes and Landforms,* 11: 275-285, 1986.

_____. *Salt weathering simulation using a single-immersion technique. Earth Surface Processes and Landforms*, 18: 369-373, 1993.

KWAAD, F. J. P. *Experiments on the granular disintegration of granite by salt actions.* Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, 16: 67-80, 1970.

KUCHITSU, N.; ISHIZAKI, T.; NISHIURA, T. "Salt weathering of the monuments in Ayutthaya, Thailand." In: *Engineering Geology*, 55: 91-99, 1999.

LA IGLESIA, A.; GARCIA DEL CURA, M. A.; ORDENEZ, S. "The physico-chemical weathering of monumental dolostones, granites and limestones; dimension stones of the Cathedral of Toledo (Spain)." In: *The Science of the Total Environment,* 152: 179-188, 1994.

LOPEZ-ARCE, P.; GARCIA-GUINEA, J. "Weathering traces in ancient bricks from historic buildings." In: *Building and Environment*, 40: 929-941, 2005.

MOROPOULOU, A.; THEOULAKIS, P.; CHRYSOPHAKIS, T. "Correlation between stone weathering and environment factors in marine atmosphere." In: *Atmospheric Environment*, 29(8): 895-903, 1995.

MOREIRA-NORDERMANN, L. M.; FORTI, M. C.; DILASCO, V. L.; MOREIRA, A.; ESPIRITO SANTO, C.; DANELON, O. M. "Acidification in Southeast Brazil." In: RODTHE & R. HERRERA (eds). *Acidification in Tropical Countries*. Wiley, Chichester, 257-296p, 1988.

RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; DOEHNER, E. *Salt weathering: influence of evaporative rate, supersaturation and crystallization pattern*. *Earth Surface Processes and Landform*, 23(3): 191-209, 1999.

SCHAFFER, R. J. "The weathering of natural building stone." In: DSIR, *Building Research Special Report*, 18, Stationery Office, London, 34pp, 1932.

SILVA, M. E.; ROESER, H. M. P. "Mapeamento de deteriorações em monumentos históricos de pedra-sabão em Ouro Preto." In: *Revista Brasileira de Geociências*, 33(4): 331-338, 2003.

SMITH, B. J.; MCALISTER, J. J.; BAPTISTA NETO, J. A.; SILVA, M. A. M. "Post-depositional modification of atmospheric dust on a granite building in central Rio de Janeiro: implications for surface induration and subsequent stone decay." In: PŘIKRYL, R.; SMITH, B. J. (eds.). *Building Stone Decays: from diagnosis to conservation*. Geological Society, London, Special Publication, 271: 153-166, 2007.

_____; BAPTISTA NETO, J. A.; SILVA, M. A. M.; WARKE, P.; MCALISTER, J. J.; CURRAN J. M. "Conservation of colonial built heritage: practical considerations and cultural constraints in Rio de Janeiro." In: *Environmental Geology*, 46: 493-503, 2004.

_____; MAGEE, R. W. "Granite weathering in an urban environment: an example from Rio de Janeiro." In: *Singapure Journal of Tropical Geography*, II (2): 143-153, 1990.

_____; MCGREEVY, J. P. "A simulation study of salt weathering in hot deserts." In: *Geografiska Annaler*, 65A: 127-133, 1983.

_____ ; _____. *Contour scaling of a sandstone by salt weathering under simulated hot desert conditions. Earth Surface Processes and Landforms*, 13: 697-705, 1988.

SPERLING, C. B.; COOKE, R. V. *Laboratory simulation of rock weathering by salt crystalization and hydration processes in hot, arid environment. Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 541-555, 1985.

TOROK, A. "Surface strength and mineralogy of weathering crusts on limestone buildings in Budapest." In: *Building and Environment*, 38: 1185-1192, 2003.

WARKE, P. A. "Inheritance Effects in Building Stone Decay." In: SMITH, B. J.; WARKE, P. A. *Processes of Urban Stone Decay*. Donnhead Publishing Ltd, pp. 32-43, 1996.

_____; CURRAN, J. M.; TURKINGTON, A. V.; SMITH, B. J. "Condition assessment for building stone conservation: a staging system approach." In: *Building and Environment*, 38: 1113-1123, 2003.

WINKLER, E. M. *Stone in Architecture*. Springer-Verlag. Berlin, 313pp, 1994.

ZEZZA, F.; MACRI, F. "Marine aerosol and stone decay." In: *The Science of the Total Environment*, 167: 123-143, 1995.