A SEGURANÇA DAS OBRAS NO BRASIL DISCUTIDA SOB DIFERENTES PONTOS DE VISTA. TRAGA O SEU.

1º CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES

21 a 23 de maio de 2014 - Foz do Iguaçu - PR

ESTUDO DO MECANISMO DE FORMAÇÃO DE FLORESCÊNCIAS EM REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA APLICADOS A SUBSTRATO CERÂMICO E O EFEITO DE BARREIRA

SALLES NETO, Moacyr1

[1] Instituto Federal do Tocantins, professor, doutor, e-mail: moacyr@ifto.edu.br

RESUMO

Este artigo teve como objetivo, contribuir para a análise do mecanismo de formação de florescências em revestimentos de argamassa aplicados sobre substratos cerâmicos, e a influência do efeito de barreira na dinâmica do processo. Foram confeccionados corpos-de-prova compostos de substratos cerâmicos revestidos com 3 cm de argamassa em uma das faces. O polímero impermeabilizante foi a base de resina acrílica, pigmentos inorgânicos, cargas minerais, aguarrás e aditivos. As argamassas foram mistas de cimento Portland e cal hidratada. Após a exposição inicial à solução salina, as séries foram expostas à água deionizada ou à solução saturada de Na_2SO_4, sendo então analisadas ao longo do tempo. As florescências foram acompanhadas pelo perfil de distribuição de sulfatos, através de espectrofotometria; pela quantificação da massa de sal eflorescido, e pela determinação da velocidade de formação. Concluiu-se que o fenômeno tem sua velocidade influenciada pela absortividade e porosidade aberta do revestimento, bem como pela concentração salina deste e do substrato. Constatou-se também que a presença da película de barreira retardou, mas não impediu a formação das florescências, acarretando ainda em um aumento da concentração de sais no interior do revestimento, provocando uma maior degradação pela formação de criptoflorescências.

Palavras chave: FLORESCÊNCIA; EFLORESCÊNCIA; CRIPTOFLORESCÊNCIA; SAIS SOLÚVEIS.

ABSTRACT

This paper aimed to contribute to analysis of the florescence´s formation mechanism in mortar revetments on ceramic substrates, and the influence of the barrier effect in the process. Samples were prepared with ceramic substrates coated with 3 cm mortar by one side. The waterproofing polymer was made by acrylic resin, inorganic pigments, mineral fillers, additives and turpentine. The mortars were made with Portland cement and hydrated lime. After the initial exposure, the series were exposed to deionized water or saturated solution of Na2SO4, and then analyzed over time. The florescences were monitored by the sulfates distribution on samples, through spectrophotometry; by the mass of effloresced salt, and by the rate of formation. It has concluded that the phenomenon's velocity is influenced by absorption and open porosity of the coating, and by the concentration of salt in mortar and substrate. It was also found that the presence of the barrier film has slowed, but it has not prevented the formation of florescences, resulting in a further increase in salt concentration inside the coating, and causing further degradation by the formation of cryptoffloresences.

Keywords: FLORESCENCES, EFFLORESCENCE, CRYPTOFFLORESCENCE, SOLUBLE SALTS.

1. INTRODUÇÃO

A observação das fachadas dos diversos tipos de edifícios leva à conclusão de que a formação de depósitos cristalinos, na superfície e no interior de painéis de alvenaria, por evaporação de soluções salinas, é uma das manifestações patológicas de maior incidência, geralmente acompanhando a presença de umidade.

Observa-se ainda que, além de frequente, o fenômeno é complexo, uma vez que os sais podem ser originados em diferentes etapas da fabricação dos materiais envolvidos; pela interação entre os diversos componentes do sistema de fechamento e mesmo de produtos das reações secundárias entre estes componentes e o solo ou o meio atmosférico podendo, além do prejuízo estético, influenciar na durabilidade do sistema de revestimento (NASCIMENTO, 1998; VERDUCH e SOLANA, 1999; MENEZES et al., 2006), sendo o fenômeno reconhecido como um dos principais mecanismos de degradação de materiais de construção porosos como pedras, argamassas e materiais cerâmicos (GOUDIE e VILES, 1997; HARRIS, 2001; SCHERER, 2006).

Em edificações antigas, construídas antes do advento do cimento Portland, o processo de cristalização salina pode ser ainda mais prejudicial relacionado, dentre outros fatores, a presença por vezes recorrente, de umidade e sais solúveis; reduzida resistência mecânica dos materiais empregados em alvenarias antigas; maior gravidade das consequências da degradação e valor histórico e artístico de muitos destes edifícios (GONÇALVES e RODRIGUES, 2010):

Apesar do contexto formado, observa-se uma carência da compreensão do fenômeno, sendo que os estudos existentes muitas vezes limitam-se a edifícios antigos ou a avaliar o potencial eflorescente de matérias-primas como blocos cerâmicos, brita, areia e massame. (RIBEIRO, 1996; NASCIMENTO, 1998; VALE, 1999; RODRIGUES e GONÇALVES, 2007), não avançando sobre a dinâmica do processo.

A ausência de uma compreensão sobre os aspectos fundamentais do fenômeno limitam a eficiência das estratégias de prevenção e correção, conduzindo, por vezes, ao empirismo nas alternativas empregadas na solução do problema, não raro limitando-se à limpeza da superfície e posterior emprego de barreiras impermeabilizantes e/ou da película de acabamento, procedimento que pode agravar o fenômeno, introduzindo tensões no sistema capazes de reduzir o desempenho do mesmo.

O presente trabalho, desenvolvido na Universidade de Brasília, visou contribuir para a análise do mecanismo de formação de florescências em revestimentos de argamassa aplicados sobre substratos cerâmicos, e a influência do efeito de barreira na dinâmica do processo.

2. VÉUS E FLORESCÊNCIAS

Segundo VERDUCH e SOLANA (1999), véus são depósitos cristalinos que se formam em argilas ou em peças "cruas" pela ação da água como agente mobilizador dos sais solúveis, podendo se tornar permanentes após cozimento em temperaturas elevadas. Florescências, por sua vez, são depósitos cristalinos que se formam na superfície ou no interior de peças cerâmicas já "cozidas", também pela ação da água como agente mobilizador, mediante estímulo de fatores externos, como infiltrações. Este último conceito deve ser ampliado, abordando não apenas os depósitos ocorridos em materiais cerâmicos, mas também nos demais substratos porosos (argamassa, concreto, etc.). Uma combinação de três fatores é necessária para a formação da florescência: deve haver uma fonte de sais solúveis; deve haver a presença de umidade para atingir estes sais e trazê-los para a superfície; a evaporação ou pressão hidrostática deve causar a migração da solução. Se qualquer destas condições for eliminada, a florescência não ocorrerá (ASTM INTERNATIONAL C270, 2003).

Conforme apontam VERDUCH e SOLANA, 1999, e MENEZES et al., 2006, as florescências podem ser divididas em dois grupos principais: subflorescências, também conhecidas como criptoflorescências e eflorescências:

- Subflorescências ou criptoflorescências: são florescências não visíveis, ocasionadas quando os depósitos cristalinos são formados sob a superfície da peça, nos poros e na rede capilar, podendo ocasionar consideráveis danos à durabilidade do sistema pelas forças de expansão criadas.
- Eflorescências: são as florescências visíveis, ocasionadas quando há a cristalização na superfície dos elementos. Esta formação salina acarreta a degradação estética do produto, mas não produz esforços mecânicos relevantes, causando degradação microestrutural apenas nas zonas próximas à superfície. A Figura 1 ilustra este contexto.



Figura 1: Eflorescência em alvenaria de deck de piscina de edifício residencial em Goiânia – GO.

As normas também se referem às florescências seguindo esta classificação. A ASTM INTERNATIONAL C270 (2003) e a ASTM INTERNATIONAL C1232 (2002) definem eflorescência como um depósito cristalino, usualmente branco, de sais solúveis em água na superfície da alvenaria. Já a criptoflorescência é descrita como um depósito cristalino de compostos solúveis em água nos poros da alvenaria.

De forma geral todos os blocos cerâmicos, argamassas e concretos, quando secos contêm, em seu interior, sais cristalizados, ainda que em baixas concentrações. A existência destes poderia levar à conclusão errônea de que estes materiais possuem criptoflorescências. O termo criptoflorescência, entretanto, deve ser reservado para caracterizar um contexto patológico dos sistemas envolvidos, quando se verifica a abundância de sais, geralmente carreados de fontes externas, com o agravante destes sais serem capazes de apresentar mudanças de volume, exercer esforços direcionais durante sua cristalização ou concentrar-se em locais determinados dos materiais envolvidos. (VERDUCH e SOLANA, 1999).

Os sais geralmente associados ao fenômeno são o $CaSO_4$, $MgSO_4$ e Na_2SO_4, capazes de exercer, segundo MUZZIN (1982), as pressões de 110 MPa, 25 MPa e 25 MPa respectivamente, quando em condições semelhantes. Estas pressões são suficientes para degradar os materiais envolvidos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental proposto buscou abordar os principais fatores intervenientes no mecanismo de formação de florescências de Na_2SO_4 em revestimentos de argamassa aplicados sobre substratos cerâmicos. Foram empregadas placas cerâmicas maciças de 19 cm x 29 cm, obtidas a partir do secionamento de canaletas para alvenaria estrutural. Antes da moldagem estas placas tiveram seu comprimento reduzido em 3 cm para retirada de amostras para avaliação de porosimetria e teor inicial de sulfatos, resultando em placas de 19cm x 26cm. Buscando-se avaliar a variação do mecanismo de formação de depósitos salinos em revestimentos de argamassa, sob diferentes condições de porosidade, foram empregadas argamassas mistas, com o emprego de cimento Portland CP IV - 32, cal hidratada CH-I e areia de rio lavada, traço em volume 1:1:6, variando a granulometria do agregado miúdo. As areias empregadas foram de rio, lavadas, com módulos de finura 1,72; 1,79 e 2,29.

Influenciou na escolha do sal o fato de que a maioria das florescências em blocos cerâmicos é composta por sulfatos, sobretudo de metais alcalinos. Assim sendo, buscou-se conciliar elevada frequência com altas solubilidade e pressão de cristalização, segundo UEMOTO (1988), VERDUCH e SOLANA (1999) e MUZZIN (1982).

A determinação da quantidade de água seguiu as recomendações de Sousa (2005), o qual aponta que argamassas consideradas plásticas, capazes de oferecer uma condição de trabalhabilidade adequada, apresentam um intervalo de penetração de cone entre 45mm e 56 mm, com média em torno de 51 mm, medido de acordo com a norma ASTM INTERNATIONAL C780 (2009). A água empregada foi potável, originada de poço artesiano. A mistura dos materiais seguiu as recomendações da NBR 13276 (2005), para argamassas dosadas em obra, à base de cimento e cal hidratada.

A programação de ensaios proposta buscou relacionar as diferentes variáveis do fenômeno em estudo, encontrando-se esquematicamente ilustrada nas Figuras 2, 3 e 4.



Figura 2 – Programação dos ensaios – análises iniciais e moldagem das séries

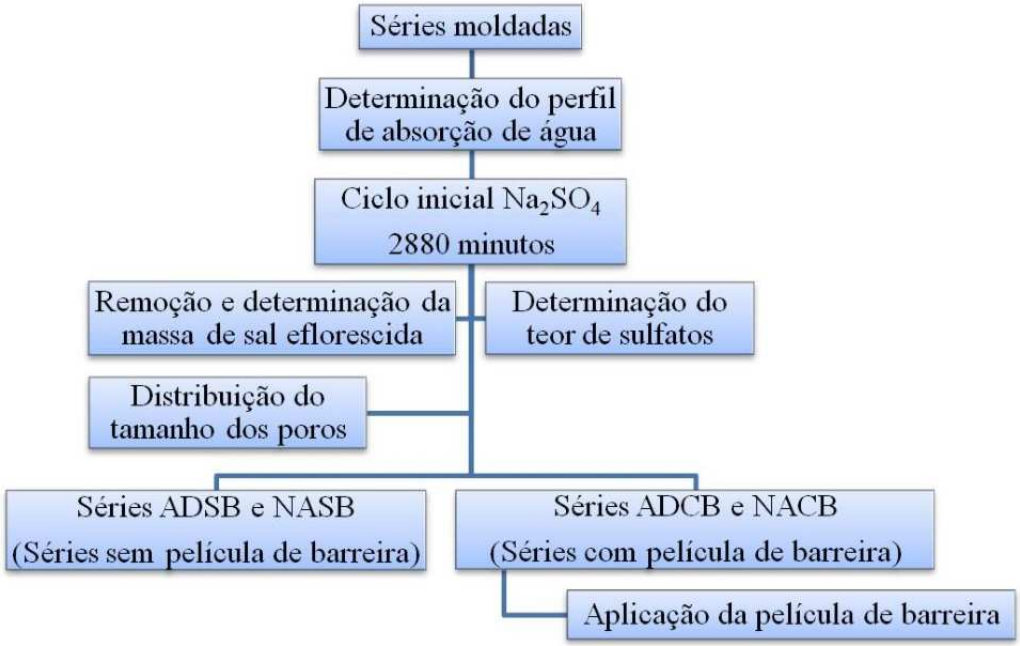

Figura 3 - Programação dos ensaios – ciclo de exposição inicial e aplicação da película de barreira

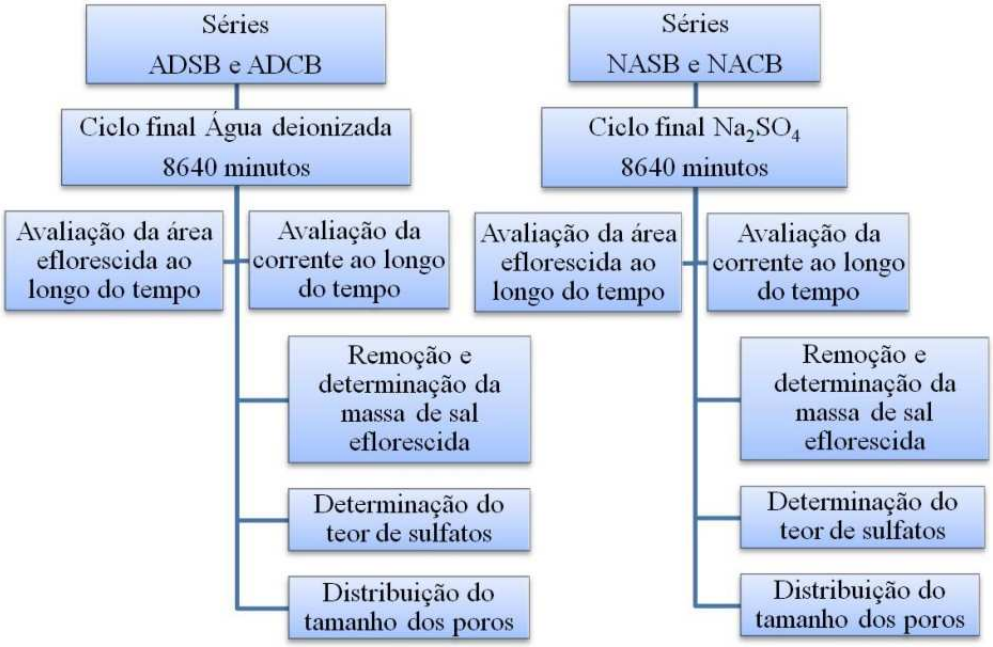

Figura 4 – Programação dos ensaios – Ciclo de exposição final

As argamassas e o substrato foram caracterizados quanto à absorção de água livre (absorção de água por imersão e absortividade); distribuição do tamanho dos poros através de porosimetria por intrusão de mercúrio e determinação do teor de sulfatos do substrato e do perfil de distribuição de sulfatos na argamassa por espectrofotometria. A massa de sal eflorescido foi determinada através de remoção mecânica e posterior filtração. A avaliação da corrente ao longo do tempo forneceu a evolução da franja de umidade e a velocidade de formação das eflorescências foi determinada através da avaliação digital das imagens da superfície eflorescida ao longo do tempo.

A Figura 5 ilustra o corpo-de-prova já moldado. A Tabela 1 relaciona os corpos-de-prova do procedimento experimental.

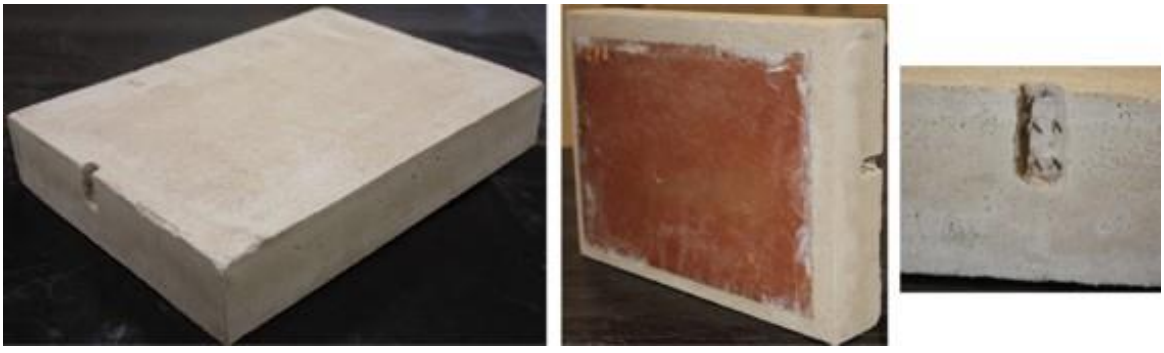

Figura 5 – Corpo-de-prova confeccionado

Tabela 1 – Relação dos corpos-de-prova confeccionados no procedimento experimental

Nr.	Identificação	Argamassa	Presença de película de barreira	Meio de exposição no ciclo final
1	ADG1SB	Com areia MF 1,72	NÃO	Água deionizada
2	ADG2SB	Com areia MF 1,79	NÃO	Água deionizada
3	ADG3SB	Com areia MF 2,29	NÃO	Água deionizada
4	ADG1CB	Com areia MF 1,72	SIM	Água deionizada
5	ADG2CB	Com areia MF 1,79	SIM	Água deionizada
6	ADG3CB	Com areia MF 2,29	SIM	Água deionizada
7	NAG1SB	Com areia MF 1,72	NÃO	Solução saturada de Na_2SO_4
8	NAG2SB	Com areia MF 1,79	NÃO	Solução saturada de Na_2SO_4
9	NAG3SB	Com areia MF 2,29	NÃO	Solução saturada de Na_2SO_4
10	NAG1CB	Com areia MF 1,72	SIM	Solução saturada de Na_2SO_4
11	NAG2CB	Com areia MF 1,79	SIM	Solução saturada de Na_2SO_4
12	NAG3CB	Com areia MF 2,29	SIM	Solução saturada de Na_2SO_4

A espessura empregada na camada de argamassa foi de 3 cm, já anteriormente estudada por PAES (2004), remetendo à espessura limite especificada pela NBR 13749 (1996). Durante a execução, uniformizou-se a altura e energia de aplicação das argamassas em 50cm.

Decorridos 28 dias da moldagem, foram retiradas amostras para determinação da porosimetria por intrusão de mercúrio e do teor de sulfatos, sendo a seção restaurada com o auxílio de EPS, para evitar o efeito de forma durante a exposição aos meios em estudo. A Figura 6 ilustra este procedimento. Após a reconstituição da seção, as amostras tiveram as faces laterais e a argamassa da face inferior impermeabilizadas com resina tipo epóxi de baixa viscosidade, como ilustrado na Figura 7, buscando-se orientar o fluxo das soluções em estudo.



Figura 6 – Extração de amostra para porosimetria e restauração da seção com EPS

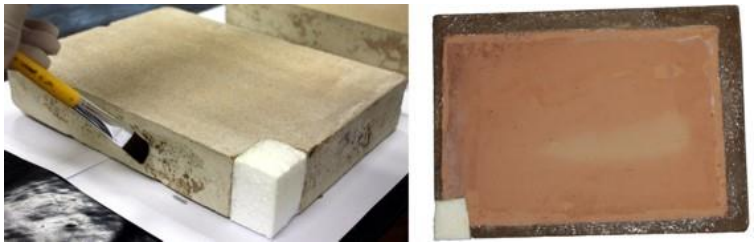

Figura 7 – Aplicação de adesivo epóxi no corpo-de-prova para orientar o fluxo da solução em estudo

Os corpos-de-prova foram então posicionados, em grupos de 6, sobre suportes em vidro de 10mm x 20mm x 3mm de altura, os quais possibilitavam o total acesso da solução saturada de sulfato de sódio ao substrato cerâmico, conforme ilustra a Figura 8. A solução nas bandejas foi reabastecida ao longo do procedimento de forma a ser mantida, durante a exposição de 48 horas contínuas, uma lâmina de 3 mm nos corpos-de-prova.

Após a exposição, o sal eflorescido foi removido e quantificado. Foram retiradas amostras para determinação da porosimetria e do perfil de distribuição de sulfatos, procedendo-se a impermeabilização com película epóxi nos pontos de extração, bem como sua reestruturação onde foi percebida a degradação pelo processo de cristalização. A seção foi restaurada com o auxílio de EPS fixado com fitas. A Figura 9 ilustra as eflorescências formadas na superfície do corpo-de-prova ADG1SB após o ciclo de exposição inicial.

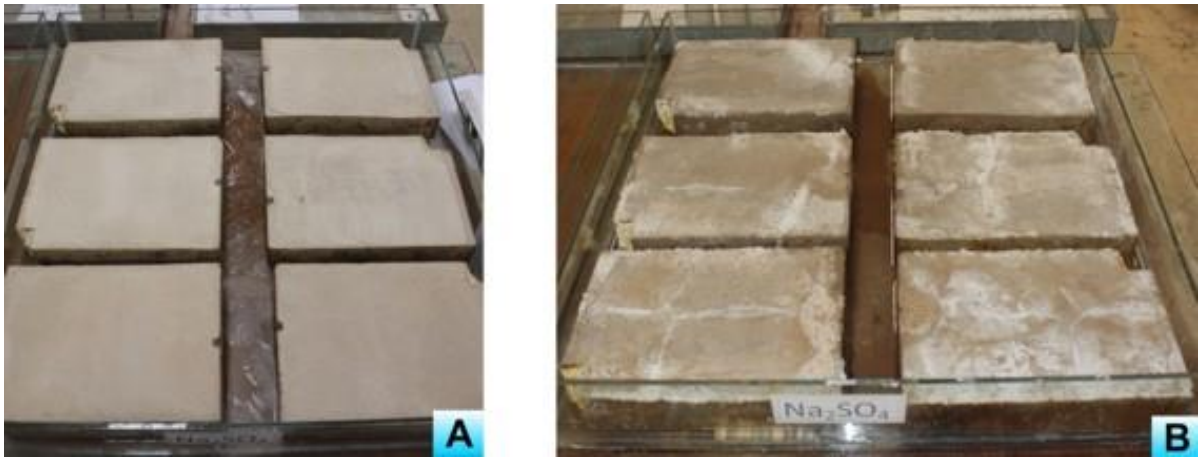

Figura 8 – Ciclo de exposição inicial à solução saturada de Na2SO4 (A – antes e B – após)



Figura 9 – Eflorescências formadas durante o ciclo de exposição inicial – ADG1SB em detalhe

Após a remoção do sal e reestruturação da seção procedeu-se a aplicação da película de barreira na série “CB”, segundo as recomendações do fabricante do produto. Os corpos-de-prova foram inicialmente saturados com água e, posteriormente, procedeu-se a limpeza da superfície com uma solução de ácido clorídrico. O produto foi aplicado, com o auxílio de um pincel, em 4 demãos cruzadas, sendo a primeira diluído em 30 % de aguarrás e, as demais, em

10 % de aguarrás. O intervalo entre cada demão foi de 4 horas e a temperatura do laboratório foi mantida constante em 23 °C durante o procedimento.

Decorridas 12 horas da aplicação da película, as amostras foram divididas em grupos de seis e posicionados em duas bandejas. Os suportes empregados possibilitavam o total acesso dos meios em estudo ao substrato cerâmico. Após o correto posicionamento, a série AD foi exposta à água deionizada e a série NA, à solução saturada de sulfato de sódio, tendo, a partir de então, a corrente elétrica monitorada pelos eletrodos posicionados no interior dos mesmos, e a área eflorescida registrada por meio fotográfico. Durante o período de exposição, a água deionizada e a solução de Na_2SO_4 foram periodicamente reabastecidas, mantendo uma lâmina de 3 mm nos corpos-de-prova.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

São a seguir apresentados os resultados obtidos a partir da interação entre as variáveis adotadas: diferentes argamassas e meios de exposição final, com vistas ao entendimento de como estas influenciam no transporte de sais e manifestação das florescências.

4.1 Alterações Observadas na Estrutura de Poros

Buscando-se determinar possíveis alterações no tamanho dos poros das diferentes argamassas, devido aos processos de cristalização do Na_2SO_4, foi realizado o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4, com ordem de apresentação estruturada conforme a etapa em que as amostras foram retiradas. Salienta-se que os sais presentes nas amostras não foram retirados para determinação dos perfis de distribuição de poros. Objetivando-se determinar as alterações devido às condições de exposição mais severas, não foram realizados ensaios de porosimetria para a série exposta, no ciclo final, à água deionizada.

Pode-se afirmar que o emprego de areias com diferentes módulos de finura acarretou, como esperado, em alterações na porosidade das argamassas confeccionadas, com menor porosidade quanto maior o módulo de finura da areia empregada, fato concordante com os ensaios conduzidos de absorção de água. Não foram observadas, entretanto, alterações significativas na distribuição do tamanho dos poros. Salienta-se que as amostras foram retiradas após a confecção das séries.

Comparativamente à distribuição do tamanho dos poros dos substratos, observou-se que a argamassa apresenta poros de maior diâmetro que o substrato e, este último, apresenta uma maior porosidade total (indicada pelo volume intrudido e pela área total de poros).

Tabela 2 – Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio das argamassas, antes do ciclo de exposição inicial à solução saturada de Na_2SO_4

Característica	Amostra		
	Argamassa MF 1,72	Argamassa MF 1,79	Argamassa MF 2,29
Diâmetro crítico (µm)	0,60	0,67	0,58
Diâmetro característico (µm)	0,35	0,38	0,36
Diâmetro equivalente (µm)	0,06	0,06	0,05
Diâmetro médio (µm)	0,12	0,10	0,10
Área total de poros (m²/g)	6,54	5,94	5,68
Volume intrudido (cm³/g)	0,095	0,082	0,073

Tabela 3 – Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio das argamassas, após o ciclo de exposição inicial à solução saturada de Na_2SO_4

Característica	Amostra		
	Argamassa MF 1,72	Argamassa MF 1,79	Argamassa MF 2,29
Diâmetro crítico (µm)	0,60	0,65	0,58
Diâmetro característico (µm)	67,50	66,75	34,43
Diâmetro equivalente (µm)	0,08	0,09	0,09
Diâmetro médio (µm)	0,16	0,18	0,19
Área total de poros (m²/g)	5,25	4,48	4,02
Volume intrudido (cm³/g)	0,100	0,102	0,088

A cristalização do Na_2SO_4 no interior da argamassa, após o ciclo de exposição inicial, supostamente levou à ruptura parcial da rede de poros, sobretudo os de menor diâmetro, alterando sua distribuição de tamanho, indicado pelo aumento do diâmetro, redução da área total e aumento do volume intrudido, em relação aos valores anteriormente medidos. Salienta-se que, quando da mensuração, a rede de poros encontrava-se parcialmente ocupada pelos cristais de Na_2SO_4, o que permite deduzir que os danos causados na distribuição de poros são ainda superiores aos apresentados.

Tabela 4 – Resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio das argamassas, após o ciclo de exposição final à solução saturada de Na_2SO_4

Característica	Amostra		
	Argamassa MF 1,72	Argamassa MF 1,79	Argamassa MF 2,29
Diâmetro crítico (µm)	0,53	0,74	0,37
Diâmetro característico (µm)	0,26	71,28	0,18
Diâmetro equivalente (µm)	0,08	0,09	0,09
Diâmetro médio (µm)	0,15	0,20	0,17
Área total de poros (m²/g)	4,63	4,48	3,35
Volume intrudido (cm³/g)	0,089	0,098	0,076

Observou-se que após o ciclo de exposição final à solução saturada de sulfato de sódio, a distribuição de tamanho de poros apresentou pequenas alterações, em comparação ao estado apresentado após a exposição inicial, com uma diminuição significativa apenas do diâmetro característico. Tal comportamento encontra-se possivelmente associado ao incremento da ocupação parcial da rede de poros pelos cristais de sulfato de sódio, mobilizados durante a exposição final.

Constatou-se ainda que, apesar da maior absortividade apresentada pelas argamassas mais porosas, quanto maior a porosidade da argamassa menor o dano provocado pela cristalização do sulfato de sódio (através da avaliação do incremento percentual de volume intrudido após o ciclo de exposição inicial). Tal fato encontra-se possivelmente relacionado ao incremento de volume disponibilizado ao mesmo.

4.2 Perfis de Distribuição de Sulfatos

O teor de sulfatos apresentado pelas amostras foi determinado por espectrofotometria, buscando-se avaliar as tendências de variação e perfis de distribuição.

Para elaboração dos perfis de distribuição foram reservadas amostras do substrato e de três diferentes profundidades da argamassa dos corpos-de-prova (0,5cm (T1), 1,5cm (T2) e 2,5cm (T3) a partir do substrato), quando do secionamento dos CPs para retirada de amostras para determinação da porosimetria, conforme ilustra a Figura 10.



Figura 10 – Regiões de extração das amostras para elaboração dos perfis de distribuição de sulfatos

Após a exposição inicial à solução salina pôde-se observar que a maior parte dos sulfatos se concentrou no substrato e no terço próximo da superfície da argamassa, conforme relacionado na Tabela 5. Este comportamento encontra-se relacionado com a maior porosidade do substrato, em relação à argamassa, e à frente de evaporação da argamassa próxima à superfície, indicada pelas eflorescências formadas.

Tabela 5 – Distribuição da concentração dos sulfatos nas amostras após o ciclo de exposição inicial à solução saturada de Na_2SO_4 – valores relativos

Corpo-de-prova	Distribuição dos sulfatos – em relação ao total da amostra			
	Substrato	Terço inicial - T1	Terço médio - T2	Terço final - T3
ADG1SB	45,09 %	18,50 %	11,16 %	25,25 %
ADG2SB	42,72 %	14,94 %	17,88 %	24,46 %
ADG3SB	36,47 %	19,08 %	17,50 %	26,94 %
ADG1CB[a]	45,03 %	23,37 %	12,14 %	19,45 %
ADG2CB[a]	32,85 %	16,62 %	22,02 %	28,51 %
ADG3CB[a]	47,35 %	21,75 %	10,72 %	20,18 %
NAG1SB	47,40 %	13,09 %	9,68 %	29,84 %
NAG2SB	35,38 %	18,39 %	17,48 %	28,75 %
NAG3SB	39,49 %	16,96 %	20,66 %	22,88 %
NAG1CB[a]	48,15 %	15,50 %	15,25 %	21,11 %
NAG2CB[a]	37,69 %	23,72 %	15,91 %	22,67 %
NAG3CB[a]	48,52 %	17,38 %	12,84 %	21,27 %

[a]Quando das leituras, os corpos-de-prova ainda não dispunham da película de barreira.

Após a exposição final os teores de sulfato em cada camada analisada se mostraram melhor distribuídos em todas as séries, com uma visível movimentação dos sais do substrato em direção à argamassa, com maiores concentrações nos terços próximo à superfície da argamassa e próximo ao substrato, como pode ser constatado na Tabela 6.

Tabela 6 – Distribuição da concentração dos sulfatos nas amostras após o ciclo de exposição final à solução saturada de Na_2SO_4 ou à água deionizada – valores relativos

Corpo-de-prova	Distribuição dos sulfatos – em relação ao total da amostra			
	Substrato	Terço inicial - T1	Terço médio - T2	Terço final - T3
ADG1SB	22,60%	29,83%	21,85%	25,72%
ADG2SB	34,24%	28,60%	17,70%	19,46%
ADG3SB	16,90%	32,64%	15,41%	35,04%
ADG1CB	24,46%	20,70%	21,53%	33,31%
ADG2CB	13,71%	29,89%	25,31%	31,10%
ADG3CB	34,01%	26,62%	10,30%	29,07%
NAG1SB	21,05%	31,54%	16,31%	31,09%
NAG2SB	20,22%	25,83%	20,37%	33,58%
NAG3SB	22,62%	24,47%	26,40%	26,51%
NAG1CB	23,48%	27,77%	19,37%	29,38%
NAG2CB	24,66%	25,63%	19,90%	29,81%
NAG3CB	24,94%	29,87%	19,11%	26,07%

4.3 Velocidade de Formação das Eflorescências

A velocidade de formação das eflorescências foi determinada pela inclinação da reta ajustada entre a área eflorescida e o tempo decorrido. A Tabela 7 contém os dados determinados,

juntamente com o tempo correspondente à eflorescência máxima formada, determinada pela curva assintótica.

Tabela 7 – Velocidade de formação de eflorescências e tempo correspondente à máxima área eflorescida no ciclo de exposição final

Corpo-de-prova	Velocidade de formação das eflorescências	Tempo correspondente à eflorescência máxima
ADG1SB	0,854 $^{\%}/_{min}$	990 min
ADG2SB	1,093 $^{\%}/_{min}$	4620 min
ADG3SB	0,347 $^{\%}/_{min}$	2550 min
ADG1CB	0,408 $^{\%}/_{min}$	2550 min
ADG2CB	0,408 $^{\%}/_{min}$	3020 min
ADG3CB	1,266 $^{\%}/_{min}$	1700 min
NAG1SB	3,912 $^{\%}/_{min}$	1125 min
NAG2SB	1,242 $^{\%}/_{min}$	1440 min
NAG3SB	0,303 $^{\%}/_{min}$	5910 min
NAG1CB	0,100 $^{\%}/_{min}$	7200 min
NAG2CB	0,035 $^{\%}/_{min}$	8640 min
NAG3CB	0,530 $^{\%}/_{min}$	8640 min

4.4 Análise da Estrutura das Eflorescências Formadas

De forma geral, foram observadas estruturas semelhantes às micrografias de Rodriguez-Navarro; Doehne e Sebastian (2000), com cristais característicos das fases III e V da thenardita, os quais eram esperados dadas as características de umidade relativa e temperatura do ambiente do laboratório (23ºC, umidade relativa em torno de 65%). A ruptura da película de barreira ocorreu pelo acúmulo e posterior cristalização de sais logo abaixo de sua superfície, preferencialmente ao longo de fissuras formadas na argamassa durante a exposição inicial à solução de Na_2SO_4 (Figuras 11 e 12). Foram também observadas eflorescências em sua superfície, em geral de formato granular, sem a presença de rupturas visíveis na película, como pode ser observado na Figura 12.



Figura 11 – Ruptura da película de barreira devido à cristalização de sais, característicos da Fase III e da Fase V da thenardita, em sua interface com o revestimento de argamassa



Figura 12 – Eflorescências formadas no ciclo final em corpo de prova com película de barreira características da Fase V da thenardita

5. CONCLUSÕES

O fenômeno da eflorescência é complexo e subestimado, sendo tratado pelo mercado da construção civil de forma secundária e, por vezes, empírica. Os danos provocados no processo de cristalização podem ser extensos, não se limitando às camadas superficiais e podendo, inclusive, levar à ruína do material. O grau de degradação potencial depende de fatores como a natureza dos materiais, suas propriedades físicas e mecânicas, seu estado de conservação e da concentração do sal presente.

O fenômeno de formação de eflorescências em painéis de substrato cerâmico revestidos com argamassas mistas de cimento Portland e cal aérea, sem a presença de aditivos, tem sua velocidade influenciada pela absortividade e porosidade aberta do revestimento, bem como pela concentração salina deste e do substrato. Constatou-se também que a presença da película de barreira retardou, mas não impediu a formação de eflorescências, acarretando ainda em um aumento da concentração de sais no interior do revestimento, provocando uma maior degradação deste pela formação de subflorescências.

As características do substrato cerâmico (absortividade e porosidade) influenciaram na intensidade do fenômeno, mensurada pela massa de sal eflorescido e concentração salina próxima à superfície da argamassa, sobretudo na série AD, onde a absortividade foi diretamente proporcional à massa de sal eflorescido. O substrato atuou inicialmente como meio de acumulação do sulfato, sendo que as características apresentadas possuíram reduzida relação com a velocidade do mecanismo.

A absortividade da argamassa mostrou-se relacionada à intensidade das eflorescências e sua velocidade de formação.

A porosidade da argamassa encontra-se intimamente relacionada ao mecanismo em estudo: quanto maior a porosidade da mesma, menor o dano provocado pela cristalização do Na_2SO_4

na rede porosa; menor a velocidade de formação de eflorescências e a massa de sal eflorescida na série AD, sendo observado o oposto na série NA; maior a tendência de funcionamento da argamassa como revestimento de transporte de sais, sendo esta última característica salientada nas séries que contavam com a película de barreira.

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM INTERNATIONAL C270**: Standard specification for mortar for unit masonry. West Conshohocken, United States, 2003.

_____. **ASTM INTERNATIONAL C780**: Standard Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry. West Conshohocken, United States, 2009.

_____. **ASTM INTERNATIONAL C1232**: Standard terminology of masonry. West Conshohocken, United States, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13749:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro, 1996.

GONÇALVES, Teresa Diaz; RODRIGUES, José Delgado. **Argamassas de Revestimento para paredes afectadas por cristalização de sais solúveis: influência do substrato.** In 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, 2010, Lisboa. Anais.

GOUDIE, Andrew S.; VILES, Heather A. **Salt Weathering Hazards.** Chichester: John Wiley & Sons, 1997. 256p.

HARRIS, Samuel, Y. **Building pathology: deterioration, diagnostics, and intervention.** New York: John Wiley & Sons, 2001. 654p.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Sais solúveis e eflorescências em blocos cerâmicos e outros materiais de construção - revisão**. Cerâmica, v.52, 2006. p. 37-49.

MUZZIN, G. **Les éfflorescences dans les maçonneries em briques**. C.S.T.C Revue, v.4, Decembre, 1982. p. 2-11.

NASCIMENTO, Solange Francisco do. **Influência da concentração de sais solúveis nas propriedades cerâmicas e eflorescentes em cerâmica vermelha do estado da Paraíba.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), 1998. Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 257 p.

PAES, Isaura Nazaré Lobato. **Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação.** 2004. 242 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.

RIBEIRO, Iracira José da Costa. **Os sais solúveis na construção civil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 1996. Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 105 p.

RODRIGUES, J. Delgado; GONÇALVES, T. Diaz. **Sais solúveis nas construções históricas: introdução e relato sumário.** In: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC (Ed.). Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Divisão de Edições e Artes Gráficas, 2007. p. 1-13.

RODRIGUEZ-NAVARRO, Carlos; DOEHNE, Eric; SEBASTIAN, Eduardo. **How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials.** Cement and Concrete Research, v.30, 2000. p. 1527-1534.

SCHERER, George W. **Internal stress and cracking in stone and masonry.** In: KONSTA-GDOUTOS, Maria S. (Ed.). **Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties.** Berlin: Springer Netherlands, 2006. p. 633-64.

SOUSA, José Getulio Gomes de. **Contribuição ao estudo das propriedades das argamassas de revestimento no estado fresco.** 2005. 233 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.

UEMOTO, Kai Loh. Patologia: danos causados por eflorescência. In: Centro de Documentação da Divisão de Edificações do IPT (Coord.). **Tecnologia de Edificações.** São Paulo: PINI, 1988. p. 561-564.

VALE, Walker Luiz Oliveira do. **Os sais solúveis nos materiais de construção da cidade de Campina Grande, Paraíba.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 1999. Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 129 p.

VERDUCH, Antonio García; SOLANA, Vicente Sanz. **Velos, Florescencias y Manchas en Obras de Ladrillo.** Castellón: Faenza Editrice Ibérica, 1999. 301 p.