

IL DEGRADO DELLE MURATURE CAUSATO DAI SOLFATI PRESENTI NEI LATERIZI

analisi di tre "case histories"

Luigi Coppola,* Roberto Troli*

Tra le tipologie di degrado che possono interessare le murature in laterizio - sia quelle antiche che di recente costruzione - sono da annoverare quelle legate all'azione dei sali solfatici.

Le forme di degrado connesse con la presenza di questi sali sono essenzialmente:

- la comparsa di efflorescenze saline sulla superficie dei laterizi o degli intonaci di rivestimento;
- il distacco o l'esfoliazione degli intonaci per effetto della pressione di cristallizzazione dei sali depositati dall'acqua all'interfaccia tra intonaco e muratura o tra strati diversi di intonaco (subflorescenza);
- il rigonfiamento e lo sgretolamento delle malte degli intonaci e di quelle di allestimento per l'instaurarsi di reazioni chimiche che portano alla formazione di composti espansivi (ettringite e thaumasite).

EFFLORESCENZE E SUBFFLORESCENZE

Le murature sono solidi porosi che contengono sempre al loro interno una certa quantità di umidità dovuta:

- alla risalita capillare dalle fondazioni;
- all'assorbimento dell'acqua meteorica battente sulla superficie esterna;
- alla condensazione capillare del vapore acqueo;
- all'acqua contenuta nei materiali utilizzati per la realizzazione della muratura. Questo caso è, ovviamente circoscritto alle murature di recente costruzione.

L'acqua contenuta nelle murature è soggetta a migrare, per effetto di gradienti di umidità, dalle zone più umide a quelle caratterizzate da un minor contenuto di acqua, in particolare, verso le superfici esterne che sono soggette all'evaporazione. Spostandosi dall'interno della muratura verso l'esterno, l'acqua scioglie e trasporta con sé tutti i sali idrosolubili, in particolare i solfati, che possono essere contenuti nei materiali che costituiscono il paramento murario e, evaporando, li deposita sulle superfici esterne.

Le efflorescenze solfatiche possono avere aspetto e caratteristiche diverse a seconda del tipo di sale che precipita. Se i precipitati sono costituiti da solfati alcalini (di sodio e potassio), le efflorescenze sono in genere costituite da depositi voluminosi con aspetto di barbe e filamenti di colore bianco, facilmente asportabili e fortemente solubili in acqua (1). Se, invece, i precipitati sono costituiti da gesso (solfato di calcio biidrato), le efflorescenze - scarsamente solubili - assumono un aspetto cristallino e saccaroide, per lo più di colore biancastro, molto resistenti all'azione meccanica di asportazione (1).

In alcune circostanze climatiche (forte ventilazione e bassa umidità relativa) l'evaporazione dell'acqua è così veloce che il deposito dei sali non avviene sulla superficie esterna del muro, ma al suo interno (subflorescenza). Il deposito dei sali, in questo caso, avviene generalmente all'interfaccia tra intonaco e muratura o tra lo strato grezzo e quello di finitura dell'intonaco,



FIGURA 1 (IN ALTO). MICROFOTOGRAFIA AL MICROSCOPIO ELETTRONICO DELL'ETTRINGITE COLLOIDALE.

FIGURA 2 (SOPRA). MICROFOTOGRAFIA AL MICROSCOPIO ELETTRONICO DELL'ETTRINGITE CRISTALLINA.

nel passaggio, cioè, da un mezzo più poroso ad uno meno permeabile. La cristallizzazione dei sali, all'interfaccia delle sopra menzionate soluzioni di continuità, provoca l'instaurarsi di una pressione che può determinare distacchi degli intonaci dai laterizi o della finitura dallo strato grezzo. Inoltre, non sono rari i casi in cui il degrado si manifesta attraverso un'esfoliazione dello strato corticale dei mattoni ("cartella") per effetto di pressioni di cristallizzazione che si instaurano all'interno del laterizio (1). I sali solfatici maggiormente responsabili di questo tipo di degrado sono il solfato di magnesio e il solfato di sodio, i quali possono incrementare notevolmente il loro stato di idratazione formando sali con un elevato numero di molecole d'acqua.

REAZIONI CHIMICHE ESPANSIVE

La forma più grave di degrado dovuta all'azione dei solfati è quella legata alle reazioni chimiche che possono avvenire, in ambiente umido, tra il solfato di calcio biidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e i prodotti di idratazione delle malte a base di cemento Portland, calce idraulica o calce e pozzolana. Tutti questi leganti formano, nel loro processo di idratazione, due composti: gli alluminati di calcio idrati e i silicati di calcio idrati. Dall'interazione tra il solfato di calcio biidrato e gli alluminati di calcio idrati si forma l'ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$); l'interazione del solfato di calcio biidrato con i silicati di calcio idrati, invece, dà luogo alla formazione di thaumasite ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$). Entrambi questi composti sono responsabili di gravi forme di degrado nelle malte che costituiscono le murature.

La formazione di ettringite è pericolosa solo se avviene in ambiente fortemente basico, come sono in genere tutti i sistemi a base di cemento Portland, calce idraulica o calce e pozzolana (l'alcalinità in tutti i casi è data dalla presenza di calce). In queste condizioni, infatti, l'ettringite - definita "colloidale" - si presenta sottoforma di fibre molto corte (lunghe qualche micron) non ben accresciute (2), capaci di adsorbire acqua e di aumentare notevolmente il proprio volume creando tensioni dirimpanti e distruttive per la matrice legante (figura 1). In ambiente non alcalino, invece, l'ettringite si presenta in forma di cristalli ben definiti con fibre lunghe qualche centinaio di micron e non in grado di adsorbire acqua e provocare rigonfiamenti (figura 2).

L'aumento di volume che consegue alla formazione di ettringite colloidale provoca l'espansione della malta; a questa espansione fa seguito un rigonfiamento e un distacco dell'intonaco o della parte corticale delle malte di allestimento. I frammenti di malta espulsi appaiono solidi e coerenti in quanto alla formazione di ettringite non corrisponde un decadimento delle caratteristiche meccaniche della malta, ma solo un rigonfiamento (figura 3).

La formazione di thaumasite, invece, non è accompagnata da una significativa espansione, ma determina una drastica perdita di resistenza meccanica delle malte le quali diventano incoerenti e, quindi, facilmente dilavabili dalle acque piovane (figura 4).

* Enco, Engineering concrete, Spremiano (TV).

LA PRESENZA DI SOLFATI NELLE MURATURE

La presenza di solfati all'interno delle murature può avere molteplici origini. Quelli più ricorrenti sono legate:

- all'utilizzo del solfato di calcio emidrato (gesso) come legante nelle murature;
- all'arricchimento nelle murature di sali solfatici idrosolubili, provenienti dal terreno, per effetto del fenomeno della risalita capillare;
- alla presenza di sali solfatici nei laterizi.

1. Le malte a base di gesso sono caratterizzate da prestazioni meccaniche mediocri, inferiori a quelle ottenibili impiegando malte a base di calce idraulica, calce e pozzolana o calce e cemento. Inoltre, il gesso è un legante "aereo" che non indurisce in acqua; pertanto, le malte a base di gesso sono particolarmente sensibili all'umidità e soggette al dilavamento delle acque piovane. Nonostante queste "debolezze" intrinseche del legante, le malte di gesso sono caratterizzate da

FIGURA 3. INTONACO DEGRADATO PER FORMAZIONE DI ETRINGITE: LA MALTA SI RIGONFIA E SI STACCA DAL MURO; I RESIDUI DI INTONACO APPAIONO TUTTAVIA ANCORA CONSISTENTI.



FIGURA 4. INTONACO DEGRADATO PER FORMAZIONE DI THAUMASTITE: LA MALTA SI PRESENTA INCOERENTE E VIENE FACILMENTE DILAVATA.

una relativa rapidità di presa e da una facilità di posa in opera che ne hanno fatto, soprattutto in passato, il materiale ideale per la realizzazione di intonaci interni, di volte e soffittature. Ancora oggi le malte a base di gesso vengono utilizzate per la realizzazione di intonaci interni e massetti per pavimento in ragione della loro facilità di pompaggio e rapidità di esecuzione. Inoltre, per la sua rapidità di presa il gesso è stato spesso utilizzato in passato come legante da restauro, soprattutto per il ripristino di intonaci parzialmente distaccati o lesionati, o per il fissaggio di barre metalliche di rinforzo all'interno delle murature.

2. La presenza di solfato nelle murature può essere, inoltre, ascrivita al fenomeno della risalita capillare dell'acqua. È noto che se immergiamo un tubicino di vetro all'interno di una bacinella piena d'acqua, quest'ultima tende a risalire all'interno del tubo fino ad un'altezza h dal pelo libero della bacinella. Questo fenomeno è dovuto alle tensioni di contatto che si creano all'interfaccia tra acqua e vaso capillare che, compensando parzialmente la forza di gravità, permettono all'acqua di risalire all'interno del tubo. L'altezza raggiunta dipende dal raggio del vaso (r), dalla tensione superficiale dell'acqua (s), della sua massa volumica (m), dall'angolo di contatto tra acqua e vetro (φ) e dalla forza di gravità (g) secondo la formula:

$$h = 2s \cos\varphi / (rmg) \quad [1].$$

In maniera del tutto analoga al vaso di vetro si comportano i pori capillari presenti nei laterizi e nelle malte delle murature insistenti su fondazio-

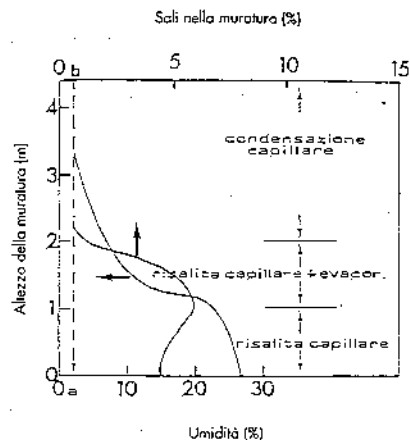


FIGURA 5. UMIIDITÀ E CONTENUTO DI SALI NELLA MURATURA IN FUNZIONE DELLA SUA ALTEZZA (A = UMIIDITÀ RESIDUA DOVUTA ALLA CONDENSAZIONE CAPILLARE; B = CONTENUTO DI SALI IDROSOLUBILI NEI MATERIALI ORIGINARI COSTITUENTI LA MURATURA).

ni umide. L'acqua di falda, infatti, tende a risalire per capillarità lungo la muratura trasportando con sé tutti i sali idrosolubili, ed in particolare quelli solfatici, di cui in genere sono ricchi i terreni. Questi sali, poi, vengono direttamente depositati sulla superficie esterna sottoforma di efflorescenze.

In figura 5 vengono riportati gli andamenti della percentuale di umidità e della concentrazione di

sali idrosolubili presenti nella muratura per effetto della risalita capillare, in funzione dell'altezza. Come si può notare, la concentrazione salina è massima a circa 1 metro di altezza, dove l'umidità diminuisce per effetto dell'evaporazione, ma tende bruscamente a diminuire fino a divenire praticamente nulla intorno ai due metri. Ne consegue che, a causa dell'evaporazione, l'arricchimento di sali solfatici nella muratura per effetto della risalita capillare è un fenomeno normalmente circoscritto alle zone più basse dei paramenti (massimo 1 o 2 metri di altezza).

Esistono, però, frequenti casi di murature, nelle quali non è stato fatto uso di gesso come legante, in cui si registrano elevate concentrazioni di solfati a quote che non sono raggiungibili dalla risalita capillare. A volte, inoltre, si riscontra la presenza di zone ricche di solfati sovrastanti zone complementaremente prive di efflorescenze. In questi casi si deve ritenere che i solfati siano stati introdotti, sottoforma di impurezza, da uno dei materiali utilizzati per la costruzione della muratura.

A rigore tutti i materiali utilizzati per la realizzazione di una muratura possono contenere sali solfatici sottoforma di impurezze o composti secondari. Impurezze solfatiche possono essere presenti, ad esempio, negli aggregati o nell'acqua utilizzati per confezionare le malte; il cemento, è noto, contiene al suo interno, in qualità di regolatore di presa, un certo quantitativo di solfato di calcio biidrato. Tuttavia, salvo casi eccezionali di errata scelta di aggregati inquinati da anidride, il quantitativo di solfati presente in questi ingredienti

FIGURA 6. INTONACO REALIZZATO CON MALTA DI COCCIOPESTO. SI NOTI LA CLASSICA COLORAZIONE ROSSO MATRONE DELL'INTONACO.

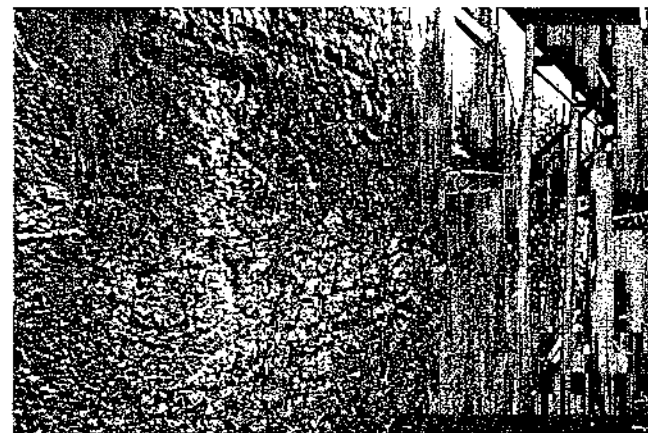




FIGURA 7. COMPARSA DI ROLE E DISTACCO DELL'INTONACO DI CALCE E CEMENTO NELLE ZONE BASALI DELLA MURATURA.



FIGURA 8. VISTA DELL'INTONACO DOPO LA REALIZZAZIONE DELLA RINATURA.

deve ritenersi innocuo, giacché dopo poche ore dal confezionamento della malta i solfati presenti, ed il gesso del cemento in particolare, si trasformano in un sale non pericoloso (mono solfoalluminato idrato) per la durabilità del materiale cementizio (3).

La presenza del solfato nei laterizi, invece, può determinare un severo degrado per le malte di allestimento e per gli intonaci a causa dell'interazione negativa (discussa al paragrafo 3) tra i sali del mattone con i prodotti di idratazione delle malte di cemento, di calce idraulica o di calce e pozzolana.

La presenza di solfati nei mattoni deve essere ascritta alle impurezze solfatiche che inquinano le materie prime utilizzate per la produzione dei laterizi. Le argille, infatti, possono contenere notevoli quantitativi di sali solfatici, in particolare solfati di sodio e potassio, che si mantengono inalterati nel prodotto finito senza decomporsi, soprattutto se per la cottura vengono utilizzate temperature piuttosto basse (4).

I sali solfatici, inoltre, ancorché non presenti nelle materie prime utilizzate per la produzione dei mattoni, possono formarsi durante il processo di cottura. Le argille, infatti, possono risultare frequentemente "inquinata" da pirite (FeS_2). Durante la cottura dei laterizi, la pirite libera anidride solforosa, che successivamente si combina per formare sali solfatici di metalli alcalini (potassio, sodio) o alcalino terrosi (calcio, magnesio) (4).

La pericolosità legata alla presenza di solfati nei laterizi è riconosciuta dalle norme di legge, che - attraverso un Regio Decreto del 1939 (5) - ne limitano il contenuto massimo allo 0.05% in peso (espresso come SO_3).

Negli anni recenti il contenuto di solfati nei laterizi di nuova produzione è aumentato notevol-

mente, al punto che il limite, invero molto severo, imposto dal Regio Decreto sopramenzionato non viene mai rispettato. Le ragioni dell'aumento del contenuto di solfati nei laterizi risiedono principalmente nella sempre maggiore difficoltà di reperire materie prime non inquinate da sali solfatici o pirite, ma anche nella necessità, dettata da ragioni di tipo ambientalistico ed energetico, di riciclare i tipi prodotti dalla combustione del carburante utilizzato per alimentare i forni di cottura dei laterizi. Infatti, i fumi caldi vengono reintrodotti all'interno dei forni con il conseguente arricchimento dell'ambiente di cottura dei laterizi delle impurezze di zolfo contenute nel combustibile.

Oggi non di rado si trovano in commercio laterizi aventi un contenuto di solfati decine di volte superiore al limite imposto dal vigente Regio Decreto che determinano spesso vistose efflorescenze saline sulla superficie dei mattoni, già durante il loro stoccaggio nel piazzale dello stabilimento di produzione (1). Generalmente queste efflorescenze saline sono costituite da solfati di sodio e potassio: thenardite - Na_2SO_4 - e aphthalite - $K_2Na(SO_4)_2$. In taluni casi, però, le efflorescenze formatesi sulla superficie dei laterizi stoccati in piazzale sono costituite da cristalli di gesso biidrato e addirittura di ettringite (1). La presenza di non trascurabili quantità di calcio nelle materie prime utilizzate per la produzione dei mattoni, infatti, in particolari situazioni, può favorire la formazione autonoma di gesso ed ettringite senza che il laterizio venga a contatto con malte idrauliche.

L'elevato contenuto di solfati nei laterizi può essere indirettamente responsabile di un'altra fonte di apporto di solfati nelle murature. È il caso delle malte da intonaco a base di cocchiopesto realizzate impiegando laterizi macinati in

aggiunta o in sostituzione delle sabbie (figura 6). Nelle malte a base di cocchiopesto i laterizi finemente macinati acquistano proprietà pozzolaniche che li rendono, cioè, capaci di reagire con l'idrossido di calcio, formando composti chimici molto simili a quelli che si ottengono dall'idratazione del cemento Portland. Pertanto, realizzando una malta con calce aerea (idrossido di calcio) e cocchiopesto, si ottiene un materiale che possiede discrete proprietà idrauliche, in grado di resistere al dilavamento da parte delle acque meteoriche e, quindi, è utilizzabile anche per la realizzazione di intonaci esterni.

Se per la realizzazione del cocchiopesto vengono utilizzati rottami di laterizi con elevato contenuto di solfati, si viene a creare una situazione potenzialmente molto pericolosa, in quanto i solfati sono direttamente introdotti e finemente dispersi nelle malte dove possono interagire con i prodotti formati a seguito della reazione pozzolanica e promuovere la formazione di ettringite responsabile del degrado.

IL RESTAURO DI INTONACI DEGRADATI PER ATTACCO SOLFATICO

Quando ci si trova di fronte alla necessità di ripristinare un intonaco degradato per azione dei solfati, è necessario utilizzare delle malte a base di leganti intrinsecamente resistenti all'azione dei solfati.

In linea di massima il cemento* non è consigliabile, soprattutto per intonaci, a causa della sua eccessiva rigidità ed alla elevata resistenza offerta alla diffusione del vapore che non consente un adeguato smaltimento dell'umidità contenuta nelle murature.

Qualora si debba confezionare, quindi, malte per intonaci o allorquando il cemento debba essere impiegato sotto forma di iniezioni per riempire le macroporosità esistenti all'interno della muratura, soprattutto se utilizzato con rapporti

* È bene, forse precisare che il termine "cemento" ha assunto il significato di legante generico e quindi esso include ogni forma di legante aereo o idraulico (calce, gesso, calce idraulica, cemento Portland, cemento pozzolanico, ecc.). La raccomandazione di non impiegare, in linea di massima, il cemento per il restauro delle murature negli edifici storici, si riferisce, invece, alle caratteristiche dei cementi quali sono definiti dalle Norme sui requisiti di questo materiale (Norma UNI/ENV 197 Parte 1a): in altre parole ciò che preoccupa, in questo contesto, sono le caratteristiche di elevata rigidità, di alta resistenza meccanica e di bassa porosità degli impasti cementizi rispetto ai materiali tradizionalmente impiegati nelle murature degli edifici storici.

acqua/cemento elevati per aumentare la fluidità della boiaccia, è necessario verificare la compatibilità del cemento con la eventuale presenza di solfati nelle murature. Infatti, l'elevata porosità capillare della pasta di cemento, necessaria per garantire negli intonaci un corretto smaltimento dell'umidità o nelle boiacche la fluidità necessaria a occludere vuoti della muratura, comporta una facile penetrazione da parte dei solfati. Ne deriva che l'unica difesa della pasta di cemento dell'intonaco o della boiaccia iniettata da parte dell'aggressione solfatica diventa, in queste condizioni, la sua insensibilità intrinseca al solfato. A questo proposito è raccomandabile il cosiddetto "saggio di Anstett" che consente di valutare, attraverso una prova tanto rapida quanto severa, l'assoluta inerzia del cemento al solfato (6).

Il saggio di Anstett consiste nel confezionare una

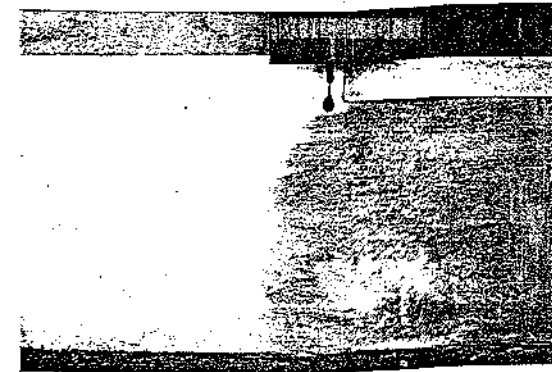


FIGURA 9. RIFACIMENTO DELLA TINTEGGIATURA.

"pasticca" ottenuta comprimendo con una sollecitazione di 2 MPa una miscela costituita da una parte di gesso e da due parti di cemento già idratato (e quindi contenente eventualmente silicati o alluminati di calce idrati capaci di produrre ettringite colloidale o thaumasite). La pasticca conservata in ambiente sauro di vapore non deve fessurarsi ed espandersi più dello 0.1%. Data la "intima" miscelazione del cemento idratato con il gesso, l'eventuale stabilità della pasticca diventa un chiaro sintomo di assoluta insensibilità della pasta di cemento, ancorché porosa, alla eventuale presenza di solfato nelle murature. In linea di massima, difficilmente i cementi disponibili in commercio sono capaci di superare positivamente

te il saggio di Anstett.

La calce idraulica può essere impiegata per malte da allettamento e per intonaci interni o esterni soprattutto nelle zone della muratura esposte agli agenti atmosferici e alla pioggia. Infatti, la calce idraulica, a differenza della calce aerea, è in grado di sopportare l'azione dilavante dell'acqua. A differenza del cemento, inoltre, consente di ottenere malte sufficientemente porose e poco

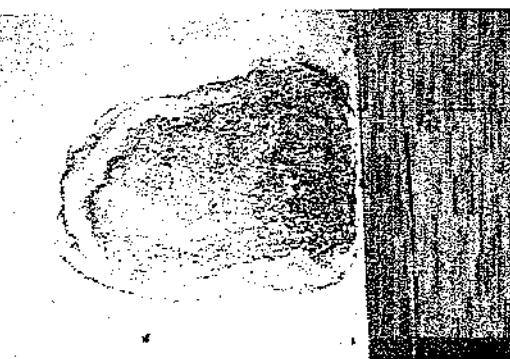


FIGURA 10. MACCHIA DI UMIDITÀ E VISTOSE EFFLORESCENZE SALINE SULL'INTONACO INTERNO.

FIGURA 11. PARTICOLARE DELLE MACCHIE E DELLE EFFLORESCENZE SALINE IN CORRISPONDENZA DELLA SPALLETTA DI UNA FINESTRA.

rigide. Tuttavia, anche per la calce idraulica, come per il cemento, valgono le stesse limitazioni laddove la muratura possa contenere dei solfati: in tal caso anche la calce idraulica dovrebbe essere sottoposta al saggio di Anstett, in quanto solo alcune calci idrauliche sono per la loro composi-

zione in grado di superare positivamente questa prova.

I leganti idraulici speciali sono dei formulati particolari, prodotti industrialmente al fine di conciliare le diverse antiche esigenze richieste per il restauro delle murature. Essi, mescolati con sabbia, debbono essere in grado di produrre malte da intonaco che siano:

- a) porose come malte di calce per consentire l'evaporazione dell'umidità dalla muratura (resistenza alla diffusione del vapore minore di 2 metri cubi di aria equivalente);
- b) idrauliche, e quindi capaci di resistere nel tempo all'azione della pioggia;
- c) di caratteristiche elastiche e meccaniche simili ai materiali esistenti nelle murature (resistenza a compressione di 5-15 MPa, modulo elastico di 5000-15000 MPa);
- d) capaci di resistere chimicamente all'azione dei solfati nonostante la loro porosità (saggio di Anstett positivo);
- e) povere di sali idrosolubili capaci di dare efflorescenze e subflorescenze per non caricare ulteriormente il contenuto salino già esistente nelle murature;
- f) compatibili con i rivestimenti superficiali anch'essi non impermeabili (marmorino o pitture colorate porose ma idrorepellenti).

ANALISI DI TRE CASE HISTORIES

Nel seguito vengono esaminati diversi esempi di edifici interessati da degrado per attacco solfatico. Come si potrà notare, in tutti e tre i casi analizzati il degrado è da ascrivere ad un eccessivo contenuto di solfati nei laterizi delle murature.

1° Caso - Riguarda un edificio costruito agli inizi del secolo sottoposto circa quattro anni orsono ad una ristrutturazione straordinaria che ha comportato la demolizione e il rifacimento degli orizzontamenti e della copertura; sono state mantenute, invece, le murature esterne e di spina originarie, realizzate in mattoni pieni a 3 e 4 teste. Gli intonaci originari, in larga parte ammalorati e cadenti, sono stati asportati meccanicamente e al loro posto sono stati applicati degli intonaci premiscelati a base di calce aerea e cemento portland, sui quali è stata successivamente applicata una tinteggiatura al quarzo di colore giallo.

Circa due anni dopo l'ultimazione dei lavori di ristrutturazione, hanno iniziato ad evidenziarsi delle "sbollature" nell'intonaco cementizio utiliz-

zato per la ristrutturazione (figura 7), accompagnate da efflorescenze di colore biancastro. Il degrado descritto si è manifestato solo sulla superficie esterna del paramento murario rivolto a sud ed è risultato circoscritto ad una fascia di intonaco alta circa 1 metro a partire dal terreno. Sulle superfici di laterizio messe a nudo a seguito del distacco dell'intonaco apparivano consistenti formazioni cristalline di colore biancastro. Mediante l'analisi per diffrazione dei raggi X nei frammenti di intonaco ammalorato è stata rilevata la presenza di ettringite a conferma di un degrado per attacco solfatico in atto. Inoltre, le efflorescenze biancastre risultavano costituite esclusivamente da solfato di sodio e solfato di magnesio.

Il degrado, limitato alla parte bassa di muratura a contatto col terreno, ha fatto inizialmente pensare che ci si trovasse di fronte ad un problema di risalita capillare dell'acqua. Ciò avrebbe comportato necessariamente, per risolvere completamente il problema, la realizzazione di uno sbarramento orizzontale (o di un sistema di elettrosmosi) che bloccasse (o invertisse) la risalita dell'acqua. Le analisi chimiche effettuate su campioni di terreno prelevati nelle vicinanze della muratura degradata, però, non hanno riscontrato la presenza di solfati nel suolo. D'altra parte, risultava abbastanza singolare che la risalita capillare avvenisse esclusivamente su una parete muraria mentre le altre ne fossero completamente esenti. Parallelamente, un'indagine diffrattometrica eseguita su campioni di laterizio prelevati dalla muratura degradata ha evidenziato tracce consistenti di sali solfatici di sodio, potassio e magnesio, che, invece, non sono state ritrovate, se non in minor misura, nelle malte di allettamento.

In sostanza, per l'edificio in esame si può ipotizzare la seguente situazione: l'impresa che ha effettuato i lavori di ristrutturazione ha asportato l'intonaco originario ammalorato (sicuramente anch'esso per attacco solfatico) senza preoccuparsi del motivo che aveva provocato tale degrado. Durante i lavori di restauro per il rifacimento degli intonaci è stata impiegata una malta a base cementizia non in grado di resistere all'azione deleteria dei solfati. Il degrado è avvenuto esclusivamente in corrispondenza della parete rivolta a sud e limitatamente alle fasce più basse, perché questa zona è la più esposta a cicli di bagnatura (per effetto delle piogge), e di asciugatura (per effetto dell'irraggiamento solare che è massimo per le pareti esposte a sud). Questi cicli hanno

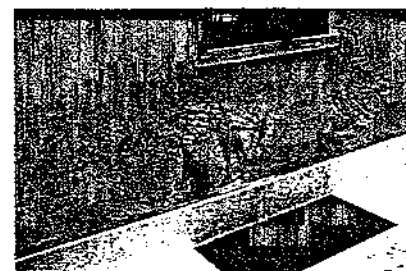


FIGURA 12. PRESENZA DI MACCHIE IN FORMA DI STRIATURE AD ALZONI SULL'INTONACO A MARMORINO.



FIGURA 13. MACCHIE SULL'INTONACO A MARMORINO IN CORRISPONDENZA DI MICROFESSURAZIONI DELL'INTONACO.

favorito inizialmente l'accumulo di acqua nella muratura, la quale nella successiva fase di evaporazione verso l'esterno ha trascinato con sé i sali solfatici contenuti nei laterizi, ponendoli a diretto contatto con la malta cementizia dell'intonaco. Questa situazione non si è verificata nelle altre pareti meno soggette a cicli di bagnatura-asciugatura, ma non è da escludere che il degrado non si possa verificare in futuro anche per questi paramenti.

Il ripristino delle stabiliture è stato effettuato sulla porzione di muratura degradata procedendo all'eliminazione dell'intonaco degradato mediante asportazione meccanica ed alla pulitura, mediante spazzole d'acciaio, della superficie dei laterizi da ogni deposito salino. Successivamente è stato applicato l'intonaco utilizzando per il confezionamento della malta un legante la cui resistenza al solfato è stata valutata preliminarmente mediante il saggio di Anstett. L'intonaco è stato applicato in tre fasi realizzando

un rinzafo, uno strato di intonaco grezzo e uno strato di finitura (figura 8). Infine, dopo l'indurimento si è proceduto al rifacimento della integgiatura (figura 9).

2° Caso - Il secondo esempio è relativo ad una casa colonica sottoposta ad una ristrutturazione straordinaria ancora in corso. La ristrutturazione ha previsto, tra l'altro, la demolizione e la ricostruzione di gran parte delle murature e il rifacimento degli intonaci interni ed esterni. Per la ricostruzione delle murature sono stati impiegati mattoni pieni di recente produzione; per il rifacimento degli intonaci è stata utilizzata una malta di calce e cemento. All'esterno della muratura è stato applicato esclusivamente lo strato grezzo.

Successivamente all'applicazione degli intonaci, in concomitanza con la stagione autunnale, sono comparse sulla superficie interna ed esterna dei muri vistose macchie di umidità accompagnate da efflorescenze saline (figure 10 e 11). Il problema ha interessato esclusivamente le pareti in muratura ricostruite con laterizi nuovi ed è stato osservato anche in corrispondenza di una ripresa effettuata a scuci-cuci - di una muratura vecchia - realizzata anch'essa con mattoni nuovi. La distribuzione delle macchie e delle efflorescenze risulta casuale con la presenza di zone umide sovrastanti zone completamente asciutte.

Le analisi diffrattometriche condotte su campioni di intonaco sano e di intonaco degradato hanno messo in evidenza nel campione degradato la presenza di thenardite e apthitalite (sali solfatici) che non si ritrovano nel campione sano. L'analisi quantitativa del solfato condotta sugli stessi campioni ha rilevato nel campione sano un contenuto di solfati dello 0,57% (espresso come SO_2), coincidente con il contenuto "fisiologico" di solfati apportato nella malta da cemento; nel campione degradato, invece, il contenuto di SO_2 è risultato del 3,35%, quindi 10 volte superiore al valore "fisiologico". Un'analoga analisi condotta sui laterizi nuovi e su quelli vecchi ha rilevato un contenuto di SO_2 pari al 3,5% nei primi; nei vecchi mattoni, invece, sono state riscontrate solo tracce di solfati. I risultati ottenuti indicano che il degrado è stato promosso anche in questo caso dai solfati presenti nei laterizi, ed in particolare in quelli nuovi utilizzati per la ricostruzione delle murature. E' probabile, inoltre, che la comparsa delle efflorescenze, sia stata facilitata da un elevato assorbimento di acqua piovana in quanto l'intonaco esterno - costituito dal solo strato grezzo -

è privo dello strato di finitura e risulta, quindi, particolarmente poroso. L'acqua piovana penetrata durante le piogge, infatti, tende successivamente ad evaporare verso le due superfici, interna ed esterna della muratura, trascinandosi con sé i sali solfatici disciolti nei laterizi e depositandoli sulla superficie sottoforma di efflorescenze.

Per ovviare ai difetti estetici lamentati, in questo caso, è necessario attenuare il carico di umidità presente nelle murature agendo in due direzioni. Occorre applicare uno strato di finitura esterno che, impedisca all'acqua piovana di penetrare nella muratura, ma allo stesso tempo consenta lo smaltimento sottoforma di vapore dell'umidità contenuta all'interno; ciò può essere realizzato completando l'intonaco, ancora allo stato grezzo, con uno strato di finitura realizzato con una malta solfato-resistente e macroporosa sul quale, ad indurimento avvenuto occorrerà applicare un protettivo idrorepellente a base di alchil-alcoisi silani. Il trattamento silanico ha la capacità di impedire all'acqua piovana di venire assorbita dalla muratura, senza però costituire una barriera impermeabile per l'acqua che in forma di vapore migra dall'interno del muro verso l'esterno. L'applicazione dell'intonaco macroporoso con finitura idrorepellente consentirà di non aggravare il carico di umidità all'interno della muratura evitando un eccessivo "movimento" dei sali solfatici all'interno della stessa. Gli eventuali sali trasportati dai mattoni verso la superficie esterna, per effetto della sola trasmissione del vapore prodotto all'interno del fabbricato, potranno essere "ospitati" all'interno delle cavità dell'intonaco macroporoso, evitando l'insorgere di pressioni di cristallizzazione distruttive per lo strato di finitura. Inoltre, la resistenza intrinseca del legante ai solfati eviterà l'insorgere di reazioni chimiche espansive legate alla formazione di ettringite e thaumasite.

Un'ulteriore precauzione, tesa ad evitare l'assorbimento dell'umidità prodotta all'interno a causa delle attività domestiche, è quella di realizzare all'interno un contornuro in laterizio forato che formi un intercapedine con la muratura presente e nella quale dovrà essere inserita la barriera al vapore.

3° Caso - Il terzo esempio riguarda una villa di recente costruzione i cui intonaci esterni sono stati realizzati con una malta di calce e ciocciopesto (strato grezzo) utilizzando rotami di laterizi

provenienti dalla demolizione di vecchi edifici; lo strato di finitura, invece, è stato realizzato a marmorino. Il marmorino è un tipo di finitura a base di grassello di calce e polvere finissima di pietra calcarea. Esso viene applicato in spessore millimetrico su un sottofondo costruito dall'intonaco grezzo, stendendo uno strato sottile di impasto di marmorino e curando di premerlo energeticamente. Questa operazione consente la fuoriuscita dell'acqua in eccesso e, quindi, di predisporre una microstruttura molto densa. Dopo l'asciugatura di questo strato, si applica un secondo velo di marmorino avendo cura di ridurre la finezza della polvere calcarea in modo da occludere i vuoti dello strato sottostante. Dopo aver realizzato uno o più strati di marmorino, si applica un velo di sapone di Marsiglia (a base di stearati) per migliorare l'impermeabilità della finitura. Lo strato sottilissimo di finitura ottenuto è caratterizzato da un aspetto estetico che richiama molto le venature del marmo, da cui il nome di marmorino.

Prima che fossero ultimati i lavori di costruzione dell'edificio, sugli intonaci esterni sono iniziate ad apparire macchie di colore marrone scuro particolarmente evidenti data la colorazione giallo-crema del marmorino (figura 12). Tali macchie risultano più evidenti e maggiormente diffuse nelle zone delle facciate più direttamente esposte all'azione dell'acqua piovana. In alcuni punti le macchie scure si sono manifestate in corrispondenza di microfessurazioni del marmorino (figura 13), mentre in altri hanno assunto la forma di piccoli aloni. Alcune macchie sono state rilevate anche sulla superficie di un intonaco interno realizzato in corrispondenza di una parete piena, comunicante con l'esterno, che per lungo tempo era rimasta non intonacata sulla superficie esterna.

Le analisi diffrattometriche condotte su campioni di finitura a marmorino macchiato hanno rilevato la presenza di gesso che, invece, non si ritrova nel marmorino privo di difetti. Le diffrattometrie, inoltre, hanno escluso la presenza di sali solfatici nello strato grezzo di intonaco a ciocciopesto. E' stata, quindi, effettuata un'analisi quantitativa del solfato sui laterizi rilevando una percentuale di solfati (espressa come SO_2) pari all'1,5%, che risulta 30 volte superiore al limite massimo ammesso dal Regio Decreto per i laterizi.

Anche in questa situazione, quindi, i difetti lamentati sono da ascrivere alla presenza eccessiva di solfati nei laterizi.

CONCLUSIONI

Sono stati analizzati tre diversi esempi di degrado per attacco solfatico che hanno coinvolto gli intonaci di alcuni fabbricati antichi e di recente costruzione. In tutti e tre gli esempi discussi si è evidenziato come gli effetti deleteri registrati sottoforma di efflorescenze saline, fessurazioni o distacchi dell'intonaco e macchie antiestetiche sulle finiture a marmorino, siano da ascrivere ad un eccessivo contenuto di solfati nei mattoni di gran lunga superiore al limite massimo (0,05%) previsto dal Regio Decreto n. 2233 attualmente in vigore.

Bibliografia

- (1) Dongi, Fabbri, *Difetti superficiali di pavimentazioni in cotto: ipotesi di sviluppo connesso con la migrazione di sali*, Atti del Convegno di Bressanone "Le Superfici dell'Architettura: II - Cotto. Caratterizzazione e Trattamenti", 399-407, (1992).
- (2) P.K. Mehta, *Cement Concrete Research*, 3, 1 (1973).
- (3) M. Collepardi, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*, III Ed., Hoepli, Milano (1991).
- (4) Collepardi, Coppola, *Materiali negli Edifici Storici*, Ed. ENCO (1991).
- (5) Regio Decreto 16 Novembre 1930, n. 2233 - Norme per l'accettazione dei laterizi.
- (6) F.M. Leo, *The Chemistry of Cement and Concrete*, Ed. Edward Arnold, London (1970).