

INTONACI DEUMIDIFICANTI E IDROREPELLENTI

Luigi Coppola
Enco, Spresiano, Treviso

1. Introduzione

Se si escludono i danni traumatici provocati negli organismi edilizi da eventi straordinari come terremoti, incendi e guerre, i danni "naturali" possono essere classificati, in base al meccanismo di degrado prevalente, in deterioramenti di tipo fisico, biologico o chimico.

Questi meccanismi di degrado (schematicamente illustrati in Fig. 1) coinvolgono sempre un'interazione del materiale con l'ambiente circostante (1). Il principale responsabile di questa interazione degradante è l'acqua. L'acqua, infatti, gioca un ruolo determinante in tutti i meccanismi di degrado dei materiali da costruzione. L'acqua può entrare nelle costruzioni, soprattutto nelle murature, dall'aria durante le piogge oppure per assorbimento di umidità dal terreno attraverso le fondazioni o per risalita capillare lungo le murature (Fig. 2).

Nel presente paragrafo verrà esaminato con maggior dettaglio il fenomeno della risalita capillare dell'umidità che, unitamente all'acqua piovana, è la fonte principale di degrado degli intonaci e delle malte di allettamento impiegate nella realizzazione dei paramenti murari. Per ragioni di brevità, non verranno trattati i fenomeni di condensa di umidità e di penetrazione d'acqua nelle murature interrate anch'essi schematicamente illustrati in Fig. 2 e per i quali si rimanda ai lavori di letteratura (2-3).

Il meccanismo di risalita dell'acqua nelle murature che insistono in terreni umidi è governato dal fenomeno fisico della capillarità che ha origine dalle forze di adesione che si stabiliscono in un poro di dimensioni ridotte (capillare) tra il liquido in esso contenuto e le pareti del poro stesso. In sostanza, un liquido come l'acqua, che mostra affinità per le pareti interne di un poro capillare immerso in un sistema contenente lo stesso liquido, risale spontaneamente all'interno del poro come sospinto da una pressione capillare (P_c) capace di sostenere la massa d'acqua in contrapposizione alle forze di gravità. La risalita di acqua avviene fin quando si stabilisce un equilibrio tra pressione capillare (P_c) e pressione idrostatica (P_i):

$$P_i = m \cdot g \cdot h = 2\sigma \cos\theta/r = P_c \quad [1]$$

con:

- m = massa volumica dell'acqua (100 kg/m^3)
- g = accelerazione di gravità (9.81 m/sec^2)
- h = massima altezza di risalita capillare (in m)
- σ = tensione superficiale dell'acqua ($72 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$)
- θ = angolo di contatto dell'acqua (circa 0°)
- r = raggio del vaso capillare

Approssimativamente, assumendo un valore per θ di 0° e quindi un valore di 1 per $\cos\theta$, l'altezza massima di risalita capillare dell'acqua vale:

$$h = 15 \cdot 10^{-6}/r \quad [2]$$

L'altezza massima di risalita capillare, quindi, dipende dalla dimensione dei pori del materiale costituente la muratura. Se si tiene conto (4) che la dimensione media dei pori nei materiali da costruzione si aggira tra qualche micron e qualche decina di micron (Fig. 3), dall'equazione [2] emerge che la massima altezza di risalita capillare può variare da qualche metro a qualche decina di metri. Nella realtà però - salvo qualche caso eccezionale - l'altezza di risalita capillare è sostanzialmente inferiore ai valori teorici e presenta un profilo irregolare (Fig. 4). Ciò è da ascrivere all'evaporazione di acqua dalla muratura reale non tenuta in conto nella definizione dell'equazione [2].

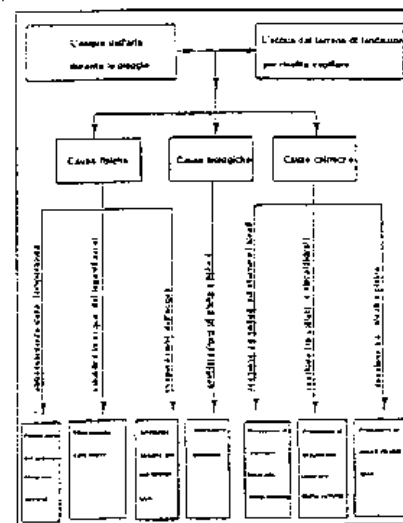


Fig. 1 - Cause di degrado biologiche, fisiche e chimiche provocate dalla presenza dell'acqua nelle strutture degli edifici storici.

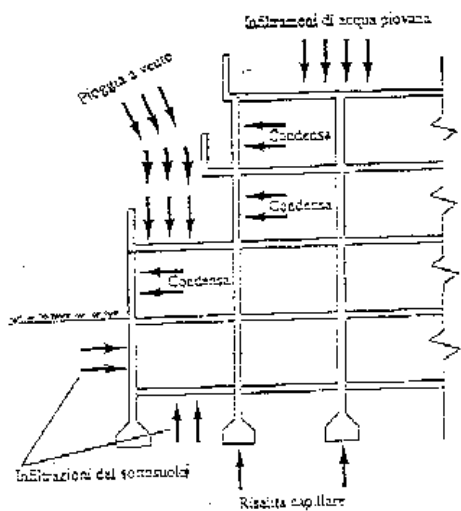


Fig. 2 - Visione schematica delle cause che determinano la presenza di umidità nelle murature.

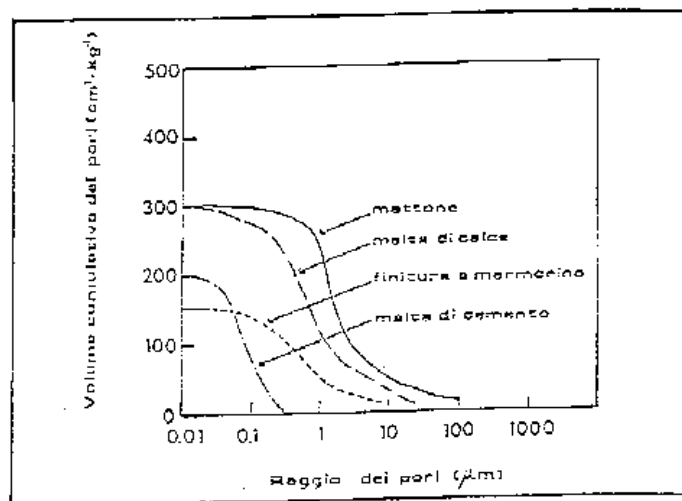


Fig. 3 - Tipiche distribuzioni dimensionali dei pori per alcuni materiali da costruzione nelle murature.

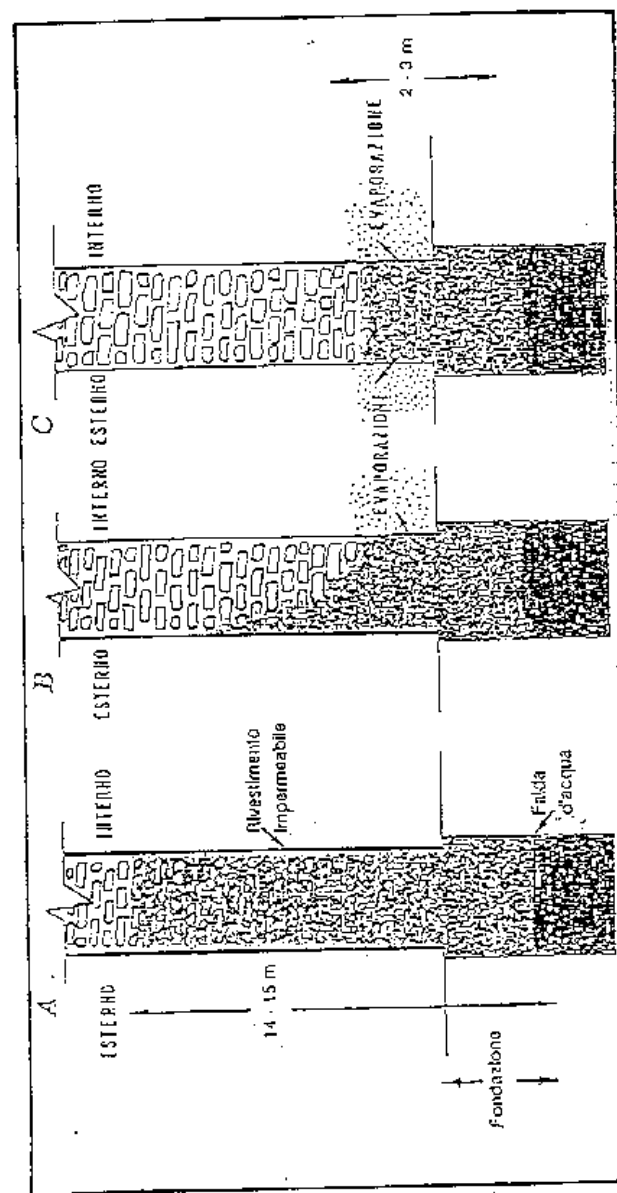


Fig. 4 - Risalita capillare della fondazione lungo la muratura : in una muratura con intonaci impermeabili interni ed esterni (A), in una muratura con intonaco poroso solo all'interno (B), in una muratura con intonaci porosi che consentono l'evaporazione nei periodi di clima asciutto (C).

Nella Fig. 4A si vede, per esempio, che la risalita capillare di acqua avviene fino a 14-15 m rispetto alla quota massima della falda acquosa (in accordo quindi con l'equazione [2] per $r = 1\mu\text{m}$) solo se la muratura è rivestita con un intonaco impermeabile su entrambi i lati (esterno ed interno) in modo da impedire completamente l'evaporazione. Nel caso in cui l'impermeabilizzazione esista solo sul lato esterno della muratura (Fig. 4B), la risalita è minore e presenta un profilo orizzontale irregolare. Se, infine, la muratura è rivestita con intonaci porosi e traspiranti su entrambi i lati, la risalita capillare dell'acqua si attesta ad una quota sostanzialmente più bassa (Fig. 4C).

2. Il ruolo dell'acqua nel degrado dei materiali nell'edilizia storica

Come già schematicamente mostrato in Fig. 1, i meccanismi attraverso i quali l'acqua danneggia le murature degli edifici storici possono essere schematicamente suddivisi in fisici, chimici e biologici.

Il più importante meccanismo fisico di degrado è la formazione del ghiaccio: quando la temperatura scende al di sotto di 0°C , l'acqua presente nei pori delle pietre, dei mattoni e delle malte congela con un aumento di volume pari circa al 10%. Le escursioni termiche diurne e stagionali fanno avvenire ciclicamente il fenomeno del gelo e disgelo dell'acqua, cosicché i materiali sono sottoposti ad una sollecitazione ripetuta che può provocare la rottura a fatica che si manifesta con delaminazione del materiale (Fig. 5).

Un secondo meccanismo degradante di tipo fisico che ha coinvolto le malte, e soprattutto gli intonaci, è il dilavamento da parte dell'acqua piovana nei confronti dei leganti aerei (calce e gesso) che, a indurimento avvenuto, producono composti relativamente idrosolubili (Fig. 6).

Un altro meccanismo, anch'esso di natura fisica, è legato alla presenza dei sali idrosolubili all'interno delle costruzioni. Ma di nuovo è l'acqua a promuovere il danneggiamento. L'acqua contenuta nelle murature, infatti, è soggetta a migrare, per effetto di gradienti di umidità, dalle zone più umide a quelle caratterizzate da un minor contenuto d'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 (e i solfati in particolare) 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. 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.

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 (subfiorescenza). 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, 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. 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. Questo tipo di degrado è frequentemente registrato nelle murature degli edifici di Venezia per effetto della elevata concentrazione salina nell'acqua che risale (Fig. 7).

Anche nei meccanismi di degrado chimico (5-9) l'acqua giuoca un duplice ruolo di fondamentale importanza: innanzitutto l'acqua è uno dei componenti che partecipano alle reazioni chimiche che avvengono all'interno dei materiali provocandone il deterioramento; in secondo luogo l'acqua funge da *carrier* per i sali (e per il solfato in particolare) trascinandoli da dove si trovano originariamente verso gli altri componenti (e verso gli alluminati e i silicati idrati in particolare) con i quali possono reagire chimicamente.



Fig. 5 - Tipica delaminazione di una muratura in mattoni per effetto dei cicli di gelo-disgelo.

Il solfato, solubile in acqua, è così in grado di raggiungere quei componenti con i quali può interagire provocando la formazione di due composti distruttivi come l'ettringite e la thaumasite.



Fig. 6 - Dilavamento dei giunti di malta nella muratura della Mole Vanvitelliana ad Ancona.

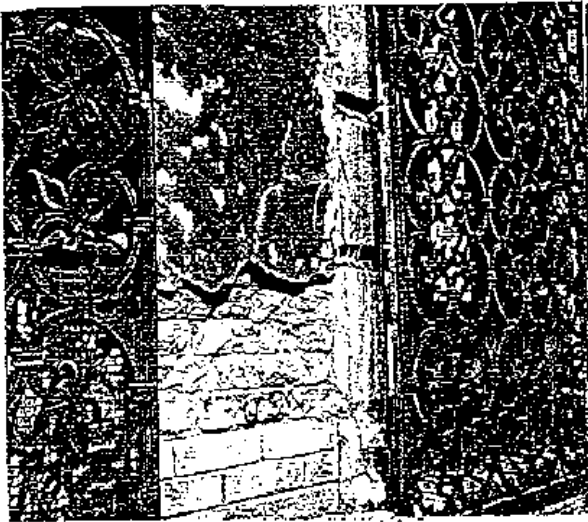


Fig. 7 - Degrado dell'intonaco di una muratura di Venezia per effetto dell'elevata pressione di cristallizzazione dei sali risalenti per capillarità dell'acqua di mare a contatto con le fondazioni.

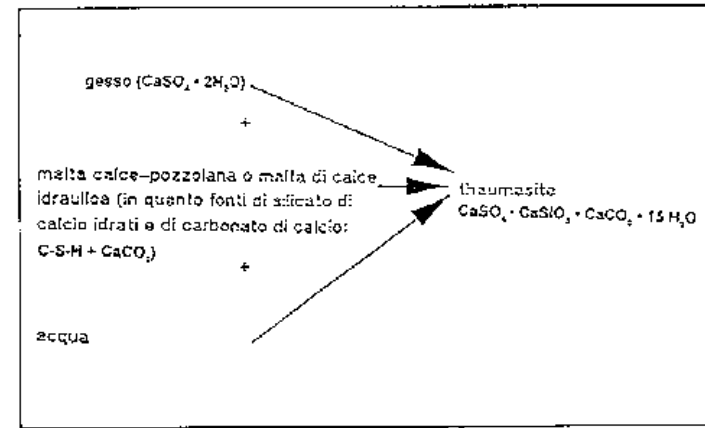
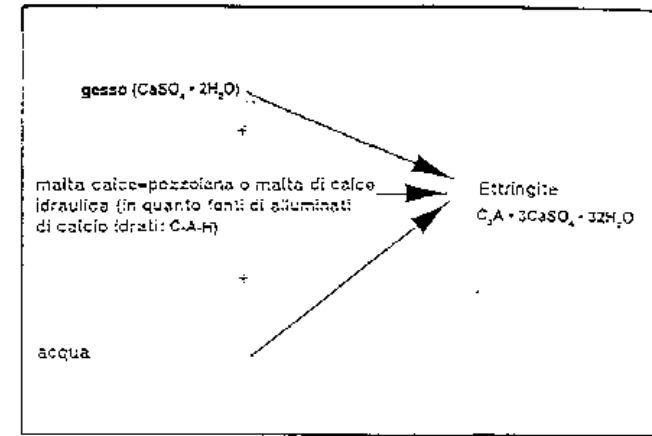


Fig. 8 - Processo schematico di produzione dell'ettringite (in alto) e di thaumasite nelle murature.

Paradossalmente, proprio le malte idrauliche (calce e pozzolana o calce idraulica) che hanno rappresentato, rispetto alle malte aeree (con calce o gesso), un notevole progresso tecnologico per la maggiore resistenza meccanica e per la maggiore resistenza all'azione dilavante dell'acqua piovana, si sono dimostrate più suscettibili all'azione del solfato. Infatti, 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 bi-idrato e gli alluminati di calcio idrati si forma l'ettringite (Fig. 8: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$); l'interazione del solfato di calcio bi-idrato con i silicati di calcio idrati, invece, da luogo alla formazione di thaumasite

(Fig. 8: $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$). 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, capaci di assorbire acqua e di aumentare notevolmente il proprio volume creando tensioni dirompenti e distruttive per la matrice legante (Fig. 9). 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 assorbire acqua e provocare rigonfiamenti (Fig. 9).



Fig. 9 - Microfotografia al microscopio elettronico dell'ettringite colloidale (sopra) e dell'ettringite cristallina.

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 allettamento. 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 (Fig. 10).

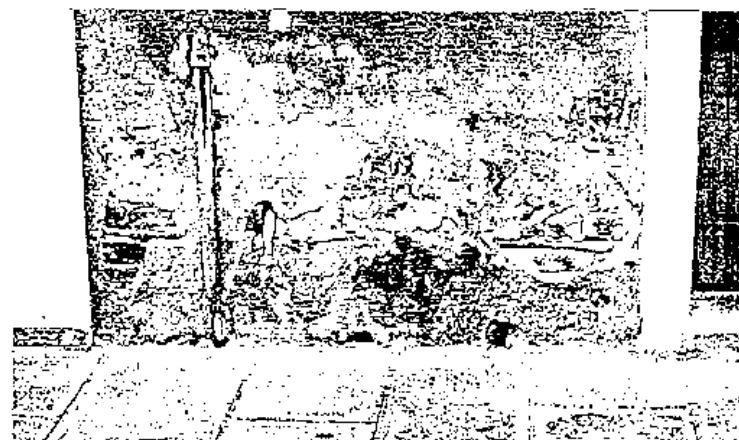


Fig. 10 - Intonaco degradato per formazione di ettringite (in alto): la malta si rigonfia e si stacca dal muro; i residui di intonaco appaiono tuttavia ancora consistenti. Intonaco degradato per formazione di thaumasite (in basso): la malta si presenta incoerente e viene facilmente dilavata.

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 (Fig. 10).

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

- all'utilizzo del solfato di calcio idrato (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.

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 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.

La presenza di solfato nelle murature può essere, inoltre, ascritta al fenomeno della risalita capillare dell'acqua. L'acqua di falda, infatti, tende a risalire per capillarità lungo la muratura trasportando con se 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 Fig. 11 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 a 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 completamente 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.

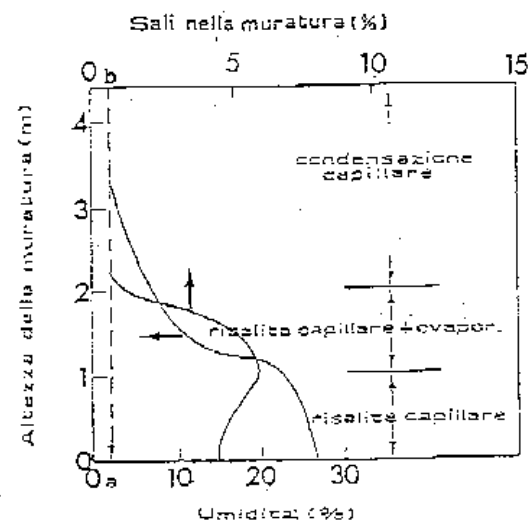


Fig. 11 - Umidità e contenuto di sali nella muratura in funzione della sua altezza (A = umidità residua dovuta alla condensazione capillare; B = contenuto di sali idrosolubili nei materiali originari costituenti la muratura).

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 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 (monosolfatoalluminato idrato) per la durabilità del materiale cementizio.

La presenza del solfato nei laterizi, invece, può determinare un severo degrado per le malte di allettamento e per gli intonaci a causa dell'interazione negativa 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 alla 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.

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).

La pericolosità legata alla presenza di solfati nei laterizi è riconosciuta dalle norme di legge, che - attraverso un Regio Decreto del 1939 - 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 notevolmente, 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 fumi 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. Generalmente queste efflorescenze saline sono costituite da solfati di sodio e potassio: thenardite - Na_2SO_4 - e aphtitalite - $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ -. In taluni casi, però, le efflorescenze formatesi sulla superficie dei laterizi stoccati in piazzale sono costituite da cristalli di gesso bidratato e addirittura di ettringite. 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. E' il caso della malte da intonaco a base di cocciopesto realizzate impiegando laterizi macinati in aggiunta o in sostituzione delle sabbie.

Nelle malte a base di cocciopesto 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 cocciopesto, 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 cocciopesto 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.

Per quanto concerne i meccanismi di degrado di tipo biologico, essi coinvolgono la formazione di muschi a base di alghe, licheni e funghi. Le alghe possono insediarsi sulla superficie degli intonaci umidi. Inizialmente assumono una colorazione verdastra (Fig. 12) che tende progressivamente al bruno e poi al nero fino a confondersi con le croste nere prodotte per solforazione negli ambienti inquinati da SO_4 (Fig. 13).



Fig. 12 - Tipica muratura deturpata dalla formazione di muschio per effetto dell'umidità.

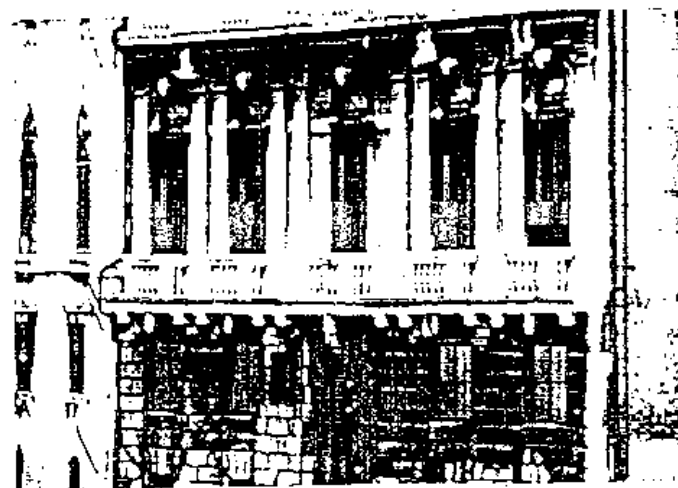


Fig. 13 - Tipica formazione di croste nere per solforazione della pietra calcarea. Interventi per eliminare o ridurre l'umidità nelle murature.

In genere le alghe scure crescono più facilmente in corrispondenza di zone alimentate dall'acqua che, in occasione delle piogge, è scaricata in modo improprio da grondaie difettose, avanzate, ecc. (6). Per quanto non accettabili esteticamente, soprattutto laddove esse provocano indesiderate variazioni cromatiche della superficie, le alghe non provocano un'azione disgregante dell'intonaco.

3. Interventi di risanamento

Per diminuire o eliminare gli inconvenienti connessi con la presenza di umidità nelle murature generalmente si interviene:

- per ridurre o annullare il flusso di acqua che risale dal terreno o per ridurre il quantitativo di acqua adescato dalle fondazioni o dai muri controterra;
- per aumentare l'evaporazione dell'acqua dalle murature verso l'ambiente esterno.

Il primo metodo, del quale esistono varie versioni, è più adatto per murature perennemente a contatto con un fondazione umida e consiste nell'interporre un'impedimento meccanico alla risalita capillare. Gli sbarramenti fisici alla risalita capillare possono essere di tipo orizzontale o verticale. Quelli orizzontali sono generalmente realizzati mediante taglio dei muri e successivo inserimento di lastre impermeabili in PVC (Fig. 14), oppure mediante iniezioni di resine o sostanze idrorepellenti. Gli sbarramenti verticali, invece, si rendono necessari quando l'edificio è costituito da piani interrati. Essi sono realizzati con materiali ad elevata impermeabilità che impediscono l'accesso dell'acqua nei locali cantinati.



Fig. 14 - Tagli del muro a Venezia: il taglio inferiore protegge la muratura dalla risalita capillare; il secondo taglio preserva la muratura dalla risalita capillare in caso di "acqua alta".

3.1. Gli intonaci macroporosi

Rispetto agli sbarramenti orizzontali, che bloccano alla "radice" (almeno da una certa quota in su) l'ingresso di umidità nella muratura per risalita capillare, il secondo metodo, basato su una maggiore quantità di umidità smaltita dalla muratura, è meno radicale. Esso consiste nell'applicare un intonaco costituito da uno o più strati di malte macroporose in grado di facilitare - proprio grazie all'elevata porosità - l'evaporazione dell'umidità dal muro verso l'ambiente esterno. L'applicazione dell'intonaco macroporoso, quindi, non elimina la risalita capillare di acqua nella muratura, ma favorisce soltanto lo smaltimento dell'umidità, soprattutto nei periodi di stagione calda e secca. Inoltre, la particolare struttura caratterizzata dalla presenza di cavità omogeneamente disseminate nella matrice legante (Fig. 15) consente agli intonaci macro-porosi di allentare le tensioni dirompenti dovute alla formazione del ghiaccio, evitando esfoliazioni e distacchi superficiali della stabilitura.

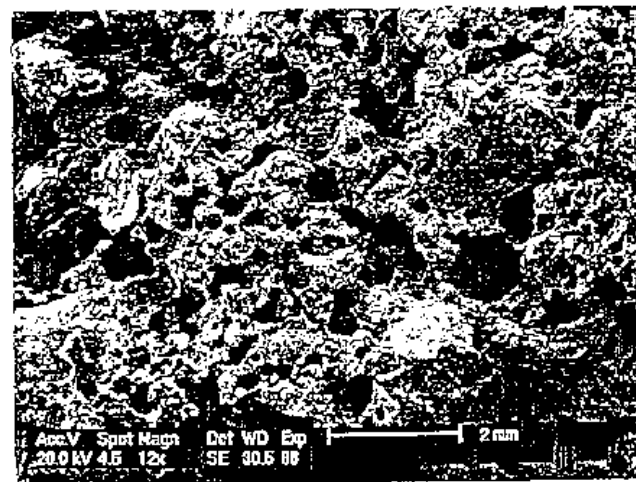


Fig. 15 - Microfotografia al microscopio elettronico di un intonaco macroporoso.

L'impiego degli intonaci macroporosi, tuttavia, se da una parte consente un facile smaltimento dell'umidità di risalita, dall'altra non può impedire l'ingresso dell'acqua piovana nella muratura. Il risultato è che si otterrà un beneficio, in termini di deumidificazione della muratura, solo se essa è situata in zone caratterizzate da un clima in cui le giornate asciutte e ventilate prevalgono su quelle umide e piovose. D'altra parte occorre sottolineare che se si applicasse sull'intonaco macroporoso un rivestimento impermeabile per impedire l'ingresso dell'acqua piovana nel muro, ne conseguirebbe anche una maggiore difficoltà di evaporazione dell'umidità presente nel muro per effetto della risalita capillare.

Pertanto la soluzione migliore al problema della deumidificazione delle murature consiste nell'applicazione di un intonaco macroporoso idrorepellente capace di impedire l'ingresso dell'acqua piovana liquida ed allo stesso tempo caratterizzato da una bassa resistenza alla diffusione del vapore, che consenta lo smaltimento dell'umidità presente nella muratura per effetto della risalita capillare.

La normativa tedesca DIN 4108 considera idonei per la protezione delle murature umide intonaci e rivestimenti protettivi superficiali caratterizzati dalle seguenti prestazioni (Fig. 16):

- resistenza alla diffusione del vapore (S_d) non superiore a 2 m equivalenti d'aria;
- assorbimento di acqua per capillarità (A) non superiore a $0.5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$;
- il prodotto della resistenza alla diffusione del vapore (S_d) per l'assorbimento di acqua per capillarità (A) deve essere minore di 0.1.

Per quanto attiene al primo requisito - resistenza alla diffusione del vapore (S_d) minore di 2 m equivalenti di aria - esso potrebbe essere conseguito realizzando un intonaco a calce di spessore pari a 2.5-3.0 cm caratterizzato da un valore S_d solitamente variabile tra 0.2 e 0.4 m. Tuttavia, questa soluzione non è praticabile in giacché, essendo la calce un legante di tipo aereo, l'intonaco risulterebbe dilavabile dall'azione dell'acqua piovana. Allo stesso modo deve essere escluso per la deumidificazione delle murature l'impiego di intonaci di solo cemento caratterizzati da un valore S_d maggiore di 2 m già per spessori di applicazione di 2 cm.

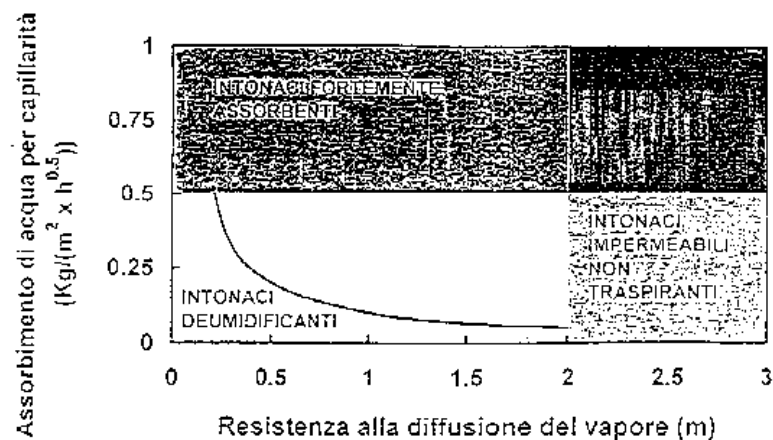


Fig. 16 - Individuazione degli intonaci deumidificanti sulla base della resistenza alla diffusione del vapore e dell'assorbimento di acqua per capillarità.

Quindi, il conseguimento di un a resistenza alla diffusione del vapore minore di 2 m può essere realizzata con leganti più deboli del cemento portland, ma non dilavabili dall'azione dell'acqua piovana (ad esempio calce idraulica), o con miscele di cemento e calce aerea (intonaci di malta "bastarda"), oppure "indebolendo" gli intonaci di solo cemento introducendo nella matrice legante - mediante l'impiego di tensioattivi - un sistema di microbolle opportunamente spaziate ($100-200 \mu\text{m}$) che consenta una facile trasmissione del vapore. Questo sistema ha il vantaggio di creare all'interno della matrice legante una serie di cavità nelle quali possono essere "ospitati" i sali presenti nel terreno o nei laterizi, e che vengono trasportati dall'acqua risalente sulla superficie della muratura. Queste cavità, inoltre, possono attenuare le pressioni indotte dalla cristallizzazione dei suddetti sali evitando esfoliazioni e distacchi dell'intonaco (Fig. 17).

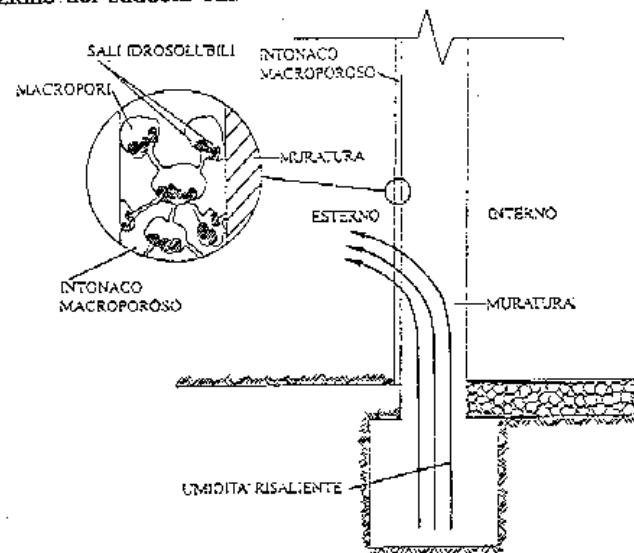


Fig. 17- Visione schematica di un intonaco macroporoso

Per quanto attiene al secondo requisito - assorbimento d'acqua (A) non superiore a $0.5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$ - esso può essere conseguito applicando sull'intonaco poroso un trattamento superficiale non pellicolante idrofobo, capace di impedire l'assorbimento di acqua senza alterare però le proprietà di trasmissione del vapore ($S_d \leq 2 \text{ m}$). Nella pratica la riduzione dell'assorbimento di acqua si consegue:

- applicando sulla superficie dell'intonaco (a spruzzo o a pennello) un trattamento liquido a base di alchil-alcossi silani (Fig. 18) che ha la peculiarità di modificare l'angolo di contatto tra acqua ed intonaco macroporoso senza ostacolare la trasmissione del vapore;

- applicando sulla superficie dell'intonaco una finitura cementizia (1-2 mm) additivata con silani predispersi in polvere (Fig.19).

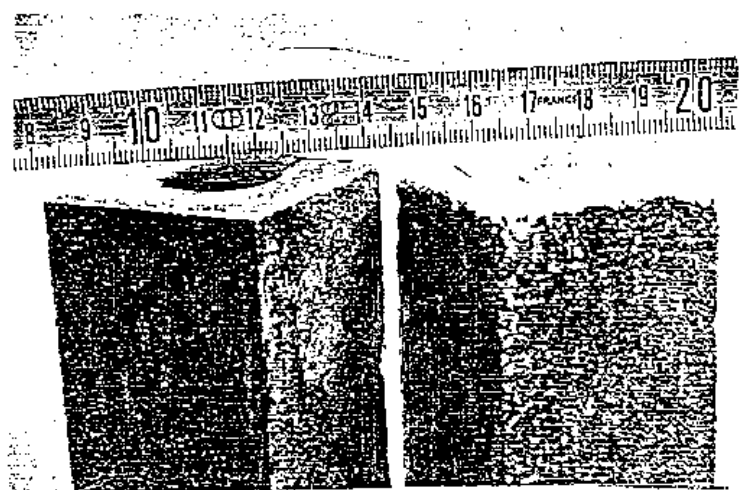


Fig. 18 - L'acqua viene assorbita dall'intonaco poroso (a sinistra) ma non dallo stesso se trattato con idrorepellente silanico.

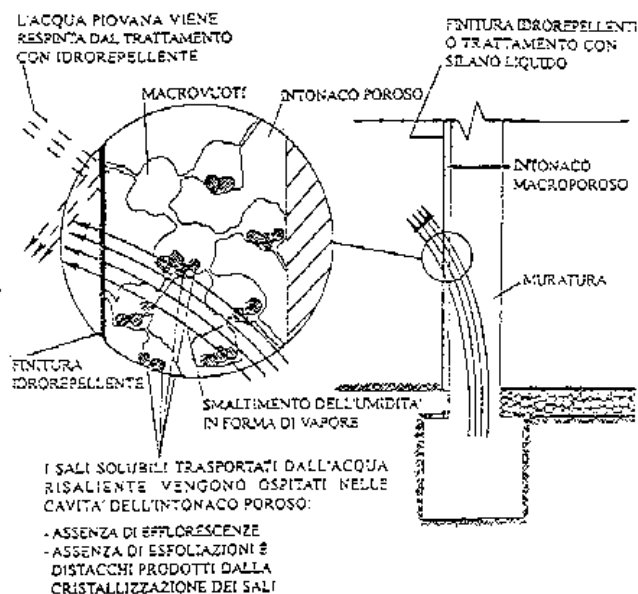


Fig. 19 - Visione schematica di un intonaco macroporoso idrorepellente.

3.2 Caratteristiche fisiche, chimiche ed elasto-meccaniche degli intonaci per la deumidificazione

Nel paragrafo precedente è stato evidenziato come l'intonaco debba essere eseguito con una malta macroporosa (per favorire lo smaltimento di umidità per evaporazione: Fig. 17) preferibilmente trattata con idrorepellente silanico (per impedire l'ingresso dell'acqua piovana dal lato esterno della muratura: Fig. 18-19).

In questo paragrafo vengono esaminate le caratteristiche fisico-meccaniche e chimiche dei materiali da utilizzare in fase di restauro.

In genere è bene riservare l'impiego della malta a base di calce solo per il restauro di interni dove, per l'assenza di pioggia, è di fatto impedito il dilavamento della malta per effetto della sua eccessiva porosità. Tuttavia, l'intonaco a marmorino - malta fine a base di calce - ha dimostrato un comportamento accettabile anche per rivestimenti esterni grazie alla particolare tecnologia applicativa che porta alla formazione di una microstruttura calcarea densa, compatta e, pertanto, non facilmente dilavabile. Naturalmente, l'accettabilità del marmorino per esterni è fondamentalmente legata alla comprovata abilità ed esperienza dello stuccatore.

L'impiego di malte idrauliche a base di calce e pozzolana naturale (o cocciopesto) rappresenta, in linea di massima, una buona soluzione per il restauro di murature (all'interno come all'esterno) a causa della buona resistenza alla pioggia di queste malte oltre che per la compatibilità fisico-meccanica (resistenza a compressione: circa 8-12 MPa; modulo elastico: circa 10.000-15.000 MPa) con i materiali similari esistenti. A queste caratteristiche meccaniche - relativamente deboli ma sufficienti per la riuscita del restauro - corrisponde una microstruttura sufficientemente porosa dell'intonaco per consentire un rapido smaltimento dell'umidità della muratura verso l'esterno (Fig. 17) soprattutto se trattato in superficie con rivestimenti trasparenti e traspiranti a base di silani (Fig. 18-19).

Esistono, tuttavia, alcuni casi anche per gli intonaci interni dove l'impiego della calce con pozzolana potrebbe dar luogo ad inconvenienti: laddove essa venga a contatto il solfato preesistente nella muratura; in queste situazioni si potrebbe verificare la formazione di ettringite e thaumasite (Fig. 8) con possibilità di degrado soprattutto in murature umide.

E' bene evitare l'impiego di gesso in fase di restauro. Per intonaci esterni esso non è assolutamente adatto a causa della sua elevata dilavabilità da parte della pioggia. Anche in tutte le altre applicazioni di restauro è bene non impiegare gesso giacchè esso potrebbe interagire con i materiali già esistenti (calce-pozzolana, calce idraulica, cemento) o con quelli adoperabili in futuri restauri, per dar luogo a pericolosi fenomeni rigonfianti a causa della produzione di ettringite colloidale o thaumasite.

In linea di massima il cemento non è consigliabile, soprattutto per intonaci a causa della sua eccessiva rigidità rispetto ai tradizionali materiali impiegati nelle murature degli edifici storici. Si può derogare da questa regola qualora il progettista del restauro ravvisi l'opportunità o la necessità di rinforzare staticamente alcune zone della struttura con malte o calcestruzzi, per esempio nelle fondazioni. In tal caso, l'effetto dell'eventuale presenza di solfati nelle murature può essere contrastato impiegando

malte o calcestruzzi con rapporto acqua/cemento così basso (meno di 0.40) da rendere il materiale cementizio impermeabile e quindi inattaccabile dal sale.

Altrettanto sconsigliabile è l'uso del cemento per malte da allettamento per intonaci, qualora la muratura è umida per risalita capillare: in tal caso la bassa porosità del rivestimento cementizio diventa un impedimento all'evaporazione dell'acqua dalla muratura nella stagione asciutta.

Qualora il cemento debba essere impiegato sotto forma di iniezioni per rinforzare le macroporosità esistenti all'interno della muratura, e qualora esso sia utilizzato con rapporti 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, in questo caso, l'elevato rapporto acqua/cemento comporta un'elevata porosità capillare della pasta di cemento una volta che sia indurita, e quindi una facile penetrazione da parte dei solfati. Ne deriva che l'unica difesa della pasta di cemento iniettata da parte dell'aggressione solfatica diventa, in queste condizioni, la sua insensibilità intrinseca alla reazione con il 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 (7).

Il saggio di Anstett consiste nel confezionare una "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 saturo di vapore non deve fessurarsi ed espandere più dello 0.1%. Data la "intima" miscelazione del cemento idratato con il gesso, la eventuale stabilità della pasticca diventa un chiaro sintomo di assoluta insensibilità della pasta di cemento iniettata, ancorché porosa, alla eventuale presenza di solfato nelle murature. In linea di massima, difficilmente i cementi disponibili in commercio sono capaci di superare positivamente il saggio di Anstett.

Le iniezioni di cemento sono state largamente impiegate per il consolidamento delle murature. Tuttavia, il successo dell'operazione, oltre che dalla compatibilità con i solfati, dipende moltissimo dalla effettiva capacità di riempire le cavità interne. Se si tiene conto delle dimensioni dei granuli di cemento (1-100 µm) è difficile pensare che le iniezioni cementizie possano impregnare i pori capillari delle malte preesistenti. Ciò che si può realisticamente ottenere è il riempimento delle macrocavità delle murature a sacco. Da questo punto di vista l'impregnazione dei pori capillari può essere garantita solo da liquidi fluidi capaci di penetrare nella porosità capillare. In prospettiva la disponibilità di "microcementi", con granulometria molto più fine di quella dei normali cementi, si presenta molto promettente per il futuro e potrebbe rivelarsi più efficace che non i normali cementi.

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, 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 rigide come avviene per le malte idrauliche a base di calce e pozzolana. Tuttavia, anche per la calce idraulica, come per il cemento e

per le malte di calce e pozzolana, 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 calce idrauliche sono per la loro composizione in grado di superare positivamente questa prova.

Esistono, infine, dei formulati particolari a base di leganti idraulici speciali, prodotti industrialmente al fine di conciliare le diverse antitetiche esigenze richieste per il restauro delle murature. Essi mescolati con sabbia, debbono essere in grado di produrre malte che siano:

- a) porose come le malte di calce (per consentire l'evaporazione dell'umidità dalla muratura);
- 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 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).

Bibliografia

- (1) M. Collepari e L. Coppola, "Il risanamento degli edifici storici: situazione attuale e prospettive nella ricerca", L'Edilizia, 9, 537-548, (1991).
- (2) S. Mammi, "L'Umidità da condensa", Eubios, 8-13, 16, Marzo 1996.
- (3) L. Coppola, "Umidità nelle costruzioni: diagnosi e rimedi", Presenza Tecnica, 79-86, Marzo - Aprile 1996.
- (4) M. Collepari e L. Coppola, "Materiali degli edifici storici. Degradazione e restauro", Enco, (1991).
- (5) M. Collepari, "Classificazione delle possibili tipologie delle murature degli edifici storici in base all'uso dei materiali originali", L'Edilizia, 9, 428-433 (1989).
- (6) M. Collepari, "Cause chimiche di degrado dei materiali originali nelle murature degli edifici storici", L'Edilizia, 10, 493-501 (1989).
- (7) M. Collepari, "Il degrado chimico causato dal restauro delle murature degli edifici storici", L'Edilizia, 11, 575-584 (1989).
- (8) M. Collepari, "Degradation and restoration of masonry wall of historical buildings", Materials and Structures, 23, 81-102 (1990).
- (9) M. Aquilino et al., "Il recupero edilizio", NIS, Roma (1984).