

IL DEGRADO CHIMICO CAUSATO DAL RESTAURO DELLE MURATURE DEGLI EDIFICI STORICI

1. I materiali impiegati nel restauro

I materiali impiegati nel restauro delle murature degli edifici storici appartengono sostanzialmente a due categorie: a) quelli simili ai materiali originali; b) quelli "nuovi" disponibili dalla fine del secolo scorso in coincidenza con l'avvento del cemento Portland prima e delle resine polimeriche dopo.

Vale subito la pena di sfatare un pregiudizio molto diffuso secondo il quale solo utilizzando materiali simili, se non identici, a quelli impiegati nella costruzione originale, si assicurerebbe un restauro tecnicamente efficace*.

A questo scopo è opportuno pensare che il degrado degli edifici storici si è manifestato in modo significativo ancor prima del restauro e quindi con i materiali originali.

1.1 I materiali originali impiegati nelle murature degli edifici storici

I materiali da costruzione impiegati originariamente nelle murature degli edifici storici sono fondamentalmente: la calce, il gesso, la sabbia, la pozzolana, i mattoni, le pietre [1]. Per quanto concerne i leganti, sia la calce che il gesso induriscono solo all'aria e non sono in grado di produrre malte meccanicamente resistenti e - soprattutto negli intonaci esterni - non sono capaci di resistere all'azione dilavante delle piogge.

1.1.1 La calce

Per quanto meccanicamente più resistente del gesso, la calce rimane un legante "debole". La malta di calce è dilavabile dalle acque piovane. Essa è porosa e

quindi permeabile all'acqua. Se, da una parte, questa caratteristica è vantaggiosa nel favorire la fuoriuscita di umidità che, per una qualunque ragione, può trovarsi all'interno di una muratura, la stessa caratteristica è, d'altra parte, sfavorevole alla protezione della muratura dalla penetrazione dell'acqua dall'ambiente esterno.

Solo in combinazione con la pozzolana, in luogo della sabbia normale, la calce è in grado di indurire significativamente e di produrre malte resistenti all'azione dell'acqua piovana (malta idraulica). I prodotti che si formano per reazione tra la calce, la pozzolana e l'acqua sono simili ai prodotti che si formano per reazione dell'acqua con i più moderni leganti idraulici (cemento e calce idraulica).

Successivamente, la scoperta della calce idraulica ha consentito di produrre malte "forti" e resistenti all'azione dell'acqua pur in presenza di una comune sabbia in luogo della pozzolana.

1.1.2 Il gesso

Il gesso, invece, rimane - pur in presenza di pozzolana - un legante "debole" ed incapace di resistere all'azione dissolvente dell'acqua. Pur tuttavia, il gesso è stato a lungo utilizzato in molte costruzioni storiche. La presenza di gesso, come legante delle murature negli edifici storici è stata riscontrata dall'autore del presente articolo all'interno delle murature di numerosi edifici storici in Italia**. Nè può escludersi il suo impiego in molti altri Paesi europei, Ludwig e Mehr [2], per esempio, hanno trovato tracce importanti di gesso dentro le mu-

ratore di numerosi edifici storici nel nord della Germania.

Nè deve sorprendere l'uso del gesso, nonostante la sua inferiorità prestazionale rispetto alla calce, come legante delle malte di allettamento. Innanzitutto perché la produzione del gesso legante era più semplice ed economica. In secondo luogo perché mancavano, nell'antichità, i mezzi di comunicazione attualmente disponibili con cui trasmettere, tra gli addetti alle costruzioni, informazioni sulle prestazioni tecnologiche dei materiali.

Infine, solo con l'avvento della chimica moderna si è potuto distinguere, su basi scientifiche e sicure, la pietra calcarea e quella da gesso con cui, per cottura, produrre rispettivamente la calce o il gesso legante; fu infatti solo nel 1780 che il chimico barlinese A.S. Marggraf scoprì la composizione chimica della pietra da gesso; prima di allora essa era stata molto spesso confusa con il calcare, benché fosse nota empiricamente la diversa temperatura di cottura [3].

Il gesso, inoltre, grazie alle sue caratteristiche di presa relativamente rapida, è stato talvolta scientemente impiegato nel passato (ma non solo nel passato) per "fissare" rapidamente le barre metalliche inserite nelle murature da restaurare.

Esistono, inoltre, altre importanti ragioni in base alle quali il gesso può essere presente nelle murature degli edifici storici, oltre a quelle riguardanti l'impiego del gesso come legante. Per esempio, i mattoni degli edifici storici, come del resto anche quelli delle costruzioni moderne, contengono quantità non trascurabili di sali solfatici [4] che si manifestano, talvolta, sotto forma di efflorescenze cristalline.

Questi sali, a contatto della calce o del calcare nella malta,

* Da questa valutazione squilibrata tecnica sono escluse, ovviamente, le considerazioni di carattere storico-culturale in base alle quali è opportuno, laddove è possibile, impiegare nel restauro materiali simili, se non identici, a quelli originali.

** L'uso nel passato del gesso come legante per intonaci esterni delle murature, se mai ci sia stato, non può essere attualmente riscontrato proprio per la facilità con cui esso sarebbe stato asportato dalle piogge.

danno luogo al solfato di calcio bivalente, cioè al gesso. Crammond [5], per esempio, ha trovato che anche nelle moderne murature in mattoni possono essere presenti rilevanti quantità di solfato.

Infine nelle costruzioni immerse in acque marine o salmastre, come per esempio a Venezia, i solfati presenti nell'acqua di mare risalgono per capillarità e producono, ancora, gesso a contatto con la calce o con il calcare della malta.

1.2. I materiali disponibili per il restauro

Tra i materiali "nuovi" attualmente disponibili, quelli significativamente diversi dai materiali originali sono: la calce idraulica, il cemento e le resine polimeriche.

Ovviamente nel restauro possono anche essere impiegati i leganti utilizzati nelle murature originali: la calce, il gesso, e la miscela calce-pozzolana. Quest'ultima, ai fini del presente articolo si comporta come una calce idraulica o un cemento Portland, giacché i suoi prodotti di idratazione contengono silicati e alluminati di calcio idrati [1] che possono interagire negativamente con i solfati esistenti nelle murature, come è mostrato più avanti nel paragrafo 3. Per quanto riguarda la calce ed il gesso, essi presentano innanzitutto il limite di essere facilmente dilavabili dalle piogge, soprattutto qualora siano impiegati negli intonaci esterni. Inoltre, come si vedrà al paragrafo 3 essi possono anche interagire negativamente con gli altri componenti preesistenti nella muratura.

1.2.1 La calce idraulica ed il cemento

La calce idraulica prodotta in passato, ed utilizzata già dal Palladio [1], era ottenuta per cottura

di calcari marnosi, cioè da miscele naturali di calcare ed argilla. Essa era costituita sostanzialmente da idrossido di calcio, C_2S^* e CA ed a questi ultimi due composti (presenti rispettivamente nel cemento Portland ed in quello aluminoso) si deve il comportamento idraulico del legante, cioè la caratteristica di indurire anche sotto acqua e di resistere all'azione dilavante della pioggia [6]. Attualmente la calce idraulica è di fatto un vero e proprio cemento Portland "diluato" con filler ed additivato con agente aerante, allo scopo di produrre malte di plasticità simile a quella ottenibile con la calce idraulica "di una volta" grazie alla presenza di un significativo volume di aria [7].

Ad ogni modo, dal punto di vista delle possibili interazioni con i materiali originali delle murature, non esiste una sostanziale differenza tra la calce idraulica attualmente disponibile e quella prodotta un tempo: in entrambi i leganti sono presenti composti mineralogici dal comportamento idraulico: C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF nel primo caso e C_2S e CA nel secondo [6]. Sono proprio i prodotti di idratazione di questi componenti mineralogici che possono interferire, come si vedrà più avanti, con altri composti presenti nelle murature originali ed in particolare i sali solfatici.

Si comportano come il cemento Portland anche il cemento pozzolanico o quello d'altoforno che contengono gli stessi costituenti mineralogici del cemento Portland accanto rispettivamente alla pozzolana o alla loppa d'altoforno.

1.2.2 I materiali polimerici

Per quanto concerne i materiali polimerici essi sono presenti sotto

forma di lattici acquosi (a base acetato di vinile, acrilato, ecc.) mescolati con cariche minerali (caolino, polvere di marmo, coloranti, cemento, ecc.) per formare una dispersione da applicare come pittura o come strato di finitura finale sulla malta della muratura.

Il rivestimento pellicolare indurisce per evaporazione dell'acqua ed il polimero, fortemente adesivo al supporto, forma un sottile strato impermeabile sulla muratura. Talvolta, laddove è presente il cemento come carica minerale, all'azione ricoprente contribuisce anche l'idratazione del cemento stesso: in questo caso, a seconda del rapporto polimero/cemento ed acqua/cemento, il rivestimento potrà risultare più o meno permeabile all'umidità. Alternativamente si sono impiegati rivestimenti altrettanto impermeabili a base di due componenti (per esempio: resine epossidiche), miscelati eventualmente con solvente e/o con cariche di filler finissimi e coloranti. In questo caso la polimerizzazione avviene in situ per reazione tra i due componenti con conseguente formazione di uno strato pellicolare altrettanto adesivo al rapporto murario ed impermeabile all'umidità.

Proprio la formazione di uno strato di materiale polimerico, pochissimo permeabile all'umidità, è stata la causa di molti insuccessi [8]. Infatti il rivestimento pressoché impermeabile se da una parte protegge la muratura dalla pioggia, dall'altra impedisce all'umidità, presente all'interno della muratura, di evaporare verso l'esterno se non molto lentamente. La formazione di ghiaccio a seguito del raffreddamento ambientale provoca conseguentemente un brusco rigonfiamento e distacco dell'intonaco. Oppure, un rapido riscaldamento ambien-

* Secondo la simbologia adottata usualmente nella chimica del cemento: S = SiO_2 ; A = Al_2O_3 ; C = CaO ; F = Fe_2O_3 .

tafe, fa aumentare, nei periodi in cui la muratura è esposta all'insolazione, la pressione del vapore acqueo all'interno della muratura con conseguente distacco della malta di intonaco*.

Oltre alle motivazioni sopra riportate, in base alle quali i rivestimenti polimerici hanno provocato il distacco degli intonaci dalle murature degli edifici storici, ma anche da quelle delle costruzioni recenti [9], c'è da sottolineare che l'impermeabilità del rivestimento è stata una causa non trascurabile del degrado delle murature stesse. Infatti, è solo in presenza di umidità che i degradi chimici hanno potuto esplicarsi. Il ruolo dell'acqua è duplice: da una parte funge da "trasportatore" degli ioni idrosolubili (solfati ed alcali) verso i componenti della muratura (silice amorfa, silicati e alluminati di calcio idrati) con i quali i sali interagiscono negativamente: dall'altra l'acqua è uno dei componenti indispensabili che partecipa al decorso stesso delle reazioni degradanti [10].

2. Scopo del lavoro

In una precedente nota [1] si sono descritte le diverse tipologie derivanti da tutte le possibili combinazioni dei materiali originali impiegati negli edifici storici prima dell'avvento del cemento Portland (calce, calce idraulica, gesso, pozzolana, mattoni, pietra).

In una nota successiva [10] si sono esaminate le possibili cause di degrado delle murature provocate dalle interazioni chimiche tra i materiali originali. Tutte queste cause di degrado chimico so-

no sostanzialmente da ricondurre alla reazione alcali-silice amorfa (nella pietra) e soprattutto alla reazione dei sali solfatici che provocano la formazione di ettringite e/o thaumasite. In tutte e tre queste reazioni, che provocano rigonfiamenti e distruzione per lo più della malta, l'acqua giuoca un ruolo di fondamentale importanza. Ne consegue che solo in presenza di umidità, sia pure non continua, le murature degli edifici storici possono essersi degradate.

Lo scopo del presente articolo è quello di analizzare le possibili cause di degrado provocato dalle interazioni tra i materiali originali e quelli successivamente impiegati nelle operazioni di restauro e di consolidamento. Non è, infatti, infrequente il caso di edifici storici che, dopo un'apparente ed immediata "rivitalizzazione" in seguito al restauro o al consolidamento delle murature hanno subito successivamente un degrado talvolta più intenso di quello in atto prima dell'intervento manutentivo o restauratore.

3. Degrado, dopo il restauro, provocato dalla formazione di ettringite o thaumasite

A parte gli insuccessi registrati con l'uso dei materiali polimerici, fondamentalmente provocati dalla impermeabilizzazione di murature umide, ed ai quali si è già accennato nel paragrafo 1.2.2, nel presente articolo vengono esaminate le cause di insuccesso nel restauro o nel consolidamento delle murature, allorchando si impiegano, per queste operazioni, i leganti idraulici, quali il cemento Portland, la calce idraulica o anche miscele di calce-pozzolana. In tutti questi casi, infatti, proprio la idraulicità del legante (dovuta alla formazione di allu-

minati di calcio idrati e soprattutto di silicati di calcio idrati) cui si deve la resistenza all'acqua delle malte indurite, è anche responsabile delle possibili interazioni con il solfato di calcio eventualmente presente nelle murature per una delle ragioni esposte al paragrafo 1.1.2.

Nella Fig. 1 è mostrato schematicamente il processo della reazione che porta alla formazione di ettringite; perché questa reazione possa avvenire occorrono tre condizioni:

- la presenza di solfati nella muratura;
- la presenza di alluminati di calcio idrati nelle malte impiegate nel restauro;
- la presenza di umidità nella muratura.

Nella Fig. 2 è mostrato schematicamente il processo della reazione che porta alla formazione di thaumasite; anche in questo caso perché la reazione possa decorrere occorrono tre condizioni:

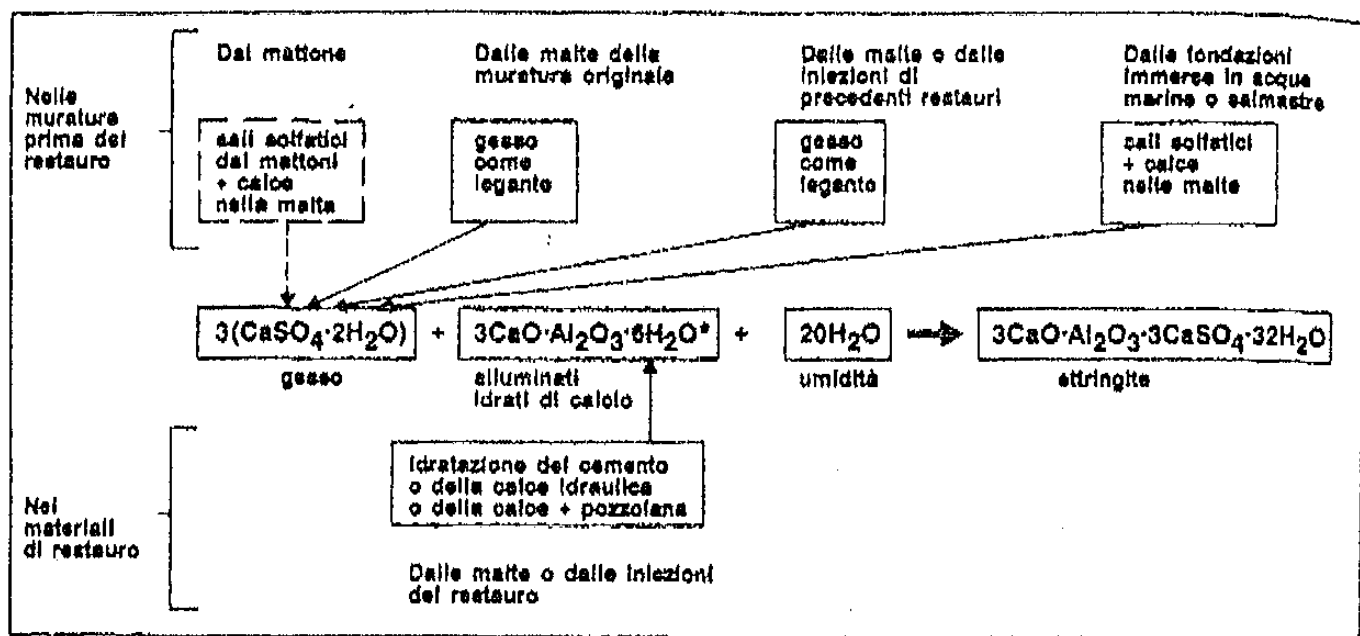
- la presenza di solfati nella muratura;
- la presenza di silicati di calcio idrati nelle malte impiegate nel restauro;
- la presenza di umidità.

Come si vede negli schemi di reazione illustrati nelle Fig. 1 e 2, allorchando si impiega nel restauro una malta idraulica a base di cemento, di calce idraulica o anche di calce-pozzolana esistono le condizioni per la formazione di alluminati idrati di calcio e di silicati idrati di calcio. Pertanto, se nelle murature, per una delle ragioni illustrate nel paragrafo 1.1.2, esistono il solfato di calcio e l'umidità, ne consegue la possibilità di formazione di ettringite (Fig. 1) e/o di thaumasite (Fig. 2) e quindi il degrado più o meno rapido della malta impiegata nel restauro.

Qualora poi, il cemento - o gli

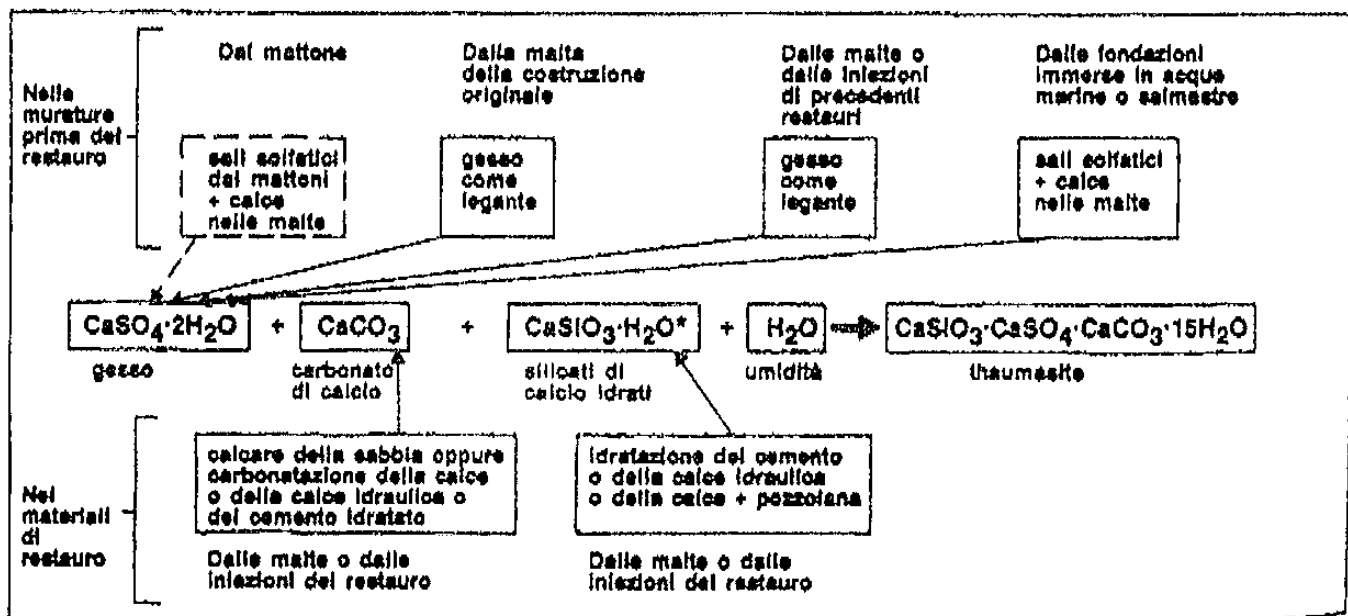
* Ovviamente la formazione di una strato protettivo impermeabile di lattice polimerico, di resine epossidiche e anche di malte cementizie a basso rapporto acqua/cemento (e quindi poco porosa) non genera questi inconvenienti nel caso di murature sicuramente e continuamente asciutte: in tal caso il rivestimento protegge la muratura dall'azione delle acque piovane o comunque ambientali.

Fig. 1 Schema delle possibili interazioni tra i leganti idraulici impiegati nel restauro ed il solfata preesistente nella muratura per la formazione di ettringite. La parte tratteggiata riguarda solo le murature in mattoni contenenti sali solfatici.



* L'alluminato idrato indicato può essere sostituito da altri alluminati di calcio idrato quali, per esempio, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$.

Fig. 2 Schema delle possibili interazioni tra i leganti idraulici impiegati nel restauro ed il solfata preesistente nella muratura per la formazione di thaumasite. La parte tratteggiata riguarda solo le murature in mattoni contenenti sali solfatici.



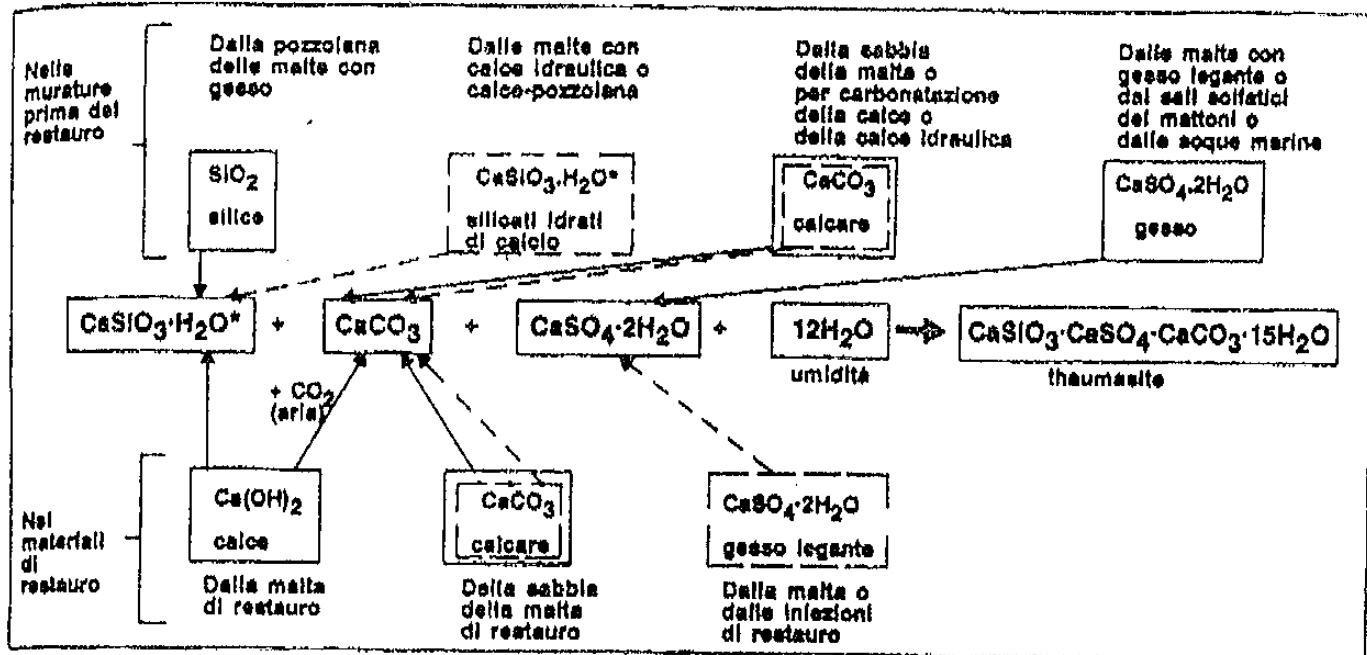
* Il silicato idrato indicato rappresenta in effetti i silicati di calcio idrati di formule generica $x\text{CaO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ indicati anche come C-S-H nella chimica del cemento.

altri leganti idraulici - siano usati per produrre boiacche cementizie da iniettare all'interno di murature da consolidare, la produ-

zione di ettringite e/o thaumasite può coinvolgere anche la staticità della costruzione se i fenomeni espansivi e distruttivi riguardano

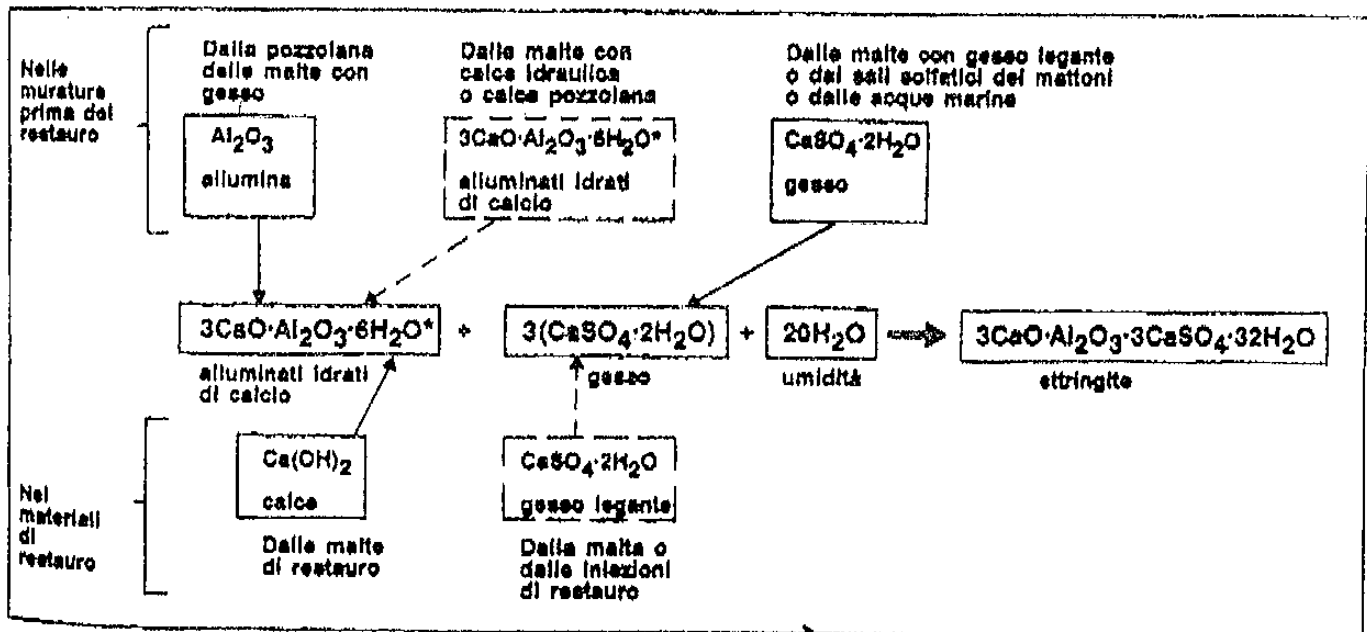
estensivamente la muratura. La formazione di ettringite può avvenire anche impiegando, per il restauro, i leganti aerei tradi-

Fig. 3 Schema delle possibili reazioni tra i leganti aerei (calce e gesso) impiegati nel restauro e gli alluminati idrati di calcio (rispettivamente che si formano e che preesistono) nella muratura; le linee tratteggiate riguardano la produzione di ettringite quando il legante del restauro è il gesso; quelle continue quando il legante del restauro è la calce.



* L'alluminato idrato indicato può essere sostituito da altri alluminati di calcio idrati quali, per esempio, $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$.

Fig. 4 Schema delle possibili reazioni tra i leganti aerei (calce e gesso) impiegati nel restauro ed i silicati di calcio idrati (rispettivamente che si formano e che preesistono) nella muratura; le linee tratteggiate riguardano la produzione di ettringite quando il legante del restauro è il gesso; quelle continue quando il legante del restauro è la calce.



* Il silicato idrato indicato rappresenta in effetti i silicati di calcio idrati di formula generica $xCaO \cdot ySiO_2 \cdot zH_2O$ indicati anche come C-S-H nella chimica del cemento.

zionali (calce e gesso) qualora si verificano determinate condizioni nelle murature da restaurare (Fig. 3). Per esempio, l'impiego

della calce nel restauro, laddove esista tra i materiali originali nelle murature la pozzolana (contenente allumina) ed il gesso legante

(oppure quello che si forma per i sali solfatici del mattone o per risalita capillare di acque marine), può portare alla forma-

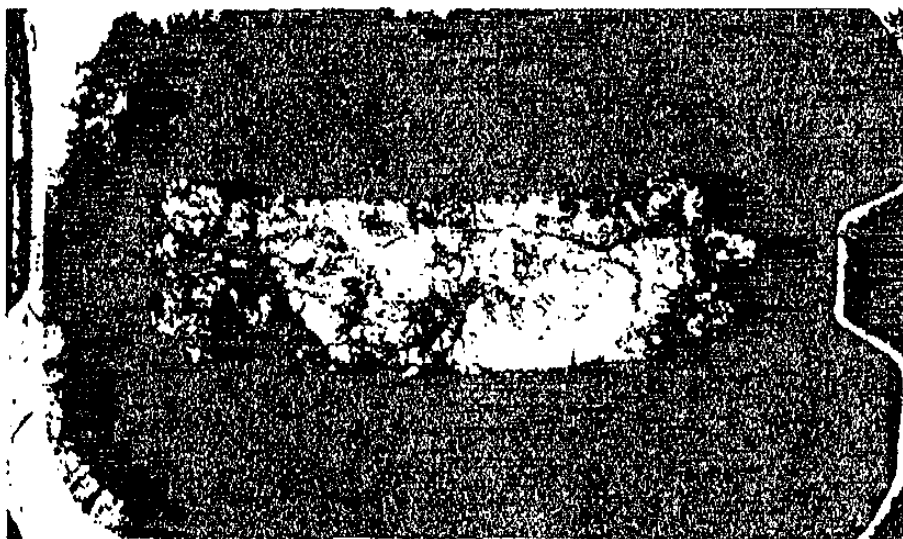


Foto 5 Provino di impasto cementizio fessurato per formazione di ettringite.

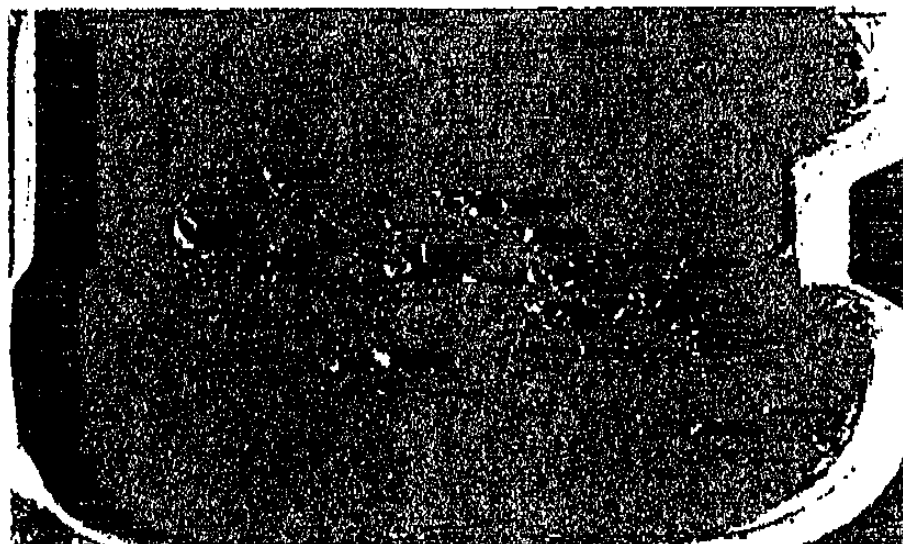


Foto 6 Provino di impasto cementizio distrutto per formazione di thaumasite.

zione di ettringite (Fig. 3, linee continue). L'ettringite può anche formarsi se si impiega nel restauro il gesso legante in murature già contenenti alluminati di calcio idrati derivanti dalle malte a base di calce idraulica o calce-pozzolana (Fig. 3, linee tratteggiate).

D'altra parte anche la formazione di thaumasite può avvenire impiegando nel restauro i leganti aerei tradizionali (calce e gesso) come è mostrato in Fig. 4: le linee

continue indicano i reagenti che portano alla formazione di thaumasite impiegando la calce nel restauro; le linee tratteggiate indicano i reagenti che portano alla formazione di thaumasite impiegando il gesso nel restauro.

Qualunque sia lo schema delle reazioni che, secondo le Fig. 1-4, porta alla formazione di ettringite o thaumasite, le principali differenze tra le due reazioni sono le seguenti:

a) L'ettringite si forma provo-

cando l'espansione della malta che rimane, anche dopo fessurazione, un materiale solido e resistente; la thaumasite, invece, non è accompagnata da una significativa espansione ma, dopo la sua formazione, la malta diventa incoerente e priva di qualsiasi resistenza dando luogo, soprattutto in presenza di acqua, ad una massa incoerente: le foto delle Fig. 5 e 6 mostrano due provini di laboratorio, uno fessurato e l'altro completamente distrutto a causa della formazione rispettivamente di ettringite e thaumasite da una malta di cemento a contatto con una soluzione di solfato di magnesio; le foto delle Fig. 7 e 8 mostrano due intonaci a base di cemento, degradati rispettivamente per formazione di ettringite o di thaumasite individuati entrambi mediante diffrattometria a raggi X: si noti come nel primo caso si verifica un distacco dell'intonaco che rimane comunque consistente, mentre nel secondo caso è possibile affondare un dito nella malta incoerente e priva di qualsiasi resistenza, a causa della formazione di thaumasite.

b) L'ettringite si forma più rapidamente della thaumasite e molto spesso, quindi, la presenza di thaumasite è preceduta dalla formazione di ettringite [5]; a seconda delle condizioni (temperatura, umidità, ecc.) la thaumasite può formarsi in qualche decina di giorni o in qualche anno.

c) Anche se le basse temperature favoriscono la formazione di entrambi i processi, è soprattutto la formazione di thaumasite ad essere accelerata nei climi freddi [5,11]; le condizioni igrometriche ottimali per la produzione di thaumasite sono: U. R. = 90% e temperature tra 0°C e 5°C.

Sia l'ettringite che la thaumasite sono individuabili attraverso una analisi per diffrazione di

raggi X, purché i campioni siano umidificati qualora siano stati prelevati da una muratura esposta all'insolazione e quindi eventualmente asciugatosi: infatti, un essiccamento eccessivo potrebbe eventualmente decomporre l'ettringite e la thaumasite ed impedire il riconoscimento ai raggi X nonostante la loro effettiva presenza nella muratura degradata.

Per quanto concerne i fenomeni fisico-meccanici che accompagnano la formazione di ettringite e thaumasite, essi dipendono dal particolare tipo di restauro.

Nel caso di iniezioni di cemento per il consolidamento di murature, l'aumento di volume che segue la formazione di ettringite, può arrivare alla fessurazione quasi immediata della costruzione: l'evento dipende ovviamente dalla quantità di ettringite formata e dalla resistenza meccanica a trazione della muratura da consolidare: se, invece, si forma la thaumasite si assiste, dopo un iniziale consolidamento subito dopo l'iniezione, ad un lento e progressivo indebolimento del sistema legante che potrebbe anche provocare il collasso della struttura.

Nel caso di restauro delle malte di allettamento o degli intonaci, la formazione di ettringite è accompagnata da rigonfiamenti, espulsioni e distacchi di malta, mentre la thaumasite provoca un "rammollimento" della malta: poiché questa diventa facilmente asportabile dall'azione delle acque piovane, non sempre è possibile effettuare il riconoscimento della thaumasite se l'intervento diagnostico avviene molto tempo dopo il degrado.

3.1. Le murature in mattoni degradabili dopo il restauro per formazione di ettringite e thaumasite.



Fig. 7 Intonaco degradato per formazione di ettringite: la malta si rigonfia e si stacca dal muro; i residui di intonaco appaiono tuttavia ancora consistenti.

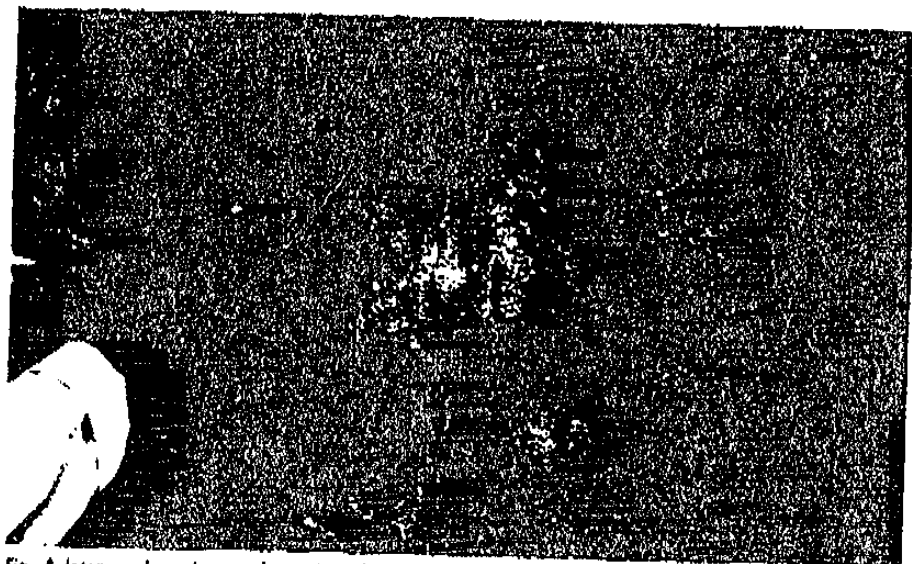


Fig. 8 Intonaco degradato per formazione di thaumasite: la malta si presenta così incoerente che un dito, appena appoggiato, vi affonda agevolmente.

Nella Tabella 1 sono indicate le 20 possibili tipologie di murature in mattoni in base ai materiali originariamente impiegati. Ciascuna di esse è individuata da un codice alfabetico di quattro lettere secondo una classificazione illustrata in un precedente lavoro [1]. Per esempio la muratura Mic'c indica una muratura in mattoni (M), Intonacata (i), per la quale si è impiegata calce idraulica o calce-pozzolana (c') nella malta di allettamento, e calce (c)

nella malta dell'intonaco.

Nella Tabella 1 sono contrassegnate con * le murature nelle quali il legante idraulico (cemento, calce idraulica, calce-pozzolana) impiegato nel restauro può interagire con il gesso legante preesistente per formare ettringite e/o thaumasite secondo gli schemi delle reazioni indicate nelle Fig. 1 e 2. Rientrano in questa categoria le murature Mvg, Mvg', Migg, Migg', Migc, Migc', Mig'g, Mig'g', Mig'c, Mig'c'. Ov-

Tabella 1 Murature in mattoni degradabili per attacco solfatico a seguito del restauro

| Murature in mattoni a vista Mv | | | | Murature in mattoni intonacate Ml | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| Malta di allietamento | legante "interno" + gesso | | legante "interno" + calce | | legante "interno" + gesso | | | | | | | | legante "interno" + calce | | | | | | | |
| | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia normale | | | | sabbia pozzolanica | | | | sabbia normale | | sabbia pozzolanica | | | | | |
| | * Mvg | * Mvg' | Mvc | Mvc' | Mlg | | | | Mlg' | | | | Mlc | | Mlc' | | | | | |
| Malta da intonaco | | | | | legante "esterno" + gesso | | legante "esterno" + calce | | legante "esterno" + gesso | | legante "esterno" + calce | | legante "esterno" + gesso | | legante "esterno" + calce | | legante "esterno" + gesso | | legante "esterno" + calce | |
| | | | | | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. |
| | | | | | * Mlg | * Mlg' | Mlgc | Mlgc' | * Mlg | * Mlg' | * Mlg | * Mlg' | * Mlg | * Mlg' | Mlgc | Mlgc' | Mlcc | Mlcc' | * Mlg | * Mlg' |

* degrado se i leganti idraulici sono applicati dentro e sulla muratura quando il gesso fu impiegato per la malta di allietamento o iniettato in restauri precedenti.
 ^ degrado se i leganti idraulici sono applicati per il ripristino del vecchio intonaco in gesso del quale rimangono residui.
 o degrado se si adoperò il gesso legante dentro e sulla muratura originariamente contenente calce idraulica e calce pozzolanica.
 O degrado se si adoperò la calce dentro e sulla muratura originariamente contenente gesso e pozzolana dei quali permangono residui.
 Nota: oltre alle murature contrassegnate da * ^ o O possono degradarsi, a seguito del restauro, anche le murature prive di gesso legante, ma costruite con mattoni ricchi di sali solfatici oppure umidificate con acque solfatiche (marine) risalite per capillarità lungo la muratura.

viamente rientrano in questa categoria anche le murature non contrassegnate da * nelle quali, però, il gesso legante sia stato impiegato in restauri precedenti a quello con leganti idraulici.

Le murature contrassegnate con Δ sono quelle che originariamente contenevano gesso come legante sull'intonaco. Pertanto,

qualora non sia stato integralmente rimosso, questo gesso residuo può formare ettringite e/o thaumasite con l'eventuale legante idraulico impiegato nel restauro. Rientrano in questa categoria le murature Mlgg, Mlgg', Mig'g', Mig'g', Mlcg, Mlcg', Mic'g', Mic'g'.

Le murature contrassegnate con O nella Tabella 1 sono degra-

dabili impiegando nel restauro calce e sabbia normale (e quindi malte non idrauliche) se nella muratura fu originariamente impiegata sabbia pozzolanica in combinazione con gesso (g'). Rientrano in questa categoria le murature Mvg', Migg', Mig'g', Mig'c, Mlcg', Mic'g'. Gli schemi che portano alla formazione di ettringite

Tabella 2 Murature in pietra degradabili per attacco solfatico a seguito del restauro

| Murature in pietra a vista Pv | | | | Murature in pietra intonacate Pl | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| Malta di allietamento | legante "interno" + gesso | | legante "interno" + calce | | legante "interno" + gesso | | | | | | | | legante "interno" + calce | | | | | | | |
| | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia normale | | | | sabbia pozzolanica | | | | sabbia normale | | sabbia pozzolanica | | | | | |
| | * Pvg | * Pvg' | Pvc | Pvc' | Pig | | | | Pig' | | | | Plc | | Plc' | | | | | |
| Malta da intonaco | | | | | legante "esterno" + gesso | | legante "esterno" + calce | | legante "esterno" + gesso | | legante "esterno" + calce | | legante "esterno" + gesso | | legante "esterno" + calce | | legante "esterno" + gesso | | legante "esterno" + calce | |
| | | | | | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. | sabbia norm. | sabbie pozzol. |
| | | | | | * Plgg | * Plgg' | Plgc | Plgc' | * Plg | * Plg' | * Plg | * Plg' | * Plg | * Plg' | Plcc | Plcc' | * Plg | * Plg' | Plc | Plc' |

* degrado se i leganti idraulici sono applicati dentro e sulla muratura quando il gesso fu impiegato per la malta di allietamento e iniettato in restauri precedenti.
 ^ degrado se i leganti idraulici sono applicati per il ripristino del vecchio intonaco in gesso del quale rimangono residui.
 o degrado se si adoperò il gesso legante dentro e sulla muratura originariamente contenente calce idraulica e calce pozzolanica.
 O degrado se si adoperò la calce dentro e sulla muratura originariamente contenente gesso e pozzolana dei quali permangono residui.
 Nota: oltre alle murature contrassegnate da * ^ o O possono degradarsi, a seguito del restauro, anche le murature prive di gesso legante, ma costruite con mattoni ricchi di sali solfatici oppure umidificate con acque solfatiche (marine) risalite per capillarità lungo la muratura.

e thauasite sono indicati, in questo caso, rispettivamente nelle Fig. 3 e 4.

Le murature contrassegnate con \diamond nella Tabella 1 sono degradabili impiegando nel restauro gesso, come legante aereo, se nella muratura fu originariamente impiegata una malta con calce-pozzolana o calce idraulica (Fig. 3 e 4 se si sono impiegati nel restauro i leganti aerei (calce e gesso)).

3.3 Le murature in calcestruzzo degradabili dopo il restauro per formazione di attringite e thauasite

Nella Tabella 3 sono mostrate le murature in calcestruzzo degradabili per attacco solfatico dopo il restauro con i leganti idraulici secondo il meccanismo illustrato nelle Fig. 1-2, e con i leganti aerei secondo il meccanismo illustrato nelle Fig. 3-4.

4. Degrado, dopo il restauro, provocato dalla reazione alcali-pietra nelle murature in pietra ed in calcestruzzo

È noto, dalla chimica del calcestruzzo [12], che gli alcali del ce-

Tabella 3 Murature in pietra degradabili per attacco solfatico a seguito del restauro

| Murature in calcestruzzo a vista C1 | | Murature in calcestruzzo intonacato C1 | | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|----------------|
| Malta di allattamento | legante "interno" : calce | | legante "interno" : calce | | | | | | |
| | sabbia normale | sabbia pozzolanica | sabbia normale | | | sabbia pozzolanica | | | |
| Malta da intonaco | rottami di pietra | | rottami di pietra | | rottami di pietra | | rottami di pietra | | |
| | C1c | C1c \diamond | C1c | | C1c | | C1c | | |
| legante "esterno" : gesso | legante "esterno" : calce | legante "esterno" : gesso | legante "esterno" : calce | legante "esterno" : gesso | legante "esterno" : calce | legante "esterno" : gesso | legante "esterno" : calce | | |
| | | | | | | | | sabbia norm. | sabbia pozzol. |
| * C1c \diamond | * C1c \diamond | C1c | C1c \diamond | C1c \triangle | C1c \triangle | C1c \triangle | C1c \triangle | C1c \circ | C1c \circ |

* degrado se i leganti idraulici sono applicati dentro e sulla muratura quando il gesso fu impiegato per la malta di allattamento e intonaco in restauri precedenti.

\triangle degrado se i leganti idraulici sono applicati per il ripristino del vecchio intonaco in gesso del quale rimangono residui.

\diamond degrado se si adopera il gesso legante dentro e sulla muratura originariamente contenente calce idraulica o calce pozzolanica.

\circ degrado se si adopera la calce dentro e sulla muratura originariamente contenente gesso e pozzolana del quali permangono residui.

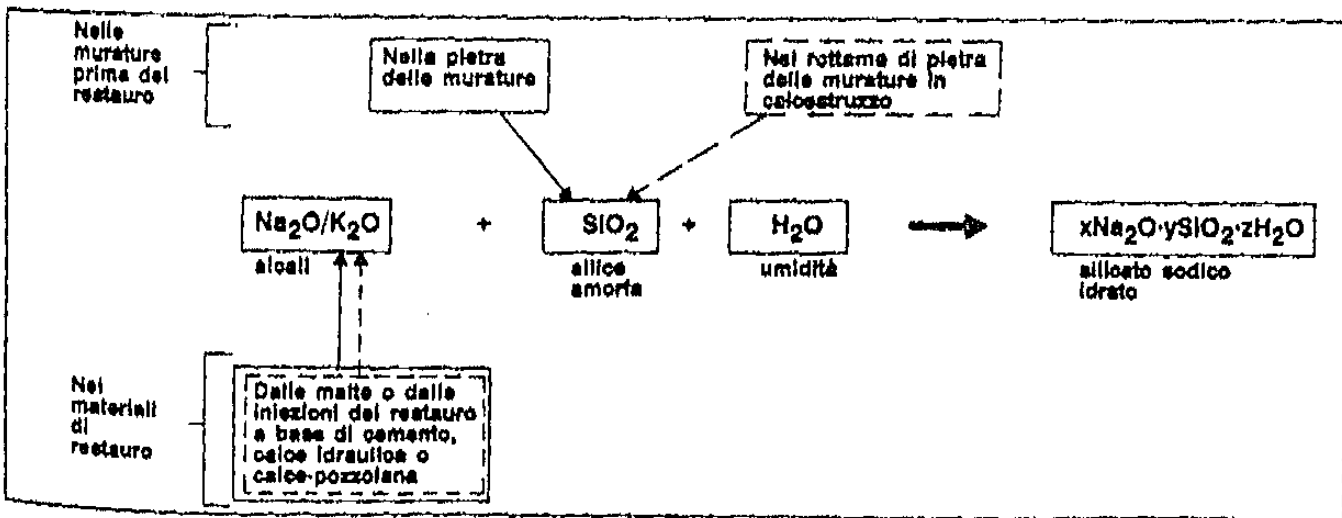
Nota: oltre alle murature contrassegnate da * \triangle e \circ possono degradarsi, a seguito del restauro, anche le murature prive di gesso come legante, ma bagnate da acque solfatiche (marine) risalite per capillarità lungo le murature.

mento possono reagire con alcune forme di silice amorfa presente negli aggregati per produrre dei composti (silicati idrati di sodio o potassio) più voluminosi dei reagenti (Fig. 9).

La reazione è accompagnata da fenomeni espansivi disruptivi che possono manifestarsi sulla su-

perficie della lastra e del muro, con espulsione localizzata di materiali (*pop out*), o che possono coinvolgere tutta la struttura provocandone la completa fessurazione. Anche in questo caso, come per l'attacco solfatico, è indispensabile la presenza di umidità, sia pure non continua, all'in-

Fig. 9 Schema delle possibili interazioni tra i leganti idraulici impiegati nel restauro e la silice amorfa delle murature in pietra (linea continua) o in calcestruzzo (linea tratteggiata) per la reazione alcali-silice amorfa.



terno della muratura. Qualora le pietre utilizzate nelle murature contengano silice amorfa (opale, calcedonio) o forme mal cristallizzate di cristobalite e tridimite, può verificarsi una reazione quale quella schematizzata in Fig. 9 quando i leganti utilizzati per il restauro siano relativamente ricchi di alcali (più dello 0,60% se espressi come Na_2O). Il problema non è di facile soluzione diagnostica, rispetto a quello relativamente semplice dell'attacco solfatico, in quanto i prodotti finali della reazione, a differenza dell'ettringite e della thaumasite, non sono facilmente ed immediatamente identificabili attraverso l'analisi per diffrazione ai raggi X per la mancanza di cristallinità del prodotto della reazione alcali-aggregato. Tuttavia un esame petrografico, come quello relativo alla foto della Fig. 10, consente di evidenziare la formazione di silicati idrati alcalini (di colore più chiaro) all'interfaccia tra il granulo reattivo (al centro della foto) e la matrice cementizia circostante.

5. CONCLUSIONI

Il recupero degli edifici storici è un'operazione molto delicata, in quanto i materiali da impiegare nel restauro possono interagire negativamente con alcuni composti eventualmente già presenti nelle murature. A causa di queste reazioni, l'operazione di restauro può tramutarsi in un peggioramento dello stato delle murature poiché queste reazioni provocano rigonfiamenti, distacchi e disintegrazione delle malte di allettamento e degli intonaci applicati nel restauro, così come delle iniezioni cementizie effettuate per il consolidamento interno delle strutture.

BIBLIOGRAFIA

[1] M. Collepardi, *Il degrado ed il restauro delle murature negli edifici sto-*

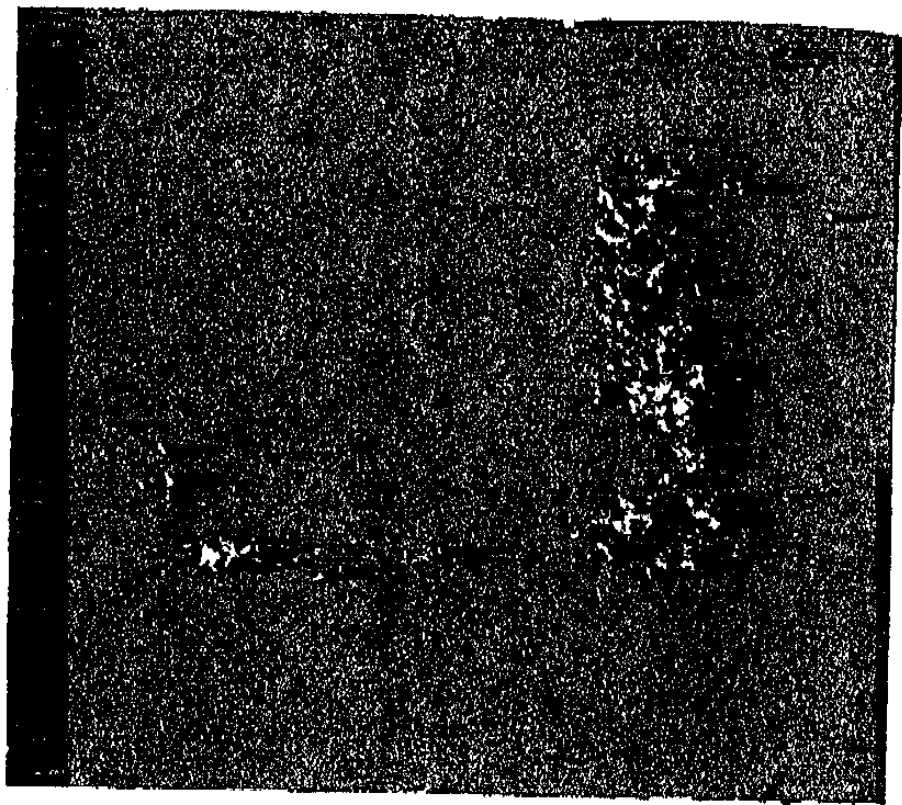


Fig. 10 Pietra di silice reattiva circondata da un alone di silicato idrato sodico.

rici. *Parte I: Classificazione delle possibili tipologie delle murature in base all'uso dei materiali originali, in corso di stampa.*

[2] U. Ludwig e S. Mehr, *Destruction of Historical Buildings by the Formation of Ettringite or Thaumasite*, pg 181, Vol V, 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, (1986).

[3] C. Goria, *Evoluzione storica dei leganti e dei conglomerati, dall'empirismo alla loro conoscenza razionale*, in "Cemento: Storia, Tecnologia, Applicazioni". Edizioni Fratelli Fabbri Editori, Milano (1976).

[4] T. Emiliani, *La tecnologia della ceramica*, Ed. Fratelli Lega, Faenza, (1957).

[5] N. J. Crammond, *Thaumasite in failed cement mortars and renders from exposed brickwork*, *Cement Concrete Research*, 15, 1039, (1985).

[6] M. Collepardi, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*, pg 7, II Edizione, Hoepli, Milano, (1987).

[7] L. Cussino, *Le malte oggi: materiali in produzione*, pg 454, "Atti del Seminario Rilem, Le malte nell'evoluzione del processo costruttivo: passato, presente, futuro", Ed. Anna Gilibert Volterrani, Torino, (1988).

[8] V. Furlan, *Atti del Convegno "Intonaci Colore e Coloritura nell'Edilizia Storica"*. Roma, 1984, *Bollettino d'Arte, Supplemento*, Vol I, pg 95, Ministero dei Beni Culturali ed Ambientali.

[9] V. Furlan e N. Kohler, *Dégradation prématurée des enduits à base de résine synthétique*, in *Chantiers* 8, pg 13, (1981).

[10] M. Collepardi, *Cause chimiche di degrado dei materiali originali nelle murature degli edifici storici*, in corso di stampa.

[11] R. Lachaud, *Thaumasite et ettringite dans les matériaux de construction* *Annales de L'Institut Technique et des Travaux Publics*, 370, 3, (1979).

[12] M. Collepardi, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*, pg 277, II Edizione, Hoepli, Milano, (1987).