

CAUSE CHIMICHE DI DEGRADO DEI MATERIALI ORIGINALI NELLE MURATURE DEGLI EDIFICI STORICI

1. Introduzione: cause chimiche e fisiche del degrado

Se si escludono le cause strutturali, cioè quelle che hanno provocato il deterioramento delle strutture in quanto sottoposte ad una sollecitazione eccessiva rispetto alla loro resistenza meccanica, i meccanismi che hanno provocato il degrado delle murature degli edifici storici, prima ancora che si intervenisse nel restaurarle, possono essere divise in cause chimiche e fisiche. Le cause chimiche sono prevalentemente legate alle reazioni tra il solfato e gli altri composti presenti nella muratura. Le cause fisiche sono principalmente, anche se non esclusivamente, legate alle variazioni fisiche dell'acqua all'interno della muratura: evaporazione, risalita capillare, formazione di ghiaccio, ecc. [1].

Nel presente lavoro vengono esaminate soltanto le cause chimiche, essendo quelle fisiche rimandate ad una nota successiva.

Tuttavia val la pena subito di precisare che il ruolo giocato dall'acqua è di fondamentale importanza anche nelle cause chimiche (nel seguito descritte in dettaglio) per due ragioni:

a) innanzitutto, come si vedrà più avanti, l'acqua (sotto forma di liquido o di vapore) partecipa attivamente a tutte le reazioni chimiche che possono avere provocato il degrado;

b) in secondo luogo, l'acqua sotto forma di liquido ha l'importante funzione di trasportare un componente verso l'altro consentendo così un contatto fisico tra i due componenti senza il quale la reazione chimica tra essi non avrebbe potuto avere luogo: si pensi ad esempio all'acqua che per risalita capillare lungo le murature trascina con sé un sale idrosolubile, presente per esempio nel mattone, e lo porta a con-

tatto con l'intonaco, rendendo così possibile una reazione chimica "pericolosa" tra il sale ed un componente dell'intonaco.

Ne consegue, pertanto, che la presenza, sia pure discontinua, di umidità nelle murature è una condizione necessaria anche se non sufficiente per l'insorgere del degrado, non solo quello legato a cause di natura fisica, ma anche quello basato su interazioni chimiche.

Ne consegue anche che quelle murature che si sono conservate perennemente asciutte non hanno subito degrado di tipo chimico, anche quando fossero presenti all'interno delle murature elementi potenzialmente "pericolosi" in quanto capaci di interagire chimicamente per produrre composti degradanti in presenza di umidità.

2. Classificazione delle murature in base ai materiali

Allo scopo di esaminare tutte le reazioni chimiche che possono aver provocato il degrado nelle murature degli edifici storici, si farà riferimento ad una classificazione, presentata in una precedente nota [2], che comprende cinquanta diverse tipologie derivanti da tutte le possibili combinazioni dei materiali di partenza impiegati negli edifici storici prima dell'avvento del cemento Portland. Esse sono qui riportate nelle Tabelle 1, 2 e 3 corrispondenti rispettivamente alle murature in mattoni, in pietra e in calcestruzzo. In queste Tabelle vengono anche contrassegnate con un rettangolo o con un cerchio le tipologie di murature soggette ad un degrado potenziale secondo i meccanismi nel seguito illustrati.

La simbologia adottata in questa classificazione è sintetizzata attraverso un codice alfabetico di

quattro lettere: la prima, in maiuscolo, individua se la muratura è in mattone (M), oppure in pietra (P), oppure in calcestruzzo (C).

La seconda lettera indica se la muratura è intonacata (i) o a vista (v).

La terza lettera indica quale è il legante di tipo aereo (cioè capace di indurire solo all'aria), impiegato nella malta di allettamento: gesso (g) oppure calce (c); nel caso in cui il legante fosse stato abbinato ad una pozzolana invece che ad una normale sabbia, per il legante si usa il simbolo g' e c' invece di g e c; ugualmente si usa il simbolo c' invece di c, pur in presenza di una qualsiasi sabbia, inclusa quella normale, qualora sia stata impiegata la calce idraulica invece della calce: in altre parole, ai fini della presente classificazione una malta è idraulica - cioè indurisce anche sott'acqua - sia quando si usa la calce e la pozzolana, sia quando si usa la calce idraulica e una sabbia qualsiasi. Nel caso del gesso l'abbinamento con una pozzolana, invece di una comune sabbia, non trasforma il comportamento del legante da aereo in idraulico, purtuttavia è opportuno distinguere le due malte (g e g') ai fini del meccanismo di degrado nel seguito descritto.

La quarta lettera, che appare solo nelle murature intonacate, indica qual'è il legante impiegato nell'intonaco (g, c, g', c') con lo stesso significato descritto per il legante della malta di allettamento. Per distinguere i due leganti, viene definito "interno" quello che si trova dentro la muratura nella malta di allettamento tra le pietre o i mattoni, ed "esterno" quello che si trova nell'intonaco che eventualmente riveste la muratura.

Per esempio la muratura Pic'

indica una muratura in pietra (P), intonacata (i), che ha una malta di allettamento del tipo idraulico a base di calce idrata e pozzolana o di calce idraulica e sabbia qualsiasi (c'), ed un intonaco a base di malta aerea a base di calce e sabbia normale (c).

3. Reazioni chimiche "pericolose" nelle murature tra i materiali originali: l'attacco solfatico

Trascurando momentaneamente la reazione alcali-pietra, che verrà esaminata più avanti (sezione 5.2), le possibili reazioni chimiche che hanno provocato il degrado nelle murature a seguito di interazione tra i materiali originali sono fondamentalmente due, ed entrambe richiedono, oltre alla umidità, la presenza di solfato [3].

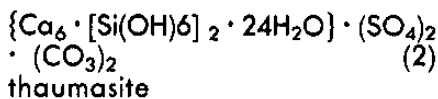
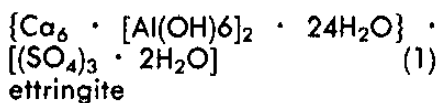
I prodotti che si possono originare per effetto di queste reazioni sono: l'ettringite e la thaumasite, composti ben noti nella chimica del cemento Portland [4], ma che, come vedremo, si possono formare anche nei materiali degli edifici storici che hanno preceduto l'avvento del cemento Portland.

Sia la formazione di ettringite che quella di thaumasite si presentano macroscopicamente attraverso un rigonfiamento del materiale originale che può arrivare - in particolare per la thaumasite - ad uno sfaldamento o addirittura ad uno spappolamento del materiale come è mostrato nella Fig. 1. Molto spesso i due composti sono presenti simultaneamente, anche se di solito la formazione di ettringite precede quella della thaumasite. Inoltre, entrambi i composti hanno la caratteristica di essere prodotti più rapidamente in ambienti freddi (0-10°C) che in quelli caldi.

È importante sottolineare che

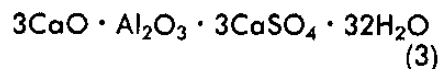
la formazione di ettringite non è di per sé pericolosa, cioè non crea rigonfiamenti se non è accompagnata dalla presenza di calce: è stato dimostrato da Mehta [5] che se essa si forma in ambiente basico, per la presenza di calce, l'ettringite cristallizza sotto forma di fibre molto corte (lunghe qualche micron) e male accresciute, capaci di adsorbire acqua e provocare rigonfiamenti; se invece l'ettringite si forma in assenza di calce le fibre si presentano ben accresciute (lunghe un centinaio di micron) e non sono in grado di adsorbire acqua e provocare rigonfiamenti. Mehta definisce *colloidale* o *cristallina* l'ettringite rispettivamente capace o non di provocare rigonfiamenti.

Le formule chimiche di questi due composti possono essere di due tipi: formule di struttura o formule "grezze". Le prime riguardano l'aspetto strutturalistico e cristallografico (cioè informano come gli atomi sono tra loro coordinati all'interno del reticolo cristallino) ed evidenziano le forti somiglianze tra questi due prodotti che giustificano le analogie di comportamento nel meccanismo di degrado:

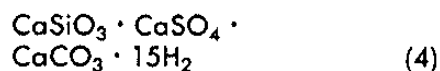


In sostanza nella thaumasite lo ione silicio (Si⁴⁺) occupa nel reticolo cristallino, il "posto" che nell'ettringite è occupato dallo ione alluminio (Al³⁺). A causa, però, della diversa carica elettrica del silicio rispetto all'alluminio, nella thaumasite oltre allo ione solfato SO₄⁼ occorre lo ione carbonato CO₃⁼ per compensare le cariche elettriche nel reticolo cristallino.

Le formule "grezze", invece, ci informano sui composti (solfato di calcio, silicato di calcio, ecc.) che compongono i due prodotti ma non hanno nulla a che vedere con l'aspetto cristallografico: esse tuttavia, sono molto utili in quanto ci indicano immediatamente quali sono i composti che possono dar origine ai prodotti finali. Per esempio la formula "grezza" dell'ettringite è:



mentre la formula "grezza" della thaumasite è:



Nel caso dell'ettringite, per esempio, sappiamo dalla formula (3) che essa si può formare per reazione del solfato di calcio, dell'acqua e degli alluminati di calcio idrati, quali quelli presenti nelle malte di cemento Portland o nelle malte di calce idraulica o nelle malte calce-pozzolana (4CaO · Al₂O₃ · 13H₂O, · 3CaO · Al₂O₃ · 6H₂O, ecc.).

Nel caso della thaumasite, dalla formula (4), sappiamo che essa si può formare per reazione del solfato di calcio, dell'acqua e dei silicati di calcio idrati, quali quelli presenti nelle malte di cemento, nelle malte di calce idraulica e nelle malte calce-pozzolana (di composizione variabile ed assimilabili alla generica formula xCaO · ySiO₂ · zH₂O, talvolta indicata anche per brevità come C-S-H).

Come si vede, per quanto attiene alle murature degli edifici storici non restaurati - ed escludendo quindi la presenza di malte di cemento Portland - la formazione di ettringite e/o thaumasite richiede la simultanea presenza di:

- solfato di calcio;

- acqua;
- malte di calce-pozzolana, malte di calce idraulica (in quanto fonti di alluminati e silicati di calcio idrati).

Nelle Figg. 2 e 3 sono schematicamente mostrate le possibili interazioni chimiche tra i vari elementi delle murature che possono aver dato luogo alla formazione di ettringite e/o thaumasite. Sulla base di questi due schemi di reazione, le Tabelle 1, 2 e 3, (che sintetizzano le possibili tipologie delle murature sulla base di tutte le combinazioni dei vari materiali) sono state "marcate" con un cerchio o un rettangolo per individuare le murature degradabili per attacco solfatico. Sono stati contrassegnati con un cerchio i codici alfabetici delle murature in mattoni, in pietra o in calcestruzzo che si possano essere degradate per effetto della formazione di ettringite e/o thaumasite. Sono stati contrassegnati con un rettangolo i codici alfabetici delle murature, limitatamente a quelle in mattoni, che si possano essere degradate, sempre per formazione di ettringite e/o thaumasite.

te, ma solo nel caso che i mattoni utilizzati contenessero sali solfatici.

4. Degradazione delle murature in mattoni

Nelle sezioni che seguono vengono separatamente esaminate in dettaglio le cause di degrado chimico nelle murature in mattoni.

4.1 Degradazione per attacco solfatico delle murature in mattoni indipendentemente dal loro contenuto di solfato.

Le murature in mattone degradabili per effetto delle reazioni chimiche illustrate in Fig. 2 e, indipendentemente dal contenuto di sali solfatici nei mattoni, sono le sei seguenti tipologie:

Mig'c' Mig'c' Mig'c' Mig'c' Mig'g' Mig'g'

Esse appaiono tutte "cerchiate" nella Tabella 1, in quanto è sempre presente il gesso, nella malta di allettamento (*Mig'c', Mig'c', Mig'c'*) o nell'intonaco (*Mig'c', Mig'g', Mig'g'*), abbinato

con una malta idraulica rispettivamente nell'intonaco o nella malta di allettamento: in altre parole tra le due malte (da allettamento e per l'intonaco) esiste sempre una "complementarità" per la formazione di ettringite e/o thaumasite, beninteso in murature umide.

In due dei sei casi sopra menzionati (*Mig'c'* e *Mig'g'*) non esiste in realtà la malta idraulica, ma piuttosto quella aerea (c) tra i mattoni (*Mig'c'*) o nell'intonaco (*Mig'g'*); pertanto in teoria mancherebbero i presupposti che ci siano gli alluminati di calcio idrati o i silicati di calcio idrati indispensabili per la produzione rispettivamente dell'ettringite (Fig. 2) e/o della thaumasite (Fig. 3), a seguito della reazione con il gesso. Tuttavia questo gesso è stato impiegato insieme ad una sabbia di natura pozzolanica (ed infatti è codificato come *g'* non *g*) anche se nel caso specifico la sabbia non ha esplicato la sua capacità pozzolanica in mancanza di calce. All'interfaccia tra le due malte (di allettamento e dell'intonaco) vengono però a trovarsi la calce da una parte, e la pozzolana ed il gesso dall'altra ed esistono quindi le condizioni per le reazioni schematizzate in Fig. 2 e Fig. 3.

4.2 Degradazione per attacco solfatico delle murature in mattoni contenenti solfati

Nella Tabella 1 sono indicate quattro murature in mattoni i cui codici alfabetici (*Mvc', Micc', Mic'c', Micc'*) sono contrassegnati con un rettangolo. Queste murature, per mancanza di gesso (come legante "interno" o "esterno"), non dovrebbero degradarsi, a meno che il gesso non si formi *in situ* per reazione tra il solfato (SO_4^{2-} proveniente dal mattone) e la calce $-Ca(OH)_2-$ presente nelle malte:



Fig. 1 Da sinistra a destra un provino di malta integro, degradato e distrutto per formazione di ettringite e thaumasite.

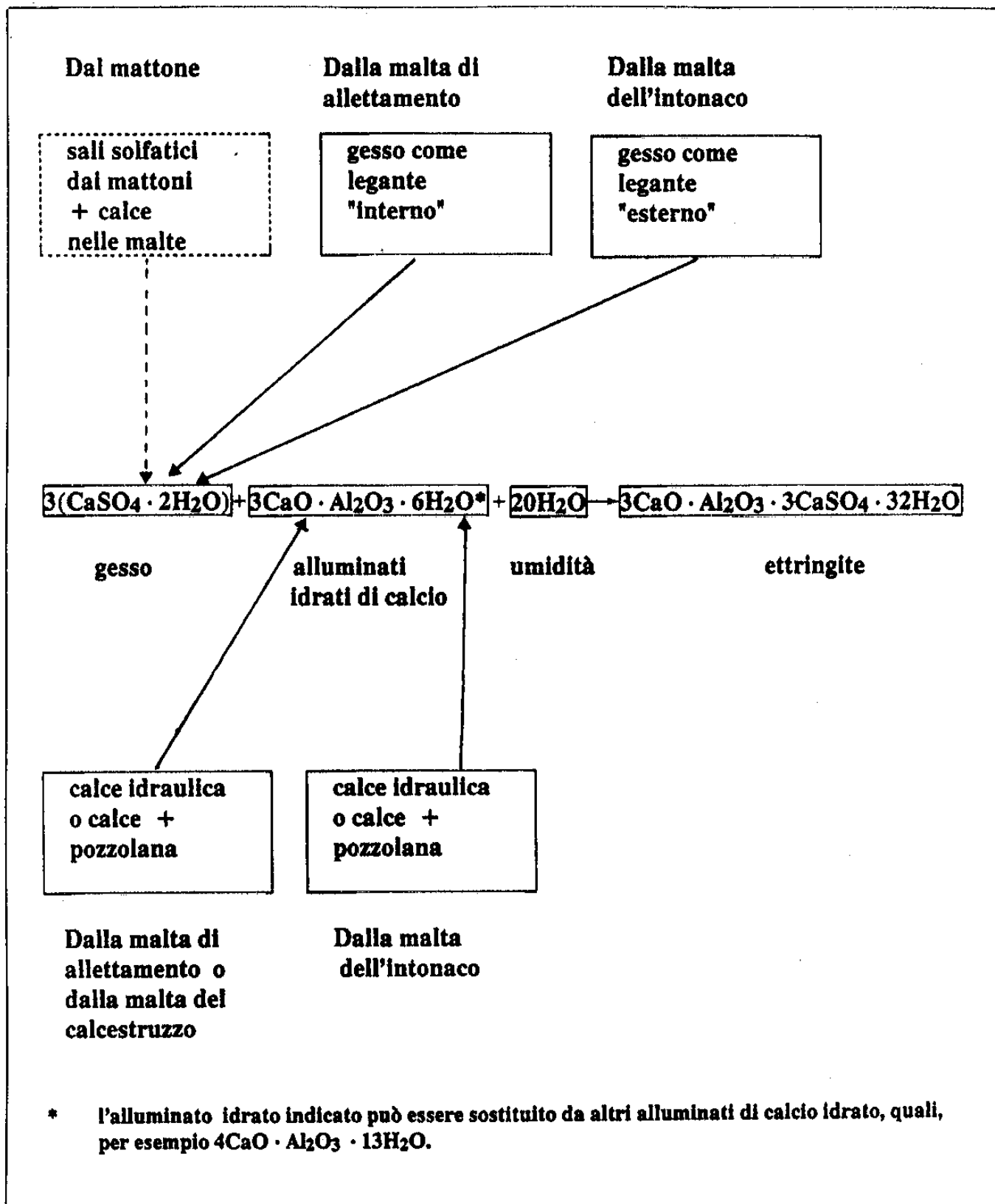


Fig. 2 Schema delle possibili interazioni tra gli elementi della muratura per la formazione di ettringite. La parte tratteggiata riguarda solo le murature in mattoni contenenti sali solfatici.

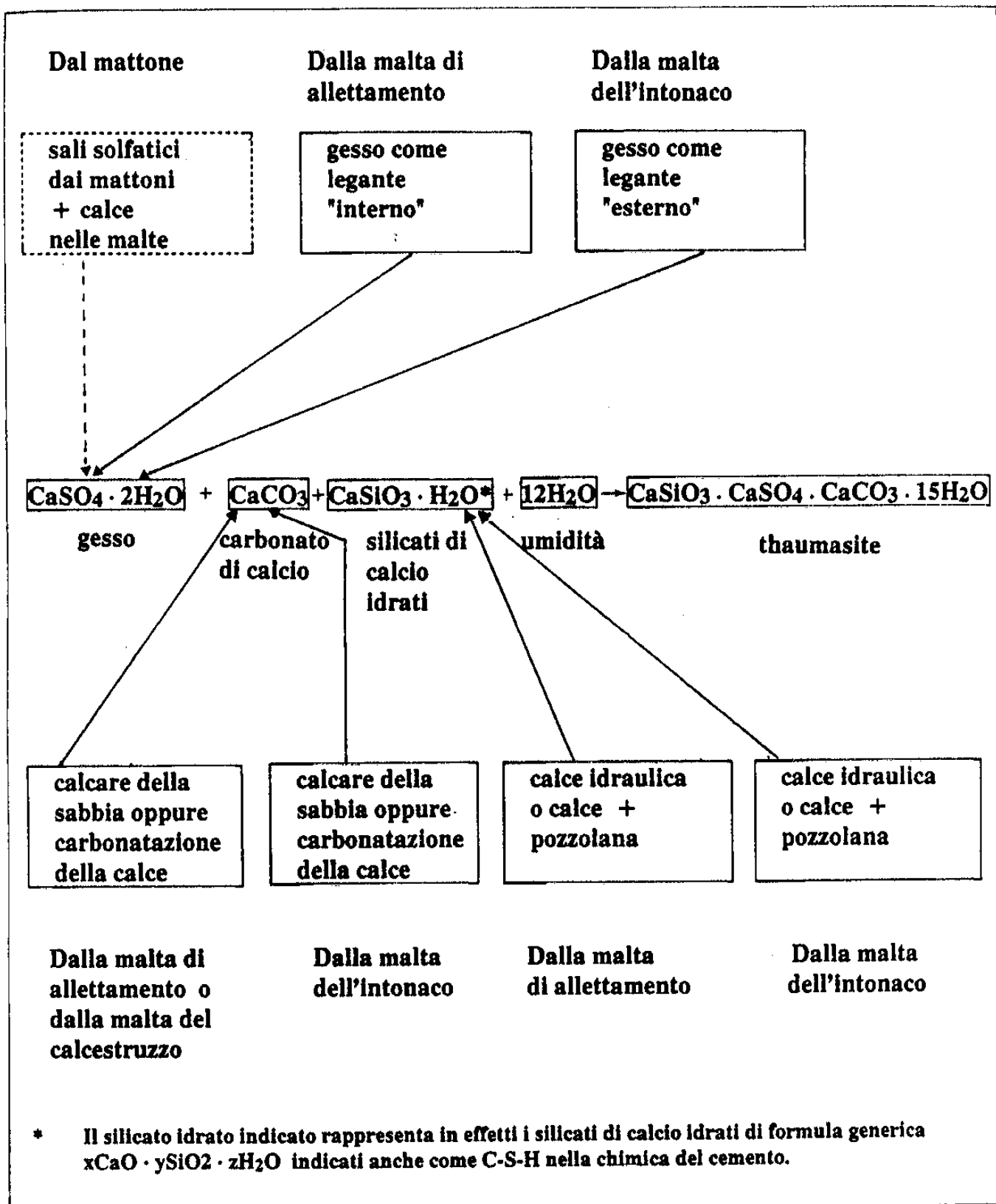
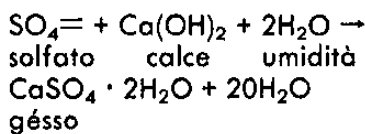


Fig. 3 Schema delle possibili interazioni tra gli elementi della muratura per la formazione di thaumasite. La parte tratteggiata riguarda solo le murature in mattoni contenenti sali solfatici.



Questo meccanismo di degrado corrisponde nelle Fig. 2 e 3 alle linee tratteggiate.

Questo tipo di degrado è frequente in quelle murature nelle quali si siano impiegati mattoni prodotti per cottura di argille "inquinata" - come spesso accade - da pirite (FeS_2) che nel forno di cottura si è trasformata in solfato [5] di metalli alcalini (potassio, Na, K) o alcalino-terrosi (calcio, magnesio).

Talvolta la presenza di solfati è testimoniata dalla formazione sulle murature di un'efflorescenza salina (impropriamente chiamata "salnitro"): quando ciò avviene, l'apparizione di efflorescenze è seguita dal degrado dell'intonaco e/o dalla malta di allettamento, qualora sia stata

impiegata una malta idraulica (c) rispettivamente all'esterno e/o all'interno della muratura. Anche in questi casi vengono infatti a crearsi le condizioni per la formazione di ettringite e/o thaumasite secondo gli schemi delle Fig. 2 e 3 (linee tratteggiate).

Val la pena di sottolineare che, anche in questo tipo di degrado, l'umidità della muratura svolge un ruolo determinante: l'acqua piovana, che bagna le murature, o quella che risale per capillarità delle fondazioni, scioglie i sali idrosolubili presenti nei mattoni e li trasporta verso l'intonaco quando l'acqua successivamente evapora verso l'ambiente esterno asciutto. In questo modo, anche piccole quantità di sali solfatici, presenti nei mattoni, si accumulano prevalentemente in prossimità dell'intonaco esterno creando concentrazioni critiche per la formazione di ettringite e/o thau-

masite se la malta dell'intonaco è di tipo idraulico.

5. Degrado per cause chimiche delle murature in pietra

Nel caso delle murature in pietra è necessario distinguere due potenziali tipi di degrado connesso a cause chimiche: l'attacco solfatico e la reazione alcali-silice.

5.1. Degrado per attacco solfatico delle murature in pietra

Nel caso delle murature in pietra, l'attacco solfatico è più semplice, venendo a mancare di solito la complicazione del solfato derivante dalla pietra, come invece avviene frequentemente nelle murature in mattoni (sezione 4.2). Pertanto, i meccanismi di degrado delle murature in pietra sono gli stessi di quelli illustrati nelle Fig. 2 e 3 ad eccezione di

Tabella 1 Murature in mattoni degradabili per attacco solfatico

Murature in mattoni a vista Mv				Murature in mattoni intonacate Mi										
Malta da allettamento	legante "interno": gesso		legante "interno": calce		legante "interno": gesso				legante "interno": calce					
	sabbia norm.	sabbia pozzol.	sabbia norm.	sabbia pozzol.	sabbia normale		sabbia pozzolanica		sabbia normale		sabbia pozzolanica			
	Mvg	Mvg'	Mvc	Mvc'	Mig		Mig'		Mic		Mic'			
Malta da intonaco	legante "esterno": gesso		legante "esterno": calce		legante "esterno": gesso		legante "esterno": calce		legante "esterno": gesso		legante "esterno": calce		legante "esterno": calce	
	sabbia norm.	sabbia pozzol.	sabbia norm.	sabbia pozzol.	sabbia norm.	sabbia pozzol.	sabbia norm.	sabbia pozzol.	sabbia norm.	sabbia pozzol.	sabbia norm.	sabbia pozzol.	sabbia norm.	sabbia pozzol.
	Migg	Migg'	Migc	Migc'	Mig'g	Mig'g'	Mig'c	Mig'c'	Micc	Micc'	Micc'g	Micc'g'	Micc'c	Micc'c'

Nota 1. Per sabbia pozzolanica si intende o quella naturale generalmente di origine vulcanica o quella artificiale ottenuta per frantumazione di mattoni, tegole, ecc. ("coccio pesto").

Nota 2. Agli effetti pratici se in luogo della normale calce si usa la calce idraulica, la malta assume un comportamento idraulico anche in assenza di pozzolana: in altre parole Mvc diventa Mvc' se si impiega calce idraulica anche se la sabbia è normale e non pozzolanica.

○ Indicano le murature in mattoni che si possono essere degradate per attacco solfatico (v. Fig. 2 e Fig. 3)

□ Indicano le murature in mattoni che si possono essere degradate per attacco solfatico (v. Fig. 2 e Fig. 3) solo nel caso di mattoni contenenti sali solfatici.

Tabella 2 Murature in pietra degradabili per attacco solfatico

Murature in pietra a vista Pv				Murature in pietra intonacate Pi																
Malta da allestimento	legante "interno" : gesso		legante "interno" : calce		legante "interno": gesso						legante "interno": calce									
	sabbia norm.	sabbia pozzol.	sabbia norm.	sabbia pozzol.	sabbia normale			sabbia pozzolanica			sabbia normale			sabbia pozzolanica						
	Pvg	Pvg'	Pvc	Pvc'	Pig:			Pig'			Pic			Pic'						
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.		sabbia pozzol.		sabbia norm.		sabbia pozzol.		sabbia norm.		sabbia pozzol.		sabbia norm.		sabbia pozzol.		sabbia norm.		sabbia pozzol.	
	Pigg		Pigg'		Pigc		Pigc'		Pig'g		Pig'g'		Pig'c		Pig'c'		Picg		Picg'	

Nota 1. Per sabbia pozzolanica si intende o quella naturale generalmente di origine vulcanica o quella artificiale ottenuta per frantumazione di mattoni, tegole, ecc. ("coccio pesto").

Nota 2. Agli effetti pratici se in luogo della normale calce si usa la calce idraulica, la malta assume un comportamento idraulico anche in assenza di pozzolana: in altre parole Pvc diventa Pvc' se si impiega calce idraulica anche se la sabbia è normale e non pozzolanica.



Indicano le murature in pietra che si possono degradare per attacco solfatico (v. Fig. 2 e Fig. 3).

quelli riguardanti le linee tratteggiate che si riferiscono solo alle murature in mattoni ricchi di solfati.

Ne consegue, anche, che i possibili casi di attacco solfatico nelle murature in pietra (Pigc', Pig'c, Pig'c', Picg', Pic'g, Pic'g') sono meno numerosi di quelli riguardanti le murature i mattoni. I codici alfabetici di queste murature in pietra attaccabili dai solfati appaiono "cerchiati" in Tabella 2. Le ragioni del degrado sono esattamente quelle stesse già illustrate nella sezione 4.1 per le murature in mattoni.

5.2 Degrado per reazione alcali-silice nelle murature in pietra

Val la pena di segnalare che nel caso delle murature in pietra, potrebbe essersi verificato un altro tipo di degrado chimico che non coinvolge la presenza di solfati. Esso è basato sulla reazione tra gli alcali presenti nella malta ed alcune forme di silice "reattiva" (opale, calcedonio, ecc.) pre-

senti nelle pietre. La reazione - che porta alla formazione di silicati alcalini idrati ($xNa_2O \cdot ySiO_2 \cdot zH_2O$) molto voluminosi - è ben nota nella tecnologia del calcestruzzo con il nome di "reazione alcali-aggregato" poiché avviene tra gli alcali presenti nel cemento e gli aggregati contenenti forme reattive di silice per lo più amorfa [7].

Anche la "reazione alcali-aggregato", come del resto quella connessa con i solfati, richiede necessariamente la presenza di acqua e quindi potrebbe manifestarsi solo nelle murature umide, come è mostrato nel meccanismo illustrato nella Fig. 4.

Questo tipo di degrado, anche se chimicamente diverso rispetto all'attacco solfatico, si esplica apparentemente attraverso un'analoga manifestazione di fessure, distacchi, ecc. Il fenomeno è più lento rispetto all'attacco solfatico, ma ciò sarebbe inessenziale, ai fini prati-

ci, per la durata che dovrebbero avere gli edifici storici. Dall'esame delle cause connesse con l'attacco solfatico sono escluse, nel presente articolo, quelle reazioni che provocano il degrado delle pietre per effetto della presenza di anidride solforosa nell'atmosfera con conseguente formazione di solfato di calcio: in questo caso, il fenomeno della solfatazione ed il conseguente degrado riguarda non solo murature in pietra in vista, ma anche i monumenti, le statue o altre opere in muratura prive di malta. In altre parole, il fenomeno della solfatazione delle pietre è connesso con la interazione pietra-ambiente e non già alla interazione pietra-malta come avviene, invece, per le murature, allo studio delle quali è destinato il presente articolo.

6. Degrado per cause chimiche delle murature in calcestruzzo

Anche nel caso delle murature

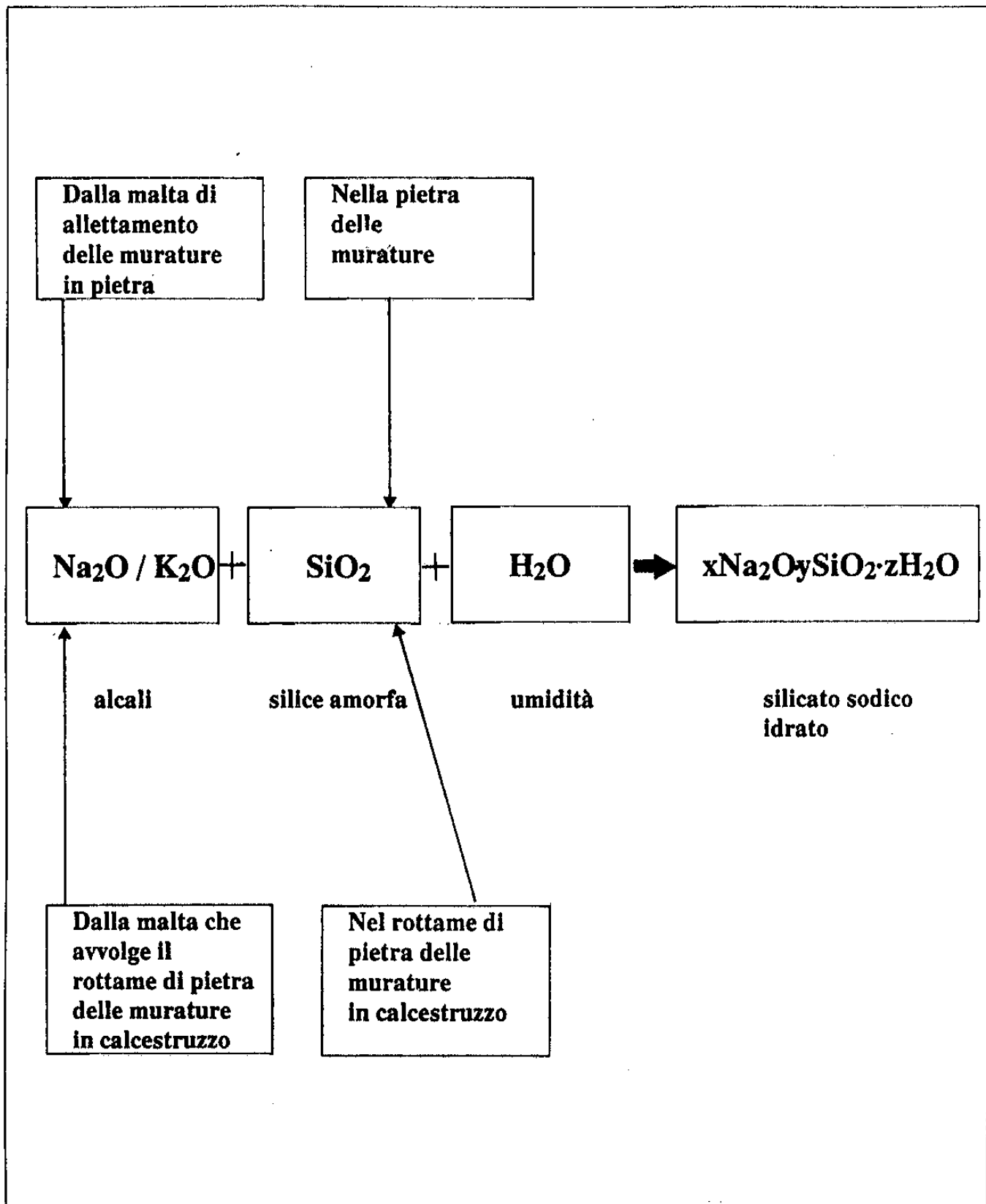


Fig. 4 Schema delle possibili interazioni tra gli elementi delle murature in pietra o in calcestruzzo per la reazione alcali silice amorfa.

in calcestruzzo degli edifici storici – come anche per le murature in pietra – sono possibili due tipi di attacchi: quello solfatico e quello della reazione "alcali-silice".

6.1. Degrado per attacco solfatico delle murature in calcestruzzo

Poiché si è escluso l'uso del gesso come legante "interno" per le murature in calcestruzzo degli edifici storici [2], il numero delle tipologie possibili, è minore di quelli delle altre murature (Tabella 3).

L'attacco solfatico nelle murature in calcestruzzo degli edifici storici può avere fondamentalmente due origini.

La prima origine riguarda la presenza del gesso come legante "esterno" nell'intonaco: le murature coinvolte in questo tipo di degrado sono le *Cic'g'*, *Cic'g* e *Cic'g'* che appaiono cerchiare in Tabella 3. Le cause di questo degrado sono esattamente le stesse già discusse in dettaglio per le murature in mattoni (sezione 4.1) attraverso i meccanismi illustrati nelle Fig. 2 e 3.

La seconda origine di degrado per attacco solfatico è in relazione con la possibile presenza di solfato – per la più sotto forma di pietra da gesso, ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – nel rottame di pietra*. Le murature coinvolte con questo tipo di attacco solfatico sono contrassegnate con un rettangolo nella Tabella 3. Esse sono *Cvc'*, *Cic'c*,

Cic'c' oltre a *Cic'g* e *Cic'g'* potenzialmente interessate anche all'attacco del solfato proveniente dall'intonaco. Anche in questo caso i prodotti finali della reazione del degrado sono l'ettringite e la thaumasite, che si possono formare per interazione del gesso presente nel rottame di pietra rispettivamente con gli alluminati di calcio idrati ed i silicati di calcio idrati presenti nelle malte idrauliche all'interno del calcestruzzo.

6.2. Degrado per reazione alcali-silice nelle murature in calcestruzzo

Questo tipo di degrado è del tutto simile a quello già descritto nella sezione 5.2 per le murature in pietra. Anche nel calcestruzzo degli edifici storici può verificarsi la reazione tra gli alcali presenti nella malta ed il rottame di pietra qualora questa contenga silice amorfa reattiva. Il meccanismo della reazione è quello illustrato nella Fig. 4.

7. Conclusioni

Sono state ipotizzate 50 possibili diverse murature negli edifici storici, sulla base delle potenziali combinazioni dei materiali da costruzione originali: calce, calce idraulica, gesso, mattoni, pietra, ecc.

Sono state analizzate le possibili cause di degrado chimico nelle murature provocate dalle interazioni tra i materiali originali: tutte le possibili cause di degrado chimico sono fondamentalmente riconducibili alla reazione

alcali-silice amorfa (nella pietra) e soprattutto alle reazioni dei sali solfatici che provocano la formazione di ettringite e/o thaumasite.

In ogni caso, l'acqua giuoca un ruolo di fondamentale importanza per il decorso delle suddette reazioni cosicché solo in presenza di umidità – sia pure discontinua – le murature degli edifici storici possono aver subito un significativo degrado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] V. Furlan, *Atti del Convegno "Intonaci Colore e Coloriture nell'Edilizia Storica"*, Roma, 1984, *Bollettino d'Arte, Supplemento, Vol 1, pg 95, Ministero dei Beni Culturali ed ambientali.*
- [2] M. Collepari, *Classificazione delle possibili tipologie delle murature degli edifici storici in base all'uso dei materiali originali, pubblicata su "L'edilizia n. 9" settembre 1989.*
- [3] U. Ludwig e S. Mehr, *8th Congress on the Chemistry of Cement, pg. 181, Vol. V. Rio de Janeiro, 1986.*
- [4] R. Lachaud, *Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, 370, 3 (1979)*
- [5] P. K. Mehta, *Cement Concrete Research, 3, 1 (1973)*
- [6] T. Emiliani, *La Tecnologia della Ceramica, Ed. Fratelli Lega, Faenza (1957)*
- [7] M. Collepari, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo, pg. 227, II Edizione, Hoepli, Milano (1987).*

* La presenza di gesso biidrato nelle pietre naturali impiegate come inerti può riguardare anche i moderni calcestruzzi confezionati con cemento Portland, tanto è vero che esistono normative per escluderne tassativamente la presenza.