
IL RUOLO DELL'UMIDITA' NEL DEGRADO DEI MATERIALI NELLE MURATURE

Luigi Coppola, ENCO, Spresiano (TV)
Mario Collepari, Università di Ancona

**ENCO Srl, Via Lazzaris 7, 31027 Spresiano (TV)
Tel. 0422/881350 - Fax 0422/881332**

IL RUOLO DELL'UMIDITA' NEL DEGRADO DEI MATERIALI NELLE MURATURE

Luigi Coppola, Enco, Spresiano (TV)
Mario Collepari, Università di Ancona

L'ACQUA NELLE MURATURE

L'acqua, come tutti i composti chimici, è caratterizzata da una serie di proprietà fisiche, quali la tensione di vapore, la temperatura di solidificazione, quella di ebollizione, ecc.

I valori di queste proprietà possono cambiare in modo significativo se l'acqua, anziché essere contenuta in un comune recipiente di proporzioni relativamente grandi, viene a trovarsi all'interno di piccole cavità (1, 2) quali possono essere i pori presenti nei materiali da costruzione delle murature. La conseguenza più appariscente di questa variazione delle proprietà fisiche, nel passare da un comune recipiente ad un contenitore costituito da un solido poroso che presenta un sistema di pori di piccole dimensioni, è la risalita capillare dell'acqua all'interno del solido, quale può essere considerata la muratura.

La ragione di questa variazione nelle proprietà dell'acqua risiede nel fatto che le sue molecole, allorquando esse si trovano all'interno di un sistema di pori di piccole dimensioni, o tra due superfici di un solido molto vicine tra loro, risentono fortemente dell'attrazione esercitata dalle superfici del solido.

LA RISALITA CAPILLARE DELL'ACQUA NEI SOLIDI POROSI

Un solido nei confronti di un liquido può presentare due diversi tipi di comportamento: esso può essere *liofilo* (affine al liquido) o *liofobo* (nemico del liquido): nel caso in cui il liquido sia in particolare l'acqua i due termini diventano rispettivamente idrofilo o idrofobo.

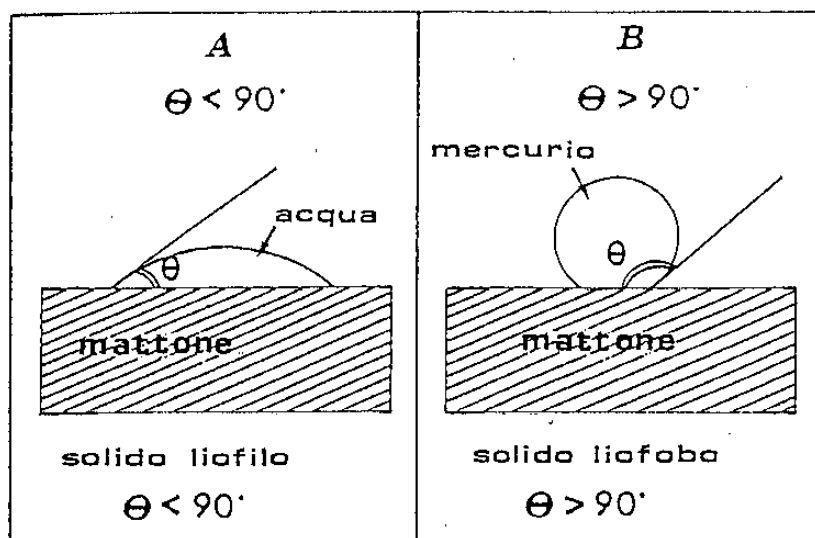


Fig. 1 Comportamento di un solido (per es. un mattone) nei confronti dell'acqua (A) e del mercurio (B).

Se si considera una superficie piana di solido come un mattone, o una malta o una pietra, a contatto con una goccia di un liquido come l'acqua, per il quale mostra un comportamento di liofilia, cioè in tal caso di idrofilia, l'angolo di contatto θ risulterà minore di 90° , in quanto la goccia di acqua, per la sua affinità con il solido, tenderà "schiacciarsi" sulla superficie per estendere al massimo il contatto con il solido (Fig. 1A).

Se invece dell'acqua, il solido è posto in contatto con il mercurio, per il quale mostra un comportamento di liofobia, l'angolo di contatto θ risulterà maggiore di 90° , in quanto la goccia di mercurio tende ad assumere una forma pressochè sferica per minimizzare il contatto con la superficie del solido (Fig. 1B).

Val la pena subito di precisare che il comportamento idrofilo di un liquido può trasformarsi in idrofobo se la superficie del solido viene trattata con uno strato di prodotti che presenta una repulsione per l'acqua (Fig. 2): i silani, gli stearati, i grassi, ecc. sono tipici prodotti da impiegare per rendere idrorepellente la superficie di un solido che di per sè sarebbe idrofilo: in tal caso l'angolo di contatto θ , minore di 90° per una superficie di un solido idrofilo (Fig. 2A), diventa maggiore di 90° per la superficie dello stesso solido rivestita con una pellicola di prodotto idrorepellente (Fig. 2B).

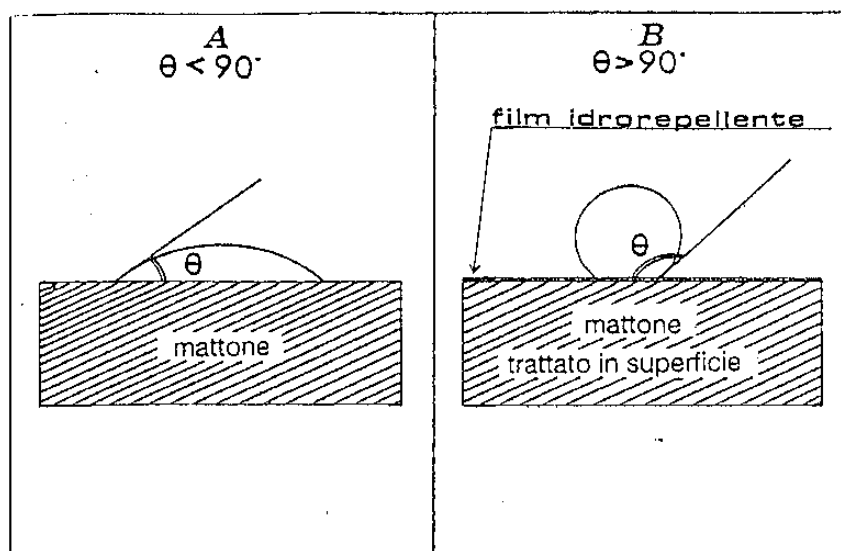


Fig. 2 Comportamento di un solido (per es. un mattone) nei confronti dell'acqua prima (A) e dopo (B) l'applicazione di un film di prodotto idrorepellente.

Una conseguenza della diversa affinità di un solido per un liquido, e viceversa, consiste nel fenomeno della risalita capillare.

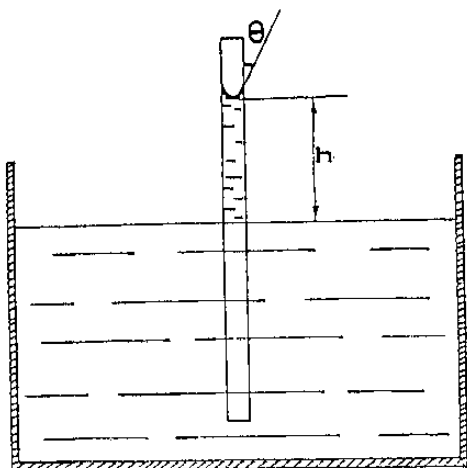


Fig. 3 Risalita capillare "spontanea": si noti la concavità del menisco del liquido dentro il tubo

Un liquido, che mostri affinità per le pareti interne di un tubo immerso in una vaschetta contenente il liquido stesso, risale spontaneamente all'interno del tubo. E' come se esso fosse spinto da una pressione (P) così calcolabile mediante l'equazione di Washburn [1]:

$$P = (2\sigma/r_c)\cos\theta \quad [1]$$

dove σ è la tensione superficiale del liquido, r_c è il raggio del tubo capillare e θ è l'angolo di contatto.

Se θ è minore di 90° , il $\cos\theta$ è maggiore di zero e la pressione P risulta positiva: è come se la pressione capillare spingesse "spontaneamente" il liquido all'interno del tubo dal basso verso l'alto.

La pressione P che fa risalire il liquido all'interno del tubo è tanto maggiore quanto minore è r_c (cioè quanto più piccola è la dimensione del tubo) e quanto minore è θ (cioè quanto maggiore è l'affinità del liquido per la superficie interna del tubo).

La risalita del liquido all'interno del tubo avviene, finchè raggiunta un'altezza h , si stabilisce un equilibrio tra la pressione capillare (P) e la pressione idrostatica ($m \cdot g \cdot h$):

$$m \cdot g \cdot h = (2\sigma/r_c)\cos\theta \quad [2]$$

dove m è la massa volumica del liquido e g è l'accelerazione di gravità.

Nel caso di liquidi, come il mercurio, per il quale un solido non presenta affinità, θ risulta maggiore di 90° e pertanto $\cos\theta$ risulta negativo. Ne deriva che anche il valore di P risulta negativo: ciò significa in pratica, che il mercurio non risalirà "spontaneamente" all'interno del tubo, ma sarà necessario applicare una pressione P sul mercurio per vincere la repulsione del mercurio nei confronti delle superfici interne del tubo (liofobia): la pressione

da applicare sarà in tal caso tanto maggiore quanto minore è il raggio del capillare e questo principio viene sfruttato per calcolare il raggio un poro attraverso la misura P che occorre per forzare il mercurio in un solido poroso (porosimetro a mercurio).

L'EQUILIBRIO IGROMETRICO FONDAZIONE-MURATURA- AMBIENTE

In teoria la massima risalita (h) di acqua per capillarità è ricavabile dalla equazione [2] che nella forma dell'equazione [3] è nota come legge di Jurin:

$$h = 2\sigma \cos\theta / r_c m g \quad [3]$$

dove m , la massa volumica dell'acqua, è 1000 Kg/m^3 , g vale 9.81 ms^{-2} , e σ è la tensione superficiale ed è uguale a $72 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$. Per $\theta = 0$, cioè assumendo la massima affinità possibile tra acqua e materiale poroso (mattoni, pietra, malta), si ottiene l'equazione [4]:

$$h = 14.7 \cdot 10^{-6} / r_c \quad [4]$$

Ciò significa che in un materiale poroso costituito solo da pori con raggio capillare r_c di $1 \mu\text{m}$ (cioè $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$), l'altezza di risalita dell'umidità dovrebbe arrivare al massimo di circa 15 m:

$$h = 14.7 \cdot 10^{-6} / 1 \cdot 10^{-6} = 14.7 \text{ m} \quad [5]$$

La porosità capillare di molti materiali che costituiscono le murature presenta una distribuzione dimensionale dei pori compresi tra 0.1 e $1 \mu\text{m}$ (Fig. 4), e pertanto per risalita capillare l'acqua dovrebbe raggiungere un'altezza nella muratura di oltre 15 m. In particolare in una muratura a mattoni, considerando teoricamente questo materiale come l'unico presente nella struttura, si dovrebbero registrare risalite di acqua per capillarità fino a 15 m se si ipotizza una porosità costituita da pori aventi raggio $1 \mu\text{m}$.

In effetti, anche in murature costantemente insistenti su un sottofondo bagnato come si verifica in quelle di Venezia, difficilmente si registrano risalite capillari oltre i 2-3 m (3). La ragione di questa discrepanza tra teoria e realtà (cioè 14-15 m contro 2-3 m) sta nel fatto che accanto al fenomeno della risalita capillare, coesiste quello dell'evaporazione. Inoltre la risalita capillare richiede del tempo: inizialmente essa procede con una velocità lineare di circa 2 cm/ora, successivamente la cinetica di risalita è molto più lenta. Tuttavia l'aspetto cinetico del fenomeno è praticamente annullato, dopo qualche anno, laddove, come si verifica per le murature di Venezia, le murature insistono su fondazioni che sono perennemente immerse in acqua; esso deve essere, invece, preso in considerazione laddove la bagnatura delle fondazioni è discontinua o addirittura occasionale.

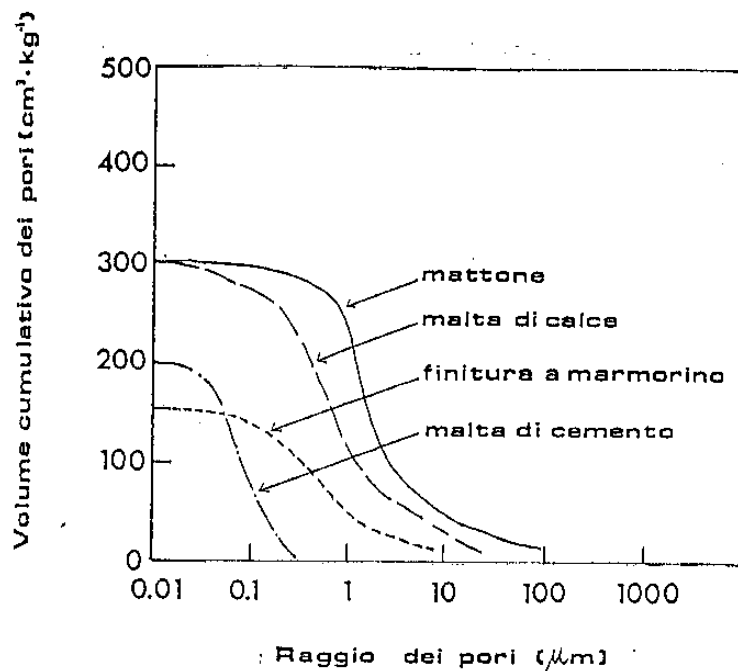


Fig. 4 Tipiche distribuzioni dimensionali dei pori per alcuni materiali da costruzione nelle murature

L'evaporazione dell'acqua, attraverso la parete esposta all'aria, influenza il contenuto residuo di umidità risalita per capillarità nella muratura. La Fig. 5 illustra esemplificativamente quale è un tipico diagramma "altezza - umidità" in una muratura in cui coesistono la risalita capillare della fondazione e l'evaporazione dell'acqua dalla parete. Si osserva che il contenuto di acqua può raggiungere valori del 20-30% nelle zone basse della muratura fino a circa 1 m. Per altezze superiori, l'evaporazione dell'acqua annulla in gran parte l'alimentazione dell'acqua per risalita capillare e si registra una diminuzione brusca dal 15-20% fino a circa il 5% nella fascia di muratura tra 1 e 2 m di altezza. Per altezze della muratura superiore a 2-3 m, il valore dell'umidità residua (a sull'ascissa della Fig. 5) non è tanto dovuto alla risalita capillare, quanto invece alla condensazione capillare ed il valore di a (circa 2-3%) dipenderà ovviamente dall'UR ambientale e dalla dimensione dei pori.

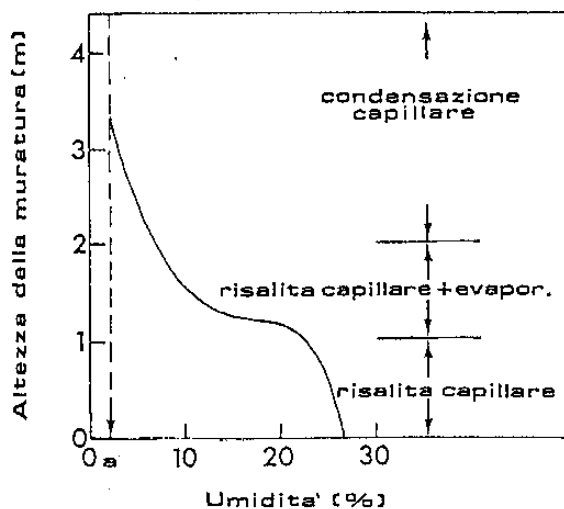


Fig. 5 Umidità della muratura in funzione della sua altezza

Ovviamente la forma precisa della curva illustrata in Fig. 5 nei vari casi specifici dipenderà dal tipo di muratura, dalla costanza o meno di alimentazione di acqua dalla fondazione e dalle particolari condizioni microclimatiche (vento, UR, temperatura, insolazione) che potranno favorire o meno l'evaporazione dell'acqua.

Per quanto concerne l'umidità nella muratura a parità di altezza, essa varierà solo leggermente in funzione dello spessore della muratura e tenderà ad essere leggermente inferiore verso la parete da dove avviene l'evaporazione (Fig. 6).

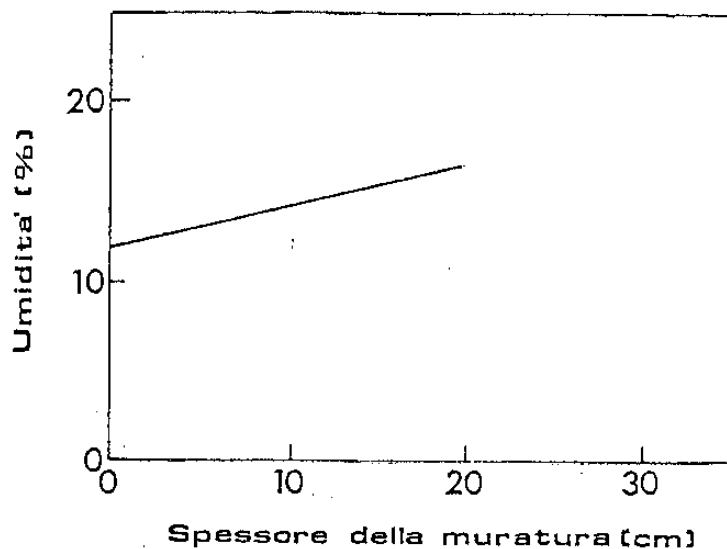


Fig. 6 Umidità in funzione dello spessore della muratura ad una determinata altezza

LA RISALITA DELL'ACQUA NELLE MURATURE DALLA FONDAZIONE

La risalita capillare "spontanea" da parte dell'acqua all'interno di un materiale poroso (idrofilo) è ciò che avviene nelle murature allorché queste insistono su una fondazione umida. E' evidente, almeno in teoria, che la risalita capillare porterà l'umidità ad altezze tanto maggiori quanto minore è la dimensione dei pori presenti all'interno dei materiali.

In realtà, data la grande eterogeneità dei materiali che compongono la muratura (mattoni, pietre, malta di allettamento, ecc.) la risalita avverrà in modo non uniforme per la distribuzione dimensionale dei pori diversa da materiale a materiale, ed in minor misura per il diverso angolo di contatto (θ), che può variare con i materiali.

In effetti la risalita capillare non raggiungerà mai i valori teorici previsti dalle equazioni [3], [4] e [5] in quanto una parte dell'acqua che risale può evaporare, a meno che la muratura non sia rivestita da entrambi i lati (esterno ed interno) da un rivestimento superficiale impermeabile (Fig. 7A). Nel caso in cui il rivestimento impermeabile sia presente solo nel lato esterno della muratura, la risalita capillare sarà maggiore su questo lato, e minore sul lato interno per effetto dell'evaporazione (Fig. 7B). Infine, se la muratura non presenta rivestimenti su entrambi i lati, l'evaporazione dell'acqua non consentirà di raggiungere lo stato stazionario di regime (massima risalita capillare: 14-15 m) e l'umidità sarà presente soltanto nella parte più bassa (1-2 m) della muratura (Fig. 7C).

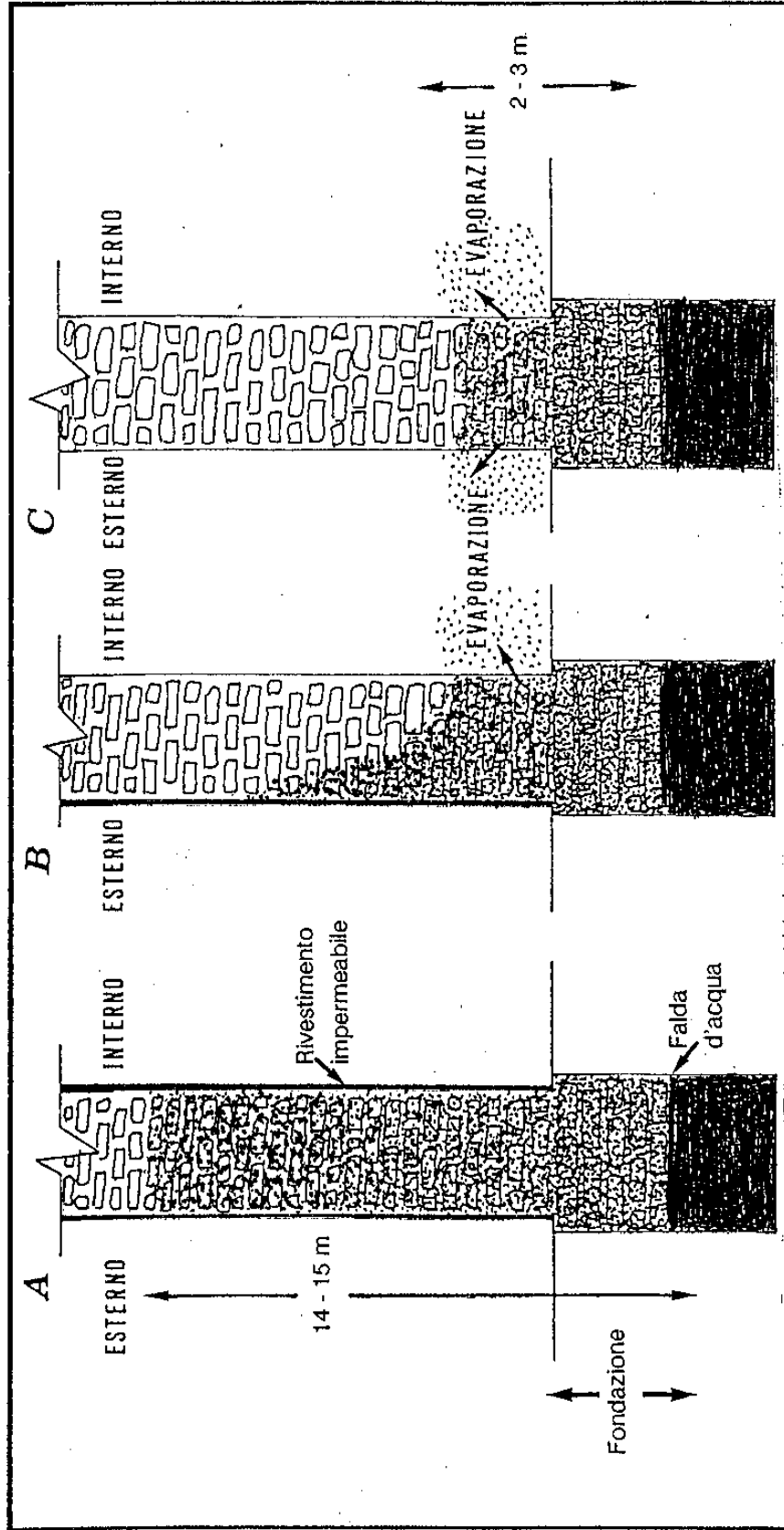


Fig. 7 Risalita capillare dalla fondazione lungo la muratura: in una muratura con intonaci impermeabili interni ed esterni (A), in una muratura con intonaco poroso solo all'interno (B), in una muratura con intonaci porosi che consentono l'evaporazione nei periodi di clima asciutto (C)

La conseguenza pratica della risalita capillare dell'umidità all'interno delle murature sono molteplici e tutte negative. Innanzitutto si registra uno scadente *comfort* interno laddove l'umidità evapora verso gli interni degli edifici (B e C in Fig. 7). In secondo luogo l'acqua presente nelle murature può congelare d'inverno ed innescare un degrado del materiale in conseguenza della formazione ciclica e distruttiva del ghiaccio. Il trasporto di acqua dal basso verso l'alto porterà alla formazione di depositi salini sulla superficie esterna (efflorescenze) o appena sotto l'intonaco (sub-efflorescenze), in quanto tutti i sali idrosolubili presenti nel terreno, nella fondazione o nella muratura stessa subiranno nel tempo lo stesso percorso ascendente dell'acqua accumulandosi verso zone più alte e corticali della struttura. In presenza di umidità, inoltre, viene favorita la crescita di microrganismi vegetali (muffe, muschi, funghi, licheni) con gravi ripercussioni sull'aspetto estetico delle murature).

Infine, a causa del movimento dei sali trascinati dall'acqua, si possono innescare alcune reazioni chimiche (molto dannose alla stabilità delle malte di allettamento e degli intonaci) nel caso che tra i sali siano presenti i solfati.

In sintesi, le conseguenze della risalita capillare dell'acqua - congiuntamente all'umidità derivante dall'azione della pioggia - sono così riassumibili (Tabella 1)

Tabella 1 Conseguenze dell'acqua nelle murature

<ul style="list-style-type: none">- Ridotto comfort- Deterioramento per formazione di ghiaccio- Efflorescenze e sub-efflorescenze- Crescita di muffe, muschi, funghi e licheni- Degrado per attacco solfatico (ettringite e/o thaumasite)

LA FORMAZIONE DEL GHIACCIO NEI MATERIALI DA COSTRUZIONE ESPOSTI ALL'ACQUA AMBIENTALE

Quando l'acqua solidifica, il suo volume aumenta del 9%, e se essa riempie completamente una cavità di un solido poroso, come un mattone o una malta, l'incremento di volume che accompagna la formazione di ghiaccio provoca un aumento di pressione che può arrivare alla distruzione del materiale, soprattutto se il fenomeno del gelo si alterna ripetutamente a quello del disgelo.

L'abbassamento della temperatura al di sotto del punto di gelo è condizione necessaria ma non sufficiente affinché si espliciti l'azione distruttiva in un solido poroso. Infatti, un materiale poroso completamente privo di umidità non subirà ovviamente, alcun danno dall'alternarsi della temperatura intorno al punto di gelo dell'acqua. Quale è, allora, il contenuto di umidità all'interno di un materiale poroso al di sopra del quale la formazione di ghiaccio diventa deleteria? Qual'è, cioè, il grado di saturazione* critico di un materiale poroso, al di sopra del quale l'aumento di volume dell'acqua (9%), che accompagna la for-

* Si definisce grado di saturazione la percentuale del volume di acqua presente nelle cavità di un solido poroso rispetto al volume totale dei pori.

mazione del ghiaccio, può provocare la distruzione del materiale?

Se si indica con v il grado di saturazione critico, esso può essere così individuato:

$$\begin{aligned}v + 0.09v &= 100 \\v &= 100/1.09 = 91.7\end{aligned}$$

In altre parole, se l'acqua riempie più del 91.7% del volume dei pori, la completa formazione del ghiaccio comporta un volume finale dell'acqua maggiore del volume dei pori: conseguentemente all'interno dei pori vengono indotte delle tensioni che possono arrivare alla rottura del materiale qualora la resistenza a trazione del materiale stesso risulti inferiore alla tensione insorta.

D'altra parte, se il volume di acqua all'interno del materiale è inferiore al 91.7%, la completa formazione di ghiaccio non arriva a far riempire le cavità e pertanto non si generano tensioni.

In realtà, sono stati registrati casi di rottura di materiali porosi anche se l'acqua in essi contenuta era considerevolmente inferiore al 91.7%: la ragione di questo comportamento, apparentemente contraddittorio, è semplicemente dovuta al fatto che l'umidità nei solidi porosi può essere distribuita in modo eterogeneo, e pertanto un grado di saturazione mediamente inferiore al 91.7% non necessariamente significa che in tutte le zone esiste effettivamente lo stesso contenuto di umidità. Infatti, non si può escludere che in alcune zone il contenuto di umidità possa essere anche superiore al 91.7%, provocando così localmente una formazione di ghiaccio distruttiva per il materiale.

Per contro, si sono anche registrati fenomeni di non distruzione del materiale sebbene il grado di saturazione critico fosse uniforme e superiore al 91.7%: nel caso di un materiale meccanicamente molto resistente e poco poroso (per esempio con una porosità inferiore allo 0.5%, come si può verificare in alcune pietre compatte) anche un grado di saturazione superiore a quello critico può non essere sufficiente a distruggere il materiale; anche se i pochi pori infatti sono pieni di acqua, la formazione di ghiaccio, e la conseguente sollecitazione, può arrivare al massimo a deformare elasticamente il materiale senza però arrivare a provocarne la rottura.

Come si vede, quindi, il degrado connesso alla formazione di ghiaccio in solidi porosi non è un fenomeno facilmente inquadrabile in base alla misura del grado di saturazione determinato su un numero relativamente modesto di provini prelevati da un materiale così eterogeneo come quello presente nelle murature degli edifici.

A complicare ulteriormente il fenomeno del degrado legato alla solidificazione dell'acqua delle murature contribuisce anche il fatto che la cristallizzazione del ghiaccio non è ovviamente un fenomeno istantaneo: esso si verifica in realtà gradualmente e con una velocità tanto maggiore quanto più alta è la velocità di raffreddamento. Questo fatto ha delle conseguenze molto importanti allorché si confronta il fenomeno della formazione del ghiaccio all'interno di un materiale poroso con quello che si verifica nella classica bottiglia di vetro conservata nel *freezer* al di sotto di 0°C.

Il fatto che i cristalli di ghiaccio si formino mentre ancora coesiste una parte di acqua liquida, comporta che l'aumento di volume provocato dalla formazione dei primi cristalli

comprime l'acqua non ancora solidificata spingendola attraverso i canali di pori verso vie d'uscita o cavità vuote. La pressione idraulica (4) che così si genera in prossimità dei primi germi cristallini di ghiaccio, è tanto maggiore quanto più difficile è la fuoriuscita dell'acqua liquida non ancora solidificata. Pertanto la probabilità che la pressione idraulica arrivi ad assumere valori così elevati da provocare la rottura del materiale solido poroso dipende, oltre che dalla resistenza a trazione del materiale stesso, anche da quei parametri che influenzano l'entità della pressione idraulica secondo la nota legge di Darcy:

$$dV/(dt \cdot A) = k \cdot \Delta P/L$$

dove ΔP è la differenza tra la pressione idraulica che si genera dove si forma il ghiaccio e quella atmosferica; L è il cammino che l'acqua non ancora solidificata deve percorrere fino a fuoriuscire o trovare una cavità vuota che si trova alla pressione atmosferica; A è la sezione dei pori attraverso cui l'acqua liquida viene spinta; dV/dt è il flusso dell'acqua che coincide con l'aumento di volume nel tempo determinato dalla formazione di ghiaccio, che a sua volta dipende dalla velocità con cui il ghiaccio si forma e quindi dipende dalla velocità di abbassamento della temperatura ambientale al di sotto di 0°C ; K , infine, è il cosiddetto coefficiente di permeabilità che, a sua volta, dipende non tanto e non solo dalla porosità totale del materiale solido, quanto invece dalla distribuzione dimensionale dei pori.

Dalla teoria della pressione idraulica deriva un concetto molto importante che ha trovato una pratica applicazione nella produzione di malte e calcestruzzi resistenti alla formazione del ghiaccio. Se si riduce la distanza (L) tra un punto dove si forma il ghiaccio e quello dove si trova una cavità vuota, si aumenta la capacità del materiale di resistere alle tensioni provocate dalla formazione del ghiaccio. In pratica ciò può essere realizzato aggiungendo alle malte o ai calcestruzzi, al momento della loro confezione, un additivo tensioattivo (aerante) capace di sviluppare una miriade di microbolle (diametro medio: $100 \mu\text{m}$) distanti tra loro non più di $200\text{-}300 \mu\text{m}$ (4).

EFFLORESCENZE SULLE MURATURE E SUBFLORESCENZE DENTRO LE MURATURE

L'acqua che risale capillarmente dalla fondazione trascina con sé tutti i sali idrosolubili che incontra lungo il suo cammino e li deposita sotto forma di efflorescenze sulla superficie da cui evapora (Fig. 8A). In talune circostanze climatiche (vento forte e bassa UR) l'evaporazione dell'acqua è così veloce che avviene ancor prima di raggiungere la superficie esterna, cosicché il deposito dei sali trascinati dall'acqua liquida avviene all'interno della muratura (subflorescenze), e molto spesso nella zona di confine tra zona umida e zona asciutta dove appunto l'acqua comincia a difettare (Fig. 8B). Se il deposito dei sali anziché sulla superficie (efflorescenza) avviene all'interno della muratura (subflorescenza), possono insorgere delle tensioni interne dovute alla cristallizzazione dei sali capaci di danneggiare il materiale.

Ma l'inconveniente più grave nel fenomeno di risalita capillare dell'acqua che trascina i sali idrosolubili è dovuto al fatto che alcuni di questi sali (per esempio i solfati) possono interagire negativamente con altri composti situati in altre zone della muratura (per esempio: sugli intonaci) con le quali, in assenza di risalita capillare, i sali idrosolubili non sarebbero mai venuti in contatto. Ne consegue che le murature esposte ai fenomeni di risalita capillare sono quasi sempre maggiormente esposte al rischio di degrado: di tipo fisico (formazione di ghiaccio, subflorescenza) o di tipo chimico (reazione di sali idrosolubili con altri elementi della muratura).

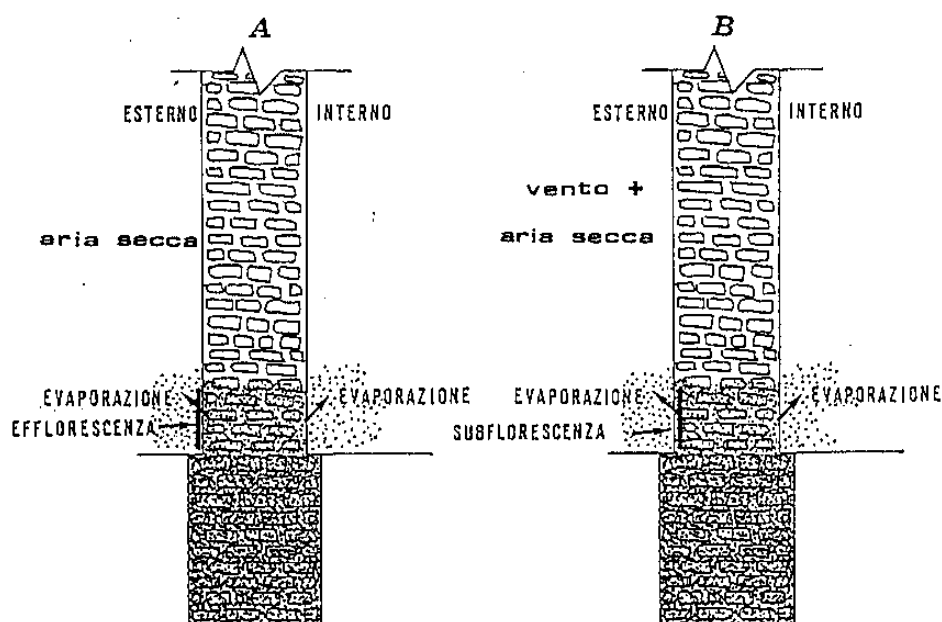


Fig. 8 Formazione di efflorescenza (A) e subflorescenza (B)

L'INFLUENZA DELL'ACQUA SULLE ALTERAZIONI BIOLOGICHE

L'insediamento di micro-organismi rientra tra le cause biologiche di degrado, ed è fortemente condizionato dalla presenza dell'acqua.

Le alghe possono insediarsi sulla superficie degli intonaci umidi. Inizialmente assumono una colorazione verdastra che tende progressivamente al bruno e poi al nero fino a confondersi con le croste nere prodotte per solfatazione negli ambienti inquinati da SO₂. 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, davanzali, ecc (5).

Per quanto non accettabili esteticamente, soprattutto laddove esse sono responsabili di indesiderate variazioni cromatiche della superficie, le alghe non provocano un'azione disgregante dell'intonaco.

Anche i licheni, derivanti da un'azione combinata delle alghe con i funghi, possono danneggiare solo l'aspetto estetico delle pitture o anche delle pietre scolpite attraverso una

variazione di colore estremamente variabile da caso a caso, ma difficilmente essi sono responsabili di una disgregazione sia pure superficiale del materiale.

Vi sono anche alghe e licheni capaci di produrre, attraverso il loro metabolismo, l'acido ossalico che, reagendo con il calcare dell'intonaco, dà luogo ad una patina di ossalato di calcio variamente colorata (rosa, giallo, marrone) e ritenuta decorativa e protettiva nei confronti della superficie sottostante. Non si può, però, escludere che la patina di ossalato di calcio si sia formata lentamente nel tempo attraverso una trasformazione biologica di prodotti organici (albumina, caseina, ecc.) applicati originariamente sugli intonaci a scopo protettivo e decorativo. Per questo motivo, a differenza delle macchie provocate dalle alghe, le patine di ossalato non sono meccanicamente rimosse negli interventi di manutenzione o recupero degli intonaci.

REAZIONI CHIMICHE "PERICOLOSE" NELLE MURATURE TRA I MATERIALI ORIGINALI: L'ATTACCO SOLFATICO

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 (6, 7).

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. 9. Molto spesso i due composti sono presenti simultaneamente, anche se di solito la formazione dell'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.

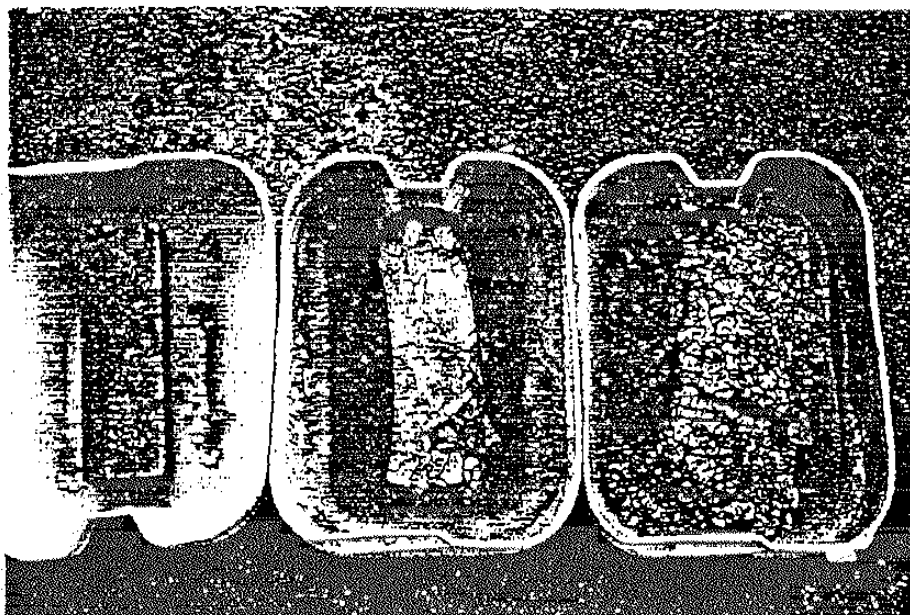
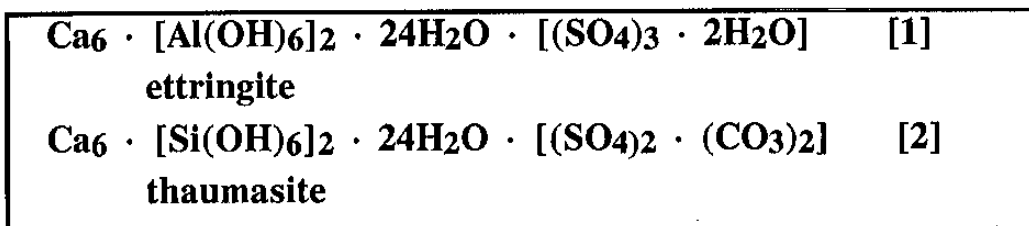


Fig. 9 Da sinistra a destra: un provino di malta integro, degradato per formazione di ettringite, e distrutto dalla produzione di thaumasite.

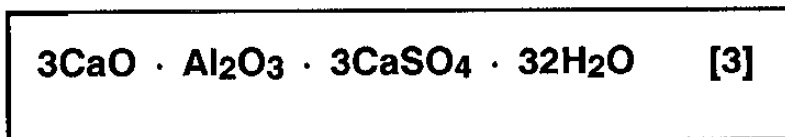
E' importante sottolineare che la formazione di ettringite non è di per sè pericolosa, cioè non crea rigonfiamenti se non è accompagnata dalla presenza di calce: è stato dimostrato da Mehta (8) che se essa si forma in ambiente basico, per la presenza di calce, l'ettringite cristallizza sottoforma di fibre molto corte (lunghe, qualche μm) 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 μm) e non sono in grado di adsorbire acqua e provocare rigonfiamenti. Mehta definisce colloidale e cristallina l'ettringite rispettivamente capace e 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 strutturistico 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:

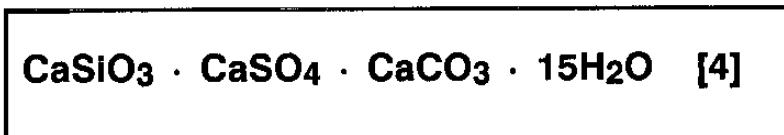


In sostanza nella thaumasite lo ione silicio (Si^{+4}) occupa, nel reticolo cristallino, il "posto" che nell'ettringite è occupato dallo ione alluminio (Al^{+3}). A causa, però, della diversa carica elettrica del silicio rispetto all'alluminio, nella thaumasite oltre allo ione solfato SO_4^- occorre lo ione carbonato CO_3^- per compensare le cariche elettriche nel reticolo cristallino.

Le formule "grezze", invece, ci informano sui composti (solfato di calcio, silicato 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 ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ecc.).

Nel caso della thaumasite, invece, sappiamo dalla formula [4] che essa si può formare per reazione del carbonato di calcio, 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 $x\text{CaO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$, talvolta indicati 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 di calcio idrati).

Nella Fig. 10 e 11 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.

Un commento a parte merita l'uso del cocchiopesto. Poichè esso è stato ottenuto per frantumazione di rottami di materiali ceramici (tegole, mattoni, biscotti per maioliche prima della smaltatura, ecc.) è possibile che esso contenesse dei solfati formati durante la cottura delle argille contenenti pirite (FeS_2) come impurità. In tal caso, il cocchiopesto inquinato da solfati si è comportato come una miscela solfato - pozzolana. Se, pertanto, si è impiegata la calce come legante in combinazione con questo tipo di cocchiopesto inquinato da solfato, esistevano, fin dalla costruzione originaria, le condizioni potenziali per la formazione di ettringite e/o thaumasite nella malta destinata all'intonaco o all'allettamento dei mattoni o delle pietre.

INTERVENTI PER ELIMINARE O RIDURRE L'UMIDITA' DELLE MURATURE A SEGUITO DELLA RISALITA CAPILLARE

Esistono fondamentalmente due metodi per ridurre o addirittura eliminare l'umidità dalle murature proveniente dalla risalita capillare. Il successo completo dell'intervento, data la complessità del problema, non è mai garantito.

Il primo metodo, del quale esistono varie versioni (taglio del muro ed inserimento di una lastra di piombo o neoprene, oppure iniezione di resina epossidica), è più adatto per murature perennemente a contatto con una fondazione umida e consiste nell'interporre un'impedimento meccanico alla risalita capillare. Il secondo, invece, è più adatto a murature saltuariamente umidificate per risalita capillare, consiste nell'alleviare il carico di umidità nella muratura attraverso l'applicazione, in fase di restauro, di un intonaco macroporoso che faciliti, proprio grazie alla elevata porosità, l'evaporazione dell'umidità dalla muratura nel periodo di tempo asciutto.

Rispetto al primo metodo, che blocca alla "radice" (almeno da una certa quota in su) l'ingresso di umidità nella muratura per risalita capillare, il secondo metodo è meno

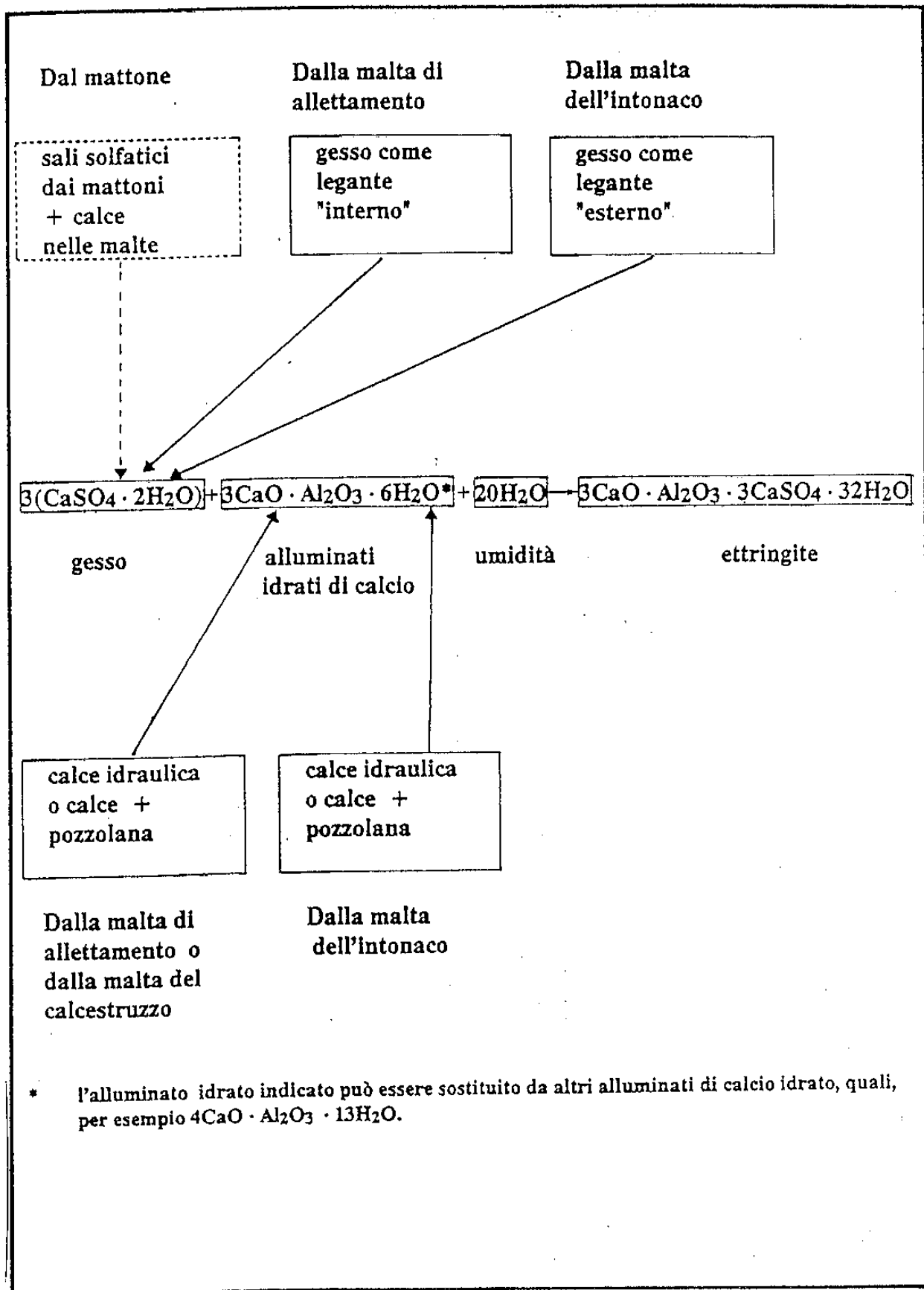


Fig. 10 Schema delle possibili interazioni tra gli elementi della muratura per la formazione di ettringite. La parte tratteggiata riguarda solo le murature in mattoni contenenti sali solfatici

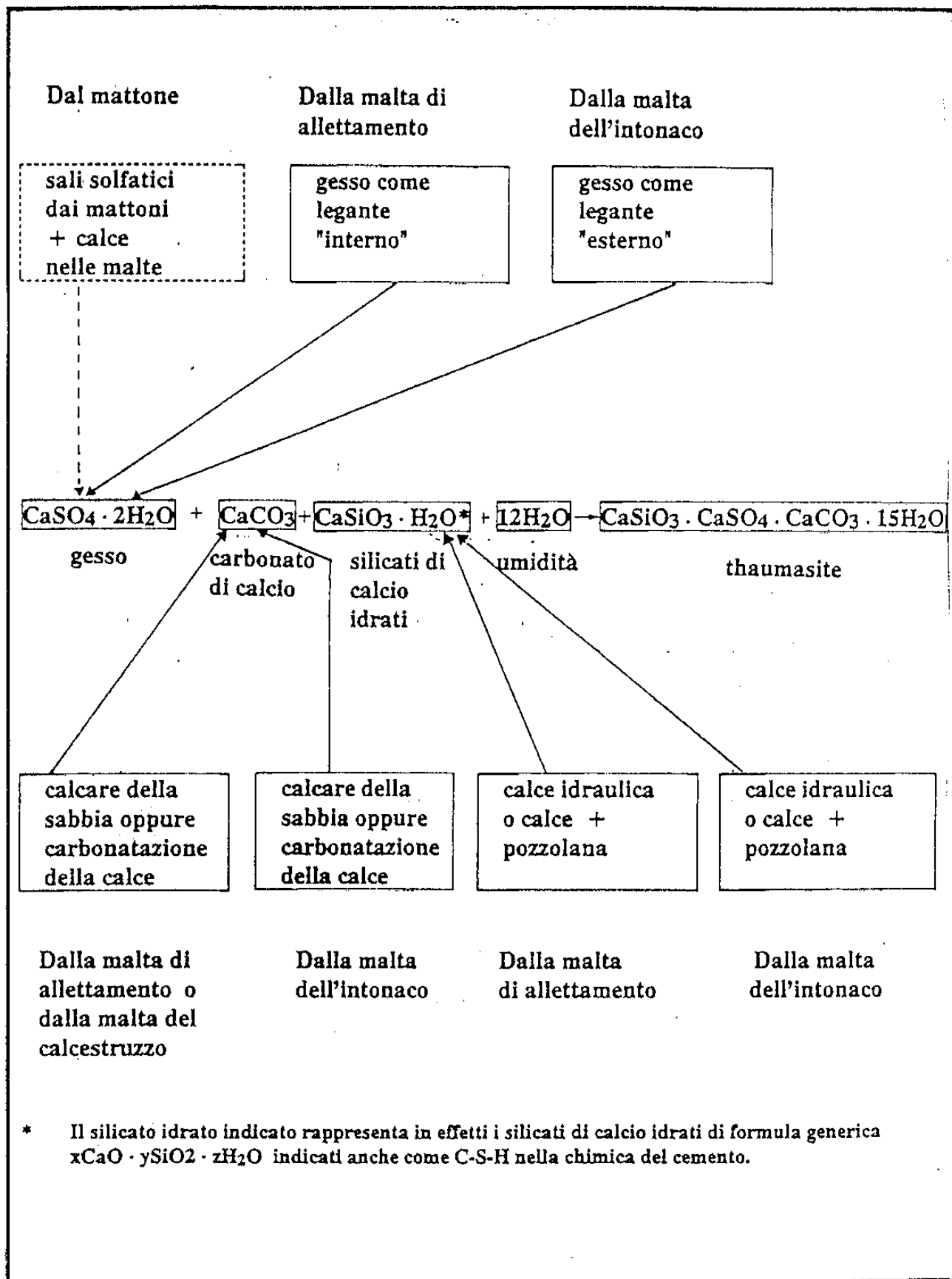


Fig. 11 Schema delle possibili interazioni tra gli elementi della muratura per la formazione di thaumasite. La parte tratteggiata riguarda solo le murature in mattoni contenenti sali solfatici.

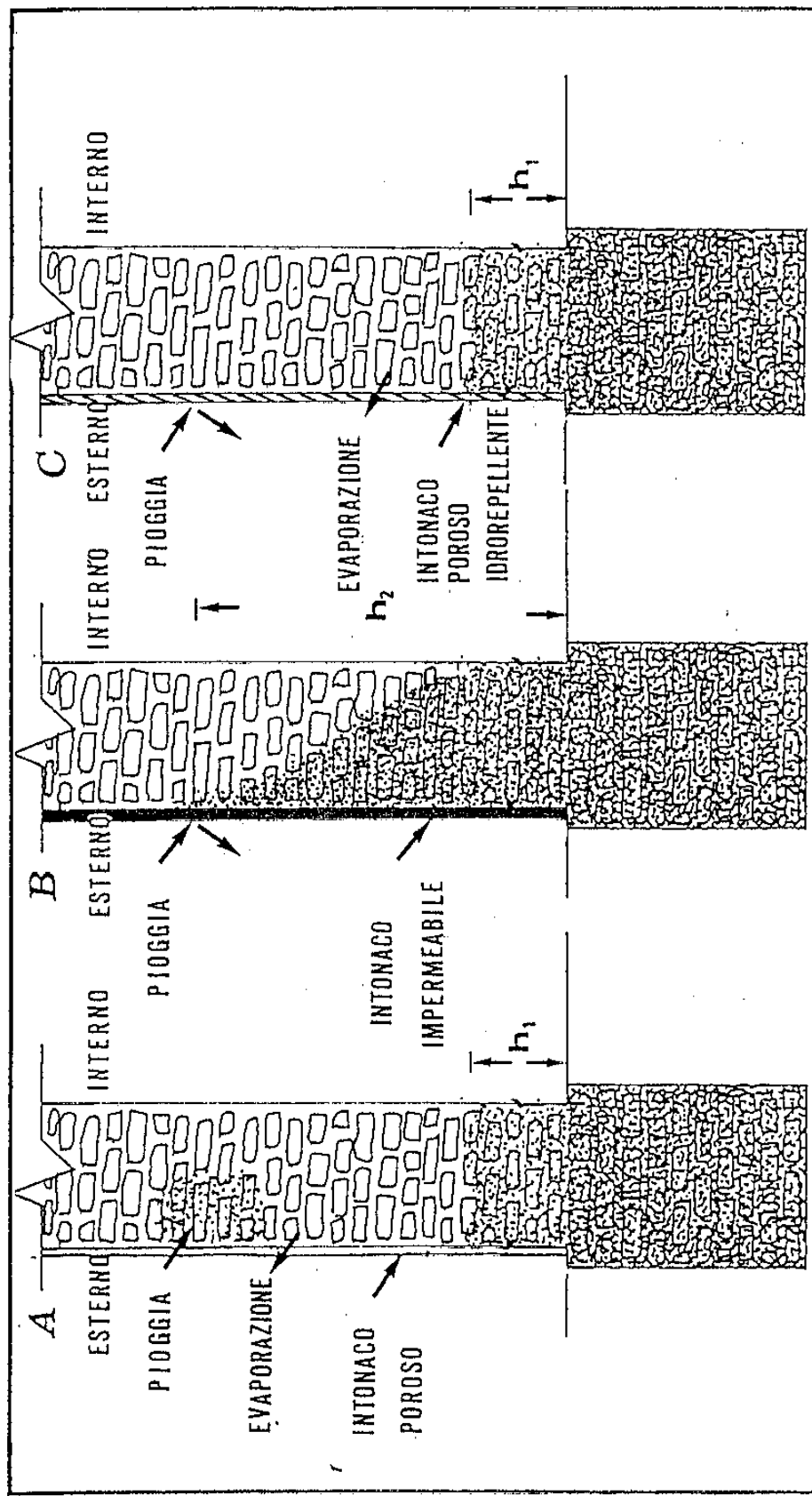


Fig. 12 A: l'evaporazione nella stagione secca impedisce la risalita capillare oltre una certa quota (h_1), ma l'acqua piovana può penetrare nella muratura; B: la pioggia è respinta dall'intonaco impermeabile, ma la risalita capillare, per l'impedimento dell'evaporazione, fa risalire ad h_2 l'altezza di muratura umida sul lato esterno; C: l'applicazione di un intonaco macroporoso ed idrorepellente impedisce alla pioggia di penetrare nella muratura e lascia inalterata l'evaporazione

radicale. Esso non elimina la risalita capillare ma favorisce solo lo smaltimento del carico di umidità nei periodi della stagione calda e secca. L'impiego di un intonaco di malta macroporosa facilita lo smaltimento dell'umidità per risalita capillare, ma non può impedire l'ingresso dell'acqua piovana (Fig. 12A). Il risultato di questi due opposti effetti è tuttavia favorevole all'asciugamento della muratura se i giorni asciutti prevalgono su quelli piovosi come avviene nei nostri climi.

D'altra parte, se si applicasse un rivestimento impermeabile sul lato esterno della muratura, per impedire l'ingresso dell'acqua piovana (Fig. 12B), ne conseguirebbe anche una maggiore difficoltà dell'evaporazione dell'umidità (risalita per capillarità) verso l'ambiente esterno per l'impedimento fisico del rivestimento impermeabile.

La migliore soluzione al problema dell'umidità nelle murature consiste nell'applicazione di un intonaco macroporoso trattato superficialmente con un rivestimento trasparente, traspirante ed idrofobizzante a base di silani (Fig. 12C): in queste condizioni, l'umidità interna (risalita per capillarità) può fuoriuscire sia attraverso l'intonaco macroporoso di malta, sia attraverso il rivestimento silanico superficiale traspirante; d'altra parte, quest'ultimo, per le sue proprietà idrofobizzanti, è capace di cambiare l'angolo di contatto θ tra l'acqua e la muratura (Fig. 2), cosicchè l'acqua piovana "scivola" sulla muratura senza esserne assorbita come avviene in un normale intonaco macroporoso. In sostanza, la combinazione di un intonaco macroporoso con un rivestimento silanico provoca una sorta di "via-a-senso-unico" per l'acqua: essa può uscire dalla muratura in forma di vapore, ma non può entrare in forma di acqua liquida per il carattere idrofobo del rivestimento.

BIBLIOGRAFIA

- (1) S. Glasstone, *Trattato di chimica fisica*, Manfredi Editore, Milano, 2° Edizione, (1959).
- (2) N. K. Adam, *The Physics and Chemistry of Surfaces*, Oxford University Press, 3° Edizione, (1941).
- (3) G. Biscontin, *Recuperare*, 33, 78, (1988).
- (4) M. Collepari, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*, Editore Hoepli, Milano, 3° Edizione, (1991).
- (5) G. Torraca, *Atti di un convegno sulle superfici architettoniche a Ferrara*, Ordine degli Ingegneri ed Architetti di Ferrara, pg. 67, (1987).
- (6) M. Collepari, *L'Edilizia*, 9, 428, (1989).
- (7) M. Collepari, *L'Edilizia*, 10, 493, (1989).
- (8) P. K. Mehta, *Cement and Concrete Research*, 3, 1, (1973).