

IL RISANAMENTO DEGLI EDIFICI STORICI: SITUAZIONE ATTUALE E PROSPETTIVE NELLA RICERCA

Gli edifici storici in Europa ed in Italia

Si possono tentare diverse definizioni degli "edifici storici" in base al diverso approccio con cui si affronta questo argomento.

Per esempio, si potrebbe tentare una definizione in base allo stile architettonico o al periodo di tempo in cui un edificio fu costruito. Tuttavia, in riferimento al degrado subito dalle strutture degli edifici storici, un parametro sicuramente più determinante è l'impiego dei materiali con i quali essi furono costruiti. Infatti, per alcuni millenni l'uomo ha costruito con gli stessi materiali (legno, pietre, mattoni, calce e gesso) fino all'avvento del cemento, la cui invenzione all'inizio dell'800 può essere considerata, nel campo delle costruzioni, la più importante tra le tante innovazioni della rivoluzione industriale.

Tuttavia è solo all'inizio di questo secolo, quando si scopre il meraviglioso connubio tra il calcestruzzo prodotto con il cemento e l'acciaio impiegato come rinforzo strutturale, che ha inizio una nuova era per le costruzioni. Così è il nuovo materiale, e la relativa tecnologia applicativa, a scandire il tempo con cui datare gli edifici storici: con l'avvento e la vasta applicazione del cemento finisce

Historical buildings, and in particular masonry walls, have been deteriorated by physical, chemical and biological processes. The recovery of historical buildings is a very delicate operation, since the materials employed in restoration work, can interact negatively with some of the compounds that might be present in historical buildings. Owing to these reactions, the restoration operation can worsen the state of historical buildings. These reactions cause swelling, pop-out and falling of jointing and rendering mortars applied during the restoration work, as well as cement grout injections for interior consolidation of structures.

l'era delle costruzioni che oggi noi definiamo storiche. Se è vero che ormai il cemento, soprattutto sotto forma di calcestruzzo armato, ha rimpiazzato in gran parte i vecchi materiali impiegati negli edifici storici, rimane tuttavia il grande problema da una parte di arrestare il degrado di queste costruzioni e dall'altra di provvedere ad un loro recupero. Questi due aspetti del problema, si possono sintetizzare in due quesiti: perché si degradano gli edifici storici? E come è possibile ripararli?

Prima di tentare di dare una risposta a questi due quesiti vale la pena di sottolineare che la salvaguardia ed il recupero degli edifici storici nei centri urbani, in Europa in genere ed in Italia in particolare, è un'operazione di enorme importanza non solo dal punto di vista storico-culturale ma anche da quello economico: sia per il recu-

pero in sé di un bene immobiliare molto spesso di grande valore finanziario oltre che architettonico, sia per la conseguente valorizzazione turistica del centro storico che in molte città Europee rappresenta un elemento di fortissimo richiamo nei confronti dei visitatori di altri Paesi. Si pensi, per esempio, soltanto a Roma, Venezia e Firenze ed all'importanza che hanno gli edifici per la storia, la cultura e l'economia di queste tre città italiane.

Val la pena di precisare che, per quanto uno studio su basi statistiche non sia ancora stato fatto, è molto probabile che la situazione dei centri storici nel nostro Paese si presenti molto più grave che non negli altri paesi europei. A questo scopo è stata fatta una valutazione di confronto tra le tre menzionate città italiane (Roma, Firenze, Venezia) e tre città in Paesi europei



Fig. 1 - Edificio storico in Francia (Honfleur, Normandia).



Fig. 2 - Edificio rurale in Svizzera (Campagna di Zurigo).

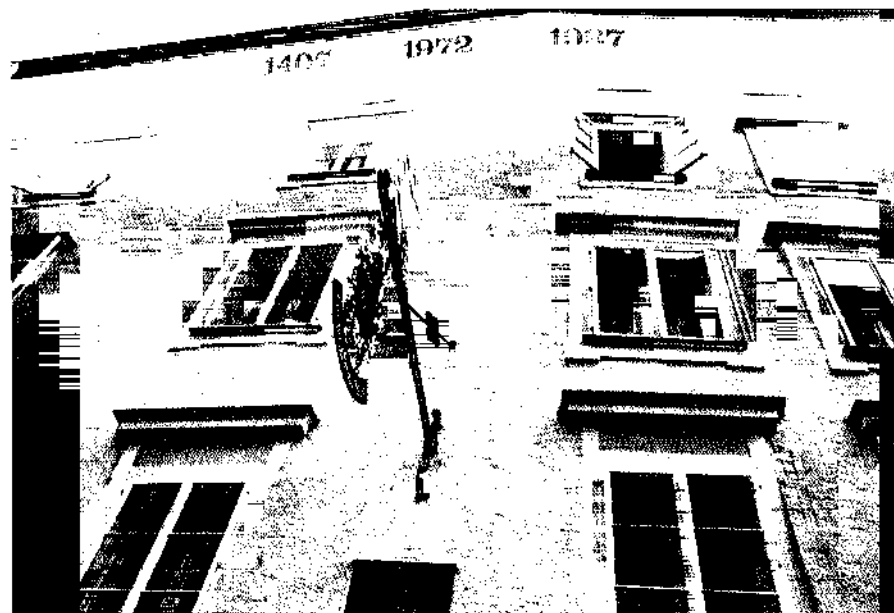


Fig. 3 - Edificio storico a Salisburgo (Mozartstrasse).

confinanti (Parigi, Zurigo, Salisburgo). Sono state anche documentate le situazioni in altri centri storici minori che confermano i risultati del confronto tra le città italiane e quelle degli altri Paesi. E' bene subito precisare che il confronto è sconcertante e tutto a svantaggio nei confronti del nostro Paese.

A Parigi, ma la situazione è simile in molte altre città francesi, è pressoché impossibile trovare un edificio storico che si trovi in situazione di degrado. Anche in piccoli villaggi rurali lo stato di conservazione degli edifici in Francia è veramente eccellente e può essere spiegato con l'accurata manutenzione regolarmente eseguita; a puro



Fig. 4 - Edificio storico a Venezia (Campo Manin): distacco dell'intonaco.

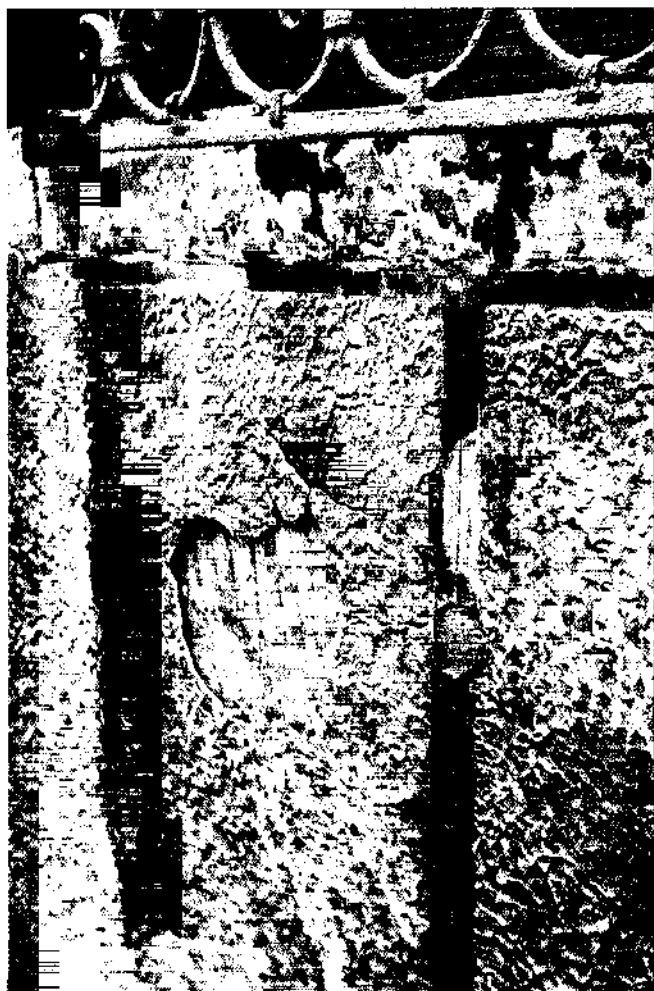


Fig. 5 - Edificio storico a Venezia: riparazione fallimentare con intonaco di cemento su muratura in mattoni e pietra.

titolo esemplificativo si riporta nella Fig. 1 la foto di un tipico edificio situato in Normandia: si tratta di un vecchio maniero attualmente adibito ad albergo.

Analoga è la situazione in Svizzera. Non solo a Zurigo, ma in tutte le altre città svizzere lo stato di conservazione degli edifici storici è da considerare eccellente. In Svizzera, come in Francia, anche edifici rurali di scarso valore storico-culturale si presentano in ottimo stato, come è mostrato nell'esempio fotografico della Fig. 2: si tratta in questo caso di un edificio rurale costruito in muratura mista a legno e quindi molto esposto potenzialmente a processi degradanti; ciò nonostante, questi edifici si presentano anch'essi ben conservati grazie ad accurata e sapiente manutenzione. Ancora migliore appare la situazione in Austria. A Salisburgo, per esempio, gli edifici più importanti - tutti in eccellente stato di salute - appaiono "datati" in alto, al di sotto del cornicione, con cifre visibilissime indicanti l'anno di costruzione e quello di risanamento. Nella Fig. 3 è mostrato uno dei tanti edifici storici di Salisburgo dove si può riconoscere l'anno di costruzione (1407) e quelli dei due interventi di restauro (1972 e 1987).

Decisamente scoraggiante appare la situazione in Italia. Se è in qualche modo comprensibile la situazione di enorme degrado nella quale vengono a trovarsi gli edifici storici di Venezia (Fig. 4-5-6) per la straordinaria aggressione dell'ambiente, proveniente in particolare dal mare sul quale insistono tutte le fondazioni degli edifici, non è altrettanto giustificabile il livello di degrado attualmente raggiunto in città meno aggredite come Roma (Fig. 7) e Firenze (Fig. 8). Né appare migliore la situazione degli edifici storici nelle altre prestigiose città italiane (da Verona a Milano, da Perugia a Siena, da Napoli a



Fig. 6 - Edificio storico a Venezia: tentativi vari di risanamento con malta di cemento su una muratura in mattoni.



Fig. 7 - Edificio storico a Roma (Portico d'Ottavia): riparazioni ripetute tutte fallimentari di una muratura (sulla sinistra in secondo piano).



Fig. 8 - Edificio storico a Firenze (Piazza della Signoria): degrado dell'intonaco in una muratura in pietra.



Fig. 9 - Abbazia del XII secolo a Orvieto: degrado della muratura in pietra.

Palermo, da Bologna a Genova) o anche dei centri storici minori, come Orvieto (Fig. 9), o di paesi tanto sconosciuti ai più, quanto ricchi di tesori architettonici.

La carenza nella ricerca

All'enorme importanza dell'argomento, non fa purtroppo riscontro un'adeguata attenzione alla conoscenza tecnico-scientifica del problema da parte dei tecnici e dei produttori di materiali. Da questo punto di vista, anche le pubbliche istituzioni (Università, Centri di Ricerca, ecc.) non hanno certo contribuito molto a colmare le lacune scientifiche nel campo delle conoscenze del meccanismo di degrado dei materiali degli edifici storici, ove si pensi, per confronto, all'enorme investimento effettuato nel settore dei nuovi materiali avanzati, o anche in quello dei materiali tradizionali per la costruzione in cemento armato. In conseguenza di queste carenze conoscitive del problema, molto spesso l'operazione di recupero degli edifici storici finisce, a lungo termine, con

l'aggravare lo stato di degrado delle costruzioni dopo un iniziale apparente miglioramento.

Le cause di questi non infrequenti infortuni nel settore del risanamento degli edifici storici trovano una perfetta analogia nel settore medico: una diagnosi errata della patologia del malato porta molto spesso a trasformare l'intervento terapeutico in un peggioramento dello stato di salute del paziente perché la causa del male non è stata rimossa, o perché - ed è ancora peggio - l'intervento terapeutico interferisce negativamente con lo stato preesistente del paziente: così un'iniezione di cemento, molto spesso praticata per consolidare una muratura di un edificio storico, può risultare talvolta tanto fatale, quanto l'iniezione di un farmaco impropriamente prescritto per una diagnosi errata.

Nel risanamento delle costruzioni, in particolare di quelle degli edifici storici, l'errore è molto spesso da attribuire alla mancanza di umiltà con la quale, invece, è necessario affrontare il recupero delle opere antiche con le nuove tecnologie. Il solo fatto di avere a

disposizione mezzi, conoscenze e materiali straordinariamente superiori a quelli disponibili in passato, non deve far commettere l'errore di utilizzare indiscriminatamente i moderni materiali per riparare le opere costruite con gli antichi materiali. Solo rimuovendo questa arroganza culturale sarà possibile affrontare l'esame conoscitivo delle antiche costruzioni e proporre tecnologie più moderne, ma adeguate ad un risanamento duraturo degli edifici storici.

Gli antichi materiali da costruzione impiegati negli edifici storici

I più importanti materiali da costruzione impiegati originariamente nelle costruzioni in mattone, in pietra o in calcestruzzo degli edifici storici comprendono:

- i materiali leganti (gesso, calce, calce idraulica);
- le sabbie (normali o pozzolatiche) per la confezione delle malte;
- gli elementi da legare (pietre e mattoni);
- il legno.

Nel caso particolare delle murature in calcestruzzo, oltre al legante ed alla sabbia, si sono usati rottami di pietre e di mattoni.

Il gesso

Per la semplicità della sua produzione, il gesso è stato il primo legante impiegato nella storia: gli Egiziani, per esempio, lo usarono come malta per collegare le pietre nella piramide di Cheope (2500 A.C.). Esso indurisce solo all'aria e per questo è definito *legante aereo*. È stato usato in forma di pasta (cioè mescolato solo all'acqua) per stucchi o decorazioni, o in forma di malta (cioè mescolando acqua e sabbia) per intonaci, per lo più in ambienti interni, a causa della sua

dilavabilità dalle acque piovane. E' stato impiegato anche sotto forma di malta per legare mattoni e pietre. Per la scarsa resistenza meccanica non è mai stato usato per produrre calcestruzzi.

La calce, la pozzolana e la calce idraulica

La calce, più esattamente la calce idrata, è anch'essa un legante aereo, in quanto mescolato con acqua indurisce solo all'aria per formare carbonato di calcio. La produzione della calce idrata iniziò molto dopo quella del gesso a causa della maggiore temperatura di cottura della pietra calcarea da cui proviene, e quindi delle maggiori difficoltà del processo produttivo. Sebbene ci siano testimonianze (Plinio il Vecchio) che gli Egiziani conoscessero il modo di produrre la calce, tuttavia essa fu largamente impiegata solo successivamente dai Greci e, soprattutto, dai Romani.

Inizialmente fu impiegata sotto forma di malta aerea capace di indurire solo all'aria, mescolando calce idrata, acqua e sabbia normale. Successivamente si scoprì che sostituendo la sabbia normale con una sabbia di origine vulcanica (del tipo di quella esistente a Pozzuoli, vicino Napoli), la malta diventava *idraulica*: era in grado, cioè, di indurire anche sotto acqua, oltre che all'aria, e di raggiungere una maggiore resistenza meccanica. Si definisce *pozzolanica* una sabbia capace di trasformare una malta da aerea in idraulica nonostante il legante impiegato (calce) sia di per sé stesso aereo. L'effetto è fondamentalmente dovuto alla presenza, nella pozzolana, di silice ed allumina reattive nei confronti della calce per il loro stato scarsamente cristallino e vetroso. Molto spesso si otteneva lo stesso effetto sostituendo la sabbia di Pozzuoli, per questo diventata famosa con il nome

di pozzolana, con argilla cotta macinata o con cocchio pesto (mattoni o tegole finemente macinate). Sia la sabbia di origine vulcanica (pozzolana naturale) che il cocchio pesto (pozzolana artificiale) hanno la capacità di reagire con la calce trasformandola in alluminati di calcio idrati e in silicati di calcio idrati capaci di produrre una maggiore resistenza meccanica e, soprattutto, di indurire sotto acqua.

Sebbene la scoperta delle malte idrauliche sia comunemente attribuita ai Romani, sembra che anche i Fenici (già nel X secolo A.C.), insieme agli Israeliti, conoscessero la tecnica di produrre malte idrauliche di enorme importanza tecnologica in tutte le opere idrauliche (acquedotti, porti, serbatoi, ecc.) dove il dilavamento dell'acqua degradava rapidamente le comuni malte aeree. Per questo motivo le cisterne per l'acqua potabile fatte costruire da Re Salomone a Gerusalemme venivano protette con malte idrauliche ottenute mescolando calce con cocchio pesto.

Ancor prima dei Romani, che sicuramente ne compresero l'importanza strategica nel campo delle costruzioni idrauliche, o comunque esposte alle intemperie ed all'azione dell'acqua piovana, la pozzolana fu impiegata, in forma di sabbia, dai Greci soprattutto attraverso l'uso della cenere vulcanica proveniente dall'isola di Santorino. Risalirebbe addirittura al 2000 A.C. l'uso di materiali pozzolanici - sotto forma di polvere di argilla calcinata - in alcune strutture dell'isola di Creta.

Soprattutto dopo la scoperta del comportamento idraulico da parte di miscele di calce e pozzolana, iniziò l'uso della calce per produrre calcestruzzi mescolando calce, sabbia pozzolanica, acqua e rottami di pietra (*caementum*) ed eventualmente rottami di mattone. Molte delle opere di Appio Claudio Cieco

nel 300 A.C., quali l'acquedotto Appio e la via Appia, testimoniano l'uso di un calcestruzzo vero e proprio per l'impiego di rottami di pietra come aggregato grosso. Ma forse l'esempio più famoso di struttura in calcestruzzo a base di calce aerea e pozzolana è la grande cupola (43 metri di diametro) del Pantheon a Roma. Nella maggior parte delle opere dei Romani, il calcestruzzo fu in realtà impiegato come riempimento tra i paramenti esterni in mattoni o in pietra che fungevano come casseforme permanenti. Le murature in calcestruzzo sono state ampiamente costruite nell'antichità e sono citate nelle opere di Plinio il Vecchio ("Storia Naturale") e di Vitruvio ("De Architectura"). Il calcestruzzo (*opus caementitium*) era costituito da rottami di pietra o mattoni, mescolati con calce, sabbia ed acqua; per le opere idrauliche la sabbia veniva sostituita dalla pozzolana naturale o dal cocchio pesto.

Dovettero passare molti secoli prima che si scoprisse una calce idraulica che di per sé - cioè indipendentemente dalla presenza di pozzolana - avesse la capacità di indurire e di resistere all'azione dilavante delle acque.

Nel 1570 il Palladio riferisce di una calce straordinaria ottenuta per cottura di una pietra calcarea presso Padova, con caratteristiche idrauliche. Egli dice: "La calce ottenuta da tale pietra indurisce immediatamente e si può adoperare, sia per lavori in acqua che per opere esposte alle intemperie". Oggi noi sappiamo che la idraulicità della calce descritta dal Palladio consisteva nella impurezza del calcare di partenza, per la presenza di argilla (calcare marnoso). In presenza di argilla (ricca di silice ed alluminio) si formano per cottura accanto alla calce anche il silicato bicalcico e l'alluminato monocalcico, composti che sono capaci di

indurire anche sotto acqua. Si era così, in sostanza, arrivati - sia pure inconsapevolmente - a produrre i primi rudimentali cementi moderni che debbono proprio alla presenza dei silicati ed alluminati di calcio le caratteristiche di alta resistenza meccanica e di idraulicità.

Occorrerà, tuttavia, ancora del tempo per arrivare ad una produzione razionale e scientifica delle calce idrauliche prima, e del cemento Portland dopo: occorrerà, cioè, l'avvento della rivoluzione industriale e soprattutto l'inizio della Chimica moderna con Lavoisier, verso la metà del secolo XVIII, per poter analizzare chimicamente le pietre con cui produrre per cottura i leganti e guidare razionalmente su scala industriale la produzione di un legante piuttosto che un altro.

Da un punto di vista pratico, pertanto, le malte idrauliche largamente adoperate a partire dalla metà del settecento, costituite da calce idraulica, acqua e sabbia non presentano - una volta indurite - significative differenze dalle malte idrauliche, sviluppate dai Romani, e costituite da calce aerea, acqua e pozzolana. Anche da un punto di vista chimico esistono forti somiglianze, giacché il prodotto che conferisce idraulicità, oltre che maggiore resistenza meccanica, è il già menzionato idrosilicato di calcio: esso può formarsi o per reazione della calce aerea con la pozzolana, o per idratazione del silicato e dell'alluminato che accompagnano la calce idraulica.

Le pietre

Le pietre usate nelle murature sono per lo più squadrate e relativamente grandi ("*saxum quadratum*", secondo Vitruvio), mentre le pietre, sotto forma di rottame, impiegate nelle murature in calcestruzzo sono di forma irregolare e

di dimensione relativamente piccola (non maggiore di una mano, secondo la definizione di Vitruvio) ed adatte a confezionare, sempre secondo Vitruvio, il "*saxum caementitium*" (cioè blocco fatto con rottame di pietre legate da calce ed acqua). Per quanto concerne il comportamento nel tempo delle pietre, le problematiche esistenti possono essere suddivise in:

- degrado per assorbimento di acqua (dall'ambiente o dalle fondazioni per risalita capillare) e successiva formazione di ghiaccio nei periodi invernali con conseguente azione delaminante e dirompente;

- degrado delle pietre per interazione con l'ambiente inquinante ed in particolare con l'anidride solforosa dei gas esausti provenienti dalla combustione (solfatazione);

- degrado per formazione delle cosiddette "croste nere" per accumulo e depositi di particelle incombuste sulla superficie solfatata delle pietre;

- degrado per interazione delle pietre con la malta ricca di alcali (già noto nella tecnologia del calcestruzzo come reazione alcali-aggregato), che verrà più avanti discusso esaminando il deterioramento delle murature: quest'ultimo meccanismo si verifica solo nelle murature che prevedono una malta di allettamento tra le pietre, mentre gli altri meccanismi sopra riportati coinvolgono anche i paramenti in pietra privi o quasi di malta di allettamento, come anche i monumenti lapidei esposti alle intemperie naturali.

I mattoni

I mattoni sono ottenuti per cottura di argilla, precedentemente saggomata ed essiccata. A causa della presenza di determinati minerali (soprattutto pirite) nelle materie prime, i mattoni possono contenere

alcuni sali (nitrati, cloruri, fosfati e, soprattutto, solfati) di metalli alcalini (sodio e potassio) ed alcalino-terrosi (calcio e magnesio) facilmente solubili in acqua. Per effetto della bagnatura (per esempio di acque piovane) e della successiva essiccazione, l'acqua può prima entrare all'interno del mattone e sciogliere i sali, trascinarli sulla superficie e qui depositarli. Se la superficie del mattone è a vista si notano le tipiche efflorescenze saline.

Per i mattoni i meccanismi di degrado più significativi concernono la presenza di sali solfatici, che possono interagire con la malta circostante, e di nuovo l'assorbimento d'acqua con successiva formazione di ghiaccio.

Il legno

Il legno è uno dei più antichi materiali da costruzione impiegati dall'uomo ed ha giuocato un ruolo determinante nella storia delle costruzioni. Anche negli edifici dove prevalgono le murature in pietre e mattoni, il legno è sempre stato comunque impiegato per gli infissi, le porte, le travi, ecc. Dove è stato adeguatamente protetto il legno è durato molti secoli.

Il legno naturale è costituito per circa due terzi in peso da acqua contenuta dentro e tra le fibre, formate da celle vuote ed allungate più o meno parallele alla direzione dell'asse del tronco dell'albero. Le celle delle fibre possono assorbire fino a circa il 30% di acqua (punto di saturazione delle fibre). Se il contenuto di acqua diventa inferiore al punto di saturazione le fibre si contraggono, soprattutto nella direzione tangenziale al tronco dell'albero, ed il materiale si ritira. Il contrario avviene (rigonfiamento) se il legno essiccato assorbe acqua fino a portare il contenuto di umidità oltre il punto di saturazione delle fibre. Le variazioni dimensionali

possono provocare sollecitazioni di trazione nella zona corticale con conseguenti fessure che possono anche coinvolgere tutta la sezione della struttura. La variazione di umidità oltre il punto di saturazione che coinvolge l'acqua contenuta tra le fibre, non provoca invece significative variazioni dimensionali. Un legno, essiccato naturalmente e protetto dalla pioggia, si porta in equilibrio con l'ambiente in modo da raggiungere da un minimo del 4% (zone aride) fino ad un massimo del 14% (zone tropicali) di umidità.

Il degrado "naturale" degli edifici storici: stato dell'arte nella ricerca

Se si esclude il danneggiamento traumatico, come quello provocato da incendi, guerre o terremoti, le principali cause di deterioramento "naturale" che hanno portato, nel corso dei secoli, ad un lento ma inesorabile degrado degli edifici storici sono connesse con l'interazione tra il materiale delle costruzioni e l'ambiente circostante [1].

Il principale responsabile di questa interazione degradante è l'acqua. L'acqua, infatti, giuoca un ruolo determinante in tutti i meccanismi di degrado dei materiali da costruzione in genere, e di quelli degli edifici storici in particolare. L'acqua può entrare nelle costruzioni, soprattutto nelle murature, dall'aria durante le piogge o dal terreno per risalita capillare. L'acqua può anche interagire con le strutture lignee innescando processi di degrado fisico, chimico e biologico.

Il degrado "naturale" delle murature

I meccanismi attraverso i quali l'acqua ha danneggiato le murature

degli edifici storici possono essere schematicamente suddivisi in fisici, chimici e biologici (Fig. 10).

Il più importante meccanismo fisico di degrado è la formazione del ghiaccio: quando la temperatura scende al di sotto di 0°C, l'acqua presente nei pori delle pietre, dei mattoni e delle malte congela con un aumento di volume di circa il 10%. Le escursioni termiche diurne e stagionali fanno avvenire ciclicamente il fenomeno del gelo e disgelo

dell'acqua, cosicché i materiali sono sottoposti ad una sollecitazione ripetuta che può provocarne la rottura a fatica.

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

Un altro meccanismo, anch'esso

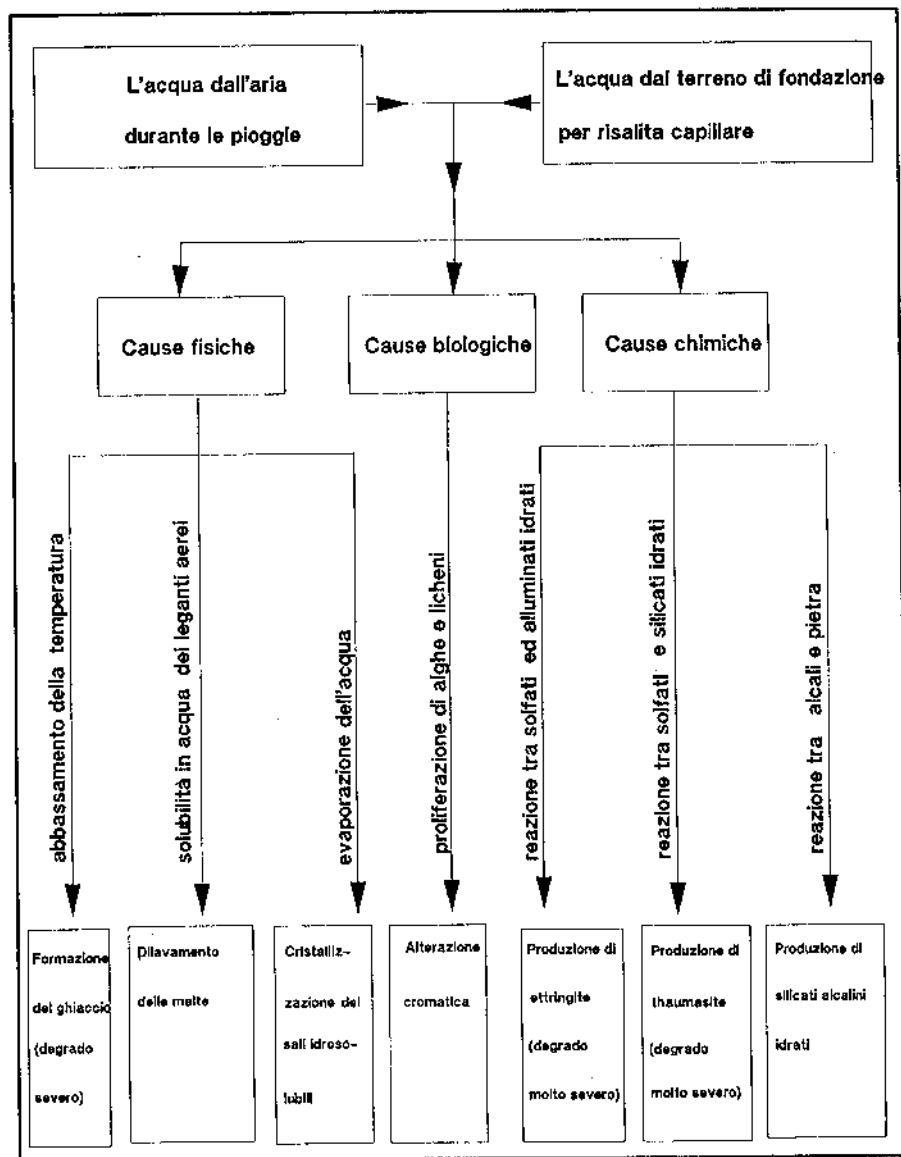


Fig. 10 - Cause di degrado biologiche, fisiche e chimiche provocate dalla presenza dell'acqua nelle strutture degli edifici storici.

di natura fisica, è legato alla presenza dei sali idrosolubili all'interno delle costruzioni. Ma di nuovo è l'acqua a promuovere il danneggiamento: con l'alternarsi delle stagioni asciutte a quelle umide o piovose, l'acqua fuoriesce dalle murature e vi rientra. Ma mentre l'acqua è in grado di evaporare, i sali si depositano all'interno dei pori dei materiali creando una pressione, detta di cristallizzazione. Questo tipo di degrado è sicuramente il meno grave di tutti, a meno che il sale non sia di un particolare tipo capace di reagire chimicamente con la malta come si vedrà più avanti.

Anche nei meccanismi di degrado chimico [2-5] l'acqua gioca un duplice ruolo di fondamentale importanza: innanzitutto l'acqua è uno dei componenti che partecipa alle reazioni chimiche che avvengono all'interno dei materiali provocandone il deterioramento; in secondo luogo l'acqua funge da *carrier* di un particolare sale (il solfato) trascinandolo da dove si trova originariamente verso gli altri componenti (alluminati e silicati idrati) con i quali reagisce chimicamente. L'alternarsi delle piogge con i periodi

di insolazione o di clima asciutto provoca un movimento dell'acqua all'interno dei materiali: il solfato, solubile in acqua, è così in grado di muoversi anch'esso e di raggiungere quei componenti con i quali può interagire provocando la formazione di due composti come l'ettringite e la thaumasite.

Paradossalmente, proprio le malte idrauliche (calce e pozzolana o calce idraulica) che hanno rappresentato, rispetto alle malte aeree (con calce o gesso), un notevole progresso tecnologico per la maggiore resistenza meccanica e per la maggiore resistenza all'azione dilavante dell'acqua piovana, si sono dimostrate più suscettibili all'azione del solfato. Infatti proprio le malte idrauliche, al contrario di quelle aeree, contengono gli alluminati ed i silicati di calcio idrati capaci di reagire con il solfato, in presenza di acqua, per produrre l'ettringite e la thaumasite (Fig. 11 e 12).

Sia l'ettringite, che la thaumasite sono dei prodotti terribilmente pericolosi allorché si formano all'interno dei materiali porosi, quali sono quelli che si trovano nelle murature degli edifici storici. Essi

sono in grado di provocare fessurazioni, rigonfiamenti, distacchi fino ad arrivare alla completa disintegrazione del materiale. Il fenomeno, per certi versi, molto simile alla formazione del ghiaccio che, avvenendo con aumento di volume, danneggia i materiali entro i cui pori l'acqua liquida è inizialmente contenuta. Anche la formazione di ettringite e thaumasite avviene con un aumento di volume, con la sola differenza che il fenomeno è legato ad una reazione chimica anziché ad una trasformazione fisica. L'effetto della formazione della thaumasite, in particolare, è così devastante da provocare la trasformazione della malta di allettamento o dell'intonaco in una poltiglia facilmente asportabile.

Un terzo meccanismo degradante di tipo chimico consiste nella reazione tra i sali alcalini (di sodio e potassio) con alcuni tipi di pietra (a base di silice amorfa) con formazione, in presenza di acqua, di sali a base di silicati idrati di sodio e potassio, anch'essi rigonfianti come l'ettringite e la thaumasite. Il fenomeno, che nel degrado degli edifici storici ha giocato un ruolo probabilmente meno determinante che

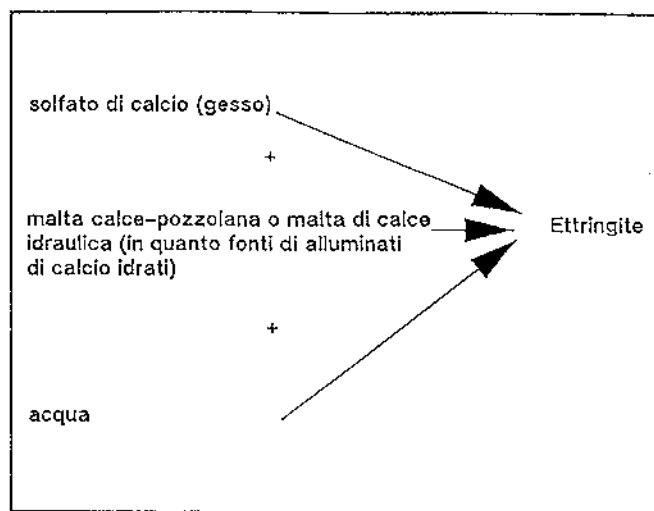


Fig. 11 - Processo schematico di produzione di ettringite nelle murature degli edifici storici.

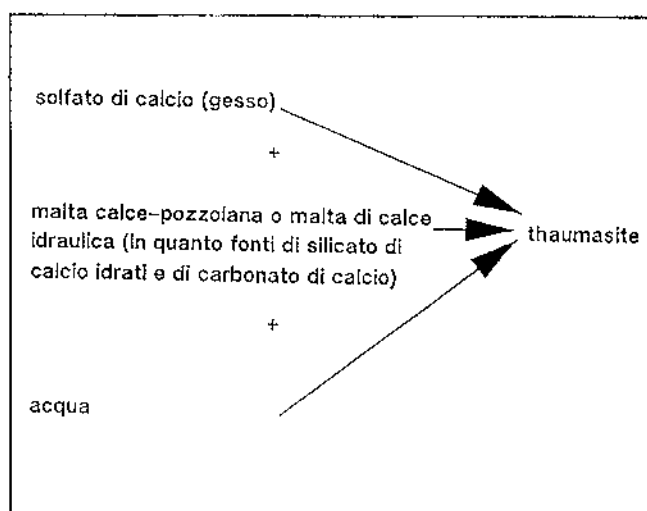


Fig. 12 - Processo schematico di produzione di thaumasite nelle murature degli edifici storici.

non gli altri due processi chimici legati alla presenza del solfato, va sotto il nome di reazione alcali-aggregato.

Per quanto concerne i meccanismi di degrado di tipo biologico, essi coinvolgono la formazione di alghe, licheni e funghi. Le alghe possono insediarsi sulla superficie degli intonaci umidi. Inizialmente assumono una colorazione verdastria che tende progressivamente al bruno e poi al nero fino a confondersi con le croste nere prodotte per solfatazione negli ambienti inquinati da SO_2 . 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, avanzali, ecc. (6). Per quanto non accettabili esteticamente, soprattutto laddove esse provocano indesiderate variazioni cromatiche della superficie, le alghe non provocano un'azione disgregante dell'intonaco.

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 origi-

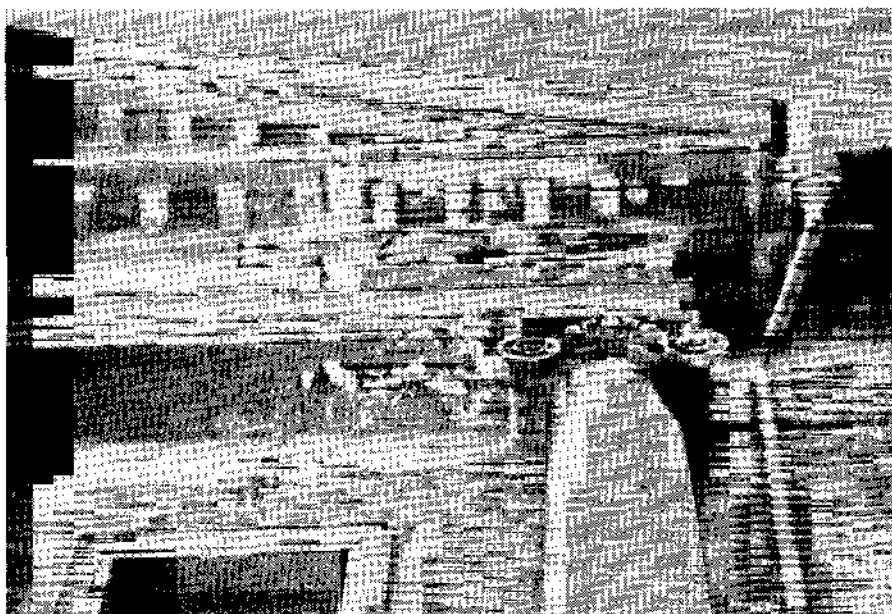


Fig. 13 - Intonaco cementizio (a destra) degradato per incompatibilità fisico-meccanica con la muratura sottostante e l'intonaco preesistente (in alto a sinistra).

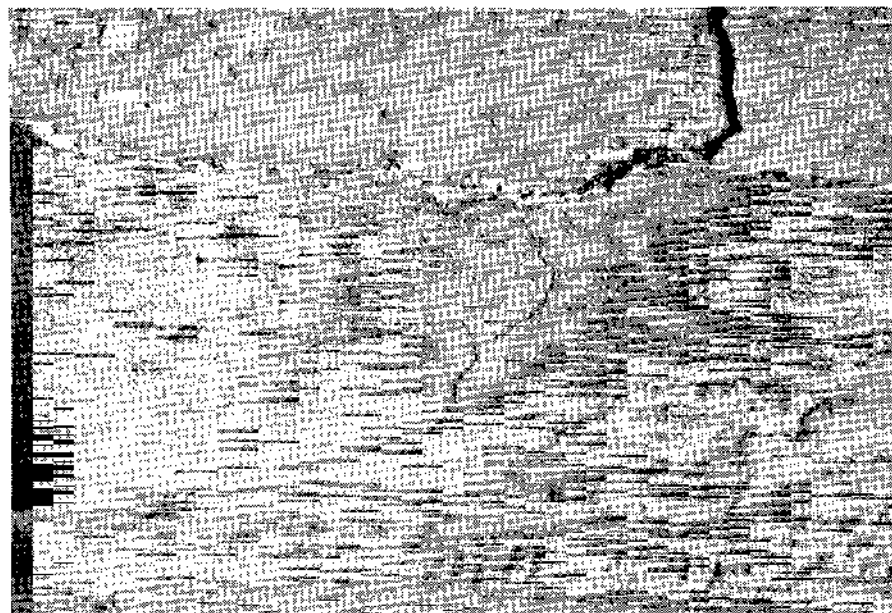


Fig. 14 - Edificio storico ad Ancona: formazione di croste nere sui paramenti in pietra di una muratura.

nariamente 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.

Il degrado "naturale" delle strutture in legno

Una eccessiva umidità è il fattore più frequente e determinante per compromettere le prestazioni in servizio del legno quale materiale

da costruzione: oltre ad un decadimento delle proprietà meccaniche ed alla variazione dimensionale delle strutture, l'ingresso dell'acqua nel legno crea le condizioni più favorevoli alla crescita ed all'attacco aggressivo da parte di funghi ed insetti. Soprattutto se il contenuto di acqua supera il punto di saturazione delle fibre, l'acqua libera presente tra le fibre favorisce la crescita di funghi, e se questa situazione si protrae per molto tempo si può arrivare al completo degrado del legno. Il processo di decadimento è ulteriormente accelerato dall'azione di alcuni insetti (soprattutto termiti) che prosperano nel legno umido o già degradato dalla crescita dei funghi.

Linee di ricerca da sviluppare sui materiali per il risanamento degli edifici storici

Nel recupero degli edifici storici danneggiati è di primaria importanza evitare che dentro le strutture, e le murature in particolare, vengano a trovarsi materiali rigidi, introdotti con il risanamento, accanto a quelli originali molto più duttili e deformabili. Una tale situazione comporterebbe una differente distribuzione degli sforzi per effetto di una stessa sollecitazione di origine meccanica o termica.

Occorre tener presente che i materiali originali delle murature degli edifici storici (malte, pietre e mattoni) sono solidi molto porosi. Ed è proprio la porosità che rende questi materiali da una parte meccanicamente deboli ed elasticamente deformabili, e dall'altra molto permeabili all'acqua e quindi vulnerabili dal degrado. I nuovi materiali leganti attualmente disponibili, invece, sono spesso poco permeabili all'acqua, meccanicamente forti ed elasticamente rigidi: per esempio, possono rientrare in

questa categoria le malte di cemento e le resine epossidiche. Un accoppiamento di questi materiali con quelli originali presenti nelle strutture degli edifici storici è quindi, in linea di massima, da evitare per incompatibilità che potremmo definire fisico-meccanica (Fig. 13).

D'altra parte, l'impiego di nuovi materiali porosi, meccanicamente deboli e deformabili, cioè simili a quelli impiegati originariamente (malte a base di calce o gesso), è accettabile solo per il risanamento di interni, ma non per le strutture esposte all'azione dilavante dell'acqua. Da questo punto di vista, le malte idrauliche (a base di calce e pozzolana, o di calce idraulica) rappresentano un miglior compromesso per conciliare la compatibilità fisico-meccanica con la resistenza all'azione dilavante dell'acqua piovana.

Tuttavia, tutti questi materiali - sia le malte aeree che quelle idrauliche - pur molto simili a quelli originariamente impiegati, lasciano irrisolti almeno due problemi che possono aver provocato il degrado naturale degli edifici storici e che potrebbero sussistere anche dopo il risanamento: a) la formazione del ghiaccio; b) l'interazione chimica con il solfato già esistente dentro i vecchi materiali o proveniente dall'ambiente.

Tenendo conto di questi problemi, appare molto interessante sviluppare una linea di ricerca per la messa a punto di una malta ideale da impiegare nel risanamento delle murature negli edifici storici e che deve soddisfare almeno i seguenti requisiti:

- elevata porosità per far evaporare l'acqua nella stagione asciutta;
- elevata duttilità e deformabilità;
- elevata resistenza al dilavamento dell'acqua piovana;
- elevata resistenza alla forma-

zione del ghiaccio;

- elevata resistenza chimica all'azione dei solfati.

Per quanto concerne quest'ultimo punto val la pena di precisare che esistono diverse ragioni per le quali si possono trovare dei sali solfatici dentro la muratura di un edificio storico: per esempio, il legante usato originariamente o impiegato in precedenti risanamenti può essere stato il gesso (solfato di calcio); oppure i mattoni utilizzati nella costruzione possono contenere il solfato sodico come principale componente delle tipiche efflorescenze saline; oppure il solfato, presente nel terreno di fondazione, può penetrare nella muratura insieme all'acqua in cui è disciolto, per effetto della risalita capillare; oppure ancora il solfato si forma dentro la muratura per interazione con l'aria sempre più inquinata e ricca di ossidi di zolfo (SO_2 e SO_3) provenienti dai gas esausti della combustione.

Come si vede, ce n'è abbastanza per temere che le murature degli edifici storici siano insidiate dalla presenza di questo terribile sale: ed è allora assolutamente necessario che il risanamento avvenga senza aggiungere alcun componente capace di interagire con il solfato aggravando ulteriormente il precario stato di salute delle antiche costruzioni.

Nelle moderne malte a base di cemento la resistenza chimica ai solfati viene conseguita fisicamente impiegando poca acqua e molto cemento, cioè con un basso rapporto acqua/cemento. Ciò si traduce in un materiale molto rigido e meccanicamente resistente, in quanto poco poroso, molto compatto e quindi impenetrabile fisicamente dall'acqua e dai solfati. Questa tecnologia non può, però, essere impiegata nel risanamento degli edifici storici laddove si ri-

chiede, come si è visto, una malta che deve essere porosa, deformabile e meccanicamente debole. In altre parole, la resistenza al solfato delle malte cementizie non è coniugabile con la porosità e con la compatibilità fisico-meccanica nei confronti delle vecchie strutture degli edifici storici. Occorre, invece, un legante idraulico che sia resistente ai solfati per la sua intrinseca insensibilità chimica anche con rapporti acqua/cemento elevati: solo in questo modo diventa possibile impiegare malte porose, deformabili e deboli come gli antichi materiali, ma anche resistenti all'azione dilavante dell'acqua piovana e soprattutto all'attacco chimico dei solfati. Solo un legante di questo tipo, ancorché moderno, è veramente compatibile con gli antichi materiali giacché li consolida e li protegge senza alterarli fisicamente o danneggiarli chimicamente.

Per quanto concerne il degrado provocato dalla formazione del ghiaccio, il problema può essere facilmente risolto mutuando dalla moderna tecnologia del calcestruzzo l'impiego di additivi capaci di sviluppare un sistema di microbolle d'aria nella malta: in presenza di un adeguato volume d'aria, infatti, vengono fortemente attenuate le tensioni insorte per la formazione di ghiaccio giacché il conseguente aumento di volume può essere "ospitato" appunto nelle microbolle d'aria. Così pure altre soluzioni innovative, derivanti dalla moderna tecnologia del calcestruzzo, possono essere felicemente trasferite nel risanamento delle murature negli edifici storici. Tra queste si possono citare l'impiego di aggiunte minerali capaci di rendere le malte facilmente applicabili in quanto fortemente adesive alle vecchie murature da risanare; oppure l'impiego di fibre polimeriche capaci di rendere le malte meno su-

scettibili alla fessurazione provocata dal rapido essiccamento quando si lavora in climi asciutti: entrambe queste soluzioni tecnologiche mirano a risolvere il problema di una corretta applicazione dei materiali pur con personale non più qualificato e attento come quello di una volta.

Per quanto concerne le murature in pietra a vista, occorre tener conto che una linea di ricerca specifica per questo settore dovrebbe tener presente una serie irrisolta di problemi quali quelli nel seguito elencati:

- protezione delle pietre porose dall'assorbimento d'acqua mediante trattamento con idrorepellenti che blocchino l'ingresso di acqua piovana ma che consentano nel contempo la fuoriuscita di quella interna proveniente dalla condensa o dalla risalita capillare: cioè consentirebbe la protezione della pietra dall'aggressione fisica provocata dalla pioggia con successiva formazione del ghiaccio, ma permetterebbe anche di smaltire il carico di umidità interno proveniente dalla condensazione e risalita capillare;

- protezione delle pietre dalle piogge acide ricche di anidride solforosa presente nei gas esausti della combustione mediante trattamenti protettivi "neutri" nei confronti del supporto lapideo per impedire la formazione delle "croste nere" (Fig. 14).

Per quanto attiene al legno le possibili linee di ricerca dovrebbero tener conto di tre fondamentali problematiche:

- prevenire l'ingresso di umidità;
- proteggere il legno dal degrado biologico;
- restaurare le strutture degradate.

I trattamenti per prevenire l'ingresso di umidità nelle strutture in legno possono coinvolgere sia il corretto posizionamento delle strutture in legno in relazione al-

l'ambiente circostante (terreno, aria esterna, interni) sia il trattamento preventivo con prodotti chimici per eliminare o ridurre l'ingresso dell'acqua.

I trattamenti per proteggere il legno dal degrado biologico (funghi ed insetti) già prevedono l'impiego di prodotti chimici (sodio fenilfenossido, pentacloro-fenossido, sali di arsenico, rame e cromo, ecc.). Tuttavia, il problema meriterebbe una maggiore attenzione sia per migliorare l'efficacia di questi prodotti attualmente non molto soddisfacenti, sia soprattutto per mettere a punto una corretta tecnologia applicativa per ottimizzare il rendimento della protezione.

Gli interventi di restauro del legno sono molto complessi ed includono: a) il "ringrosso" delle sezioni con altro legno laddove esistono problemi di carattere strutturale che, se non risolti in tempo, possono anche portare l'edificio al collasso; b) il restauro, anch'esso strutturale, di elementi lignei fessurati e che debbono essere risanati mediante placcatura con elementi metallici; c) il consolidamento di strutture in legno danneggiate dal degrado biologico mediante impregnazione con polimeri strutturali, compatibili con il legno stesso e con i prodotti di protezione contro funghi ed insetti.

Per concludere, i moderni materiali e le tecnologie innovative non necessariamente debbono essere bandite dagli interventi di risanamento degli edifici storici in genere, e delle murature in particolare, purché il loro impiego avvenga nel rispetto delle vecchie strutture e per il miglioramento della loro salvaguardia.

Bibliografia

[1] M. Collepari e L. Coppola, "Materiali negli Edifici Storici: De-

grado e Restauro", Ed. Enco, Spresiano, (1990).

[2] M. Collepardi, "Classificazione delle possibili tipologie delle murature degli edifici storici in base all'uso dei materiali originali", *L'Edilizia*, 9, 428-433, (1989).

[3] M. Collepardi, "Cause chimiche di degrado dei materiali originali nelle murature degli edifici storici", *L'Edilizia*, 10, 493-501 (1989).

[4] M. Collepardi, "Il Degrado Chimico causato dal Restauro delle Murature degli Edifici storici", 11, 575-584, (1989).

[5] M. Collepardi, "Degradation and restoration of masonry wall of historical buildings", *Materials and*

Structures, 23, 81-102, (1990).

[6] G. Torraca, "Atti di un conve-

gno sulle superfici architettoniche a Ferrara", *Ordine degli Ingegneri ed Architetti di Ferrara*, pg. 67, (1987).



Mario Collepardi

Dipartimento di Scienza dei Materiali e della Terra
Università di Ancona



Luigi Coppola

Enco, *Engineering Concrete*, Spresiano, (TV)