

# *Interventi di risanamento delle sponde murarie dei rii veneziani: aspetti chimico-fisici dei materiali*

di GUIDO DRIUSI

**L**e sponde murarie lungo i rii di Venezia fungono da interfaccia fra mare e terra e, in quanto tali, subiscono una serie di processi meccanici, fisici e chimici che per lo più comportano condizioni di degrado tanto della muratura nel suo insieme quanto dei singoli materiali costituenti.

Le cause dei meccanismi di alterazione più frequenti e importanti possono essere accorpate, in termini del tutto generali, in macrocategorie, tutte in qualche misura dipendenti dalla presenza dell'acqua marina.

Da questo punto di vista infatti è evidente che l'interazione fra acqua salata e materiali lapidei presenti, siano essi naturali come la pietra d'Istria o artificiali come i laterizi e le malte di allettamento, si esplica tanto in termini fisico-chimici e per certi versi biologici con l'alterazione della composizione e della microstruttura, quanto in quelli meccanici dovuti all'azione disgregatrice conseguente al moto ondoso e più in generale ai flussi mareali.

Le interazioni fra laguna e strutture murarie erano evidentemente già chiare, seppur empiricamente, alle maestranze dell'epoca che adottarono una serie di strategie esecutive proprio per cercare di ridurre tale impatto; strategie che andavano dalla realizzazione di una palificazione di fondazione, alla costituzione di murature continue e ben strutturate e che infine prevedevano molto spesso la presenza di corsi in pietra d'Istria con funzione di intercettazione della risalita capillare e dei fenomeni a essa connessi.

Il sistema delle sponde deve comunque aver richiesto azioni di manutenzione e/o rifacimento, ma ha retto sufficientemente per numerosi secoli ed ha subito un tracollo soprattutto in epoche abbastanza recenti, allorché l'aumentare del traffico acquatico – sia come numero di natanti sia come velocità degli stessi con conseguente incremento del moto ondoso, che risulta raddoppiato negli ultimi trent'anni<sup>1</sup> – e, almeno in parte, l'aumentata frequenza delle alte maree eccezionali<sup>2</sup> hanno sostanzialmente modificato le condizioni al

contorno, allontanandole molto da quelle per le quali le sponde erano state inizialmente pensate.

## ***Stato di fatto***

In termini generali il profilo delle sponde murarie può essere distinto in tre aree diverse, cui corrispondono processi di alterazione propri, in funzione della differente esposizione all'acqua dei canali:

### ***a) una prima zona, quella inferiore, che è sostanzialmente sempre immersa***

In tale zona la continua presenza dell'acqua dei canali crea evidentemente le condizioni affinché le frazioni meno stabili (o meglio più solubili e/o sensibili alla presenza di sali disciolti nell'acqua di mare) possano in qualche maniera perdere le loro capacità adesive e coesive.

La costante presenza di acqua per contro impedisce la concentrazione dei sali e il loro successivo accumulo, evitando l'innescarsi dei processi di alterazione dovuti alla cristallizzazione degli stessi. In questa zona i meccanismi di degrado avvengono perciò prevalentemente ai danni della malta di allettamento e di stilatura dei giunti fra i laterizi, mentre questi ultimi subiscono modeste o nulle alterazioni microstrutturali ma essendo slegati dalla muratura possono facilmente cadere o venire asportati. Solo raramente infatti si rilevano situazioni di disgregazione a carico dei laterizi e in questi limitati casi ciò dipende da una scadente qualità degli stessi.

### ***b) una fascia intermedia che viene in contatto diretto con l'acqua in modo più o meno ciclico, corrispondendo grosso modo alla zona interessata dalle oscillazioni di marea***

La presenza discontinua di acqua in fase liquida nella fascia intertidale implica che, oltre ai già descritti fenomeni di dissoluzione, possano avvenire una serie di processi di cristallizzazione dei sali con inevitabili ripercussioni sulla tessitura e sulla microstruttura dei materiali presenti. In quest'area sono inoltre particolarmente intense le azioni meccaniche della ondità e degli urti da parte dei natanti.

c) *la zona superiore che tendenzialmente non entra in contatto diretto con l'acqua dei canali*  
 Quest'area è sottoposta principalmente agli effetti legati alla risalita capillare e ai conseguenti fenomeni di degrado, peraltro abbastanza noti<sup>3</sup>.

Per quello che riguarda la fascia sommersa e quella intertidale delle murature di sponda lungo i rii veneziani la manifestazione che appare più evidente e frequente è comunque l'assenza in molte zone delle malte di allettamento cui consegue la perdita di continuità della tessitura muraria (fig. 1).

Tale comportamento trova la sua giustificazione nella circostanza che l'azione dell'acqua di mare, e in particolare degli ioni  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  nonché dell'anidride carbonica, si esplica più attivamente sui composti di natura carbonatica (tipicamente presenti nella matrice legante delle malte) che su quelli silicatici prevalenti nei laterizi (almeno sui laterizi ben cotti e di buona qualità).

La presenza degli ioni testé citati rende infatti possibile l'innescarsi di una serie complessa di reazioni chimiche che portano alla trasformazione del carbonato di calcio in prodotti a maggiore solubilità e quindi più facilmente dilavabili. Da questo punto di vista vanno sottolineate due condizioni particolari che in qualche misura concorrono ad aggravare la situazione.



Fig. 1 - Esempio di degrado della tessitura muraria

La prima è che la solubilità del carbonato di calcio in acqua – normalmente abbastanza ridotta (circa 14 mg/l)<sup>4</sup> – diventa decisamente più elevata allorché nell'acqua siano disciolte significative quantità di alcuni ioni quali  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , condizione questa tipicamente presente nell'acqua di mare.

La seconda è che, nonostante in molti riferimenti bibliografici sia citata la presenza di componenti con proprietà idrauliche come ad esempio la "calce negra"<sup>5</sup> negli impasti utilizzati originariamente, gran parte delle malte attualmente sono invece risultate essere di natura prevalentemente aerea con apporti

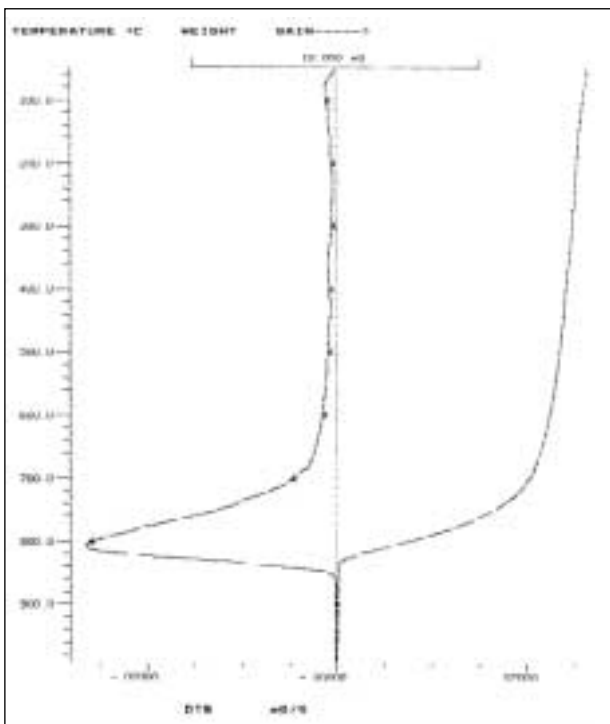


Fig. 2 - Analisi termogravimetrica campione BG 30 legante aereo

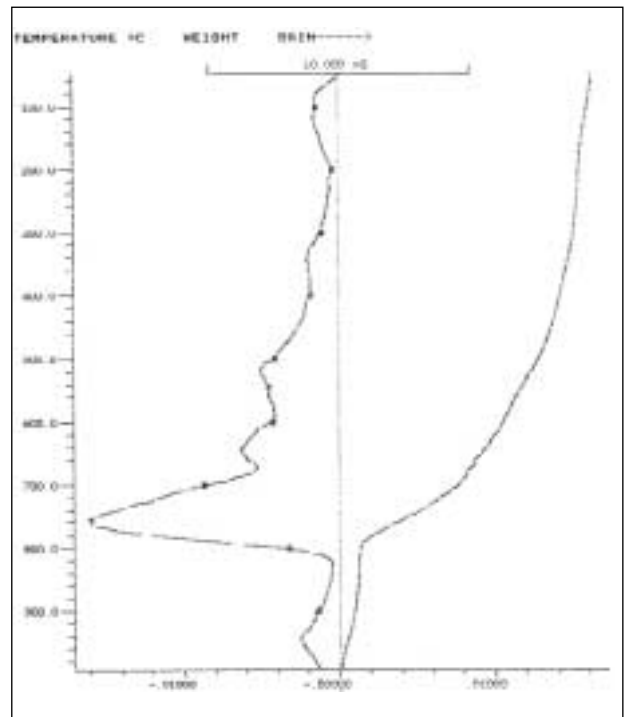


Fig. 3 - Analisi termogravimetrica campione C 19 legante misto con componenti anche idraulici

molto ridotti e non costanti di materiali a comportamento debolmente idraulico<sup>6</sup>.

Per quanto riguarda la natura dei leganti presenti nelle malte di allettamento, le indagini condotte su numerosi campioni prelevati da murature di sponda indicano infatti, almeno nelle aree non soggette a rimaneggiamenti molto recenti, la prevalenza di leganti a natura carbonatica (soprattutto di calcio ma talvolta anche di magnesio) mentre gli apporti di composti riconducibili ai silicoalluminati o a frazioni in qualche misura idrauliche risultano solo occasionali (figg. 2-3).

La natura prevalentemente aerea delle malte rende queste ultime più sensibili all'azione dell'acqua; azione che comporta una serie di processi di degrado inevitabilmente sinergici.

Le malte infatti inizialmente tendono a perdere gran parte della loro iniziale coesione, risultando (laddove ancora presenti) particolarmente inconsistenti. La contemporanea trasformazione del carbonato originario in prodotti a maggiore solubilità, consente poi la dissoluzione di quest'ultimo e il suo trasporto da parte dell'acqua. Il sistema di allettamento quindi va via via impoverendosi e aumentando la sua porosità, facilitando sempre più l'accesso da parte dell'acqua con un incremento della cinetica del degrado.

La presenza infatti di fenomeni di trasporto – legati al normale andamento delle maree, al moto ondoso e alla presenza di differenze momentanee di pressione fra la superficie verso il canale e quella verso l'interno – può a questo punto provocare l'allontanamento non solo dei prodotti di alterazione, ma anche di parte dell'aggregato, che ormai risulta privo di adeguata coesione.

L'effetto complessivo nella fascia sommersa, e localmente anche in quella intertidale, è pertanto caratterizzato soprattutto dall'assenza, in porzioni più o meno ampie, della malta di allettamento con la conseguente disarticolazione della tessitura muraria e il distacco dei laterizi dalla cortina muraria.

Il fenomeno interessa con maggiore evidenza, come chiaramente rilevabile soprattutto in occasione della messa in secco dei rii, lo spessore corrispondente al primo corso di mattoni, ove evidentemente gli scambi fra acqua e malta sono maggiori e più efficaci, ma non per questo è assente negli spessori più interni (fig. 4).

Anche in tali sezioni di muratura infatti vi è l'azione di dissoluzione esercitata dall'acqua di mare che, attraverso discontinuità nella tessitura muraria o sfruttando particolari condizioni di debolezza del



*Fig. 4 - Particolare della mancanza di allettamento nello spessore interno*

materiale, può provocare l'instaurarsi di vie preferenziali di scorrimento e quindi la formazione di cavità all'interno della muratura anche in zone in cui sulla superficie non siano rilevabili particolari condizioni di degrado.

Nelle parti più basse, soprattutto sulle sponde prospicienti canali con consistente traffico e/o ad elevati flussi mareali, tale condizione diviene particolarmente pesante e si può arrivare alla perdita pressoché totale del sistema di allettamento. A titolo di esempio si riportano i risultati ottenuti dalla stima dei vuoti realizzata su alcune carote prelevate dalle sponde di canali caratterizzati da elevata circolazione di acqua sia in termini di marea che di traffico, dai quali appare evidente come a profondità superiori ai 150 cm dal selciato soprastante, la perdita di materiale sia consistente e porti alla formazione di discontinuità (o meglio cavità) rilevanti sia come dimensioni che come estensione.

Anche in questo caso comunque è possibile rilevare una certa differenziazione di comportamento in funzione della natura dei leganti utilizzati: laddove siano presenti impasti con più spiccate proprietà idrauliche le lacune, seppur sempre presenti, risultano leggermente più contenute (fig. 5). L'azione dell'acqua ai danni delle malte è influenzata, oltre che dalla natura chimica delle stesse, anche da alcuni parametri fisici e microstrutturali degli impasti originari. Gran parte delle malte hanno messo in evidenza infatti come la distribuzione granulometrica degli aggregati sia sostanzialmente riconducibile all'uso di sabbie a dimensioni molto piccole.

Nel grafico di fig. 6 sono riportate le distribuzioni

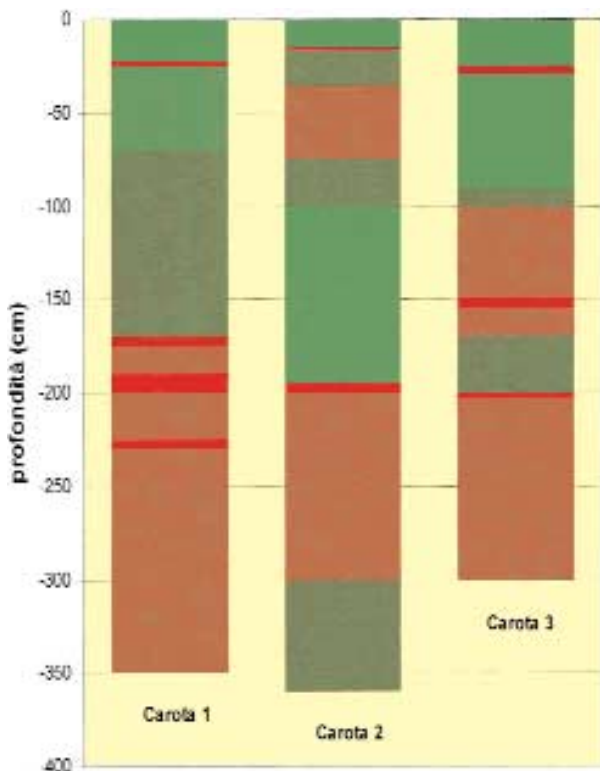


Fig. 5 - Distribuzione delle cavità su carote verticali (dal verde al rosso si passa da condizioni di integrità alla presenza di lacune via via più grandi)

medie rilevate in campioni di malta di allettamento prelevati in occasione dei lavori di scavo e manutenzione dei rii di San Severo e della Pietà. L'indicazione più evidente riguarda la circostanza che - ben lungi da avere distribuzioni granulometriche in linea col quella ideale ipotizzata da Fuller<sup>7</sup> per avere una ottimale costipazione con il minor volume di vuoti possibile, e ancora più distanti da quelle indicate dal Dm 180/68 - le sabbie

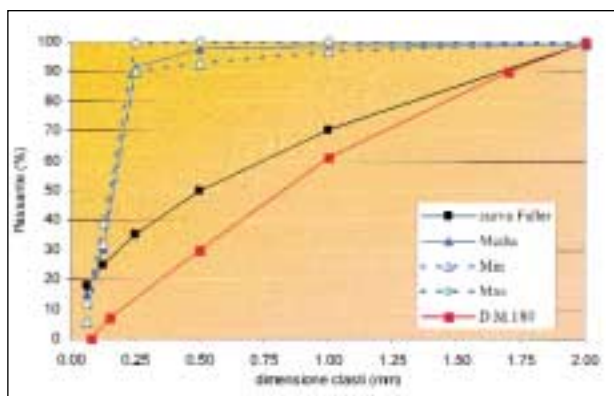


Fig. 6 - Distribuzione granulometrica delle malte in confronto alla curva dell'inerte ideale di Fuller e delle indicazioni del Dm 180/68

presenti sono costituite da granuli aventi dimensioni sostanzialmente inferiori ai 0,25 mm, con frequenze massime addirittura attorno agli 0,125 mm. Tale situazione evidentemente non solo non rappresenta una condizione ottimale per quanto concerne la microstruttura e il necessario rapporto legante/inerte, ma complica ancor più i meccanismi di circolazione dell'acqua all'interno della malta. Il ricorso ad aggregati particolarmente fini, infatti, comporta un consistente aumento della loro superficie specifica e richiederebbe un incremento della quantità di legante per consentire il completo rivestimento dei singoli granuli, condizione questa non sempre rispettata anche in relazione ai conseguenti fenomeni di ritiro che si potrebbero avere in fase di presa con un eccesso di legante. Anche la capacità di assorbimento di acqua viene incrementata, in impasti di tipo aereo, dall'uso di sabbie a granulometria ridotta. Vi sono infatti in tal senso evidenze scientifiche<sup>8</sup> che indicano (fig. 7) come, a parità di altri parametri, l'eliminazione da una sabbia delle frazioni inferiori a 0,5 mm induce, nella malta realizzata con quest'ultima, un incremento sensibile nella quantità di acqua assorbita.

In definitiva quindi vi sono anche caratteristiche intrinseche degli impasti originari che facilitano l'interazione fra l'acqua di mare e il materiale. Complessivamente comunque sulla base di numerose indagini eseguite su campioni di muratura provenienti da sponde murarie è possibile osservare che anche laddove l'azione dilavante non è particolarmente accentuata e non si arriva all'asportazione della frazione legante, i processi di alterazione provocano tuttavia una certa decoesione dei sistemi di allettamento. Spesso infatti le malte risultano scarsamente o per nulla aderenti ai laterizi

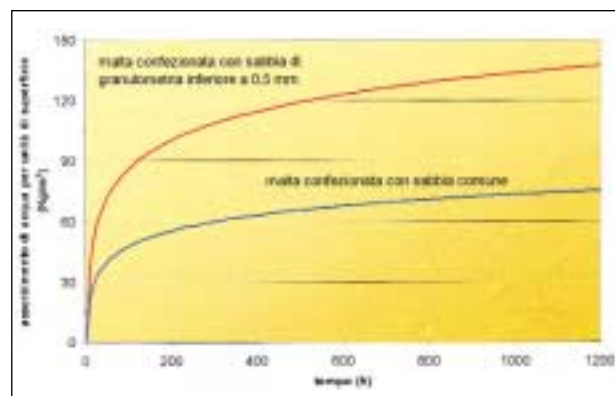


Fig. 7 - Assorbimento capillare in funzione della granulometria degli aggregati



e la loro residua presenza è dovuta solo all'effetto di "confinamento fisico" dovuto alla orditura dei mattoni (fig. 8).

Da questo punto di vista le indagini mettono in evidenza che in tali condizioni l'alterazione conseguente ai processi di dissoluzione comporta generalmente un'azione ai danni della porosità dei sistemi.

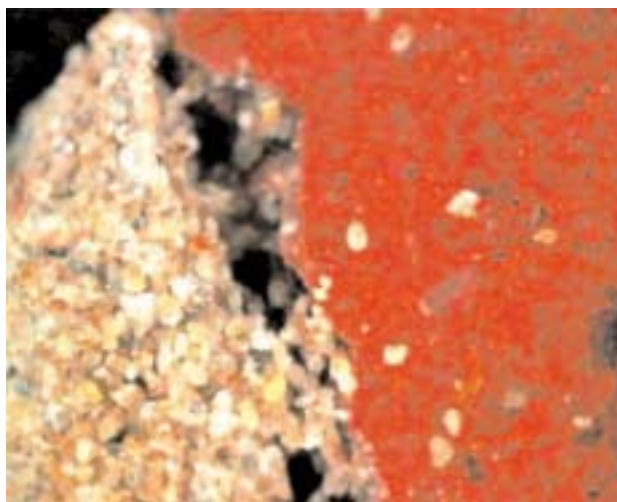


Fig. 8 - Osservazioni in microscopia: perdita di adesione fra malta e laterizio

In particolare in molti campioni esaminati si rileva che la perdita di coesione avviene prima ancora che si abbia un grande incremento della porosità totale. Come si può rilevare dai due diagrammi di fig. 9, relativi rispettivamente a una malta in condizioni tutto sommato ancora sufficienti (fig. 9a) e a un campione della stessa malta ma prelevato in area più degradata (fig. 9b), la porosità totale – o meglio il volume cumulativo, ossia la sommatoria dei vuoti presenti – non risulta drasticamente diversa attestandosi in entrambe i casi attorno ai 250 mm<sup>3</sup>/g (cfr. curve continue).

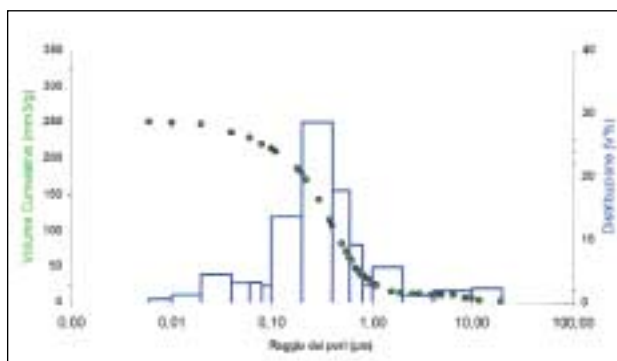


Fig. 9a - Curve porosimetriche campione 48 a

Passando però alla valutazione della distribuzione della porosità, ossia alla verifica di quali siano i diametri dei pori più frequenti, si può rilevare come mentre nella frazione di malta meno degradata la porosità sia attribuibile principalmente ai pori aventi raggio compreso tra 0,1-0,6 µm (che da soli costituiscono oltre il 65% della porosità totale), nel campione più degradato non vi sia più una netta prevalenza di questi pori ma soprattutto si registra un sensibile incremento percentuale di pori a piccolo e piccolissimo raggio (tra 0,006 e 0,08 µm). Tutto ciò indica da un lato che l'azione aggressiva dell'acqua dei canali si traduce inizialmente nella formazione di una serie di micropori e, dall'altro, che sono sufficienti variazioni di porosità tutto sommato abbastanza modeste per passare da uno stato di conservazione ancora sufficiente a una condizione di evidente degrado.

Tale situazione dovuta principalmente a meccanismi di dissoluzione viene decisamente incrementata nella fascia intertidale dai processi ciclici di cristallizzazione e ridissoluzione dei sali solubili presenti nell'acqua marina.

Non sempre però la situazione è così evidente e univoca.

Spesso infatti a seguito della presenza di sottopressioni pulsanti si registra, soprattutto nella fascia sommersa, la sostituzione di parte delle malte con fango proveniente dal terreno retrostante le sponde. Tale condizione è particolarmente insidiosa: infatti da un lato l'apparente assenza di vuoti potrebbe indurre a ritenere lo stato di conservazione ancora sufficiente e dall'altro pone seri problemi sulle modalità di intervento e risanamento.

### Metodologie di intervento

In relazione a una tale situazione, appare evidente come gli interventi rivolti alla conservazione e al

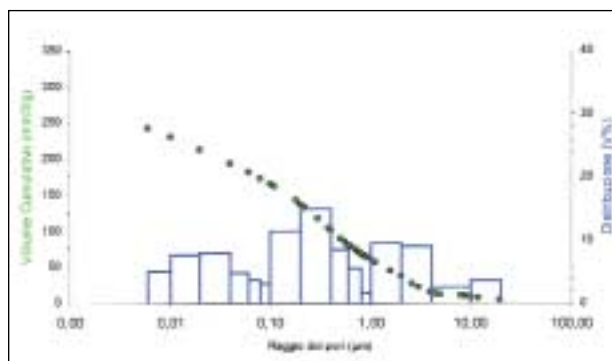


Fig. 9b - Curve porosimetriche campione 82

ripristino delle sponde murarie siano operazioni decisamente complesse che richiedono un'adeguata progettazione e una ancor più calibrata esecuzione, tanto per quanto riguarda le possibili metodologie quanto per i materiali utilizzabili.

Tralasciando, almeno in questa sede, gli interventi più "pesanti" che prevedono il rifacimento complessivo di porzioni più o meno ampie di muratura, per i quali oltre agli aspetti più propriamente materici vi sono anche innegabili e non semplici problematiche culturali relative alla *querelle* conservazione-rifacimento, diviene gioco forza pensare a una serie di interventi manutentivi che sinergicamente possano comunque consentire un adeguato ripristino delle funzionalità complessive del sistema "sponde murarie" con una buona prospettiva di durabilità.

Da questo punto di vista il nodo focale, anche se certamente non l'unico, dell'operazione è certamente finalizzato alla ricostituzione di una sufficiente continuità della tessitura muraria.

Operazione questa che viene per lo più realizzata ricorrendo al riempimento delle cavità venutesi a formare con impasti più o meno fluidi inseriti mediante iniezione.

La tecnica delle iniezioni per il consolidamento di murature viene spesso praticata negli interventi di restauro di edifici storici ma il particolare insieme costituito dall'ambiente lagunare, in cui le sponde sono inserite, introduce una serie di problematiche che richiedono un'accurata messa a punto dell'intera operazione.

In particolare gli aspetti sicuramente più significativi e che maggiormente diversificano l'intervento sulle sponde da quello su murature tradizionali in ambiente terrestre sono da un lato l'impossibilità di rimuovere completamente l'acqua e, dall'altro, la frequente presenza di fango e/o frazioni limose e argillose che hanno rimpiazzato parte delle malte dilavate.

Per quanto i canali nel corso dell'intervento vengano messi in "asciutto" mediante cassetture e palancolati, dai quali un sistema di pompe provvede all'allontanamento dell'acqua, le strutture murarie continuano per lo più a essere ancora interessate dalla presenza di acqua residua che percola dal terreno circostante. In generale si tratta di acqua salata che migra dalle zone non a secco e, in parte, acqua di origine meteorica che scorre attraverso percorsi preferenziali o che proviene da perdite della rete di sottoservizi.

In questo contesto evidentemente i meccanismi di

indurimento e presa dei prodotti utilizzati per l'iniezione sono influenzati non solo dall'eccesso di acqua ma anche dalla natura dei sali in essa disciolti.

Impasti in cui la fase legante fosse costituita da sola calce si troverebbero infatti nell'impossibilità di carbonatarsi e quindi di indurirsi. In tale situazione infatti la malta tende a rimanere per lungo tempo allo stato pastoso e può essere abbastanza facilmente dilavata allorché il canale o rio venga riaperto ai flussi della laguna.

Il ricorso a sistemi con proprietà idrauliche quindi sembra divenire obbligatorio. Prodotti però di natura semplicemente cementizia non risultano completamente soddisfacenti sia sotto l'aspetto chimico-fisico che per quanto riguarda le proprietà meccaniche complessive e in particolar modo sotto l'aspetto legato alla scarsa elasticità di tali prodotti. Recentemente sono state sviluppate nuove generazioni di leganti in cui l'idraulicità non è legata alla presenza di cemento tradizionale bensì di prodotti che per comportamento sono più simili alle calce idrauliche, con spiccate caratteristiche di pozzolanicità. Si tratta per lo più di materiali in cui la capacità idraulica viene raggiunta ricorrendo a prodotti quali la silice attiva o sistemi zeolitizzati che, attraverso la reazione con calce, danno luogo a composti con proprietà leganti affini ai silicati idrati di calcio. La microsilice, ad esempio,<sup>9-10</sup> in virtù delle sue dimensioni estremamente piccole (dell'ordine dei  $\mu$ ) e della elevatissima superficie specifica, reagendo con la calce dà origine a un gran numero di piccoli cristalli che incrementano notevolmente le proprietà della microstruttura dell'impasto, soprattutto in termini di aumento della resistenza e riduzione della porosità. Tutto ciò comporta un notevole incremento della durabilità di questi sistemi all'azione dell'acqua di mare.

Oltre a un comportamento idraulico e alla minore sensibilità al dilavamento, questi prodotti innovativi presentano, almeno dal punto di vista teorico, una serie di altri innegabili vantaggi.

In particolare sono leganti che si prestano bene a una variabilità di formulazioni, nel senso che è possibile, ad esempio, spaziare in un ambito abbastanza ampio di moduli elastici.

Questa caratteristica elimina alcune delle perplessità spesso sollevate a riguardo dell'incompatibilità che può venirsi a creare introducendo in un sistema tutto sommato elastico, come quello delle murature veneziane, un elemento a elevata rigidità quale gli impasti cementizi.

Sempre nell'ambito delle possibilità formulative quasi tutti i prodotti da iniezione di nuova generazione possiedono una tixotropia decisamente più elevata delle boiacche di natura inorganica (ad esclusione quindi delle resine) utilizzate precedentemente.

L'aspetto legato alla tixotropia è notevolmente importante per ciò che riguarda la buona riuscita dell'intervento.

Come già detto infatti le murature di sponda sono caratterizzate dalla presenza di aree di maggiore o minore estensione in cui gli impasti di allettamento risultano assenti (con lacune e vuoti quindi di dimensioni centimetriche o maggiori); accanto a queste vi sono poi aree in cui la malta è solo parzialmente assente e nelle quali perciò i vuoti sono di dimensioni millimetriche; infine dove la decoesione è appena iniziata le dimensioni delle discontinuità risultano sub-millimetriche.

Gli impasti attualmente disponibili sul mercato sono accuratamente selezionati dal punto di vista dimensionale e presentano una finezza decisamente elevata (circa l'80% del materiale infatti ha dimensioni inferiori ai 20  $\mu\text{m}$ ) e gli sviluppi tecnologici attualmente in corso lasciano già intravedere la possibilità di ricorrere a materiali sub-micronizzati.

Tutto ciò permette fin d'ora di produrre miscele da iniezione a buona fluidità, atte cioè a penetrare abbastanza bene nelle discontinuità di dimensioni almeno millimetriche pur essendo iniettate con pressioni di esercizio contenute.

Il problema che si potrebbe porre è invece opposto, nel senso che impasti a dimensione sufficientemente ridotta ed elevata fluidità, per poter passare attraverso discontinuità piccole, potrebbero scorrere troppo nelle cavità grandi al punto da fuoriuscire attraverso vie preferenziali senza riuscire a saturare i vuoti.

La necessità quindi è di avere materiali che abbiano comportamento diversificato in relazione alla pressione di iniezione utilizzata: che siano fluidi sotto l'azione di una modesta pressione e che diventino viscosi non appena la pressione diminuisce.

Solo così infatti la miscela riesce a percolare nelle discontinuità piccole e contemporaneamente a riempire "ispessendosi" quelle maggiori senza fuoriuscirne subito.

I prodotti utilizzati nel corso dei recenti interventi



Fig. 10 - Macrofotografia dell'adesione fra malta di iniezione e laterizio

sulle murature dei rii appartengono sostanzialmente a questa tipologia e i risultati ottenuti sono decisamente promettenti.

Carote di controllo prelevate dopo il ciclo di iniezioni (fig. 10) confermano l'avvenuta saturazione delle cavità presenti e quindi la ricostituzione di una tessitura sufficientemente regolare; anche l'adesione fra le nuove malte e il materiale preesistente (sia vecchie malte che laterizi) risulta buona anche se, sotto questo profilo, è necessario segnalare che la bontà dell'adesione non dipende solo dalla qualità dei prodotti utilizzati ma anche dalla accuratezza delle lavorazioni.

In tal senso infatti a causa della presenza, spesso rilevante, di fango o altro materiale incoerente estraneo, per garantire una adeguata adesione è fondamentale una prolungata ed effettiva pulitura delle zone interessate, da realizzare mediante un preliminare lavaggio con acqua attraverso i fori di iniezione.

Un ultimo aspetto che riguarda l'innovazione di questi prodotti è relativa agli sviluppi tecnologici che i produttori stanno apportando soprattutto nel formulare composti con proprietà *anti wash out*. Come è già stato sottolineato infatti per quanto i canali vengano posti in asciutto, nelle murature vi è comunque spesso un eccesso di acqua che continua a ruscellare. Il tentativo, in parte già riuscito, è quello di proporre impasti che non risentano di tale eccesso di acqua, cioè che non vengano dilavati già prima della presa eliminando quindi eventuali problemi di dispersione e di *bleeding*.

<sup>1</sup> F. Fiorin, F. Carrera, *L'evoluzione del sistema dei trasporti e del traffico acqueo*, in *Venezia la città dei rii* a cura di G. Caniato, F. Carrera, V. Giannotti, P. Pypaert, Cierre Edizioni UNESCO - Insula Spa, Verona 1999, pp. 153-159.

<sup>2</sup> P. Canestrelli, *Le problematiche legate alle alte maree e al moto ondoso*, in *Venezia la città dei rii*, cit., pp. 183-193.

<sup>3</sup> A. Bakolas, G. Biscontin, E. Zendri, *The effect of sea tides on historical brickwork in Venice*, in "Materials and Structures", 27, 1994, pp. 353-358.

<sup>4</sup> *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press.

<sup>5</sup> V. Fontana, *Appunti sulle malte e i mattoni in uso nei cantieri veneziani nel Cinquecento da documenti e trattati d'epoca*, in *Il Mattone a Venezia*, atti del congresso, Fondazione Cini 22-23 ottobre 1979, a cura del Laboratorio per lo studio della dinamica delle grandi masse del CNR e dell'Università di Venezia, Venezia 1979, pp. 39-52.

<sup>6</sup> I. Turlon, C. Modena, G. Driussi, G. Biscontin, *Le malte nelle sponde*, in *Venezia la città dei rii*, cit., pp. 137-139.

<sup>7</sup> N. Fuller, S.E. Thompson, *Trans Asce*, 59, 1907.

<sup>8</sup> D. Hoffmann, K. Niesel, *Quantifying the effect of air pollutants on rendering and also moisture-transport phenomena in masonry including its constituents*, in [www.bam.de/service/publikationen/virtuelles\\_buch/transport.html](http://www.bam.de/service/publikationen/virtuelles_buch/transport.html), 26/06/2001 Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung.

<sup>9</sup> H.S. Pietersen, *Reactivity of Fly Ash and Slag in Cement*, Thesis, Delft University of Technology, Delft 1993.

<sup>10</sup> J. Bijen, H. Pietersen, *Mineral Admixtures: Reactions, Micro-Structure and Macro-Properties* in, "Advances in Cement and Concrete", Proc. Eng. Found. Conf., July, 24-29, 1994.



*Manutenzione delle sponde in rio del Piombo, giugno 1999*