

IL RECUPERO DELLE STRUTTURE MURARIE: PROBLEMI E PROPOSTE

Maria Rosa Valluzzi

PROBLEMI GENERALI E APPROCCIO AL CONSOLIDAMENTO

Il patrimonio storico nazionale, appartenente sia all'edilizia storica monumentale che a quella locale abitativa dei piccoli e medi centri urbani presenti in molte regioni a rischio sismico, è largamente costituito da costruzioni in muratura di pietra o mattoni.

Indagini diagnostiche sugli edifici esistenti rivelano frequenti situazioni di degrado fisico-meccanico dei materiali costituenti e strutturale dei manufatti, dovuto a eventi sismici, vetustà, aggressione ambientale ed interventi antropici, che richiamano la forte necessità d'interventi di tutela mirata.

L'argomento è caratterizzato da forti carenze a livello normativo, sia a livello nazionale che internazionale, che implicano di fatto un uso pressoché indiscriminato degli interventi, in assenza di criteri di progetto e di procedure di esecuzione e per il controllo dell'efficacia. Tale situazione diviene particolarmente complessa per le murature, contraddistinte da varietà tipologiche e costitutive estremamente diversificate, sia storicamente (epoche costruttive) che geograficamente sul territorio. La scelta dell'intervento "più appropriato", ossia l'individuazione della giusta combinazione tecnica-materiali per il consolidamento è, quindi, strettamente legata alla muratura oggetto del consolidamento. Ciò implica una attenta conoscenza del supporto (morfologia, tipologia, materiali) e del suo comportamento meccanico (problema strutturale specifico) e di adeguati studi sui materiali di apporto, al fine di migliorare le condizioni del manufatto (ripristino delle condizioni di sicurezza, incremento della capacità portante, protezione dal degrado, etc.) con garanzia di sufficiente durabilità.

In mancanza di tali elementi in fase di progetto, e nella possibile concomitanza di difetti di esecuzione, un intervento può risultare infatti inefficace, o addirittura deleterio per le costruzioni esistenti.

Il moderno approccio, riconosciuto anche dall'ultima normativa sismica (mediante l'introduzione del concetto di "miglioramento", accanto a quello di "adeguamento") e confortato anche da recenti osservazioni sul campo (es. sisma Umbria-Marche 1997), pone particolare riguardo al mantenimento dell'identità del manufatto, al fine di alterare il meno possibile il suo comportamento originario.

- **D.M. 3 Marzo 1975:** "Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche".
- **Legge Regionale 20 Giugno 1977, n.30:** "Documentazione tecnica per la progettazione e direzione delle opere di riparazione degli edifici" D. T. n. 2 (Nov. 1977): "Raccomandazioni per la riparazione strutturale degli edifici in muratura".
- **D.M.LL.PP. 2 Luglio 1981:** "Normativa per la riparazione ed il rafforzamento degli edifici danneggiati dal sisma nelle regioni Basilicata, Campania e Puglia"
- **Circolare M.LL.PP. 30 Luglio 1981 n ° 21745:** "Istruzioni relative alla normativa tecnica per la riparazione ed il rafforzamento degli edifici in muratura danneggiati dal sisma".
- **D.M.LL.PP. 20 Novembre 1987:** "Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento"
- **Circolare M.LL.PP. 4 Gennaio 1989, n ° 30787:** "Istruzioni in merito alle norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento"
- **D.M.LL.PP. 16 Gennaio 1996:** "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche"

ADEGUAMENTO

complesso di opere che rendano l'edificio atto a resistere alle azioni sismiche (adottando l'aumento di resistenza e/o la riduzione degli effetti dell'azione sismica), tale che costituisca con l'intervento di riparazione un'unica ed organica operazione tecnica

MIGLIORAMENTO

esecuzione di una o più opere riguardanti i singoli elementi strutturali dell'edificio con lo scopo di conseguire un maggior grado di sicurezza senza modificarne in maniera sostanziale il comportamento globale

Fig. 1: Riferimenti normativi sugli interventi di consolidamento.

Alla “compatibilità” meccanico-strutturale della tecnica d’intervento sia affianca quindi quella chimico-fisica dei materiali, a cui gli operatori del settore si mostrano oggi più sensibili. In tale contesto, la bio-edilizia si pone l’obiettivo del recupero delle strutture murarie nel rispetto dell’identità storico-costruttiva del manufatto murario, ricercando i materiali “più idonei” per il ripristino. In relazione alle tecniche di consolidamento tra le più diffuse (ripristino di malte degradate, iniezioni, intonaci armati), la tendenza attuale, in accordo con quella oramai universalmente accettata alla conservazione del patrimonio architettonico, riguarda l’uso di materiali a base di calce (in contrapposizione a prodotti a base cementizia o di natura organica), per la cui validazione d’impiego sul campo sono disponibili risultati sperimentali di recenti ricerche.

DEGRADO DEI MATERIALI E PROBLEMI DI COMPATIBILITÀ

I diversi fenomeni di degrado delle murature esistenti sono essenzialmente dovuti alla presenza di acqua, sia essa di risalita o ricevuta direttamente dall’aria o dalle piogge. Dal punto di vista fisico, l’acqua, per fenomeni di soluzione e/o evaporazione può essere causa di un impoverimento delle componenti delle malte esistenti (dilavamento dei leganti aerei) e/o essere responsabile di possibili coazioni interne (variazioni volumetriche, effetto gelo-disgelo, cristallizzazione dei sali idrosolubili ed eventuale formazione di efflorescenze superficiali). Dal punto di vista chimico, la presenza di costituenti reattivi (solfati, alcali) può attivare fenomeni espansivi e fessurativi legati alla formazione di ettringite e thaumasite, o connessi alla nota reazione alcali-aggregato (Collepari, 1991). Tali fenomeni possono avvenire nella muratura esistente in virtù della tipologia dei materiali presenti, ossia del tipo di malta (legante ed inerte) e del tipo di elemento resistente (mattono o pietra), oppure, in situazioni non potenzialmente pericolose, a causa dell’apporto di materiali incompatibili in fase d’intervento.

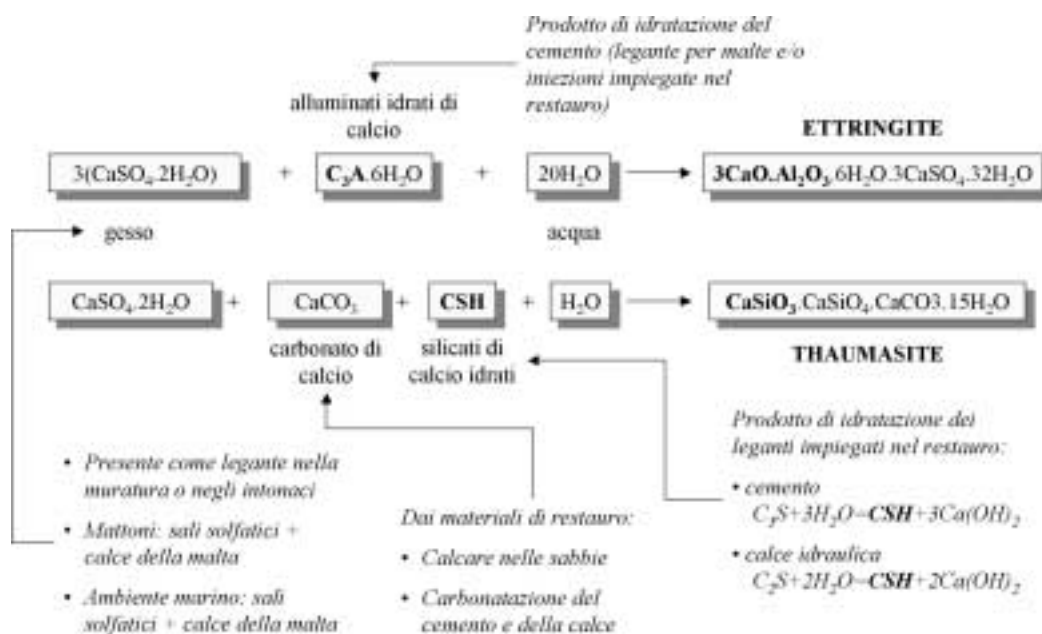


Fig. 2. Reattività ai solfati: formazione di ettringite e thaumasite.

Tra i prodotti impiegati nel consolidamento, le miscele organiche (resine sintetiche) pur dotate di una fluidità molto elevata (che ne permette l’iniezione in fessure sottili) e di una buona resistenza chimica, non forniscono sufficienti garanzie di durabilità. Esse presentano una bassa resistenza agli stress termici, possono dar luogo a reazioni esotermiche anche dannose per la muratura, ed hanno una scarsa resistenza al fuoco e difficoltà d’adesione in caso d’umidità, spesso presente nelle murature storiche. Dal punto di vista meccanico, infine, sviluppano resistenze e rigidità troppo elevate, che possono indurre squilibri nella risposta strutturale del muro riparato.

Tra le miscele di tipo inorganico (calci e cementi) i cementi presentano particolari problemi di compatibilità con i materiali originari delle murature. La presenza di costituenti reattivi rende elevato il rischio di attivazione di fenomeni espansivi e fessurativi legati alla reazione con il gesso o gli aggregati. Rispetto alle calci, essi hanno anche una maggior tendenza al dilavamento di sali solubili a prodotto idratato.

Tuttavia, anche nell'ambito delle calci, la scelta del materiale più idoneo alle murature esistenti è affetta da incertezze che si collocano addirittura in fase di definizione del prodotto. Di fatto, la famiglia delle "calci" ingloba tre tipologie di prodotti: la calce aerea, quella idraulica e quella idraulica naturale. Dal punto di vista dei materiali per il restauro, il primo è un legante aereo, e quindi con bassissime caratteristiche meccaniche e di resistenza all'umidità. Per contro, la calce idraulica deriva essenzialmente dal cemento tagliato con filler o calce aerea. Le calci idrauliche così denominate, in definitiva, sono quindi semplicemente dei cementi di scarsa resistenza, con potenziali effetti negativi sulla durabilità degli interventi (pericolo di formazione di ettringite e thaumasite, elevato contenuto di sali idrosolubili apportati dall'aggiunta di legante aereo).

La normativa vigente (D.M. 31/08/72) è in questo senso ancora carente poiché non propone alcuna differenziazione né in termini produttivi né di materia prima tra calci idrauliche naturali e artificiali, ma solo dei valori limite minimi di resistenza meccanica comuni a tutte le tipologie di calce e quindi non efficaci per una loro caratterizzazione distintiva. Il migliore approccio all'argomento calce è fornito attualmente dalla normativa europea UNI EN 459-1 che introduce, oltre alla semplice classificazione delle calci in base alle resistenze meccaniche, anche importanti specifiche chimico-fisiche della materia prima e del prodotto finito, affinché si possa parlare di calce idraulica naturale anziché solo di calce idraulica. Solo la calce idraulica prodotta secondo i canoni della UNI EN 459-1, ovvero ottenuta dalla cottura di calcari argillosi a temperature inferiori ai 1250°C può essere definita naturale e quindi garantire nel panorama delle calci esistenti caratteristiche idrauliche, meccaniche, elasticità, basso contenuto di sali idrosolubili, assenza di reattività chimica in presenza di solfati, tali da garantire la necessaria durabilità negli interventi di consolidamento. Solo tale differenziazione prevista dalla UNI EN 459-1 garantisce, attualmente, differenze mineralogiche costitutive tra calci idrauliche e calci idrauliche naturali tali da far preferire queste ultime alle prime negli interventi di consolidamento.

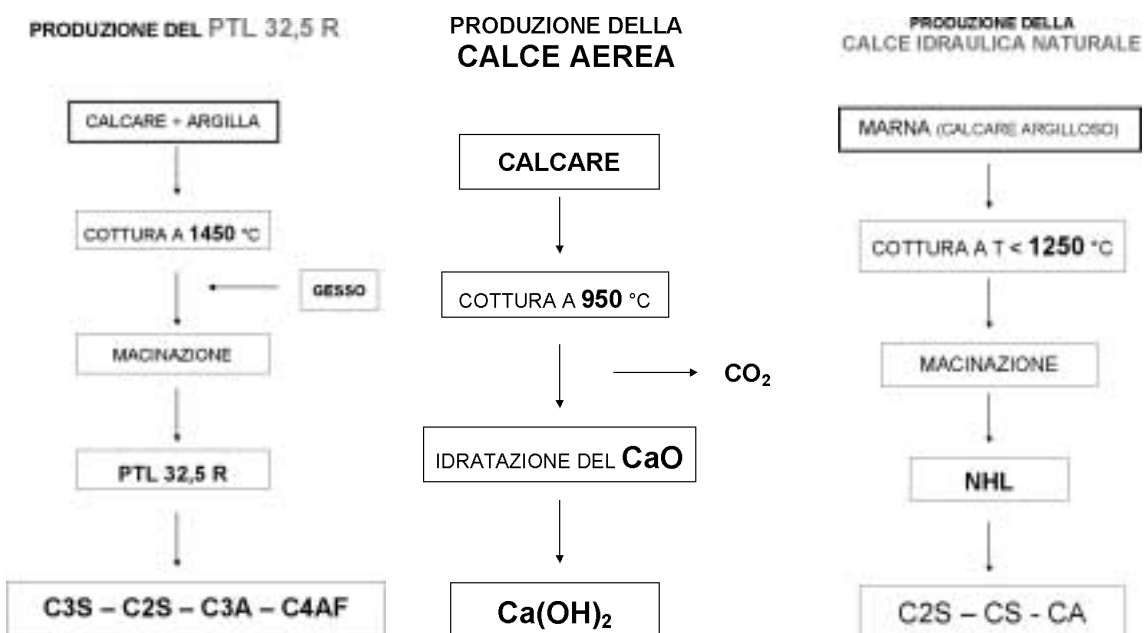


Fig. 3. Processo produttivo di cemento Portland, calce aerea e calce idraulica naturale

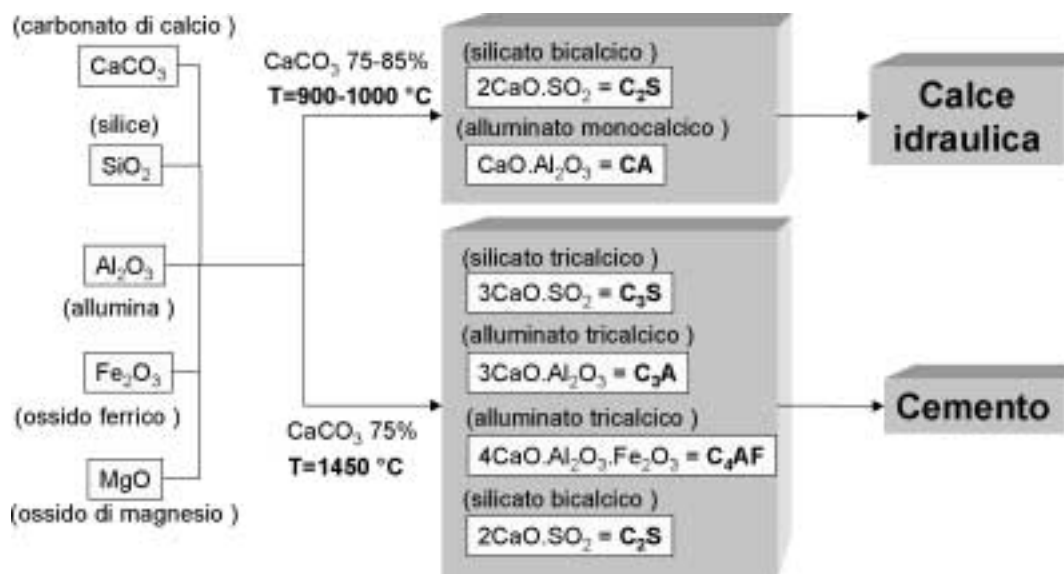


Fig. 4: Composti mineralogici delle calce e dei cementi e fattori determinanti la loro formazione.

| Tipo di calce | Resistenza a compressione (MPa) | Contenuto % MgO | Stabilità di volume | Tempo di presa |
|---|---------------------------------|--------------------|---------------------|----------------|
| | 28 gg | | | |
| Calci idrauliche naturali o artificiali in polvere | 1.5 | ≤4% | soddisfatta | ? 1h e ≤48h |
| Calci eminentemente idrauliche naturali o artificiali in polvere, pozzolaniche o siderurgiche | 3.0 | | | |

Tab. 1: D.M. 31/08/1972: "Requisiti di accettazione e modalità di prova di leganti idraulici".

| Tipo di calce | Resistenza a compressione (MPa) | | Contenuto % | | finezza | | stabilità | Contenuto % | | Tempo di presa |
|---------------|---------------------------------|--------|-----------------|------------|---------|--------|-----------|-------------------------|------|----------------|
| | 7 gg | 28 gg | SO ₃ | CaO libero | 0.09 mm | 0.2 mm | | H ₂ O libera | aria | |
| HL 2 | - | 2÷5 | ≤3% | ?8 | ≤15 | ≤5 | ≤20 mm | ≤2 | ≤20 | ? 1h e ≤15h |
| HL 3.5 | ? 1.5 | 3.5÷10 | ≤3% | ?6 | | | | | | |
| HL 5 | ? 2 | 5÷15 | ≤3% | ?3 | | | | | | |

Tab. 2: UNI ENV 459/1 (1994): "Calci da costruzione. Definizioni, specifiche e criteri di conformità".

| Resistenza a compressione* (MPa) | | Contenuto % | | | | Finezza (passante) | | Stabilità (espansione in autoclave) | Tempo di presa** |
|----------------------------------|-------|------------------|---------|--|-----------------|--------------------|----------|-------------------------------------|------------------|
| 7 gg | 28 gg | SiO ₂ | CaO+MgO | Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ | CO ₂ | 0.6 mm | 0.075 mm | | |
| ? 1.7 | 3.4 | 16-26 | 65-75 | ≤12 | ≤8 | ≤0.5% | ≤10% | ≤1% | ? 2h e ≤24h |

Tab. 3: ASTM C141-96: "Standard specification for hydraulic hydrated lime for structural purposes".

Sperimentazioni comparative tra calci idrauliche naturali e cementi applicate al restauro dimostrano come le prime, con caratteristiche fisiche di peso specifico, porosità, permeabilità al vapore, garantiscano alla muratura una migliore traspirabilità. Le miscele a base di calce idraulica naturale, inoltre, bene si prestano in fase produttiva a controlli della curva granulometrica e della finezza, in modo a garantire alla miscela una migliore capacità di riempimento di cavità e piccoli vuoti. La calce idraulica naturale, inoltre, sviluppa un minor calore d'idratazione rispetto al cemento e presenta una buona inerzia termica, permettendo così di evitare coazioni interne in fase d'indurimento e garantendo una migliore aderenza. Dal punto di vista meccanico, infine, le resistenze a compressione e le rigidità delle miscele a base di calce idraulica naturale indurite hanno ordini di grandezza, rispetto alle miscele cementizia, confrontabili con quelli delle murature esistenti e presentano una maggiore stabilità nel tempo, anche in condizioni ambientali avverse.

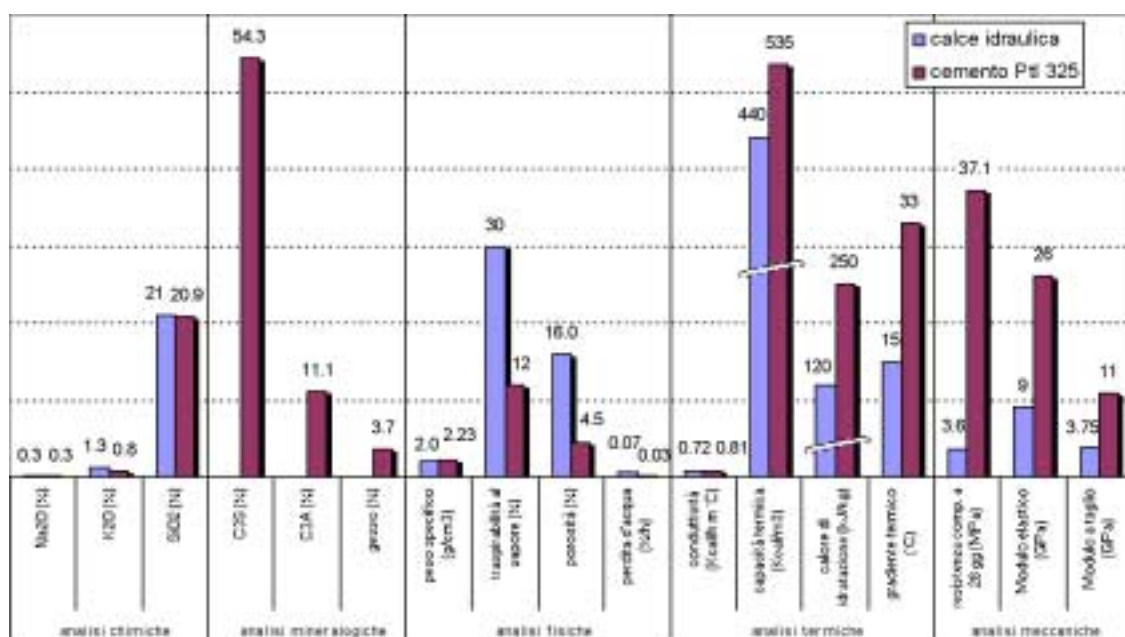


Fig. 5: Confronto sperimentale delle proprietà chimiche, fisiche e meccaniche di una calce idraulica naturale e un cemento.

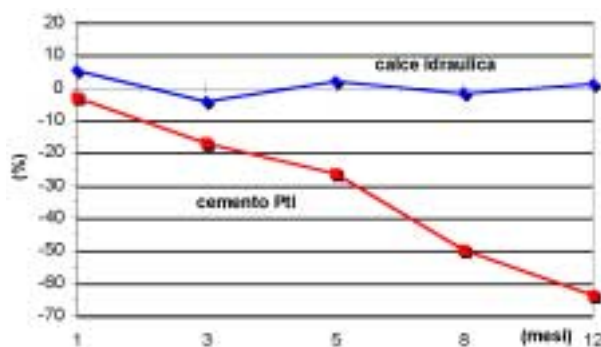


Fig. 6: Stabilità della resistenza meccanica di una calce idraulica naturale e di un cemento in presenza di attacco solfatico.

TIPOLOGIE MURARIE E PROPOSTE D'INTERVENTO

Nell'ambito delle murature presenti sul territorio nazionale, le murature di pietra sono caratterizzate da un'estrema varietà tipologica e da forte irregolarità (sia in sezione che in facciata) e disomogeneità. Spesso, inoltre, la loro conformazione è assimilabile ad un muro multistrato (con paramenti esterni di conci di pietra e nucleo pressoché incoerente, che può costituire anche la maggior parte dello spessore), il cui collegamento trasversale, realizzato essenzialmente dalla malta tra i conci è carente o addirittura mancante. Lo strato di riempimento è generalmente caratterizzato dalla presenza di vuoti, distribuiti disordinatamente insieme ad inerti e malta. Gli inerti possono essere di varia natura (pietra di cava, ghiaia di fiume, laterizio) e di diverse forme e dimensioni (elementi ricavati da operazioni di taglio, ciottoli, zeppe), e può esservi presenza di terra, argilla, sostanze organiche, etc..; le malte sono generalmente di scarsa qualità e spesso non circondano completamente gli elementi resistenti.

Contrariamente alle murature in pietra, le murature di mattoni presentano caratteristiche di regolarità ben riconoscibili sia riguardo alla tessitura che ai materiali (impiego di malta e mattoni, di caratteristiche determinabili con semplici prove di laboratorio). Il degrado di tali strutture è evidenziato essenzialmente da distacchi (mattoni e/o malta) e da fessurazioni più o meno diffuse.

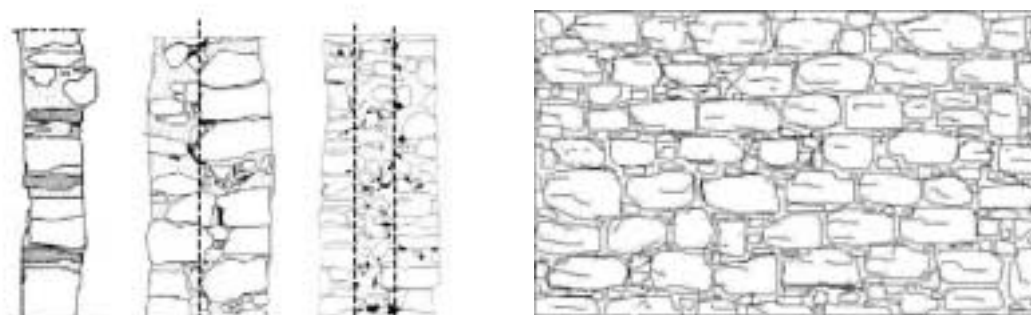


Fig. 7: Morfologia di murature in pietra in sezione (singolo e multistrato) e in facciata (Binda, Baronio, Penazzi et. al, 1999).

I problemi strutturali delle murature in pietra sono da annoverare principalmente nella scarsa portanza (malta inconsistente o mancante, eccessiva presenza di vuoti, etc.), e nella debole connessione trasversale dei paramenti, che tendono a sviluppare meccanismi di collasso "anticipati" rispetto alla rottura per compressione del materiale, per fenomeni di uscita dal piano sia sotto carichi verticali (per instabilità dei singoli paramenti) sia sotto i carichi orizzontali (per espulsione localizzata di uno strato in presenza di carichi verticali deboli o per accentuazione dei fenomeni di instabilità in presenza di carichi verticali elevati).

In tal senso, le tecniche d'intervento sono quindi rivolte al consolidamento del nucleo interno (iniezioni) ed al rafforzamento della connessione tra i paramenti esterni (collegamento trasversale, in presenza o meno di intonaci armati, iniezioni).

Per le murature di mattoni, l'impiego delle iniezioni è invece generalmente finalizzato al risarcimento delle lesioni, oppure, in situazioni particolari di degrado superficiale, alla realizzazione di una barriera sigillante all'ulteriore degrado.

Inoltre, per entrambe le tipologie, quale integrazione al degrado delle malte può essere impiegata efficacemente la ristilatura dei giunti di malta.

Una recente ricerca sperimentale ha messo in luce gli effetti dell'applicazione delle diverse tecniche di consolidamento (sia singolarmente che in combinazione) su murature in pietra multistrato. L'iniezione con miscele a base di calce naturale si sono dimostrate particolarmente adeguate allo scopo, migliorando il comportamento globale sia in termini di resistenza che di meccanismo di rottura, nel rispetto della compatibilità chimico-fisica e meccanica con le murature originarie. Alla luce

di analoghi risultati sperimentali, si è infatti rilevato come l'uso di materiali ad elevata resistenza meccanica, come le miscele cementizie, oltre a non presentare sufficienti garanzie di compatibilità con i materiali esistenti, non consenta incrementi di resistenza nei muri consolidati significativamente più elevati di quelli ottenibili con miscele meccanicamente più compatibili con essi.

La ricerca ha consentito, inoltre, la messa a punto di procedure sperimentali finalizzate ad ottimizzare la scelta della miscela (rapporto a/l, eventuale additivazione, etc.) al fine di rendere massima l'iniettabilità di murature in pietra. Il criterio si basa sulla selezione progressiva di miscele a base di calce idraulica naturale e consente di individuare la combinazione più appropriata del rapporto acqua/legante in relazione alla composizione della miscela (eventuale presenza di additivi). La selezione avviene mediante verifiche sperimentali dei requisiti reologici di fluidità e stabilità (pre-requisiti per l'iniettabilità, misurati ai coni standardizzati e mediante ispezioni visive) e di iniettabilità del supporto (valutata in base a simulazione dell'iniezione entro cilindri trasparenti riempiti con il materiale da consolidare).



Fig. 8: Prove di iniettabilità in cilindri riempiti con diversi tipi di supporto (Valluzzi, 2000).



Fig. 9: Interventi di consolidamento su murature in pietra: iniezioni e ristilatura dei giunti (Valluzzi, 2000).

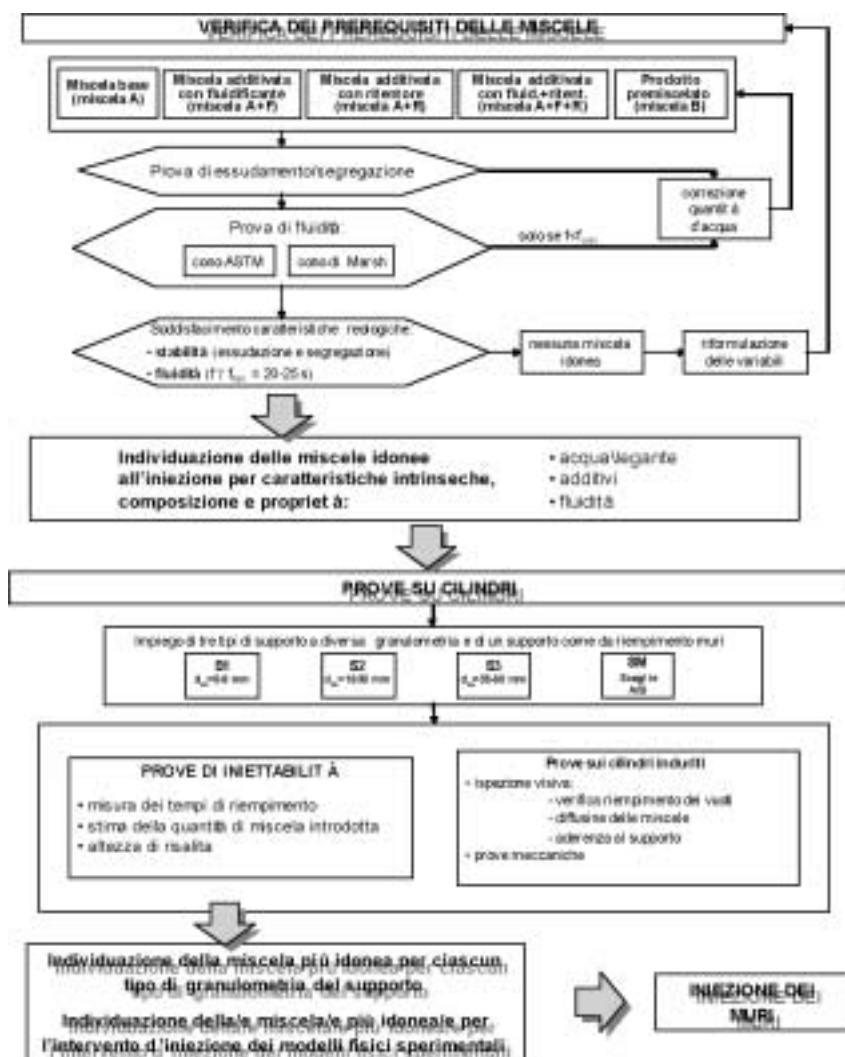


Fig. 10: Procedura per la scelta della miscela da iniezione in relazione ad alcuni parametri che influenzano l'iniettabilità delle murature (Valluzzi, 2000).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Binda L., Baronio G., Penazzi D., Palma M., Tiraboschi C. (1999). *Caratterizzazione di murature in pietra in zona sismica: DATA-BASE sulle sezioni murarie e indagini sui materiali. L'ingegneria sismica in Italia*, 9° convegno nazionale, Torino (CD-ROM).

Collepari M. (1991). *“Scienza e tecnologia del calcestruzzo”*, Hoepli, Milano.

Collepari M., Coppola L. (1991). *Il risanamento degli edifici storici: situazione attuale e prospettive nella ricerca*. L'Edilizia 9/9137-548.

Valluzzi M.R. (2000). *“Comportamento meccanico di murature consolidate con materiali e tecniche a base di calce”*. Tesi di Dottorato, Dottorato di Ricerca in Progetto e Conservazione delle Strutture (sede amm.va Università di Trieste), XIII ciclo, Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Università di Padova.