

1. INTRODUZIONE

La muratura in pietra è presente in tutto il territorio nazionale e presenta, pur nella varietà dei materiali e delle tecniche impiegate, problematiche ricorrenti per quanto riguarda sia la vulnerabilità nei confronti delle azioni sismiche, sia l'applicabilità delle tecniche di rinforzo più frequentemente impiegate.

Trattasi, nella fattispecie, di murature costituite essenzialmente da elementi lapidei (blocchi non lavorati, generalmente di forma irregolare, di diverse dimensioni ed anche di diverso materiale), generalmente a più paramenti accostati o mal collegati tra loro, e da malte di scarsa qualità, sia per composizione che per resistenza. Per questo tipo di murature, sovente mal collegate con gli orizzontamenti, gli effetti dovuti ad incuria, al tempo, o ad eventi eccezionali, quali un sisma, possono creare condizioni di dissesto legate sia al comportamento fuori piano delle pareti - come effetto globale (ribaltamento) o locale (espulsione del paramento esterno) - che al comportamento nel piano.

È noto, infatti, che nei casi di non adeguato collegamento tra le pareti contigue e tra gli elementi verticali ed orizzontali, le pareti verrebbero impegnate, nell'assorbimento delle forze orizzontali, con sollecitazioni flessionali fuori del piano, che conducono al pressoché immediato collasso. L'efficace connessione tra le pareti (ammorsamento efficace) e tra pareti e solai (cordoli, catene con funzione di cordoli), unita alla presenza di orizzontamenti di rigidità adeguata consente, invece, il comportamento scatolare dell'edificio e la trasmissione delle forze orizzontali ai pannelli murari tale che ciascuno di essi possa reagire nella direzione parallela al proprio piano.

Nel contesto del recupero strutturale, il progetto di un intervento che si reputi necessario deve poter considerare, pertanto, sia il comportamento della costruzione nella sua globalità (miglioramento delle connessioni tra i muri e con gli orizzontamenti, verifica del supporto fondale) che la verifica delle prestazioni dei singoli elementi strutturali (muri, solai, coperture).

I dissesti più comunemente osservati nelle costruzioni di muratura riguardano, infatti, meccanismi globali (rotazioni di porzioni di edifici con conseguente fessurazione estesa delle pareti) e meccanismi più localizzati, che possono interessare l'elemento strutturale nel suo insieme (ribaltamento di intere pareti fuori del piano, scorrimenti rigidi degli orizzontamenti) oppure coinvolgere la resistenza del muro nei termini in cui la sezione è organizzata ed in funzione della direzione della sollecitazione rispetto al piano della parete (rottture per taglio e pressoflessione, ribaltamento di porzioni della facciata o espulsione dei paramenti).

Il progetto di una tecnica di consolidamento passa attraverso varie fasi di studio, sintetizzabili nei seguenti punti:

- *conoscenza del supporto originario*, sia in relazione ai singoli costituenti (malta, pietre) che come materiale composito (tessitura, morfologia); tale fase si avvale dei metodi di indagine in sito (carotaggi, endoscopie) e delle prove di laboratorio sui materiali estratti;
- *conoscenza del comportamento della struttura muraria prima e dopo l'intervento*: la conoscenza della costruzione e del comportamento sotto i carichi applicati consente di mettere in luce le possibili deficienze strutturali per la scelta dell'intervento più adeguato, in relazione alle prestazioni volute; in ogni caso, è importante non sottovalutare gli effetti dell'intervento sul comportamento originario della costruzione, al fine di prevedere, ove possibile, con modelli di comportamento meccanico, il funzionamento della muratura consolidata;
- *scelta dell'intervento*: la scelta riguarda l'impiego di materiali compatibili con il supporto murario, legati a tecniche tali da migliorare la prestazione strutturale senza alterare in maniera eccessiva il comportamento originario (si pensi, ad esempio, agli effetti dell'incremento di rigidità delle pareti in edifici soggetti a sisma);
- *esecuzione della tecnica*: è evidente che la bontà di un intervento dipende, oltre che da un'adeguata progettazione, in maniera fondamentale dalla sua corretta esecuzione; l'inaccuratezza nella pratica costruttiva, dovuta anche alla mancanza di direttive specifiche adeguate, può inficiare del tutto la tecnica o condurre a situazioni consolidate peggiorative dell'esistente. Le modalità esecutive correntemente impiegate sono estremamente variabili, in funzione delle tradizioni e dell'esperienza degli operatori locali, e sono operative in assenza di possibilità di controllo sulla effettiva necessità ed efficacia, pur facendo riferimento a specifiche ricavate da "regole codificate" nelle ben note "schede tecniche" predisposte in occasione della ricostruzione del Friuli;
- *verifica dell'efficacia dell'intervento*: la fase di controllo dell'effettivo miglioramento prestazionale della muratura per effetto dell'intervento si avvale del supporto offerto dalla sperimentazione in sito, volta a valutare la resistenza a compressione e a taglio della muratura prima e dopo il consolidamento; agendo sull'esistente e nella prospettiva del recupero, le prove sperimentali, si basano su metodologie d'indagine a carattere non distruttivo o debolmente distruttivo. La validità di tali tecniche per la determinazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità della muratura, tuttavia, va confermata con i risultati disponibili relativi a prove distruttive.

2. OBIETTIVI DELLA RICERCA

Nel contesto precedentemente esposto, l'Unità di Ricerca di Padova si è proposta i seguenti obiettivi:

- la catalogazione delle tecniche di consolidamento maggiormente impiegate nell'edilizia storica;
- l'interpretazione dell'intervento mediante prove sperimentali in situ, atte a mettere in evidenza efficacia e limiti di validità della tecnica.

Vengono prese in considerazione le tecniche di consolidamento maggiormente diffuse nel territorio nazionale, applicate negli interventi di ricostruzione post-sisma già a partire dagli eventi del Friuli del 1976; esse sono:

1. iniezioni con miscele consolidanti;
2. intonaci armati;
3. iniezioni armate;
4. tirantature metalliche.

Mentre le prime due tecniche sono rivolte al rinforzo della parete muraria, al fine di migliorare il suo comportamento nel piano, le iniezioni armate (con funzione di cucitura) e le tirantature (con funzione di cordolo perimetrale) consentono di rendere efficace il collegamento delle pareti resistenti, ossia di realizzare i vincoli bilaterali tra elementi contigui, in modo da garantire il comportamento scatolare dell'edificio e, quindi, lo sfruttamento ottimale delle risorse strutturali disponibili.

È palese, pertanto, che il progetto di interventi di consolidamento volti al miglioramento del comportamento a lastra delle pareti, non può prescindere dalla valutazione del comportamento globale e della misura dell'effettiva collaborazione degli elementi strutturali.

L'U.R. di Padova ha svolto un lavoro di raccolta dei dati tecnico-costruttivi relativi alle tecniche di rinforzo sopra citate per le murature in pietra di differenti aree colpite da sisma (fascia sub-alpina dell'Italia nord-orientale e regione Toscana) e alle caratteristiche meccaniche del materiale prima e dopo l'intervento.

Una ricerca è stata promossa e finanziata dall'Istituto Trentino per l'Edilizia Abitativa, con l'obiettivo molto concreto di fornire indicazioni per la progettazione degli interventi di consolidamento e per il controllo in cantiere della loro efficacia. Sono in particolare disponibili risultati, confrontabili, di prove eseguite con martinetti piatti singoli e doppi, e di prove a compressione e taglio eseguite in sito su pannelli murari isolati nell'ambito di intere pareti mediante opportune tecniche di taglio.

Questa prima banca dati è stata successivamente arricchita con i risultati di indagini analoghe eseguite in contesti simili ma in zone diverse. In particolare, sono state eseguite: prove di resistenza a taglio su pannelli murari prima e dopo

l'esecuzione di iniezioni in edifici dell'area bellunese; caratterizzazioni meccaniche con martinetti piatti doppi di murature prima e dopo l'esecuzione di iniezioni, confrontate con misure di prove soniche, ancora nel bellunese e a Verona, in collaborazione con la Prof. G. Riva dell'Istituto Universitario di Architettura di Venezia. In collaborazione con il Politecnico di Milano (prof. L. Binda) sono state effettuate applicazioni di prove non distruttive (soniche, georadar) in una muratura di un complesso monumentale a Este (Padova), ponendo particolare attenzione al problema della verifica preliminare della iniettabilità della muratura mediante prove di laboratorio sviluppate presso lo stesso Politecnico.

Altri risultati sono disponibili, nell'ambito di una ricerca condotta con modalità e finalità simili a quella promossa dall'Istituto di Trento, finanziata dalla regione Toscana e svolta in collaborazione fra il Politecnico di Milano (prof. Binda), l'Università di Firenze (prof. Vignoli) e l'Università di Padova.

In base ai risultati ottenuti si sono potute trarre indicazioni specifiche sul campo d'impiego delle varie tecniche individuate in relazione alla loro utilizzazione e alla loro efficacia, e sui materiali adottati per il consolidamento.

Si è posta l'attenzione, inoltre, sia al problema della verifica sperimentale, sia alla validazione e taratura di modelli di previsione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità delle murature rinforzate. In relazione a quest'ultimo aspetto e in particolare per la tecnica delle malte/betoncini armati, è stato messo a punto un modello numerico in grado di cogliere i principali fenomeni locali che influiscono sul comportamento meccanico della struttura.

Nella presente relazione, per ciascuna tecnica considerata vengono, pertanto, sinteticamente esposti:

- a) *i criteri di applicazione utilizzati in passato*: tutte le tecniche citate sono "codificate" in indicazioni prescrittive (tipo codici di pratica), purtroppo già inserite all'interno della normativa tecnica, prive di adeguate basi tecnico-scientifiche e nella quasi totale assenza di strumenti di valutazione quantitativa della loro effettiva efficacia in relazione alle specifiche condizioni di impiego;
- b) *le osservazioni critiche emerse sulla base dei risultati che è stato fino ad oggi possibile riscontrare "sul campo"*: si analizzano aspetti legati alla compatibilità chimico-fisica, ma anche strutturale, dei materiali e dei componenti aggiunti rispetto a quelli esistenti, alla durabilità, ai limiti tecnico-esecutivi, alla stima della reale efficacia e al rispetto dei criteri di conservazione dell'edilizia storica;
- c) *i principali risultati ottenuti dalle ricerche che negli anni più recenti sono state condotte sia in Italia che all'estero*: per alcune delle tecniche citate sono disponibili contributi per la scelta appropriata di modalità esecutive e materiali, per la valutazione del miglioramento delle prestazioni strutturali dei componenti rinforzati in termini quantitativi e, quindi, per il dimensionamento del componente aggiunto in relazione alle prestazioni

richieste, e per la verifica dell'efficacia e della buona esecuzione degli interventi;

- d) *le proposte di impiego secondo criteri "aggiornati"*: come diretta conseguenza di quanto esposto nei punti precedenti sono possibili alcuni suggerimenti riguardanti ciascuna tecnica in relazione, per esempio, al campo d'impiego, ai controlli preliminari ed ad intervento ultimato, alla scelta dei materiali più adeguati e ai risultati attesi.

Per alcune delle tecniche menzionate è stata anche effettuata una prima valutazione dei costi dell'intervento.

Il lavoro costituisce, pertanto, l'occasione per acquisire conoscenze sulle tecniche di intervento, sia in termini di efficacia, sia in relazione alle possibilità di attuazione sul piano tecnologico ed economico. La ricaduta di tali attività potrà costituire un riferimento per la proposta di una serie di indicazioni progettuali e per la stesura di codici di pratica di adeguamento antisismico e di normative tecniche.

3. RIFERIMENTI NORMATIVI

In tema di riparazioni per costruzioni in muratura la normativa nazionale risulta relativamente recente: a partire dagli eventi sismici che hanno colpito l'Italia nel 1976 con il terremoto del Friuli, sono state emanate una serie di norme, legate all'emergenza, che sono rimaste a tutt'oggi prive di un valido riferimento a procedure sperimentali ben collaudate e tali da garantire l'efficacia soddisfacente delle tecniche di consolidamento proposte.

Prima di allora, il Decreto Ministeriale del 3 Marzo 1975: "*Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche*" rappresentava il primo decreto sismico disponibile sul territorio nazionale. Esso si limitava, comunque a citare le possibili tecniche di intervento (i punti fondamentali sono riportati di seguito), senza il minimo ulteriore approfondimento.

In termini cronologici, le norme e le raccomandazioni in materia di ricostruzione in zone sismiche sono state emanate antecedentemente alla normativa specifica sulle murature, introdotta solo nel 1987, ai fini della progettazioni di nuovi edifici. Tale normativa giungeva finalmente a coprire, anche se in maniera insufficiente per quanto riguarda gli interventi su vecchi edifici, una grave lacuna legislativa e tecnica nel campo delle costruzioni.

Questo sviluppo anomalo della normativa, che ha visto la presenza di normative sismiche contenenti, quindi, già tutte le prescrizioni necessarie alla verifica delle strutture (determinazione delle sollecitazioni, indicazione degli interventi necessari al consolidamento, specifiche dei valori di resistenza richiesti, etc.), prima dell'introduzione di un regolamento specifico sulle costruzioni in muratura, è probabilmente la causa delle lacune che essa presenta.

A titolo di esempio è utile rimarcare che a tutt'oggi non viene suggerito un criterio specifico in base al quale valutare la necessità di un intervento di rinforzo; inoltre, una volta optato per l'intervento, non vengono fornite indicazioni che consentano di scegliere la tecnica più adeguata al caso di studio o criteri per la misura del consolidamento. Infine, non esistono solide basi sperimentali (né ne viene proposta o suggerita la necessità), che garantiscano l'efficacia delle tecniche proposte.

La genericità e la mancanza di chiarezza della normativa non può che contribuire fortemente, quindi, al rischio di interventi indiscriminati che, se da una parte possono alterare notevolmente le caratteristiche originali degli edifici, dall'altra possono rivelarsi insufficienti o inadeguati o addirittura deleteri per garantire la sicurezza richiesta.

Il quadro completo delle norme disponibili sul territorio nazionale sugli edifici in muratura, in relazione alle tecniche di intervento, è riportato di seguito in ordine cronologico; in esso vengono inserite le indicazioni generali per mettere in luce l'impostazione della norma, rimandando la descrizione specifica delle tecniche di consolidamento ai paragrafi specifici più avanti.

- **D.M. 3 Marzo 1975:** *“Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche”*. Tale decreto, nella sezione C.9, relativa alla riparazione degli edifici in muratura, accenna ai seguenti possibili interventi:
 - per le murature: “Le murature che non presentino gravi sintomi di instabilità, quali strapiombi o estese lesioni possono essere riparate mediante opportuna ripresa con murature di mattoni e malta cementizia, getti di conglomerato cementizio, ed anche con l’eventuale inserimento di elementi metallici o in cemento armato. I legamenti, oltre che con catene di acciaio, potranno effettuarsi anche con cavi posti in leggera pre-tensione e comunque non superiore al 50% della tensione ammissibile d’esercizio. In entrambi i casi dovrà essere posta all’atto esecutivo la massima cura e diligenza per conseguire un’idonea ripartizione sulla muratura delle pressioni di contatto delle strutture di ancoraggio”;
 - per i dissesti: “Qualora i fabbricati manifestino segni di dissesto palesemente dovuti a cedimenti differenziali delle fondazioni, ovvero le murature siano danneggiate e scarsamente consistenti nella zona di basamento del fabbricato, si provvederà a risarcire le lesioni e, ove possibile, ad iniettarle. Inoltre si potranno eseguire, al di sotto della quota del piano marciapiede, pareti sottili cementizie armate in modo da costituire strutture scatolari di contenimento, eventualmente rinforzate da cavi. Tali pareti, di preferenza, verranno eseguite da ambo i lati delle murature e collegate tra loro”.

Altre altrettanto generiche indicazioni sono fornite per: fondazioni, archi e volte, cordoli, solai, sbalzi, scale e coperture.
- Dopo il sisma del Friuli del 1976, venne emesso dalla Segreteria Generale Straordinaria della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia la **Legge Regionale 20 Giugno 1977**, n.30: *“Documentazione tecnica per la progettazione e direzione delle opere di riparazione degli edifici”* che, nel Documento Tecnico n. 2, datato Novembre 1977, si occupa delle *“Raccomandazioni per la riparazione strutturale degli edifici in muratura”*. In questo documento si forniscono le indicazioni base per la comprensione del comportamento sismico degli edifici (funzionamento scatolare, importanza degli orizzontamenti nella ripartizione delle forze orizzontali, importanza del collegamento con le pareti verticali e tra le pareti stesse, distribuzione adeguata delle pareti di taglio in entrambe le direzioni delle componenti di accelerazione considerata, controllo della distribuzione delle rigidità) e i possibili sistemi di intervento per il consolidamento, specificando le modalità degli stessi ed alcune note sulla valutazione delle caratteristiche meccaniche delle murature consolidate ottenute su base sperimentale, con particolare riferimento alle iniezioni e alle paretine armate.

I possibili *sistemi di intervento* vengono citati come:

- consolidamento: in questa normativa compare, per la prima volta, la definizione di consolidamento come operazione che “consiste nel rigenerare la resistenza specifica delle strutture danneggiate e nel loro rafforzamento fino a raggiungere i necessari livelli di capacità portante”;
- sostituzione di elementi strutturali, attuata con demolizione e rifacimento delle parti strutturali per le quali il consolidamento non porterebbe alcun miglioramento;
- ristrutturazione, effettuata mediante inserimento di nuovi elementi strutturali ad integrazione delle strutture esistenti. Tale intervento, a differenza dei primi due, che sono tipici di situazioni già strutturalmente corrette dal punto di vista morfologico, si rende necessaria quando la distribuzione degli elementi resistenti non è tale da garantire il funzionamento scatolare dell’insieme delle strutture.

Per quanto riguarda le *modalità di intervento*, le proposte riguardano fondazioni, murature, solai, tiranti e coperture in legno. Per ciò che concerne le murature vengono proposte:

- a) iniezioni di malta cementizia;
- b) lastre di cemento armato.

Per ciascuna di esse vengono date alcune indicazioni esecutive, insieme ad alcuni valori numerici per il dimensionamento dell’intervento e, nella sezione delle caratteristiche meccaniche, alcune osservazioni sulla resistenza basate sulla sperimentazione fino ad allora disponibile, relativa agli studi effettuati dallo ZMRK di Lubiana, in Slovenia.

- **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" nella quale si tratta degli interventi negli edifici esistenti in termini di:
 - definizione di *intervento di riparazione* come esecuzione di un complesso di opere finalizzate a ripristinare l’integrità di ogni parte dell’edificio, e di *adeguamento antisismico* come *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;*
 - operazioni progettuali che il progetto d’intervento comporta;
 - provvedimenti tecnici di intervento per l’adeguamento antisismico dividendoli in:
 - a) provvedimenti intesi a ridurre gli effetti sismici;
 - b) provvedimenti atti ad aumentare la resistenza strutturale.

Il punto 3.4 concerne dei provvedimenti tecnici di intervento da applicare agli edifici di muratura; nella sezione dedicata alle pareti, vengono nominati e sinteticamente descritti le tecniche possibili per il consolidamento; esse sono:

- a) risarciture localizzate;
- b) iniezioni di miscele leganti;
- c) applicazioni di lastre in cemento armato o di reti metalliche elettrosaldate;
- d) inserimento di pilastri in cemento armato o metallici in breccia nella muratura;
- e) tirature orizzontali e verticali.

Per ognuno di questi provvedimenti la circolare fornisce una generale descrizione sulle modalità e materiali utilizzabili, riprese più in dettaglio nella Circolare di applicazione citata di seguito. A tali prescrizioni si farà cenno più avanti, quando si andrà a trattare in dettaglio alcune di queste tecniche.

- **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". La circolare contiene le norme di applicazione relative al Decreto di cui sopra; in appendice, inoltre, viene riportata quale esempio per edifici in muratura la: "Verifica di un edificio caratterizzato da un comportamento al collasso del tipo taglio", che propone l'espressione di Turnsek per la stima della resistenza tangenziale di riferimento ed applica il metodo POR alla struttura a pareti portanti.

Il decreto e la circolare sopra menzionate si basano sui risultati del "*Progetto Finalizzato Geodinamica*" del C.N.R. avviato in seguito al sisma del Friuli, i cui risultati sono stati pubblicati nel 1981 sotto il titolo di "*Riparazione e consolidamento degli edifici in muratura*".

- **L'Ordinanza n° 230 del 5 Giugno 1984:** "Disciplina dei criteri e delle modalità in ordine alla riattazione degli edifici e delle opere danneggiate dai terremoti del 7 ed 11 maggio 1984" (terremoto in Abruzzo e Umbria) specifica, nell'allegato A, le norme tecniche per la realizzazione degli interventi, definendo l'intervento di riattazione di un edificio con struttura portante verticale in muratura un complesso di opere che tenda a riparare i danni provocati dalle azioni sismiche garantendo contestualmente una maggiore sicurezza nei confronti di futuri eventi sismici. Definisce, inoltre, alcuni criteri per escludere classi di edifici dalla necessità di intervento; tali criteri si riferiscono a valori limite della resistenza convenzionale alle azioni orizzontali, dei fuori piombo, della superficie dei crolli parziali rispetto alla superficie totale delle murature portanti, della superficie interessata dalle lesioni passanti e di schiacciamento, etc.. Rispetto alla precedente norma vengono fornite alcune specifiche aggiuntive relative alle tecniche di consolidamento. Gli interventi tecnici per la riattazione sono citati per: risarcitura delle lesioni, incatenamenti, architravi, orizzontamenti, coperture, aggetti verticali e scale.

- **D.M.LL.PP. 20 Novembre 1987:** *“Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento”*; il Titolo II della norma si occupa specificatamente del consolidamento rispecchiando, tuttavia, quanto contenuto nel precedente decreto e limitandosi, pertanto, ancora ad una descrizione generale ed operativa del problema.
- **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”*; è la circolare relativa al precedente decreto.
- **D.M.LL.PP. 16 Gennaio 1996:** *“Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche”*¹: questa norma conferma sostanzialmente i principi generali espressi dalle norme precedenti. Al punto C.9, senza tra l’altro entrare in dettaglio, vengono trattati gli interventi negli edifici esistenti in ordine agli argomenti sotto indicati:

la definizione di interventi di **adeguamento** (esecuzione di un complesso di opere per rendere l’edificio antisismico, come nel Decreto 2 Luglio 1981) e di **miglioramento** come 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;

- i casi in cui è fatto obbligo di procedere all'adeguamento ed al miglioramento²;
- le modalità di redazione dei progetti e scelte progettuali;
- i provvedimenti tecnici di intervento dividendoli, come nel primo decreto, in:
 - a) provvedimenti intesi a ridurre gli effetti sismici;
 - b) provvedimenti atti ad aumentare la resistenza strutturale;
- il collaudo degli interventi.

Il punto C.9.5 tratta specificatamente gli edifici in muratura senza però entrare nel merito di come determinare la resistenza delle pareti portanti e come intervenire per aumentarla.

- **Circolare M.LL.PP. n. 65/AA.G. del 10 Aprile 1997:** *“Istruzioni per l’applicazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche”*. Come

¹ È da ricordare che tale norma rappresenta l’aggiornamento del precedente decreto sismico del 24 Gennaio 1986. Per ciò che riguarda gli interventi di consolidamento, le prescrizioni sono sostanzialmente le stesse, a parte qualche correzione relativa agli indici impiegati nella verifica sismica e poche considerazioni aggiuntive.

² Diversamente, l’intervento di miglioramento è prescritto per edifici di carattere monumentale “in quanto compatibile con le esigenze di tutela e di conservazione del bene culturale”. Nel precedente decreto sismico non era presente alcuna osservazione a riguardo.

per i precedenti decreti, le istruzioni applicative entrano più nel dettaglio. Le norme in questione prendono in esame, con l'allegato 3, gli edifici in muratura; per ciò che riguarda l'aumento di resistenza delle pareti murarie vengono elencati i seguenti provvedimenti:

- iniezioni di miscele leganti;
- applicazioni di lastre in cemento armato o di reti metalliche elettrosaldate;
- inserimento di pilastri in cemento armato o metallici in breccia nella muratura;
- tirantature orizzontali e verticali.

Anche in questo caso, per ciascun provvedimento, la circolare fornisce una descrizione sulle modalità e materiali utilizzabili, ripresi in seguito, per le tecniche considerate, in questo studio.

L'introduzione del concetto di miglioramento rappresenta un'importante evoluzione della norma, poiché avalla una logica più coerente con quello di conservazione dell'esistente; in termini più concreti, esso consente di operare sui manufatti da riparare con interventi meno invasivi (ma non per questo meno efficaci) di quelli previsti dall'adeguamento antisismico.

D'altra parte, così come espresso dal decreto, il concetto di miglioramento sottintende che l'edificio abbia già nella sua concezione progettuale, nella scelta dei materiali e nella validità degli aspetti costruttivi e di esecuzione, una struttura in grado di sopportare le azioni sismiche in modo soddisfacente.

Tale approccio, soprattutto se si fa riferimento agli edifici storici e, quindi, a materiali e tecniche oramai in disuso, ha carattere fortemente qualitativo e non può che aumentare le incertezze e le perplessità intorno al tema delle riparazioni.

È invece necessario poter impostare il problema in termini quantitativi ossia, dal punto di vista ingegneristico, poter effettuare una valutazione della sicurezza della costruzione prima e dopo gli interventi, utilizzando metodi di calcolo semplificati, capaci di cogliere gli aspetti fondamentali del comportamento della struttura.

4. STRUMENTI PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEGLI INTERVENTI

4.1 Aspetti generali

Come già ribadito in precedenza, il progetto di un intervento di consolidamento dipende da molteplici parametri, relativi a tutte le fasi di studio, ossia a partire dalla conoscenza dei materiali fino all'esecuzione della tecnica in sito.

La fase finale si riferisce alla valutazione dell'effettiva riuscita di un intervento di consolidamento, e si avvale del supporto offerto dalla sperimentazione, finalizzata alla determinazione dei valori delle caratteristiche meccaniche delle murature prima e dopo l'intervento.

Effettuati i test e le verifiche preliminari per la conoscenza delle caratteristiche della muratura da iniettare (carotaggi, endoscopie, prove di laboratorio sui materiali estratti) ed una volta valutata la fattibilità dell'intervento, la realizzazione di una serie di indagini, effettuate prima e dopo il consolidamento, consente di valutare, in termini quantitativi, se la tecnica adoperata ha effettivamente comportato un miglioramento delle prestazioni strutturali della muratura.

La scarsa qualità delle murature su cui ci si trova ad operare, insieme alla necessità di conservazione del bene, non consente di prelevare campioni indisturbati dalla struttura originaria per determinare le caratteristiche volute in laboratorio; per di più, le condizioni al contorno in cui la muratura si trova in sito sono difficilmente riproducibili in sede diversa da quella in cui giace.

Le prove sperimentali di riferimento sono, pertanto, prove effettuate direttamente in sito, con tecnologie e metodologie messe a punto grazie all'esperienza acquisita nel corso degli anni. La tendenza è di prediligere, ovviamente, procedure con bassissimo, se non nullo, grado di distruttività del supporto originario. L'importante è verificare l'attendibilità di tali procedure, mettendole a confronto, ove possibile, con metodologie di prova a carattere distruttivo, che forniscono risultati meno approssimati.

Il problema si pone, quindi, in due aspetti: da una parte c'è la stima dell'efficacia dell'intervento su una struttura che, per gli scopi stessi del consolidamento, dovrà essere riutilizzata; dall'altra c'è la valutazione dell'affidabilità delle prove non o debolmente distruttive.

Esistono numerose tecniche e procedure di prove in situ per le murature, tese alla valutazione delle caratteristiche meccaniche (compressione e taglio) della stessa. Si riportano di seguito le più diffuse, distinguendole rispetto al grado di invasività sulla muratura.

4.1.1 Prove non distruttive

- *Test sonici:*

Con le prove soniche è possibile misurare la velocità di trasmissione delle onde elastiche all'interno della parete da un generatore di impulsi (generalmente un martello strumentato) al ricevitore. La velocità di trasmissione aumenta con la densità del mezzo, adeguando corrispondentemente ampiezza e frequenza. RegISTRAZIONI di incrementi di velocità per effetto, ad esempio, di un'iniezione, denotano maggiore compattezza e forniscono, quindi, un'indicazione della buona riuscita dell'intervento.

A seconda delle posizioni relative tra punto d'impulso e di ricezione si possono effettuare prove per:

- *trasmissione diretta:* sonda e punto d'impulso sono posizionate in modo simmetrico sulle facce opposte della parete; risulta il tipo di trasmissione più sensibile, ma richiede l'accessibilità alla faccia interna e la conoscenza esatta dello spessore;
- *trasmissione semi diretta:* si posizionano i due punti nelle facce opposte ma non in corrispondenza simmetrica, oppure in facce ortogonali del paramento; data l'incertezza della lunghezza della linea di trasmissione risulta meno sensibile del metodo precedente;
- *trasmissione indiretta:* il punto d'impulso viene scelto sulla stessa faccia dove si trova la sonda ricevente; risulta il metodo meno sensibile perché risente soprattutto della composizione dello strato superficiale, che può essere diversa dagli strati profondi.

Generalmente, una seduta di prova consiste nella misura delle velocità in una maglia di rette fra di loro perpendicolari, in modo da ottenere una mappa dettagliata delle velocità.

In un mezzo omogeneo e isotropo si verificano, per un impulso, tre tipi di onde:

- onde longitudinali:* si generano per compressione e successiva dilatazione nella direzione di trasmissione dell'onda, sono generalmente le uniche registrate nei test;
- onde trasversali:* hanno direzione ortogonale alle precedenti e velocità di propagazione inferiore;
- onde superficiali:* sono onde a grande ampiezza con velocità di poco superiore alle onde longitudinali. Hanno ampiezza e frequenza molto influenzabili dallo stato di fessurazione e vengono facilmente riflesse dalle pareti dei vuoti. Esiste una tecnica specifica per la loro misura detta *carotaggio sonico*.

Mediante le prove soniche può essere calcolato il modulo elastico sonico E_d che in genere, per il bassissimo sforzo generato nel test, sovrastima del 10% circa il normale modulo elastico misurato su provini o carotaggi. Nota la densità ρ del materiale e fissato il modulo di Poisson ν si può ricavare dalla relazione:

$$E_d = V^2 \rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu) / (1 - \nu)$$

I test sonici possono essere molto utili per definire il diverso stato della muratura; si sono potuti individuare, per esempio, tre diversi livelli delimitati dai campi di variazione della velocità per murature in mattoni, qui riportate in assenza di analoghi risultati sulle murature in pietra:

- 1) $V < 1000$ m/s: individua murature fortemente danneggiate con presenza di grossi vuoti interni;
- 2) $1000 \text{ m/s} < V < 2000$ m/s: rappresenta la maggioranza delle murature in mattoni esistenti; valori di V inferiori ai 1500 m/s possono indicare presenza di vuoti e difetti, irregolarità nei corsi o nelle giunzioni.
- 3) $V > 2000$ m/s: indica murature accuratamente costruite e conservate con elevata resistenza a compressione, stimabile fra i 5 e 15 MPa.

Le prove *soniche* vengono effettuate con vibrazioni elastiche di frequenze variabili tra i 16 e i 20000 Hz. Il rilievo delle velocità trasmesse lungo diversi percorsi possibili all'interno della porzione muraria individuata, consente poi, impiegando determinati algoritmi per l'elaborazione, di effettuare una mappatura delle velocità (*tomografia sonica*).

Accanto a queste, le prove *ultrasoniche* utilizzano, invece, una banda di frequenza che varia da 20 kHz a 1000 MHz. Tali onde non riescono a essere trasmesse da mezzi gassosi, per cui sono sfruttate per l'individuazione di microfessure che riescono a riflettere il fronte d'onda; per contro, il segnale ultrasonico risulta altamente attenuato per via della sua lunghezza d'onda troppo piccola in confronto alle dimensioni dei componenti la muratura.

I risultati delle prove soniche si rivelano, pertanto, più facilmente leggibili e, per questo, sono generalmente più utilizzate.

Altre grandezze misurabili oltre alla velocità di propagazione sono: il contenuto di energia e la sua distribuzione nel dominio delle frequenze, i fenomeni di smorzamento, etc.

- *Georadar:*

La tecnica radar consiste nell'irradiare il mezzo di indagine con impulsi di energia elettromagnetica caratterizzati da una brevissima durata (qualche nanosecondo) e da un'elevata cadenza di emissione (decine di kHz); l'irraggiamento

viene effettuato tramite un'antenna trascinata a velocità costante lungo la linea di prospezione. Una seconda antenna, funzionante come ricevitore e solidale con quella trasmittente, rileva gli impulsi riflessi dalle superfici di discontinuità tra materiali a differente costante dielettrica³, che vengono poi trasformati dal sistema radar in segnali elettrici. Tali segnali vengono riprodotti sul monitor del sistema ed eventualmente memorizzati o stampati come pseudoimmagine (sezione tempi-distanze) della sezione indagata. Dalla rappresentazione così ottenuta è possibile evidenziare la presenza di superfici riflettenti, per esempio discontinuità nella stratificazione o cavità, e ricavare lo spessore compreso tra la superficie di prospezione e quella riflettente, applicando la seguente formula:

$$h = \frac{v_m \cdot t}{2}$$

dove h è lo spessore, t il tempo di riflessione in secondi e v_m la velocità media delle onde elettromagnetiche nel mezzo investigato.

Velocità delle onde elettromagnetiche e costante dielettrica sono legate dalla seguente formula:

$$\varepsilon = \frac{c^2}{v_m^2}$$

dove c è la velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto.

La massima profondità di indagine dipende dalla frequenza delle onde elettromagnetiche irradiate e dalla resistività del mezzo indagato.

Usualmente le indagini GPR (Ground Penetrating Radar) vengono effettuate in modalità eco utilizzando due antenne (trasmittente e ricevente) affiancate; il sistema radar consente anche di rilevare segnali utilizzando le due antenne separate.

4.1.2 Prove debolmente distruttive

- *Prove con i martinetti piatti:*

Le prove con i martinetti piatti possono essere effettuate in due modalità differenti:

- a) *con martinetto singolo, per la determinazione dello stato di sollecitazione:* si realizza un taglio orizzontale di adeguate dimensioni in direzione normale alla muratura provocando il rilascio delle tensioni. Si inserisce uno speciale martinetto piatto, realizzato con sottili lamiere in acciaio saldate, collegato ad un'apparecchiatura oleodinamica, e si aumenta gradualmente la pressione nel martinetto fino ad annullare la deformazione misurata in seguito al taglio. In

³ A titolo di esempio: l'aria ha costante dielettrica pari a 1, l'acqua a 81, il calcestruzzo ha costante dielettrica variabile da 4 a 11, il granito da 4 a 7, la sabbia bagnata da 19 a 24 mentre quella asciutta da 3 a 5.

queste condizioni la pressione raggiunta eguaglia la sollecitazione preesistente al taglio in direzione normale al piano del martinetto, a meno di una costante sperimentale che tiene conto del rapporto tra l'area del martinetto e l'area del taglio, e della rigidità propria del martinetto.

- b) *con martinetti doppi, per la determinazione della tensione di rottura e delle caratteristiche di deformabilità*: si eseguono due tagli orizzontali nella parete entro cui vengono introdotti due martinetti piatti, che permettono di applicare alla porzione di muratura interposta uno stato di sollecitazione monoassiale. Si possono quindi misurare, con estensimetri meccanici rimovibili dislocati in modo opportuno, sia le deformazioni assiali che trasversali e, incrementando la pressione fin oltre il limite elastico in prossimità della rottura, la tensione di rottura della muratura.

4.1.3 Prove distruttive

Adottate sia per la compressione che per il taglio, vengono realizzate in sito isolando il campione con dei tagli verticali per eliminare il confinamento laterale ed applicando il carico attraverso una struttura di contrasto.

Per l'esecuzione delle prove distruttive a taglio secondo tale procedura, possono efficacemente utilizzarsi gli stipiti delle aperture come superficie sulle quali applicare l'attrezzatura di contrasto.

Un'altra configurazione per la resistenza a taglio è quello di prova a compressione diagonale, che viene riprodotta in sito isolando un pannello su tre lati e imprimendo l'azione lungo le direzioni diagonali.

La descrizione delle prove è rimandata alla loro applicazione a casi specifici di studio, riportati in seguito.

4.2 Correlazione tra i risultati delle diverse procedure di prova

La sperimentazione in sito si prefigge lo scopo di determinare le caratteristiche meccaniche della muratura prima e dopo l'intervento di consolidamento in modo da poterne valutare l'efficacia. Il fine del recupero per la riabilitazione del bene sposta l'interesse verso procedure e tecnologie che alterino il meno possibile lo stato reale della muratura, sia all'origine che dopo l'intervento.

Il problema è allora quello di tarare le metodologie di prova mediante il confronto tra prove distruttive e debolmente distruttive, e tra queste e quelle non distruttive, in modo da poter stimare l'affidabilità di quest'ultime ai fini della loro applicazione.

Lo scopo è quello di mettere a punto una o più procedure che posano consentire indagini di semplice esecuzione, e che abbiano nel contempo pregi di rapidità ed economicità. Limitando il danneggiamento locale del manufatto, tali tecniche d'indagine consentirebbero, infatti, il monitoraggio della struttura, ossia il

controllo delle sue caratteristiche meccaniche nel tempo e, quindi, delle eventuali riduzioni di efficacia dell'intervento di consolidamento.

A tale proposito sono disponibili alcuni studi sul confronto tra i risultati ottenuti da prove di compressione dirette (distruttive) e prove con i martinetti piatti, che hanno mostrato un buon accordo sperimentale. I risultati del confronto vengono riportati nel prossimo paragrafo.

Altri studi sono tuttora in corso sulla possibilità di correlazione tra i valori di resistenza ricavati dalle prove con i martinetti piatti e le velocità di trasmissione delle onde soniche. I risultati di questo confronto sono riportati nella sezione dedicata alle prove sperimentali volte a valutare l'efficacia delle iniezioni.

Se per la valutazione della resistenza a compressione la correlazione tra procedure a diverso grado distruttivo sembra aver intrapreso la giusta direzione, non è stata ancora stabilita un'analoga opportunità per la resistenza a taglio, la cui determinazione resta ancora legata a procedure di prova a carattere distruttivo. Lo "shove test", procedura parzialmente distruttiva⁴ messa a punto per misurare la resistenza a taglio dell'interfaccia malta-mattone, oltre ad avere validità limitata alle murature con corsi regolari (difficile condizione da ritrovare nelle murature di pietra) può infatti fornire valori di resistenza fortemente sovrastimati.

4.2.1 Prove a compressione: confronto tra prove distruttive e debolmente distruttive

Alcune esperienze di prove in sito a compressione *parzialmente distruttive e distruttive* sono state effettuate dall'U. O. di Padova in quattro cantieri nella provincia di Trento. Le tipologie murarie riscontrate presentano diverse caratteristiche e tessitura: pietra listata (Rovereto), ciottoli arrotondati con malta di pessima qualità (Calliano), murature stratificate con pietra listata ai piani bassi e ciottoli a quelli superiori (Mezzolombardo e Mezzocorona).

In questo paragrafo vengono forniti alcuni risultati relativi alle prove eseguite, insieme alla descrizione della procedura di prova adottata nel caso specifico.

Per l'esperienza in oggetto sono stati messi a disposizione alcuni edifici su cui si sono potute effettuare *prove distruttive*, sottoponendo a compressione direttamente i pannelli ricavati dalle pareti murarie. I campioni di grande dimensione hanno necessitato di un notevole lavoro di preparazione: i muri degli edifici sono stati divisi in pannelli isolati fra di loro da tagli verticali, per evitare l'effetto di contenimento, e nelle parti superiore ed inferiore si sono realizzati cordoli di ripartizione del carico in calcestruzzo, alti circa 40 cm, con la tecnica del cuci e scuci, in modo da non recare disturbo alla muratura. Per quanto riguarda le dimensioni si è cercato di adeguarsi il

⁴ La tecnica consiste nel rimuovere un mattone dalla tessitura per poter inserirvi il martinetto idraulico che imprime la forza di scorrimento voluta; è necessario, inoltre, eliminare il giunto verticale sul lato opposto del mattone, in modo che il carico totale applicato venga trasferito per solo taglio sulla lunghezza del singolo mattone. Alla prova di scorrimento viene accoppiata una prova con martinetti doppi, posti a cavallo del mattone individuato, in modo da poter valutare la compressione agente durante la prova a taglio.

più possibile a quanto prescritto dalle normative riguardo le prove di laboratorio sui pannelli murali, con attenzione di evitare effetti di scala legati alle dimensioni dei conci.

Come attrezzatura per il carico si è realizzato un telaio autocontrastato a quattro colonne. Nella parte superiore ed inferiore si sono utilizzate due travi HE ad ali lunghe parallele rinforzate, disposte trasversalmente alla muratura in prossimità dei due fianchi. Apposite scanalature forniscono la sede per quattro barre d'acciaio del diametro di 60 mm, filettate alle estremità in modo da permettere il serraggio tramite otto ghiera, e realizzare così un sistema di contrasto chiuso su se stesso. L'applicazione del carico è stata affidata ad un martinetto piatto 100x50x5 cm, interposto tra il cordolo in calcestruzzo superiore ed il telaio, dotato di un'opportuna piastra di ripartizione.

Per la valutazione delle deformazioni sono stati utilizzati trasduttori induttivi di spostamento disposti in senso verticale ed orizzontale nonché passanti lo spessore attraverso un apposito foro e posizionati come mostrato in fig.1.

Le prove sono state effettuate applicando al campione uno stato di tensione monoassiale crescente, attraverso l'esecuzione di un numero di cicli di carico e scarico prestabilito a diversi livelli di sollecitazione, al termine dei quali si portavano a rottura i campioni.

In parallelo, si sono effettuate prove di compressione con i *martinetti piatti*, messo a punto in questa occasione per le murature in pietra. La scadente qualità della muratura, priva di coesione, non ha permesso l'effettuazione di prove in laboratorio su campioni estratti oppure ricostruiti.

Vista la disomogeneità dei paramenti, si sono dovuti realizzare un martinetto semicircolare di dimensioni adatto a coprire una zona sufficientemente rappresentativa della sezione muraria, e di un'adeguata mototroncatrice a disco diamantato per eseguire il taglio di dimensioni adatte al martinetto ed in grado di lavorare su materiali fortemente eterogenei.

I risultati dello stato di sollecitazione e delle caratteristiche di deformabilità sono riportati in tab.1

Per una loro chiara interpretazione si può fare riferimento alla fig. 2, dove si riportano i diagrammi sollecitazione-deformazione ottenuti da queste prove e, in punto linea il valore della sollecitazione presente.

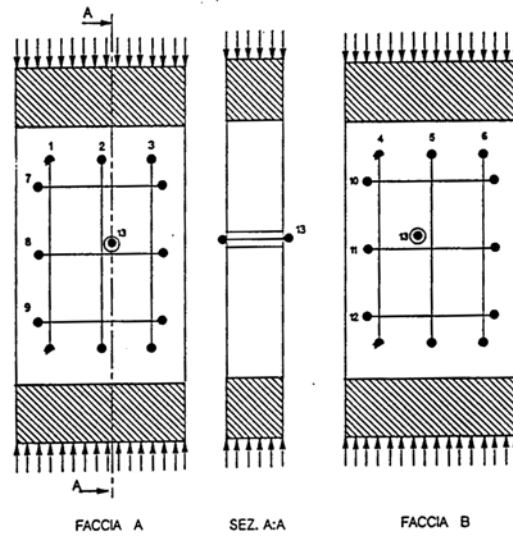


Fig. 1 - Disposizione della strumentazione nelle prove a compressione diretta.

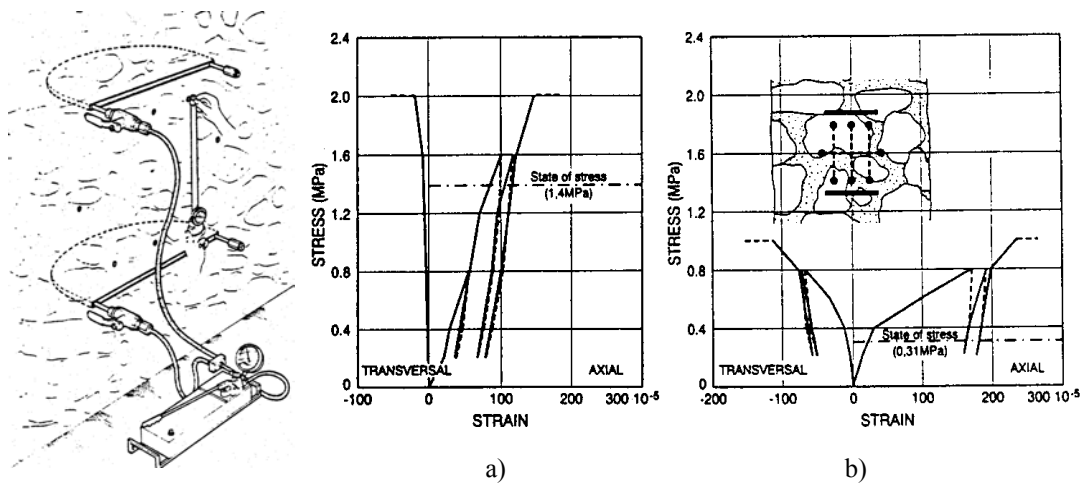


Fig. 2 - Prova con i martinetti piatti: Schema di prova e risultati ottenuti per due tipologie di muri.

In fig. 2, il diagramma a) si riferisce ad una muratura con proprietà meccaniche piuttosto buone, su cui però grava uno stato di sollecitazione piuttosto elevato, mentre il diagramma b) si riferisce ad una muratura scadente che, anche se sollecitata da una sollecitazione poco elevata, si trova in condizione statiche critiche in quanto è prossima al punto di diminuzione della rigidità e quindi al collasso strutturale.

Tab. 1: Caratteristiche di resistenza e deformabilità ottenute dalle prove con martinetti piatti.

Prove con martinetto piatto per la determinazione dello stato di sollecitazione

N. Prova	Ubicazione dei punti di prova	Valore sollecitazione rilevato (MPa)
Edificio di S. Michele Mezzocorona		
M1	muro di spina (piano terra)	1.40
M2	muro perimetrale (I piano)	0.12
M3	muro di spina (I piano)	0.17
M4	muro di spina (II piano)	0.17
M5	muro perimetrale (piano terra)	0.00
Edificio di Mezzolombardo		
M6	muro di spina (piano terra)	0.38
M7	muro di spina (piano terra)	0.12
Edificio di Rovereto		
M12	pilastro scala (piano terra)	0.31

Prove con martinetto piatto per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità'

N. Prova	Ubicazione dei punti di prova	E	E	E	E	E	E
		0.0-0.4 (MPa)	0.4-0.8 (MPa)	0.8-1.2 (MPa)	1.2-1.6 (MPa)	1.6-2.0 (MPa)	2.0-2.4 (MPa)
Edificio di S. Michele Mezzocorona							
M1B	muro di spina (piano terra)	1290	1540	2670	1380	1540	-
M2B	muro perimetrale (I piano)	1660	1430	1140	680	630	-
M3B	muro di spina (I piano)	2220	3330	2220	2220	1740	890
M4B	muro di spina (II piano)	1430	1110	1330	800	-	-
M5B	muro perimetrale (piano terra)	660	530	300	-	-	-
Edificio di Mezzolombardo							
M6B	muro di spina (piano terra)	1140	2670	800	740	380	-
M7B	muro di spina (piano terra)	350	1053	-	-	-	-
M8B	muro di spina (piano terra)	660	660	250	-	-	-
M9B	muro di spina (I piano)	1080	1330	780	-	-	-
M10B	muro di spina (I piano)	340	370	-	-	-	-
Edificio di Rovereto							
M11B	muro perimetrale (piano terra)	2500	1430	1600	780	-	-
M12B	pilastro scala (piano terra)	1290	280	-	-	-	-
M13B	muro di spina (I piano)	294	170	-	-	-	-
M14B	muro perimetrale (piano terra)	1020	1250	560	290	-	-
Edificio di Calliano							
M15B	muro perimetrale (piano terra)	1180	570	350	-	-	-
M16B	muro di spina (piano terra)	490	240	-	-	-	-
M17B	muro di spina (piano terra)	2350	360	-	-	-	-

In fig. 3 e 4 ed in tab. 2 si mettono a confronto i diagrammi sollecitazione-deformazione relativi a una prova con martinetti piatti e una di compressione su una parete a doppio paramento, con cattiva connessione dei due strati verticali. I valori del modulo elastico in tabella si riferiscono all'intervallo di sollecitazione in cui è stato calcolato.

La similitudine dei due andamenti indica un buon accordo tra le due procedure.

La regolarità dei diagrammi sperimentali mostra, inoltre, che le modalità di prova adottate permettono di limitare gli inevitabili effetti dovuti all'eterogeneità delle murature.

Si può anche aggiungere che, nella prova del martinetto piatto, l'effetto di contenimento della muratura circostante la zona interessata dalla prova risulti trascurabile, probabilmente a causa della scarsa qualità della muratura, che possiede bassa resistenza ed elevata deformabilità.

Infine, i risultati mostrano che la resistenza ultima ottenuta con il metodo dei martinetti piatti è lievemente più elevata di quella ricavata dalla prova a compressione diretta; probabilmente ciò è dovuto al fatto che la prova con i martinetti interessa una porzione limitata dello spessore del muro, per cui si è risentito in maniera ridotta dell'effetto di spanciamento tra i due paramenti che compongono la muratura.

Il giudizio positivo espresso non giustifica all'uso indiscriminato della prova con martinetti piatti; soprattutto nei casi, frequenti nelle murature in pietra, di apparecchiature incerte e disordinate, la prova richiede comunque un'adeguata accuratezza di operatori esperti.



Fig. 3a - Esempio di prova a compressione diretta.



Fig. 3b - Esempio di prova con martinetti piatti doppi.

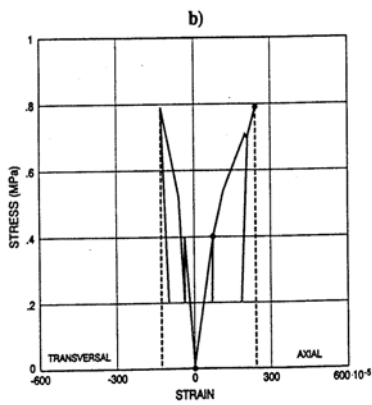


Fig.4a - Risultati della prova a compressione diretta.

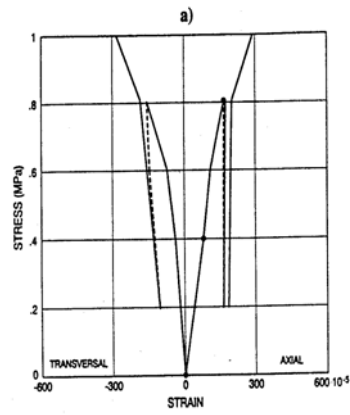
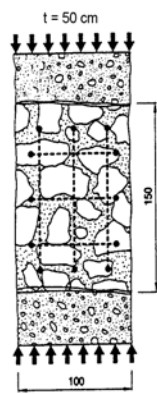
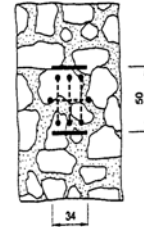


Fig. 4b - Risultati della prova con i martinetti piatti.



Tab. 2: Confronto tra i risultati delle prove con martinetti piatti (FJ) e distruttive (DT).

(MPa)	Campione 1		Campione 2	
	diretta	martinetti	diretta	martinetti
E_1	490	490	290	240
E_2	240	240	170	-
σ_{rott}	1.0	1.0	0.8	0.6

5. LE INIEZIONI

5.1 Aspetti generali

La tecnica di consolidamento delle iniezioni è appropriata, in generale, in presenza di lesioni diffuse e per murature in pietra, generalmente dotate di percentuali relativamente elevate di vuoti interni. È essenziale, infatti, che esista la “possibilità fisica” di far penetrare all’interno del corpo murario le miscele leganti che esercitano il loro ruolo di miglioramento delle prestazioni meccaniche del muro, sia eliminando in parte le cavità (fessure o vuoti), sia rafforzando i legami fra i vari componenti della muratura stessa.

È un metodo di consolidamento definito “passivo” perché non richiede l’esecuzione di operazioni tali da alterare l’equilibrio o l’aspetto esteriore della struttura.

Per queste sue caratteristiche costituisce una tecnica di consolidamento estremamente diffusa negli edifici storici di particolare pregio artistico o architettonico, ove sia necessario mantenere la struttura e l’aspetto originario.

L’intervento consiste nel far penetrare la miscela legante, in pressione o per colata, a seconda dello stato di degrado della muratura, nei vuoti presenti, in modo tale da ripristinarne o migliorarne le caratteristiche meccaniche.

Le miscele sono costituite da acqua e leganti inorganici (calci, cementi) o da miscele organiche (resine). I leganti citati presentano un diverso grado di compatibilità con il supporto originario, soprattutto in relazione alla qualità delle malte esistenti, e conferiscono un diverso comportamento, in termini di rigidità e resistenza, alla muratura consolidata.

È evidente che l’efficacia di un tale tipo di intervento dipende dalla possibilità della miscela iniettante di permeare e diffondersi sufficientemente all’interno della massa muraria in modo da raggiungere tutti gli interstizi presenti nel supporto.

Il muro deve essere quindi sufficientemente iniettabile, ossia deve presentare una tessitura con sufficiente continuità tra i vuoti e, allo stesso modo, la miscela deve essere progettata in modo da garantire una sufficiente penetrabilità, ossia un’adeguata fluidità (né scarsa, né eccessiva) in relazione ai tempi di esecuzione richiesti. In tal senso, le caratteristiche reologiche della miscela iniettante possono essere migliorate con l’aggiunta di particolari additivi, dosati anche in funzione del grado di assorbimento d’acqua del supporto (malta esistente e conci).

5.2 Materiali impiegati

5.2.1 Miscele per iniezioni

Le caratteristiche generali richieste ai materiali utilizzati per le iniezioni sono le seguenti:

- *Caratteristiche meccaniche*: si richiede generalmente una resistenza meccanica e caratteristiche di deformabilità (modulo elastico e coefficiente di Poisson) simili a quelle della muratura originaria;
- *Penetrabilità*: per ottenere un'elevata penetrabilità della miscela i materiali impiegati devono presentare omogeneità ed assenza di grumi, granulometria fine, e scarsa viscosità allo stato fluido;
- *Presa e indurimento*: il tempo di presa deve essere adeguato alle procedure d'impiego e quindi non deve essere eccessivamente breve o prolungato; l'indurimento può essere richiesto anche alle basse temperature; il ritiro dev'essere assente o limitato;
- *Proprietà chimiche*: le caratteristiche chimiche devono rimanere stabili nel tempo e le reazioni irreversibili; è opportuno che si instaurino forti legami chimici con i materiali esistenti;
- *Caratteristiche igroscopiche*: si richiede che la miscela non risulti solubile in acqua, non vari il proprio volume con l'umidità e non crei una barriera alla libera circolazione del vapore;
- *Caratteristiche di economia*: il materiale deve naturalmente risultare poco costoso e di facile reperibilità ed impiego.

L'indisponibilità di materiale che possa riunire insieme tutte queste qualità rende necessaria una scelta in base a quanto richiesto dall'intervento specifico e dalle procedure adottabili.

I prodotti attualmente utilizzati per il consolidamento tramite iniezioni si possono dividere in due categorie principali:

- a) miscele inorganiche;
- b) miscele a base di resine sintetiche.

Alcune ricerche sono risalite al tipo di miscela più idoneo da utilizzare in funzione delle dimensioni delle lesioni da riparare, prevedendo materiali più fluidi, come le resine epossidiche, per lesioni variabili fra 0.2÷0.3 cm, prodotti speciali a base di cemento o miscele binarie acqua-cemento-sabbia per lesioni fra 0.4÷0.5 cm e latte di cemento per lesioni maggiori di 0.6÷0.7 cm.

La base di queste miscele sono i comuni leganti utilizzati normalmente in edilizia cioè calce (aerea ed idraulica) e cemento.

Generalmente i leganti aerei non vengono mai impiegati da soli ma accompagnati da materiali che possano permettere loro di maturare anche in presenza d'acqua. Altri, come l'argilla, vengono impiegati come carica, per conferire alle miscele proprietà come la tixotropia, ossia la possibilità di aumento temporaneo della viscosità e dell'adesione alle superfici.

Altri tipi di cariche o additivi si possono usare per conferire alle miscele diverse qualità o ridurre certi difetti: può essere necessario infatti aumentare le caratteristiche meccaniche della miscela, migliorare la coesione, ridurre il ritiro o la viscosità, regolare i tempi di presa e l'assorbimento d'acqua, etc..

I principali additivi utilizzati possono essere di tipo espansivo, accelerante o ritardante, fluidificante e aerante. Come cariche, oltre alla citata argilla possono venire impiegate sabbie, polveri di roccia, cocchio pesto, ceneri volanti e pozzolana; queste ultime possiedono anche proprietà idrauliche.

Importanza fondamentale sull'iniettabilità di queste miscele rivestono la dimensione degli aggregati solidi, in rapporto alle dimensioni delle fessure, e la quantità d'acqua d'impasto.

Esistono dati discordanti forniti dai vari ricercatori sul rapporto minimo tra dimensione delle fessure e diametro massimo delle componenti la miscela: si va da un valore del rapporto pari a 5 ad un più ottimistico 1.5. Questo perché i fattori che influenzano i risultati sono talmente numerosi (tipo di muratura, grado di fessurazione sul quale si va ad intervenire, composizione della miscela e particolare tecnica d'iniezione adottata) da rendere impossibile la formulazione di una regola generale.

Per quanto riguarda l'acqua d'impasto, il suo dosaggio deve essere tale da permettere l'idratazione del legante e, soprattutto, da conferire alla miscela la necessaria fluidità richiesta per il pompaggio e la penetrazione completa della massa muraria, evitando ovviamente gli eccessi. Questi possono essere dannosi in quanto si può provocare un ritiro eccessivo, che può limitare il contatto della miscela con le pareti delle cavità oppure, a causa dell'evaporazione, un'elevata porosità. In questi casi può essere necessario l'uso degli appositi additivi.

Le miscele a base di materiali inorganici più usate si possono dividere in due categorie:

- a) *Miscela a base di cemento*: sono generalmente le più utilizzate nelle iniezioni nei casi in cui sia richiesta un'elevata resistenza meccanica e non ci siano incompatibilità con altri materiali. Viene usato generalmente il cemento Portland oppure si può impiegare cemento pozzolanico o d'alto forno. Il rapporto acqua/cemento varia tra 0.8÷1.2. La granulometria, a volte eccessiva, può limitare l'adesione al substrato esistente, per cui come aggregato viene può essere adoperata della polvere di marmo per una quantità pari al 10% del peso del cemento. Un dosaggio eccessivo d'acqua può provocare fenomeni accentuati di ritiro e bleeding a cui si fa fronte caricando la miscela con polveri silicee o pozzolaniche. La resistenza a

compressione raggiungibile da queste miscele può arrivare fino a circa 40 MPa.

- b) *Miscela a base di calce*: si utilizzano quando non vengono richieste elevate resistenze meccaniche oppure in alternativa alle miscele a base di cemento quando quest'ultimo risulta incompatibile con i materiali della muratura. La calce viene generalmente utilizzata sotto forma di grassello e realizza una buona diffusione in seno alla muratura. Per contro, presenta elevato ritiro e la possibilità dei finissimi grani di occludere i fori provocando ristagni d'acqua pericolosi in caso di gelo e disgelo. Queste miscele tuttavia, presentano una maggiore affinità con le caratteristiche meccaniche e fisiche dei materiali componenti le murature esistenti, tra cui la resistenza, il modulo elastico e il coefficiente di dilatazione termica. Un'opportuna additivazione per far fronte agli aspetti negativi sopra citati, ne consente l'impiego con la soddisfacente efficacia.

Le miscele a base di resine possono essere:

- a) *miscele a base di resine organiche*, per ottenere resistenze finali superiori o tempi di presa più rapidi;
- b) *miscele reoplastiche* (malte aventi elevata fluidità e nel contempo alto potere coesivo, contengono generalmente additivi fluidificanti e agenti anti-bleeding) o espansive per ottenere elevate proprietà antiritiro.

5.3 Modalità esecutive

5.3.1 Prescrizioni normative

Per la conoscenza dei criteri di applicazione utilizzati in passato può essere utile far riferimento alle regole ed alle indicazioni fornite dalle normative tecniche più indietro considerate, le quali rappresentano di fatto l'unico mezzo guida a disposizione dei progettisti per far fronte al problema delle riparazioni degli edifici in muratura.

Si riportano interamente i punti coinvolti per la particolare tecnica considerata, allo scopo di evidenziare i limiti e le innovazioni che hanno coinvolto nel tempo la normativa nazionale sulle riparazioni; il testo è tratto dalle sole pubblicazioni che dedicano un più ampio spazio alla descrizione della tecnica in oggetto.

Tale excursus storico della normativa è utile per comprendere i metodi e le tecnologie con cui gli addetti del settore si sono trovati ad operare nel passato e, quindi, riportando tale condizione ai giorni nostri, la situazione corrente degli edifici consolidati che, nell'eventualità di nuovi dissesti, i tecnici di oggi o di domani potranno trovarsi a riaffrontare.

Legge Regionale Friuli Venezia Giulia, DT 2 del Novembre 1977:

1.2.2.1 Iniezioni di malta cementizia:

L'obiettivo dell'iniezione è quello di far penetrare la miscela legante, lentamente e sotto bassa pressione, in tutte le fessure, cavità e vuoti del muro danneggiato.

In tal modo, a presa avvenuta, gli elementi lapidei risultano tra di loro efficacemente collegati migliorando sensibilmente le caratteristiche meccaniche della muratura.

La miscela, costituita essenzialmente da malta fluida di cemento ed additivi, è iniettata nel muro attraverso tubi inseriti nella muratura.

Dal tubo di entrata la miscela fluisce radialmente in tutte le direzioni.

La miscela dev'essere spinta fino agli estremi contorni del corpo fessurato già nella prima fase dell'operazione di iniezione. Ciò si può ottenere usando miscele con viscosità molto ridotta, oppure composte da aeranti e da cementi che riducono il contenuto d'acqua, oppure usando riempitivi inerti fini.

L'iniezione dei muri nella pratica di ripristino è attuata attraverso brevi condotti tubolari lunghi circa 15 cm e di $\frac{3}{4}$ " di diametro, inserite in aperture di circa 40 mm di diametro, precedentemente preparate per mezzo di trapanazione; le aperture sono praticate ad una distanza variabile da 40 a 200 cm l'una dall'altra, e tale distanza dipenderà dalla frequenza delle fessure e dalle porosità del muro.

Nel caso di muri sottili, è preferibile rimuovere l'intonaco, mettere a giorno i punti di giunzione dei blocchi, e porre in opera tubi di iniezione di 15 cm di lunghezza senza praticare particolari aperture, ma inserendoli semplicemente nei punti in cui si trovano fessurazioni o cavità.

Le perforazioni dovranno avere una profondità di almeno 10 cm oltre la profondità di penetrazione dei condotti tubolari. Lo schema di perforazione dev'essere abbastanza fitto per garantire la sovrapposizione delle aree di iniezione.

In pratica ciò si controlla lasciando fuoriuscire la miscela legante dalle aperture immediatamente adiacenti.

Prima di effettuare l'iniezione i punti di giunzione e le fessure del muro devono essere sigillate con malta di cemento.

Nella prima fase di iniezione si inietta solo acqua pura, al fine di inumidire opportunamente le cavità, i canali di diffusione e le fessurazioni per facilitare l'iniezione di miscela più densa.

L'iniezione di muri di pietra si esegue di solito con miscela la cui composizione solidi-acqua è 0.8/1.0 oppure 1.0/1.0 e con una pressione fino a 3 atmosfere.

L'iniezione di muri di mattoni, normalmente riguardante le sole fessurazioni, è effettuata con una miscela la cui composizione solidi-acqua è circa 1.0/2.0.

Quando l'apertura di iniezione non accetta più miscela, la pressione viene elevata da 3 a 4 atmosfere per agevolare il drenaggio dell'acqua.

La quantità di cemento per iniettare 1m³ di muro di pietra varia da 80 a 120 kg.

2.1 Caratteristiche meccaniche delle murature consolidate con iniezioni di malta cementizia:

- *Murature in laterizio:*

Vanno distinti due casi:

- iniezioni riguardanti le lesioni e le parti di muro circostanti;
- iniezioni che riguardano l'intero elemento murario.

Nella fig. 1 è riportato un diagramma relativo ad elementi di muro iniettati solamente nell'area della fessurazione.

Il diagramma mostra un esempio di come vari la "resistenza caratteristica" τ_k (resistenza al taglio in assenza di carichi verticali) al variare della resistenza a compressione delle malte; mostra anche che l'incremento di τ_k ottenuto con le iniezioni è maggiore nel caso di muri costruiti con malte di cattiva qualità.

Nel caso di iniezioni riguardanti l'intero elemento murario si ottengono aumenti di τ_k maggiori che nel caso di cui sopra. Ad esempio: con malte di resistenza a compressione pari a 33 kg/cm^2 τ_k aumenta con l'iniezione da 1.30 a 2.20 kg/cm^2 .

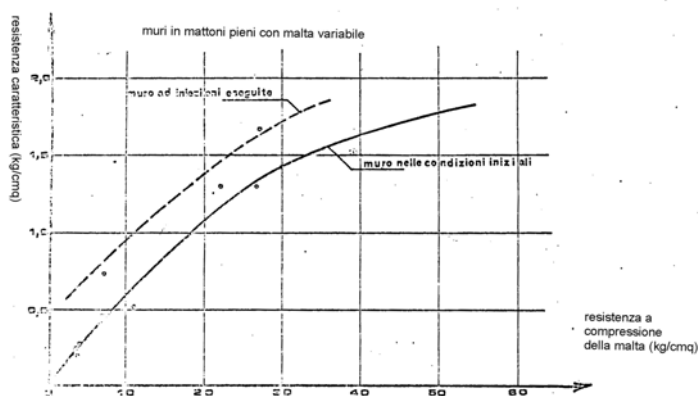


fig. 1

- *Murature in pietrame:*

In questo caso le iniezioni di regola vengono estese all'intero elemento murario.

Prove di laboratorio hanno dimostrato che in murature di pietrame iniettate con malta cementizia, secondo le composizioni e le tecniche già in uso, sono stati raggiunti valori di τ_k fino a 0.80 kg/cm^2 e ciò indipendentemente dal valore iniziale di τ_k .

Tuttavia si consiglia di adottare nelle verifiche della sicurezza alle azioni sismiche valori di τ_k minori e cioè pari a 0.70 kg/cm^2 .

Decreto 2 Luglio 1981:

3.4.2.2 Iniezioni di miscele leganti:

Le iniezioni possono essere eseguite con miscele cementizie, semplici o additivate, oppure a base di resine organiche.

Le miscele a base di resine saranno scelte adottando, in generale, prodotti a basso valore di modulo elastico quando l'ampiezza media delle lesioni è piccola e a più elevato valore di detto modulo per riempimenti di zone estese.

Circolare 30 Luglio 1981:

3.3.2 Iniezioni di miscele leganti:

L'adozione di iniezioni di miscele leganti mira al miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura da consolidare.

A tale tecnica, pertanto, non può essere affidato il compito di realizzare efficaci ammorsature dei muri e quindi di migliorare, se applicata da sola, il primitivo schema strutturale.

a) Miscela a base di legante cementizio:

La miscela di legante deve possedere le seguenti proprietà:

- buona fluidità*
- buona stabilità*
- tempo di presa opportuno*
- adeguata resistenza*
- minimo ritiro.*

Tali proprietà sono agevolmente conseguibili con le sospensioni cementizie in acqua, semplici o con sabbie molto fini a granuli arrotondati (di fiume o di spiaggia), caratterizzate da valori del rapporto acqua-cemento in genere variabili da 0.6 a 1.2 e migliorate con l'aggiunta di additivi fluidificanti ed espansivi antiritiro. Il cemento deve essere di granulometria molto fine.

La scelta della pressione di immissione va fatta con grande attenzione, perché le dilatazioni trasversali prodotte dal fluido in pressione, a causa delle eventuali discontinuità della muratura nei piani paralleli ai paramenti, potrebbero modificare negativamente la configurazione di equilibrio raggiunta dalla costruzione.

In ogni caso le iniezioni devono essere fatte a bassa pressione, eventualmente ricorrendo a fasi successive con pressioni via via crescenti, e vanno condotte iniziando dal basso e procedendo per simmetria.

È assolutamente sconsigliabile usare questa tecnica di ripristino nelle murature incoerenti e caotiche senza procedere alla preventiva loro incamiciatura.

La tecnica operativa può essere articolata nelle seguenti fasi di lavoro: scelta dei punti in cui praticare i fori, effettuata in funzione della diffusione delle fessure e della porosità del muro; in genere sono sufficienti 2-3 fori per m²;

asportazione dell'intonaco lesionato e stuccatura con malta cementizia delle lesioni per evitare risorgenze di miscela;

esecuzione dei fori con perforazioni di diametro fino a 40 mm, eseguite con trapani o sonde rotative;

posizionamento nei fori degli ugelli di immissione e successiva sigillatura con malta di cemento;
immissione preliminare di acqua e leggera pressione, allo scopo di effettuare il lavaggio delle sezioni filtranti e di saturare la massa muraria;
iniezione della miscela, in genere iniziata in zone perimetrali più basse.

Nel caso di dissesti localizzati in zone limitate può risultare conveniente risanare dapprima a bassa pressione queste zone e poi operare a pressione più elevata, nelle zone rimanenti.

b) Miscela a base di resine organiche:

Stante la forte dipendenza, per il buon esito dell'operazione, dal dosaggio dei componenti base e dalle condizioni di esecuzione, si consiglia l'uso delle iniezioni di miscela a base di resine organiche (possibilmente epossidiche) ai soli casi in cui risulti dimostrata la convenienza economica e si possa fare ricorso ad operatori specializzati.

La tecnica operativa resta, comunque, non dissimile da quelle già illustrate per le iniezioni cementizie alla quale si rimanda.

Circolare 10 Aprile 1997:

La circolare riprende, nell'allegato 3 al punto 3. *Iniezioni di miscela e leganti* la tecnica delle iniezioni esattamente nei modi e nei termini espressi dalla circolare del 1981.

Come accennato in precedenza, le norme forniscono indicazioni generali, comunque utili per l'esecuzione, sull'applicazione delle tecniche, ma rimangono molto carenti per ciò che riguarda i criteri di valutazione di efficacia delle stesse.

5.3.2 Tecnica di esecuzione

L'esecuzione delle iniezioni risulta un'operazione articolata che richiede attenzione nelle diverse fasi in cui si esplica. Esse sono: preparazione delle parete, perforazione e inserimento delle cannule, lavaggio e imbibizione della muratura, iniezione. Le diverse fasi possono assumere caratteristiche differenti a seconda della miscela e della tecnica adottate.

Di seguito vengono sintetizzate le fasi successive per una corretta esecuzione dell'intervento:

1) *Preparazione della parete:*

- *asportazione dell'intonaco:* generalmente la parete si presenta in cattivo stato e con essa l'eventuale strato d'intonaco che l'avvolge; si rende quindi necessaria la sua rimozione che viene effettuata manualmente o con ausilio di utensili;

- *pulitura della parete*: se la miscela da iniettare non è di origine organica, dopo l'asporto dell'intonaco si pratica un lavaggio della superficie con acqua in modo da eliminare eventuali sostanze solubili come il gesso, o altre sostanze insolubili combinando il lavaggio con azioni meccaniche. Il lavaggio può essere fatto con getti d'acqua a bassa od alta pressione, ponendo attenzione, in quest'ultimo caso, di non danneggiare ulteriormente la muratura; in alternativa, si possono eseguire getti di vapore saturo a temperatura di $150^{\circ}\div 200^{\circ}$ e pressione di $5\div 10$ atm. Anche in questo caso occorre una particolare attenzione per evitare che la muratura subisca un eccessivo shock termico che disgrega le zone superficiali. Nel caso di murature particolarmente delicate è possibile eseguire il lavaggio con acqua nebulizzata in grado di sciogliere depositi a base di solfato di calcio e, se miscelata con appositi tensioattivi, croste nere più compatte; tale operazione richiede però molto tempo e risulta quindi piuttosto costosa. Particolare cura va portata alla pulizia dei giunti e delle lesioni. In alternativa al lavaggio possono essere effettuate pulizie meccaniche con spazzole, aria compressa oppure sabbiature o, in presenza di particolari sostanze lavaggi chimici. Infine si ricorda che per edifici di particolare pregio artistico si possono effettuare impacchi con sostanze assorbenti come la sepiolite.
- *stilitura dei giunti e sigillatura delle fessure*: per evitare la fuoriuscita della miscela durante l'operazione di iniezione è necessario sigillare tutte le fessure ed i giunti deteriorati presenti in superficie. E' bene utilizzare malte di calce e sabbia o calce e cemento con caratteristiche di deformabilità il più possibile simili alla malta della murature. Sono anche in uso stucchi speciali e adesivi strutturali scelti tra la vasta produzione industriale.

2) *Perforazione e sistemazione dei tubetti*:

- *ubicazione e geometria dei fori*: prima di eseguire le perforazioni va studiata attentamente la loro ubicazione e geometria (diametro, profondità e inclinazione). Risulta perciò importante determinare il raggio d'azione del foro cioè la massima distanza dal foro raggiungibile dalla miscela. Per fare ciò si pratica nella muratura un foro principale da cui sarà introdotta la miscela ed una serie di altri fori a distanze diverse. Durante l'iniezione si chiudono i fori da cui man mano esce la miscela finché il processo si interrompe. La distanza dell'ultimo foro otturato dal foro principale fornisce il raggio d'azione cercato. Determinato tale valore è bene distribuire i fori su vertici di triangoli equilateri di lato uguale il doppio, riuscendo così ad interessare un'area maggiore, come schematizzato in fig. 5. Si raggiungono migliori risultati con un numero elevato di fori di piccolo diametro piuttosto che pochi di grosso diametro; quest'ultimo può variare tra i 10 e 30 cm in base al tipo di miscela iniettata. Infine, visto che

generalmente l'operazione si esegue solo su una faccia del paramento, la profondità del foro deve essere spinta fra i 2/3 e i 3/4 dello spessore e mai di valore inferiore ai 10 cm, dando al foro una pendenza dall'alto verso il basso.

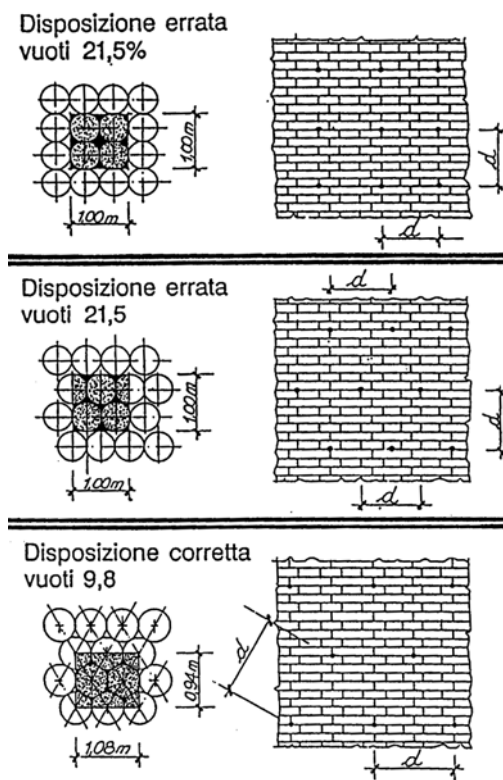


Fig. 5 - Valutazione della migliore distribuzione dei fori.

- *realizzazione dei fori*: decisa la geometria e la localizzazione dei fori si procede alla loro realizzazione. È opportuno utilizzare perforatrici a rotazione, in particolare carotiere, in modo da non trasmettere alla struttura vibrazione e scuotimenti dannosi. Sono da evitare trapani a roto-percussione o percussione.
- *posizionamento dei tubetti di rabbocco*: nei fori praticati vanno inseriti i tubetti che possono essere costituiti da rame, alluminio o resine sintetiche. Generalmente sono previsti attacchi per l'innesto rapido del tubo di mandata, ed è bene lasciare fuoriuscire il tubetto di una certa quantità in modo da garantire una certa sovrappressione al termine dell'operazione. Infine, vanno sigillati alla parete con malta a presa rapida sia per evitare l'espulsione durante l'iniezione che per evitare l'uscita della miscela nella giunzione.

- 3) *Lavaggio e imbibizione della parete*: nel caso venga utilizzata una miscela a base di calce o cemento risulta necessario lavare la parete e saturarla d'acqua attraverso i tubicini appena disposti. Si riesce così ad asportare detriti e polvere creati nella fase di perforazione, che possono limitare l'aderenza della miscela; inoltre, saturando la muratura, si evita l'assorbimento di questa di parte dell'acqua del materiale iniettante, che può alterare il processo d'idratazione. Questa operazione, inoltre, mette in evidenza eventuali vie di fuga per la miscela non individuate e sigillate precedentemente.
- 4) *Esecuzione delle iniezioni*:
- *Tecniche di iniezione*: a seconda delle modalità di introduzione della miscela nella massa muraria si possono avere tre metodi diversi di intervento:
 - a) *metodo di iniezione per pressione*: la miscela penetra attraverso i fori muniti di iniettori collegati ad una pompa idraulica o ad aria compressa che la spingono fino a diffondersi nella massa muraria ad una pressione adeguata alle dimensioni delle fessure ed al tipo di miscela, come schematizzato in fig. 6.b. L'immissione avviene generalmente iniziando dalle zone laterali inferiori per poi proseguire verso il centro; l'operazione va poi ripetuta per gli strati superiori fino alla sommità.
 - b) *metodo di iniezione per gravità*: se la muratura risulta in uno stato talmente danneggiato da non potere sopportare sovrappressioni o perforazioni si fa penetrare la miscela dall'alto attraverso le lesioni o cavità create, asportando materiale deteriorato come illustrato in fig. 6.a; questo metodo non permette l'occlusione di tutti i vuoti ma solo delle lacune di più grande dimensione.
 - c) *metodo di iniezione per depressione*: si sigillano preventivamente le fessure superficiali con malta a presa rapida; vengono posizionati gli iniettori dei quali, quelli inferiori vengono collegati al contenitore della miscela, mentre in quelli superiori viene creato il vuoto fino a quando non inizia a fuoriuscire la miscela per risalita, dopodiché vengono chiusi. Sono applicabili solo con materiali molto fluidi e quindi, in modo particolare, alle resine sintetiche.
 - *Pressione d'iniezione*: nel primo metodo descritto risulta molto importante la pressione esercitata per iniettare la miscela; una pressione insufficiente non permette, infatti, di occludere completamente i vuoti, mentre una pressione elevata può recare danno alla muratura ed intrappolare bolle d'aria che impediscono alla miscela di saturare i vuoti, come mostrato in

Fig. 7. Il valore ottimale si determina per tentativi partendo da valori di 1 atm per poi salire gradualmente fino ad un limite massimo di 6 atm, da applicare solo in casi particolari.

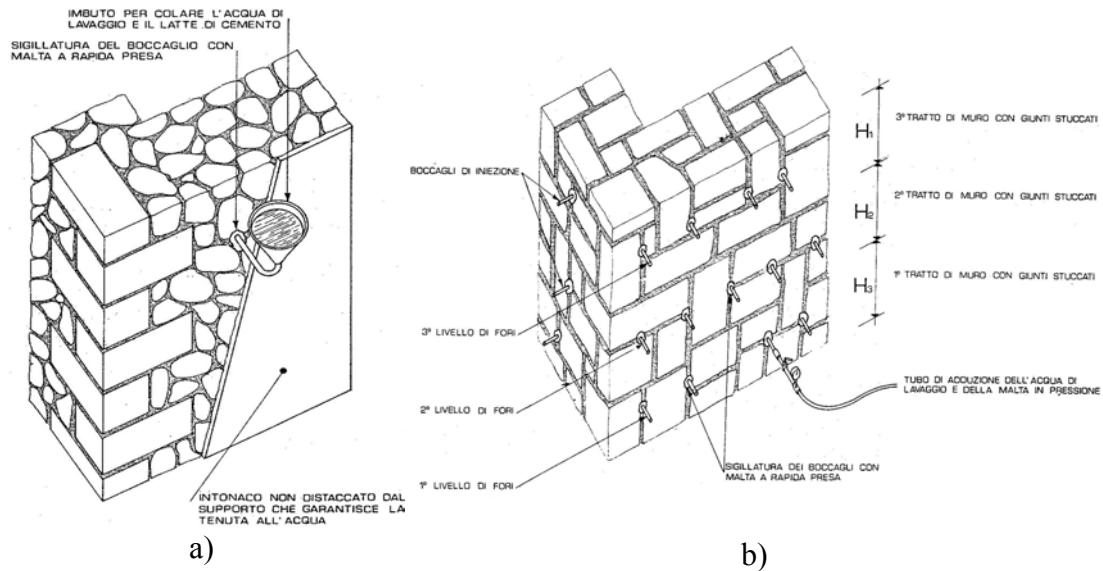


Fig. 6 - Schema di iniezione per gravità (a) e per pressione (b).

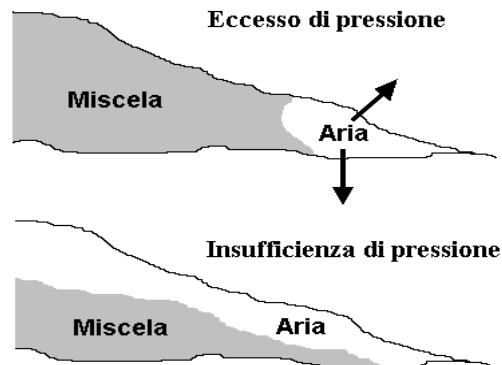


Fig. 7 - Effetto di pressioni inadeguate nelle iniezioni.

5.4 Valutazione dell'efficacia dell'intervento

L'efficacia delle iniezioni dipende da molteplici parametri, tra cui: le proprietà fisiche e chimiche della muratura e delle miscele iniettate, la dimensione e la distribuzione delle lesioni, le condizioni termoigrometriche dell'ambiente in cui si va ad operare ed, ovviamente, le modalità d'esecuzione della stessa tecnica.

La fattibilità dell'intervento passa attraverso le prove preliminari sui materiali (supporto e miscela legante) e le prove di iniettabilità del supporto; una serie di indagini in sito, pre- e post-consolidamento, consente di valutare poi, in termini quantitativi, l'affidabilità della tecnica.

5.4.1 Principali risultati ottenuti

Si riportano i risultati ottenuti in alcune delle esperienze più significative effettuate dall'U.O. di Padova nel corso degli ultimi anni, anche in collaborazione con altre Università e Gruppi di Ricerca; essi comprendono prove a compressione e a taglio effettuate prima e dopo il consolidamento delle pareti su diverse tipologie murarie, provenienti da zone differenti ma operanti in contesti simili. Ove disponibili, si riportano i risultati delle prove distruttive, debolmente e non distruttive, con alcune osservazioni sui possibili confronti e correlazioni.

Alcune esperienze sono state effettuate nella fascia pedemontana delle Tre Venezie. Sulle murature della zona trentina, già presentate nel paragrafo 4.2.1, sono state applicate sia la tecnica delle iniezioni che quella con paretine di betoncino additivato. Si riportano in questo paragrafo i risultati relativi alla sola efficacia delle iniezioni, rinviando al 6.4.1 le considerazioni sul confronto tra le due tecniche di consolidamento.

5.4.1.1 Resistenza a compressione

- *Prove con martinetti piatti:*

In fig. 8 sono riportati i risultati delle prove con i martinetti piatti doppi prima e dopo l'iniezione sulle murature degli edifici siti nella provincia di Trento.

Le miscele leganti adoperate per l'iniezione sono state ottimizzate in funzione delle caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche del supporto. Per la muratura di Calliano, nella cui malta originaria si erano riscontrati dei solfati si è utilizzata, in particolare, una miscela composta al 40% di calce idraulica pozzolanica premiscelata (per accelerarne la presa) e al 60% da calce aerea spenta, fornita satura d'acqua; a tale miscela è stata aggiunta una quantità d'acqua tale da ottenere la fluidità richiesta nella fase di esecuzione. Per le murature di Rovereto, che non evidenziavano la presenza di solfati, si è impiegato cemento Portland 325 miscelato con sola acqua fino ad idratare il cemento e raggiungere la fluidità richiesta.

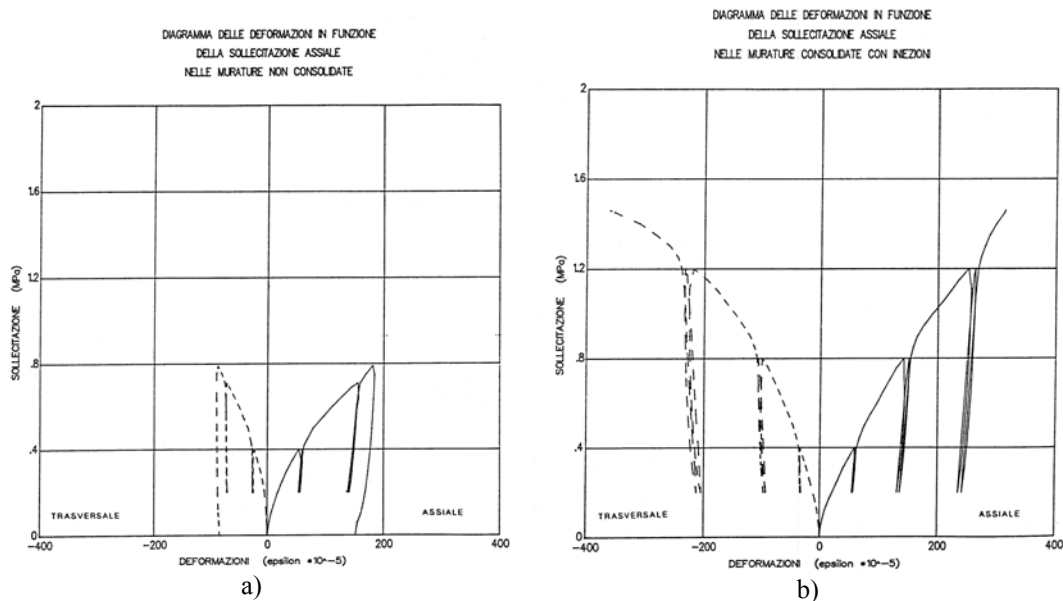


Fig. 8 - Diagrammi sollecitazione-deformazione nei casi di un pannello non consolidato (a) e di un pannello consolidato con iniezioni (b).

Dall'analisi dei diagrammi sollecitazione-deformazione in figura si può notare come, dopo l'esecuzione del consolidamento, la resistenza si incrementa in modo significativo; inoltre, a parità di resistenza, le deformazioni diventano più contenute, con un lieve aumento della pendenza della curva, indice di un incremento del modulo elastico. Tale variazione non è comunque così marcata come per la tecnica delle pareti, a dimostrazione che le iniezioni, pur migliorando in modo significativo la resistenza, consentono di mantenere proprietà di deformazione della muratura simili a quelle originali.

Gli stessi risultati sono confermati nella sperimentazione effettuata nel bellunese (località Villabruna), caratterizzata da muratura a sacco di spessore variabile tra 45 e 50 cm, con paramenti di ciottoli e pietrame di varia pezzatura, disposti a corsi sub-orizzontali connessi da giunti di malta di calce aerea di grosso spessore, con rare rinzeppature di laterizio; il nucleo della muratura è costituito da scampoli di pietra disposti alla rinfusa e materiale incoerente su allettamenti della stessa malta, con presenza di vuoti macroscopici. Per la miscela di iniezione si è adoperata calce idrata con aggiunta di polvere di mattoni, detta anche cocchiopesto (nelle proporzioni 1:2 e 1:3 rispettivamente), per favorire la reazione pozzolanica con la calce e conferire ad essa quindi l'idraulicità necessaria, ed additivi anti ritiro e fluidificanti. Le proporzioni acqua miscela adoperate sono state di 1:5. È stata effettuata una iniezione per gravità, praticando fori inclinati di circa 45° nello spessore del muro, allo scopo di facilitare la penetrazione della miscela. Il numero di perforazioni per metro quadro, necessario per diffondere l'iniezione all'interno del muro, è stato fissato pari a 10 (più del doppio della densità impiegata nella pratica corrente di questa tecnica).

Uno schema della tessitura muraria e i risultati della prova con martinetti prima e dopo il consolidamento sono riportati in fig. 9.

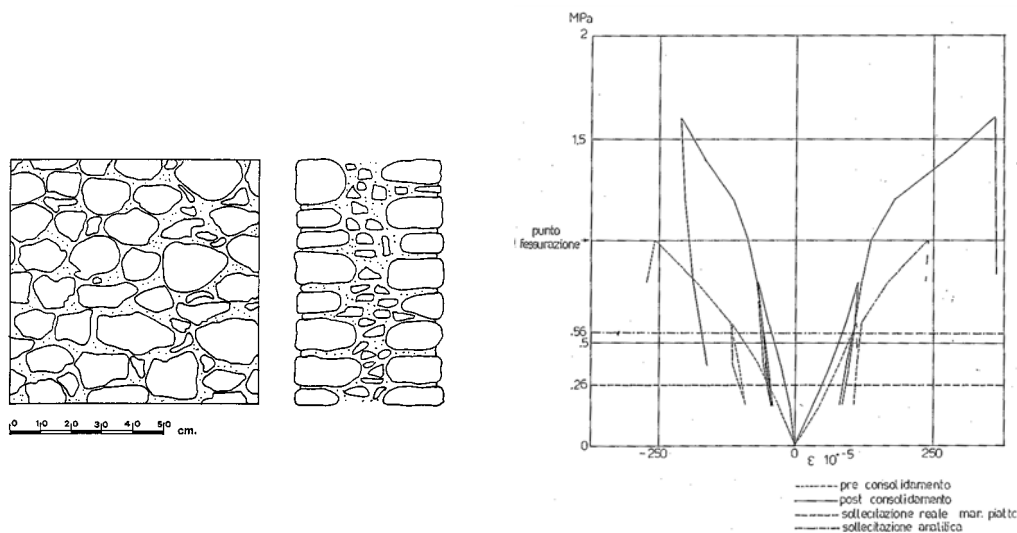


Fig. 9a - Aspetto superficiale e sezione della muratura esaminata.

Fig. 9b - Prove con i martinetti piatti su un muro prima e dopo l'iniezione.

- *Prove soniche:*

I risultati presentati si riferiscono ad un'indagine con tecnica sonica, svolta in collaborazione con lo IUAV di Venezia (prof. Riva), su dieci intorni omogenei di murature portanti di pietra naturale o mista in pietra e laterizio diffuse nel Triveneto.

Dopo una prima battuta di rilevamento delle velocità, ove possibile, gli intorni sono stati danneggiati con la compressione esercitata da martinetti piatti doppi; la muratura è stata poi successivamente consolidata con iniezioni ed è stata registrata una nuova serie di valori sonici. I risultati delle prove (dirette ed indirette) sono riportati in fig. 10.

I grafici evidenziano, in generale, la buona riuscita del consolidamento, misurato dall'incremento nei valori delle caratteristiche analizzate.

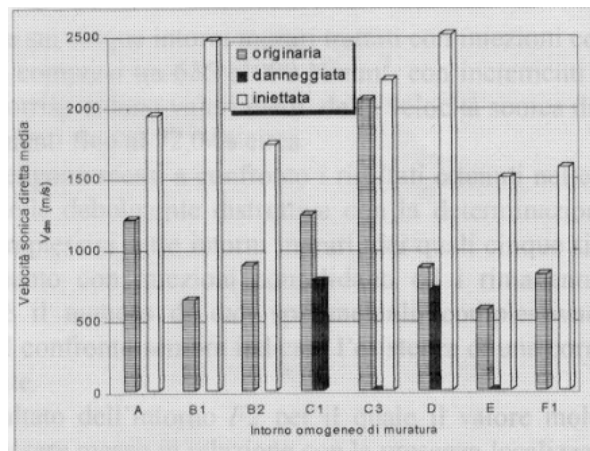
La variabilità dei valori della velocità sonica è da mettere in relazione al tipo di composizione ed apparecchiatura delle murature, al loro stato di conservazione e, a consolidamento avvenuto, alle differenti percentuali di materiale iniettato. Inoltre, si notano variazioni a seconda del tipo di lettura adoperato (prove dirette o indirette verticali ed orizzontali), dovute alla diversa influenza della non omogeneità della muratura: le prove indirette sono influenzate dalle caratteristiche dei paramenti esterni, mentre quelle per trasparenza sono sensibili alla composizione dell'eventuale "sacco" interno o alla presenza di discontinuità per distacco dei paramenti esterni. È

buona norma, allora, effettuare entrambi i tipi di misurazione, allo scopo di avere un quadro completo delle caratteristiche del muro.

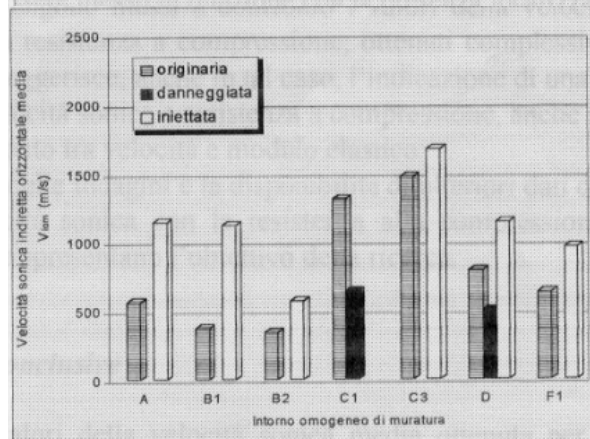
Un limite all'applicabilità della tecnica sonica è rappresentato dalla necessità della messa a nudo della porzione di superficie muraria, qualora questa presenti ricoprimenti superficiali (intonaci, rivestimenti protettivi o di bellezza) che falserebbero i risultati richiesti sulla struttura realmente portante. In tali casi ci si deve affidare ai riscontri sperimentali delle caratteristiche costruttive della parete ottenuti con sondaggi endoscopici e carotature.

Effettuate prima e dopo il consolidamento con iniezioni cementanti, le prove soniche hanno permesso di mettere in relazione le velocità misurate con i valori di resistenza e deformabilità ottenuti dalle prove con martinetti piatti.

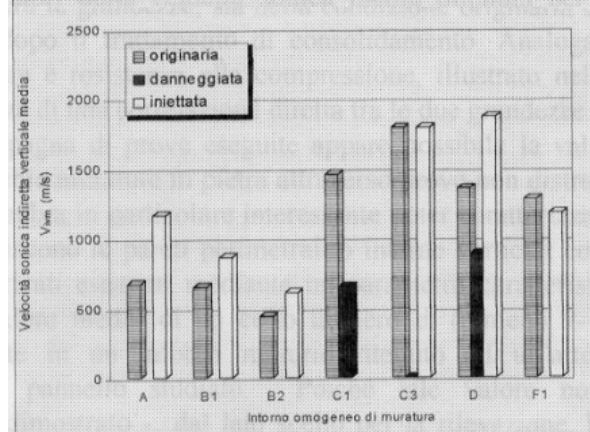
Il confronto sembra suggerire l'esistenza di una buona correlazione tra i risultati delle due prove (v. fig. 11) e quindi la possibilità di valutare quantitativamente le proprietà fisico-meccaniche della muratura. È evidente che la caratterizzazione tramite prove soniche debba essere riferita ad un parametro che potrebbe essere rappresentato dal valore medio di un certo numero di letture soniche (almeno 9-12), effettuate per trasparenza in un intorno murario reputato rappresentativo della parete in oggetto.



Prove dirette



Prove indirette orizzontali



Prove indirette verticali

Fig. 10 - Velocità sonora media rilevata durante le prove.

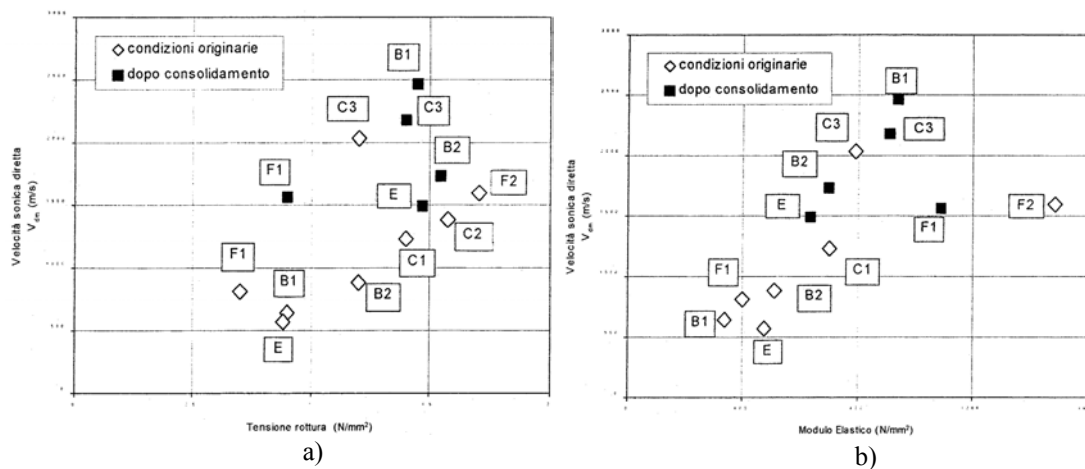


Fig. 11 - Relazione tra velocità sonora diretta e resistenza a compressione (a), e tra velocità sonora e modulo elastico (b).

Un altro caso di studio, effettuato in collaborazione con il Politecnico di Milano (prof. Binda), ha riguardato le mura del castello di Este (Padova), consolidate con iniezioni con legante a base di calce idraulica ed additivi e con legante a base di cemento microfina di natura pozzolanica.

I risultati ottenuti dalle prove soniche effettuate prima e dopo l'intervento, sono riportate in fig 12. In esse si nota come la velocità rilevata si incrementi dopo le iniezioni nelle parti più degradate della muratura, dove è stat possibile una migliore distribuzione della miscela legante.

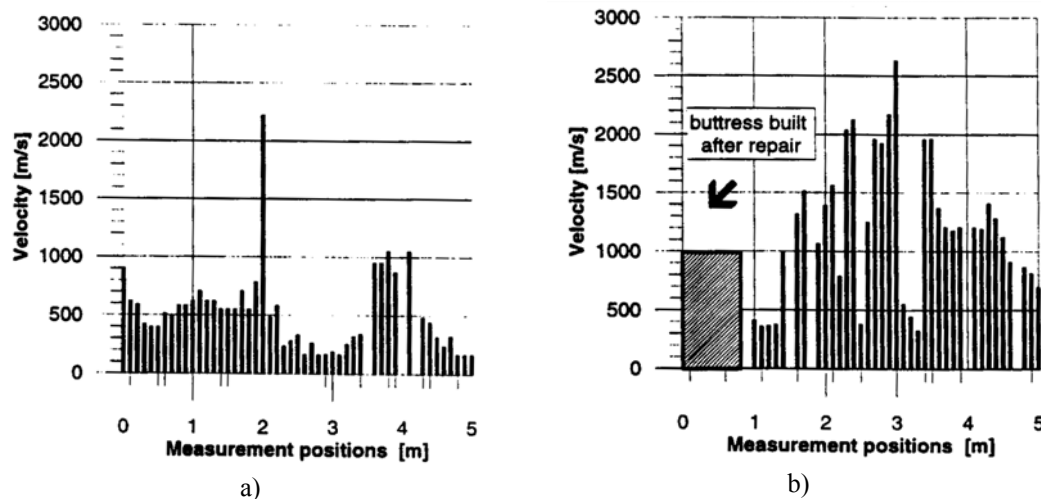


Fig. 12 - Velocità sonora misurata prima (a) e dopo (b) l'iniezione.

Sullo stesso manufatto è stata applicata la tecnologia delle *prove radar* (GPR test).

La sperimentazione, i cui risultati sono riportati in fig. 13 hanno messo in evidenza la sensibilità di questo tipo di prove allo spessore della muratura e, soprattutto, alla contenuto di umidità, che impedisce la facile propagazione delle onde. Tuttavia, la tecnica dell'echo radar fornisce informazioni sulla morfologia della parete, come ad esempio la localizzazione di ampie porzioni a bassa densità, rilevate anche con le prove soniche nella fase precedente l'iniezione, e l'assenza di tracce corrispondenti a riempimento di tali porzioni ad iniezione avvenuta.

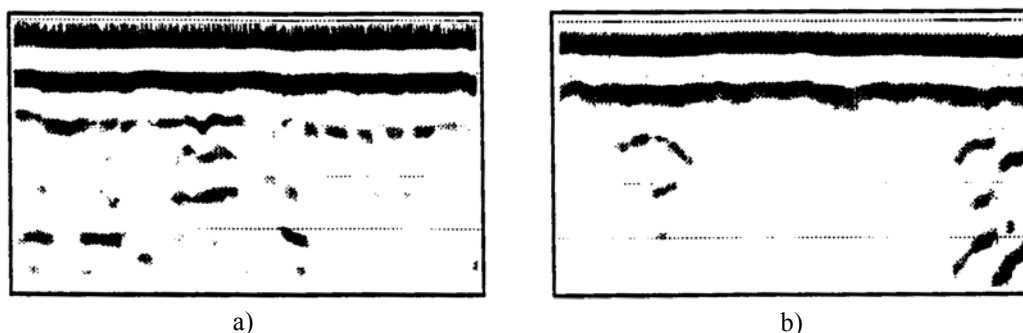


Fig. 13 - Rilevamento radar del muro prima (a) e dopo (b) l'iniezione.

5.4.1.2 Resistenza a taglio

La preparazione dei campioni per eseguire le prove a rottura per taglio diretto presenta difficoltà non inferiori a quella per la compressione. Si tratta, infatti, di una delle seguenti possibilità:

- di isolare con due tagli verticali una striscia di muro che viene caricata da un martinetto nella zona centrale della parete (fig. 14a); la parete viene strumentata secondo le due diagonali dei due semipannelli, di forma pressoché quadrata, in cui viene suddiviso il pannello dalla retta di applicazione del carico. Lo schema della prova è cioè del tipo "beam test" e corrisponde all'applicazione di un carico di compressione diagonale sui due semipannelli. La prova è effettuata in presenza della compressione esistente nella parete per effetto dei carichi ad essa sovrastanti. Nei casi in cui questi si rivelino insufficienti, il carico di compressione viene fornito mediante mezzi e modalità simili allo svolgimento della prova di compressione diretta.
- di isolare pannelli di forma circa quadrata per fare prove di compressione diagonale (fig. 14b).

Le prove a taglio possono essere condotte in condizioni di carico monotono o ciclico, disponendo di un'adeguata attrezzatura per l'inversione di carico (v. fig. 14.b e 16).

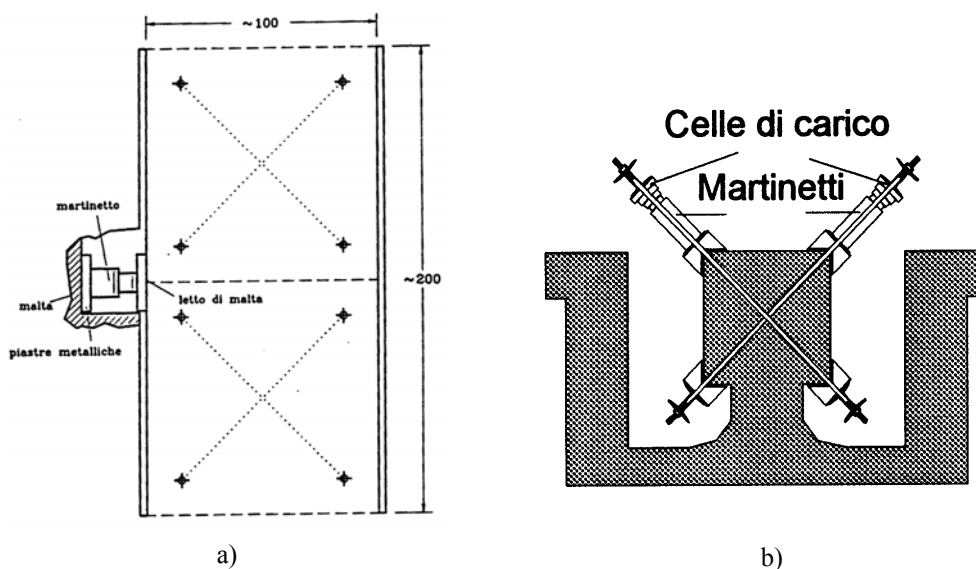


Fig. 14 - Schemi tipici di prove a taglio diretto in sito.

La configurazione di prova riportata in fig. 14a è particolarmente adeguata a fabbricati per i quali sia prevista la totale ristrutturazione; l'isolamento dei pannelli dalla struttura muraria originaria avviene, infatti, mediante piccole fessure di circa 1 cm di larghezza, in modo da non condurre il muro a rottura. Il contrasto avviene tra il martinetto alloggiato in una nicchia predisposta nel muro e allettamenti di calcestruzzo alle estremità per migliorarne le condizioni di appoggio.

Si riportano due esperienze significative svolte nell'ambito di diversi progetti di ricerca.

Una serie di prove a taglio su pareti consolidate con iniezioni è stata effettuata dall'U.R. di Padova sulle murature del bellunese, precedentemente descritte. Sono stati isolati, tramite brecce di ampiezza variabile tra 30 e 60 cm, pannelli di altezza pari a circa 2 m, di disposizione e schema riportato in fig. 15. Le pareti hanno subito un ciclo di carico-scarico prima di essere portate a rottura; tale modalità di carico si è resa possibile grazie al telaio di acciaio inserito nelle brecce praticate nel muro, il cui schema di funzionamento è riportato in fig.16.

Pannello n°	Spessore (cm)	Larghezza (cm)
1	50	120
2	50	130
3	45	130
4	45	120
5	45	130
6	45	100

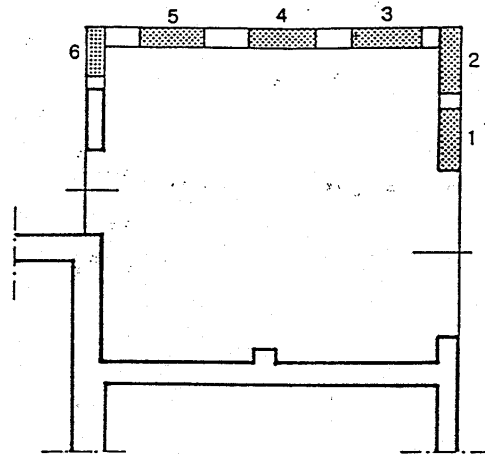


Fig. 15 - Posizione e dimensioni dei pannelli testati.

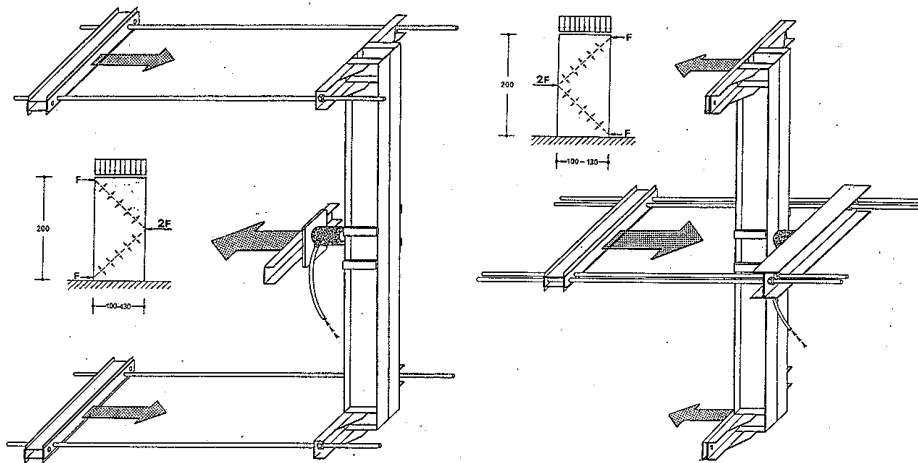


Fig. 16 - Tipo di attrezzatura utilizzata per l'inversione di carico.

I risultati delle prove sono riportati in fig 17 e in tab 3. Nella tabella, l'indice 1 indica la prova sul pannello vergine, l'indice 2 l'inversione di carico dopo la fessurazione ottenuta in prima fase; l'indice "i" indica le prove eseguite dopo l'iniezione.

Si rileva un incremento della resistenza e della rigidezza del pannello consolidato rispetto a quello non consolidato, particolarmente evidente nel rilevamento sperimentale relativo alla diagonale compressa. A tale proposito è ipotizzabile che la miglior distribuzione dei carichi, dovuta al riempimento dei vuoti macroscopici nella matrice muraria, compensi la perdita di resistenza dovuta alle discontinuità del materiale in corrispondenza delle lesioni.

L'osservazione delle pareti dopo le prove ha mostrato, nonostante l'elevata diffusione di fori di iniezione (pari a circa $10/m^2$, contro i più consueti $3/m^2$), una

disomogeneità di distribuzione della miscela e una scarsa aderenza della stessa agli elementi lapidei; l'operazione di lavaggio effettuata sui pannelli n° 4 e 5 prima della fase di iniezione ha consentito, invece, un notevole miglioramento di entrambe le caratteristiche.

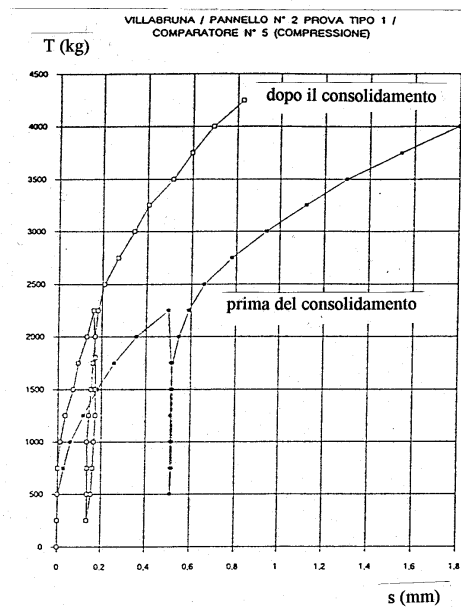
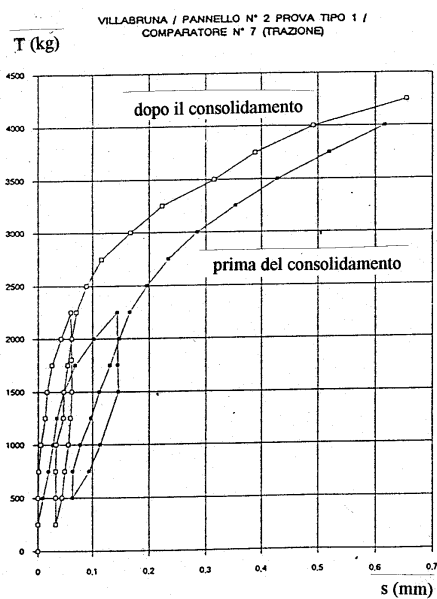
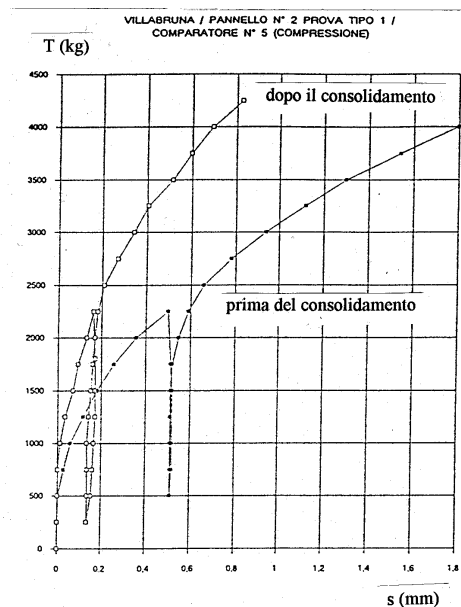
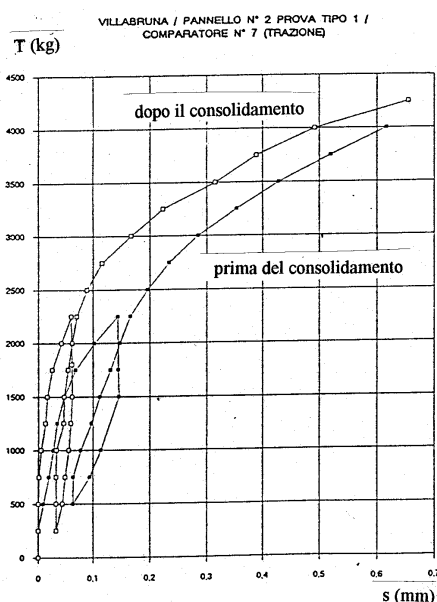


Fig. 17 - Risultati ottenuti dalle prove a taglio prima e dopo il consolidamento.

Tab. 3: Sequenza e risultati delle prove a taglio in sito.

PANELS N.	TEST TYPE	T _u daN	f _{tk} MPa	G MPa	E MPa	Quant. of grout (daN)
1	T1	3500	.041	44.0	264.0	16.7
	T2	3000	.035	38.5	231.0	
	Injection T11	4450	.053	57.2	343.2	
	T21	3250	.038	40.7	244.2	
2	T1	4000	.044	46.2	277.2	15.4
	T2	2500	.027	28.6	171.6	
	Injection T11	4250	.047	49.5	297.0	
	T21	4000	.044	46.2	277.2	
3	T1	2000	.024	25.3	151.8	34.2
	T2	2250	.027	28.6	171.6	
	Injection T11	3000	.036	38.5	231.0	
	T21	3250	.040	41.8	250.8	
4	Pre-wetting injection					64.8
	T11	5100	.067	72.6	435.6	
	T21	5100	.067	72.6	435.6	
5	T1	2380	.029	30.8	184.8	34.2
	T2	2380	.028	30.8	184.8	
	Pre-wetting injection T11	3740	.045	47.3	283.8	
	T21	3740	.045	47.3	283.8	
6	injection T11	4080	.053	58.3	349.8	20.0
	T21	3740	.059	67.1	402.6	

Nell'ambito del progetto GNDT, l'U.R. de L'Aquila (prof. Beolchini) ha fornito risultati sul comportamento statico di una parete di muratura soggetta a forze orizzontali cicliche nel proprio piano. La parete in oggetto presenta risvolti in corrispondenza degli incroci ed è stata oggetto di interventi preliminari atti a definire una situazione di partenza di sufficiente integrità.

Isolata dall'edificio di appartenenza, in una prima fase è stata portata in prossimità del collasso sotto una serie crescente di carichi ciclici, applicati sul cordolo in sommità; successivamente è stata riparata con iniezioni cementizie diffuse, ed infine è stata nuovamente sottoposta ai cicli di carico dello stesso tipo, ma applicati ai due livelli di piano dell'edificio.

Lo schema di prova è riportato in fig. 18, mentre alcuni risultati significativi sono riportati in fig. 19.

La prova ha delineato un significativo incremento della rigidezza e della resistenza globale per effetto del consolidamento; in particolare, con un solo carico applicato in sommità la forza richiesta per raggiungere il collasso nella situazione consolidata è circa l'80% superiore di quello relativo alla parete non rinforzata.

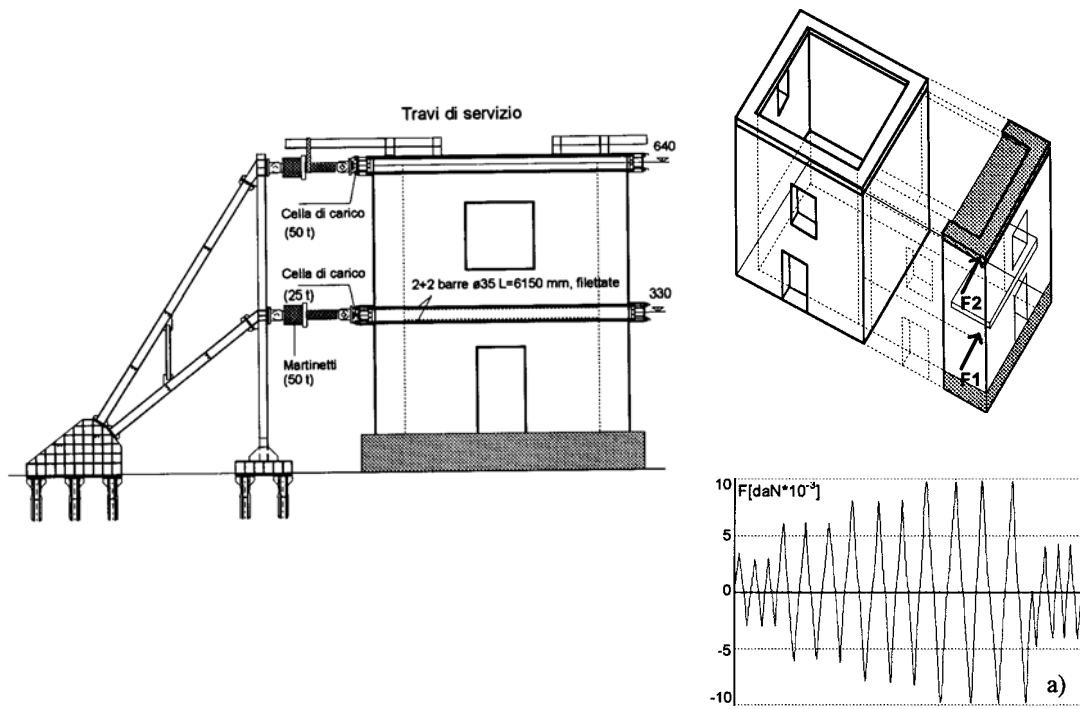


Fig. 18 - Schema della prova a taglio ed esempio di cicli imposti.

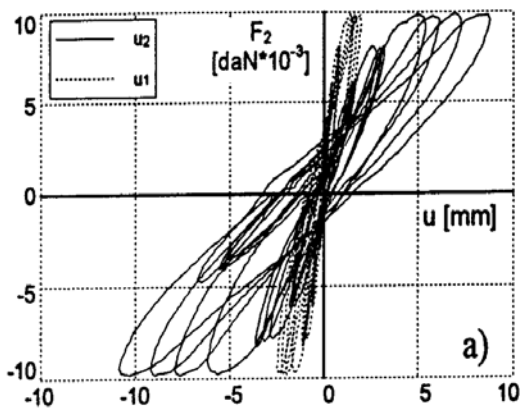


Fig. 19a - Parete non rinforzata.

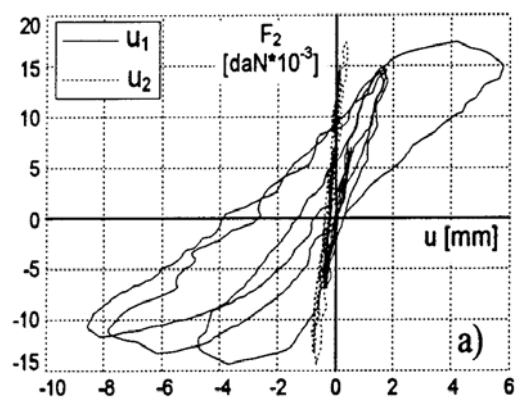


Fig. 19b - Parete rinforzata.

6. GLI INTONACI ARMATI

6.1 Aspetti generali

La tecnica di consolidamento mediante intonaci armati consiste nel realizzare in aderenza alla superficie muraria, delle lastre di materiale a base cementizia (malta, betoncino, gunita), armate con una rete metallica, e rese solidali ad essa da tiranti passanti in acciaio⁵.

Ai fini dell'affidabilità della tecnica svolgono un ruolo fondamentale i connettori trasversali, la cui efficacia è pressoché nulla, con il tipo di muratura in esame, se essi non sono passanti ed ancorati nella stessa paretina armata, applicata su entrambe le facce della parete da rinforzare.

La tecnica consente di migliorare le caratteristiche di *resistenza* dell'apparato murario, grazie all'incremento di sezione resistente apportato dalle lastre e all'effetto di confinamento esercitato sulla muratura degradata, e di aumentarne nel contempo la *duttilità*. Può risultare adatta a quelle murature in stato di degrado particolarmente avanzato e non in grado di sopportare eccessive manipolazioni; in presenza di quadri fessurativi complessi ed estesi, altre tecniche come le iniezioni o la sostruzione muraria possono infatti risultare inapplicabili.

L'applicazione delle paretine non prevede alterazioni allo stato di sollecitazione della struttura durante l'esecuzione, ma modifica in maniera sostanziale la rigidità delle pareti e quindi la loro risposta sismica.

La tecnica rende per tale ragione molto problematico l'intervento localizzato se limitato solo ad alcune pareti, mentre si presta a rinforzare zone limitate di una parete particolarmente ammalorata, oppure e intersezioni verticali delle pareti non sufficientemente connesse.

Dal punto di vista esecutivo, il metodo prevede tecnologie e materiali di basso costo e facile reperibilità, e l'impiego di attrezzature generalmente adoperate per operazioni d'intonacatura. Ne derivano i vantaggi di economicità, rapidità di esecuzione e non necessità di manodopera specializzata.

Aspetti negativi legati agli effetti della tecnica sono:

- *alterazione dell'aspetto esteriore della muratura*: il metodo non risulta applicabile in edifici particolarmente interessanti dal punto di vista storico ed architettonico o con decorazioni parietali quali affreschi o stucchi;
- *alterazione delle proprietà fisiche della parete*, quali isolamento termico e traspirabilità;
- *alterazione delle caratteristiche di deformabilità delle pareti*: l'intervento conferisce elevata rigidità alla parete, per cui un suo impiego non

⁵ Soprattutto nei casi di accessibilità limitata ad una sola faccia della muratura, possono anche adoperarsi, al posto dei tiranti passanti, staffature inserite in nicchie appositamente predisposte, successivamente riempite durante la realizzazione della paretina.

- controllato può provocare scompensi localizzati e pericolose alterazioni al comportamento statico e dinamico dell'intero edificio;
- *notevole vulnerabilità nei confronti di agenti ambientali derivante dalla possibilità di corrosione dei connettori trasversali;*

Anche per questa tecnica mancano regole specifiche per la progettazione e l'esecuzione a base sperimentale; tuttavia, esso risulta molto praticato in virtù della sua economicità e facilità d'esecuzione, basandosi su criteri di dimensionamento empirici e generici. Il controllo dell'efficacia della tecnica è molto spesso trascurato, in virtù della fiducia nella sua affidabilità.

Questo tipo di intervento può essere utilizzato per il rinforzo sia di murature in pietra che di mattoni. Per murature in pietra di qualità scadente è opportuno associare l'intervento citato alla tecnica delle iniezioni.

6.2 Materiali impiegati

I materiali occorrenti per l'esecuzione della tecnica sono: miscela legante per la costituzione dell'intonaco e rete elettrosaldata di acciaio.

La miscela da adottare può essere di diversa composizione, a seconda della procedura utilizzata; alcune possibili soluzioni sono:

- miscela secca di sabbia e cemento in proporzione 4 a 1, proiettata in pressione attraverso un ugello, all'interno del quale viene aggiunta acqua fino ad ottenere buone caratteristiche di fluidità (gunita);
- intonaco di malta cementizia ad elevato contenuto di cemento (betoncino);
- conglomerato cementizio.

Due tipiche composizioni di questi materiali possono essere, per metro cubo d'impasto:

- *Calcestruzzo:*
 - 400 kg di cemento,
 - 850 kg di sabbia,
 - 850 kg di pietrisco,
 - fluidificante,
 - acqua necessaria per un "*slump test*" di circa 200 mm.
- *Gunita:*
 - 500 kg di cemento,
 - 1700 kg di sabbia frantumata e pulita (diametro max = 5 mm),
 - 150÷250 kg d'acqua.

Qualunque sia il sistema adottato, è opportuno utilizzare nelle miscele prodotti antiritiro o espansivi per evitare fessurazioni indesiderate.

6.3 Modalità esecutive

6.3.1 Prescrizioni normative

Si riportano di seguito i paragrafi delle normative sulle riparazioni descrittivi della tecnica di consolidamento con paretine.

Legge Regionale Friuli Venezia Giulia, DT 2 del Novembre 1977:

1.2.2.2 Lastre di cemento armato:

Si tratta di realizzare in aderenza alle murature che debbono essere consolidate da uno o da ambo le parti di essa, lastre di cemento armato efficacemente collegate alla vecchia struttura.

La realizzazione delle lastre armate può effettuarsi con uno dei seguenti sistemi costruttivi:

- a) getto di conglomerato cementizio, con spessore non inferiore a 5 cm, armato con tondi Ø8 verticali ed orizzontali ad interasse di 20 cm;*
- b) intonaco con malta cementizia, di spessore minimo di 3 cm armato con reti metalliche elettrosaldate costituite da tondini Ø4-Ø6 con maglia 10x10 cm;*
- c) applicazione a spruzzo di malta cementizia, ad elevato dosaggio di cemento (gunite) fino a realizzare uno spessore minimo di 3 cm, previa applicazione alla muratura di rete metallica con maglia 10x10 cm.*

Qualunque sia il sistema costruttivo adottato è opportuno additivare gli impasti con prodotti antiritiro.

Di norma l'applicazione delle lastre si effettua per murature di laterizio, su entrambe le facce. Nel caso che si debba necessariamente intervenire su un solo lato si consiglia la realizzazione secondo il sistema a).

Per il collegamento delle lastre fra di loro e con la muratura preesistente si dovrà prevedere l'impiego di almeno 6 staffe Ø6 per m².

Qualunque sia la tecnica esecutiva prescelta fra quella in precedenza illustrate, l'esecuzione delle lastre armate deve essere preceduta da alcune operazioni preparatorie:

- asportare il vecchio intonaco;*
- lavare e saturare con acqua la muratura;*
- riempire le fessure macroscopiche con malta cementizia.*

L'efficacia del consolidamento, inoltre, è sempre subordinata non solo alla correttezza delle modalità esecutive ma anche alla cura con cui le lastre, e quindi le murature incamiciate, vengono collegate alle altre strutture portanti.

In particolare, perciò, si avrà cura di risvoltare per 50-100 cm le lastre nelle murature verticali ad esse ortogonali, collegandole altresì a solai e fondazioni.

2.2 Caratteristiche meccaniche delle murature consolidate con lastre di calcestruzzo armato sulle due facce:

I dati disponibili attualmente (forniti dallo ZMRK di Lubiana e riportati nel quaderno n. 3 del CRAD, Udine 1977), riguardano un muro in laterizio di spessore pari a 0.25 m realizzato con malta di calce e sabbia, al quale sono state applicate due lastre di 3 cm di spessore, armate con rete $\varnothing 6$ e interasse di 15 cm.

Il collegamento delle lastre è stato effettuato con 4 staffe $\varnothing 6$ per m^2 .

Dopo il consolidamento la resistenza caratteristica τ_k è salita dal valore di 0.75 kg/cm^2 al valore di 1.75 kg/cm^2 .

Nella più parte dei casi, la rottura è avvenuta previo distacco delle lastre dal paramento murario, denunciando l'insufficienza dei collegamenti tra le lastre.

Decreto 2 Luglio 1981:

3.4.2.3 Applicazione di lastre e reti metalliche elettrosaldate:

Alle murature che presentano lesioni isolate oppure in corrispondenza di aperture o d'angolo possono applicarsi, preferibilmente su entrambe le facce delle pareti, lastre in cemento armato, collegate fra loro da armature trasversali di cucitura.

In alternativa possono usarsi reti elettrosaldate posizionate su ambedue le facce di parete, cucite fra loro con tondini di acciaio, e ricoperte di intonaco cementizio.

Le reti vanno risolte in corrispondenza degli spigoli verticali e fissate con chiodi alla muratura.

In corrispondenza dei collegamenti agli elementi in calcestruzzo esistente dovranno essere utilizzate preferibilmente malte confezionate antiritiro.

Circolare 30 Luglio 1981:

3.3.3 Applicazione di lastre e reti metalliche elettrosaldate:

L'intervento mira a conservare, adeguandola alle nuove esigenze, la funzione resistente degli elementi murari, fornendo ad essi un'adeguata resistenza a trazione e dotandoli di un grado più o meno elevato di duttilità, sia nel comportamento a piastra che in quello a parete di taglio.

Quando l'intervento è esteso, con particolari accorgimenti, in corrispondenza degli innesti murari, si realizza anche una modificazione migliorativa dello schema strutturale.

Il consolidamento si esegue con l'apposizione, su una od entrambe le facce del muro, di armature di acciaio o di lastre cementizie, di adeguato spessore.

Le armature sono costituite da barre verticali ed orizzontali o da reti; ferri trasversali passanti nel muro assicurano i collegamenti.

In relazione al tipo ed allo stato di consistenza della muratura, a questo intervento può essere associata l'iniezione in pressione, nel corpo murario di miscele leganti.

L'estensione dell'intervento può comprendere l'intero edificio oppure soltanto alcuni elementi, scelti in base alla natura ed allo stato delle murature, all'entità dei dissesti, etc. Su ciascun elemento murario, poi, l'intervento può ancora essere dosato, operando rispettivamente per "fasce" verticali ed orizzontali, limitandosi al solo rinforzo del perimetro dei vani porta o finestra o adottando un sistema misto di rinforzo.

La tecnologia dell'intervento è articolata nelle seguenti operazioni:

- 1) eliminazione dei solai, quando irrecuperabili o riparazione degli stessi, se da conservare;*
- 2) preparazione delle murature, previa adeguata puntellatura: asportazione dell'intonaco, riempimento delle cavità esistenti con particolare riguardo a quelle in prossimità delle ammorsature dei muri, rifacimento a cuci-scuci, spazzolatura, lavaggio con acqua ad aria in pressione;*
- 3) intervento sulle fondazioni, per realizzare l'ancoraggio delle barre verticali di muratura e l'eventuale adeguamento della base di appoggio ai nuovi carichi;*
- 4) esecuzione delle perforazioni nella muratura per l'alloggiamento delle barre trasversali di collegamento;*
- 5) applicazione delle barre o delle reti di armatura su una o entrambe le facce del muro, con adeguata sovrapposizione e con risvolto nei vani porta o finestra;*
- 6) messa in opera di distanziatori dell'armatura dal muro, per consentire il completo avvolgimento delle barre da parte dell'intonaco, di spessore adeguato e comunque non inferiore a 2 cm;*
- 7) alloggiamento, nei fori, dei ferri trasversali con adeguato risvolto di fissaggio alle armature;*
- 8) esecuzione dell'intonaco di cemento per lo spessore prefissato (dopo abbondante lavaggio della superficie);*
- 9) rifacimento, o completamento, dei solai;*
- 10) esecuzione delle eventuali iniezioni nei muri, effettuate con pressioni che, per la presenza dell'intonaco armato avente funzione di contenimento, possono anche essere elevate, fino a 2-3 kg/cm².*

Circolare 10 Aprile 1997:

La circolare riprende, nell'allegato 3 al punto 4. Applicazione di lastre e reti metalliche elettrosaldate la tecnica delle paretine armate grossomodo negli stessi termini espressi dalla circolare del 1981.

Alcune modifiche sostanziali sono di seguito riportate:

- si afferma che è opportuno che questo tipo di intervento venga esteso anche agli innesti murari (la precedente circolare rimaneva sul vago in proposito);*

- si elimina la possibilità di effettuare il confinamento trasversale con armature di acciaio o lastre cementizie, sostituendo tale affermazione con le sole lastre cementizie opportunamente armate e di adeguato spessore;
- viene eliminata la frase per cui l'intervento possa essere esteso all'intero edificio oppure soltanto ad alcuni elementi; l'uniformità dell'intervento, soprattutto in questo caso, che è legato a notevoli incrementi di rigidezza delle pareti, è un parametro determinante nel comportamento dell'edificio consolidato;
- vengono eliminate le fasi 1) e 10) della precedente circolare, relativi alla eliminazione e al rifacimento dei solai, e viene aggiunta, tra le fasi 7) ed 8) precedenti, ossia tra l'operazione di alloggiamento dei tondini nei fori trasversali e l'esecuzione dell'intonaco, una nuova specifica, relativa all'inserimento dei collegamenti delle lastre cementizie agli elementi resistenti di contorno (solai - cordoli - pareti trasversali -fondazioni).

6.3.2 Tecnica di esecuzione

Il posizionamento delle lastre in c.a. dovrebbe essere tale da non alterare eccessivamente il comportamento globale della struttura.

Le operazioni di consolidamento dovrebbero quindi essere eseguite il più simmetricamente possibile rispetto alla pianta dell'edificio, in modo da non indurre fenomeni torsionali, visto l'incremento di rigidezza che viene ad avere la parete sulla quale si interviene.

È buona regola partire con i lavori dai piani più bassi, visto il notevole aumento delle masse apportato dalle pareti, ed è importante operare con continuità verticale a partire dal piano in cui si interviene fino al piano delle fondazioni.

L'intervento può essere eseguito con diverse modalità:

- con la costruzione di vere e proprie *pareti in c.a.*, sistema che può essere adatto quando è necessario intervenire da un solo lato della parete;
- con la formazione di lastre sottili in c.a. (*gunite*) armate con reti di acciaio elettrosaldate;
- con l'applicazione di intonaco di spessore di almeno 3 cm di malta cementizia (*betoncino*) armato, sempre con reti di acciaio elettrosaldate.

Questi ultimi due sistemi sono particolarmente adatti per le riparazioni in corrispondenza di lesioni isolate.

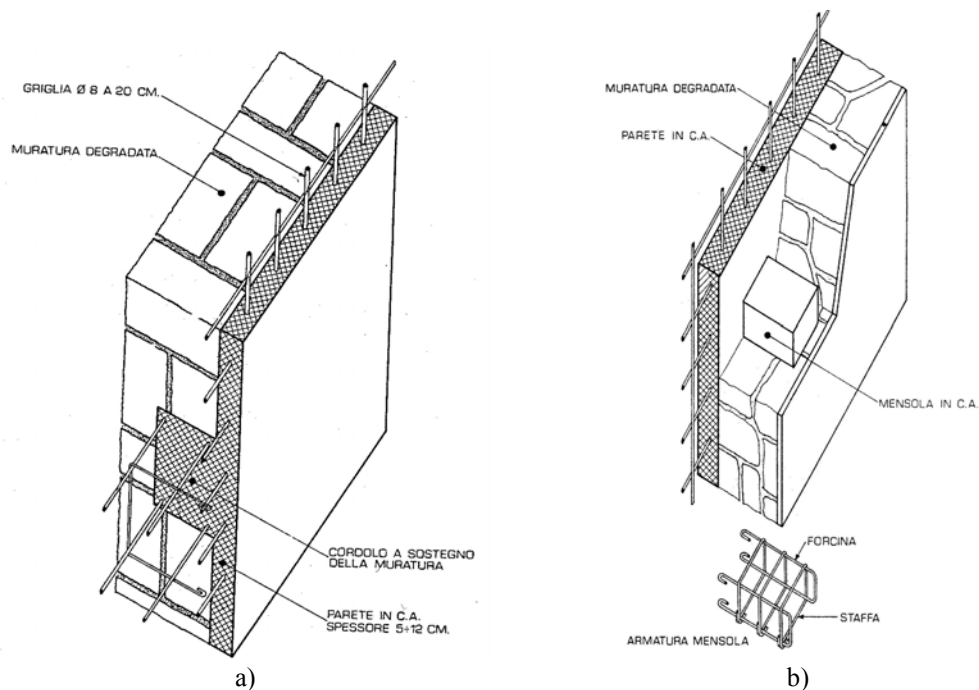


Fig. 20 - Applicazione di parete in c.a. ammassata alla muratura originaria mediante cordoli (a) e mediante mensole (b).

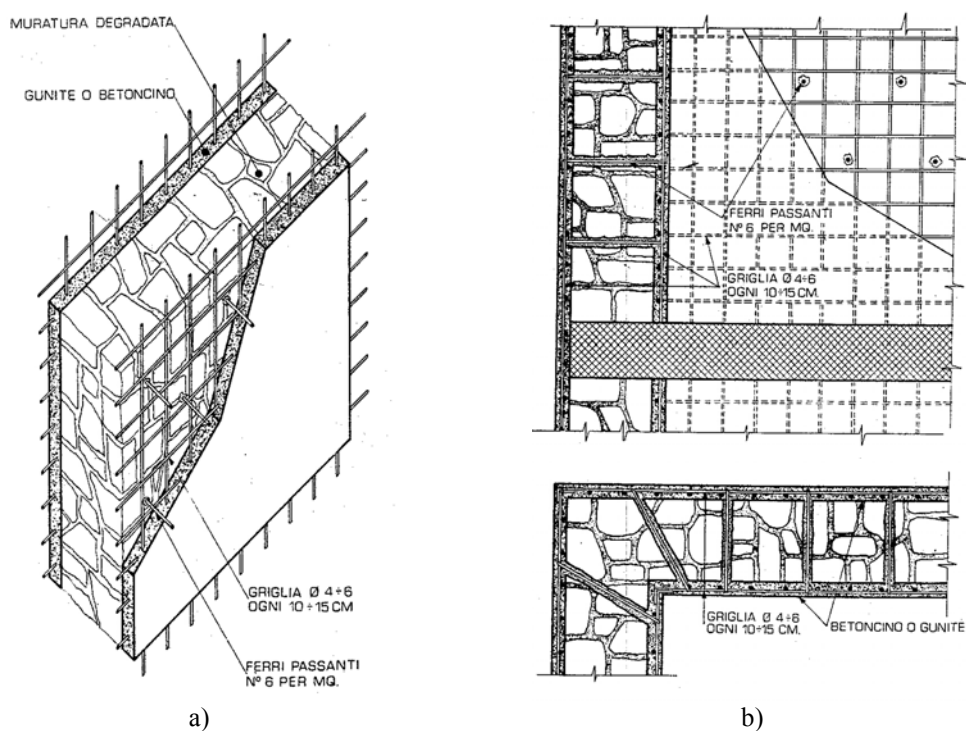


Fig. 21 - Consolidamento di muratura mediante lastre sottili (gunito o betoncino) armate con rete elettrosaldata in acciaio e collegate da ferri passanti. Vista assometrica (a); sezione orizzontale e verticale (b).

Nelle figg. 20 e 21 sono riportate alcune modalità di esecuzione della tecnica. È da sottolineare che l'ammorsamento mediante cordolo continuo indebolisce notevolmente la sezione del muro, interrompendo la continuità del paramento.

La procedura di esecuzione del consolidamento mediante paretine sottili, che rappresenta la modalità maggiormente diffusa tra quelle elencate, si articola nelle seguenti fasi:

- 1) *Preparazione della parete*: valgono essenzialmente le considerazioni già esposte per le iniezioni: asportazione dell'intonaco e messa a nudo della tessitura muraria, spazzolatura e lavaggio della muratura con getto di acqua o aria a bassa pressione e stuccatura con malta cementizia a presa rapida di fessure e vuoti macroscopici. Nell'operazione di lavaggio la superficie della parete va portata a saturazione in modo da evitare la sottrazione d'acqua al materiale spruzzato che può pregiudicare la corretta presa.
- 2) *Perforazioni*: la perforazione della muratura, per la messa in opera delle armature di collegamento paretine-muratura, è da effettuarsi per mezzo di trapani o sonde a rotazione in corrispondenza dei blocchi di pietra; i fori, distribuiti in modo uniforme sulla parete, equidistanti fra loro e a file sfalsate, devono essere leggermente inclinati per agevolare il loro successivo riempimento con malta cementizia.
Per betoncino su una sola faccia vanno realizzati almeno 6 fori al mq di diametro 40 mm e lunghezza pari ai $\frac{3}{4}$ dello spessore della parete; per betoncino su due facce sono necessari almeno 4 fori passanti al mq di diametro 40 mm.
- 3) *Inserimento dei tiranti passanti*: generalmente vengono utilizzati tondini per c.a. ad aderenza migliorata del diametro variabile da 4 a 8 mm; essi possono venire posizionati per battitura attraverso i giunti di malta, sfruttando eventualmente le lesioni presenti, oppure infilati in fori praticati appositamente, che successivamente possono anche essere sigillati con iniezione di malta. Il loro numero può variare a seconda dei casi, è bene però non scendere sotto i due tiranti per metro quadro. Nel caso si adoperino, al posto dei tiranti passanti, staffature inserite in nicchie appositamente predisposte, successivamente riempite durante la spruzzatura del materiale, il loro numero consigliato è di almeno 6 per metro quadrato. Risulta evidente l'aggravio di costo che ciò comporta, mentre non è altrettanto evidente un miglioramento dell'efficacia del consolidamento. È opportuno realizzare anche connessioni tra le lastre e gli elementi resistenti di contorno (cordoli, fondazioni, etc.).
- 4) *Posizionamento delle armature*: in genere si usano reti elettrosaldate con barre del diametro di 3÷6 mm con maglia 10x10 oppure 15x15 cm. La rete viene posizionata su un lato o su entrambe le facce della parete da consolidare,

distanziata dalla muratura di almeno 2 cm. Per il maggiore tempo di posa richiesto è da evitare di costruire la trama con singole barre. Buona regola è risvoltare la rete di almeno 50÷100 cm in corrispondenza delle intersezioni con murature ortogonali o in corrispondenza delle porte o finestre; lungo i bordi delle aperture deve essere sovrapposta di almeno due maglie nei punti di giunzione. Posizionata la rete si ripiegano i tiranti ad uncino di 90°.

- 5) *Esecuzione delle lastre*: la posa in opera della miscela legante viene realizzata, previo accurato lavaggio e bagnatura fino a saturazione della muratura, con procedure diverse in funzione dello spessore della lastra che si vuole applicare:
- per getto in apposita cassera, nel caso di pareti di spessore 5-15 cm, generalmente di c.a.;
 - in pressione, per spessore tra i 3 e i 5 cm (rapporto sabbia-cemento 4:1);
 - spruzzata meccanicamente sulla rete in uno o più passaggi per creare lo spessore desiderato, fino ad un massimo di 3 cm.

Gli spessori maggiori vanno realizzati con l'impiego di betoncino, mentre quelli inferiori con gunita. Nei giorni successivi deve essere inoltre eseguita la bagnatura per ridurre i fenomeni di ritiro.

Nelle figure 22 e 23 viene mostrato uno schema di applicazione della tecnica nelle varie posizioni richieste dal consolidamento.

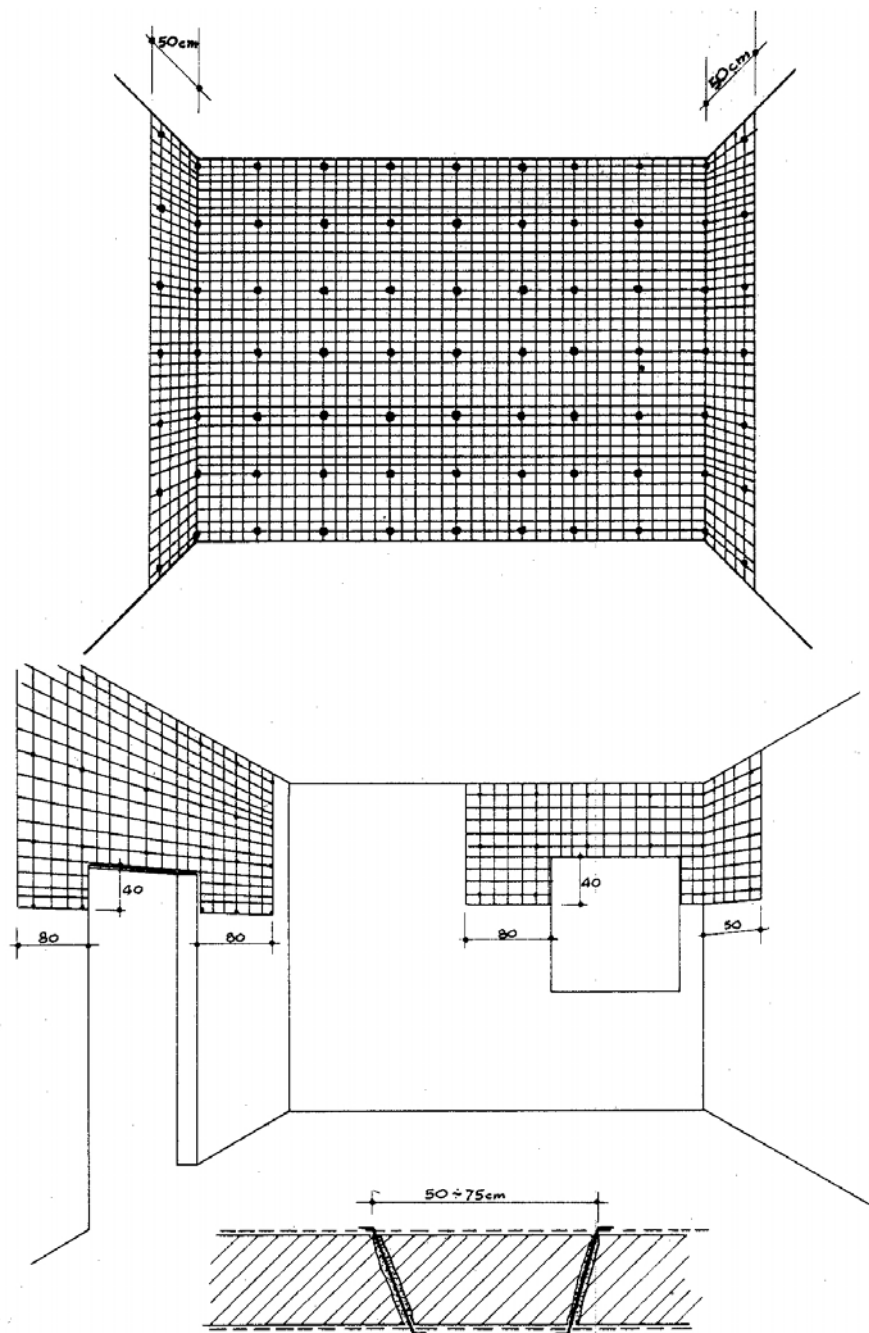


Fig. 22 - Posizionamento della rete metallica nel caso di consolidamento di un'intera parete e in corrispondenza di fori e aperture; particolare del collegamento tra le reti in sezione orizzontale.

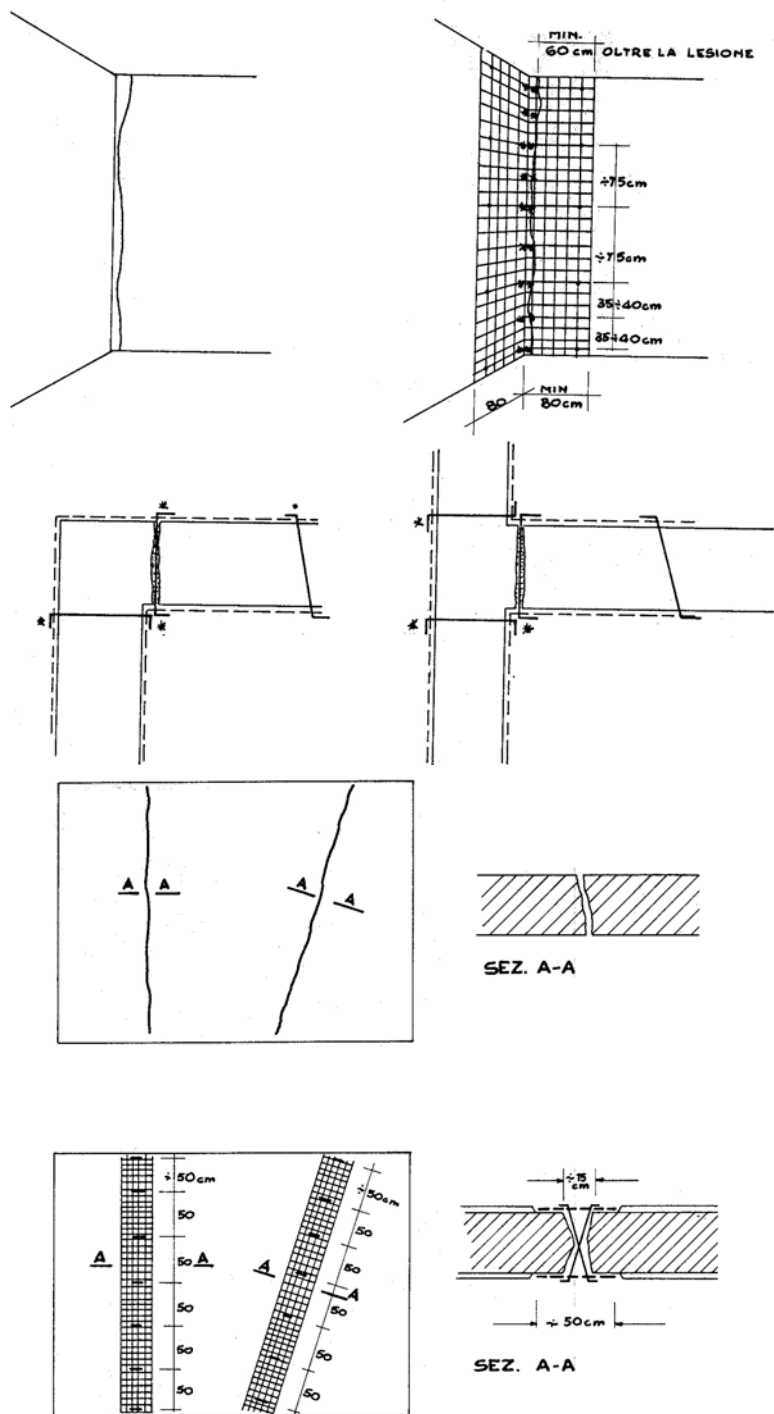


Fig. 23 - Applicazione di rete elettrosaldata nelle zone d'angolo ed in corrispondenza di singole lesioni passanti.

6.4 Valutazione dell'efficacia dell'intervento e confronto con la tecnica delle iniezioni

Riguardo alla tecnica delle pareti, sono disponibili una serie di risultati sperimentali ricavati da esperienze effettuate dall'Università di Padova nell'area delle Tre Venezie, insieme ad una modellazione numerica del comportamento locale delle lastre.

In questa sezione vengono riportati i confronti sperimentali tra i risultati delle prove a compressione e a taglio e, ove disponibili, alcune comparazioni della tecnica in oggetto con quella delle iniezioni.

6.4.1 Analisi sperimentale

6.4.1.1 Resistenza a compressione

Prove di compressione diretta sono state effettuate su pannelli, ottenuti per mezzo di tagli, nella muratura di alcuni edifici esistenti (provincia di Trento). La modalità di prova è la stessa di quella definita nel paragrafo 4.2.1.

Per un pannello si è eseguita la costruzione di una sola parete in betoncino, in modo da poterne confrontare i risultati ottenuti su pannelli consolidati con due pareti di contenimento.

Lo schema della prova è riportata in fig. 24 per entrambi i casi di studio.

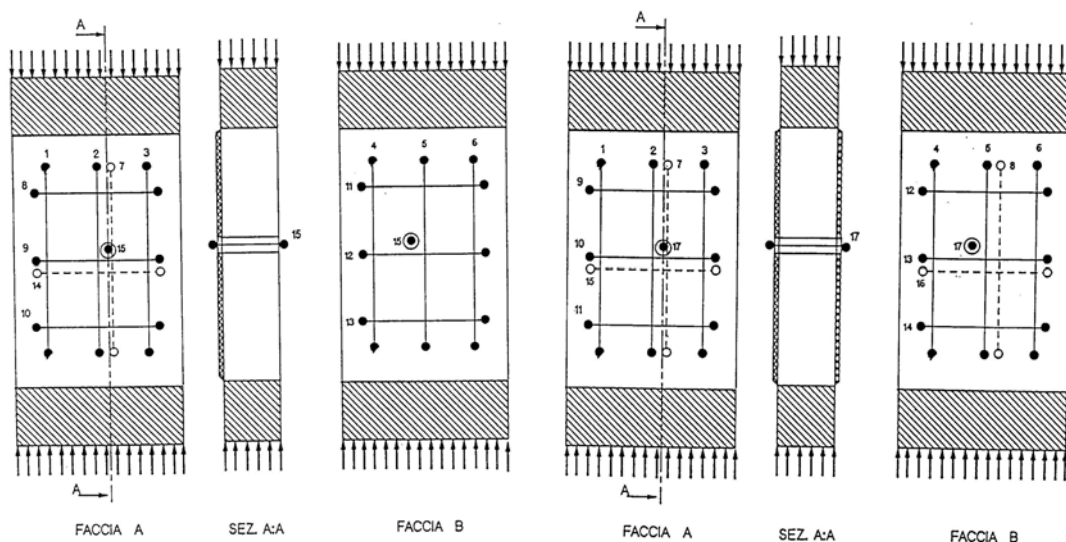


Fig. 24 - Schema delle prove di compressione diretta nelle due modalità di consolidamento.

I risultati delle prove sono riassunti in tab. 4, dove sono riportati i valori del modulo elastico nelle diverse fasi di sollecitazione delle prove e la sollecitazione misurata a rottura per i campioni allo stato originario e consolidati con iniezioni o con pareti di betoncino additivato. I moduli di deformazione riportati sono

calcolati sulla media dei valori misurati dai tre trasduttori verticali disposti su ogni faccia, mentre i valori della sollecitazione di rottura sono stati definiti in corrispondenza ai punti dove il diagramma sollecitazioni/deformazioni, tracciato sulle medie delle basi di misura, assume una tangente approssimativamente orizzontale; in molti casi si è fatto riferimento al solo trasduttore trasversale passante.

Tab. 4: Confronto dei parametri di resistenza e deformabilità tra le tecniche di iniezione e di placcaggio con paretine.

		muratura prima del consolidamento					murature consolidate con betoncino				consolidamento con iniezioni			
		marlinetti piatti		prova di compressione			prova di compressione				prova di compressione			
muratura n.	faccia	E(0.2-0.4) (MPa)	E(0.4-0.6) (MPa)	E(0.2-0.4) (MPa)	E(0.4-0.6) (MPa)	resist. a compress. (MPa)	E(0.2-0.4) (MPa)	E(0.4-0.6) (MPa)	E(0.6-1.2) (MPa)	resist. a compress. (MPa)	E(0.2-0.4) (MPa)	E(0.4-0.6) (MPa)	E(0.6-1.2) (MPa)	resist. a compress. (MPa)
1	C1	A									210	130	70	
		B									180	190	10	1.5
	C2	A									470	240	130	
		B									530	500	400	1.46
	C3	A									800	430	250	
		B									670	450	320	1.71
	C4	A			360	60					480	370	90	
		B			2300	240	0.70				480	500	130	1.15
	C5**	A						(*)	(*)	(*)				
		B	500	420				(*)	(*)	(*)	0.75			
	C6	A			200	160		10400	7900	6700				
		B			550	400	0.80	11200	10800	9400	1.85			
	C7	A						9300	10400	8800				
		B						9800	9400	6400	1.80			
2	R1	A			800	1100					3500	2500		
		B			130	100	0.90				3400	2600		1.00
	R2	A			90	50		5300	(*)	(*)				
		B	210	210	240	100	0.60	19700	(*)	(*)				

- (1) murature in localita' Calliano (TN) (2) murature in localita' Rovereto (TN)
 (*) impossibilità a calcolare il modulo in quanto le deformazioni denotano un allungamento delle basi di misura
 (***) Pannello rinforzato con una paretina di calcestruzzo su una sola faccia

La fig. 25 mette a confronto i valori della sollecitazione di rottura per le murature non consolidate e consolidate con i due metodi considerati. Si nota immediatamente il notevole incremento che gli interventi hanno apportato facendo passare da valori mai superiori ad 1 MPa a valori sempre superiori a 1.5 MPa.

Anche le caratteristiche di deformabilità sono notevolmente variate, come mostra la fig. 26, che riporta il confronto diretto tra i diagrammi sforzi-deformazioni relativo alle due tecniche di consolidamento. Si può notare che le deformazioni diventano generalmente più contenute con aumento del modulo elastico notevolmente diverso per le due tecniche. L'uso delle paretine comporta un incremento notevolissimo di rigidità, andando ad alterare in maniera eccessiva il comportamento originario della struttura. Ciò può creare, soprattutto nei casi di non uniforme esecuzione, degli scompensi di rigidità che possono produrre effetti

torcenti o modifiche nella ripartizione tra le pareti delle forze orizzontali dovute, ad esempio, ad un sisma.

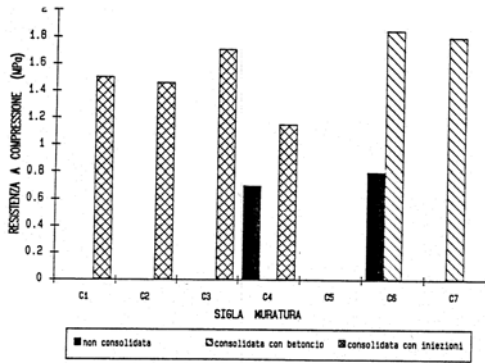


Fig. 25 - Resistenza a compressione monoassiale.

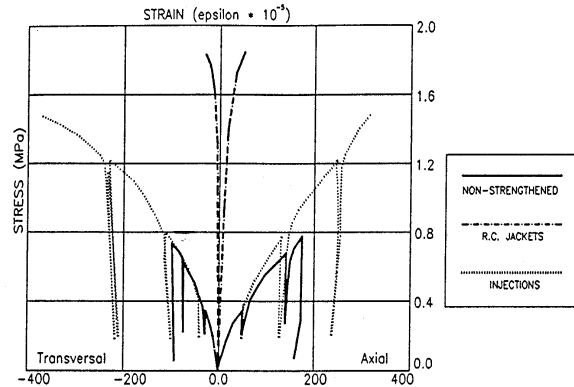


Fig. 26 - Diagrammi sforzi deformazioni di confronto tra la tecnica delle iniezioni ed i placcaggi.

6.4.1.2 Resistenza a taglio

Da indagini condotte su pareti in muratura site in Lunigiana (Toscana), in una collaborazione tra l'Università di Padova, l'Università di Firenze (Prof. Vignoli) e il Politecnico di Milano (Prof.ssa Binda) prima e dopo l'applicazione di solette di betoncino armato, si sono ottenuti diagrammi taglio-deformazione come riportato in fig. 27. I risultati mostrano chiaramente come con questo tipo di consolidamento sia possibile incrementare notevolmente anche la resistenza e la rigidezza a taglio delle murature.

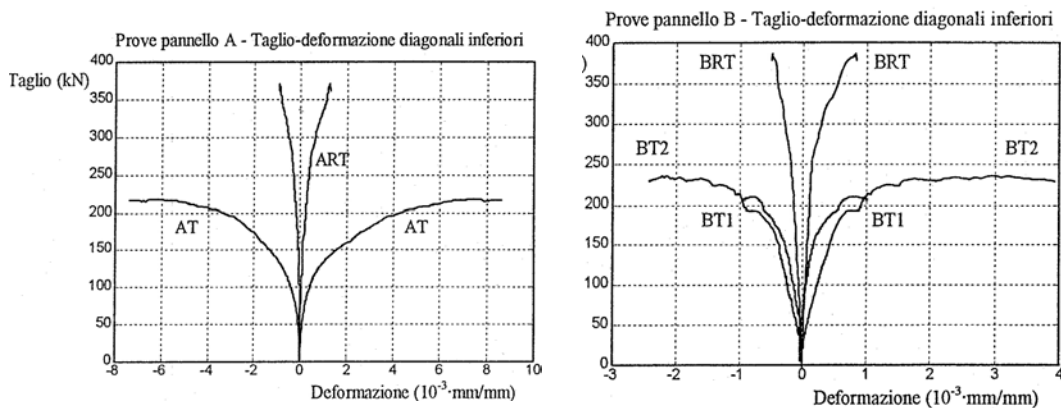


Fig. 27 - Diagrammi taglio-deformazione diagonale per pannelli non consolidati (AT e BT) e per pannelli consolidati con le paretine armate (ART e BRT).

6.4.2 Modellazione numerica

La costruzione del modello numerico per l'analisi agli elementi finiti del pannello consolidato con paretine in betoncino risulta un'operazione molto delicata

se si vuole approssimare con sufficiente attendibilità il reale comportamento della struttura. Essa presenta infatti notevoli effetti di non linearità, dovuti al comportamento dei materiali (legge costitutiva della muratura), al meccanismo di trasferimento del carico all'interfaccia fra muratura e paretina (fenomeni di ingranamento ed attrito) e alla non linearità geometrica (eccentricità elevate di carico sulla paretina).

Un modello eccessivamente complesso non troverebbe giustificazione nella scarsa conoscenza dei meccanismi locali di trasferimento del carico all'interfaccia, che possono condizionare notevolmente il comportamento globale della struttura. Si è sviluppato pertanto un modello bidimensionale, utilizzando elementi ad una o due dimensioni a stato piano di deformazione e considerando come parametro di taratura le deformazioni trasversali.

6.4.2.1 Descrizione del modello

I parametri caratteristici per la modellazione sono stati ricavati dalle prove di laboratorio per i singoli materiali (calcestruzzo dei cordoli di ripartizione del carico, acciaio dei tirantini passanti di collegamento e betoncino additivato), mentre per i parametri caratterizzanti il comportamento della muratura, si è fatto ricorso a prove in sito (Fig. 28). Per la valutazione dei parametri non noti, quali il coefficiente di Poisson, l'angolo d'attrito e la coesione del materiale, si è invece costruito un modello numerico del pannello in muratura non consolidato, sottoposto più volte alla simulazione della prova di compressione (fig. 29).

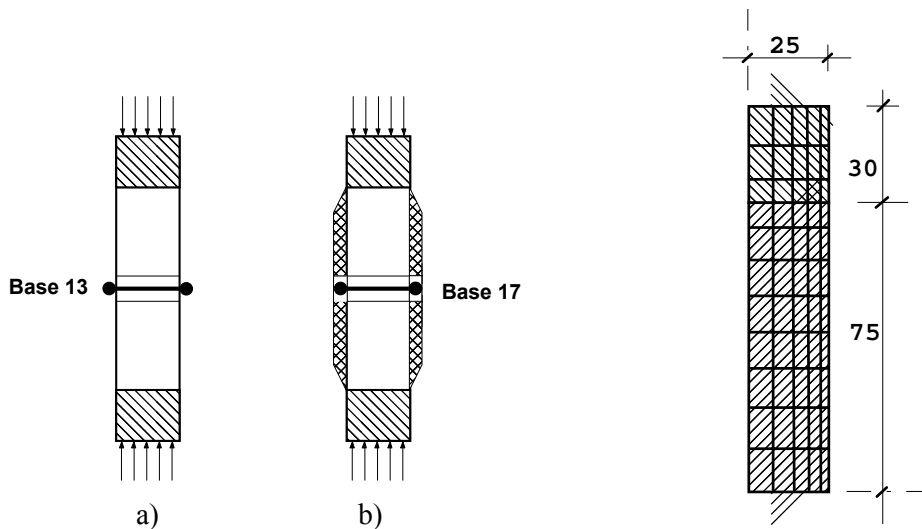


Fig. 28 - Posizioni delle basi di misura trasversali. Fig. 29 - Modello del pannello non consolidato.

Nel determinare la geometria del modello consolidato, particolare cura si è posta nell'approntare gli elementi che, all'interfaccia fra la muratura e le paretine in betoncino, trasmettono lo sforzo di taglio dal primo mezzo al secondo (fig. 30).

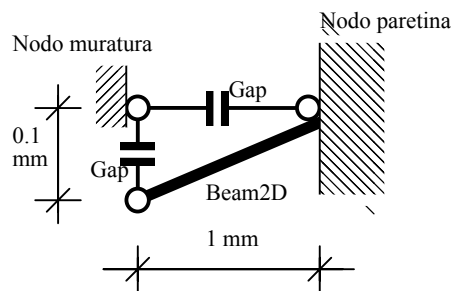


Fig. 30 - Elementi di trasmissione del taglio.

Il modello così costruito è stato sottoposto ad analisi numerica non lineare con incremento del carico costante pari ad ogni passo di elaborazione al valore di 1 kg/cm^2 . Come parametro di confronto con il pannello reale si è ricorsi alla deformazione trasversale del modello in mezzeria; tali dati, per quanto riguarda il modello fisico, sono stati forniti dai valori misurati sulla base 17 durante la sperimentazione (vedi Fig. 28). Il confronto, riportato in Fig. 31, mostra un buon accordo tra i tratti lineari sia per il muro non consolidato che per quello consolidato. La perdita di linearità della curva sperimentale è ancora ben colta dai risultati del modello. Nel muro non rinforzato la quasi perfetta corrispondenza tra le curve scompare in corrispondenza di una probabile rottura fragile locale della muratura. Il modello non può cogliere queste variazioni brusche nel diagramma, ma si può notare che nella fase successiva le due curve a confronto abbiano lo stesso andamento fino a collasso.

I risultati numerici evidenziano anche che la trasmissione degli sforzi di taglio all'interfaccia tra muratura e pareti è concentrata alla sommità. In particolare, per qualsiasi carico applicato, più del 90% del taglio tra il muro ed il rinforzo è concentrato in sommità, in una zona lunga 40 cm. Anche quando il sistema è vicino al collasso tale contributo è maggiore dell'80%. Questo comportamento è evidenziato nella fig. 32.

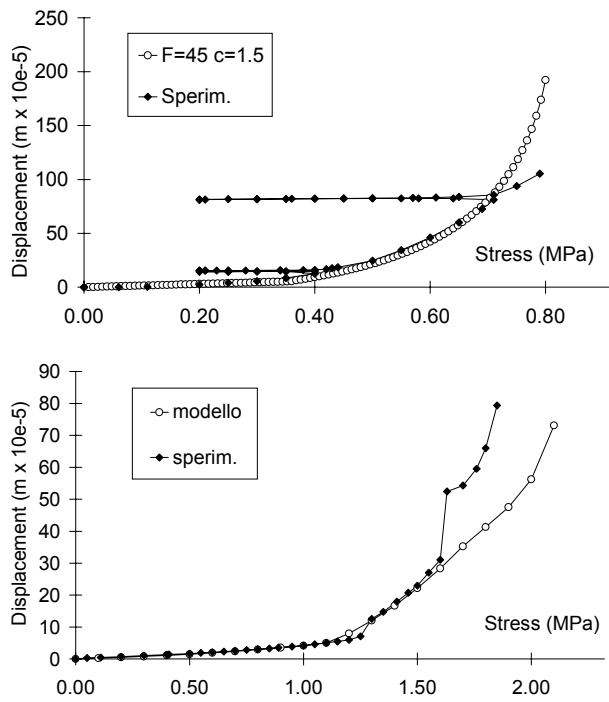


Fig. 31 - Confronto tra i risultati sperimentali e numerici per il pannello originale (sopra) e rinforzato (sotto).

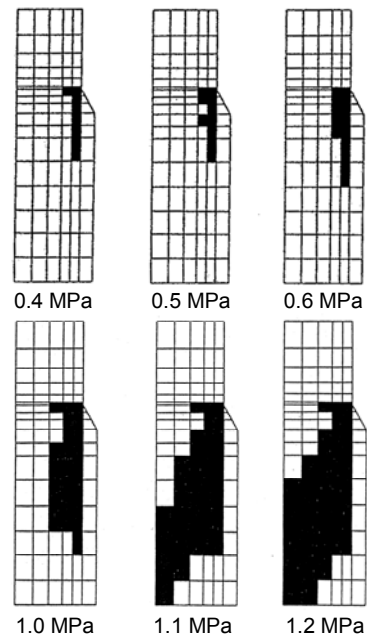


Fig. 32 - Evoluzione della plasticizzazione nel muro consolidato.

6.4.2.2 Varianti del modello base

Sulla base del modello numerico descritto nel capitolo precedente si sono creati nuovi modelli variando alcuni parametri geometrici caratteristici quali:

- i) l'area d'acciaio dei tirantini (A);
- ii) lo spessore della paretina di contenimento (S);
- iii) l'altezza della parete (H).

Per quanto riguarda l'area d'acciaio ci si è riferiti all'area corrispondente ad un numero intero variabile di tondini del diametro di 6 mm (come quelli del modello di riferimento) per metro quadrato di pannello; si sono considerati valori di 3, 8 e 10 $\varnothing 6$ per metro quadro, con un'area equivalente variabile da poco più della metà al doppio di quello modello di riferimento.

Gli spessori considerati della paretina di betoncino sono stati di 3, 4, 6, 7 ed 8 cm.

Sono stati sviluppati, inoltre, modelli con due altezze diverse dall'originale (1.5 m) e più vicine alle altezze dei muri reali, considerando valori di 3 e 4 m.

Si è infine provveduto a realizzare alcuni modelli combinando insieme alcuni di questi valori.

In Tab. 5 si sono riassunte le variabili caratteristiche per tutti i modelli sviluppati.

Tab. 5: Variazioni geometriche nei modelli numerici considerati.

Variazioni nei confronti di	Modelli	Numero tondini	Spessore paretine (cm)	Altezza muro (m)
Modello di riferimento	Riferimento	5Ø6/m ²	5	1.5
Numero tondini	A3	3Ø6/m ²	5	1.5
	A8	8Ø6/m ²	5	1.5
	A10	10Ø6/m ²	5	1.5
Spessore paretine	S3	5Ø6/m ²	3	1.5
	S4	5Ø6/m ²	4	1.5
	S6	5Ø6/m ²	6	1.5
	S7	5Ø6/m ²	7	1.5
	S8	5Ø6/m ²	8	1.5
Altezza muro	H3	5Ø6/m ²	5	3
	H4	5Ø6/m ²	5	4
Tondini e Spess. paretine	S3A3	3Ø6/m ²	3	1.5
	S8A10	10Ø6/m ²	8	1.5
Tondini e Altezza muro	H3A3	3Ø6/m ²	5	3
	H3A10	10Ø6/m ²	5	3
	H4A3	3Ø6/m ²	5	4
	H4A10	10Ø6/m ²	5	4
spessore paretine e altezza muro	H3S3	5Ø6/m ²	3	3
	H3S8	5Ø6/m ²	8	3
	H4S3	5Ø6/m ²	3	4
	H4S8	5Ø6/m ²	8	4

L'elaborazione dei modelli caratterizzata solo dalla variazione dell'area di acciaio ha evidenziato una resistenza crescente con l'aumentare della quantità di d'acciaio, come evidenziato nel diagramma riportato in fig. 33.

Si nota facilmente come il primo tratto elastico non risenta apprezzabilmente della variazione del parametro, coincidendo praticamente per tutti e quattro i casi. Solo attorno al valore di sollecitazione di 1.1 MPa il nucleo interno alla sezione della muratura si plasticizza; di conseguenza la spinta sulle paretine aumenta e i tiranti sono costretti a sopportare incrementi di forza via via più elevati e si deformano in base alla loro rigidità assiale. Si ottengono in questo modo le diverse pendenze delle curve in figura, dove quelle a maggiore rigidità si riferiscono ai modelli con area d'acciaio superiore. Raggiunto per entrambi i tiranti il valore della tensione di plasticizzazione (il primo a plasticizzare risulta il sempre il tirante superiore), variabile per ogni modello, non potendo essere sopportati più incrementi di carico, la paretina non risulta più trattenuta e la curva subisce un'ulteriore impennata. Si giunge così improvvisamente al collasso finale, che avviene per espulsione della paretina con tipico fenomeno di instabilità laterale.

I modelli con variazione dello spessore della paretina di contenimento, prevedono incrementi di un centimetro a partire da un valore minimo di 3 fino ad un massimo di 8 cm (valori che rientrano negli intervalli suggeriti generalmente dai vari ricercatori ed applicati a molti casi reali).

Il diagramma di fig. 34 riporta il confronto dei carichi di rottura per i vari modelli; risulta evidente un leggero decremento della resistenza all'aumentare dello spessore della paretina di contenimento, scendendo da un valore di 2.2 MPa per lo spessore minimo di 3 cm, a 1.7 MPa per il modello con spessore massimo della paretina di 8 cm.

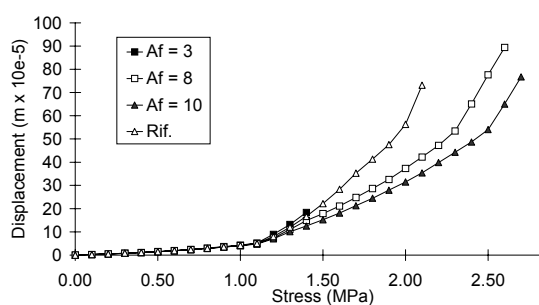


Fig. 33 - Modelli con diversa area di acciaio.

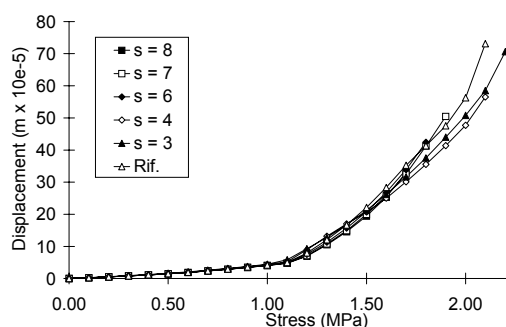


Fig. 34 - Modelli con variazione di spessore della paretina.

Anche in questo caso si nota come il primo tratto elastico coincida praticamente per tutti i modelli; la rottura avviene prima nei modelli a spessore maggiore della paretina che in quelli a spessore inferiore.

Per spiegare questo fenomeno apparentemente paradossale si può pensare all'instaurarsi di fenomeni di instabilità globale delle paretine, avanzando le seguenti ipotesi.

L'azione del muro sulla paretina può essere suddivisa in due singoli meccanismi, causati da due modalità differenti di applicazione delle azioni suddette, illustrate in fig. 35.

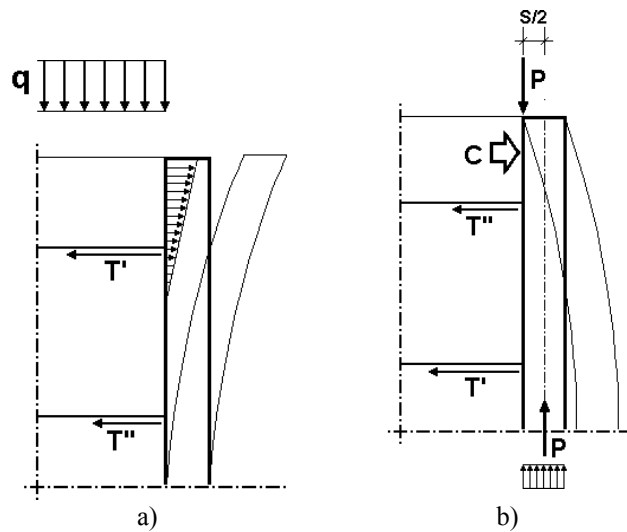


Fig. 35 - Azioni della muratura sulle pareti: primo tipo (a) e secondo tipo (b).

Una prima azione che agisce sulla paretina è la spinta esercitata dallo strato superiore della muratura, ormai plasticizzata e più libera di deformarsi trasversalmente, sulla parte corrispondente della parete di contenimento. Tale spinta viene contrastata dai due tiranti, che sviluppano le due reazioni T' e T'' . Risulta evidente che la barra superiore, per effetto della maggiore sollecitazione, arriva alla plasticizzazione prima di quella inferiore. A plasticizzazione avvenuta del tirante superiore la parete tende ad incurvarsi e la deformata che ne consegue presenta la concavità verso l'esterno.

Si può supporre, per l'altro tipo di azione e secondo una schematizzazione approssimata, che lo sforzo di taglio P venga trasmesso tutto alla testa della paretina con un'eccentricità pari ad $s/2$. La tensione che si sviluppa in mezzeria della paretina è approssimativamente uniforme nello spessore ed offre la reazione a tale sforzo in corrispondenza al baricentro dello stesso. Le due forze P risultano quindi disassate di circa $s/2$ e danno origine ad una coppia che viene equilibrata da un'altra di verso opposto composta dalle reazioni dei tiranti T' e T'' e dalla forza risultante C delle compressioni che si generano in testa alla muratura dove la paretina si appoggia. Anche in questo caso la paretina tenderà ad incurvarsi, ma la deformata avrà concavità rivolta verso l'interno, mentre il tirante più sollecitato e quindi, il primo a raggiungere la plasticizzazione, sarà quello inferiore.

Queste due azioni, in realtà, si combinano nel sollecitare la paretina; ma, mentre la prima si può ritenere non vari significativamente al variare dello spessore, la seconda dipende invece in maniera diretta da questo parametro, per effetto della variazione del braccio della coppia. Quello che si può supporre è che aumentando lo spessore il secondo meccanismo divenga predominante sul primo portando prima all'instabilità la paretina.

I risultati delle elaborazioni sembrano confermare questa ipotesi, essendosi riscontrata prima la plasticizzazione nel tirante superiore nelle pareti con spessore sottile e di quello inferiore nelle pareti a spessore più elevato. In particolare, nel modello S6, si è rilevato che la plasticizzazione dei due tiranti avviene all'incirca contemporaneamente per un valore del carico di 1.8 MPa, ad indicazione che le due modalità di azione si equivalgono.

Proseguendo la modellazione, si è scelto di combinare insieme lo spessore massimo della paretina (che aveva fornito la minore resistenza fra i modelli del primo gruppo) con l'area massima d'acciaio (che aveva fornito la massima resistenza fra i modelli del secondo gruppo), e lo spessore minore della paretina (dal comportamento migliore fra gli elementi del primo gruppo) con la minima area d'acciaio (peggiore comportamento nel secondo gruppo).

I risultati di queste elaborazioni sono rappresentati dal diagramma sollecitazione/deformazione trasversale riportato in fig. 36 dove per confronto viene riportata anche la curva relativa al modello di riferimento.

Dopo il solito tratto lineare simile per le tre curve, si nota una fase plastica con perdita di rigidità maggiore per quanto riguarda il modello con area d'acciaio inferiore dove, fra l'altro, non risulta evidente il tratto finale.

Questo si era notato anche per il modello del primo gruppo con area d'acciaio corrispondente, ed indicava una perdita di stabilità repentina della paretina dopo la contemporanea plasticizzazione dei due tiranti; si nota però che il carico di rottura risulta superiore, segno che una riduzione dello spessore ha pure ridotto gli effetti del secondo tipo descritti al punto precedente.

Anche l'aumento dell'area d'acciaio nel modello con $s=8$ ha sortito effetti benefici elevando la resistenza da 1.7 a 2.0 MPa. Questo risultato conferma l'importanza che rivestono elevate sezioni d'acciaio nell'aumento della resistenza e della rigidità in fase plastica.

Altro parametro molto influente sul comportamento globale dei modelli numerici della muratura consolidata si è rivelata l'altezza. Il modello predisposto riproduce un pannello di prova ricavato da una parete esistente, su cui si sono realizzate le prove di compressione monoassiale, ma risulta di un'altezza ridotta ($H = 1.5$ m) rispetto alle pareti che normalmente si incontrano negli interventi di consolidamento.

Come si può notare dal diagramma di fig. 37 l'incremento di resistenza aumenta visibilmente con l'altezza, passando da 2.1 MPa per $H = 1.5$ m, a 2.2 MPa per $H = 3$ m, fino a raggiungere 2.5 MPa per l'altezza $H = 4$ m.

L'aumento di resistenza in questo caso avviene per un'alterazione al meccanismo di plasticizzazione dovuto proprio alla variazione dell'altezza apportata ai nuovi modelli.

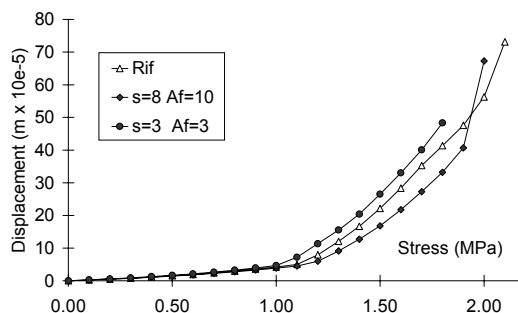


Fig. 36 - Confronto con modelli con s_{max}, A_{max} e s_{min}, A_{min} .

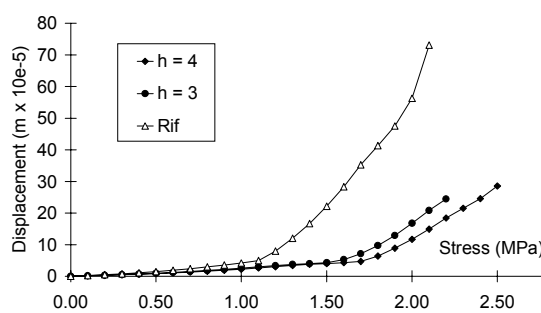


Fig. 37 - Confronto tra modelli a diversa altezza.

Infatti, mentre per il modello di riferimento, il processo parte dai primi elementi esterni superiori per poi espandersi diagonalmente verso il piano medio verticale della sezione, nel pannello basso gli elementi plasticizzati superiori si uniscono a quelli simmetrici inferiori provenienti dal verso opposto lasciando quindi isolata un'area esterna non plasticizzata libera di deformarsi che spinge sulla paretina.

L'effetto dell'altezza maggiore fa sì che il processo di plasticizzazione non riesca ad espandersi verso il centro congiungendosi con l'opposto; anche nelle fasi finali di carico rimane un nucleo centrale non plasticizzato, anche perché il carico trova una lunghezza maggiore per completare il suo trasferimento alla paretina scaricando sempre più la muratura.

Infine, nei pannelli alti, è stato osservato che l'incremento di acciaio produce un incremento di rigidità e resistenza (fig. 38) e che un maggiore spessore della paretina comporta un rilevante incremento di resistenza (fig. 39) dovuto al meccanismo di collasso causato dalla flessione locale della paretina.

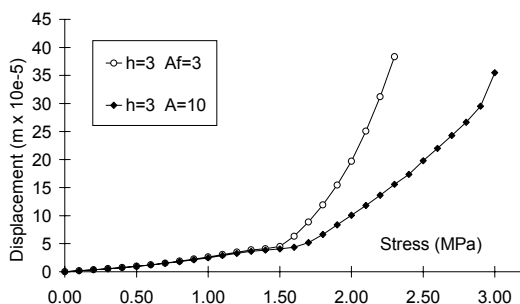


Fig. 38 - Confronto tra H3A3 e H3A10.

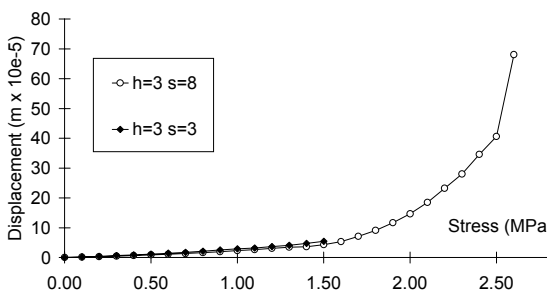


Fig. 39 - Confronto tra H3S8 e H3S3.

Sulla base di questi risultati è ora possibile avanzare delle osservazioni conclusive di carattere qualitativo; il comportamento del sistema muratura-paretina infatti risulta notevolmente complesso per cui un modello relativamente semplice

come quello proposto può cogliere solo in parte i fenomeni che realmente avvengono.

Un aumento dell'area di acciaio migliora le caratteristiche meccaniche della muratura specialmente in fase plastica. Nulla si può dire però sulla possibilità di potere usare poche barre di elevato diametro invece che una distribuzione più diffusa di barre sottili, cosa non di poco conto se si considera il costo economico dell'operazione che nel secondo caso risente molto dell'impiego della manodopera. Solo un modello tridimensionale può dare indicazioni attendibili in tal senso.

Anche il posizionamento dei tiranti sulla parete gioca un ruolo determinante sull'efficacia dell'intervento di consolidamento: nelle pareti di altezza più usuale la rottura avviene per inflessione locale della paretina ai margini estremi; per contenerla e ridurla risulta allora consigliabile infittire in queste fasce piuttosto che al centro la distribuzione dei tiranti.

Sempre nelle pareti con elevata altezza rispetto al modello standard risulta importante lo spessore della paretina che aumenta la rigidità flessionale; in proposito si rileva pure l'importanza di un'adeguata rete elettrosaldata, da posizionarsi il più possibile vicino alla superficie esterna, che deve farsi carico delle trazioni che si verificano al lembo esterno della paretina per le effetto di dette inflessioni. Diminuendo l'altezza della parete è bene però non aumentare oltremodo il valore dello spessore, potendo verificarsi azioni del secondo tipo viste in precedenza, per le quali lo spessore eccessivo può innescare precoci effetti di instabilità.

6.4.3 Alcune considerazioni sui risultati ottenuti

In base ai risultati sperimentali e numerici fin qui esposti è possibile avanzare una serie di ipotesi sull'impiego delle paretine armate o delle iniezioni come tecniche di consolidamento per murature di pietra:

- 1) È stato osservato che il caso con consolidamento effettuato con applicazione della paretina solo da un lato non ha registrato alcun aumento della resistenza; ciò è probabilmente dovuto ad una concomitanza di diversi aspetti:
 - l'impossibilità di eseguire un adeguato ancoraggio delle barre trasversali alla muratura, che in genere presenta bassa resistenza;
 - la scarsa aderenza superficiale all'interfaccia dei due materiali, che non permette quindi il trasferimento dello sforzo applicato dalla muratura alla paretina armata;
 - il possibile innesco di una sollecitazione flessionale anomala dovuta al fatto che la muratura caricata, deformandosi in base alle proprie caratteristiche meccaniche, perviene a collasso prima che la lastra in c.a. possa attivare il proprio effetto.
- 2) Il consolidamento con paretine è un metodo semplice e rapido e adatto per murature anche molto scadenti, ma necessita di un adeguato dimensionamento sia in quanto altera le rigidità sia a compressione che a taglio della muratura originaria, sia in relazione ai fenomeni di instabilità possibili delle lastre, per

effetto della scarsa presenza di collegamenti trasversali. Di queste considerazioni si deve tener conto soprattutto in tema di comportamento sotto azioni sismiche.

- 3) La tecnica di rinforzo con iniezioni permette di incrementare la resistenza senza però variare eccessivamente le caratteristiche di deformabilità della muratura originaria. Tale aspetto rende opportuno l'impiego di questo tipo d'intervento per interventi globali negli edifici, dove risulta importante non alterare il comportamento statico globale, oppure per interventi parziali che possono diventare pericolosi in caso di forti variazioni della deformabilità. La stessa tecnica però presenta grosse difficoltà nella scelta del materiale più appropriato (possibili incompatibilità chimiche o fisiche dei componenti di classico uso con il substrato delle murature) e nella valutazione del numero adeguato di punti d'immissione della miscela.
- 4) Nell'ambito delle prove sperimentali in sito, la tecnica di caratterizzazione basata sull'impiego dei martinetti piatti ha mostrato di poter rappresentare il punto di passaggio nella correlazione dei risultati tra prove distruttive e prove non distruttive (prove soniche, in particolare).

6.4.4 Una stima dei costi

In collaborazione con alcuni Enti dell'area trentina, l'U.O. di Padova ha raccolto alcuni dati per compiere una valutazione economica degli interventi maggiormente impiegati per il consolidamento. Lo scopo è quello di effettuare, sulla base dei risultati delle precedenti analisi, una valutazione costi-benefici delle tecniche proposte.

A titolo di esempio è riportato, in tab. 6, il confronto dei costi previsti per l'esecuzione degli interventi:

Tab. 6 - Esempio di confronto dei costi relativi alle due tecniche di consolidamento.

LAVAGGIO MURATURA	OPERAI	ORE	COSTO/H	TOTALE
MANO D'OPERA	2	3	38.000	228.000
NOLEGGIO FIORETTO				60.000
ACQUISTO TUBO IN GOMMA				20.000
ACQUA				1.000
INIEZIONE				
MANO D'OPERA	3	4	38.000	456.000
NOLEGGIO MACCHINA				200.000
CEMENTO(4.5q.li x 19.000)				85.500
ACQUA				1.000
			TOTALE	1.051.500

Costo a mc. di muratura iniettata

£\mc. 262.000

	OPERAI	ORE	COSTO/H	TOTALE
MANO D'OPERA	2	5	38.000	380.000
NOLEGGIO FIORETTO				60.000
BETONCINO(6.16mq x 152.000)				936.320
			TOTALE	1.376.320

Costo a mc. di muratura consolidata

£\mc. 343.736

7. LE INIEZIONI ARMATE

7.1 Aspetti generali

La tecnica delle iniezioni armate consiste nel disporre armature all'interno della muratura, inserendole in fori successivamente cementati con miscele per iniezioni.

In base alla modalità di impiego, possono avere la funzione di “cucitura” tra elementi sconnessi (rinforzo localizzato delle zone d'angolo, ammorsamento dei muri ortogonali, ricongiungimento di parti lesionate) oppure di rinforzo dell'intero elemento strutturale.

In presenza di murature di buona qualità, che non siano degradate, ma non presentino adeguate ammorsature tra le pareti ortogonali, è possibile infatti ripristinare il collegamento tra i diversi elementi strutturali per mezzo di un reticolo di fori armati e cementati.

Viceversa, se estese ai componenti strutturali (pilastri o pareti), le iniezioni armate permettono di conferire alle murature esistenti una maggiore resistenza alle sollecitazioni (taglio, pressoflessione) conferendo caratteristiche simili a quelle della muratura armata.

Dal punto di vista strutturale, tale tecnica di consolidamento associa all'aumento di resistenza a compressione della muratura, prodotta dalla cementazione, un ampliamento del dominio di rottura nel campo delle trazioni, per effetto della presenza di armatura metallica.

La disposizione trasversale nello spessore del muro delle barre di armatura consente, inoltre, di contrastare l'espansione laterale degli elementi compressi.

La tecnica non comporta modifiche dal punto di vista estetico, per cui può collocarsi tra gli interventi possibili per opere di particolare pregio artistico.

7.2 Modalità esecutive

7.2.1 Prescrizioni normative

Le iniezioni armate non sono quasi per niente contemplate dai decreti ministeriali presi come riferimento per questo studio; solo le circolari del 1981 e l'ultima del 1997, contengono una breve e sommaria descrizione dell'intervento, inclusa nella sezione dedicata alle iniezioni, e classificata alla pari con i due tipi di miscela proposti, quella a base di legante cementizio e quella a base di resine organiche.

Circolare 30 Luglio 1981:

3.3.2 Iniezioni di miscele leganti:

c) Iniezioni armate:

Tale sistema di consolidamento prevede l'inserimento nella muratura di un reticolo di barre metalliche, assicurandone la collaborazione mediante sigillatura con miscele cementanti.

L'uso di questa tecnica è particolarmente consigliabile allorché si debbano realizzare efficaci ammorsature tra le murature portanti, nei casi in cui non si possa ricorrere all'uso di altre tecnologie.

In quest'ultimo caso le cuciture consistono in armature di lunghezza pari a 2-3 volte lo spessore delle murature, disposte in fori trivellati alla distanza di 40-50 cm l'uno dall'altro ed inclinati alternativamente verso l'alto e verso il basso di circa 45°. I fori vengono successivamente iniettati e la miscela si diffonde in corrispondenza dello spigolo dell'edificio determinato dalle pareti ortogonali così "cucite" realizzando un complesso molto resistente.

Le miscele leganti da impiegare sono dello stesso tipo di quelle esaminate ai punti precedenti con l'avvertenza che dovranno essere ancora più accentuate le caratteristiche di elevata aderenza ed antiritiro, per poter contare sulla collaborazione tra armature e muratura, oltre che di resistenza, poiché nel caso specifico le iniezioni sono localizzate nelle zone più sollecitate.

Qualche volta può essere necessario consolidare preventivamente la muratura mediante iniezioni semplici.

Circolare 10 Aprile 1997:

La circolare riprende, nell'allegato 3 al punto 3. Iniezione di miscele e leganti, la tecnica delle cuciture armate grossomodo negli stessi termini espressi dalla circolare del 1981.

L'unica nota è che non viene dato uno specifico angolo di inclinazione per i fori trivellati (nella precedente circolare era di circa 45°).

7.2.2 *Tecnica di esecuzione*

L'intervento si esegue introducendo, in fori praticati nelle murature, barre di acciaio ad aderenza migliorata del diametro di 12-16 mm o trefoli di acciaio armonico che, per mezzo dell'iniezione di malta cementizia, vengono solidarizzate al supporto murario.

Per la realizzazione dei fori, generalmente inclinati, è necessario adoperare una perforatrice a rotazione capace di realizzare fori di diametro modesto (dell'ordine di 4-6 cm) e di lunghezza a volte notevole.

In fig. 40 è riportato uno schema con alcuni casi possibili di posizionamento delle iniezioni armate.

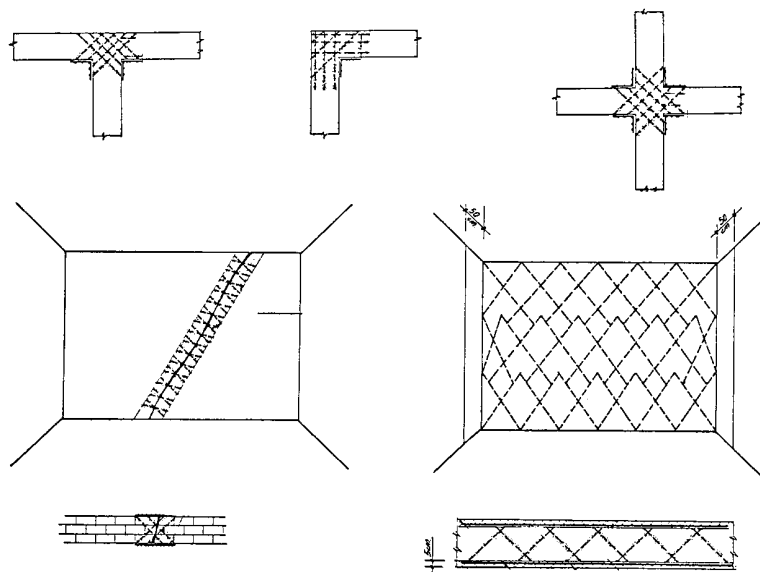


Fig. 40 - Schemi tipici di reticoli cementati: in corrispondenza di intersezioni murarie, per il ripristino di lesioni, e per il rinforzo dell'intero elemento strutturale.

Le fasi di esecuzione della tecnica sono:

1) *Perforazioni:*

- tracciamento della posizione e del percorso delle perforazioni;
- foratura della muratura: i fori, inclinati alternativamente verso l'alto e verso il basso e direzionati variamente in pianta, hanno interasse tra i 40 e i 50 cm e lunghezza dipendente dal livello di aderenza sia tra malta e barre, sia tra malta e tessitura preesistente;
- pulitura dei fori per mezzo di getto d'aria in pressione, al fine di garantire una perfetta aderenza tra muratura e malta successivamente iniettata.

2) Posizionamento delle barre:

- posizionamento delle barre d'acciaio ad aderenza migliorata; in alcuni casi è opportuno realizzare efficienti ancoraggi alle estremità delle barre al fine di evitare il rischio di sfilamento;
- eventuale messa in tensione delle barre in modo da avere un'azione di contrasto sulla muratura prima dell'insorgere di nuove deformazioni.

3) Esecuzione delle iniezioni:

- getto della malta di completamento (boiaccia di cemento) a bassa pressione (2-3 atm) e riempimento dell'imbocco del foro con malta cementizia;
- sistemazione della testa del foro con riempimento dell'imbocco con cocci di laterizi e malta cementizia.

Ad intervento ultimato, la sovrapposizione delle aree interessate dalla trasudazione dell'acqua contenuta nella boiaccia di cemento iniettata in pressione costituisce un segnale di buona diffusione dell'intervento.

Nel caso di consolidamento di intere pareti, l'intervento può essere eseguito in concomitanza con l'operazione di iniezione del muro; l'inserimento delle barre può avvenire, allora, negli stessi fori di iniezione, posizionati opportunamente.

7.3 Valutazione dell'efficacia dell'intervento e confronto con la tecnica delle iniezioni

7.3.1 Alcuni risultati ottenuti

In tema di iniezioni armate, non sono disponibili molti casi di studio.

Si riportano i risultati della sperimentazione eseguita dall'U.R. dell'Università de L'Aquila (prof. Beolchini) su pannelli di muratura in pietrame, volta a valutare l'influenza delle modalità di rinforzo sulle caratteristiche fisico-meccaniche della muratura.

I campioni, isolati mediante tagli da pareti in muratura, sono stati testati in situ con cicli alterni di carico e scarico ripetuti. La procedura della prova è quella a compressione diagonale (v. fig. 14.b).

Il consolidamento è stato effettuato inserendo le armature orizzontalmente e parallele al piano della muratura (v. fig. 41). Tale schema di posizionamento è sicuramente innovativo e si propone come una nuova possibile applicazione, anche in ambito sismico.

Tuttavia, la tecnica si avvale di indagini non ancora sufficienti per la diffusione della tecnica direttamente sui casi reali.

Un pannello (sigla SD1) è stato portato vicino al collasso e consolidato con iniezioni in pressione; successivamente è stato sottoposto nuovamente ai cicli di carico (fase SD1R) e riconsolidato, ma questa volta mediante iniezioni armate,

utilizzando la stessa miscela della prima fase ed inserendo 4 barre di diametro 16 mm in fori passanti di 25 mm di diametro; infine, il pannello è stato portato a rottura sempre con lo stesso tipo di carico.

Altri due pannelli sono stati consolidati, dopo rottura, direttamente con le iniezioni armate (SD3 ed SD4), inserendo solo 2 barre di armatura, mentre un ultimo pannello (SD2) è stato portato a rottura senza alcuna successiva riparazione.

Si riportano in fig. 42 i risultati delle prove del pannello SD1 insieme alle corrispondenti curve involuppo dei cicli rilevati.

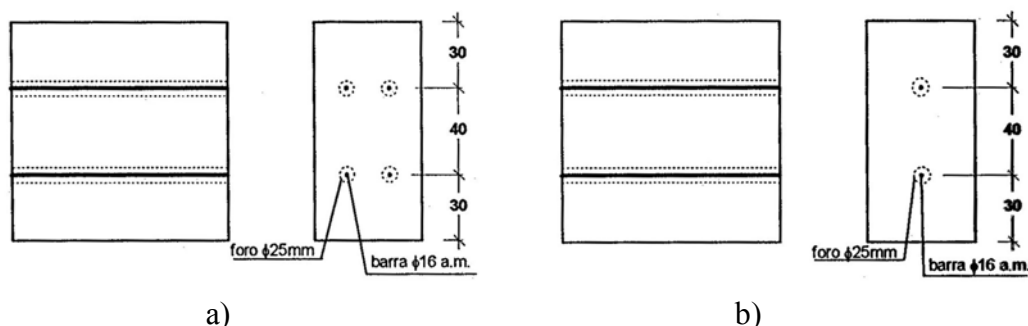


Fig. 41 - Posizionamento delle barre nei pannelli consolidati: a) pannelli tipo SD1, b) tipo SD3 ed SD4.

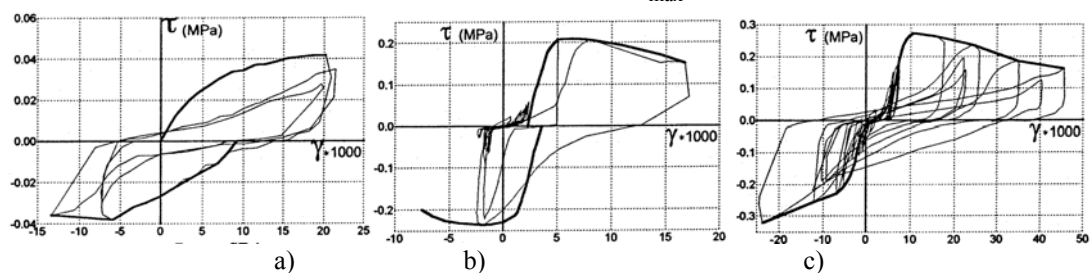
I risultati delle prove, riportati anche in tab. 7, indicano significativi incrementi del modulo di rigidezza iniziale, della resistenza (valutata in termini di carico massimo sopportato) e della duttilità (calcolata come rapporto tra deformazione ultima e quella elastica). In fig. 43 è riportata l'analisi in termini energetici dei pannelli testati; essa evidenzia significativi incrementi di energia dissipata per i campioni consolidati.

Tab. 7 - Caratteristiche geometriche e meccaniche, e duttilità dei pannelli testati⁶.

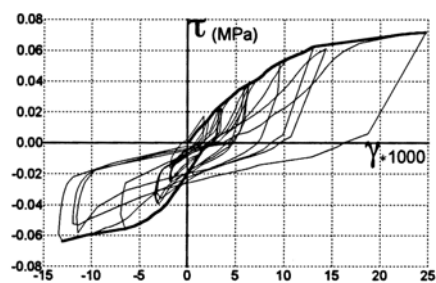
PROVA	Tipo di rinforzo	Dimensioni			τ_{max} (MPa)	G (MPa)	μ duttilità	G/G ₀	$\tau_{max}/\tau_{max,0}$
		base (mm)	spessore (mm)	altezza (mm)					
SD1	---	1070	530	1080	0.042	6.0	>3.2	---	---
					-0.038	3.2	>2.1	---	---
SD1R	iniezione di malta	1070	530	1080	0.208	122.6	6.3	20.6	5.0
					-0.236	99.7	4.8	31.4	6.2
SD1B	4 barre iniettate	1070	530	1080	0.273	82.4	5.4	13.8	6.5
					-0.322	49.7	4.0	15.7	8.5
SD2	---	1015	450	1020	0.068	6.6	>2.7	---	---
					-0.064	9.8	>2.6	---	---
SD3	---	1015	410	1055	0.062	8.0	>3.6	---	---
					-0.052	17.2	>1.9	---	---
SD3B	2 barre iniettate	1015	410	1055	0.267	68.6	8.7	8.6	4.3
					-0.236	64.3	9.2	3.7	4.6
SD4	---	1070	430	1045	0.063	8.0	>3.1	---	---
					-0.048	7.2	>2.8	---	---
SD4B	2 barre iniettate	1070	430	1045	0.192	112.2	>10	14.0	3.0
					-0.215	128.0	9.9	17.9	4.4

⁶ Legenda indici: R= rinforzato con iniezioni; B= rinforzato con iniezioni armate.

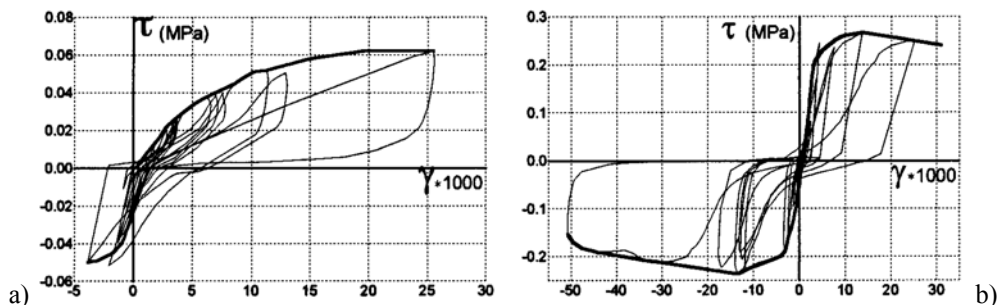
In tab. 7 ed in fig. 43, i valori con pedice c sono relativi al ciclo corrente, mentre i valori con pedice 0 si riferiscono al ciclo di riferimento definito dalla curva inviluppo dei cicli isteretici utilizzata per il calcolo di G e μ dei pannelli non rinforzati. In particolare, la curva inviluppo è stata linearizzata mediante una bilatera, assumendo per il primo tratto un modulo G calcolato dalla curva inviluppo nell'intervallo $0.1-0.4\tau_{\max}$, e per il secondo tratto da una retta orizzontale al livello $0.9\tau_{\max}$.



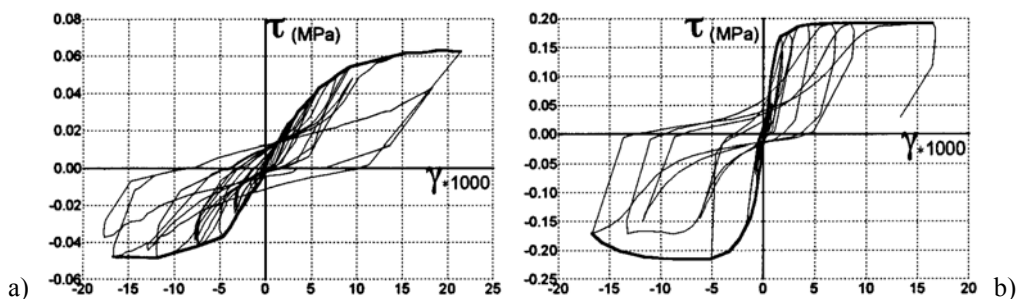
Prova SD1: a) pannello non consolidato, b) iniettato, c) consolidato con iniezioni armate.



Prova SD2: pannello non consolidato.



Prova SD3: a) pannello non consolidato, b) consolidato con iniezioni armate.



Prova SD4: a) pannello non consolidato, b) consolidato con iniezioni armate.

Fig. 42 - Diagrammi sollecitazione-deformazione ottenuti su pannelli non consolidato e consolidati con iniezioni e/o iniezioni armate.

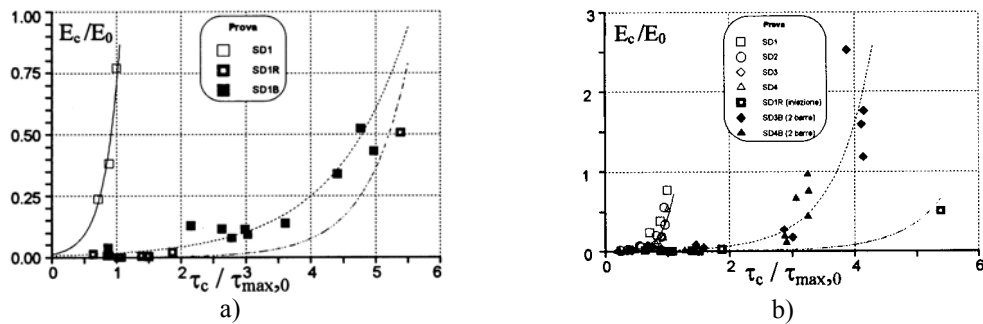


Fig. 43 - Risultati delle prove in termini di energia dissipata: a) prova SD1, b) confronto tra tutte le prove eseguite.

Il confronto tra le due tecniche impiegate ha mostrato che entrambe le tecniche di consolidamento hanno migliorato le caratteristiche meccaniche dei pannelli.

Tuttavia, si è rilevato un diverso contributo: i pannelli con le iniezioni hanno mostrato maggiore resistenza e maggiore rigidezza rispetto a quelli consolidati con le barre, i quali hanno fornito, per contro, una maggiore duttilità (2 volte quella dei pannelli iniettati e, in complesso, 6-10 volte quella dei pannelli vergini) e maggiore quantità di energia dissipata (più di tre volte superiore e con valori di carico massimo raggiunto anche quattro volte superiori). I pannelli rinforzati con iniezioni hanno mostrato valori di energia dissipata in prossimità del collasso paragonabile a quella relativa ai pannelli non consolidati, anche se con valori di carico massimo anche fino a cinque volte superiori.

8. LE TIRANTATURE METALLICHE

8.1 Aspetti generali

La tecnica d'intervento per mezzo di tirantature metalliche è particolarmente indicata nei casi in cui risultino inadeguati i collegamenti tra le pareti ortogonali, o insufficienti i vincoli tra pareti e solai. Attraverso l'applicazione delle catene è, infatti, possibile ottenere un efficace collegamento tra le strutture portanti in corrispondenza dei solai, assicurando così un funzionamento monolitico del complesso edilizio.

L'inserimento di tirantature metalliche tende, inoltre, ad eliminare o ridurre le spinte orizzontali trasmesse alle murature verticali da strutture tipicamente spingenti - archi, volte, capriate - sopperendo così alla scarsa resistenza a trazione, caratteristica delle murature.

Se le condizioni della struttura su cui si va ad operare lo consentono, è opportuno porre in opera le catene sotto un'adeguata pretensione così da evitare l'aggravarsi del dissesto ed anzi far regredire gli spostamenti che ad esso si accompagnano. Quanto detto evidenzia come la buona riuscita di una tecnica di intervento semplice, antica e pertanto molto diffusa quale l'incatenamento, sia sostanzialmente legata ad una corretta valutazione della pretensione necessaria ed al suo effettivo conseguimento.

8.2 Modalità esecutive

8.2.1 Prescrizioni normative

Prima di citare le prescrizioni normative, nell'evoluzione attinente alle riparazioni, è opportuno riportare alcune osservazioni sull'applicazione di tali elementi metallici, in relazione a problemi riscontrabili nella pratica corrente.

Visto il largo impiego dell'acciaio negli interventi di consolidamento statico delle murature, è importante soffermarsi su alcune considerazioni circa il problema della durabilità di tale materiale, tenuto conto delle difficoltà, e spesso della impossibilità pratica, di eseguire interventi di manutenzione.

In tale ambito va attentamente considerato l'impiego degli acciai speciali, in particolare gli inossidabili delle varie classi, sulla base delle loro caratteristiche di resistenza e di deformabilità, di lavorabilità e compatibilità con altri tipi di materiali.

Occorre tenere presente, a tale proposito, che le officine dove viene costruita la normale carpenteria, che utilizza acciai al carbonio, non sono necessariamente a conoscenza delle specifiche esigenze riguardanti le lavorazioni meccaniche e le saldature degli acciai inossidabili, per cui il capitolato dovrebbe essere più ricco di dettagli (attrezzature, velocità di lavorazione, tipo di elettrodi) quando è previsto

questo tipo di materiale. Allo stesso modo, è necessario porre attenzione alla possibilità che il materiale meno nobile si corroda a contatto con quello più nobile.

Appare quindi opportuno diversificare in più voci questa categoria di lavoro, e in particolare prevedere descrizioni per strutture metalliche in genere; tiranti e piastre, e tasselli per cuciture localizzate, distinguendo il caso degli acciai al carbonio da quello degli acciai inossidabili.

Occorre inoltre qualche specifica per i trattamenti superficiali e per l'esecuzione dei fori, per la posa e soprattutto per l'ancoraggio dei tiranti, nel caso non possa essere realizzato con piastre esterne (esecuzione dei fori inclinati nella muratura e successiva iniezione), e dei tasselli.

Si riportano di seguito i paragrafi delle normative sulle riparazioni, che descrivono la tecnica di consolidamento strutturale per mezzo dell'applicazione di tirantature metalliche.

Legge Regionale Friuli Venezia Giulia, DT 2 del Novembre 1977:

1.2.4. Tiranti

I tiranti possono essere realizzati con barre di acciaio normale o con trefoli di acciaio armonico.

Con l'applicazione di tiranti ancorati alle murature mediante piastre si raggiunge lo scopo di realizzare un efficace collegamento fra le strutture portanti dell'edificio.

Per svolgere efficacemente la funzione di collegamento i tiranti devono essere applicati con le seguenti modalità:

- *essere posizionati il più vicino possibile ai solai, avendo cura di limitare al massimo la spaziatura tra i tiranti che legano i muri tra loro perpendicolari;*
- *essere applicati su entrambe le facce dei muri per tutta la loro lunghezza ed essere il più possibile aderenti ai muri stessi.*

Nel caso di muri a spessore variabile o che presentino curvature o sporgenze, il contatto muro-tirante deve essere garantito mediante legature trasversali; tali legature devono comunque essere effettuate quando il muro presenta uno sviluppo libero superiore a 7 m.

Per la posa di tiranti si seguiranno le seguenti modalità:

- *i fori passanti saranno eseguiti con trapani a rotazione onde evitare sconnessioni;*
- *l'area di appoggio delle piastre dovrà essere accuratamente preparata rendendola piana con malta cementizia;*
- *il tirante verrà posto in trazione solo a malta indurita;*
- *i tiranti dovranno essere protetti dagli agenti atmosferici.*

Circolare 30 Luglio 1981:

3.3.5. Applicazione di tiranti

L'uso di tiranti di acciaio (analogamente a quello dei cordoli di piano) mira in primo luogo a migliorare lo schema strutturale – tramite la realizzazione di efficaci collegamenti tra le strutture murarie portanti – assicurando un funzionamento monolitico del complesso edilizio da consolidare.

Non risultano, per altro, trascurabili i vantaggi che ne conseguono nei riguardi della duttilità e della risposta ultima alle azioni sismiche, a parità di sollecitazioni agenti sull'elemento murario presollecitato.

Tuttavia, per quanto riguarda in particolare la presollecitazione verticale, si raccomanda che la tensione normale non superi, dopo la precompressione, il valore di un terzo di quella a rottura.

I tiranti possono essere posti in opera all'interno o all'esterno delle murature. Nel primo caso (tiranti trivellati) essi sono costituiti da trefoli d'acciaio armonico disposti inguainati entro fori trivellati nello spessore delle murature. Nel secondo caso i tiranti sono costituiti da barre di ferro disposte parallele sulle due facce della muratura ed ammorsate ad una piastra in testa del muro per mezzo di un sistema a vite che consente di imprimere uno stato di presollecitazione. Questo tipo di tiranti è prevalentemente usato nella disposizione orizzontale.

Gli elementi di contrasto sulle murature sono di regola costituiti da piastre metalliche che hanno il compito di distribuire la forza indotta dal tirante sulla muratura evitando concentrazioni di sforzi.

Nel caso di tirantature orizzontali queste adempiono inoltre al compito di legare le pareti ortogonali: a questo fine è opportuno che le teste dei tiranti siano collegate a piastre o a chiavi di grossa dimensione per migliorare le caratteristiche di connessione.

I tiranti esterni sono costituiti da barre metalliche aderenti alle murature e spesso poste in scanalature ricavate sulla loro superficie in modo da occultarne la vista. Anche qui, per i tiranti orizzontali, è opportuno disporre chiavi in testata, di dimensioni tali da garantire una buona legatura tra le murature.

Per i tiranti esterni sono estremamente utili dispositivi (come i tenditori) in grado di riprendere eventuali cadute di tiro che dovessero verificarsi nel corso degli anni.

Ordinanza N.230 del 5 Giugno 1984:

1.3.2. Incatenamenti

Ai livelli di volte e solai privi di cordoli o tiranti dovranno essere disposti incatenamenti sia esterni sia interni, su tutte le murature considerate resistenti alle azioni sismiche; tali incatenamenti, quando si riferiscono a murature esterne, dovranno interessare tutto il perimetro dell'edificio.

Le modalità esecutive saranno quelle della citata circolare n.21745 del 30 Luglio 1981.

Circolare 10 Aprile 1997:

Allegato 3 Punto 2. Applicazione di tiranti

Ove non sia presente un efficace cordolo in cemento armato, devono disporsi tiranti ancorati tramite piastre di dimensioni opportune o di chiavi, che consentano un'efficace cerchiatura dell'edificio.

I tiranti possono essere realizzati con normali barre in acciaio per armatura, piatti o profilati metallici o con trefoli in acciaio armonico. Questi possono essere disposti sia orizzontalmente che verticalmente, e devono essere estesi a tutta la dimensione della parete.

Se i solai non sono in grado di assicurare un sufficiente incatenamento delle pareti, si deve intervenire con tiranti orizzontali, ancorati all'esterno delle pareti medesime. In alternativa si possono far funzionare i solai come incatenamenti, applicando alle travi ed ai travetti, se questi elementi possono essere ritenuti idonei allo scopo, chiavi metalliche ancorate all'esterno della pareti.

L'uso di tiranti in acciaio, analogamente a quello dei cordoli di piano, mira a migliorare lo schema strutturale tramite la realizzazione di efficaci collegamenti tra le strutture murarie portanti, assicurando un funzionamento monolitico del complesso edilizio da consolidare.

Non risultano, peraltro, trascurabili i vantaggi che ne conseguono nei riguardi della duttilità e della risposta ultima alle azioni sismiche se i tiranti sono presollecitati.

Tuttavia, per quanto riguarda in particolare la presollecitazione verticale, è opportuno che la tensione normale, nelle murature, non superi, aggiunta alla precompressione, il valore di un quinto di quella di rottura.

8.2.2 Tecnica di esecuzione

I tiranti possono essere posti in opera all'interno o all'esterno delle murature. Nel primo caso si tratta di tiranti trivellati, costituiti da trefoli in acciaio armonico, disposti in guaine protettive entro fori trivellati nello spessore delle murature. Nel secondo caso i tiranti sono composti da barre, piatti o profilati in acciaio, aderenti alle murature o poste in scanalature ricavate sulla loro superficie in modo da occultarne la vista.

I dispositivi di ancoraggio delle catene alle murature sono costituiti da capichave metallici – a paletto o a piastra - che devono presentare caratteristiche di rigidità e resistenza tali da riportare le sollecitazioni trasmesse alla muratura entro valori ammissibili, così da evitare schiacciamenti o lesioni localizzate.

Le principali fasi di esecuzione di tale tecnica sono:

- 1) *Preparazione delle pareti*: al fine di creare un'area di appoggio della piastra di ancoraggio adeguata alle sollecitazioni agenti dopo la messa in tensione della catena, è importante intervenire sulle murature con la scrostatura dell'intonaco e con eventuali operazioni di consolidamento nelle zone interessate dagli ancoraggi.
- 2) *Dimensionamento delle catene e tracciamento dei livelli e degli assi dei tiranti*: per quanto riguarda il dimensionamento è da prendere in considerazione la resistenza a trazione del materiale metallico e quella a taglio del muro su cui agisce il capochiave. Le catene, di sezione non inferiore a $\Phi 16$, non possono avere lunghezza superiore ai 20 m e devono agire per tratti rettilinei.
Per il tracciamento dei livelli vanno osservati alcuni importanti criteri di posizionamento:
 - le catene vanno inserite a livello degli orizzontamenti ed in caso di solai sfalsati a metà fra i due;
 - è bene mantenere eventuali simmetrie in pianta in modo da evitare l'insorgere di pericolosi effetti torsionali sulla struttura;
 - le catene vanno inserite il più omogeneamente possibile lungo l'altezza dell'edificio in modo da ridurre la lunghezza libera di inflessione dei maschi murari per azioni normali al proprio piano;
 - la disposizione più corretta prevede: per i muri di spina catene accoppiate, adiacenti, una da una parte e una dall'altra dello stesso muro; per i muri esterni catene singole, collocate sul paramento interno (v. fig. 44).
- 3) *Foratura delle pareti ed inserimento dei tiranti*: la foratura è da effettuarsi a livello di ogni solaio, ad intervalli di altezza non superiore ai 4-5 m. Vanno utilizzate perforatrici che non producono scuotimenti e vibrazioni sulla muratura per evitare fenomeni fessurativi sulle zone di ancoraggio. Le catene devono quindi essere protette dall'azione degli agenti atmosferici con opportuni trattamenti o con guaine protettive. In genere sono da preferirsi catene inguainate in modo da poter effettuare operazioni di ritesaggio per compensare eventuali allentamenti.
- 4) *Messa in tensione dei tiranti*: il tiro della catena deve essere calcolato in modo che sia in grado di assorbire la forza sismica orizzontale dovuta alla massa delle murature comprese tra i punti medi degli interassi di catene contigue, sia in orizzontale che in verticale.
- 5) Dopo la perfetta rappresa del letto di malta cementizia ad elevate proprietà antiritiro, interposto tra la muratura e la piastra di ancoraggio, si procede con il tiraggio delle catene, che può essere ottenuto a caldo o a freddo.
- 6) *Allungamento a caldo*: una volta posta in opera la catena se ne riscalda il tratto centrale fino all'allentamento dei capichiave; a questo punto, bloccando nuovamente gli ancoraggi, la catena svilupperà il suo tiraggio raffreddandosi.

- 7) *Allungamento a freddo*: è possibile solo se le catene hanno almeno ad un estremo una filettatura e il capochiave è forato per permetterne il passaggio. Il tiraggio avviene avvitando il dado sull'estremo filettato della catena, fino a raggiungere l'allungamento calcolato. Invece del dado di testa, che contrasta sul capochiave, il tiraggio può avvenire per mezzo di un manicotto intermedio con filettature destra-sinistra.

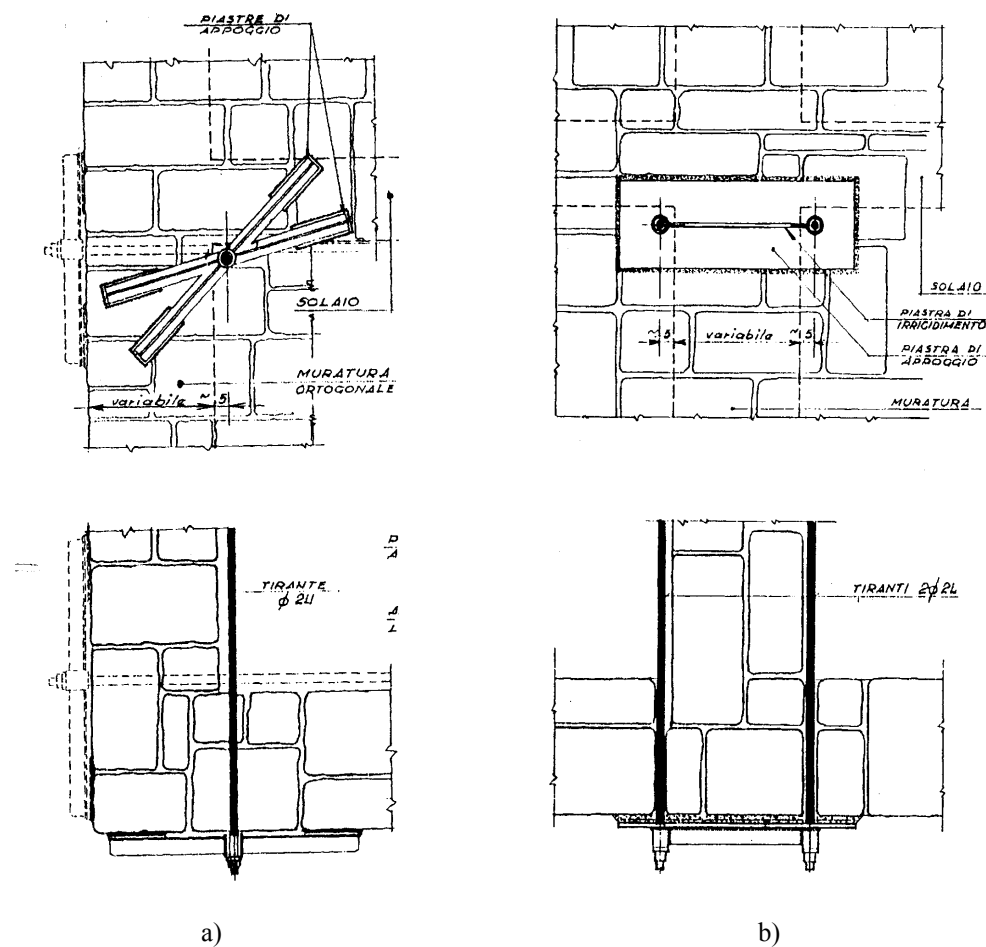


Fig. 44 - Sistema di ancoraggio: con chiavi in acciaio (a), con tiranti complanari con piastra irrigidita (b).

8.3 Valutazione dell'efficacia dell'intervento

8.3.1 Alcuni risultati ottenuti

Per quanto riguarda la tecnica di consolidamento per mezzo di tirantature metalliche, pochi sono i casi di studio effettuati.

A riguardo, si riportano i risultati ottenuti dalle prove eseguite dal prof. Tomazevic dell'Università di Lubiana (Slovenia), in cui vengono messi a confronto i comportamenti sismici di quattro modelli, a cui si sono applicate diverse tecniche di rinforzo.

I modelli rappresentano, in scala 1:4, semplici costruzioni di due piani in muratura di laterizio (v. tab. 8), e vengono testati su tavola vibrante, imprimendo una sollecitazione crescente fino al raggiungimento del collasso della struttura. Si riportano di seguito i principali risultati raggiunti.

Tab. 8: Caratteristiche strutturali dei modelli testati.

	Tipo di solaio		Tiranti metallici		Tiranti pretesi
	1° solaio	2° solaio	Longitudinali	Diagonali	
Modello A	legno	legno	no	no	no
Modello B	cemento	cemento	cordolo	-	-
Modello C	legno	legno	si	no	si
Modello D	legno	legno	si	si	no

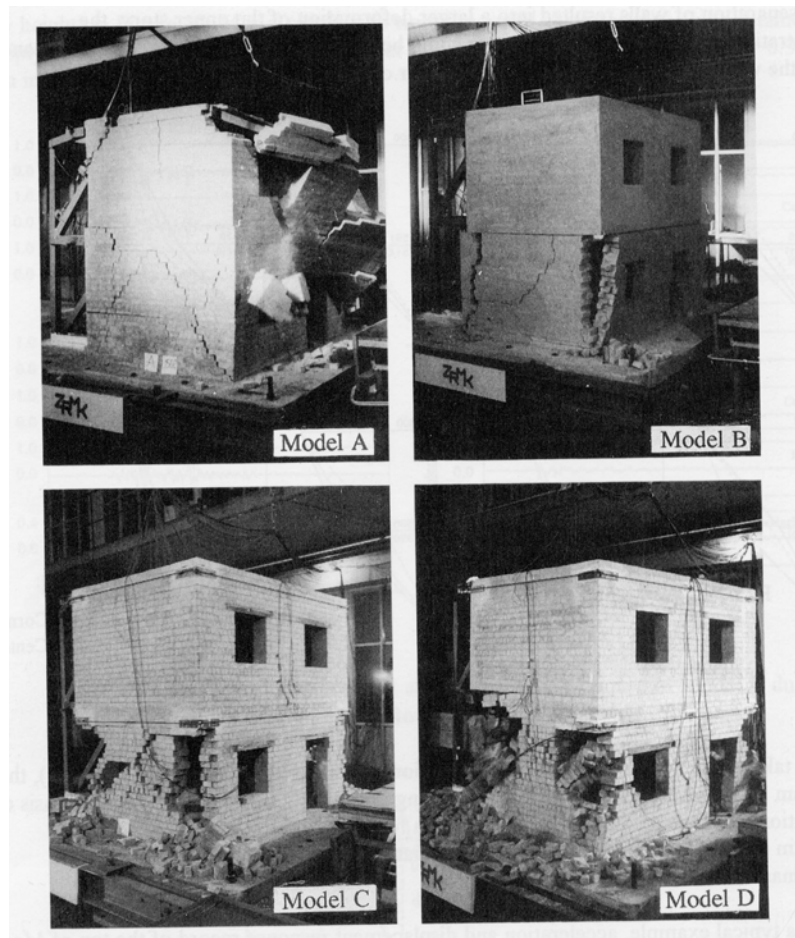


Fig. 45 - Meccanismi di collasso dei diversi modelli testati.

Come si può notare in fig. 45, nel *modello A*, con solai in legno non vincolati alle pareti, si sviluppano inizialmente delle lesioni in corrispondenza dei collegamenti tra pareti verticali ed orizzontamenti, quindi si nota il formarsi di lesioni orizzontali e diagonali, che portano al crollo della parte superiore del modello.

Il *modello B*, rinforzato con solai in cemento, presenta una struttura più rigida. La crescente sollecitazione, a cui è sottoposta la struttura, porta allo sviluppo di una lesione orizzontale in corrispondenza del primo solaio, con lo scorrimento del piano superiore su quello sottostante.

Il comportamento a blocco monolitico della parte superiore determina, nella parte inferiore delle murature, gravi lesioni verticali e il conseguente crollo delle angolate.

Nel caso dei *modelli C e D*, la presenza di tiranti metallici previene il distacco delle pareti verticali. In entrambi i modelli i crolli si sviluppano a livello del piano terra, mentre nella parte superiore si notano solo lievi danni. Il comportamento osservato è simile a quello del modello B: si verifica infatti un'oscillazione della

parte alta della struttura come blocco monolitico, che porta al ribaltamento fuori piano delle zone d'angolo.

E' importante sottolineare come non sia rilevante la differenza di comportamento sismico osservato nel modello con tiranti pretesi – *modello C* – da quello anche con tiranti posti diagonalmente – *modello D* – (v. fig. 46).

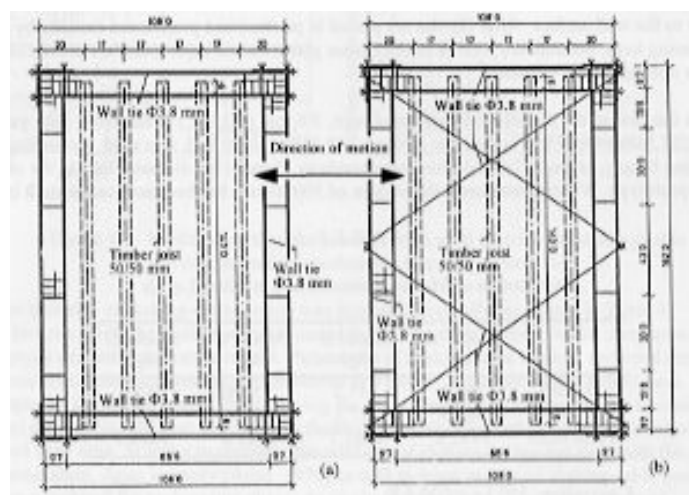


Fig. 46 - Posizionamento delle catene rispettivamente nei modelli C e D.

Le prove condotte in questo studio hanno confermato come il comportamento sismico degli edifici in muratura dipenda essenzialmente dalla rigidità degli orizzontamenti e dal grado di connessione esistente tra le pareti.

Nonostante la configurazione strutturale dei vari modelli sia identica, i differenti tipi di solai e il diverso sistema di collegamento tra le pareti hanno determinato diverse risposte meccaniche.

Mentre il solaio in legno del *modello A* non è in grado di prevenire la separazione tra le pareti, nei *modelli C e D*, dove le pareti sono efficacemente collegate con catene metalliche, l'integrità della struttura viene mantenuta fino al collasso finale.

Il crollo delle zone d'angolo, riscontrato nei *modelli C e D*, dimostra come le strutture murarie risultino vulnerabili in questi punti, che dovrebbero essere rinforzati con particolare attenzione. Il consolidamento delle angolate garantisce, infatti, un comportamento scatolare alla struttura, andando a migliorare la capacità di dissipare energia da parte dell'edificio.

I risultati di tali prove dimostrano, inoltre, come nel caso in cui le pareti siano adeguatamente collegate tra loro per mezzo di tirantature metalliche, meglio se pretese per una più efficace redistribuzione delle tensioni, la sostituzione dei solai in legno con solai in cemento non è condizione necessaria per conseguire un migliore comportamento sismico.

BIBLIOGRAFIA

- Abbaneo S., Baronio G., Binda L., Tiraboschi C. (1996): Murature in pietra: classificazione ed indagini preliminari per la scelta e la progettazione delle miscele per l'iniezione.
- Beolchini G. C., Grillo F., Ricciardulli G. (1997): Prove cicliche a compressione diagonale su pannelli in muratura di pietrame rinforzati con diverse tecniche: confronto dei risultati. *Atti del VIII Convegno Nazionale "L'Ingegneria sismica in Italia"*, Taormina.
- Beolchini G. C., Grillo F., Ricciardulli G., Valente G. (1996): Comportamento di una parete in muratura di pietrame rinforzata con iniezioni diffuse di malta di cemento soggetta a forze cicliche nel piano. *Atti del convegno "La muratura tra teoria e progetto"*, Messina.
- Bettio C., Modena C., Riva G. (1996): The efficacy of consolidating historical masonry by means of injections. *Seventh North American Masonry Conference*, Notre-Dame, Indiana-USA.
- Binda L., Anzani A., Modena C. (1997): Investigation for the design and repair of an historical stone masonry wall. *7th Int. Conf. Structural Faults & Repair*, Edimburgh.
- Binda L., Baronio G., Modena C., Abbaneo S. (1995): Repair and investigation techniques for stone masonry walls. *Sixth Int. conf. Extending the Lifes of Bridges, Civil + Building Structures*, London.
- Binda L., Modena C., Baronio G. (1993): Strenghtening of masonries by injection technique. *6th North American Masonry Conference*, Philadelphia.
- Braga F., Spera G. (1997): Edifici in muratura in zona sismica: interventi di rafforzamento e ricostruzione. *Atti del Convegno A.N.I.D.I.S. Pg-An.*
- Caleca L., De Vecchi A. (1990): Tecnologie di consolidamento delle strutture murarie. Libreria D. Flaccovio ed.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche (1981): Riparazione e consolidamento degli edifici in muratura. Progetto Finalizzato Geodinamica. Masson Italia Editori.
- Gelmi A., Modena C. (1993): Caratterizzazione meccanica e consolidamento statico delle murature dei centri abitati di antica origine della provincia di Trento: obiettivi e impostazione della ricerca. Rapporto preliminare. Trento.
- M.LL.PP: Circolare 10 Aprile 1997 n. 65/AA.G.: Istruzioni per l'applicazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche.
- M.LL.PP: Circolare 30 Luglio 1981 n° 21745: Istruzioni relative alla normativa tecnica per la riparazione ed il rafforzamento degli edifici in muratura danneggiati dal sisma.
- M.LL.PP: Circolare 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.
- M.LL.PP: D.M. 16 Gennaio 1996: Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche.
- M.LL.PP: D.M. 2 Luglio 1981: Normativa per la riparazione ed il rafforzamento degli edifici danneggiati dal sisma nelle regioni Basilicata, Campania e Puglia.
- M.LL.PP: D.M. 20 Novembre 1987: Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento.
- M.LL.PP: D.M. 3 Marzo 1975: Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche.
- Modena C. (1989): Italian practice in evaluating, strenghtening and retrofitting masonry buildings. *Proc. of an Int. Seminar on evaluating, strenghtening and retrofitting masonry buildings*, University of Texas at Arlington.

- Modena C. (1994): Repair and upgrading techniques of unreinforced masonry structures utilized after the Friuli and Campania/Basilicata earthquakes. *Earthquake Spectra*, vol. 10, n. 1.
- Modena C. (1997): Criteria for cautious repair of historic buildings. *Evaluation and Strengthening of Existing Masonry Structures*. L. Binda & C. Modena Ed., RILEM.
- Modena C., Bettio C. (1994): Experimental characterisation and modeling of injected and jacketed masonry walls. *Proc. Italian-French Symposium Strengthening and Repair of Structures in Seismic Area*, Nizza.
- Modena C., Zavarise G., Valluzzi M.R. 1997: Modelling of stone masonry walls strengthened by r. c. Jackets. *Strumas IV – Fourth International Symposium on Computer Methods in Structural Masonry*, Florence, Italy.
- Regione Friuli Venezia Giulia (1977): Legge Regionale Friuli Venezia Giulia, n.30: Documentazione tecnica per la progettazione e direzione delle opere di riparazione degli edifici. Documento Tecnico n. 2: Raccomandazioni per la riparazione strutturale degli edifici in muratura.
- Regione Umbria: Ordinanza 5 Giugno 1984 n° 230: Disciplina dei criteri e delle modalità in ordine alla riattazione degli edifici e delle opere danneggiate dai terremoti del 7 ed 11 maggio 1984. Allegato A.
- Riva G., Bettio C., Modena C. (1997): The use of sonic wave technique for estimating the efficiency of masonry consolidation by injection. *11th Int. Brick/Block Masonry Conference*, Shanghai.
- Tomazevic M., M.EERI, Lutman M., Weiss P. (1996): Seismic upgrading of old brick-masonry urban houses: tying of walls with steel ties. *Earthquake Spectra*, vol. 12, n. 3.
- Università degli studi di Firenze (1998): Sperimentazione e tecniche d'intervento di miglioramento strutturale su edifici in muratura nei centri storici. Convenzione di studio tra la Regione Toscana ed il Dip. di Ing. Civile dell'Università di Firenze. Relazione 1997-98.
- Vugrinec E. (1977): Dettagli costruttivi della posa dei tiranti. Quaderno n. 6. Centro di Ricerca Applicata e Documentazione, Udine.