



## **PROVE SPERIMENTALI DI ESTRAZIONE DI ANCORAGGI INIETTATI IN MURATURE STORICHE**

**Ing. Cristiano Algeri \*, Ing. Elena Poverello\*\*,  
Prof. Ing. Ezio Giuriani, Prof. Ing. Giovanni Plizzari \*\*\***

**\* C-SPIN Centro Sviluppo Progettazioni Ingegneristiche  
Via G. Crescenzi 3, 24123 Bergamo, Italy**

**\*\* Bossong S.p.A.  
Via E. Fermi 51, 24050 Grassobbio (BG), Italy**

**\*\*\* Dipartimento DICATA  
Università degli Studi di Brescia  
Via Branze 38, 25123 Brescia, Italy**

**Sommario.** *Il presente lavoro riguarda i risultati di una ricerca teorico sperimentale su ancoraggi iniettati in murature storiche effettuata presso la Facoltà di Ingegneria di dell'Università di Brescia. In particolare lo studio intendeva approfondire le conoscenze sul comportamento degli ancoraggi iniettati con calza in tessuto e verificare la possibilità di una loro applicazione nel campo del consolidamento delle strutture in muratura. Tra i principali scopi della ricerca vi è la valutazione della capacità e del meccanismo resistente degli ancoraggi iniettati con calza.*

## **PRUEBAS EXPERIMENTALES DE EXTRACCIÓN DE ANCLAJES INYECTADOS EN MAMPOSTERÍAS HISTÓRICAS**

**Ing. Cristiano Algeri \*, Ing. Elena Poverello\*\*,  
Prof. Ing. Ezio Giuriani, Prof. Ing. Giovanni Plizzari \*\*\***

**Sumario.** *El presente trabajo, expone los resultados de una investigación teórica-experimental sobre anclajes inyectados en mamposterías históricas, realizada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Brescia. En particular, el estudio se planteó profundizar los conocimientos sobre el comportamiento de los anclajes inyectados con una técnica especial, en la que se utiliza una "manga" de tejido que envuelve la barra metálica para obtener el control total de la inyección, averiguando las posibilidades de aplicación de dicha técnica en el campo de la consolidación de las estructuras de mampostería. Uno de los principales objetivos de la investigación, fue la evaluación de la capacidad y del mecanismo resistente de los anclajes inyectados con la técnica de la manga de tejido.*

## 1. INTRODUZIONE

In questi ultimi tempi si è assistito al recupero, da parte delle costruzioni in muratura, di quel ruolo principale che avevano perso nel corso del secolo scorso. Anche il legislatore italiano, consapevole del valore dei beni monumentali presenti nel territorio, ha emanato negli ultimi anni normative e linee guida sui temi delle costruzioni esistenti e sull'utilizzo di adeguati presidi antisismici.

Nell'ambito degli interventi di recupero di edifici esistenti sono ricorrenti opere di consolidamento in cui si prevede l'inserimento di elementi metallici all'interno di strutture in muratura o strutture lignee: la cucitura di piccole lesioni, il collegamento tra elementi metallici di rinforzo e le strutture esistenti, catene o cerchiature poste a contenimento dell'azione di elementi spingenti quali archi e volte, la connessione tra gli impalcati e le murature perimetrali e l'inserimento di tiranti interni alla muratura allo scopo di incrementarne le caratteristiche di resistenza o di migliorare il comportamento globale delle strutture, anche in funzione antisismica. Un grande sviluppo in questo campo è stato raggiunto con l'avanzamento delle tecniche di perforazione che ha permesso di poter intervenire inserendo elementi di rinforzo in acciaio nelle murature esistenti con il minimo impatto in termini di conservazione del manufatto. L'efficacia di tali presidi è demandata essenzialmente, come è intuibile, al punto di connessione dell'elemento nella muratura storica.

I sistemi di ancoraggio, intesi come veri e propri elementi strutturali, hanno quindi ricevuto una crescente attenzione nel settore delle costruzioni anche a causa delle seguenti motivazioni: maggiore interesse per gli effetti conseguenti a terremoti; maggiore interesse per la conservazione del patrimonio storico architettonico e culturale in aggiunta al riutilizzo e alla riabilitazione delle strutture esistenti; elevate esigenze di sicurezza delle strutture sottoposte a carichi dinamici ciclici.

Allo stato attuale gli ancoraggi di catene, le connessioni e le cuciture possono essere solidarizzate alla muratura con iniezioni di malte o resine. A seconda dell'applicazione e del tipo di manufatto su cui si deve intervenire, può essere necessario operare con modalità differenti per realizzare ancoraggi iniettati. Le operazioni di iniezioni con resina sono relativamente semplici nel caso in cui le lunghezze di ancoraggio siano inferiori a 1,00÷1,50 metri mentre, per lunghezze superiori, si deve ricorrere all'iniezione di malte compatibili con i materiali originari. La tixotropia delle resine abitualmente utilizzate per gli ancoraggi garantisce dalle eccessive dispersioni negli interstizi della muratura ma, per i tempi brevi di indurimento, complica la fase di iniezione in profondità. Al contrario, le malte, caratterizzate da una maggiore fluidità, sono facilmente iniettabili ma possono disperdersi attraverso gli interstizi delle murature, i vuoti e le lesioni, impedendo il riempimento del foro e quindi non garantendo l'ancoraggio.

Il presente lavoro riassume i principali risultati di una ricerca teorico-sperimentale su ancoraggi iniettati in murature storiche, avente per oggetto l'approfondimento delle conoscenze sul comportamento degli ancoraggi iniettati con calza e di una loro applicazione nel campo del consolidamento delle strutture in muratura.

A testimonianza della necessità di intraprendere studi in questo settore è la richiesta sempre più forte da parte di progettisti, ingegneri ed architetti che operano nel settore, di strumenti e di linee guida per il progetto degli ancoraggi iniettati.

## 2. FINALITÀ DEL LAVORO DI RICERCA

L'obiettivo dello studio è lo sviluppo di una tecnologia per la realizzazione di ancoraggi iniettati, specifica per il consolidamento e rinforzo delle strutture in muratura.

Il Dipartimento di Ingegneria Civile Architettura e Ambiente dell'Università di Brescia si era già occupato degli ancoraggi iniettati nelle murature storiche proponendo modalità di iniezione e di controllo del processo significative ed efficaci. Tuttavia il progresso tecnologico avvenuto nell'ultimo decennio, con particolare riferimento alle modalità di perforazione ed all'impiego di prodotti e materiali innovativi, hanno reso necessario un nuovo approfondimento.

Sistemi che si basano su un principio di funzionamento in cui si prevede il totale controllo dell'iniezione del materiale consolidante mediante utilizzo di speciale calza sono presenti attualmente sul mercato ed hanno trovato, nel corso degli ultimi anni, diverse applicazioni. L'elemento di rinforzo, costituito da una barra in acciaio, risulta avvolto da una speciale calza in tessuto che ha la funzione di contenere il materiale consolidante iniettato per solidarizzare l'elemento in acciaio al substrato.

Lo studio della calza in tessuto e della malta hanno costituito, insieme alle valutazioni sul comportamento dei due elementi accoppiati, la fase iniziale di una ricerca di più ampio respiro, nell'ambito dell'approfondimento delle conoscenze sul comportamento degli ancoraggi iniettati e di una loro applicazione nel campo del consolidamento delle strutture in muratura, che condurrà all'approfondimento di tematiche inerenti il comportamento degli ancoraggi anche in campo sismico.

La presente ricerca si è posta come obiettivo l'incremento prestazionale dell'ancoraggio, il superamento dei limiti relativi al delicato processo di iniezione riscontrati in corso d'applicazione ed un adeguamento della tecnologia alle esigenze specifiche di interventi; questi, nella maggior parte dei casi, riguardano manufatti che appartengono al nostro patrimonio architettonico, spesso vincolati alla tutela della Soprintendenza per i Beni Architettonici e che necessitano di particolari attenzioni, sia dal punto di vista dei materiali che delle tecniche utilizzate.

Gli inghisaggi si basano sull'ancoraggio per ingranamento con malta a base cementizia e a base calce nel caso di interventi su murature storiche.

La sperimentazione in laboratorio ed in situ ha consentito di ottenere una banca dati attualmente composta da una cinquantina di prove che costituiscono un utile riferimento, con le dovute cautele legate alla notevole variabilità dei risultati, per i progettisti ed i tecnici che operano nel settore.

Il percorso di ricerca è stato impostato sullo sviluppo di due linee di prodotti, uno caratterizzato da una miscela legante tradizionale a base cementizia ed uno, più innovativo e rispettoso dei manufatti storici, a base di calce, valutando la capacità resistente degli ancoraggi iniettati con calza e delle relative modalità di rottura.

Scopo dello studio è stato anche quello di poter fornire nozioni tecniche utili per la corretta progettazione dell'ancoraggio e per la individuazione delle condizioni che possono influenzarne il rendimento.

Il presente lavoro ha rappresentato, pertanto, l'occasione per acquisire conoscenze sulle tecniche di intervento, sia in termini di efficacia tecnico-economica sia in termini applicativi. I risultati della ricerca costituiscono un primo 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. PROBLEMATICHE E MODALITA' DI PROVA

Il tema degli ancoraggi iniettati su murature storiche presenta diverse problematiche in relazione all'eterogeneità del substrato. Le murature, infatti, spesso manifestano tessiture irregolari, con leganti degradati e parzialmente alterati dal tempo e fessurazioni di diversa natura. Uno degli obiettivi della ricerca è rappresentato dalla definizione di uno standard di prova per la verifica della resistenza all'estrazione degli ancoraggi che tenga conto dei diversi meccanismi di rottura (Fig. 1).

La corretta comprensione del fenomeno comporta un'attenzione particolare al layout di prova. In particolare:

- l'evoluzione del fenomeno, resa attraverso i due parametri che governano questi tipi di prove ovvero il carico applicato e lo spostamento risultante, ha imposto l'utilizzo di strumentazioni in grado di descrivere in tempo reale l'andamento della curva;
- l'osservazione diretta dei possibili meccanismi di rottura dell'ancoraggio ha imposto l'utilizzo di apposite strutture di contrasto in grado di non interferire in alcun modo con l'evoluzione del fenomeno. Si pensi, per esempio, all'effetto di confinamento esercitato localmente da un'eventuale struttura di contrasto posta troppo vicina alla barra da estrarre. In tal caso l'eventuale estrazione con cono di rottura verrebbe inibito per un errore grossolano in fase di definizione del layout di prova.

### 4. ADESIONE, ATTRITO, INGRANAMENTO: RICHIAMI TEORICI

Per le ragioni espresse sopra si è quindi ritenuto opportuno riprendere alcuni aspetti teorici con riferimento al problema dell'aderenza. Nel seguito vengono pertanto riportate alcune nozioni minime per la corretta comprensione del problema, pur sapendo che la trattazione non può essere esaustiva in quanto le interfacce di scorrimento e quindi di fessurazione sono molteplici e variabili di caso in caso [1].

L'aderenza tra la barra in acciaio ed il materiale legante circostante, sia esso a base calce o a base cementizia, che si trasmette tramite le tensioni tangenziali  $\tau$ , è generalmente riconducibile alla sovrapposizione di due effetti complementari costituiti dall'adesione e dall'ingranamento. La prima ha origine chimico fisica e si sviluppa con la maturazione della miscela legante; il secondo, essenzialmente di origine fisica, dipende dallo stato della superficie della barra e dalla resistenza del materiale legante.

Al crescere della tensione di aderenza  $\tau$ , indotta dall'aumento dell'azione assiale in una barra, si osserva un primo intervallo tensionale in cui, essendo efficiente l'adesione, non vi è scorrimento fra la barra in acciaio ed il materiale legante; seguono poi intervalli con scorrimenti crescenti dovuti alla mobilitazione di sforzi associati ad un complesso campo di tensioni nella malta circostante la barra.

Attorno alle nervature delle barre da c.a. si ha poi una sollecitazione di compressione obliqua, associata a trazione circonferenziale che, per elevati valori di  $\tau$ , superata la resistenza a trazione  $f_{ct}$ , ingenera un sistema di microfessure radiali attorno alle barre che ne determina il calo prestazionale.

Nel caso di ancoraggi iniettati in murature, le possibili superfici di scorrimento sono due: la prima è quella classica all'interfaccia barra-malta, la seconda è quella posta all'interfaccia del bulbo di ancoraggio con il substrato circostante. In particolare la seconda appare essere, dalle sperimentazioni condotte, quella che governa prevalentemente il problema della resistenza dell'ancoraggio per azioni di trazione.

Negli ancoraggi, la lunghezza minima di ancoraggio fra la barra in acciaio e la malta circostante dipende generalmente da più fattori agenti anche contemporaneamente tra loro:

- stato della superficie della barra;
- valore della tensione nell'armatura;
- valore della resistenza a trazione  $f_{ct}$  della malta;
- pressioni trasversali alla barra dovute ai carichi o al ritiro della miscela legante;
- posizione della barra entro la corona circolare di malta;
- spessore dello strato di malta di ricoprimento della barra.

A questa prima famiglia di variabili associate all'interfaccia barra-malta è possibile affiancarne una seconda che tenga in dovuta considerazione l'interfaccia bulbo di ancoraggio-substrato:

- stato della superficie del bulbo di ancoraggio in tessuto;
- valore della resistenza a trazione  $f_{ct}$  della malta;
- posizione del bulbo entro il foro di alloggiamento dell'ancoraggio;
- asperità e cavità interne al substrato con insorgenza di fenomeni di ingranamento;
- valore della resistenza a trazione  $f_{ct}$  della malta costituente il legante del substrato.



(a)



(b)

Figura 1: Adesione al substrato (a) e ingranamento meccanico (b) degli ancoraggi nelle murature.

## 5. MODALITÀ DI PROVA

Per la definizione delle modalità di prova e la soluzione delle criticità tecniche e operative si è adottata la metodologia di prova già impiegata in lavori analoghi svolti in precedenza all'Università di Brescia.

Per la realizzazione delle prove sono quindi state previste le seguenti fasi:

- esecuzione di perforazioni perfettamente rettilinee con carotatrice attrezzata con sonda diamantata, con funzionamento a sola rotazione e con raffreddamento ad acqua, raccolta e conservazione delle carote in apposite cassette catalogatrici;
- posa degli ancoraggi campione e iniezioni di specifica malta;
- esecuzione di prove di estrazione su ancoraggi campione, 28 gg dopo aver completato le iniezioni di specifica malta.

Per i test sono state impiegate le seguenti attrezzature e strumentazione di prova (Figg. 2,3,4):

- cilindro forato a spinta posizionato in asse all'ancoraggio con superficie di appoggio ortogonale al foro. Forza massima a spinta  $\sim 576$  kN, foro  $\varnothing 53,8$  mm, dimensioni esterne  $\varnothing 159 \times H 247$  mm, corsa 76 mm, pressione max. 700 bar. La forza applica-

ta viene misurata attraverso un trasduttore di pressione applicato al circuito idraulico (pressione massima 700 bar, precisione 0,1 bar);

- trasduttore rettilineo a tastatore con sfera di tipo potenziometrico fissato ad un cavalletto per la misura dello spostamento della testa libera della barra d'acciaio dell'ancoraggio (corsa 50 mm, precisione 0,01 mm);
- pompa manuale oleodinamica da 700 bar;
- per le misure sperimentali si è adottato un sistema digitale di acquisizione dati in automatico composto da un personal computer collegato alla centralina di acquisizione/conversione A/D (analogico/digitale). La registrazione delle indicazioni strumentali (carico o pressione e spostamento) è stata condotta ad intervalli di tempo predefiniti pari a 0,5 secondi.

I principali parametri di prova sono i seguenti:

- valore di forza di estrazione massima (misurato in kN) in corrispondenza del picco della curva ottenuta per via sperimentale;
- valore di spostamento massimo (misurato in mm) in corrispondenza del valore di massima forza di estrazione;
- rigidità  $K_1$  (espressa in kN/mm) e rappresentativa della rigidità dell'ancoraggio calcolata basandosi sullo spostamento unitario preso come valore limite di riferimento per il comportamento in esercizio in campo elastico;
- valore di forza al 50% di intensità (espressa in kN) e calcolato sulla base del valore massimo di forza di estrazione ridotto della metà. Tale valore è stato convenzionalmente assunto come limite superiore del ramo elastico della curva forza vs spostamento;
- valore di spostamento al 50% di intensità di carico (espresso in mm) calcolato in corrispondenza del valore di forza sopra descritto;
- rigidità  $K_{50\%}$  (espressa in kN/mm) rappresentativa della rigidità dell'ancoraggio calcolata nel tratto convenzionale elastico della curva;
- rapporto tra il valore di forza finale post picco e forza massima: valori prossimi all'unità rappresentano curve con comportamento elasto-plastico mentre valori prossimi allo zero descrivono curve con comportamento elasto-fragile.



Figura 2: Vista generale della strumentazione di prova e relativa installazione



Figure 3: Dettagli della strumentazione di prova

Passando dalle forze alle sollecitazioni sono state introdotte ulteriori notazioni rappresentative del comportamento delle azioni di taglio all'interfaccia barra-malta e all'interfaccia bulbo-substrato:

- valore di  $\tau$  massima barra (espressa in MPa) ottenuta considerando un valore di  $\tau$  "nominale" dividendo cioè la forza massima di estrazione agente per la superficie cilindrica posta all'interfaccia tra barra e malta;
- valore di  $\tau$  massima foro (espressa in MPa) ottenuta considerando un valore di  $\tau$  "nominale", dividendo cioè la forza massima di estrazione agente per la superficie cilindrica posta all'interfaccia tra bulbo e substrato;
- valore di  $\tau$  barra in corrispondenza di uno scorrimento di 1 mm (espressa in MPa);
- valore di  $\tau$  foro in corrispondenza di uno scorrimento di 1 mm (espressa in MPa);
- valore di  $\tau$  barra al 50% di intensità (espressa in MPa). Tale valore è stato assunto come limite convenzionale del ramo elastico della curva forza vs spostamento;
- valore di  $\tau$  foro al 50% di intensità (espressa in MPa).

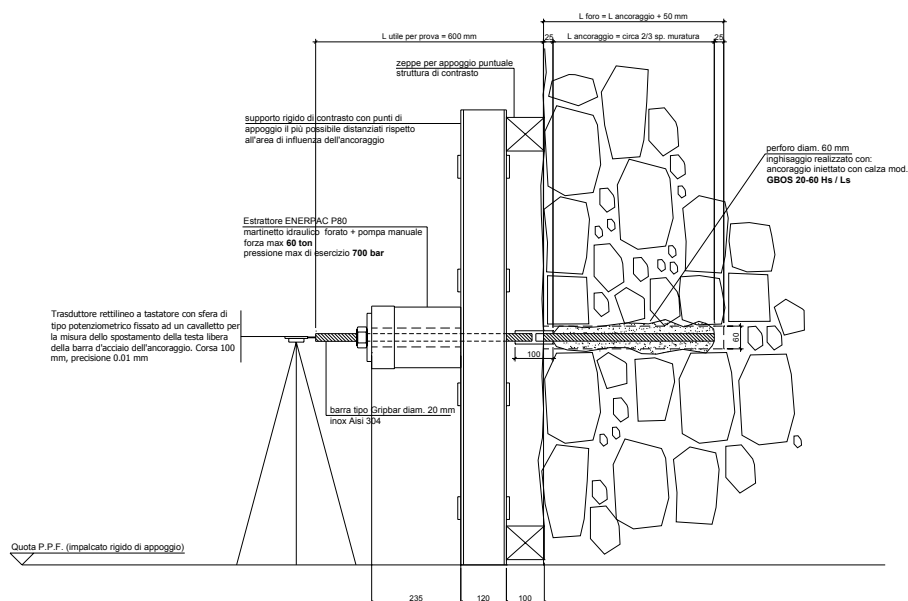


Figura 4: Layout delle prove d'estrazione su ancoraggi iniettati con calza



## 6. INDAGINI DI LABORATORIO: PROVE SU CAMPIONI IN SCALA REALE

L'esecuzione di test preliminari su banchi prova realizzati in calcestruzzo hanno permesso di osservare il fenomeno al netto della variabilità tipica della muratura ovvero di quelle imperfezioni caratteristiche delle strutture murarie che tuttavia risultano essere fondamentali per il verificarsi dei benefici fenomeni di ingranamento. In particolare, l'esecuzione di tali prove ha permesso di confrontare tra loro sia il comportamento di ancoraggi con barre di diverso diametro, a parità di lunghezza e diametro del foro di alloggiamento, sia il comportamento di ancoraggi per aderenza o per meccanismi resistenti più complessi quali l'ingranamento.

La fase successiva della sperimentazione ha riguardato una muratura "standard" nella quale sono stati inseriti ancoraggi per aderenza o per ingranamento. Nello specifico, dapprima si è studiato il comportamento degli ancoraggi in funzione della possibile morfologia del foro di alloggiamento attraverso l'esecuzione di perfori paralleli piuttosto che sagomati (con sonda Profile Drill). Secondariamente è stato analizzato il comportamento in funzione della lunghezza di ancoraggio.

I criteri di scelta adottati per definire i campioni in muratura hanno tenuto in dovuta considerazione la necessità di riprodurre una tipologia strutturale il più possibile simile a quella presente nelle costruzioni storiche. Particolare attenzione è stata posta nella definizione dei componenti della malta di allettamento utilizzata per l'unione degli elementi in laterizio. I due banchi prova in muratura sono stati realizzati con mattoni di laterizio comune uniti con una malta a base calce, la cui ricetta è stata opportunamente ricreata sulla base di precedenti studi svolti dall'Università degli Studi di Brescia [2, 3]. I due campioni di muratura hanno una lunghezza di 2000 mm, un'altezza di 1700 mm e una profondità di 750 mm (Fig. 5). E' stato opportuno predisporre un idoneo sistema di presollecitazione dei campioni in muratura in scala reale, in modo da simulare l'inserimento dei banchi prova stessi in un contesto che fosse il più possibile simile alla realtà simulando una condizione di due piani sovrastanti. Il valore di presollecitazione è stato posto pari a 0,2 MPa, valore questo riscontrabile in molti casi di edilizia storica, alla base di edifici caratterizzati da due o tre piani di altezza [4].

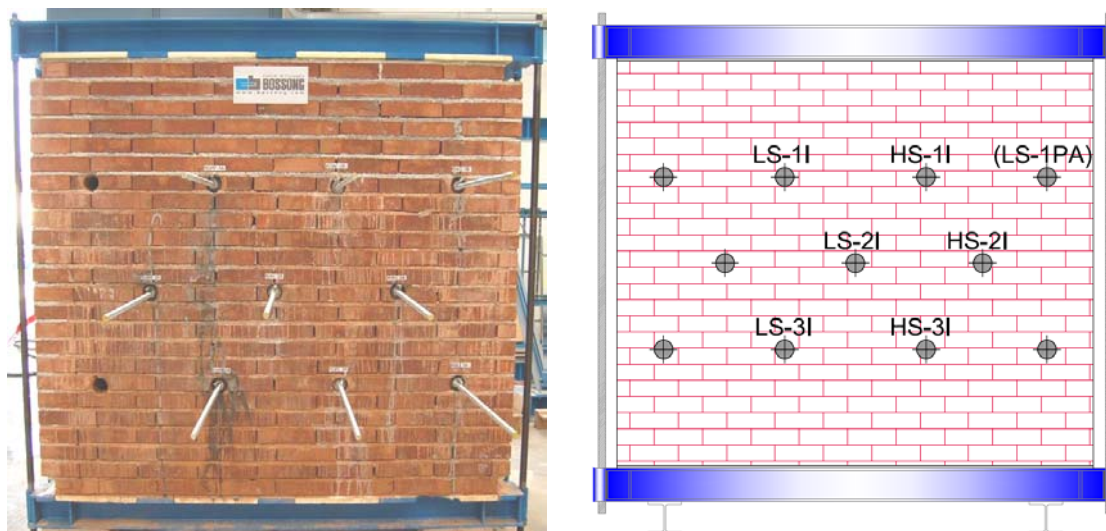


Figura 5: Schema della disposizione degli ancoraggi su blocco di muratura campione

Il sistema di applicazione del carico di compressione è stato ottenuto mediante l'utilizzo di 3+3 barre, disposte lateralmente, di diametro M36 mm, filettate alle estremità, in grado di esercitare la coazione desiderata sulla muratura attraverso una azione assiale per ciascuna barra di 5.000 daN (Fig. 5). Il carico di compressione è stato distribuito sulla muratura attraverso tre + tre travi in acciaio HEB 140, collegate alle barre verticali, poste superiormente ed inferiormente alla muratura (Fig. 5).

Tutte queste prove, effettuate presso il Laboratorio "Pietro Pisa" dell'Università di Brescia con tre tipologie di ancoraggio (una con miscela a base cementizia denominata C1 e due con miscela a base calce contraddistinte dalle sigle HS ed LS), hanno permesso la valutazione della capacità resistente degli ancoraggi, sia per la malta a base cementizia che per le malte a base calce nonché un confronto con il comportamento degli ancoraggi per ingranamento.

Le prove hanno anche permesso di individuare, tra le due malte a base calce, quella che garantisce le migliori prestazioni di aderenza e ancoraggio per ingranamento.

Al termine di questa fase sono pertanto state definite la malta a base cementizia e la malta a base calce da utilizzare in accoppiamento con la calza in tessuto per la realizzazione di ancoraggi iniettati. Con queste due tipologie di miscele si è proceduto ad una fase successiva di indagini in situ, non riportata in questa memoria.

## **7. TECNICA DI ANCORAGGIO DELLE BARRE**

Per l'inserimento degli ancoraggi iniettati in ciascun banco prova sono stati effettuati dei fori passanti mediante carotatrice Hilti: la dimensione del diametro, pari a 62 mm, è stata assunta in modo tale da garantire uno spessore di malta attorno alla barra sufficiente per un corretto ancoraggio. La posizione dei fori è stata definita in modo tale da permettere la formazione del cono di rottura ipotizzato e, al tempo stesso, di poter correttamente posizionare il treppiede o altro sistema di contrasto.

Nella realizzazione dei carotaggi si è cercato, nel limite del possibile, di effettuare le perforazioni tra due giunti di malta paralleli e consecutivi al fine di poter rendere più omogenea la risposta degli ancoraggi in fase di estrazione. Tuttavia va ricordato che questo aspetto può essere messo in secondo piano in quanto, facendo riferimento ad una situazione reale, questo fattore risulta vincolato dalle caratteristiche della struttura originaria e può non essere preso come elemento determinante.

In primo luogo è stato effettuato un tracciamento sulle superfici frontali dei due banchi prova al fine di definire gli assi di perforazione. I fori, come già accennato, sono passanti poiché essi permettono da un lato di poter effettuare ancoraggi di lunghezza pari a 600 mm e, dall'altro, permettono di controllare il processo di iniezione anche per ancoraggi di lunghezza non superiore a 300 mm.

Alcuni fori sono stati poi opportunamente sagomati per mezzo di una sonda apposita che permette l'esecuzione di forme coniche all'interno del foro grazie ad un dispositivo meccanico che allarga i denti della punta diamantata una volta giunto alla profondità desiderata (Fig. 6). Questo particolare processo, ancora poco diffuso nel panorama delle perforazioni, ha permesso utili considerazioni sull'incidenza della forma del perforo sulla tenuta dell'ancoraggio.

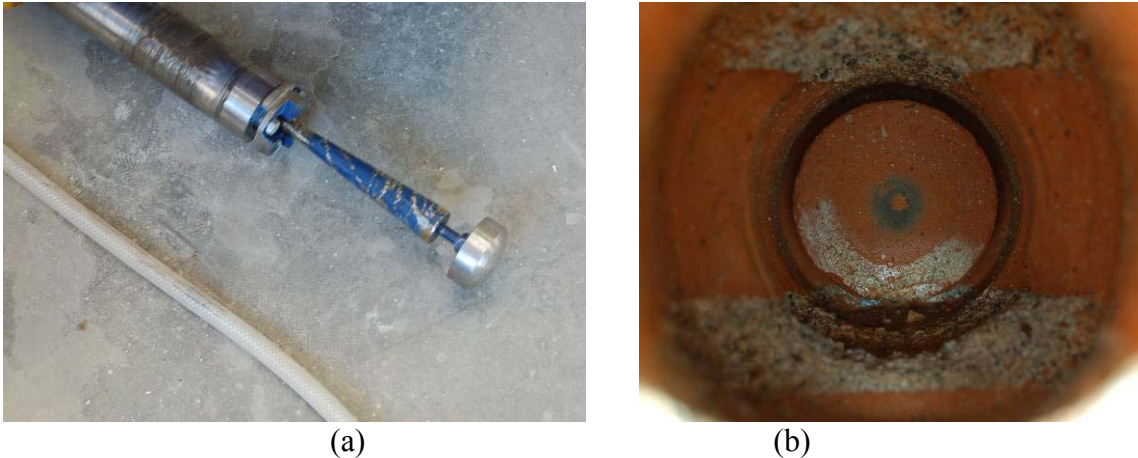


Figura 6: Sonda per perforazioni sagomate (a) e vista dell'interno del foro sagomato (b).

Una volta effettuati i fori si è proceduto con il posizionamento delle barre in acciaio da iniettare ponendo molta attenzione alla centratura della barra rispetto all'asse del perforo utilizzando un centratore metallico.

Prima di procedere con l'iniezione è stata saturata la muratura, nell'intorno dell'inghisaggio, mediante iniezione di acqua per evitare che fenomeni indesiderati di ritiro compromettessero le prove. Questa prassi è comunemente impiegata peraltro anche nelle normali pose in cantiere rientrando nella buona pratica costruttiva che caratterizza questa tipologia di prodotti. Il sistema di ancoraggio oggetto di studio è consistito nell'inserimento di un elemento resistente, generalmente una barra filettata in acciaio di diametro variabile da 16 mm a 30 mm di classe variabile tra 8.8 e 10.9, all'interno di un perforo di diametro 62 mm (Figg. 7 e 8).



Figura 7: Fase di iniezione dell'ancoraggio.

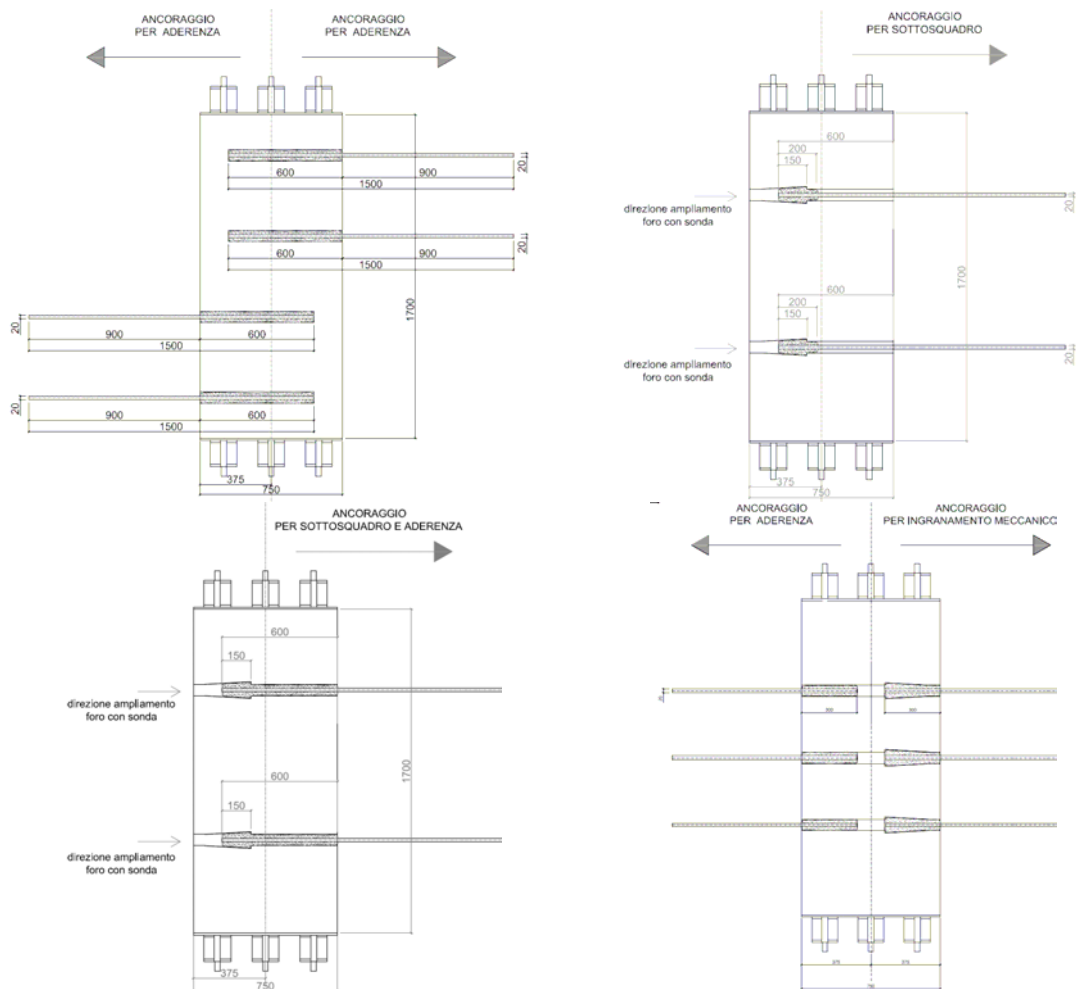


Figura 8: Schemi delle diverse modalità di estrazione con lunghezze di ancoraggio differenti.

La connessione della barra al substrato è avvenuta per mezzo di una miscela legante, iniettata attraverso un tubicino di plastica solidale alla barra in acciaio, che è a sua volta contenuta in una speciale calza in tessuto che la avvolge completamente per tutta la lunghezza dell'ancoraggio. Il processo di iniezione della miscela attraverso il tubicino rappresenta una fase delicata e di fondamentale importanza per la corretta efficacia dell'ancoraggio.

Il problema dello scarso ricoprimento della miscela legante sulla barra in acciaio è già stato oggetto di studi ed ha portato alla determinazione che aree non interamente ricoperte dalla miscela, non permettendo la corretta trasmigrazione degli sforzi di taglio, comportano una riduzione significativa della capacità resistente dell'ancoraggio con conseguenti ricadute sull'efficacia dello stesso [5],[6]. Per tale ragione, l'iniezione è avvenuta immettendo la miscela con pressioni modeste dell'ordine di 3÷6 bar dalla testa dell'ancoraggio fino alla coda dello stesso per poi rifluire, una volta fuoriuscita dalla cannula d'immissione, seguendo il percorso di mandata a ritroso fino alla testa dell'ancoraggio. Durante tale operazione la miscela viene contenuta all'interno della calza in tessuto che avvolge la barra e che funge da interfaccia tra la barra in acciaio e la muratura circostante. La calza in tessuto assume quindi un triplice ruolo: il primo e fondamentale ruolo è quello di confinare la miscela evitando inutili e non controllabili dispersioni di boiaccia all'interno del paramento murario; il secondo è quello di permettere

una efficace espansione della calza in quanto essa, risultando sufficientemente elastica, permette di conformarsi alle cavità circostanti di piccola e media entità garantendo un efficace azione di ingranamento dell'ancoraggio; il terzo è quello di potersi imbibire di latte di calce o di cemento esercitando così un contributo non trascurabile alle risorse di resistenza per aderenza dell'ancoraggio stesso.

## **8. MECCANISMI DI ROTTURA OSSERVATI**

L'osservazione diretta delle modalità di collasso degli ancoraggi iniettati ha permesso di confermare quanto già riscontrato in letteratura, ovvero che i possibili meccanismi di rottura possono essere ricondotti sostanzialmente a tre tipologie:

- rottura per sfilamento della barra;
- rottura per sfilamento del bulbo di malta con calza;
- rottura del substrato e/o rottura con espulsione conica del substrato.

Gli schemi di Figura 9 permettono di comprendere meglio le modalità di rottura.

## **9. PRIME INDICAZIONI PER LINEE GUIDA PER PROVE DI ESTRAZIONE**

I risultati della sperimentazione consentono di fornire una prima lista di nozioni tecniche utili alla corretta progettazione dell'ancoraggio e nella individuazione delle condizioni che possono influenzarne il rendimento.

E' noto che le condizioni al contorno dell'ancoraggio possono far variare moltissimo la reale resistenza dello stesso. Tra le più significative si riportano le seguenti:

- disomogeneità della tessitura muraria (in particolare su murature storiche);
- stato di consistenza del substrato (muratura degradata, a più paramenti, in laterizio o pietrame, ecc.);
- profondità dell'ancoraggio (ancoraggio in cortina continua o ancoraggi corti);
- interasse di posa degli ancoraggi (in particolare per ancoraggi ramificati);
- distanza dagli spigoli e da cantonali (aree con diversa tessitura muraria);
- prossimità di aperture sia verticali che orizzontali (porte, finestre, volte);
- modalità di applicazione del carico (risposta in condizioni statiche o dinamiche);
- angolazione e morfologia del preforo (insorgenza dei fenomeni di ingranamento).

Passando in rassegna brevemente i punti sopra citati è evidente che la consistenza del substrato su cui si andrà ad inserire un ancoraggio riveste un ruolo fondamentale per la buona tenuta dello stesso per le azioni di progetto.

Tralasciando per ora le modalità di dimensionamento dell'ancoraggio iniettato in termini di diametro della barra e lunghezza d'ancoraggio, è chiaro che la struttura muraria che accoglie tale sistema di tenuta debba poter sopportare, con adeguati margini di sicurezza, i carichi di progetto trasmessi dall'ancoraggio attraverso un'area di influenza denominata "area di tensione". Tale concetto è fondamentale per poter comprendere i possibili meccanismi di rottura che si instaurano ogni qual volta un ancoraggio viene sottoposto a carichi di trazione (per es. attraverso una prova di pull-out).

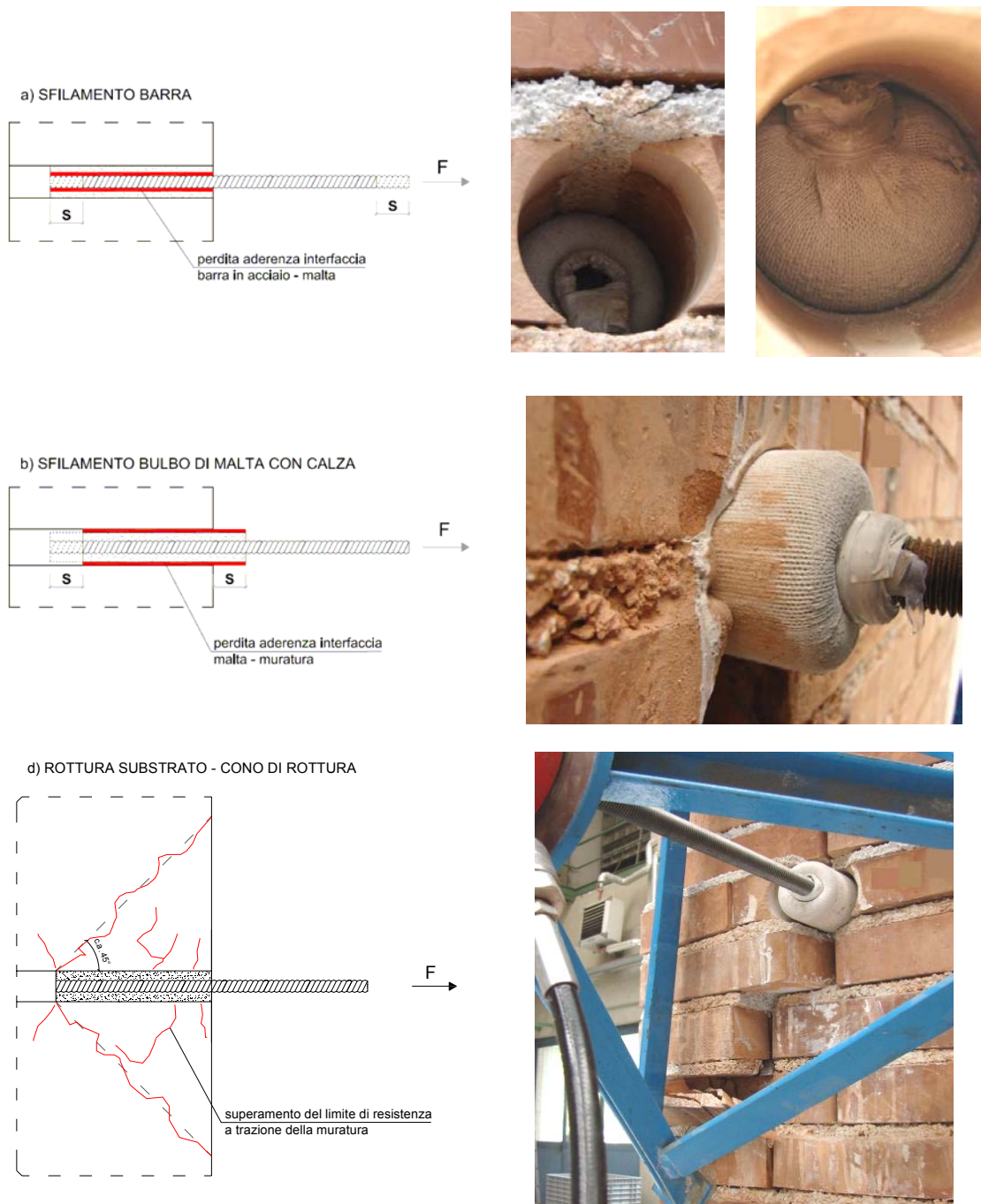


Figura 9: Schemi delle diverse modalità di rottura di ancoraggi iniettati con calza

A tal proposito è stato quindi predisposto un banco prova in calcestruzzo che potesse fornire un substrato particolarmente resistente per le azioni indotte dall'estrazione degli ancoraggi permettendo di cogliere il limite superiore di resistenza e di tenuta degli stessi senza che meccanismi di rottura fragili (quali quelli che usualmente si verificano su strutture in muratura) potessero interferire con la definizione del carico ultimo. Si è adottata una classe di resistenza particolarmente elevata pari a C30/37.

La natura compositiva e la disomogeneità delle murature, in particolare quelle a valenza storica che possono aver subito nel corso degli anni numerosi rimaneggiamenti, impongono una cautela maggiore e pertanto andrebbero previste sempre delle prove di estrazione in-situ con l'intento di poter cogliere, nel limite dell'esiguo numero di campioni di prova, i valori più attendibili di resistenza al fine di determinare il carico ultimo e di esercizio di riferimento per quel particolare substrato.

In particolare è possibile affermare che alla luce dei punti sopra esposti sarebbe più corretto definire un valore massimo di carico applicato nel punto di fissaggio anziché di resistenza dell'ancoraggio. Infatti, se correttamente installato, l'ancoraggio iniettato grazie alla sua peculiare caratteristica di plasmarsi perfettamente alle cavità ed alle asperità che lo circondano, permette di rendersi solidale con il substrato che lo circonda interessando un'area di tensione tanto maggiore quanto l'ancoraggio verrà posato con le dovute cautele. Tale zona di tensione potrà, come meglio descritto nel seguito, essere direttamente relazionata all'area tracciata in un tipico digramma carico-spostamento.

## **10. LEGAME TRA PROFONDITÀ DI ANCORAGGIO E AREA DI TENSIONE**

In relazione alla cosiddetta area di tensione è possibile affermare come vi sia una stretta corrispondenza tra la stessa e la profondità degli ancoraggi in quanto gli sforzi che l'ancoraggio trasmette alla muratura circostante si interfacciano su di essa creando una zona sollecitata, detta appunto area di tensione. L'area di questa porzione di muratura interessata dal fenomeno è generalmente direttamente proporzionale alla profondità a cui avviene l'espansione dell'ancoraggio e quindi il primo ingranamento.

In tal caso è corretto definire un cono di rottura, che rappresenta una superficie conica con vertice posto idealmente al limite dell'ancoraggio ma più correttamente si troverà in corrispondenza del punto a massima espansione o di primo ingranamento.

Tale meccanismo di rottura è quello che generalmente chiama in causa le riserve di resistenza del substrato in quanto gli ingranamenti che si vengono a creare durante la fase di iniezione forniscono l'innescò del meccanismo stesso. Tuttavia se da un lato tale comportamento è preferibile in quanto, a parità di profondità di ancoraggio, esso permette una maggior rigidità in fase elastica e quindi un maggior carico con uno scorrimento inferiore, tuttavia esso non presenta caratteristiche di duttilità in quanto la rottura avviene repentinamente. Questo comportamento è stato osservato in particolare con le prove HS-P. Il grafico qualitativo di Figura 10 mette quindi a confronto l'andamento qualitativo degli sforzi di taglio in funzione dello spostamento misurato al variare della tipologia di ancoraggio: per aderenza (curva 1) o per ingranamento (curva 2).

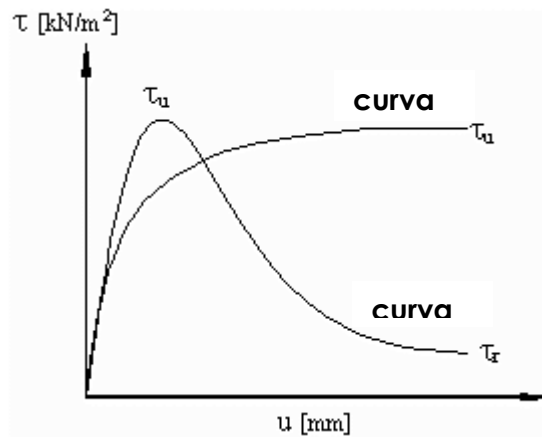


Figura 10: Curve taglio vs slittamento

Sottoponendo l'ancoraggio ad un carico di estrazione pari al carico di rottura, a mezzo di un estrattore idraulico installato su di un supporto metallico di contrasto (tipicamente un treppiede in acciaio o una putrella adeguatamente modificata per lo scopo), con appoggi posti idealmente ad un diametro superiore all'interasse minimo prescritto rispettando quindi tutti i criteri di installazione, si possono verificare tre possibili fenomeni di estrazione esposti in ordine crescente di possibilità:

- I° modo: rottura della barra ancorata sottoposta a trazione preceduto da una fase di snervamento dello stesso;
- II° modo: sfilamento della barra ancorata all'interno della corona di malta senza intaccare in alcun modo il substrato;
- III° modo: distacco dell'area di tensione ovvero della porzione di substrato legatosi all'ancoraggio. Tale distacco può a sua volta manifestarsi in duplice modo: il primo attraverso un cono di rottura, il secondo mediante sfilamento del bulbo di ancoraggio.

Il manifestarsi di una tipologia di rottura rispetto ad un'altra è essenzialmente legata alla tipologia di ancoraggio. Appare quindi chiaro che:

- per ancoraggi lunghi, caratterizzati generalmente da un rapporto "lunghezza di ancoraggio/ diametro del preforo" superiore a 15, i meccanismi di rottura più plausibili saranno quelli di I e II modo;
- per ancoraggi medio-corti, con rapporto "lunghezza di ancoraggio/ diametro del preforo" compreso tra 5÷15, i meccanismi di rottura saranno quelli di II e III modo;
- per ancoraggi corti, con rapporto "lunghezza di ancoraggio/ diametro del preforo" inferiore a 5, i meccanismi di rottura saranno esclusivamente quelli di III modo.

Tali indicatori tuttavia possono risultare affetti da diverse variabili e devono tenere conto delle seguenti indicazioni:

- il concetto di "area di tensione" serve a far capire l'importanza dell'interfaccia tra substrato ed ancoraggio (sia tra barra e malta che tra bulbo e substrato);
- la relazione tra profondità minima di ancoraggio ed interasse minimo di ancoraggio deve essere sempre intesa al netto di spigoli, aperture, indebolimenti della muratura posti nell'intorno dell'area di tensione nonché dalle caratteristiche meccaniche di resistenza della muratura stessa;
- a parità di ancoraggio, una maggiore profondità di ancoraggio con conseguente aumento dell'interasse e della distanza dai bordi (spigoli, aperture, indebolimenti ecc) crea una più vasta area di tensione e garantisce una maggior tenuta della struttura ma non aumenta, di norma, il carico ultimo dell'ancoraggio. A titolo esemplificativo è stato os-



servato che, per ancoraggi medio-corti, la profondità di ancoraggio dovrebbe sempre essere posta oltre i 2/3 della larghezza del paramento murario per poter innescare i meccanismi benefici “dell’effetto piastra” che localmente si ingenera grazie ai puntoni di compressione interni al maschio in muratura;

- è consigliata una maggior profondità di ancoraggio in presenza di murature la cui parte superficiale non risulti compatta, perché sgretolata e soggetta a fenomeni di degrado soprattutto in relazione allo stato di consistenza dei giunti di malta, o perché fortemente fessurate.

## 11. INTERASSE, DISTANZE DAI BORDI E ANCORAGGI RAMIFICATI

Da quanto sopra riportato appare chiaro che riveste un ruolo di primaria importanza l’interdistanza tra i singoli ancoraggi iniettati in virtù delle possibili interferenze delle singole aree di tensione.

Poiché, infatti, ogni punto di ancoraggio insiste su di una ben definita area di tensione di superficie circolare a conformazione conica o cilindrica (in funzione del meccanismo di rottura) che è essenziale per la corretta trasmigrazione di sforzi, una riduzione dell’interasse di detta area di tensione, per effetto dell’intersezione delle superfici, non può che condurre a concentrazioni di tensioni non ammissibili per la muratura.

Nel caso degli ancoraggi ramificati, tale effetto risulta poi amplificato poiché la superficie di rottura interessata aumenta di molto grazie alla particolare morfologia dell’ancoraggio stesso che presenta, di norma, superfici di rottura troncoconiche. In tal caso, tuttavia, anche la concentrazione di sforzi aumenta e pertanto l’interasse dovrà risultare maggiore.

Analogamente, per quanto concerne la distanza minima dal bordo, vale quanto detto in precedenza. Una riduzione della distanza dal bordo non crea nessuna intersezione di superfici di rottura ma riduce in ogni caso l’area di tensione, diminuendo la resistenza ultima dell’ancoraggio posizionato in quella porzione di muratura.

## 12. DETERMINAZIONE DELLE SOLLECITAZIONI TANGENZIALI

Dall’analisi delle curve sperimentali è possibile ottenere, l’andamento delle  $\tau$  ricavate in corrispondenza dell’interfaccia barra-malta, denominate quindi  $\tau$  barra e di quelle poste in corrispondenza dell’interfaccia bulbo-substrato definite  $\tau$  foro. La Figura 11 mostra i risultati ottenuti sui banchi prova in calcestruzzo ed in muratura diagrammando l’andamento della forza di estrazione in relazione allo scorrimento della barra rispetto ad un sistema di riferimento esterno. A tal proposito sono riportate sia le curve sperimentali direttamente ottenute dalla centralina di acquisizione (indicate con il carattere “\*”) sia le omologhe curve post elaborate nelle quali sono stati eliminati i picchi dovuti alla sovrappressione indotta dal martinetto di estrazione.

Nella Tabella 1 vengono meglio specificate le sigle utilizzate:

Sigla	Descrizione
HS	Miscela legante a base cementizia
LS	Miscela legante a base calce

A	Ancoraggio per aderenza corto
AL	Ancoraggio per aderenza lungo
I	Ancoraggio per ingranamento
P	Ancoraggio per ingranamento a piastra
PA	Ancoraggio per ingranamento e aderenza
*	Curva prove sperimentale senza elaborazione

Tabella 1: Risultati sintetici delle prove di estrazione su murature storiche

### 13. CONCLUSIONI

I prodotti attualmente reperibili sul mercato scontano una carenza sistematica di test di laboratorio e studi. Le sperimentazioni condotte, in collaborazione con aziende di settore, hanno permesso di indagare il comportamento degli ancoraggi iniettati con calza in tessuto su banchi prova in calcestruzzo e in muratura.

E' stata messa a punto una miscela legante a base calce ed una miscela a base cementizia prediligendo ora la compatibilità con il substrato originario, ora la resistenza meccanica dell'ancoraggio.

I numerosi test eseguiti hanno portato alla creazione di uno standard per l'esecuzione di prove di estrazione per ancoraggi iniettati, caratterizzato dalla definizione di alcuni parametri ritenuti significativi per la definizione del problema quali le sollecitazioni di taglio all'interfaccia barra-malta e quelle all'interfaccia bulbo-substrato.

I meccanismi di rottura fatti registrare durante l'esecuzione dei test hanno permesso di valutare, caso per caso, le interfacce soggette a rottura in funzione della lunghezza e della forma di ancoraggio (per aderenza o per ingranamento); tali meccanismi sono perlopiù riconducibili alla rottura del substrato, con sfilamento degli elementi resistenti nel caso di ancoraggi per aderenza e alla creazione del cono di rottura nel caso di ancoraggi per ingranamento.

Si riporta in Figura 12 il diagramma di sintesi delle prove effettuate riportando i valori massimi di  $\tau$ , a rottura, in funzione delle profondità di ancoraggio su banchi prova in muratura.

La corretta progettazione dell'ancoraggio, in funzione della tipologia di malta da iniezione impiegata, deve tenere in dovuta considerazione la lunghezza d'ancoraggio, la forma del perforo di alloggiamento e l'impiego di adeguati coefficienti di sicurezza locali sui materiali che si consiglia di porre pari a 3.

Precedenti lavori di ricerca [7] hanno proposto delle formulazioni analitiche per il corretto dimensionamento degli ancoraggi di barre iniettate che qui sono state riprese e opportunamente modificate in funzione della peculiarità dell'ancoraggio con calza portando a buoni risultati.

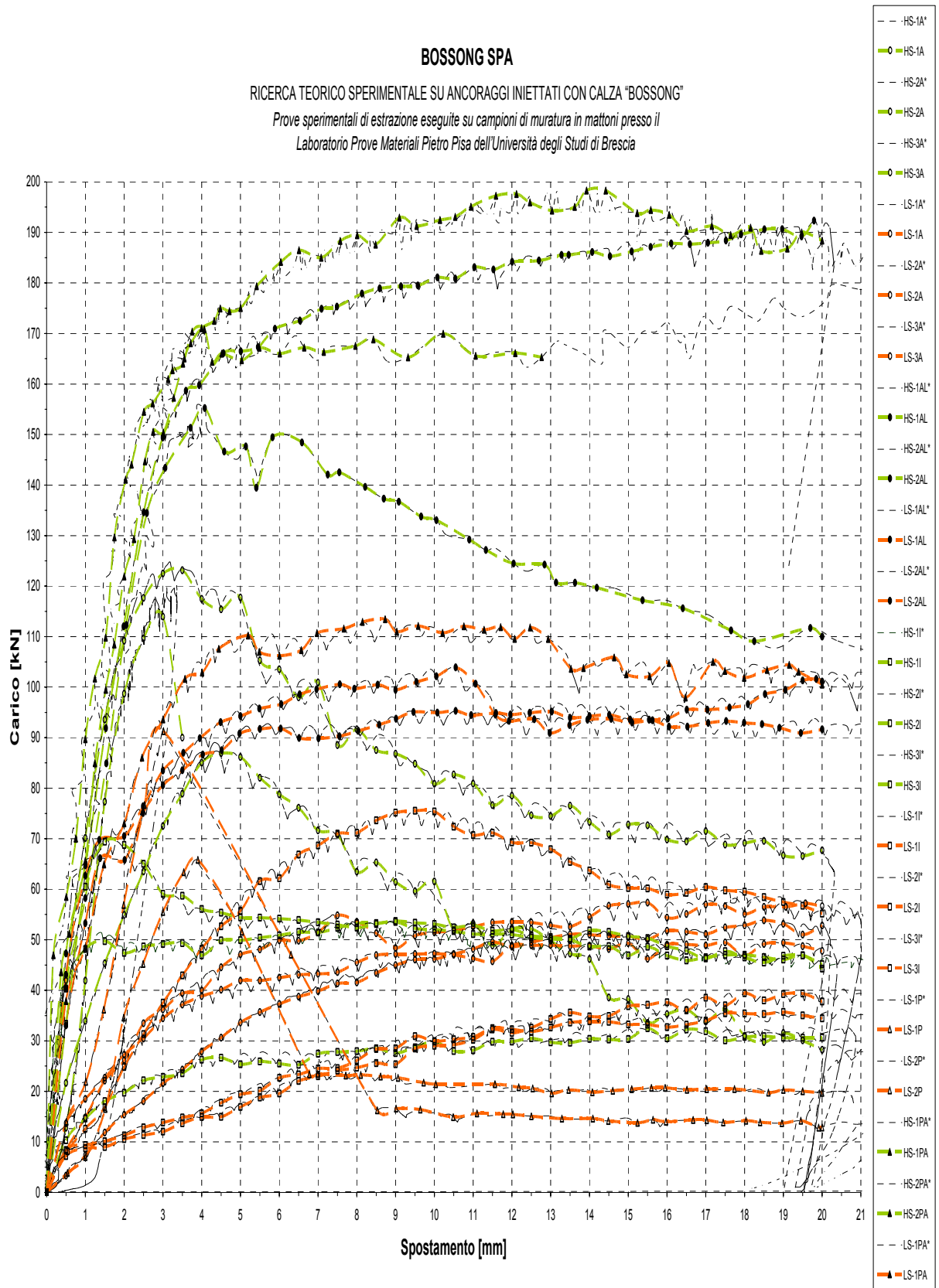


Figura 11: Curve carico – spostamento ottenute dalle diverse prove di estrazione.

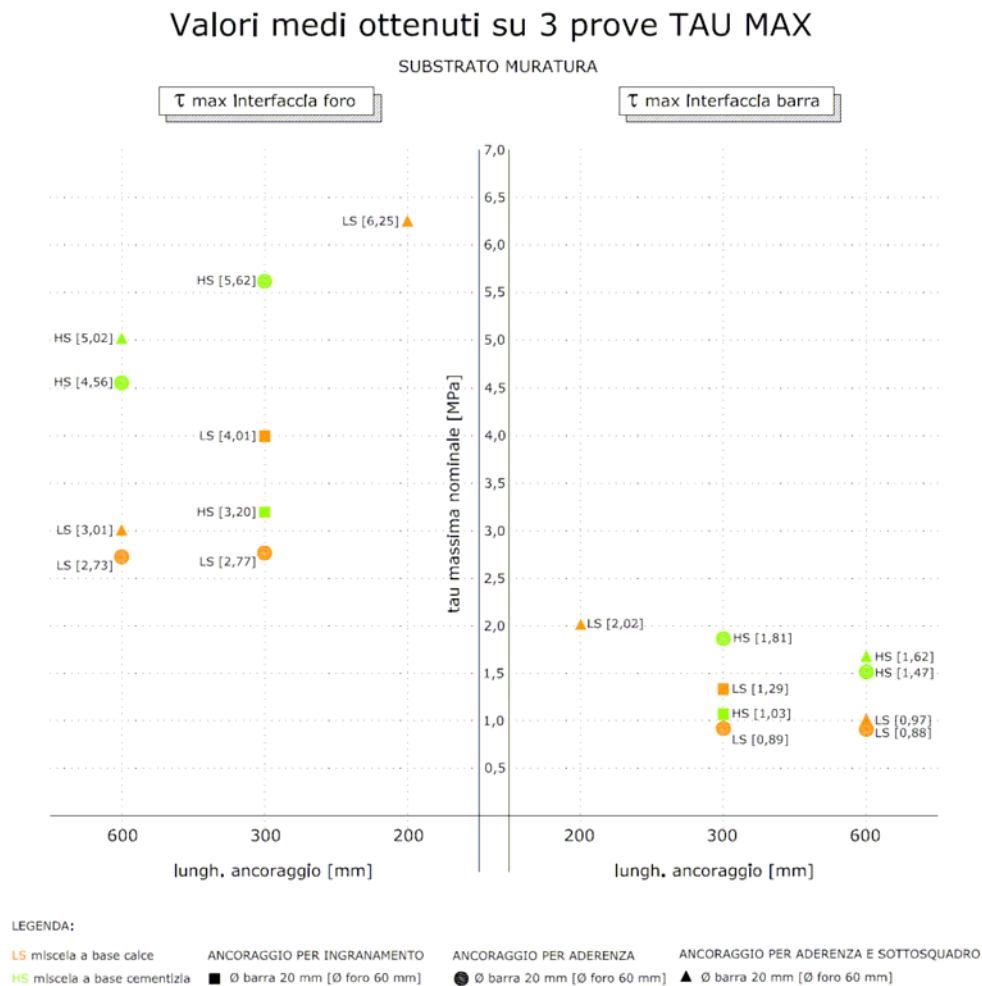


Figura 12: Sforzi di taglio vs profondità di ancoraggio.

L'esecuzione dei numerosi test condotti in questo lavoro di ricerca ha portato alla definizione di parametri che dovrebbero essere presi in considerazione ogni volta che si intenda progettare, installare e soprattutto collaudare sistemi di ancoraggio quali quello in esame. Si propone, a tal proposito, di poter testare l'idoneità di tali presidi attraverso prove di estrazione in situ applicando un carico di verifica pari al 20 % del carico di progetto. Questa soglia, come osservato sperimentalmente, risulta essere cautelativa nei confronti di eventuali sfilamenti degli ancoraggi che ne vanificherebbero la tenuta ma, nel contempo, permettono di poter validare correttamente l'efficacia degli stessi. Gli stessi parametri sono stati utili per la definizione delle modalità di prova per l'esecuzione di prove di estrazione utile per sviluppi in situ. Questo lavoro infatti è stato solo il primo passo di una ricerca più ampia, ancora in divenire, che contempla una fase di prove in situ necessaria per la comprensione reale del problema.

Si riporta, a solo titolo informativo, che le risultanze sperimentali ottenute da una decina di casi studio sparsi nel territorio lombardo, pur non esaurendo chiaramente la casistica delle tipologie murarie esistenti soprattutto in ambito nazionale, hanno fornito dati comparabili con quanto ottenuto nella fase di laboratorio. Tuttavia è stata riscontrata una dispersione di risultati più significativa con test che presentano valori modesti di resistenza (a tal proposito si veda quanto riportato nella Tabella 2). Infatti come osservato

nel presente studio, soprattutto per le prove in situ, ancoraggi iniettati con miscele leganti troppo resistenti non comportano valori di resistenza significativamente più elevati in quanto molto spesso i meccanismi fragili delle murature si innescano per primi e quindi ne governano il problema.

Valori tangenziali massimi, a rottura, interfaccia barra-malta			
	Prove in laboratorio		Prove in situ
	aderenza	ingranamento	aderenza- ingranamento
LS	$\tau_{\max}$ 2,77 MPa	$\tau_{\max}$ 4,01 MPa	$\tau_{\max}$ 0,89÷3,45 MPa
HS	$\tau_{\max}$ 5,62 MPa	$\tau_{\max}$ 5,02 MPa	$\tau_{\max}$ 1,64÷5,09 MPa

Valori tangenziali massimi, a rottura, interfaccia bulbo-substrato			
	Prove in laboratorio		Prove in situ
	aderenza	ingranamento	aderenza- ingranamento
LS	$\tau_{\max}$ 0,89 MPa	$\tau_{\max}$ 1,29 MPa	$\tau_{\max}$ 0,29÷1,11 MPa
HS	$\tau_{\max}$ 1,81 MPa	$\tau_{\max}$ 1,62 MPa	$\tau_{\max}$ 0,53÷1,64 MPa

Tabella 2: Risultati sintetici delle prove di estrazione su murature storiche

Si ritiene pertanto opportuno, anche alla luce del presente studio, operare prediligendo materiali non invasivi e compatibili con il substrato quali miscele a base calce e processi di iniezione controllati senza dannose dispersioni di boiaccia in aderenza ai moderni principi di recupero e riabilitazione strutturale, soprattutto nei casi di edilizia monumentale.

#### 14. RINGRAZIAMENTI

Gli Autori ringraziano Bossong S.p.A ed in particolare il Dott. Michele Taddei, per aver finanziato l'attività di ricerca.

#### 15. BIBLIOGRAFIA

- [1] Tepfers R. - *A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars* - Chalmers University of Technology, Goteborg, Publ. 73/2, 1973, 328 pp.
- [2] Felicetti R., Gattesco N. - *A penetration test to study the mechanical response of mortar in ancient masonry buildings* - Rilem Materials and Structures, vol. 31, June 1998, pp. 350-356.
- [3] Sala E. - *Calce e pozzolana naturale: un binomio antico e moderno. Caratterizzazione meccanica di miscele leganti desunte dalla trattatistica d'architettura* - Starrylink, 2008, Brescia.
- [4] Bassini C. - *Gli ancoraggi di barre iniettate nelle murature* - Tesi di laurea della facoltà di ingegneria civile dell'Università degli Studi di Brescia, anno accademico 1997-1998, relatore Prof. Ing. Giuriani E., Correlatore Prof Ing. Plizzari G.

[5] Gigla B. - *Bond strength of injection anchors as supplementary reinforcement inside historic masonry* - 13th International Brick and Block Masonry conference, Amsterdam, 4-7 July 2004

[6] Gigla B. - *Verbundfestigkeit von Verpressankern im Mauerwerk* - Tesi di laurea della facoltà di ingegneria civile dell'Università degli Studi di Karlsruhe, anno accademico 1998-1999, relatore Prof. Ing. Wenzel F., Correlatore Prof Ing. Rostásy F.

[7] Università degli Studi di Bergamo Facoltà di Ingegneria Dipartimento di Ingegneria Industriale – Prof. Stefano Dotti - *Fattibilità di produzione industriale di un manufatto in maglia tubolare ad uso tecnico* – Bergamo, 2004-2006.

