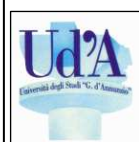




Comune di CAPORCIANO

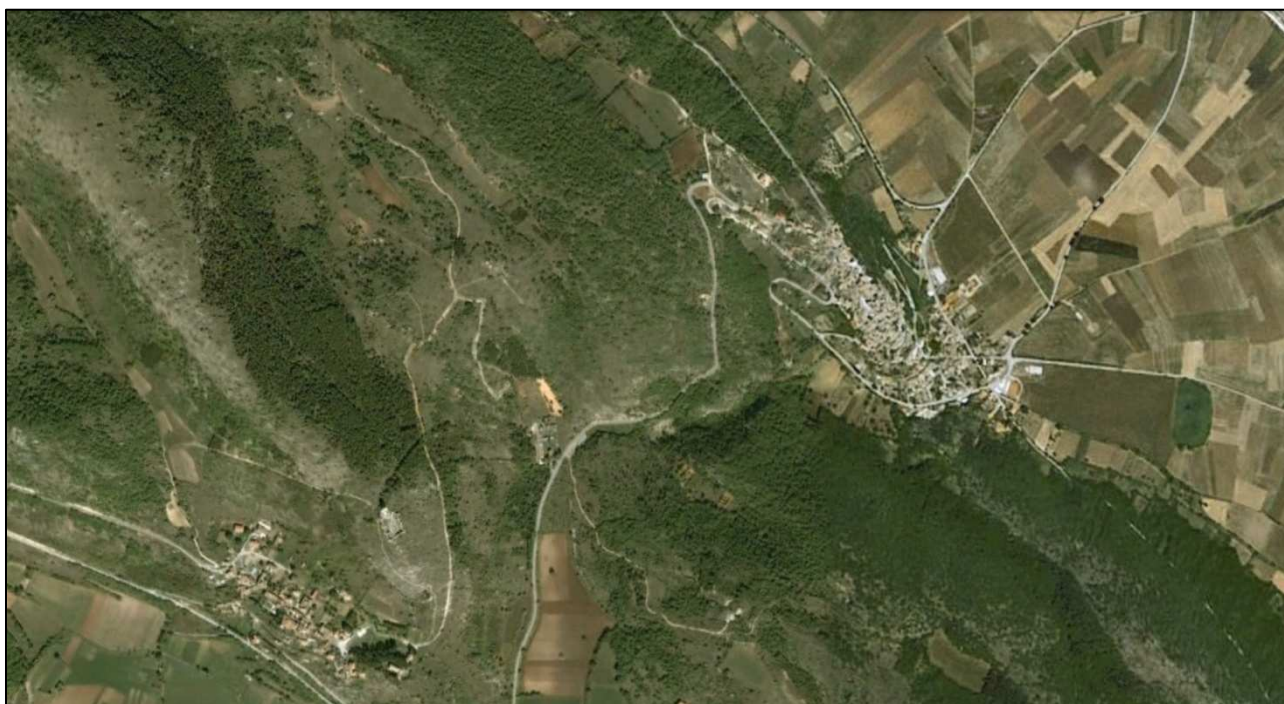
Provincia di L'Aquila



## PIANO DI RICOSTRUZIONE

Responsabile Scientifico: Prof. Arch. Maria Cristina Forlani

19 dicembre 2011



**ELABORATI**

**B3**

**DEFINIZIONE DEI CRITERI E DELLE MODALITA' DI INTERVENTO**

**RISTRUTTURAZIONE DEL REGIME STATICO:  
INTERVENTI DI RINFORZO STRUTTURALE**

Responsabile: Prof. Ing. Alberto Viskovic<sup>1</sup>

Gruppo di lavoro:

Prof. Ing. E. Spacone<sup>1</sup>, Prof. Ing. S. Biondi<sup>1</sup>, Prof. Ing. G. Camata<sup>1</sup>, Prof. Ing. G. De Matteis<sup>1</sup>,  
Prof. Ing. V. Sepe<sup>1</sup>, Prof. Ing. I. Vanzì<sup>1</sup>

Collaboratori:

Dott. Arch. M. Fiusco<sup>1</sup>, Dott. Arch. D. Giuliani<sup>1</sup>, Arch. E. Raka<sup>1</sup>

1- Dipartimento di Ingegneria

# **LINEE GUIDA PER IL CONSOLIDAMENTO ED IL RECUPERO STRUTTURALE DELLE COSTRUZIONI IN MURATURA**

## **1.1 CONCETTI GENERALI E FILOSOFIA D' INTERVENTO SULL'EDILIZIA STORICA**

### **1.1.1 La decisione dell'intervento**

Le costruzioni storiche, per loro natura, dovrebbero essere alterate il meno possibile, proprio per non compromettere questo valore che è legato non solo alla forma ma anche ai materiali ed alle tecniche costruttive originarie. Questo concetto può però portare ad una apparente contraddizione accettando, in alcuni casi, margini di sicurezza modesti, pur di limitare o rinunciare a certi lavori di rinforzo, che porterebbero ad una alterazione rispetto alla concezione originaria, con conseguente rischio di perdita del bene, soprattutto nel caso delle azioni esterne più impegnative, come l'azione sismica. In generale è opportuno effettuare l'intervento "minimo" ma strategicamente in grado di assicurare un miglioramento del comportamento strutturale della costruzione nel suo complesso; strategia consentita dalla Normativa Italiana vigente (NTC2008) che, nel caso di edifici storici o beni vincolati, permette di non raggiungere il livello di "adeguamento sismico" richiesto per edifici nuovi o recenti, ma di assicurare un livello di "miglioramento sismico" comunque quantificabile e verificabile con procedure analitiche (nella normativa precedente era consigliato il "miglioramento" ma non ne era richiesta la "quantificazione").

Intervento "minimo" non significa "concentrato" in pochi punti della struttura in quanto, una soluzione di questo tipo può portare a concentrazioni di sforzo localizzate e quindi dannose per le strutture originarie.

È invece opportuno studiare interventi minimi ma "diffusi" in modo da distribuire gli sforzi e chiamare a collaborare, nel comportamento strutturale d'insieme, la maggior parte degli elementi strutturali originari.

Esasperare la linea del minimo intervento strutturale può portare tuttavia al rischio di avere livelli di sicurezza effettivi ancor più piccoli di quelli ipotizzati in sede di progetto, a causa delle incertezze nell'interpretazione dei fenomeni e dei dati disponibili.

La scelta di intervenire e di come intervenire deve essere frutto di un'attenta analisi che pervenga ad una sintesi delle conoscenze necessarie per un giudizio sulla sicurezza di una costruzione: l'analisi storica, l'osservazione diretta dei quadri fessurativi, le indagini sperimentali sulla qualità dei materiali e degli elementi strutturali, l'analisi del comportamento strutturale.

Le conoscenze e le tecniche disponibili permettono al progettista di avere diverse opzioni di fronte ad ogni singolo problema. I criteri di scelta nel caso di costruzioni storiche, devono pertanto essere guidati non solo dall'efficacia strutturale e dall'economia ma anche, e soprattutto, dalla conoscenza delle tecniche e tecnologie del

passato, (presumibilmente) impiegate nella costruzione dell'edificio o del monumento, e dal rispetto della sua originaria concezione strutturale.

La raccolta delle informazioni basate sulla ricerca storica dell'edificio deve infatti comprendere un'indagine volta alla ricostruzione della storia del cantiere e delle fasi della costruzione del manufatto, oltre a ricostruire le vicende e gli eventi che hanno interessato l'edificio nel corso della sua esistenza. Tra le informazioni ottenibili ciò consentirà, infatti, di evidenziare le lacune e le discontinuità (o anche le sconnessioni) originarie, distinguendole da quelle acquisite in tempi successivi, elementi questi fondamentali sia per una corretta modellazione numerica sia per le analisi dei possibili meccanismi di collasso.

Di particolare importanza è l'osservazione delle lesioni e delle deformazioni, che rappresentano infatti le tracce fisiche dei meccanismi di dissesto che si sono attivati, anche se solo parzialmente.

Le prove che si devono effettuare sono atte ad ottenere informazioni precise e puntuali su particolari aspetti: l'esame della consistenza e della fattura all'interno dello spessore murario, lo stato tensionale di un paramento, le caratteristiche fisico meccaniche dei materiali, la presenza di vuoti e di discontinuità non visibili esternamente, il livello di iniettabilità di un maschio murario, la deformabilità di un solaio, le caratteristiche dinamiche di un elemento strutturale, ecc.

La conoscenza che si intende raggiungere può infatti essere conseguita con diversi livelli di approfondimento, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche, e delle indagini sperimentali.

Facendo il ragionamento inverso, tali indagini saranno funzione dei livelli di conoscenza voluti ed andranno ad interessare tutto o in parte l'edificio, a seconda della tipologia dell'intervento previsto.

Il livello di conoscenza raggiunto andrà ad esplicitarsi in un fattore detto "Coefficiente di Confidenza" e previsto dalle ultime normative. In particolare, nel caso di edifici storici è necessario fare riferimento alle tabelle di calcolo dei Coefficienti di Confidenza riportate nelle linee guida dei Beni Culturali (più dettagliate delle schede presenti nelle NTC).

Il rilievo materico costruttivo deve permettere di individuare completamente l'organismo resistente della fabbrica, tenendo anche presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi.

Tale riconoscimento richiede l'acquisizione di informazioni spesso nascoste (sotto intonaco, dietro a controsoffitti, ecc.), che può essere eseguita grazie a tecniche di indagine non distruttive di tipo indiretto (termografia, georadar, tomografia sonica, ecc.) o ispezioni dirette debolmente distruttive (endoscopie, scrostamento di intonaci, strappi d'intonaco localizzati nelle giunzioni tra setti murari, saggi, piccoli scassi, ecc.). Un aspetto rilevante è la scelta del numero, della tipologia e della localizzazione delle prove da effettuare. Per una corretta conoscenza esse dovrebbero essere adottate in modo diffuso, ma per il loro eventuale impatto e per motivazioni economiche, esse andranno impiegate solo se ben motivate, ovvero se utili nella valutazione e nel progetto dell'intervento. Al fine di limitare al massimo l'impatto di queste indagini è fondamentale avere un'approfondita consapevolezza delle caratteristiche costruttive dei manufatti nell'area e nei diversi periodi storici, in modo tale da poter fare ricorso a caratteristiche desumibili dalla regola dell'arte.

*Considerata la notevole varietà di materiali e tecniche, sia a livello geografico che storico, è utile definire regole dell'arte locali cui fare riferimento per il giudizio di qualità di una muratura.*

La lettura di uno schema strutturale di funzionamento della fabbrica necessita quindi di una conoscenza dei dettagli costruttivi e delle caratteristiche di collegamento tra i diversi elementi, e anche la relativa caratterizzazione di tali elementi. Tale lettura può essere riassunta nei seguenti prime indagini e verifiche:

- tipologia della muratura (in mattoni, in pietra – squadrata, sbozzata, a spacco, ciottoli - o mista, a paramento unico, a due o più paramenti) e caratteristiche costruttive (tessitura regolare o irregolare; con o senza collegamenti trasversali, ecc.);
- qualità del collegamento tra pareti verticali (ammorsamento nei cantonali e nei martelli, catene, ecc.);
- qualità del collegamento tra orizzontamenti (solai, volte e coperture) e pareti, con rilievo dell'eventuale presenza di cordoli di piano o di altri dispositivi di collegamento (catene, ecc.);
- elementi di discontinuità determinati da cavedi di canne fumarie etc.
- tipologia degli orizzontamenti (solai, volte, coperture), con particolare riferimento alla loro rigidezza nel piano;
- tipologia ed efficienza degli architravi al di sopra delle aperture;
- presenza di elementi strutturalmente efficienti atti ad equilibrare le spinte eventualmente presenti;
- presenza di elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità.

Speciale attenzione dovrà essere riservata alla valutazione della qualità muraria, in particolare di significativa importanza risulta essere:

- la presenza di elementi trasversali (denominati diatoni), di collegamento tra i paramenti murari e la forma, tipologia e dimensione degli elementi;
- il riconoscimento di una disposizione regolare e pressoché orizzontale dei corsi, la buona tessitura, ottenuta tramite l'ingranamento degli elementi (numero ed estensione dei contatti, presenza di scaglie) ed il regolare sfalsamento dei giunti;
- la natura delle malte ed il loro stato di conservazione.

### **1.1.2 Strategie per la Scelta dell'intervento Di Miglioramento**

Con il termine di "miglioramento" si deve intendere l'esecuzione di opere in grado di far conseguire all'edificio un maggior grado di sicurezza rispetto alle azioni sismiche con un livello di protezione sismica non necessariamente uguale a quello previsto per le nuove costruzioni.

La scelta della strategia e della tecnica d'intervento, nonché l'urgenza di attuarlo, dipendono dai risultati della precedente fase di valutazione.



L'intervento deve essere realizzato solo dopo aver accertato i benefici che possono conseguirsi e l'impatto sulla costruzione storica. In particolare devono, in via generale, essere evitate tutte le opere di demolizione - sostituzione e di demolizione - ricostruzione, operando con interventi che si integrino con la struttura esistente senza trasformarla radicalmente. In situazioni di emergenza si può derogare da questa condizione, adottando tuttavia soluzioni provvisorie tali da produrre minime alterazioni permanenti.

L'obiettivo principale resta sempre la conservazione non solo della materia ma anche del funzionamento strutturale accertato, qualora questo non presenti carenze tali da poter comportare la perdita del bene. Il progetto degli interventi dovrà garantire la conservazione dell'architettura in tutte le sue declinazioni, in particolare valutando l'eventuale interferenza con gli apparati decorativi.

La valutazione della sicurezza e l'eventuale scelta dell'intervento non possono essere effettuate solo su base analitica, come siamo abituati per le nuove costruzioni, ma si devono basare su un processo di sintesi tenendo conto degli aspetti oggettivi e soggettivi che caratterizzano ciascuna delle tre strade correntemente seguite nello studio di un edificio storico: 1) la ricerca storica, 2) l'osservazione diretta (con l'eventuale supporto di indagini e monitoraggio) e 3) l'analisi strutturale, tenendo ben presente che in quest'ultimo processo l'oggettività degli sviluppi teorici non garantisce l'oggettività delle conoscenze, essendo la realtà filtrata dalla soggettività sia nella scelta che nella definizione degli schemi.

La valutazione della sicurezza ed una chiara comprensione della struttura devono essere alla base delle decisioni e delle scelte degli interventi. In particolare, l'intervento dovrà essere proporzionato agli obiettivi di sicurezza e durabilità, contenendo gli interventi in modo tale da produrre il minimo impatto sul manufatto storico. La scelta delle tecniche d'intervento sarà valutata caso per caso, dando la preferenza a quelle meno invasive e maggiormente compatibili con i criteri della conservazione, tenendo conto dei requisiti di sicurezza e durabilità. Gli interventi dovranno quindi, per quanto possibile, rispettare la concezione e le tecniche originarie della struttura, nonché le trasformazioni significative avvenute nel corso della storia del manufatto.

L'intervento dovrà essere valutato anche in ragione del suo costo, rapportandolo all'entità del beneficio da esso prodotto ed all'effettiva necessità.

L'intervento non deve essere finalizzato solo al raggiungimento di un appropriato livello di sicurezza della costruzione, ma deve anche tendere al rispetto/raggiungimento di principi/obiettivi rivolti ad un "miglioramento controllato" e riassumibili nei seguenti punti:

- Alterare il meno possibile l'originale distribuzione delle rigidità negli elementi
- Valutare l'interferenza degli interventi con gli apparati decorativi
- Evitare (per quanto possibile) sostituzioni e ricostruzioni
- Rinforzo degli elementi resistenti originari
- Limitato inserimento di nuovi elementi
- Inserimento di protezioni passive
- Riduzione delle masse

- Limitazione o cambiamento di destinazioni d'uso (cercando usi con minori carichi di esercizio)
- Non inserire impianti negli elementi strutturali originari (ovvero non alterare le sezioni resistenti)
- Ogni materiale aggiunto/inserito deve garantire la compatibilità e durabilità in rapporto alle caratteristiche chimico fisiche della materia storica
- Operare per l'integrazione e non la trasformazione della struttura
- Rispetto di concezioni e tecniche originarie della struttura
- Se possibile, reversibilità o rimovibilità
- Limitare l'estensione degli interventi
- Conservare sia la materia che il comportamento strutturale accertato (se non è carente)
- Sono sempre validi, anche per il consolidamento, tutti i principi base del restauro

Il progetto del sistema di rinforzo deve presupporre i seguenti requisiti fondamentali:

- i rischi ai quali la struttura potrebbe essere soggetta vanno accuratamente individuati, eliminati o attenuati;
- la configurazione del rinforzo deve risultare poco sensibile ai suddetti rischi;
- la stessa configurazione deve inoltre sopportare l'occorrenza di danneggiamenti localizzati;
- sistemi di rinforzo che collassino senza segnali di preavviso vanno opportunamente evitati.

Nel soddisfare i requisiti fondamentali sopra definiti occorre garantire:

- la scelta di materiali opportuni;
- un progetto adeguato con un'accorta cura dei particolari costruttivi;
- la definizione, nell'ambito di ogni intervento, di procedure di controllo per la progettazione, la produzione, l'esecuzione e l'uso.

Qualora il rinforzo strutturale riguardi costruzioni di interesse storico e monumentale, si richiede sempre una valutazione critica dell'intervento rispetto ai canoni della conservazione e del restauro.

### **1.1.3 La reversibilità**

La filosofia del restauro tende a privilegiare interventi che siano reversibili, o in altre parole che possono essere eliminati o migliorati nel futuro.

Questo principio è corretto in quanto le decisioni non sempre sono prive di errori e quindi sarebbe illogico escludere la possibilità di utilizzare in futuro tecniche, tecnologie e materiali più appropriati, mano a mano che la scienza e la tecnica progrediscono.

E' importante ricordare, comunque, che la reversibilità si deve considerare come una preferenza nelle scelte progettuali, piuttosto che un requisito assoluto.

Situazioni nelle quali la reversibilità non è né possibile né raccomandabile non sono inusuali.

Una di queste, ad esempio, è rappresentata dal consolidamento (rigenerazione) della muratura dissestata mediante iniezioni; questa tecnica irreversibile, è, in ogni caso, assai meno traumatica ed invasiva della vecchia tecnica dello scuci-cuci, che comporta demolizioni e ricostruzioni parziali della muratura.

La rigenerazione muraria, mediante iniezioni ed impregnazioni di malte idrauliche chimicamente compatibili con le malte storiche (in genere vanno utilizzate malte di tipo pozzolanico), è l'intervento fondamentale per il miglioramento di murature degradate, con tessiture irregolari e nucleo interno non ben legato. Il miglioramento della qualità muraria è inoltre in molti casi la condizione indispensabile per l'applicabilità e l'ancoraggio di molte tipologie di interventi di rinforzo, tra le quali quelle volte al miglioramento del comportamento strutturale d'insieme.

## **1.2 TIPOLOGIE DI INTERVENTO PER IL CONSOLIDAMENTO DI EDIFICI IN MURATURA**

### **1.2.1 Criteri generali**

Gli interventi in genere sono rivolti ad un incremento della capacità resistente dei diversi elementi strutturali; capacità resistente che deve essere commisurata all'entità dei carichi in gioco. E' opportuno comunque migliorare il comportamento d'insieme della struttura prima di studiare gli interventi per i singoli elementi strutturali.

Nella valutazione del comportamento strutturale d'insieme occorre mettere in conto sia i carichi di esercizio, conseguenti alla destinazione d'uso prevista e spesso mutati rispetto all'epoca della realizzazione originaria, sia i carichi esterni come l'azione sismica.

L'obiettivo da perseguire con gli interventi di consolidamento è quello di ottenere per le parti della muratura un comportamento monolitico e gli strumenti per ottenere questo sono diversi a seconda della situazione da cui si parte.

Gli interventi di consolidamento vanno applicati, per quanto possibile, in modo regolare ed uniforme alle strutture; l'esecuzione di interventi localizzati su porzioni limitate dell'edificio va opportunamente valutata (possibilmente evitata) e giustificata calcolando l'effetto in termini di variazione nella distribuzione delle rigidezze; particolare attenzione deve essere posta anche alla fase esecutiva degli interventi, onde assicurare l'efficacia degli stessi.

La ricerca del miglioramento del comportamento strutturale globale dell'edificio deve essere legata ed orientata alla ricerca ed alla verifica dell'ottenimento di un comportamento scatolare d'insieme. Il comportamento scatolare d'insieme è fondamentale al fine di evitare il formarsi di meccanismi locali ed assicurare una corretta distribuzione delle azioni esterne orizzontali (sisma, vento) in proporzione alle rigidezze dei diversi elementi strutturali.

Una volta assicurata una risposta globale della struttura si può procedere con la valutazione dei possibili interventi di incremento resistenza.

Come vedremo nel seguito, gli interventi si possono distinguere in interventi di rinforzo statico, legati in genere alla destinazione d'uso prevista per l'edificio oltre che a manomissioni ed indebolimenti strutturali avvenuti nel passato, ed interventi rivolti ad un miglioramento sismico, per quanto si possa affermare come sia comunque opportuno ricercare soluzioni che soddisfino al contempo entrambe le problematiche.

In generale, gli interventi devono in primo luogo assicurare (o ripristinare) una buona continuità ed efficaci collegamenti tra i vari elementi strutturali (pareti, solai, tetti, ecc.). Per quanto riguarda in particolare l'azione sismica, concettualmente si possono individuare due strade: migliorare il comportamento strutturale o ridurre gli effetti del sisma.

Si può comunque rilevare che, se da un punto di vista teorico rinforzare la struttura o dissipare l'energia porta allo stesso miglioramento del livello di sicurezza, da un punto di vista pratico spesso il primo tipo di intervento è più facilmente realizzabile.

Nel riassumere e sistematizzare quanto detto fin qui, le modalità d'intervento impiegate nei recuperi strutturali e gli interventi di miglioramento sismico possono essere distinti sia per tipologie di intervento (impiego di determinati materiali), sia sulla base delle diverse tipologie di strutture ed elementi strutturali su cui è necessario intervenire, nonché in base alla "filosofia" d'intervento (interventi puntuali o diffusi, di rinforzo delle resistenze o di riduzione delle azioni, ecc.).

La valutazione della qualità delle murature deve essere propedeutica a qualunque analisi od ipotesi di intervento ed è di fondamentale importanza per un corretto riferimento al modello di comportamento per macroelementi.

Prima di porsi il problema dell'individuazione di zone di muratura che rimangano solidali durante la sollecitazione dinamica, occorre infatti stabilire se tale muratura è realmente in grado di comportarsi in maniera monolitica, ed in caso negativo occorrerà provvedere a quanto occorre per raggiungere tale obiettivo.

La valutazione dell'efficienza strutturale di una muratura non si può basare solo sui valori di resistenza meccanica, ma deve essere integrata con l'esame dell'apparecchiatura, dello stato delle malte, e della qualità dell'inerte. Si tratta quindi di un confronto da operare con riferimento ad abachi che riportano le diverse tipologie murarie e le loro caratteristiche strutturali, abachi in parte presenti nelle ultime normative.

## ***1.2.2 Le tecniche principali di intervento***

### ***1.2.2.1 Le tecniche tradizionali***

I criteri e le tecniche utilizzate nelle antiche costruzioni sono spesso più efficaci e resistenti di quanto possa apparire a prima vista; infatti occorre tener presente che, ad

esempio, la deformabilità della muratura, prodotta da un reticolo di fessure o piccole lesioni, non sempre compromette la stabilità, ma permette alla struttura di adattarsi a fattori come le variazioni termiche e piccoli assestamenti del suolo; inoltre anche quadri fessurativi diffusi non sempre sono indice di dissesto: gli archi, le volte e le cupole hanno una eccezionale capacità portante e sono in grado di assolvere la loro funzione, anche quando severamente danneggiati.

Il legno può utilizzarsi intelligentemente, non solo per realizzare tetti e solai, ma anche per costituire incatenamenti, in grado di bilanciare la spinta delle volte, o migliorare la continuità ed il collegamento tra le pareti.

L'impiego di materiali tradizionali e delle tecniche antiche nel restauro è pertanto appropriato non solo per mantenere il valore storico della costruzione, ma anche come metodo tecnicamente corretto ed intelligente per ripristinare condizioni soddisfacenti di sicurezza ed efficienza strutturale. Le tecniche e le pratiche costruttive del passato non sono tuttavia prive di errori.

La storia dell'architettura comprende anche la storia dei dissesti e dei crolli che hanno segnato i momenti di passaggio da tecniche consolidate a nuove forme e concezioni innovative, nonché i momenti di decadenza, in genere segnati da perdita di conoscenze e di saperi, tra i quali anche le regole apparentemente consolidate di buona costruzione, senza contare la riduzione della qualità dei materiali impiegati nei periodi di crisi economica.

Non tutti gli edifici affetti da errori e manchevolezze costruttive sono già crollati nel passato, molti sono sopravvissuti fino ad oggi, ma con debolezze intrinseche e margini di sicurezza inferiori a quanto apparentemente presumibile; di qui l'importanza di adeguate analisi e verifiche.

Occorre infine tener presente che in molti casi non è comunque possibile applicare le tecniche tradizionali. Questo accade ogniqualvolta il miglioramento strutturale richiesto (o voluto) non è compatibile con le caratteristiche meccaniche dei materiali tradizionali.

#### **1.2.2.2 Le tecniche moderne**

L'uso eccessivo e indiscriminato delle nuove tecniche e tecnologie nel campo del restauro ha portato ad una riconsiderazione dei benefici e ad una maggiore attenzione agli svantaggi che il loro uso può comportare.

Oggi è chiaro che le nuove tecniche si debbano usare con cautela, poiché possono produrre anche danni irreversibili.

Le tecniche moderne, tuttavia, se utilizzate appropriatamente, possono offrire soluzioni eccezionali ed effettivamente aiutare nel preservare il nostro patrimonio architettonico.

Uno dei problemi più importanti nel restauro delle costruzioni storiche è spesso rappresentato dalla necessità di conferire una certa resistenza a trazione.

I materiali moderni (acciai speciali (inossidabili o autopassivanti), fibre sintetiche, ecc.) possono fornire una alternativa interessante ed efficace alle catene ed agli elementi di legno, utilizzati frequentemente nel passato.

### **1.2.2.3 Le tecnologie innovative**

Nei tempi più recenti si sono sviluppate alcune tecnologie d'avanguardia, spesso nate per applicazioni diverse da quelle del restauro, ma che hanno trovato poi in questo settore applicazioni di estremo interesse. Tra queste citiamo:

**Resine** quelle più comunemente usate sono quelle epossidiche

**Materiali compositi** sono costituiti da una matrice di resine polimeriche (*epossidiche, poliestere, viniliche, ...*) o di malte inorganiche (pozzolaniche) fibrorinforzate, in cui sono immerse fibre sintetiche (*vetro, aramide, carbonio, basalto*), che sono quelle che conferiscono la resistenza al composito.

Come tutte le tecnologie innovative si deve tuttavia fare attenzione a possibili *effetti collaterali negativi* come, ad esempio, la *sensibilità ai raggi ultravioletti*.

**Acciai speciali** hanno fatto grandi progressi conseguendo non solo eccezionali resistenze, ma anche buona durabilità e compatibilità con le costruzioni storiche, come ad esempio gli acciai inossidabili ed al titanio. Interessanti sono anche i così detti *acciai "a memoria di forma"* (shape memory alloy) .

#### **Apparecchi viscosi oleodinamici (shock transmitters)**

Questi apparecchi consentono di accoppiare due elementi strutturali (ad esempio un solaio ed una parete) in modo da consentire le deformazioni relative lente, come le deformazioni termiche o quelle indotte da cedimenti del suolo, mentre si comportano rigidamente, costituendo quindi veri e propri vincoli, in caso di azioni dinamiche veloci, come il sisma.

## **1.3 OPERAZIONI E TECNICHE DI INTERVENTO**

Nel seguito sono fornite indicazioni generali per la scelta degli interventi di miglioramento sismico degli edifici in muratura, con riferimento ad alcune tecniche di utilizzo corrente. Gli interventi possibili per ciascuna patologia o forma di vulnerabilità sono generalmente più d'uno, con caratteristiche diverse in termini di efficacia, invasività, reversibilità, compatibilità, durabilità e costi. Gli interventi si possono distinguere in vari gruppi a seconda del loro obiettivo e della loro importanza.

### **1.3.1 Interventi volti a ridurre le carenze dei collegamenti**

Alla fine di garantire un comportamento globale ottimale dell'edificio è necessario che gli interventi siano mirati ad assicurare alla costruzione un soddisfacente comportamento d'insieme, mediante la realizzazione di un buon ammassamento tra le pareti e di efficaci collegamenti dei solai alle pareti; inoltre, deve essere verificato che le



eventuali spinte prodotte da strutture voltate siano efficacemente contrastate e deve essere corretto il malfunzionamento dei tetti spingenti. La realizzazione di questi interventi è un prerequisito essenziale per l'applicazione di gran parte dei metodi di analisi sismica globale dell'edificio, che si basano sul comportamento delle pareti murarie nel proprio piano, presupponendone la stabilità nei riguardi di azioni sismiche fuori dal piano.

### **1.3.1.1 Inserimento di tiranti metallici**

Nel caso di edifici in muratura con più piani, le catene vanno in genere collocate in corrispondenza dei solai (orizzontamenti di piano) e posizionate al di sotto del pavimento.

Come criterio base da perseguire, quando possibile ed obbligatoriamente nell'ipotesi di solai che non garantiscano adeguato contrasto all'azione di compressione (per faticenza, per carenza della dimensione, ecc.), le catene vanno posizionate (generalmente al livello dei solai) in adiacenza ai muri trasversali, sia perché essi sono in grado di contrastarne in maniera efficace il tiro, sia perché in tal modo si consegue un efficiente collegamento puntuale tra pareti ortogonali.

La disposizione più efficace è costituita da una coppia di catene gemelle (catene binate) poste in parallelo, lateralmente allo stesso muro.

Il dimensionamento dei capichiave deve tener conto delle caratteristiche dell'elemento murario (muro, colonna, pilastro) collegato. Spesso risulta necessario un consolidamento locale della muratura, nella zona di ancoraggio, ma, come detto in precedenza, è ancora meglio procedere ad una rigenerazione muraria di tutte le pareti portanti quando l'apparecchiatura è scadente.

I capichiave sono generalmente lasciati a vista, soltanto in alcuni casi (edifici di interesse storico-monumentale) possono essere "nascosti" ed allocati in tasche di intaglio all'uopo realizzate nella muratura e successivamente mascherati con sovrapposizione di protesi in elementi lapidei, opere a stucco e da semplici inserti di intonaco. Ad ogni modo, dove è possibile è sempre consigliabile l'impiego di capichiave esterni (appositamente progettati non solo per la funzione strutturale ma anche per quella estetica).

Ogni catena deve essere dimensionata, oltre che in funzione della resistenza a trazione del materiale metallico di cui è costituita, anche con una sezione trasversale rapportata alla lunghezza, che ne assicuri un'adeguata rigidità, nonché essere sottoposta ad uno stato di pretensione commisurato a:

- entità del tiro in esercizio;
- valutazione dell'entità delle cadute di tensione nel tempo;
- azioni locali (all'interfaccia capochiave - muratura di assestamento) compatibili con le capacità resistenti locali delle parti murarie che forniscono il contrasto.

Tiranti disposti nelle due direzioni principali del fabbricato, a livello dei solai ed in corrispondenza delle pareti portanti, ancorati alle murature mediante capochiave, forniscono un efficace vincolo contro il ribaltamento fuori piano dei pannelli murari e

conferiscono un elevato grado di connessione tra le murature ortogonali, tale da favorire il comportamento d'assieme del fabbricato.

Nel realizzare gli incatenamenti trasversali si possono anche sfruttare le travi dei solai esistenti come tiranti, collegandole con opportuna ferramenta a capochiave esterni.

E' da valutare con attenzione il ricorso agli ancoraggi per aderenza (mediante iniezioni di resine o malte a base cementizia nella muratura), sia per le possibili incompatibilità tra i materiali che per la difficoltà di controllare l'efficacia dell'ancoraggio.

I capichiave a paletto non vengono mai posti in opera in posizione verticale o orizzontale. Il loro orientamento deve essere scelto in funzione delle reazioni che possono fornire le strutture (i blocchi lapidei) poste ad immediato contatto.

### **1.3.1.2 Cerchiature esterne**

Cerchiature esterne con elementi metallici o materiali compositi, possono garantire un efficace collegamento tra murature ortogonali nel caso di edifici di dimensioni ridotte, dove i tratti rettilinei della cerchiatura non sono troppo estesi, o quando vengono realizzati ancoraggi in corrispondenza dei martelli murari. È opportuno disporre elementi ripartitori (piastre angolari) per evitare l'insorgere di concentrazioni di tensioni in corrispondenza degli spigoli delle murature.

Ad ogni modo, questo genere d'intervento è in genere sconsigliabile per invasività e per la scarsa efficacia. È adatto per opere provvisorie o per piccoli edifici o per strutture particolari (cupole, torri).

### **1.3.1.3 Perforazioni armate**

Le perforazioni armate devono essere limitate ai casi in cui non siano percorribili altre soluzioni, per la notevole invasività di tali elementi e la dubbia efficacia, specie in presenza di muratura a più paramenti scollegati; in ogni caso dovrà essere garantita la durabilità degli elementi inseriti (acciaio inox, materiali compositi o altro) e la compatibilità delle malte iniettate. Si precisa che questi interventi di collegamento locale sono efficaci per il comportamento d'assieme della costruzione solo in presenza di murature di buone caratteristiche, mentre per le murature scadenti è preferibile l'adozione di tiranti, che garantiscono un collegamento complessivo.

### **1.3.1.4 Collegamenti tra pareti e solai**

E' possibile, in generale, considerare i solai come elementi strutturali atti a conseguire il richiesto mutuo incatenamento delle pareti murarie; tale soluzione strutturale è stata ampiamente utilizzata anche dai costruttori delle epoche passate.

Con tale tecnica si utilizzano le travi in legno e/o metalliche costituenti gli elementi portanti degli orizzontamenti di piano (solai) e relativi sistemi di ancoraggio alle pareti murarie: esse si vincolano per mezzo della posa in opera di chiavarde, capichiave, ancoraggi di ammorsamento, alle murature portanti parallele all'orditura ed alle

murature di vincolo ortogonali all'orditura, contribuendo a solidarizzare mutuamente l'impianto murario portante verticale complessivo costituito dai muri perimetrali e/o di spina su cui sono impostati gli orizzontamenti.

Più recentemente tale tecnica è stata sviluppata anche con utilizzo di tecnologie e materiali innovativi con l'adozione di ancoraggi (fiocchi) realizzati in materiali compositi (fibre in carbonio, fibre metalliche ad elevata resistenza meccanica) con matrici epossidiche, collegati/incollati alle travi lignee e risvoltati con formazione di testa di contrasto sulla superficie esterna della parete muraria attraversata per l'imperniazione.

La possibilità di utilizzare i solai, opportunamente ancorati alle murature, come elementi utili anche a svolgere la funzione aggiunta di incatenamento delle pareti murarie, deve essere valutata attentamente anche in funzione della qualità muraria delle pareti di ancoraggio, dello stato conservativo delle stesse travi portanti e dell'effettiva capacità degli orizzontamenti (solai) di restituire un comportamento a diaframmi rigidi nel proprio piano.

Nel caso un'accurata indagine preventiva (saggi) rivelasse un deficit delle qualità richieste, si procederà all'esecuzione propedeutica delle opere di pre-consolidamento delle murature (sostruzione muraria nella zona di attestamento, iniezioni, ecc.) e di consolidamento dei solai, atte a garantire l'efficienza prestazionale delle travi (protesi, sostituzione parziale di elementi compromessi, ecc.) e la restituzione del comportamento statico richiesto (diaframma rigido).

In alternativa è sempre preferibile adottare le altre soluzioni tecniche proposte per gli incatenamenti (cfr.: catene, tiranti, controventi orizzontali).

#### **1.3.1.5 Scuci e cuci**

L'intervento di cuci e scuci è un intervento molto invasivo e costoso, quindi prima di pensare a tale intervento bisogna vedere se si può risolvere in altro modo il problema della sconnessione, danneggiamento e allentamento di un pannello murario.

#### **1.3.1.6 Cordoli in sommità**

Cordoli in sommità alla muratura possono costituire una soluzione efficace per collegare le pareti, in una zona dove la muratura è meno coesa a causa del limitato livello di compressione, e per migliorare l'interazione con la copertura. Questi cordoli possono essere realizzati in muratura armata, consentendo di realizzare il collegamento attraverso una tecnica volta alla massima conservazione delle caratteristiche murarie esistenti.

Questi cordoli, infatti, devono essere realizzati con una muratura a tutto spessore e di buone caratteristiche; in genere la soluzione più naturale è l'uso di una muratura in mattoni pieni. All'interno, nei giunti orizzontali, deve essere alloggiata un'armatura metallica o in materiale composito, resa aderente alla muratura del cordolo tramite conglomerato pozzolanico fibrorinforzato.

Il collegamento tra il cordolo e la muratura sottostante può essere in genere garantito dall'aderenza, l'ingranamento e l'attrito (in alcuni casi può essere opportuno eseguire un

consolidamento della muratura sommitale della parete, ad esempio tramite iniezioni di malta). Perfori armati, disposti con andamento verticale, sono impiegabili previa rigenerazione della muratura sottostante.

In alternativa alla muratura armata, quando è necessaria una prestazione meccanica superiore si possono impiegare cordoli in acciaio: rappresentano una valida alternativa per la loro leggerezza, la limitata invasività e la reversibilità. Essi possono essere eseguiti in due diversi modi: a) attraverso una struttura reticolare, in elementi angolari e piatti metallici, posta in sommità e collegata tramite perfori armati; b) tramite piatti o profili sui due paramenti, posti poco al di sotto della sommità della muratura e collegati tra loro con barre passanti. In presenza di muratura di scarsa qualità, l'intervento deve essere accompagnato da un'opera di bonifica e rigenerazione della fascia di muratura interessata. Il collegamento del cordolo alla muratura, opportunamente consolidata se necessario, viene eseguito tramite perfori armati. I cordoli metallici si prestano particolarmente bene al collegamento degli elementi lignei della copertura e contribuiscono all'eliminazione delle eventuali spinte.

### ***1.3.2 Interventi volti a ridurre le spinte di archi, volte ed architravi, nonché al loro consolidamento***

#### **Premessa**

Gli interventi sulle strutture ad arco o a volta possono essere realizzati con il ricorso alla tradizionale tecnica delle catene, che compensino le spinte indotte sulle murature di appoggio e ne impediscano l'allontanamento reciproco.

Le catene andranno poste di norma alle reni di archi e volte. Qualora non sia possibile questa disposizione, si potranno collocare le catene a livelli diversi purché ne sia dimostrata l'efficacia nel contenimento della spinta.

Tali elementi devono essere dotati di adeguata rigidità (sono da preferirsi barre di grosso diametro e lunghezza, per quanto possibile, limitata); le catene devono essere poste in opera con un'adeguata presollecitazione, in modo da assorbire parte dell'azione spingente valutata tramite il calcolo (valori eccessivi del tiro potrebbero indurre danneggiamenti localizzati).

In caso di presenza di lesioni e/o deformazioni, la riparazione deve ricostituire i contatti tra le parti separate, onde garantire che il trasferimento delle sollecitazioni interessi una adeguata superficie e consentire una idonea configurazione resistente.

#### **Piattabande ed architravi**

Gli architravi sono costituiti da archi in muratura estremamente ribassati, o da un unico elemento in pietra o legno.

La capacità portante dipende da un adeguato sviluppo di un "effetto arco" all'interno della parete stessa, subito al di sopra dell'apertura.

Possono entrare in crisi quando siano interessati da lesioni passanti; gli interventi allora possono consistere in iniezioni di malta tra i mattoni distaccati, incollaggio con resine tra le parti in pietra distaccate, inserimento di barre o biette.

Nei casi di maggior dissesto, o quando si prevedano sensibili incrementi di carico, un rinforzo efficace può ottenersi mediante l'inserimento di una coppia di putrelle, collegate tra loro. Nei casi in cui il dissesto coinvolga anche la muratura immediatamente superiore, si può procedere al rinforzo inserendo delle armature ancorate superiormente nella muratura integra.

### **Archi e volte**

Gli archi e le volte, grazie alla loro forma curva presentano una notevole capacità portante; le cupole e le volte a vela, grazie alla doppia curvatura, sviluppano al massimo grado la resistenza per forma. Archi volte e cupole presentano quindi notevoli riserve di resistenza e possono giungere al collasso o per riduzione quasi totale delle caratteristiche meccaniche del materiale con cui sono realizzate o per considerevoli spostamenti delle imposte, cioè per insufficienza della necessaria contropinta.

Se il problema è la mancanza di contropinta si può intervenire aumentando il ricarico verticale o la massa delle strutture di sostegno, ricostruendo strutture contro-spingenti in adiacenza (volte precedentemente demolite in ambienti adiacenti a quello della volta che si vuole conservare), aggiungendo speroni esterni o inserendo incatenamenti in acciaio o in legno. L'efficacia delle catene aumenta se all'atto della posa in opera vengono messe in tensione, in modo da fornire il contrasto richiesto prima dell'insorgere di ulteriori deformazioni.

Il problema della riduzione delle caratteristiche meccaniche del materiale può insorgere in caso di mancanza di manutenzione ed esposizione agli agenti atmosferici, soprattutto nel caso di volte in conglomerato di pietrame.

Questa situazione è particolarmente pericolosa in caso di volte e cupole molto ribassate, come quelle a sezione ellittica realizzate in età barocca, dove il degrado delle malte può non garantire la necessaria resistenza a taglio nella zona centrale.

Inoltre occorre considerare che un ritiro delle malte (con conseguente caduta di spinta) non adeguatamente preso in conto, può aver ridotto i margini di sicurezza già all'epoca della costruzione.

Negli edifici le volte sono spesso molto ribassate, danneggiate da lesioni, da perdita di malta e sono soggette ad incrementi del carico di esercizio; può quindi non essere sufficiente assicurare la spinta alle imposte ed è necessario intervenire sulle volte stesse mediante bonifica dei giunti di malta, iniezioni di malta nelle zone fratturate.

Nel caso delle cupole è spesso necessario rinforzare a trazione (con catene in acciaio o in fibra sintetica) le linee dei paralleli, dove si producono più facilmente sforzi di trazione superiori alla capacità resistente del materiale muratura. Più raramente è necessario aggiungere rinforzi lungo i meridiani, per compensare gli effetti flessionali nei piani radiali (questo in genere accade in seguito ad errori nella progettazione originaria, come quando la lanterna è troppo pesante in rapporto alla geometria della cupola).

Occorre fare attenzione alle cupole con pianta ellittica e quindi anche alle volte a vela su base rettangolare: in questi casi particolari non si possono impiegare incatenamenti

circonferenziali secondo i paralleli, perché controproducenti, ed è necessario quindi disporre dei contrasti radiali.

Per assorbire le spinte di volte ed archi non deve essere esclusa a priori la possibilità di realizzare contrafforti o ringrossi murari. Questi presentano un certo impatto visivo sulla costruzione ma risultano, peraltro, reversibili e coerenti con i criteri di conservazione. La loro efficacia è subordinata alla creazione di un buon ammorsamento con la parete esistente, da eseguirsi tramite connessioni discrete con elementi lapidei o in laterizio ed alla possibilità di realizzare una fondazione adeguata.

È possibile il ricorso a tecniche di placcaggio all'estradosso con fasce di materiale composito.

La realizzazione di contro-volte in calcestruzzo o simili, armate o no, è da evitarsi.

Il placcaggio all'intradosso con materiali compositi è efficace se associato alla realizzazione di un sottarco, in grado di evitare le spinte a vuoto, o attraverso ancoraggi puntuali, diffusi lungo l'intradosso.

Placcaggio con fasce di materiale composito

- si possono applicare sia con resine epossidiche che con matrice cementizia
- da considerare: traspirabilità, durabilità, reversibilità
- nel caso di placcaggi all'intradosso vanno equilibrate le spinte a vuoto

### **Archi**

Si possono prevedere due possibili schemi strutturali:

- schema ad arco, per archi insistenti su imposte fisse;
- schema arco-piedritto, detto schema a portale, per archi insistenti su piedritti.

Generalmente, un arco o un portale crolla per la formazione di almeno quattro cerniere. In particolare, un possibile meccanismo può essere dovuto, ad esempio, alla formazione di tre cerniere (proprie) e di un doppio pendolo (cerniera impropria) che permette lo slittamento a taglio di una parte dell'arco rispetto all'altra.

Nello schema ad arco, per impedire il meccanismo caratterizzato dalla formazione delle quattro cerniere, di cui due all'estradosso e due all'intradosso, si può intervenire incollando tessuti o lamine di FRP all'estradosso ovvero all'intradosso.

L'intervento di rinforzo sugli archi si esegue preferenzialmente applicando tessuti o lamine di FRP all'estradosso, allo scopo di inibire la formazione di cerniere all'intradosso; in alternativa si possono applicare tessuti o lamine di FRP all'intradosso dell'arco (se non è faccia a vista) per inibire la formazione di cerniere al suo estradosso, ma è meno efficace.

Un'altra pratica possibile consiste nell'applicare il rinforzo sia all'estradosso che all'intradosso dell'arco per prevenire la formazione di cerniere del primo e del secondo tipo. Tale modalità di applicazione è tuttavia meno frequente.

Tra gli schemi strutturali finalizzati alla determinazione delle caratteristiche della sollecitazione sulla struttura rinforzata, devono essere sempre inclusi quelli che prevedono la formazione di cerniere alle imposte, a meno di non realizzare specifici interventi che ne impediscano la formazione.



- Gli interventi di rinforzo parziali, eseguiti su parte dell'estradosso o dell'intradosso, non escludono la formazione di cerniere responsabili dell'attivazione di un cinematismo; tuttavia, se opportunamente concepiti e realizzati, contribuiscono ad incrementare il valore del carico di collasso.

È consigliabile:

- preferire alle lamine di FRP i tessuti, che meglio si adattano alla geometria del supporto murario;
- applicare, se possibile, il rinforzo sull'estradosso dell'arco; infatti in tal caso, per effetto della curvatura, si mobilitano all'interfaccia arco - FRP teso tensioni normali di compressione; al contrario, nel caso di un rinforzo teso applicato all'intradosso dell'arco, insorgono all'interfaccia interazioni di trazione, che riducono la resistenza alla delaminazione.

### ***Schema a portale***

Nello schema a portale può non essere sufficiente apporre il rinforzo di FRP all'estradosso o all'intradosso dell'arco per impedire il meccanismo ad apertura delle imposte. Occorre in tal caso intervenire sui piedritti oppure disporre una catena tra le imposte.

### ***Volte***

Le verifiche da effettuare sono le stesse di quelle previste per lo schema ad arco.

Generalmente, si consiglia di disporre lungo le generatrici una quantità di rinforzo per unità di area pari al 10% di quella disposta lungo la direttrice. La predetta percentuale deve essere innalzata fino al 25% in zona sismica.

Nel caso di volte impiegate in edifici cellulari con vani di modeste dimensioni è opportuno privilegiare l'intervento di rinforzo sulla gabbia muraria la cui integrità e rigidità può consentire alla volta di equilibrare i carichi verticali con comportamenti membranali che prevedano un impegno a trazione minimo o nullo. Tale intervento, di norma, consente di evitare o ridurre quello sulla superficie curva della volta.

### ***Volte a doppia curvatura: cupole***

In una cupola soggetta a soli carichi verticali si instaura uno stato tensionale con tensioni normali di trazione dirette lungo i paralleli. Esso è localizzato in prossimità dell'imposta della cupola e si estende sin oltre le reni. La modestissima resistenza a trazione della muratura giustifica il classico quadro fessurativo che frequentemente si instaura nelle cupole: le lesioni si dispongono lungo i meridiani, con l'apice posizionato all'incirca alla metà di questi ultimi, e si estendono fino all'imposta. La fessurazione lungo i meridiani modifica lo stato di equilibrio preesistente mobilitando valori considerevoli della spinta all'imposta, con eventuali ripercussioni sulla sottostante struttura.

L'intervento mediante tessuti circonferenziali di FRP, disposti in prossimità della base della cupola, può servire a contrastare l'estensione della zona fessurata mitigando l'incremento di spinta all'imposta.

### ***Volte a doppia curvatura su pianta quadrata***

L'intervento di rinforzo di volte a vela, ovvero volte di traslazione su pianta quadrata, spesso presenti in edifici cellulari con vani di modeste dimensioni, deve innanzitutto interessare la gabbia muraria: l'integrità e la rigidità di quest'ultima consente alla struttura voltata di equilibrare i carichi verticali con stati tensionali di sola compressione. Ove non si ritenga di poter conseguire pienamente tale risultato, i rinforzi sulla volta possono limitarsi ai "pennacchi" d'angolo, nei quali la trazione è prevista in direzione ortogonale alle diagonali del vano.

### ***1.3.3 Interventi volti a ridurre l'eccessiva deformabilità dei solai ed al loro consolidamento***

I solai devono essere efficacemente collegati alle pareti murarie, attraverso un appoggio sufficientemente ampio ed elementi di connessione che ne impediscano lo sfilamento. Il ruolo dei solai nel comportamento sismico delle costruzioni in muratura è quello di trasferire le azioni orizzontali di loro competenza alle pareti disposte nella direzione parallela al sisma; inoltre essi possono costituire un ulteriore vincolo per le pareti sollecitate da azioni ortogonali al proprio piano, oltre all'ammorsamento con le pareti ortogonali ed ai sistemi di collegamento puntuale. Per le suddette ragioni risulta utile un irrigidimento dei solai nel loro piano, di cui vanno valutati gli effetti, a cui si associa inevitabilmente un aumento della resistenza degli elementi. Compatibilmente con il rispetto delle precedenti finalità, è opportuno che i solai con struttura in legno siano il più possibile conservati, anche in considerazione del loro ridotto peso proprio.

Un irrigidimento dei solai, nel caso dei solai lignei, può essere conseguito operando all'estradosso sul tavolato. Una possibilità è fissare un secondo tavolato su quello esistente, disposto con andamento ortogonale o inclinato, ponendo particolare attenzione ai collegamenti con i muri laterali; in alternativa, o in aggiunta, si possono usare rinforzi con bandelle metalliche, o di materiali compositi, fissate al tavolato con andamento incrociato. Un analogo beneficio può essere conseguito attraverso un controventamento realizzato con tiranti metallici. Nel caso di solai a semplice orditura, dovrà essere curato il collegamento con le pareti parallele alle travi, realizzandolo, ad esempio, con bandelle fissate al tavolato ed ancorate nella muratura.

Nei casi in cui risulti necessario un consolidamento statico del solaio per le azioni flessionali, è possibile, con le tecniche legno-legno, limitare la deformabilità flessionale ed aumentare la resistenza con un secondo tavolato, utilizzando, ortogonalmente rispetto al tavolato esistente, dei nuovi tavoloni continui, resi collaboranti alle travi mediante perni anche di legno.

Nel caso di solai a travi in legno e pannelle di cotto, se viene dimostrata l'insufficiente resistenza nel piano, possono essere adottati interventi di irrigidimento all'estradosso con sottili caldane armate in calcestruzzo alleggerito, opportunamente collegate alle murature perimetrali ed alle travi in legno.

Nel caso di solai a struttura metallica con interposti elementi in laterizio (putrelle e voltine o tavelloni), può essere necessario collegare tra loro i profili saldando bandelle metalliche trasversali, poste all'intradosso o all'estradosso.

Fattori condizionanti la scelta della tipologia di consolidamento:

- Caratteristiche tipologiche degli elementi strutturali
- Geometria degli elementi strutturali
- Rilevanti carichi di esercizio
- Esigenza di incrementare la resistenza delle orditure lignee
- Necessità di diminuire la deformabilità del solaio
- Mantenimento di tutti gli elementi lignei
- Compatibilità dei materiali per il rinforzo con quelli esistenti

### ***1.3.4 Interventi sulle strutture murarie verticali***

Il materiale “muratura” presenta una resistenza a trazione (e taglio) decisamente scarsa; di questo ne sono sempre stati consapevoli i costruttori ed i progettisti del passato, che infatti hanno sviluppato concezioni strutturali che si basano e sfruttano al meglio la sola resistenza a compressione nei pilastri, negli archi, nelle volte, negli archi di scarico inseriti nella pareti, ecc..

Le tecniche costruttive hanno sempre tenuto anche conto dell'anisotropia delle murature in mattoni o in blocchi squadrati ben apparecchiati: la maggior resistenza a trazione in direzione parallela ai ricorsi di mattoni e, viceversa, la maggior resistenza a compressione in direzione ortogonale ai medesimi ricorsi di mattoni.

Per migliorare la resistenza a trazione sono spesso state impiegate, nei decenni passati, delle iniezioni armate con elementi metallici o sintetici. Le iniezioni armate comunque devono oggi rappresentare un intervento eccezionale, limitato a zone particolari (come talune giunzioni tra pareti) ed attentamente verificate come compatibilità sia per quanto riguarda il carattere storico dell'opera, sia per le alterazioni che la nuova rigidezza composta nel contesto strutturale.

In caso di azioni sismiche, può essere (ed in genere è) comunque necessario un “miglioramento” delle caratteristiche meccaniche intrinseche del materiale muratura.

È possibile migliorare il materiale “muratura” migliorando le caratteristiche meccaniche della malta per mezzo di iniezioni con malte idrauliche compatibili con quelle originarie (“rigenerazione della compagine muraria”).

Le malte da iniezione devono essere antiritiro e con densità / fluidità funzione della muratura da iniettare: malte più dense (“boiacche”), nel caso di muratura con molti vuoti al loro interno per assenza o perdita della malta originaria; malte superfluide dove bisogna penetrare in piccole fratture e dove bisogna “rigenerare” una vecchia malta ancora in situ ma degradata e senza più capacità legante. In questo caso la malta superfluida deve essere in grado di infiltrarsi nelle porosità della malta degradata, imbibendola.

Le malte più compatibili con le malte storiche sono in genere le malte a base pozzolanica, mentre devono essere escluse quelle a base di cemento (malte di cemento tipo portland).

Una buona qualità della compagine muraria è necessaria per garantire l'efficacia degli interventi di incatenamento e di controventamento, in relazione alla corretta funzionalità degli ancoraggi. Ne consegue quindi che in genere la rigenerazione muraria è propedeutica a tutti gli altri interventi, sia quelli inerenti il comportamento globale che quelli riguardanti i rinforzi locali.

### Pareti e pilastri

Il metodo tradizionale per incrementare la capacità portante dei pilastri, oltre ad una eventuale rigenerazione delle malte mediante iniezioni, consiste in cerchiature circonferenziali atte a contrastare l'espansione laterale; un'alternativa meno efficace consiste nell'utilizzare cerchiature radiali realizzate mediante iniezioni armate (l'efficacia del contrasto laterale si perde alle estremità delle barre, avvenendo la trasmissione degli sforzi per aderenza). Il beneficio della staffatura è in ogni caso maggiore se le staffe vengono pretese.

In caso di azione sismica gli elementi che giocano il ruolo principale sono le pareti, mentre i pilastri in muratura, nei quali si generano facilmente delle cerniere plastiche alle due estremità trasformandoli in "pendoli" verticali, non sono in grado di fornire contributi sostanziali nel contrasto alle azioni orizzontali.

Quando in una parete sono presenti dei danni, gli interventi possono essere suggeriti dai danni stessi ed in particolare dal quadro fessurativo. Viceversa, se il progetto ha lo scopo di prevenire il danneggiamento, è necessaria una analisi preliminare per individuare, all'interno di una parete, quale tra il meccanismo resistente di tipo "flessionale" e quello di tipo "taglio" sia il più debole, tenendo conto che in taluni casi occorre rinforzare entrambe i meccanismi.

Come accennato, sono le pareti a dover resistere alle azioni sismiche ed in particolare devono essere in grado di contrastare la componente dell'azione sismica che agisce parallelamente al loro piano principale (mentre la componente ortogonale ad una data parete deve essere assorbita dalle pareti ad essa ortogonali). Il miglioramento del comportamento strutturale e sismico di una singola parete può essere quindi tarato e gradualmente incrementato secondo la seguente gerarchia di interventi:

- a) assicurare la solidità della parete a livello di materiale (iniezioni per la rigenerazione delle malte, se necessario) e dell'insieme, cercando di eliminare zone di debolezza dovute a modifiche e manomissioni del passato (nicchie, tracce per impianti, vani) evitando al contempo, di indebolire la struttura con nuovi carotaggi e fori, nell'attuare gli interventi descritti nei punti successivi: se bisogna realizzare un incatenamento parallelamente al piano principale di una parete è bene non disporre una sola catena in asse alla parete stessa (previo relativo carotaggio), ma sdoppiare l'intervento in due catene di sezione equivalente (e quindi di diametro inferiore), disposte esternamente ed in aderenza sulle due facce della parete medesima; anche gli alloggiamenti delle teste delle travi dei solai, specialmente quelle di legno, rappresentano punti di debolezza che devono essere accuratamente verificati e consolidati, nonché, se necessario, richiusi realizzando l'appoggio delle travi su mensole o su correnti (in legno o acciaio) posti in aderenza e fissati nel modo meno invasivo;

- b) migliorare il comportamento "flessionale e a taglio" dei pannelli orizzontali a livello dei solai ("fasce di piano"); occorre infatti tener conto che per migliorare il comportamento strutturale di una parete per azioni orizzontali agenti parallelamente al proprio piano principale è sempre bene passare da un meccanismo resistente d'insieme di tipo flessionale a un meccanismo di tipo taglio; questo si ottiene incrementando la rigidezza flessionale delle fasce di piano; negli anni ottanta sono stati impiegati a questo scopo cordoli di piano in cemento armato, che però sono incompatibili con il valore storico degli edifici in muratura, sono spesso chimicamente incompatibili con le malte storiche e si sono spesso rivelati poco efficaci, per non dire dannosi. Incatenamenti orizzontali pretesi possono sostituire i cordoli in c.a. e possono essere realizzati con barre in acciaio, profili in acciaio o correnti in legno; nel caso dei profili in acciaio e dei correnti in legno vanno previsti degli ancoraggi pretesi alle estremità e poi degli ancoraggi alla muratura in più punti lungo tutta la loro lunghezza;
- c) migliorare il comportamento a "taglio" rinforzando i pannelli di muratura compresi tra le porte e le finestre di un medesimo piano (i "maschi murari"): quando non è sufficiente passare dal meccanismo resistente d'insieme di tipo flessionale a quello di tipo taglio, oltre ad eventualmente rinforzare a flessione i pannelli verticali più snelli, come visto al punto precedente, diventa necessario rinforzare a taglio i pannelli verticali più tozzi; questo è un lavoro delicato poiché generalmente sono richiesti interventi relativamente invasivi; nel passato, ma anche nei manuali più recenti, è stato impiegato il placcaggio con lastre di c.a. sulle due facce opposte del pannello murario; si tratta di un intervento non molto efficace (soprattutto se non si è anche provveduto alla rigenerazione muraria), non compatibile con edifici di valore storico e comunque non eseguibile nel caso di murature faccia a vista; oggi al posto di lastre in c.a. (peraltro chimicamente non compatibili con le malte storiche) si preferisce un placcaggio con malte pozzolaniche fibrorinforzate e armate con reti in fibra aramidica o pvc, disponendo anche, se necessario, strisce di rete di rinforzo lungo le diagonali di ciascun pannello murario; l'intervento è reso più efficace collegando i placcaggi sulle due facce del pannello mediante staffe trasversali, sempre in fibra sintetica, per conferire anche un adeguato confinamento trasversale; in questo tipo d'intervento il miglioramento deriva dal confinamento della muratura, più che da un incremento della sezione resistente;
- d) migliorare il comportamento flessionale della parete: se l'incremento di capacità portante ottenuto passando dal meccanismo resistente d'insieme di tipo flessionale a quello di tipo taglio non è sufficiente, può essere necessario anche migliorare il comportamento flessionale dell'intera parete e/o dei singoli pannelli verticali; si tratta in questo caso di andare a contrastare moti di ribaltamento (nel piano della parete) e a questo fine diventa quindi necessario eliminare le trazioni verticali; a tal fine possono essere previsti cavi o barre verticali, eventualmente pretesi, posti alle estremità delle pareti di ciascuna parete;
- e) migliorare la possibilità di sviluppo di un "effetto arco", interno allo spessore della parete, nel caso di azioni orizzontali ortogonali alla parete medesima; le zone più deboli sono quelle prossime agli angoli o nei piani superiori, dove il contrasto alla

spinta fornita dall'effetto arco può essere insufficiente, rispettivamente in direzione orizzontale o in direzione verticale; può quindi essere necessario l'inserimento di incatenamenti a loro volta rispettivamente in direzione orizzontale o verticale.

L'azione sismica non comporta normalmente problemi alla capacità portante dei solai (se non sono degradati e/o insufficienti per altre ragioni), data l'amplificazione generalmente ridotta delle componenti verticali del moto del terreno, mentre le forze orizzontali coinvolgono queste strutture nel loro piano principale, dove possiedono una maggiore rigidezza e resistenza. Ad ogni modo è importante evitare che movimenti relativi tra le pareti portino ad uno sfilamento dagli appoggi di travi e travetti. È quindi fondamentale collegare travi e travetti alle pareti, mediante ancoraggi in acciaio o in fibra sintetica.

### ***1.3.5 Interventi in copertura***

Per le coperture valgono considerazioni analoghe a quelle dei solai, tenendo conto delle spinte che alcune tipologie di tetti a falda possono esercitare sulle pareti. L'inserimento di cordoli in muratura armata o in legno, sul colmo della muratura, è un intervento strutturalmente valido, per il comportamento strutturale d'insieme, ma occorre caso per caso valutarne la fattibilità in relazione alle caratteristiche architettoniche dell'opera.

Il rinforzo dei tetti spingenti richiede in genere l'inserimento di catene trasversali, disposte alla quota d'imposta del tetto; alla stessa quota possono essere disposti controventi orizzontali sempre realizzati con tiranti in acciaio, per il miglioramento del comportamento scatolare d'insieme. Anche le falde dei tetti possono essere irrigidite nel loro piano con la stessa metodologia vista per i solai in legno.

È in linea generale opportuno il mantenimento dei tetti in legno, per evitare incrementi alle masse poste in sommità dell'edificio (come invece succede inserendo coperture in latero - cemento) ed al contempo evitare l'inserimento di elementi (come i cordoli in c.a. di contorno ai medesimi tetti in latero cemento) eccessivamente rigidi rispetto alla compagine muraria sottostante.

In generale, vanno il più possibile sviluppati i collegamenti e le connessioni reciproche tra la parte terminale della muratura e le orditure e gli impalcati del tetto, ricercando le configurazioni e le tecniche compatibili con le diverse culture costruttive locali. Oltre al collegamento con capochiave metallico, che impedisce la traslazione, si possono realizzare cordoli-tirante in legno o in metallo opportunamente connessi sia alle murature sia alle orditure in legno del tetto (cuffie metalliche), a formare al tempo stesso un elemento di connessione sul bordo superiore delle murature ed un elemento di ripartizione dei carichi concentrati delle orditure del tetto. Vanno in generale evitati i cordoli in cemento armato, per la diversa rigidezza che essi introducono nel sistema strutturale, per la conseguente modifica nella distribuzione delle masse e per l'invasività dal punto di vista storico architettonico ed l'incompatibilità chimica spesso presente.

Ove i tetti presentino orditure spingenti, come nel caso di puntoni inclinati privi di semicatene in piano, la spinta deve essere compensata andando a posizionare le catene "mancanti".



Nel caso delle capriate, deve essere presente un buon collegamento nei nodi, necessario ad evitare scorrimenti e distacchi in presenza di azioni orizzontali: oltre a verificare le zone d'appoggio è opportuno prevedere dispositivi di appoggio/ancoraggio alla muratura sottostante.

### ***1.3.6 Interventi su elementi non strutturali***

In una costruzione vi sono diversi elementi, così detti secondari dal punto di vista strutturale, quali i comignoli, i cornicioni, le gronde, le lastre di rivestimento delle facciate e così via, che però sono comunque importanti per l'incolumità delle persone.

In particolare le lastre di rivestimento si possono staccare con una certa facilità dalle pareti in muratura dissestata, anche in relazione all'invecchiamento delle malte ed all'ossidazione delle staffe o grappe di collegamento.

Gli interventi, ed in particolare in zona sismica, consistono essenzialmente nel ristabilire un collegamento efficace utilizzando tecniche appropriate, come l'inserimento di chiodi, di grappe, di staffe, ecc.; queste possono essere integrate, ed in alcuni casi anche sostituite, da malte o colle speciali.

### ***1.3.7 Interventi in fondazione***

L'inadeguatezza delle fondazioni è molto raramente la sola o la principale causa dei danni osservati dopo un terremoto. E' possibile omettere gli interventi sulle strutture di fondazione, nonché le relative verifiche, qualora si riscontrino le seguenti condizioni:

- non siano presenti significativi dissesti attribuibili a cedimenti in fondazione e sia stato accertato che dissesti di questa natura non si siano verificati neppure in passato;
- gli interventi progettati sulla struttura in elevazione non comportino sostanziali alterazioni dello schema statico del fabbricato;
- gli stessi interventi non comportino rilevanti modifiche delle sollecitazioni trasmesse alle fondazioni;
- siano esclusi fenomeni di ribaltamento della costruzione per effetto delle azioni sismiche.

Nei casi in cui le indagini e le analisi mettano in evidenza la necessità di un intervento in fondazione, l'intervento stesso dovrà mirare alla massima uniformità delle condizioni di appoggio al fine di ottenere una distribuzione il più possibile uniforme delle pressioni di contatto. A tal fine, in generale sono da privilegiare interventi di ampliamento della base fondale con sottomurazione, rispetto al ricorso a pali di piccolo diametro o ad altre tecniche di consolidamento localizzato del terreno quali trattamenti colonnari con jet grouting o deep mixing.

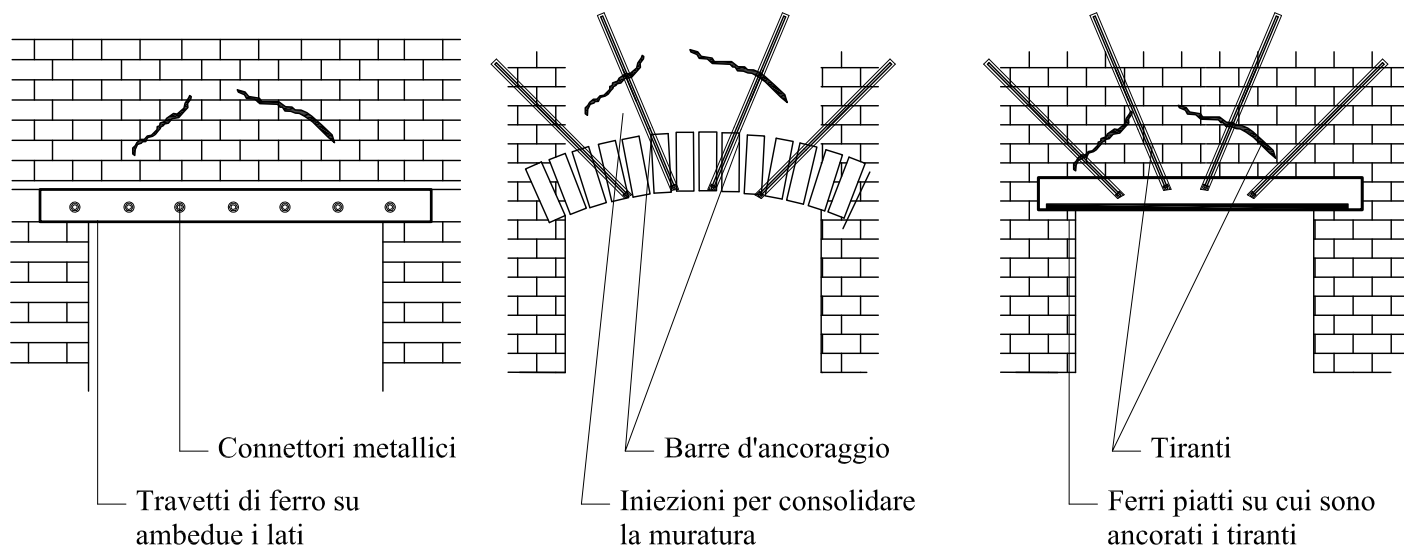
Nelle situazioni in cui si ritiene possibile l'attivazione sismica di fenomeni d'instabilità del pendio, il problema deve essere affrontato agendo sul terreno e non a livello delle strutture di fondazione.

OBIETTIVO		ELEMENTO STRUTTURALE	INTERVENTI	CODICE
INTERVENTO PER MIGLIORARE IL COMPORTAMENTO SCATOLARE	Connessioni tra elementi strutturali	Pilastro Setto Capriata	Inserimento di tiranti o catene	MCT_01
			⇒ Cerchiature esterne	
			Cordoli in sommità in muratura armata	MCM_01-02
			Connessione dei solai di piano e delle coperture	MCM_01-02
			⇒ Speroni,puntelli	
			⇒ Speroni, catene, barre, tiranti	MCT_01
			⇒ Rinforzi, scarpe	
	Interventi volti a ridurre le spinte di archi e volte ed al loro consolidamento	Arco, volte, cupole Architrave	⇒ Catene, contrafforti controvolte, placcaggio e frenelli	MCV_01-08
			⇒ Incatenamenti locali - barre di ancoraggio	MAC_01
	Interventi volti a ridurre l’eccessiva deformabilità dei solai ed al loro consolidamento	Solaio	⇒ Irrigidimento dei solai	MSI_01-03
Solai a struttura metallica				
INTERVENTI DI RINFORZO DEI ELEMENTI MURARI	Interventi volti ad incrementare la resistenza degli elementi murari	Pilastro	Iniezioni di miscele leganti	
			⇒ Barre, cavi o tiranti pretesi*	
			Staffe	
		Trave	⇒ Tiranti	
			⇒ Staffe, bulloni	
			Iniezioni o riparazioni *	RTI_01-02
		Setto	⇒ Tiranti	MCT_01
			Cordoli armati, controventi	
		Arco, volte	⇒ Catene e tiranti	REC_01-04
			Iniezioni, riparazioni	RTI_01-02
		Cupola	⇒ Catene, frenelli	
			Iniezioni, riparazioni	
		Capriata	Tiranti, cerchiature,cavi postesi (grappe)	
			⇒ Sostituzione	
			Tiranti e staffe	
			Rompitratta	
	Interventi su elementi non strutturali		⇒ Cornicioni	
			⇒ Parapetti	
			Camini	
	Interventi in fondazione		⇒ Allargamento delle fondazioni	
⇒ Consolidamento dei terreni di fondazione				
⇒ Il collegamento reciproco delle fondazioni isolate				
* interventi da valutare in casi di particolari				

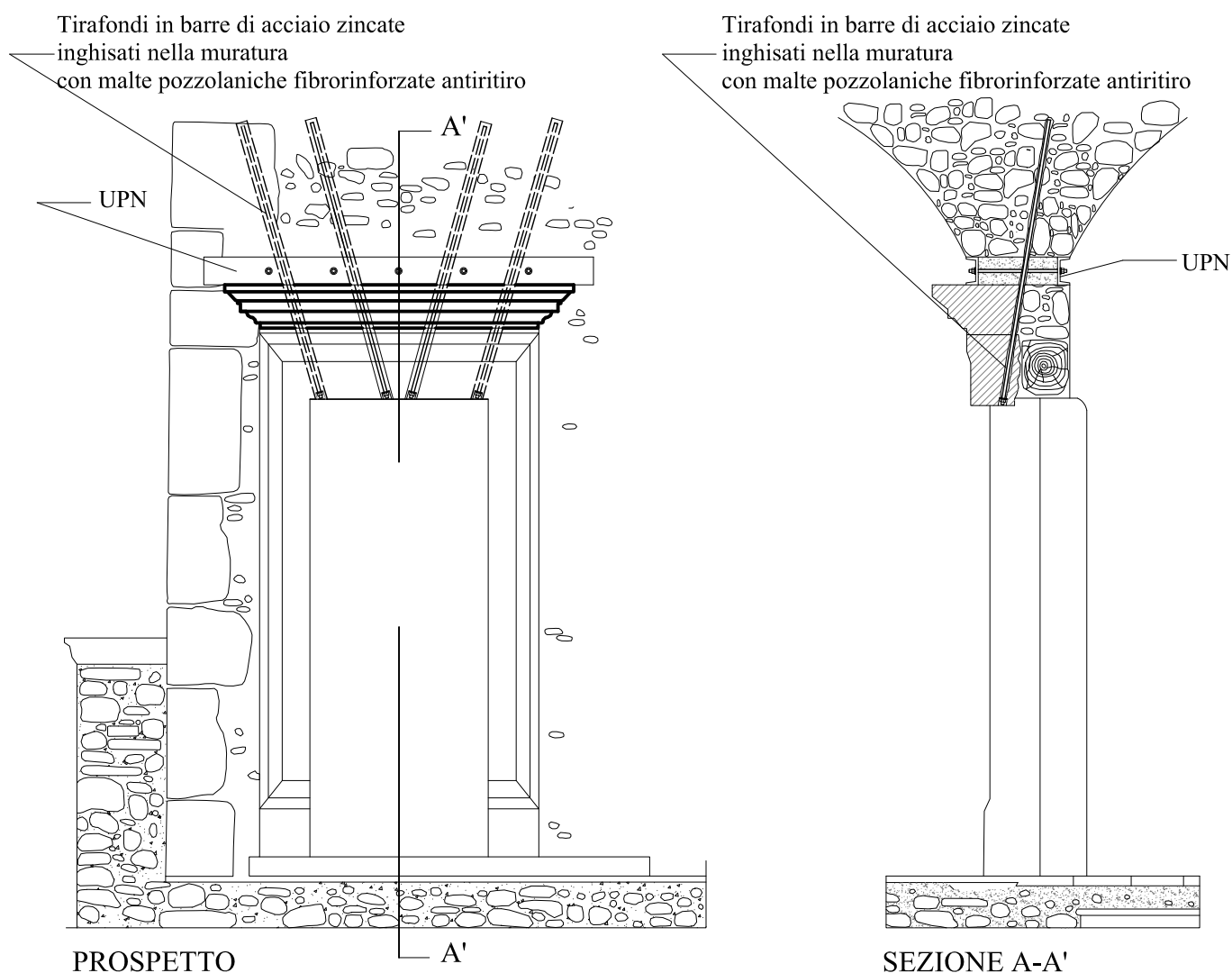
Gli architravi possono essere realizzati con tecnologie e materiali diversi; alcune tipologie sono, ad esempio, architravi in mattoni pieni, architravi in legno, architravi in pietra.

L'intervento di consolidamento e miglioramento sismico varia in funzione della tipologia.

Gli interventi di rinforzo possono consistere nel consolidamento con iniezioni, inserimento di chiodi, ancoraggi, ecc.



## Esempio di consolidamento di architrave in pietra



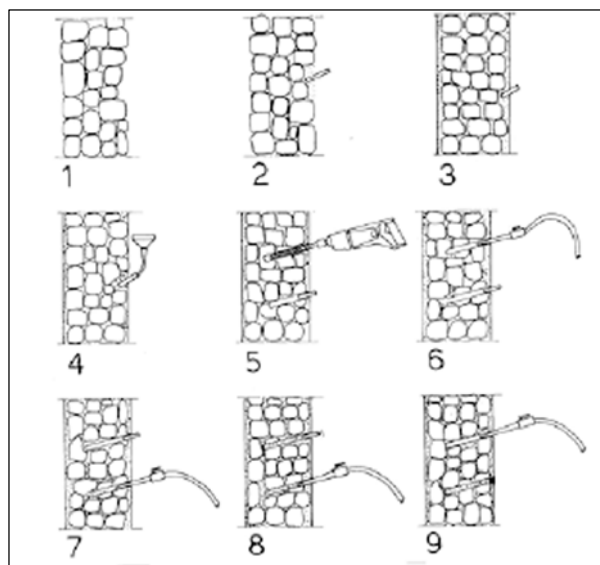
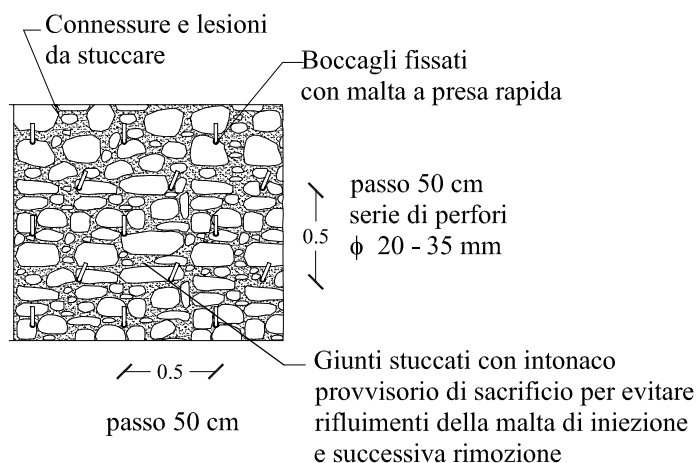
## 1) PREPARAZIONE DELLA PARETE

- Rimozione eventuale intonaco
- Lavaggio della superficie muraria con acqua o con getti di vapore, pulizia meccanica abrasiva, impacchi
- Stilatura dei giunti e delle lesioni

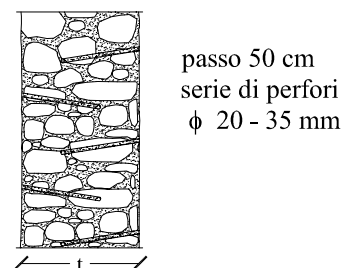
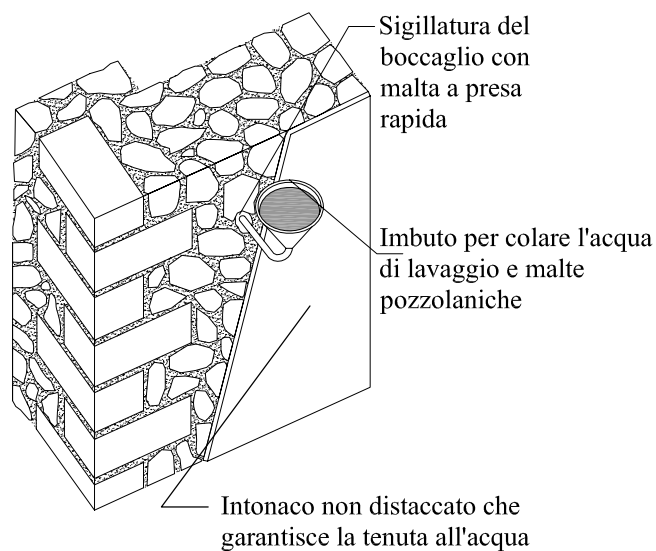
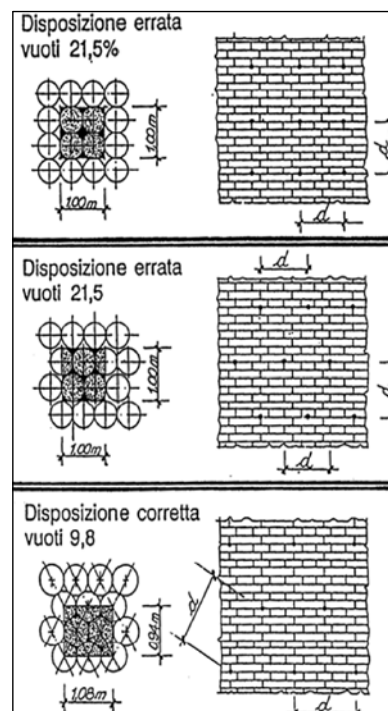
## 3) LAVAGGIO CON ACQUA O ARIA

- Con acqua o aria per rimuovere eventuali impurità
- Con acqua per imbibire la parete ed evitare segregazione della miscela

## 4) INIEZIONE PER GRAVITA' O PRESSIONE

**Fasi dell'intervento con le iniezioni**

## 2) PERFORAZIONE ED INSERIMENTO DI CANULE

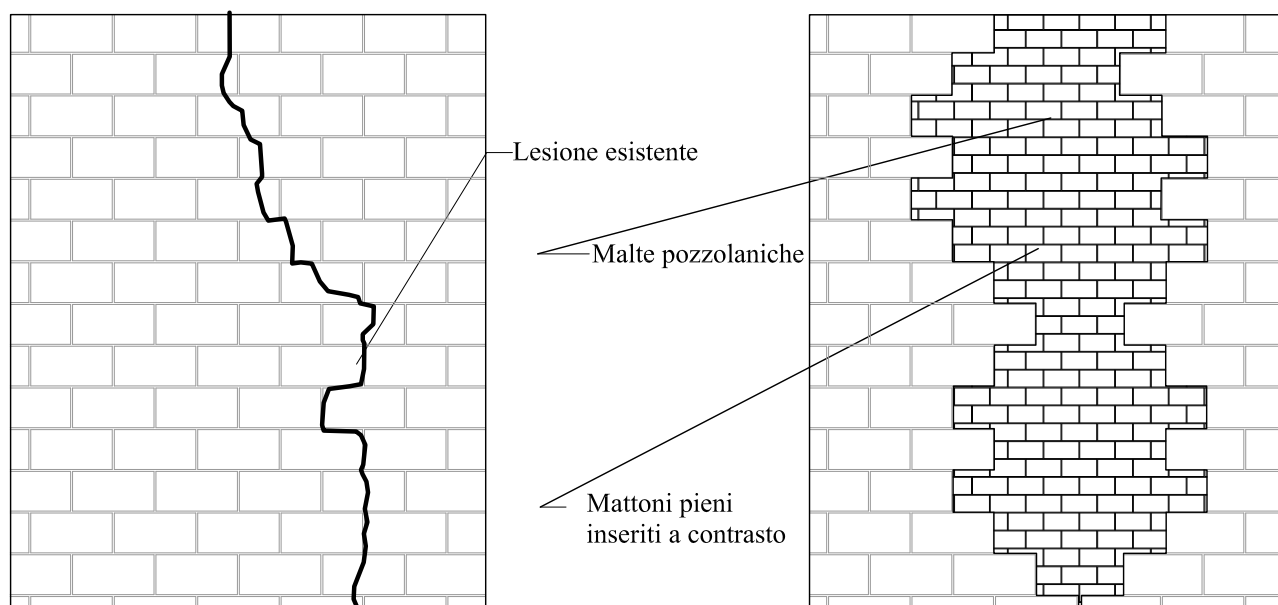
**Schema di iniezioni diffuse**

**Lavorazioni esecutive per intervento di scuci e cuci**

1. Operare la rimozione (scucitura) della parte di muratura (pietrame e/o laterizi) localmente degradata e/o lesionata, ivi compresa la malta di allettamento originaria e tutto quanto possa compromettere le successive lavorazioni, utilizzando mezzi esclusivamente manuali senza l'utilizzo di utensili meccanici.
2. Procedere al lavaggio del paramento murario con utilizzo di acqua spruzzata a bassa pressione.
3. Ricostruzione (cucitura) dei conci murari precedentemente rimossi e sostituzione (sostruzione) degli stessi utilizzando mattoni pieni allettati con malta di caratteristiche fisicomeccaniche simili alla preesistente, realizzata con un legante esente da cemento a base di ecopozzolana e inerti selezionati.

Il legante dovrà essere esente da sali idrosolubili.

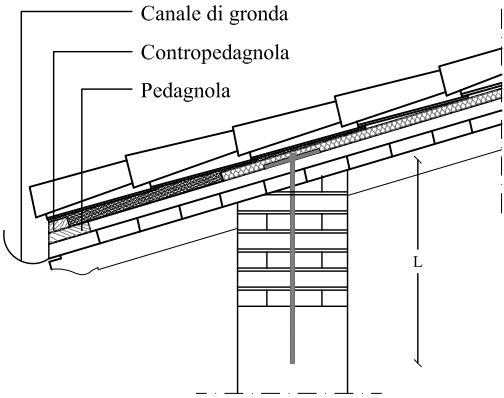
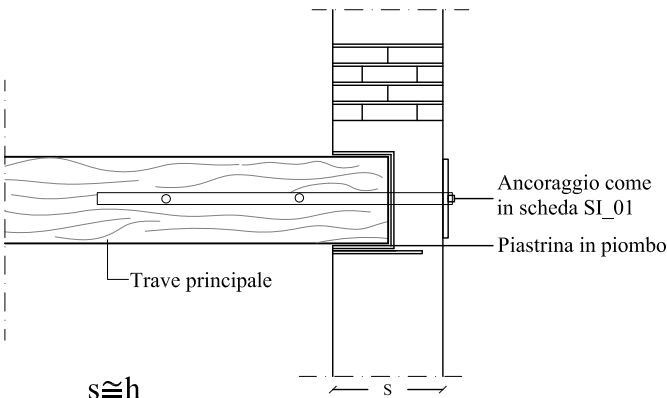
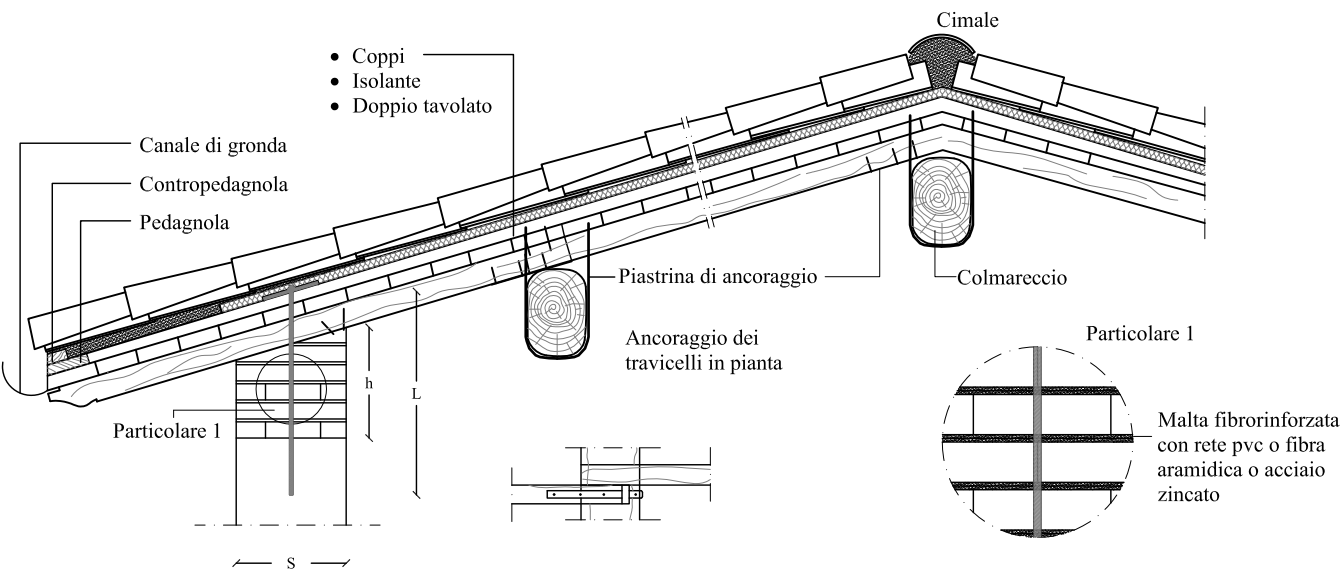
I mattoni pieni saranno ammorsati (da entrambi i lati) alla vecchia muratura, avendo cura di lasciare tra la muratura nuova e la vecchia, lo spazio per l'inserimento forzato di appositi cunei.

**Paramento murario oggetto di intervento di scuci e cuci**

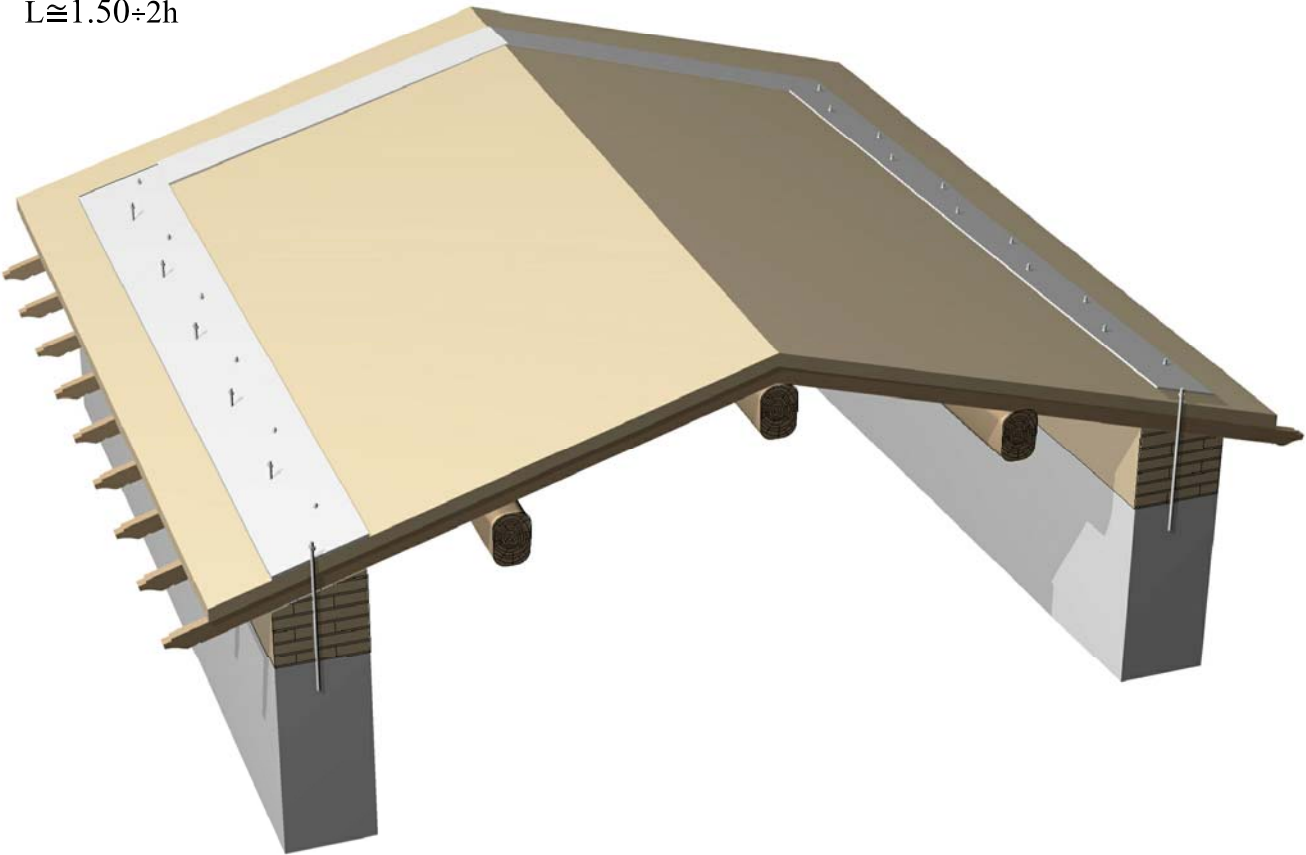
18	20	16	19	17	4 Allineamento
11	14	12	15	13	3 Allineamento
6	9	7	10	8	2 Allineamento
1	4	2	5	3	1 Allineamento

L'intervento di consolidamento sostitutivo locale, "scuci e cuci", consiste in una demolizione locale di parti di tessitura muraria e successiva ricostruzione. E' un intervento basato sulla *sostituzione*, e non sul recupero o sul rafforzamento. Questo metodo e' inoltre parzialmente distruttivo poiche' e' basato sul principio di sostituzione.

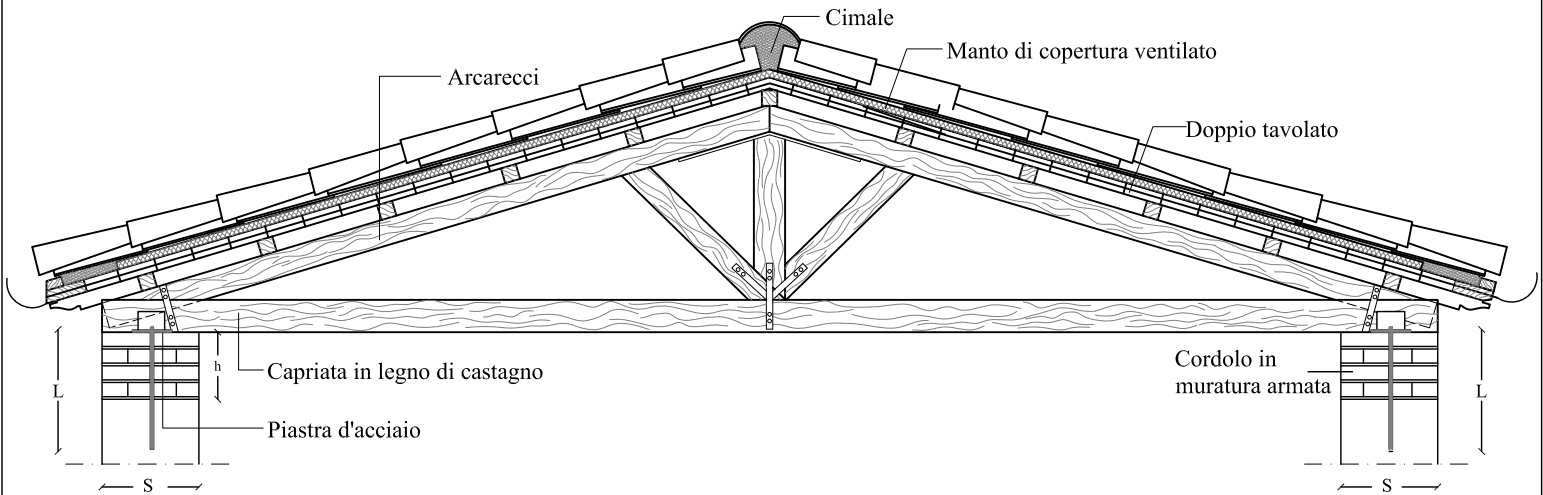
**Suddivisione e sequenza delle zone da sostituire**



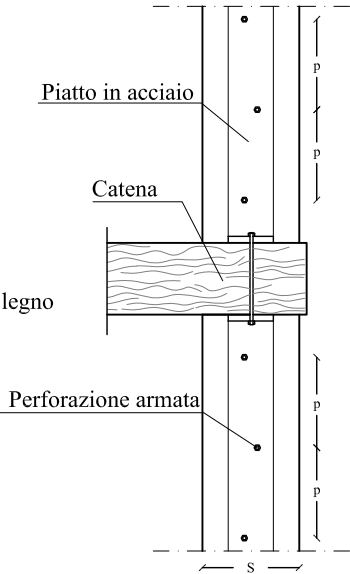
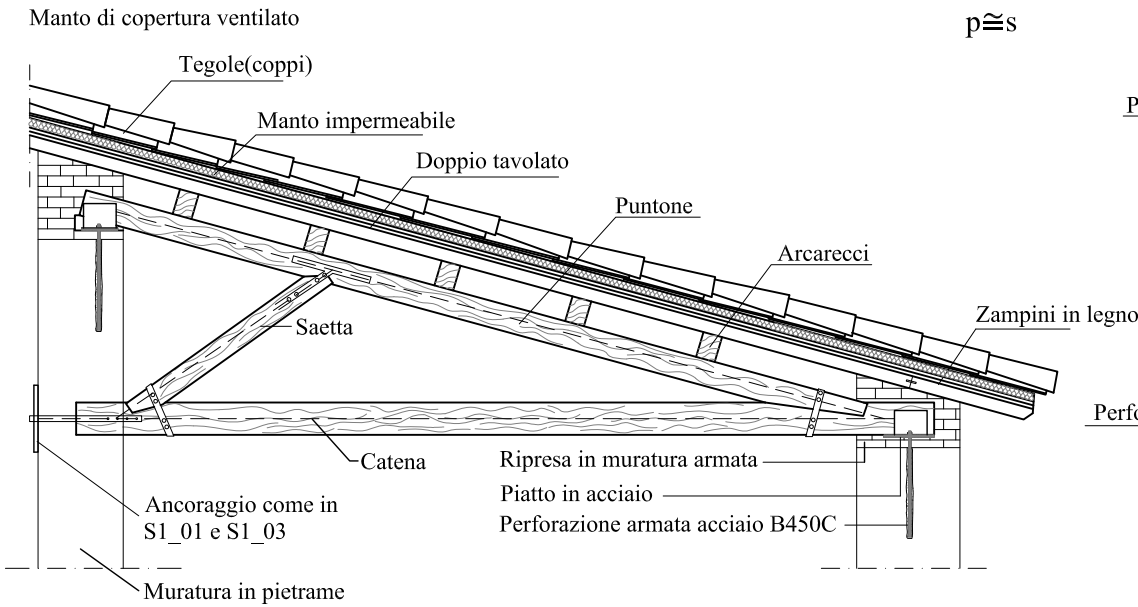
$s \cong h$   
 $L \cong 1.50 \div 2h$





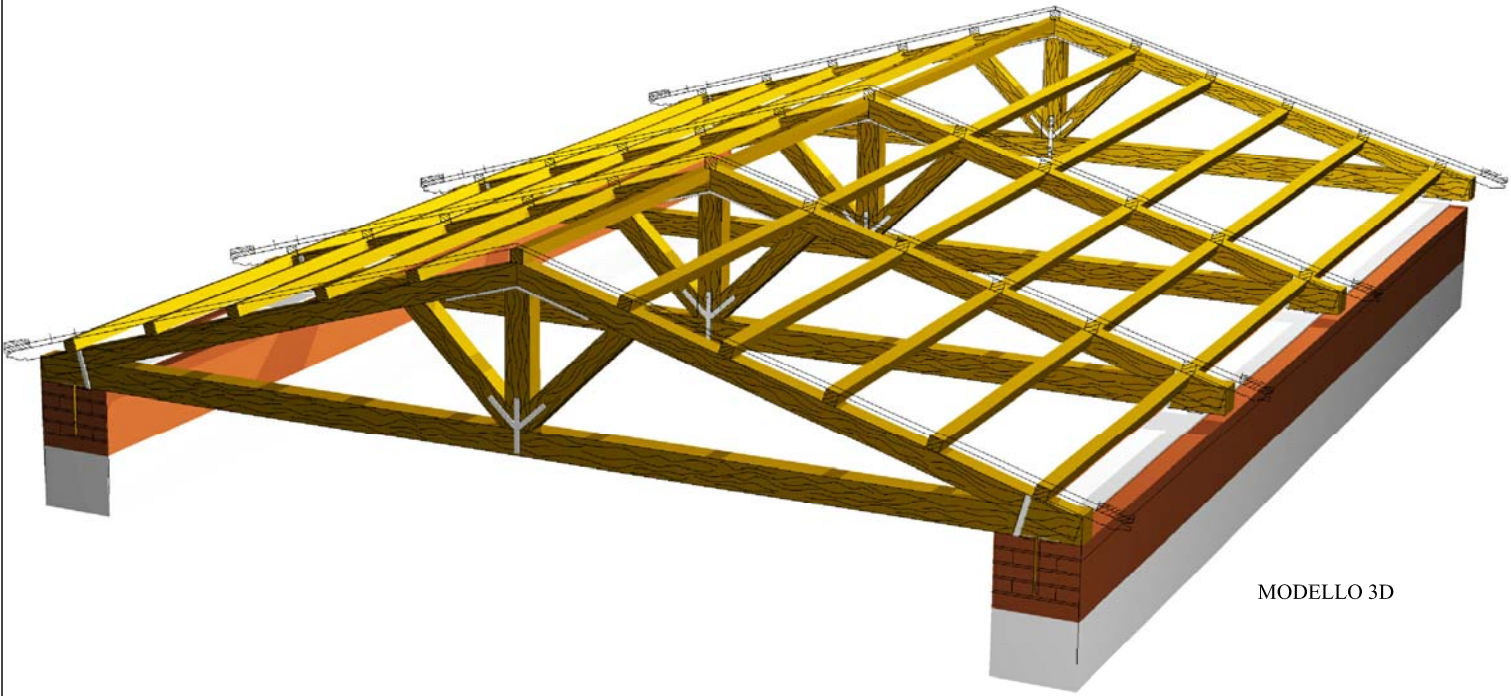


$s \cong h$   
 $L \cong 1.50h$   
 $p \cong s$

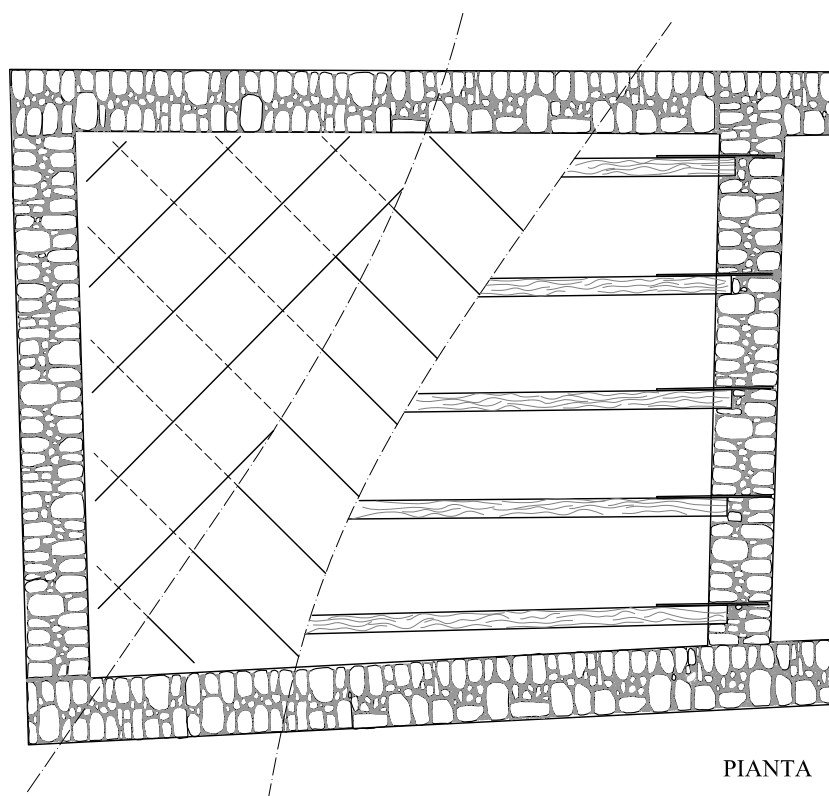


SEZIONE

PIANTA



MODELLO 3D



PIANTA

Questo tipo di ancoraggio si può usare se lo spessore della muratura è tale da poterlo consentire

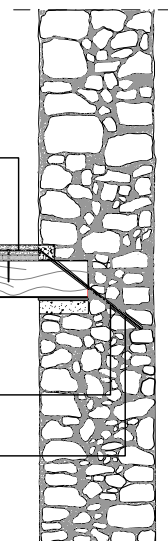
Malta fibrorinforzata con rete pvc o fibra aramidica

Tavolato

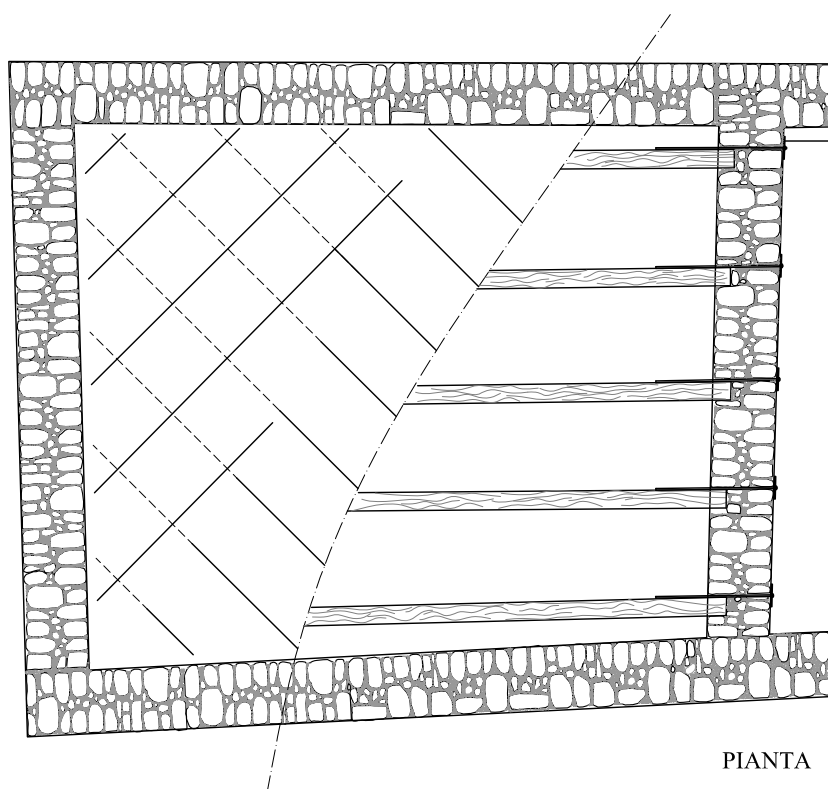
Trave in legno

Ancoraggio con fibra aramidica

Iniezioni di malta pozzolanica fibrorinforzata o di resina



SEZIONE



PIANTA

Ancoraggio singolo alla parete (vedere MSI\_02 per l'ancoraggio doppio)

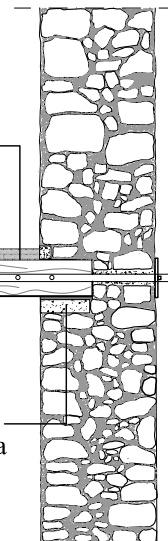
Chiavarda

Doppio tavolato

Trave in legno

Chiavarda

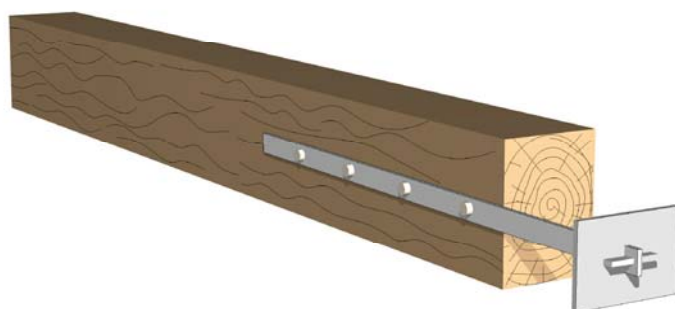
Appoggio con lastra in acciaio (o cuffia in piombo) su letto di malta fibrorinforzata



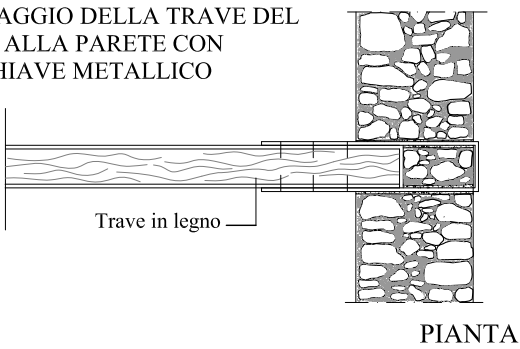
SEZIONE

Tramite l'ancoraggio diffuso della murature si svolge una funzione di distribuzione delle forze orizzontali e di contenimento della parete

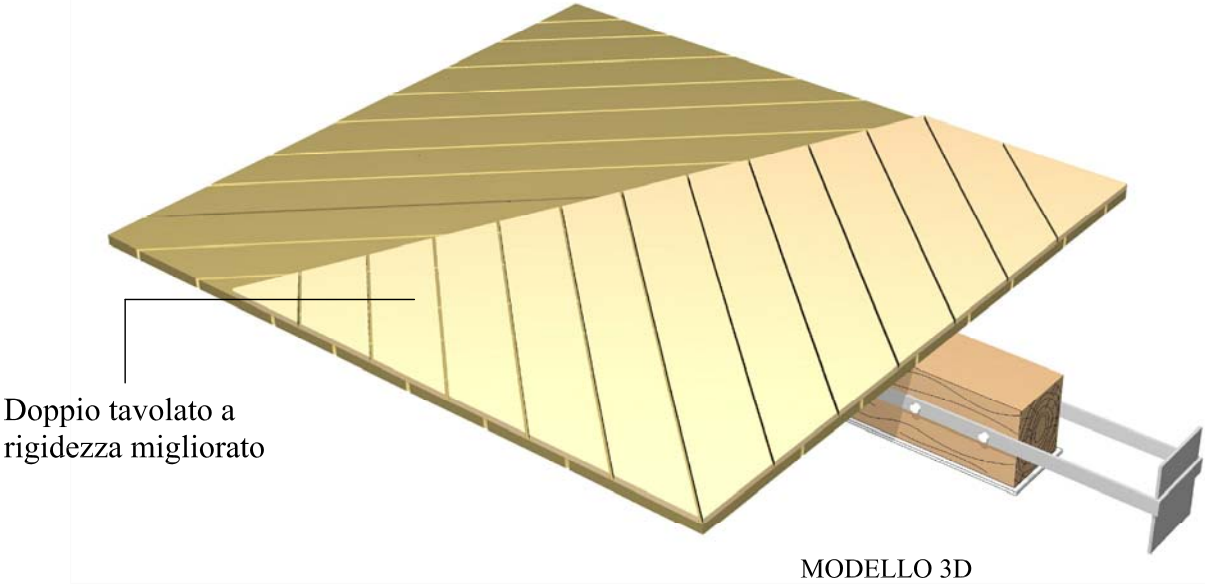
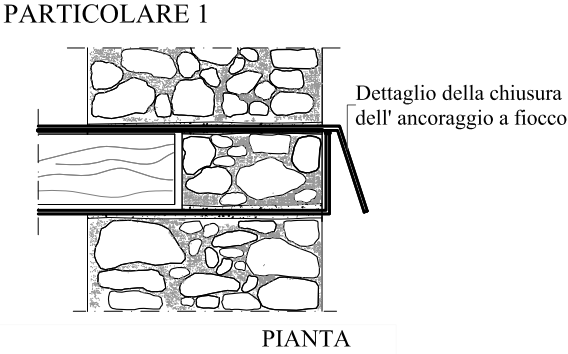
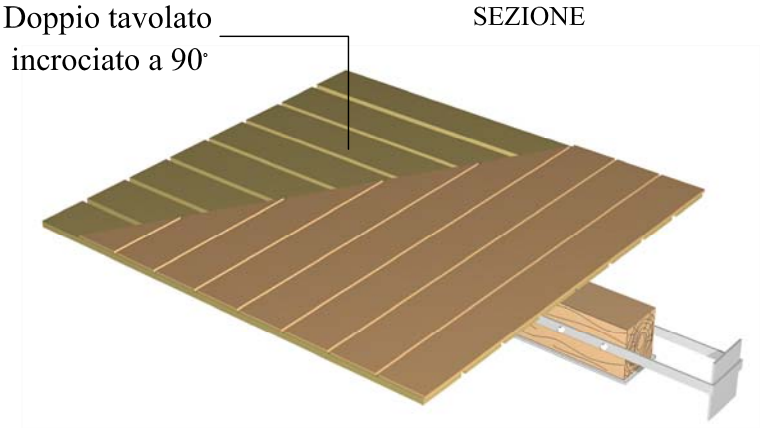
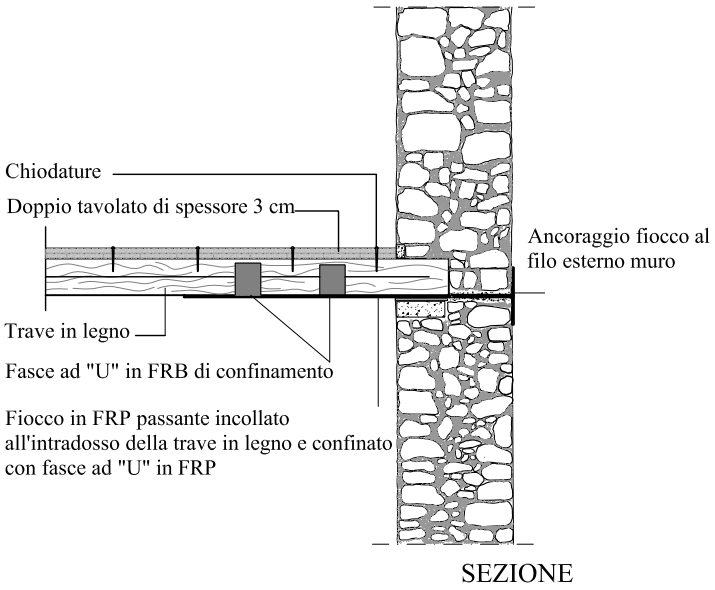
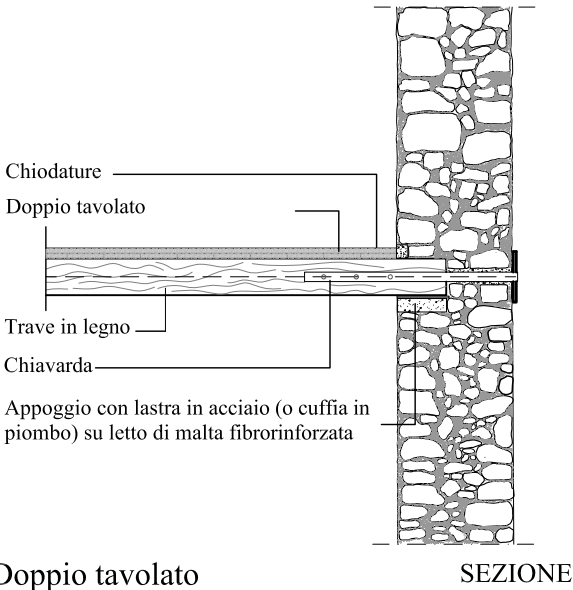
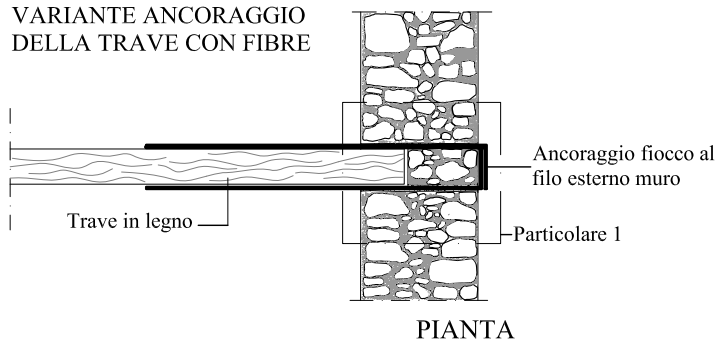
Nota: Vedere MSI\_02 per il caso con l'ancoraggio doppio



ANCORAGGIO DELLA TRAVE DEL SOLAIO ALLA PARETE CON CAPOCHIAVE METALLICO

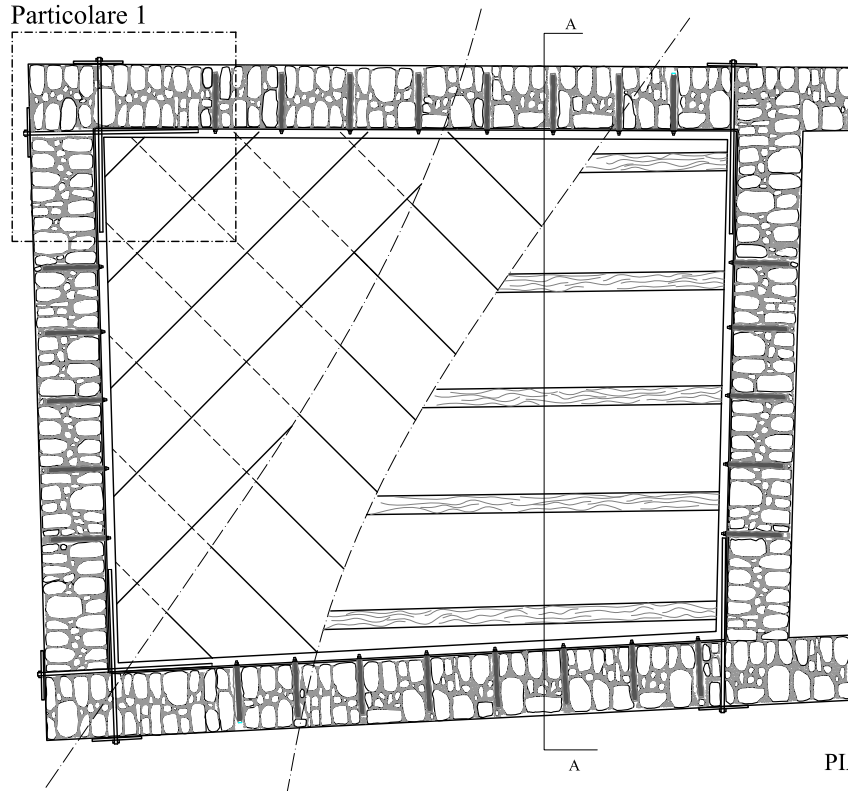


VARIANTE ANCORAGGIO DELLA TRAVE CON FIBRE



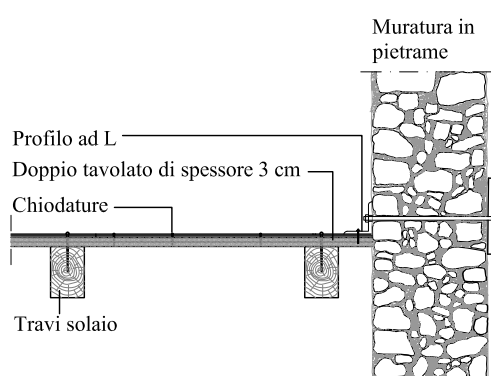


Particolare 1

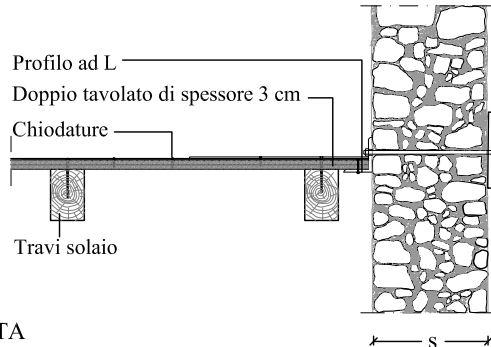


PIANTA

TAVOLATO INFERIORE

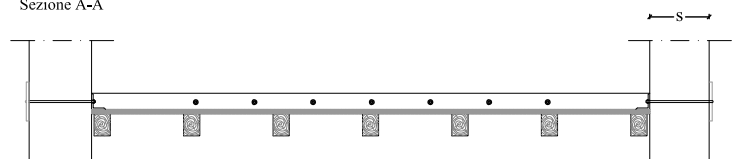


TAVOLATO SUPERIORE



PARTICOLARE SEZIONE

Sezione A-A



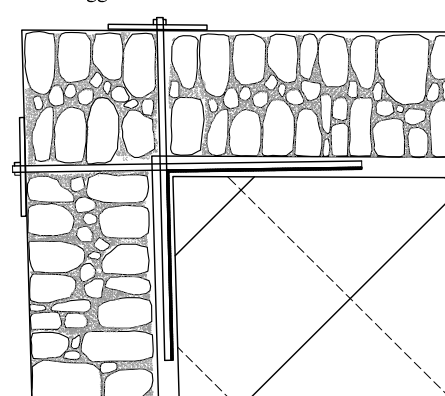
SEZIONE

$$d \cong s$$

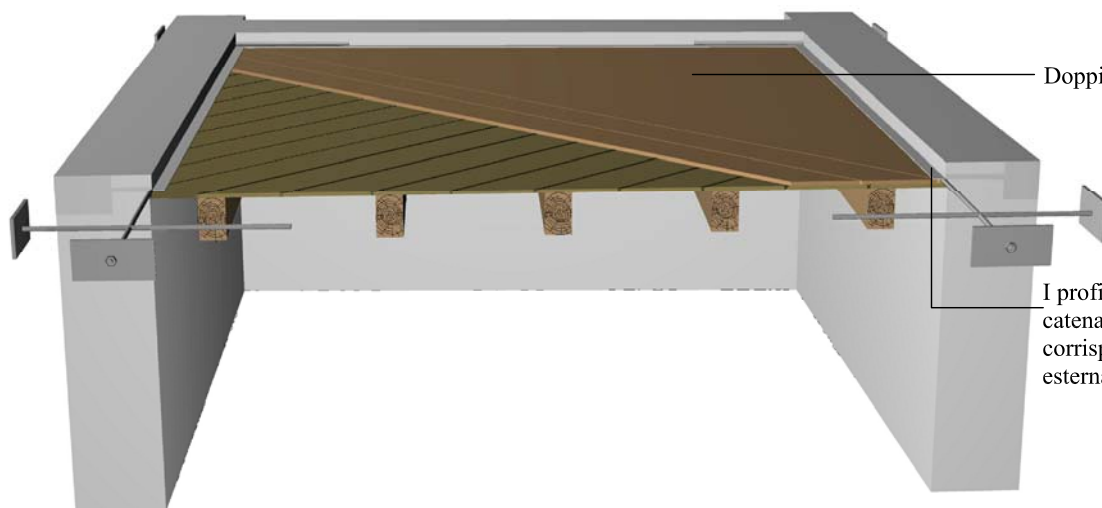
$$0,55 \leq d \leq 1,55$$

Il profilo e' ancorato al muro come mostrato nella scheda CD1 per evitare lo sfilamento delle travi e per svolgere un'azione di distribuzione delle forze orizzontali e di contenimento delle pareti.

PARTICOLARE 1  
Ancoraggio saldato



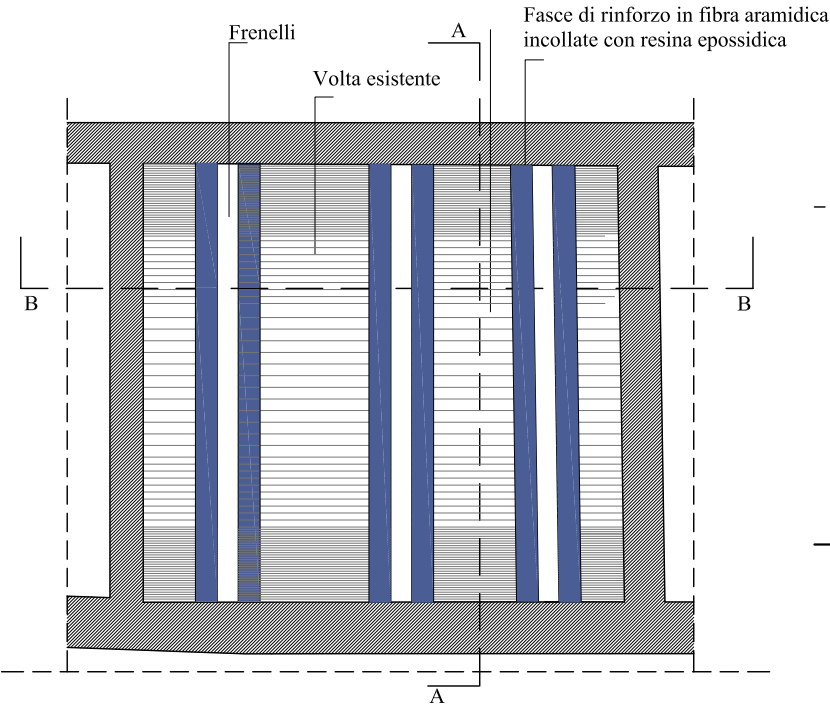
PIANTA



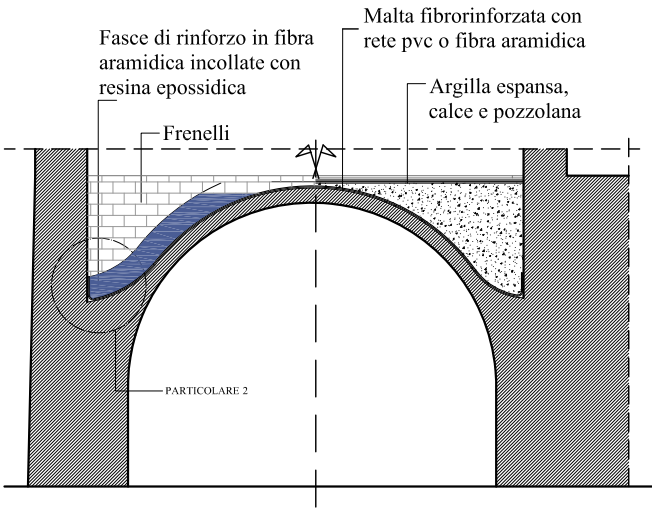
Doppio tavolato a rigidezza migliorato

I profili metallicci hanno anche funzione di catena quindi l'ancoraggio e' passante in corrispondenza degli angoli con capochiave esterna se la parete e' d'ambito

VOLTA A BOTTE CON MURO PASSANTE

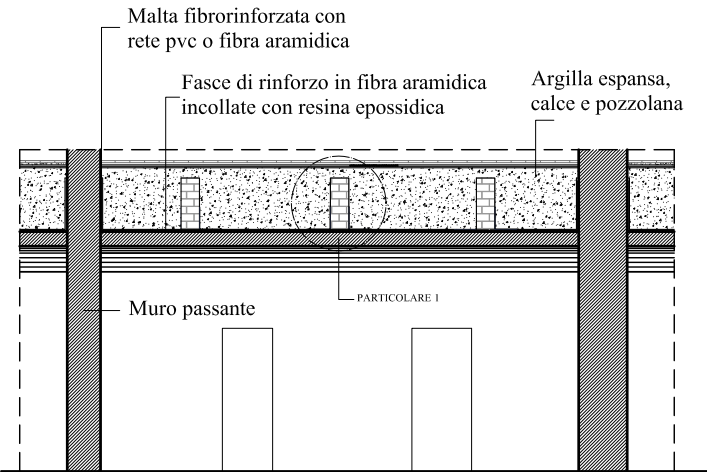


PIANTA

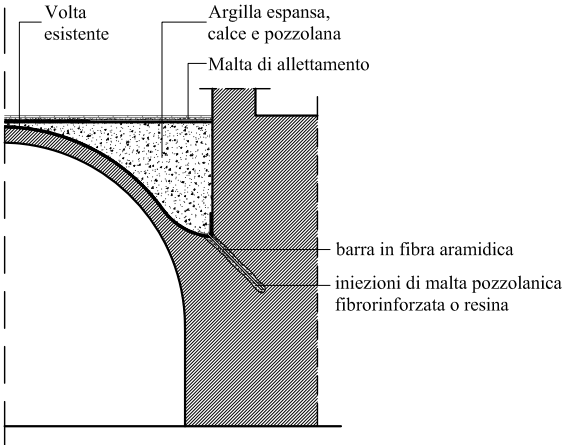


SEZIONE A-A

RINFORZO ESTRADOSSALE CON  
ANCORAGGIO BARRE SFIOCATE

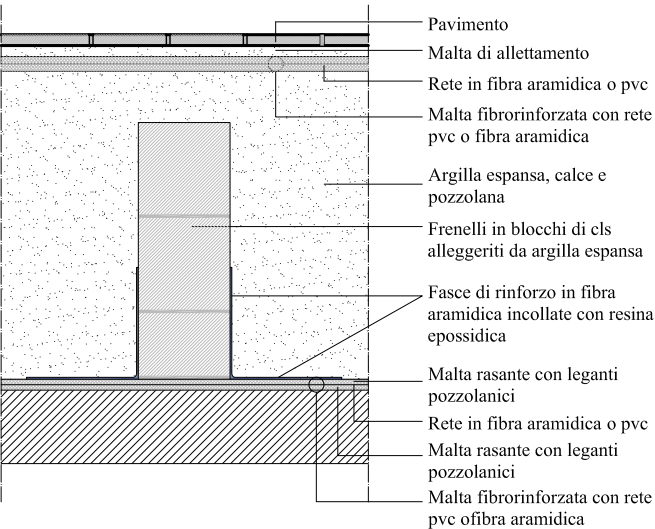


SEZIONE B-B

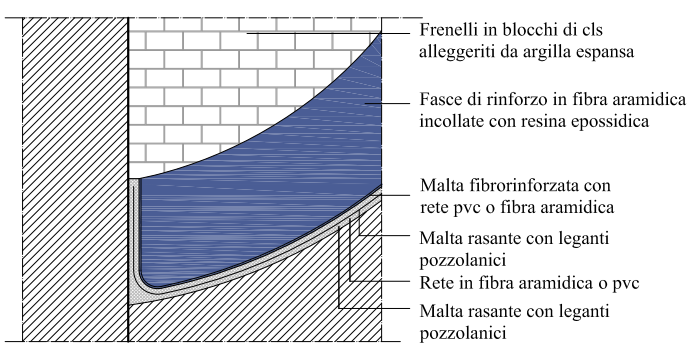


SEZIONE A-A

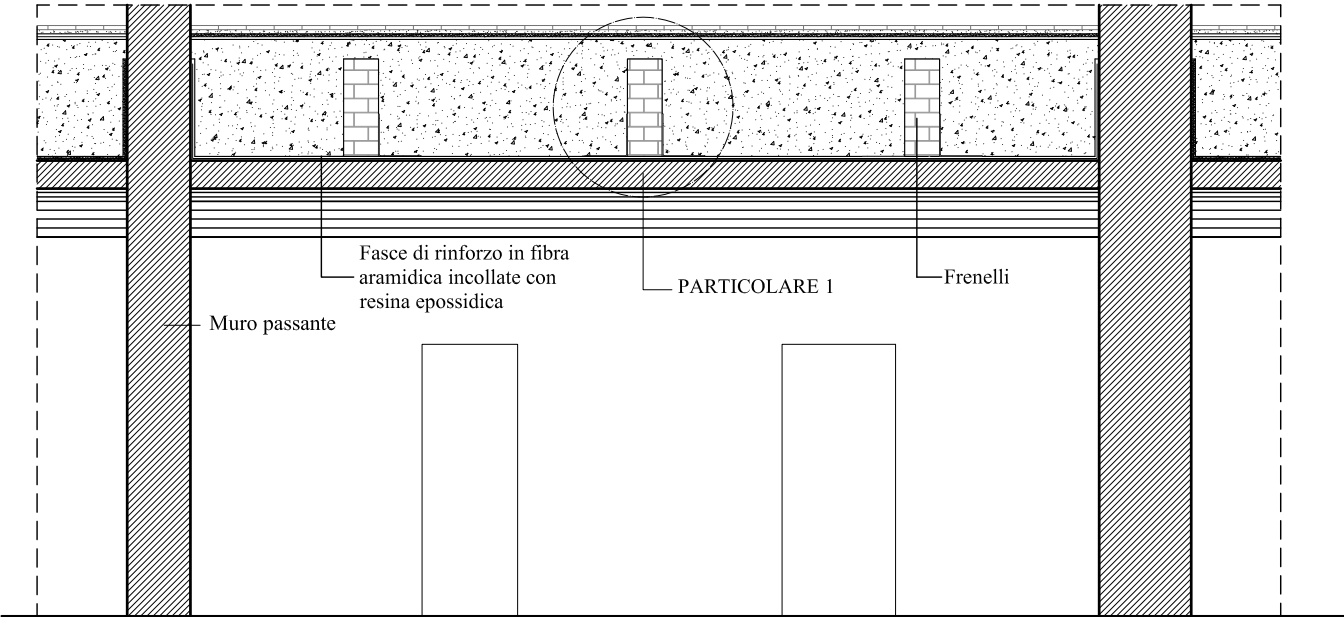
PART. 1



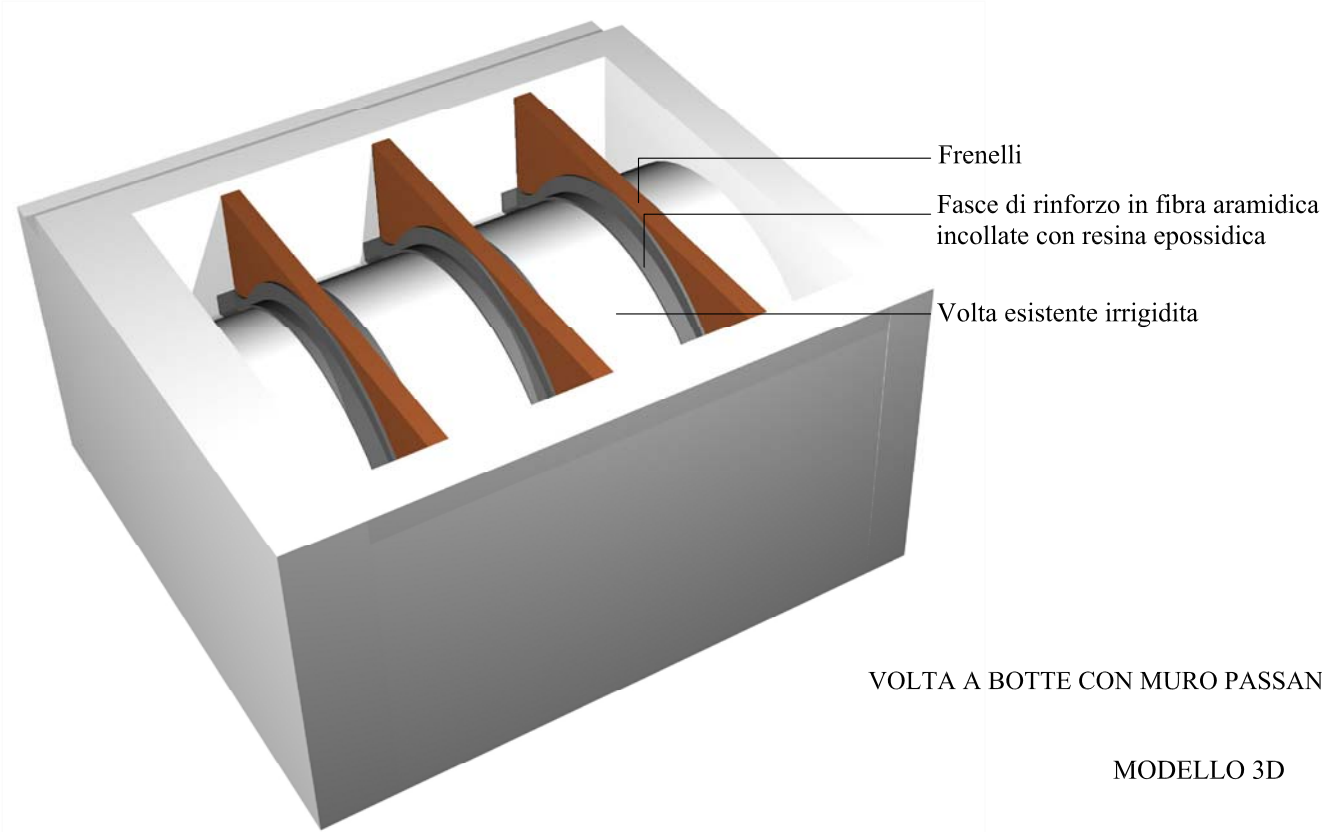
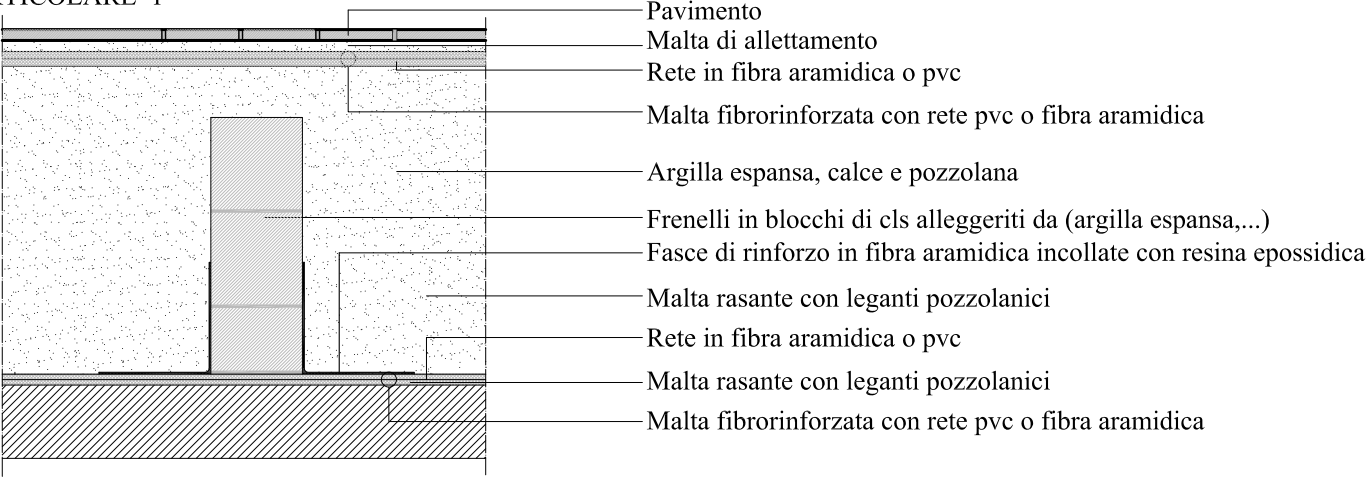
PART. 2



SEZIONE VOLTA A BOTTE CON MURO PASSANTE



PARTICOLARE 1



VOLTA A BOTTE CON MURO PASSANTE

MODELLO 3D

**VOLTA A BOTTE CON MURO IN FALSO**

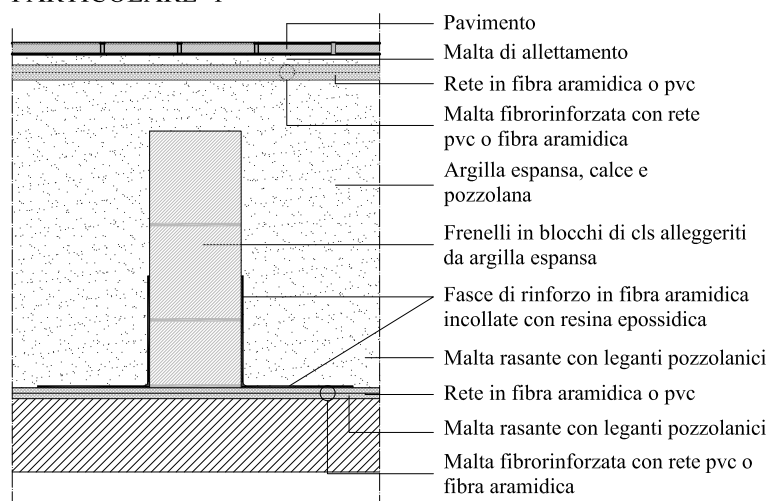
Labels on the right side of the diagram:

- Muri in falso su arco
- Arco
- Malta fibrorinforzata con rete pvc o fibra aramidica Frenelli
- Malta di allettamento
- Fasce di rinforzo in fibra aramidica incollate con resina epossidica
- Malta fibrorinforzata con rete pvc o fibra aramidica
- Argilla espansa calcæ pozzolana
- Volta esistente

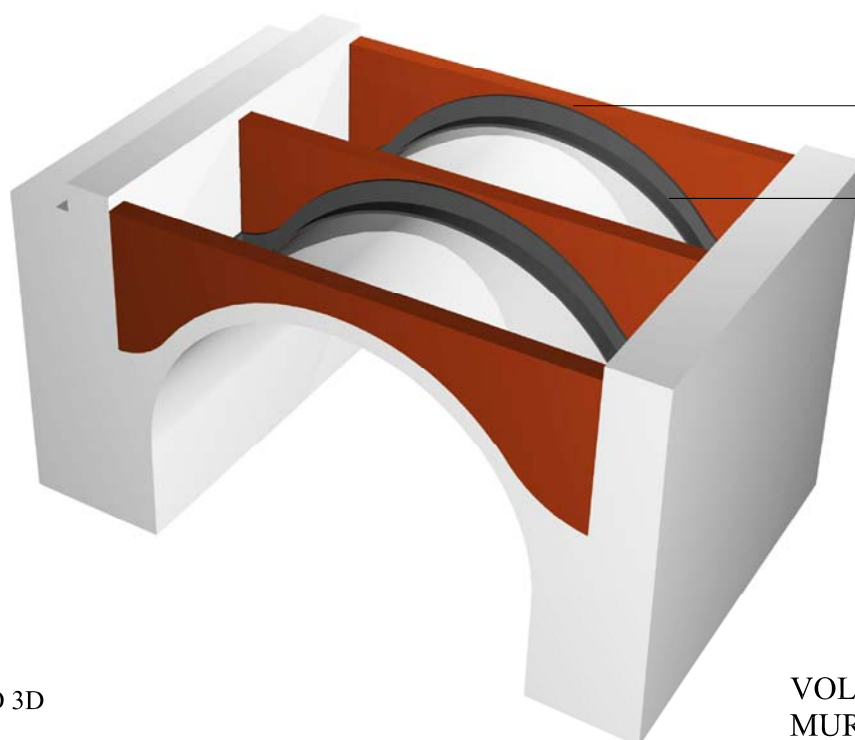
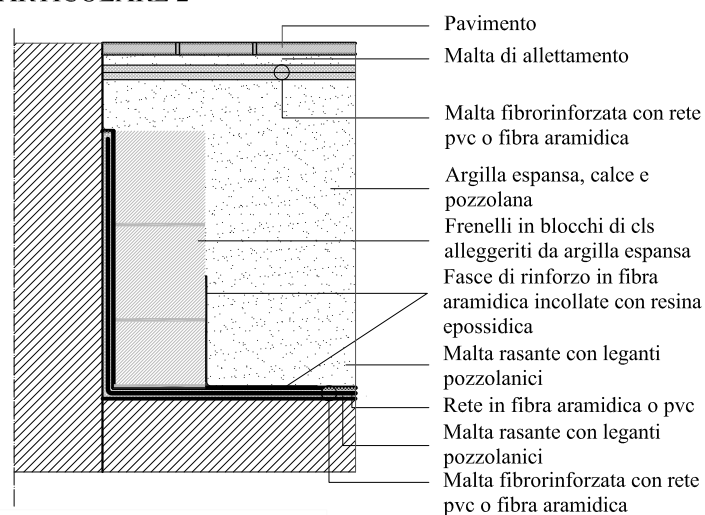
Labels on the left side of the diagram:

- PARTICOLARE 2
- Arco
- PARTICOLARE 1

PARTICOLARE 1



## PARTICOLARE 2

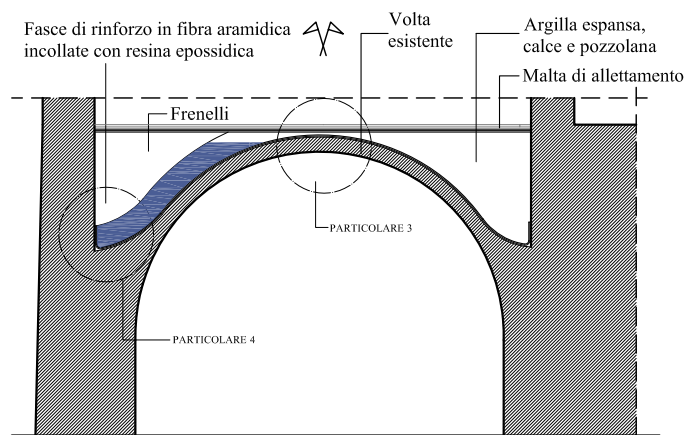


### MODELLO 3D

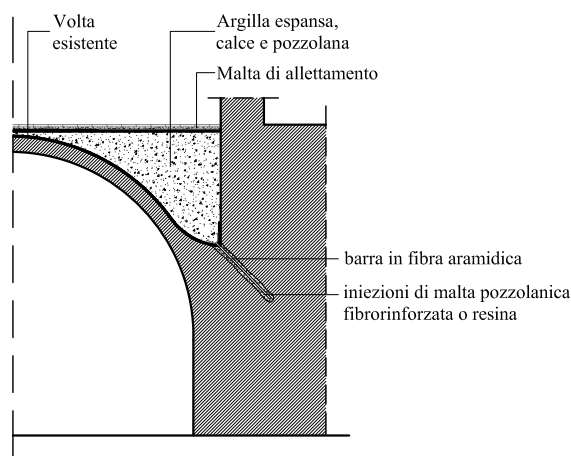
## VOLTA A BOTTE CON MURO IN FALSO

VOLTA A BOTTE CON MURO IN FALSO

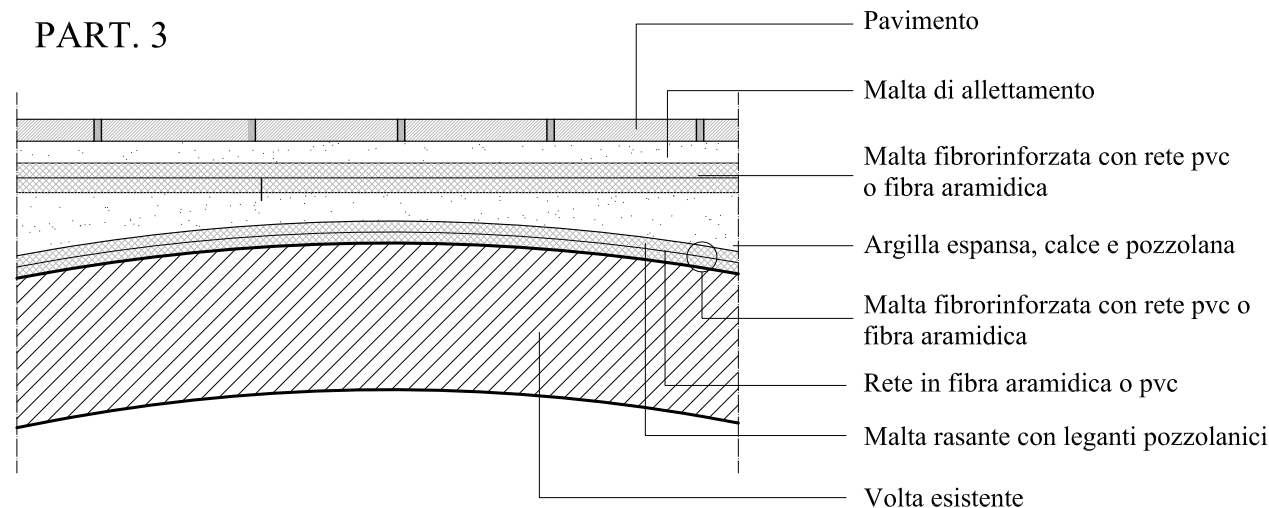
SEZIONE A-A RINFORZO ESTRADOSSALE



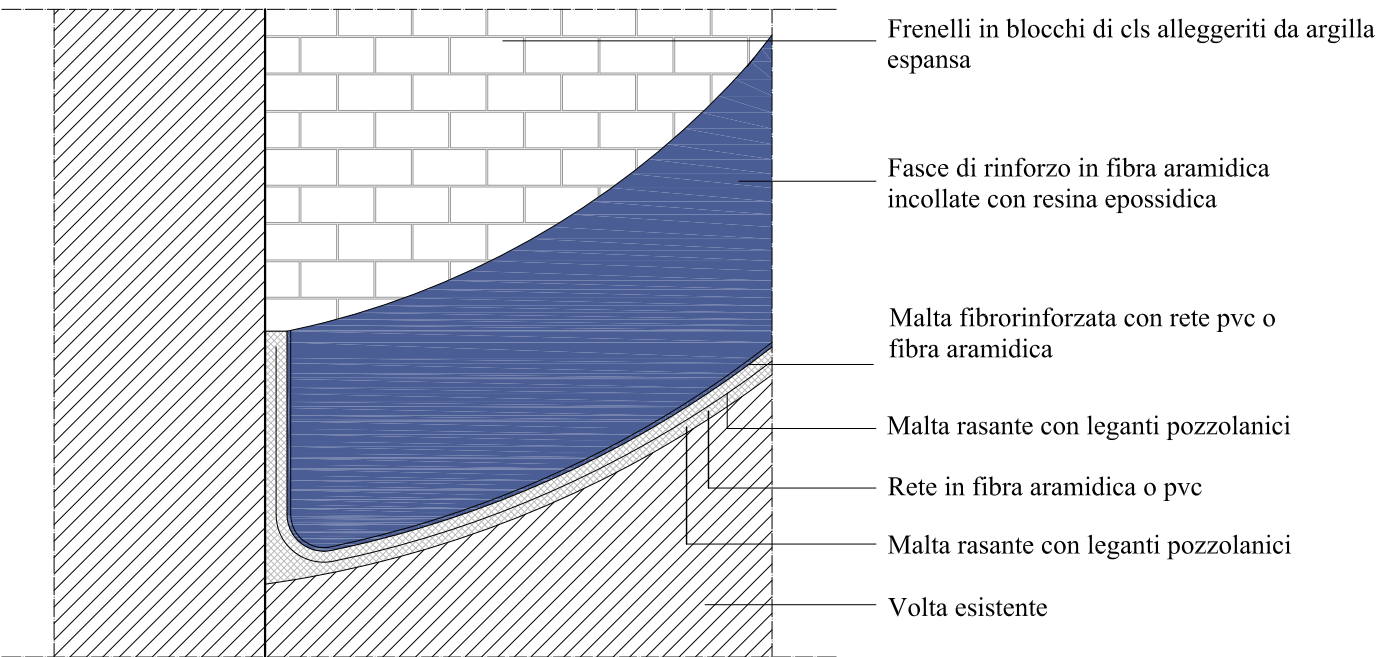
RINFORZO ESTRADOSSALE CON ANCORAGGIO BARRE SFIOCATE



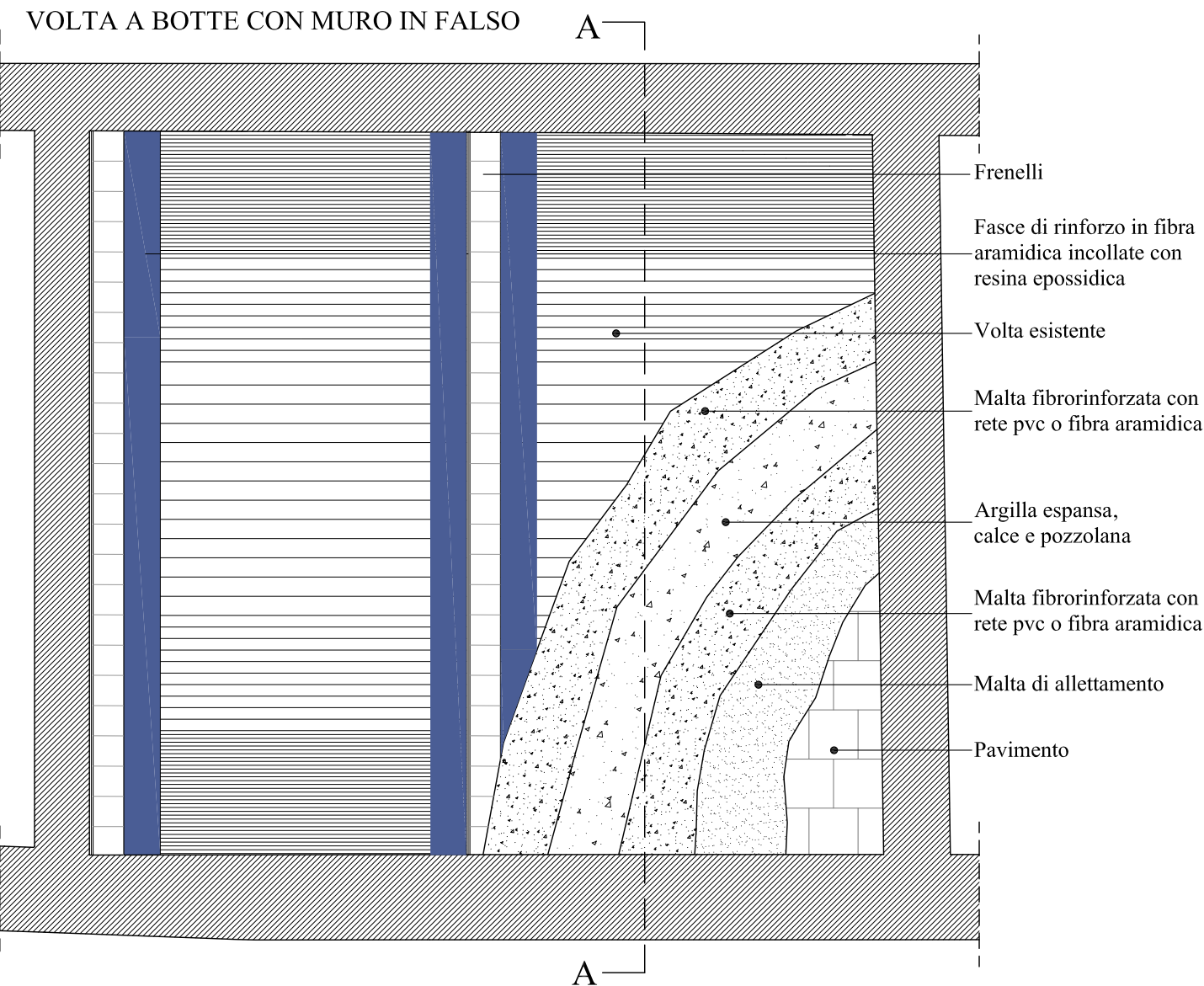
PART. 3



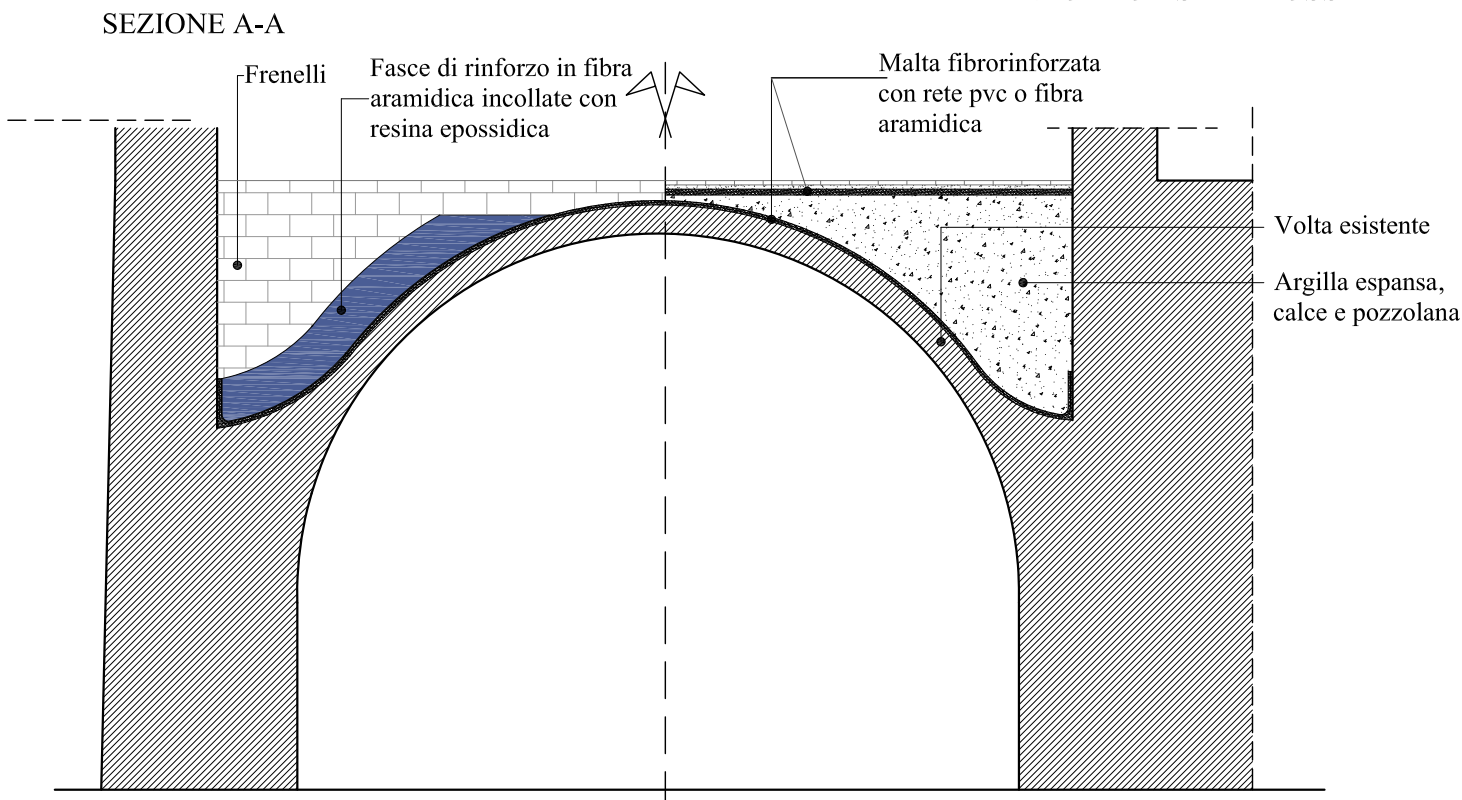
PART. 4



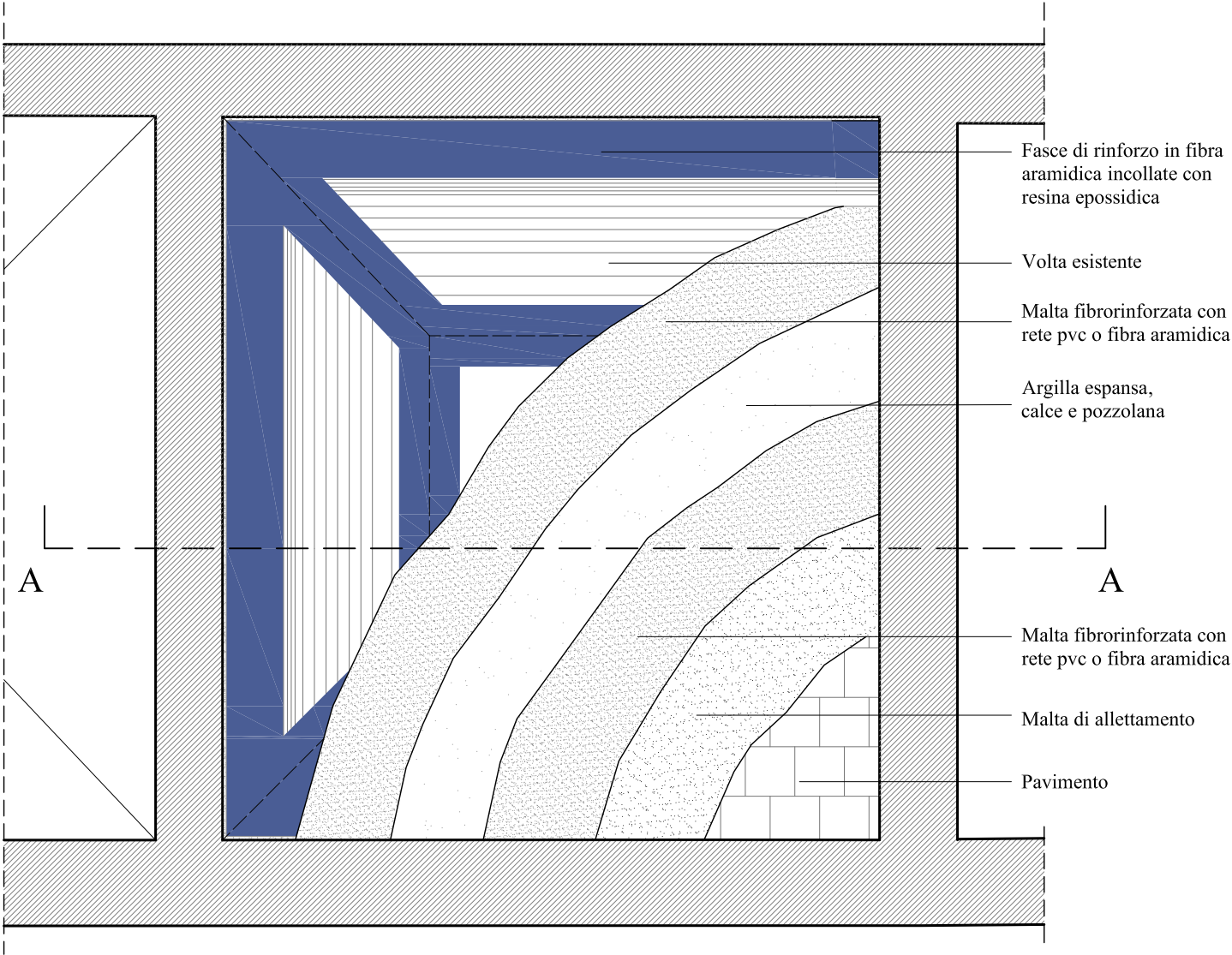




RINFORZO ESTRADOSSALE



VOLTA A PADIGLIONE



PIANTA

Fasce di rinforzo in fibra aramidica  
incollate con resina epossidica

Malta fibrorinforzata con  
rete pvc o fibra aramidica

Malta fibrorinforzata con  
rete pvc o fibra aramidica

Pavimento

Malta di allettamento

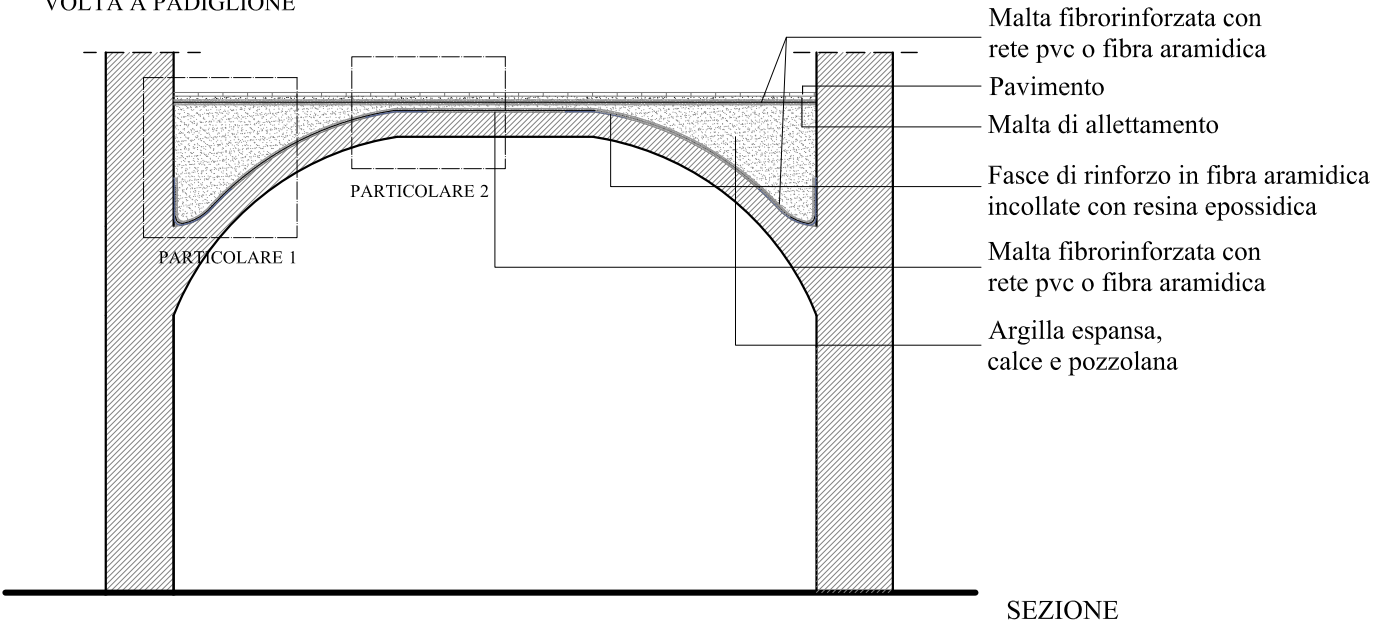
Fasce di rinforzo in fibra aramidica  
incollate con resina epossidica

Argilla espansa,  
calce e pozzolana

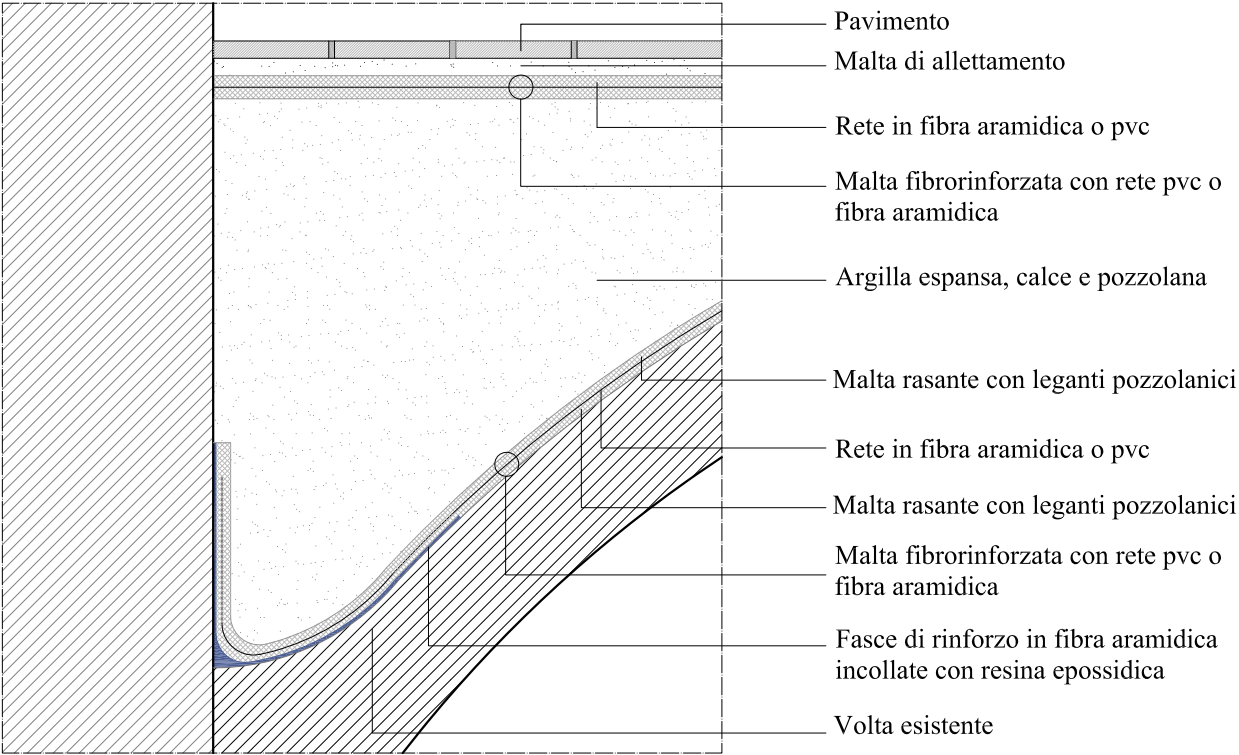
Volta esistente

SEZIONE A-A'

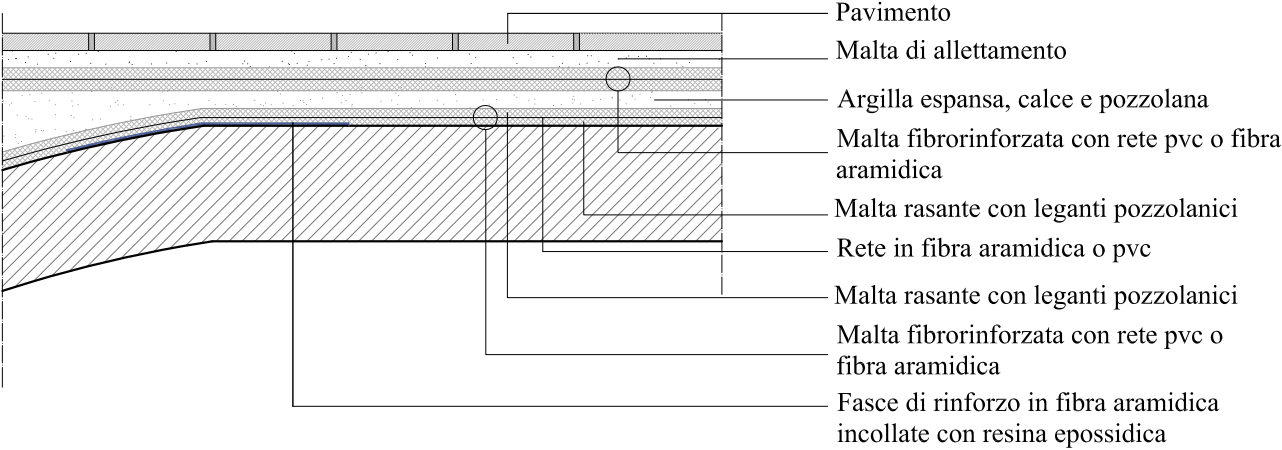
VOLTA A PADIGLIONE



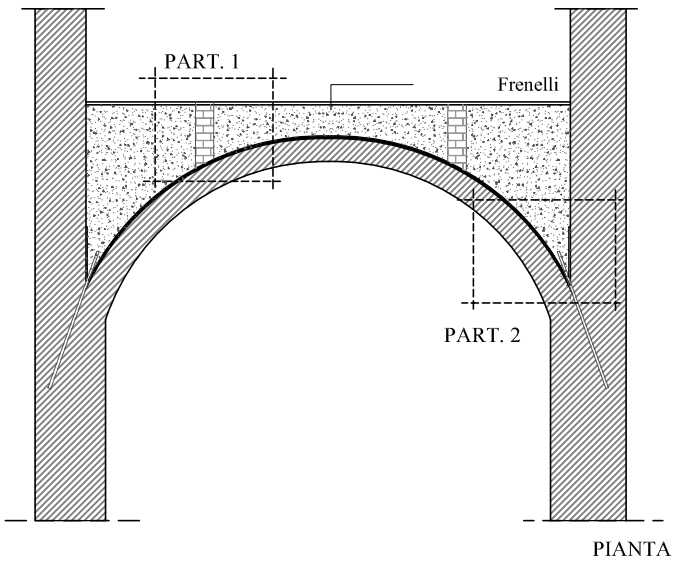
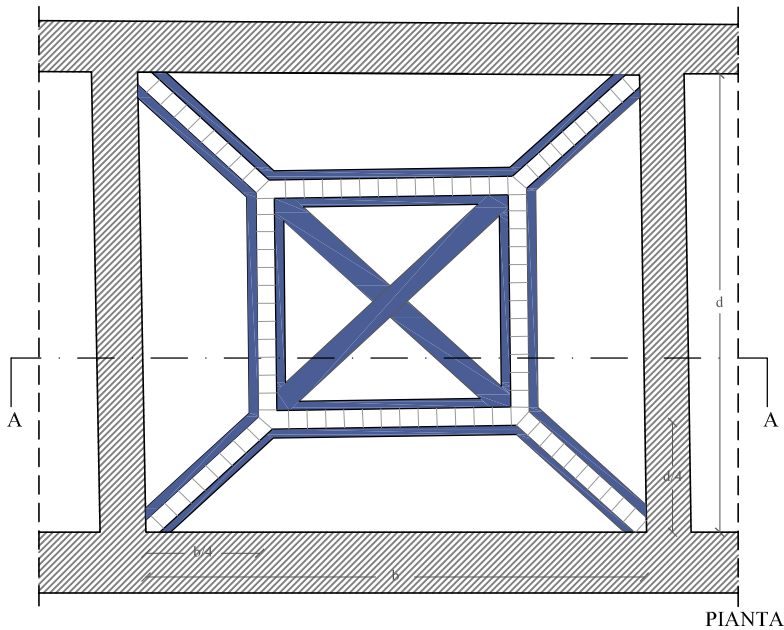
PARTICOLARE 1



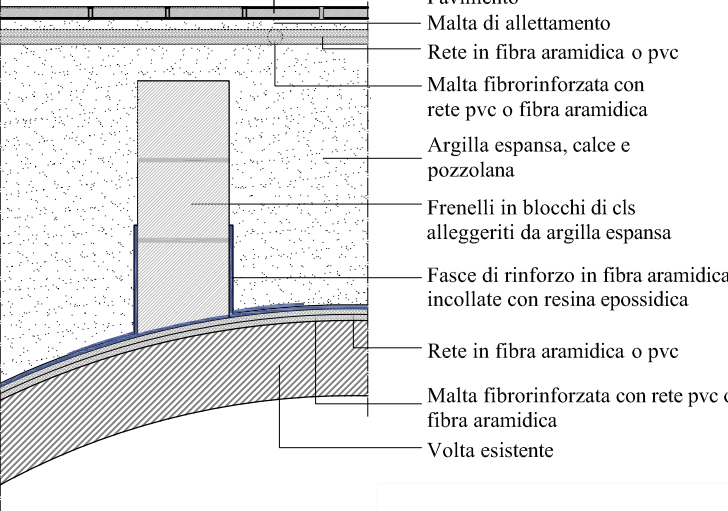
PARTICOLARE 2



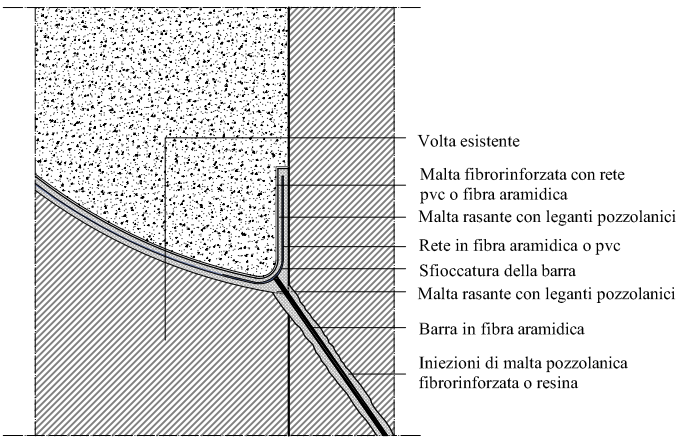
VOLTA A CROCIERA



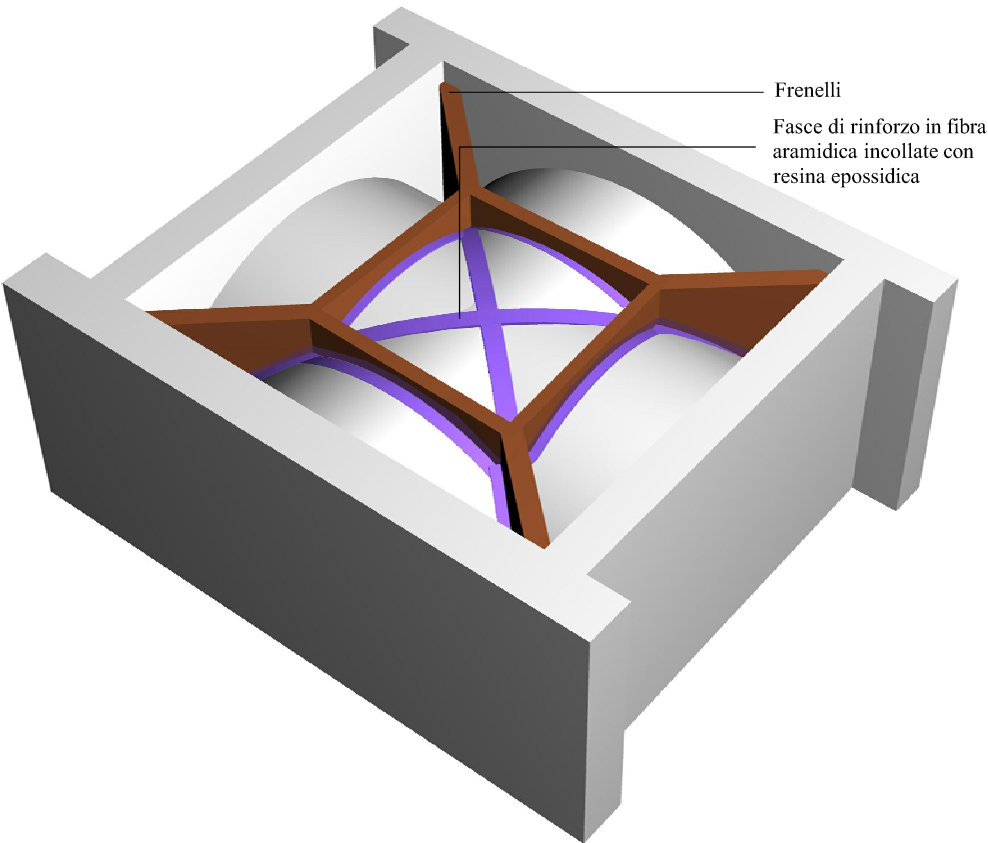
PART. 1



PART. 2

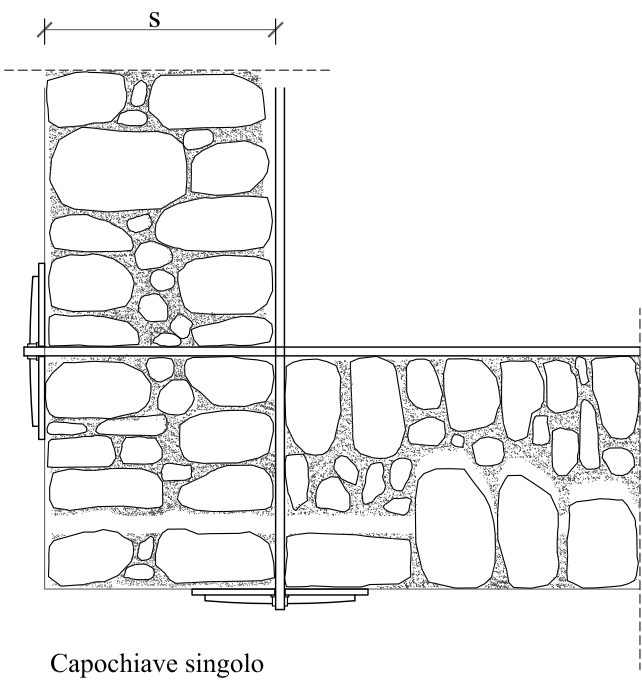
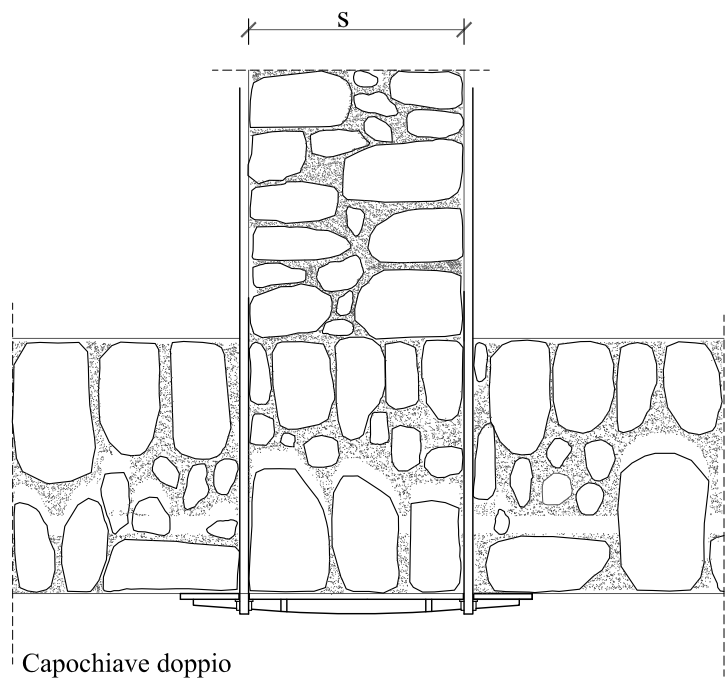


VOLTA A CROCIERA  
CON MURI PASSANTI

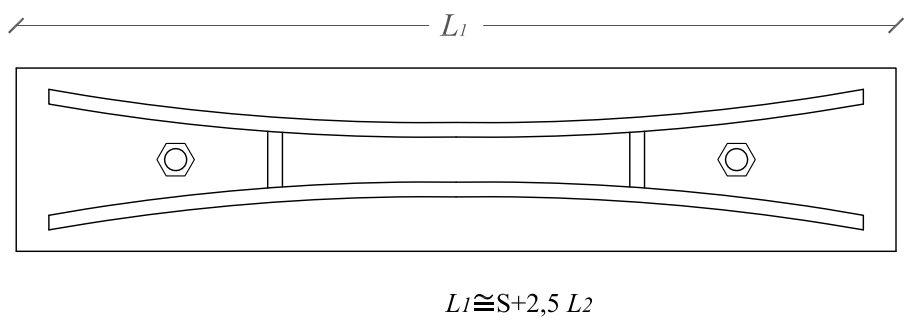
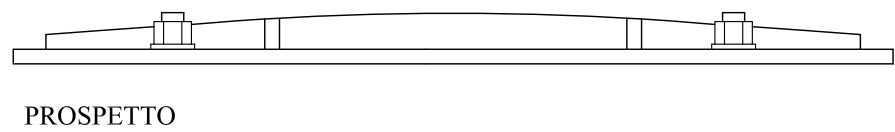
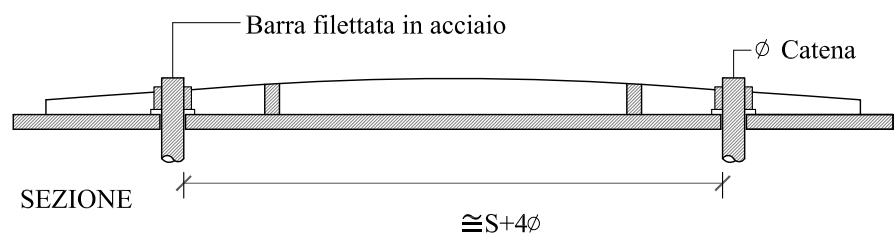


MODELLO 3D

CAPOCHIAVE A PIASTRA

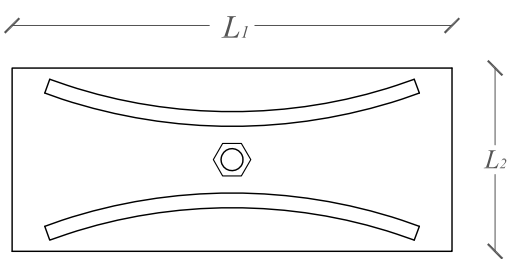
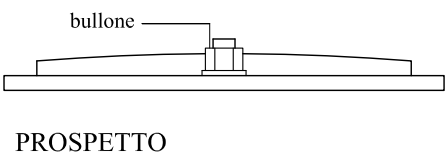
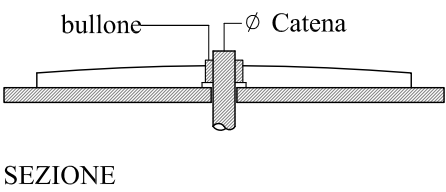


PARTICOLARE - Capochiave doppio



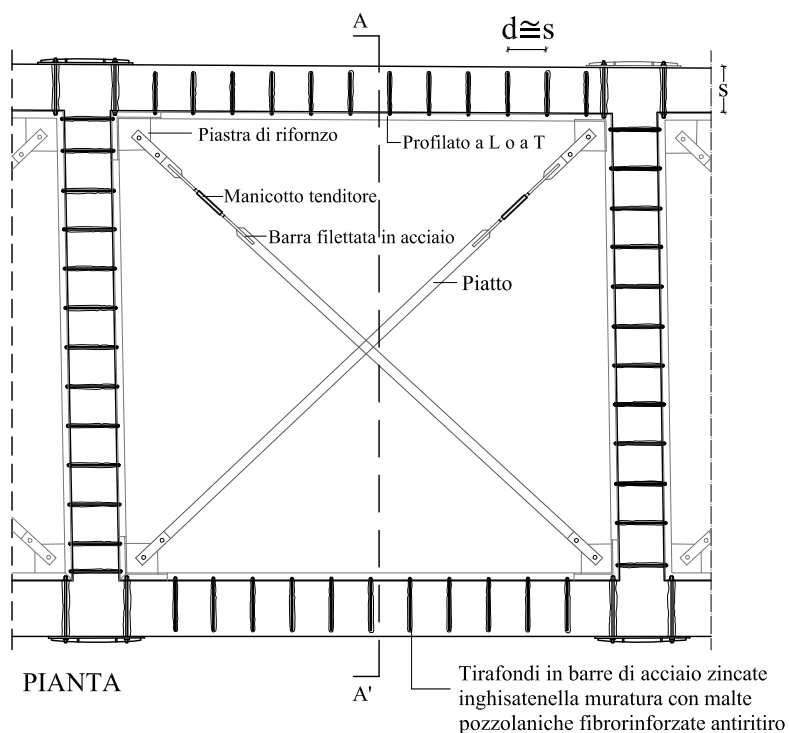
PIANTA

PARTICOLARE - Capochiave singolo



PIANTA

Il capochiave singolo puo' anche essere quadrato o tondo

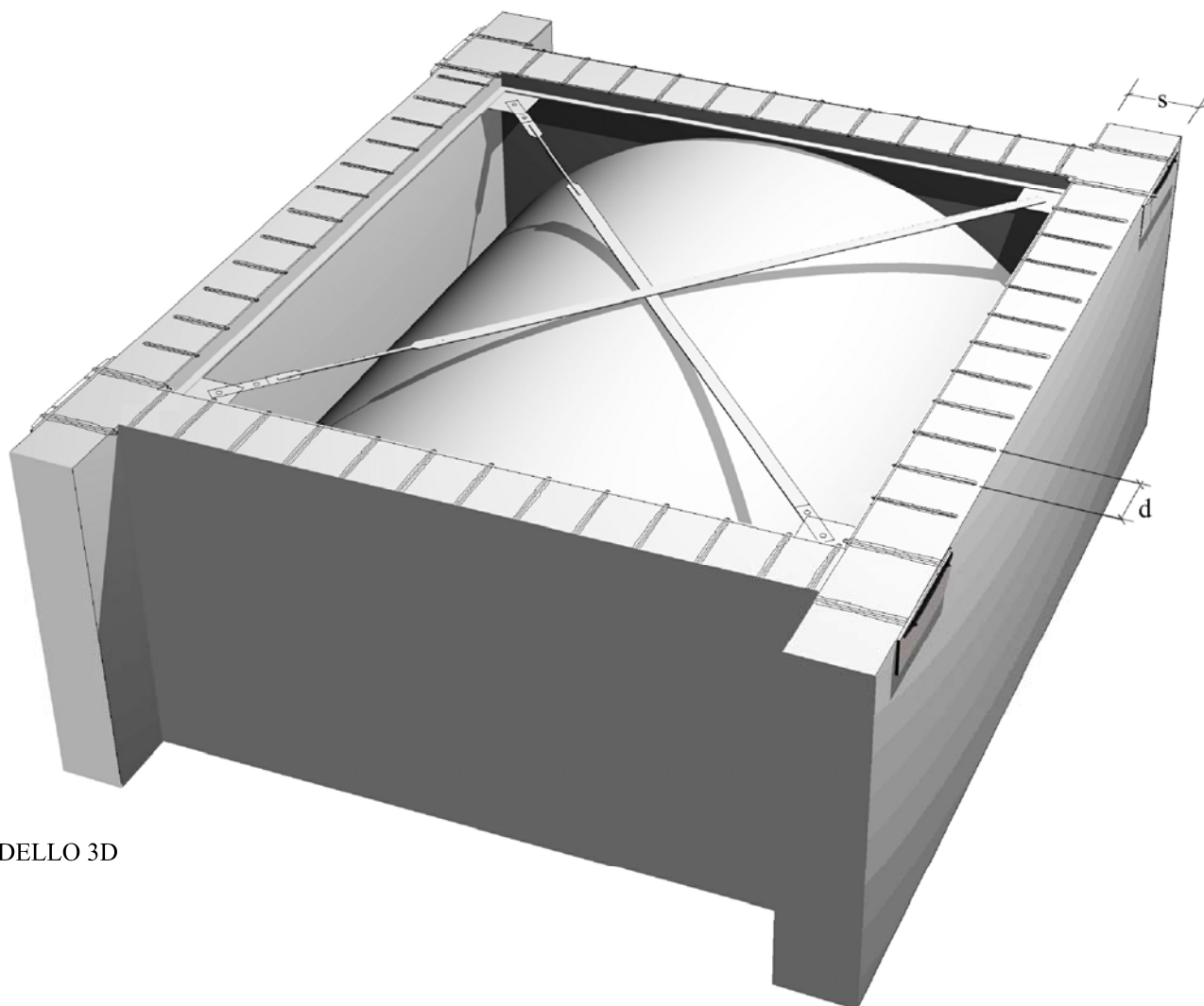


Il rinfilanco alleggerito legato con malta pozzolanica non viene posto in opera se e' a quota di sottotetto

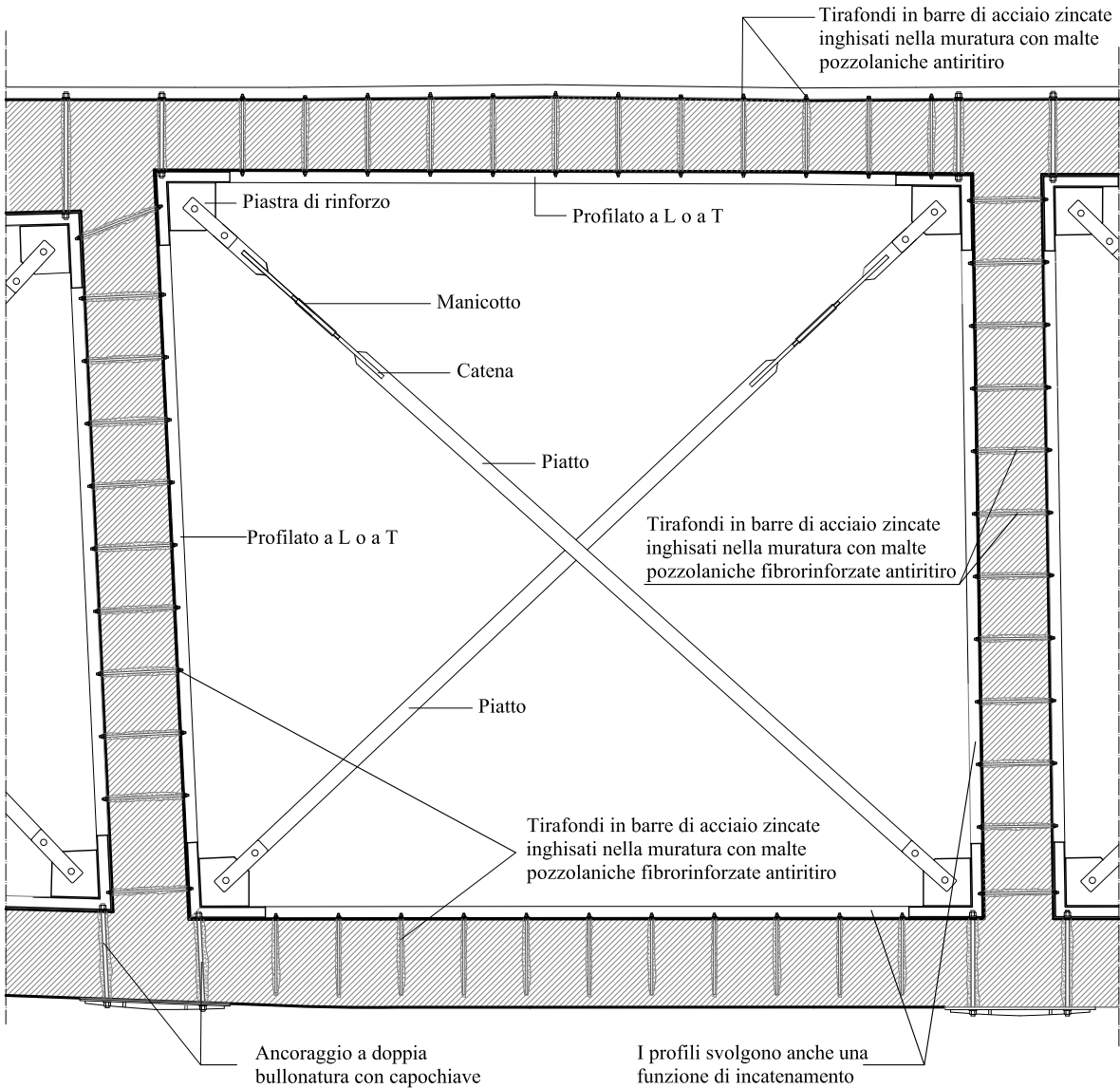
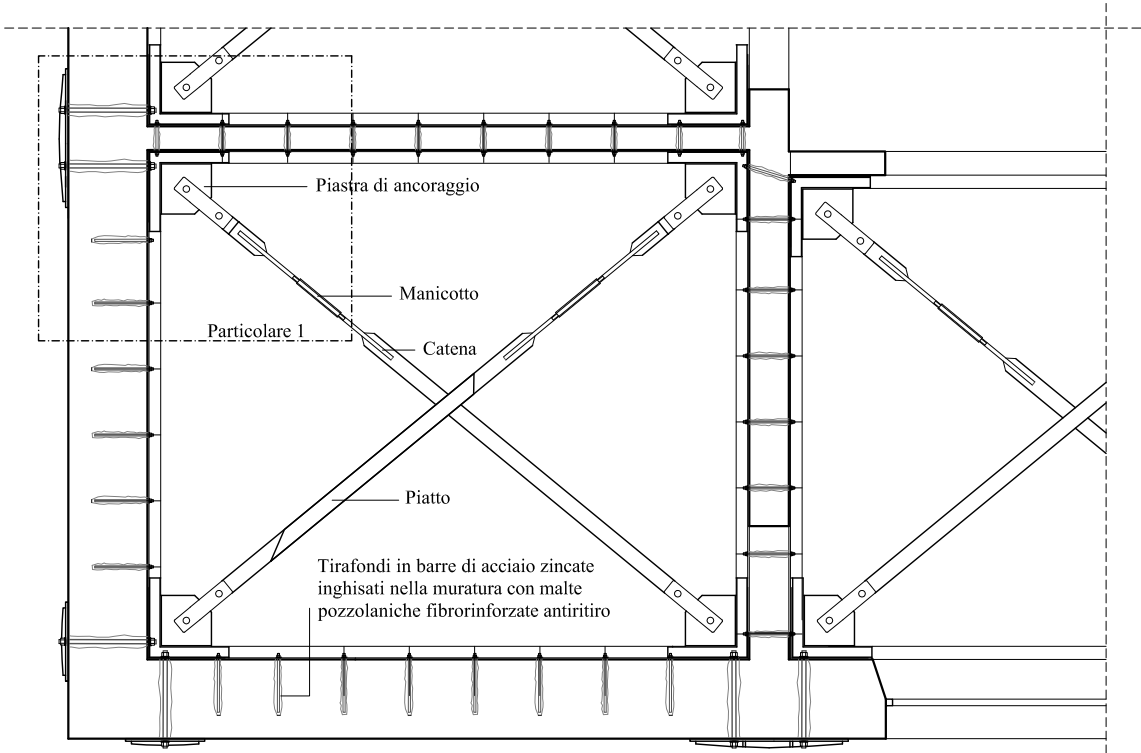
$$d \approx s$$

$$0,55s \leq d \leq 1,55s$$

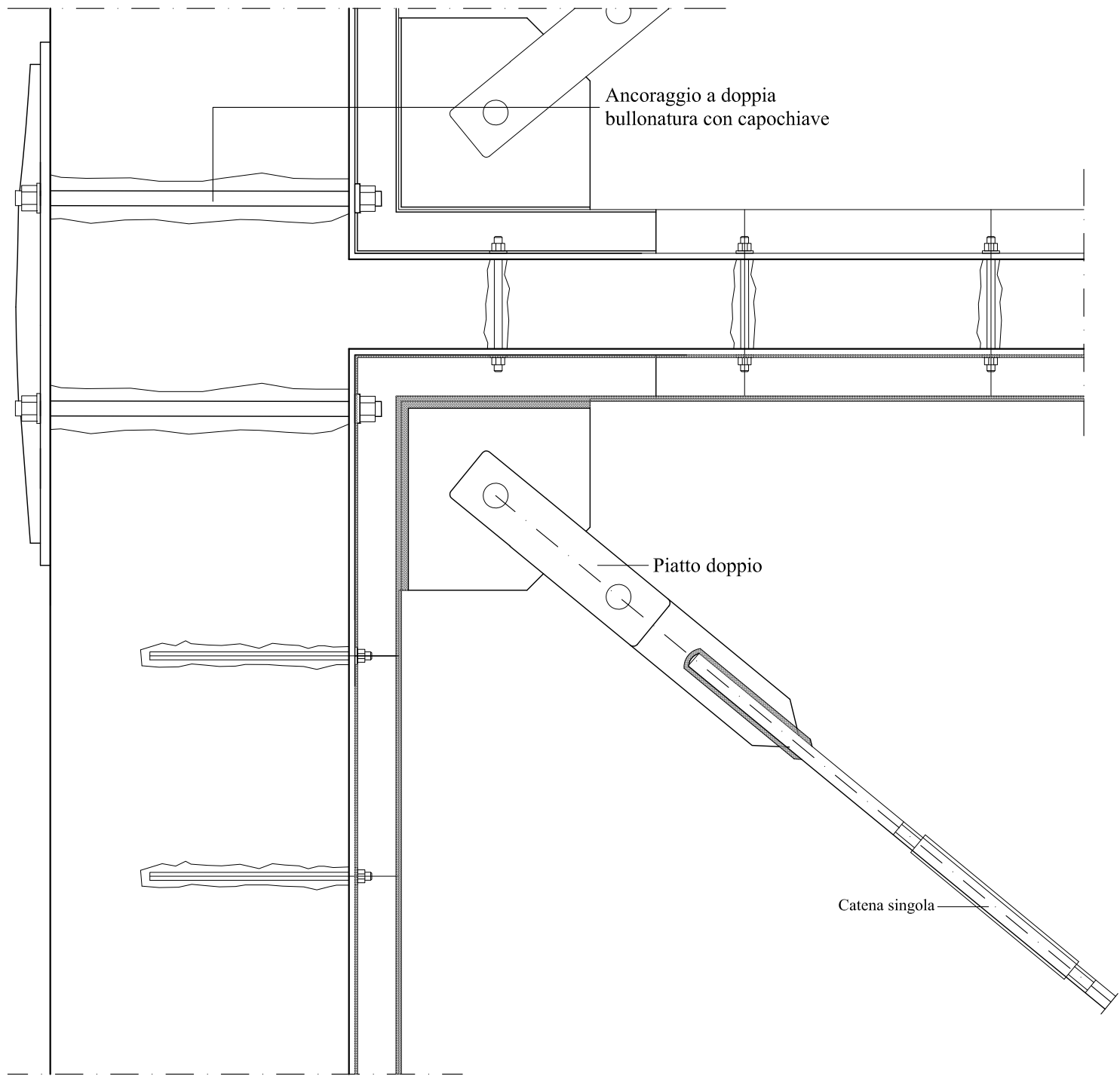
MODELLO 3D



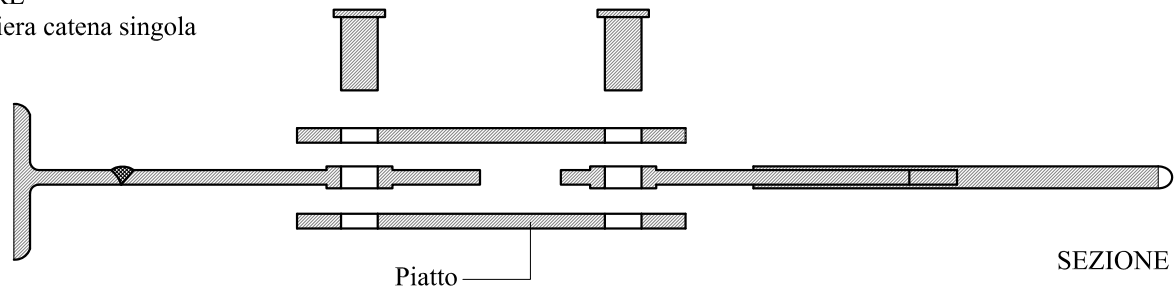




PARTICOLARE DELL'ANCORAGGIO A DOPPIA BULLONATURA



PARTICOLARE  
Attacco a cerniera catena singola





PARTICOLARE - ATTACCO A CERNIERA CATENA DOPPIA

