5.1 TIPOLOGIA E TECNOLOGIA DELLE VOLTE

Le volte presenti al piano terra dell'ex convento Santa Maria degli Angeli sono realizzate in laterizi, murati con malta di calce e sabbia fine, apparecchiati in foglio e sono disposte in campate consecutive. La geometria è a crociera, con dimensioni medie dei singoli ambienti 4,15 x 3,50 m; altezza in chiave 5 m, all'imposta 3,50 m. La struttura è irrigidita da arconi di mattoni dello spessore di una testa, murati con malta a base di calce e sabbia fine. Il tipo costruttivo è stato introdotto nel '700 e viene utilizzato fino alla fine dell'800 ed oltre. È molto diffuso sia nell'edilizia cittadina storica che nell'ambiente rurale. I laterizi sono accoppiati per costa, murati con malta e sistemati secondo le generatrici dei cilindri a giunti sfalsati; la soluzione con mattoni in foglio garantisce un risparmio di materiale rispetto alla disposizione a coltello (circa 1/3 dei mattoni). Lo spessore ridotto della volta rende instabile il manto laterizio; il fenomeno è attenuato dagli arconi d'irrigidimento sull'intradosso e dal riempimento di calcinacci sull'estradosso, che impediscono le deformazioni della volta verso l'alto e verso il basso. Il taglio dei laterizi lungo la nervatura è simile alla soluzione con accoltellato di mattoni (immagine 2, particolare 4), mentre la chiusura in chiave secondo le direzioni longitudinali e trasversali presenta soluzioni geometriche diverse (immagine 2, particolare 3) in funzione dello spazio residuo fra gli ultimi filari. L'assonometria (immagine 2) mostra la successione delle fasi costruttive della volta con la sovrastruttura di calcinacci, il massetto e il mattonato; la centina fissa, ricostruita in riferimento alle strutture tipiche, evidenzia gli elementi portanti principali e il sistema di cunei di legno necessari per il corretto disarmo.L'uso di centine mobili, frequente in questo genere di lavorazione, è reso possibile dalla rapida presa della malta e dal peso ridotto della struttura. Le spinte della volta, a differenza della soluzione con accoltellato di mattoni, trovano in questo caso il contrasto dei pilastri oltre che del muro laterale, per cui l'effetto spingente viene efficacemente assorbito dal sistema dei muri d'appoggio attraverso il carico trasmesso dalle murature sovrastanti. Generalmente una variante delle volte di mattoni in foglio si rileva ai piani nobili degli edifici di maggior pregio, con geometrie a padiglione o a vela; si tratta di false volte dove i mattoni non svolgono funzione portante, rinfiancati solo fino alle reni. L'orizzontamento è costituito da un solaio ligneo realizzato sopra la volta e nascosto alla vista. In questi casi non esistono problemi legati all'assorbimento delle spinte modestissime, mentre la soluzione architettonica è analoga a quella delle volte portanti.

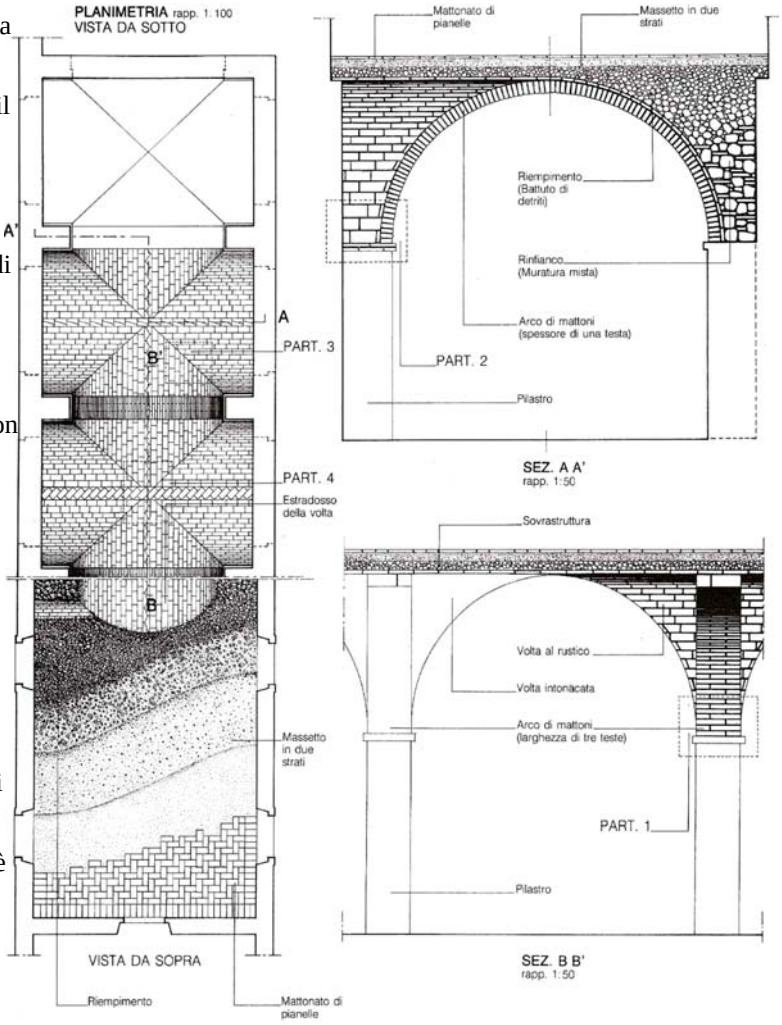
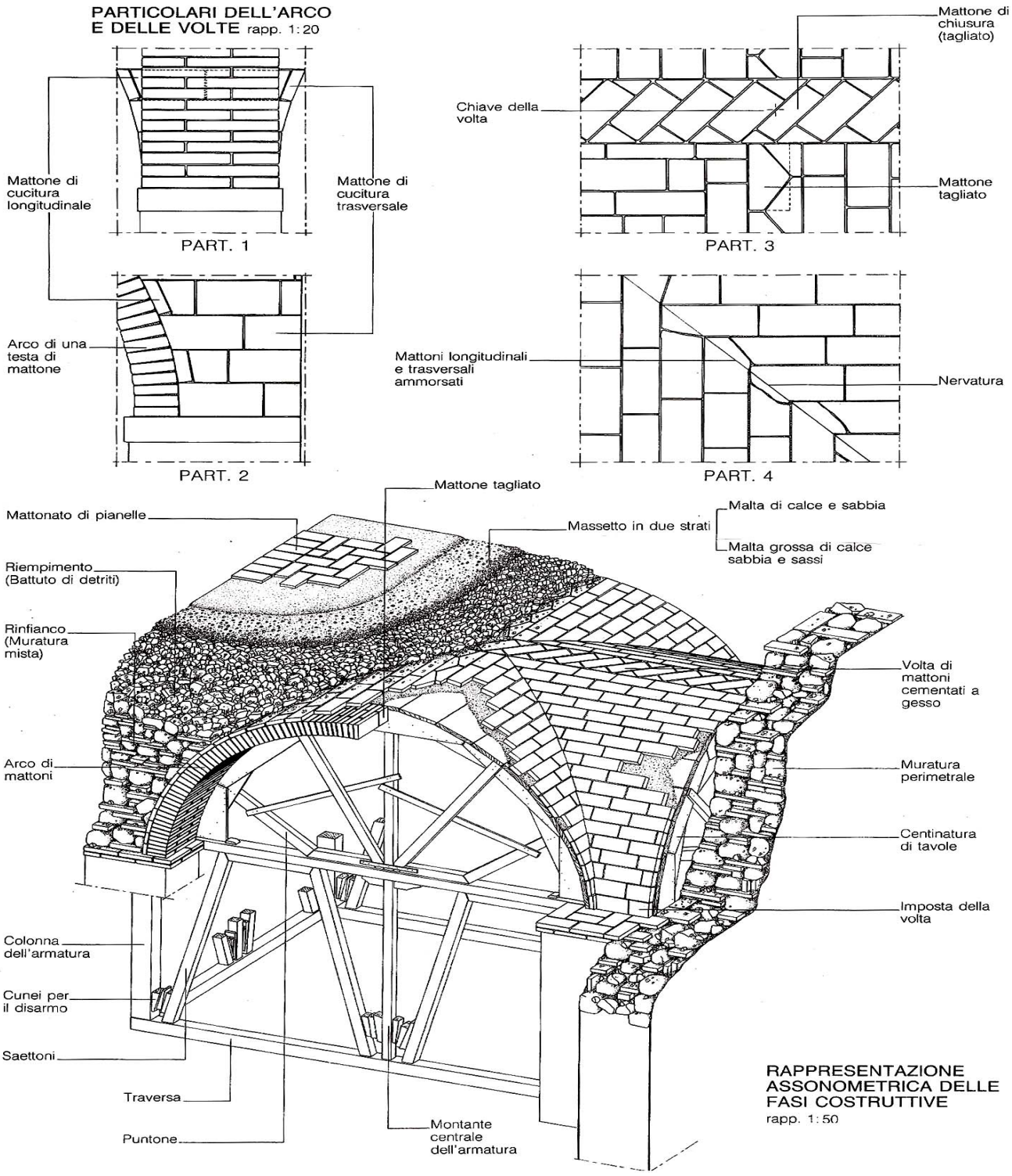


Immagine 1, tecnologia della volta a crociera in foglio

Immagine 2


PARTICOLARI DELL'ARCO E DELLE VOLTE rapp. 1:20
Mattone di cucitura longitudinale
Mattone di cucitura trasversale
PART. 1
Arco di una testa di mattone
PART. 2
Chiave della volta
Mattone di chiusura (tagliato)
Mattone tagliato
PART. 3
Mattoni longitudinali e trasversali ammorsati
Nervatura
PART. 4
Mattone tagliato
Mattonato di pianelle
Massetto in due strati
Malta di calce e sabbia
Malta grossa di calce sabbia e sassi
Riempimento (Battuto di detriti)
Rinfianco (Muratura mista)
Volta di mattoni cementati a gesso
Arco di mattoni
Muratura perimetrale
Centinatura di tavole
Imposta della volta
Colonna dell'armatura
Cunei per il disarmo
Saettoni
Traversa
Puntone
Montante centrale dell'armatura
RAPPRESENTAZIONE ASSONOMETRICA DELLE FASI COSTRUTTIVE
rapp. 1:50

5.2 TEORIA E STATICA DELLE VOLTE SOTTILI

L'analisi del comportamento statico di una volta costituisce un complesso problema di scienza delle costruzioni. Gli schemi statici ai quali si riconducono generalmente tali strutture sono quelli dell'arco e della lastra curva in regime di membrana. Infatti, da un punto di vista geometrico le volte si considerano generate dalla traslazione di un arco lungo una direttrice ad esso ortogonale: la più semplice è la volta a botte; le altre derivano dall'intersezione di volte a botte.

Dal punto di vista statico la volta a botte può essere vista come una successione di archi paralleli: se ne isola una striscia di lunghezza unitaria e si può studiare, quindi, la distribuzione degli sforzi interni come per un arco; i muri d'ambito, sui quali la volta si appoggia ne sopportano la spinta trasmessa loro con continuità dalle imposte. Per quanto concerne il funzionamento a membrana, esso è caratteristico delle volte aventi superficie media a doppia curvatura. Comunque, in via approssimativa, il funzionamento a membrana può essere considerato predominante nel regime globale delle tensioni interne, per tutte le strutture aventi le caratteristiche delle volte sottili. Per tali strutture, è possibile che si instauri il regime di membrana, per una qualsiasi distribuzione di forze applicate. Va precisato, inoltre, che, teoricamente, il regime di membrana è subordinato all'ipotesi che la deformazione sia la medesima che si avrebbe se la superficie della volta fosse indefinita, anziché limitata sia trasversalmente sui due timpani, sia longitudinalmente lungo i due bordi. Nella realtà, questo non si verifica quasi mai. Da un punto di vista statico, la stabilità di una struttura voltata è garantita quando la curva delle pressioni, ovvero il poligono funicolare del carico permanente e di quello accidentale su di essa gravanti, passa all'interno del nocciolo centrale d'inerzia di ciascuna sezione ("canale statico") (immagine 3.a). In particolare, tre sono le sezioni caratteristiche al di fuori delle quali la curva funicolare non deve cadere: la sezione in chiave e le due sezioni alle reni, individuate da un angolo di 60° rispetto alla verticale (immagine 3.b). Qualora invece, la curva delle pressioni dovesse fuoriuscire dal predetto canale statico, a causa ad esempio di mutate condizioni di carico, la sezione si parzializzerebbe con conseguente nascita di tensioni di trazione. Fintanto che l'eccentricità rispetto al nocciolo centrale d'inerzia si mantiene modesta, l'arco pur fessurandosi è in grado di rimanere in esercizio. Se la curva delle pressioni, già esterna alle linee di nocciolo, fuoriuscisse anche dalle linee di intradosso o estradosso, ovvero dai bordi dell'arco stesso, sopraggiungerebbe la crisi per formazione di una cerniera.

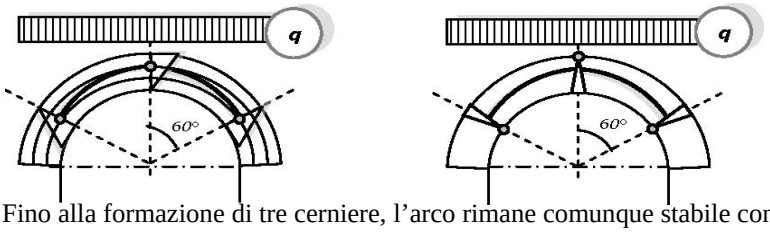


Immagine 3

a) Curva delle pressioni

b) Sezioni critiche

Fino alla formazione di tre cerniere, l'arco rimane comunque stabile configurandosi secondo il noto schema di arco a tre cerniere e quindi come struttura staticamente determinata; se il numero di cerniere aumentasse, la struttura diventerebbe labile (meccanismo o cinematismo) e l'arco collasserebbe. Il rinforzo mediante applicazione di materiali in grado di resistere a trazione, applicati all'estradosso delle strutture voltate, incide sulle modalità di collasso alterando il meccanismo di formazione delle cerniere. Le tensioni di trazione, venutesi a creare a seguito della parzializzazione della sezione, vengono assorbite dal rinforzo stesso. Analogamente a quanto avviene nelle sezioni in c.a., la crisi dell'arco rinforzato (crisi di tipo globale) sopraggiunge per schiacciamento della muratura (raggiungimento del limite di resistenza a rottura della muratura) o per superamento della resistenza a trazione del rinforzo. Numerose ricerche sperimentali hanno dimostrato che attraverso una adeguata progettazione del rinforzo e un suo razionale posizionamento sull'elemento strutturale da consolidare, si ottiene un incremento delle capacità portanti e di resistenza. Non bisogna dimenticare che nel caso di strutture ad arco in muratura i metodi di calcolo tradizionali, calcolo elastico e

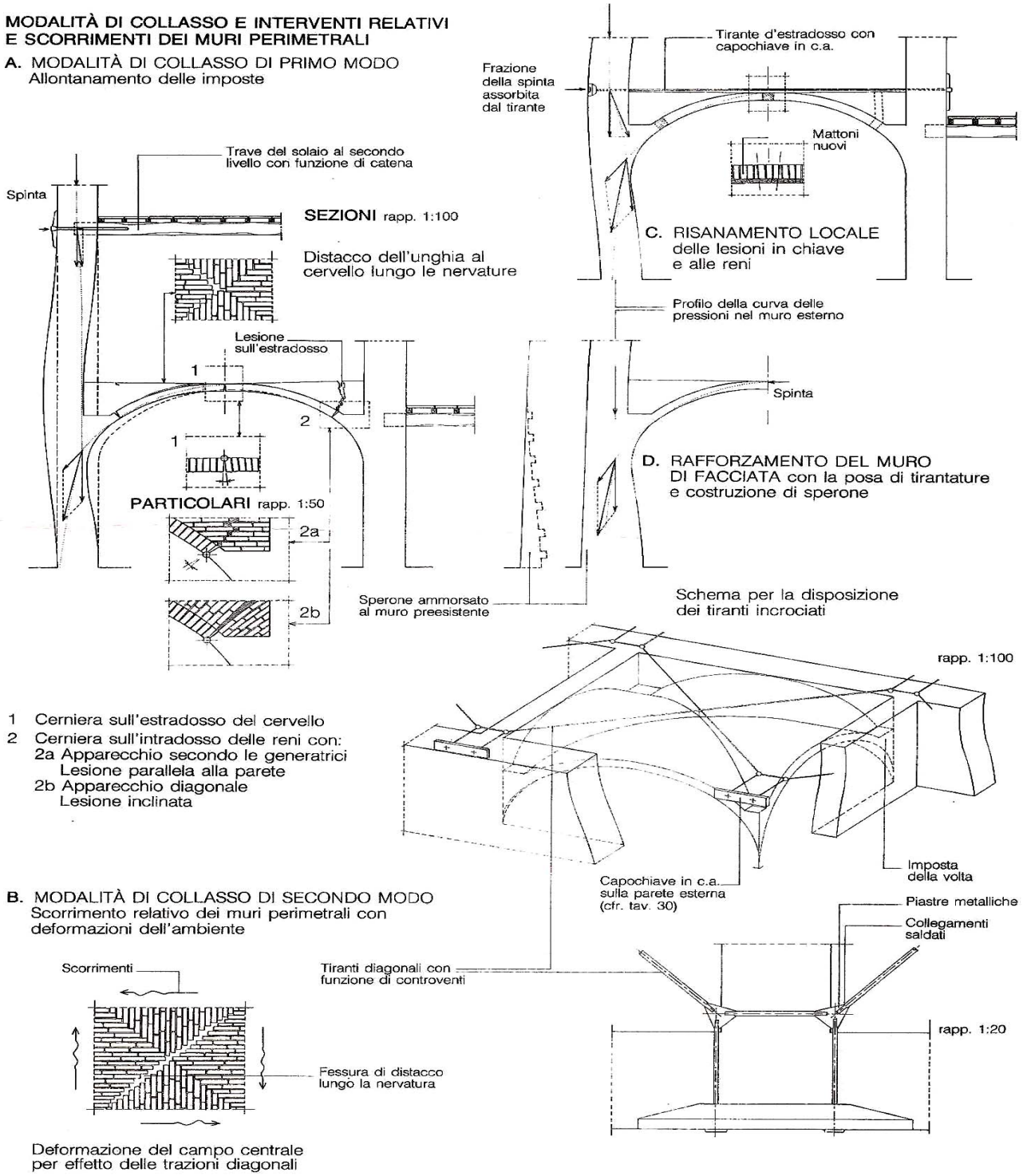
a rottura, creano non poche incertezze. Da un lato, lo schema di calcolo elastico (metodo delle tensioni ammissibili) considera le strutture totalmente compresse e poi verifica che la curva delle pressioni non fuoriesca dal terzo medio della sezione, senza indagare sul comportamento della struttura nella fase fessurativa. Dall'altro lato, il calcolo a rottura (metodo agli stati limite) ipotizza la muratura come materiale non resistente a trazione e poi verifica che la curva delle pressioni non cada al di fuori dello spessore murario dell'arco stesso. Entrambi gli schemi di calcolo non sono tuttavia in grado di cogliere quella fase intermedia di danneggiamento della struttura, che si verifica durante il processo di carico e che immediatamente segue e precede le situazioni relative agli schemi tradizionali di calcolo . In ogni caso l'incremento delle prestazioni di una struttura muraria rinforzata è assicurato qualora si crei uno stato tensionale di trazione nel rinforzo stesso, che in tal modo è in grado di sopperire alla trascurabile resistenza a trazione del materiale murario.

MODALITA' DI COLLASSO NEGLI EDIFICI STORICI

L'osservazione ed il confronto tra numerosi CASI, oltre ad approfondire le conoscenze sulle tecniche costruttive, ha permesso di osservare che le modalità di collasso tipiche di queste strutture, sono associate tanto alla geometria della volta e al tipo di apparecchio, quanto alle condizioni di contorno (vincoli, spessori delle murature, ecc.). I meccanismi di danno sono spesso associati ai dissesti dei muri perimetrali, che con le rotazioni o gli scorrimenti relativi producono la deformazione della geometria strutturale e quindi la formazione di lesioni. Sono state prese in esame le modalità di collasso di 1° modo, a cui corrispondono deformazioni trasversali dei muri perimetrali, e di 2° modo, a cui sono associate deformazioni della volta e dell'ambiente per effetto di scorrimenti relativi fra i muri. Il primo caso è il più grave, in quanto la spinta stessa della volta tende a causare l'allontanamento delle imposte, producendo lo spostamento della parete verso l'esterno. A tale situazione corrisponde la formazione di lesioni il cui andamento dipende dal tipo di apparecchio (vedi particolari 4, 2a, 2b), ma in ambedue i casi si formano delle cerniere sull'estradosso del cervello e sull'intradosso delle reni; attraverso queste si trasmettono le forze che garantiscono l'equilibrio. L'unghia addossata alla parete esterna mostra di regola un comportamento diverso rispetto a quella opposta; infatti essa tende a seguire il movimento verso l'esterno, distaccandosi lungo la nervatura dal cervello della volta che, per effetto del cinematismo, subisce un abbassamento a seguito della rotazione attorno alla cerniera che si forma alle reni. I provvedimenti da adottare in questi casi mirano al contenimento e quindi all'arresto delle deformazioni, senza possibilità di ripristinare la configurazione originaria. Notevoli miglioramenti si ottengono disponendo dei tiranti sull'estradosso, perfettamente nascosti alla vista e in grado di deviare la curva delle pressioni all' interno del basamento, come illustrato negli esempi dell'immagine 4. Il tirante all'estradosso assorbe solo una parte della spinta trasmessa dalla volta, l'altra quota viene trasferita alla fondazione; la ripartizione si ottiene considerando la parete del primo ordine come una trave su due appoggi sottoposta a un carico concentrato (spinta); il tirante assorbe la reazione vincolare superiore. La disposizione del tirante all'altezza del massetto si mostra molto efficace, anche per il fatto che va a coincidere con il ventre dello spanciamento della parete esterna (mai coincidente con il punto d'applicazione della spinta). I muri perimetrali, nel subire deformazioni lungo il loro piano, portano a variazioni della forma dell'ambiente coperto dalla volta e queste si trasferiscono inevitabilmente sul campo centrale dell'apparecchio laterizio, attraverso sforzi di trazione e di compressione. Per far fronte a quest'altro problema è opportuno che le tirantature d'estradosso vengano poste lungo le diagonali e sistemate in modo tale da realizzare una controventatura di piano, dove gli sforzi di trazione vengano assorbiti dalle aste metalliche e le compressioni trasferite alle strutture murarie. Tornando al caso specifico dell'ex convento di Santa Maria degli Angeli, dalle prime indagini visive le strutture voltate, il pilastri e i setti murari non sembrano essere assoggettati a fenomeni di dissesto rilevanti pertanto i casi sopra citati vengono considerati come ipotesi plausibili per

eventuali dissesti futuri provocati da incrementi di carico o da eventi sismici. In ogni caso per determinare lo stato conservativo e le capacità meccaniche delle strutture in oggetto si rimanda a spedizioni diagnostiche approfondite e successivamente a verifiche statiche e dinamiche puntuali.

Immagine 4



5.3 DIAGNOSTICA STRUTTURALE

Il progetto di consolidamento, finalizzato al raggiungimento di adeguati livelli di sicurezza, è parte integrante del più generale progetto per la conservazione del monumento. I metodi da applicarsi saranno, pertanto, quelli indicati da una ragionata metodologia del restauro, sia per la definizione delle finalità dell'intervento sia come prassi operative. Saranno, quindi, analizzate in via preliminare le risultanze delle indagini conoscitive sullo stato di fatto del monumento, per definire le anomalie rispetto al corretto funzionamento statico dell'opera e individuare le cause primarie degli eventuali dissesti. Solo attraverso questo *iter* conoscitivo si potrà delineare un primo quadro d'interventi e sarà davvero possibile, in seguito, agire sulla fonte delle patologie, operando quindi con l'obiettivo del minimo intervento e con la massima efficacia. Questa metodologia è basilare per rispondere in modo realistico alla raccomandazione di principio sulla 'reversibilità', sul 'minimo intervento' e sulla 'non invasività'. Ciò spiega la particolare attenzione che sarà riservata alla più approfondita e dinamica definizione delle indagini conoscitive. Queste non possono esaurirsi nella programmazione iniziale ma devono adeguarsi all'evoluzione della conoscenza in modo tale da costituire essa stessa come fase di progettazione, in quella complessa opera di convincimenti, intuizioni e, anche, di negazioni di quanto ipotizzato e creduto inizialmente. Le idee progettuali sono, infatti, in essere già nella fase dell'esecuzione delle indagini, tanto da trovare una configurazione, almeno concettuale, col concludersi di queste. In altre parole, la progettazione finalizzata per sanare le patologie presenti nell'opera, man mano che le indagini forniscono nuove informazioni o confermano quelle previste, subisce correzioni di rotta e integrazioni, in un dualismo concorde tra risultati conoscitivi e proposte progettuali.Le indicazioni fornite dal documento preliminare sulla consistenza strutturale del vecchio istituto carcerario lasciano sperare in un giudizio positivo sulla stabilità del complesso o, almeno, sul possibile raggiungimento del livello di sicurezza richiesto dalle future esigenze funzionali.

In particolare per le strutture voltate, si prevedono opportuni saggi che forniranno i dati necessari per la verifica della stabilità. Se le verifiche non dovessero garantire la portanza richiesta dalle nuove esigenze funzionali, gli interventi di consolidamento dovranno essere previsti sulla base di un'accurata analisi e diagnosi preliminare e di un'assoluta compatibilità fisico-chimica e specificatamente meccanica con le preesistenze. Nello specifico una volta catalogate tutte le informazioni di tipo geometrico, materico e sulla tipologia costruttiva si renderanno necessarie una serie di verifiche statiche e dinamiche su ogni singola volta eseguite attraverso l'utilizzo di strumenti informatici in grado di creare modelli strutturali analoghi a quelli studiati e di simulare il comportamento degli elementi sotto l'azione dei carichi nelle varie combinazioni. Nell'ipotesi remota, che i risultati ottenuti siano soggetti ad un grado di incertezza elevato e non sia stato possibile valutare con sicurezza le capacità meccaniche delle volte, si potrebbe ricorrere a prove di carico distribuito e concentrato in grado di simulare le sollecitazioni cui le strutture saranno soggette sia allo stato di esercizio che in situazioni rare e più gravose. Completato il quadro conoscitivo si potrà procedere alle eventuali operazioni di consolidamento.

5.4 USUALI TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO DI ARCHI E VOLTE

Di seguito vengono illustrate le tecniche di consolidamento più utilizzate in passato e ritenute <u>non idonee</u> per il restauro di un complesso monumentale di grande valore storico ed architettonico. Nelle patologie più frequenti sugli archi e le volte si evidenziano per lo più lesioni concentrate in pochi punti, assimilabili a vere e proprie *"cerniere"* strutturali, che, quando superano il numero di tre, generano un meccanismo di collasso.

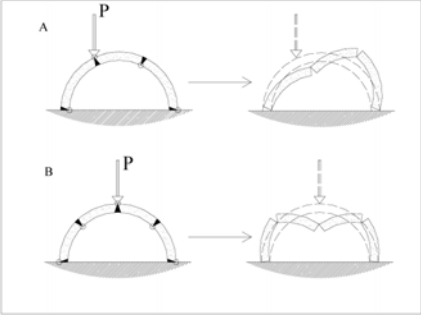


Immagine 5 Meccanismi di collasso. (A) meccanismo a 4 cerniere (B) meccanismo a 5 cerniere

La struttura, che in origine è tre volte iperstatica, si trasforma in un cinematismo ad uno o più gradi di libertà. (figura 5), con conseguente crollo. Talora non si raggiunge la situazione limite, in quanto entrano in gioco elementi non-strutturali in grado di collaborare alla portata ultima, ma anche in questi casi avvallamenti e depressioni eccessive possono risultare inaccettabili. L'obiettivo dell'intervento di consolidamento (analogo peraltro a quello che a suo tempo si era proposto il progettista originario) è quello di ottenere *la massima corrispondenza* tra forma d'asse dell'arco e curva delle pressioni, o per lo meno di ridurne l' eccentricità a valori minimi e comunque contenuti nello spessore strutturale.

Molte sono le tecniche finora adottate nel consolidamento delle volte. I principali interventi riguardano il rinforzo dei piedritti (Immagine 6a) per renderli adatti a sostenere le spinte orizzontali comunicate dall'arco e sono usualmente accompagnati da interventi di ripristino della geometria originaria oppure da interventi di rinforzo locale in grado di ricostituire la continuità strutturale. In pratica si modifica la situazione di vincolo alla base, e dunque l'entità delle reazioni vincolari, modificando la curva delle pressioni. Questi interventi influenzano tuttavia l'aspetto esterno delle pareti in modo talora non accettabile. L 'uso di catene di contrasto alle imposte (Immagine 6b) va nella medesima direzione ed è da sempre il principale strumento adottato, quando non sia possibile operare con contrafforti o comunque con strutture esterne. Le catene tuttavia , mentre impediscono efficacemente i movimenti orizzontali dell'arco, creano contemporaneamente un ingombro visuale e materiale talora eccessivo, soprattutto nel caso di volte affrescate.

L'uso di rinfianchi posti alle reni (Immagine 6c) introduce carichi aggiuntivi rispetto al peso proprio dell'arco, cui è affidata una funzione di centraggio della curva delle pressioni. Ogni intervento che comporti aggiunta di nuovo materiale introduce peraltro nuove masse in posizioni alte dell'edificio, con forti controindicazioni in zone sismiche.

Una soluzione che ha preso piede in questi ultimi vent'anni, molto interessante anche se decisamente invasiva, è il getto di una cappa collaborante in cemento armato all'estradosso delle volte (Immagine 6d), previa la posa in opera di connettori metallici tra la vecchia e la nuova struttura. Taluni interpretano questa tecnica come un incremento dello spessore complessivo dell'arco, altri più semplicemente la intendono come una struttura autonoma, a cui la vecchia volta risulta appesa. Anche questa tecnica presenta naturalmente pregi e difetti. Indiscutibilmente si ottiene un incremento della resistenza e della rigidezza della volta ma talora l'eccessivo peso del materiale aggiunto provoca danni alle strutture verticali o alle fondazioni, per non parlare dell'incremento di massa disposta a livelli alti, dannoso in caso di terremoti. Oltre alla evidente impossibilità di rimuovere l'intervento in futuro, va sottolineato anche il rischio che il calcestruzzo possa provocare danni di tipo fisico-chimico alla sottostante muratura, quali il percolamento di sali o l'impedimento della traspirazione, deleteri soprattutto in presenza di affreschi. E' necessario allora proporre e sperimentare sistemi alternativi, meno invasivi e capaci di adattarsi ai singoli casi.

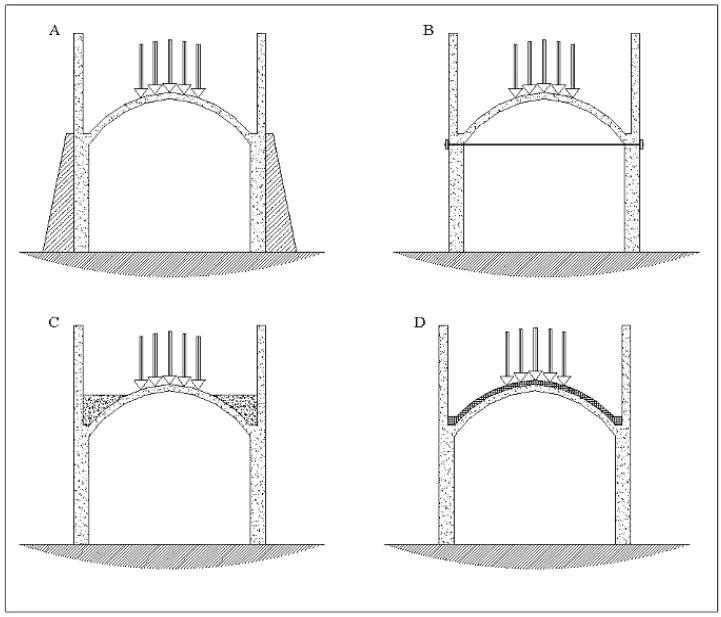


Immagine 6 *Tecniche di consolidamento di strutture voltate: (A) rinforzo dei piedritti,* (B) *utilizzo di catene di contrasto,* (E) *uso di rinfianchi, (D) aggiunta di cappa collaborante in cemento armato.*

5.5 PROPOSTA DI CONSOLIDAMENTO

La rinnovata sensibilità di questi ultimi anni per un approccio conservativo al restauro strutturale richiede ai progettisti nuove ed affidabili proposte di intervento e ciò ha ridestato un interesse per l'argomento che non è solo teorico. Ricerche storiche sui principali autori che nel passato si sono occupati del tema ed una interpretazione del comportamento di archi e volte in termini di calcolo a rottura hanno contribuito ad una ripresa di conoscenza sul tema.

Gli eventi sismici che a intervalli purtroppo frequenti interessano il patrimonio edilizio storico hanno evidenziato come interventi poco riguardosi del contesto possano portare ad un incremento della vulnerabilità, invece che ad una sua riduzione. Risulta necessario individuare e sperimentare tecniche in cui le nuove strutture si pongano *"in parallelo"* alle strutture esistenti, limitandosi a collaborare con queste senza sostituirle, e che assieme incrementino la resistenza e la duttilità globale, senza indesiderate modifiche nella distribuzione delle masse e delle rigidezze. Si può constatare dalle numerose prove realizzate in varie epoche e dalle osservazioni in situ che in fase di collasso le cerniere danno sempre luogo *a fessurazioni alternate* tra le fibre di estradosso e quelle di intradosso dell'arco. In altre parole i punti attorno a cui avvengono le rotazioni mutue rigide tra i vari segmenti di arco sono situati in modo alternato sulle fibre superioriesu quelle inferiori. (Si faccia riferimento all'immagine 7.) Se si fosse in grado, lungo lo sviluppo dell'arco, di impedire almeno una tra le due famiglie di cerniere (tutte quelle di estradosso oppure tutte quelle di intradosso) nella struttura non si potrebbe formare alcun meccanismo con cerniere alternate. La struttura, originariamente continua, potrebbe al massimo degradarsi ad "arco a tre cerniere", di cui due al piede, che staticamente è ancora efficiente. In altre parole la struttura non può diventare ipostatica e quindi non si arriva al collasso per cinematismo. La soluzione più semplice per ottenere questo risultato è rappresentata da *una armatura diffusa resistente a trazione*, ad esempio una membrana applicata su un lato della volta, all'estradosso (Immagine 7).

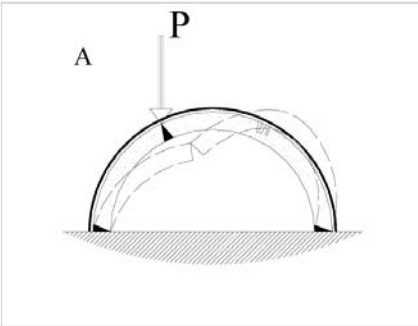


Immagine 7, Armatura posta all'estradosso, la struttura si comporta come un arco a tre cerniere

In secondo luogo, dai documenti progettuali è riscontrabile che alcuni dei tramezzi in laterizio presenti sia nello stato di fatto che nel progetto, gravano come muri in falso sulle volte in foglio. Considerando il peso non trascurabile, considerando che in alcuni casi sono muri su cui grava il peso di controsoffitti voltati in laterizio, considerando che gravano come carichi concentrati su una struttura di spessore limitato (volta in foglio), si predispone affinché il peso delle tramezzature venga trasferito alle murature portanti sgravando completamente le volte interessate. Per la tramezzatura trasversale esistente, si propone l'inserimento al piede di profili metallici, opportunamente dimensionati, in grado di riportare i carichi sulla muratura perimetrale e di spina. Per i muri di nuova costruzione previsti dal progetto, si propone di realizzarli utilizzando materiali leggeri e non invasivi come, ad esempio, pennellature lisce e continue di cartongesso. Per i muri esistenti paralleli al muro di spina (vedi tavole), si propone la realizzazione di una trave reticolare realizzata in fibra di carbonio (corrente superiore e diagonali) e acciaio (corrente inferiore) di altezza 3 metri circa, che sia in grado di "appendere" il pannello murario ai muri trasversali sottostanti che hanno una distanza di circa 8/10 metri. In questo modo viene eliminata una sollecitazione che, in caso di sisma, può mettere seriamente in crisi la stabilità della volta. Successivamente è possibile procedere al consolidamento delle strutture voltate.

TECNOLOGIA DEL CONSOLIDAMENTO

Alla luce delle considerazioni statiche e dei principi del restauro che si voglio applicare, l'intervento di consolidamento prevede l'utilizzo di tecnologie di rinforzo da applicare all'estradosso delle volte, che consentano di introdurre una

resistenza a trazione ma al contempo non modifichino le rigidezze, non alterino gli schemi statici e siano compatibili con i materiali esistenti, permettendo la traspirabilità dell'apperecchiatura muraria. Un intervento particolarmente innovativo che risponde a tutte le esigenze sopra citate è quello che prevede l'applicazione all'estradosso di un'armatura costituita da una rete in fibra di vetro, ancorata alla struttura con chiodi in rame e completata con una rasatura di 25/35 millimetri di spessore composta da cocciopesto, calce idraulica romana e grassello. La nuova frontiera dei metodi di rinforzo degli edifici storici, consente di abbandonare le matrici organiche normalmente utilizzate, proponendo matrici inorganiche (leganti idraulici) maggiormente compatibili sia dal punto di vista chimico sia elasto-meccanico" e rappresentano una valida alternativa alle normali applicazioni realizzate con interventi in fibra di carbonio. Il sistema si compone di una rete in fibra di vetro strutturale,resistente agli alcali, caratterizzata da una elevata resistenza a trazione (45 kN/m) e da un'ottima stabilità dimensionale. La rete è resistente agli agenti atmosferici, è totalmente immune "da fenomeni di corrosione, leggera, e maneggevole ed è inoltre facile da tagliare e da adattare alla conformazione del supporto. L' incollaggio avviene utilizzando una malta bicomponente a reattività pozzolanica a elevata duttilità e con basso modulo elastico. La malta, che può essere formulata con l'assistenza di un apposito laboratorio di ricerca, assicura un'ottima adesione a qualsiasi supporto in muratura così da formarne un corpo unico. La presenza di una notevole quantità di fibre di vetro disperse, inoltre,consente al prodotto un'elevata resistenza a flessione e un comportamento più duttile rispetto ad un normale legante idraulico. Il sistema di rinforzo così composto presenta una elevata duttilità e capacità di dissipazione dell'energia sismica, resistenza alle alte temperature e buona permeabilità al vapore. A differenza delle normali applicazioni con fibra di carbonio e resine epossidiche è applicabile su supporti umidi mantenendo comunque un ridotto spessore dell'intervento. Analizzando con attenzione i test di laboratorio, condotti presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale "DAPS" dell'Università "Federico Il" di Napoli, appare evidente la capacità di dissipazione dell'energia sismica. Utilizzando questo sistema di rinforzo le tensioni agenti sulle volte si disperdono ottenendo quindi, uno stato fessurativo diffuso anzichè la formazione di macro-fessure concentrate e quindi di cerniere. Dal punto di vista numerico inoltre, i test evidenziano anche un' incremento della T max (tensione tangenziale massima) che sfiora il 100% rispetto a quella di strutture senza rinforzo esterno. Ciò che è veramente significativo è l'incremento di duttilità che il pannello rinforzato manifesta, testimoniando così un'elevata capacità di deformazione senza perdita di carico portato. Queste due proprietà, incremento della resistenza tangenziale e della duttilità, soddisfano le indicazioni contenute in tutti i recenti documenti legislativi in materia sismica (OPCM 3274 e successivi), permettendo così di ottenere una conformità normativa totale del sistema di rinforzo. Le caratteristiche tecniche di questo sistema di rinforzo strutturale armato proposto, consentono semplicità e velocità di posa, la possibilità di modellare e adattare il rinforzo alle forme più complesse e un'elevata durabilità. Allo scopo di validare il "metodo della volta armata" è stata eseguita una campagna sperimentale su archi a tutto sesto diversamente caricati. Ricordiamo che il comportamento statico della volta è schematizzabile con quello dell'arco. La prova ha utilizzato modelli a scala ridotta, in legno, di luce netta 60 cm. Si è realizzato un arco in conci di legno, di luce 60 cm e spessore 6 cm, a cui sono stati applicati carichi di intensità crescente fino a rottura, modificando il punto di applicazione dei carichi stessi. Sono state eseguite una serie di 64 prove applicando carichi singoli in varie posizioni e carichi doppi simmetrici. Le fotografie illustrano il modello realizzato. Si è confrontata la risposta dell'arco semplice con quella dell'arco armato con rinforzo all'estradosso. Il rinforzo è costituito da una semplice nastro continuo, ossia una striscia di carta di spessore costante, appoggiata superiormente ai conci e solidale all'arco ai conci di estremità. Sono state eseguite numerose prove con due tipi di nastro, uno di resistenza a trazione 0,86 daN e l'altro con resistenza 1,74 daN. I risultati delle prove sono riassunti nella tabella A, utilizzando le notazioni della Immagine 8.

Notiamo che ogni valore riportato nella tabella rappresenta il valore medio di almeno due prove. L'angolo "alfa" che indica il punto di applicazione del carico viene misurato a partire dall'imposta dell'arco. I carichi di collasso sono espressi in daN. Nella tabella citata: (1) rappresenta il carico di collasso di un arco non armato; (2) rappresenta il carico di collasso di un arco armato con fibra di vetro estradossale, di resistenza a trazione 0,86 daN e solidale ai soli conci estremi dell'arco; (3) è analogo a (2), ma con fibra di vetro estradossale solidale ad ogni concio dell'arco; (4) è analogo a (2), ma con fibra di vetro estradossale di resistenza a trazione 1,74 daN .

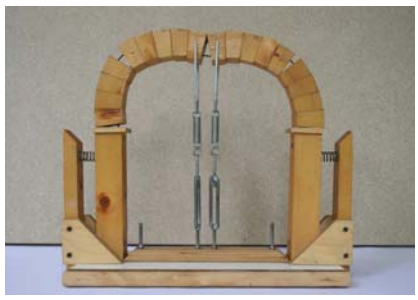


Tabella A

	Carico P di collasso in funzione del punto di applicazione del carico (un solo carico P concentrato)						
	alfa = 90	alfa =105	alfa =115	alfa=125	alfa=135	alfa=145	
arco semplice (1)	0,22	0,22	0,23	0,33	0,51	0,95	
arco armato (2)	1,61	1,71	1,48	1,65	1,97	2,43	
arco armato (3)	2,16	2,22	2,12	2,27	2,60		
arco armato (4)	3,05	3,10	3,04	3,15	3,04	3,40	
P(4) / P (1)	**13,86**	**14,09**	**13,21**	**9,54**	**5,96**	**3,58**	
	Carico P di collasso in funzione del punto di applicazione del carico (due carichi P simmetrici e concentrati)						
	alfa = 90	alfa =105	alfa =115	alfa=125			
arco semplice (1)	0,11	0,16	0,22	0,60			
arco armato (2)	0,80	0,97	1,30	3,40			
arco armato (4)	1,53	2,07	2,65	5,80			
P(4) / P (1)	**13,86**	**12,94**	**12,04**	**9,67**			

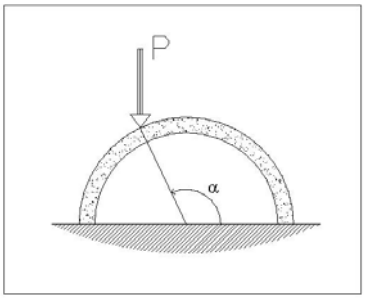


Immagine 8

Malgrado la ridotta resistenza dei nastri di rinforzo utilizzati, l'incremento del carico di collasso risulta ragguardevole soprattutto quando i carichi vengano applicati nella parte centrale dell'arco. Il rapporto P(4)/P(1), tra arco armato e arco semplice, varia infatti da 3,58 a 14,09 ad illustrazione dei notevoli vantaggi ottenuti. Notiamo anche che al raddoppiare della resistenza del rinforzo si ottiene un proporzionale incremento del carico limite.

Il rapporto P(4)/P(2) risulta circa pari a 2, in tutte le prove. Nel corso delle prove di tipo (2) si è osservata una forte deformabilità della struttura prima di giungere al crollo, con fenomeni di scorrimento del nastro di rinforzo nei confronti dei conci. Nelle prove di tipo (3), in cui il nastro è stato solidarizzato ad ogni singolo concio in modo da impedire scorrimenti, i risultati evidenziano un ulteriore miglioramento del 35% circa. Dalle prove sperimentali eseguite e dalle osservazioni formulate la tecnica della *volta armata* qui proposta appare decisamente promettente e di semplice utilizzo, con considerevoli incrementi di resistenza e di duttilità nei confronti della volta semplice e con risposte simili a quelle ottenute con la più tradizionale tecnica della cappa in c.a. La sua applicazione in zone caratterizzate da eventi sismici appare pertanto interessante, soprattutto tenendo in conto il trascurabile incremento delle masse in gioco.