

Volte di laterizio in folio: una tecnica di consolidamento

Natale GUCCI - Anna DE FALCO - Marco CINOTTI

INTRODUZIONE

Le volte sono costruzioni in pietre che l'arte ha immaginato per supplire ai soffitti ed alle coperture in legno, onde rendere gli edifici più durevoli e guarentirli dagl'incendi.

[...] Colla parola volta s'intende una costruzione composta di molte pietre di taglio, pietrami, mattoni od altre materie modellate, disposte o riunite in modo da sostenersi per coprire uno spazio (Giovanni Rondelet, "Trattato dell'arte di edificare" Tomo II, I parte Libro III "Stereotomia" Sezione III "Costruzione ed apparecchio delle volte piane", 1831).

Nell'edilizia del passato ancora in uso i piani delle abitazioni sono spesso costituiti da volte sottili in laterizio, costruite con mezzane *in folio* disposte a spinapesce o a filari longitudinali paralleli ai muri di imposta. Il gesso, utilizzato per la rapidità della presa, garantiva il celere avanzamento della costruzione senza l'ausilio di centine complete.

Le volte a padiglione ribassato, dette "a specchio", erano spesso completate all'estradosso da frenelli, lunette o unghie, anch'esse costruite *in folio*, che, avvicinandosi alla quota del pavimento, riducevano il peso del riempimento e contribuivano alla statica con la loro rigidità.

Nell'edilizia attuale questa tecnica non trova più applicazioni, che sono invece riscontrabili molto frequentemente fino alla Seconda Guerra Mondiale, ma è sostituita dai solai a intradosso piano che comportano tecniche costruttive più semplici ed economiche con minori ingombri e senza spinte.

Le volte in laterizio, nelle numerose varietà tipologiche spesso molto ardite, rappresentano quindi una fondamentale componente dell'edilizia storica tuttora in uso e destano ammirazione per la loro perfezione tecnica, rivelandosi degne di conservazione e adeguamento alle attuali necessità in termini di impiego e di sicurezza.

Questo lavoro vuol dare un contributo all'utilizzo sicuro di questo particolare patrimonio edilizio, rendendolo anche idoneo a carichi concentrati o eccentrici e non vulnerabile dagli effetti dell'acqua sul gesso di connessione. A tale scopo viene qui presentata una tecnica, per molti aspetti innovativa, applicata ad un caso specifico di recente attuazione.

Si analizza inizialmente la funzione statica dei diversi elementi costruttivi componenti la volta e, successivamente, si valuta, in termini quantitativi, il miglioramento statico apportato dall'intervento di rinforzo sia alla volta stessa, sia alle pareti di imposta sia al comportamento scatolare dell'edificio.

LA VOLTA: ANALISI STATICA

L'evoluzione storica di questo modo di costruire si basa sull'inventiva e sull'empirismo, cioè sul

processo di osservazione e meditazione che conduce alla percezione del funzionamento di ideazioni originali. Gli studi di Leonardo e le considerazioni di carattere empirico dei costruttori di cattedrali gotiche hanno preceduto lo sviluppo delle teorie statiche sugli archi e sulle volte, che caratterizzarono il panorama scientifico a partire dal XVIII secolo, quando gli scienziati analizzarono le configurazioni di collasso e introdussero le tecniche di calcolo.

Eppure tali teorie tardarono a influenzare le tecniche costruttive che continuarono sempre e comunque a basarsi sulle buone regole dell'arte.

L'intuito dei costruttori che, anche senza il ricorso al calcolo, è sempre stato alla base di grandi opere, si evidenzia anche nell'esempio studiato che rappresenta una tipologia molto diffusa nell'edilizia abitativa del passato.

Il caso in esame consta di una volta a specchio di mattoni in folio di un edificio ottocentesco situato a Pisa, nato per residenza e recentemente destinato a ristorante. Costruita su pianta rettangolare di 5 m x 4,65 m, la volta è composta da un padiglione ribassato di mezzane in folio con due rotoli di mezzane disposte di coltello lungo gli assi principali, otto lunette in folio laterali per raggiungere la quota del pavimento e due unghie, sempre di mezzane in folio, alle due estremità del padiglione che proseguono la sagoma trasversale della volta. Il pavimento soprastante poggia su un riempimento incoerente versato sui vani generati dalle lunette e dalle unghie (figg. 1, 2 e 3).

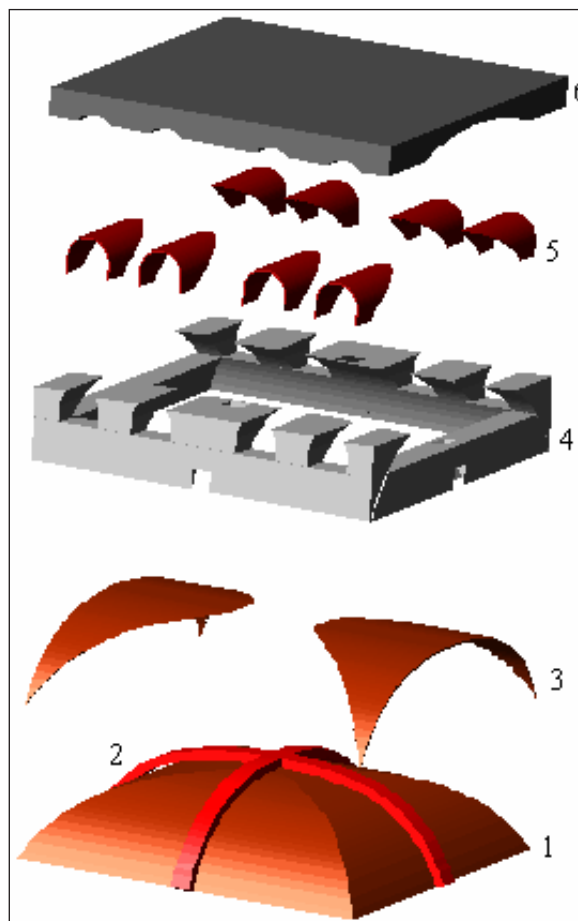


Fig. 1 - Geometria della volta:
1) padiglione; 2) rotoli; 3) unghie; 4) rinfianco di materiale debolmente legato; 5) lunette; 6) riempimento di materiale incoerente.

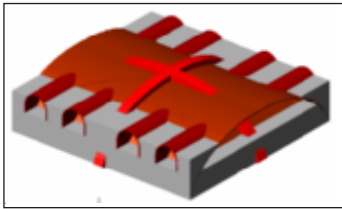


Fig. 2 - Composizione della volta di laterizio.



Fig. 3 - L'estradosso durante lo smontaggio delle lunette.

Le debolezze comuni a tale tipologia sono: la scarsa sismoresistenza (non solo perchè spingente, ma anche per la mancata capacità dell'orizzontamento a costituire un diaframma rigido nel proprio piano), la limitata attitudine a far fronte ai carichi concentrati o asimmetrici, la sensibilità ai cedimenti differenziali, il degrado del gesso che si rammollisce se a contatto con l'acqua (perdite idrauliche, un tempo trascurabili).

Prima di analizzare il reale comportamento statico dell'assieme, si sono effettuate analisi immaginando la volta priva via via dei suoi elementi di completamento, ciò solo allo scopo di giudicare la completezza della concezione, certamente frutto di ingegno ed esperienza combinati nel tempo e coerente con i canoni estetici. Si è potuto osservare a questo proposito che la risposta statica è molto simile a quella di una volta a botte con lunette trasversali, mentre la forma dell'intradosso esibisce doppia simmetria.

Sono state quindi condotte analisi agli elementi finiti con modelli diversi che simulano, in ordine, la volta idealmente costituita dal solo padiglione, la volta a padiglione dotata di rotoli, la volta a padiglione con rotoli e rinfianco sui lati principali e, infine, la volta nella configurazione completa.

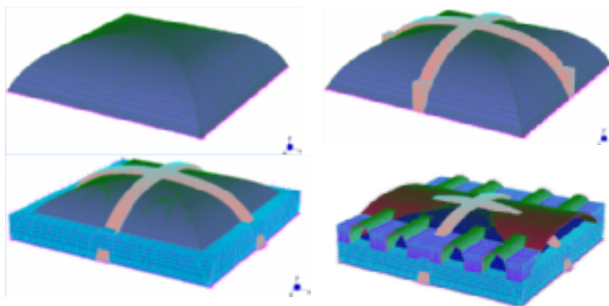


Fig. 4 - Modelli utilizzati nel calcolo

L'analisi è stata condotta con il programma di calcolo agli elementi finiti Straus 7 utilizzando elementi piani a quattro nodi per la volta ed elementi solidi a otto nodi per gli archi. Il materiale è stato modellato omogeneo, isotropo e a comportamento elastico lineare; le caratteristiche fisiche e meccaniche sono state assunte sulla base di quelle dei materiali componenti tramite un'analisi a strati elastici. I valori usati nel calcolo sono

- $\gamma_m = 1800 \text{ daN/m}^3$ peso di volume della muratura
- $\gamma_r = 1600 \text{ daN/m}^3$ peso di volume del rinfianco
- $E_{mf} = 1900 \text{ Mpa}$ modulo elastico della muratura in folio
- $E_{mr} = 2200 \text{ Mpa}$ modulo elastico dei rotoli
- $\nu_m = 0,15$ coefficiente di Poisson della muratura

Il solo padiglione è stato studiato con un modello di 5940 elementi shell e 5929 nodi, con vincoli alla base che impediscono le traslazioni.

In presenza dei soli carichi permanenti (costituiti dal riempimento di estradosso, di cui si trascura il contributo di rigidità, e dal pavimento, per un totale di circa 160 kN) la modellazione mostra

che l'equilibrio potrebbe aversi soltanto con trazioni irrealizzabili, localizzate sugli spigoli all'estradosso e, all'intradosso, in fasce longitudinali comprese tra le imposte e le reni. Il padiglione, da solo, risulta pertanto assolutamente non idoneo a realizzare la struttura..

Nel modello successivo, costituito da 5940 elementi piani, 1840 elementi solidi e 8366 nodi, sono presenti anche i rotoli, che terminano con rinfianco a forma di sperone e sono connessi alla parete in modo unilatero.

Sotto i carichi permanenti, il comportamento tensionale ipotetico del padiglione nervato appare sostanzialmente analogo a quello del padiglione semplice, salvo minore estensione delle zone in trazione.

Il modello che schematizza il padiglione con rotoli e rinfianco, è composto da 6448 elementi piani e 6360 elementi solidi, con vincoli sul contorno di tipo unilatero. In presenza di solo carico permanente, l'analisi evidenzia la possibilità di equilibrio per l'assenza di trazioni; ciò però non accade quando si aggiungono i sovraccarichi.

Il modello finale che simula la volta reale (padiglione, rotoli, rinfianco, lunette e unghie), composto di 16216 elementi piani e 16772 elementi solidi, mette in evidenza che la struttura è interamente compressa sotto l'effetto dei carichi permanenti e accidentali uniformi fino a circa 250 daN/m². Nelle figure 5 e 6 è mostrato lo stato tensionale all'estradosso e all'intradosso del padiglione in presenza di un carico accidentale uniformemente distribuito di 200 daN/m².

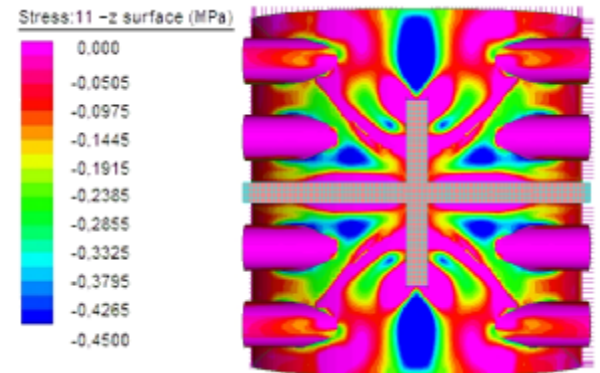


Fig. 5 - Tensioni principali massime all'estradosso con 200 daN/m² di carico accidentale.

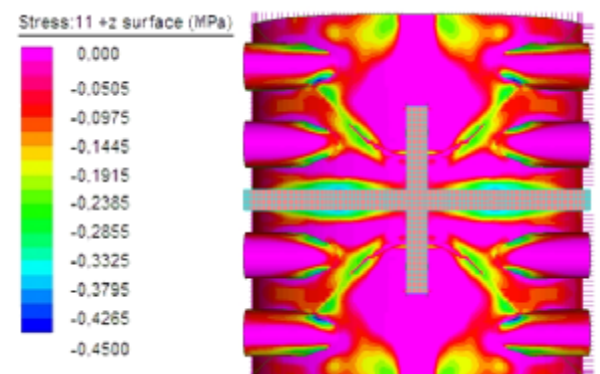


Fig. 6 - Idem all'intradosso [negativo = compressione].

Ciò conferma la capacità di questa vecchia struttura ad assolvere il suo ruolo, mostrando carichi ammissibili uniformemente distribuiti di entità più che sufficiente, che, peraltro, si riducono sensibilmente quando la distribuzione non è uniforme o i carichi sono concentrati.

I risultati delle quattro modellazioni mostrano l'importanza del rinfianco, delle lunette e delle unghie, il solo padiglione nervato, non sarebbe infatti in grado di far fronte neppure al carico relativo al peso proprio e a quello del riempimento di estradosso.

Le lunette e le unghie di estremità producono un sensibile alleggerimento della struttura (circa 80 kN di riempimento passivo), con conseguente abbassamento dei valori di tensione e svolgono, al contempo, un'importante funzione statica. Le lunette costituiscono infatti una sorta di rinfianco cavo: sotto l'effetto dei carichi risultano compresse. Le unghie di estremità, a loro volta, coprono le teste del padiglione che, dunque, spingono così solo sui muri laterali, limitando in tal modo l'azione sulle pareti di testa al solo debole effetto del peso proprio del padiglione.

IL RINFORZO

L'evidente quadro fessurativo all'intradosso della volta, associato ad avvallamenti del pavimento soprastante e alla caduta di frammenti, ha motivato un intervento di rinforzo, in vista anche della nuova destinazione a sala ristorante del locale superiore (figg. 7 e 8).

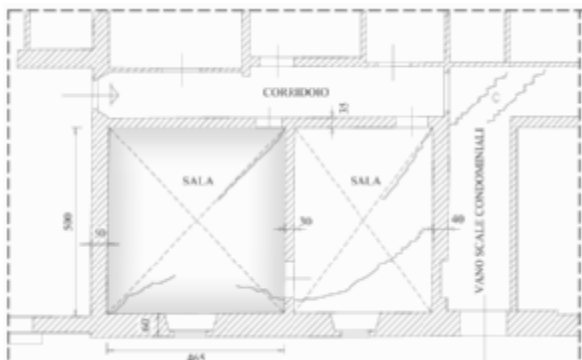


Fig. 7 - Pianta della volta con il quadro fessurativo all'intradosso.

La tecnica messa a punto (figg. 9, 10, 11) prevede il restauro della struttura esistente, che, rinforzata all'estradosso con GFRP, viene destinata ai soli carichi permanenti, mentre i carichi accidentali e la pavimentazione sono sostenuti da una struttura in c.a. che prende il posto del materiale incoerente a contatto con il pavimento. Si conferisce cioè resistenza a una sorta di "calco" in c.a. che sostituisce, a parità di peso (calcestruzzo di argilla espansa), il materiale incoerente di riempimento compreso tra l'estradosso della volta e il pavimento. Questa struttura, vincolata alle pareti perimetrali, genera anche un rigido diaframma che assicura connessione in caso di sisma.



Fig. 9 - Dopo l'asportazione del pavimento e del materiale di riempimento, vengono smontate le lunette e le unghie di estremità.



Fig. 8 - Una fessura all'intradosso.



Fig. 10 - L'estradosso del padiglione messo a nudo viene rinforzato con GFRP così come pure l'estradosso delle lunette e delle unghie, una volta rimontate.



Fig. 11 - L'estradosso della volta è rivestito dallo strato soffice in attesa del getto.

Il calco in c.a. e l'estradosso della volta restaurata sono a contatto tramite uno strato soffice, realizzato con materiale per imballaggi, su cui riposa il getto caricando la volta. A maturazione avvenuta, il c.a. sostiene i carichi di esercizio, con deformazioni consentite dalla rimanente deformabilità dello strato soffice in modo da insistere poco sulla volta; tali carichi possono così anche essere concentrati o eccentrici.

In particolare, lo scopo è quello di affidare alla volta rinforzata il peso del getto e, una volta terminata la presa, di poter contare sul calcestruzzo armato per far fronte ai carichi del pavimento e a quelli accidentali. Lo strato soffice ha il compito di

limitare l'aliquota dei carichi accidentali sulla volta, pur soggetta al peso del calcestruzzo e in altri casi, in assenza di FRP, di proteggere la vecchia volta dalle infiltrazioni di acqua, compresa quella del getto. Inoltre l'uso di membrane permeabili al solo vapore (ad esempio Goretex) consentirebbe soluzioni capaci di mantenere le condizioni igrometriche necessarie anche alla conservazione di affreschi all'intradosso.

Il calco in c.a. deve essere incastrato alle muraure circostanti vincolando le armature alla muratura.

Le sezioni trasversali significative per il confronto delle situazioni prima e dopo l'intervento sono mostrate nelle figure 12 e 13: in rosso è indicato lo strato di GFRP utilizzato per restituire compattezza alla volta e in azzurro lo strato sofficce.

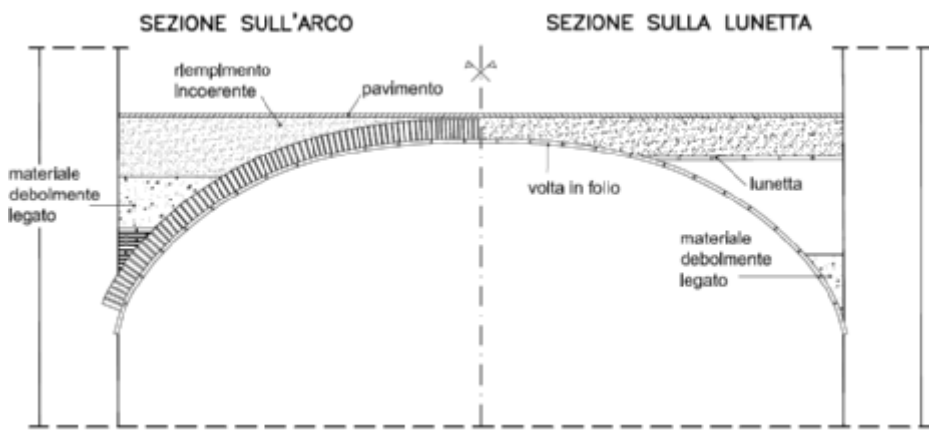


Fig. 12 - Sezione trasversale della volta prima dell'intervento.



Fig. 13 - Sezione trasversale della volta dopo l'intervento.

La modellazione della tecnica di rinforzo si articola in due fasi, sovrapponendo poi i risultati: la fase di getto, in cui si analizza la volta con lo strato sofficce, gravata dal peso proprio e da quello del getto (fig. 14), e la fase di esercizio in cui è l'intera struttura ad essere gravata dal carico del pavimento e da un carico accidentale distribuito di 500 daN/m² (fig. 15). La sovrapposizione tra la volta e il calco con il materassino è modellata con elementi monodimensionali non resistenti a trazione.

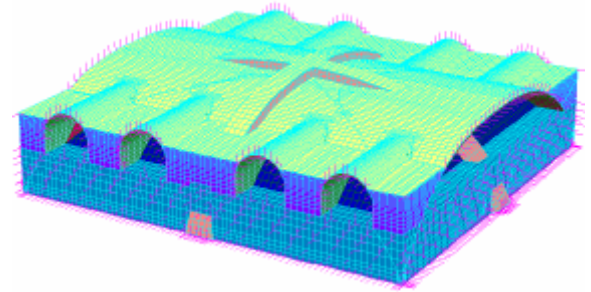


Fig. 14 - Prima fase di calcolo: antica volta consolidata con FRP in fase di getto.

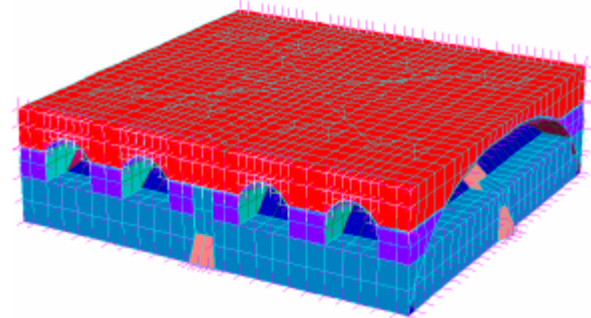


Fig. 15 - Seconda fase di calcolo: intera struttura in fase di esercizio.

L'analisi è stata condotta per diversi valori di deformabilità dello strato sofficce, allo scopo di valutarne l'effetto in relazione alla ripartizione dell'impegno statico fra volta e calco armato.

Risulta che quando il modulo di elasticità è pari a quello del calcestruzzo, l'aliquota del carico accidentale trasferito alla volta raggiunge il massimo, pari a circa il 7%.

Nelle figure 16 e 17 sono mostrate le tensioni principali massime sull'estradosso e sull'intradosso del padiglione di laterizio in presenza di un carico accidentale uniformemente distribuito sulla volta rinforzata di 500 daN/m².

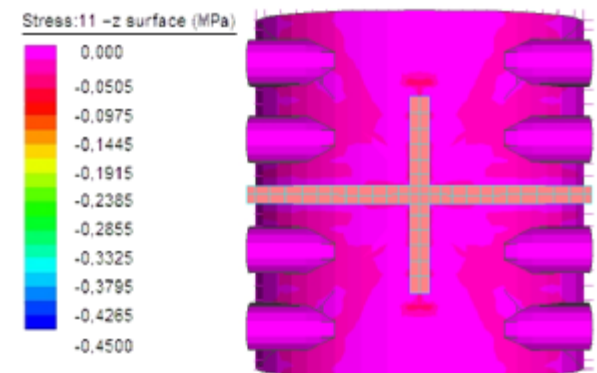


Fig. 16 - Tensioni principali massime sull'estradosso della volta con 500 daN/m² di carico accidentale.

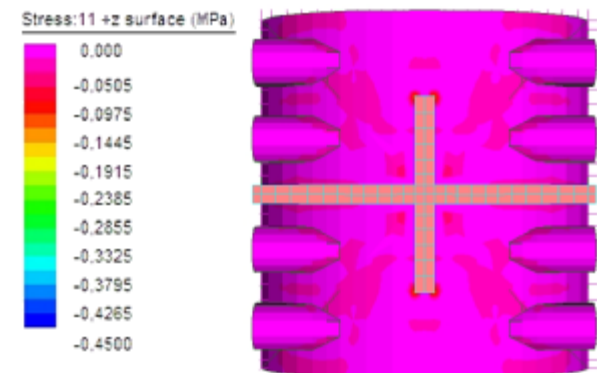


Fig. 17 - Idem sull'intradosso [negativo = compressione]

A una maggiore deformabilità corrisponde una riduzione del trasferimento alla volta. Anche se la deformabilità del collegamento fosse infinita o lo strato soffice venisse meno con il tempo, la volta consolidata rimarrebbe ancora stabile perché mantenuta sempre in forza dal suo peso perché comunque svincolata dal soprastante c.a.. Il conseguente maggior impegno del calco, che in tal caso verrebbe a sostenere anche il suo peso, sarebbe comunque ancora ampiamente ammissibile.

Per verificare infine l'effetto dell'intervento di rinforzo sul regime statico delle pareti perimetrali su cui si imposta la volta, è stato costruito un modello che simula il comportamento del complesso volta-pareti sottostanti, gravato dal carico proveniente dai piani superiori (fig. 18).

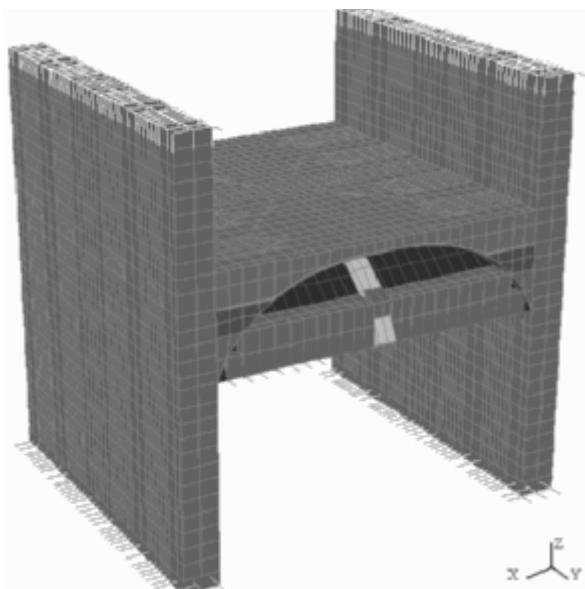


Fig. 18 - Il modello del complesso volta-pareti.

Poiché la rigidezza delle pareti di imposta influenza sostanzialmente l'entità degli spostamenti orizzontali consentiti alla struttura voltata, quindi anche l'entità della spinta esercitata da questa, è stato tracciato l'andamento della curva delle pressioni per diversi valori di rigidezza delle pareti (fig. 19). In figura 20 è mostrato l'andamento della spinta orizzontale del calco al variare del modulo elastico di queste, per due diversi valori della rigidezza dello strato soffice.

Fig. 19 - La curva delle pressioni nello spessore delle pareti per diverse rigidezze del materiale (E_b) con rigidezza dello strato soffice di 1 MPa.

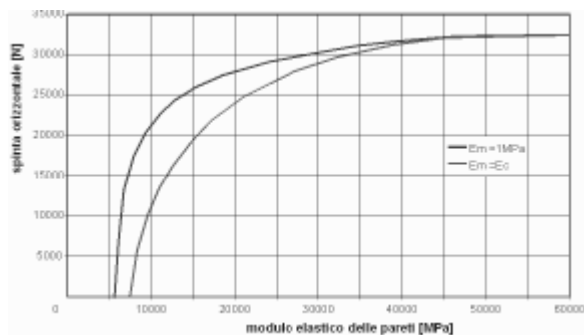
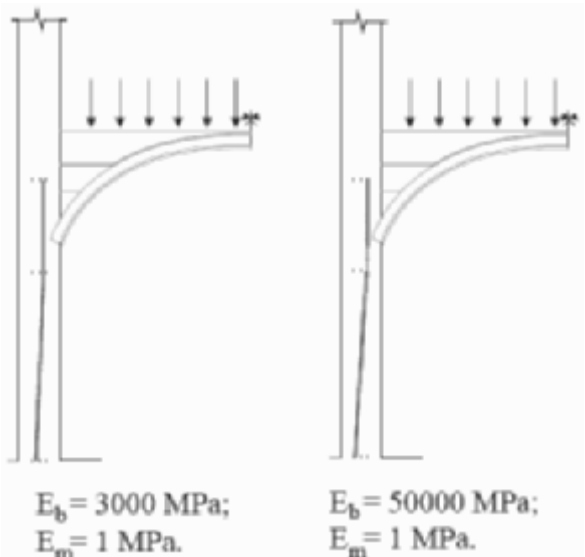


Fig. 20 - Spinta del calco in funzione del modulo elastico delle pareti per due valori di rigidezza dello strato soffice.

Si può osservare come la spinta risulti sensibile alla deformabilità delle pareti, riducendosi quando queste tendono a cedere e divenendo insensibile alla loro rigidezza solo per valori improbabili del modulo elastico (oltre 400.000 daN/cm^2).

Gli effetti della deformabilità dello strato soffice sulle azioni orizzontali che il sistema trasmette alle pareti si possono così sintetizzare: la spinta totale diminuisce con l'aumentare della rigidezza dello strato perché aumenta l'impegno della volta di laterizio sottostante: questa ha infatti una geometria meno spingente del calco e la risultante delle spinte si abbassa. Ne consegue che l'eccentricità alla base si riduce con la deformabilità dello strato soffice a vantaggio della stabilità delle pareti. In sintesi, strati più soffici alleviano l'impegno della vecchia volta a scapito di quello delle pareti. Tali effetti non hanno influenza rilevante sulla sicurezza del sistema combinato nella fattispecie, ma non sono impossibili situazioni più severe in interventi dello stesso tipo effettuati in contesti diversi.

Nel caso specifico, il carico stabilizzante relativo ai due piani soprastanti e alla copertura fa comunque sì che, qualunque sia il modulo elastico del materiale costituente le pareti, la curva delle pressioni sia sempre contenuta all'interno del terzo medio delle sezioni trasversali di queste.

Questa tecnica di rinforzo è dunque applicabile in casi analoghi su orizzontamenti voltati, ad esclusione di quelli degli ultimi piani degli edifici.

CONCLUSIONE

Il rinforzo delle volte di laterizio in folio rappresenta un problema che frequentemente si presenta nella pratica degli interventi sull'ampio patrimonio edilizio storico italiano.

L'esempio di applicazione di una tecnica in parte originale che qui si descrive può costituire una guida per gli operatori del settore specialmente quando si dia la necessità di non toccare l'intradosso.

Oltre allo studio del funzionamento statico di queste strutture e alla descrizione dell'intervento (che costituisce il miglioramento di un componente dell'edificio) e del nuovo funzionamento statico dell'orizzontamento, si avanzano osservazioni rivolte a guidare l'applicazione della tecnica nella generalità dei casi.

Si mostra che si può aumentare la capacità portante oltre il doppio di quella originale (senza surrogare totalmente il ruolo della volta) e rendere la struttura comunque sicura e idonea per carichi eccentrici o concentrati, contemporaneamente realizzando un diaframma che favorisce in ogni caso la sismoresistenza della costruzione. Tutto ciò operando soltanto dall'alto, senza alcun aumento di peso e senza modifiche alla geometria.

Natale GUCCI, ordinario nell'Università di Pisa, di "Diagnostica e Consolidamento", ingegnere civile dall'a.a. 1958/59, autore di numerosi e originali studi in tema di costruzioni metalliche (fra cui l'attraversamento dello Stretto di Messina con gallerie alvee), di costruzioni in muratura storiche e nuove, di tecniche per la sperimentazione delle costruzioni; progettista di interventi di consolidamento su costruzioni storiche e monumentali spesso attuati con criteri e tecniche innovativi, è stato il primo direttore del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa.

Anna DE FALCO, nata a Grosseto nel '67 si è laureata in Ingegneria Civile nel 1996 a Pisa, dove attualmente vive e lavora. Dottore di Ricerca in "Storia delle Scienze e delle Tecniche Costruttive", fa ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa nel campo della Tecnica delle Costruzioni, occupandosi prevalentemente della diagnostica e del consolidamento degli edifici storici.

Marco CINOTTI, nato a San Marcello P.se nel 1980, si è laureato in Ingegneria delle Costruzioni Civili presso l'Università di Pisa nel 2006, attualmente lavora a Pisa come libero professionista occupandosi di progettazione strutturale, direzione lavori e sicurezza in cantieri pubblici e privati.