

LA RISCOPERTA DEL METODO DELLE “GRAFFETTE” PER IL CONSOLIDAMENTO DI ARCHI E VOLTE

RE-DESCOVERING A CONSOLIDATION TECHNIQUE FOR ARCHES AND VAULTS: THE “NEW CLAMP” METHOD

Lorenzo Jurina
Politecnico di Milano
Dipartimento di Ingegneria Strutturale-DIS
Milano, Italia
lorenzo.jurina@polimi.it
www.jurina.it

ABSTRACT

A way of consolidating arches and vaults is the so called “NEW CLAMP“ method that works very well in case of strong horizontal forces applied to the abutments.

This method dates back to the past, when an iron clamp was adopted on the extrados of arches and vaults. The clamp was composed by an horizontal element (usually a cable) and two inclined ties, tangent to the arch, inserted in the abutments. The system was not effective due to the lack of stiffness of the horizontal cable. Substituting the cable with a rigid beam makes the method very effective, acting as an active method.

In these last years the “new clamp method” or “Graffetta method” has been applied in the consolidation of several historical building, as the Dome of Cremona and the Castle of Manta. Among the benefits to be added to the structural efficiency, we have to mention minimal invasiveness, respect of the historical heritage, good aesthetic and easy execution.

SOMMARIO

L’articolo propone una tecnica per il consolidamento di archi e volte i cui problemi strutturali derivano principalmente da eccessive spinte orizzontali sui piedritti di sostegno.

Si tratta di un metodo, già anticipato in costruzioni del passato, il quale prevede la creazione di un “morsetto metallico” estradossale all’arco (o volta), composto da un elemento orizzontale (una trave metallica) e da due tiranti laterali inclinati, inseriti nella muratura delle imposte ed in grado di contenere le spinte. Il sistema non funziona a meno che non si renda sufficientemente rigido l’elemento orizzontale, così da consentirgli di contrastare, senza inflettersi, il tiro delle due diagonali.

Gli studi sul tema e recenti realizzazioni hanno dimostrato che si tratta di una tecnica molto efficace e soprattutto una tecnica “attiva”.

Negli ultimi anni la tecnica è stata riproposta con il nome di “metodo delle graffette” ed è stata applicata dall’autore nel consolidamento di numerosi edifici storici, tra cui il Duomo di Cremona ed il Castello della Manta.

Tra i vantaggi, oltre all’efficacia strutturale, sono da citare la ridotta invasività nel rispetto della materia storica esistente, la buona resa estetica e la facilità di esecuzione.

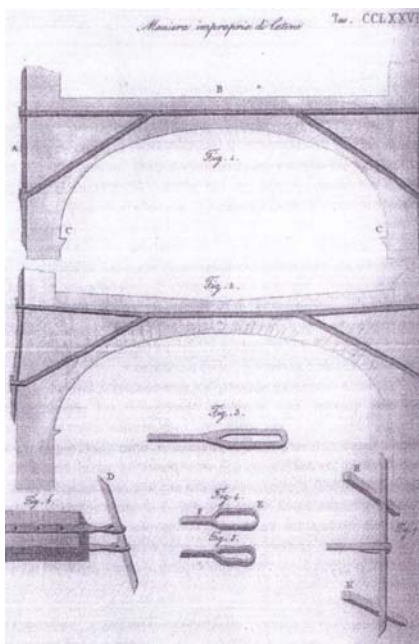
1 INTRODUZIONE

Le strutture ad arco e le strutture a volta, come è noto, scaricano sui loro sostegni non solo le azioni verticali gravitazionali, ma anche spinte orizzontali.

Gli elementi portanti di sostegno, a seconda dei casi, possono essere pilastri o pareti che, a causa dei vincoli geometrici imposti dalla natura degli edifici, si configurano generalmente come elementi snelli lungo la direzione di scarico dell'arco. I sostegni, dunque, si comportano come mensole incastrate alla base e caricate all'estremo libero da un'azione sollecitante scomponibile in due forze, l'una diretta verticalmente, l'altra in orizzontale. Pilastri e pareti, nelle strutture di nostro interesse, sono generalmente elementi snelli realizzati in laterizio o in pietra, materiali caratterizzati da un basso modulo elastico e da limitata resistenza a trazione. Di conseguenza i sostegni delle strutture ad arco o voltate offrono generalmente una scarsa rigidità nei confronti delle traslazioni orizzontali. Gli spostamenti in orizzontale delle sommità di pilastri e pareti, ovvero dei punti d'imposta degli archi e delle volte, hanno evidentemente effetti molto negativi, dato che favoriscono il collasso delle strutture tramite la formazione di cinematismi a 4 cerniere (di cui 2 in corrispondenza degli appoggi dell'arco, 1 in posizione mediana ed almeno 1 alla base del pilastro).

Nel caso di archi e volte che presentino un dissesto statico riconducibile alla traslazione nel piano dei loro punti d'appoggio, il consolidamento deve prevedere l'arresto di tale meccanismo tramite l'imposizione di un adeguato sistema di confinamento. Il consolidamento deve quindi mettere in opera elementi che impediscano l'allontanamento reciproco dei piedritti posti a sostegno dell'arco. L'obiettivo è infatti quello di annullare le spinte orizzontali sui tali elementi in modo da avere pilastri e pareti non più presso inflessi, ma soggetti a semplice compressione.

La soluzione più immediata, di facile realizzazione e di sicura efficacia, è l'inserimento di catene intradossali (usualmente metalliche, ma in passato anche lignee) resistenti a trazione e poste a collegamento dei punti d'imposta dell'arco. Questo tipo d'intervento, strutturalmente efficiente, può risultare talora non praticabile per le conseguenze estetiche, e per la fruibilità degli ambienti, che in taluni casi può venire compromessa. L'obiettivo di consentire l'utilizzo degli ambienti può essere parzialmente risolto alzando la quota di posizionamento delle catene, ma questa soluzione non è adeguata dal punto di vista strutturale in quanto non elimina completamente le sollecitazioni flessionali che insistono sui piedritti.



Antesignano del metodo delle graffette è l'uso delle cosiddette "catene a braga" [2] e [3]. Si tratta di una catena orizzontale posta all'estradosso dell'arco, a cui sono fissate, con semplici perni, due saette diagonali. Le estremità della catena orizzontale e della saetta diagonale fuoriescono dalla muratura e sono tra loro collegate da un lungo capochiave "a paletto", che fornisce il contrasto, distribuendo i carichi sulla muratura. La forzatura viene esercitata con una soluzione classica, utilizzando cunei in ferro di bloccaggio, dopo aver riscaldato le catene per indurre un allungamento.

Il sistema ha una efficacia limitata, in quanto la catena orizzontale, molto deformabile, si inflette e non è in grado di offrire contrasto alle saette diagonali.

Il sistema inizia a funzionare solo quando la catena si è in flessa tanto da resistere ad ulteriori sollecitazioni verticali per "effetto catenaria".

Fig. 1: Consolidamento con sistema di "catena a braga"

2 IL METODO DELLE “GRAFFETTE”

Una soluzione alternativa all'uso delle catene intradossali è la tecnica delle “graffette”.

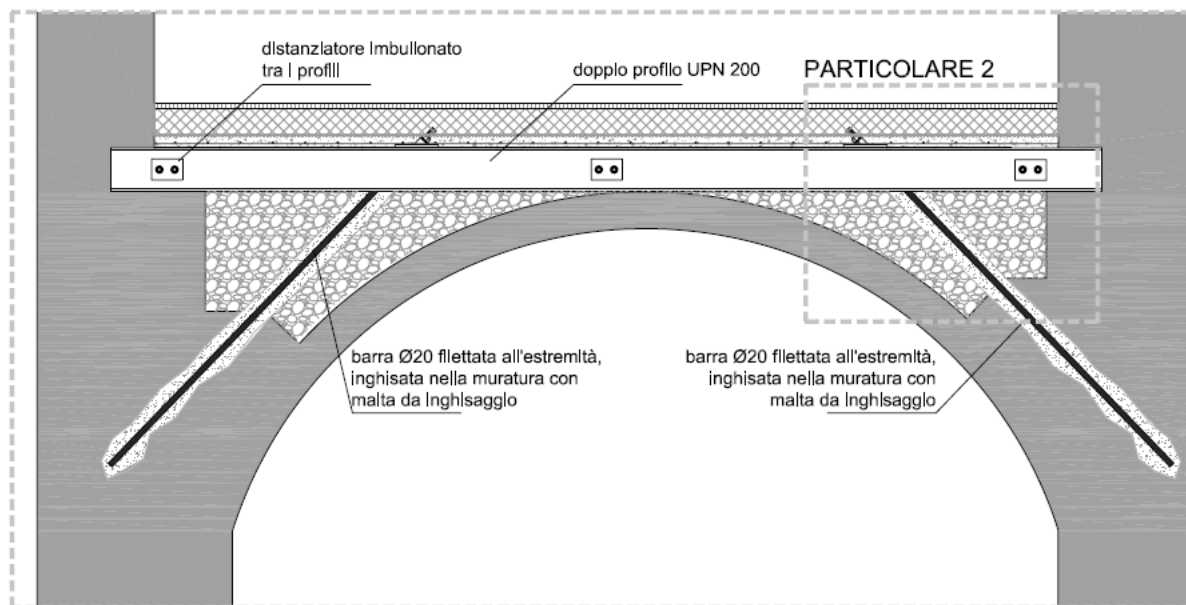
Il sistema è essenzialmente composto da tre elementi:

- una trave, collocata all'estradosso della volta da consolidare, con i due appoggi in corrispondenza dei piedritti di sostegno dell'arco/volta;
- due tiranti simmetrici e diagonali che partono dalla trave e raggiungono i due punti d'imposta dell'arco, fissati con malte da inghisaggio e post-tesati in modo da annullare la spinta orizzontale.

Nel sistema mostrato in figura, i tiranti inclinati sono inghisati nella muratura ad una estremità, mentre nel punto di collegamento con la trave è inserita una piastra di contrasto e un dado di tensionamento, che consente di mettere in trazione il tirante.

La tesatura del tirante comporta le seguenti conseguenze statiche:

- i tiranti vengono posti in trazione;
- la trave estradosale risulta assoggettata a flessione (due carichi concentrati) e, nella parte centrale, risulta tesa;
- le porzioni murarie comprese tra i punti d'appoggio della trave e i punti d'inghisaggio dei tiranti vengono assoggettate ad un carico di compressione aggiuntivo;
- la spinta divaricante esercitata dall'arco viene in tutto o in parte eliminata, in dipendenza del tiro applicato ai tiranti diagonali.



SEZIONE AA': Consolidamento mediante il metodo delle "GRAFFETTE". I tiranti inclinati sono inghisati nella muratura ad una estremità, mentre una piastra di contrasto dotata di dado di tensionamento li collega alla trave estradosale. Il sistema di post-tensione dei tiranti consente di rendere il sistema attivo.

scala 1:20

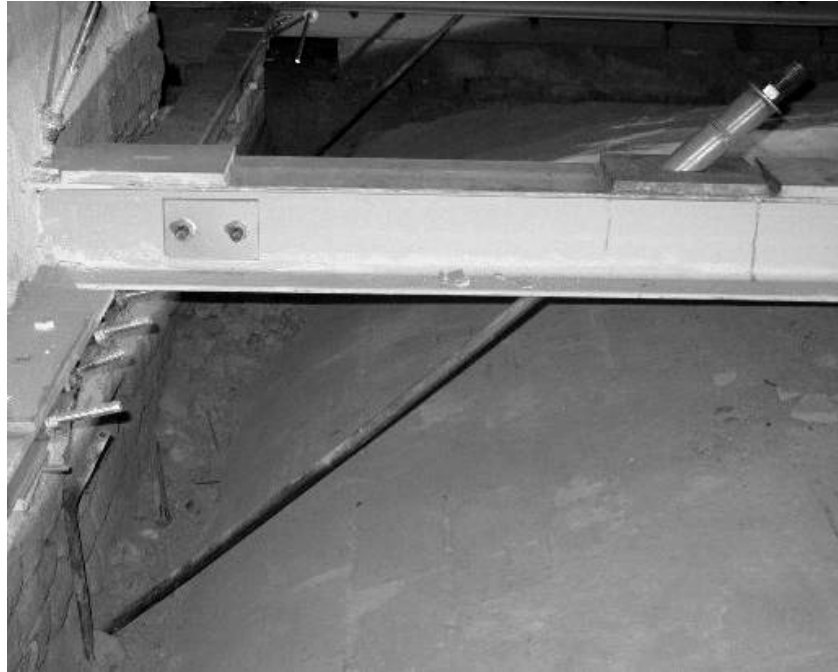


Fig. 2: Consolidamento con sistema a “graffette”: schema statico ed esempio di un nodo tirante-trave

In particolare, definita H la spinta orizzontale del sistema voltato ed α l’inclinazione del tirante rispetto all’orizzontale, il consolidamento ottimale è ottenuto per una tensione nel tirante

$$T=H/\cos\alpha$$

Come si diceva, l’azione del tirante elimina la spinta orizzontale dell’arco/volta, induce nella parte centrale della trave una trazione pari a H , e comporta una compressione aggiuntiva di valore $C=H \operatorname{tg}\alpha$ nella muratura compresa tra l’appoggio della trave e l’imposta dell’arco.

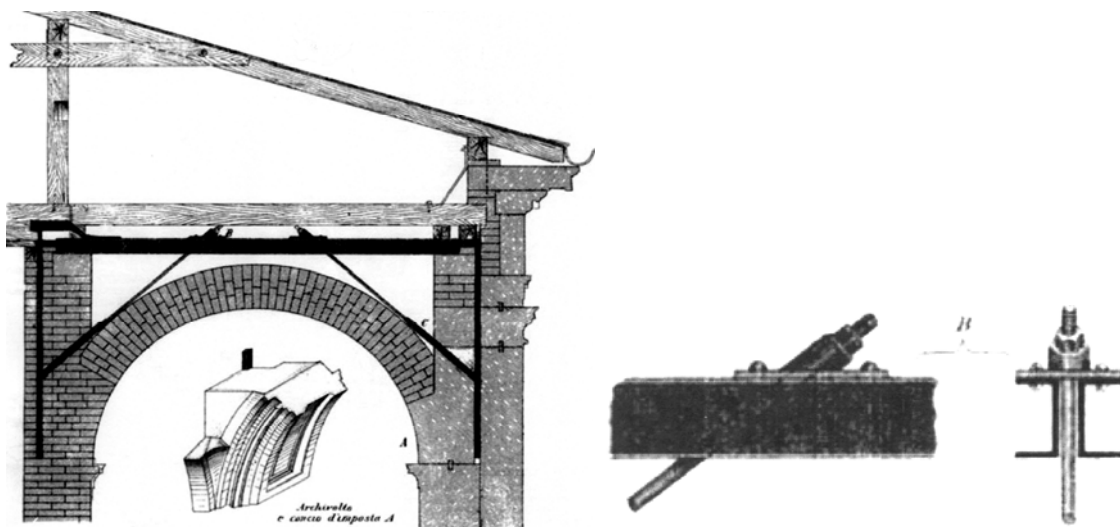


Fig. 3: Breyman, “Trattato di Costruzioni Civili” – sistema costruttivo per strutture ad arco e particolare del dado di tensionamento del tirante

Il sistema costruttivo descritto dal **Breyman** nel suo “Trattato di Costruzioni Civili” di metà Ottocento [1]; per molti decenni dimenticato, costituisce un precedente prezioso . Questa soluzione prevedeva l’inserimento, già in fase di costruzione, di paletti verticali in ferro

all'interno delle murature di sostegno dell'arco. Tali paletti, collegati tramite tiranti inclinati a due punti centrali di una trave metallica posta all'estradosso della struttura voltata, avevano la funzione di ridurre le spinte orizzontali scaricate dall'arco sui sostegni laterali.

Breyman utilizza gli elementi verticali metallici interni alla muratura per poter agire sui punti d'imposta dell'arco senza comprometterne la continuità. I tiranti inclinati si collegano agli elementi verticali metallici, i quali, lavorando a flessione, trasportano l'azione dei tiranti alla base dell'arco. Questa tecnica consente di poter disporre i tiranti con un'inclinazione α ridotta, e di conseguenza minimizzare le componenti verticali delle azioni e le sollecitazioni flessionali della trave estradosale. Va detto che la reale capacità distributiva dell'elemento verticale metallico nel sistema del Breyman non è completamente assicurata, data la sua ridotta inerzia sezionale.

Ne consegue che i pilastri/pareti laterali risulteranno ancora presso inflessi, seppur in misura inferiore rispetto a quanto accadrebbe in totale assenza di un sistema di confinamento.

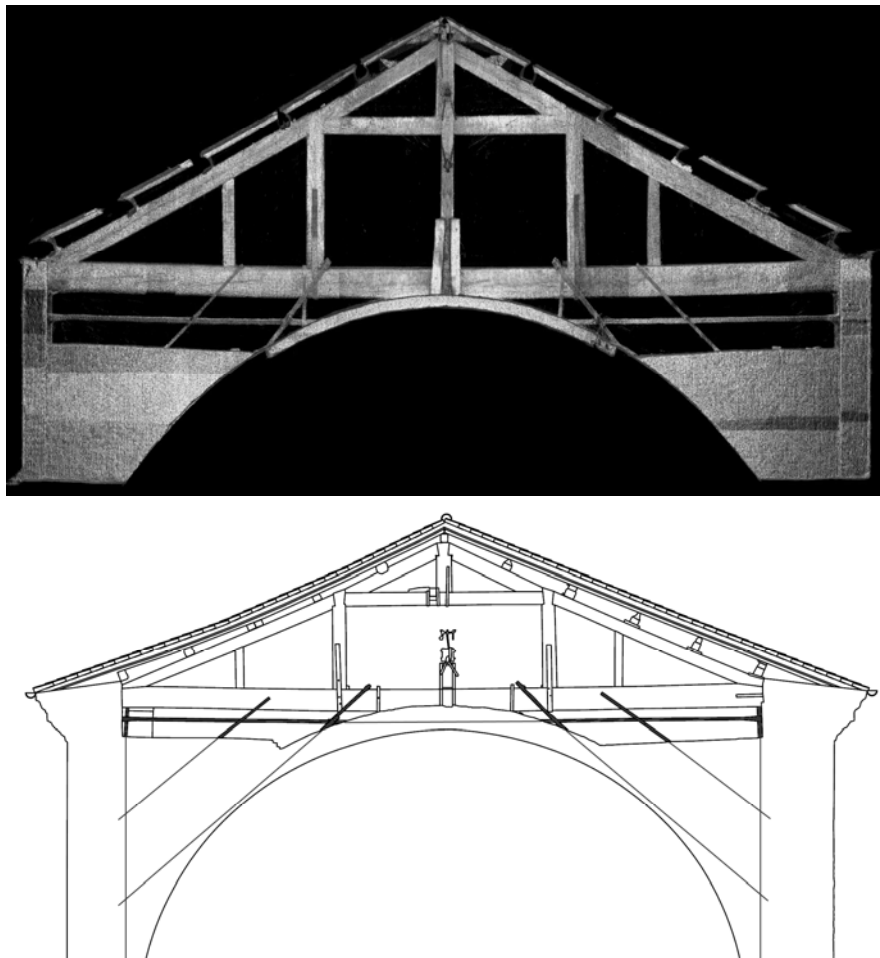


Fig. 4 a,b: San Nicolò a Verona, sezione della capriata e della volta a botte in copertura (immagine laser-scanner e restituzione grafica con evidenziato il sistema a “graffette”)

La tecnica descritta da Breyman, a sua volta, proviene da esperienze costruttive più antiche: ad esempio, una soluzione simile è stata utilizzata per la copertura voltata della chiesa secentesca di San Nicolò a Verona. Il sistema adottato presenta tiranti diagonali metallici innestati nella muratura alla base della volta, i quali trovano contrasto nella soprastante capriata lignea, che lavora a flessione. In realtà le azioni assiali dei tiranti vengono applicate alla catena lignea

che è giunta con “dardi di Giove” ed è poco rigida, ma la catena, mediante i monaci, fa parte della capriata, la quale, nel suo insieme, offre una sufficiente rigidità.

Una possibile criticità è data dal fatto che, sotto carichi di neve o vento, la capriata si inflette e pertanto il contrasto offerto ai tiranti si riduce.

Va tenuto anche conto che la capriata lignea presenta un comportamento viscoso, sotto carichi costanti. Questo fatto, nel tempo, tende a rendere meno efficiente il sistema, in assenza di dispositivi di ritesatura.

Ne consegue sia la necessità di separare la funzione di copertura, soggetta ai carichi meteorici, variabili, dalla funzione di contrasto degli archi, così da ottenere un effetto costante nel tempo e da consentire l’inserimento di dispositivi di regolazione.

Recentemente la tecnica delle “graffette” è stata utilizzata dall’autore per il consolidamento delle volte del piano primo del **Palazzo delle Carrozze a Masino**, di proprietà del FAI. Per ottenere un confinamento maggiormente diffuso sulle pareti laterali ed evitare eccessive concentrazioni locali degli sforzi, a Masino è stata adottata una soluzione che prevede di triplicare i tiranti inclinati. Le travi estradossali sono state realizzate con due profili HE accostati; l’unione tiranti-trave è realizzata tramite saldatura di piatte d’acciaio alle travi HE, completati da tubi di estremità. La forzatura viene ottenuta tramite dadi. Il collegamento delle barre diagonali alla muratura è garantito da piastre metalliche di contrasto che insistono sul paramento esterno, e che sono posizionate in sottosquadro, in piccoli scassi successivamente ripristinati.

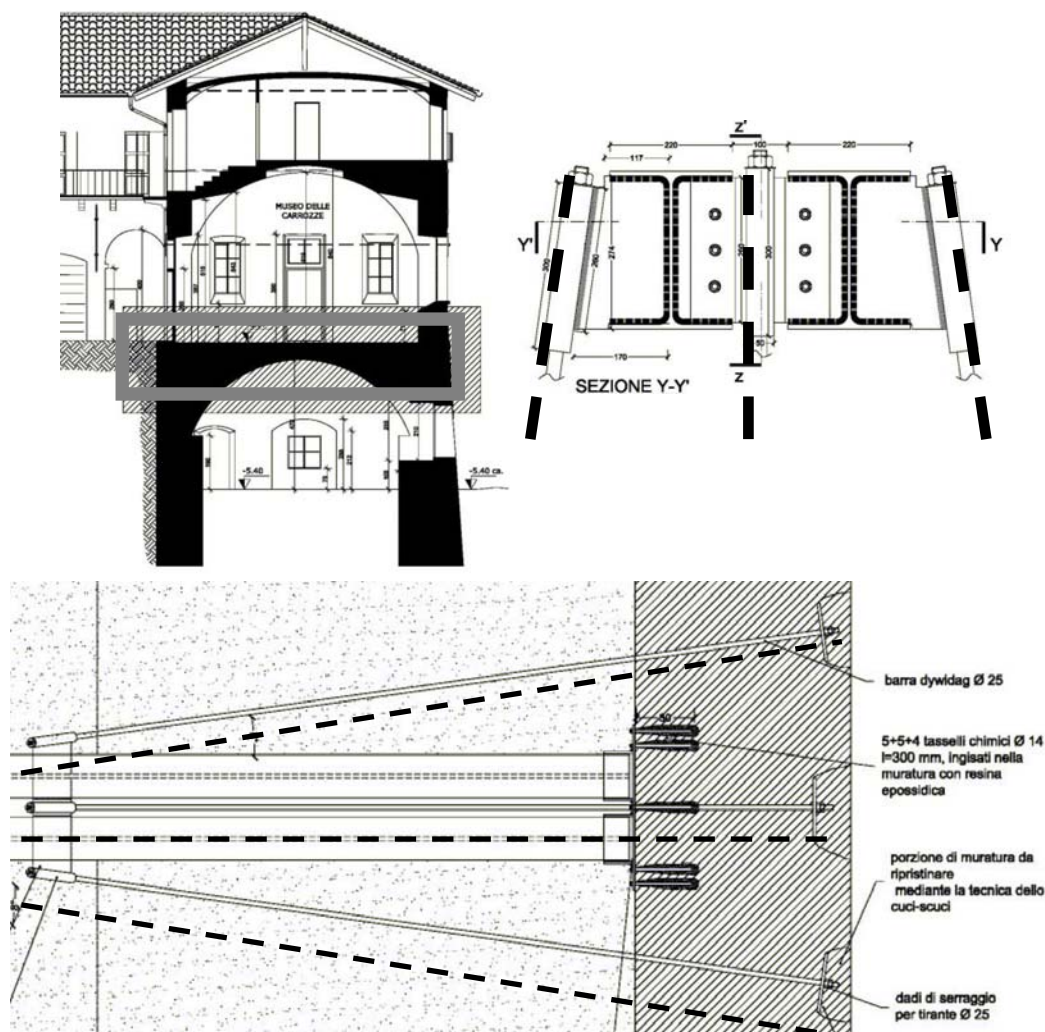


Fig. 5. Palazzo delle Carrozze a Masino, sezione con indicata l’area d’intervento e particolari del “triplo tirante”



Fig. 6: Palazzo delle Carrozze a Masino, particolare dell'unione tiranti-trave

Le travi estradossali, in molti casi, risultano utili anche per il sostegno di solai posti superiormente alle superfici voltate, così da non gravare ulteriormente su di esse. Nel caso di **Palazzo Cattaneo** a Cremona, ad esempio, le graffette, posta a passo 250 cm, hanno costituito elemento di supporto per un solaio continuo di sottotetto in tavole di legno, utile per la manutenzione del tetto e come sostegno delle unità di trattamento dell'aria.

Un recente intervento è stato realizzato nel **Corridoio delle Grottesche al Castello della Manta**, il quale presentava una particolare situazione di fessurazione imputabile alla spinta orizzontale della volta [5].



Fig. 7: Una evidente fessura sulla volta del Corridoio delle Grottesche; Realizzazione della “graffetta” all'estradosso della volta

L'intervento di consolidamento mediante “graffette” ha ripristinato la stabilità locale della volta. Da notare che si è ottenuto il desiderato effetto di confinamento operando esclusivamente dall'estradosso e preservando i pregiati affreschi del corridoio.

Le graffette sono appoggiate su lunghi correnti con sezione a L, posti ai lati della volta. I campi rettangolari tra graffetta e graffetta sono stati, da ultimo, integrati da croci di S.Andrea, realizzate con cavi, così che l'intero sistema è diventata una grande trave reticolare nel piano della copertura, utile a “congelare” i fuori piombo delle pareti, a suo tempo indotti dalla spinta delle volte.

L'efficienza del consolidamento con le “graffette” è stata studiata tramite un modello numerico ad elementi finiti che ha consentito di definire progettualmente le coazioni da applicare mediante la “graffetta”.

I risultati numerici hanno mostrato come il metodo delle “graffette” contribuisca ad un notevole miglioramento sia in termini di tensioni che di deformazioni.

L'intervento di consolidamento mediante il metodo delle "graffette" è in fase di realizzazione anche a livello dei matronei del **Duomo di Cremona**, a lato della navata principale.

Nei matronei viene disposta una lunga trave reticolare a traliccio tridimensionale, di dimensione 60x8x1 metri, con funzione di "diaframma di piano", antisismico. Le barre diagonali, che scendono tangenti agli archi con lo scopo di limitare le spinte sulle colonne inferiori, si ancorano direttamente a questo traliccio, il quale ha una funzione riconducibile alle travi orizzontali della "graffetta" tradizionale.

Per valutare la risposta del Duomo soggetto a carichi verticali ed orizzontali, principalmente di origine sismica, è stato realizzato un modello FEM a telaio tridimensionale.

Nel modello sono stati inseriti i diversi interventi di consolidamento previsti e ne è stata valutata l'efficacia dimostrando che le "graffette" introducano una benefica de-trazione nelle catene intradossali degli archi delle navate laterali. Grazie alla "graffetta" la trazione nella catena si riduce infatti dai 400 kN dello stato di fatto ai 150 kN della situazione consolidata.

Un tema che ha meritato qualche riflessione è quello dell'interasse massimo tra graffetta e graffetta nelle volte continue a botte, di una certa lunghezza. Si è osservato che graffette troppo distanti tra loro consentono un andamento "a festoni" degli spostamenti della linea di imposta della volta, a cui conseguono sforzi di trazione e possibili fessurazioni verticali delle murature portanti, nei punti di mezzo tra le due graffette consecutive.

Analogamente, nel caso di irrigidimenti troppo distanti tra loro, si formano fessure orizzontali, da trazione, in chiave alla volta, immediatamente al di sotto delle graffette e con direzione parallela alla graffetta stessa.

L'interasse massimo a cui posizionare le graffette, pertanto, non deve eccedere il 40-60% della luce della volta.

3 CONCLUSIONI

Il metodo delle "graffette", riscoperto, rivisitato ed applicato dopo anni di oblio, risulta un sistema appropriato e strutturalmente efficace nel consolidamento di archi e volte. Alla valenza strutturale si aggiungono la buona resa estetica, in quanto gli elementi metallici sono posizionati in luoghi non visibili, una grande facilità di messa in opera, la ridotta invasività dell'intervento, la sostanziale reversibilità e la ritesabilità delle barre diagonali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Breymann G. A., Archi, volte, cupole, in Trattato di Costruzioni Civili, Roma: Dedalo, 1995. Originale 1885.
- [2] Dotti C.F., Esame sopra la forza delle catene a braga, Bologna 1730.
- [3] Jurina L., Prove a collasso su archi in muratura consolidati con la tecnica dell'Arco Armato: Risultati di una sperimentazione, Atti del convegno IF CRASC '09
- [5] Jurina L., Il consolidamento delle strutture castellane, Atti del convegno " Sant'Angelo Lodigiano: un castello, un borgo un fiume...", Sant'Angelo Lodigiano 10 maggio 2003.
- [6] Galimberti U., Interventi di consolidamento su archi e volte con particolare riferimento al metodo delle "graffette", Tesi di Laurea in Architettura, Relatore: Lorenzo Jurina, A.A. 2006/07.
- [7] Basile A., Benini A, La riduzione della spinta in archi e volte: confronto tra le principale tecniche, analisi e modellazione, Tesi di Laurea in Ingegneria, Relatore: Lorenzo Jurina, A.A. 2009/10.

PAROLE CHIAVE

Consolidamento, archi, volte, graffette, spinte orizzontali, catene.

KEY WORDS

Consolidation, arches, vaults, new clamp method, horizontal forces, chains