

---

## **PONTI IN MURATURA: VERIFICHE STATICHE ED INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO CON LA TECNICA DELL'ARCO ARMATO**

**Lorenzo Jurina**

**Massimo Mazzoleni**

Politecnico di Milano

www.jurina.it

### **Introduzione**

Il ponte ha da sempre l'ancestrale e sorprendente capacità di unire ciò che per natura è diviso, di colmare un vuoto, di tramutare lo spazio in luogo.

Ponti in pietra ed in mattoni caratterizzano le nostre valli ed i nostri fiumi, testimonianze di una antica perizia. Uomini creativi ed audaci li hanno immaginati, progettati ed infine realizzati ma l'esperienza di chi li ammira è sempre così potentemente "magica" che persino oggi, pur smalzati e sicuri dei progressi tecnici e tecnologici, è difficile non restare stupiti davanti a tali opere, soprattutto riflettendo sulle scarse risorse a disposizione in termini di materiali e di attrezzature da cantiere che hanno caratterizzato quelle opere del passato.

Nonostante la perizia tecnica con cui furono eretti, però, può succedere che anche queste strutture non siano più in grado di garantire i requisiti minimi di sicurezza e stabilità necessari per affrontare i nuovi carichi di esercizio che sono chiamate a sopportare. Non va dimenticato che l'evoluzione avvenuta nelle modalità e nei mezzi di trasporto ha portato ad un aumento, sia dal punto di vista geometrico che da quello dei carichi, delle sollecitazioni. Eventi traumatici quali urti, inondazioni, cedimenti, frane, carichi eccessivi, oppure il degrado fisiologico dei materiali possono aver ridotto il coefficiente di sicurezza che la norma ed il buon senso ci obbligano a rispettare. Ed allora nasce la necessità dell'intervento correttivo, la necessità del consolidamento strutturale.

Affrontare il progetto di consolidamento di un ponte in muratura è un delicato esercizio di equilibrio tra la necessità di conservare la struttura come testimonianza storico-architettonica e l'esigenza di adeguare "punti strategici" dell'infrastruttura viaria, tenuto conto sia degli aspetti della sicurezza che di quelli economici.

L'intervento sul costruito, allora, è sempre opera ardua, decisione struggente tra opposti desideri, vincolati come siamo dal bisogno della mutazione e dalla voglia di permanenza. Le soluzioni sono molte, più o meno benefiche, più o meno traumatiche. Ne illustreremo due quasi agli opposti come filosofia progettuale, ben consci che ogni ponte merita la "sua" soluzione, unica come unico è quel manufatto.

### **Una modalità standard di intervento: la cappa in c.a. armata**

Questo intervento, frequentemente adottato negli ultimi decenni ma a ragione criticato in quanto invasivo, consiste nel collegare la volta esistente ad una controvolta estradosale in calcestruzzo armato. Si viene a creare in questo modo una nuova struttura resistente che collabora con quella sottostante comportandosi come una nuova volta di spessore maggiorato. Queste due strutture, quella antica e quella nuova, vengono così a lavorare in parallelo, ma la differente rigidità della lastra in calcestruzzo armato la porta usualmente ad assumersi una percentuale maggiore del carico accidentale agente sulla struttura. Tra i vantaggi del metodo va ricordato il fatto che l'estradosso della volta riesce, nella fase di parzializzazione pre-collasso della sezione, ad assorbire anche sforzi di trazione, grazie all'armatura metallica della cappa. Ancora tra i vantaggi la funzione di cucitura della muratura in direzione trasversale, soprattutto se l'accoppiamento muratura-calcestruzzo viene favorito da connettori metallici. Tra gli svantaggi, oltre alla menzionata invasività che rende irraggiungibile l'estradosso a future ispezioni, si può ricordare l'incremento

non trascurabile delle masse in gioco, cui va posta attenzione in zona sismica, e le potenziali interazioni negative tra muratura e calcestruzzo in termini di percolazioni, filtrazione di sali, ecc.

La prima operazione da eseguire dopo la puntellazione della struttura consiste nella rimozione dei rinfianchi, che, in alcuni casi, proseguono oltre la quota d'estradosso di chiave, al fine di una loro sostituzione con nuovi rinfianchi granulari, alleggeriti ma coesivi e resistenti a compressione, oppure con frenelli, che svolgono la stessa funzione del materiale asportato, risultando al contempo più leggeri.

L'asportazione dei materiali di riempimento (rinfianchi), deve essere effettuata in modo uniforme, a destra e a sinistra, per tutto l'estradosso della volta. Questa operazione evita l'effetto negativo del carico eccentrico, che si verrebbe a generare con una asportazione asimmetrica del materiale. Avendo asportato tutti i materiali portati, si deve pulire perfettamente l'estradosso della volta, per poter procedere al suo consolidamento.

L'aderenza tra la soletta in calcestruzzo armato di consolidamento e la struttura sottostante può essere garantita da connettori metallici inghisati alla muratura o, più semplicemente, dalla scabrosità delle superfici di contatto, favorita da una pulizia profonda dei giunti.

La cappa di calcestruzzo armato è spesso realizzata utilizzando come armatura metallica una rete elettrosaldata, meglio se inox oppure zincata, stesa su tutta la superficie estradosale della volta, avendo l'accortezza di aumentare lo spessore della gettata in corrispondenza delle imposte e di ben vincolare l'armatura alle spalle, realizzando così un collegamento con connettori alle murature perimetrali su cui si imposta la volta.

Successivamente al getto della soletta armata si procede a ripristinare i rinfianchi utilizzando preferibilmente un conglomerato non cementizio con inerti alleggeriti (tipo argilla espansa). Per migliorare la statica della volta si può procedere inoltre alla ricostruzione di un sistema di muretti (frenelli), normali alla generatrice della volta, che, oltre ad impedirne la possibilità di ampie deformazioni, possono anche costituire il sostegno di solai. La disposizione dei frenelli dipende dal tipo di volta e vi si collegano mediante monconi d'acciaio o chiodi emergenti dalla cappa estradosale in calcestruzzo.

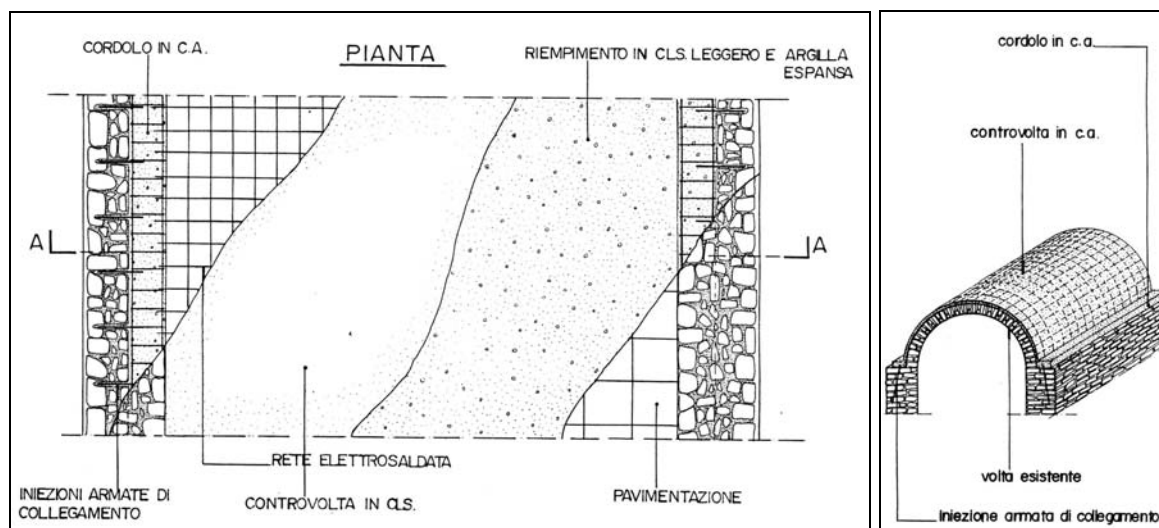


Figura 1. Consolidamento con cappa in cemento armato. Pianta e schema assonometrico (Rocchi, Piccirilli-1991)

## Una nuova soluzione per il consolidamento degli archi: “l’arco armato”

Gli interventi di consolidamento su archi e volte in muratura rappresentano un tema di difficile soluzione nel restauro dei ponti e più in generale degli edifici storici. Ciò è dovuto in parte alla progressiva perdita di conoscenza tecnica su questo argomento ed alla obiettiva difficoltà di operare nel rispetto delle preesistenze in contesti importanti e spesso vincolati.

---

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. Gli eventi sismici, che ad intervalli purtroppo frequenti interessano il patrimonio edilizio storico, hanno evidenziato inoltre come interventi poco riguardanti 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 rigidità.

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. La struttura, che in origine è tre volte iperstatica, si trasforma in un cinematismo ad uno o più gradi di libertà, con conseguente crollo.

Molte sono le tecniche finora adottate nel consolidamento degli archi e volte: l'uso di *catene di contrasto* alle imposte, l'uso di *rinfianchi* posti alle reni, il getto di una *cappa collaborante in cemento armato* all'estradosso delle volte. L'esperienza tuttavia ha dimostrato che l'applicazione di queste tecniche di intervento, a fronte della loro efficacia in termini di sicurezza, molto spesso comporta implicazioni tali da alterare, o addirittura snaturare, la realtà strutturale e costruttiva dell'arco.

Non vanno trascurati inoltre i cosiddetti “*effetti collaterali*”, già citati nel paragrafo precedente:

- il forte carattere di invasività delle soluzioni con rinforzo dei piedritti o con l'uso di catene intradossali,
- la dannosità sulle strutture verticali e sulle fondazioni di incrementi di peso per l'aggiunta di rinfianchi, nonché le notevoli controindicazioni della loro presenza e della loro massa in caso di eventi sismici,
- l'irreversibilità della tecnica con cappa collaborante in cemento armato, nonché i relativi problemi relativi alla traspirabilità della muratura.

E' necessario allora proporre e sperimentare sistemi alternativi, meno invasivi e capaci di adattarsi ai singoli casi. Negli anni passati uno degli autori ha proposto e sperimentato una tecnica originale, denominata “*arco armato*”, che consente di consolidare archi e volte in muratura con un minimo apporto di nuovo materiale, e che comporta la semplice aggiunta di cavi metallici post-tesati posti in aderenza alla muratura (*rf. bibl. 1,2,6*).

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 ridurre l'eccentricità a valori minimi e comunque contenuti nello spessore strutturale. *La tecnica proposta tende ad ottenere tale corrispondenza non mediante invasive modifiche apportate alla geometria ma mediante l'aggiunta di nuove forze che modifichino quella già agenti e la loro distribuzione.*

Se si fosse in grado, lungo lo sviluppo dell'arco, di impedire l'apertura di almeno una tra le due famiglie di cerniere (tutte quelle di estradosso oppure tutte quelle di intradosso) nella struttura non si potrebbero formare alcun meccanismo con cerniere alternate. La struttura, originariamente continua, potrebbe al massimo degradarsi ad “*arco a tre cerniere*”, di cui due al piede ed una in campata, che staticamente è ancora efficiente.

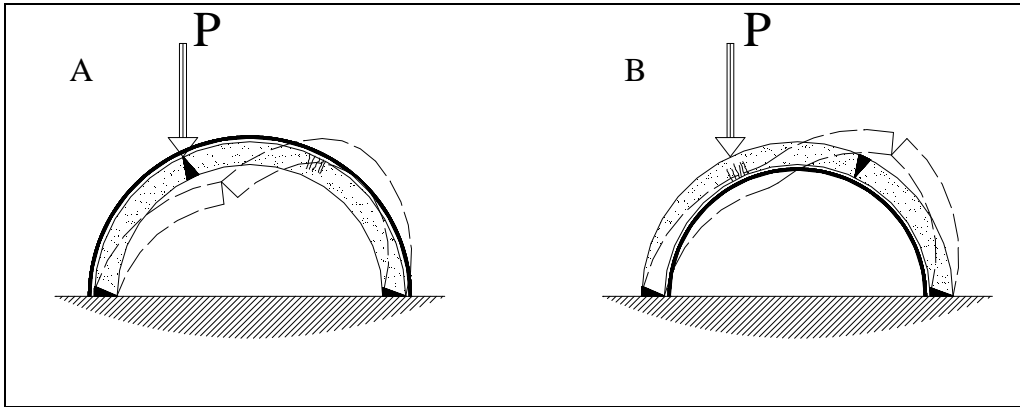


Figura 2. Contributo del rinforzo estradossale ed intradossale.

La soluzione più semplice per ottenere questo risultato è rappresentata da una armatura “passiva” diffusa e resistente a trazione, ad esempio una membrana applicata su un lato della volta, all’estradosso (come avviene nella tecnica della “cappa armata”), oppure, in modo duale, all’intradosso.

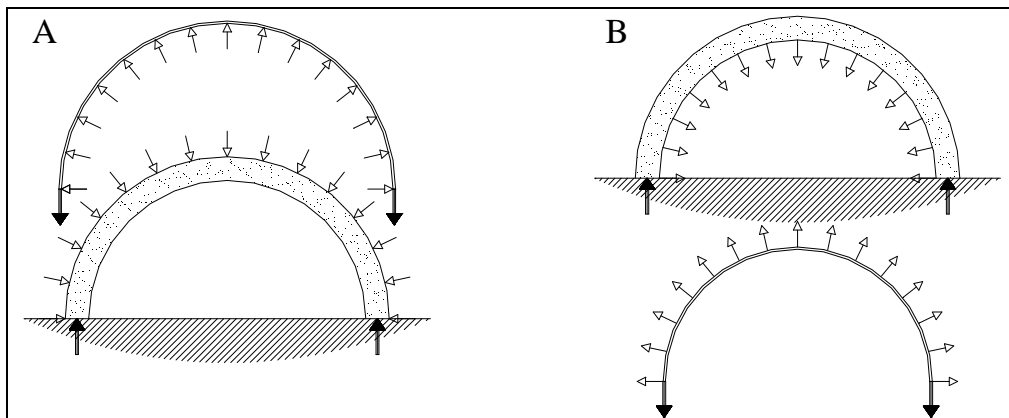


Figura 3. Forze di interazione tra cavo (in trazione) e arco (in compressione), con cavo posto (A) all’estradosso, (B) all’intradosso

Se invece di limitarsi ad un semplice accostamento passivo tra muratura ed armatura si adottano cavi metallici posti in trazione (facendoli funzionare da “tiranti attivi”) si ottiene una distribuzione di forze applicate sull’arco in direzione radiale, il che provoca una benefica compressione assiale e, di conseguenza, la centratura della curva delle pressioni.

Per realizzare una adeguata “forzatura” tra le funi e l’arco (mediante coazioni imposte che inducono una trazione nelle funi ed una contemporanea compressione nell’arco) è sufficiente fissare le funi agli estremi dell’arco ed allontanarle dall’estradosso mediante cunei o distanziatori a vite, uniformemente ripartiti. Analogo risultato si ottiene con comuni tenditori, realizzati con vite destrogira e sinistrogira, posti ad esempio alle estremità dei cavi, a patto di facilitare mediante l’interposizione di membrane a basso attrito lo scorrimento tra il cavo e la muratura lungo la linea di contatto.

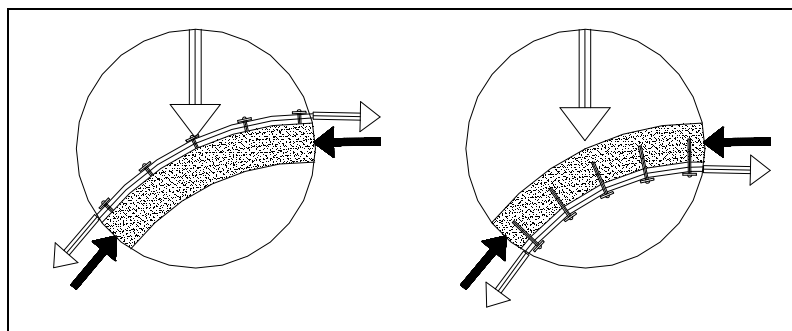


Figura 4. Dettaglio dell'interfaccia tra tirante e muratura. (a sinistra) cavo estradossale con connettori in compressione (a destra) cavo intradossale con connettori in trazione

E' interessante notare ancora che nel caso di archi particolarmente deformati la *tecnica attiva* sopra proposta consente di applicare carichi distribuiti anche in modo non uniforme sulla struttura in mattoni.

E' sufficiente infatti mantenere il cavo separato dalla muratura e forzare maggiormente la fune, e di conseguenza il sottostante arco, dove sia presente un maggiore imbozzamento.

In altre parole, al posto di modificare la geometria dell'arco per consentirgli di sopportare i carichi esistenti, è possibile modificare i carichi applicati in modo da rendere ottimale la geometria esistente, ottenendo una ricentatura della curva delle pressioni, condizione necessaria per la stabilità dell'arco. Si agisce in sostanza con la stessa strategia del "rinfiacco alle reni" senza tuttavia alcun incremento delle masse in gioco.

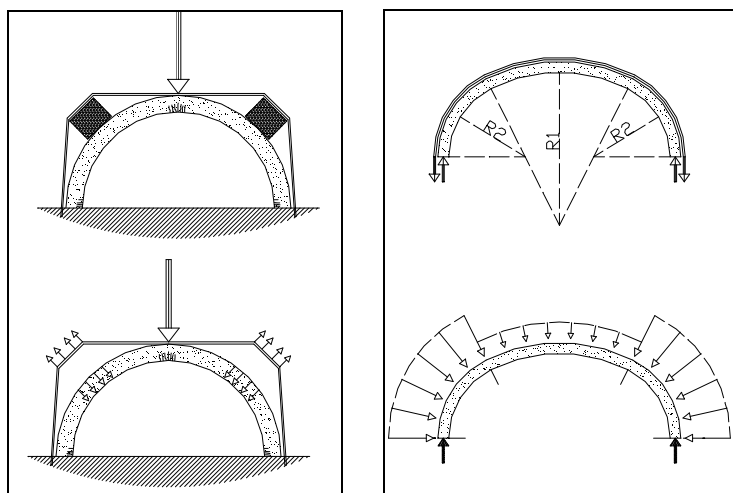


Figura 5. (a sinistra) "Forzatura" localizzata tra arco e tirante di estradosso per opporsi a imbozzamenti locali. (a destra) Si noti che le forze dipendono dal raggio di curvatura locale applicate dal cavo teso all'arco

Per l'efficienza dell'armatura con cavi metallici estradossali non è richiesto che gli archi presentino una geometria a tutto sesto. La tecnica descritta può essere utilizzata anche nel caso di archi notevolmente depressi in quanto in un cavo curvo, che sia teso in modo uniforme su tutta la lunghezza, l'entità delle forze radiali applicate è inversamente proporzionale al raggio di curvatura.

Il metodo dell'arco armato si propone in definitiva, anche in questo caso, di riportare la struttura ai preesistenti livelli di sicurezza senza necessariamente provvedere ad un ripristino o ad una modifica della geometria originaria, ciò che soprattutto in archi con presenza di superfici affrescate risulta inopportuno. Il desiderio di mantenere anche nel ponte la stessa forma geometrica a cui è giunto a seguito di cedimenti delle imposte o delle pile di appoggio è importante al fine di non indurre nella

---

struttura coazioni indesiderate e poco prevedibili che potrebbero incrementare eccessivamente lo stato tensionale locale.

Si è parlato finora genericamente di “tiranti”, e naturalmente la preferenza va accordata a quei materiali che siano in grado di garantire la maggiore resistenza e la maggiore durabilità, come l'acciaio inox. Sarebbe possibile tuttavia anche l'uso di materiali diversi, quali i compositi fibrorinforzati, ma trattandosi di interventi di tipo “attivo” è importante adottare materiali che siano poco influenzati da fenomeni viscosi, pena la necessità di frequenti ritesature.

Qualunque sia il materiale adottato, i vantaggi dell'uso di tiranti di rinforzo post-tesati sono comunque evidenti e si possono riassumere nel ridotto ingombro, unito a costi contenuti, leggerezza, grande resistenza, elevata duttilità globale dell'insieme muratura-cavi, immediata riconoscibilità e possibile reversibilità dell'intervento.

Il metodo dell'arco armato è stato sottoposto a prove sperimentali per controllarne la validità. In modo specifico si sono confrontati i carichi di collasso di archi semplici, di archi rinforzati con cappa in c.a. e di archi “armati” all'estradosso con cavi inox, tutti delle stesse caratteristiche geometriche e di materiale

Oltre ad un confronto tra l'arco armato ed il più diffuso metodo tradizionale della cappa in cemento armato, si voleva dare risposta alla seguente domanda: “nella soluzione di consolidamento che prevede il getto di una cappa collaborante in c.a., è davvero fondamentale la presenza del conglomerato cementizio oppure il rinforzo strutturale vero e proprio è costituito in modo prevalente dalla armatura metallica, resistente a trazione, che vi è contenuta?”

### ***Verifiche sperimentali della tecnica dell'arco armato***

Allo scopo di validare il “metodo dell'arco armato” sono state eseguite due campagne sperimentali su archi a tutto sesto diversamente caricati.

Sono stati realizzati 12 archi in muratura di luce netta 200 cm e spessore 12 cm su cui sono stati effettuati confronti tra quattro diverse situazioni :

- (1) arco semplice in muratura,
- (2) arco con cappa superiore in c.a., senza connettori, ma con armatura saldata alla base,
- (3) arco rinforzato con cappa superiore in c.a., con connettori metallici tra arco e cappa,
- (4) arco armato con due cavi in acciaio posti in trazione, semplicemente appoggiati all'estradosso.

In figura seguente si illustrano i 12 archi approntati per la campagna sperimentale dove sono presenti modelli di arco semplice, modelli di arco con cappa in c.a e modelli di “*arco armato*”.

Tutti i modelli sono stati assoggettati a carichi concentrati applicati sia a metà sia al quarto della luce mediante una semplice strumentazione costituita da un tirante metallico e da un martinetto idraulico.

Il contrasto è fornito da una trave a doppio C, posta a supporto dell'arco ed in grado di assorbire le spinte orizzontali. Il carico è stato applicato con cicli ripetuti di carico e scarico, misurando gli spostamenti assoluti in 6 punti mediante comparatori centesimali fissati a terra.



Figura 6. Arco armato: Modelli di archi in muratura predisposti per prove a scala reale

Gli archi di tutti i 12 modelli sono costituiti da sezioni 12x25 in mattoni pieni di tipo paramano, con resistenza a collasso, su provini da quattro mattoni, pari mediamente a 28 daN/cm<sup>2</sup>.

La cappa in calcestruzzo degli archi di tipo (2) e (3) ha spessore 4 cm ed è armata con rete elettrosaldata Ø5/15x15. Il calcestruzzo adottato è di classe Rck250.

I connettori sono rappresentati da barre in acciaio Ø10, disposte una ogni 22 cm. L'armatura adottata nei modelli di tipo (4), vale a dire per l'arco armato, è costituita da due trefoli in acciaio zincato Ø12 mm, con resistenza a rottura 2500 daN ed allungamento a rottura 4%. La tesatura dei trefoli è stata ottenuta mediante regolazione con chiave dinamometrica alle estremità.

Nella Tabella B si indica in (Nm) il valore della coppia di serraggio del dado di contrasto.

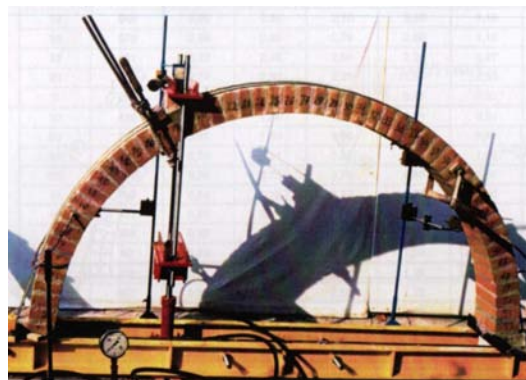


Figura 7. Arco armato: schema di posizionamento dei flessimetri, strumentazione di carico e misura

Per brevità e riferendoci in modo specifico al caso di archi soggetti a carichi asimmetrici, simili a quelli generati da sollecitazioni sismiche o dal transito di veicoli sui ponti, vengono illustrati solo una parte dei risultati ottenuti. Nella tabella seguente si riassumono i risultati di 5 prove, nelle quali il carico è stato applicato verticalmente ad 1/4 della luce. Vengono indicati il valore del carico di collasso (in daN) e gli spostamenti (in cm) in corrispondenza dei 6 comparatori utilizzati, misurati per un carico pari all'85% del collasso.

	P (daN)	Flex 1	Flex2	flex 3	flex 4	flex 5	flex 6
1- arco semplice	191	0,04	0,84	1,35	1,16	0,60	1,50
2- arco + cappa	3379	3,78	10,60	13,34	15,20	6,84	13,00
3- arco + cappa + conn.	2948	2,10	5,82	7,33	8,17	3,03	7,36
4- arco armato (60 Nm)	2559	5,18	20,22	19,70	23,10	10,50	16,73
5- arco armato (80 Nm)	2886	1,30	11,64	12,75	11,98	5,03	9,42

---

Al termine delle prove effettuate si possono formulare le seguenti osservazioni:

- 1- le tecniche di rinforzo dell'arco con cappa in c.a.(2 e 3) e dell'*arco armato* (4 e 5) portano a risposte nel carico di collasso nettamente superiori rispetto al caso di arco semplice (1),
- 2- La tecnica (2), con cappa in c.a. senza connettori e con armatura metallica saldata alla base, ha dato risultati migliori della tecnica (3), con connettori.
- 3- La tecnica dell'*arco armato*, ha dato risultati confrontabili con quelli ottenuti negli archi con cappa in c.a..Il principale elemento resistente è dunque l'armatura resistente a trazione. In entrambi i casi il collasso si è verificato per rottura dei mattoni compressi.
- 4- La risposta dell'*arco armato*, dipende in modo sostanziale dalla entità della tensione applicata al cavo estradossale.
- 5- La duttilità ottenuta con la tecnica dell'arco armato è superiore a quella con cappa in c.a.

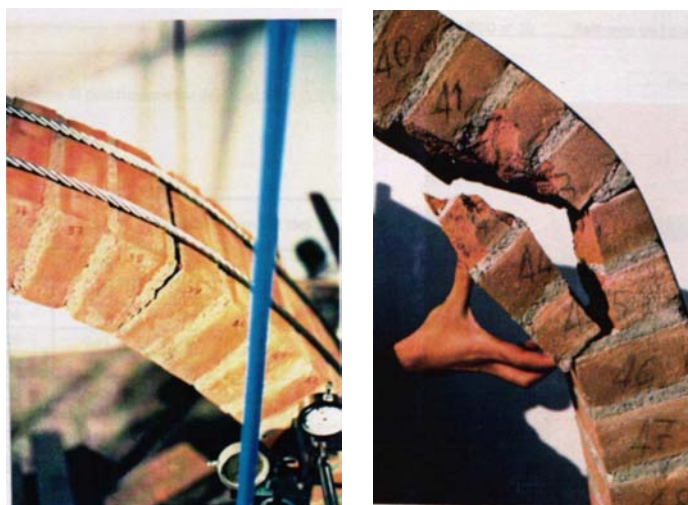


Figura 8. Arco armato: dettaglio delle armature estradossali,deformata a collasso, formazione di “cerniera” con fessura estradossale contenuta dai cavi, rottura dell'arco per compressione dei mattoni (ossia formazione della 4<sup>a</sup>cerniera)

Dalle prove sperimentali eseguite e dalle osservazioni formulate la tecnica dell'*arco armato* qui proposta appare decisamente promettente e di semplice utilizzo, con considerevoli incrementi di resistenza e di duttilità nei confronti dell'arco semplice e con risposte simili a quelle ottenute con la più tradizionale ma più invasiva 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.



## METODI DI CALCOLO

In commercio si trovano diversi software che permettono di analizzare strutture ad arco in muratura e strutture voltate che possono costituire una valida alternativa alle modellazioni numeriche con programmi ad elementi finiti.

Nei paragrafi seguenti si riportano alcuni esempi, in modo da evidenziarne le diverse opportunità di analisi che ognuno di essi permette.

### Il programma ARCO

“ARCO” è un programma di analisi strutturale di archi in muratura e volte sviluppato dal prof. P. Gelfi dell'Università degli studi di Brescia. Il software si basa sui criteri di sicurezza derivanti dall'analisi delle strutture in muratura svolti dal prof. Heyman, utilizzando l'approccio statico nell'analisi limite della struttura.

Il programma “ARCO” attraverso un metodo iterativo individua, tra tutte le curve di pressione possibili, quella che minimizza lo spessore dell'arco fittizio, individuando, quindi, un fattore di sicurezza geometrico minimo.

Il criterio di sicurezza “geometrico”, come definito da Heyman, è ricavato dal rapporto tra il vero spessore dell'arco e quello di un ipotetico arco, interno al precedente, del minimo spessore necessario a contenere interamente la curva delle pressioni relativa ai carichi esterni che insistono sull'arco.

Nel programma sono definibili:

- geometria qualsiasi dell'arco;
- spessore variabile dei conci;
- carico distribuito asimmetrico;
- pressione passiva del rinfianco.

Come output si ottengono l'andamento della curva delle pressioni, gli andamenti degli sforzi normali all'intradosso e all'estradosso dell'arco e le spinte sulle imposte.

Il programma è caratterizzato dalla eventuale possibilità di analizzare la azione stabilizzante indotta dalla “spinta passiva” offerta dal rinfianco nei confronti delle spinte laterali.

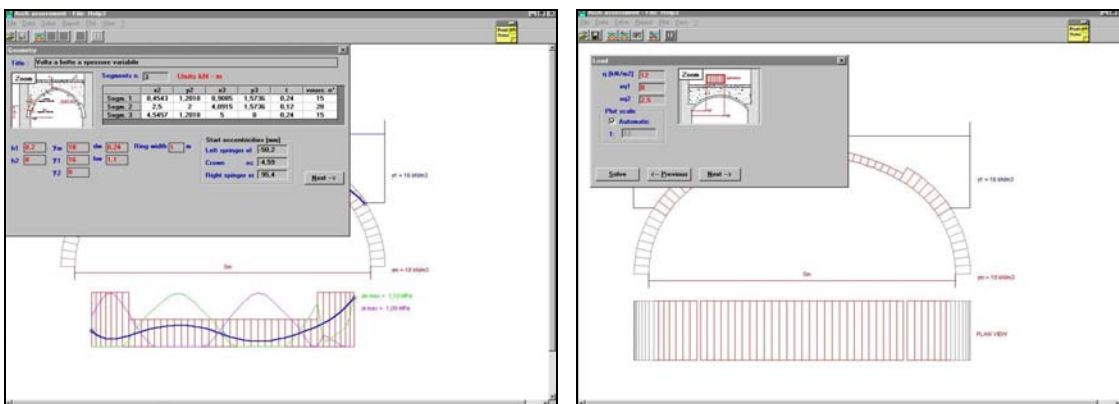


Figura 9. Programma Arco : Introduzione della geometria e dei carichi.

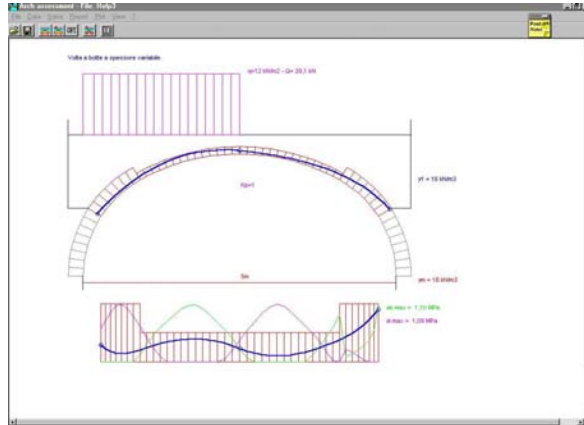


Figura 10. Programma Arco: risultati delle elaborazioni.

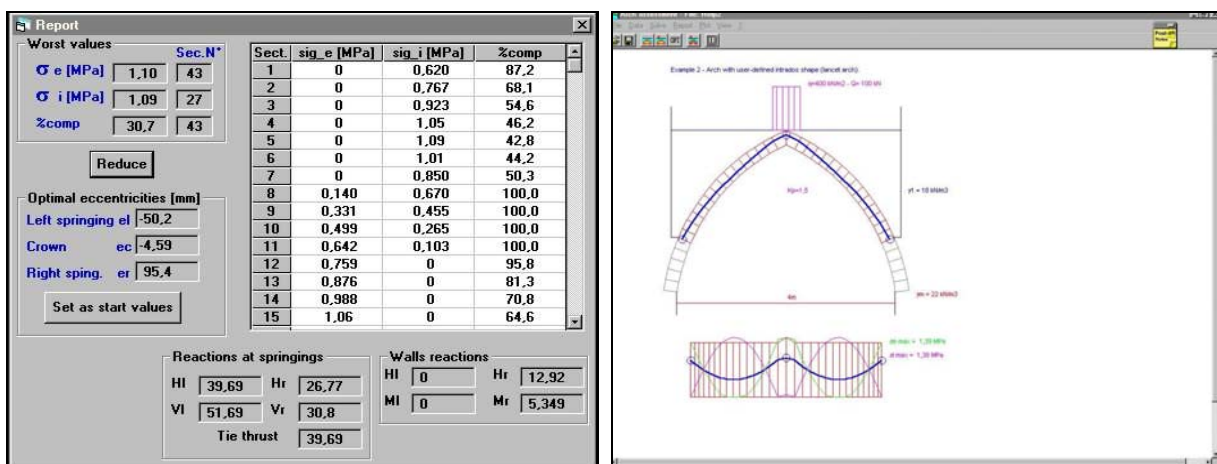


Figura 11. Programma Arco: output numerico ed esempio di geometria più complessa

## Il programma RING

“RING” è un programma di analisi strutturale studiato per ponti ad arco in muratura, anche con carichi viaggianti. Il software è stato sviluppato da Matthew Gilbert della Università di Sheffield e presenta le seguenti caratteristiche:

- geometrie con singola o multipla arcata;
- calcolo della curva delle pressioni e del cinematismo di rottura;
- carichi concentrati mobili e distribuiti;
- grafica del cinematismo di rottura.

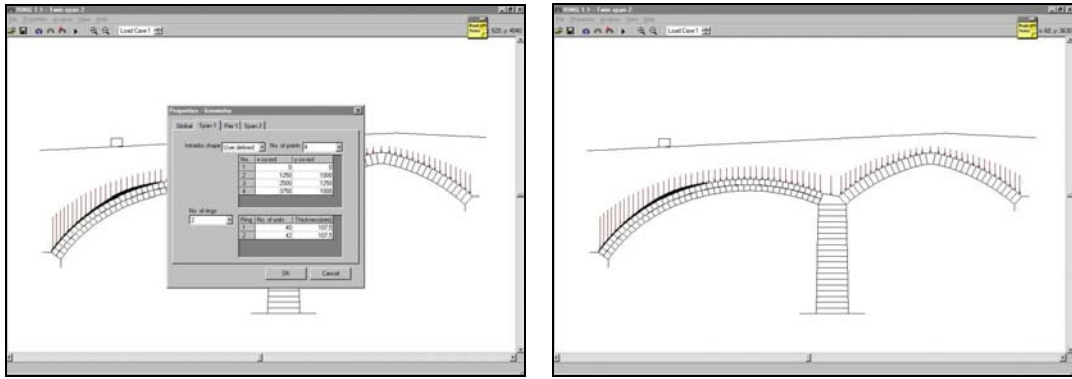


Figura 12. Programma *Ring* : Introduzione della geometria e dei carichi.

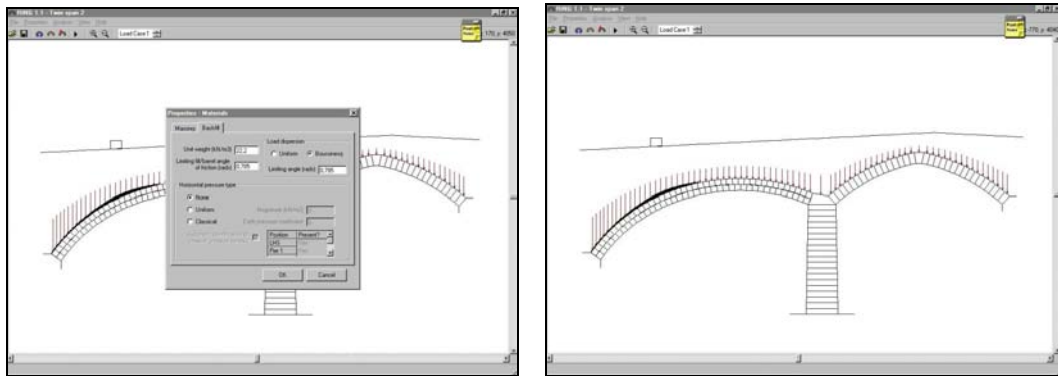


Figura 13. Programma *Ring*: introduzione dei carichi

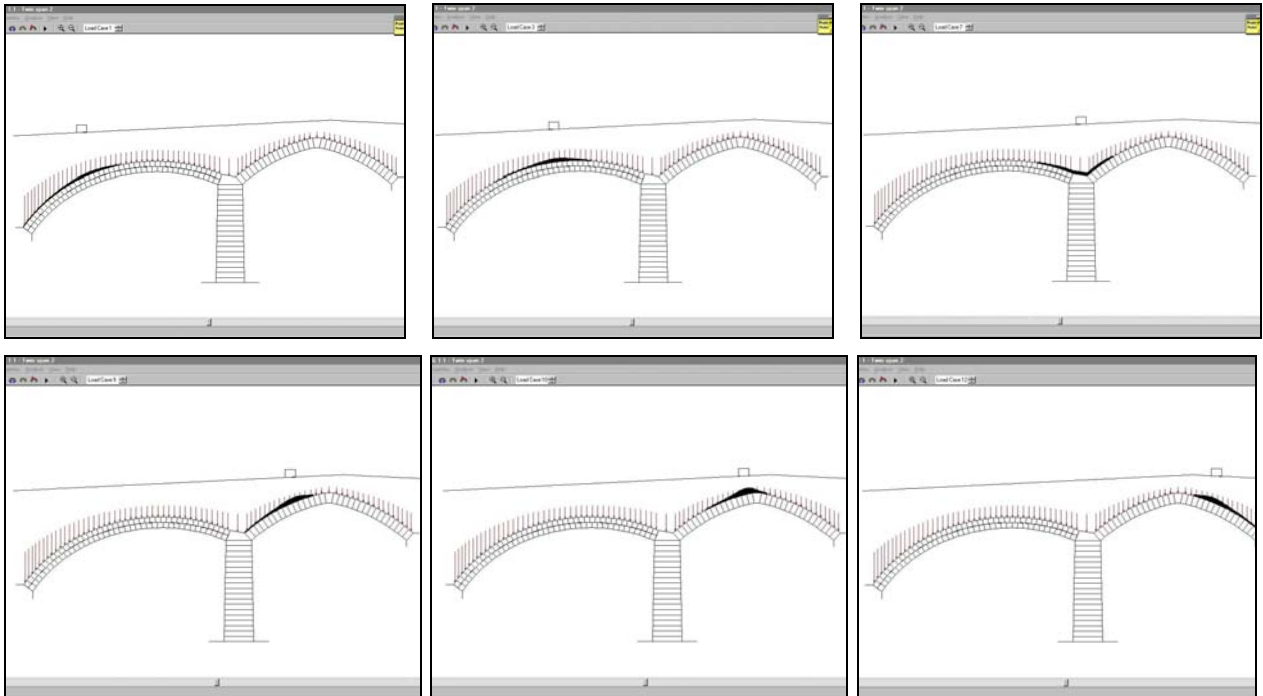


Figura 14. Programma *Ring*: carico concentrato mobile

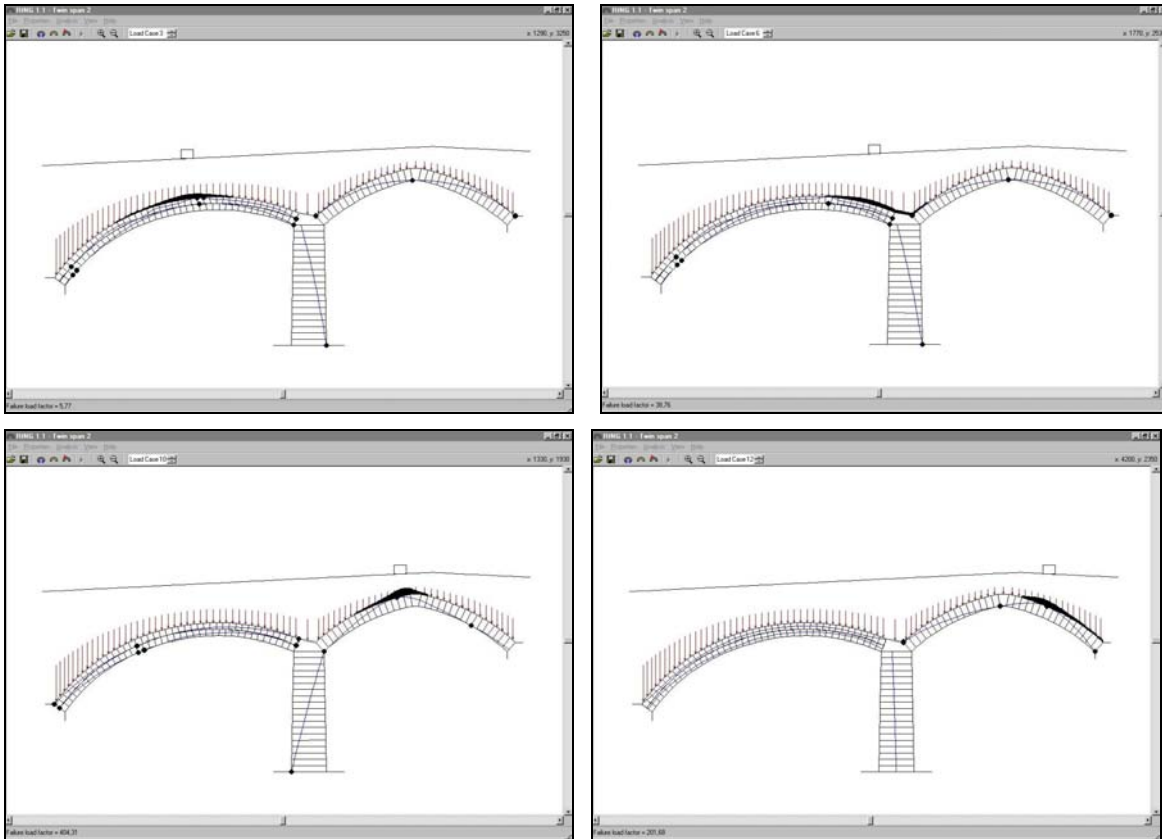


Figura 15. Programma *Ring*: andamento della curva delle pressioni

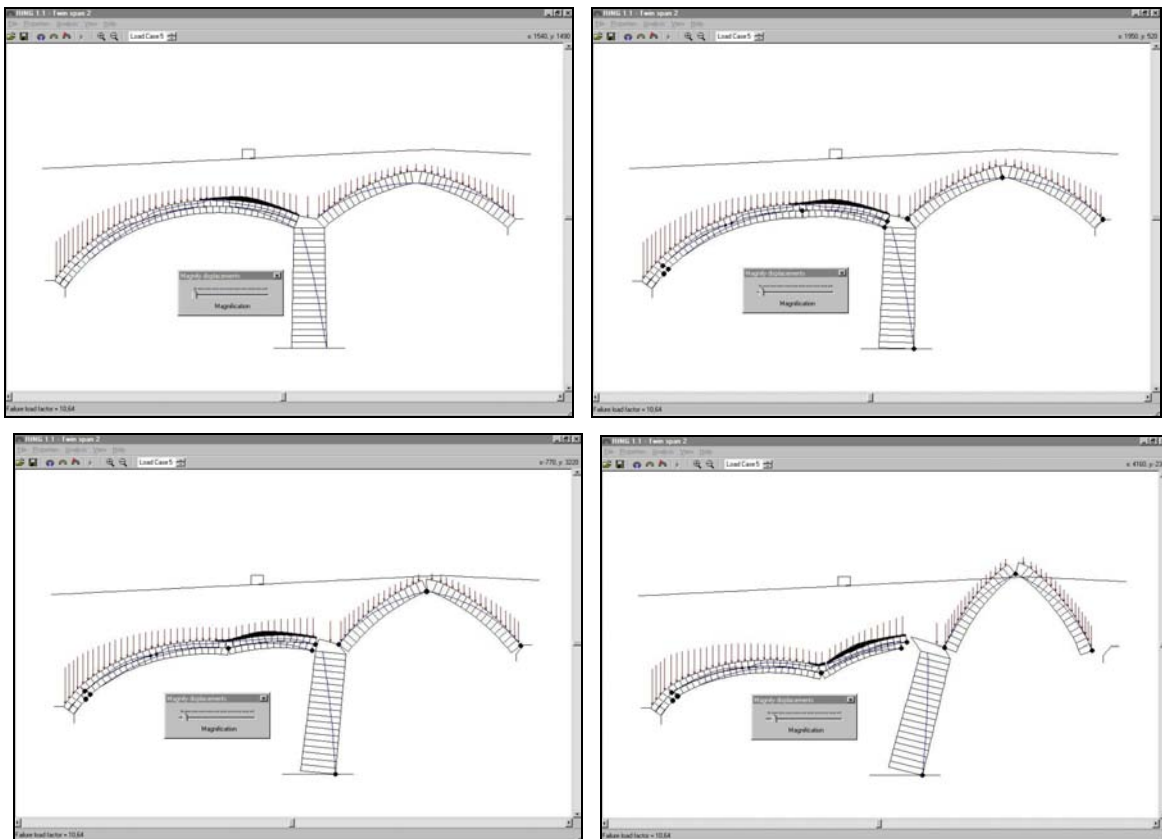


Figura 16. Programma *Ring*: es.1 - cinematismo di rottura

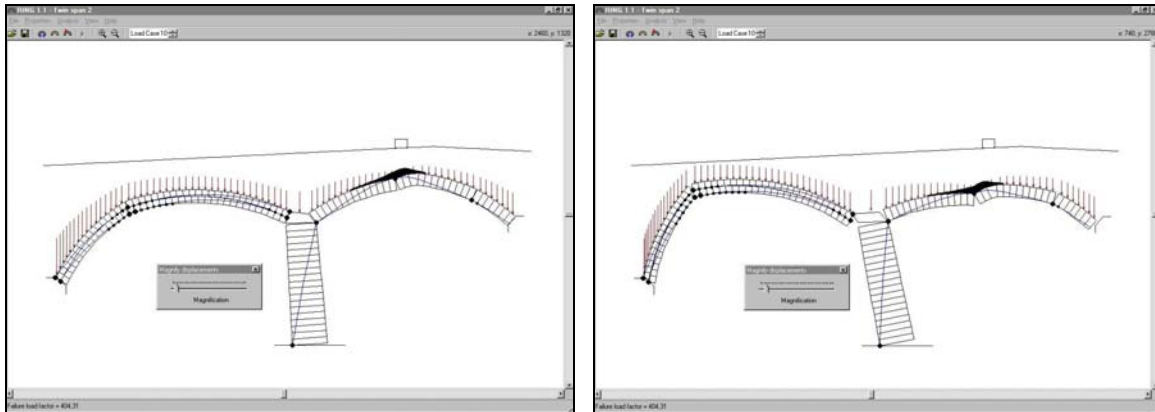


Figura 17. Programma *Ring*: es. 2 - cinematico di rottura

### Il programma SAV2000

La metodologia di calcolo di "SAV2000" è stata sviluppata dai prof. M. Paradiso e G. Tempesta dell'Università di Firenze. L'applicazione della metodologia di calcolo fornisce sia una risposta sulla stabilità dell'arco, evidenziandone la posizione della curva delle pressioni, sia i valori delle azioni interne. Esse possono essere utilizzate per ulteriori verifiche strutturali.

SAV consente quattro verifiche fondamentali:

- 1) *Equilibrio della struttura (Verifica di Stabilità);*
- 2) *Verifica ad attrito (Taglio nei giunti);*
- 3) *Verifica a Compressione della muratura;*
- 4) *Verifica a Trazione dei rinforzi.*

Permette l'introduzione di catene metalliche, di cappa in calcestruzzo armato e di rinforzi con fibre in materiale composito (nastri in FRP). Oltre a carichi uniformi su tutta la campata consente l'introduzione di carichi concentrati verticali ed orizzontali e permette l'analisi statica e sismica.

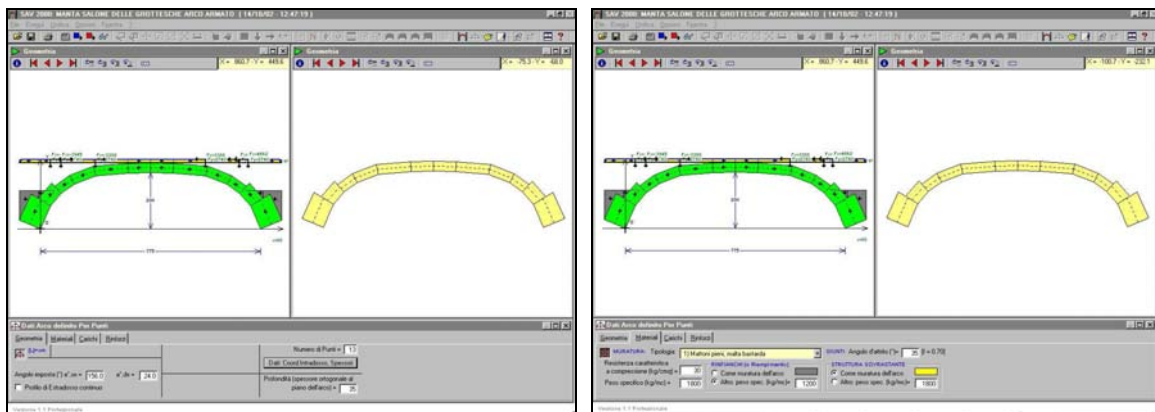


Figura 18. Programma SAV 2000: introduzione geometria e definizione dei materiali

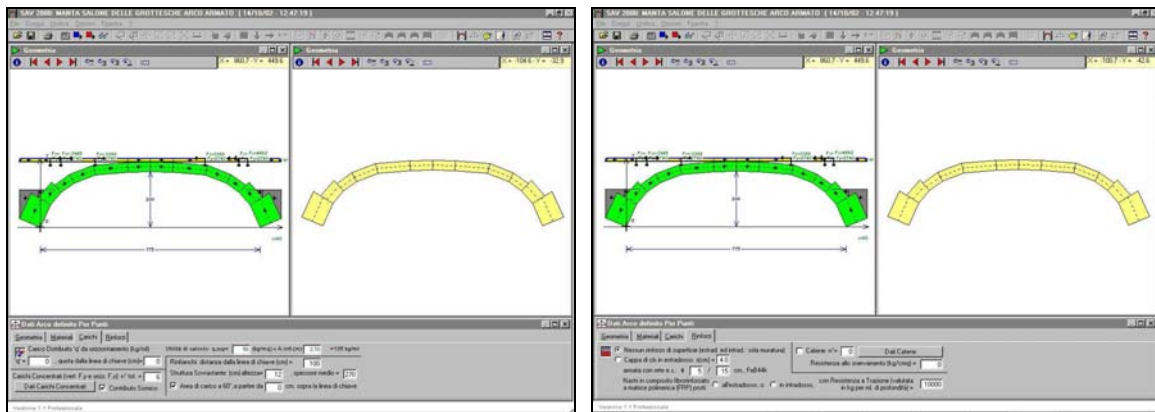


Figura 19. Programma SAV 2000: introduzione dei carichi e introduzione di catene e rinforzi.

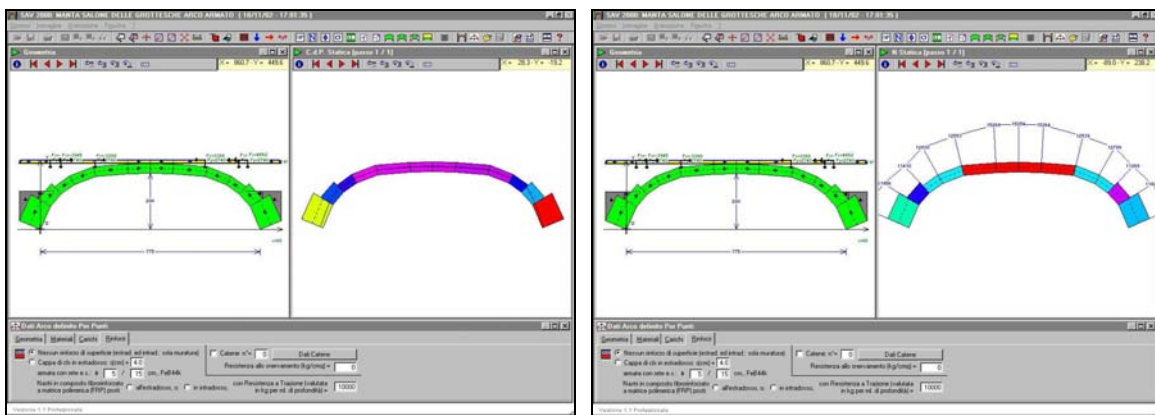


Figura 20. Programma SAV 2000: OUTPUT GRAFICI - grafico dell'andamento della curva delle pressioni e grafico dell'azione N normale ai conci

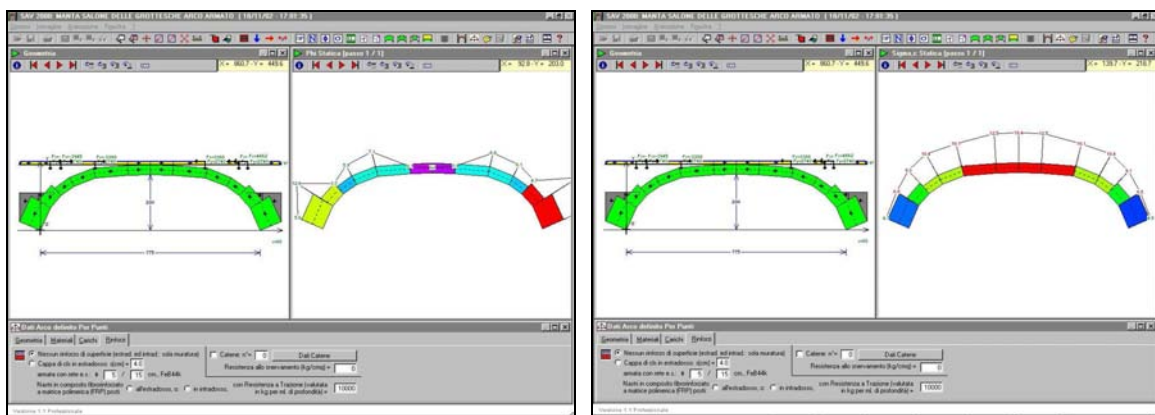


Figura 21. Programma SAV 2000: OUTPUT GRAFICI - grafico degli sforzi di scorrimento tra i conci e grafico degli sforzi normali ai conci

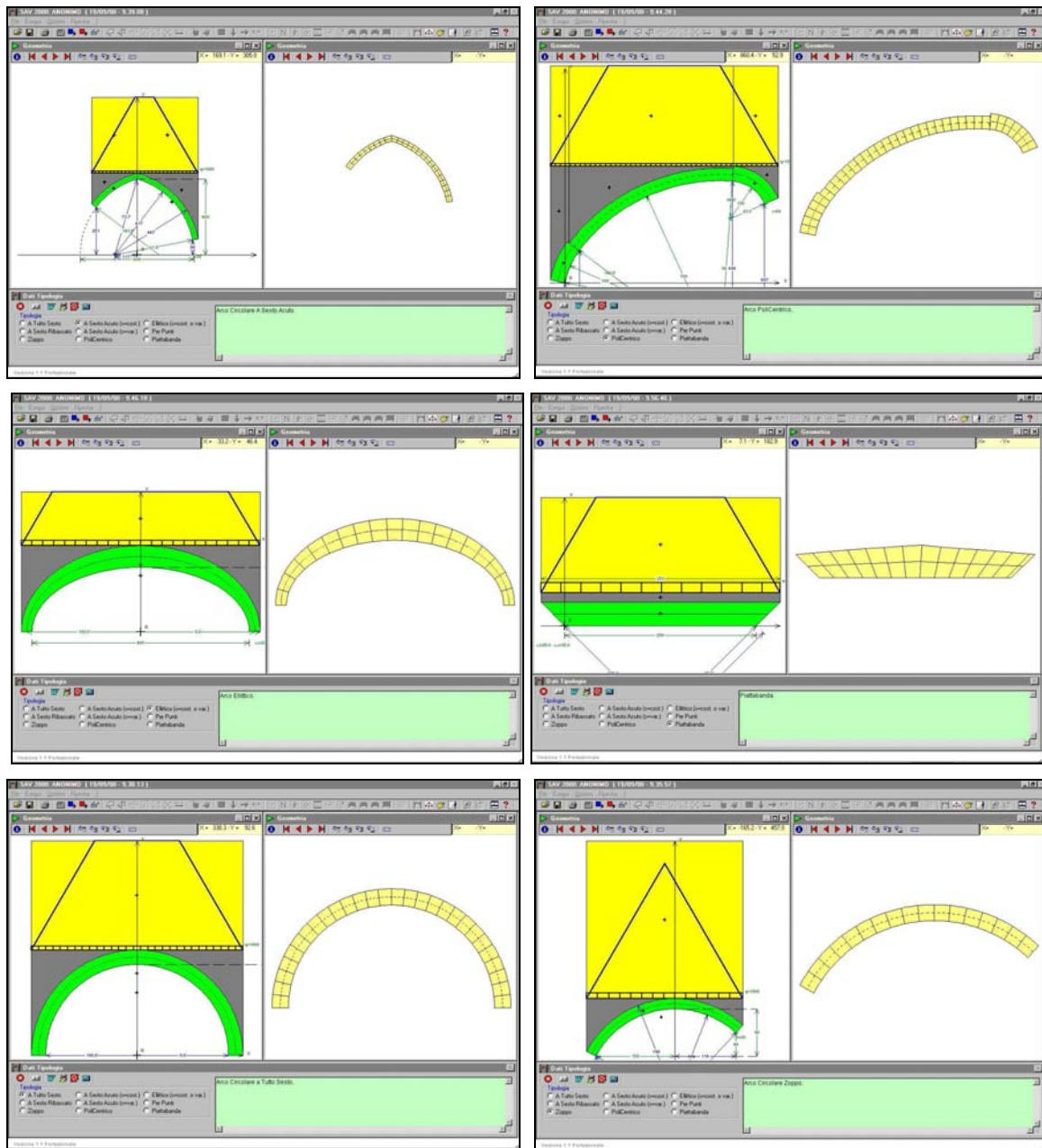


Figura 22. Programma SAV 2000: TIPOLOGIE DI ARCHI ANALIZZABILI - arco a tutto sesto ,arco a sesto ribassato, arco a sesto acuto, arco policentrico arco ellittico e piattabanda

## ***Ponte sul torrente Strona a Guardabosone (Vc)***

All'interno di una recente tesi di laurea sui ponti storici in muratura e sul loro possibile adeguamento statico, è stata sviluppata la proposta di consolidamento di un ponte in muratura attraverso la tecnica dell'arco armato a cavi post tesati. L'intento era quello di adeguare la struttura ai carichi che su di essa gravano a causa del traffico stradale, attraverso un metodo che non modificasse la statica originaria del manufatto, che fosse reversibile e poco invasivo.

La struttura analizzata è un ponte a tre arcate, a sesto ribassato, risalente alla fine del '700, in pietra selezionata di forme e dimensioni eterogenee con armille in pietra da taglio.

Tre chiavi metalliche collegano i fianchi di ogni arcata. I rinfianchi sono in muratura di pietrame, i muri frontali sono in pietra selezionata legata con malta, sormontati da un cordolo-gocciolatoio in pietra da taglio.



Figura 23. Viste del ponte

I muri andatori sono rettilinei, in pietra selezionata, di forma e dimensioni eterogenee con la presenza di numerosi ciottoli di fiume, legati con malta. I muri di valle sono parzialmente rivestiti con malta cementizia. I parapetti sono in pietra selezionata legata con malta e copertine in pietra da taglio. La pavimentazione è in conglomerato bituminoso e non esistono marciapiedi riservati al transito pedonale.



La lunghezza totale è di 41,25 m, con larghezza pari a 5,10 m; le luci nette sono per l'arcata destra 12,15 m, per l'arcata centrale 12,05 m e per l'arcata sinistra 11,85 m. La sezione media degli archi è di circa 65 cm.

Le analisi svolte sono partite dal calcolo del carico di collasso del ponte in muratura utilizzando l'approccio cinematico dell'analisi limite. Si è fatto uso di una semplice impostazione mediante foglio EXCEL e l'uso del principio dei lavori virtuali applicato a meccanismi dove le cerniere hanno assunto posizione variabile.

Abbiamo ottenuto risultati analoghi a quelli delle ricerche a suo tempo condotte dal prof. Heyman che hanno individuato come più probabile il meccanismo di collasso provocato da un carico puntuale posizionato a circa  $\frac{1}{4}$  della luce dell'arco in muratura. La posizione di tale carico sarebbe quella che rende minimo il valore del carico P puntuale rispetto a quello richiesto per la formazione di cinematismi in altre posizioni. Come ben sappiamo, il cinematismo si ha quando si giunge alla formazione di quattro cerniere, quindi in questo caso, oltre alla fessura aperta nell'intradosso in corrispondenza della posizione di P si avranno altre tre cerniere con apertura rispettivamente interna-esterna rispetto a quella ad un  $\frac{1}{4}$  in P.

Attraverso l'introduzione di cavi estradosso nel cosiddetto "metodo dell'arco armato", si riesce ad impedire la formazione di almeno una tra le due famiglie di cerniere, o quelle di intradosso o quelle di estradosso. Nella struttura non potranno nascere quindi meccanismi a cerniere alternate. La struttura, originariamente continua, potrebbe, al massimo, degradarsi ad arco a tre cerniere, due al piede ed una intermedia, che staticamente è ancora efficiente: la struttura non può diventare ipostatica e quindi non si arriverebbe al collasso per cinematismo. Con l'arco armato non si modifica la geometria dell'arco per permettergli di sopportare i carichi esistenti, ma si modificano i carichi applicati in modo da rendere ottimale la geometria esistente, ottenendo la ricentatura della curva delle pressioni, condizione necessaria per la stabilità dell'arco.

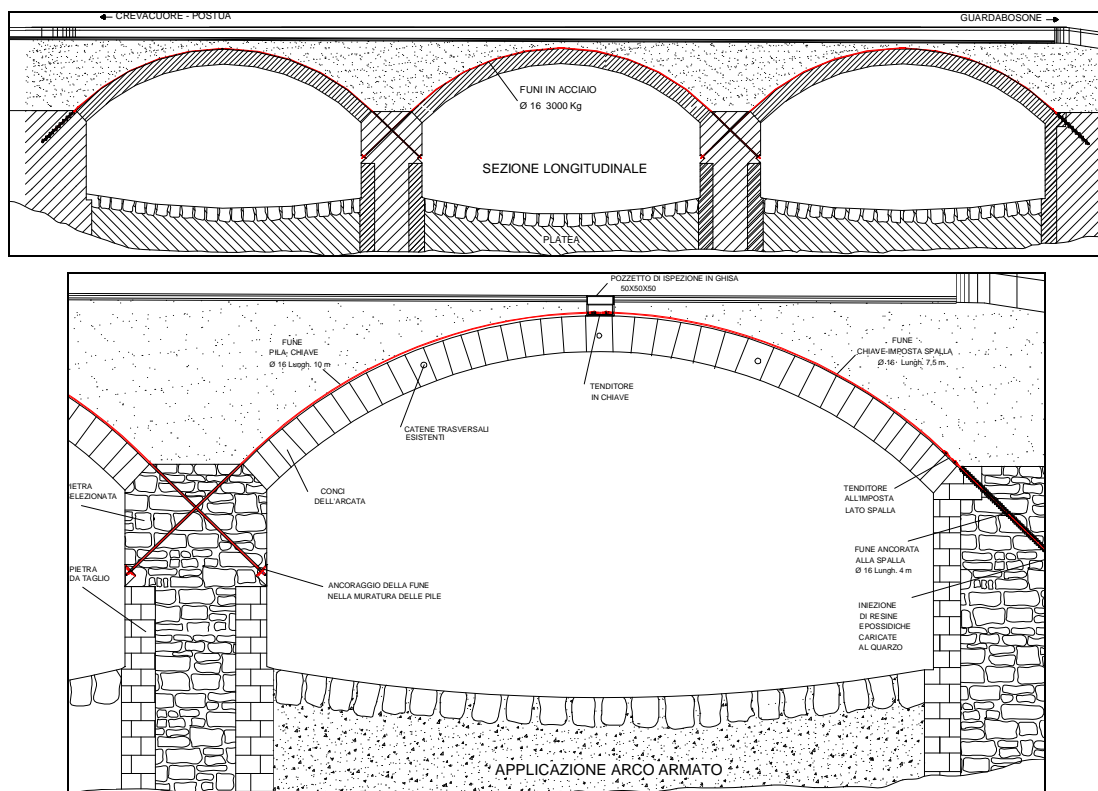


Figura 24. Elaborati di progetto.

I previsti cavi in acciaio inox sono ancorati alle spalle e alle pile (nel caso di un ponte ad un'unica campata, esse saranno ancorate unicamente alle spalle mediante ancoraggi profondi).

Il fissaggio alle spalle viene effettuato tramite l'inserimento di una barra nel foro del carotaggio e saldamente fissata con un'iniezione a base di resina epossidica o altro legante; tale barra ancorata alla spalla sarà collegata ad un tenditore collocato alle imposte dell'arco. L'ancoraggio alle pile viene effettuato molto semplicemente tramite una piastra in cui si incastra il capocorda posto all'estremità della fune.

Le funi vengono tesate tramite tenditori: uno posto in chiave e due all'imposta alle spalle. Nel caso studiato, in ogni campata sono state posizionate 7 funi tesate a circa 3 tonnellate ciascuna. Un estensimetro elettrico per la valutazione della tesatura è posto sul tenditore in chiave. I tenditori, con il relativo estensimetro, sono collocati all'interno di un pozzetto d'ispezione a doppia chiusura per rendere agevole il controllo e la manutenzione. I pozzetti sono previsti uno per ogni tirante, per permettere di ispezionare ed eventualmente di mettere in atto degli interventi manutentivi puntuali.

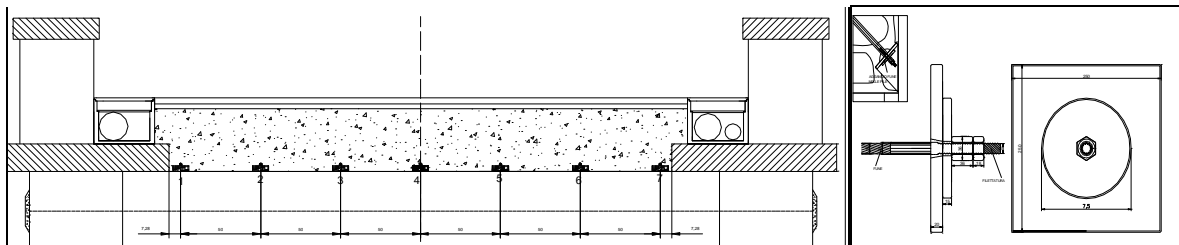


Figura 25. Sezione trasversale e particolare dell'ancoraggio del cavo

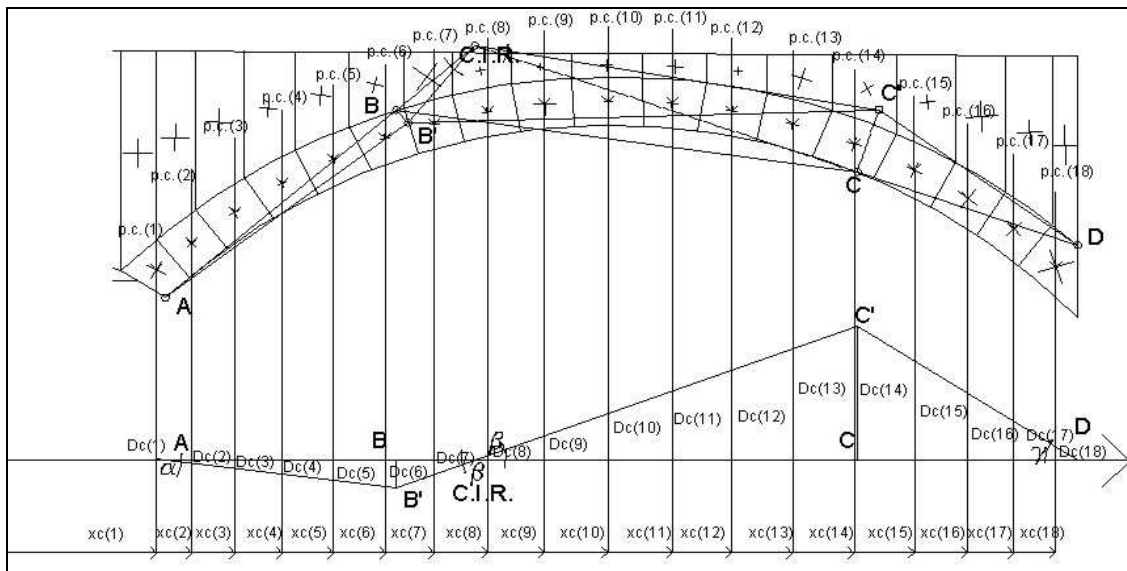


Figura 26. Peso dei conci e componente verticale dello spostamento virtuale

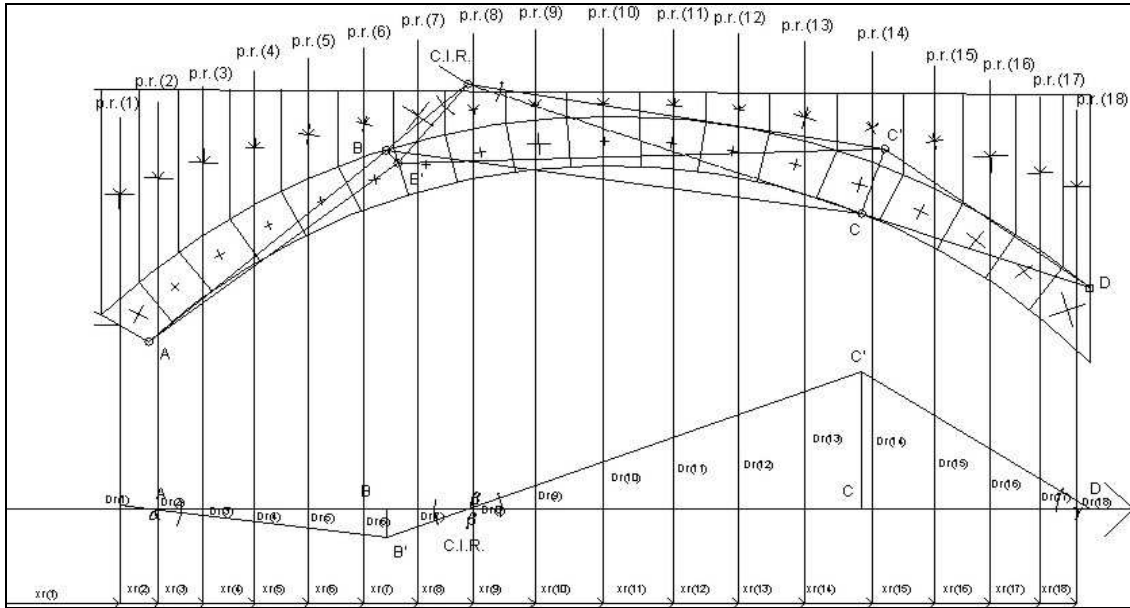


Figura 27. Peso del riempimento e componente verticale dello spostamento virtuale

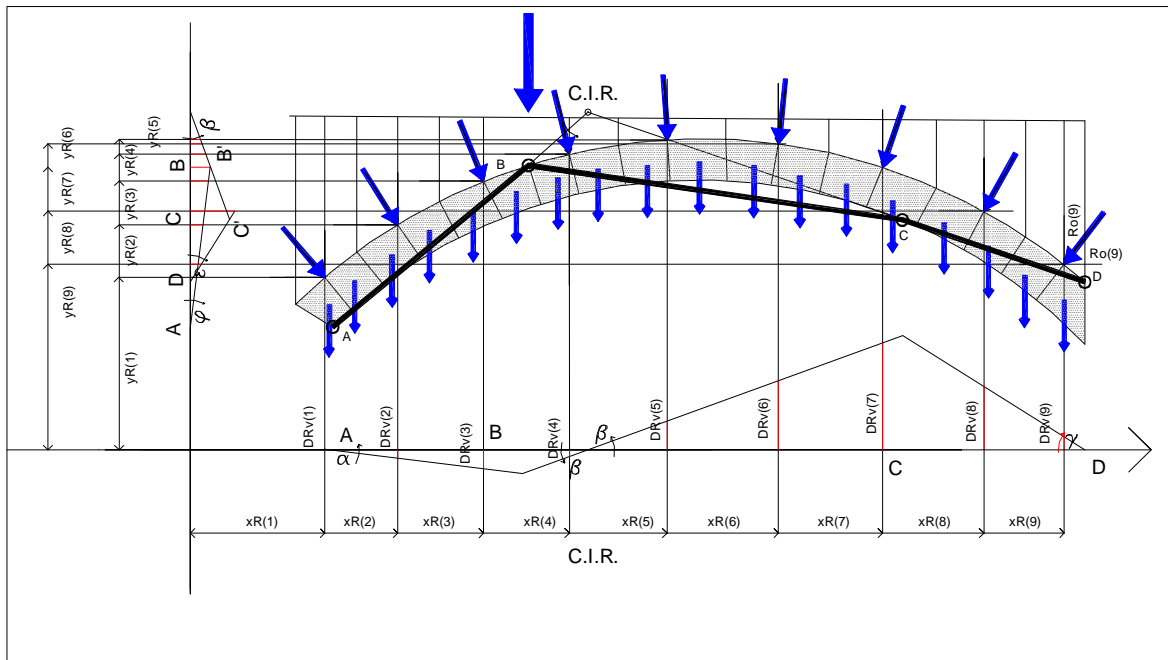


Figura 28. Carichi esercitati dalle funi estradossali attive e proiezione verticale ed orizzontale dello spostamento virtuale

I principali risultati che si ottengono con tale applicazione si possono così riassumere:

- *efficacia*: nel caso preso in esame, il carico a rottura del ponte così come si trova oggi, corrisponde a circa 8 tonnellate. Attraverso l'applicazione di 7 tiranti tesi a 3 t l'uno, si raggiunge un carico di collasso pari a circa 27 tonnellate, triplicando così il valore di partenza;
- *non invasività e reversibilità*: l'armatura si limita a collaborare con la struttura esistente incrementandone la resistenza e la duttilità globale senza alterare le masse e le rigidità in gioco. Tale soluzione non solo rispetta l'estetica del ponte, ma anche e soprattutto la sua statica, non altera la geometria esistente e gli elementi introdotti possono, in ogni momento, essere sostituiti o rimossi;
- *leggerezza e semplicità*, grazie al ridotto ingombro del materiale utilizzato per l'intervento;

- 
- *manutenzione*, grazie all'uso di singoli pozzetti è possibile non solo una facile ispezione, ma anche un rapido intervento;
  - *implementabile*, poiché aumentando il tiro delle funi viene incrementata la capacità portante del ponte.

Tale proposta si presenta, quindi, come un intervento sostenibile per adeguare i ponti in muratura alle nuove condizioni di esercizio richieste dal traffico attuale e futuro.

### ***Antico ponte romanico sul fiume Uso, Sogliano al Rubicone (FC)***

Questo ponte romanico è situato ai piedi del monte di Montetiffi e collega le due sponde del fiume Uso. La costruzione è presumibilmente legata a quella della vicina Abbazia di Montetiffi e quindi ai secoli XI-XII. E' un ponte ad arco unico, costruito con elementi in pietra conca, con luce di circa dieci metri e largo appena due metri, impostato in entrambi i lati su roccia.

Il ponte è in uno stato di forte degrado e dissesto che si protrae ormai da decenni. Sono evidenti e preoccupanti ampie aree di crollo delle spalle laterali sia a valle che a monte che hanno interessato anche parte della struttura dell'arco portante.

La precaria condizione statica in cui si trova attualmente ha portato l'amministrazione comunale di Sogliano al Rubicone a prevederne il restauro e il consolidamento statico, la cui progettazione è stata svolta dagli autori, ing.L.Jurina e arch. M.Mazzoleni, assieme all'ing. G.Malvisi . Alla data del convegno è ormai quasi completato la fase esecutiva.

Il punto di partenza è dato dalla presenza di una struttura provvisoria di sostegno del ponte montata circa 15 anni fa che si è rivelata assolutamente provvidenziale per la salvaguardia dello stesso, avendone scongiurato il collasso altrimenti inevitabile, ma che oggi, in previsione degli interventi da dover attuare non può più essere mantenuta in quanto compromette la possibilità di intervento sui paramenti. La realizzazione di una nuova struttura provvisoria e di centinatura del manufatto consente una messa in sicurezza ed al contempo la costituzione di piani di lavoro esterni per le operazioni di ripristino dei tessuti murari.

Dalle indagini condotte sulla struttura è emersa una situazione statica complessiva preoccupante legata al progressivo deterioramento dei paramenti murari sfociato in fenomeni di crollo piuttosto estesi in corrispondenza delle spalle. Tale situazione ha reso ovviamente cruciali le prime fasi di intervento che sono consistite in un generalizzato ripristino del tessuto murario attraverso operazioni di stilatura dei giunti, di iniezione consolidante e di scuci-cuci.

Il vero e proprio consolidamento del ponte, d'accordo con la competente Soprintendenza di Ravenna, è costituito dalla parziale ricostruzione del tessuto murario e, quindi, dalla ricostituzione dell'originaria monoliticità dell'arco che costituisce la struttura portante, anche in considerazione del fatto che la destinazione prevista è quella di passerella pedonale, e quindi senza carichi elevati ma con la necessità di evitare pericoli di caduta per i passanti.

Si è ritenuto comunque prudente procedere ad un consolidamento dell'arco strutturale mediante la tecnica dell'*arco armato* per diversi motivi, primo tra cui il fatto di ottenere un'efficace azione di ricentrimento della curva delle pressioni lungo il profilo della volta senza alcun incremento dei carichi, assicurando nel contempo un grado di invasività molto ridotto. I cavi in acciaio inox appoggiati all'estradosso delle volte e sottoposti ad accorciamento sono ancorati alle spalle del ponte mediante tiranti in roccia realizzati con barre Dywidag. La coazione imposta provoca una trazione nel cavo e una contemporanea compressione (strutturalmente benefica) nel sottostante arco o volta, causando una riduzione o la scomparsa delle eventuali fessurazioni presenti.

Accanto a questo intervento che aumenta la capacità portante della struttura e, quindi, il suo coefficiente di sicurezza, si è deciso di affiancare una serie di catene trasversali all'asse che ne consentono un irrigidimento ed evitano possibili aperture longitudinali della struttura dell'arco che potrebbero avvenire in situazioni di carichi concentrati e asimmetrici.

Non si è fatto altro che riproporre quello che era già stato pensato dai costruttori del ponte nel momento in cui hanno inserito tre catene trasversali in legno, ormai totalmente degradate, aggiornandole con le moderne tecnologie.

L'inserimento delle catene trasversali è caratterizzato da un dispositivo di ancoraggio "unghiato" a completa scomparsa. In questo modo si ottiene un aumento della area di effettivo ancoraggio della catena che riuscirà ad interessare più blocchi di pietra del paramento murario, riuscendo anche a collegarli vicendevolmente. Mettendo, infine, in tensione la catena trasversale si otterrà un benefico effetto di confinamento che migliorerà il comportamento trasversale globale dell'intera struttura portante del ponte.



Figura 29. Prospetto a monte e dettagli del paramento murario

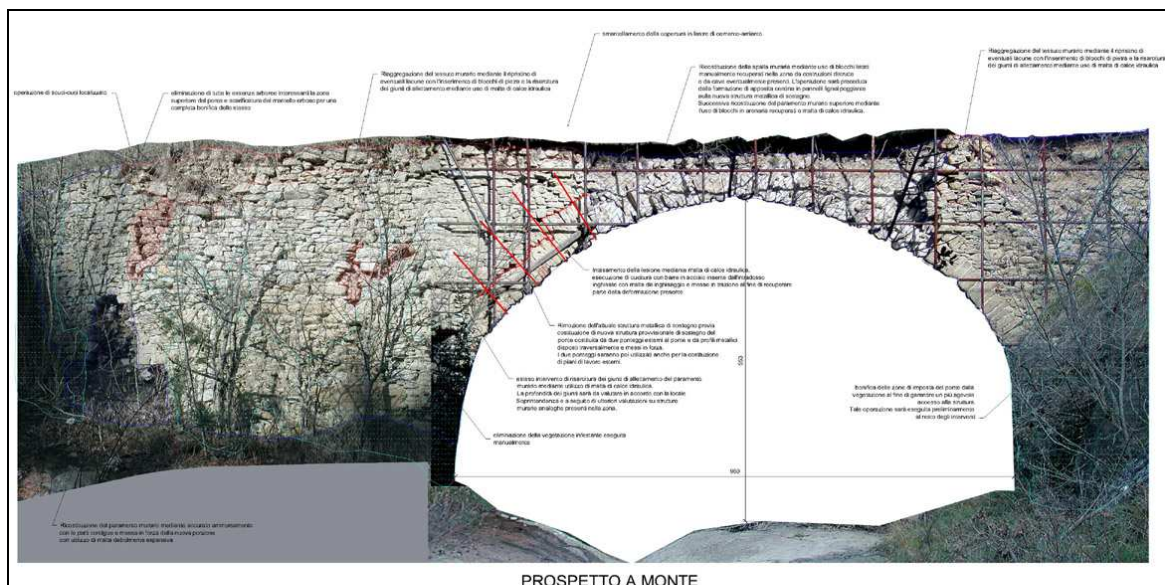


Figura 30. schema degli interventi di ripristino del tessuto murario

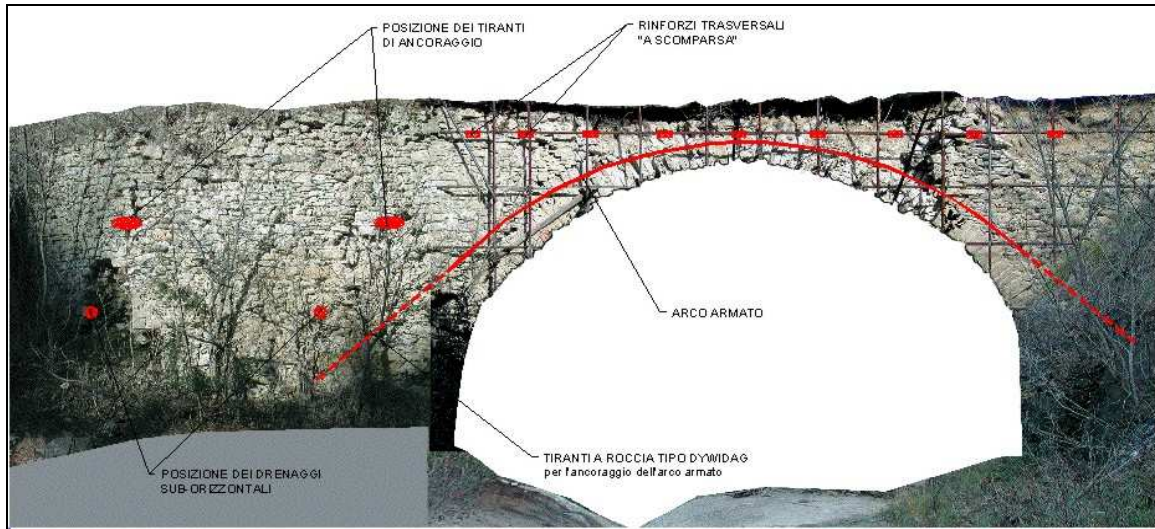


Figura 31. schema degli interventi di consolidamento statico

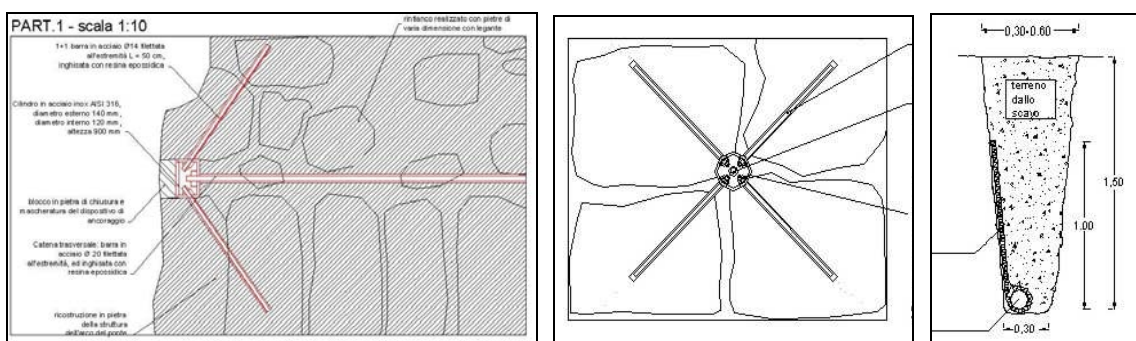
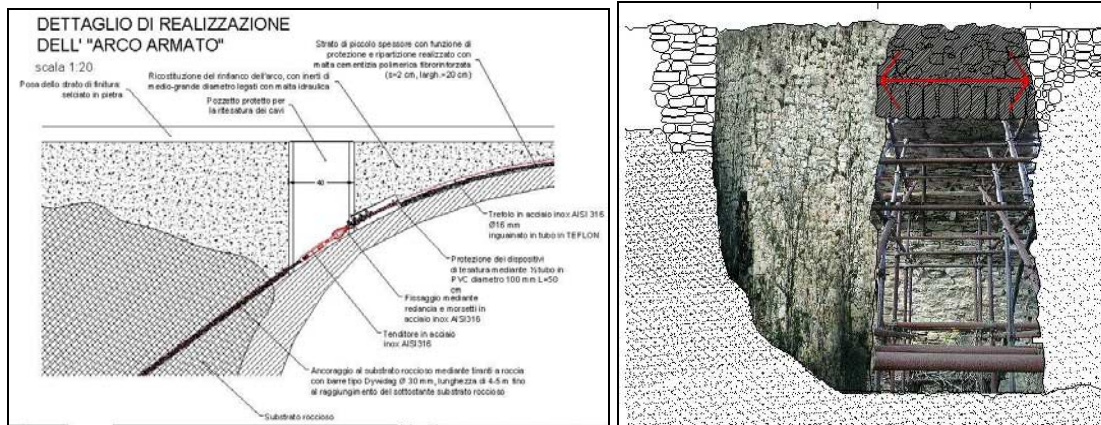


Figura 32. Particolari di progetto.



Figura 33. Situazione precedente l'intervento di presidio.



Figura 34. Situazione precedente l'intervento di presidio e struttura provvisoria di presidio in fase di allestimento

Con la fase di realizzazione degli interventi, tutt'oggi in corso, sono emersi alcuni fattori inaspettati ed a priori imprevedibili che hanno reso necessario l'aggiornamento di alcune soluzioni progettate. Come evidenziato in particolare nelle immagini sotto riportate, una volta rimosso il materiale di riempimento, si è scoperto che l'arco portante presenta in realtà un andamento in estradosso molto irregolare e due diversi spessori rispettivamente sui due semiarchi di destra e di sinistra. Si è reso perciò necessario disporre la realizzazione di tre nervature estradosso di raccordo in muratura sul semiarco più sottile di modo da permettere la successiva posa dei tiranti dell'arco armato.



Figura 35. Immagini di cantiere: situazione precedente agli interventi di ricostruzione delle porzioni crollate di volta e di muri di testa.



Figura 36. Immagini di cantiere: situazione riscontrata al termine della fase di rimozione dei rin fianchi.



### **Ponte di Campazzino, Milano**

Si tratta di un manufatto di modeste dimensioni ad arcata unica ribassata con archivolti in pietra di grande apparecchio e volta interna in mattoni.

Su questo ponte è prevista la realizzazione di un intervento di rinforzo di carattere sperimentale commissionato dal Comune di Milano e basato sulla tecnica dell'arco armato a cavi estradossali.

E' attualmente interessato da un quadro fessurativo rilevante sia a livello degli archivolti che della volta interna.

La prima fase in programma prevede la realizzazione di una campagna diagnostica volta soprattutto ad un approfondimento delle zone di imposta dell'arco portante.

Seguirà il progetto dell'intervento di rinforzo.



Figura 37. Immagini di insieme del ponte



Figura 38. Immagini di dettaglio della volta muraria portante

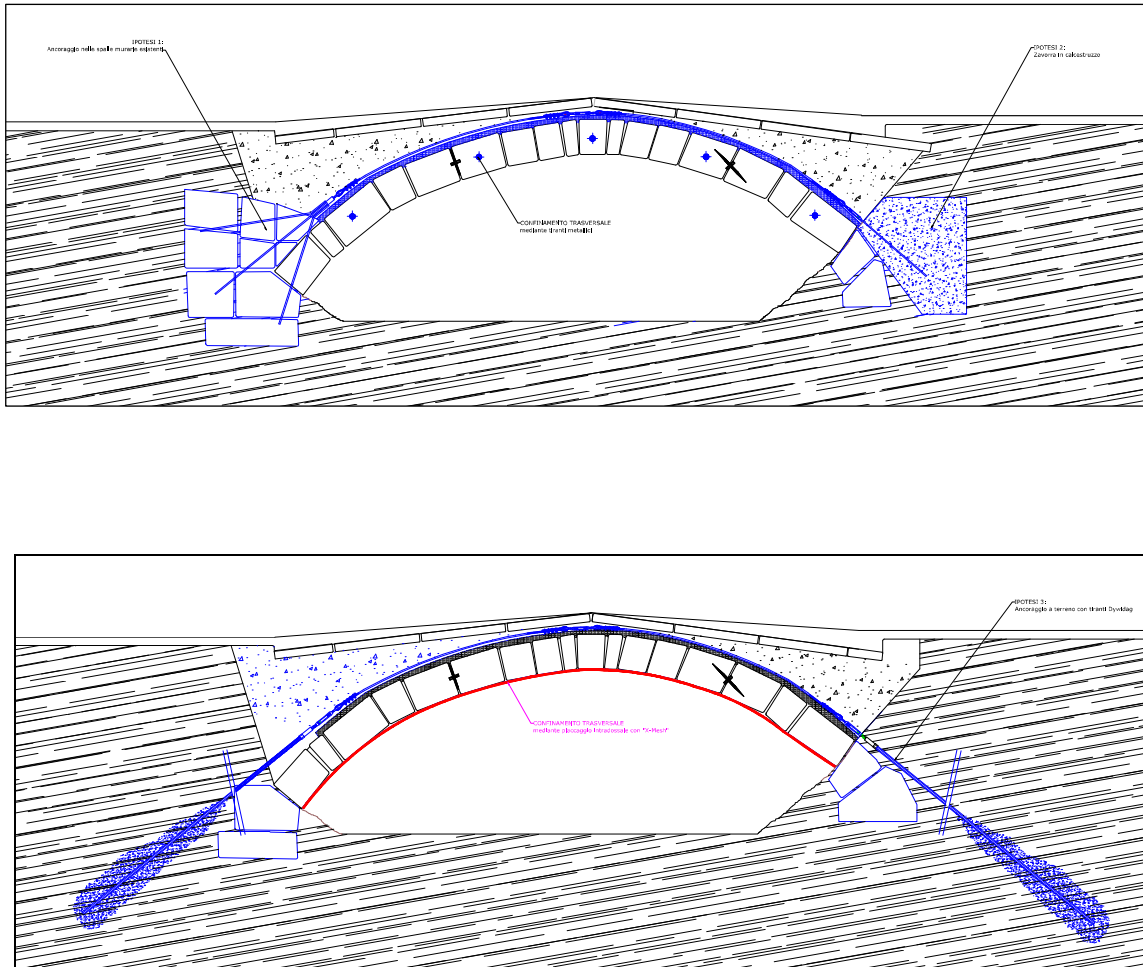


Figura 39. Ipotesi di intervento formulate in funzione della consistenza delle zone di imposta

## Conclusioni

Un rilievo finalizzato del bene, una ricostruzione puntuale delle tecniche esecutive adottate, una valutazione delle patologie sopravvenute con la previsione del loro evolversi, una diagnostica strumentale adeguata, una verifica realistica, anche se semplificata, del comportamento statico in esercizio e a collasso, sono tutti passi propedeutici ad una corretta valutazione del livello di sicurezza e alla progettazione degli eventuali interventi di consolidamento, su quella particolare tipologia edilizia qui analizzata, rappresentata dai ponti ed in particolare da quelli in muratura.

La attuale disponibilità di materiali di elevata durabilità e la individuazione di nuove tecniche di intervento mirate, poco invasive ed almeno in parte reversibili, può condurre alla definizione di interventi minimi, necessari e rispettosi della struttura originaria.

Il ponte in muratura, opera d'arte per eccellenza in un mondo a cavallo tra ingegneria ed architettura, offre lo spunto per dare l'avvio ad una attività interdisciplinare di controllo diffuso del patrimonio nazionale basata su criteri di confronto oggettivi, applicati ad una tipologia edilizia con caratteri di omogeneità, per quanto può esserlo l'edilizia storica.

L'esperienza acquisita durante questa analisi sul costruito porterà alla individuazione di modalità operative e di prassi decisionali da testare su grandi numeri, le quali in seguito potranno essere estese ad altre tipologie edilizie, anche più complesse.

Il tutto in vista della conservazione del patrimonio edilizio storico che ancora oggi, per nostra fortuna ma anche per nostra responsabilità, ci circonda.

---

## Bibliografia

- 1 Jurina L., *L'arco armato: una nuova tecnica di consolidamento di archi e volte in muratura con uso di tiranti metallici*, XVI Convegno CTA, Ancona 1997
- 2 Jurina L., *Una tecnica di consolidamento attivo per archi e volte in muratura*, Convegno ASSISI 99, Seismic performance of built Heritage in Small Historic centers, Assisi, Aprile 1999
- 3 Jurina L., *Il confinamento laterale delle pareti in muratura mediante tiranti inseriti nelle "buche pontate"*, Conv.naz. "La meccanica delle murature tra teoria e progetto", Messina, Settembre 1996
- 4 Fumagalli C., *Le catene nella progettazione e nel consolidamento strutturale di archi e volte*, Tesi di laurea, Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore prof. L.Jurina, 1996
- 5 Cultreri O., Savoldelli G., *Arco armato*, Tesi di laurea, Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore prof. L.Jurina, 1997
- 6 Senini A., Zanon P., *I ponti storici in muratura. Adeguamento a nuove condizioni di esercizio: una modifica sostenibile*, Tesi di laurea, Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore prof. L.Jurina, 1999
- 7 L. Jurina, *I tiranti metallici nel consolidamento degli edifici monumentali*, atti del XVI Congresso C.T.A., Ancona 1997
- 8 Heyman J., *The masonry arch*, Ellis Horwood Library Editino, England, 1982
- 9 CIAS, *Manuale per la valutazione dello stato dei ponti*, Edizione 2002
- 10 Benvenuto E., *La scienza delle costruzioni ed il suo sviluppo storico*, Sansoni, Firenze, 1981
- 11 Coulomb C., *Essai sur une application de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'Architecture*, pubblicato tra i "Mémoires de Mathématique et de Physique présentés à l'Académie Royale des Sciences, par divers Savans, et lûs dans les Assemblées – Année 1773", Paris, 1776.
- 12 Rocchi P., Piccirilli C., *Manuale del consolidamento*, Edizioni DEI Roma, 1991