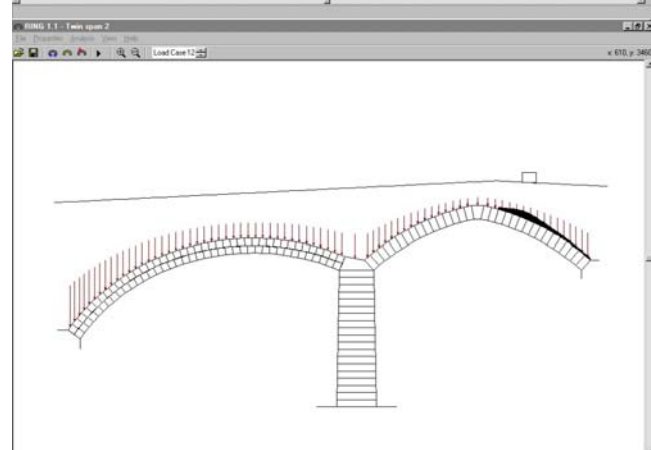
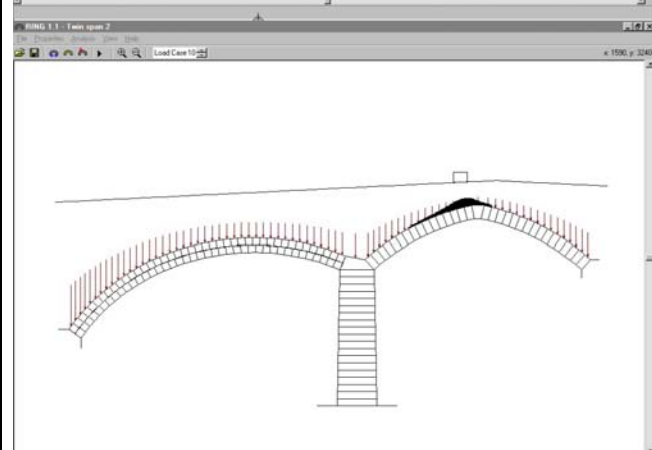
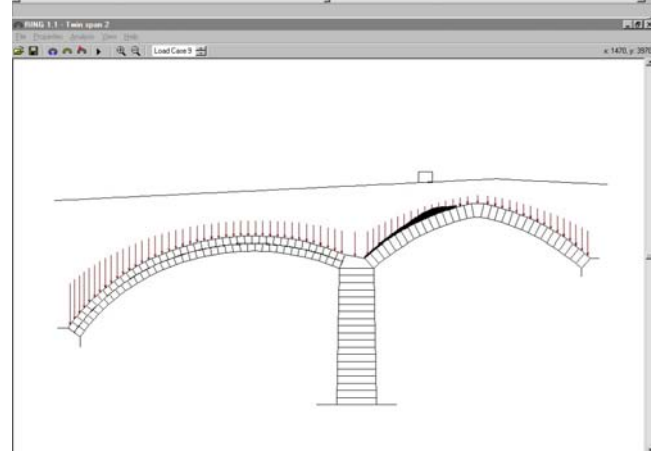
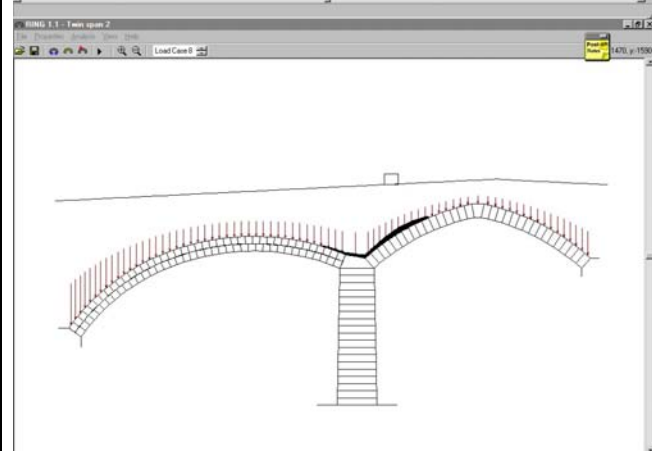
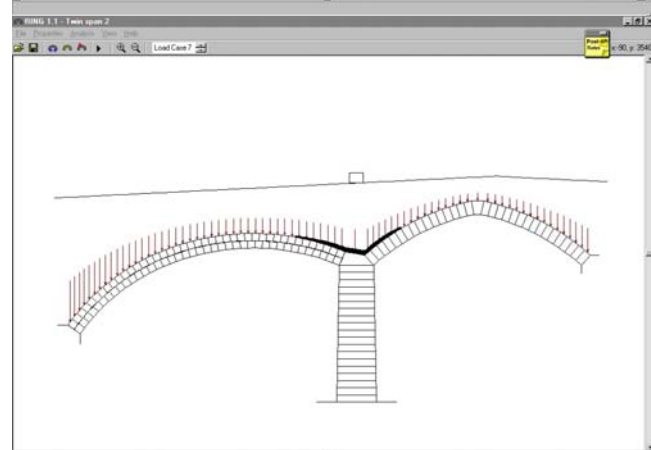
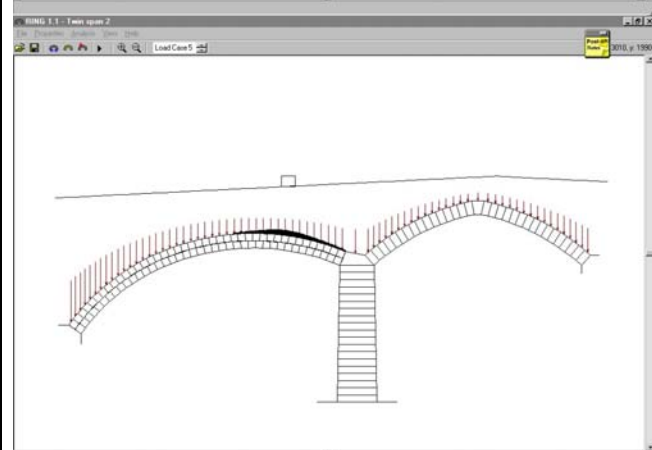
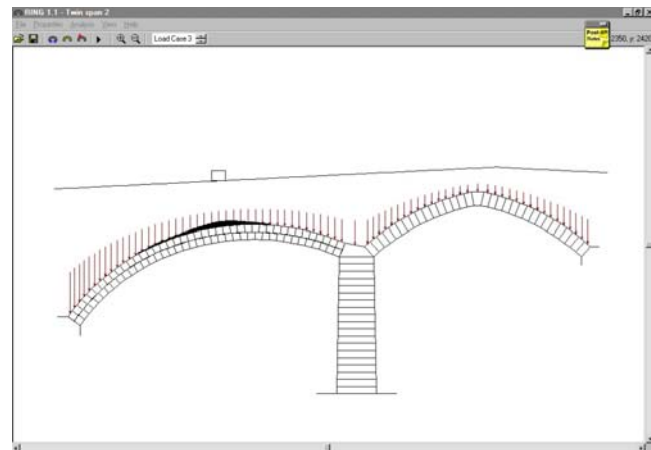
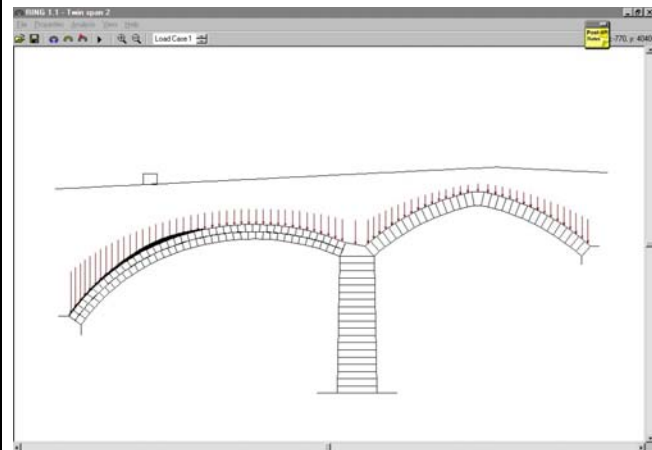
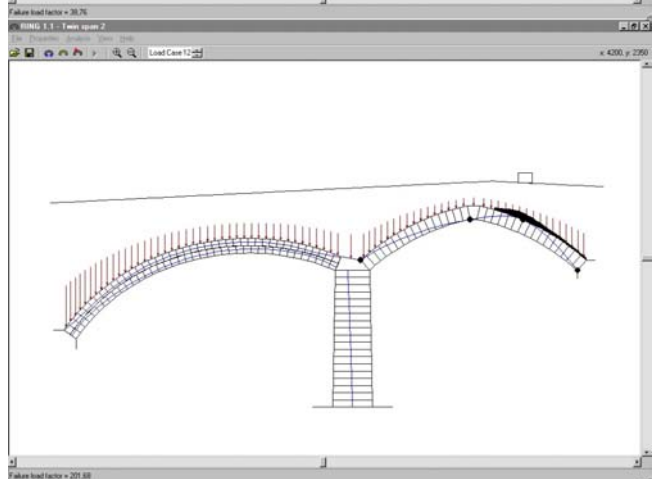
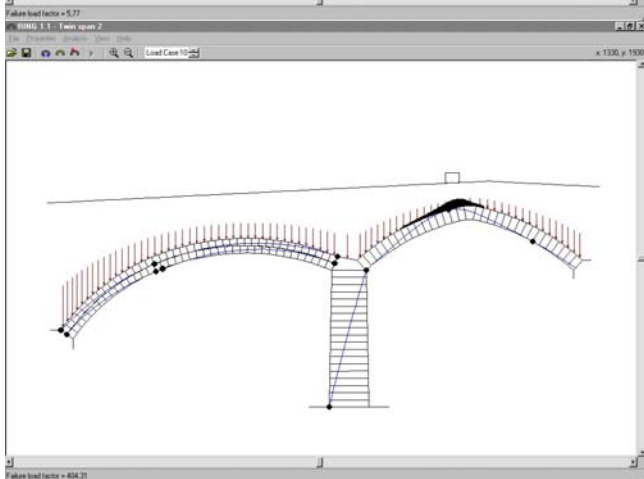
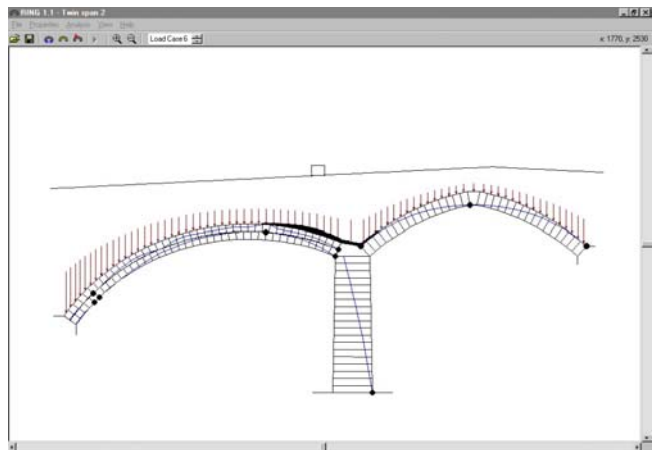
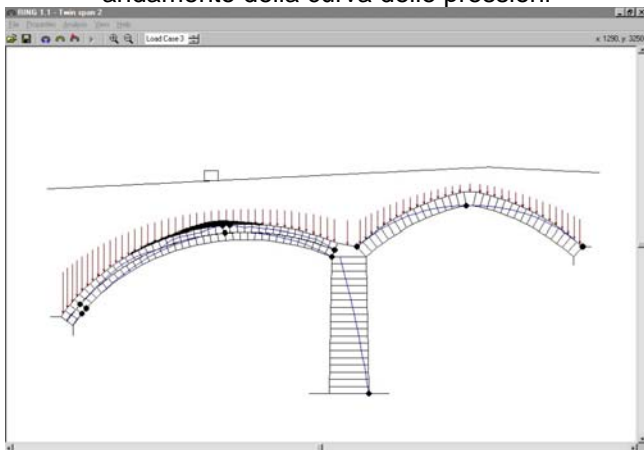


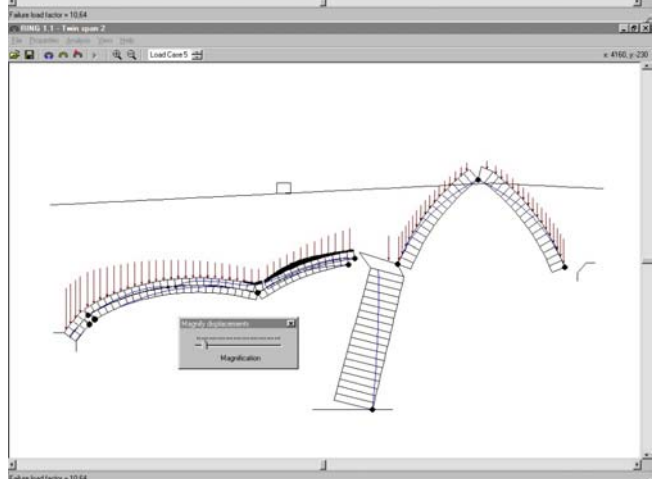
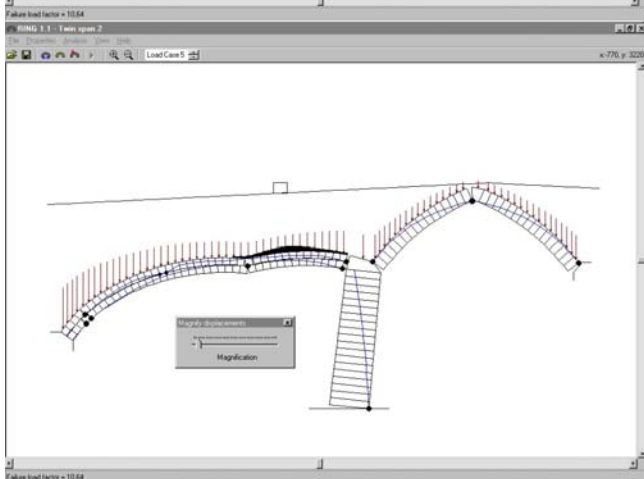
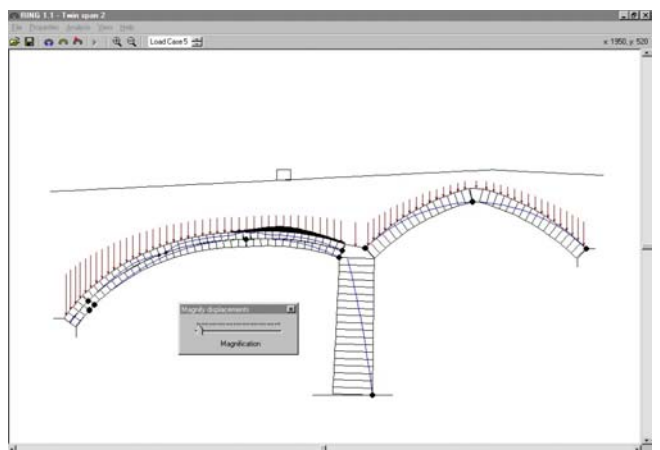
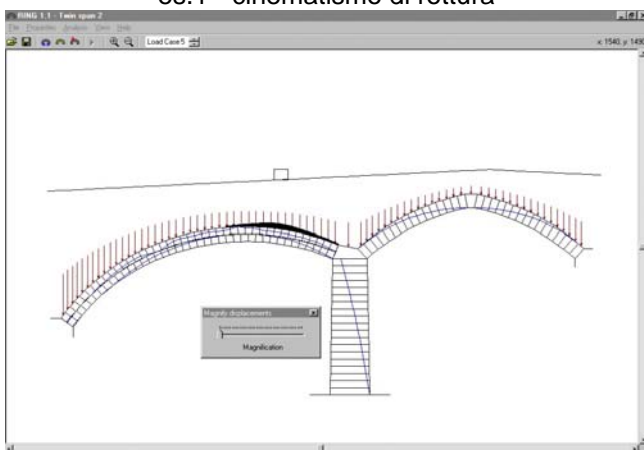
carico concentrato mobile



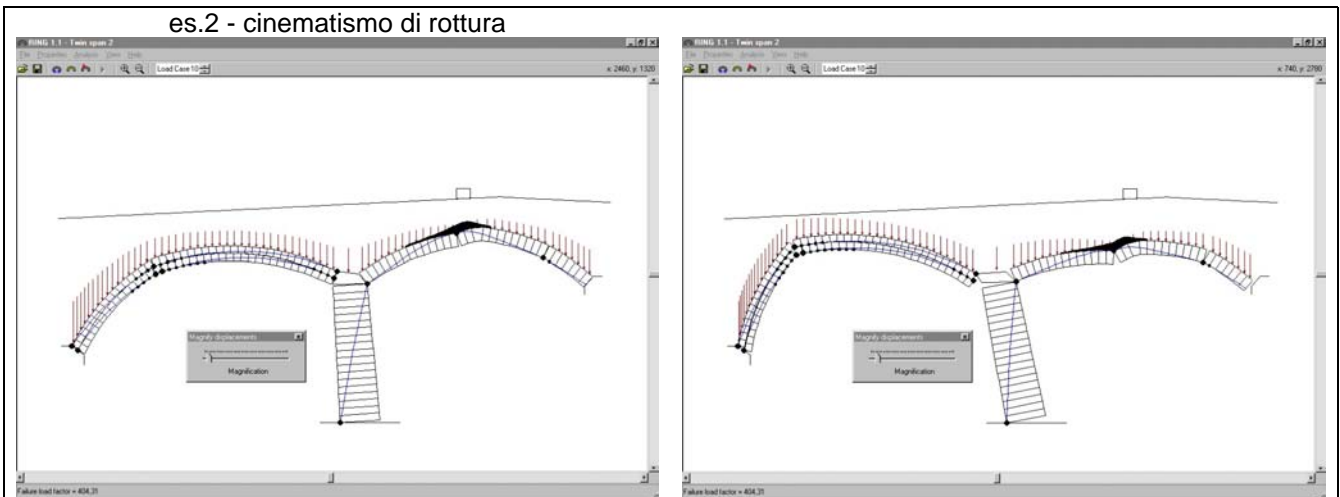
andamento della curva delle pressioni



es.1 - cinematico di rottura



es.2 - cinematico di rottura



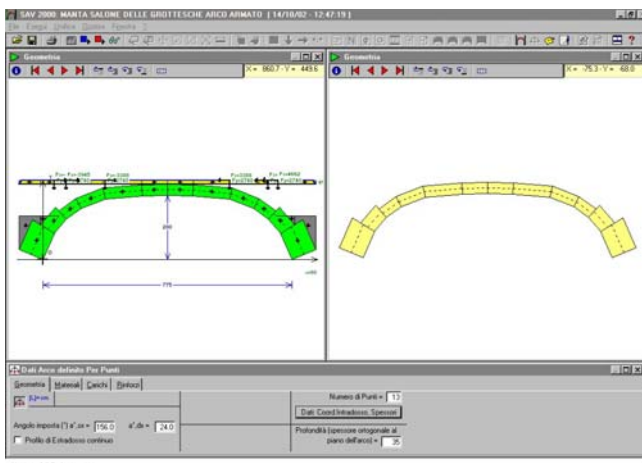
Il programma SAV2000

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.

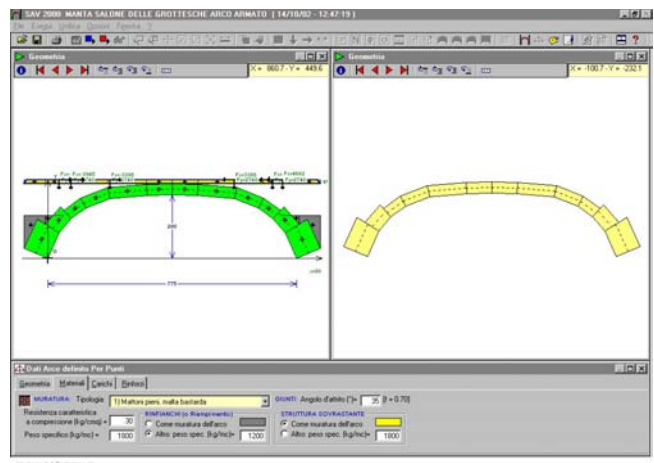
SAV consente quattro verifiche fondamentali:

- 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.*

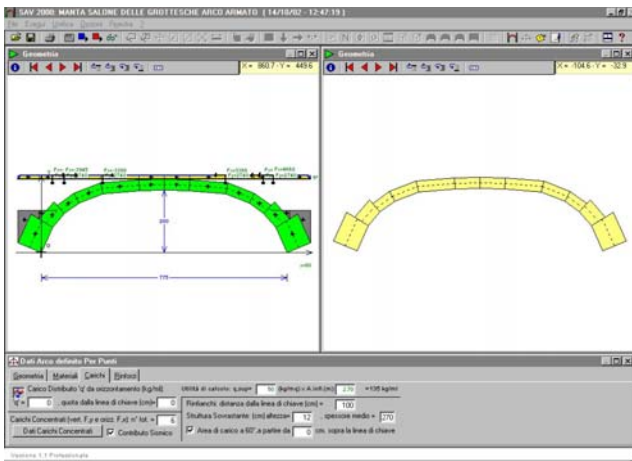
Permette l'introduzione di catene metalliche, di rinforzi con cappa in calcestruzzo armato e di rinforzi con fibre in materiale composito (nastri in FRP). Oltre a carichi uniformi su tutta la campata consente l'introduzione di carichi concentrati verticali ed orizzontali e permette l'analisi statica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



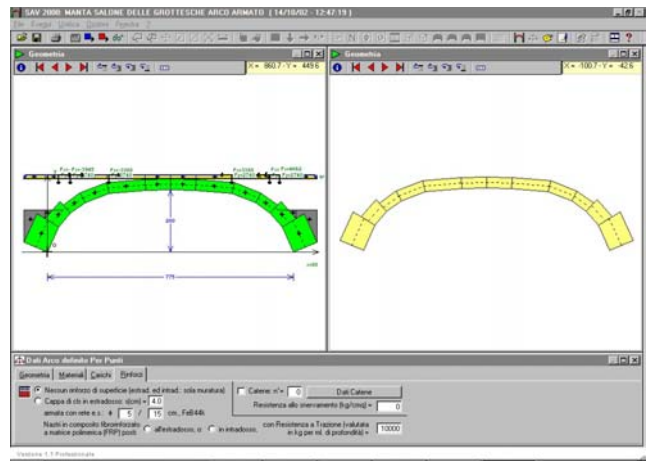
introduzione geometria



definizione dei materiali



introduzione dei carichi



introduzione di catene e rinforzi

OUTPUT GRAFICI

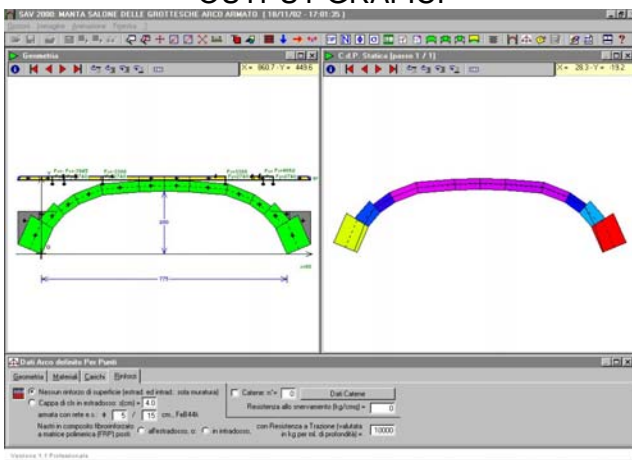


grafico dell'andamento della curva delle pressioni



grafico dell'azione N normale ai conci

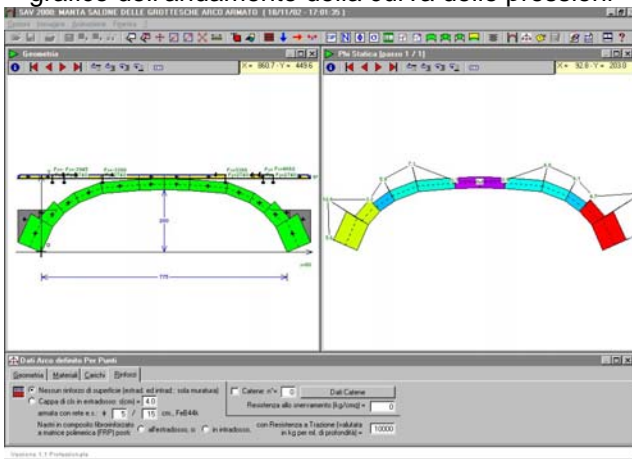


grafico degli sforzi di scorrimento tra i conci

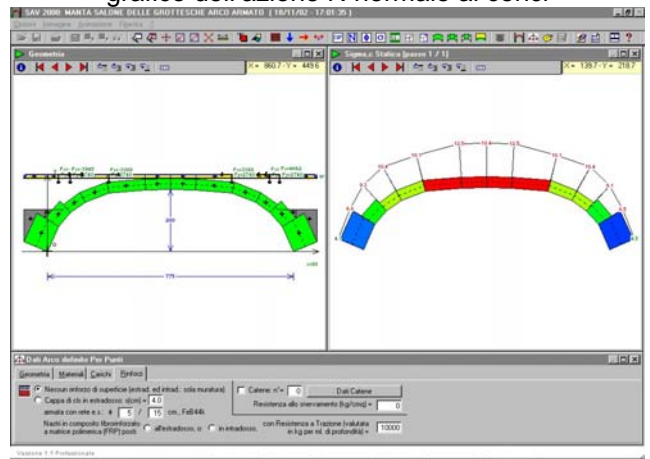
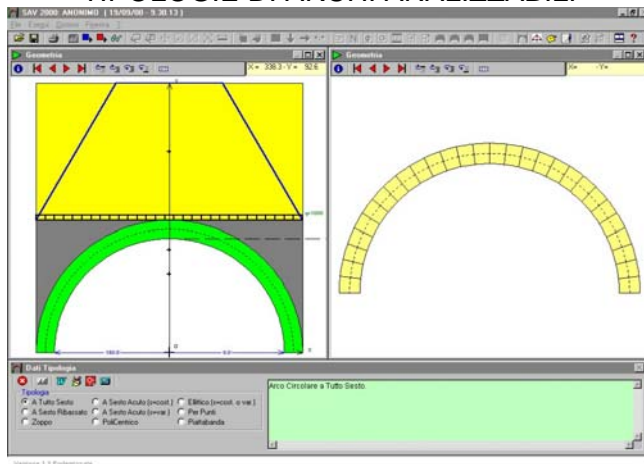
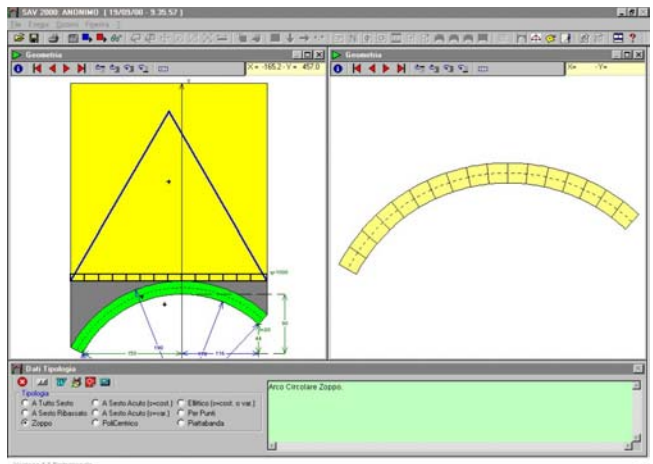


grafico degli sforzi normali ai conci

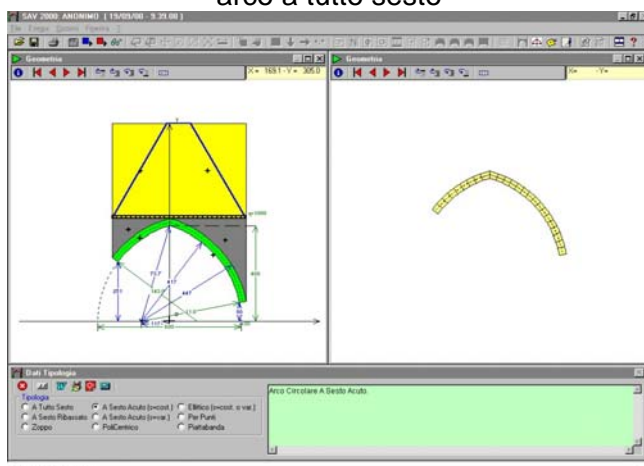
TIPOLOGIE DI ARCHI ANALIZZABILI



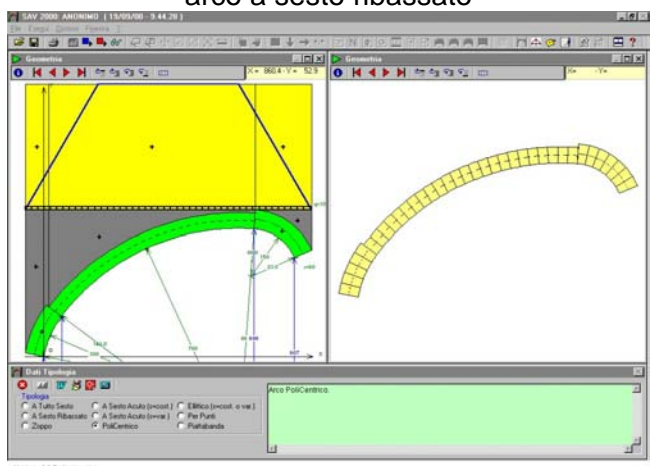
arco a tutto sesto



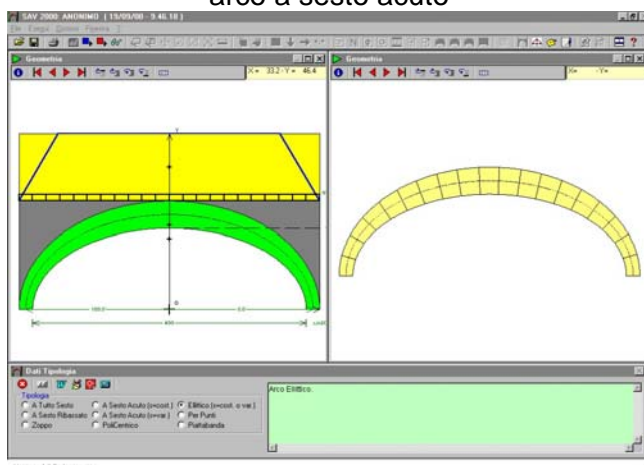
arco a sesto ribassato



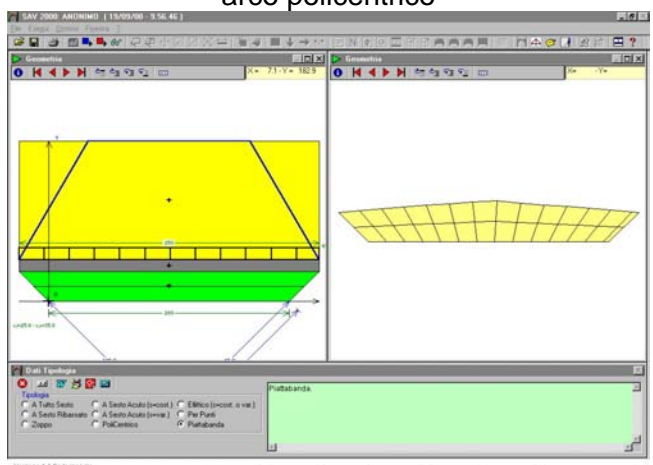
arco a sesto acuto



arco policentrico



arco ellittico



piattabanda

PONTE SUL TORRENTE STRONA A GUARDABOSONE (VC)

(Tesi di Laurea di A.Senini, P.Zanon, *rif.bibl.* 7)

All'interno di una recente ed approfondita 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 tesi. 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 rin fianchi sono in muratura di pietrame, i muri frontali sono in pietra selezionata legata con malta, sormontati da un cordolo-gocciolatoio in pietra da taglio.

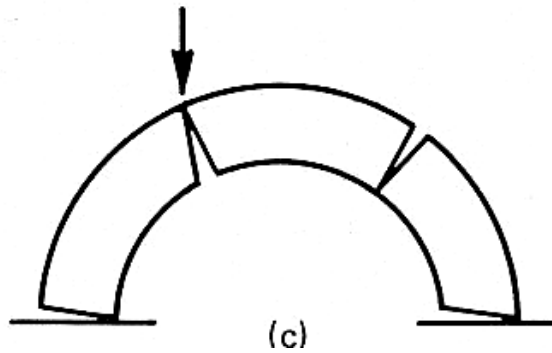


Viste del ponte

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.

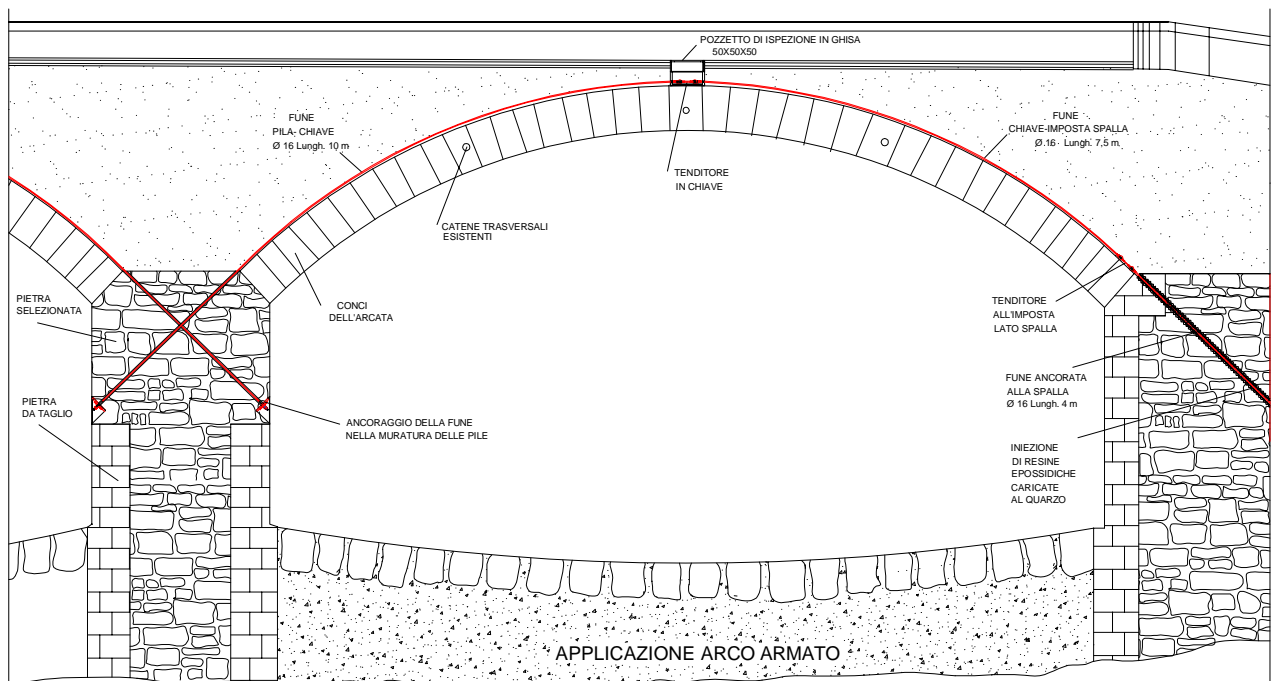
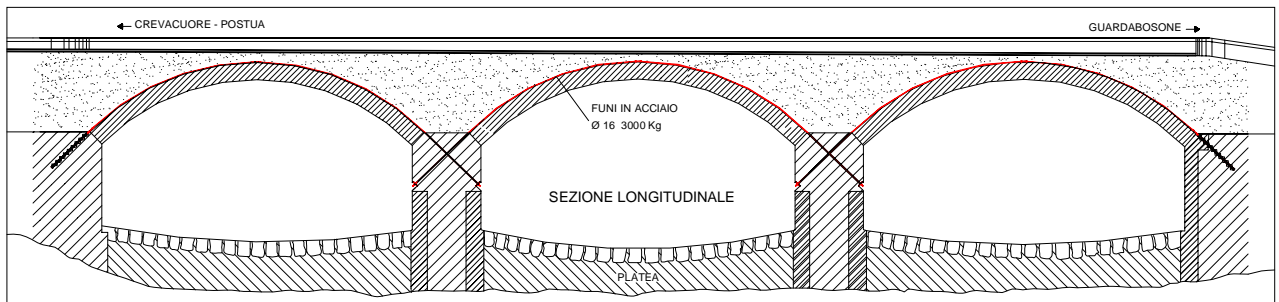
La lunghezza totale è di 41,25 m, con larghezza pari a 5,10 m; le luci nette sono per l'arcata destra 12,15 m, per l'arcata centrale 12,05 m e per l'arcata sinistra 11,85 m. La sezione media degli archi è di circa 65 cm.

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 cinematici in altre posizioni. Come ben sappiamo, il cinematico 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.



(c)
Tipo di cinematismo a quattro cerniere

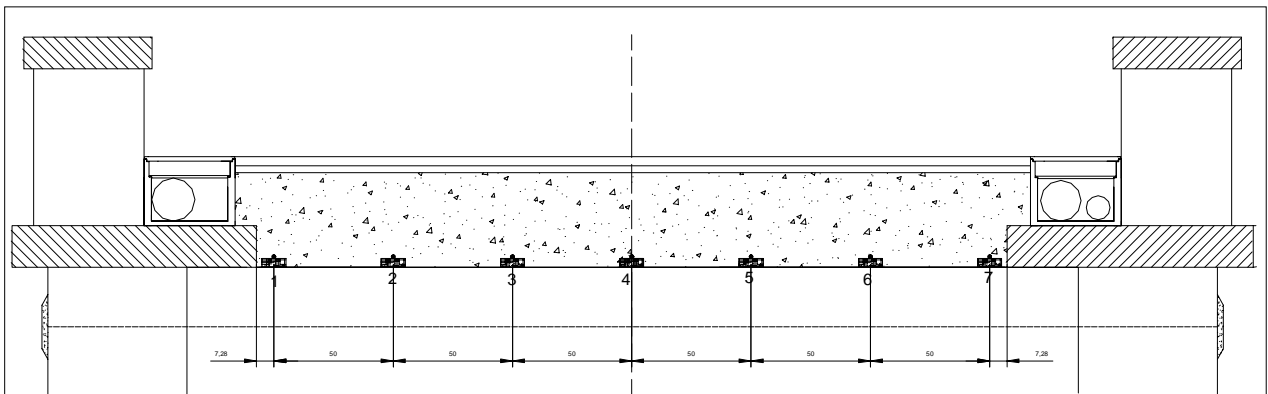
Attraverso l'introduzione di cavi estradosso nel cosiddetto "metodo dell'arco armato", si riesce ad impedire la formazione di almeno una tra le due famiglie di cerniere, o quelle di intradosso o quelle di estradosso. Nella struttura non potranno nascere quindi meccanismi a cerniere alternate. La struttura, 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.



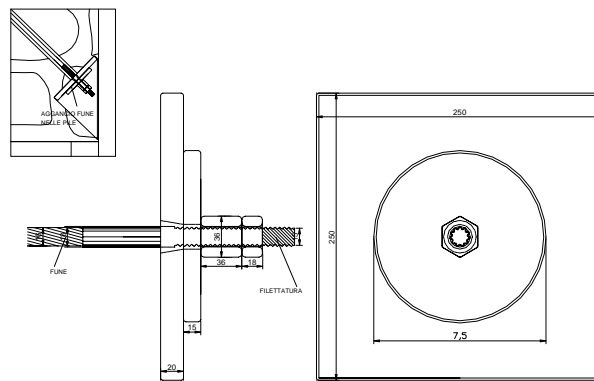
I previsti cavi in acciaio inox sono ancorati alle spalle e alle pile (nel caso di un ponte ad un'unica campata, esse saranno ancorate unicamente alle spalle mediante ancoraggi profondi).

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.

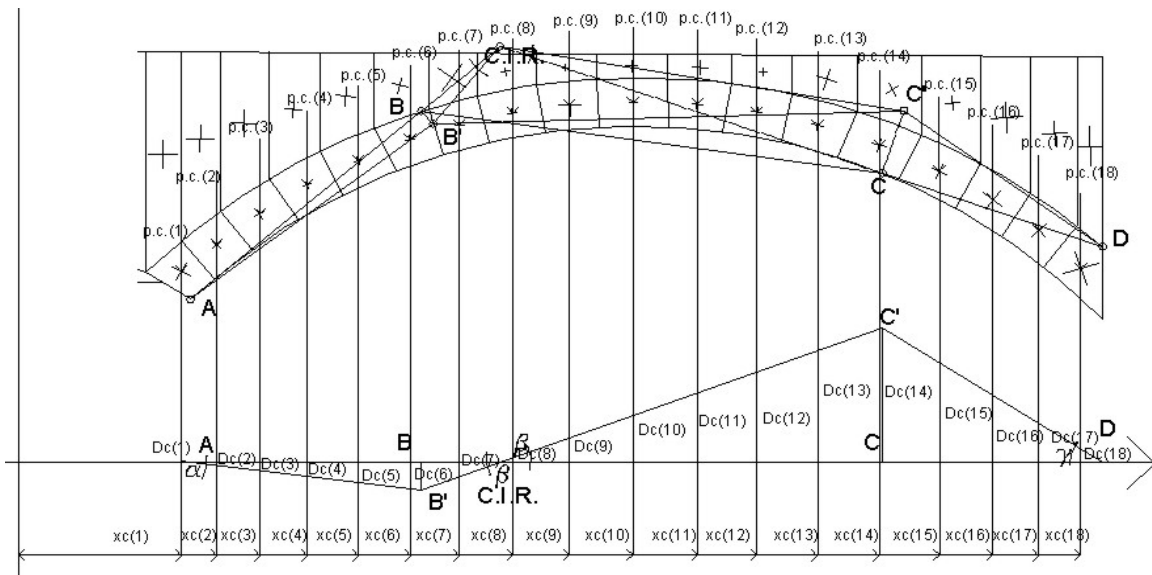
Le funi vengono tesate tramite tenditori: uno posto in chiave e due all'imposta alle spalle. Nel caso studiato in ogni campata sono state posizionate 7 funi tesate a circa 3 tonnellate ciascuna. Un estensimetro elettrico per la valutazione della tesatura è posto sul tenditore in chiave. Il tenditore, 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.



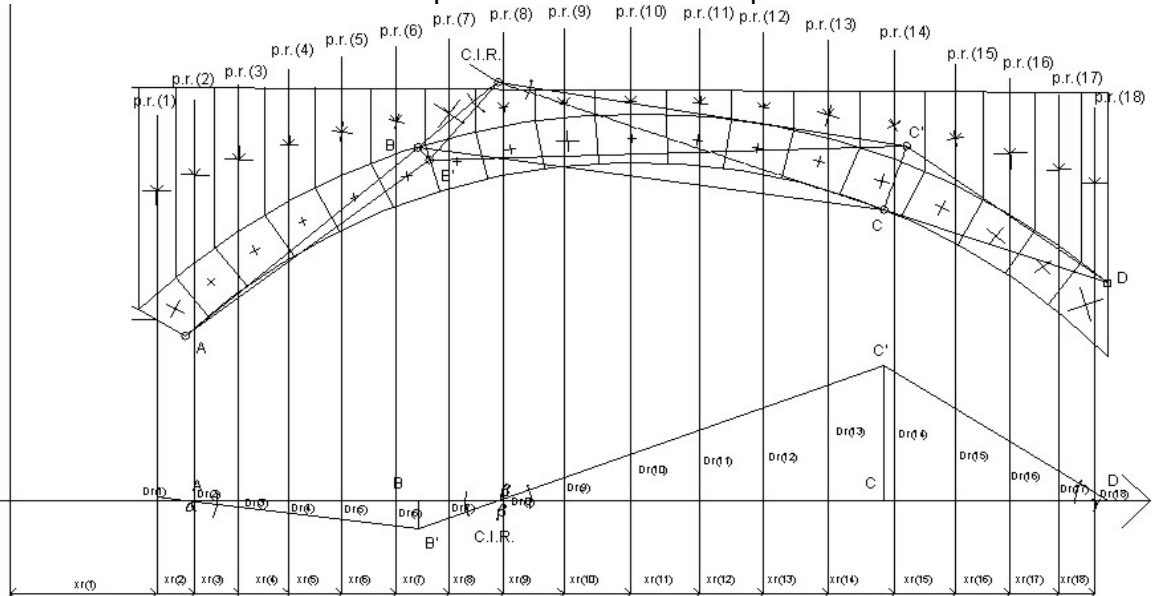
sezione trasversale



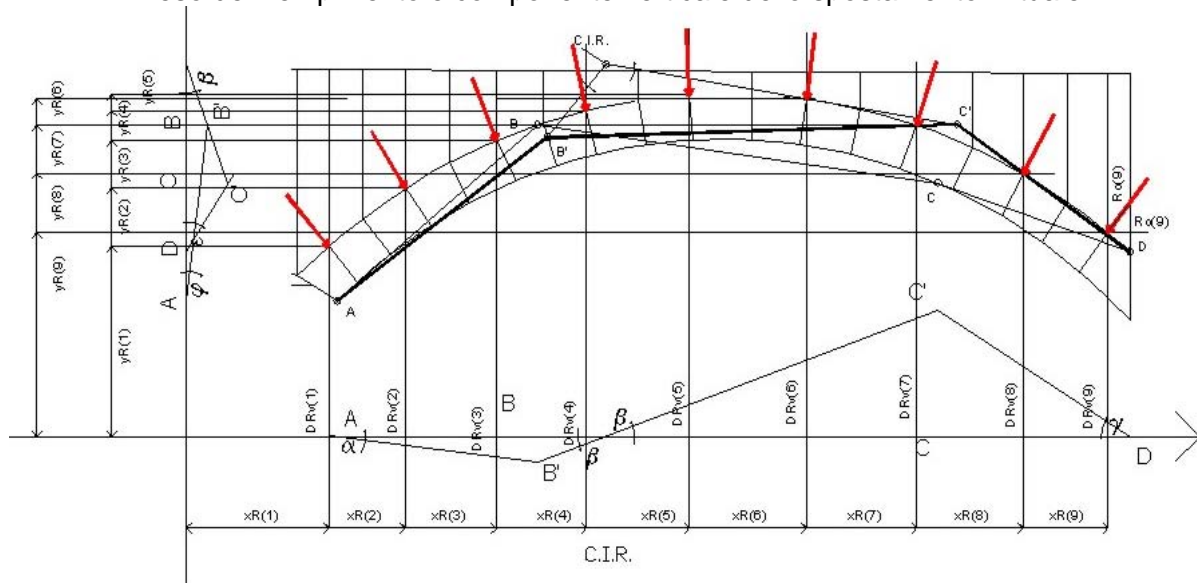
particolare dell'ancoraggio del cavo



Peso dei conci e componente verticale dello spostamento virtuale



Peso del riempimento e componente verticale dello spostamento virtuale



Carichi esercitati dalle funi 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 minimo ammissibile del ponte così come si trova oggi, corrisponde a circa 8 tonnellate. Attraverso l'applicazione di 7 tiranti tesati 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 rigidezze 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 (FO-CE)

Questo ponte romanico è situato ai piedi del monte di Montetiffi e collega le due sponde del fiume Uso. Della sua datazione non si è certi, ma la costruzione è presumibilmente legata alla 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 su 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 dall'autore, ing.L.Jurina, assieme all'ing. G.Malvisi e all'arch. M.Mazzoleni, ed ha ormai raggiunto 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 renderà ovviamente cruciali le prime fasi di intervento che consistranno 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 ritiene 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 decide 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 farà 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.

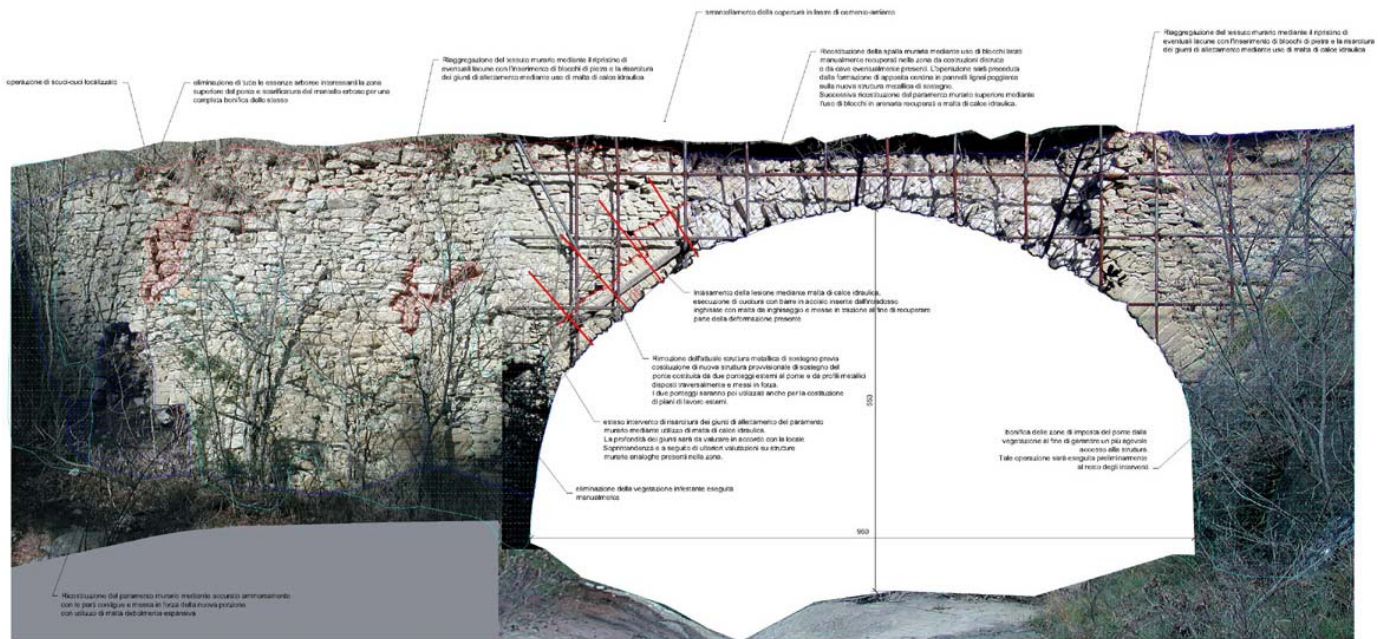
L'inserimento delle catene trasversali è caratterizzato da un dispositivo di ancoraggio "unghiato" a *completa scomparsa*, sviluppato assieme all'arch. M.Cavallin, senza piastre esterne. In questo modo si ottiene un aumento della area di effettivo ancoraggio della catena che riuscirà ad interessare più 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.



prospetto a monte



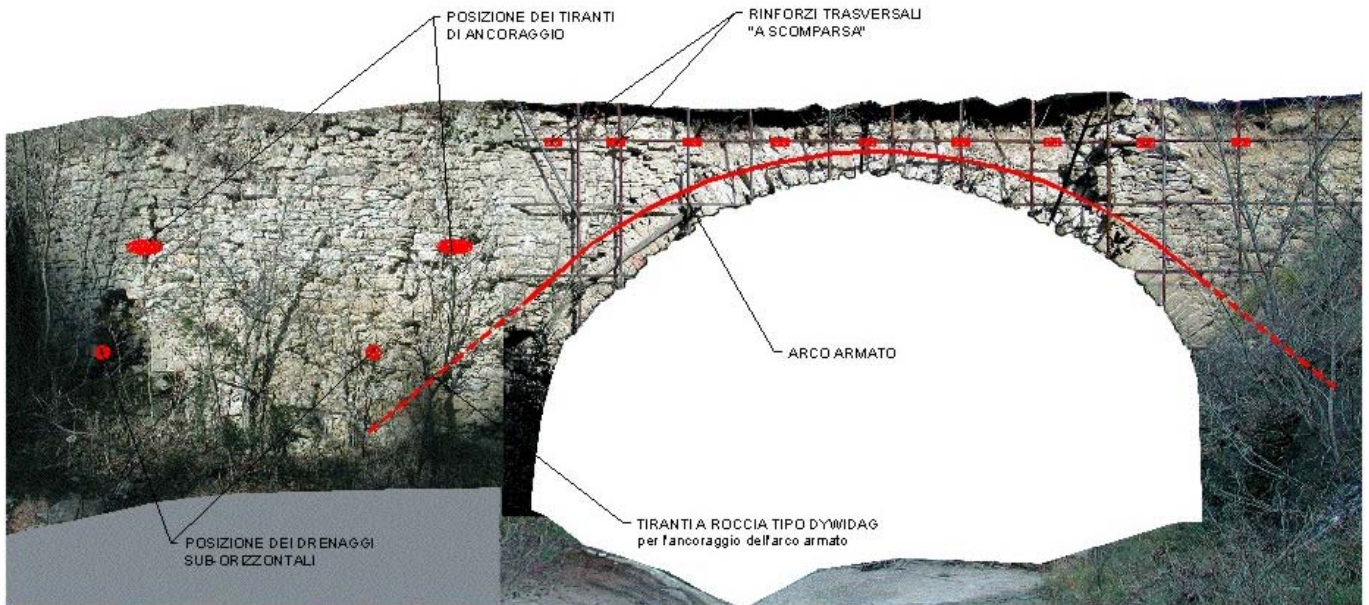
dettagli del paramento murario



LEGGENDA ESPLICATIVA DEGLI INTERVENTI

- Operazioni preliminari di abbattimento della vegetazione infestante da segnalare eventualmente
- Operazione di rifilatura dei giunti con malta di calce strauca e di innalzamento con blocchi consolidati a base di calce strauca e silio emulsionato a base cemento di essi solubili, compatibili con la muratura esistente
- Operazione di riproduzione del tessuto murario mediante ripristino dei giunti di allacciamento, eventuale separazione temporanea con successivo riposizionamento dei blocchi stabili ed inserimento di nuovi elementi lapidei opportunamente armonizzati nel tessuto esistente
- Operazione di ricostruzione delle zone di muratura parzialmente crollate mediante utilizzo di blocchi in pietra arenata analoghi a quelli esistenti, ricambi da dove limitati o da costruzioni di volta in muratura nella zona
- Operazioni di scavo-quad finalizzato per la ricostruzione di parti murarie lesionate
- Operazioni di scavo-quad eseguite con barre in acciaio inox AISI 316 ad aderenza migliorata ingobbiate con malta di ingobbio

schema degli interventi di ripristino del tessuto murario



schema degli interventi di consolidamento statico

DETTAGLIO DI REALIZZAZIONE DELL' "ARCO ARMATO"

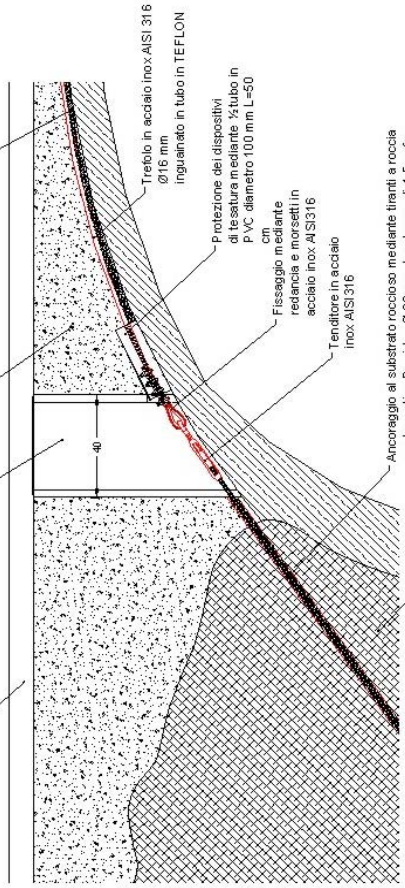
Scala 1:20

Posa dello strato di infillure: selciato in pietra

Ricostruzione del rifianco dell'arco, con inerti di medio-grande diametro legati con malta idraulica

Pozzetto protetto per la riteguratura dei cavi

Strato di piccolo spessore con funzione di protezione e ripulizione realizzato con in alta cementizia polimerica fibrorinforzata (3-2 cm, largh. ~20 cm)



Trebbio in acciaio inox AISI 316 Ø16 mm inguainato in tubo in TEFLON

Protezione dei dispositivi di tessitura mediante 1/2 tubo in PVC diametro 100 mm L=50 cm

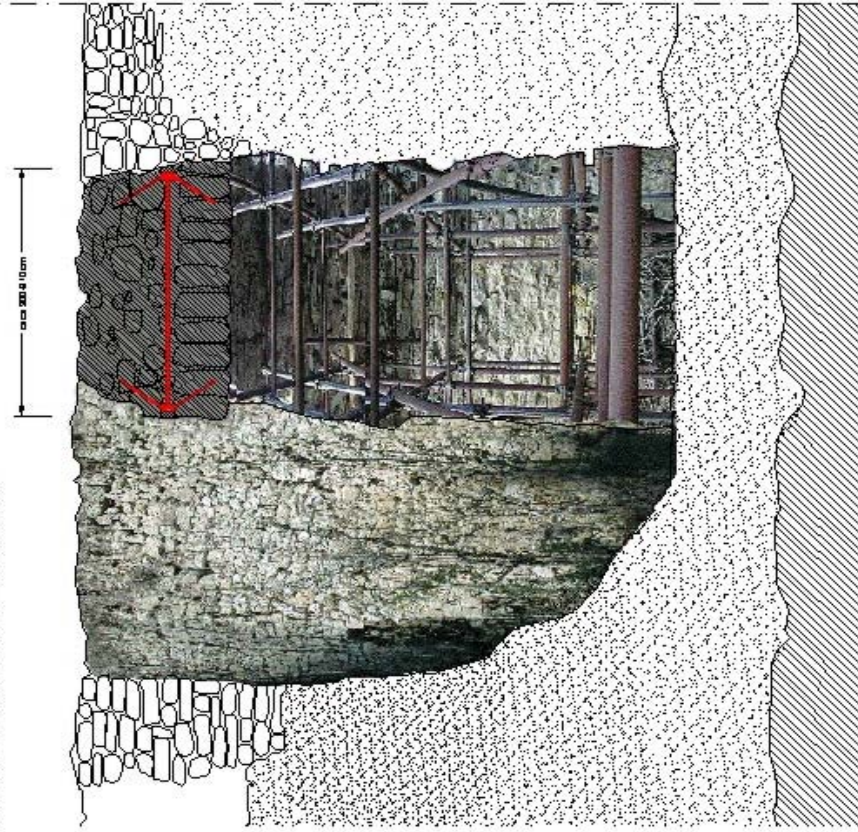
Fissaggio mediante resina e morsetti in acciaio inox AISI 316

Tenditore in acciaio inox AISI 316

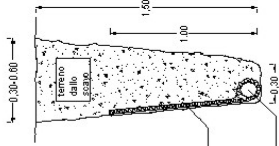
Ancoreggio al substrato roccioso mediante tiranti a roccia con barre tipo Dywidag Ø 30 mm, lunghezza di 4-5 m fino al raggiungimento del sottostante substrato roccioso

Substrato roccioso

DETTAGLIO DI REALIZZAZIONE DELLA CATENA UNGHIAIA DI RINFORZO TRASVERSALE SEZIONE TRASVERSALE - SCALA 1:50



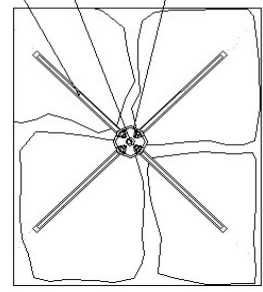
TRINCEA scala 1:20



barra in acciaio Ø14 filettata all'estremità L=50 cm, inghiata con resina epossidica
Catena trasversale: barra in acciaio Ø 20 filettata all'estremità, ed inghiata con resina epossidica

Cilindro in acciaio inox AISI 316, chiuso con coperchio metallico e scomparsa dietro una pietra del paramento murario

PART.1 - vista frontale scala 1:20



DETTAGLIO DI REALIZZAZIONE DELL' "ARCO ARMATO"

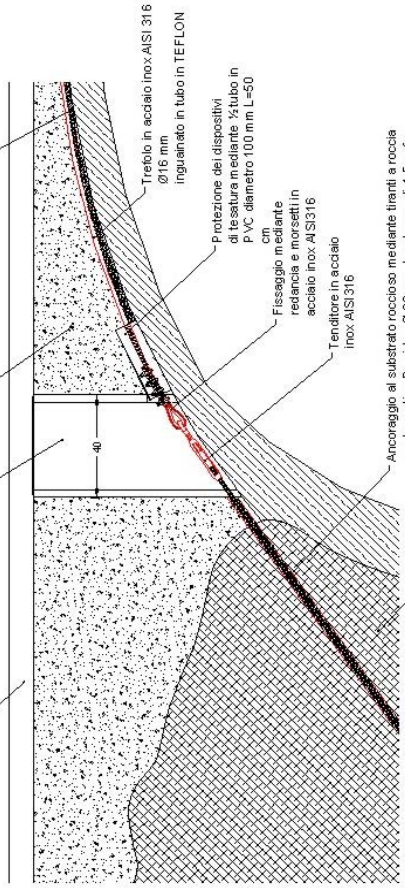
Scala 1:20

Posa dello strato di infillure: selciato in pietra

Ricostruzione del rifianco dell'arco, con inerti di medio-grande diametro legati con malta idraulica

Pozzetto protetto per la riteguratura dei cavi

Strato di piccolo spessore con funzione di protezione e ripulizione realizzato con in alta cementizia polimerica fibrorinforzata (3-2 cm, largh. ~20 cm)



Trebbio in acciaio inox AISI 316 Ø16 mm inguainato in tubo in TEFLON

Protezione dei dispositivi di tessitura mediante 1/2 tubo in PVC diametro 100 mm L=50 cm

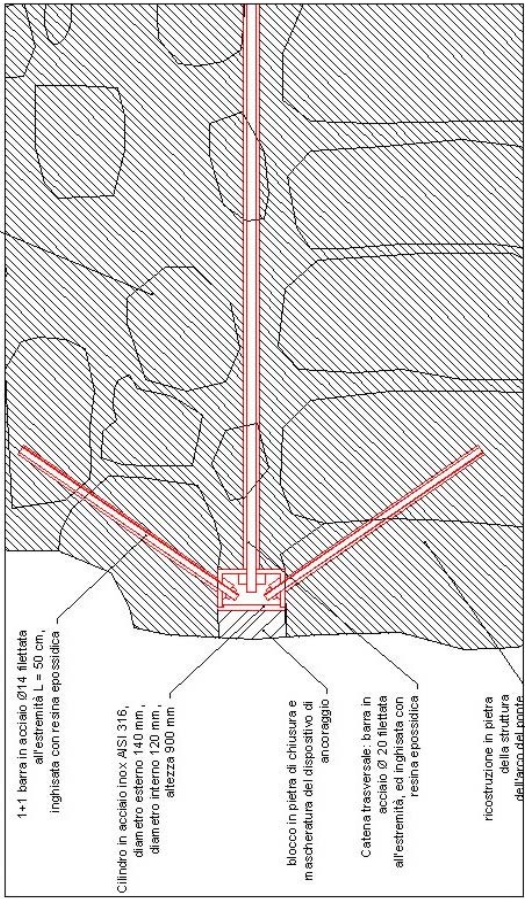
Fissaggio mediante resina e morsetti in acciaio inox AISI 316

Tenditore in acciaio inox AISI 316

Ancoreggio al substrato roccioso mediante tiranti a roccia con barre tipo Dywidag Ø 30 mm, lunghezza di 4-5 m fino al raggiungimento del sottostante substrato roccioso

Substrato roccioso

PART.1 - scala 1:10



1+1 barra in acciaio Ø14 filettata all'estremità L= 50 cm, inghiata con resina epossidica

Cilindro in acciaio inox AISI 316, diametro esterno 140 mm, diametro interno 120 mm, altezza 900 mm

blocco in pietra di chiusura e mascheratura del dispositivo di ancoraggio

Catena trasversale: barra in acciaio Ø 20 filettata all'estremità, ed inghiata con resina epossidica

ricostruzione in pietra della struttura dell'arco del ponte

rifianco realizzato con pietre di varia dimensione con legante

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., Jadicicco M., *L'acciaio inossidabile nel consolidamento delle strutture*, Convegno "Progettare e costruire con l'acciaio inossidabile", Milano, novembre 2000
- 4 Jurina L., *Il confinamento laterale delle pareti in muratura mediante tiranti inseriti nelle "buche pontaiè"*, Conv.naz. "La meccanica delle murature tra teoria e progetto", Messina, Settembre 1996
- 5 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
- 6 Cultreri O., Savoldelli G., *Arco armato*, Tesi di laurea, Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore prof. L.Jurina, 1997
- 7 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
- 8 L. Jurina, *I tiranti metallici nel consolidamento degli edifici monumentali*, atti del XVI Congresso C.T.A., Ancona 1997
- 9 Heyman J., *The stone skeleton*, Int. Journ. Solids and Structures, 1966
- 10 Heyman J., *The masonry arch*, Ellis Horwood Library Editino, England, 1982
- 11 CIAS, *Manuale per la valutazione dello stato dei ponti*, Edizione 2002
- 12 Galliazzo V., *I ponti romani*, Vol. I e II, Edizioni Canova, Treviso, 1995
- 13 Benvenuto E., *La scienza delle costruzioni ed il suo sviluppo storico*, Sansoni, Firenze, 1981
- 14 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.
- 15 Rocchi P., Piccirilli C., *Manuale del consolidamento*, Edizioni DEI Roma