

IV Workshop Italiano sulle Costruzioni Composte

Palermo 23 – 24 Novembre 2000

METODI INNOVATIVI PER IL CONSOLIDAMENTO DEI SISTEMI A VOLTA IN MURATURA

A. Failla¹, C. Cucchiara¹ e M. Accardi¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università degli Studi di Palermo

ABSTRACT

In recent years new reinforcing techniques for the consolidation of historical masonry structures have been developed.

In order to analyze the effectiveness of such techniques, experimental tests have been performed on calcarenite ashlar cylindrical vaults with mortar joints. Two extrados consolidation methods have been compared: pre-stressed steel cable and bonded CFRP sheet reinforcement .

1 INTRODUZIONE

Il costante interesse per la salvaguardia del patrimonio storico-artistico, continua ad alimentare il dibattito tecnico-scientifico sulla ricerca di nuovi materiali e metodi per il consolidamento e/o il rinforzo delle strutture in muratura esistenti.

Relativamente alle strutture voltate, alcune delle tecniche più in uso di rinforzo sono quelle che fanno ricorso all'effetto di precompressione prodotto da cavi posti in tensione ed applicati sull'estradosso della volta (Jurina, 1997), e quelle che utilizzano materiali innovativi quali i compositi fibrorinforzati (CFRP). Tali metodi, rispondendo pienamente ai requisiti di reversibilità richiesti dagli Enti preposti alla salvaguardia del patrimonio storico-artistico, hanno già trovato largo impiego nel consolidamento statico di detti elementi strutturali, pur in assenza di tutte le necessarie indagini che ne attestino l'efficacia e la durabilità.

La prima tecnica di consolidamento utilizza un materiale storicamente compatibile con la muratura, l'acciaio, i cui benefici effetti nel tempo sono, però, strettamente connessi all'efficacia del sistema di vincolo dei cavi e alla capacità degli stessi di mantenere lo stato di pretensione inizialmente indotto.

L'impiego di lamine o nastri in CFRP, in alternativa ai materiali più tradizionali, necessita invece di accurate indagini, attualmente non sufficientemente disponibili in letteratura, sulle proprietà del materiale composto muratura-CFRP. Molti restano, infatti, i problemi aperti come quelli legati ai fenomeni di distacco tra la fibra e il supporto: fenomeni di peeling e debonding.

L'indagine sperimentale, condotta sia su piccola scala, per indagare sui meccanismi di trasferimento degli sforzi nonché dei relativi meccanismi di rottura, che su modelli a grande scala, per osservare il comportamento di tali rinforzi su strutture reali, diventa allora, un mezzo indispensabile per l'acquisizione di dati attendibili da assumere a guida delle modellazioni numeriche.

Con l'obiettivo di indagare sull'efficacia di tali tecniche di rinforzo per sistemi strutturali a volta a semplice curvatura, si è avviato, presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Palermo, un programma di ricerca teorico-sperimentale su volte in conci di calcarenite e malta di connessione.

A tal fine è stata realizzata un'apparecchiatura che consente di effettuare prove di carico sia monotoniche che cicliche nelle condizioni di vincoli fissi o cedevoli elasticamente o anelasticamente, per considerare l'effettiva interazione piedritti - volta. I dettagli sull'apparecchiatura di prova e le indagini preliminari effettuate, finalizzate alla determinazione della capacità portante della volta in assenza di rinforzo, riassunte brevemente nel seguito, si trovano in (Failla et al. 2000).

Lo studio è stato rivolto, in particolare, a volte a botte circolari a sesto ribassato in vera grandezza: luce 450 cm, freccia 130 cm, spessore 16 cm e lunghezza di 112 cm. Sulle strutture danneggiate sono state applicate le due tecniche di rinforzo predette, entrambe atte a contenere l'apertura dei giunti estradossali della volta.

2 INDAGINE SPERIMENTALE

2.1 Sistema di vincolo

Si compone di un blocco fisso in calcestruzzo che costituisce uno dei due vincoli della volta e di un apparato interamente in acciaio, l'altro vincolo, costituito essenzialmente da due parti: un carrello mobile su cuscinetti; un telaio di contrasto. Tra il carrello ed il contrasto sono interposte delle molle di caratteristiche elastiche note atte a simulare la presenza di una parete (piedritto).

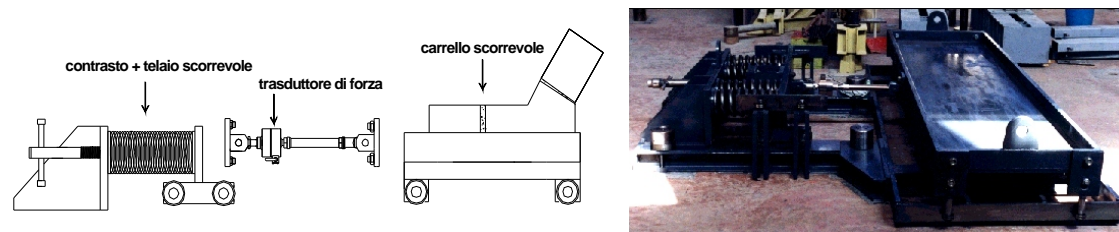


Fig. 1 – Appoggio scorrevole.

Un trasduttore di forza montato tra le molle ed il carrello consente di misurare la spinta esercitata dalla volta. Il carrello ed il trasduttore di forza possono essere anche collegati rigidamente al contrasto tramite una vite a passo fine. In tal modo si può applicare alla volta una storia di spostamenti prefissata.

L'uso appropriato degli elementi sopradescritti, come è facilmente intuibile, consente di ottenere diversi tipi di vincolo: il vincolo fisso si realizza con il bloccaggio della vite; il vincolo cedevole si ottiene rendendo attive le molle e quindi togliendo la vite; il vincolo cedevole anelasticamente si realizza per mezzo della vite imprimendo la storia di spostamenti prevista. In quest'ultimo caso si può effettuare, pertanto, una prova in controllo di spostamento (Fig. 1).

2.2 Struttura sottoposta a prova

La sperimentazione è stata condotta su volte cilindriche a sesto ribassato realizzate in conci di calcarenite di 36x21x16 cm, disposti a giunti sfalsati lungo le generatrici e malta idraulica di connessione.

2.3 Metodologia di prova

Prima di procedere all'applicazione dei rinforzi si è caricata monotonicamente la volta sino a rottura con un carico posto lungo la generatrice ad $\frac{1}{4}$ della luce (Fig. 2).

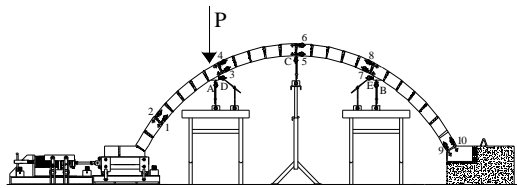


Fig. 2 – Condizione di carico ad $\frac{1}{4}$ della luce e strumentazione di misura.

Il carico è stato fatto crescere fino al formarsi di una prima evidente cerniera che si è verificata in corrispondenza del giunto a valle in adiacenza al sistema di trasmissione del carico. Il carico raggiunto in questa fase è stato di 1090 daN.

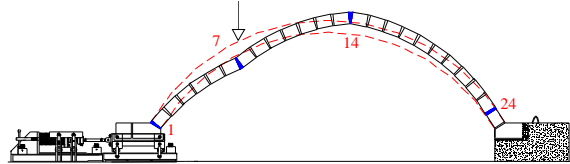


Fig. 3 – Meccanismo di collasso sperimentale.

Il formarsi della prima cerniera, ha determinato poi, e sostanzialmente in contemporanea, l'attivarsi di un meccanismo di collasso a quattro cerniere con rapida diminuzione del carico che si è stabilizzato a 750 daN (Figg. 3-4).

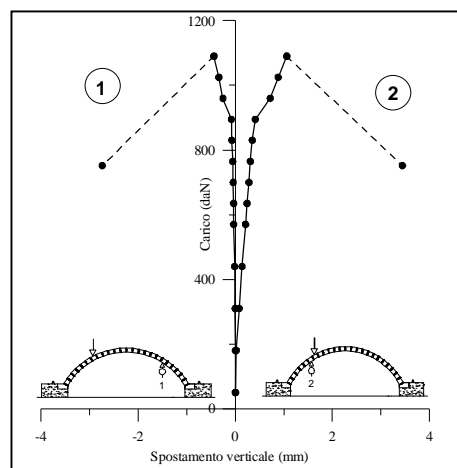


Fig. 4 – Curve carico – spostamento verticale per carico ad $\frac{1}{4}$ della luce.

Tale volare è stato trovato corrispondente a quello limite associato al meccanismo di collasso rilevato, calcolato nell'ipotesi di materiale non resistente a trazione.

E' da rilevare che il meccanismo verificatosi sperimentalmente non è in accordo con quello che viene a determinarsi con un'analisi alla Heyman (Failla et al. 2000 a, Giambanco et al. 2000 b).

2.4 Consolidamento con cavi esterni pretesi

Il consolidamento delle volte mediante cavi esterni pretesi si persegue disponendo sull'estradosso e/o sull'intradosso delle stesse cavi metallici posti in trazione in grado di impedire la libera apertura delle cerniere estradosali e/o intradosali e di determinare la centratura della curva delle pressioni mediante l'azione di un sistema forze radiali autoequilibrate, che si esplicano lungo il contatto tra la muratura ed i cavi in acciaio.

Tale azione determina una riduzione degli sforzi di trazione nella volta con relativo incremento della capacità portante ed aumento del moltiplicatore a collasso.

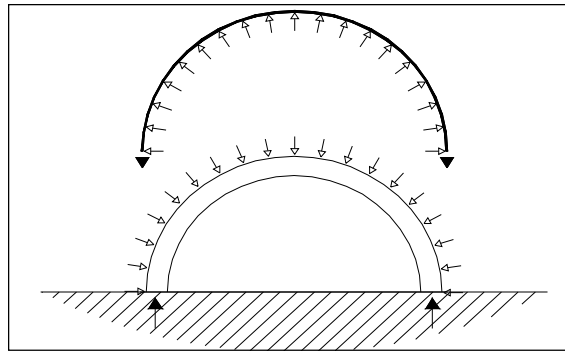


Fig. 5 – Schema statico del rinforzo

E' da rilevare che la tecnica indicata non comporta incrementi di massa ed i cavi, all'occorrenza, risultano essere facilmente ritesabili e rimovibili.

La prima tecnica di rinforzo adottata per la volta già danneggiata è stata quella che fa uso di cavi esterni pretesi.

A tal fine è stato disposto sull'estradosso della volta, in asse alla lunghezza, un cavo di acciaio inossidabile di 6mm di diametro dotato di terminali a vite che è stato fissato alle imposte per mezzo di piastre in acciaio forate inserite nello spessore della volta. Per ridurre le perdite di sforzo per attrito il cavo è stato alloggiato all'interno di un tubo flessibile in PVC.

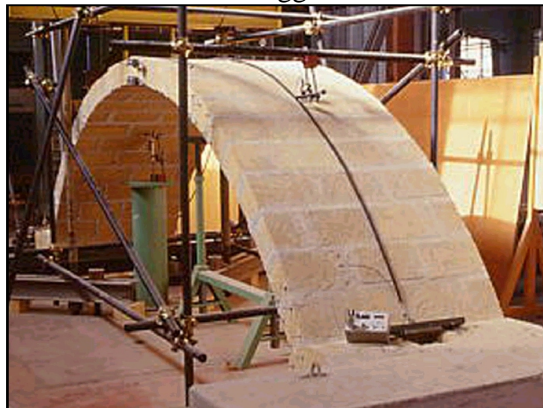


Fig. 6 – Applicazione del cavo

Effettuato il posizionamento nel tubo e negli ancoraggi il cavo è stato tesato sino a 500 daN.

Il tiro applicato è stato misurato mediante un trasduttore di forza anulare con fondo scala di 40 kN, inserito tra il dado di serraggio di una delle due viti di estremità e la piastra in acciaio disposta per l'ancoraggio del cavo a quella estremità.

Durante la prova si è controllato il tiro applicato per rilevare le eventuali variazioni di sforzo nel cavo. La prova sulla volta rinforzata è stata condotta applicando un carico ad $\frac{1}{4}$ della luce. Il sistema di rilevamento degli spostamenti è rimasto uguale a quello adottato nella precedente prova.

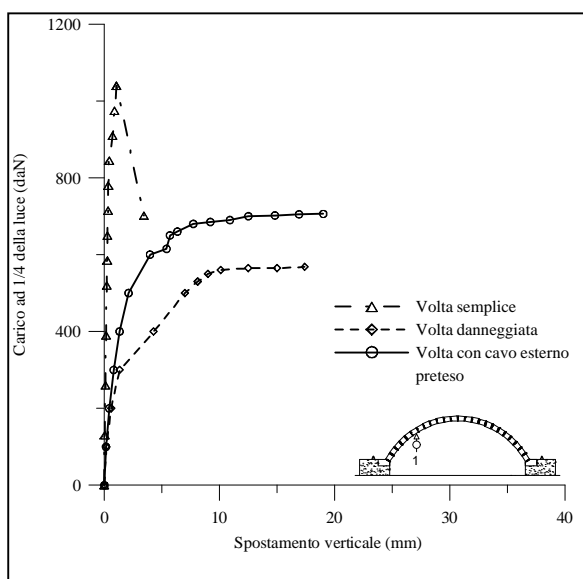


Fig. 7 – Diagramma carico - spostamento verticale della volta semplice, danneggiata e con cavo esterno preteso

Il comportamento tenuto dalla struttura è stato quello rilevabile dalla (Fig.7) dalla quale si trae che la volta rinforzata, pur esibendo una rigidezza inferiore a quella della volta semplice ha attinto un valore del carico ultimo di 706 daN, superiore a quello ottenuto per la volta danneggiata, 506 daN, in uno dei cicli successivo al primo nel quale la prova è stata spinta fin quasi all'innescarsi del meccanismo di collasso.

E' da rilevare che al raggiungimento del carico limite si è riscontrato l'attivarsi dello

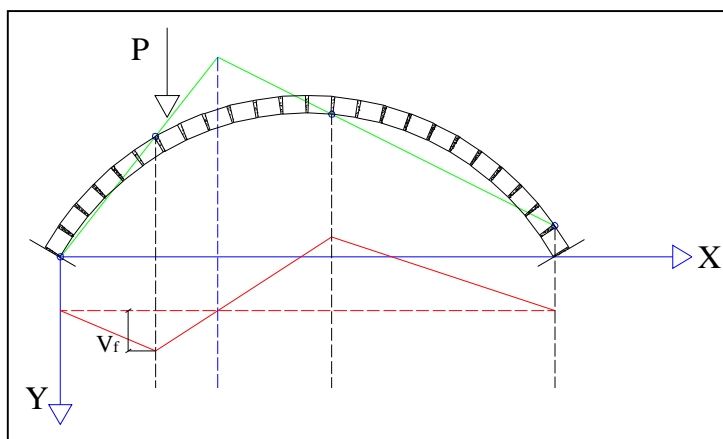


Fig. 8 – Spostamenti verticali relativi al meccanismo sperimentale

stesso meccanismo di collasso che si era manifestato per la volta semplice; pertanto la presenza del cavo non ha impedito la formazione delle cerniere estradossali, ma ha solo limitato l'apertura delle stesse. L'incremento di carico ultimo ottenuto è quindi ascrivibile agli effetti indotti dallo sforzo di tesatura applicato. Noto il meccanismo di collasso si è ricavato per via teorica il valore del carico ultimo, ricorrendo al teorema cinematico dell'analisi limite e con le ipotesi di Heyman (J. Heyman 1982). Dell'effetto del cavo si è tenuto conto incrementando il peso dei conci in relazione del tiro applicato.

Noto il meccanismo di collasso si è ricavato il diagramma degli spostamenti verticali (Fig. 8) e quindi il carico ultimo:

$$P_u = -\frac{L_{f0}}{v_f} = 790 \text{ daN}$$

Il carico così determinato risulta in buon accordo con quello trovato sperimentalmente di 706 daN.

2.5 Consolidamento tramite utilizzo di CFRP

Ultimata la precedente fase d'indagine si è proceduto a rinforzare la volta con una striscia di tessuto in fibra di carbonio larga 15cm applicata sull'estradosso, in asse alla lunghezza, (fig. 9) secondo la metodologia di seguito sintetizzata:

- regolarizzazione dell'estradosso mediante la formazione di uno strato di malta reoplastica bicomponente a basso modulo elastico spesso mediamente 1 cm e largo quanto il rinforzo;
- applicazione della striscia di rinforzo in tessuto di fibre di carbonio previa spalmatura di uno strato di adesivo epossidico;
- definizione dell'incollaggio mediante un'ulteriore spalmatura di adesivo epossidico sulla striscia.

Il rinforzo è stato ancorato poco al di sotto delle imposte della volta incollandolo su due

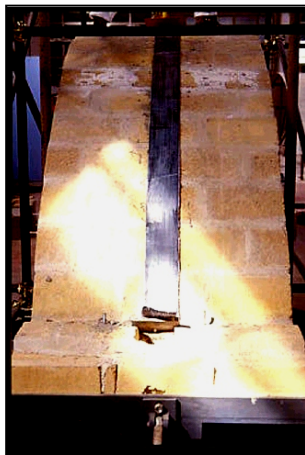


Fig. 9 – Volta rinforzata con strisce di tessuto in fibre di carbonio



Fig. 10 – Particolare dell'ancoraggio

piastre in acciaio inserite nelle spalle della stessa. La tenuta dell'incollaggio ad azioni di strappo è stata assicurata da una contropiastra serrata contro l'incollaggio stesso (Fig. 10) e sagomata in modo tale da non fare innescare rotture fragili nella sezione di attacco del rinforzo.

La volta così consolidata, è stata, quindi, sottoposta a prova con carico applicato ad un quarto

della luce. Si è proceduto monotonicamente ad incrementi costanti di carico fino a 1080 daN.

In corrispondenza di tale valore si è riprodotto lo stesso meccanismo rilevato nella prova della volta semplice. Si è osservata, però, anche l'apertura di due ulteriori giunti, più spostati verso il vincolo, prossimi a quello già formatosi in adiacenza alla chiave.

Tale circostanza sembra indicare che la mancata coincidenza riscontrata tra meccanismo teorico e meccanismo sperimentale si deve attribuire alla diversa resistenza offerta dai giunti di malta. La fibra applicata, infatti, contrastando l'apertura del giunto già formatosi in prossimità

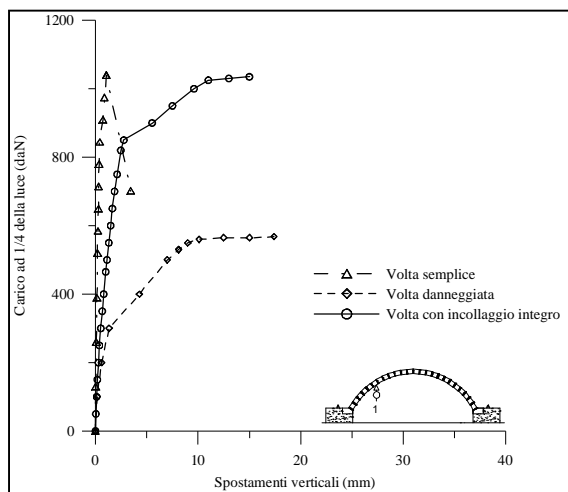


Fig. 11 – Curve carico - spostamento verticale per la volta semplice, danneggiata e con rinforzo in CFRP non danneggiato

della chiave ha reso possibile l'attivazione di una cerniera in posizione più prossima a quella indicata dall'analisi limite. Il comportamento rilevato è raffigurato in (Fig. 11) ove sono riportati anche i diagrammi relativi alle prove eseguite sulla volta semplice e danneggiata per l'apertura di lesioni in quattro giunti.

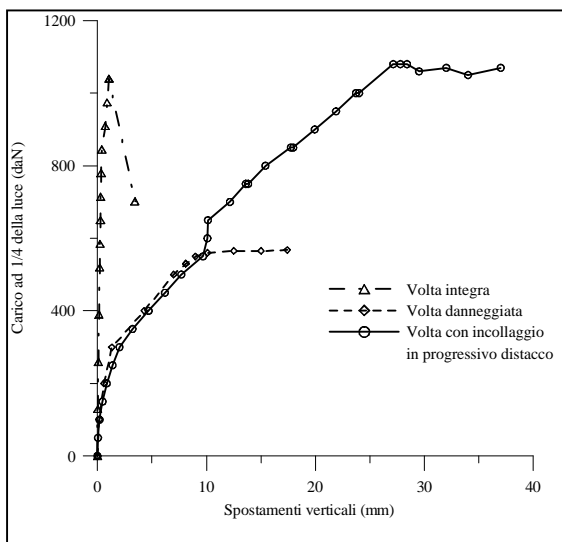


Fig. 12 – Curve carico - spostamento verticale della volta semplice, danneggiata e con rinforzo in CFRP in progressivo distacco

Alla rimozione del carico la volta ha ripreso la sua configurazione iniziale con la richiusura delle lesioni che si erano formate.

Successivamente si sono effettuati alcuni cicli di carico nei quali nonostante venisse raggiunto in ogni ciclo lo stesso valore di carico attinto nel primo ciclo si registrava una sensibile progressiva riduzione di rigidità della struttura in corrispondenza del carico di 300 daN (Fig. 12).

Il sistema, sostanzialmente, evolvendo verso il meccanismo di collasso esibiva un comportamento elastico a tratti ed una elevata duttilità e manifestava che il collasso si sarebbe verificato per il progressivo schiacciamento dei blocchi di calcarenite nei tratti compressi dei giunti di rottura formatisi.

Durante I cicli di carico eseguiti il controllo del comportamento della striscia di rinforzo in CFRP ha messo in luce la comparsa di fenomeni di peeling. Si è rilevato che il fenomeno di distacco dell'elemento di rinforzo rappresentato in neretto nelle Fig. 13a,b,c si è sviluppato nelle fasi di seguito sinteticamente descritte:

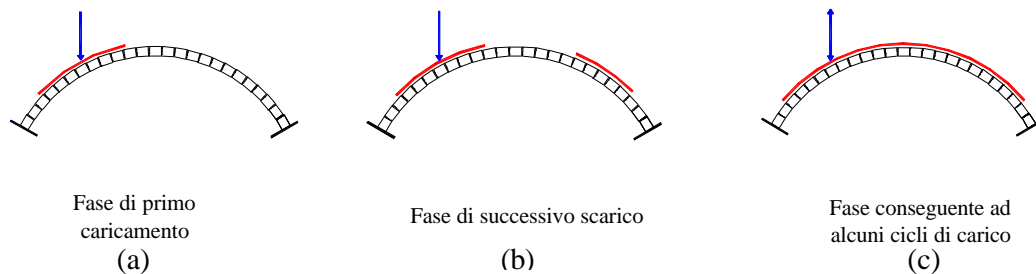


Fig. 13

- il primo distacco si è osservato nell'interfaccia strato di regolarizzazione-calcarenite in un tratto sottostante al carico (Fig. 13a);
- nella fase di scarico si è verificato un analogo distacco nella parte opposta alla zona caricata (Fig. 13b);
- con il susseguirsi dei cicli di carico il distacco ha interessato quasi l'intero sviluppo della direttrice della volta.

È da rilevare che nonostante il verificarsi di tale distacco il sistema di rinforzo non ha perso la sua efficacia e ciò in quanto gli ancoraggi hanno perfettamente resistito.

In definitiva il rinforzo con CFRP ha comportato i seguenti vantaggi

- facilità di esecuzione dell'intervento di consolidamento;
- notevole recupero delle capacità portante della volta anche in presenza di fenomeni di peeling estesi alla quasi totalità del rinforzo;
- elevata duttilità del sistema.

3 CONCLUSIONI

Dai risultati ottenuti dall'indagine sperimentale condotta sui due tipi di consolidamento realizzati emerge che entrambe le tecniche di rinforzo impiegate determinano incrementi di resistenza e duttilità della volta semplice. In termini di carico ultimo il consolidamento con cavi esterni pretesi ha comportato un aumento della capacità portante del 34% mentre il consolidamento con strisce di tessuto in fibre di carbonio del 93%. La diversità di efficacia riscontrata richiede ovviamente ulteriori indagini per individuare le effettive cause che la determinano e, fra l'altro, quanto incidano la diversa rigidità estensionale dei due rinforzi e l'aderenza alla volta. Il fenomeno di distacco progressivo del rinforzo in fibre di carbonio rilevato al susseguirsi dei cicli di carico e per spostamenti crescenti, nonché la riduzione della rigidità della volta al progredire del distacco del rinforzo sino ai valori ottenuti per la volta danneggiata non rinforzata evidenziano la necessità di migliorare le metodologie di

applicazione dei materiali fibrorinforzati alle murature sia agendo sulla scelta dei materiali di regolarizzazione della superficie che sul loro spessore sia accoppiando all'incollaggio fissaggi di tipo meccanico.

Si desidera ringraziare la SIKA Italia per la disponibilità e il supporto tecnico-logistico fornito.

4 BIBLIOGRAFIA

- Avorio, A., Borri, A., Celestini, G., Corradi, M. 1999. “*Sperimentazione e analisi sull’utilizzo dei materiali compositi nelle costruzioni in muratura*”. L’Edilizia n°9/10 1999.
- Capozzucca, R. 1996. “*Comportamento di volte in muratura: analisi e modellazione sperimentale*”. Congresso su “La meccanica delle murature fra teoria e progetto”, Messina, Settembre 1996.
- Di Tommaso, A., Foraboschi, P. 1995. “*Armature in compositi fibrosi a matrice polimerica per il conglomerato cementizio*”. L’Edilizia n° 9/10 1995.
- Faccio, P., Foraboschi, P. 2000. *Analisi agli stati limite ultimi di volte in muratura con rinforzi in FRP*. L’Edilizia n°5/6 2000.
- Failla, A., Cucchiara, C., Accardi, M. 2000a. “*Experimental investigation on the behaviour of cylindrical vaults in calcarenite ashlar and bed joint mortar*”. 12th International Brick/Block Masonry Conference, Madrid, 25-28 June 2000.
- Failla, A., Giambanco, G., Cucchiara, C. 2000b, “*Numerical modelling of masonry arches*”. 12th International Brick/Block Masonry Conference. Madrid, 25-28 June 2000.
- Foraboschi, P., Siviero, E. 1999. “*Volte in muratura con rinforzi in FRP*”, L’Edilizia n°9/10 1999.
- Heyman, J. 1982. *The masonry arch.*, Ellis Horwood, Chichester, England, 1982.
- Modena, C., Valdemarca, M., Valluzzi, M.R. 2000. “*Volte murarie rinforzate mediante FRP*”. L’Edilizia L’Edilizia n°5/6 2000.
- Jurina, L., “*L’arco armato: una nuova tecnica di consolidamento di archi e volte in muratura con uso di tiranti metallici*” Giornate italiane della costruzione in acciaio, Ancona, 1997.
- Triantafillou, T.C., “*Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates*”, J. Composites for Construction, ASCE, 2(5), pp.96-104, 1998.