Carla Biasi

VULNERABILITÀ SISMICA ED INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO DEGLI EDIFICI ECCLESIASTICI

Abstract - Old, non engineered structures often require seismic retrofitting in order to reduce their vulnerability. Here, the effectiveness of a retrofitting operation, the insertion of a tie rod at the impost of the arch of an ancient church, is evaluated. Results, although obtained for a specific case, are expected to have general significance.

Keywords - earthquake engineering, vulnerability, arches.

Riassunti - È spesso necessario ridurre la vulnerabilità sismica di edifici storici attraverso operazioni cosiddette di miglioramento.

Questo lavoro valuta l'efficacia della posa di un tirante di acciaio alle reni dell'arco di una chiesa antica. I risultati, pur se ottenuti per un caso particolare, si possono ritenere indicativi per la tipologia considerata.

Parole chiave - ingegneria sismica, vulnerabilità, arco.

Questo lavoro affronta il problema della riqualificazione antisismica degli edifici monumentali a tipologia speciale, quali sono le chiese ed i palazzi storici. Per questi edifici, e particolarmente per gli edifici di culto, la scelta degli interventi risulta sempre molto complessa: tali edifici, infatti, sono caratterizzati da superfici molto estese, da grandi volumi liberi e da caratteristiche architettoniche non comuni. Di conseguenza gli interventi su di essi vengono definiti sempre come progetti di restauro. Ove si ponga la necessità di affrontare anche il problema di un eventuale intervento antisismico, occorre poter valutare il livello di risposta al sisma che il manufatto può fornire nella situazione attuale e definire interventi che non ne alterino gli aspetti architettonici né le caratteristiche di funzionamento strutturale.

Interventi di questo tipo, detti di «miglioramento» sismico, sono specificatamente previsti dalle normative italiane. Essi non prevedono

un riscontro dell'effetto dell'intervento con l'azione prevista nel caso di costruzioni nuove o soggette ad adeguamento vero e proprio, ma intendono prevalentemente recuperare le capacità che gli effetti del tempo e le mutazioni avvenute possono aver degradato ed eliminare possibili manchevolezze strutturali nella progettazione originaria senza peraltro modificare lo schema globale di risposta, che nei secoli e in molti eventi ha dimostrato una sua validità.

Si presenta quindi il problema di come attuare efficacemente un intervento di miglioramento e, prima ancora, di valutare la capacità di risposta di queste costruzioni e l'eventuale necessità dell'intervento stesso.

Quest'ultimo aspetto si colloca nella tematica generale della valutazione della vulnerabilità sismica, cioè della qualità della risposta sismica che un edificio può fornire in funzione delle sue caratteristiche costruttive e del suo stato di fatto. Criteri di valutazione della vulnerabilità sono stati proposti ed utilizzati per varie tipologie di edifici, in particolare per costruzioni in muratura di tipo comune, generalmente di uso residenziale. Tali metodi si suddividono in metodi diretti e metodi indiretti ([1]). I primi forniscono immediatamente una stima dell'entità dei danni che verrebbero provocati da un terremoto di un livello appurato, mentre i metodi indiretti associano ad ogni edificio un valore di indice di vulnerabilità e richiedono la definizione di una correlazione tra indice di vulnerabilità e danno atteso. Le indagini di questo tipo sono state però orientate a valutare non tanto il livello del singolo edificio ma le caratteristiche di vulnerabilità del patrimonio edilizio di una particolare zona territoriale. La specificità delle caratteristiche degli edifici di culto rende comunque inutilizzabili tali criteri, in quanto non si tengono in considerazione indicazioni molto importanti al fine della individuazione del miglior metodo di intervento.

Un metodo di valutazione della vulnerabilità specifico per queste costruzioni, capace anche di fornire indicazioni di intervento particolarizzate al singolo edificio in esame, è stato recentemente proposto dal Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Il metodo si basa sulla suddivisione dell'edificio in sottostrutture, o macroelementi, che rappresentano elementi in cui, sulla base storica dei dati di danno sismico, si riconosce la possibilità di formazione di specifici meccanismi di collasso. In base all'esame dello stato di questi elementi, con il supporto della storia dell'edificio, è possibile una valutazione del danno sismico atteso e, in conseguenza, l'in-

([1]) DOGLIONI (a cura di), 1994, p. 7-8; BENEDETTI, 1984; BENEDETTI, 1988.

dicazione degli interventi che possono evitare, o comunque limitare, la formazione dei meccanismi senza però alterare il comportamento globale dell'edificio. Schematicamente l'iter procedurale del metodo può essere descritto come segue: rilievo geometrico, rilievo critico (=rilievo del danno pregresso e restituzione descrittiva), suddivisione del manufatto in «macroelementi», accertamento delle condizioni di manutenzione, analisi della storia dell'edificio ed individuazione delle vulnerabilità caratteristiche (ricerca su documenti, indagine in sito), attribuzione di un indice di danno, stesura di un «progetto di danno atteso» per macroelementi (individuazione per ogni macroelemento della classe tipologica di appartenenza mediante confronto con il campione [2], individuazione di tipi di danno attivati, probabili e possibili), individuazione delle vulnerabilità specifiche legate alle modalità costruttive iniziali ed ai processi di trasformazione, stesura di un progetto di miglioramento avente come scopo la riparazione dei danni pregressi, o la manutenzione, e la riduzione od eliminazione delle vulnerabilità.

L'obiettivo di questo lavoro è di implementare la procedura proposta applicandola a situazioni reali contribuendo quindi alla sua messa a punto e, inoltre, di fornire un contributo alla base di conoscenze del metodo valutando quantitativamente l'efficacia di uno degli interventi di miglioramento che possono venirne suggeriti.

A tal fine il metodo proposto dal Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti del Consiglio Nazionale delle Ricerche è stato applicato a due edifici di culto della zona di Feltre, ovvero la Chiesa di S. Vito e Modesto a Caupo e la Chiesa della SS. Trinità a Feltre. Per entrambe le chiese si è proceduto alla stesura del «progetto di danno atteso» e nel caso della chiesa della SS. Trinità è stato redatto il progetto di miglioramento.

Dei vari macroelementi in cui è possibile suddividere una chiesa e dei vari interventi di miglioramento attuabili si è studiato in questo lavoro il macroelemento «arco trionfale» al fine di valutare i possibili tipi di danno e di quantificare l'efficacia di uno degli interventi di miglioramento maggiormente utilizzati, ovvero l'inserimento di un tirante metallico.

L'arco trionfale, è quell'elemento strutturale-architettonico che funge da elemento di separazione fra la navata e l'abside della chiesa. La classificazione del macroelemento arco trionfale secondo i criteri proposti dal G.N.D.T. avviene in base a rapporti geometrici esistenti fra

---

[2] DOGLIONI (a cura di), 1994 p. 127-235.

alcune grandezze caratteristiche dell'arco stesso.I rapporti geometrici considerati sono:

S=larghezza della spalla, X=altezza in chiave,
H=altezza della spalla, R= raggio dell'arco.

il rapporto tra la larghezza della spalla e il raggio dell'arco, Ks=S/R, il rapporto tra l'altezza della spalla e il raggio, Kh = H/R e, infine, il rapporto tra l'altezza in chiave ed il raggio, Kx = X/R (vedi fig. 1).

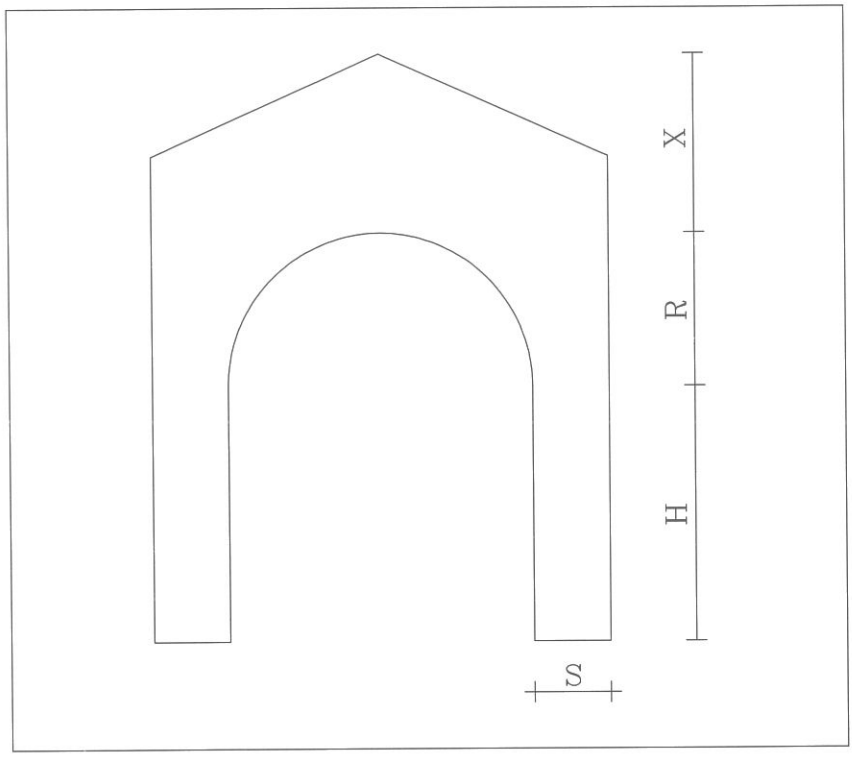

Fig. 1 - Geometria dell'arco trionfale.

Per la definizione delle classi tipologiche in base alle quali classificare il macroelemento arco trionfale è stata introdotta, quale principale fattore di discriminazione, la percentuale di foratura del pannello. Sono state individuate le seguenti cinque classi tipologiche.

1. Arco regolare
   I rapporti geometrici fra la larghezza del foro, l'altezza in chiave dell'arco, la base e l'altezza delle spalle sono prossimi a quelli mediani del campione, e si ha una percentuale di foratura compresa tra il 22% ed il 43%.

2. Arco con grande apertura.
   Il pannello ha un'ampia superficie aperta e ridotte dimensioni dell'altezza in chiave e della larghezza delle spalle; la percentuale di foratura supera il 43%.

3. Arco con piccola apertura.
   La percentuale di pannello aperta è esigua a causa delle notevoli dimensioni dell'altezza in chiave e della larghezza delle spalle, la percentuale di foratura è minore del 22%.

4. Arco tipo telaio.
   Corrisponde ad una situazione in cui la fascia muraria sopra il foro ha dimensioni notevoli rispetto al pannello ed alle spalle, tali da modificare il comportamento della struttura che si scosta sensibilmente dallo schema ad arco.

5. Arco con situazione al contorno dissimmetrica.
   Si ha quando le strutture o macroelementi che realizzano un vincolo ai bordi laterali sono addossati in modo dissimmetrico al pannello dell'arco. Non si considerano i vincoli che si sviluppano per una altezza minore ad un terzo di quella del bordo del pannello.

I tipi di danno fondamentali per questo macroelemento, sono stati individuati sulla base delle osservazioni effettuate dopo gli eventi sismici nel Friuli. In ogni caso i meccanismi proposti sono riconducibili ad azioni nel piano della parete in quanto nella generalità dei casi le azioni fuori piano sono contrastate sia dalla copertura (nelle parti sommitali), che dalle pareti dell'aula e dell'abside.

1. Taglio simmetrico nelle spalle
   In questo caso si ha rottura a taglio delle spalle con allontanamento delle imposte dell'arco e con deformazione abbassamento in chiave e formazione di cerniere nell'arco stesso, anche con crollo parziale.

2. Rotazione monolaterale di una spalla.
   Si ha una rotazione alla base di uno dei ritti verso l'esterno accompagnata da lesioni nell'arco dovute, generalmente, a rototraslazione alle reni e/o in chiave.

3. Rotazione bilaterale delle spalle.
   Si ha una rotazione bilaterale alla base di entrambi i ritti con allontanamento delle imposte dell'arco e con deformazioni ed a volte crollo dell'arco stesso.

4. Taglio (non simmetrico).
   Si evidenziano lesioni da taglio che interessano il pannello dell'arco, in genere sono localizzate non solamente nelle spalle e presentano un andamento non simmetrico.

5. Deformazioni o rotazioni localizzate nell'arco.
   Si riscontrano abbassamenti, deformazioni, formazioni di cerniere e discontinuità che si verificano solamente nell'arco senza che siano osservabili analoghi effetti anche sulle spalle.

L'arco trionfale oggetto dello studio svolto è quello collocato nella chiesa della SS. Trinità a Feltre. Per quanto riguarda la tipologia , si sono calcolati i seguenti rapporti geometrici: Ks=S/R=0.20 Kx=X/R=1.255 Kh=H/R=0.515 ed una percentuale di foratura pari a circa il 46%. Data l'alta percentuale di foratura ed il basso valore del rapporto geometrico relativo alle spalle si potrebbe classificare questo arco come arco di grande apertura, anche se l'elevato valore del rapporto geometrico relativo all'altezza in chiave, e di conseguenza l'enorme massa muraria concentrata nella parte alta dell'arco potrebbe far rientrare questo arco nella tipologia dell'arco tipo telaio.

Lo studio del comportamento di questo macroelemento in presenza di forze sismiche è stato effettuato con la realizzazione di un modello agli elementi finiti. I problemi incontrati nella realizzazione di un modello agli elementi finiti che rappresentasse al meglio la realtà possono essere così sintetizzati: problemi legati al materiale muratura, problemi legati alla geometria, problemi legati alle condizioni di vincolo.

In questo lavoro le analisi svolte sono una analisi elastica, al fine di valutare il comportamento in fase statica dell'arco, ed una analisi statica equivalente con l'ipotesi di materiale elasto-fragile.

La semplicità di questa ipotesi di comportamento è giustificabile per vari motivi: essa intende essere una analisi di primo approccio al problema, intende proporsi come metodo semplice ed accessibile di verifica di effetti in prima approssimazione; valuta due situazioni - cioè pre e post intervento - ed è quindi intesa in senso relativo.

L'analisi elasto fragile sviluppata consiste in una serie di analisi successive per carichi orizzontali crescenti, considerando agenti sulla struttura una serie di forze che simulano le forze di inerzia generate da un

sisma, con l'ipotesi di materiale elastico o fratturato; poiché il materiale fratturato non è in grado di assumere alcun carico, l'analisi permette lo sviluppo di fessure con rilascio totale delle tensioni laddove viene superata la resistenza caratteristica massima di trazione. Le fessure sono realizzate attraverso una doppia numerazione dei nodi scollegando tra loro gli elementi corrispondenti. Ogni passo dell'analisi prevede la determinazione dello stato di sforzo derivante dall'applicazione dell'intero carico alla struttura via via più degradata, secondo il metodo della secante.

Per assegnare le proprietà meccaniche al materiale, non essendo disponibile alcun dato sperimentale, derivante da analisi sul manufatto, si è fatto riferimento alla normativa italiana e, ove questa non fornisce indicazioni adeguate, alla normativa europea.

I risultati di tali analisi, dato il modello di materiale adottato, saranno indicativi del comportamento, ma sicuramente non perfettamente aderenti al caso in esame. Infatti, inserendo i valori forniti dalle norme per modulo elastico e resistenze caratteristiche della muratura, si considera un materiale non omogeneo e anisotropo come la muratura idealizzandolo come materiale omogeneo ed isotropo, comportamento comunque previsto dalla normativa.

L'arco oggetto della analisi presenta una lieve dissimmetria rispetto all'asse verticale passante per la chiave dell'arco. Da un confronto degli sforzi ottenuti da analisi svolte considerando prima la geometria reale dell'arco, e in seguito una geometria simmetrica rispetto all'asse passante per la chiave dell'arco, si nota che le differenze, considerate anche le dimensioni della struttura in esame, non sono così significative da inficiare il risultato di analisi. nell'ipotesi dissimmetrica Al fine di fornire una valutazione del comportamento dell'arco il più generale possibile, che serva di riferimento per archi di questo tipo, le analisi sono state svolte considerando l'arco avente geometria regolare.

Un ulteriore problema affrontato in fase di definizione del modello è stato quello relativo alla definizione delle condizioni di vincolo. Se si può ragionevolmente considerare l'arco incastrato alla base, il grado di vincolo da introdurre tra l'arco e le pareti laterali presenta una incertezza molto maggiore. Allo scopo di fornire indicazioni le più reali possibili, si sono costruiti per l'arco vincolato tre modelli diversi; tali modelli realizzati con tre reticoli (=mesh) differenti sono stati utilizzati in tutti i tipi di analisi eseguite in quanto rappresentano le condizioni estreme o significative in cui si può considerare vincolato l'arco e permettono quindi di definire un ragionevole intervallo di comportamento.

Nella prima mesh si è considerato l'arco senza alcun vincolo laterale, ipotizzando che non vi fosse alcuna collaborazione fra l'arco trionfa-

le e le pareti laterali e, in secondo luogo, per la particolare chiesa in esame, che l'arco si trovasse nella sua condizione iniziale, ovvero, facendo riferimento all'analisi storica, nella situazione antecedente alla realizzazione dell'aula, quando esisteva solo una cappella aperta. Questa situazione rappresenta un limite inferiore alla possibile rigidezza dei vincoli al bordo, eventualmente giustificabile in presenza di un corrispondente quadro fessurativo.

Nella seconda mesh si è supposto esistesse completa collaborazione fra arco trionfale e pareti laterali. A questo scopo, sono state aggiunte due fasce murarie della larghezza di 0.73 m aventi uno spessore pari a tre volte lo spessore dell'arco. Questa configurazione diventa quella che meglio rispecchia la realtà qualora si consideri l'inserimento del tirante previsto dal progetto.

La terza mesh può essere considerata quella che meglio descrive un limite inferiore allo stato attuale, in quanto si considera l'arco senza collaborazione delle pareti esterne, ma viene considerato un contributo dalle pareti della cappella originaria, modellato irrigidendo l'arco nelle zone di contatto. Questo irrigidimento viene ottenuto aumentando adeguatamente lo spessore dell'arco in prossimità della zona esterna.

Le analisi svolte hanno lo scopo di valutare la resistenza propria dell'arco considerato allo stato attuale, e quindi in assenza di qualsiasi tipo di intervento, e di confrontare i risultati di questa analisi con quelli ottenuti da identiche analisi svolte considerando l'arco rinforzato con il tirante previsto in fase di progetto.

La valutazione del comportamento sismico della struttura è stata fatta sulla base di una analisi statica equivalente, ovvero rappresentando le azioni sismiche mediante un insieme di forze orizzontali statiche la cui intensità e distribuzione viene determinata in funzione dei modi propri di oscillazione della struttura ricavati tramite una analisi modale. Essendo l'arco costituito da muratura di pietrame, l'analisi è consistita in una analisi elasto-fragile che si prefiggeva lo scopo di individuare il quadro fessurativo ed i meccanismi di collasso più probabili. Tale analisi è stata effettuata in più passi di carico; per ciascuno di questi passi venivano determinate le azioni statiche equivalenti partendo dalle forze modali e riducendole in base ad un coefficiente determinato di volta in volta facendo il rapporto fra la tensione massima raggiunta nella struttura soggetta alle forze modali e la resistenza massima a trazione

La scelta di una analisi statica equivalente in luogo di una analisi dinamica con spettro di risposta o con moto alla base, è significativa in quanto le forze statiche equivalenti applicate sono valutate sulla base della prima forma modale dell'arco, la quale ha una percentuale di massa par-

tecipante estremamente elevata e presenta deformata modale molto simile alla deformata modale di un telaio shear-type. Inoltre questo tipo di analisi, essendo completamente indipendente da tutti i caratteri esterni quali il tipo di terreno, il tipo di fondazione, la velocità di propagazione, è completamente governata dalla struttura e dalle sue caratteristiche.

Sulla base delle analisi modali è stata scelta una distribuzione delle forze statiche equivalenti costante per le fasce soprastanti i ritti, e una distribuzione lineare per i ritti.

L'ipotesi che soggiace a forze statiche equivalenti di questo tipo è di sollecitazione unidirezionale della struttura: di conseguenza questo tipo di analisi è in grado di evidenziare un meccanismo di collasso asimmetrico e, per questo, solo uno dei possibili meccanismi che potranno attivarsi. Meccanismi a carattere simmetrico sono stati rilevati in strutture ad arco danneggiate da sisma e sono giustificabili con il carattere a segno alterno della sollecitazione.

La scelta di sviluppare in questa sede un meccanismo asimmetrico è giustificabile sia con la sua alta rappresentabilità delle situazioni di collasso, conseguenti ad un picco di accelerazione in una direzione specifica, sia dal fatto che si intende utilizzare tale configurazione per uno studio di confronto tra due situazioni: quella di struttura sottoposta ad un intervento di miglioramento rispetto a quella in situazione attuale; per cui, in prima istanza, il confronto è comunque significativo e, più in particolare, il meccanismo prodotto si riteneva potesse fornire una valutazione dell'efficacia dell'intervento in senso ridotto rispetto ai meccanismi simmetrici che allontanassero direttamente le imposte e quindi, in conclusione, cautelativa.

Conclusioni

Una delle prime osservazioni sui risultati ottenuti riguarda il meccanismo di collasso della struttura. In tutti i casi studiati si riesce ad evidenziare il meccanismo di rotazione monolaterale delle spalle, verificatosi con alta frequenza nella realtà ([3]).

Certamente, come già accennato precedentemente, si tratta di un meccanismo particolare sviluppatosi in relazione alle modalità di carico che si sono utilizzate in corso d'analisi. Si potrebbe supporre che nel caso di analisi che comportasse una sollecitazione a segni alterni della

([3]) Doglioni (a cura di), 1994, p. 177 e 181.

struttura possano presentarsi anche meccanismi simmetrici, ovvero il caso di rotazione bilaterale delle spalle.

Giustificazione di questo risiede nella snellezza delle spalle H / S pari a 2.54 che si trova al limite inferiore indicato dalla casistica come condizione necessaria all'attivazione dei meccanismi suddetti.

Il meccanismo ottenuto è sicuramente di probabile attivazione nel macroelemento in esame, anche se non si ha la certezza della sua attivazione. Questo, comunque, non condiziona il significato dei risultati in quanto il fine ultimo delle analisi è un confronto fra i valori ottenuti nelle diverse configurazioni considerate ed un confronto fra detti valori e i limiti prescritti dalla normativa.

Per quanto riguarda i quadri fessurativi evidenziati dalle varie analisi si nota come, mentre nel caso di arco con spalle (fig. 3) la fessura non interessa la chiave dell'arco come nel caso dell'arco senza spalle (fig. 2), nel caso di arco irrigidito la fessura ha sempre inizio in chiave all'arco, ma invece di propagarsi verticalmente verso la finestrella soprastante si propaga radialmente (fig. 4). L'inserimento del tirante riduce notevolmente il quadro fessurativo (fig. 5).

Dal rilievo effettuato sulla struttura reale è stata evidenziata una fessura che, partendo dalla chiave dell'arco, inizia a propagarsi verticalmente. Supponendo che questa fessura sia imputabile ad un sisma, si può innanzi tutto dire che tale sisma deve essere sicuramente avvenuto prima della trasformazione da cappella a chiesa, così da produrre un quadro fessurativo più simile agli altri due casi studiati, ovviamente ipotizzando che il meccanismo corrisponda a quello ricavato dall'analisi.

Bisogna comunque rilevare che già in fase statica, ovvero considerando l'arco caricato soltanto dal peso proprio, dai carichi verticali imputabili alla copertura, e dai carichi accidentali, le tensioni di trazione nel nodo coincidente con la chiave dell'arco uguagliano la resistenza limite a trazione, il che potrebbe implicare l'apertura della fessura già per questo tipo di carico.

Una chiara visione dei diversi risultati e quindi dei diversi comportamenti si ottiene dalla sovrapposizione dei vari grafici forza - spostamento ottenuti per i vari casi esaminati che, come si è detto, differiscono per le diverse ipotesi di vincolo ai bordi dell'arco. (fig. 6)

Si può osservare come in tutte le analisi svolte la struttura abbia mostrato un comportamento relativamente duttile, più o meno marcato in funzione del tipo di condizione al contorno considerata

Si nota subito come la curva relativa all'arco con spalle e tirante (curva 4) sia poco differente dalla curva relativa al caso di arco con pareti laterali interamente collaborante (curva 3), confronto evidenzia-

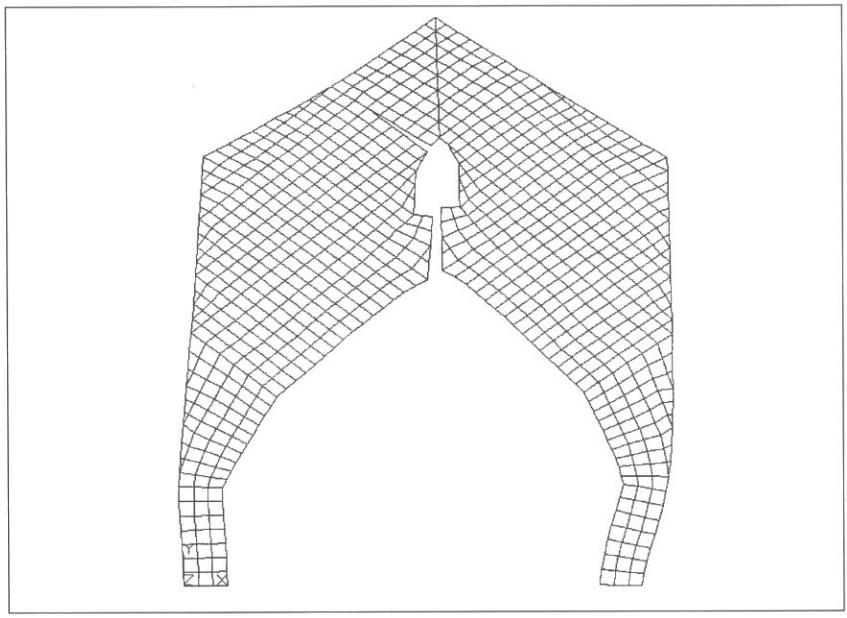

Fig. 2 - Quadro fessurativo relativo all'analisi nel caso di arco senza pareti laterali collaboranti.

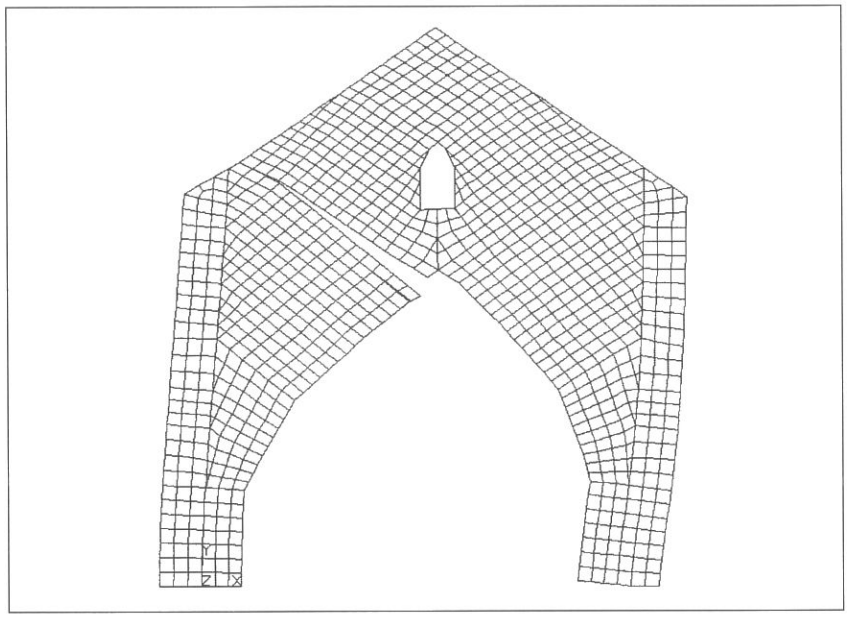

Fig. 3 - Quadro fessurativo relativo all'analisi nel caso di arco con pareti laterali totalmente collaboranti.

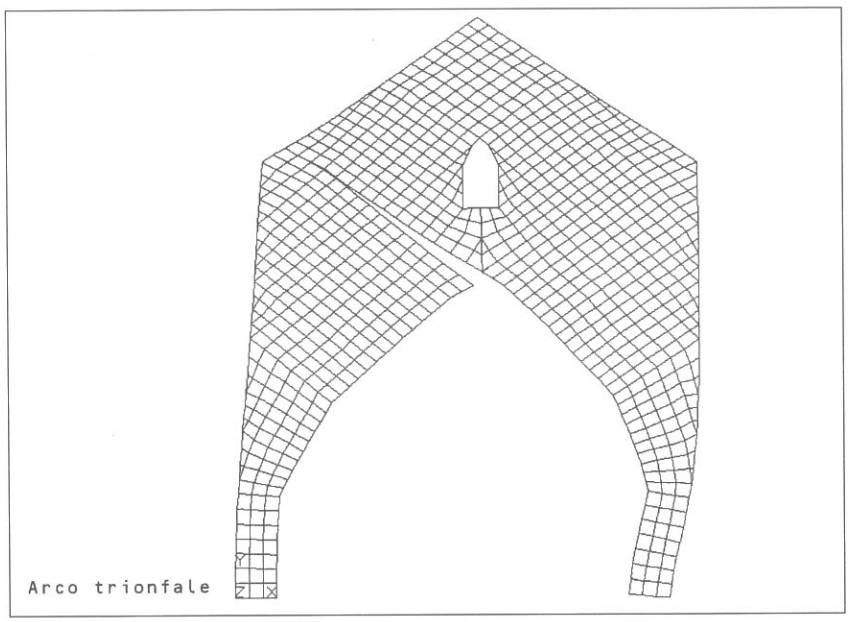

Fig. 4 - Quadro fessurativo relativo all'analisi nel caso di arco con pareti laterali parzialmente collaboranti.

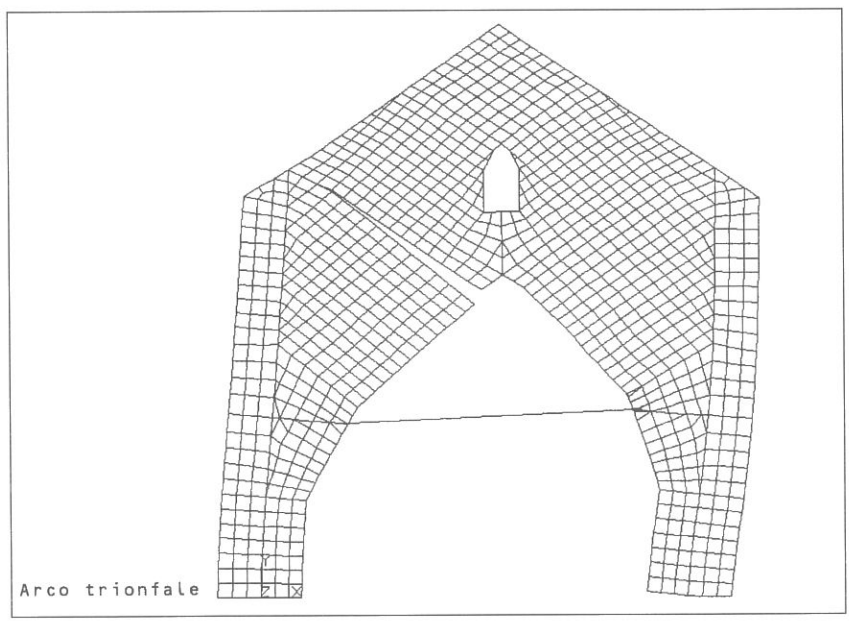

Fig. 5 - Quadro fessurativo relativo all'analisi nel caso di arco con tirante.

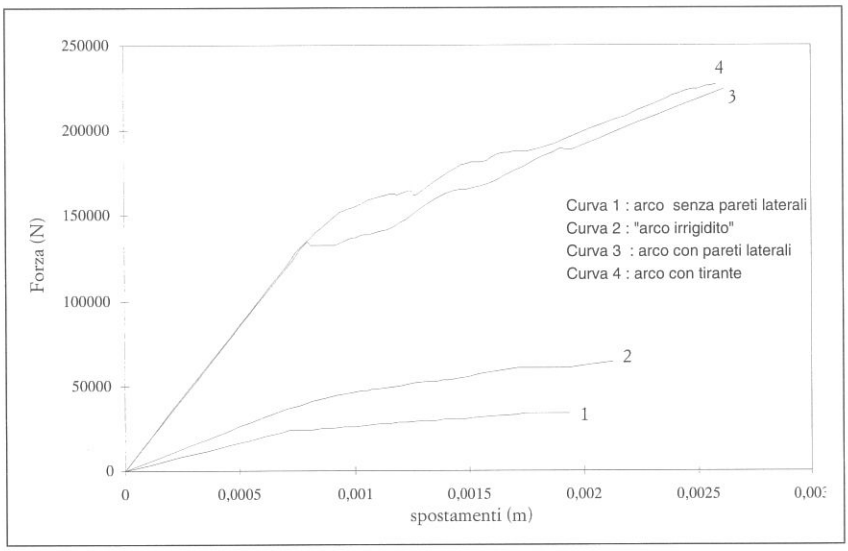

Fig. 6 - Grafico di confronto dei risultati ottenuti dalle varie analisi.

to anche dal rapporto fra spostamento ultimo e spostamento di limite elastico che nel primo caso è di 3.30 e nel secondo è di 3.32; analogo confronto vale anche per il rapporto fra forza di collasso e forza di limite elastico che risulta essere pari a 1.67 nel caso di arco con spalle e a 1.72 nel caso di arco con spalle e tirante. Si può rilevare invece un miglioramento dei valori immediatamente successivi alla prima fessurazione, scompare infatti l'instabilità alla prima fessurazione , comportamento sempre critico rappresentato dal leggero calo della forza necessaria al proseguimento della fessura, mentre compare un comportamento più regolare.

Si può notare come il fatto di considerare o meno collaboranti le pareti laterali (curve 1 e 3) faccia cambiare notevolmente il comportamento della struttura. Se si fa il rapporto fra le forze agenti nei due casi, si ricava che la forza di prima fessurazione che agisce sulla struttura in cui si sono considerate le pareti laterali collaboranti risulta essere 5.67 volte maggiore rispetto al caso di non collaborazione, mentre la forza di collasso risulta essere addirittura 6.59 volte maggiore. Si potrebbe affermare, osservando questi dati, che l'intervento di ampliamento della chiesa, che ha comportato l'addossamento delle pareti laterali, abbia salvato l'arco trionfale nel passare dei secoli.

Bisogna specificare che entrambi i modelli che descrivono la struttura non rinforzata dal tirante rappresentano situazioni limite. È infatti

impensabile che le pareti laterali non forniscano alcun vincolo all'arco, così come non risponde alla realtà il considerare completamente collaboranti le pareti laterali e l'arco, semplicemente anche solo per il fatto che sono state edificate in epoche diverse.

Un vero limite inferiore alla situazione reale è rappresentato dalla mesh dell'arco irrigidito (curva 2).

I valori rappresentativi delle situazioni significative di prima fessurazione e collasso sono riassunti nella tabella I:

TABELLA I

ANALISI SVOLTA	F elastica (N)	F collasso (N)	Ux elast (mm)	Ux collas (mm)
arco senza spalle	23657	33995	0,7216	1,9392
arco rinforzato	40887	64152	0,8191	2,1281
arco con spalle	134021	224000	0,793	2,6204
arco con spalle e tirante	132236	227202	0,7775	2,5814

ANALISI SVOLTA	Fc / Fe	Uc / Ue
arco senza spalle	1.44	2.69
arco rinforzato	1.57	2.60
arco con spalle	1.67	3.30
arco con spalle e tirante	1.72	3.32

Si nota come la curva rappresentante l'analisi svolta sulla mesh individuata col nome di «arco rinforzato» (curva 2) venga a posizionarsi nella zona intermedia alle due situazioni limite di arco con spalle collaboranti e di arco senza spalle (curve 1 e 3).

Appare quindi rilevante come, rispetto a questa situazione intermedia, l'inserimento del tirante aumenti notevolmente la resistenza ultima della struttura. In sostanza garantisce un comportamento duttile e di elevata capacità che è il limite superiore delle varie situazioni di collaborazione per altro non valutabili esattamente nella realtà e sulle quali quindi, senza l'intervento di miglioramento che impone fisicamente la collaborazione non è possibile fare affidamento. Dalla tabella I si osserva che il rapporto fra forza di collasso e forza di prima fessurazione risulta essere maggiore di tre, rapporto valutato prima di avere rag-

giunto la situazione di equilibrio limite della struttura ma corrispondente ad una accentuata fessurazione, che si è definita qui come situazione limite. È di interesse rilevare come, pur con un semplice intervento di miglioramento, si è non lontani da duttilità previste per costruzioni nuove in materiali che possono propriamente sviluppare un buon livello di duttilità, quali acciaio o cemento armato.

BIBLIOGRAFIA

Benedetti D., Petrini V., 1984 - *Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: un metodo di valutazione,* L'Industria delle Costruzioni, Vol. 18, pag, 66 - 74.

BENEDETTI D., BENZONI G., PARISI M.A., 1988 - *Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei,* Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol 16.

DOGLIONI F., MORETTI A., PETRINI V., 1994 - (a cura di) GRUPPO NAZIONALE PER LA DIFESA DAI TERREMOTI: *Le chiese e il terremoto: dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione*, Trieste.

Indirizzo dell'autore:

dr. ing. Carla Biasi, via Driopozzo 35, I-38068 Rovereto