



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

FLORE

Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

Interpretazione dell'intervento di consolidamento di volte della cripta di S. Maria Novella a Firenze a cura del Prof. Ing. Andrea Chiarugi

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

Original Citation:

Interpretazione dell'intervento di consolidamento di volte della cripta di S. Maria Novella a Firenze a cura del Prof. Ing. Andrea Chiarugi / Terenzi, G; Spinelli, P; Salvatori, L. - STAMPA. - 1:(2014), pp. 249-260. (Safe Monuments 2014 Firenze 28 Marzo 2014).

Availability:

The webpage <https://hdl.handle.net/2158/912333> of the repository was last updated on 2015-11-29T20:47:10Z

Publisher:

Collegio degli Ingegneri della Toscana Srl

Terms of use:

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

Publisher copyright claim:

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)



Collegio degli Ingegneri della Toscana



Dipartimento di ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze

Atti del Workshop Safe Monuments 2014

Coordinatore
Paolo Spinelli

Comitato Organizzatore
Michele Betti, Lorenzo Conti
Maurizio Orlando, Gloria Terenzi

SAFE MONUMENTS

Conservation vs Safety
of Monuments and Historical Constructions

Tra Conservazione e Sicurezza
di Edifici Monumentali e del Costruito Storico

FIRENZE
28 Marzo 2014
Auditorium Ente Cassa di Risparmio di Firenze

Coordinatore
Paolo Spinelli

Comitato Organizzatore
Michele Betti
Lorenzo Conti
Maurizio Orlando
Gloria Terenzi

Edizioni
Collegio degli Ingegneri della Toscana Srl

INTRODUZIONE

Negli anni '70 e '80 gli interventi su edifici monumentali e di importanza storico-artistica hanno visto prevalere il fronte della sicurezza su quello della conservazione, soprattutto negli interventi realizzati a seguito di eventi sismici. Nei decenni successivi, grazie anche a modifiche ed integrazioni delle norme tecniche per le costruzioni, si è riaperto il dibattito sui temi della sicurezza e della conservazione quali elementi di paritaria importanza sul fronte della prevenzione e salvaguardia del patrimonio culturale.

Dopo quasi 40 anni risulta così necessaria una riflessione sia sull'apparato normativo che è venuto sviluppandosi, ed in alcuni casi sovrapponendosi, nel panorama nazionale, sia sulla filosofia del principio stesso di questi interventi che non possono che svilupparsi sul doppio binario della sicurezza e della conservazione. Questo è il contesto nel quale si è inserito il workshop *Safe Monuments - Tra Conservazione e Sicurezza di Edifici Monumentali e del Costruito Storico*, organizzato dal Collegio degli Ingegneri della Toscana con il patrocinio del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze.

Il workshop, introdotto dai saluti del Magnifico Rettore dell'Università degli Studi di Firenze, prof. Alberto Tesi, si è articolato su quattro sessioni, ciascuna introdotta da una relazione ad invito:

- *Sicurezza e responsabilità: due termini da ripensare alla luce delle norme vigenti per la salvaguardia degli edifici storici* di Carlo Blasi (Università degli Studi di Parma)
- *Conservazione e sicurezza: autoritarismi, larghe intese e convergenze parallele* di Antonio Borri (Università degli Studi di Perugia)
- *La sicurezza del patrimonio culturale: l'esperienza della Direzione Regionale per i beni culturali e paesaggistici della Toscana* di Isabella Lapi (Direttore Regionale per i Beni culturali e paesaggistici della Toscana), Emanuela Carpani (Soprintendente per i Beni architettonici e paesaggistici di Siena e Grosseto)
- *Complessità della conservazione dei monumenti e del costruito storico. Riflessioni brevi* di Francesco Gurrieri (Università degli studi di Firenze)

La partecipazione al workshop sia di liberi professionisti, architetti e ingegneri, sia di funzionari degli uffici tecnici del Genio Civile della Regione Toscana, delle Soprintendenze e della Protezione Civile e del Comune di Firenze, ha contribuito ad instaurare un dibattito molto proficuo sui temi del workshop, ribadendo in maniera molto decisa che gli interventi su edifici a carattere monumentale richiedono un approccio multidisciplinare.

Firenze, 28 marzo 2014

Il Comitato Organizzatore

Michele Betti
Lorenzo Conti
Maurizio Orlando
Gloria Terenzi

INTERPRETAZIONE DELL'INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO DI VOLTE DELLA CRIPTA DI S. MARIA NOVELLA A FIRENZE A CURA DEL PROF. ING. ANDREA CHIARUGI

Gloria Terenzi, Paolo Spinelli, Luca Salvatori

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze, Firenze

ABSTRACT

In this paper the strengthening design of vaults in the S. Maria Novella Basilica in Florence is analysed. The intervention was conceived and supervised by Prof. Eng. Andrea Chiarugi between 1985 and 1988 years. The conditions that motivated the intervention and its design and implementation process are analysed for achieving its correct interpretation. Different strengthening techniques have been adopted in three different zones of the crypt. Among them, of particular interest is the reinforcement of the arch below the partition wall between the sacresty and the lateral nave of the basilica. A steel plate, shaped to follow the arch intrados, is suspended by harmonic-steel cables to a reinforced concrete beam placed on top of the church wall at the roof level. The small diameter post-tensioned tendons can slide inside internally-lubricated plastic ducts that are inserted into long vertical drillings in the wall. This solution was designed to remove tension forces in the masonry portion above the arch and to prevent its further subsidence, without substantially modifying the stiffness and the general stress and strain states of the wall. It represents an important application of the concept of "active strengthening" conceived by Prof. Chiarugi in the 1980s.

SOMMARIO

Nella memoria viene esaminato l'intervento di consolidamento delle volte della cripta all'interno della Basilica di S. Maria Novella a Firenze, progettato e diretto dal Prof. Ing. Andrea Chiarugi fra gli anni 1985 e 1988. Al fine di pervenire ad una corretta interpretazione dello stesso sono state innanzitutto ricercate le motivazioni che ne hanno giustificato la soluzione assunta, nonché seguito l'iter progettuale di esecuzione, ripercorrendo le fasi di studio e realizzazione dell'intervento. Differentemente concepito nelle varie zone coinvolte, di particolare interesse risulta il consolidamento della parete di separazione fra sacrestia e navata laterale della Basilica, consistito nella messa in opera di una piastra metallica all'intradosso dell'arcone d'imposta di due volte adiacenti, sospesa mediante trefoli pretesi e scorrevoli in guaine immesse in perforazioni di notevole lunghezza, realizzate all'interno della parete sovrastante. Tale soluzione, finalizzata ad eliminare le trazioni nella porzione di parete coinvolgente l'effetto arco ed eventuali ulteriori cedimenti, al contempo non alterando il generale stato tensionale e deformativo della muratura, rappresenta un'autorevole applicazione del concetto di "consolidamento attivo" introdotto dal Prof. Chiarugi negli anni Ottanta.

PAROLE CHIAVE: Consolidamento passivo, consolidamento attivo, volte in muratura.

1. INTRODUZIONE

Il consolidamento delle volte di copertura della cripta della Basilica di S. Maria Novella a Firenze costituisce un esempio di soluzione molto particolare d'intervento su sistemi voltati con problemi di cedimento in chiave. E' noto come le principali tecniche di consolidamento in questo caso consistano nel rinforzo dei piedritti, nell'uso di catene di contrasto alle imposte, nella ricostruzione di rinfianchi posti alle reni che favoriscono il ricentraggio della curva delle pressioni, o nella

realizzazione di calotte collaboranti, realizzate in cemento armato (Turnašek e Cacovic, 1971; Rocchi, 1989; Jurina, 1999; Tomaževic, 1999), solo più recentemente in materiale composito (Borri et al., 1999; Schwegler, 1999; Focacci, 2008; ReLUIS 2009), da porre all'estradosso delle volte. Quest'ultima soluzione porta ad accrescerne le proprietà di resistenza e rigidità, ma l'aumento del carico dovuto al materiale aggiunto deve essere considerato con attenzione fra gli effetti d'incremento di massa, con conseguenze sfavorevoli dal punto di vista sismico. Pur rientrando nella logica generale di applicazione di questa modalità d'intervento, particolarmente in uso negli anni Ottanta e Novanta del secolo scorso, il consolidamento dei sistemi voltati della cripta della Basilica di S. Maria Novella è stato effettuato generalmente utilizzando calcestruzzo alleggerito in modo da ridurre il problema d'accrescimento della massa, nonché sospendendo le volte al disotto della navata laterale ad una struttura reticolare metallica per ovviare a specifiche difficoltà esecutive dell'intervento e per evitare un eccesso di passivo ricarico sulle volte stesse. Del tutto originale è poi l'ardita soluzione di sospendere a sistemi di lunghi cavi di piccolo diametro, ancorati da una parte ad un architrave in copertura, dall'altra all'intradosso di uno degli archi d'imposta di due volte adiacenti a livello della cripta, e scorrevoli in perforazioni eseguite all'interno della parete di separazione fra la sacrestia e la navata laterale. Tale soluzione vuole evidenziare il concetto di "pretensione attiva" che il Prof. Chiarugi ebbe e sviluppò in quegli anni. Egli riteneva che, specie per strutture monumentali, gli interventi dovessero portare a realizzare sistemi di forze il più possibile costanti nel tempo, generando azioni sui paramenti, e non coazioni intese come deformazioni impresse. Questo perché voleva, il Prof. Chiarugi, non turbare il comportamento del complesso murario. In effetti, se si inserisse un cavo corto, seppur preteso, ma reso aderente mediante getti, si determinerebbe da una parte un irrigidimento locale della muratura, dall'altra, data la limitata lunghezza dell'elemento, un cedimento locale anche piccolo, imputabile a varie cause quali le variazioni termiche del solido murario, od il rientro locale dell'ancoraggio, che potrebbe portare ad uno scarico tensionale del cavo. Se invece il cavo è lungo e non aderente alla muratura, la rigidità del paramento non cambia e lo stesso piccolo cedimento dell'ancoraggio va a ripercuotersi su tutta la lunghezza del cavo con conseguente piccola deformazione e minima perdita di tensione.

2. RICOSTRUZIONE STORICA DELLE FASI EDIFICATIVE DEL COMPLESSO DOMENICANO ED ANTEFATTI DELL'INTERVENTO

La Basilica di S. Maria Novella rappresenta per Firenze uno dei più importanti esempi di arte romanica del XIII secolo (Fig. 1). Con pianta a croce latina, al suo interno è composta da tre navate che seguono l'architettura cistercense, aventi ampie campate ed archi a sesto acuto con un coro di quattro cappelle laterali. La sua realizzazione si deve a due frati, Sisto e Ristoro, dopo che, nel 1221, l'area in cui si erge l'intero complesso venne assegnata ai domenicani. Progettata nel 1278, l'attuale basilica rappresenta il risultato della trasformazione della vecchia chiesa di S. Maria delle Vigne, risalente al 1094. I lavori proseguirono nel secolo successivo, riguardando altresì tutti gli altri locali dell'insediamento. Almeno dal punto di vista strutturale si può ritenere che vennero conclusi nel 1360 con la realizzazione della sala capitolare, anche denominata "Cappellone degli Spagnoli" (Fig. 2a), e del campanile a cuspide in stile romano-gotico (Fig. 2b), entrambi opera di Fra Talenti. In realtà però la "fabbrica" perdurò ben oltre tale data. Si ricorda infatti come la facciata della basilica sia una delle più importanti realizzazioni del Rinascimento italiano; iniziata nel 1458 da Leon Battista Alberti che ne concepì gli intarsi in marmo bianco e verde, venne effettivamente completata solo nel XVII secolo, ad opera di Ulisse Ciocchi che ne dipinse le lunette laterali. Dall'abolizione degli Ordini religiosi del 1868 il complesso domenicano versò in uno stato di pressoché totale abbandono per circa un secolo, finché venne rilevato dal Comune che, in collaborazione con l'Università, programmò un articolato piano di recupero e valorizzazione. In particolare, l'idea e la proposta scientifica del recupero globale dell'intero complesso e di quanto in esso contenuto sono stati dell'Università, per conto della Prof.ssa Maria Grazia Ciardi Dupré dal Poggetto e del Prof. Roberto Lunardi (cattedra di Storia della miniatura e delle arti minori), e dell'Arch. Franco Puccinelli della Divisione Belle Arti del Comune. Dopo due anni d'importanti interventi, nel 1983 fu aperto al pubblico il nuovo museo comunale che occupa i primi locali restaurati di quel convento. In seguito ad un'ulteriore serie di altri interventi come quelli di recupero del dormitorio superiore dell'antico convento, assegnato al Calcio storico fiorentino quale

magazzino per attrezzature e materiali, delle Cappelle dei Santi Simone e Giuda Taddeo, di San Lorenzo e di San Martino, durante i quali sono stati al contempo avviati gli scavi per ritrovare l'originario piano fondale della basilica, nonché della Cappella dei Popoleschi, si è reso necessario procedere ad interventi di consolidamento del complesso di volte di copertura della cripta, posta al disotto della sacrestia e del tratto più settentrionale della navata occidentale della chiesa, per il cui progetto venne coinvolto il Prof. Ing. Andrea Chiarugi. Sulla pianta in Fig. 3, rappresentativa dell'intero complesso domenicano, è cerchiata la zona interessata.



Figura 1. Vista fotografica frontale e laterale della Basilica di Santa Maria Novella

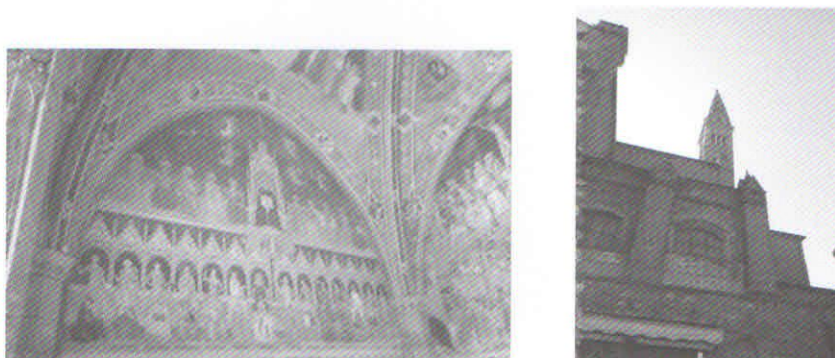


Figura 2. Vista fotografica di affreschi interni al Cappellone degli Spagnoli e del campanile

3. DESCRIZIONE DELLA CRIPTA

La cripta risale alla vecchia Chiesa di Santa Maria delle Vigne del 1094. Come reso evidente dalla pianta riportata in Fig.3 ed ancor più dai dettagli fotografici mostrati in Fig. 4, nel complesso dell'attuale basilica ad essa si ha accesso dal Chiostro verde. Seguendo la notazione riportata in Fig. 4, lungo il lato B è costeggiata da un passaggio che separa la chiesa dal Cappellone degli Spagnoli e che adduce al Chiostro dei morti, mentre i suoi lati C e D sono chiusi al disotto del transetto e della navata laterale della basilica. In Fig. 5 viene mostrata la pianta della cripta, così come ricostruito da un rilievo effettuato allo stato attuale, peraltro immutato rispetto alle condizioni osservate dal Prof. Chiarugi nella relazione tecnica concernente il consolidamento delle volte, datata 26 giugno 1985 (Chiarugi, 1985). Dalla stessa pianta si coglie come sia suddivisa in due zone di cui la prima localizzata al disotto della sacrestia, mentre l'altra sottostante la porzione settentrionale della navata laterale. Mentre la prima si presenta come un vano libero, la seconda è parcellizzata da serie di tramezzi e pareti che costituivano gli elementi divisorii di tombe a camera trecentesche. Le caratteristiche della struttura voltata sono pertanto meglio identificabili nel primo dei due ambienti.

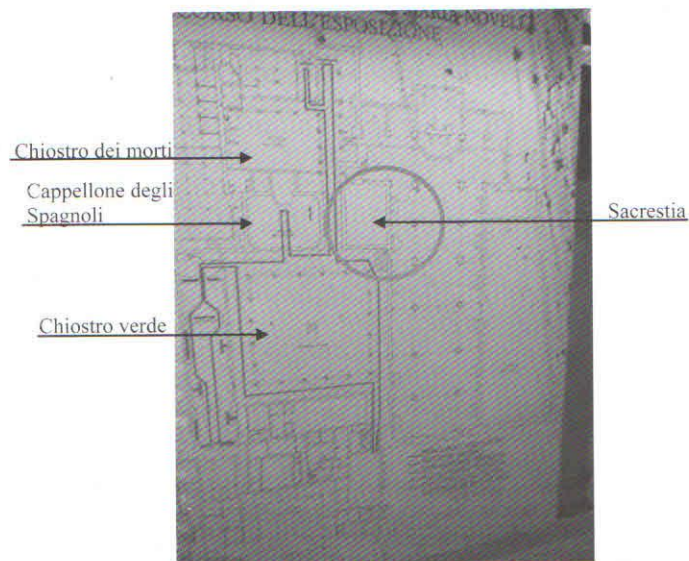


Figura 3. Pianta dell'intero complesso domenicano

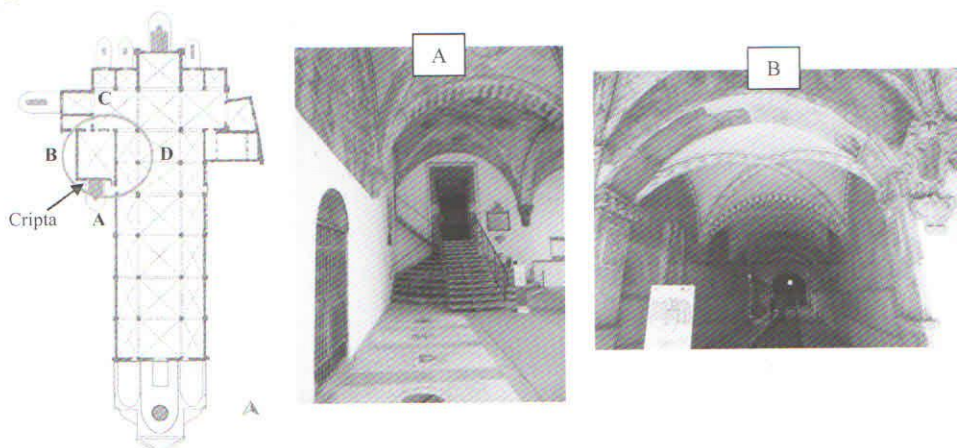


Figura 4. Pianta della Basilica con evidenziata la zona che ha riguardato l'intervento ed immagini fotografiche rappresentative dell'ingresso della cripta (A) e del passaggio voltato adiacente al Cappellone degli Spagnoli (B)

Data l'invariata situazione attuale rispetto all'epoca dell'intervento, per la descrizione della struttura si riporta quanto rilevato dal Prof. Chiarugi e documentato nella succitata relazione tecnica: ".....

a) La situazione attuale

Dall'esame degli elaborati grafici di rilievo risulta che la struttura in oggetto è costituita da una serie di volte a botte disposte secondo due direzioni ortogonali e da volte a crociera ottenute dall'intersezione delle precedenti. La quota d'imposta delle volte è variabile da +45 cm a -19 cm circa, con luci di 2,5 m, 4,3 m, 5,8 m e 7 m circa, ed una quota d'intradosso in chiave variabile da 86 cm a 76 cm circa. Per quanto riguarda le volte poste sul perimetro della cripta gli elementi d'imposta sono costituiti dalle pareti laterali della stessa, mentre per quelle disposte nella zona centrale e per le sezioni d'imposta interne delle volte perimetrali da pilastri a pianta rettangolare di muratura in pietra di dimensioni di 2 m x 1,6 m circa. In corrispondenza della parete laterale della soprastante chiesa vi è un aumento di 2,3 m circa delle dimensioni del lato minore di uno di tali pilastri, con conseguente riduzione della luce della volta corrispondente da 7 m a 4,9 m circa.

sacrestia, la seconda quelle sottostanti la zona settentrionale della navata laterale, mentre la terza l'arco d'imposta della parete fra sacrestia e navata laterale della basilica.



Figura 6. Dettaglio fotografico dell'architettura realizzata mediante coppie di putrelle e della trave di legno

4.1. VOLTE SOTTOSTANTI LA SACRESTIA

Rappresentano la zona a maggior estensione con pianta rettangolare di dimensioni 11 m x 16 m circa. In tale zona sono presenti due pilastri interni in pietra, contraddistinti dai simboli P_1 e P_2 sulla pianta in Fig. 5, delle dimensioni di 2 m x 1,6 m circa. Come reso evidente dalla tavola progettuale riportata in Fig. 7, l'intervento è consistito nell'esecuzione di una serie di perforazioni sia in direzione longitudinale che trasversale, con punti di attacco all'estradosso delle volte e previa asportazione del pavimento e di tutto lo strato di riempimento e rinfiacco delle volte, aventi interasse di 50 cm ed inclinazione di 30° rispetto all'orizzontale. In tali perforazioni sono state inserite barre ad aderenza migliorata, con diametro $\phi 14$, fuoriuscenti per un'altezza di 13 cm dall'estradosso e rese collaboranti per iniezione di boiaccia di cemento in pressione fino al riempimento della cavità ed alla bonifica della parte di muratura circostante le perforazioni.

E' stata inoltre eseguita una soletta in c.a. dello spessore di 15 cm, armata con doppia maglia di rete elettrosaldata, realizzata mediante fili di diametro $\phi 14$ disposti secondo una doppia orditura con interasse di 20 cm.

Tra le volte di luce maggiore, nella porzione tra i due pilastri interni P_1 e P_2 , sono state eseguite 3 nervature in c.a. dello spessore di 25 cm ed altezza variabile, con l'estradosso alla distanza costante di 10 cm circa dal piano finito del pavimento. In corrispondenza di tali nervature e nello spessore della volta sono state inoltre effettuate 8 perforazioni orizzontali per l'alloggiamento di 8 barre aventi diametro $\phi 20$, ancorate a due dadi di calcestruzzo posti sui pilastri in pietra. Il riempimento del volume fino alla quota di posizionamento del massetto è stato ricostituito mediante calcestruzzo alleggerito con argilla espansa, avente peso specifico non maggiore di 1200 kg/m^3 in modo da evitare di eccedere nell'incremento di massa sulla struttura. Pur rispondendo allo schema classico per l'epoca di consolidamento mediante calotte collaboranti in cemento armato, l'intervento che ha riguardato questa porzione di volte è degno di nota per l'abilità richiesta nella gestione del cantiere, nonché per la perizia esecutiva espressa dall'Impresa Faesulae; si osserva infatti come i lavori siano stati condotti operando per strisce successive di solaio e creando ponti metallici atti al sostegno provvisorio della pesante e continua armatura settecentesca non rimovibile, posta lungo il contorno della sacrestia (Fig. 7).

4.2. VOLTE SOTTOSTANTI LA NAVATA LATERALE

Tale zona comprende una serie di volte aventi luce di circa 6 m, estremamente ribassate e praticamente prive di rinfiacco. La tavola progettuale in Fig. 8 mostra in pianta la parte coinvolta di solaio della navata laterale della basilica. Come evidenziato nella proposta di consolidamento presentata dal Prof. Chiarugi il 28 gennaio 1986 (Chiarugi, 1986) e peraltro deducibile dall'esame della distribuzione di spazi nella parte sottostante di cripta, visibile in Fig. 5, per mancanza di spazio in essa non è stato possibile eseguire un intervento analogo al precedente. Si è quindi alternativamente operato in modo da appendere il complesso di volte ad una struttura mista acciaio-

calcestruzzo, realizzata mediante perforazioni verticali e posizionamento di barre di diametro $\phi 12$ saldate all'estremità inferiore ad una piastra metallica (indicata in rosso e contraddistinta con la lettera *B* sulla pianta in Fig 5), filettate all'estremità opposta ed ancorate ad un profilato metallico del tipo HE160B mediante dadi, come reso evidente dal "Particolare A" sulla tavola progettuale originale, riprodotta in Fig. 9. In sovrapposizione alla sezione C-C riportata sulla stessa tavola, indicate con le lettere *A* e *C* sono le altre due piastre di consolidamento rilevate durante il recente sopralluogo effettuato dagli autori. Di esse la prima costituisce un ulteriore rinforzo all'arco d'imposta al disotto dell'allineamento fra le navate dei due pilastri cerchiati in Fig. 8, nella limitata luce libera dello stesso, data la presenza di pareti adiacenti, realizzate alla quota della cripta (Fig. 5). Come discusso nei successivi paragrafi, la seconda rappresenta invece un'applicazione del concetto di "consolidamento attivo", teorizzato negli anni Ottanta dal Prof. Chiarugi.

4.3. ARCO D'IMPOSTA DELLA PARETE DELLA NAVATA LATERALE

Sulla scia dell'entusiasmo della scoperta dei resti della chiesa di Santa Maria delle Vigne, con l'intenzione di rendere visibile al pubblico il ritrovamento dell'impiantito originario, dalla Divisione belle arti per conto del Comune di Firenze venne richiesto di non occludere alcuna zona della Cripta allo scopo del consolidamento. Per rispettare tale indicazione, al contempo riducendo parte dei cedimenti in atto anche causati dagli scavi, nonché altri che avrebbero potuto verificarsi coinvolgendo l'arco di sostegno della parete divisoria e le porzioni di volta adiacenti della navata laterale e della sacrestia, il Prof. Chiarugi progettò un sistema di precompressione attiva della parete di cui altresì curò i dettagli esecutivi in collaborazione con l'Impresa Faesulae.

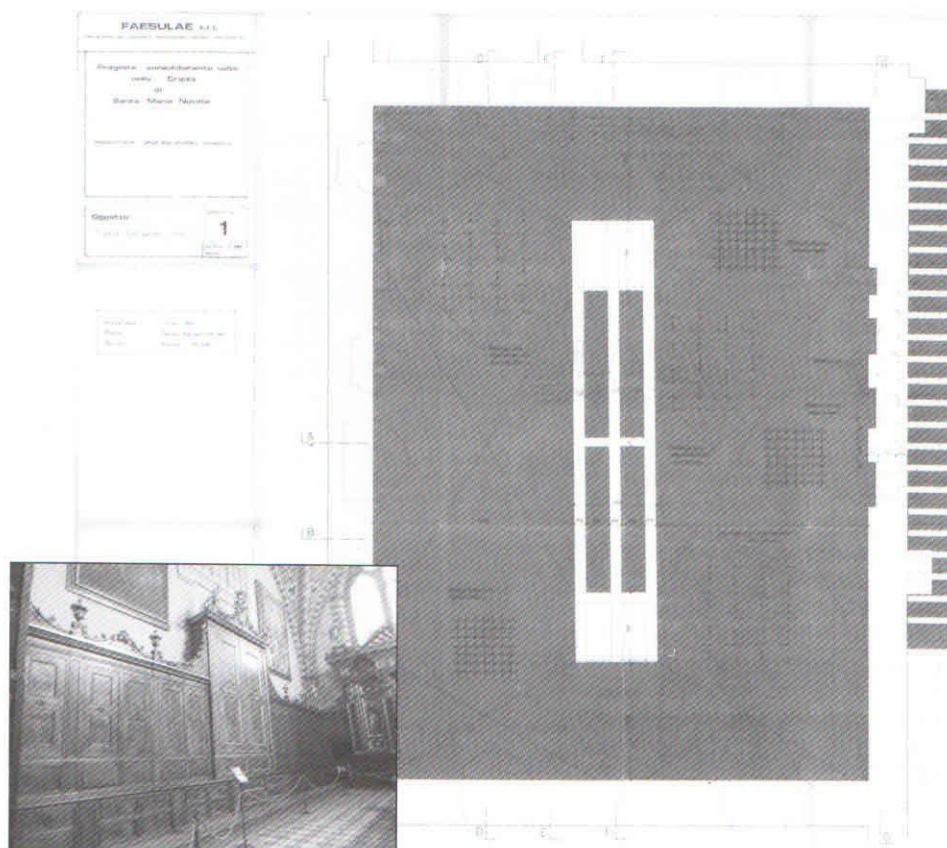


Figura 7. Tavola progettuale dell'intervento sulle volte sottostanti la sacrestia e vista fotografica di una parte dell'armadiatura settecentesca presente sul contorno

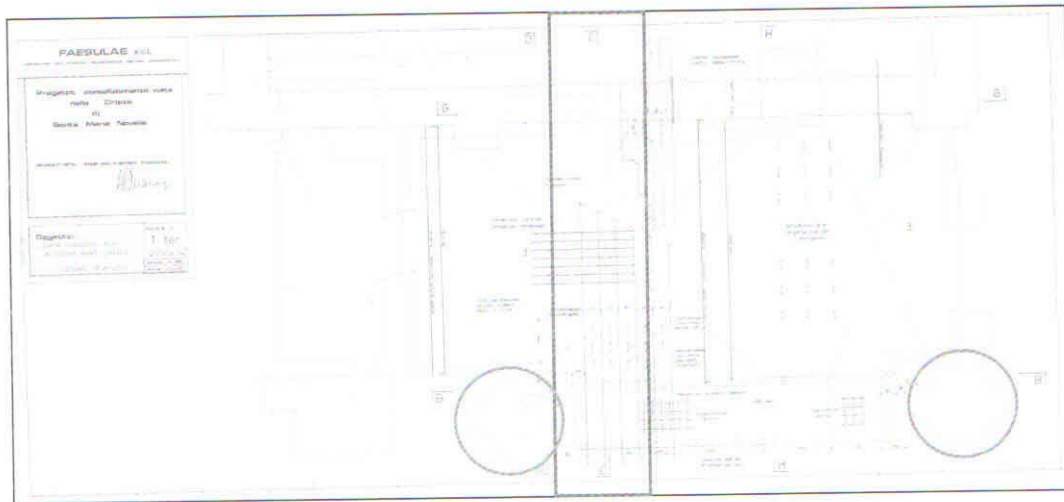


Figura 8. Tavola progettuale della pianta dell'intervento sulle volte sottostanti la navata laterale con riquadrata la sezione C-C e cerchiata l'impronta dei pilastri posti sull'allineamento fra navata laterale e navata centrale della basilica.



Figura 9. Tavola progettuale dell'intervento sulle volte sottostanti la navata laterale: sezione CC e particolare A

L'intervento è consistito nella predisposizione di una piastra metallica di sospensione, indicata con la lettera C sulla pianta in Fig. 5 e nella sezione in Fig. 9, avente uno spessore di 25 mm e larghezza 1200 mm, sagomata come l'intradosso dell'arcone ove è stata posta, ed ancorata ad un cordolo in copertura mediante 8 trefoli da 6/10" disposti su due file sfalsate secondo lo schema mostrato nel dettaglio in Fig. 10, nonché lateralmente con barre quadrate 40 mm x 40 mm. Per la messa in opera dei trefoli, del tipo Dyform, sono state realizzate delle perforazioni di circa 18 m nello spessore della stessa parete, 4 verticali e 4 leggermente inclinate per evitare la finestra soprastante. I trefoli sono stati mantenuti scorrevoli all'interno di un tubo di polietilene rigido, internamente lubrificato. In Fig. 11 viene mostrata la disposizione delle perforazioni per la cui esecuzione, da parte dell'Impresa specializzata Bardin, è stata necessaria un'estrema attenzione tenendo conto che i due pavimenti della sacrestia e della navata laterale sono posti a quote differenti con un dislivello di circa 43 cm e che, procedendo dalla parte inferiore della parete al disopra dell'arco fin verso quella centrale del paramento, si trovano lateralmente due incavi nello spessore, aventi dimensioni di circa 1,5 m x 2,5 m, nei quali sono alloggiati i confessionali, un altare in marmò del 1802, dedicato ad Anna Pandolfini, con basamento a gradini in pietra serena realizzato tra le due aperture e la "Visione di San Giacinto", dipinto risalente al 1596, attribuito ad Alessandro Allori (Fig. 11). Tenendo conto del pregio degli arredi adiacenti alla parete, il consolidamento della muratura nella zona coinvolta dalle perforazioni longitudinali è stato pertanto realizzato mediante ulteriori perforazioni trasversali, passanti ove non fossero presenti gli affreschi, non passanti altrimenti, in

cui sono state inserite barre aventi diametro $\phi 12$ mm e successivamente iniettata boiaccia cementizia. Come risulta da una lettera datata 17.06.1987, inviata dal Prof. Chiarugi all'Impresa Faesulae, l'ardito intervento è stato eseguito articolandolo nelle seguenti fasi: ".....

- 1) *Nelle zone di estremità inferiore e superiore della parete, per un'altezza di circa 2 m deve essere eseguita una bonifica della muratura esclusivamente con malte o boiacche di cemento come risulta dal disegno allegato.*
- 2) *Lungo tutta la parete nella zona interessata dalle perforazioni verticali ed in prossimità dei cavi deve essere eseguita la tirantatura della parete stessa con perforazioni orizzontali o suborizzontali armate con tondi $\phi 12$ mm ancorati alla muratura anche con resine; in tal caso si richiedono le caratteristiche delle resine che si intende impiegare e le modalità con cui si intende procedere.*
- 3) *Bonifica della muratura a sacco anche con l'iniezione di resine fino a saturazione e riempimento delle cavità conseguenti alle perforazioni effettuate. Tale bonifica deve comunque assicurare la scorrevolezza dei cavi nelle guaine.*
- 4) *La tesatura dei cavi deve avvenire in più fasi:*

1^ fase: al completamento dei lavori nella navata laterale:

cavo n°				Carico applicato (kg)
1,	2,	3,	4	4900
5,	6,	7,	8	3900

2^ fase: al completamento dei lavori nella Sacrestia:

cavo n°				Carico applicato (kg)
1,	2,	3,	4	6500
5,	6,	7,	8	

In fase di esecuzione dovrà inoltre essere prevista la possibilità di effettuare ulteriori tesature dei cavi successivamente alle due indicate e nei primi mesi di funzionamento della struttura.

- 5) *Le perforazioni delle volte nella navata laterale devono essere eseguite in modo da ottenere i risultati indicati in progetto e in condizioni tali da non alterare l'esistente."*

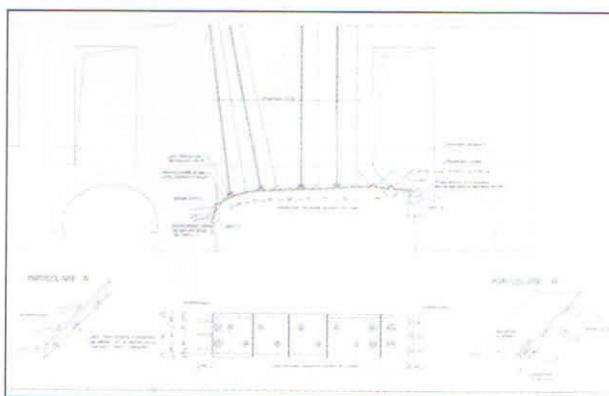


Figura 10. Tavola progettuale di dettaglio della piastra metallica e del sistema di ancoraggio

Come evidenziato anche nel testo della citata lettera, la scorrevolezza del trefolo era un requisito fondamentale per la buona riuscita dell'intervento. Grazie a tale proprietà, congiunta ad un'elevata deformabilità dei cavi di piccola sezione e grande lunghezza, l'azione di precompressione imposta agli stessi, i cui ancoraggi dal lato della piastra sono ben visibili nell'immagine fotografica in Fig. 12, deve infatti operare attivamente alleviando la condizione tensionale della porzione di muratura

posta al disopra della piattabanda metallica, per un'estensione in altezza rapportabile all'effetto arco, altresì preservando da successivi abbassamenti del paramento. La restante parte della muratura, non solidarizzata rigidamente al sistema di sospensione, deve invece mantenere sostanzialmente invariato il suo stato tensionale. La preservata scorrevolezza dei cavi consente inoltre, a distanza di anni, di poter verificare il permanere dello stato di tensione in essi e, se necessario, di ritesarli per non far perdere d'efficiacia all'intervento.

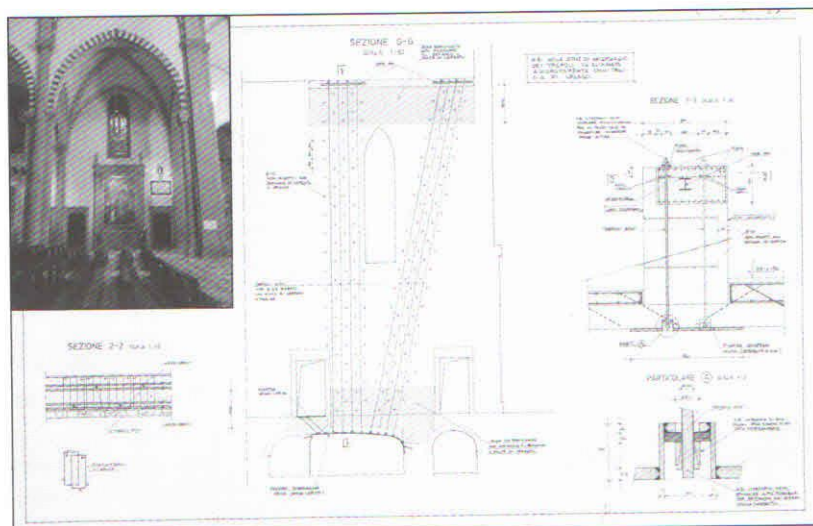


Figura 11. Tavola progettuale di dettaglio della piastra metallica e del sistema di ancoraggio

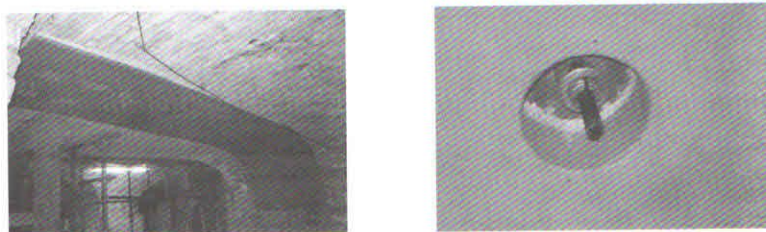


Figura 12. Vista fotografica dell'intradosso dell'arco al disotto della parete e dettaglio di ancoraggio di uno dei trefoli

5. VERIFICA NUMERICA DELL'EFFICACIA DELL'INTERVENTO SULLA PARETE

Per avere conferma dell'idea del Prof. Chiarugi, nonché per valutare l'efficacia dell'intervento confrontando lo stato tensionale e deformativo da esso indotto con quelli della parete non consolidata, è stata condotta una preliminare indagine numerica utilizzando il codice di calcolo SMARTmasonry (Salvatori & Spinelli, 2011). Il programma consente modellazioni non lineari ibride, in cui alcune porzioni di parete possono essere schematizzate come blocchi rigidi interagenti tramite interfacce, mentre altre sono modellate mediante elementi finiti continui, eventualmente dotati di microstruttura. Nel caso della parete in esame l'arcone della cripta, gli altri archi e le architravi sovrastanti le aperture sono stati schematizzati tramite elementi distinti del primo tipo per riprodurre l'effettiva tessitura muraria, mentre la restante porzione di parete è stata assunta come continuo. In via preliminare le analisi sono state condotte in ambito lineare ed il continuo è stato considerato isotropo e privo di microstruttura, con modulo elastico $E = 3,5 \text{ GPa}$, coefficiente di Poisson $\nu = 0,25$ e densità $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$ (Chiarugi, 1986). I carichi trasmessi dalla copertura e dalle volte sono stati applicati come uniformemente distribuiti lungo le rispettive linee d'imposta (stimati in 50 kN/m e 100 kN/m , rispettivamente). Nel modello relativo alla situazione consolidata

la piastra ed i cordoli sono stati schematizzati come continui isotropi ($E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0,2$, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ per l'acciaio; $E = 29 \text{ GPa}$, $\nu = 0,2$, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ per il c.a.), mentre i trefoli sono elementi biella a due nodi, ancorati rispettivamente alla piastra ed al cordolo sommitale, con le seguenti caratteristiche meccaniche e dimensionali: modulo $E = 196 \text{ GPa}$, area della sezione $A = 182 \text{ mm}^2$, precompressione $N_0 = 65 \text{ kN}$.

In Fig. 13 vengono confrontati gli andamenti degli sforzi normali nei casi di assenza e presenza del sistema di sospensione attiva. Dalla rappresentazione grafica del flusso tensionale sulla parete non consolidata si coglie la particolare concentrazione di trazioni in chiave di volta. Lo stesso andamento è rilevabile dal quadro deformativo dell'arco da cui si evince come, prima dell'intervento, lo stato tensionale e di abbassamento in chiave stesse portando ad un forte ribassamento della volta. Ponendo a confronto il flusso delle tensioni normali relativo alla situazione di assenza e presenza di trefoli, dalla distribuzione delle fasce di colore fra le zone di ancoraggio si osserva come la parte di muratura intermedia rimanga sostanzialmente inalterata, mentre lo stato di trazione si attenua sensibilmente nell'ipotesi di pretensione in prossimità degli ancoraggi. Tenendo conto della disposizione degli 8 trefoli su due file sfalsate di 4 cavi (Fig. 10) l'esito numerico conferma peraltro la correttezza della semplificazione di calcolo applicata dal Prof. Chiarugi di considerare la piastra come una semplice trave a cinque campate, incastrata alle estremità e caricata da una porzione di muratura di circa 3 m. In termini deformativi il modello computazionale ha inoltre consentito di porre in evidenza quali siano le zone di più probabile localizzazione delle fessure mostrando, grazie alla presenza dei blocchi, una condizione d'incipienza del distacco per scorrimento degli stessi e sconnessione con l'elemento continuo all'intradosso. Come mostrato dai dettagli fotografici in Fig. 14, tali zone corrispondono proprio a quelle in cui dal sopralluogo è attualmente stato rilevato l'inizio del distacco della piastra, probabilmente generato da cadute di tensione da parte dei trefoli che necessitano di essere ritesati per non ridurre l'efficacia dell'intervento.

CONCLUSIONI

Nella memoria viene riesaminato un complesso intervento di consolidamento delle volte della cripta della Basilica di S. Maria Novella a Firenze, progettato e seguito nella sua esecuzione dal Prof. Ing. Andrea Chiarugi. Articolato in tre parti, di esse le prime due hanno riguardato le calotte di estradosso delle volte, mentre la terza ha portato al consolidamento della parete di separazione fra sacrestia e navata laterale della basilica. Nella generale maestria di concezione ed esecuzione dell'intero intervento, particolarmente singolare e degno di nota è quest'ultimo che rappresenta un'applicazione autorevole della tecnica di consolidamento attivo teorizzato dal professore negli anni Ottanta. Pur necessitando di ulteriori verifiche ed approfondimenti anche in ambito non lineare, una prima serie di valutazioni numeriche eseguite in campo lineare, congiunte ad una verifica in sito dello stato attuale dell'arco hanno evidenziato come l'intervento, a distanza di trent'anni, richieda una semplice ritesatura dei trefoli per garantire la conservazione dei requisiti di efficienza originari.

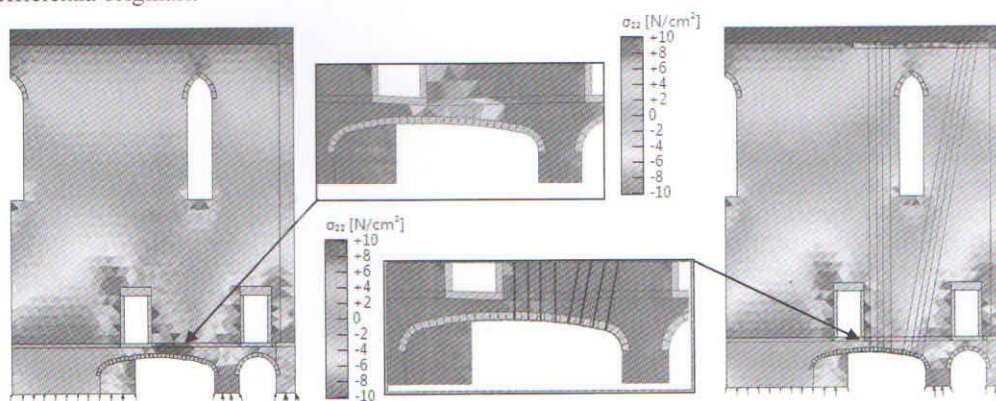


Figura 13. Flussi di tensione sulla parete prima e dopo l'intervento

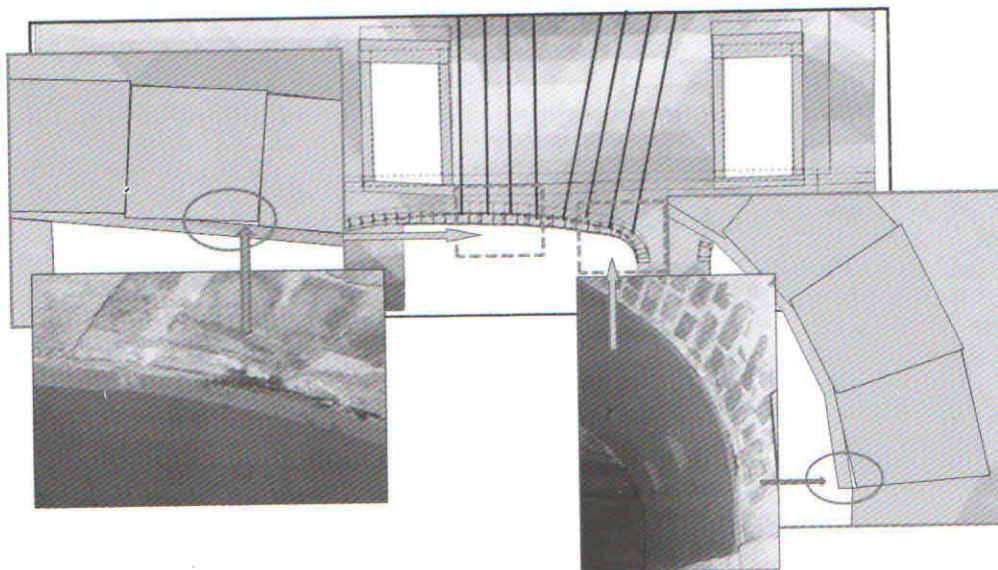


Figura 14. Zone di distacco fra piastra ed intradosso dell'arco

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Geom. Sante Valori dello Studio Chiarugi e l'Impresa Faesulae per la documentazione progettuale e le preziose testimonianze riguardo all'esecuzione dell'intervento fornite agli autori. Si ringrazia inoltre il Servizio Belle arti del Comune di Firenze per aver consentito il sopralluogo alla cripta della Basilica.

BIBLIOGRAFIA

- Borri A., Sorace S., Vagniluca M. (1999). "Il consolidamento di volte a crociera. Modellazione degli interventi", *L'Edilizia, Building and Construction for Engineers*, N. 1/2 1999, pp. 44-49.
- Chiarugi A. (1985). "Relazione tecnica concernente il consolidamento delle volte della Cripta della Chiesa di S. Maria Novella", 26 giugno 1985.
- Chiarugi A. (1986). "Proposta di consolidamento delle volte della Cripta della Chiesa di S. Maria Novella", 28 gennaio 1986.
- Croci G. (2001). *Conservazione e restauro strutturale dei beni architettonici*, UTET, Torino.
- Focacci F. (2008). *Rinforzo delle murature con materiali compositi*, Flaccovio Editore.
- Jurina L. (1999). "Una tecnica di consolidamento attivo per archi e volte in muratura", *Proc. of ASSISI'99, Seismic Performance of Built Heritage in Small Historic Centers*, Assisi, April 1999.
- LL.PP.24_07_09 (2009). *Linee guida per la progettazione, l'esecuzione, ed il collaudo di interventi di rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP*, Progetto DPC-ReLUIS 2004-2008.
- Rocchi P. (1989). *Progettare il consolidamento*, Kappa, Roma.
- Schwegler G. (1995). "Masonry construction strengthened with composites in seismically endangered zone", *Proc. of 10th Eur. Conf. on Earth. Eng.*, Vienna, Austria, Sept. 1994, A.A. Balkema Publ., pp.2299-2303.
- Salvatori L., Spinelli P. (2011). "Structural Modelling and Analysis for Research and Technology of Masonry Walls (S.M.A.R.T. masonry). Parte I: modello computazionale". *Atti del 4^o Convegno WONDERmasonry*, 10-11 November, Firenze.
- Tomaževic M. (1999). "Earthquake-resistant design of masonry buildings.", *Series on Innovation in Structures and Construction*, Vol. 1, Imperial College Press, London
- Turnašek V., Cacovic F., (1971). "Some experimental results on the strength of brick masonry walls", *Proc. of the 2nd Intern. Brick Masonry Conference*, Stoke-on-Trent, pp. 149-156.