

SEISMIC CONSOLIDATION OF DUOMO DI COLORNO: MODELLING AND INTERVENTIONS

IL CONSOLIDAMENTO ANTISISMICO DEL DUOMO DI COLORNO: MODELLAZIONE E INTERVENTI

Lorenzo, Jurina¹; Edoardo Oliviero, Radaelli¹; Giovanni, Michiara²
Politecnico di Milano A.B.C. dept.¹; GEOFABER²

ABSTRACT

The special case of “Duomo di Colorno”, in Italy, near Parma, is here presented. The XVIII century masonry vaults of the cathedral widely suffered due to a seismic event occurred in 2012 and a relevant crack pattern appeared. A deep diagnosis was conducted before the interventions, aimed to evaluate the residual mechanical properties of the masonry and the dynamic response of vaults, facade and bell tower. In a second time, some consolidation interventions were proposed in order to restore the global resistance of the building, mainly focusing on the roofs and on the vaults. One of the adopted methods is represented by an innovative and active technique called “RAM – Reinforced Arch Method”. Besides, a FRCC net was applied on the the vaults. The use of post-tensioned steel cables, working in parallel to the FRCC net, led to a strong increase of the horizontal collapse load. A further global strengthening was provided by the reinforced new roofs, behaving as rigid diaphragms. After the consolidation interventions, an “ex-post” dynamic diagnostic campaign was conducted to compare the new frequencies with the previously measured ones and with the numerical results.

Keywords

Seismic vulnerability, structural consolidation, diagnosis, dynamic response, numerical model.

1. CENNI STORICI

La fondazione del Duomo di Colorno (Parma), dedicato a Santa Margherita, risale al XV secolo, su un preesistente oratorio; originariamente collocato ai margini del Borgo, nei pressi delle antiche mura, venne consacrato il 28 maggio 1525 come chiesa parrocchiale.

Lo stile originario si ispirava al tardo gotico, in particolare alla chiesa di San Francesco in Prato di Parma e presentava una pianta di forma rettangolare, suddivisa in tre navate da colonne tonde che si concludevano in tre absidi sfaccettate, rivolte ad Est secondo i canoni costruttivi dell'epoca. Il soffitto piano in legno e la pavimentazione in cotto caratterizzavano l'ampia navata centrale. L'esterno venne lasciato in mattone faccia a vista, compresa l'austera facciata con un unico portone centrale, due finestre ed il rosone. Nel 1532 venne eretto il campanile.

Nel 1636 il Duomo venne danneggiato durante l'occupazione cruenta di Colorno da parte degli spagnoli e dei cremonesi e due decenni più tardi, il 10 aprile 1653, subì un primo evento sismico che "gittò a basso la punta del toricino di mezzo [...]", causando alcuni danni.

Dal 1660 al 1737 vennero eseguite opere di notevole interesse artistico, come la costruzione nel transetto destro della Cappella del SS. Sacramento e la Cappella di Sant'Antonio.

Nella seconda metà del XVIII secolo la chiesa annoverò diversi interventi, tra i quali il restauro dell'abside e la plafonatura a volta che venne a nascondere la soffittatura in legno.

Un'ulteriore scossa tellurica, nel 1832, causò all'edificio ingenti danni, tali da richiedere consistenti lavori che durarono undici anni. Si volle ammodernare la facciata e l'interno, rimodellando l'edificio al gusto neoclassico, trasformando i pilastri da sezione circolare a quadrata ed aprendo le cappelle lungo le navate laterali, così come oggi appaiono.

Sequirono nel XX secolo numerosi altri interventi di manutenzione delle strutture e di restauro degli apparati decorativi.

Il 25 gennaio 2012 il forte sisma che colpì l'Emilia Romagna causò una evidente fessurazione delle volte della navata centrale e il Duomo venne dichiarato inagibile.

La collaborazione tra la Parrocchia, le Istituzioni ed un gruppo di volontari e preparati tecnici locali portarono alla riapertura del Duomo in solo 30 mesi.

La presente memoria illustra la fase diagnostica ed i criteri di progettazione ed esecuzione seguiti il restauro strutturale, da parte di uno degli autori.

2. LA DIAGNOSTICA

Al fine di condurre ad una progettazione consapevole e mirata degli interventi di consolidamento strutturale del Duomo di Colorno è stata effettuata una esaustiva campagna di indagini diagnostiche sui principali elementi strutturali.

Le prove soniche eseguite sui pilastri e sulle murature del cleristorio centrale hanno fornito velocità superiori ai 1500 m/s, indice di buone caratteristiche meccaniche della muratura, così come i martinetti piatti singoli e doppi hanno restituito valori di sforzo agente nella muratura compresi tra 0,46 MPa e 0,64 MPa, in linea con i risultati previsti dal modello numerico. I carotaggi, eseguiti su alcuni pilastri della navata centrale, hanno confermato una solidarietà tra i pilastri originari tondi e le integrazioni ottocentesche.

Accanto alle tradizionali prove in situ e di laboratorio, destinate a determinare le proprietà meccaniche residue della muratura, sono state condotte prove dinamiche per indagare la risposta sismica del corpo di fabbrica nella condizione danneggiata post- sisma. In particolare, sono state eseguite indagini con microtremori e indagini sismiche di tipo MASW.

Le prime si basano sul concetto di "microtremore sismico", cioè un rumore bianco sempre presente sulla crosta terrestre con basse ampiezze di oscillazione. Il microtremore deriva principalmente dai moti oceanici, atmosferici, sismici e antropici (Gosar, A. 2012).

Lo studio dei microtremori nasce negli anni '50 mentre la tecnica dei rapporti spettrali H/V (componente orizzontale/componente verticale) viene introdotta agli inizi degli anni '70 da Nogoshi e Igarashi (1971) e Shiono (1979) per venire poi ampiamente sviluppata da Nakamura (1989) tanto da oggi essere nota oggi come "tecnica di Nakamura" specie in riferimento alle misure applicate al terreno. Attualmente la tecnica è ampiamente utilizzata sul terreno per individuarne le frequenze (ad esempio negli studi di microzonazione sismica) e si sta espandendo anche come utilizzo per l'individuazione delle frequenze proprie delle strutture. Il segnale acquisito in genere non può essere utilizzato tal quale ma deve essere trattato con opportuni filtri e finestre per eliminare ciò che non è rumore sismico e che viene pertanto considerato disturbo.

In realtà, su alcune strutture, la semplice trasformata di Fourier del segnale acquisito restituisce già la frequenza propria, poiché l'amplificazione della struttura è tale da rendere superfluo l'uso di ulteriori operazioni. A tutt'oggi si dibatte ancora su quanto le frequenze individuate mediante microtremore siano confrontabili con quelle che avremmo in caso di strong motion, ad esempio indotte da un sisma importante. Le esperienze e la bibliografia evidenziano un certo abbassamento di frequenza nel caso di strong motion rispetto al microtremore, mediamente dell'ordine del 10% (Fiaschi, A. et.al. 2012).

Nel caso del Duomo di Colorno la rilevazione dei microtremori, indotti da rumore bianco di tipo ambientale, ha utilizzato 9 punti di misurazione, di cui 2 posti a quota 0.00m, 2 a livello del cleristorio, 4 a livello del sottotetto della navata centrale, investigando così le volte, la facciata e la base del campanile. Una ultima rilevazione è stata ubicata in sommità del campanile.

Mediante il metodo di Nakamura sono stati ricavati i rapporti spettrali H/V (Horizontal / Vertical), ossia è stata individuata la risposta dinamica delle strutture in termini di modi di vibrare, filtrando il segnale da qualsiasi rumore non sismico.

Con la medesima finalità, sono stati altresì analizzati gli spettri direzionali, utili a individuare gli effetti amplificativi indotti dall'altezza della struttura rispetto al suolo.

I risultati sono contenuti nella Tabella 1, dalla quale si evince una bassa frequenza del suolo, pari a 0,8 Hz, ed una frequenza nell'ordine di 2,5 – 3,0 Hz per il campanile. I due primi modi di vibrare corrispondono dunque al campanile, secondo traslazioni in direzione Est/Ovest ed in direzione Nord/Sud.

I modi di vibrare della facciata e delle volte fessurate della navata centrale sono stati ottenuti per frequenze pari a 4,0 – 5,0 Hz, mentre per frequenze intorno ai 7,0 Hz si ha l'attivazione di modi propri del corpo della chiesa.

In definitiva, l'elemento che si è manifestato come il meno rigido è il campanile. A seguire la facciata e le volte della navata centrale che corrispondono agli elementi danneggiati dal sisma. Il confronto tra i risultati numerici (ottenuti dalla modellazione FEM) e i risultati delle misurazioni sperimentali in termini di frequenze e modi propri ha restituito somiglianze più che accettabili.

	Asse longitudinale		Asse trasversale	
	Frequenza [Hz] sperimentale	Frequenza [Hz] numerica	Frequenza [Hz] sperimentale	Frequenza [Hz] numerica
Suolo	0,8	-	0,8	-
Campanile	3,0	3,5	2,5	2,9
Facciata	4,0	5,5	-	-
Corpo delle chiesa	6,0	6,0	5,0	4,5
Volte	4,0	4,5	4,8	5,6

Tabella 1. Frequenze ottenute da indagini dinamiche sul Duomo allo stato di fatto e da modello numerico

Quale ultima indagine diagnostica, è stata condotta una indagine sismica tipo MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) al fine di misurare la dispersione ed il ritorno delle onde di taglio (V_s) nel suolo.

I dati restituiti dalla prova MASW sono stati elaborati ricostruendo il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s) nel terreno limitrofo al Duomo. Dalle elaborazioni eseguite è stata ricavata una velocità $V_{S,30}$, pari a circa 209,6 m/s, che corrisponde ad un suolo di categoria C, ossia depositi di sabbie o ghiaie mediamente addensate o argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri.

I risultati ottenuti dalle indagini diagnostiche si sono rivelati particolarmente utili nella fase di calibrazione del modello di calcolo ad elementi finiti nonché come misura di riferimento nelle analisi ex-post condotte sulle stesse strutture del Duomo al termine dell'intervento di consolidamento.

Ovviamente le misure ottenute consentiranno un controllo delle risposte globali dell'edificio monumentale, ripetuto nel tempo. Sarà possibile con questa modalità economica e per nulla invasiva monitorare il comportamento del Duomo e rendere operativa la pratica virtuosa della manutenzione programmata.

3. LE ANALISI DI VULNERABILITA' SISMICA E GLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO: RISULTATI A CONFRONTO

3.1 Dall'analisi semplificata al modello ad Elementi Finiti

In accordo con le Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, è stata condotta una prima valutazione LV1 mediante l'adozione di un modello semplificato per la stima dell'indice di sicurezza sismica, sulla base dei 28 cinematismi individuati per le chiese.

L'indice di vulnerabilità i_v , ottenuto attraverso una opportuna combinazione di punteggi assegnati ai diversi elementi di vulnerabilità e di presidio antisismico, ha restituito una corrispondente accelerazione di raggiungimento dello Stato Limite di Salvaguardia della Vita pari a $1,50 \text{ m/s}^2$, nella situazione allo stato di fatto.

Adottando il medesimo approccio numerico nella configurazione consolidata si è raggiunta una accelerazione pari a $2,38 \text{ m/s}^2 > 1,50 \text{ m/s}^2$, fornendo un valore corrispondente ad un miglioramento sismico della struttura.

È stato condotta una seconda analisi di vulnerabilità sismica, a livello LV2, nella quale sono stati considerati i principali meccanismi di ribaltamento della struttura e per ciascuno di essi, mediante il

Principio dei Lavori Virtuali, è stato calcolato il moltiplicatore del carico critico e la corrispondente accelerazione di attivazione.

Sono stati analizzati i meccanismi di ribaltamento della facciata principale, posizionando la cerniera cilindrica a diverse altezze, oltre ai i meccanismi di ribaltamento delle pareti del cleristorio, del campanile ed i meccanismi di scorrimento della lanterna.

Il ribaltamento dell'intera facciata lungo una cerniera cilindrica posta a terra è risultata la situazione più gravosa, fornendo una accelerazione di attivazione del cinematismo pari a $0,55 \text{ m/s}^2$, allo stato di fatto. L'introduzione degli interventi di consolidamento strutturale ha portato a raggiungere una accelerazione di attivazione del medesimo cinematismo pari a $0,93 \text{ m/s}^2 > 0,55 \text{ m/s}^2$, a conferma del miglioramento sismico della struttura consolidata.

Occorre notare che nel cinematismo di ribaltamento della facciata è stato trascurato il contributo stabilizzante offerto dalle murature della navata centrale e di quelle laterali, ponendosi in una situazione a estremo favore di sicurezza. Tale ipotesi giustifica il valore dell'accelerazione inferiore rispetto a quello ottenuto nell'analisi LV1.

Infine, è stata condotta una terza analisi di vulnerabilità di livello LV3, che ha previsto una modellazione ad elementi finiti dell'intero corpo di fabbrica.

La modellazione numerica dell'edificio è stata calibrata utilizzando i risultati ricavati dalle prove sperimentali, privilegiando come parametri di riferimento i modi propri di vibrare ottenuti dai microtremori e gli sforzi nella muratura misurati con i martinetti piatti.

Una volta validato il modello FEM sono state condotte analisi dinamiche non lineari di tipo "push-over", sia sull'edificio allo stato di fatto, sia nella situazione consolidata.

Ciascun intervento di progetto è stato modellato singolarmente, per valutarne la specifica efficacia strutturale, e poi congiuntamente ai restanti consolidamenti per verificare la risposta sismica globale dell'intero corpo di fabbrica.

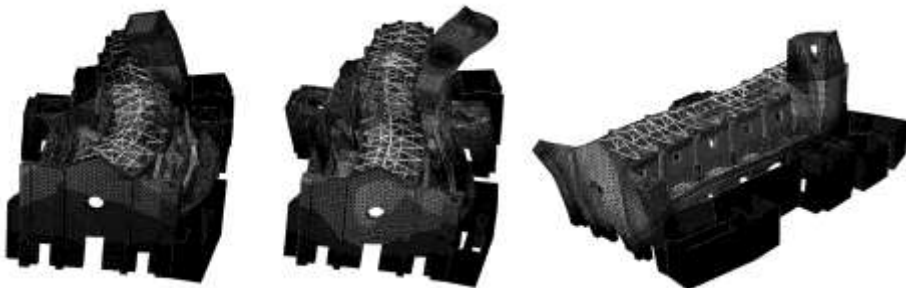


Figura 1. I primi modi di vibrare ottenuti dal modello FEM

La modellazione numerica ha restituito un'accelerazione di prima fessurazione sulle volte della navata centrale pari a $1,6 \text{ m/s}^2$ nella condizione allo stato di fatto (ossia paragonabile a quella ottenuta nel modello LV1), e pari a $3,7 \text{ m/s}^2$ in presenza di tutti gli interventi di consolidamento. Nel primo caso, ossia allo stato di fatto, l'accelerazione di fessurazione è risultata inferiore a $3,1 \text{ m/s}^2$, che corrisponde alla accelerazione massima da spettro di progetto, e dunque il Duomo non risultava verificato. Nella configurazione consolidata l'accelerazione di fessurazione è risultata maggiore di quella di progetto, e dunque si è raggiunto un significativo miglioramento sismico dell'intero corpo di fabbrica.

3.2 Gli interventi di consolidamento strutturale

Gli interventi di consolidamento strutturale si sono limitati alla sola parte alta del Duomo, ossia solo laddove risultava effettivamente necessario intervenire, ed hanno reso l'edificio un corpo continuo, in cui le varie parti si possono aiutare mutuamente, senza che porzioni particolarmente deboli, tra cui la facciata, il cleristorio, il campanile e le volte, possano diventare sedi di meccanismi di collasso locale.

Tra gli interventi, è stato innanzitutto realizzato un sistema di consolidamento nei confronti delle spinte delle volte a crociera della navata centrale, attuato tramite una cerchiatura attiva con barre Dywidag posizionate al di sopra del fregio decorativo della navata centrale, lungo la direzione longitudinale. Il confinamento prosegue nell'abside con l'inserimento di una piastra in acciaio corrente, collegata puntualmente alla muratura e tale da prevenirne il ribaltamento (Jurina, L. 2012).

L'evidente quadro fessurativo delle volte della navata centrale ha richiesto la valutazione e l'affiancamento in parallelo di più soluzioni di consolidamento. Un primo intervento ha previsto l'applicazione fibre in carbonio FRCM sull'estradosso delle volte e, solo localmente, anche all'intradosso. Si tratta di un sistema passivo capace di restituire una adeguata continuità e resistenza alla muratura, specie nelle zone fessurate (Jurina, L. 2014).

Accanto alle fibre di carbonio è stata impiegata la tecnica dell'"Arco Armato" estradosale, ampiamente sperimentata ed adottata in numerosi interventi di consolidamento di archi e volte. Il sistema, costituito da cavi post-tesati e disposti "a stella", è attivo, capace di modificare i carichi e di adattarsi alla geometria esistente, contribuendo ad un significativo incremento di resistenza delle volte sia a carichi orizzontali che verticali. Nel caso del Duomo di Colorno, con la sola applicazione dell'FRCM si è raggiunto un incremento di carico di prima fessurazione pari al 25%, mentre utilizzando il sistema combinato FRCM+ Arco Armato l'incremento è risultato addirittura pari al 69%.



Figura 2. Intervento di consolidamento strutturale realizzati sulla copertura del Duomo di Colorno

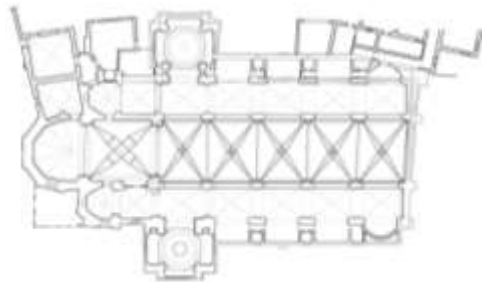


Figura 3. Schema della disposizione degli "archi armati" sulle volte del Duomo di Colorno

Negli interventi di consolidamento antisismico è buona norma inserire elementi di controvento in copertura, capaci di apportare miglioramenti nei confronti delle azioni orizzontali, al fine di garantire alla struttura un "coperchio rigido" in sommità e conferire un comportamento scatolare globale. Per il Duomo di Colorno si è optato in favore di una soluzione "legno su legno", che prevede l'impiego di un doppio assito ligneo incrociato e collegato alla sottostante orditura, sopra al quale sono state disposte sottili

bandelle forate in acciaio zincato a caldo, con andamento a croce lungo il piano di falda. Le bandelle risultano collegate in modo diffuso ai sottostanti assiti e creano una efficace trave reticolare.

Infine, quale ultimo intervento, è stato predisposto un sistema di controventi nel campanile, realizzato mediante profili in acciaio di cerchiatura e diagonali ad "X" lungo le 4 pareti, dalla quota d'imposta fino in sommità.

La combinazione di tutti gli interventi di consolidamento ha comportato il raggiungimento del 131% di incremento di resistenza, conseguendo un più che soddisfacente miglioramento sismico.

4. LE ANALISI EX-POST E GLI SVILUPPI FUTURI

La parte più interessante ed innovativa, anche se ancora in fase di sviluppo, è quella relativa alle misure dinamiche post consolidamento. A tal fine sono state ripetute le prove nella situazione di volte consolidate mediante FRCM e Arco Armato ed in presenza della copertura rinforzata, individuando le nuove frequenze delle volte e del campanile e confrontandole con quelle pre-consolidamento, ossia nella situazione danneggiata.

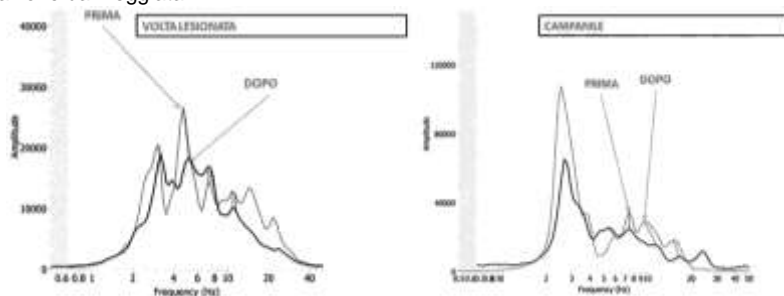


Figura 4. Frequenze sperimentali pre e post consolidamento sulla volta e sul campanile

La ripetizione delle misure ha individuato uno shift delle frequenze verso valori più alti, in particolar modo nelle volte consolidate, come evidenziato nel grafico sottostante. Da questo ultimo si evince inoltre il mantenimento della forma spettrale pre e post consolidamento, che consentirà ulteriori approfondimenti sul significato dei rapporti tra i vari picchi.

Lo shift registrato sul campanile evidenzia invece come la variazione principale non sia sulla prima frequenza, ma su quelle successive più alte. Va sottolineato che le prove dinamiche qui riportate sono state condotte in una fase di cantiere che ancora non comprendeva l'intervento di rinforzo sul campanile. E' tuttavia plausibile ipotizzare che una eventuale ripetizione delle prove ad intervento completo avrebbe fornito valori di frequenze più elevate anche per le prime frequenze.

La tabella 2 riporta i risultati sperimentali e numerici in cui conferma lo scarto ridotto tra i due dati.

L'aspetto promettente di tale tecnica è il suo utilizzo per studiare le variazioni delle frequenze pre e post intervento oppure (guardandolo al contrario) pre o post danneggiamento.

In pratica, il posizionamento di sensori con la possibilità di misure ripetute nel tempo potrebbe evidenziare sia la riuscita di determinati interventi, sia segnalare un decadimento della struttura (ad esempio usandolo per verifica post sisma). L'obiettivo è di determinare una sorta di "impronta microsismica" del manufatto.

	Asse longitudinale				Asse trasversale			
	Frequenza [Hz] sperimentale		Frequenza [Hz] numerica		Frequenza [Hz] sperimentale		Frequenza [Hz] numerica	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
Campanile	3	3,3	3,5	3,6	2,5	2,6	2,9	3,0
Volte	4,0	4,5	4,5	4,6	4,8	5,2	5,6	5,8

Tabella 2. Frequenze sperimentali e numeriche Pre e Post intervento di consolidamento

Due aspetti importanti, non sempre compatibili tra di loro, riguardano la riproducibilità delle misure nel tempo e l'economicità del sistema. A tale scopo, dopo i dati incoraggianti derivanti dallo studio del Duomo di Colorno, si stanno apportando alcune modifiche alla metodologia di misura. La prima è l'introduzione di un "caposaldo microsismico", cioè di una piastra metallica che rimane fissata alla struttura e permette una riproducibilità esatta della misura nel tempo connettendo i sensori con appositi alloggi filettati. Ovviamente la soluzione ottimale sarebbe stata quella di lasciare fissi i sensori nel tempo, sebbene presenti la controindicazione di costi elevati dovuti all'utilizzo di sensori di elevata qualità che possano essere sottoposti a periodici controlli di calibratura.

E' in corso di valutazione l'impiego di sistemi low cost di minor sensibilità per intercettare eventuali scosse sismiche ed individuare la risposta della struttura monitorata nel tempo. Tale scelta potrà costituire un buon compromesso tra economicità e informazioni registrate.

In fine, un'ulteriore evoluzione del sistema originariamente utilizzato sul Duomo di Colorno consisterà nel miglioramento della sincronizzazione della stazione di base rispetto a quella mobile, nonché un più sofisticato trattamento matematico dei segnali.

Auspichiamo che approcci come quelli seguiti per il Duomo di Colorno possano essere strumento utile al professionista nella valutazione di vulnerabilità sismica del patrimonio storico e nella individuazione di interventi di consolidamento realmente necessari ed efficaci.

NOTE

Committente: Parrocchia di Santa Margherita – Colorno (PR) ; Progettista delle strutture: prof. Ing. Lorenzo Jurina
 Progettista Architettonico e DL: Arch. Artemio Canali; DL delle strutture: ing. Cesare Finardi
 Diagnostica: geol. Giovanni Michiara – Geofaber; Impresa esecutrice: Ediltor s.r.l. – Torrile (PR)
 Importo Lavori: € 1.065.471 Durata dei lavori: 508 giorni

BIBLIOGRAFIA

- Jurina, L., Mantegazza, G., Radaelli, E.O.. (2014) *FRCM - Strengthening of masonry vaults: the "Duomo Colorno" and "Braidense Library" cases in Italy*. In *Mechanics of Masonry Structures Strengthened with Composite Materials (AICO) 4th seminar MURICO 2014, 9-11 Settembre 2014, Ravenna: Trans Tech Publications.*
- Jurina, L., et.al. (2012) *Interventi di consolidamento statico e sismico del Duomo di Cremona*. In *Cattedrale di Cremona. I restauri degli ultimi vent'anni (1992-2011)*, 295-303, Milano: SKIRA
- Fiaschi, A., et.al. (2012) *Microtremor analysis of the Basilica of the Holy Sepulchre, Jerusalem*. In *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 41, 14-22.
- Gosar A. (2012) *Determination of masonry building fundamental frequencies in 5 Slovenian towns by microtremor excitation and applications for seismic risk assessment*. In *Nat. Haz.*, 62, 1059-1079.
<http://www.jurina.it>