

Indagini soniche su edifici colpiti da eventi sismici. Lombardia 2004 Sisma Salò applicazioni, su edifici di culto elaborazioni convenzionali e sviluppi sperimentali

Sergio Lagomarsino*, Giovanni Dondero L.P.°, Gerolamo Stagno# - Mari Biasin **.
Tecnica Costruzioni. DICAT Univ.tà di Genova; **Studio di Architettura Biasin,
Brescia; °RINA Genova; #Studio Tecnico Diagnostico Genova

SOMMARIO

Le indagini soniche sulle murature sono una delle tecniche non distruttive inserite nell'Allegato tecnico delle Ordinanze della Presidenza del Consiglio dei Ministri per la determinazione di parametri meccanici delle murature prima di applicare metodologie conoscitive più invasive come la tecnica dei martinetti piatti.

Gli edifici soggetti a vincolo di tutela ai sensi del Codice dei Beni Culturali Testo Unico DLGS. 490 impongono un approccio conservativo per la conoscenza delle murature e limiti operativi anche in termini di applicazioni delle tecniche di indagine sonora già di per se conservative nei confronti dell'esistente.

Il caso in esame rappresenta una situazione esemplificativa delle problematiche di cui sopra.

Nell'applicazione delle indagini soniche si è proceduto per via convenzionale secondo i metodi per tangenza e per trasparenza, i limiti imposti dalla presenza di elementi dipinti sulle pareti e degli intonaci storici hanno richiesto la sperimentazione di tecniche soniche particolari al fine di contenere demolizioni significative.

I risultati elaborati secondo tali tecniche hanno comunque permesso di ottenere valori attendibili pur se ricavati da metodi non convenzionali.

A seguito dell'evento sismico del 24 Novembre 2004 che ha colpito una vasta area della Lombardia orientale e di regioni confinanti con epicentro in Salò sono state emanate relative OPCM : n.3385 del 10.12.2004 che seguiva la OPCM n. 3274 del 20.03.2005 , e del Commissario Delegato per l'emergenza sismica n.n. 36 del 21.03.2005 e n. 149 del 08.06.2005.

Gli allegati tecnici in particolare la scheda riassuntiva per la stesura di progetti esecutivi per edifici di interesse culturale suddivisa in 17 punti , riporta al punto 5) il capitolo Esiti diagnostici sul campo e in laboratorio richiede per la fase conoscitiva anche la determinazione di parametri chimico-fisici e meccanici delle strutture e l'indicazione su grafici schematici dei punti di esecuzione di prove /sondaggi.

Su tale richiesta sono state svolte attività specifiche diagnostiche su circa 20 chiese poste nell'area epicentrica del sisma.

CHIESA	TIPOLOGIA INDAGINI
Parrocchiale dei Santi Faustino e Giovita – Botticino Mattina	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – verifica ammorsamenti murari - carotaggi – videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte
Oratorio San Lorenzo di Clibbio	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – carotaggi – videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte – indagini su elementi lignei copertura (analisi del degrado - sclerometrie – resistografie)
Chiesa di Santa Maria Nascente – Gardone Sotto	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) - Videoendoscopie
Chiesa dei Santi Faustino e Giovita – Monte Maderno	Videoendoscopie - analisi spettrofotometrica e granulometrica malte - indagini su elementi lignei copertura (analisi del degrado - sclerometrie – resistografie - umidità)
Canonica di Pompegnino	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – carotaggi – videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte – indagini su elementi lignei copertura (analisi del degrado - sclerometrie)
Chiesa di San Pietro e Paolo - Preseglie	Videoendoscopie – verifica ammorsamenti murari - analisi spettrofotometrica e granulometrica malte
Chiesa della Madonna della Rocca in Vobarno	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – verifica ammorsamenti murari - videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte
Chiesa della Rocca di Sabbio Chiese	Videoendoscopie - verifica ammorsamenti murari – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte - indagini su elementi lignei (analisi del degrado - sclerometrie – resistografie)
Chiesa di San Bartolomeo in Toscolano Maderno	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – verifica ammorsamenti murari - videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte
Chiesa di San Faustino - Bione	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – verifica ammorsamenti murari - videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte
Chiesa di San Lorenzo in Sabbio Chiese - Clibbio	Videoendoscopie – verifica ammorsamenti murari - analisi spettrofotometrica e granulometrica malte
Chiesa di San Michele Arcangelo in Val di Sur	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte – indagini su elementi lignei

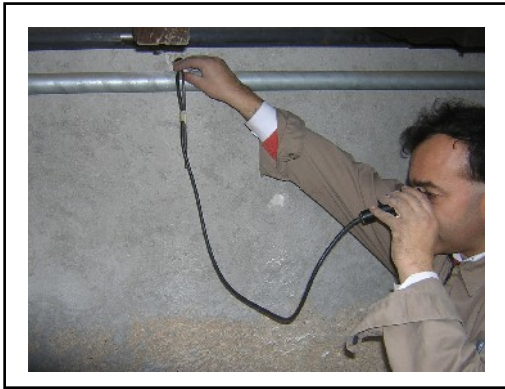
CHIESA	TIPOLOGIA INDAGINI
Chiesa Parrocchiale di San Nicola in Gardone Riviera	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte – indagini su elementi lignei copertura (analisi del degrado - sclerometrie – resistografie)
Chiesa di San Rocco in Vobarno	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) - carotaggi – videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte
Chiesa dei SS. Vigilio e Gregorio Magno - Concesio	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte
Chiesa Parrocchiale di Santa Maria Assunta in Vobarno	Indagini su elementi lignei (analisi del degrado - sclerometrie – resistografie - umidità)
Chiesa di Sant’Andrea – Toscolano Maderno	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte
Chiesa dei Santi Cornelio e Cipriano - Teglie	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – carotaggi – videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte - Indagini su elementi lignei copertura (analisi del degrado – sclerometrie)
Chiesa di San Martino in Tresnico	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte
Chiesa dei SS.. Vito, Modesto e Crescenza - Bedizzole	Videoendoscopie
Chiesa di Santa Margherita di Scozia – Carpeneda di Vobarno	Indagini alle murature (soniche - sclerometrie) – carotaggi – videoendoscopie – analisi spettrofotometrica e granulometrica malte - Indagini su elementi lignei copertura (analisi del degrado – sclerometrie - resistografie)

Il progetto diagnostico stabilito di concerto con i progettisti dei singoli interventi ha richiesto la definizione di accertamenti parzialmente distruttivi e non distruttivi.

Successivamente sottoposto agli organi di Tutela Sovrintendenza Regionale ai Beni Culturali della Lombardia , ed al Centro Operativo Misto di Brescia l’indagine prevedeva la determinazione a campione di elementi conoscitivi per la stesura del progetto di riparazione e miglioramento sismico.

In particolare per la parte diagnostica sono state eseguite a campione:

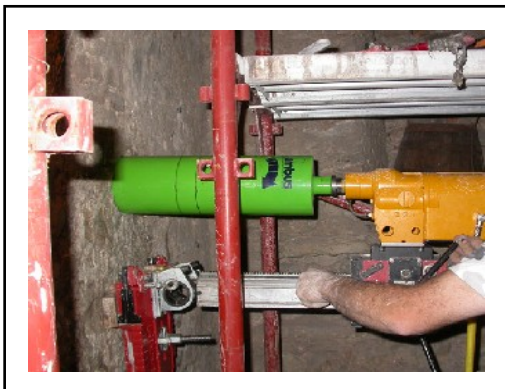
- per le murature
- indagini videoendoscopiche da eseguirsi per la determinazione delle stratigrafie orizzontali delle murature (sezione muraria).



- prove soniche eseguite su pannelli murari privi d'intonaco combinate con battute sclerometriche su malta per l'identificazione di parametri meccanici delle murature



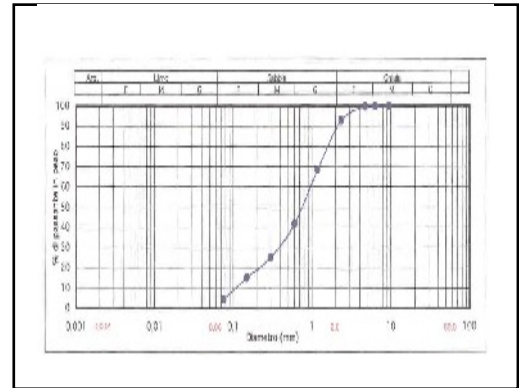
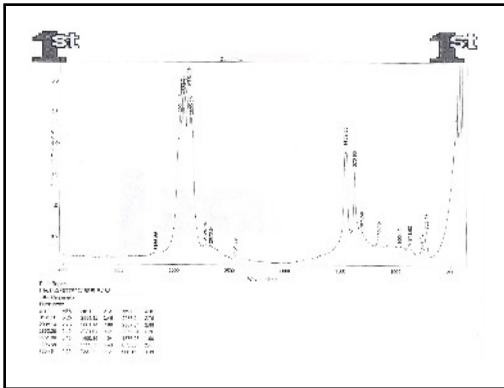
- carotaggi per prove a compressione sulle murature



- verifica del grado di ammorsamento tra le murature con microscassi



- analisi di laboratorio su prelievi di malte per analisi chimica per spettrofotometrie IFIR e analisi granulometrica per verificare lo stato di degrado del materiale sia su malte che su materiale lapideo che mattoni.



•Sulle parti lignee


- previa ispezione visiva secondo il metodo del prof Giordano oggi recepito alla UNI 11119; le raccomandazioni successiva applicazione di indagine resistografica, sclerometriche, dell'umidità per determinare lo spessore e le caratteristiche in opera del legname strutturale.



L'operare su edifici soggetti a vincolo monumentale ha richiesto di eseguire le indagini in punti poco evidenti anche se efficaci per la conoscenza dei dati necessari. La presenza di superfici dipinte, di arredi sacri mobili ha portato talvolta a modificare la posizione dei punti di accertamento ed in particolare i carotaggi. Dalle murature è apparso comunque difficoltoso estrarre campioni murari cilindrici (carote) significativi per le prove in laboratorio, ciò ha portato ad aumentare il numero delle altre tipologie di indagine elencate meno invasive. In particolare le indagini soniche da eseguirsi per trasparenza hanno posto in essere il problema dell'asportazione di superfici intonacate anche se non interessate da dipinti o affreschi per visionare la muratura da ambo i lati. Al fine di evitare questi interventi che, se pur autorizzati, prevedevano asportazione di superfici di intonaci storici si è proceduto all'elaborazione di un metodologia sperimentale per giungere a formulare parametri meccanici e criteri di giudizio qualitativo sulle murature.

La valutazione dell'efficacia e dell'omogeneità di parametri quali: tessitura muraria, sezione muraria (vedi indagini videoendoscopiche) e grado di ammorsamento alle intersezioni tra le pareti verticali consentono di esprimere un giudizio qualitativo su tipo, organizzazione e qualità del sistema resistente ossia ad esprimere una valutazione sul grado di funzionamento scatolare dell'organismo murario in accordo con la compilazione della scheda di II livello GNDT.

Per accertare in maniera oggettiva a mezzo di esame visivo la tessitura muraria è stata utilizzata una scheda di valutazione qualitativa dei parametri che caratterizzano l'apparecchiatura muraria, come quella di seguito riportata a titolo di esempio.

VALUTAZIONE QUALITA' MURARIA					
Committente:			Manufatto:		
Codice identificativo	Maschio 1	Dimensioni scrostamento		Piano n°	
		paramento faccia a vista		seminterrato	
Ruolo strutturale (muro perimetrale, di spina, interno): Muro di spina					
Orizzontalità dei filari (OR)			Qualità della malta (MA)		
Rispettata	2		Malta idraulica in buono stato	1	x
Parzialmente rispettata	1	x	Malta a base di calce in buono stato	0.5	
Non rispettata	0		Malta scadente	0	
Forma e dimensione elementi (FD)			INDICE QUALITA' MURARIA		7
Regolari - Grandi	2				
Regolari - Medie	1.5		NOTE		
Parzialmente regolari - Medio piccole	1	x	Presenza di zeppe, muratura listata (ricorsi in mattoni)		
Irregolari - Medio piccole	0.5				
Irregolari - Piccole	0				
Elementi ortogonali al piano della muratura "diatoni" (PD)					
Presenti (muratura a una testa)	3				
Parzialmente presenti	1.5	x			
Non presenti	0				
Sfalsamento giunti verticali (SG)					
Rispettata	2				
Parzialmente rispettata	1	x			
Non rispettata	0				

Le informazioni ottenute con tale procedura consentono la valutazione della qualità muraria attraverso un valore numerico che prende il nome di indice di qualità muraria (I.Q.) che sostanzialmente fa riferimento a tre soglie di punteggio (vedi Tabella) riferite:

- al rispetto della regola dell'arte (categoria A);
- al parziale rispetto della regola dell'arte (categoria B);
- all'assenza della regola dell'arte (categoria C)

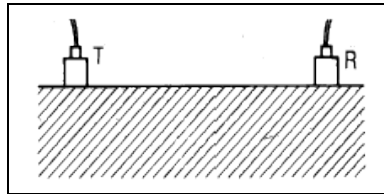
Categoria	Punteggio [I.Q.]
A	$8 \leq I.Q. \leq 10$
B	$4 < I.Q. < 8$

$$\boxed{C} \quad \boxed{0 \leq I.Q. \leq 4}$$

In merito all'interpretazione dei risultati ottenuti dalle prove soniche indirette si presenta una trattazione a carattere sperimentale per la valutazione del modulo elastico dinamico E_d della muratura. La tecnica di indagine sonica, come noto in letteratura, si basa sulla generazione di onde elastiche in un punto della struttura; la velocità di propagazione delle onde elastiche, in un mezzo elastico, omogeneo ed isotropo, è direttamente correlabile alla densità ρ ed al modulo elastico dinamico E_d , attraverso la nota relazione:

$$E_d = v^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Il tecnica indiretta o “di superficie”, prevede l'utilizzo delle sonde (emettitore e ricevitore) disposti sullo stesso lato.



La prova indiretta può essere descritta con le seguenti modalità:

- Individuazione sul pannello murario di una geometria quadrata di lato 60 cm.
- Tracciamento, su tale superficie, di un reticolo di punti (vedi figura) a distanza di 20 cm così da individuare una mesh quadrata anch'essa di lato 20 cm



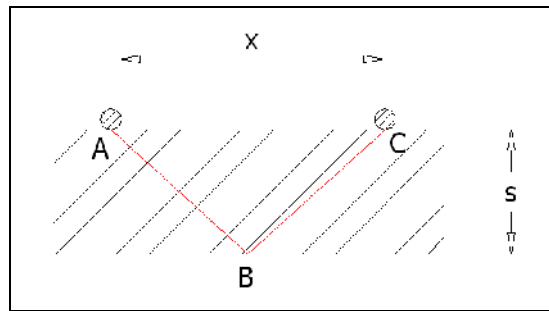
- Lettura delle misure di velocità con step 20 cm in direzione verticale (direzione di carico): posizionare, ad esempio il sensore di ricezione nel punto 5 e colpire con il martello strumentato sul punto 1. Analogamente si procede con step di misura rispettivamente a 40 e 60 cm.

La presenza di discontinuità, associata a fenomeni di rifrazione e riflessione dell'onda, nonché alla lunghezza d'onda della frequenza dominante fa sì che la muratura si discosti dal comportamento ideale. Tutti questi aspetti conducono alla valutazione dei risultati principalmente in termini di caratteristiche qualitative e non quantitative della muratura. Nonostante ciò sono stati condotti interessanti ricerche nel tentativo di correlare le caratteristiche meccaniche dei materiali con i parametri sonici di velocità. Tale approfondimento nasce dalla valutazione di numerosi aspetti ed in particolare dal fatto che i dati di velocità “superficiale” (prova indiretta), relativi a murature che, l'analisi

qualitativa, ha classificato quantomeno di Categoria B, evidenziano valori di velocità troppo bassi se rapportati alle proprietà elastiche ordinarie del mezzo.

Ciò evidenzia che il percorso compiuto dall'onda elastica, con ogni probabilità, non copre la distanza diretta che collega i due trasduttori, ma compie un tragitto più lungo, determinando tempi superiori di percorrenza rispetto a quelli delle condizioni ideali di propagazione. Pertanto, l'onda di primo arrivo alla stazione ricevente, non sarà quella caratterizzata dal percorso tangenziale, bensì quella di un'onda di compressione riflessa sulla prima superficie di discontinuità del mezzo, più veloce, pur compiendo un percorso maggiore. Un ulteriore aspetto che ha contribuito a definire quanto sotto illustrato è rappresentato dalla constatazione che mediamente si riscontra un aumento della velocità di percorrenza con l'aumentare della distanza tra le sonde, a conferma che l'errore commesso in termini di percorso compiuto dell'onda diminuisce con l'aumentare della distanza. Molto semplicemente si è adottato lo schema riportato in figura per descrivere univocamente il percorso compiuto dall'onda all'interno del mezzo, il rapporto:

$$\frac{AB + BC}{AC} \quad \text{tende asintoticamente a 1 dato lo spessore } s \text{ costante.}$$



L'analisi viene sviluppata in termini delle grandezze fisiche in gioco, ossia:

- s : spessore della prima discontinuità muraria su cui avviene la riflessione dell'onda;
- V_{∞} : rappresenta la velocità asintotica, ossia la velocità attesa della muratura;
- definendo x la distanza tra le sonde di misura;

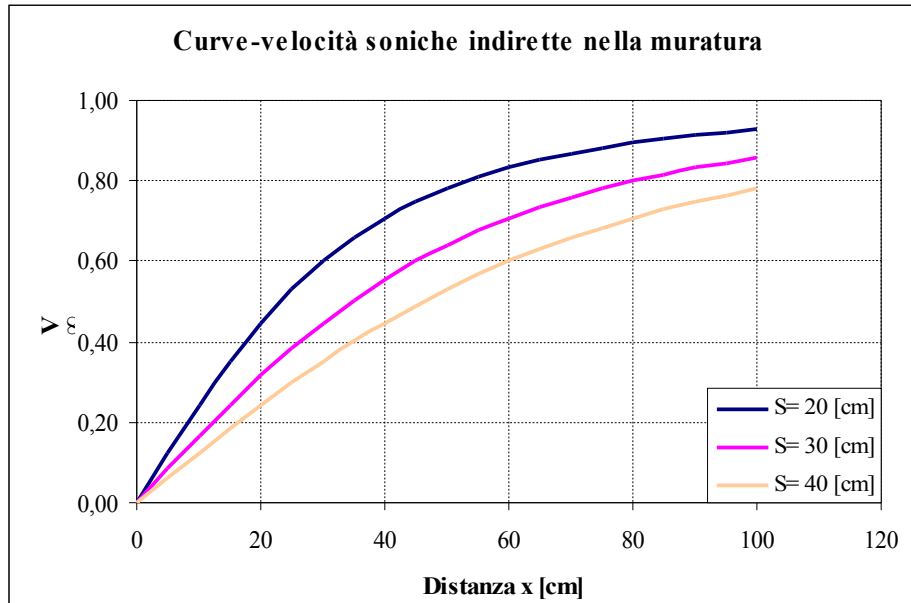
Detto questo si procede ad una semplice analisi analitica, assumendo una legge lineare di velocità, per ottenere l'incognita del problema: ossia V_{∞} .

A questo punto per avere un riscontro diretto della distribuzione di velocità nel mezzo, definita V_i la velocità media in direzione verticale, rilevata per una distanza tra le sonde pari a X_i si definisce la funzione di velocità espressa come:

$$V_i = \frac{V_{\infty}}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot s^2}{X_i^2}}}$$

Tale espressione consente, assunta una velocità asintotica di riferimento (esempio $V_{\infty} = 1000$ m/s) e variando lo spessore della discontinuità muraria, ad esempio 20-30-40 cm, di tracciare degli esempi relativi alle curve di distribuzione della velocità nel mezzo.

Queste curve consentono di conseguire un'analisi qualitativa immediata dell'andamento della velocità all'interno del mezzo inoltre permettono di verificare quali sono le distanze di misura significative da assumere nella prova in situ (distanza tra le sonde).



Curve- distribuzione velocità sonica nella muratura al variare dello spessore della discontinuità muraria su cui avviene la riflessione dell'onda, per velocità asintotica $V_{\infty}=1000$ m/s.

In seconda analisi si procede agli sviluppi analitici per ottenere l'incognita del problema (V_{∞}); in particolare definite V_1 e V_2 rispettivamente le velocità rilevate a distanza tra le sonde pari a X_1 e X_2 la funzione di velocità assume la seguente forma:

$$V_{\infty} = V_1 \cdot V_2 \cdot \sqrt{\frac{X_2^2 - X_1^2}{V_1^2 \cdot X_2^2 - V_2^2 \cdot X_1^2}}$$

Il problema analitico così impostato ha un'immediata applicazione sui dati elaborati dall'indagine in situ; in particolare nello schema di prova utilizzato i dati sopra definiti assumono il seguente significato:

- V_i : velocità media verticale ottenuta a distanza X_i che, nel caso delle indagini eseguite sugli edifici in muratura trattati, assume valori pari a 20,40,60 centimetri.

In conclusione l'analisi condotta ha consentito la messa a punto di un metodo sperimentale che permette di interpretare ed elaborare i dati ottenuti dalle prove soniche indirette che di fatto acquisiscono una certa valenza e attendibilità anche per la stima dei parametri meccanici della muratura (E_d).

A titolo di esempio si riportano i risultati ottenuti su alcune prove nelle chiese indagate.

Codice elemento		D	V medie,vert.	X1; X2	X1; X3	X2; X3	$V_{8,medio}$ [m/s]	E
		[cm]	[m/s]	V_8 [m/s]	V_8 [m/s]	V_8 [m/s]		[N/mm ²]
S1	X_1	20	398	777	755	676	736	1072
	X_2	40	595					
	X_3	60	665					
S2	X_1	20	389	983	1715	1009	1362	3673
	X_2	40	825					
	X_3	60	983					
S3	X_1	20	468	983	4594	1627	1627	5241
	X_2	40	723					
	X_3	60	1350					
S4	X_1	20	262	542	1569	829	980	1901
	X_2	40	401					
	X_3	60	710					

Riferimenti bibliografici

- 1) Ordinanza Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274, 20/03/2003 “*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*”.
- 2) OPCM 3431. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 3 maggio 2005 “*Ulteriori modifiche ed integrazioni all’ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003*”, G.U. 10/5/2005.
- 3) D.M. 14 Settembre 2005 “*Norme tecniche per le costruzioni*”.
- 4) D.M. 20 Novembre 1987, “*Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il consolidamento*”.
- 5) Testo integrato dell’Allegato 2 – Edifici – all’Ordinanza 3274 come modificato dall’OPCM3431 del 3/5/2005 “*Norme Tecniche per il progetto, la valutazione e l’adeguamento sismico degli edifici*”.
- 6) Regione Molise, CNR, “*Studio per la vulnerabilità sismica degli edifici pubblici strategici e di culto nei Comuni colpiti dal sisma del 31 ottobre 2002*”, Supervisione scientifica: Prof. Ing. S. Lagomarsino – DISEG - Università di Genova, 2003.
- 7) Regione Toscana, “*Programma regionale vulnerabilità sismica di edifici in muratura (VSM)*”, 2004.
- 8) Regione Toscana, “*Rilevamento della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura*”, 2003.
- 9) Regione Umbria, “*Recupero Edilizio e prevenzione sismica*” DEI - Tipografia del Genio Civile, 2004.
- 10) Regione Umbria, “*Manuale del recupero strutturale antisismico*” DEI - Tipografia del Genio Civile, 2004.
- 11) M. Acanfora, G. Fabbroncino, G. Voltaggio, “*La diagnostica strutturale a supporto della prevenzione sismica: l’intervento dimostratore del progetto RESIS*”, in Atti Convegno AIPnD, Milano 2005.
- 12) Atti del Convegno “*L’Ingegneria sismica in Italia*”, XI Convegno Nazionale ANIDIS di Ingegneria Sismica, Genova, 2004.
- 13) Atti del Convegno “*Sicurezza del costruito in muratura in zona sismica*”, DISEG, Novi L., 2003.
- 14) L. Binda, A. Saisi, “*Il ruolo delle indagini nella diagnostica strutturale*”, Dis, Milano, 1999.
- 15) G. Concu, M. Valdes, “*Applicazione di metodi sonici nel monitoraggio delle murature in pietra della Cattedrale di Cagliari*”, in Atti Convegno AIPnD, Milano 2005.
- 16) M. Dolce, A. Masi “*Linee guida per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici strategici e rilevanti*”, Regione Basilicata – CRIS ,2005.
- 17) F. Iacobelli “*Progetto di verifica delle costruzioni in muratura in zona sismica*”, EPC LIBRI, 2005.
- 18) F. Iacobelli “*Calcolo degli edifici in muratura in zona sismica*”, EPC LIBRI, 2004.
- 19) L. Santoro “*Verifiche tecniche di edifici in zona sismica*”, Dario Flaccovio Editore, 2005.