

## LA METODOLOGIA SMAV PER LA VALUTAZIONE SPEDITIVA DELL'OPERATIVITÀ STRUTTURALE DEGLI EDIFICI STRATEGICI

F. Mori<sup>1</sup>, D. Spina<sup>2</sup>, G. Acunzo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CNR-IGAG, Roma

<sup>2</sup> Dipartimento della Protezione Civile, Roma

**Premessa.** Con l'applicazione dell'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) in molti comuni, sono emerse le prime esigenze di predisposizione di metodi e procedure finalizzati a ottimizzare i percorsi valutativi dei sistemi di gestione dell'emergenza. Fra questi, con maggiore urgenza, ricadono quelli volti a valutare le priorità di intervento per la messa in sicurezza degli edifici strategici.

Infatti, da una prima analisi sulle verifiche degli edifici strategici avviata a seguito dell'emanazione dell'OPCM 3274/2003 emerge che, il patrimonio sul quale intervenire è decisamente cospicuo (circa 40.000 edifici rilevati ai quali aggiungerne ulteriori 20.000, stimati, ancora da rilevare). Tale patrimonio include tutto ciò che viene definito all'interno del Decreto del Capo Dipartimento della protezione civile del 21 ottobre 2003, n. 3685 e, quindi, tutto ciò che "assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile" e non solo per la gestione dell'emergenza.

E' evidente che su tali numeri, rilevamenti di maggior dettaglio, anche solo finalizzati a formare graduatorie e priorità di intervento, possono diventare complessi e con costi proibitivi, a meno di ulteriori selezioni in termini di funzioni.

Con la metodologia dell'analisi della CLE (versione 2.0)<sup>1</sup> viene introdotta una codifica specifica per tre edifici strategici ritenuti fondamentali per il sistema di gestione dell'emergenza: il coordinamento degli interventi, il soccorso sanitario e l'intervento operativo. Ciò in coerenza con l'obiettivo di fondo dell'analisi della CLE: analizzare il più generale sistema strategico di protezione civile per i soli aspetti specifici riguardanti la gestione dell'emergenza, a partire da quanto definito e riportato nel piano di protezione civile.

Nell'ambito delle attività di supporto e monitoraggio alla MS e alla CLE da parte del Dipartimento di protezione civile in accordo con il CNR-IGAG, si adotta questa selezione di edifici come sottoinsieme prioritario su cui applicare una metodologia speditiva per valutare l'operatività strutturale. L'obiettivo generale è, quindi, quello di avere una graduatoria per gli edifici strategici finalizzati alla gestione dell'emergenza, tali da costituire una rete territoriale a copertura nazionale, possibilmente tenendo conto di bacini di utenza oltre una certa soglia dimensionale (per questo vengono incentivate analisi per Unioni di comuni), al fine di evitare squilibri e sprechi di risorse.

Nel predisporre la metodologia si è tenuto conto della semplicità applicativa, della modularità e della standardizzazione della procedura, al fine di poterla estendere in diversi contesti e consentire la sua applicazione anche da parte di strutture tecniche regionali, pur mantenendo la confrontabilità su scala nazionale.

Nel capitolo 1 vengono descritti gli obiettivi e lo schema procedurale.

Nel capitolo 2 vengono descritte in dettaglio la metodologia e le fasi operative.

Nel capitolo 3 vengono descritte alcune specifiche sulle modalità esecutive delle misure di vibrazione sull'edificio. Infine sono riportati due esempi di validazione della metodologia con dati sperimentali, un confronto con una valutazione di vulnerabilità sismica condotta nel rispetto delle NTC08 e due esempi applicativi a due edifici strategici facenti parte della CLE di Faenza.

Tutto ciò rappresenta lo sviluppo di quanto contenuto in "Un metodo sperimentale per la valutazione dell'operatività di un edificio strategico che tenga conto della risposta sismica locale" di Spina *et al.* (2013).

<sup>1</sup> [http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/standard\\_analisi\\_cle.wp](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/standard_analisi_cle.wp)

**Obiettivi.** La presente metodologia viene applicata per la mitigazione del rischio sismico nell'ambito dell'analisi della Condizione Limite dell'Emergenza (CLE) e degli studi di Microzonazione Sismica (MS) attualmente in corso di realizzazione in Italia.

Gli edifici strategici selezionati per l'applicazione saranno quelli riferiti alle tre funzioni fondamentali:

- coordinamento degli interventi
- soccorso sanitario
- intervento operativo.

Obiettivo della metodologia è di valutare l'operatività strutturale degli edifici strategici che fanno parte del sistema di gestione dell'emergenza al fine di definire le priorità di intervento per il miglioramento o l'adeguamento sismico.

La metodologia proposta si fonda sull'identificazione delle specifiche proprietà dinamiche dell'edificio e del terreno di fondazione tramite misure di vibrazioni prodotte da sorgenti ambientali.

I parametri modali sono estratti dalle misure utilizzando la tecnica nota come *Operational Modal Analysis* (OMA).

Un modello matematico spaziale dell'edificio che prevede la riproduzione della cinematica di piano secondo una suddivisione ideale della planimetria in rettangoli a comportamento rigido e massa concentrata, permette di eseguire un'analisi lineare dinamica come prevista al 7.3.3.1 delle NTC08 al fine di prevedere la risposta sismica dell'edificio e determinare l'Indice di Operatività strutturale (IOPS).

Le attività si sviluppano in 3 fasi:

- misure sperimentali *in situ* sul terreno di fondazione e sull'edificio (Fase I);
- previsione della risposta sismica dell'edificio con modello matematico (Fase II);
- individuazione dell'Indice di operatività strutturale dell'edificio (IOPS) e della Classe di Operatività Strutturale (COPS) (Fase III).

**La metodologia SMAV** (*Seismic Model from Ambient Vibrations*). La prima fase prevede le misure sperimentali in situ sul terreno di fondazione e sull'edificio. Per le misure di rumore sul terreno viene utilizzato un sensore velocimetrico a tre componenti a bassa frequenza propria, che consente di investigare con accuratezza l'intervallo di frequenza 0,2-30 Hz. Tale intervallo contiene ampiamente i valori di frequenza di interesse ingegneristico.

Le misure vengono effettuate intorno all'edificio, in numero sufficiente a coprire l'intero perimetro, in condizioni *free field* e tenendosi, se possibile, ad una distanza dall'edificio pari almeno alla sua altezza.

Per quanto riguarda le misure di rumore ambientale sull'edificio potranno essere utilizzati i sensori velocimetrici del tipo già descritti, oppure accelerometri. Se si utilizzano accelerometri essi potranno essere sia di tipo "force-balance" che piezoelettrici o capacitivi, con fondo scala non superiore a 2.0 g e dinamica uguale o superiore a 140 dB nell'intervallo 0.5- 20 Hz a cui corrisponde un potere di risoluzione almeno pari a 2  $\mu$ g. In ogni caso il sistema di misura dovrà essere dotato di convertitore Analogico-Digitale a 24 bit o superiore.

L'architettura del sistema di misura dell'edificio è semplice, in quanto costituita da almeno due terne accelerometriche per ogni rettangolo in cui è idealmente suddivisa la pianta dell'edificio disposte negli angoli di estremità dei suddetti rettangoli.

Le misure dovranno essere eseguite su tutti gli impalcati della struttura registrando le vibrazioni nelle due direzioni principali dell'edificio (X e Y) in almeno due punti per ogni rettangolo in cui è stata suddivisa la pianta. La disposizione sarà mantenuta se possibile inalterata per tutti gli impalcati a meno di significative variazioni della pianta lungo l'altezza. I sensori potranno essere semplicemente appoggiati, se dotati di sufficiente massa e di opportune basi di appoggio, oppure fissati alla struttura mediante incollaggio o unione di tipo meccanico.

Non è necessario eseguire le misure relative a tutti gli impalcati contemporaneamente, ma si potranno effettuare più registrazioni in diverse configurazioni, purché in tutte le configurazioni

i sensori di almeno un impalcato (possibilmente quello al livello più elevato) siano sempre presenti.

Per ciascuna configurazione i dati relativi ai diversi punti di misura dovranno essere sincronizzati o attraverso un collegamento via cavo ad un'unica centralina di conversione A/D e acquisizione, o attraverso il tempo assoluto GPS associato a ciascun segnale.

Si effettuerà almeno una registrazione di rumore ambientale per ciascuna configurazione della durata non inferiore a 1800 s e con una frequenza di campionamento uguale o superiore a 100 Hz.

La *seconda fase* consiste nella previsione della risposta sismica dell'edificio strategico previa definizione dell'input sismico sotto forma di spettro di risposta.

Se l'edificio in esame è situato in un centro abitato nel quale è stato condotto uno studio di microzonazione sismica di livello MS2 o MS3, è possibile utilizzare lo spettro di risposta che caratterizza la microzona nella quale è costruito l'edificio stesso.

Se la microzonazione sismica non è disponibile, si effettua un'analisi di risposta sismica locale sulla base di un modello di sottosuolo monodimensionale definito con parametri geologici e geofisici. La validazione di tale modello avviene attraverso i dati ricavati dalle misure sul terreno.

La previsione della risposta sismica dell'edificio avviene con l'identificazione dei parametri modal sperimentali della struttura e con un modello matematico.

Le deformate modali globali dell'edificio vengono ricostruite a partire dalle singole configurazioni parziali, grazie al riferimento degli accelerometri fissi.

L'affidabilità dei parametri sperimentali è valutata attraverso una serie di indici. Sulla base di tali indicazioni le deformate modali possono essere corrette in modo da migliorare il modello matematico.

Il modello matematico dell'edificio è basato sull'ipotesi di piano suddiviso idealmente in rettangoli a comportamento rigido e massa concentrata assicurando comunque la congruenza degli spostamenti nei punti comuni a più rettangoli. La matrice di massa è costruita sulla base della geometria planimetrica dei rettangoli costituenti idealmente la pianta ai diversi impalcati e della distribuzione delle murature/tamponature.

I coefficienti di partecipazione e le masse modali sono calcolati a partire dalla matrice di massa e dalle deformate sperimentali definite in termini di traslazioni e rotazioni dei rettangoli.

Il modello matematico sviluppato consente di ricostruire la fisica spaziale dell'edificio in termini di accelerazioni e spostamenti controllando le percentuali di massa partecipante nelle due direzioni principali e l'eventuale errore introdotto dall'ipotesi cinematica assunta.

La *terza fase* prevede la valutazione dell'operatività strutturale dell'edificio strategico.

Il requisito prestazionale imposto all'edificio strategico a seguito del terremoto è quello dell'operatività strutturale corrispondente allo Stato Limite di Danno SLD, ovvero "la costruzione nel suo complesso subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature."

La valutazione dell'operatività strutturale viene condotta in relazione a due tipi di evento di diversa severità:

1. evento con  $T=475$  anni, caratterizzato da una probabilità di superamento del 10% in 475 anni (si assume una classe d'uso II);
2. evento con  $T=101$  anni, caratterizzato da una probabilità di superamento del 63% in 101 anni (si assume una classe d'uso IV).

La valutazione legata all'evento 1. scaturisce dalla definizione della CLE dove viene specificato che l'edificio strategico deve rimanere operativo a fronte dell'interruzione delle funzioni residenziali (per tale motivo si assume che l'edificio strategico abbia la stessa vita nominale degli edifici residenziali).

La valutazione legata all’evento 2. risponde invece a quanto prescritto da NTC08 per la verifica di edifici strategici allo SLD.

Come previsto nella pratica ingegneristica, per la valutazione relativa all’evento 1. si utilizza come input sismico lo spettro di risposta anelastico mentre per la valutazione relativa all’evento 2. lo spettro di risposta elastico. Per quanto riguarda lo spettro di risposta anelastico si assume una duttilità pari a 3. Nel caso di MS3 o risposta sismica locale si opera direttamente con lo spettro di risposta in spostamento ottenuto come media degli spettri anelastici in spostamento a duttilità costante del set di accelerogrammi in superficie fornito, mentre nel caso di analisi di normativa si opera con lo spettro di risposta di progetto in accelerazione assumendo fattore di struttura pari a 2,25 e valutando gli spostamenti secondo 7.3.3.3 di NTC08.

**L’indice di Operatività strutturale (IOPS) e la Classe di Operatività Strutturale (COPS).** Il risultato finale è fornito in termini di un Indice di Operatività Strutturale (IOPS) per i due eventi sopra riportati e di una Classe di Operatività Strutturale (COPS).

L’Indice di Operatività Strutturale (*IOPS*) è definito come il rapporto tra un valore soglia di drift di piano IDR che segna il raggiungimento della condizione di danno accettata ed il massimo drift di piano calcolato da SMAV.

$$IOPS = \frac{IDR_{LIMITE}}{\max(IDR_{SMAV})}$$

In relazione ai due tipi di evento si calcolano due differenti indici:  $IOPS_{475}$  e  $IOPS_{101}$ . La Classe di Operatività Strutturale (*COPS*) è così definita:

CLASSE OPERATIVITA' STRUTTURALE – COPS	$IOPS_{475}$	$IOPS_{101}$
A	> 1	> 1
B	< 1	> 1
C	< 1	< 1

Fig. 1 – Definizione delle Classi di Operatività Strutturale (COPS).

**Perché SMAV per la valutazione degli edifici strategici.** La metodologia SMAV unisce l’elevato grado di affidabilità dell’identificazione modale con tecnica OMA alla versatilità del modello matematico implementato in grado di cogliere le variazioni delle frequenze proprie dell’edificio in funzione del livello di scuotimento e svolgere un’analisi dinamica lineare nel rispetto delle NTC08.

Dovendo prevedere la risposta dinamica della struttura in campo lineare (fino al grado di danneggiamento corrispondente allo SLD), è essenziale cogliere con la maggiore precisione possibile le frequenze proprie e poter seguire la loro evoluzione fino alle soglie limite di drift di piano che segnano l’inizio del danneggiamento.

SMAV è stato sviluppato nel rispetto di questi due aspetti fondamentali:

- l’identificazione delle frequenze proprie è assicurata dalla precisione della tecnica OMA;
- la variazione delle frequenze al crescere dello scuotimento è presa in considerazione tramite curve di letteratura che mettono in relazione il drop di frequenza (massima variazione di

frequenza durante il sisma rispetto a quella identificata da prove di rumore ambientale) con il drift di piano.

Di seguito in Fig. 2 sono rappresentate le curve di letteratura implementate in SMAV per gli edifici in cemento armato e per quelli in muratura. I punti rossi sono rappresentativi di uno studio condotto su un campione di edifici dell'Osservatorio Sismico delle strutture (OSS)<sup>2</sup>, (28 edifici in c.a. e 18 edifici in muratura).

Per ogni struttura e per il terremoto di maggiore intensità registrato dal sistema di monitoraggio permanente è stata analizzata la variazione di frequenza rispetto alla frequenza identificata dalle prove ambientali e messa in correlazione con il massimo drift di piano.

Tramite queste curve SMAV è in grado di calcolare i drift di piano per mezzo di una procedura iterativa.

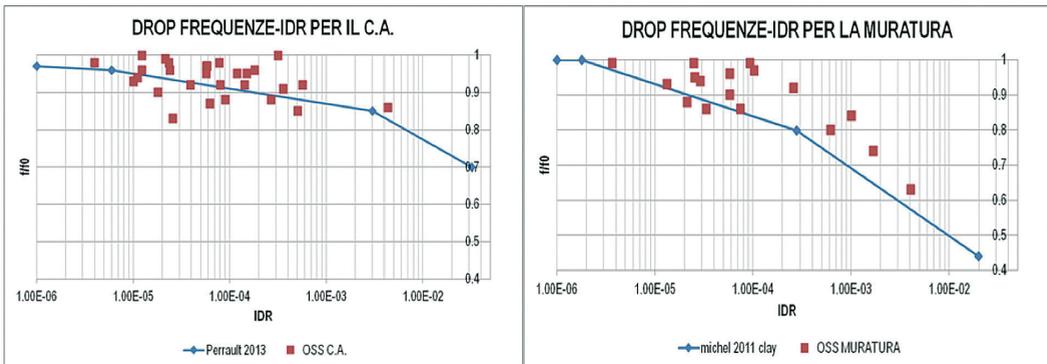


Fig. 2 – Relazioni drop di frequenza - drift di piano assunte per edifici in c.a. e muratura.

Inoltre è importante sottolineare che SMAV, oltre all'IOPS, fornisce:

- la percentuale di massa partecipante nelle due direzioni;
- un indice che misura il grado di approssimazione del modello cinematico adottato;
- la distribuzione dei drift di piano in ogni punto dell'edificio;
- la percentuale di abbattimento delle frequenze iniziali (dalle prove ambientali) in funzione del *drift* massimo raggiunto (sulla base delle curve di letteratura);
- i valori massimi di taglio alla base nelle due direzioni rapportate al peso totale ( $C_x/W; C_y/W$ );
- il valore di duttilità media con il controllo del limite massimo previsto al 7.3.3.3 delle NTC08.

**Esempi di validazione della metodologia SMAV con i dati dell'OSS.** La validazione della metodologia SMAV è avvenuta utilizzando i dati sperimentali dell'Osservatorio Sismico delle strutture (OSS), la Rete di monitoraggio sismico permanente del Dipartimento della Protezione Civile che monitora le oscillazioni causate dal terremoto in 133 edifici pubblici (48% scuole, 22% municipi, 12% ospedali, 18% altre tipologie), 7 ponti ed 1 diga.

La metodologia SMAV è stata ad oggi applicata su dieci edifici dell'OSS. A titolo di esempio si illustrano due casi: il primo relativo all'Istituto Comprensivo S. Benedetto di Norcia ed il secondo relativo alla Scuola Secondaria di I grado "Lorenzo de' Medici" di Barberino di Mugello. In quest'ultimo caso il modello matematico è stato generalizzato assumendo un comportamento rigido non nella pianta complessiva dell'edificio ma di ogni singolo rettangolo in cui la pianta viene suddivisa.

Per l'evento sismico di maggiore intensità registrato dal sistema di monitoraggio permanente è stata applicata la metodologia SMAV e confrontati i drift di piano previsti con quelli

2 <http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/osservatorio.wp>

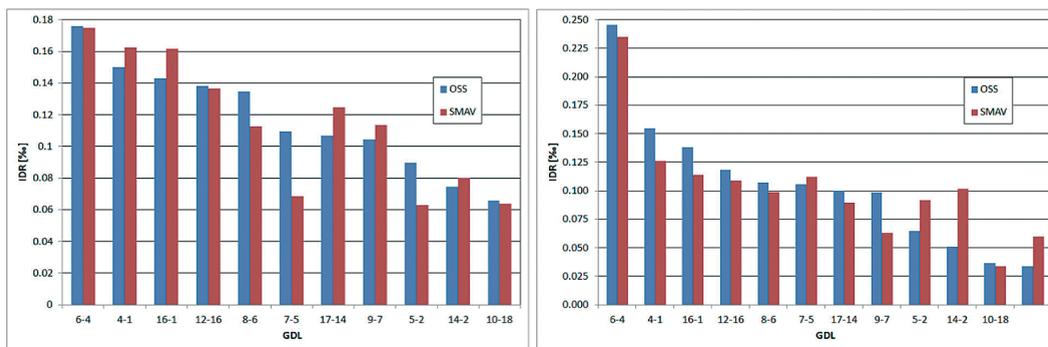


Fig. 3 – Confronto tra i drift di piano sperimentali OSS e quelli previsti da SMAV.

sperimentali come mostrato in Fig. 3 (a sinistra il caso di Norcia e a destra quello di Barberino di Mugello).

**Confronto tra metodologia SMAV e software commerciale.** Di seguito si riportano i risultati finali di verifica di operatività strutturale sul Municipio di Gioia dei Marsi (edificio in muratura facente parte dell'OSS) ottenuti da un lato con il software 3Muri© e dall'altro con la metodologia SMAV. Per rendere possibile il confronto con SMAV, dall'output di 3Muri è stato ricavato l'IOPS come la media, per le 24 analisi, del rapporto tra lo spostamento limite allo SLD (Dd) e lo spostamento massimo del nodo di controllo.

Tab. 1 - Confronto tra gli IOPS ricavati con 3Muri e quelli ottenuti con SMAV.

INPUT SISMICO	IOPS (3Muri)	IOPS (SMAV)
NTC08 SLD (cu=2)	1,83	2,21
NTC08 SLV (cu=2)	0,64	0,53

Il confronto effettuato evidenzia come i risultati della metodologia SMAV in termini di Indici di Operatività Strutturale (IOPS) risultano numericamente in accordo con quelli ottenuti con il software 3Muri. Questi ultimi sono stati ottenuti a seguito di:

- raggiungimento di un livello di conoscenza approfondito (LC2) della struttura che consiste nella verifica estesa ed esaustiva dei dettagli costruttivi e nell'esecuzione estesa di indagini sui materiali;
- calibrazione del modello sulla base dell'identificazione modale con tecnica OMA;
- analisi statica non lineare.

Il sostanziale accordo numerico degli indici di valutazione di SMAV con quelli ampiamente riconosciuti nella pratica ingegneristica e caratterizzati da un onere computazionale e di indagini non indifferente, evidenzia l'elevato grado di affidabilità della metodologia speditiva proposta.

**Esempi applicativi della metodologia SMAV su edifici strategici della CLE.** *CLE di Faenza – Soccorso Sanitario - Casa di cura San Pier Damiano.* Descrizione della struttura: a telai in c.a. con pianta a T e 5 piani fuori terra. Vedi Tab. 2.

Tab. 2 - Valutazione dell'operatività strutturale dell'edificio con funzione soccorso sanitario.

AZIONE SISMICA	IOPS <sub>475</sub>	IOPS <sub>101</sub>	COPS
NTC08	0,64	1,36	B
MS3	0,92	1,68	B

*CLE di Faenza - Intervento operativo – Uffici del II8.* Descrizione della struttura: a telai in c.a. con pianta rettangolare e 2 piani fuori terra. Vedi Tab. 3.

Tab. 3 - Valutazione dell'operatività strutturale dell'edificio con funzione intervento operativo.

AZIONE SISMICA	IOPS <sub>475</sub>	IOPS <sub>101</sub>	COPS
NTC08	2,67	11,7	A
MS3	6,22	13,3	A

**Conclusioni e sviluppi futuri.** E' stata presentata una metodologia speditiva per la valutazione dell'operatività strutturale degli edifici strategici richiamando le basi teoriche ed illustrando dettagliatamente la procedura applicativa. L'utilizzo dei dati sperimentali dell'OSS ha permesso la validazione della metodologia attraverso due casi studio che mostrano la capacità di SMAV di riprodurre la distribuzione spaziale dei drift ottenuti dai dati sperimentali. L'affidabilità della metodologia è stata ulteriormente validata attraverso il confronto con la verifica di operatività eseguita utilizzando le indagini previste da NTC08 ed utilizzando il software commerciale 3Muri. Infine l'applicazione di SMAV su due edifici strategici facenti parte della CLE di Faenza ha permesso di comprendere quanto l'utilizzo di input sismico da MS3/RSL possa modificare gli IOPS.

La metodologia SMAV è attualmente in corso di sperimentazione in 4 Regioni pilota su edifici facenti parte della terna di edifici strategici dei seguenti Comuni: Sansepolcro (Toscana), Bagno di Romagna (Emilia Romagna, Recanati (Marche), Pordenone (Friuli Venezia Giulia).

#### Bibliografia

- DCDPC 1755 27/04/2012; 2012: *Approvazione modulistica per l'Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE)* dell'insediamento urbano di cui all'art.18 dell'OPCM 29/02//2012 n.4007.
- Gruppo di lavoro MS; 2008: *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e Province Autonome, 3 vol. e DVD.
- Lagomarsino S., Penna A., Galasco A., Cattari S.; 2013: *TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings*, Engineering Structures, 56,1787-1799, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.002>.
- Michel C., Zapico B., Lestuzzi P., Molina F. J. Weber F.; 2011: *Quantification of fundamental frequency drop for unreinforced masonry buildings from dynamic tests*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40(11):1283–1296.
- NTC08.; 2008: *Norme tecniche per le Costruzioni*. D.M. 14.1.2008.
- Peeters B., Roeck G.D.; 2001: *Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review*. "Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 123:659-667.
- Spina D., Lamonaca B.G., Nicoletti M., Dolce M.; 2011: *Structural monitoring by the Italian Department of Civil Protection and the case of 2009 Abruzzo seismic sequence*. Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 9, No.1.
- Perrault M. ; 2013: *Evaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments à partir de mesures in situ*. Tesi di dottorato
- Spina D., Mori F., Pagliaroli A.; 2013: *Un metodo sperimentale per la valutazione dell'operatività di un edificio strategico che tenga conto della risposta sismica locale* - Convegno NGGTS 2013.