



# Un approccio semplificato per la localizzazione del danno su strutture in cemento armato basato sulla trasformata di Stockwell

Felice Carlo Ponzo, Rocco Ditommaso, Gianluca Auletta

Dipartimento DiSGG – Università degli Studi della Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza

*Keywords: damage detection, structural monitoring, S-Transform, modal curvature, R.C. Structures*

## ABSTRACT

È noto che il verificarsi di un danno su un qualsiasi tipo di struttura è in grado di alterare le caratteristiche dinamiche del sistema strutturale stesso. I principali parametri interessati da queste variazioni sono generalmente i periodi propri, i fattori di smorzamento e le deformate modali. Diversi metodi di valutazione del danneggiamento si basano proprio sulla misura di tali parametri. Recentemente notevoli sforzi sono stati fatti al fine di ottenere relazioni semplificate, tali da poter essere utilizzate in metodologie speditive, in grado di mettere in relazione le variazioni dei parametri sopra elencati con l'entità e la localizzazione del danno subito da una struttura.

Negli ultimi anni sono stati proposti alcuni metodi basati sulla variazione della curvatura modale. Tali metodologie sembrano essere particolarmente indicate per la localizzazione del danno sulle strutture. In questo lavoro viene proposta una nuova strategia di analisi del comportamento non lineare delle strutture basata sulla trasformata di Stockwell. Tale trasformata supera i limiti derivanti dalle ipotesi di comportamento stazionario e consente di analizzare il comportamento non lineare, e quindi non stazionario, di un qualsiasi sistema dinamico, consentendo una stima molto accurata delle caratteristiche dinamiche dello stesso. In particolare, per un edificio sottoposto a un forte evento sismico, sfruttando un filtro a banda variabile basato su quest'ultima trasformata, diventa possibile valutare, con buona accuratezza, le deformate modali durante la massima escursione in campo plastico, dunque, nell'istante in cui l'edificio raggiunge la sua minima frequenza di oscillazione. Nel lavoro vengono mostrati due esempi in cui, grazie al confronto tra le curvature modali valutate prima, durante e dopo l'evento, è possibile valutare con buona approssimazione la posizione del danno su una struttura di tipo intelaiato.

## 1 INTRODUZIONE

Gli studi riguardanti il monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring - *SHM*) mirano ad approfondire la conoscenza del comportamento dinamico delle strutture al fine di mettere a punto delle strategie di analisi, sempre più accurate, per la valutazione della sicurezza. In particolare, il monitoraggio strutturale, soprattutto per le strutture ubicate in zona sismica, ha assunto un significato di grande importanza, per la possibilità di effettuare in maniera più oggettiva e in tempi più rapidi la stima del danno a seguito di un evento sismico. Tali strumenti, inoltre, favoriscono la comprensione del comportamento strutturale degli edifici durante l'evento sismico e

dei relativi meccanismi di danneggiamento, consentendo di studiare e mettere a punto strategie di protezione efficaci e allo stesso tempo economicamente convenienti.

L'esperienza di danni, anche catastrofici, verificatisi in tutto il mondo a seguito dei forti eventi sismici susseguitisi negli anni, ha fatto sempre più emergere la necessità di dotarsi di nuovi strumenti teorici e nuove tecnologie per comprendere e migliorare il comportamento delle costruzioni civili e per valutare in tempi rapidi, ed in maniera quanto più oggettiva possibile, le possibili strategie di intervento. Proprio con questo obiettivo, sia nel mondo accademico che in quello dell'industria, gli ingegneri sono

impegnati nello sviluppo e nella messa a punto di nuovi sistemi di rilevazione e nuove tecniche per il monitoraggio dello stato di salute di strutture ed infrastrutture.

Notevoli passi avanti sono stati fatti nelle teorie riguardanti il monitoraggio delle strutture con l'applicazione dell'analisi della propagazione delle onde all'interno degli edifici (Safak, 1998a, 1998b, 1999; Ivanović *et al.*, 2001; Snieder e Safak, 2006; Todorovska e Trifunac, 2008a, 2008b, 2008c; Trifunac *et al.*, 2008; Todorovska 2009a, 2009b; Ditommaso *et al.*, 2010; Mucciarelli *et al.*, 2011; Picozzi *et al.*, 2011) e con lo sviluppo e l'applicazione di tecniche di analisi tempo-frequenza (2011; Mucciarelli *et al.* 2011; Parolai 2009; Puglia *et al.*, 2011, Ponzo *et al.*, 2010; Ditommaso *et al.*, 2010; Ditommaso *et al.*). Grazie alle tecniche di analisi tempo-frequenza messe a punto negli ultimi anni, e in particolare grazie alle proprietà di cui gode la trasformata di Stockwell, sono stati messi a punto dei filtri non lineari (Ditommaso *et al.*, 2011a; Ponzo *et al.*, 2011) utilizzabili nell'ambito del monitoraggio strutturale per studiare la fase transiente del comportamento dinamico della struttura monitorata, fornendo la possibilità di identificare e localizzare anche eventuali danni provocati del terremoto.

## 2 I METODI SEMPLICATI PER IL MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE

Nel corso degli ultimi due decenni molte ricerche sono state svolte nel settore della valutazione del danno sugli edifici, utilizzando tecniche non distruttive (Non-destructive Damage Evaluation: NDE), basate sulla variazione del comportamento dinamico del sistema (Ditommaso *et al.*, 2008; Picozzi *et al.*, 2008, 2009). I metodi NDE possono essere classificati in quattro diversi livelli (Stubbs *et al.*, 2000), in funzione del tipo di informazioni fornite dal singolo approccio (Rytter, 1993):

- I. Metodi di primo livello: solo in grado di valutare la presenza di un eventuale danno sulla struttura;
- II. Metodi di secondo livello: capaci di valutare la presenza di un eventuale danno fornendo anche indicazioni circa la posizione;
- III. Metodi di terzo livello: capaci di identificare un eventuale danno fornendo indicazioni circa la posizione e l'entità del danneggiamento;

IV. Metodi di quarto livello: capaci di individuare l'eventuale presenza di danno, stimarne l'entità e la posizione oltre a dare indicazioni circa l'impatto che il danneggiamento ha sulla struttura.

Ogni metodologia, in funzione del livello in cui si colloca, richiede precise informazioni oltre a richiedere algoritmi per l'analisi a complessità variabile. Dunque, la messa a punto di metodologie raffinate richiede, in genere, costi elevati, risulta computazionalmente onerosa, a causa degli elevati tempi di calcolo, e comporta, infine, una maggiore probabilità di errore nell'interpretazione dei risultati.

La valutazione dello stato di "salute" di un numero sempre crescente di strutture ed infrastrutture richiede sforzi notevoli, soprattutto se l'obiettivo è quello di fornire una fedele valutazione del rischio sismico e le indagini basate sulla sola ispezione visiva, sembrano essere sempre più inadeguate.

I metodi di primo livello sono generalmente basati sulla variazione delle frequenze di vibrazione o sulla variazione dello smorzamento viscoso equivalente. Tali metodi risultano essere convenienti, data la semplicità e l'innegabile vantaggio di utilizzare pochi sensori installati sulla struttura, anche se tale approccio può portare a valutazioni talvolta errate. In effetti, la variazione della frequenza di vibrazione nel tempo, non è necessariamente legata alla presenza di danno, ma può essere determinata da diversi fattori quali, per esempio, la variazione della temperatura esterna, la configurazione delle masse e/o delle rigidità, specie per le strutture particolarmente deformabili in acciaio o in cemento armato (Doebeling e Farrar, 1998). La variazione delle frequenze può risultare, in alcuni casi, legata anche al contenuto d'acqua del terreno di fondazione.

Nell'ambito dei progetti di ricerca RELUIS-DPC 2005-2008 linea 9 e RELUIS-DPC 2010-2013 Task AT3.1, entrambi finanziati dal Dipartimento nazionale di Protezione Civile (DPC), è stata definita una metodologia speditiva finalizzata ad ottenere utili informazioni sull'evoluzione del danno di edifici intelaiati, durante e dopo un evento sismico, basando le analisi su pochi sensori installati solo all'ultimo livello della struttura. La fattibilità e l'ottimizzazione dei costi sono i più importanti obiettivi del sistema di controllo semplificato, tutto volto a favorire un utilizzo diffuso di tali sistemi. Tale metodo, proposto da Ponzo *et al.*

(2010) per il monitoraggio dello stato di salute degli edifici intelaiati, si basa su un numero limitato di registrazioni effettuate all'ultimo livello di un edificio (generalmente accelerazioni) e supera alcune delle limitazioni insite nei classici metodi di primo livello. La procedura per la valutazione dell'indice di danno (in questo caso il massimo *drift* d'interpiano) utilizza parametri estraibili dalle registrazioni fatte in testa alla struttura durante l'evento sismico: massima accelerazione assoluta, variazioni delle frequenze fondamentali e variazione dello smorzamento viscoso equivalente. Dopo aver estratto i parametri, questi vengono combinati mediante una relazione di tipo non lineare, ricavata da valutazioni statistiche, al fine di valutare il valore del massimo *drift* atteso. Il valore del massimo *drift* stimato può essere assunto direttamente quale indicatore di danno o anche come fattore di correzione dell'indice di danno stimato tramite un classico metodo di primo livello basato sulla variazione di frequenza.

### 3 LA TRASFORMATATA DI STOCKWELL E IL FILTRO NON LINEARE

Lo studio dell'evoluzione nel tempo delle caratteristiche dinamiche di un sistema viene spesso affrontato utilizzando delle strategie di analisi non appropriate, in quanto basate su strumenti basati sull'assunzione di stazionarietà del comportamento del sistema. Per esempio, uno degli strumenti più utilizzati per analizzare i sistemi dinamici è la trasformata di Fourier, che per una funzione  $h(t)$  vale:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt \quad (1)$$

Tale trasformata, di forte interesse pratico nella risoluzione di diversi problemi matematici e ingegneristici, essendo basata sull'ipotesi di comportamento stazionario del sistema oggetto di studio, mal si presta all'analisi dei fenomeni transienti e quindi all'analisi del comportamento non stazionario delle strutture sottoposte ad eccitazione sismica. Infatti, valutando la trasformata di Fourier di un segnale non stazionario si ottiene solo l'ampiezza media di ogni singola componente spettrale valutata sulla lunghezza dell'intera finestra temporale acquisita. Dunque, appare ovvio che si perdono tutte le informazioni legate ai fenomeni tempo-varianti.

Una trasformazione integrale molto utilizzata per studiare i fenomeni transitori è la (Short Time

Fourier Transform (*STFT*) (Gabor, 1946). Questa tecnica supera alcuni dei limiti legati alla semplice trasformata di Fourier, fornendo alcune indicazioni sulla variazione nel tempo delle caratteristiche spettrali del segnale analizzato. Per un segnale  $h(t)$  la *STFT* è definita come:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt \quad (2)$$

dove  $w(t - \tau)$  è una generica finestra temporale che trasla lungo l'asse temporale. Purtroppo, anche questa trasformazione integrale ha alcuni limiti che tendono a falsare il risultato e a far perdere alcune importanti informazioni legate ai fenomeni transienti. Infatti, i valori delle caratteristiche spettrali ricavati dalla trasformazione relativa alla finestra mobile non sono assoluti, ma hanno carattere relativo e di conseguenza possono essere utilizzati solo per confrontare gli spettri relativi alle singole finestre temporali. Tale inconveniente deriva dal fatto che, per valutare la *STFT*, è necessario valutare l'opportuna lunghezza della finestra temporale che non può essere scelta in modo arbitrario, ma è vincolata alla necessità di raggiungere un giusto compromesso tra la risoluzione nel dominio del tempo e quella nel dominio delle frequenze. Infatti, una buona risoluzione nel dominio del tempo richiede una lunghezza ridotta della finestra temporale, ma questo si scontra con la risoluzione nel dominio delle frequenze che, al contrario, necessita una finestra mobile che sia la più lunga possibile. Appare quindi evidente che, in funzione del problema da affrontare, va effettuata una scelta opportuna della lunghezza temporale della finestra mobile. Recentemente sono state proposte nuove tecniche per l'analisi tempo-frequenza dei segnali. Tra le più utilizzate si può citare la trasformata wavelet e la distribuzione di Wigner-Ville. Queste due trasformazioni, per un segnale  $h(t)$ , sono definite rispettivamente come:

$$F(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot w^* \left( \frac{t - b}{a} \right) dt \quad (3)$$

dove  $a$  e  $b$  sono due fattori di scala e  $w^*$  è una generica finestra mobile, e

$$WD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h\left(\tau + \frac{t}{2}\right) \cdot h\left(\tau - \frac{t}{2}\right) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt \quad (4)$$

dove  $t$  è il tempo,  $f$  è la frequenza e  $\tau$  è un parametro che controlla la posizione della finestra temporale.

Queste due ultime trasformazioni forniscono una serie di vantaggi rispetto alla trasformata di

Fourier e rispetto alla *STFT*, ma non consentono un'esatta valutazione delle caratteristiche spettrali locali. Dunque, nonostante i vantaggi, nessuna delle trasformazioni integrali menzionate è in grado di valutare in modo corretto lo spettro locale di un segnale rappresentativo del comportamento di un sistema tempo-variante.

Uno strumento che supera tutte le limitazioni e permette di valutare con esattezza sia le caratteristiche spettrali che la loro variazione locale nel tempo è la trasformata di Stockwell o *S-Transform* (Stockwell *et al.*, 1996). Questa trasformazione, per un segnale  $h(t)$ , è definita come:

$$S(\tau, f) = \frac{|f|}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot e^{-\frac{(\tau-t)^2 \cdot f^2}{2}} \cdot e^{-i2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (5)$$

dove  $t$  è il tempo,  $f$  è la frequenza e  $\tau$  è un parametro che controlla la posizione della finestra gaussiana lungo l'asse temporale. Tuttavia la trasformata di Stockwell si può derivare sia dalla *STFT*, effettuando una particolare scelta della finestra mobile, sia dalla trasformata wavelet, come caso particolare della wavelet continua (Mallat, 1998). Un innegabile vantaggio rispetto alle wavelet consiste nel non dover soddisfare il vincolo di media zero all'interno della finestra mobile. Inoltre, rispetto alle altre trasformate, nella *S-Transform* i coefficienti reali ed immaginari non sono costanti, ma evolvono man mano che trasla la finestra temporale determinando un cambiamento di forma della finestra stessa. Al contrario, nella trasformata wavelet la finestra mobile trasla nel tempo, ma non cambia mai la sua forma (Parolai, 2009).

Tra le importanti proprietà di cui gode la *S-Transform* va citata la linearità della trasformazione e la possibilità di scrivere questa trasformata come un particolare operatore dello spettro di Fourier (Stockwell *et al.*, 1996):

$$S(\tau, f) = \frac{|f|}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\alpha + f) \cdot e^{-\frac{2\pi^2 \cdot \alpha^2}{f^2}} \cdot e^{-i2\pi \cdot \alpha \cdot \tau} d\alpha \quad \text{with } f \neq 0 \quad (6)$$

da cui si può dimostrare che

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau \quad (7)$$

Dunque, avendo a disposizione la trasformata di un segnale è possibile ricostruire il segnale di partenza  $h(t)$  invertendo banalmente la trasformazione (Stockwell *et al.*, 1996):

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau \right) \cdot e^{i2\pi \cdot f \cdot t} df \quad (8)$$

Appare a questo punto utile impiegare tale operatore integrale al fine di mettere a punto un filtro che consenta di isolare le fasi transienti a frequenza variabile nel tempo. In particolare, ai fini ingegneristici, tale approccio può essere utilizzato per isolare e studiare il comportamento non lineare delle strutture avendo la possibilità di valutare le deformate modali e la loro eventuale variazione durante l'evento sismico.

Molti autori si sono cimentati nella messa a punto di strategie numeriche per l'eliminazione del rumore da un generico segnale utilizzando diversi tipi di trasformazioni (Weaver *et al.*, 1991; Donoho e Johnstone, 1994; Donoho, 1995; Douglas, 1997; Galiana-Merino *et al.*, 2003), mentre altri, agli stessi fini, hanno già utilizzato la *S-Transform* (Pinnegar e Eaton, 2003; Ascari e Siahkoohi, 2007; Simon *et al.*, 2007; Parolai, 2009; Ditommaso *et al.*, 2011a, 2011b).

Ditommaso *et al.* (2011a e 2011b) evidenziano la possibilità di utilizzare la *S-Transform* per implementare un filtro a banda variabile in grado di isolare la risposta dei singoli modi di vibrare, anche in campo non lineare.

Il filtro è stato costruito utilizzando le proprietà di convoluzione, linearità e invertibilità della *S-Transform*. L'algoritmo su cui il metodo di filtraggio si basa può essere riassunto nei seguenti passi (Ditommaso *et al.*, 2011a e 2011b): 1 - Valutazione della *S-Transform* del segnale  $h(t)$ ; 2 - Generazione della matrice filtrante; 3 - Calcolo del prodotto di convoluzione tra la matrice filtrante e la trasformata del segnale; 4 - Recupero del segnale filtrato mediante l'inversione del risultato del prodotto di convoluzione. Quindi l'intero processo può essere scritto come:

$$h_f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} [S(\tau, f) * G(\tau, f)] d\tau \right) \cdot e^{i2\pi \cdot f \cdot t} df \quad (10)$$

Dove  $S(\tau, f)$  rappresenta la trasformata del segnale  $h(t)$ ,  $G(\tau, f)$  rappresenta la matrice filtrante ed  $h_f(t)$  rappresenta il segnale filtrato.

L'intero processo è stato implementato in un algoritmo sviluppato in ambiente MATLAB®, definendo una matrice filtrante mediante input grafico effettuato a video dall'utente grazie ad un'interfaccia appositamente realizzata. Al momento la matrice filtrante può avere una forma a piacere nel dominio tempo-frequenza, l'unico vincolo è legato al fatto che il dominio deve essere semi-convesso. Maggiori dettagli possono essere trovati in Ditommaso *et al.* (2011a e 2011b).

Si riporta di seguito un esempio di applicazione del filtro non lineare utilizzato, nel caso specifico, per ripulire un segnale a frequenza variabile dal rumore, a frequenza costante, contenuto all'interno dell'intervallo di variazione della frequenza del segnale.

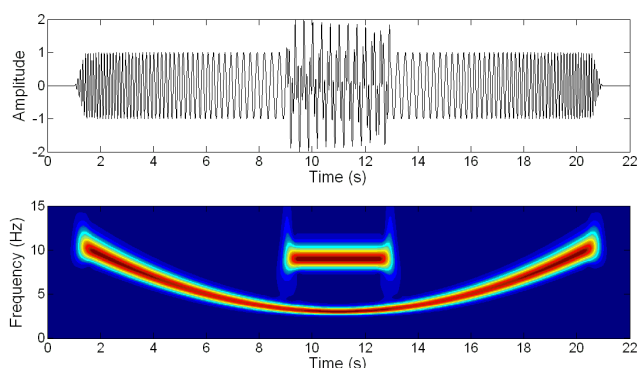


Figura 1. Segnale contaminato dal rumore a frequenza costante pari a 9Hz (Ditommaso *et al.*, 2011a e 2011b)

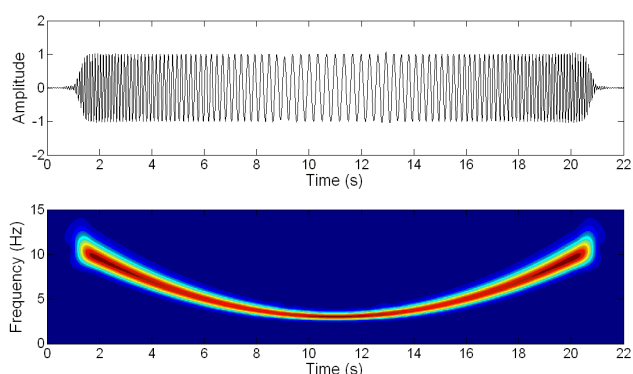


Figura 2. Segnale ripulito mediante l'applicazione del filtro a banda variabile (Ditommaso *et al.*, 2011a e 2011b)

È chiaro che, essendo la frequenza del rumore (9Hz) contenuta all'interno dell'intervallo di variazione del segnale (da 3-11Hz), non sarebbe stato possibile isolare il segnale dal rumore mediante l'applicazione di un filtro standard. Una importante proprietà del filtro a banda variabile implementato da Ditommaso *et al.* (2011a e 2011b) riguarda la possibilità di isolare un qualsiasi transiente conservando inalterata l'angolo di fase del segnale originario.

#### 4 LA VALUTAZIONE DELLE DEFORMATE MODALI E LA LOCALIZZAZIONE DEL DANNO

Le notevoli potenzialità del filtro a banda variabile messo a punto ed illustrato nel paragrafo precedente hanno indotto a valutare la possibilità di utilizzare tale strumento per la quantificazione e localizzazione del danno in una struttura intelaiata in c.a. L'idea alla base della procedura è quella di isolare, grazie al filtro, una singola deformata modale alla volta, valutarne

l'eventuale variazione nel tempo e da questa calcolare la variazione di curvatura che, com'è noto, risulta essere ben correlata al danno (Pandey *et al.*, 1991). Diagrammando la variazione di curvatura diventa possibile, infine, localizzare il danno subito al generico piano, ad esempio, a seguito di un evento sismico.

A titolo di esempio, vengono considerati due diversi casi. Il primo si riferisce a un modello numerico non lineare relativo a una struttura in cemento armato (pianta 15x12m), regolare sia in pianta che in elevazione, di cinque piani, quattro telai lungo la direzione longitudinale (X) e tre telai lungo la direzione trasversale (Y), come mostrato in Figura 3.

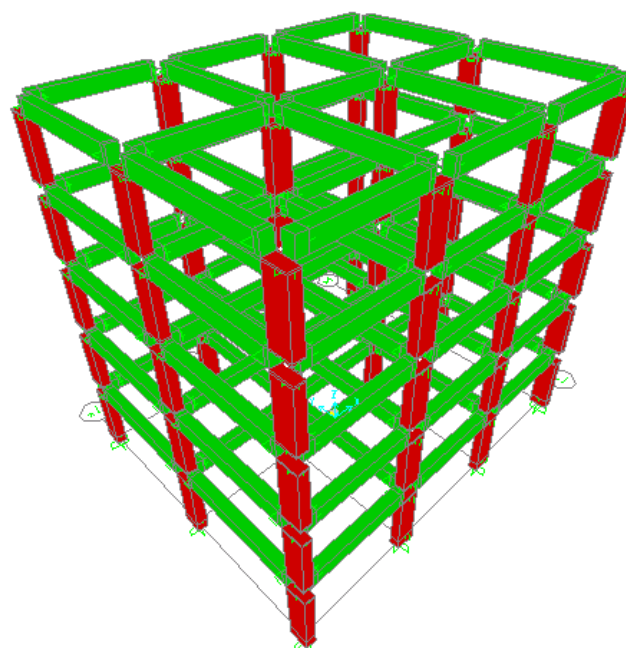


Figura 3. Modello numerico utilizzato per le analisi

La struttura in esame è stata progettata seguendo i criteri della normativa sismica (OPCM 3431/2005), considerando una classe di duttilità alta (CD A), una zona ad alta intensità sismica ( $PGA = 0,35g$ ) ed un suolo di tipo D.

L'altezza interpiano è costante a tutti i livelli ed è pari a 3m, per un'altezza totale della struttura pari 15m. La struttura è stata modellata utilizzando un software di analisi agli elementi finiti (*SAP2000*). Il modello, di tipo tridimensionale, ha consentito di cogliere tutti gli aspetti salienti del comportamento dinamico della struttura: modi traslazionali e modi rotazionali. Come è stato accennato prima, il modello è stato costruito in modo da cogliere sia il comportamento lineare che il comportamento plastico della struttura. La non linearità è stata portata in conto mediante l'utilizzo di cerniere (plasticità concentrata) introdotte lungo lo

sviluppo degli elementi monodimensionali: travi e pilastri.

Le travi ed i pilastri sono stati modellati mediante elementi di tipo *beam*, assumendo una tensione di snervamento del calcestruzzo pari a 20MPa (resistenza cilindrica) ed una tensione di snervamento per l'acciaio pari a 430MPa. Le cerniere plastiche sono state caratterizzate da un legame non lineare a comportamento isteretico di tipo Takeda. Nella definizione del legame non lineare il carico assiale agente in ciascuna cerniera plastica è stato ipotizzato costante nel tempo. Maggiori dettagli circa la costruzione del modello numerico non lineare sono disponibili in Ponzo *et al.* (2010).

L'input utilizzato per eccitare la struttura è quello riportato in Figura 4, mentre il relativo spettro di risposta in accelerazione è rappresentato in Figura 5:

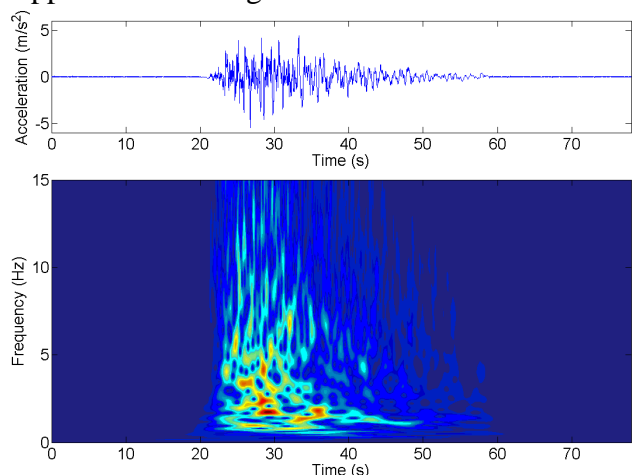


Figura 4. Componente Y dell'input utilizzato nelle simulazioni numeriche

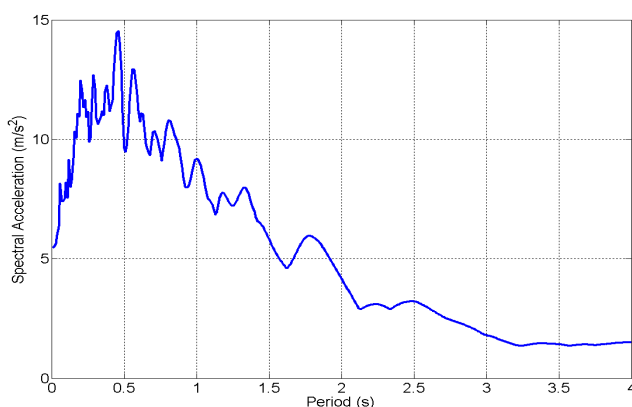


Figura 5. Spettro di risposta in accelerazione della componente Y dell'input utilizzato nelle simulazioni numeriche

Sollecitando la struttura con l'input mostrato in Figura 4 è stato possibile registrare la risposta a tutti i livelli e in tutte le direzioni.

A scopo esemplificativo si farà, di seguito, riferimento solo alla risposta relativa alla direzione Y lungo la quale si sviluppa il modo fondamentale di vibrazione. La procedura può

essere applicata, ovviamente, anche ai modi superiori di vibrare.

Durante l'eccitazione sismica la struttura ha superato il limite elastico ed ha esibito un comportamento non stazionario, dunque, non lineare. La non linearità, in questo caso, si è concretizzata sotto forma di plasticizzazioni del telaio, testimonianza della presenza di un danno sulla struttura.

Al fine di individuare il danno e di localizzarne la posizione è stata utilizzata la variazione della deformata modale (riferita al modo fondamentale) ed in particolare la variazione della curvatura modale ad essa correlata. L'algoritmo utilizzato per valutare le deformate modali della struttura e la loro variazione nel tempo prevede i seguenti passi:

- Valutazione della risposta strutturale in accelerazione all'ultimo livello;
- Definizione della matrice filtrante relativa al modo di vibrazione considerato (tarata sul segnale registrato all'ultimo livello);
- Convoluzione della matrice filtrante con la trasformata di Stockwell dei segnali registrati a tutti i livelli e lungo la stessa direzione;
- Valutazione della deformata modale nel tempo.

In Figura 6 viene riportata la registrazione accelerometrica riferita all'ultimo livello della struttura lungo la direzione Y. Il diagramma tempo-frequenza evidenzia che il comportamento della struttura è di tipo non lineare essendo caratterizzato da una frequenza del modo fondamentale variabile nel tempo. Nella Figura 7 viene riportata la *S-Transform* del segnale filtrato intorno al modo fondamentale e la sovrapposizione del segnale filtrato con quello originale registrato in testa alla struttura.

Il diagramma tempo-frequenza mostra una frequenza iniziale del modo fondamentale della struttura pari a 1,5Hz, una frequenza minima relativa alla massima escursione in campo plastico pari a 0,45Hz ed una frequenza finale pari a 0,95Hz.

Sovrapponendo i segnali filtrati a tutti i livelli è possibile valutare la deformata modale nei diversi istanti temporali ed apprezzarne le variazioni. Nel caso specifico si fa riferimento solo alle deformate modali più significative che sono quelle relative all'istante precedente alla fase *strong motion* (indicato con A in Figura 8), quello relativo all'istante di massima escursione in campo plastico (indicato con B in Figura 8), e

quello relativo all'istante successivo all'evento sismico (indicato con C in Figura 8).

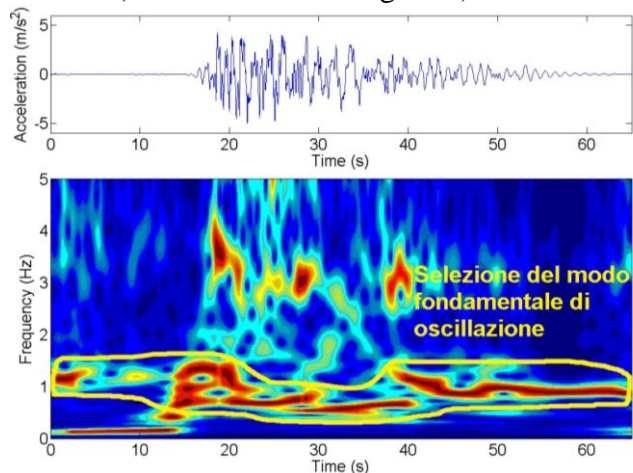


Figura 6: S-Transform del segnale accelerometrico registrato in testa all'edificio e selezione del modo fondamentale di oscillazione con frequenza variabile nel tempo (comportamento non lineare)

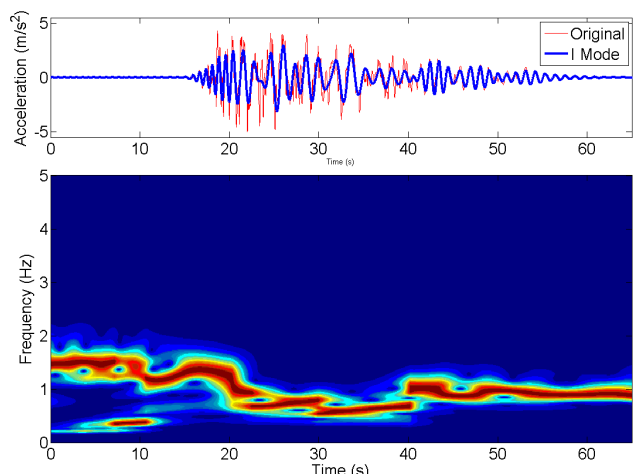


Figura 7: Sovrapposizione del segnale filtrato intorno al modo fondamentale di oscillazione e del segnale originale registrato in testa all'edificio. Il diagramma tempo-frequenza rappresenta la S-Transform del segnale filtrato

Vale la pena notare che se si fosse utilizzato l'approccio classico per la valutazione delle deformate modali sarebbe stato impossibile riuscire a valutare la deformata modale durante la fase transiente. Dunque, non sarebbe stato possibile valutare la deformata modale durante la fase di massima escursione in campo plastico, perdendo, così, informazioni preziose durante la fase transiente.

In Figura 9 sono state rappresentate le deformate modali e le curvature modali riferite agli istanti A, B e C definiti in Figura 8. La Figura 9 mostra, inoltre, la differenza delle tre deformate modali valutate nei tre istanti temporali A, B e C.

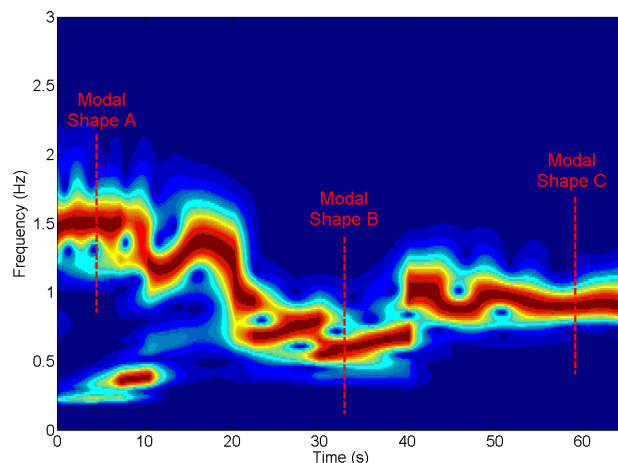


Figura 8: Istanti temporali A, B e C a cui fanno riferimento le deformate modali plottate in Figura 9

La differenza di comportamento è maggiormente evidente in termini di curvatura modale e in termini di differenza tra le curvature B-A e C-A come riportato in Figura 9. La figura mostra che il livello 3 è quello in corrispondenza del quale si registra il massimo valore di curvatura e la massima differenza tra la curvatura valutata nell'istante B (massima escursione in campo plastico) e la curvatura iniziale (istante A). La curvatura valutata nell'istante di massima escursione in campo plastico fornisce la valutazione del danno in modo più immediato, come risulta evidente dal confronto tra le curve B-A e C-A di Figura 9.

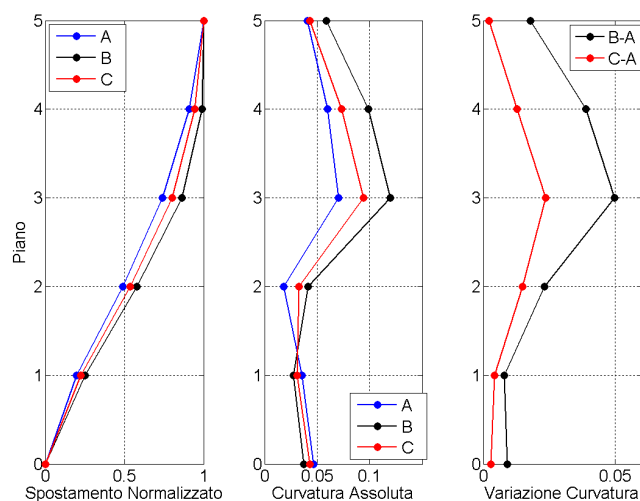


Figura 9: (a sinistra) Deformate modali valutate negli istanti temporali A, B e C definiti nella Figura 8; (al centro) Le corrispondenti Curvature modali; (a destra) Valore assoluto della differenza tra le curvature modali B-A e C-A

Il vantaggio del metodo presentato in questo articolo, rispetto a quello proposto da Pandey *et al.* (1991), sta nel fatto di poter valutare il danno in termini di variazione di curvatura modale, facendo riferimento sia alla fase precedente a quella di *strong motion*, che al momento di massima escursione in campo plastico.

Analogamente a quanto proposto per il modello numerico esposto nel caso precedente, la procedura per la valutazione e la localizzazione del danno è stata applicata anche a un modello sperimentale in scala 1:4. Tale modello, mostrato in Figura 10, è stato progettato per resistere ai solo carichi verticali.



Figura 10: Modello POP scala 1:4 (Ponzo *et al.*, 2010)

Esso è caratterizzato dal possedere una geometria regolare in pianta e in elevazione ed è costituito da quattro livelli con altezza interpiano costante.

Il modello è stato testato presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture dell'Università degli Studi della Basilicata nell'ambito del Progetto POP (Dolce *et al.*, 2005). Le prove sono state condotte su una tavola vibrante mono-direzionale. Il modello è stato testato considerando diverse configurazioni di prova:

I FASE: modello a base fissa;

II FASE: modello a base isolata.

Per quanto riguarda la configurazione a base fissa, configurazione alla quale si fa riferimento per l'applicazione del metodo, la massima accelerazione in input trasmessa attraverso la tavola vibrante è stata incrementata progressivamente, test dopo test, da 0,05g fino a 0,35g, utilizzando diversi input opportunamente scalati nell'asse dei tempi in funzione della scala del modello. Tutti i gradi di libertà significativi sono stati monitorati durante le prove. In particolare sono stati utilizzati sia trasduttori di spostamento che accelerometri collocati a tutti i livelli Ponzo *et al.* (2010). Al fine di applicare la procedura di valutazione e localizzazione del danno è stata valutata la variazione della frequenza fondamentale di oscillazione del modello eccitato su tavola vibrante con un input di tipo EC8, avente una accelerazione di picco

pari a 0,35g (Figura 11). Sempre in Figura 11 vengono rappresentati gli istanti temporali utilizzati per la valutazione delle deformate modali.

Coerentemente a quanto fatto per il modello numerico, anche in questo caso è stato scelto un istante antecedente alla fase di *strong motion* (istante A), un istante rappresentativo della massima escursione in campo plastico (istante B) e un istante successivo alla fase di *strong motion* (istante C).

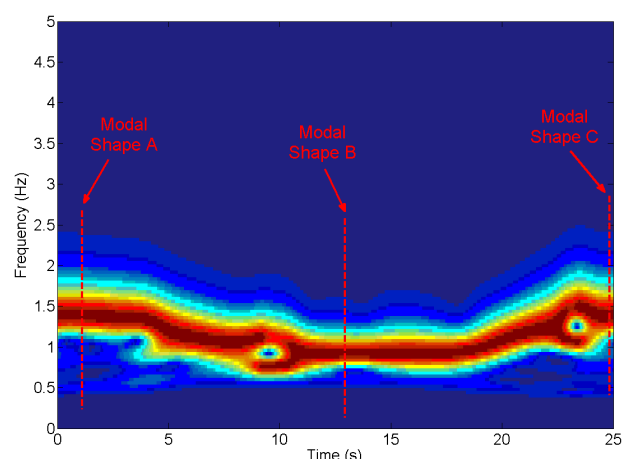


Figura 11: Istanti temporali A, B e C a cui fanno riferimento le deformate modali plotate in Figura 12

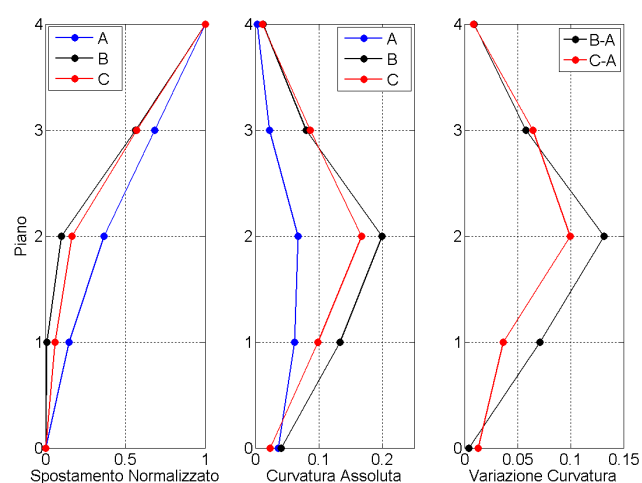


Figura 12: (a sinistra) Deformate modali valutate negli istanti temporali A, B e C; (al centro) Curvature modali valutate negli istanti A, B e C definiti nella Figura 11; (a destra) Valore assoluto della differenza tra le curvature modali B-A e C-A

L'analisi delle frequenze mostra che, a fronte di significative variazioni della frequenza fondamentale durante le fasi di *strong motion*, il modello è in grado di recuperare abbastanza bene la frequenza iniziale, a causa della presenza di danno nei nodi prodotto dai test precedentemente effettuati sullo stesso modello, e che l'incremento di danno determinato dal singolo test sismico è, tutto sommato, modesto. Il medesimo fenomeno è stato osservato anche durante le registrazioni di



aftershock su edifici reali (Mucciarelli *et al.*, 2011). Nel caso specifico, è stata misurata una frequenza iniziale pari a 1,4Hz, una frequenza minima pari a 0,9Hz e una frequenza finale di 1,35Hz.

La metodologia di valutazione del danno fornisce dei risultati in ottimo accordo con quello che è stato il danno osservato sul modello testato in laboratorio. Grazie al filtro a banda variabile è stato possibile estrarre la risposta non lineare del modo fondamentale di vibrazione e valutarne la curvatura modale e la relativa variazione. Dall'analisi della variazione della curvatura modale, riportata in Figura 12, è evidente che il livello più danneggiato è il livello 2.

## 5 CONCLUSIONI

Gli strumenti classici, basati sulla semplice trasformata di Fourier, mal si prestano all'analisi dei sistemi tempo-evolventi durante la fase transiente. La trasformata messa a punto da Sockwell *et al.* (1996) supera molti dei limiti e dei vincoli derivanti dall'uso delle vecchie trasformazioni integrali e consente di effettuare analisi dinamiche di dettaglio anche durante la fase transiente e quindi durante la fase di massima escursione in campo plastico di un edificio.

Tale trasformata è alla base della metodologia di localizzazione del danno proposta con il presente lavoro, che si pone come obiettivo quello di studiare in dettaglio la risposta di un sistema strutturale tempo-evolvente anche durante la fase transiente (Ditommaso *et al.*, 2010, 2011a e 2011b).

Il metodo mira a separare i diversi contributi modali, istante per istante, in campo non lineare, al fine di calcolare la variazione delle deformate modali e quindi delle curvature. Anche altri autori avevano messo in evidenza il fatto che la variazione della curvatura modale è strettamente legata al danno subito da una struttura a seguito di un evento sismico (Pandey *et al.*, 1991), ma non avevano a disposizione gli strumenti analitici per valutarla durante la fase non stazionaria.

La metodologia prevede, quindi, l'utilizzo di almeno una stazione sismica per ciascun livello di una struttura, mediante le quali valutare la variazione della singola deformata modale, istante per istante, opportunamente isolata nel segnale registrato per mezzo di un filtro a banda variabile basato sulla trasformata di Stockwell. Tale opportunità risulta di fondamentale

importanza sia per comprendere meglio i meccanismi di danneggiamento delle strutture durante gli eventi sismici, sia per mettere in atto strategie di localizzazione del danno basate sulla variazione istantanea della curvatura modale, così come presentato in questo lavoro.

## RINGRAZIAMENTI

Il presente studio è stato finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile Italiana nell'ambito del progetto DPC-RELUIS 2010-2013 (Task 3.1).

## REFERENCES

- Askari, R., and H. R. Siahkoochi (2007). Ground roll attenuation using the S and x-f-k transforms. *Geophys. Prospect.*, Vol. 55, pp. 1–10.
- Ditommaso R., M. Vona, M. Mucciarelli, A. Masi (2008). Identificazione dei modi rotazionali degli edifici mediante tecniche di misura di vibrazione ambientale. *Atti del 27° Convegno nazionale GNGTS*. Trieste, 8 - 10 ottobre 2008.
- Ditommaso, R., Parolai, S., Mucciarelli, M., Eggert, S., Sobiesiak, M., and J. Zschau (2010). Monitoring the response and the back-radiated energy of a building subjected to ambient vibration and impulsive action: the Falkenhof Tower (Potsdam, Germany). *Bull Earthquake Eng.*, 8, 3, 705-722. DOI: 10.1007/s10518-009-9151-4.
- Ditommaso Rocco, Marco Mucciarelli, Felice Carlo Ponzo (2011a). Analysis of non-stationary structural systems by using a band-variable filter. Submitted to *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Ditommaso Rocco, Marco Mucciarelli, Felice Carlo Ponzo (2011b). Un filtro tempo-frequenza per l'analisi delle caratteristiche dinamiche di strutture a comportamento non stazionario. XIV Convegno ANIDIS. 18-22 settembre 2011, Bari.
- Doebbling S.W., C.R. Farrar, M.B. Prime, (1998), A summary review of vibration-based damage identification methods. *The Shock and Vibration Digest*.
- Dolce M, Cardone D, Di Cesare A, Moroni C, Nicoletti M, Ponzo FC, Nigro D (2005). Dynamic tests on a 1:4 scaled R/C existing building: comparison of several isolation systems. 9th Assisi, Kobe
- Donoho, D. (1995). De-noising by soft-thresholding. *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 41, pp. 613–627.
- Donoho, D., and I. M. Johnstone (1994). Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. *Biometrika*. Vol. 81, pp. 425–455.
- Douglas, A.. (1997). Bandpass filtering to reduce noise on seismograms: is there a better way?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87, pp. 770–777.
- Gabor, D. (1946). *Theory of communications*. *J. Inst. Electr. Eng.*, Vol. 93, pp. 429–457.
- Galiana-Merino, J. J., J. Rosa-Herranz, J. Giner, S. Molina, and F. Rotella (2003). De-noising of short period seismograms by wavelet packet transform. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, pp. 2554–2562.
- Ivanović, S.S., M.D. Trifunac, and M.I. Todorovska (2001). On identification of damage in structures via wave

- travel times, in M. Erdik, M. Celebi, V. Mihailov, and N. Apaydin (Eds.), Proc. NATO Advanced Research Workshop on Strong-Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures, June 2-5, 1999, Istanbul, Turkey, Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 21.
- Mallat, S. (1998). *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic, New York.
- Mucciarelli, M., Bianca, M., Ditommaso, R., Gallipoli, M.R., Masi, A., Parolai, S., Picozzi, M., Milkereit, C., and Vona M. (2011). Far field damage on RC buildings: the case study of the Navelli during the L'Aquila (Italy) seismic sequence 2009. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Online First, DOI: 10.1007/s10518-010-9201-y.
- Pandey, A. K., M. Biswas, M. M. Samman (1991). Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 145, Issue 2, pp. 321-332.
- Parolai, S. (2009). Denoising of Seismograms Using the S Transform. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 1, pp. 226–234.
- Picozzi M., Milkereit C., Zulfikar C., Fleming K., Ditommaso R., Erdik M., Safak E., Jäckel K.-H., Özel O., Zschau J., Apaydin N. and the SAFER and EDIM working groups (2008). Wireless technologies for the monitoring of strategic civil infrastructures: an ambient vibration test of the Fatih Sultan Mehmet Bridge, Istanbul, Turkey. American Geophysical Union Fall Meeting 15-19 December 2008. San Francisco.
- Picozzi M., C. Milkereit, C. Zulfikar, K. Fleming, R. Ditommaso, M. Erdik, J. Zschau, J. Fischer, E. Safak, O. Özel, N. Apaydin (2010). Wireless technologies for the monitoring of strategic civil infrastructures: an ambient vibration test on the Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge in Istanbul, Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*. Volume 8, Number 3. DOI: 10.1007/s10518-009-9132-7.
- Picozzi M., S. Parolai, M. Mucciarelli, C. Milkereit, D. Bindi, R. Ditommaso, M. Vona, M.R. Gallipoli, and J. Zschau (2011). Interferometric Analysis of Strong Ground Motion for Structural Health Monitoring: The Example of the L'Aquila, Italy, Seismic Sequence of 2009. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 2, pp. 635–651, April 2011, DOI: 10.1785/0120100070.
- Pinnegar, C. R., and D. E. Eaton (2003). Application of the S-transform to prestack noise attenuation filtering. *J. Geophys. Res.*, Vol.108, no. B9, 2422, doi 10.1029/2002JB00002258.
- Ponzo F. C., Ditommaso R., Auletta G., Mossucca A. (2010). A Fast Method for Structural Health Monitoring of Italian Strategic Reinforced Concrete Buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*. DOI: 10.1007/s10518-010-9194-6.
- Ponzo F. C., Auletta G., Ditommaso R. (2011). Identificazione di vibrazioni anomale mediante la trasformata di Stockwell per il monitoraggio degli edifici in c.a. XIV Convegno ANIDIS. 18-22 settembre 2011, Bari.
- Puglia R., R. Ditommaso, F. Pacor, M. Mucciarelli, L. Luzi, M. Bianca. (2011). Frequency variation in site response over long and short time scales, as observed from strong motion data of the L'Aquila (2009) seismic sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*. DOI: 10.1007/s10518-011-9266-2.
- Rytter A. (1993). *Vibrational based inspection of Civil Engineering Structures*. Ph.D. Thesis, University of Aalborg, Denmark.
- Şafak E (1998a). Propagation of seismic waves in tall buildings, *The Structural Design of Tall Buildings*, 7(4), 295-306.
- Şafak E (1998b). Detection of seismic damage in multi-story buildings by using wavepropagation analysis. *Proc. Sixth U.S. National Conf. on Earthquake Eng., EERI, Oakland, CA, Paper No. 171*, pp. 12.
- Şafak E (1999). Wave propagation formulation of seismic response of multi-story buildings. *J. Struct. Eng., ASCE*, 125(4): 426-437.
- Simon, C., S. Ventosa, M. Schimmel, A. Heldring, J. J. Dañobeitia, J. Gallart, and A. Manuel (2007). The S-Transform and its inverses: side effects of discretizing and filtering. *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 55, pp. 4928–4937, doi 10.1109/TSP.2007.897893.
- Snieder R., and Şafak E. (2006). Extracting the Building Response Using Seismic interferometry: Theory and Application to the Millikan Library in Pasadena, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, no. 2, 586-598.
- Stockwell, R. G., L. Mansinha, and R. P. Lowe (1996). Localization of the complex spectrum: the S transform. *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 44, pp. 998–1001.
- Stubbs N., Perk S., Sikorsky C., Choi S. (2000). A global non-destructive damage assesment methodology for civil engi-neering structures. *International Journal of System Science*, 2000.
- Todorovska, M.I., and M.D. Trifunac (2008a). Impulse response analysis of the Van Nuys 7-storey hotel during 11 earthquakes and earthquake damage detection. *Struct. Control. Health Monit.* 15, 90-116. Doi: 10.1002/stc.208.
- Todorovska, M.I., and M.D. Trifunac (2008b). Earthquake damage detection in structures and early warning. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering* October 12-17, 2008, Beijing, China
- Todorovska MI, Trifunac MD (2008c). Earthquake damage detection in the Imperial County Services Building III: analysis of wave travel times via impulse response functions, *Soil Dyn. Earthq. Engrg.* 28(5), 387–404.
- Trifunac, MD, M.I. Todorovska, M.I. Manić, and B.Đ. Bulajić (2008). Variability of the fixed-base and soil-structure system frequencies of a building – the case of Borik-2 building, *Structural Control and Health Monitoring*, DOI: 10.1002/stc.277.
- Todorovska M.I. (2009a). Seismic interferometry of a soil-structure interaction model with coupled horizontal and rocking response, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 611 - 625. doi: 10.1785/0120080191.
- Todorovska M.I. (2009b). Soil-structure system identification of Millikan Library North-South response during four earthquakes (1970-2002): what caused the observed wandering of the system frequencies? *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, 626 - 635, doi: 10.1785/0120080333.
- Weaver, J. B., X. Yansun, D. M. Healy Jr, and L. D. Cromwell (1991). Filtering noise from images with wavelet transforms. *Magn. Reson. Med.*, Vol. 24, pp. 288–295.