

# Performance sismiche degli elementi non-strutturali: considerazioni sulla domanda sismica e sui dati sperimentali attualmente disponibili

## Seismic performance of non-structural elements: considerations on the seismic demand and the experimental data

Daniele Perrone<sup>1</sup>, Roberto Nascimbene<sup>2</sup> ■

### Sommario

I danneggiamenti osservati durante i passati terremoti hanno messo in evidenza come gli elementi non-strutturali rappresentino una delle maggiori problematiche sia dal punto di vista delle perdite economiche che dell'immediata funzionalità delle strutture nell'emergenza post-sisma. Per tale motivo, gli elementi non-strutturali rappresentano negli ultimi anni un importante filone della ricerca nell'ambito dell'ingegneria sismica. Nell'ottica del performance-based design ed in particolare nella valutazione delle perdite attese, gli elementi non-strutturali rivestono un ruolo fondamentale. Nel presente lavoro si propone una panoramica delle attuali conoscenze sia dal punto di vista degli studi sperimentali focalizzati alla definizione della fragilità sismica degli elementi non-strutturali che della valutazione della domanda sismica, il tutto nell'ottica del performance-based design.

**Parole chiave:** elementi non-strutturali, domanda sismica, fragilità sismica.

### Abstract

*The damage induced in non-structural elements during recent earthquakes demonstrated their vulnerability to accelerations and displacements that arise from the structure's seismic response. For this reason, the non-structural elements represent one of the most important issue in the loss estimation framework as well as in the evaluation of the immediate functionality of the structures after an earthquake. In this work a state-of-art related to the available data in terms of fragility curves for different typologies of non-structural elements has been briefly presented. The attention has been also focused on the simplified methodologies developed in order to evaluate the floor spectra and the seismic demand on non-structural elements.*

**Keywords:** non-structural elements, seismic demand, seismic fragility.

### 1. Introduzione

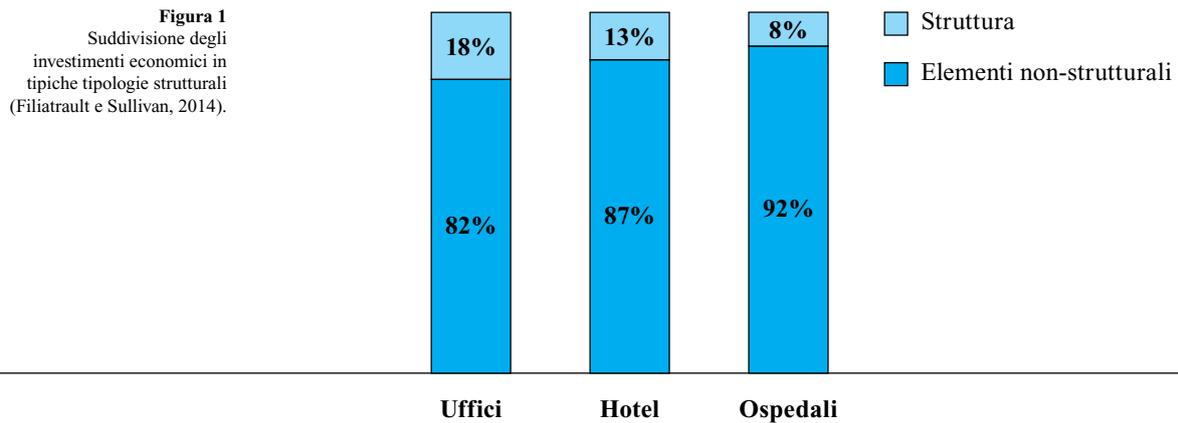
I numerosi eventi sismici che si sono susseguiti negli ultimi anni hanno messo in evidenza come nonostante una buona progettazione sismica possa garantire delle performance strutturali adeguate, gli edifici possano comunque risultare inagibili a causa del danneggiamento degli elementi non-strutturali (Villaverde, 1997). Gli elementi non-strutturali sono costituiti da tutte le componenti presenti nell'edificio che nonostante non facciano parte del sistema strutturale sono comunque soggette alle azioni dinamiche derivanti da un evento sismico. I moderni codici normativi classificano gli elementi non-strutturali in tre principali categorie: elementi architettonici, contenuti ed elementi impiantistici. Gli elementi architettonici includono per esempio i controsoffitti, le partizioni interne, le vetrate e tutti gli elementi che completano l'edificio. Gli elementi impiantistici sono realizzati all'interno dell'edificio e si rendono indispensabili per la sua funzionalità, tra essi possono essere annoverati gli impianti di condizionamento ed antincendio. Infine, i contenuti sono gli elementi che appartengono ai proprietari o agli occupanti e sono principalmente legati alla destinazione d'uso dell'edificio; tra essi rientrano ad esempio le librerie, i computer e l'arredamento interno.

Uno studio condotto da Miranda e Taghavi nel 2003 ha evidenziato come i costi connessi alle parti non-strutturali e agli impianti rappresentino gran parte degli investimenti totali nella realizzazione di un edificio (Figura 1). La ripartizione dei costi tra struttura e componenti non-strutturali è connessa principalmente alla destinazione d'uso dell'edificio; nelle strutture ospedaliere, per esempio, la parte strutturale rappresenta solo l'8% degli investimenti economici complessivi.

I danni indotti agli elementi non-strutturali durante i recenti terremoti hanno dimostrato la loro elevata suscettibilità alle azioni sismiche. Gli elementi non-strutturali generalmente sono soggetti a danneggiamenti per intensità sismiche inferiori rispetto a quelle che comportano il danneggiamento della struttura, di conseguenza questo comportamento può influenzare signifi-

<sup>1</sup> Assegnista di ricerca Post-Doc, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia (IUSS) - ✉ [daniele.perrone@iusspavia.it](mailto:daniele.perrone@iusspavia.it)

<sup>2</sup> Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (Eucentre) - Pavia - ✉ [roberto.nascimbene@eucentre.it](mailto:roberto.nascimbene@eucentre.it)



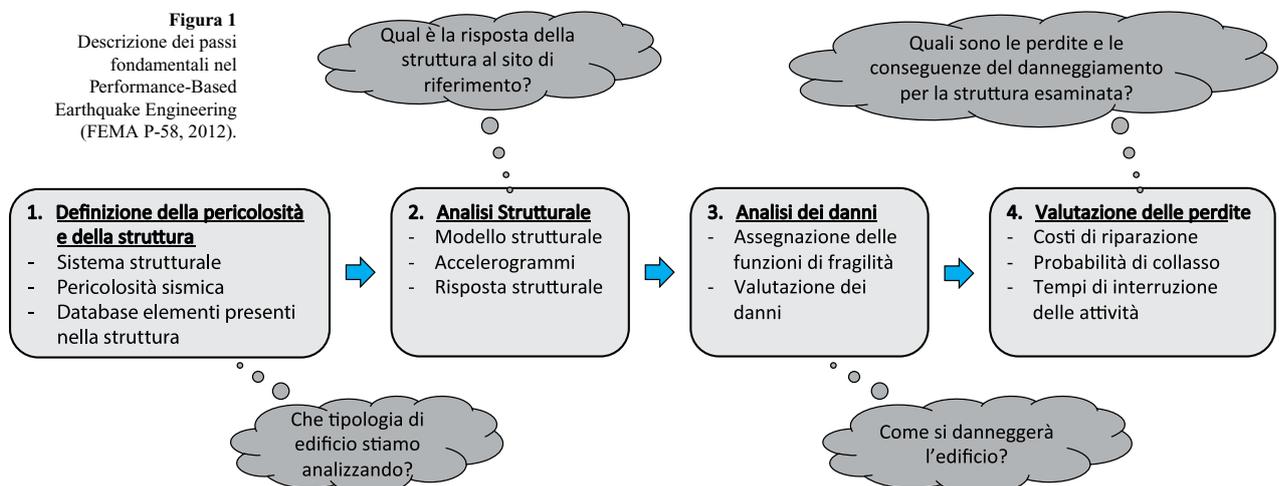
ficativamente l'immediata funzionalità a seguito di un sisma. Questa considerazione è di particolare importanza qualora si abbia a che fare con strutture di importanza strategica come gli ospedali e le scuole; tali strutture devono garantire la piena operatività nell'emergenza post-sisma non solo per la salvaguardia delle persone presenti al loro interno ma anche per fronteggiare l'emergenza nelle prime ore successive all'evento sismico.

Un esempio delle gravi conseguenze relative al danneggiamento degli elementi non-strutturali è stato osservato a seguito del terremoto avvenuto in Cile nel 2010; l'aeroporto principale di Santiago del Cile è stato chiuso per numerosi giorni a seguito del danneggiamento degli impianti e dei controsoffitti, allo stesso tempo 4 ospedali hanno perso più del 75% della loro funzionalità a causa del danneggiamento agli impianti sprinkler (Miranda et al., 2012). Significativi danni agli elementi non-strutturali sono stati riportati anche a seguito del terremoto dell'Aquila nel 2009 (Salvatore et al., 2009; Ricci et al., 2011) e dell'Emilia Romagna nel 2012 (Ercolino et al., 2012). In particolare, i principali danneggiamenti sono stati osservati nelle partizioni interne e nelle scaffalature presenti negli edifici industriali.

Sulla base di queste considerazioni appare evidente come le performance sismiche degli elementi non-strutturali rappresentino oggi un punto chiave nella progettazione sismica basata sul "performance-based earthquake engineering" (PBEE). Questa metodologia di analisi rappresenta al momento uno degli strumenti più avanzati nell'ingegneria sismica consentendo di valutare le perdite attese al variare dell'input sismico; attualmente il documento normativo di riferimento per l'applicazione di tale approccio è indubbiamente rappresentato dalla normativa FEMA P-58 (2012) sviluppata prevalentemente sulla base delle ricerche svolte presso il Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER).

La metodologia si articola in quattro passi fondamentali: 1) definizione della pericolosità sismica e del sistema da analizzare, 2) analisi strutturale, 3) analisi dei danni e 4) analisi delle perdite (Figura 2).

I primi due punti della procedura rappresentano i passi convenzionale dell'analisi sismica di un edificio. Nella prima fase è necessario definire la tipologia di struttura da analizzare collezionando tutte le informazioni che si renderanno necessarie in fase di analisi; successivamente è necessario definire la pericolosità sismica della zona in cui è ubicata la struttura selezionan-



do un opportuno set di accelerogrammi. Nella fase di analisi, il modello strutturale è soggetto ad una serie di accelerogrammi di intensità crescente e vengono registrate tutte le forze, gli spostamenti e le accelerazioni a cui la struttura è soggetta. La terza fase consiste nella valutazione dei danni, in tale fase si stabilisce la probabilità che un particolare elemento, sia esso strutturale o non-strutturale, possa subire un determinato livello di danneggiamento al variare dell'intensità sismica. Al fine di definire la probabilità di danneggiamento, per ogni stato limite esaminato, si rende necessaria la conoscenza della fragilità sismica degli elementi considerati; dato l'elevato numero di elementi strutturali e non-strutturali presenti nelle strutture appare chiaro come siano necessarie significative indagini sperimentali e numeriche al fine di definire tutte le curve di fragilità che si rendono indispensabili durante lo studio. Infine, l'ultimo passo include la valutazione di particolari variabili definite all'inizio dell'analisi, tali variabili possono essere ad esempio la valutazione delle perdite economiche o dei costi di riparazione così come la valutazione della probabilità che si abbiano feriti o vittime al variare dell'intensità sismica.

L'importanza degli elementi non-strutturali in un approccio di progettazione basato sul performance-based design appare evidente. Le due principali problematiche a cui si deve far fronte riguardano principalmente la carenza di dettagliate informazioni in merito alla fragilità sismica degli elementi non-strutturali ed il notevole onere computazionale richiesto dalle analisi dinamiche non-lineari e dal successivo post-processing dei risultati. Qualora si voglia quindi affrontare una valutazione semplificata senza dover ricorrere alle onerose analisi dinamiche non-lineari, si può ricorrere a metodologie semplificate in grado di fornire utili indicazioni in merito alla domanda sismica a cui sono soggetti gli elementi non-strutturali. Nel seguito del presente lavoro si farà una breve descrizione delle attuali conoscenze relativamente alla definizione delle curve di fragilità per varie tipologie di elementi non-strutturali e successivamente si descriveranno le principali metodologie proposte dai codici normativi e dalla comunità scientifica per valutare la domanda sismica sui componenti non-strutturali.

## 2. Curve di fragilità relative agli elementi non-strutturali

La definizione del comportamento sismico degli elementi non-strutturali rappresenta uno dei punti cruciali qualora si voglia effettuare una progettazione accurata non solo della struttura ma anche dei suoi contenuti. Negli ultimi anni una crescente attenzione è stata rivolta alla valutazione sperimentale delle performance sismiche degli elementi non-strutturali. Uno dei database più ricchi in merito alla fragilità sismica degli elementi non-strutturali è quello messo appunto dalla FEMA P-58 nell'ambito della procedura PBEE (FEMA P-58, 2012). In tale database si fa esplicito riferimento al fatto che ad oggi non sono disponibili dati sperimentali su molte tipologie di elementi e di conseguenza alcuni dei dati forniti sono basati sul giudizio di esperti. Sulla base di questa considerazione si può ben capire come sia indispensabile, nei prossimi anni, rivolgere ulteriore attenzione alla valutazione sperimentale delle performance sismiche degli elementi non-strutturali. In tal senso sono stati sviluppati specifici protocolli di carico che descrivono le procedure da adottare per effettuare prove di tipo statico e dinamico sulle componenti non-strutturali, un esempio è rappresentato dalla FEMA 461 (FEMA 461, 2007).

Sia il mondo accademico che le industrie hanno iniziato a rivolgere una particolare attenzione agli elementi non-strutturali e al miglioramento delle loro performance sismiche; in particolare, i maggiori studi disponibili in letteratura sono focalizzati sullo studio delle performance di controsoffitti, partizioni interne e tubazioni. Tali elementi rappresentano senza ombra di dubbio alcune tra le componenti più importanti essendo presenti nella maggior parte degli edifici.

Un importante contributo nello studio delle performance di queste tre tipologie di elementi è stato fornito durante il progetto NEES Non-Structural realizzato in alcune università statunitensi in congiunta con il laboratorio E-Defence in Giappone.

Nell'ambito di tale progetto, in merito alle partizioni interne, sono state testate 22 differenti tipologie di partizione; le principali variabili prese in considerazione hanno riguardato i materiali utilizzati, le connessioni, il protocollo di carico, le dimensioni del pannello e le condizioni al contorno (Davies et al., 2011). Grazie ai risultati delle prove è stato possibile popolare un ricco database con tutte le curve di fragilità delle partizioni analizzate per i differenti stati limite identificati; è stato inoltre possibile definire accurati modelli numerici per introdurre l'influenza delle partizioni nello studio di strutture più complesse. Alcuni studi molto interessanti sono stati anche realizzati al fine di studiare il comportamento di partizioni in muratura (Petroni et al., 2014; Sassun et al., 2015); queste partizioni sono rappresentative della maggior parte delle tramezzature utilizzate in Italia ed Europa. I controsoffitti rappresentano una delle tipologie non-strutturali maggiormente esaminate, anche a causa dei loro significativi danneggiamenti osservati durante numerosi eventi sismici. Oltre alle indagini condotte nell'ambito del progetto NEES Non-Structural, durante il quale sono state proposte curve di fragilità per controsoffitti realizzati con e senza miglioramento sismico (Badillo et al., 2006), numerosi altri studi sono disponibili in letteratura (Magliulo et al., 2012; Pourali et al., 2015). Nello studio condotto da Magliulo et al. sono stati identificati tre stati limite per descrivere il danneggiamento delle due tipologie di controsoffitti analizzati e sono state analizzate in dettaglio le cause delle modalità di danneggiamento osservate (Magliulo et al., 2012). Nello studio condotto da Dhakal et al. sono state analizzate le principali indicazioni fornite nei codici normativi internazionali in merito all'installazione dei controsoffitti e sono state definite le curve di fragilità di controsoffitti progettati secondo gli standard neozelandesi (Pourali et al., 2015).

In merito agli impianti, ed in particolar modo agli impianti sprinkler, lo studio di riferimento è indubbiamente quello realizzato da Tian et al. (2013). Nello studio sono state effettuate delle prove cicliche su giunti di tubazione realizzati da differenti

materiali e diametri e sono state proposte le curve di fragilità tipiche per questi elementi, inoltre è stata proposta una semplice relazione che consente di valutare il comportamento ciclico anche per tubazioni caratterizzate da diametri non testati. Infine, sono state effettuate prove su tavola vibrante su due livelli per valutare il comportamento dell'impianto nel suo complesso.

In merito alle superfici vetrate, un interessante studio è stato proposto da O'Brien et al. (2013). O'Brien et al. hanno proposto le curve di fragilità per 15 tipologie di superfici vetrate includendo anche le funzioni necessarie per la valutazione delle conseguenze relative al danneggiamento degli elementi sia in termini economici che di vite umane. Lo studio è stato sviluppato al fine di supportare lo sviluppo della norma FEMA P-58 nell'ambito della metodologia PBEE (FEMA P-58, 2012).

Con lo stesso obiettivo Porter et al. (2010) hanno proposto le funzioni di fragilità per 52 differenti attrezzature meccaniche, elettriche ed idrauliche che si possono comunemente trovare in edifici commerciali o industriali. Per la maggior parte di tali componenti sono state fornite funzioni di fragilità tenendo in conto dell'influenza della controventatura, dell'ancoraggio e dell'interazione tra gli elementi. Tutte le curve proposte sono state espresse in funzione delle accelerazioni di piano che rendono non utilizzabile l'apparecchiatura.

Infine si ritiene opportuno citare un interessante studio numerico che ha riguardato la valutazione delle curve di fragilità per elementi in grado di scorrere sulla superficie su cui sono posizionati; nello studio sono stati analizzati sia elementi vincolati che non vincolati (Lopez et al., 2003). Le curve di fragilità proposte si riferiscono a due differenti parametri per la valutazione della risposta; in particolare, si è fatto riferimento ai massimi spostamenti e alle massime accelerazioni che portano al danneggiamento dell'elemento. Lo studio ha inoltre evidenziato come, per gli elementi non-strutturali, sia indispensabile tenere in conto della componente verticale dell'azione sismica.

Sulla base dell'accurato studio dello stato dell'arte, qui sinteticamente descritto, si ritiene che, sebbene negli ultimi anni siano stati fatti notevoli passi in avanti nelle conoscenze relative al comportamento sismico delle componenti non strutturali, siano ancora necessari numerosi sforzi al fine di raggiungere lo stesso livello di conoscenza attualmente disponibile per gli elementi strutturali e di conseguenza per poter applicare in modo rigoroso anche a tali componenti le più avanzate metodologie di analisi sismica.

### 3. Considerazioni sui metodi di valutazione della domanda sismica

La valutazione della domanda sismica a cui gli elementi non-strutturali sono soggetti rappresenta un punto fondamentale sia in fase di progettazione degli elementi non-strutturali che nelle procedure di valutazione delle perdite attese. Come noto, le caratteristiche strutturali influenzano significativamente gli spostamenti e le accelerazioni a cui le componenti non-strutturali sono soggette. Nell'ottica di limitare il danneggiamento degli elementi non-strutturali potrebbe essere molto utile fare alcune considerazioni già in fase di progettazione delle strutture. Ad esempio, la domanda in termini di spostamenti di interpiano (a cui sono soggette per esempio le partizioni interne) potrebbe essere limitata incrementando la rigidità della struttura; allo stesso tempo, un incremento della rigidità della struttura comporta l'amplificazione delle azioni sugli elementi sensibili alle accelerazioni. Sulla base di queste considerazioni, in fase di progettazione sarebbe necessario identificare delle soglie che garantiscano di ottimizzare sia il comportamento degli elementi sensibili alle accelerazioni di piano che quello degli elementi sensibili agli spostamenti di interpiano.

Negli ultimi anni sono stati condotti numerosi studi al fine di sviluppare dei metodi analitici che possano essere utilizzati nella progettazione sismica. Lo studio degli elementi non-strutturali congiuntamente a quello degli elementi strutturali rappresenta tutt'ora una tematica molto complessa che richiede un significativo onere computazionale e allo stesso tempo può portare ad affrontare problematiche molto complesse relative all'iterazione dinamica tra gli elementi strutturali e non-strutturali; tali elementi avendo proprietà molto differenti potrebbero non risultare compatibili con le consuete procedure di analisi modale.

Per questo motivo i metodi maggiormente adottati per l'analisi degli elementi non-strutturali sono rappresentati dai cosiddetti "metodi a cascata", in queste metodologie la risposta dinamica della struttura è analizzata indipendentemente dall'interazione con gli elementi non-strutturali. La risposta strutturale è successivamente utilizzata come input per la valutazione della risposta degli elementi non-strutturali. Nel seguito, dopo aver fornito una breve descrizione delle indicazioni fornite nei principali codici normativi, è fornita una descrizione dei metodi semplificati attualmente disponibili per la valutazione degli spettri di piano; tali metodi consentono di definire gli spettri di piano senza la necessità di ricorrere ad analisi dinamiche non-lineari.

### 4. Codici normativi in Europa e nel mondo

A seguito del terremoto avvenuto in Alaska nel 1964 uno dei primi codici normativi a proporre una procedura per la valutazione delle forze agenti sulle componenti non-strutturali fu l'Uniform Building Code negli Stati Uniti (1964). Successivamente, la problematica è stata recepita anche da numerosi altri codici normativi internazionali che hanno proposto differenti formulazioni per la valutazione della domanda sismica e in alcuni casi linee guida per il miglioramento delle performance sismiche delle componenti non-strutturali (FEMA E-74 2012). Alla base delle formulazioni presenti nei codici normativi vi è l'assunzione che gli elementi non-strutturali possono essere considerati dinamicamente disaccoppiati dal sistema strutturale a cui essi sono connessi. La progettazione sismica degli elementi non-strutturali ha inizio dalla valutazione di una forza statica equivalente sia in direzione orizzontale che verticale, tale forza è applicata al centro di massa dell'elemento analizzato. Le

forze sono calcolate moltiplicando la massa dell'elemento non-strutturale con l'accelerazione di picco. Come per gli edifici, la forza statica equivalente è moltiplicata per un fattore di importanza che risulta essere sempre maggiore dell'unità. Inoltre, al fine di tenere in conto del comportamento non-lineare, la forza ottenuta sarà divisa per un fattore di struttura anch'esso maggiore dell'unità. Le formulazioni proposte in Europa e negli Stati Uniti per la valutazione delle accelerazioni sono leggermente diverse e numerosi studi sono stati condotti al fine di valutare la distribuzione dell'accelerazioni lungo l'altezza dell'edificio, una delle principali problematiche in tal senso riguarda l'influenza dei modi superiori negli edifici.

Un aspetto molto importante riguarda la rigidità degli elementi che si stanno analizzando; se un elemento non-strutturale risulta essere rigidamente connesso alla struttura il fattore di amplificazione della domanda sarà pari a 1; viceversa l'accelerazione di picco può essere differente da quello della struttura per elementi flessibili. I codici normativi in Europa e negli Stati Uniti definiscono gli elementi non-strutturali rigidi o flessibili in base al loro periodo naturale di vibrazione. Tipicamente elementi con un periodo superiore a 0,06 sec sono considerati flessibili; per questi elementi i codici normativi stabiliscono che l'accelerazione nel centro di massa dell'elemento sarà superiore a quella di picco al piano a cui essi sono ancorati.

L'Eurocodice 8 (CEN, 2004) - Design provisions for earthquake resistant structures, EN-1998-1:2004 (2004) stabilisce che tutti gli elementi degli edifici che potrebbero, in caso di crollo, produrre rischi per le persone o influenzare il comportamento delle strutture principali dell'edificio o la sua funzionalità, devono essere verificati nei confronti dell'azione sismica di progetto. Nel caso di elementi particolarmente importanti, l'analisi deve basarsi su modelli realistici, tuttavia, non sono fornite indicazioni su come realizzare tali modelli e sui metodi di analisi da adottare. In accordo con l'Eurocodice 8, gli effetti dell'azione sismica possono essere determinate mediante la seguente relazione:

$$F_a = \frac{(S_a \cdot W_a \cdot \gamma_a)}{q_a} \quad (1)$$

in cui:

- $F_a$  è l'azione sismica orizzontale applicata nel baricentro dell'elemento non strutturale nella direzione più sfavorevole;
- $W_a$  è il peso dell'elemento;
- $S_a$  è il coefficiente sismico applicabile ad elementi non strutturali;
- $\gamma_a$  è il coefficiente di importanza dell'elemento;
- $q_a$  è il coefficiente di comportamento dell'elemento.

Per la valutazione del coefficiente sismico è stata proposta la seguente relazione:

$$S_a = \alpha \cdot S \cdot \left[ \frac{3 \left(1 + \frac{z}{H}\right)}{1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1}\right)^z} - 0,5 \right] \quad (2)$$

in cui:

- $\alpha$  è il rapporto tra il valore di progetto dell'accelerazione ag in un terreno di tipo A e l'accelerazione di gravità g;
- $S$  è il coefficiente del terreno;
- $T_a$  è il periodo di vibrazione fondamentale dell'elemento non strutturale;
- $T_1$  è il periodo fondamentale di vibrazione della struttura nella direzione considerata;
- $z$  è la quota dell'elemento non strutturale sopra il livello di applicazione dell'azione sismica;
- $H$  è l'altezza dell'edificio misurata dalla fondazione.

Il valore del fattore  $q_a$  è compreso tra 1,0 e 2,0; indicazioni sul valore da adottare per questo coefficiente sono state fornite solo per un limitato numero di elementi.

Seppur basata sulle stesse assunzioni, la relazione fornita dalla normativa statunitense ASCE-07 (2013) risulta leggermente differente da quella proposta nell'Eurocodice. In particolare sono fornite due relazioni, la prima per la valutazione della forza orizzontale, mentre la seconda per la valutazione della componente verticale dell'azione sismica:

$$F_{ph} = \frac{0.4 a_p S_{DS}}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)} \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) W_p \quad (3)$$

$$F_{pv} = \pm 0.2 S_{DS} W_p \quad (4)$$

in cui:

- $a_p$  è il coefficiente di amplificazione dell'elemento;
- $S_{DS}$  è l'accelerazione spettrale di progetto per bassi periodi (0.2 s);
- $R_p$  è il fattore di modifica della risposta del componente;

- $I_p$  è il fattore di importanza dell'elemento;
- $z$  è l'altezza della struttura nel punto in cui l'elemento risulta collegato;
- $h$  è l'altezza della struttura dal piano delle fondazioni;
- $W_p$  è il peso dell'elemento da verificare.

La normativa statunitense fornisce inoltre dei valori minimi e massimi che devono essere rispettati. Il fattore  $a_p$  è utilizzato per simulare l'amplificazione dell'accelerazione a cui i componenti flessibili sono soggetti. Come nel caso dell'Eurocodice 8, anche la normativa ASCE-07 tiene in conto della tipologia di comportamento del componente non-strutturale mediante il coefficiente  $R_p$ , tale coefficiente ha l'analoga funzione del coefficiente di struttura utilizzato in ambito strutturale. A differenza dell'Eurocodice 8, la normativa statunitense fornisce una vasta gamma di fattori da poter utilizzare al variare della tipologia di elemento considerato. In funzione del valore assunto dal coefficiente di importanza, le forze calcolate verranno utilizzate per progettare gli ancoraggi oppure l'elemento stesso. Per valori di  $I_p=1.5$  non è sufficiente progettare gli ancoraggi bensì dovrà essere progettato l'elemento stesso ad azione sismica.

Nonostante sembrerebbe che la relazione fornita dall'Eurocodice 8 possa essere abbastanza accurata in quanto tiene conto del rapporto tra il periodo naturale di vibrazione dell'elemento in esame e il periodo della struttura, alcuni studi hanno dimostrato che errori non trascurabili possono essere commessi nella valutazione delle accelerazioni di progetto (Sullivan et al., 2013). Lo studio proposto da Sullivan et al. ha messo in evidenza che le accelerazioni a cui sono soggetti gli elementi non-strutturali possono essere significativamente sottostimate mediante le relazioni proposte dall'Eurocodice 8, soprattutto per elementi caratterizzati da bassi valori del periodo naturale di vibrazione e se il comportamento dinamico della struttura che li supporta è fortemente influenzato dai modi superiori di vibrazione. Inoltre un'altra problematica relativa alla formulazione dell'Eurocodice 8, riguarda la definizione dei fattori di struttura da applicare agli elementi non-strutturali. La proposta di soli due valori risulta molto riduttiva per coprire l'ampia gamma di elementi non-strutturali che possono essere presenti nelle strutture; di conseguenza, sarebbe utile fornire un numero maggiore di casistiche o definire delle procedure che con dettagliate analisi consentano di adottare fattori di struttura differenti se adeguatamente giustificati.

## 5. Metodologie semplificate per la valutazione degli spettri di piano

Negli ultimi anni l'attenzione di molti studiosi è stata rivolta alla definizione di metodologie semplificate che siano in grado di riprodurre fedelmente la domanda sismica agente sugli elementi non-strutturali mediante la valutazione degli spettri di piano. Uno studio condotto da Sullivan et al. (2013) ha messo in evidenza come in molti casi le formulazioni proposte dai codici normativi non siano idonee per la corretta valutazione delle accelerazioni di piano. Sullivan et al. hanno sottolineato come l'amplificazione spettrale dipenda fortemente dallo smorzamento degli elementi non-strutturali, questo aspetto non è tenuto in conto in nessuno dei principali codici normativi internazionali. Un altro aspetto molto importante riguarda l'influenza dei modi superiori nella risposta dinamica; l'Eurocodice fornisce una formulazione dipendente soltanto dal primo modo naturale di vibrazione della struttura, tuttavia, in molte strutture, come quelle caratterizzate da un significativo numero di piani, l'influenza dei modi superiori non può essere trascurata. Stesse considerazioni sono state messe in luce in uno studio condotto da Medina et al. (2006) in cui sono stati valutati gli spettri di piano per telai di differenti altezze considerando il comportamento della struttura sia elastico che non-lineare; lo studio è concluso dimostrando la non affidabilità delle correnti formulazioni presenti nei codici normativi e proponendo delle raccomandazioni per la valutazione delle accelerazioni di piano.

Tra i primi studiosi ad affrontare la problematica relativa alla definizione delle accelerazioni di piano vi sono Lin e Mahin (1985) e Sewell et al. (1988); i loro studi sono stati rivolti allo studio dell'influenza del comportamento non-lineare delle strutture sugli spettri di piano. Numerosi altri studi sono disponibili sullo stesso argomento considerando sia strutture ad un singolo grado di libertà che a più gradi di libertà (Politopoulos e Feau, 2007; Politopoulos, 2010). Rogriguez et al. (2002) hanno studiato come le accelerazioni orizzontali si propagano in un edificio a setti caratterizzato da diagrammi rigidi. Singh et al. hanno proposto due metodi per valutare la domanda sismica su elementi non-strutturali sia flessibili che deformabili (Singh et al., 2006); i metodi proposti correlano i periodi e lo smorzamento degli elementi non-strutturali analizzati con quelli della struttura a cui sono connessi al fine di determinare le accelerazioni sulle componenti non-strutturali. Petrone et al. (2015) hanno condotto uno studio parametrico al fine di proporre un metodo di valutazione della domanda sismica a cui sono soggetti gli elementi non-strutturali leggeri sensibili alle accelerazioni a seguito di terremoti di bassa intensità; lo studio è stato condotto analizzando telai in c.a. di differenti altezze progettati secondo l'Eurocodice 8.

Recentemente una metodologia di valutazione degli spettri di piano molto promettente è stata proposta da Sullivan et al. (2013); Sullivan et al. hanno evidenziato che al fine di ottenere degli spettri di piano che riproducano in modo adeguato il comportamento strutturale devono essere presi in considerazione i seguenti aspetti:

- Le caratteristiche dinamiche della struttura filtrano le azioni sismiche a cui gli elementi non-strutturali saranno soggetti; la domanda in termini di accelerazione spettrale sarà incrementata qualora il periodo naturale di vibrazione dell'elemento analizzato sarà prossimo al periodo fondamentale della struttura, mentre tenderà a diminuire quando i due periodi sono

notevolmente differenti.

- Introdurre l'influenza dello smorzamento che caratterizza l'elemento che si sta analizzando. In Figura 3c è riportato un esempio dell'effetto dello smorzamento per tre crescenti valori di smorzamento  $\xi_{c1}$ ,  $\xi_{c2}$  e  $\xi_{c3}$ .
- Influenza dell'intensità sismica. Incrementando l'intensità sismica, le accelerazioni di piano tenderanno ad aumentare. Tuttavia, tale incremento non sarà infinito ma sarà limitato dalla resistenza laterale della struttura. In Figura 3d è riportato un esempio per una struttura ad un singolo grado di libertà (SDOF) sottoposta a tre differenti intensità sismiche. Una volta raggiunta la massima resistenza laterale della struttura (Figura 3b) le accelerazioni non tenderanno più ad aumentare ma si avrà un ampliamento del range di periodi che saranno sottoposti all'accelerazione massima a causa dell'instaurarsi del comportamento non lineare nella struttura.

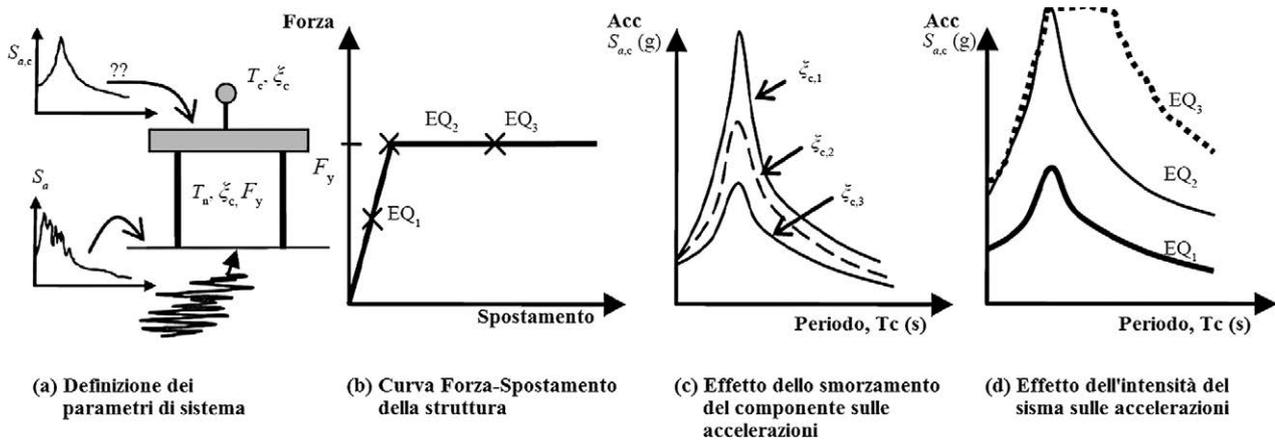


Figura 3 - Fattori che influenzano gli spettri di piano (Filiatrault e Sullivan, 2014; Sullivan et al., 2013).

Sulla base di tutti i punti su citati Sullivan et al. (2013) hanno proposto un set di equazioni che consentono di determinare gli spettri di piano per una struttura SDOF. Di seguito si riportano le equazioni proposte:

$$S_{a,c}(T_c) = \frac{T_c}{T_n} [a_{max}(DAF_{max} - 1)] + a_{max} \quad T_c < T_n \quad (5)$$

$$S_{a,c}(T_c) = a_{max} DAF_{max} \quad T_n < T_c < T_e \quad (6)$$

$$S_{a,c}(T_c) = a_{max} DAF \quad T_c > T_n \quad (7)$$

in cui  $S_{a,c}(T_c)$  rappresenta l'accelerazione spettrale per un elemento non-strutturale caratterizzato da un periodo pari a  $T_c$ ,  $a_{max}$  è l'accelerazione massima della struttura (ottenuta dividendo la resistenza laterale del sistema SDOF con la massa sismica) -  $T_n$  è il periodo naturale elastico della struttura, mentre  $T_e$  rappresenta il periodo effettivo della struttura.

Il termine DAF rappresenta il fattore di amplificazione dinamica, esso costituisce il rapporto tra l'accelerazione spettrale sul componente non-strutturale e l'accelerazione spettrale di piano. Sullivan et al. hanno proposto la seguente relazione per la valutazione di tale amplificazione dinamica:

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{(1-\frac{1}{\beta})^2 + \xi_c}} \quad (8)$$

la relazione è considerata valida per strutture caratterizzate da un periodo pari a 0.3 sec o superiore.

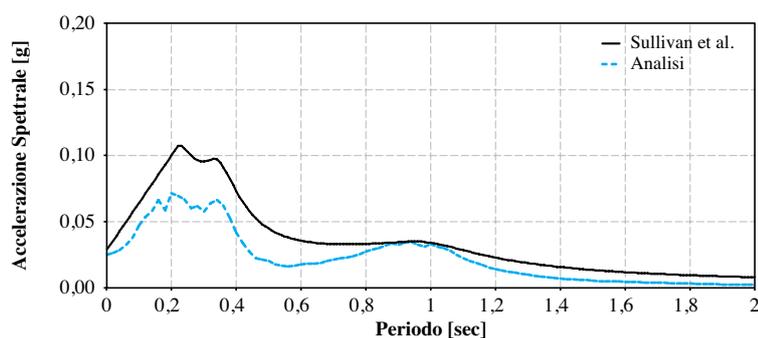
Calvi e Sullivan hanno proposto successivamente una procedura al fine di estendere la procedura alle strutture a più gradi di libertà (MDOF) in campo elastico (Calvi e Sullivan, 2014). Di seguito si riportano i passi fondamentali descritti nella procedura:

1. Effettuare l'analisi dinamica per determinare i modi naturali di vibrazione della struttura ed in particolar modo i periodi, le masse partecipanti e le forme modali;
2. Valutare gli spettri di piano per ogni modo di vibrazione mediante le equazioni precedentemente descritte;
3. Gli spettri così ottenuti sono combinati mediante la procedura SRSS al fine di determinare lo spettro effettivo sugli elementi non-strutturali per un determinato piano;

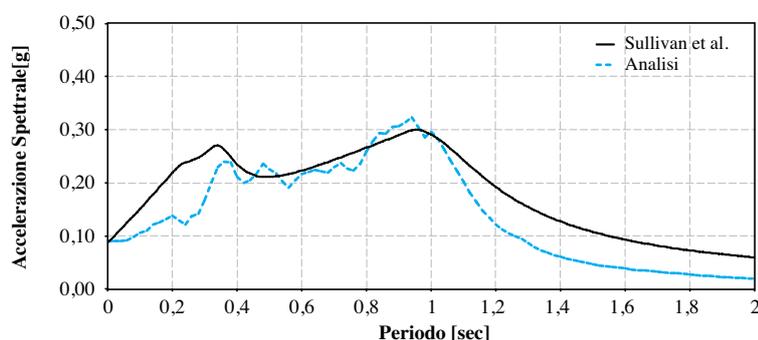
4. Il punto precedente si applica solo ai piani alti. Per quanto riguarda i piani inferiori il metodo richiede alcune modifiche. Affinché un segnale in accelerazione venga filtrato, infatti, occorre che la frequenza naturale del filtro sia più bassa di quella del segnale. In caso contrario la funzione risultante avrà ampiezza costante pari a 1.

In Figura 4 è riportato un esempio relativo ad una struttura in c.a. realizzata negli anni '70 e caratterizzata da 4 impalcati; la linea continua rappresenta lo spettro ottenuto mediante la metodologia proposta da Sullivan et al. (2013) mentre la linea tratteggiata rappresenta lo spettro ottenuto mediante le analisi dinamiche non lineari. Dal confronto tra i grafici si può notare l'ottima affidabilità della metodologia proposta da Sullivan et al.

**Figura 4**  
Confronto tra gli spettri di piano ottenuti dall'analisi e quelli ottenuti mediante la metodologia proposta da Sullivan et al.



a) Piano Terra



b) Ultimo Piano

## 6. Conclusioni

Negli ultimi anni l'importanza degli elementi non strutturali nella valutazione delle perdite attese è stata sottolineata sia dai danneggiamenti osservati durante i passati terremoti che dal crescente numero di studi proposti su questa tematica dalla comunità scientifica. Nel presente lavoro è stata svolta una riesamina delle principali indagini sperimentali che sono state svolte fino ad oggi nell'ambito della definizione della fragilità sismica degli elementi non-strutturali ed è stata focalizzata l'attenzione sulle principali metodologie attualmente disponibili per la valutazione della domanda sismica. I risultati di questo studio hanno evidenziato che negli ultimi anni sono stati svolti significativi passi in avanti, tuttavia, per colmare il gap con l'attuale stato delle conoscenze in merito al comportamento strutturale, saranno necessari ulteriori sforzi sia da parte del mondo accademico che delle industrie coinvolte nel mercato relativo agli elementi non-strutturali.

## Bibliografia

- Villaverde R. (1997) - Seismic design of secondary structures: state of the art, Journal of Structural Engineering ASCE, 123(8) 1011-1019.  
Miranda E., Taghavi S. (2003) - Estimation of Seismic Demands on Acceleration-sensitive Nonstructural Components in Critical Facilities, Proceedings of the Seminar on Seismic Design, Performance, and Retrofit of Nonstructural Components in Critical Facilities, ATC 29-2,

Newport Beach, CA, 347-360.

- Filiatrault A., Sullivan T.J. (2014) - Performance-based seismic design of nonstructural building components: The next frontier of earthquake engineering, *Earthquake engineering and earthquake vibration* 13 (1) 17-46.
- Miranda E., Mosqueda G., Retamales R., Pekcan G. (2012) - Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile Earthquake, *Earthquake Spectra* 28(S1) S453-S471.
- Salvatore W., Caprili S., Barberi V. (2009) - Rapporto dei danni provocati dall'evento sismico del 6 Aprile sugli edifici scolastici del centro storico dell'Aquila, available online: <http://www.reluis.it/>
- Ricci P., De Luca F., Verderame G.M. (2011) - 6th April 2009 L'Aquila earthquake, Italy: reinforced concrete building performance, *Bulletin of earthquake engineering* 9 (1) 285-305.
- Ercolino M., Petrone C., Coppola O., Magliulo G. (2012) - Report sui danni registrati a San Felice sul Panaro (Mo) in seguito agli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012 - v1.0, available on line: <http://www.reluis.it/>.
- FEMA P-58 (2012) - Seismic Performance Assessment of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- FEMA 461 (2007) - Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Davies R., Retamales R., Mosqueda G., Filiatrault A. (2011) - Experimental seismic evaluation, model parameterization and effects of cold-formed steel-framed gypsum partition walls on the seismic performance of an essential facility, Report MCEER-11-0005.
- Petrone C., Magliulo G., Manfredi G. (2014) - Shake table tests for the seismic assessment of hollow brick internal partitions, *Engineering Structures* 72:203-214.
- Sassun K., Sullivan T.J., Morandi P., Cardone D. (2015) - Characterising the in-plane seismic performance of infill masonry, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 49(1).
- Badillo-Almaraz H., Whittker A.S., Reinhorn A.M., Cimellaro G.P. (2006) - Seismic fragility of suspended ceiling systems, Report MCEER-06-0001.
- Magliulo G., Pentangelo V., Maddaloni G., Capozzi V., Petrone C., Lopez P., Talamonti R., Manfredi G. (2012) - Shake table tests for seismic assessment of suspended continuous ceilings, *Bulletin of Earthquake Engineering* 10(6):1819-1832.
- Pourali A., Dhakal R.P., MacRae G.A. (2015) - Shake table tests of perimeter-fixed suspended ceilings, *Proceeding of the 2015 NZSEE Conference*.
- Tian Y., Filiatrault A., Mosqueda G. (2013) - Experimental seismic study of pressurized fire sprinkler piping systems, Report MCEER-13-0001.
- O'Brien W.C., Memari A.M., Kremer P.A., Behr R.A. (2012) - Fragility curves for architectural glass in stick-built glazing systems, *Earthquake Spectra* 28(2):639-665.
- Porter K., Johnson G., Sheppard R., Bachman R. (2010) - Fragility of Mechanical, Electrical, and Plumbing Equipment, *Earthquake Spectra* 26(2):451-472.
- Lopez Garcia D., Soong T.T. (2003) - Sliding fragility of block-type non-structural components. Part 1: Unrestrained components, *Earthquake Engineering & Structural dynamics* 32(1):111-129.
- Lopez Garcia D., Soong T.T. (2003) - Sliding fragility of block-type non-structural components. Part 2: Restrained components, *Earthquake Engineering & Structural dynamics* 32(1):131-149.
- UBC, Uniform Building Code (1964) - 6<sup>th</sup> ed. International Conference of Building Officials, Whittier Narrow.
- FEMA (2012) - FEMA E-74 Reducing the risks of nonstructural earthquake damage - A practical guide.
- Presidenza del Consiglio dei Ministri, Linee guida per la riduzione della vulnerabilità di elementi non strutturali, arredi ed impianti (2009).
- CEN, Eurocode 8 - Design provisions for earthquake resistant structures, EN-1998-1:2004 (2004) - Comite European de Normalization, Brussels, Belgium.
- ASCE (2013) - Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI Standard 7-10, American Society of civil engineers, Reston.
- Sullivan T.J., Calvi P.M., Nascimbene R. (2013) - Towards improved floor spectra estimates for seismic design, *Earthquakes and Structures* 4(1):109-132.
- Medina R., Sankaranarayanan R., Kingston K.M. (2006) - Floor response spectra for light components mounted on regular moment-resisting frame structures, *Engineering Structures* 28:1927-1940.
- Lin J., Mahin S. (1985) - Seismic response of light subsystems on inelastic structures, *Journal of Structural Engineering* 111(2):400-417.
- Sewell R.T., Cornell C.A., Toro G.R., McGuire R.K., Kassawara R.P., Sing A. (1988) - Factors influencing floor response spectra in nonlinear multi-degree-of-freedom structures, Report N082, Stanford University.
- Politopoulos I., Feau C. (2007) - Some aspects of floor spectra of 1DOF nonlinear primary structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 36(8):975-993.
- Politopoulos I. (2010) - Floor spectra of MDOF nonlinear structures, *Journal of Earthquake Engineering* 14(5):726-742.
- Rodriguez M.E., Restrepo J.I., Carr A.J. (2002) - Earthquake-induced floor horizontal accelerations in buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 31(3):693-718.
- Singh M., Moreschi L., Suarez L., Matheu E. (2006) - Seismic design forces II: flexible nonstructural components, *Journal of Structural Engineering* 132(10):1533-1542.
- Singh M., Moreschi L., Suarez L., Matheu E. (2006) - Seismic design forces I: rigid nonstructural components, *Journal of Structural Engineering* 132(10):1524-1532.
- Petrone C., Magliulo G., Manfredi G. (2015) - Seismic demand on light acceleration-sensitive nonstructural components in European reinforced concrete buildings, *Earthquake engineering & Structural dynamics* 8(10):1203-1217.
- Calvi P.M., Sullivan T.J. (2014) - Estimating floor spectra in multiple degree of freedom systems, *Earthquake and Structures* 7(1):17-38.

## **Gli Autori**

### **Daniele Perrone**

Daniele Perrone è assegnista di ricerca Post-Doc presso l'Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia (IUSS Pavia). Si è laureato nel 2010 in Ingegneria Civile e ha conseguito il dottorato di ricerca in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture nel 2013 presso l'Università del Salento. La sua attività di ricerca è prevalentemente rivolta alla valutazione della domanda sismica sugli elementi non strutturali e alla valutazione della loro fragilità sismica nonché allo studio del comportamento sismico delle strutture esistenti in c.a. e muratura. Dal 2016 è membro dell'associazione SPONSE (International Association for the seismic performance of non-structural elements).

### **Roberto Nascimbene**

Laureato in Ingegneria Civile presso l'Università di Pavia, ha conseguito il Dottorato nel 2003 in "Sail Modelling for maximal speed optimum design" presso la medesima Università. All'interno del Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (Eucentre) di Pavia è responsabile dell'area di ricerca "Analisi Strutturale" e della Formazione Professionale. È inoltre Docente incaricato presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pavia, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Architettura e membro del Consiglio dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Pavia per il quadriennio 2013-2017. Ha pubblicato numerosi articoli su rivista ed a convegni nazionali ed internazionali, di cui è stato anche relatore, ed è coautore del libro "Progettare i gusci" (ISBN 978-88-6198-061-7). Svolge l'attività di relatore in seminari e corsi in svariati ambiti fra i quali analisi, modellazione e verifica sismica di edifici esistenti in c.a., codici normativi internazionali per le strutture, analisi della vulnerabilità sismica dei serbatoi in acciaio.