

# Studio della risposta di elementi non strutturali di edifici scolastici soggetti ad eventi sismici

## Role and importance of non-structural elements in the seismic vulnerability of school buildings

Paolo M. Calvi<sup>1</sup>, Matteo Moratti<sup>2</sup>, André Filiatrault<sup>3-4</sup> ■

### Sommario

Storicamente, l'ingegneria sismica si è focalizzata sulla risposta di sistemi strutturali e su come mitigare danni strutturali indotti da eventi sismici. Tuttavia, in parallelo con l'implementazione di approcci progettuali basati sulla risposta delle strutture, capire l'importanza del comportamento degli elementi non strutturali e rendere tali elementi parte integrante della progettazione ed analisi sismica di un edificio ha assunto importanza fondamentale.

Una struttura può raggiungere una prestazione desiderata soltanto se tutti gli elementi, strutturali e non, sono in grado di rispondere ad un evento sismico in maniera controllata, in linea con le raccomandazioni del progettista. Infatti, il collasso di elementi architettonici, meccanici o elettrici, così come quello del contenuto di un edificio, può ridurre significativamente la prestazione sismica dell'intero sistema.

Danni ad elementi non strutturali sono stati osservati in molte occasioni nel corso di eventi sismici avvenuti in tutto il mondo. Oltre a provocare immense perdite finanziarie dirette ed indirette, il collasso di elementi non strutturali ha sovente limitato la funzionalità di strutture di importanza strategica. Inoltre, elementi non strutturali progettati in maniera inadeguata possono diventare un pericolo per la sicurezza delle persone presenti. La risposta degli elementi non strutturali è stata in molte occasioni preoccupante per quanto riguarda gli edifici scolastici. Danneggiamento a vani scale e vie di uscita, così come il collasso di controsoffitti e muri di partizione, sono situazioni ricorrenti a seguito di eventi sismici in strutture scolastiche. È evidente che un edificio in simili condizioni non può considerarsi sicuro per i suoi occupanti, anche se il sistema strutturale è effettivamente in grado di sostenere le azioni laterali indotte dall'evento sismico. È importante ricordare che i complessi scolastici sono strutture critiche anche per il fatto che sono generalmente occupate da un gran numero di utenti, minorenni per la maggior parte, determinando un'esposizione notevole in sede di valutazione del rischio sismico. Inoltre gli edifici scolastici sono da considerarsi come edifici strategici dal momento che, in molte situazioni, vengono utilizzati come ricoveri nel corso di emergenze.

La risposta sismica degli elementi non strutturali è stata studiata in maniera superficiale e solo negli ultimi anni l'interesse per questo tema è andato crescendo. In confronto a tutto il lavoro svolto relativamente a sistemi strutturali nel corso degli ultimi decenni, la ricerca scientifica disponibile sul tema degli elementi non strutturali è ad un livello decisamente preliminare e le normative disponibili sono tipicamente di natura empirica e basate in gran parte sulle osservazioni di terremoti del passato, anziché su oggettiva evidenza analitica e sperimentale.

L'obiettivo del presente documento è quello di rivisitare una serie di eventi sismici registrati in diverse parti del mondo nel corso degli ultimi 50 anni, prestando particolare attenzione ai danni non strutturali sofferti dagli edifici scolastici.

**Parole chiave:** Elementi non-strutturali, risposta sismica di edifici scolastici, eventi sismici storici, ingegneria sismica "performance-based".

### Abstract

*Historically, earthquake engineers have focused on the response of structural systems and ways to mitigate structural damage. However, with the development and implementation of performance-based earthquake engineering, it is crucial to understand the significance of non-structural damage and to integrate non-structural elements in the seismic design and assessment processes.*

*A building can achieve a targeted performance only if both structural and non-structural elements respond to a seismic event in a "controlled" and "harmonized" manner, as intended by the designer. In fact, failure*

<sup>1</sup> University of Washington at Seattle (USA)

<sup>2</sup> Studio Calvi, Ingegneria e Architettura, Pavia

<sup>3</sup> State University of New York at Buffalo (USA)

<sup>4</sup> Istituto Universitario di Studi Superiori (IUSS) di Pavia

*of architectural, mechanical or electrical components as well as contents can lower the performance level of the entire building system.*

*Earthquake-induced non-structural damage was observed in many occasions over numerous earthquakes worldwide. In addition to causing great financial losses (the investment in non-structural elements normally accounts for more than two thirds of the building total investment), the collapse of non-structural elements has often limited the functionality of critical facilities. Furthermore, poorly designed non-structural elements can become a safety hazard or can hamper the safe movement of occupants evacuating buildings, or of rescue workers entering buildings.*

*Worrisome seismic performances of non-structural elements were often observed in relation to educational buildings. Damaged stairs and damaged exit doors as well as collapsed suspended ceilings and partition walls are common outcomes of a seismic event in school structures. It is evident that a building in similar conditions cannot be defined safe for its occupants, even though the structural system is capable of withstanding the lateral forces induced by the earthquake. Note that the criticality of school buildings is enhanced by the fact that they are normally very densely occupied, mostly by minors. In addition, schools represent strategic buildings as many communities use them as emergency shelters.*

*The seismic response of non-structural elements is overall poorly understood. In contrast with the massive amount of work conducted over the course of the past several decades on the behaviour of structural systems, basic research work in the area of non-structural elements has been sparse, and the available codes and guidelines are usually empirical in nature and, for the most parts, based on past experiences rather than on objective experimental and analytical results. This report presents a brief overview of non-structural damage to school buildings observed over the course of recent earthquakes worldwide with a focus on damage from past earthquakes in the United States (US) and in Italy.*

**Keywords:** Non-structural building components, Seismic performance of school, Historical seismic events, Performance-based earthquake engineering.

## **1. Introduzione**

Tutte le componenti di un edificio che non sono attualmente progettate per resistere alle forze laterali indotte da un evento sismico possono essere identificate come elementi non strutturali. Normalmente, le normative internazionali esistenti classificano gli elementi non strutturali all'interno di tre categorie:

1. componenti architettoniche;
2. attrezzature meccaniche ed elettriche;
3. contenuti.

Delle componenti architettoniche fanno parte muri di partizione, parapetti, camini, attici, pavimenti flottanti, controsoffitti, ornamenti, cartelloni e manifesti, ingressi e scale indipendenti, rivestimenti, finestre e sistemi di illuminazione.

Tra le attrezzature meccaniche ed elettriche sono presenti macchinari HVAC, motori, turbine, pompe, compressori, generatori, batterie, trasformatori, pannelli di controllo, attrezzature di comunicazione, computers, torri di raffreddamento, sistemi di tubazioni, condotte e canali elettrici.

I contenuti sono elementi non strutturali che appartengono ai proprietari o agli occupanti dell'edificio. Si tratta di armadietti, librerie e di tutti gli articoli di arredamento che sono presenti. Gli elementi non strutturali costituiscono la frazione maggiore del costo totale di un edificio tipico. Secondo Miranda e Taghavi (2003), negli Stati Uniti gli elementi non strutturali contano per cir-

ca 82% del costo totale di un complesso di uffici, 87% del costo totale di un albergo e 92% del costo totale di un ospedale. Inoltre, i danni agli elementi non strutturali sono indotti da eventi sismici di magnitudo molto inferiori a quelli che provocano danni alla struttura (Miranda e Taghavi, 2003). Terremoti recenti hanno dimostrato che la comunità scientifica possiede gli strumenti adeguati per controllare la risposta strutturale di un sistema soggetto a carichi sismici. Gli approcci progettuali moderni, implementati per sistemi strutturali, si sono dimostrati efficaci nel limitare i danni strutturali indotti da un evento sismico. Per esempio, nel corso del terremoto di Nisqually, Seattle, avvenuto il 28 Febbraio 2001, si sono riscontrati danni strutturali quasi esclusivamente in edifici in muratura non armata, mentre tutti gli edifici progettati in linea con i criteri sismici moderni hanno risposto al sisma in maniera soddisfacente (Creager et al., 2001). Nell'occasione, le vittime si sono limitate ad una sola persona. Allo stesso modo, il terremoto di Kona nelle isole Hawaii del 2006, ha prodotto esclusivamente danni non strutturali e qualche danno strutturale di lieve entità (Chock et al., 2006).

In entrambi i casi, la maggior parte dei danni economici, rispettivamente dell'ordine di 2 miliardi e 100 milioni di dollari americani, sono stati attribuiti ai danni non strutturali, di gran lunga superiori ai danni sofferti dalle componenti strutturali.

Questo è stato il caso, per esempio, di numerosi edifici scolastici, università e biblioteche che in occasione dei due eventi sismici a cui si è accennato, così come in occasione di altri eventi (si faccia riferimento alla Sezione 2), si sono comportati in maniera soddisfacente ma hanno sofferto danni significativi agli elementi non strutturali.

Tra i numerosi danni non strutturali che si sono osservati, i più comuni hanno interessato vani scale, uscite di sicurezza, controsoffitti e muri di partizione. È evidente che edifici che si ritrovano in simili condizioni al termine di un terremoto non possono definirsi sicuri per gli occupanti, anche se il sistema strutturale si rivela in grado di sostenere le forze laterali indotte dall'evento sismico. Gli elementi non strutturali parte di un edificio dovrebbero infatti essere progettati così da non trasformarsi in elementi pericolosi nel corso di un terremoto e in modo da non impedire agli occupanti di evacuare o ai soccorritori di accedere all'edificio in sicurezza.

## 2. Prestazione sismica di elementi non strutturali nel corso di terremoti del passato

### 2.1 Overview

In questa sezione, si discute brevemente dell'impatto degli elementi non strutturali nei confronti della prestazione globale di un numero di edifici scolastici, nel corso di sette terremoti verificatisi negli Stati Uniti nel corso degli ultimi 50 anni. Gli eventi sismici considerati sono: il terremoto dell'Alaska del 1964, il terremoto di San Fernando del 1971, il terremoto di Loma Prieta del 1989, il terremoto di Northridge del 1994, il terremoto di Nisqually del 2001, il terremoto di Kona (Hawaii) del 2006 e il terremoto di South Napa del 2014. La stessa analisi è altresì condotta con riferimento ai terremoti italiani di L'Aquila

del 2009 e dell'Emilia Romagna del 2012, ai terremoti della Nuova Zelanda del 2010 e 2011 e al terremoto del Cile del 2010. Tutti gli eventi sismici selezionati sono riportati in Tabella 1.

### 2.2 Prestazione sismica durante il terremoto dell'Alaska del 1964

Il terremoto dell'Alaska del 1964, avvenuto il 27 Marzo 1964 alle ore 17:36, fu un evento sismico di magnitudo 8.2 e provocò uno scuotimento della durata di 3 o 4 minuti. Il terremoto causò 131 vittime nonché il collasso totale o parziale di un gran numero di edifici pubblici e privati. Le perdite economiche furono stimate pari a 2.3 miliardi di dollari americani (<http://earthquake.usgs.gov/>). Il terremoto dell'Alaska del 1964 corrisponde al più potente evento sismico nella storia nordamericana e il secondo più potente evento sismico di tutti i tempi mai registrato.

Negli Stati Uniti, il 27 marzo 1964 segna la data in cui, per la prima volta, fu redatta una ricognizione dettagliata sui danni sofferti dagli elementi non strutturali. A tal proposito, una discussione esauriente si può trovare nel trattato "The Great Alaska Earthquake of 1964" (Committee on the Alaska Earthquake, 1973).

I danni sofferti dagli elementi non strutturali nel corso del terremoto dell'Alaska furono molto estesi. Furono particolarmente danneggiati elementi come facciate, controsoffitti, muri di partizione, ascensori, impianti di illuminazione, sistemi elettrici, sistemi idraulici, sistemi di ventilazione ed aria condizionata, sistemi di riscaldamento, sistemi antincendio e contenitori vari. Nella maggior parte dei casi, i costi associati alla riparazione/sostituzione di elementi non strutturali furono di gran lunga maggiori di quelli associati alla riparazione dei sistemi strutturali. Tuttavia, fu opinione comune dei ricognitori e degli esperti in carica di condurre le valutazioni

Tabella 1 - Lista dei terremoti selezionati

Terremoto	Data	Ora Locale	Magnitudo	Danni	Vittime
Alaska	Marzo 27, 1964	17:36	8.2	\$2.3 miliardi	131
San Fernando	Febbraio 9, 1971	6:00	6.6	\$6.6 miliardi	65
Loma Prieta	Ottobre 17, 1989	17:04	6.9	\$25 miliardi	65
Northridge	Gennaio 17, 1994	4:30	6.7	\$73 miliardi	60
Nisqually	Febbraio 28, 2001	10:54	6.8	\$2 miliardi	1
Hawaii	Ottobre 15, 2006	-	6.7 e 6.0	> \$100 milioni	-
L'Aquila	Aprile 6, 2009	6:32	6.3	\$16 miliardi	305
Chile	Febbraio 27, 2010	3:34	8.8	\$30 miliardi	521
New Zealand	Settembre 4, 2010	4:36	7.1	\$3 miliardi	181
	Febbraio 22, 2011	12:51	6.2	\$30 miliardi	
Emilia Romagna	Maggio 20, 2012	4:03	5.9	\$15.8 miliardi	24
	Maggio 29, 2012	4:03	5.8		
South Napa	Agosto 24, 2014	3:20	6.0	\$1 miliardi	1

post-terremoto, che la maggior parte dei danni agli elementi non strutturali si sarebbe potuta prevenire mettendo in atto piccoli accorgimenti, e a costi solo di poco superiori a quelli sostenuti per realizzare i progetti originali.

Al tempo in cui avvenne il terremoto era riconosciuto che, normalmente, gli elementi non strutturali rappresentavano circa due terzi del costo totale di un edificio, e che gli stessi rappresentavano una componente chiave nella determinazione della risposta sismica globale di un sistema strutturale. Tuttavia, l'attenzione dedicata dalla comunità scientifica alle prestazioni sismiche degli elementi non strutturali era molto limitata per non dire totalmente assente. La normativa principale di riferimento negli Stati Uniti era l'edizione del 1961 dello *Uniform Building Code* (UBC), pubblicato dall'*International Conference of Building Officials* (ICBO). Tale normativa non conteneva alcun riferimento al comportamento sismico e alla progettazione degli elementi non strutturali. L'impatto dei danni agli elementi non strutturali fu significativo per un gran numero di edifici situati in diverse città. Tuttavia, la maggior parte dei danni si verificò nella città di Anchorage. Tra gli edifici colpiti duramente dal sisma ci furono ospedali, alberghi, magazzini, uffici ed edifici scolastici.

### 2.2.1 Prestazione degli elementi non strutturali in edifici scolastici

Gli edifici scolastici furono duramente colpiti dal sisma, che provocò danni strutturali e non strutturali di vario genere. Uno dei danni non strutturali più comuni fu il collasso dei controsoffitti. Questo tipo di problema fu osservato in scuole come Whittier School, Kenai High School e West Anchorage High School, tra le altre. I detriti deri-

vanti dal collasso di un controsoffitto e dal collasso di un impianto di illuminazione, per esempio, causarono il danneggiamento dell'entrata principale alla Whittier School (Figura 1a).

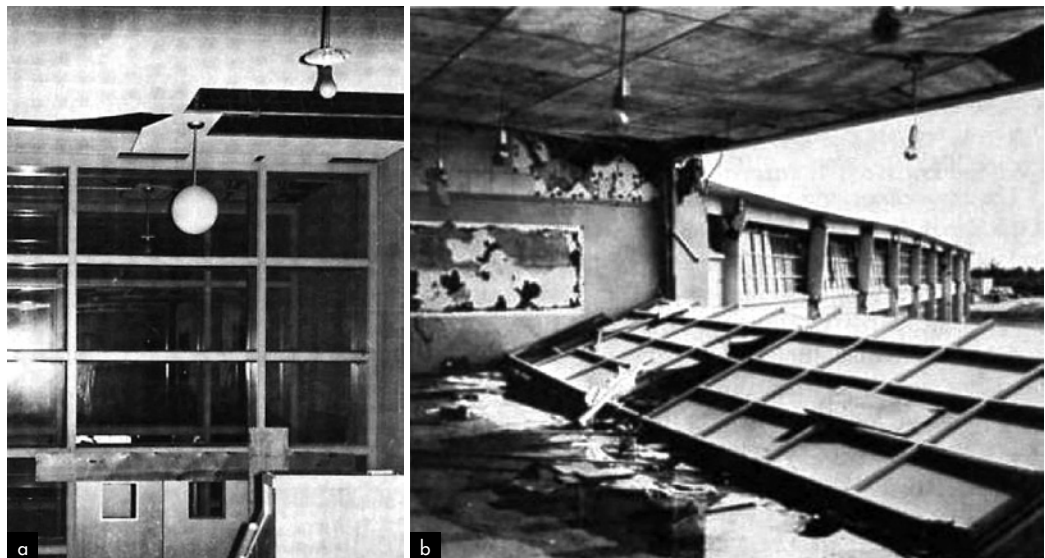
Uscite bloccate dovute al danneggiamento dei telai e alla fessurazione degli intonaci furono problemi osservati in diverse scuole. Questo fu per esempio il caso dell'auditorium alla West Anchorage High School. Il danneggiamento delle uscite di sicurezza è particolarmente preoccupante dal momento che potrebbe limitare o impedire del tutto l'evacuazione dell'edificio da parte degli occupanti.

Estesa fessurazione dei muri di partizione interni fu osservata in molte scuole in seguito al terremoto dell'Alaska. In alcuni casi, le pesanti partizioni esterne in muratura mostrarono una severa fessurazione o il completo collasso fuori piano, come risultato dell'azione perpendicolare combinata di spostamenti interpiano e accelerazioni di piano. Tra questi, si porta come esempio il caso della West Anchorage High School (Figura 1b).

Altri danni non strutturali comuni riguardarono per esempio sprinklers, suscettibili agli spostamenti differenziali tra i punti di ancoraggio (e.g. Central Junior High School), piastrelle e rivestimenti in pietra (e.g. East Anchorage High School and Eagle River School) e vani scala.

In alcune scuole si osservarono danni ai serbatoi d'acqua, suscettibili alle eccessive vibrazioni indotte dal terremoto. In particolare, le forze laterali indotte dal sisma indussero eccessivi momenti flettenti alla base dei serbatoi provocando carichi verticali eccessivi sui sistemi di supporto. Questo fu per esempio il caso della Central Junior High School, dove i supporti di un pesante generatore di acqua calda cedettero, così che il serbatoio collassò danneggiando irrimediabilmente anche un sistema di distribuzione di gas.

Figura 1  
a) Sistemi di illuminazione e controsoffitti danneggiati all'entrata principale della Whittier School;  
b) Collasso fuori piano di un muro di partizione esterno in un'aula della West Anchorage High School. (Committee on the Alaska Earthquake, 1973).



Infine, una componente significativa del danno non strutturale globale in edifici scolastici è legata al ribaltamento degli arredi e di contenuti di vario genere. In Figura 2b per esempio, sono illustrati il collasso di alcune librerie e armadietti da archivio in una sezione della West Anchorage High School Library. È interessante notare come il collasso di alcuni elementi sia avvenuto nonostante gli stessi fossero progettati in accordo con il "Title 21" del *California Administrative Code*. Tale normativa stabiliva che tutte le librerie dovessero essere ancorate al pavimento o alle pareti laterali. Bullonature e controventi dovevano essere progettati in modo tale da resistere forze laterali pari al 20% del peso degli scaffali, calcolato in condizioni di pieno carico.

### 2.3 Prestazione sismica durante il terremoto di San Fernando del 1971

Il terremoto di San Fernando avvenne alle sei di mattina del 9 febbraio 1971. L'evento sismico, di magnitudo 6.6, causò la morte di 65 persone e provocò danni che sono stimati nell'ordine di 6.6 miliardi di dollari americani. Si tratta del primo terremoto di grande magnitudo ad avvenire in una grande area metropolitana dopo la promulgazione del "Field Act". Il "Field Act" deve la sua genesi al terremoto di Long Beach del 1933, che il 10 marzo di quell'anno causò la distruzione totale o parziale di 230 edifici scolastici nella regione della California del sud. Il "Field Act" è tra le prime normative americane a richiedere la realizzazione di strutture antisismiche (edifici scolastici in particolare). Tale documento conteneva regolamenti precisi circa gli elementi strutturali di vario genere, senza tuttavia affrontare in modo diretto la progettazione degli elementi non strutturali.

Il terremoto di San Fernando (1971) e quello di Long Beach (1933) erano simili in termini di magnitudo. Tuttavia, la risposta degli edifici nel corso del terremoto di San Fernando fu globalmente significativamente migliore di quella osservata nel corso del terremoto precedente. Questo miglioramento fu in gran parte attribuito al fatto che nel 1971 la maggior parte degli edifici situati nel Los Angeles School District, zona colpita dalle scosse sismiche di maggiore intensità, erano stati costruiti o ristrutturati in conformità con il "Field Act" (Jennings, 1997).

In tale contesto, fu osservato che un numero di strutture non conformi al "Field Act", in modo particolare ospedali e tratti autostradali, soffrirono danni significativi. Per esempio, l'Olive View Hospital, costruito in conformità con il "Los Angeles County building code" e inaugurato nel novembre 1970, soffrì un collasso parziale che lo rese irrecuperabile.

In ogni caso, moltissimi edifici incorsero in danni onerosi, per esempio alle finiture architettoniche o agli impianti meccanici ed elettrici. Molti edifici moderni soffrirono estese fessurazioni degli intonaci, troppo rigidi per assorbire gli spostamenti interpianto indotti dal sisma. Alcuni edifici soffrirono danni alle finestre. In molti uffici si verificò il danneggiamento degli ascensori. In particolare, i contrappesi furono sbalzati fuori dalle rispettive guide. Infine, in molti edifici ci furono danni agli impianti di condizionamento e a contenuti di vario genere.

#### 2.3.1 Prestazione degli elementi non strutturali in edifici scolastici

Gli edifici scolastici costruiti dopo il 1933 esibirono, in generale, buone prestazioni. Soltanto alcuni degli edifici "moderni" furono affetti da

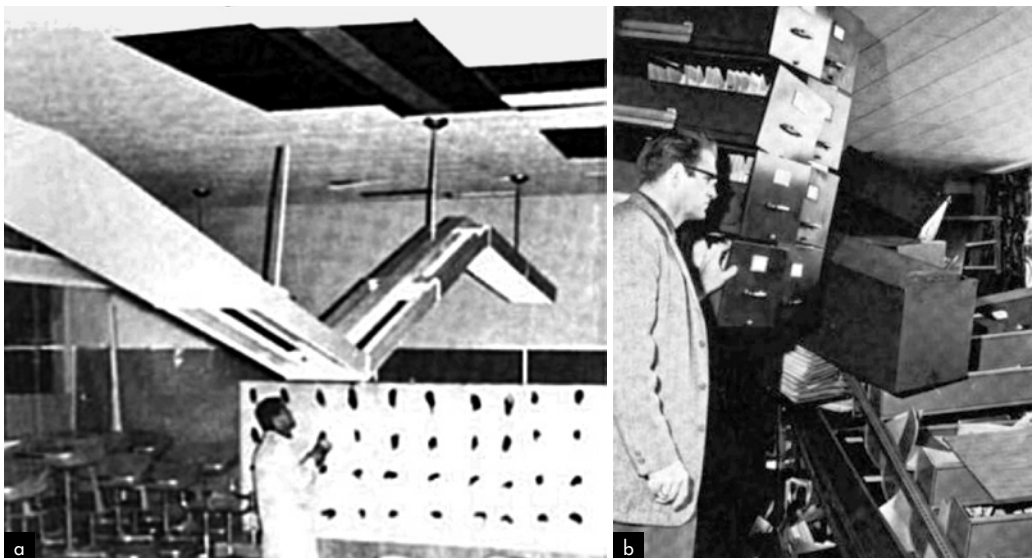


Figura 2  
a) Impianti di illuminazione danneggiati in un'aula della Whittier school;  
b) Librerie e armadietti da archivio ribaltati nella West Anchorage High School library. (Committee on the Alaska Earthquake, 1973).

danni strutturali permanenti (nella zona nord della valle di San Fernando), principalmente dovuti a cedimenti del terreno.

La maggior parte dei danni osservati è di natura non strutturale e comprende impianti di illuminazione, controsoffitti, partizioni, luci, sistemi elettrici, tubazioni, sistemi antincendio etc. (Jephcott, 1971).

In molte biblioteche, le librerie dimostrarono di non possedere adeguata resistenza ai carichi laterali, collassando come mostrato in Figura 3. I costi per la riparazione degli elementi non strutturali furono generalmente di gran lunga superiori a quelli connessi alle riparazioni strutturali.

## 2.4 Il terremoto di Loma Prieta del 1989

### 2.4.1 Prestazione sismica del costruito in generale

Il terremoto di Loma Prieta fu il più forte evento sismico a colpire la California del nord dai tempi del terremoto di San Francisco del 1906. Il terremoto avvenne alle 17:04 del 17 ottobre 1989 e fu caratterizzato da una magnitudo di 7.1 (EERI, 1989). Lo scuotimento terrestre durò per circa 15 secondi e fu avvertito su di un'area di circa 400.000 miglia quadrate (1040.000 chilometri quadrati). Il terremoto provocò la morte di 65 persone ed il ferimento di un numero di persone stimato tra 3.500 e 3.700, lasciando tra 3.000 e 12.000 sfollati.

I danni furono molto diffusi nell'area epicentrale nei dintorni di Watsonville e Santa Cruz, e danni considerevoli furono osservati ad Oakland e a San Francisco, situate a circa 60 miglia (95 km) dall'epicentro. Stime dell'*Office of Emergency Services* (OES) indicarono danni alle proprietà private dell'ordine di 1.8 miliardi e perdite totali dell'ordine di 5.9 miliardi di dollari americani (CSSC, 2009).

Danni rilevanti furono osservati nell'area del Marina District di San Francisco. Le strutture maggiormente colpite furono edifici a telaio in legno. Le condizioni del suolo ebbero un ruolo chiave nel danneggiamento delle strutture, come testimoniato dal fatto che la maggior parte dei danni si concentrò nell'area a nord di Lombard Street tra Baker Street e Fillmore Street, zona in cui le caratteristiche del terreno sono particolarmente povere.

Per quanto riguarda la risposta dei complessi scolastici, soltanto pochi edifici subirono danni strutturali, che furono in ogni caso di lieve entità. Un sondaggio condotto su 1.544 edifici pubblici produsse una stima dei danni pari ad 81 milioni di dollari americani (in valuta corrispondente al novembre 1989).

Soltanto quattro scuole esibirono danni strutturali di entità significativa: una scuola a Santa Cruz, la Loma Prieta Elementary School nei pressi di Los Gatos, un edificio scolastico di San Francisco costruito nel 1920 e ristrutturato nel 1947 e un Liceo di Watsonville costruito nel 1917 e ristrutturato nel 1935 (Bellet, 1989; National Clearinghouse for Educational Facilities, 2004). Da un punto di vista economico, le perdite del San Francisco School District furono stimate pari a 45 milioni di dollari americani. Circa un terzo delle perdite furono attribuite ai danni sofferti dagli edifici amministrativi che, coerentemente con il "Field Act", non erano progettati secondo criteri antisismici particolari (EERI, 1990).

In generale, la buona risposta degli edifici scolastici è da attribuirsi al fatto che questo tipo di strutture erano regolamentate dallo *State Building Code* e dal *Field Act*, che stabilivano procedure chiare per la progettazione e la costruzione degli edifici stessi. L'unica scuola a soffrire danni

Figura 3  
a) Danni agli scaffali nella San Fernando Valley State College Library;  
b) Altri danni alle librerie nella San Fernando Valley State College Library. (Committee on the Alaska Earthquake, 1973).



strutturali severi fu la John O'Connell High School. Molte scuole furono utilizzate come ricoveri per molte delle vittime del terremoto di Loma Prieta.

#### 2.4.2 Prestazione degli elementi non strutturali in edifici scolastici

In seguito al terremoto di San Fernando del 1971, la progettazione degli elementi non strutturali fu resa più esigente, incorporando regolamentazioni più specifiche all'interno dell'edizione del 1976 dello *Uniform Building Code*. Ipotizzando che la maggior parte degli edifici, al tempo del terremoto di Loma Prieta, fosse conforme con le normative vigenti, si potrebbe in parte spiegare la relativamente migliore prestazione degli elementi non strutturali, rispetto a quella osservata in occasione di eventi sismici precedenti. Tuttavia, gli edifici scolastici furono ancora una volta affetti da collassi, totali o parziali, degli elementi non strutturali. La maggior parte delle perdite economiche furono infatti attribuite ai danni non strutturali sofferti da elementi come muri di partizione, vetrate, sistemi di condizionamento etc. Altri danni non strutturali comunemente osservati in edifici scolastici comprendono il distaccamento di tegole dai tetti, la rottura o caduta di controsoffitti, la fessurazione di camini, muri e solette in calcestruzzo. Inoltre, macchinari e contenuti di vario genere soffrirono danni significativi.

Tutto ciò dimostra, ancora una volta, come il controllo delle prestazioni non strutturali sia una valutazione fondamentale di un progetto architettonico per quanto riguarda la prestazione sismica di un edificio scolastico (NIST, 1989).

Non furono osservati danni di rilievo a vetrate e rivestimenti. Tuttavia, la magnitudo del terremoto di Loma Prieta è considerata appena al di sotto della magnitudo che provocherebbe danni a questo tipo di elementi. Infatti, anche se le prestazioni di vetrate e rivestimenti in edifici

moderni fu soddisfacente, principi di danneggiamento furono osservati in aree come Foster City, Redwood Shores, e il centro di San Francisco.

Una fonte importante di danno non strutturale in edifici scolastici fu il ribaltamento e il danneggiamento di contenuti di vario genere. Figura 4, per esempio, mostra il collasso di una serie di librerie in due delle biblioteche della Stanford University.

## 2.5 Il terremoto di Northridge del 1994

### 2.5.1 Prestazione sismica del costruito in generale

Il terremoto di Northridge, di magnitudo 6.7, colpì la California del sud nel 1994 e fu il più forte evento sismico avvertito in quest'area dai tempi del terremoto di San Fernando (1971). Lo scuotimento terrestre fu avvertito nelle contee di Los Angeles, Orange e Ventura, su un'area di 2.192 miglia quadrate (5.700 chilometri quadrati). In questa occasione furono danneggiati 114.000 tra edifici residenziali e commerciali. Soltanto nella città di Los Angeles, le perdite economiche furono stimate in 1.9 miliardi di dollari americani (CSSC, 2009). In totale, le perdite corrisposero a 40 miliardi. Queste stime fanno del terremoto di Northridge l'evento sismico più costoso della storia degli Stati Uniti.

Tra gli altri, uno degli edifici che soffrì danni strutturali di grave entità fu la John F. Kennedy (JFK) High School a Granada Hills. La struttura era stata progettata in conformità con le disposizioni del *Field Act* contenute nell'edizione del 1967 del *California Building Code* (CBC).

Molti altri edifici in calcestruzzo armato, progettati o costruiti precedentemente al 1976, non manifestarono buone prestazioni, specialmente nell'area epicentrale. In particolare, una porzione del Northridge Fashion Center (edificio in tutto e per tutto simile alla JFK High School), soffrì un grave collasso a punzonamento (Lew et al., 1994).

Figura 4  
a) Librerie danneggiate alla Stanford University;  
b) Librerie danneggiate alla Graduate School of Business Library (Stanford) (<http://news.stanford.edu/news/2009/october5/loma-prieta-event-100909.html> e <http://quake06.stanford.edu/centennial/tour/stop7.html>).



Un liceo cattolico privato ubicato 2.3 chilometri ad est della JFK High School, e costruito nel 1956, soffrì gravi danni a 12 edifici e dovette essere ricostruito in seguito al terremoto. La Danube Elementary, costruita nel 1960, soffrì danni moderati, così come la Haskell Elementary, costruita nel 1956 (McGavin, 1994).

In generale, resoconti sui danni raccolti in 19 scuole pubbliche ubicate nell'area epicentrale dimostrarono una buona risposta sismica da parte della maggior parte delle strutture (DSA ATC-20 Reports, 1994).

### 2.5.2 Prestazione degli elementi non strutturali in edifici scolastici

Il terremoto di Northridge causò più danni non strutturali di qualsiasi altro evento sismico mai registrato negli Stati Uniti. Fino a metà degli anni '70, le disposizioni per gli elementi non strutturali contenute nel UBC e nelle sue variazioni locali erano minime. La maggior parte delle scuole ubicate nella valle di San Fernando erano state costruite prima del 1975, anno in cui le normative iniziavano ad essere aggiornate e rese più rigide, anche dal punto di vista della progettazione degli elementi non strutturali, incorporando per esempio indicazioni precise su come ancorare i controsoffitti o gli armadietti e le librerie. La *Division of the State Architect* (DSA) redasse una serie di valutazioni sullo stato post-sisma di 127 edifici scolastici ubicati in 45 diversi distretti. In quell'occasione non furono osservati collassi né totali né parziali, ad eccezione di alcuni moduli prefabbricati che furono sbalzati dai propri sostegni. Al di là di qualche danno di grave entità alla struttura in calcestruzzo armato della John Kennedy School, la maggior parte dei

danni strutturali fu di lieve entità.

In un tale contesto, i danni agli elementi non strutturali rappresentano la maggior parte delle perdite economiche. Allo stesso tempo, i danni non strutturali sarebbero stati la causa di preoccupazione per gli occupanti qualora il terremoto fosse avvenuto in orario scolastico.

La maggior parte delle scuole soffrirono collassi dei sistemi di illuminazione, dei controsoffitti e dei muri di partizione o dei rivestimenti esterni delle pareti. Esempi di danni non strutturali osservati in seguito al terremoto di Northridge sono riportati in Figura 5, in relazione alla Northridge Junior High School e alla Thousand Oaks Library. Nella palestra della Northridge J.H.S., quattro lampadari di grandi dimensioni crollarono abbattendosi al suolo.

Altri danni non strutturali osservati comprendono la caduta di piastrelle, armadietti e contenuti di vario genere.

In alcune scuole le linee degli sprinkler, così come altri tipi di tubazioni, si ruppero a causa degli spostamenti differenziali tra i punti di ancoraggio. Scaldabagno e serbatoi d'acqua soffrirono spostamenti significativi durante il terremoto, causando la rottura di alcune tubature di servizio. In alcuni casi si verificarono problemi di "martellamento" tra le attrezzature e le pareti adiacenti.

Danni non strutturali di serie entità avvennero alla University of California Los Angeles (UCLA) e alla Cal State Northridge. Per esempio, molti controsoffitti sprovvisti di puntoni d'ancoraggio in grado di assorbire le forze di compressione, crollarono al suolo.

Come osservato in occasione di altri terremoti, una fonte importante di danno non strutturale in

Figura 5  
a) Collasso di impianti di illuminazione alla Northridge Junior High School. (FEMA-E74);  
b) Danni ai controsoffitti e ad una scultura in legno presso la Thousand Oaks Library. (<http://content.cdlib.org/ark:/13030/c8fn146t/?layout=metadata>).





edifici scolastici fu il ribaltamento di contenitori di vario genere. In particolare, i danni alle attrezzature furono particolarmente severi all'interno dei laboratori. Per esempio, molti computer caddero dai propri supporti. In base a uno studio condotto alla UCLA, 55% degli infortuni avvenuti nel corso del terremoto di Northridge furono causati dalla caduta di oggetti e arredamenti di vario tipo mentre soltanto l'1% degli infortuni è da considerarsi legato a danni strutturali (<http://www.earthquakecountry.org/>). Le Figura 6a e 6b propongono due viste dell'interno della Thousand Oaks Library, e mostrano danni a libri, scaffali e controsoffitti.

In generale, il risultato dei danni non strutturali osservati nel corso del terremoto di Northridge del 1994, fu una revisione significativa dell'edizione 1997 della normativa UBC.

## 2.6 Il terremoto di Nisqually del 2001

**2.6.1 Prestazione sismica del costruito in generale**  
Il terremoto di Nisqually colpì Puget Sound nella regione occidentale dello stato di Washington, alle 10:54 del 28 febbraio 2001. La scossa principale registrò una magnitudo di 6.8. L'evento fu di durata relativamente prolungata, ma fu caratterizzato da una profondità focale di 52 km, causando dunque uno scuotimento terrestre di entità lieve o moderata (Filiatrault e Sullivan, 2014).

Danni alle strutture furono osservati ovunque nella regione del Puget Sound, ma i danni di più grave entità furono molto localizzati. In particolare, danni di grave entità furono osservati nella città di Olympia, al Seatac Airport, e nella zona sud di Seattle da Pioneer Square sud fino all'area di Sodo. Le strutture danneggiate comprendono uffici, complessi residenziali, scuole,

ospedali, strutture aeroportuali e chiese. Queste strutture, così come le zone adiacenti, furono chiuse per vari periodi di tempo in seguito al terremoto (Creager et al., 2001).

La risposta peggiore fu riscontrata negli edifici in muratura semplice, costruiti prima del 1950. Infatti, la maggior parte dei danni strutturali fu concentrata in edifici in muratura, con danni di qualche entità riportati relativamente ad edifici a telaio in legno ed edifici in calcestruzzo armato. In generale, edifici moderni ed edifici che erano stati ristrutturati in tempi recenti, furono caratterizzati da un buon comportamento sismico. Tuttavia, tutti gli edifici subirono danni agli elementi non strutturali.

La maggior parte degli edifici rispose in maniera soddisfacente da un punto di vista di salvaguardia della vita degli occupanti. Tuttavia, il livello di prestazione di un gran numero di edifici fu notevolmente più basso di quanto desiderato, a causa degli estesi danni non strutturali (Filiatrault et al. 2001). Inoltre, la maggior parte delle perdite economiche, stimate pari a 2 miliardi di dollari americani, furono attribuite ai danni subiti dagli elementi non strutturali.

Per inciso, i danni agli elementi non strutturali provocarono interruzioni di attività e servizi in grosse compagnie come Boeing, Starbucks e Amazon.com, così come in molti altri esercizi di minori dimensioni. Anche i servizi forniti dalle città e dal governo furono, in molte occasioni, interrotti.

### 2.6.2 Prestazione degli elementi non strutturali in edifici scolastici

I danni non strutturali più comunemente osservati comprendono, tra i molti altri, il collasso di controsoffitti, muri di partizione, finestre, componen-

Figura 6  
a) Vista dell'interno della Thousand Oaks Library: danni a controsoffitti e librerie;  
b) Altri danni a librerie e controsoffitti presso la Thousand Oaks Library. (<http://content.cdlib.org/ark:/13030/c8fn146t/?layout=metadata>).



ti meccaniche ed elettriche, tubazioni e contenuti di vario genere.

Pareti esterne in muratura, così come parapetti e camini furono anche oggetto di severi danneggiamenti. Danni di natura non strutturale avvennero in tutti i tipi di edificio, da quelli moderni o recentemente ristrutturati, agli edifici più antichi. I danni più comunemente osservati in relazione ad edifici scolastici comprendono danni ai controsoffitti, alle finestre alle tubazioni. In particolare, la caduta di estese porzioni di controsoffitti indusse la chiusura temporanea di un numero di scuole (Figura 7a). Inoltre, gli impianti di illuminazione furono danneggiati in molte occasioni (Figura 7b), così come furono danneggiati i muri di partizione in cartongesso e i rivestimenti delle pareti esterne. Circa 75 delle 96 scuole presenti nella città di Seattle riportarono danni non strutturali di qualche entità.

Anche i danni ai contenuti furono molto diffusi e rappresentarono un serio problema. Per esempio, danni tipici osservati in scuole superiori ed

università furono collassi di armadietti, librerie e scaffalature. Alcune biblioteche come la University of Washington (UW) Law School Library, furono chiuse in conseguenza ai danni subiti dalle librerie (Figura 8).

## 2.7 I terremoti Kiholo Bay (Mw 6.7) e di Mahukona (Mw 6.0) del 2006

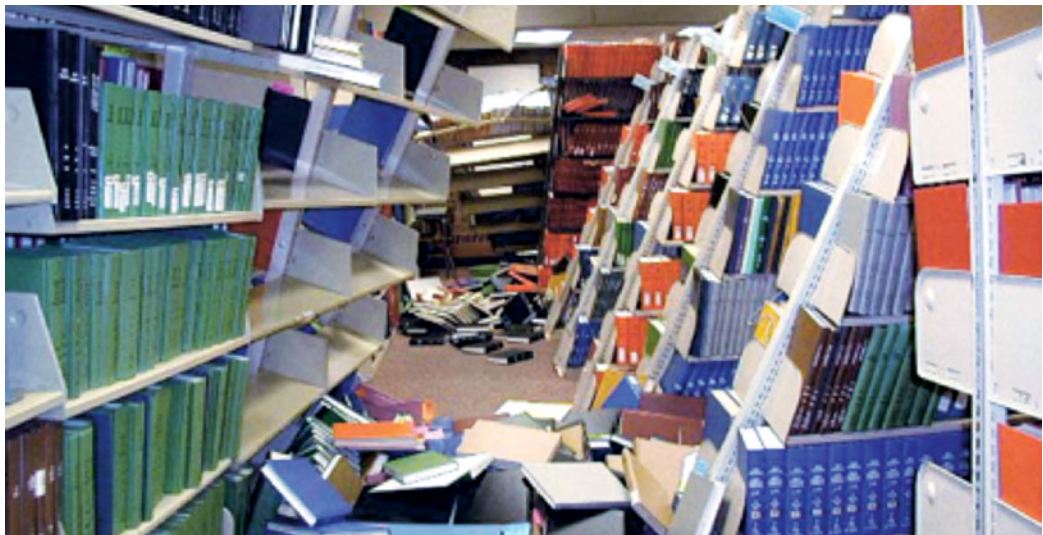
**2.7.1 Prestazione sismica del costruito in generale**  
Il 15 ottobre 2006, due terremoti di magnitudo 6.7 e 6.0 colpirono, in sequenza, l'isola principale dell'arcipelago delle Hawaii. Fortunatamente non ci furono vittime legate al terremoto. Tuttavia, i danni causati dai due eventi sismici furono stimate superiori a 100 milioni di dollari americani, senza includere nella stima i danni sofferti dalle residenze private. Circa 1.800 residenze private, che corrispondono a circa il 5% delle case famigliari presenti sull'isola principale delle Hawaii, subirono danneggiamenti di varia entità (Chock et al., 2006).

Con qualche eccezione, la maggior parte degli

Figura 7  
a) Danni in un'aula ubicata al quarto piano di un edificio scolastico. (<http://seattlecentral.edu/faculty/jhull/scccdamage.html>);  
b) Danni non strutturali in una scuola ubicata nell'area del Puget Sound di Washington (<http://pubs.usgs.gov/gip/2005/15/>).



Figura 8  
Librerie danneggiate presso la biblioteca della Law School della University of Washington. (<http://www.washington.edu/alumni/columns/june01/earthquake6.html>).



edifici moderni rispose in maniera adeguata al terremoto. Come in altre occasioni, la maggior parte dei danni agli edifici è da attribuirsi al collasso totale o parziale degli elementi non strutturali come controsoffitti, impianti di illuminazione, tubazioni ed altre linee di servizi. Danni strutturali furono osservati in un numero limitato di edifici. La prestazione di strutture strategiche come ospedali e scuole non fu sempre soddisfacente, a causa dei danni eccessivi sofferti dai loro sistemi non strutturali, in particolare controsoffitti e sistemi antincendio. Di conseguenza, alcune di queste strutture non furono del tutto funzionali per alcune delle settimane che seguirono i terremoti.

### 2.7.2 Prestazione degli elementi non strutturali in edifici scolastici

I danni sofferti dagli edifici scolastici furono quantificati in circa 5 milioni di dollari americani. In questo contesto la maggior parte delle perdite avvenne presso le scuole Waikoloa Elementary, Honoka'a Elementary e Kohala Elementary. In queste scuole, non furono riscontrati danni strutturali di rilievo. Come in altre occasioni, i danni riscontrati furono principalmente di natura non strutturale. Per esempio alla Waikoloa Elementary, molte delle aule furono chiuse a causa della diffusa caduta dei controsoffitti, impianti di illuminazione e altri elementi non strutturali (Chock et al., 2006). Esempi di controsoffitti danneggiati sono riportati in Figure 9a e 9b.

In particolare, la Waikoloa Elementary soffrì danni non strutturali significativi essenzialmente in tutte le aule, gli uffici amministrativi e le biblioteche. Nonostante gli edifici fossero di recente costruzione, i controsoffitti non erano sostenuti lateralmente, non erano equipaggiati di puntoni atti a resistere i movimenti verticali e non erano agganciati ad adeguata distanza dalle pareti adiacenti. In alcuni casi, gli impianti illuminanti caddero al suolo.

Danni di natura analoga furono osservati presso la Honoka'a Elementary School. In generale, i danni furono il risultato della mancanza di adeguati vincoli antisismici per i sistemi di sospensione (e.g., mancanza di sostegni laterali e puntoni verticali).

Altri danni non strutturali comunemente osservati comprendono la fessurazione di muri di partizione, di rivestimenti di colonne e pareti e di intonaci di vario genere.

## 2.8 Il terremoto di L'Aquila del 2009

### 2.8.1 Prestazione sismica del costruito in generale

Il terremoto di L'Aquila (magnitudo 6.3) colpì l'Italia centrale il 6 Aprile 2009 alle ore 3:32 am. Si tratta di un evento sismico relativamente superficiale, caratterizzato da una profondità epicentrale di circa 8 km. Di conseguenza, lo scuotimento terrestre fu di grande entità e la scossa principale fu seguita da una serie di aftershocks. La sequenza di terremoto causò la morte di 305 persone, il ferimento di circa 1.500 persone e provocò qualcosa come 29.000 sfollati. Le perdite economiche totali, furono stimate nell'ordine di 16 miliardi di dollari americani.

Più di 60.000 edifici furono severamente danneggiati o totalmente distrutti e circa 70.000 persone furono evacuate (Augenti et al., 2010). Un totale di 81 comuni furono colpiti più o meno gravemente dal terremoto. Oltre la città di L'Aquila, i paesi di Onna e Paganica furono quelli più gravemente danneggiati.

Tra gli edifici in calcestruzzo armato, il dormitorio studentesco dell'Università di L'Aquila soffrì un collasso totale, provocando la morte di sette persone. Altri edifici importanti come l'albergo "Duca degli Abruzzi", una costruzione degli anni '70, soffrirono collassi parziali a causa di una serie di deficienze strutturali di vario genere. L'ospedale San Salvatore si comportò adeguatamente per essere una struttura degli anni '70, ma

Figura 9  
a) Controsoffitti danneggiati presso la West Hawaii school;  
b) Controsoffitti danneggiati in una palestra (Gupta and McDonald, 2008).



la prestazione fu totalmente inaccettabile con riferimento agli standard moderni. Dal punto di vista strutturale, ci fu il collasso di tre colonne esterne. Dal punto di vista non strutturale, i danni furono molto estesi. Gli elementi maggiormente danneggiati furono i muri di partizione e i controsoffitti. Inoltre, le pareti frontali, responsabili di sostenere il peso delle pesanti insegne esterne, collassarono a causa degli eccessivi carichi dinamici. Questo collasso dimostra chiaramente come sia necessario progettare gli elementi non strutturali in funzione della loro interazione con gli elementi a cui gli stessi sono ancorati (Augenti et al., 2010).

La prestazione degli edifici scolastici fu, in generale, accettabile. Tuttavia, danni non strutturali furono osservati in tutte le scuole presenti sul territorio colpito dal sisma. Con riferimento alla valutazione del comportamento degli elementi non strutturali nel corso dell'evento sismico di L'Aquila è molto esauriente il rapporto redatto dal Dipartimento di Protezione Civile "Linee guida per la riduzione della vulnerabilità di elementi non strutturali arredi ed impianti" (DPC, 2009) che si possono intendere come un significativo approfondimento delle precedenti "Raccomandazioni per il miglioramento della sicurezza sismica e della funzionalità degli ospedali" (Ministero della salute, 2000).

### 2.8.2 Prestazione degli elementi non strutturali in edifici scolastici

La sequenza sismica che colpì l'Abruzzo nel 2009 provocò danni non strutturali diffusi in edifici privati e pubblici. Gli estesi danni non strutturali ebbero pesanti conseguenze socio-economiche, incluso perdite umane, perdite di funzionalità da parte degli edifici (particolarmente importante in caso di edifici strategici) e resero gli edifici inutilizzabili (Braga et al., 2011). Per inciso, la maggior parte delle perdite di funzionalità da parte degli edifici in seguito al terremoto di L'Aquila furono provocati da danni ad elementi non strutturali come facciate, contro-

soffitti, partizioni, luci, sistemi elettrici, tubazioni, sistemi di ventilazione, sistemi di riscaldamento e sistemi antincendio.

All'Università di L'Aquila, per esempio, un edificio universitario non più vecchio di 10 anni, resistette adeguatamente alle scosse di terremoto da un punto di vista strutturale, ma fu così severamente danneggiato da un punto di vista non strutturale, che la struttura non poté essere utilizzata in seguito al terremoto. I danni coinvolsero il collasso di gran parte dei rivestimenti esterni e di molti dei controsoffitti e dei muri di partizione interni (Figura 10). Fortunatamente il terremoto avvenne ad un orario in cui le lezioni non erano in corso o si sarebbero potute verificare molte perdite umane (Global Risk Miyamoto, 2009). In Figura 11, altri esempi di danni non strutturali riscontrati in seguito al terremoto.

Figura 12 fornisce viste addizionali di danni non strutturali osservati all'Università di L'Aquila (Magliulo et al. 2009).

Danni non strutturali estesi furono osservati anche in edifici scolastici ubicati nel centro di L'Aquila. All'Istituto Tecnico per le Attività Sociali E. di Savoia, per esempio, muri di partizione, impianti illuminanti, sistemi elettrici e idraulici furono pesantemente danneggiati. Anche i contenuti dell'edificio, in particolare librerie e armadietti, furono severamente danneggiati come risultato delle vibrazioni eccessive. Le viste interne post-terremoto di due delle classi sono presentate in Figura 12.

In generale, i danni non strutturali furono molto estesi in tutte le scuole del centro di L'Aquila. Alcuni esempi sono presentati in Figura 13.

## 2.9 Il terremoto del Cile del 2009

### 2.9.1 Prestazione sismica del costruito in generale

Il 27 febbraio 2010, alle ore 3:34 am, un terremoto di magnitudo 8.8 colpì la regione centro-meridionale del Cile, toccando un'area con una popolazione di oltre otto milioni di persone. Nella regione maggiormente colpita dal sisma,

Figura 10  
a) Collasso di controsoffitti all'Università di L'Aquila;  
b) Collasso di muri di partizione in un'aula presso l'Università di L'Aquila. (Global Risk Miyamoto, 2009).



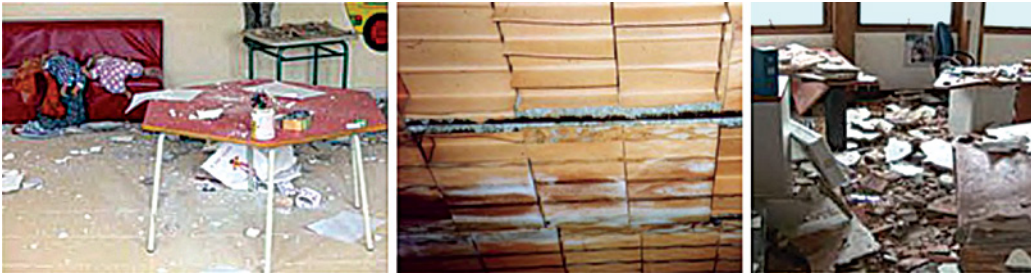


Figura 11  
Danni da sfondamento di solai in laterocemento. (Foto da: "Linee guida per la riduzione della vulnerabilità di elementi non strutturali arredi ed impianti" DPC, 2009).

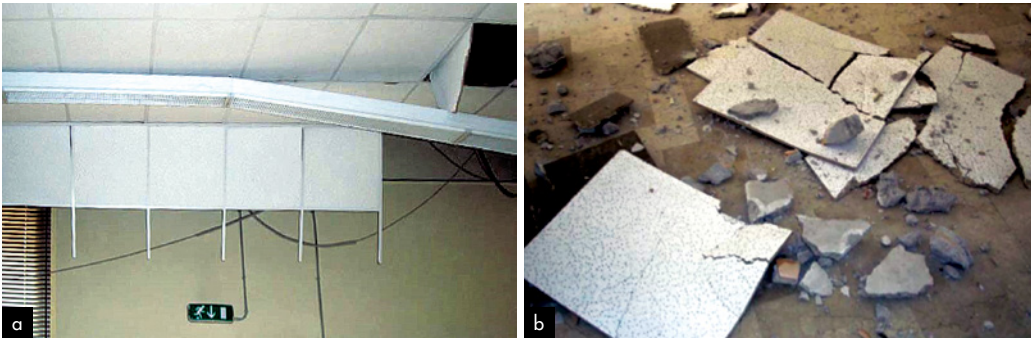


Figura 12  
a) Controsoffitti danneggiati all'Università di L'Aquila (via G. Di Vincenzo);  
b) Detriti provenienti dal collasso di un controsoffitto all'Università di L'Aquila (via G. Di Vincenzo). (Magliulo et al. 2009).



Figura 13  
a) Collasso di un muro di partizione presso l'Istituto Tecnico per le Attività Sociali E. di Savoia;  
b) Collasso di un muro di partizione e di una serie di armadi presso l'Istituto Tecnico per le Attività Sociali E. di Savoia. (Salvatore et al. 2010).

si registrarono accelerazioni maggiori di 0.05 g per oltre 120 secondi. Nel maggio 2010, il conto delle vittime era salito a 521, con 56 persone che risultavano ancora mancanti (EERI, 2010). Il terremoto causò danni gravi ad edifici, autostrade, ponti, ferrovie, porti, aeroporti e altre strutture.

Nel marzo 2010, lo U.N. Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA) stimò che 1.8 milioni di persone furono toccate dal terremoto o dallo tsunami che ne risultò, causando perdite per 30 miliardi di dollari americani. La stessa stima fu prodotta dal governo cileno, che calcolò perdite per 10.6 miliardi nel settore pubblico (e.g. scuole, ospedali, abitazioni), 10.4 miliardi nel settore privato (ad esempio imprese ed esercizi commerciali), 7.6 miliardi di perdite sul Prodotto Interno Lordo (GDP) fino alla fine del 2013, e 1.0 miliardi in altre spese (Risk Management Solutions, 2010).

Il terremoto causò imponenti danni non strutturali in tutti i tipi di edificio, incluso edifici residenziali, commerciali e industriali. Elementi non strutturali comunemente danneggiati comprendono: vetra-

te, controsoffitti, sistemi antincendio, tubazioni, ascensori, partizioni, sistemi di ventilazione, facciate, etc. (EERI, 2010). I danni non strutturali risultarono in significative perdite economiche e in considerevoli disturbi del normale funzionamento di edifici e servizi. In molti casi, danni agli elementi non strutturali portarono gravi perdite economiche a causa di interruzioni delle attività. In molti casi il collasso di elementi non strutturali fu dovuto alla mancanza di adeguati ancoraggi e sostegni. Tuttavia, ci furono molti casi in cui gli elementi di ancoraggio, installati come raccomandato in normativa, si ruppero a causa degli alti carichi indotti dal sisma. Questo sottolinea come sia necessario condurre studi approfonditi sul comportamento sismico degli elementi non strutturali, così da migliorare le disposizioni attualmente presenti in normativa. Danni ingenti furono sostenuti in edifici pubblici come scuole elementari, scuole superiori e università.

Le scuole di tutto il paese furono chiuse per più di una settimana in seguito al terremoto e gli studenti ricominciarono a frequentare le rispettive classi l'8 di Marzo. Nelle regioni di Mauele e Biobío,

quelle maggiormente colpite dal terremoto, le scuole rimasero chiuse per diverse settimane. Migliaia di scuole necessitavano di riparazioni di vario genere: molte scuole subirono danni ai contenuti e ad altri elementi non strutturali ma altre subirono danni strutturali di grave entità.

*2.9.2 Prestazione degli elementi non strutturali in edifici scolastici*

Gli edifici scolastici furono severamente danneggiati nel corso del terremoto del Cile del 2010. Mentre alcuni degli edifici soffrirono danni strutturali, tutti subirono danni non strutturali rilevanti. Gli elementi più comunemente danneggiati furono: controsoffitti, impianti di illuminazione, partizioni e contenuti. A questo proposito, alcuni esempi di danni non strutturali sono riportati in Figura 14.

Alla Universidad de Talca, il preside della facoltà di giurisprudenza stimò che sarebbero stati necessari 10 milioni di dollari americani per riparare gli edifici, rimpiazzare i contenuti dan-

neggiati, incluso le attrezzature da laboratorio, i computer e i libri. In particolare, i libri che caddero dai rispettivi scaffali furono ulteriormente danneggiati dall'acqua proveniente dal sistema antincendio.

La Universidad de Chile non soffrì particolari danni strutturali. Tuttavia i danni non strutturali furono diffusi e significativi. Figura 15 mostra, per esempio, alcuni dei danni non strutturali osservati presso le facoltà di fisica e matematica. Presso la University of the Americas, le aule principali e gli edifici amministrativi subirono perdite molto pesanti, in particolare all'ultimo piano. Furono osservati danni ingenti ai contenuti e ad altri elementi non strutturali, come per esempio gli ascensori. I danni principali coinvolsero il collasso dei controsoffitti e dei muri di partizione interni, così come il ribaltamento dei materiali da laboratorio, arredamenti, computer e attrezzature mediche. A causa di questi danni l'edificio fu reso inutilizzabile per diverse settimane che seguirono il terremoto. Le cause principali

Figura 14  
Danni a controsoffitti e impianti illuminanti presso la Universidad de Chile. (<http://romano.in/tag/beauchef/page/4/>).



Figura 15  
Danni a controsoffitti e contenuti alla Universidad de Chile. (<http://romano.in/tag/beauchef/page/4/>).



dell'incapacità degli elementi non strutturali di sopravvivere il terremoto furono, come al solito, la mancanza di adeguati ancoraggi e sostegni. Il terremoto colpì in modo severo anche la University of Concepción, causando perdite maggiori di 80 milioni di dollari americani. Gli edifici che subirono la maggior parte dei danni non strutturali osservati furono: School of Dentistry, School of Education, School of Economy, marine Biology Station (Figura 16a) e il nuovo Biotechnology Laboratory (Figura 16b).

## 2.10 I terremoti in Nuova Zelanda del 2010-11

### 2.10.1 Prestazione sismica del costruito in generale

Il terremoto di Darfield colpì la regione di Canterbury il 4 settembre 2010 alle ore 4:36 am. Nonostante l'evento contasse su una magnitudo di 7.1, ci furono soltanto due feriti gravi mentre non furono registrate vittime. In seguito al terremoto di Darfield, non ci furono collassi di edifici, gli ospedali continuarono a svolgere le loro funzioni, e i soccorsi furono tempestivi ed efficaci. Tuttavia, ci furono danni per almeno 3 miliardi di dollari, la maggior parte dei quali legati alla liquefazione e alle deformazioni del terreno che risultarono nel grave danneggiamento di molte residenze moderne, tubazioni ed elementi non strutturali. Inoltre, alcuni edifici in muratura semplice furono gravemente danneggiati (Gerstenberger et al., 2011).

Circa sei mesi più tardi, la città di Christchurch fu colpita da un devastante aftershock di magnitudo 6.2. Il terremoto avvenne il 22 febbraio 2011 alle ore 12:51 pm, ora in cui circa 50.000 persone si trovavano nel vulnerabile centro città. I collassi strutturali furono numerosi, anche a causa del fatto che l'accelerazione orizzontale al suolo registrata arrivò a superare il 100% dell'accelerazione di gravità. Il conto delle vittime fu di 181 persone. Gran parte dei danni riscontrati nella zona sud della città furono dovuti ai severi fenomeni di liquefazione verificatisi. In

generale, gli edifici progettati e costruiti in accordo con le normative moderne resistettero le scosse di terremoto in maniera adeguata, con prestazioni anche superiori a quelle desiderate. Le perdite economiche causate da questo evento sismico furono stimate pari a 30 miliardi di dollari, cifra che rappresenta l'8% del GDP della Nuova Zelanda (Gerstenberger et al., 2011). Senza dubbio, i costi maggiori furono attribuiti alla riparazione o al rimpiazzo degli elementi non strutturali come controsoffitti, tubazioni, facciate e vetrate, che furono severamente danneggiati nel corso del terremoto del 22 febbraio.

I danni non strutturali osservati nel corso dei due eventi sismici (il terremoto del settembre 2010 e l'aftershock del febbraio 2011) furono di natura molto simile. Tipicamente, uffici ed esercizi commerciali subirono danni ai controsoffitti e ai sistemi di illuminazione, ribaltamenti delle scaffalature, rottura dei sistemi antincendio, degli arredi e di contenuti vari. Numerose facciate di edifici moderni, spesso composte da vetrate e pannelli in metallo leggero, furono danneggiate e in alcune occasioni si ribaltarono in strada, trasformandosi in un pericolo per le persone in procinto di evacuare gli edifici così come per i soccorritori e le squadre di ispezione. Molte industrie manifatturiere subirono danni significativi a macchinari critici e ad infrastrutture di supporto. Numerose scaffalature in metallo crollarono all'interno di diversi magazzini.

### 2.10.2 Prestazione degli elementi non strutturali in edifici scolastici

Gli edifici scolastici furono pesantemente danneggiati nel corso di entrambi i terremoti. Per esempio, la scossa del febbraio 2011 provocò la chiusura di 419 centri per l'educazione infantile, 215 scuole primarie e secondarie e diverse istituzioni terziarie tra cui le Università di Canterbury e Lincoln, nei distretti scolastici delle città di Selwyn, Waimakariri, e Christchurch (EERI Special Earthquake Report, 2011).



Figura 16  
a) Danni alla stazione di biologia marina presso la University of Concepción; b) Danni al Biotechnology lab presso la University of Concepción. (Miranda et al. 2012).

Oltre al danneggiamento dei sistemi strutturali, furono osservati danni di natura non strutturale molto estesi. I danni più comuni coinvolsero il collasso di impianti di illuminazione e controsoffitti, pannelli per il riscaldamento a soffitto e arredamento (Figura 17).

In alcune occasioni vi fu il collasso di vetrate e il distacco di rivestimenti in laterizio o muratura piena.

## 2.11 Il terremoto dell'Emilia Romagna del 2012

### 2.11.1 Prestazione sismica del costruito in generale.

Nel 2012 la regione italiana dell'Emilia Romagna fu colpita da due eventi sismici. Il primo terremoto di magnitudo 5.9 avvenne il 20 maggio 2012 e causò la morte di sette persone, danni significativi a siti storici, chiese e strutture industriali, e circa 7.000 sfollati. Il secondo terremoto, di magnitudo 5.8, colpì la regione 9 giorni dopo il primo, il 29 maggio 2012. Questo secondo evento causò ulteriori danneggiamenti dei siti danneggiati nel corso dell'evento del 20 maggio ed estese l'area colpita arrivando fino alla zona est della provincia di Modena. Il risultato furono 17 vittime e circa 14.000 sfollati (Rossetto et al., 2012; Ioannou et al., 2012).

Danni strutturali furono osservati in relazione a costruzioni in calcestruzzo armato così come a costruzioni in muratura. La prestazione globale degli edifici scolastici ubicati nell'area colpita fu

soddisfacente. Infatti, solo nove giorni dopo il primo evento sismico, 53 scuole e palestre venivano usate come centri di raccolta e soccorso (Ioannou et al., 2012).

Le perdite economiche provocate dai due terremoti furono stimate pari a circa 15.8 miliardi di dollari americani (Impact Forecasting, 2012). Come nel caso di molti altri terremoti, la percentuale più alta delle perdite fu attribuita ai danni non strutturali.

### 2.11.2 Prestazione degli elementi non strutturali in edifici scolastici

Come nel caso del terremoto di L'Aquila, danneggiamento diffuso degli elementi non strutturali fu osservato in seguito al terremoto che colpì l'Emilia Romagna nel 2012. Gli elementi più colpiti dal sisma furono i controsoffitti, i muri di partizione e i contenuti degli edifici.

Nella biblioteca Novi, un pesante parapetto in muratura semplice ubicato sul tetto dell'edificio collassò e cadde sul marciapiede sottostante, danneggiando una rastrelliera per le biciclette (Figura 18a). Questo evento avrebbe potuto causare delle vittime nel caso in cui qualcuno si fosse trovato nei pressi dell'edificio. Un esempio di danni ai contenuti è riportato in Figura 18b. Sostanzialmente tutte le librerie e le scaffalature collocate all'interno della biblioteca Novi si ribaltarono o collassarono (Occhiuzzi et al., 2012).

Figura 17

a) Danni non strutturali alla University of Canterbury;  
b) Vista di danni a controsoffitti, tubazioni e contenuti. (<http://www.scnz.org/magazine/2010/09/steel-structures-perform-well-during-darfield-earthquake/>).

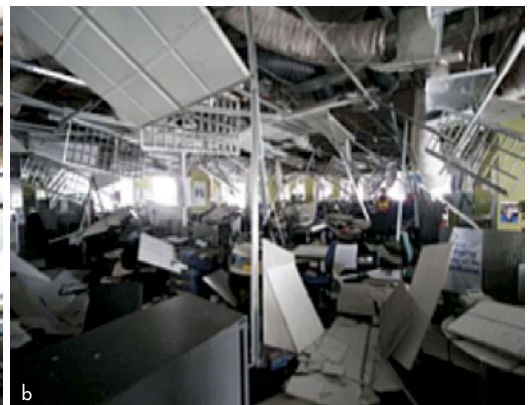


Figura 18

a) Collasso di un parapetto in muratura presso la biblioteca Novi di Modena;  
b) Collasso di librerie all'interno della biblioteca Novi di Modena. (Occhiuzzi et al. 2012).





Esempi di controsoffitti danneggiati, come mostrato in Figura 19a, possono trovarsi nella Scuola Elementare di Maccaretolo. Lo stesso edificio soffrì di fessurazione dei rivestimenti esterni e dei muri di (D'Ainello et al., 2012).

Danneggiamento diffuso di rivestimenti esterni e di muri di partizione fu anche osservato nella scuola elementare "Anna Frank", di cui si può osservare la palestra in Figura 19b (Occhiuzzi et al., 2012).

## 2.12 Il terremoto di South Napa del 2014

### 2.12.1 Prestazione sismica del costruito in generale.

Il terremoto di South Napa (California), colpì la Bay area di San Francisco il 24 agosto 2014 alle ore 3:20 am. Il terremoto fu di magnitudo 6 e fu il più forte terremoto a colpire l'area di San Francisco dai tempi del terremoto di Loma Prieta. Sebbene relativamente poco intenso, il terremoto di South Napa causò uno scuotimento terrestre di entità significativa nella regione epicentrale.

Anche se non ci furono vittime dirette, una persona morì circa due settimane dopo il terremoto, a causa di ferite inflitte dalla caduta di alcuni detriti. Tuttavia, gli esperti concordano sul fatto che le vittime e i feriti sarebbero stati molti di più nel caso in cui il terremoto fosse avvenuto nel corso della giornata lavorativa.

Resoconti preliminari redatti dal PAGER (USGS Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response), stimano le perdite economiche direttamente attribuibili al terremoto nell'ordine di 1 miliardo di dollari americani.

Come nel caso di molti altri terremoti modesti avvenuti nel passato recente negli Stati Uniti, la maggior parte degli edifici manifestò una buona risposta sismica dal punto di vista della salvaguardia della vita degli occupanti. Per inciso, non ci furono vittime come diretta conseguenza di collassi strutturali. Tuttavia, la prestazione di moltissime delle strutture interessate fu compromessa dal danneggiamento o dal collasso degli

elementi non strutturali. Si noti come la maggior parte dei danni economici sia da imputare ai danni subiti dagli elementi non strutturali. Inoltre, l'interruzione delle attività così come altre perdite indirette provocate dalle inadeguate prestazioni non strutturali, contribuirono significativamente a fare crescere le perdite globali.

Danni non strutturali furono osservati un po' ovunque nell'area epicentrale, ed in particolar modo nella città di Napa. I problemi più comuni furono il collasso di controsoffitti, serbatoi alti (in particolare all'interno delle vinerie), sistemi di illuminazione, tubazioni, attrezzature per la telecomunicazione, generatori di energia, camini in muratura, sistemi per il rifornimento di gas, vetrate, muri di partizione, parapetti in muratura e contenuti di vario genere.

### 2.12.2 Prestazione degli elementi non strutturali in edifici scolastici

Nel corso del terremoto di South Napa, le scuole pubbliche manifestarono un buon comportamento sismico, sostenendo danni strutturali molto limitati e generalmente di lieve entità. Tuttavia, la maggior parte delle strutture soffrì pesante danneggiamento di elementi non strutturali come componenti architettoniche, meccaniche ed elettriche, controsoffitti, impianti illuminanti, armadietti, scaffalature etc. Tra le molte strutture colpite, si ricorda per esempio, il Napa Valley College. A tal proposito, un esempio di danneggiamento ai contenuti è riportato in Figura 20a. Deformazioni eccessive della struttura portante causarono pesante fessurazione dei pannelli di cartongesso, incapaci di assorbire tali spostamenti (Figura 20b). È ragionevole aspettarsi questo tipo di danni in seguito a terremoti di intensità moderata o forte.

Strutture in muratura manifestarono danni a camini e parapetti. Per esempio, un parapetto in pietra, parte della Goodman Library, fu danneggiato ed alcune pietre caddero sul marciapiede sottostante (Figura 21a).



Figura 19  
a) Controsoffitti danneggiati in un edificio scolastico. (D'Ainello et al. 2012);  
b) Vista della palestra nella scuola elementare "Anna Frank". (Occhiuzzi et al. 2012).

Danni diffusi ad elementi pesanti come statue, fontane, librerie etc. Furono osservati presso la Justin-Siena High School. Figura 21b propone una vista della fontana danneggiata nel cortile interno della scuola.

Il danneggiamento di tubazioni fu osservato in varie località. Per esempio, presso un liceo ubicato nel centro di Napa, la base dell'ancoraggio di un grande serbatoio si distaccò dalla parete del serbatoio stesso. Di conseguenza, il serbatoio soffrì oscillazioni di grande ampiezza nel corso del terremoto, provocando la rottura delle tubazioni (Figura 22a). Tubazioni dislocate furono trovate anche presso il Napa Valley College. Un esempio di questo tipo di danneggiamento di lieve entità è mostrato in Figura 22b.

### 2.13 Summary

Terremoti recenti, avvenuti in paesi con forti tradizioni in ingegneria sismica, hanno dimostrato che gli edifici progettati e costruiti in accordo con le normative sismiche moderne sono generalmente in grado di resistere i terremoti senza soffrire danni strutturali eccessivi.

Al contrario, terremoti recenti così come terremoti del passato, hanno sottolineato come ad oggi, gli ingegneri, non possedano ancora una conoscenza adeguata relativamente alla risposta sismica degli elementi non strutturali. Infatti, è stato osservato che anche terremoti minori sono in grado di causare danni non strutturali di grave entità.

Nelle sezioni precedenti si è presentato un breve quadro relativo ai danni non strutturali osservati

Figura 20  
a) Libri caduti dalle rispettive scaffalature all'interno della McCarthy Library (Napa Valley College);  
b) Fessurazione di partizioni in cartongesso (Liceo nel centro di Napa). (Kang and Mahin 2014).



Figura 21  
a) Collasso di un parapetto in muratura presso la Goodman Library;  
b) Collasso di una fontana in pietra presso la Justin-Siena High School. (Kang and Mahin 2014).



Figura 22  
a) Collasso dell'ancoraggio di un serbatoio presso una scuola di Napa;  
b) Tubazioni dislocate presso il Napa Valley College. (Kang and Mahin 2014).



nel corso di una serie di eventi sismici del passato. Contrariamente a quanto erroneamente ipotizzabile, si è dimostrato come le prestazioni sismiche degli elementi non strutturali in edifici scolastici, non siano significativamente migliorate nel corso degli ultimi 50 anni. Al contrario, danni non strutturali osservati in occasione del terremoto dell'Alaska del 1964, si sono quasi sistematicamente ripetuti in occasione di tutti i terremoti che sono stati analizzati in questo studio. Gli elementi più comunemente danneggiati comprendono controsoffitti, muri di partizione, sistemi di illuminazione tubazioni e arredi come librerie e armadietti.

Tutto questo è ancora più sorprendente se si pensa che, nel 1964, una commissione di esperti stabilì, in seguito a varie ricognizioni, che la maggior parte dei danni non strutturali riscontrati si sarebbero potuti evitare senza incorrere in spese

aggiuntive rispetto ai costi del progetto originale (Committee on the Alaska Earthquake, 1973). Nella stessa occasione, fu riconosciuto che l'impatto dei danni agli elementi non strutturali fu estremamente significativo in relazione a numerosi edifici, in diverse città, e fu suggerito che la risposta di questo tipo di elementi avrebbe dovuto essere l'oggetto di studio di ricerche future. I fatti delineati in questa breve revisione, dimostrano chiaramente come sia tutt'ora necessario continuare a studiare la risposta sismica degli elementi non strutturali e come sia necessario sviluppare ed implementare metodi di progettazione affidabili per questo tipo di elementi. L'obiettivo deve essere quello di raggiungere un adeguato controllo delle perdite economiche dirette così come dei tempi di inattività che seguono un evento sismico, in aggiunta a garantire, sempre e comunque, la salvaguardia della vita delle persone.

## Bibliografia

- ATC-20: <https://www.atccouncil.org/products/downloadable-products/placards>
- Augenti N., Parisi F. (2010) - Learning from Construction Failures due to the 2009 L'Aquila, Italy, Earthquake, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, November/December 2010.
- Bellet D.E. (1989) - Impact of Seismic Safety Legislation on Schools, Hospitals, and Essential Services Buildings, Office of the State Architect, Sacramento, CA, 14 pages.
- Berryman K., Gerstenberger M., Massey C., Fursman, L. (2011) - The Canterbury Earthquake Sequence of 2010-2011, New Zealand: a review of seismology, damage observations and consequences.
- Borzi B., Ceresa P., Faravelli M., Fiorini E., Onida M. (2013) - Seismic risk assessment of Italian school buildings, all'interno del libro *Computational Methods in Earthquake Engineering*, Vol. 2, Springer editore, ISBN: 978-94-007-6572-6, ISSN: 1871-3033 pp. 317-344.
- Borzi B., Faravelli M. (2014). - Progetto Operativo d2-Definizione di Priorità di Interventi per le Scuole Italiane, Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (Eucentre).
- Braga F., Manfredi V., Masi A., Salvatori A., Vona M. (2011) - Performance of non structural elements in RC buildings during the L'Aquila, 2009 earthquake, *Bull Earthquake Eng* (2011) 9:307-324 DOI 10.1007/s10518-010-9205-7.
- California Seismic Safety Commission Findings Notes and Observations from the Nisqually Earthquake, February 28, 2001 Puget Sound Region, State of Washington CSSC Publication No. 2001-03.
- CEN (2004) - Eurocode 8 - Design Provisions for Earthquake Resistant Structures, EN- 1998-1:2004: E, Comité Européen de Normalization, Brussels, Belgium.
- Chock G., Roberston I., Nicholson P., Brandles H., Medley E., Okubo P., Hirshorn B., Sumada J., Kindred T., Iinuma G., Lau E., Sarwar A., Del Pino J., Holmes W. (2006) - Compilation of Observations of the October 15, 2006 Kiholo Bay (Mw 6.7) and Mahukona (Mw 6.0) Earthquakes, Hawaii.
- Committee on the Alaska Earthquake of the Division of Earth and Sciences National Research Council, (1973) - The Great Alaska Earthquake of 1964, National Academy of Sciences Washington D.C.
- Creager K., Crosson R., Pratt T., Weaver C., Kramer S., MacRae G., Lehman D., Eberhard M., Lowes L., Stanton J., Ballantyne D., May P., Chang S. (2001) - The Nisqually Earthquake of 28 February 2001 Preliminary Reconnaissance Report, Nisqually Earthquake Clearinghouse Group, University of Washington Seattle, WA, March 2001.
- D'Aniello M., La Manna Ambrosino G. (2012) - Terremoto dell'Emilia: report preliminare sui Danni registrati a Bondeno (FE), Cento (FE), Finale Emilia (MO), San Prospero (MO) e Viganaro Mainarda (FE) in seguito agli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012. Rilievi e verifiche di agibilità dal 02 al 06 giugno 2012, (in Italian).
- Davis G., (2003) - Guide and Checklist for Non-Structural Earthquake Hazards in California Schools, A Project of: Governor's Office of Emergency Services, Department of General Services - Division of The State Architect, Seismic Safety Commission, Department of Education.
- Division of the State Architect (DSA), (1994) - ATC-20 Reports. Reviewed by Steven Vukazich on July 8, 2009.
- Dolce M., coord. (2005) - Applicazione delle procedure VC e VM agli edifici scolastici della provincia di Potenza per le valutazioni di vulnerabilità e di rischio sismico", *Atti del Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all'ingegneria*, n. 6/2005, Università degli Studi della Basilicata.
- Dolce M., Martinelli A. (2007) - Una nuova metodologia di valutazione della vulnerabilità e del rischio sismico degli edifici in muratura applicata agli edifici pubblici dell'Italia centro-meridionale, *Atti del*

- XII Convegno L'Ingegneria Sismica in Italia ANIDIS 2007, Pisa, paper n. 226.
- Dorn R.I., Kanikeberg, K., Burke A. (2011) - School Facilities Manual - School Construction Assistance Program, Prepared by School Facilities and Organization School Facilities and Organization Office of Superintendent of Public Instruction, Gordon Beck, Director.
- Earthquake Country Alliance: <http://www.earthquakecountry.info/step1/whysecure.html>
- Earthquake Engineering Research Institute 89-03 (EERI), (1989) - Loma Prieta Earthquake October 17, 1989 - Preliminary Reconnaissance Report.
- Earthquake Engineering Research Institute (EERI), (1990) - Loma Prieta Earthquake Reconnaissance Report, EERI, Berkeley, CA.
- EERI Special Earthquake Report (2010) - Learning from Earthquakes: The Mw 8.8 Chile Earthquake of February 27, 2010.
- EERI Special Earthquake Report (2011) - Learning from Earthquakes: The M 6.3 Christchurch, New Zealand, Earthquake of February 22.
- FEMA E-74 (2011) - Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage - A Practical Guide, FEMA E-74 Document, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Filiatrault A., Uang C-M., Folz B., Christopoulos C., Gatto K. (2001) - Reconnaissance Report of the February 28, 2001 Nisqually (Seattle-Olympia) Earthquake. Structural Systems Research Project Report No. SSRP-2000/15, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, La Jolla, CA, 62 p.
- Filiatrault A., Sullivan T. (2014) - Performance-based Seismic Design of Nonstructural.
- Global Risk Miyamoto (2009) - 2009 M6.3 L'Aquila Italy, Earthquake Field Investigation Report.
- Gupta A., McDonald B.M. (2008) - Performance of Building Structures During the October 15, 2006 Hawaii Earthquake", Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Performance of building structures during the october 15, 2006 hawaii earthquake.
- Impact Forecasting (2012) - Annual Global Climate and Catastrophe Report.
- Ioannou I., Borg R., Novelli V., Melo J., Alexander D., Kongar I., Verrucci E., Cahill B., Rossetto T. (2012) - The 20<sup>th</sup> May 2012 Emilia-Romagna earthquake-EPICentre field observation report.
- Jennings P.C. (1997) - Enduring Lessons and Opportunities Lost from the San Fernando Earthquake of February 9, 1971. Earthquake Spectra, Vol. 13, No. 1, 1997.
- Jephcott D. (1971) - Performance of Public School Buildings in the San Fernando Earthquake February 9, 1971.
- Kang G.S., Mahin S.A. (2014) - Preliminary Notes and Observations on the August 24, 2014, South Napa Earthquake, Pacific Earthquake Engineering Research Center Report No. 2014/13, Headquarters, University of California, Berkeley, September 17, 2014.
- Lew H.S., Cooper J., Hacopian S., Hays W., Mahoney M. (1994) - The January 17, 1994, Northridge Earthquake, California.
- Magliulo M., Pentangelo V., Manfredi G. (2009) - Il danneggiamento delle controsoffittature a seguito del terremoto dell'Aquila dell'aprile 2009, (in Italian). Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Napoli "Federico II".
- McGavin G. (1994) - Observations of Public Educational Facilities within the Epicentral Area of the January 17, 1994, Northridge, California, Earthquake.
- Ministry of Education Engineering Strategy Group (MEESG), (2014) - Understanding the Seismic Performance of Timber Framed School Buildings, Version 1 for General Issue February 2014.
- 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.
- National Clearinghouse for Educational Facilities, (2004) - Earthquakes and Schools, adapted from Design Guide for School Safety Against Earthquakes, Floods, and High Winds, FEMA Publication 424, January 2004.
- NIST Special Publication 778 (1989) - Performance of Structures During the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989.
- Occhiuzzi A., Maddaloni G., Caterino N., Nestovio G. (2012) - Report preliminare sui danni registrati nel comune di Novi di Modena (MO) in seguito agli eventi sismici del 20 Maggio, del 29 maggio e del 2 giugno 2012 (in Italian). Università degli Studi di Napoli "Parthenope".
- Risk Management Solutions (RMS), (2010) - The 2010 Maule, Chile Earthquake: Lessons and Future Challenges.
- Rossetto T., Alexander D., Verrucci E., Ioannou I., Borg R., Melo J., Cahill B., Kongar I. (2012) - The 20<sup>th</sup> May 2012 Emilia-Romagna earthquake - EPICentre field observation report.
- 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 (in Italian). Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Civile, sede di Strutture.
- SPA Risk LLC (2014) - 24 August 2014 South Napa Mw 6 Earthquake Reconnaissance Report.

## **Gli Autori**

### **Paolo Martino Calvi**

Laureatosi presso il Dipartimento di Meccanica Strutturale dell'Università di Pavia nel 2010, ha ottenuto un Dottorato di Ricerca al Department of Civil Engineering dell'Università di Toronto (Canada) discutendo una tesi su "A Theory for the Shear Behaviour of Cracks Providing a Basis for the Assessment of Cracked Reinforced Concrete Structures" (Relatori: Prof. Michael P. Collins e Evan C. Bentz).

Attualmente è Assistant Professor presso il Department of Civil and Environmental Engineering dell'University of Washington, Seattle (WA, USA). Ha collaborato come Post-Doctoral Researcher con il Prof. André Filiatrault presso il Department of Civil, Structural and Environmental Engineering dell'Università di Buffalo (SUNY).

### **Matteo Moratti**

Ingegnere strutturista, Direttore Tecnico della Società di Ingegneria Studio Calvi S.r.l. Svolge la propria attività occupandosi di progettazione, direzione lavori e collaudo di strutture in cemento armato normale e precompresso, strutture in acciaio e strutture in legno seguendo commesse nazionali ed internazionali nell'ambito della progettazione ex-novo e dell'adeguamento di edifici ed infrastrutture esistenti.

Dal 2012 è inoltre Professore a contratto per il corso "Teoria e progetto di ponti" all'Università di Pavia. Ha partecipato, in qualità di relatore, a diversi corsi di aggiornamento per professionisti, principalmente sul tema dell'isolamento di strutture e sistemi dissipativi aggiuntivi.

### **André Filiatrault**

È Professore presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Strutturale ed Ambientale della State University of New York di Buffalo (USA) e presso l'Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia. Attualmente ricopre anche il ruolo di Presidente dell'Associazione SPONSE (Seismic Performance of Non-structural Elements).

In passato è stato Professore presso l'Università della California di San Diego e Direttore del Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER) di Buffalo. Ha un'esperienza quasi trentennale di tematiche riguardanti prove sperimentali, progettazione ed analisi di strutture e di elementi non strutturali, attività testimoniate dalle numerose pubblicazioni (libri e articoli scientifici) e che gli sono valse svariati riconoscimenti, come la "Sir Casimir Stanislaus Gzowski Medal" (1990) della Canadian Society for Civil Engineering, il "Moisseiff Award" (2002) dell'American Society of Civil Engineers e l'"Outstanding Researcher/Scholar Award" dalla Research Foundation of the State University of New York (2008).