

INTERNATIONAL CENTRE FOR MECHANICAL SCIENCES



# PROTEZIONE SISMICA DELLE STRUTTURE

## Tecnologie innovative - Ricerca - Applicazioni

A CURA DI

GAETANO RUSSO  
UNIVERSITÀ DI UDINE, UDINE, ITALY

STEFANO SORACE  
UNIVERSITÀ DI UDINE, UDINE, ITALY

## PREFAZIONE

*Le tecnologie innovative di protezione sismica delle strutture, che da tempo costituiscono un argomento di punta della ricerca nel settore dell'ingegneria sismica, sono divenute oggetto di crescente interesse anche da parte della comunità tecnica e professionale. Tale interesse è connesso sia alla realizzazione di una qualificata serie di applicazioni concrete, capaci di stimolare l'attenzione dei progettisti e delle committenze, sia al riconoscimento delle strategie e dei dispositivi d'isolamento e di dissipazione da parte delle più recenti normative tecniche (O.P.C.M. 3274 del 2003 ed aggiornamenti, D.M. 14/09/2005, D.M. 14/01/2008). Quest'ultimo aspetto, in particolare, ha provocato una forte accelerazione nell'impiego dei sistemi avanzati di maggiore efficacia, sia per le nuove costruzioni che per il miglioramento e l'adeguamento sismico delle esistenti, comprese quelle a carattere storico e monumentale.*

*L'adozione di tali tecnologie pone, tuttavia, differenti problematiche rispetto al progetto delle strutture antisismiche tradizionali, per risolvere le quali risulta necessaria una conoscenza di base dei principi di funzionamento e delle prestazioni offerte dai diversi tipi di dispositivi in commercio e dai sistemi di protezione che li includono. Inoltre, come per qualsiasi percorso progettuale, devono essere acquisiti gli opportuni metodi di analisi, di modellazione, di dimensionamento e di verifica.*

*Tenuto conto dell'interesse suscitato da tale argomento, nel 2006 gli scriventi hanno organizzato presso il CISM un corso APT ("Advanced Professional Training") ad esso dedicato, mirante a fornire alcuni approfondimenti su diverse tipologie di dispositivi e tecniche di protezione, nonché ad illustrare un selezionato repertorio di applicazioni pratiche. Nel presente volume sono raccolti i testi delle dieci lezioni tenute nel corso, successivamente predisposti dai relatori aggiornandone i contenuti agli sviluppi delle rispettive attività di studio e di ricerca, sino alla fine del 2008.*

*I capitoli riguardano: la definizione degli scenari di pericolosità sismica ai fini dell'applicazione al progetto di strutture con isolamento alla base; una panoramica delle applicazioni delle tecnologie avanzate di protezione sismica a livello internazionale; metodologie di modellazione delle stesse agli elementi finiti; l'impiego dell'isolamento negli edifici*

*ecclesiastici, con particolare riguardo a quelli a pianta basilicale; lo studio di isolatori elastomerici di ultima generazione rinforzati con tessuti in fibre di carbonio; l'analisi dei dispositivi fluido-viscosi pressurizzati e la loro applicazione in un sistema di isolamento e dissipazione alla base; l'impiego di controventi dissipativi di vario tipo nel miglioramento od adeguamento sismico delle strutture a telaio; l'analisi di uno specifico sistema a controventi dissipativi e della tecnologia cosiddetta "a cavi smorzanti", entrambi includenti dispositivi fluido-viscosi pressurizzati; una particolare strategia di adeguamento delle costruzioni in muratura, denominata "a cuciture attive"; una presentazione delle principali metodologie di sperimentazione sismica delle strutture e dei sistemi di protezione, con riferimento alle attività svolte al riguardo presso il Joint Research Centre di Ispra.*

*Nell'insieme, tali contributi delineano un quadro d'informazione scientifica e tecnica che, nell'auspicio dei curatori, può rappresentare un'utile lettura sia per i non esperti del settore, con riferimento a quanto presentato sugli aspetti di base, sia per chi già possiede buone conoscenze in merito alle moderne tecnologie di protezione sismica, con riguardo agli elementi di approfondimento proposti per alcuni dei temi trattati.*

*Gaetano Russo, Stefano Sorace*

## INDICE

Prefazione

Scenari di pericolosità sismica per l'applicazione  
dell'isolamento sismico

*G. Panza, A. Peresan, F. Romanelli, F. Vaccari, E. Zoccolo* ..... 1

Panoramica delle applicazioni dell'isolamento sismico e delle  
altre tecnologie antisismiche a livello internazionale

*A. Martelli, M. Forni*..... 31

Modellazione agli elementi finiti di sistemi di protezione sismica

*L. Bandini*..... 67

Basilica-type buildings: seismic vulnerability and application  
of base isolation

*A. De Luca, G. Brandonisio, G. Cuomo, R. De Lucia, A. Giordano,  
E. Mele, R. Santaniello* ..... 97

Isolamento alla base con dispositivi elastomerici di ultima generazione

*G. Russo, M. Pauletta, A. Paschini*..... 137

Caratterizzazione meccanica dei dispositivi fluido-viscosi pressurizzati  
ed applicazione ad un sistema d'isolamento e dissipazione alla base

*S. Sorace, G. Terenzi* ..... 165

Controventi dissipativi e loro applicazioni

*F. Braga, G. Lomiento*..... 209

I dispositivi fluido-viscosi pressurizzati in sistemi di controventi  
dissipativi e di cavi smorzanti

*S. Sorace, G. Terenzi* ..... 237

Le cuciture attive nell'adeguamento sismico delle strutture in muratura

*M. Dolce, F. C. Ponso, C. Moroni*..... 277

Progetti di ricerca sulle tecnologie avanzate di protezione sismica

*G. Magonette, D. Tirelli* ..... 311

# Scenari di pericolosità sismica per l'applicazione dell'isolamento sismico

Giuliano Panza<sup>1,2</sup>, Antonella Peresan<sup>1</sup>, Fabio Romanelli<sup>1</sup>, Franco Vaccari<sup>1,2</sup> e Elisa Zuccolo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Trieste, Trieste, Italy

<sup>2</sup> The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Miramar, Italy

**Riassunto.** Le analisi sismologiche e morfostrutturali permettono la definizione di "terremoti di scenario", ossia dei forti terremoti che possono aver luogo nella regione di interesse e quindi di modellare l'input sismico in siti predeterminati. Per gli insediamenti di particolare rilevanza, ove i sismogrammi sintetici sono stati confrontati in modo soddisfacente con le registrazioni accelerometriche o con le osservazioni macrosismiche, le stime teoriche consentono di delineare una microzonazione, considerando un insieme di possibili terremoti di scenario. La modellistica sismologica fornisce parametri che, eventualmente trasformati in termini ingegneristici, possono consentire una valutazione accurata del carico che dovrà essere sopportato dalle strutture di particolare rilevanza (ponti, dighe, aree industriali a rischio, ospedali, scuole ed edifici di rilevante interesse storico) in caso di forte terremoto, consentendo la verifica della idoneità progettuale delle strutture presenti nelle aree campione e dei siti dove esse insistono, ivi comprese le strutture sismicamente isolate.

## 1 Stato dell'arte a livello internazionale

Una strategia efficace per la mitigazione del rischio sismico dipende sostanzialmente da tre fattori: a) la stima adeguata della *pericolosità* sismica, ossia la descrizione realistica dei terremoti attesi e degli effetti legati alla propagazione delle onde sismiche; b) la valutazione della *vulnerabilità* delle strutture ed infrastrutture presenti nella regione in esame, in funzione delle loro caratteristiche tecnico-strutturali e del moto del suolo atteso nell'eventualità di un forte terremoto; c) la valutazione dell'*esposizione* di tali strutture ed infrastrutture (cioè del loro "valore", tenendo conto dei contenuti in termini sia di vite umane che di oggetti).

Per ridurre significativamente il rischio associato agli eventi sismici è necessario l'impiego di avanzate metodologie sismologiche per la stima realistica della pericolosità sismica, che consentano la mitigazione dell'impatto dei terremoti, mediante una valutazione preventiva della vulnerabilità e la pianificazione di interventi di messa in sicurezza delle strutture a rischio, anche mediante tecniche avanzate quali l'isolamento sismico e la dissipazione di energia.

Il problema tipico della stima della pericolosità sismica consiste nella determinazione delle caratteristiche del moto del suolo associabile ai terremoti futuri. Il differente approccio sismologico con cui può essere realizzata la definizione della pericolosità sismica ha portato allo sviluppo di due metodi diversi e complementari: il metodo deterministico ed il metodo probabilistico. I primi metodi tecnico-scientifici sviluppati per la stima della pericolosità sismica sono stati quelli deterministici, basati sull'osservazione che la distribuzione dei danni è generalmente correlata con la distanza e con le proprietà fisiche del suolo sottostante. Gli anni '70 hanno visto lo sviluppo di

mappe probabilistiche di pericolosità sismica a scala nazionale, regionale ed urbana (microzonazione). Negli anni '90 tali strumenti hanno finito per prevalere sulla cartografia deterministica. La maggior parte degli approcci probabilistici tradizionali, tuttavia, si è dimostrata del tutto insoddisfacente in occasione dei più recenti e distruttivi terremoti, tra i quali: Bam (Iran, 2003), Boumerdes (Algeria, 2003), Gujarat (India, 2002) e Kobe (Giappone, 1998). Ciò ha motivato, tra l'altro, la revisione, attualmente in corso, delle norme di sicurezza per gli impianti nucleari. Dopo un lungo periodo di egemonia delle metodologie probabilistiche, negli ultimi anni è divenuta sempre più diffusa la consapevolezza dei limiti di tale approccio (e.g. Castaños e Lomnitz, 2002) e l'attenzione si sta rivolgendo ora verso le metodologie deterministiche, come testimoniato fra l'altro dal notevole interesse della comunità scientifica per queste ultime in occasione dei più importanti convegni internazionali (e.g. AGU – Fall Meeting, S. Francisco, Dicembre 2005).

Un ulteriore limite delle procedure standard per la stima della pericolosità sismica è legato all'assenza di indicazioni sul tempo di occorrenza di un terremoto imminente. È generalmente accettato, infatti, che la possibilità di ottenere una tale informazione, ossia conoscere l'intervallo di tempo in cui è probabile che si verifichi un forte terremoto entro una certa regione, consentirebbe di ridurre significativamente i danni ad esso conseguenti. Le procedure probabilistiche standard, tuttavia, forniscono generalmente mappe indipendenti dal tempo, basate sulle proprietà statistiche medie della sismicità nello spazio e nel tempo. I modelli indipendenti dal tempo, infatti, trascurano l'informazione sul tempo trascorso dall'ultimo forte terremoto per le sorgenti considerate, basandosi sull'ipotesi di "stazionarietà" dell'occorrenza dei terremoti. Per superare tale limite, sono state proposte numerose procedure per la stima probabilistica dipendente dal tempo della pericolosità sismica, considerando diversi modelli di ricorrenza (*renewal process models*) come alternativa più adeguata della classica ipotesi di Poisson (occorrenza casuale e "senza memoria" dei terremoti). Questi modelli utilizzano funzioni di densità di probabilità miste per descrivere la ricorrenza dei terremoti e tali funzioni possono differire a seconda della regione considerata; conseguentemente le osservazioni disponibili appaiono spesso insufficienti per vincolare significativamente le distribuzioni di probabilità. Un altro limite dei modelli di ricorrenza utilizzati è la stima del tempo trascorso dall'ultimo terremoto forte: tale valutazione può risultare impossibile se la lunghezza del catalogo dei terremoti è inferiore ai tempi di accumulo e rilascio dell'energia sismica e se non sono disponibili dati paleosismologici rilevanti (Decanini et al., 2001).

Recentemente è stata proposta una procedura integrata, sviluppata presso l'ICTP in collaborazione con l'IEPT (Accademia delle Scienze Russa, Mosca) ed il DST (Università degli Studi di Trieste), che permette di affrontare efficacemente alcuni dei limiti menzionati dell'approccio probabilistico, tra i quali l'assenza di informazioni circa il tempo di occorrenza dei terremoti forti. La procedura integrata (Peresan et al., 2002; Peresan et al., 2008) associa l'approccio neodeterministico (e.g. Panza et al., 2001) per la stima della pericolosità sismica all'informazione spazio-temporale fornita dalle procedure sviluppate per l'identificazione delle aree ad elevato potenziale sismogenetico e per la previsione a medio termine spazio-temporale dei terremoti (i.e. dove gli allarmi sono dichiarati per intervalli temporali di qualche anno e con un'incertezza spaziale di centinaia di chilometri), in fase di avanzata sperimentazione su scala globale. Un vantaggio pratico della procedura integrata consiste nell'informazione temporale fornita dagli algoritmi di previsione, che può risultare particolarmente utile per la realizzazione di opere di prevenzione rilevanti quali:

- la verifica della stabilità e l'eventuale adeguamento degli edifici e delle vie di comunicazione, anche impiegando moderne tecniche, quali l'isolamento sismico;
- la verifica della completa operatività dei soccorsi e la pianificazione di tutte quelle operazioni che, dopo il terremoto, sarebbero inevitabilmente ostacolate dall'emergenza.

## 2 Stima della pericolosità sismica: metodo probabilistico e metodo deterministico

La stima della pericolosità sismica può essere effettuata in vari modi, ad esempio mediante una descrizione della severità dello scuotimento del suolo dovuto ad un terremoto ad una certa distanza e magnitudo ("scenario di scuotimento"), oppure mediante mappe probabilistiche dei parametri rilevanti che descrivono il moto del suolo. Storicamente il parametro più frequentemente utilizzato nell'analisi ingegneristica per la stima della pericolosità sismica è la PGA (*Peak Ground Acceleration*), ossia la massima accelerazione del suolo attesa in un determinato sito. Oggi tuttavia si riconosce l'impossibilità di descrivere in modo adeguato gli effetti del terremoto utilizzando solo la PGA, in quanto il danneggiamento dipende in modo rilevante anche da altri fattori, quali la durata e la frequenza delle onde sismiche. Per l'applicazione delle tecniche di isolamento sismico è, inoltre, necessario definire gli spostamenti per i quali la base dati esistente è ben lontana dall'avere una significatività statistica. Sebbene si sia compreso che le caratteristiche del moto del suolo, quali l'ampiezza, il contenuto in frequenza e la durata, sono importanti per valutare il suo potenziale di danneggiamento, alcune di queste proprietà vengono spesso ignorate. Inoltre è importante sottolineare che per uno studio completo della risposta non lineare delle strutture alla sollecitazione sismica non sono sufficienti i soli valori di picco, ma è necessario l'utilizzo di sismogrammi completi (Mollaioli et al., 2006).

L'analisi probabilistica (Cornell, 1968), facendo uso delle informazioni disponibili sulla storia sismica, determina il tasso di probabilità che, entro un intervallo di tempo fissato, il moto del suolo superi un certo livello. In tal modo si ottengono indicazioni potenzialmente utili, ma non sufficientemente attendibili per caratterizzare la pericolosità sismica. Inoltre, non è possibile considerare in modo adeguato fattori che influenzano significativamente il moto del suolo in un dato sito, quali le caratteristiche specifiche della sorgente sismica e del sito stesso. Per una zona fissata, la stima del periodo di ritorno degli eventi sismici è basata sull'ipotesi che gli stessi si succedano in modo indipendente nel tempo (ipotesi di Poisson) e le relative stime di probabilità sono ricavate da dati empirici, nell'ipotesi che la relazione frequenza-magnitudo (FM) dei terremoti segua la legge di Gutenberg-Richter (GR). Tale procedura può introdurre errori rilevanti nella stima della pericolosità sismica di uno specifico sito, soprattutto in considerazione delle limitate osservazioni sismologiche e del modello "Multi-Scala" (MS) della sismicità (Molchan et al., 1997). Secondo tale modello, quando si stima la pericolosità sismica seguendo il metodo probabilistico, la zonazione sismica deve essere effettuata a diverse scale, ossia le zone sismogenetiche devono essere sufficientemente grandi da garantire l'applicabilità della GR, nell'intervallo di magnitudo considerato. Il modello MS prevede infatti che relazioni del tipo  $\log N = a - bM$  (ed i concetti di "self-similarity" o invarianza scalare ad esse relativi) descrivano in modo appropriato solo l'insieme degli eventi le cui dimensioni sono trascurabili rispetto a quelle della zona in esame. Questa condizione, ampiamente soddisfatta negli originari studi effettuati da Gutenberg e Richter su scala globale, è stata violata in molti studi successivi, portando all'introduzione del concetto di *terremoto caratteristico* (Schwartz e Coppersmith, 1984) in opposizione al paradigma della *Self-*

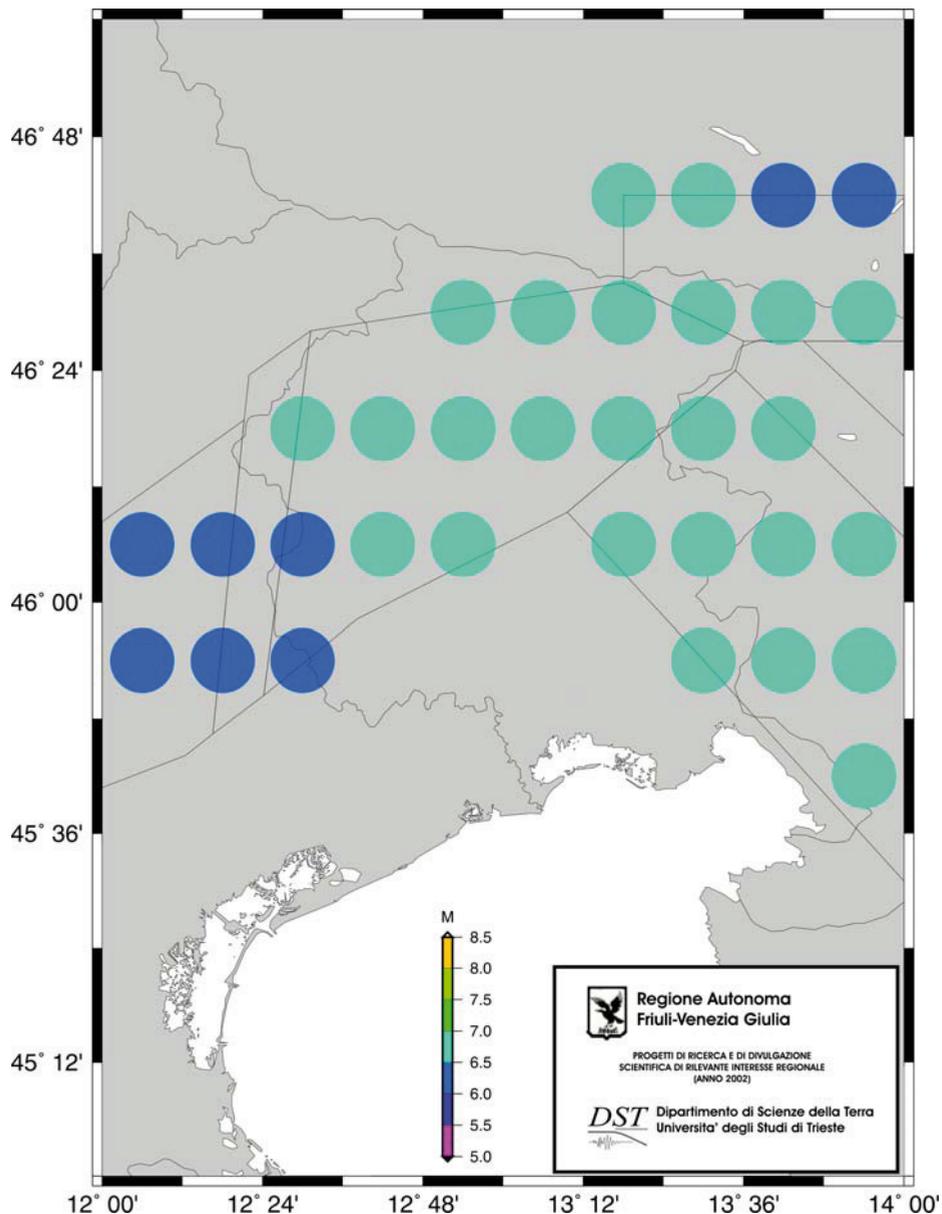
Nell'applicazione della procedura al territorio del Friuli Venezia Giulia è stato considerato un insieme di sorgenti sismiche collocate ai vertici di una griglia di passo  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ , i cui parametri di sorgente sono stati caratterizzati delimitando zone sismogenetiche omogenee, sulla base della zonazione sismotettonica indipendentemente proposta dal Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (Corsanego et al., 1997), ed assegnando, entro ciascuna zona, un meccanismo focale rappresentativo. Il momento sismico scalare (cioè una quantità rappresentativa dell'energia rilasciata da un terremoto) associato a ciascuna sorgente è stato stimato considerando la massima magnitudo osservata nell'area epicentrale. Secondo quanto descritto in Panza et al. (1999; 2001), per ottenere la distribuzione delle massime magnitudo osservate, la sismicità è stata discretizzata in celle di dimensioni  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ , assegnando a ciascuna cella la massima magnitudo in essa registrata. Successivamente, in considerazione delle dimensioni finite delle sorgenti sismiche e dei possibili errori di localizzazione, la magnitudo di ogni cella è stata assegnata anche alle celle circostanti e per ogni cella è stato scelto il valore massimo (*smoothing*). Completata l'operazione di *smoothing*, sono state selezionate le sole celle comuni alla zonazione sismotettonica.

Le sorgenti così definite, sono state utilizzate per generare un database di sismogrammi sintetici realistici, secondo il metodo della sommatoria dei modi (Panza, 1985; Panza e Suhadolc, 1987; Florsch et al., 1991).

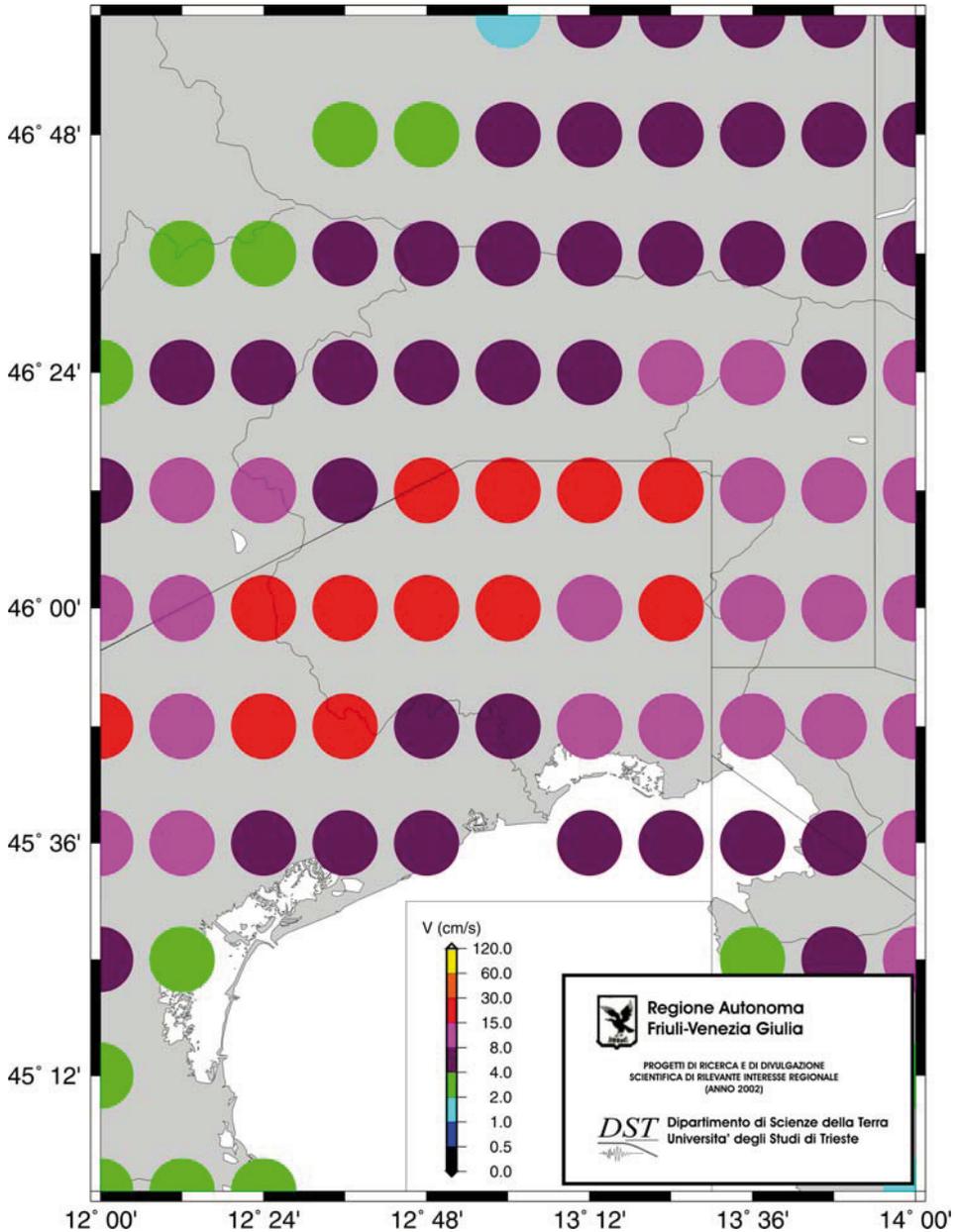
I sismogrammi sintetici sono stati calcolati in siti collocati ai vertici di una griglia di passo  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ , che copre il territorio della regione Friuli Venezia Giulia; in ogni sito viene calcolata la somma vettoriale delle componenti radiale e trasversale del moto del suolo. Per ridurre il numero di elaborazioni, la distanza massima sito-sorgente è stata fissata a 25, 50 e 90 km, in funzione della magnitudo associata alla sorgente stessa ( $M < 6$ ,  $6 \leq M < 7$  ed  $M \geq 7$ , rispettivamente). Le eterogeneità laterali sono state tenute in considerazione utilizzando modelli strutturali diversi, ossia ciascun sismogramma sintetico è stato calcolato considerando il modello strutturale medio associato al poligono regionale che include il ricevitore (Costa et al., 1993; Panza et al., 1999).

A ciascun sito sono stati così associati diversi segnali completi, generati dalle varie sorgenti, ed è stato quindi possibile produrre un insieme di mappe che descrivono il moto del suolo e che rappresentano scenari regionali. Le mappe di pericolosità sismica per il territorio del Friuli Venezia Giulia sono state tracciate considerando i valori di picco dello spostamento (Figura 2), della velocità (Figura 3), dell'accelerazione di progetto (DGA: *Design Ground Acceleration*) (Figura 4). Mappe analoghe possono essere costruite per qualsivoglia parametro estraibile dai sismogrammi completi.

È importante sottolineare come il metodo neo-deterministico consideri in modo efficace aspetti generalmente trascurati dal metodo probabilistico, tra i quali la stima diretta dei parametri descritti dalle mappe in termini di parametri di progetto, senza la necessità di doverli dedurre dalle mappe probabilistiche, e l'estrapolazione dei parametri di progetto a siti ove l'informazione sulla storia sismica è scarsa. Inoltre, lo studio ingegneristico completo della risposta non-lineare delle strutture alla sollecitazione sismica richiede l'utilizzo di sismogrammi completi. Infatti, è stata riconosciuta l'impossibilità di descrivere in modo adeguato gli effetti del terremoto utilizzando solo il PGA (*Peak Ground Acceleration*), ossia la massima accelerazione del suolo attesa in un determinato sito, in quanto il danneggiamento dipende in modo rilevante anche da altri fattori, quali la durata e la frequenza delle onde sismiche.



**Figura 2.** Sorgenti sismiche utilizzate per la stima neo-deterministica della pericolosità sismica nella Regione Friuli Venezia Giulia. La magnitudo  $M$  associata a ciascuna sorgente è stata stimata secondo Panza et al. (1999) e corrisponde alla massima magnitudo osservata nell'area epicentrale. I poligoni rappresentano le zone sismogenetiche definite dal GNDT (Corsanego et al., 1997).



**Figura 4.** Mappa delle massime velocità orizzontali attese per la regione Friuli Venezia Giulia, stimate secondo il metodo neo-deterministico (Costa et al., 1993; Panza et al., 1999). I poligoni delimitano le aree caratterizzate da differenti modelli strutturali.

# Panoramica delle applicazioni dell'isolamento sismico e delle altre moderne tecnologie antisismiche a livello internazionale

Alessandro Martelli<sup>1,2,4,5</sup> e Massimo Forni<sup>1,3,4,5</sup>

<sup>1</sup> Sezione Prevenzione Rischi Naturali e Mitigazione Effetti, Dipartimento Ambiente, Cambiamenti Globali e Sviluppo Sostenibile, Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA), Bologna

<sup>2</sup> Scuola di Dottorato in Ingegneria delle Strutture, Politecnico di Torino

<sup>3</sup> Facoltà di Architettura, Università degli Studi di Ferrara

<sup>4</sup> ASSISi (Anti-Seismic Systems International Society)

<sup>5</sup> GLIS (GLIS – Isolamento ed altre Strategie di Progettazione Antisismica)

**Sommario.** Nel mondo sono ormai ben oltre 8000 le strutture (ponti e viadotti, edifici civili, industriali e monumentali ed impianti, anche chimici e nucleari) protette con l'isolamento sismico ed altri sistemi antisismici. L'uso delle tecniche suddette è in continua crescita ed è ovunque influenzato, in modo determinante, dalle caratteristiche della normativa applicata e dall'esperienza acquisita durante terremoti violenti. Il Giappone, dove i soli edifici isolati sono oltre 5000, è il paese leader; seguono la Repubblica Popolare Cinese e la Federazione Russa, dove questi edifici erano, rispettivamente, 610 e 600 in maggio 2007. Negli USA, a causa di una normativa molto penalizzante, essi risultano attualmente "solo" circa 200. L'Italia è quinta, con almeno 51 edifici isolati già completati in aprile 2008, ma il numero delle realizzazioni è cresciuto significativamente negli ultimi anni e, soprattutto, sono ora parecchi gli edifici protetti da moderni sistemi antisismici (in particolare d'isolamento) in costruzione od in progetto: ciò si deve alla nuova normativa sismica. Applicazioni importanti sorgono anche a Taiwan, in Francia, in Nuova Zelanda, in Armenia, in Turchia, in Messico, in Grecia, a Cipro, in Portogallo, nella Corea del Sud, in Canada, in Cile, in Venezuela, in Spagna ed in altri paesi.

## 1 Introduzione

Attualmente vi sono, nel mondo, ben oltre 8000 strutture protette con l'isolamento sismico, la dissipazione d'energia ed altri moderni sistemi di controllo passivo delle vibrazioni sismiche. L'uso delle tecniche suddette è in continua crescita ed è influenzato ovunque, in modo determinante, dalle caratteristiche della normativa applicata.

Il Giappone, grazie alla disponibilità di un'adeguata specifica normativa dal 2000 ed alla liberalizzazione dell'uso dell'isolamento dal 2001, ha consolidato la sua leadership a livello mondiale, con oltre 5000 edifici isolati, incluse circa 3000 villette private (Kamada e Fujita, 2008). In questo paese, la tendenza è di isolare anche grattacieli e gruppi di edifici sorretti da un'unica grande struttura isolata (*artificial ground*). Segue ora, con 610 edifici già isolati in maggio 2007, la Repubblica Popolare Cinese, dove le applicazioni continuano ad aumentare in modo significativo, in particolare per gli edifici residenziali (molti dei quali in muratura), e proseguono

prova durante vari terremoti. Infine, è recentemente aumentato l'uso dei moderni sistemi antisismici per la protezione dei ponti e dei viadotti. Quest'ultimo, iniziato in Giappone alquanto dopo rispetto agli edifici e largamente basato sull'isolamento sismico (HDRB e LRB), si è esteso considerevolmente specialmente in seguito al terremoto di *Hyogo-ken Nanbu* (dopo il quale l'isolamento ha trovato numerose applicazioni a Kobe, per la ricostruzione e per l'adeguamento sismico del sistema viario e ferroviario, fortemente danneggiato dal succitato terremoto, divenendo obbligatorio, in tale città, per i sovrappassi e per i viadotti a doppio impalcato).



**Figura 3.** A sinistra: edificio di 87,4 m d'altezza, che è stato isolato a Tokyo nel 2000 (prima applicazione giapponese dell'isolamento a grattacieli). A destra: schizzo del complesso costituito da 21 edifici di 6÷14 piani che sorgono tutti su un'unica grande piattaforma isolata (denominata *artificial ground*) a Sagami-hara, nell'area di Tokyo.

Grazie alle numerose altre conferme dell'efficacia dei moderni sistemi antisismici durante i tre violenti terremoti giapponesi del 2003 e 2004 (*Miyagi-Oki*, *Off Tokachi* e *Niigata-ken Chetsu* – vedi Figura 2) e più recentemente (ad esempio durante quello del 16 agosto 2005), si prevede che le applicazioni di queste tecniche (soprattutto quelle d'isolamento sismico) continueranno



**Figura 20.** I nuovi edifici isolati del Quartiere San Samuele di Cerignola (a sinistra in giugno 2005 ed al centro in settembre 2005) e vista di due dei 124 HDRB installati alla sommità del piano interrato.

- 2 edifici residenziali in c.a. a Solarino (SR) nel 2004, prima applicazione italiana di HDRB assieme a SD nell'Unione Europea (UE);
- la palazzina in c.a. di Fabriano (AN) di Figura 19, prima applicazione dell'isolamento in sottofondazione nell'UE, il cui collaudo in corso d'opera è stato completato dal primo autore di questo capitolo in maggio 2006;
- un edificio completato a Rocca di Castell'Ottieri (GR) nel 2007, primo *retrofit* italiano con l'isolamento sismico di edifici in muratura.



**Figura 21.** Da sinistra: schizzo degli edifici in muratura isolati sismicamente in fase di realizzazione a Corciano; casa in muratura da adeguare sismicamente con HDRB e SD nei pressi di Belluno; viste di Mevale di Visso dopo il restauro a seguito dei danni subiti nel terremoto della Valnerina del 1979 e distrutto nuovamente dopo quello umbro-marchigiano del 1997-98.

Quanto alle nuove costruzioni isolate (Forni, ed., 2006, Martelli et al. 2008a&b, e Martelli e Forni, 2008b&c), dopo quelle realizzate a Squillace Marina (CZ) nel 1992, alla Base della Marina Militare di Augusta (SR) nel 1993 ed a Rapolla (PZ) nel 2000:

- sono state completati villette o edifici residenziali privati isolati in c.a. a Scarperia (FI) nel 2005, a Santa Venerina (CT) ed a Ragusa nel 2006 e (con 13 HDRB e 2 SD) a San Giuliano di Puglia nel 2007;
- è in fase di completamento la costruzione di 4 edifici in c.a. a Cerignola (FG), protetti da HDRB (Figura 20), nell'ambito del Programma "Contratti di Quartiere I", finanziato dall'attuale Ministero delle Infrastrutture per il risanamento delle aree urbane degradate (prima applicazione dell'isolamento ad edifici residenziali progettata in base all'OPCM n. 3274/2003, il cui collaudo in corso d'opera è stato affidato anch'esso al primo autore di questo capitolo);
- è in corso la realizzazione di altri nuovi edifici isolati residenziali in c.a. a Gricignano

gura 27), isolata nel 2003 con 92 LRB e 2 SD alla base delle colonne di sostegno;

- l'ospedale *La Luz* di Lisbona e l'adiacente residenza per anziani (Figura 28), con 315 HDRB, di 400÷1000 mm di diametro, installati alla sommità del piano terreno per proteggere la struttura sia dal sisma che dalle vibrazioni causate dalla sottostante metropolitana.

Ulteriori immagini riguardanti le applicazioni suddette sono fornite da Dolce et al. (2005 & 2006) e le più recenti da Martelli et al. (2008b) e Martelli e Forni (2008b).

### 3.14 Applicazioni in Cile

In Cile sorgono già da tempo alcune applicazioni di sistemi dissipativi e d'isolamento, sia a ponti e viadotti (dalla metà degli anni Settanta), che ad alcuni impianti industriali ed edifici (dal 1992). Il Cile è, dunque, particolarmente attivo nello sviluppo di nuovi sistemi antisismici, ma nuove applicazioni dell'isolamento agli edifici sono ostacolate da regole di progetto molto penalizzanti, in linea con quelle statunitensi. Gli edifici isolati attualmente completati sono sia residenziali che strategici (Figura 29); fra questi ultimi sono da citare il Dipartimento d'Ingegneria ed il Centro Clinico *San Carlos de Apoquindo* all'Università Cattolica di Santiago, realizzati nel 2005, ed il *Nuevo Hospital Militar La Reina*, anch'esso a Santiago, che, in tale anno, era in costruzione (Figura 29). Quest'ultima realizzazione (costata 112,8 MUS\$) è particolarmente rilevante.



**Figura 29.** A sinistra: edificio popolare della *Comunidad Andalucia* a Santiago, con HDRB (1992, prima applicazione dell'isolamento sismico in Cile). Al centro e a destra: il *Nuevo Hospital Militar La Reina* (80000 m<sup>2</sup>), durante la costruzione a Santiago (2005) con 114 HDRB e 50 LRB.

### 3.15 Applicazioni a Cipro

Nonostante la sua significativa pericolosità sismica e la notevole vulnerabilità della maggior parte dei suoi edifici, le applicazioni cipriote delle moderne tecnologie antisismiche sono ancora molto limitate (Erdik et al., 2008, Martelli et al., 2008a&b, e Martelli e Forni, 2008b): infatti, esse riguardano attualmente solo un edificio multipiano (protetto con controventi in acciaio e VD), due grandi edifici, di progettazione italiana, con struttura mista in c.a. ed acciaio di un centro commerciale (*Shacolas Park*), in costruzione a Nicosia (protetti da 164 HDRB), il progetto di *retrofit* di un edificio multipiano per le telecomunicazioni (da proteggere in parte con dispositivi FPS) ed alcuni ponti autostradali (isolati con LRB e dispositivi FPS).

# Modellazione agli elementi finiti di sistemi di protezione sismica

Leonardo Bandini<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Studio Brunetta Bandini e CSi Italia srl, Pordenone  
posta@leonardobandini.it

**Abstract.** L’inserimento di dispositivi di protezione sismica all’interno della compagine strutturale rende necessaria, da un punto di vista computazionale, una particolare cura nella modellazione degli stessi al fine di rappresentarne correttamente il comportamento, nonché il ricorso, sovente, a metodologie di analisi dinamica non lineare. In questo capitolo sono descritti gli elementi finiti ed i relativi assemblaggi utilizzati per la simulazione di alcuni tra i più comuni dispositivi, verificandone al contempo il comportamento computazionale mediante sovrapposizione della risposta numerica con quella meccanica ottenuta per via sperimentale. Sono altresì presentate le tecniche di analisi computazionale usate per la risoluzione del problema dinamico, ed in particolare i metodi “a forza bruta” di integrazione al passo delle equazioni di moto e quello della “Fast Nonlinear Analysis”. Nella seconda parte del capitolo, sono riportati tre casi di studio di sistemi di protezione ottenuti mediante l’inserimento di dispositivi di dissipazione supplementare di energia, ed altrettanti esempi di isolamento alla base, assumendo a riferimento due semplici strutture al fine di comparare agevolmente i risultati prodotti dalle diverse configurazioni adottate.

## 1 Introduzione

La risposta di strutture soggette ad un’azione sismica di elevata intensità è generalmente governata da significativi comportamenti non lineari, di tipo geometrico e materiale. In questo lavoro sarà concentrata l’attenzione sulla seconda categoria.

Di norma, le risposte non lineari sotto sisma si concentrano in un limitato numero di elementi appartenenti all’organismo strutturale:

- cerniere plastiche,
- diagonali di controvento,
- vincoli monolateri,
- zone di contatto tra parti differenti,

o in esso inseriti ai fini di un più elevato livello di protezione:

- dispositivi di dissipazione supplementare di energia,
- dispositivi di isolamento sismico.

Al di fuori di tali elementi, la risposta della restante parte della struttura può ancora essere considerata, con buona approssimazione, di tipo elastico. Le non linearità, quindi, possono essere introdotte nel modello computazionale della struttura, limitatamente alle parti sopra richiamate, ricorrendo ad elementi finiti dotati delle opportune leggi costitutive. Tali elementi, di seguito chiamati “NLLINK” (Non-Linear Link), come definiti nel codice di calcolo SAP2000NL Advanced (CSI 2007), cui verrà qui essenzialmente fatto riferimento, possono essere a uno o a due nodi. Gli elementi ad un nodo sono utilizzati per la modellazione di vincoli non lineari posti tra struttura e terreno, mentre quelli a due nodi vengono inseriti per congiungere due o più elementi finiti interni alla struttura.

## 2 Elementi non lineari (NLLINK)

Gli NLLINK sono a tutti gli effetti elementi finiti e quindi, come tali, dotati di una matrice di rigidezza. Possono essere trattati, in prima approssimazione come sei molle indipendenti (o in taluni casi accoppiate), ognuna agente secondo un grado di libertà.

I più comuni NLLINK sono di seguito elencati, e successivamente descritti:

- elastico lineare,
- multilineare elastico,
- multilineare plastico,
- plastico tipo Wen,
- elastico monolatero (solo compresso – “Gap” o solo teso – “Hook”),
- a comportamento viscoso (“Damper”),
- ad attrito (“Friction Isolator”).

### *Elemento elastico lineare*

È un elemento finito con sei gradi di libertà indipendenti o accoppiati, dotato di comportamento elastico lineare.

### *Elemento multilineare elastico*

La legge costitutiva che governa questo elemento è di tipo elastico lineare a tratti (“n-latera”). In fase di carico e scarico viene seguita la stessa curva (comportamento elastico non lineare), con isteresi nulla in cicli ripetuti di carico e scarico. Tale curva, non necessariamente monotonica, può essere soggetta, a seguito di un incremento di deformazione, sia ad un abbattimento (*softening*) che ad un incremento (*hardening*) di rigidezza.

### *Link Multilineare plastico*

Dotato, nella fase di carico, di legge elastica lineare a tratti, questo elemento prevede tre diversi modelli isteretici di scarico: con incrudimento cinematico (Figura 1), secondo lo schema di Take-da (Figura 2) e tipo “pivot” (Figura 3).

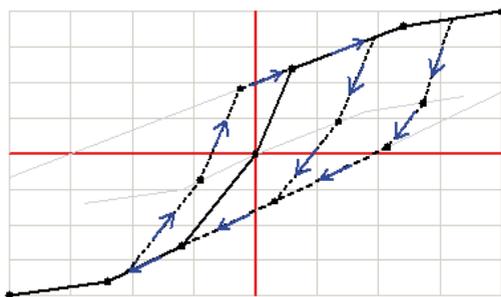


Figura 1. Isteresi ad incrudimento cinematico.

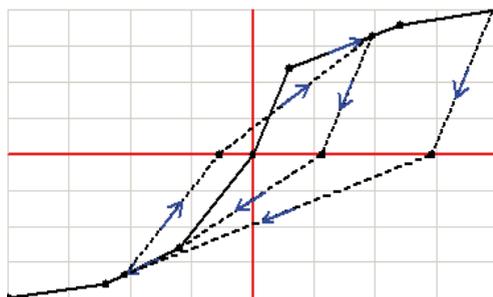


Figura 2. Isteresi secondo il modello di Takeda.

Per descrivere il comportamento nel caso di incrudimento cinematico, si faccia riferimento alla Figura 4, dove è rappresentato un generico ciclo di carico e scarico. Si immagini di avviare il ciclo imponendone la deformazione (controllo di spostamento). La fase di carico inizia dall'origine procedendo verso il punto "1", che rappresenta la fine della fase elastica, ossia, dove si conclude il primo tratto della "n-latera", e continua percorrendo il tratto "1-2".

Si proceda con l'inversione della deformazione, scaricando quindi con una pendenza uguale a quella di primo ramo prima di aver raggiunto il punto "2". Durante la fase di carico, una volta raggiunto il punto 1 verrà creato il punto speculare "-1". Lo scarico procede, successivamente, passando da "-1" e dirigendo verso il punto "-2". Invertendo il moto, si riproceda alla fase di carico, passando da "1" e successivamente da "2". A questo punto, una volta superato il punto "2", verrà creato il punto "-2". Si proceda sempre in carico fino ad arrivare al punto "3". Di nuovo si inverte la sollecitazione scaricando. Il ciclo a questo punto passerà da "-2", per poi dirigersi verso "-3".

Superando, in fase di carico (termine con il quale si individuano deformazioni sia positive che negative), un qualsiasi punto di cambio di pendenza della legge elastica, viene automaticamente creato il suo corrispettivo nel campo di deformazione opposto, il che corrisponde all'effetto di memoria del ciclo.

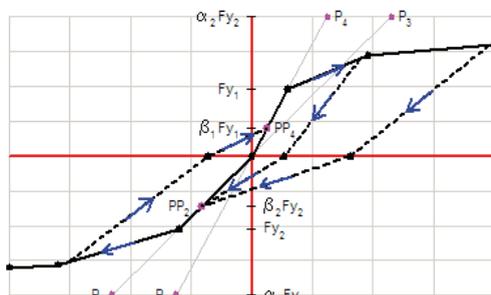


Figura 3. Isteresi secondo il modello pivot.

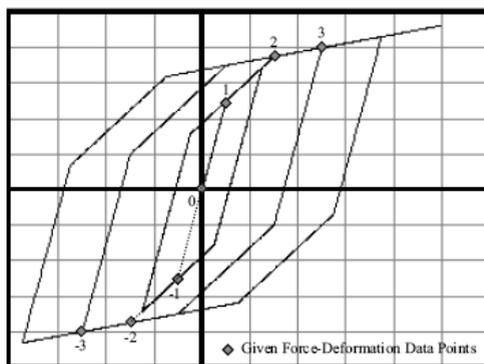
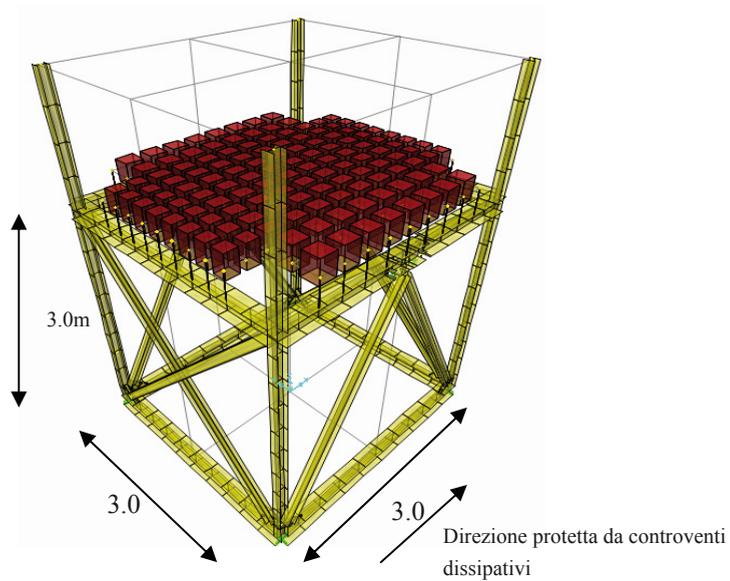


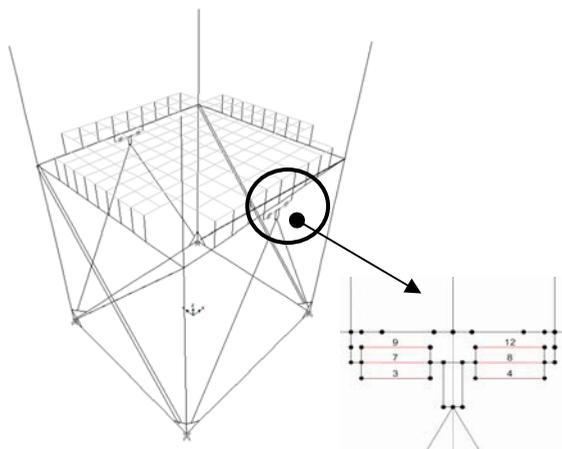
Figura 4. Costruzione di un ciclo di incrudimento cinematico.



**Figura 20.** Modello computazionale del telaio sperimentato nel Progetto NEFOREE.

### 7.1 Telaio protetto con dispositivi fluido viscosi siliconici pressurizzati

I quattro dispositivi installati a coppie nei controventi a K (Figura 21), secondo lo schema generale proposto in (Sorace e Terenzi, 2008a), sono stati modellati concordemente a quanto discusso al paragrafo 5.3. I dispositivi utilizzati nella sperimentazione sono del tipo BC1BN, di corrente produzione dell'industria Jarret (Jarret SRL, 2007), e presentano le caratteristiche di seguito riportate.



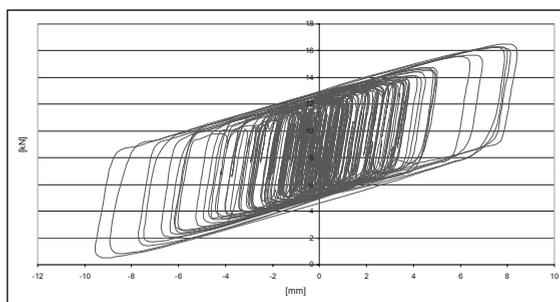
**Figura 21.** Inserimento degli elementi riproducenti i dispositivi fluido viscosi pressurizzati.

- Corsa: 25mm;
- coefficiente di smorzamento:  $C = 1.76 \text{ kN (s/mm)}^\alpha$ ;
- esponente frazionario della velocità:  $\alpha = 0.2$ ;
- rigidità di secondo ramo:  $K_2 = 0.52 \text{ kN/mm}$ ;
- pre-carico statico:  $F_0 = 2.8 \text{ kN}$ .

Come previsto dal modello generale di questo tipo di dispositivi (par. 5.3), gli elementi NLLINK utilizzati, con riferimento alla numerazione riportata in Figura 21, sono:

- 9, 12: Elastici multilineari;
- 3, 4: Damper;
- 7, 8: Gap + Hook.

I cicli di risposta di una coppia di dispositivi, simulanti quelli ottenuti per via sperimentale, sono mostrati in Figura 22.



**Figura 22.** Cicli di risposta di una coppia di dispositivi fluido viscosi pressurizzati installata nel telaio NEFOREE.

## 7.2 Telaio protetto con dispositivi ad attrito con molla precaricata

I quattro dispositivi FSSD, inseriti a coppie nei controventi a K (Figura 23), analogamente al caso degli smorzatori fluido viscosi, sono stati modellati concordemente a quanto discusso al paragrafo 5.2. Le caratteristiche dei dispositivi sono state calibrate in modo da eguagliare l'energia dissipata dai dispositivi fluido viscosi e dagli elementi T-ADAS esaminati al successivo paragrafo, al fine di agevolarne un confronto tra le risposte numeriche fornite. Seguendo la trattazione esposta in 5.2, sono stati adottati i seguenti valori delle grandezze caratteristiche:

$$k_1 = 16 \text{ kN/mm}; k_2 = 0.74 \text{ kN/mm}; d_1 = 0.5 \text{ mm}; \mu = 0.3.$$

In Figura 24 è mostrata, a titolo d'esempio, la configurazione deformata del modello computazionale, secondo la direzione di orditura dei controventi dissipativi, ad un istante della storia di risposta, mentre in Figura 25 sono riportati i cicli completi di un dispositivo.

- rigidezza non lineare,  $K_{nl} = 1e06$  N/mm
  - coefficiente “slow” = 0.01
  - coefficiente “fast” = 0.02
  - $r = 45$  s/m
  - raggio della superficie di scorrimento,  $R = 0$  (superficie piana)
- Direzione U3: come direzione U2.

Per i dispositivi fluido viscosi pressurizzati, come da schema di Figura 15:  
Elemento Multilineare Elastico:

- Direzione U1:
- rigidezza effettiva,  $K_e = 2550$  N/mm
  - rigidezza di primo ramo  $K_1 = 32112$  N/mm
  - forza di precarico,  $F_0 = 61545$  N

Elemento Damper:

- Direzione U1:
- rigidezza effettiva,  $K_e = 0$
  - rigidezza non lineare,  $K_{nl} = 1e06$  N/mm
  - coefficiente di smorzamento,  $C = 58$  kN(s/mm) $^\alpha$
  - $\alpha = 0.15$

Elemento Gap:

- Direzione U1:
- apertura,  $\delta_1 = 150$ mm,
  - rigidezza lineare,  $K_e = 0$
  - rigidezza non lineare,  $K_{nl} = 1e08$  N/mm

Elemento Hook:

- Direzione U1:
- Apertura,  $\delta_1 = 0$ ,
  - rigidezza lineare,  $K_e = 0$
  - rigidezza non lineare,  $K_{nl} = 1e08$  N/mm

L'applicazione del precarico sul dispositivo fluido viscoso avviene come indicato nella Figura 15, ossia mediante un cedimento vincolare imposto. Tale cedimento, che è di 75 mm, viene inserito tramite una funzione rampa analoga a quelle discusse precedentemente. Al termine della fase di precarico, gli elementi Gap e Hook presentano una apertura residua di tale ampiezza, che costituisce la corsa del dispositivo.

Nell'ipotesi II, vengono disposti 25 dispositivi elastomerici del tipo Algasism HDS.A500, modellati mediante un elemento di tipo Wen, come proposto al punto 6.1. Tale elemento ha 3 gradi di libertà attivi: U1, coincidente con la direzione Z del sistema di riferimento globale, dove è presente un vincolo infinitamente rigido; U2 e U3, che costituiscono le direzioni di taglio.

Nell'ipotesi III vale lo stesso schema dell'ipotesi II, rispetto alla quale sono inseriti dispositivi elastomerici con nucleo in piombo, aventi le caratteristiche descritte al punto 6.2.

I tre diversi modelli sono stati sottoposti ad analisi dinamiche non lineari di tipo FNA, impiegando lo stesso accelerogramma artificiale utilizzato per il telaio NEFOREE.