

# SVILUPPO DI UNA CONNESSIONE DISSIPATIVA PER STRUTTURE PREFABBRICATE

**LUCA MARININI, ROSE School Pavia**

**PIETRO SPATTI, ROSE School Pavia**

**PAOLO RIVA, Università degli Studi di  
Bergamo**

**ROBERTO NASCIMBENE, ROSE School Pavia**

**LIVIO IZZO, CSP Prefabbricati, Ghisalba**

**ALESSANDRO SPADAVECCHIA, CSP  
Prefabbricati, Ghisalba**

**MARCELLO MAFFIOLETTI, Officina Maffioletti,  
Brusaporto**

## SUMMARY

*The recent development of Italian and European standards had a deep influence on precast structures design, with the introduction of dedicated chapters for static and seismic actions. The importance of connections is explicitly recognized, and the possibility of using "energy dissipating connections" is offered, with the support of experimental tests on representative specimens.*

*A new type of hysteretic isolator was designed, in order to meet the code requirement of reliability (mechanical connection) and at the same time to provide good dissipation properties and economical efficiency; the developed isolators have to be positioned between cap beam and roof beam to isolate the superstructure, emulating a concept similar to bridge deck isolation. During the normal life of the structure, thermal deformations of the superstructure are allowed with low frictional resistance, while, in case of earthquake, the higher displacement level activates the energy dissipation mechanism, which consists of two metallic elements (washers), prestressed by high resistance bolts, sliding on a steel plate. After the earthquake, the system can be retrofitted by replacing the two dissipating elements, without any interruption of the building operability.*

*An analytical study is performed with a commercial Finite Element Program with two main targets: implement the experimental results in a simple numerical model suitable for performing non-linear analyses and compare the seismic response of precast structures designed according to EC8, with standard and hysteretic connections.*

## 1. INTRODUZIONE

Negli ultimi dieci anni, la progettazione antisismica ha attraversato un periodo di intenso sviluppo, basato sull'introduzione di approcci progettuali innovativi, appartenenti alla filosofia del Performance-Based Design, che associa ad un determinato evento la probabilità del raggiungimento di uno stato limite per la struttura.

Si è inoltre diffusa tra l'opinione pubblica, la classe politica e la comunità ingegneristica l'opinione che le perdite socio-economiche conseguenti a eventi sismici passati siano oggi giorno inaccettabili.

La ricerca scientifica ha indagato l'applicabilità di sistemi sismo-resistenti in grado di incrementare il livello di prestazione antisismica mantenendo il costo di costruzione a livelli ragionevoli. Molti di questi sistemi sono progettati per dissipare l'energia sismica introdotta in una struttura per mezzo di meccanismi dissipativi supplementari e/o per limitare la trasmissione dell'energia sismica alla struttura portante tramite l'isolamento dei principali elementi strutturali.

I sistemi dissipativi utilizzano elementi speciali, attivati tramite il movimento del sistema strutturale principale, per ridurre la risposta sismica complessiva grazie alla dissipazione di energia. Gli elementi strutturali principali sono protetti poiché l'energia sismica viene dissipata in questi dispositivi meccanici, che possono essere ispezionati e/o rimpiazzati a seguito di un evento sismico.

L'utilizzo e lo sviluppo di strutture in cemento armato prefabbricate in zone sismiche ha fino ad ora sofferto, a livello internazionale, della limitata conoscenza delle prestazioni di tale tipologia costruttiva sotto l'effetto di azioni sismiche, nonché della mancanza di adeguate normative.

Le non sempre eccellenti prestazioni di strutture prefabbricate nel corso di eventi sismici passati hanno, d'altro lato, contribuito ad accrescere un senso di comune ma ingiustificata "diffidenza" nei confronti di tali sistemi strutturali. E' fondamentale sottolineare come all'origine dei problemi riscontrati nella deficitaria risposta sismica di strutture esistenti, senza far riferimento alle caratteristiche peculiari dei singoli eventi, si possono in generale individuare non tanto limiti intrinseci del "prefabbricato" quanto piuttosto sostanziali carenze in fase progettuale e/o realizzativa, legate all'utilizzo di dettagli costruttivi inadeguati, alla scelta di schemi strutturali inappropriati o all'assenza di una corretta filosofia di progettazione sismica.

I problemi più comuni sono legati all'inadeguatezza dei collegamenti tra gli elementi strutturali (i crolli più eclatanti si sono verificati per perdita di appoggio dell'impalcato dalle travi a seguito di spostamenti differenziali eccessivi) e all'elevata deformabilità degli schemi statici, tipici anche della produzione prefabbricata italiana, in cui gli elementi trave sono semplicemente appoggiati, o incernierati, sulla sommità dei pilastri, incastrati a terra con schema a mensola.

Comune tendenza dei maggiori codici di progettazione internazionale (Stati Uniti, Nuova Zelanda, Giappone, Europa) è quella di consentire l'utilizzo di opere in prefabbricato in zone sismiche purché il comportamento strutturale sia del tutto analogo a quello di una struttura equivalente in c.a. gettato in opera, a meno che studi dettagliati, basati su prove sperimentali ed analitiche, non possano comprovare una soddisfacente prestazione sismica del sistema alternativo. Tale approccio, noto come "emulazione" del cemento armato gettato in opera, prevede l'utilizzo di elementi strutturali prefabbricati con getto in opera, anche solo parziale, dei relativi giunti (connessioni "umide"). E' evidente come i vantaggi tipicamente riconosciuti del prefabbricato rispetto al c.a. gettato in opera (i.e. controllo di qualità, velocità di costruzione, riduzione dei costi) risultino fortemente limitati. Diverse soluzioni sono state studiate e sviluppate per connessioni trave-colonna che possono avvenire sia nella regione nodale sia all'interno dell'elemento strutturale, realizzato in segmenti, come nel caso tipico di nodi trave colonna cruciformi prefabbricati. A seguito di estesi studi analitici e sperimentali per la definizione di connessioni per sistemi a telaio in prefabbricato, la filosofia di emulazione è stata ampiamente adottata dalla pratica costruttiva Neozelandese, ed ha in seguito trovato favorevole sviluppo in Giappone, nonostante gli evidenti limiti in termini di semplicità di realizzazione e velocità di esecuzione, con conseguenze immediate sui costi. Studi analoghi su sistemi sismici con connessioni di tipo "umido", conformemente al comune approccio di emulazione del c.a. gettato in opera, sono stati condotti in Italia tra la fine degli anni '80 e i primi anni '90 nell'ambito del Progetto Finalizzato Edilizia del CNR. La scarsa convenienza economica di tali sistemi, in aggiunta alle peculiarità della prefabbricazione italiana, (sia dal punto di vista realizzativo che normativo), non ne ha però consentito una diffusione sul mercato.

Il carattere prestazionale delle normative più recenti favorisce l'ideazione e lo sviluppo da parte dei produttori di soluzioni innovative per i sistemi di connessione, a patto che la loro efficacia sia

dimostrata attraverso prove sperimentali rappresentative del comportamento strutturale reale.

## 2. LA CONNESSIONE NEXFUSE

Nel corso del 2007, la collaborazione tra CSP Prefabbricati s.p.a. e l'Officina Meccanica Maffioletti ha consentito la nascita e lo sviluppo di un prototipo di connessione dissipativa, poi denominata NexFuse®.

La versione finale del dispositivo, l'elenco delle componenti meccaniche e lo schema di funzionamento sono riportate nelle figure da 2.1 a 2.4:

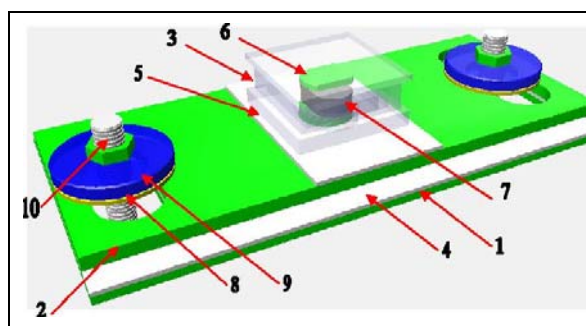


Figura 2.1. Vista tridimensionale del dispositivo

Oggetto	Nome	Materiale
1	PIATTO BASSO	S275JRG2
2	PIATTO INTERMEDIO	S275JRG2
3	SCATOLA	S275JRG2
4	POLIETILENE BASSO	
5	POLIETILENE ALTO	
6	SPINOTTO	115MnPb14
7	GOMMA	NEOPRENE
8	DISSIPATORE	
9	FERMO DEL DISSIPATORE	C40
10	VITE M20	Cl. 5.6

Tabella 2.1. Componenti del dispositivo

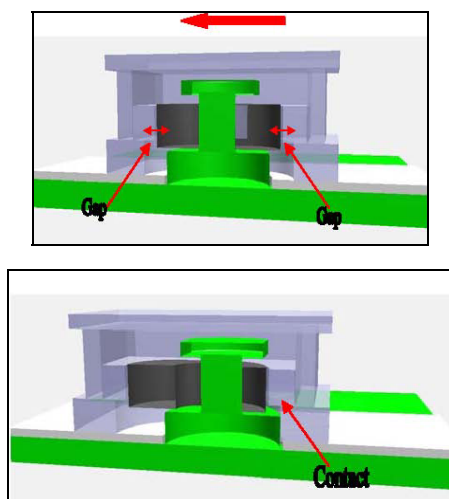
L'isolatore può essere suddiviso in tre parti principali:

- Una scatola metallica cava, da gettare all'interno dei tegoli;
- Un sistema di due piastre metalliche, quella bassa appoggiata alla trave di sostegno e quella alta collegata allo spinotto metallico a testa allargata, che può scorrere grazie

all'interposizione di un foglio in materiale a basso attrito;

- Un sistema composto da due viti M20 con testa ad ancora che collegano le piastre all'anchor channel, e impongono un carico di precompressione sugli elementi dissipativi.

La scatola metallica cava gioca un ruolo fondamentale per la risposta dell'isolatore sotto carichi statici, poiché consente spostamenti relativi di  $\pm 9\text{mm}$  tra i due elementi connessi (dovuti ad esempio alle deformazioni termiche) senza che venga attivata la resistenza degli elementi dissipativi. Nella fase di assemblaggio, la gomma garantisce un esatto centraggio dello spinotto. Il comportamento del sistema sotto carichi statici, nella direzione dell'asse del tegolo, è rappresentato in figura 2.2:



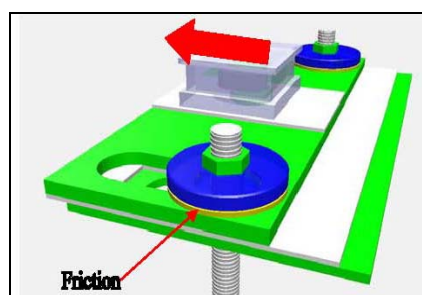
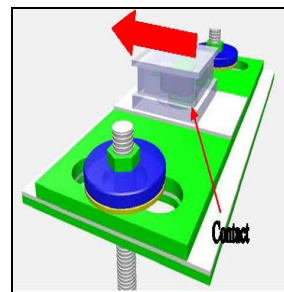
**Figura 2.2.** Comportamento per carichi statici

Mentre lo spostamento limite è un parametro di progetto, la forza limite dipende dai carichi gravitazionali trasferiti dall'appoggio, moltiplicati per il coefficiente d'attrito del materiale a basso attrito. Dopo che lo spostamento limite viene raggiunto, la base allargata dello spinotto va in contatto con la parte bassa della scatola metallica e il taglio viene trasferito alla piastra metallica superiore, attivando gli elementi dissipativi (figura 2.2).

Dopo questa fase iniziale, alla risposta del sistema viene aggiunto il ciclo isteretico degli elementi dissipativi.

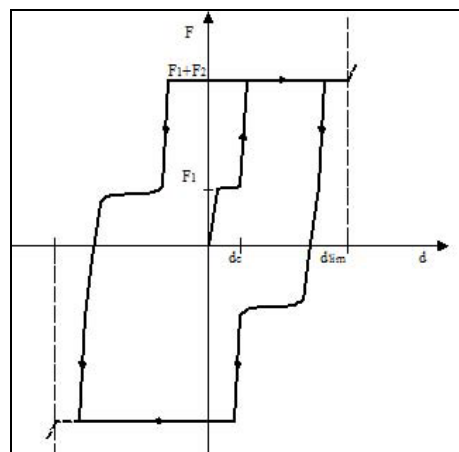
Vi è dapprima un incremento iniziale della forza trasmessa dovuto al comportamento iperelastico della gomma confinata sottoposta a compressione, quindi la base dello spinotto va in contatto con la parte interna della scatola e trasmette il taglio agli elementi dissipativi. Se viene raggiunta la corsa limite, una forza

aggiuntiva viene trasmessa dalla piastra di acciaio. In questo caso lo spostamento di contatto  $d_c$ , la forza limite trasmessa dagli elementi dissipativi  $F_{lim}$  e lo spostamento limite delle viti  $d_{lim}$  sono parametri di progetto.



**Figura 2.3.** Comportamento per carichi sismici

Uno schema del comportamento isteretico dell'isolatore assemblato è riportato in fig. 2.4:



**Figura 2.4.** Ciclo isteretico del dispositivo

Per quanto riguarda il comportamento in direzione trasversale e verticale, si suppone che l'isolatore possa essere considerato semi-rigido. Il taglio trasversale viene trasmesso allo spinotto e alle piastre metalliche, mentre il possibile sollevamento è impedito dalla testa allargata dello spinotto, di dimensioni maggiori rispetto a quelle della scatola metallica (l'assemblaggio è reso possibile grazie alla forma ellittica della testa).

### 3. PROVE SPERIMENTALI SUI COMPONENTI

#### 3.1. SCOPO

Le prove sperimentali, condotte presso il Laboratorio Prove Strutturali dell'Università degli Studi di Bergamo, hanno avuto lo scopo di studiare le proprietà meccaniche dei singoli componenti del sistema e quelle dell'intero isolatore. Dai risultati qui ottenuti è stato possibile capire il comportamento di ogni parte del meccanismo nonché l'influenza di ciascun componente sul comportamento generale.

#### 3.2. MATERIALI UTILIZZATI

Quattro materiali diversi sono stati usati per la costruzione dei vari componenti:

- *Materiale polimerico a basso attrito*: coefficiente d'attrito dichiarato, dal 5 al 9%;
- *Elementi dissipativi*: corone circolari ricavate da un cilindro cavo con un diametro esterno di 80mm ed interno di 45mm: coefficiente d'attrito dichiarato, dal 15 al 22%;
- *Gomma*: fogli di NR/SBR, spessore di 15mm;
- *Acciaio*: S275.

#### 3.3. TEST

Per ottenere un quadro completo ed esaustivo del comportamento dell'isolatore è stato realizzato un banco di prova in acciaio modificabile ed adattabile alle esigenze della sperimentazione in corso: quattro diversi test sono stati programmati ed eseguiti servendosi di una macchina di prova Galdabini Sun 5 in grado di esercitare, sia in trazione che in compressione, una forza massima di 50 kN. Gli spostamenti sono stati rilevati mediante l'uso di estensimetri potenziometrici Penny & Gills. I risultati acquisiti durante la prova sono stati successivamente elaborati per depurare eventuali spostamenti e rotazioni rigide dovuti al set-up di prova.

I quattro test sono brevemente illustrati nel seguito.

##### 3.3.1. *Materiale polimerico a basso attrito*

La caratteristica principale del materiale utilizzato è il basso attrito.

Nel primo test, l'elemento viene pressato tra due



piastre d'acciaio utilizzando delle barre di precompressione; leggendo lo spostamento relativo con gli estensimetri e la forza necessaria per generare tale spostamento, si ottiene il coefficiente d'attrito del materiale, pari a 6%.

##### 3.3.2. *Dissipatore*

L'unica parte sostituibile dell'intero meccanismo, quella evidentemente sacrificabile durante la dissipazione del giunto provocata dallo strisciamento contro la piastra d'acciaio sulla quale è schiacciata, è l'elemento dissipativo: grande importanza ha la coppia di serraggio con la quale viene serrato il dado sopra di esso, visto e considerato che la quantità di energia dissipata è proporzionale alla forza d'attrito generata, a sua volta direttamente proporzionale alla forza verticale esercitata durante il movimento.

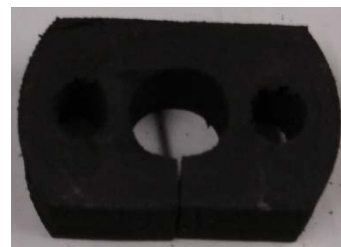
Anche in questo caso, analizzando e depurando i dati acquisiti durante la prova, si ottiene un coefficiente d'attrito, pari a 18,8%.



##### 3.3.3. *Gomma*

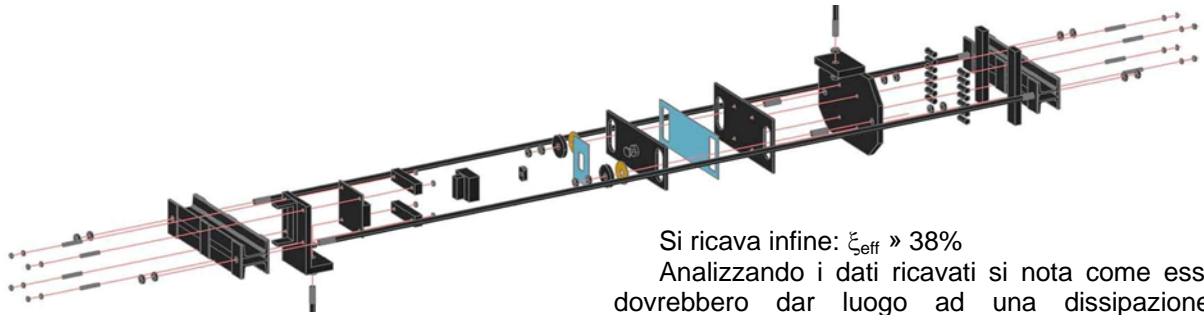
Per evitare l'impatto fra la parte mobile e quella fissa dell'isolatore viene usato un elemento in gomma provvisto di tre fori: il centrale serve per mantenere l'elemento in sede durante il movimento, i due laterali

per permettere alla gomma di espandersi a causa della compressione. Il comportamento risultante è perfettamente elastico. Per questo terzo test, nessuna forza di precompressione viene applicata alle barre.

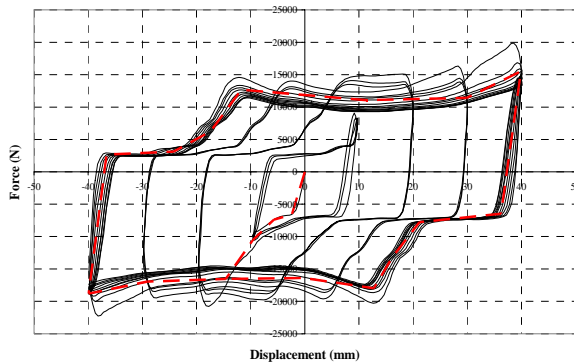


##### 3.3.4. *Intero isolatore*

Nel quarto ed ultimo test viene investigato il comportamento dell'intero isolatore; una volta posizionato tra le due piastre d'acciaio di prova e simulato il carico verticale, è stato possibile leggere lo spostamento relativo delle piastre e la forza necessaria per generare tale spostamento.



**Figura 3.1:** Schema di montaggio relativo alla 4a prova (intero isolatore)

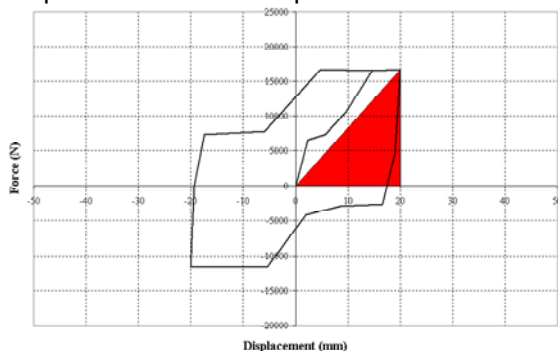


**Figura 3.2:** Comportamento del dispositivo

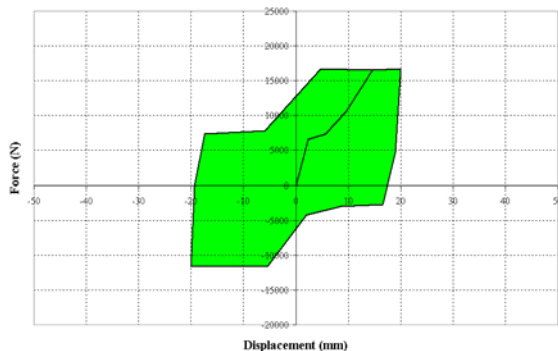
Lo smorzamento effettivo può essere ricavato dalla linearizzazione della curva in Figura 3.2:

$$\xi_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{A_{pl}}{A_{el}} \text{ dove } A_{el} \text{ è l'area elastica e } A_{pl}$$

è l'area plastica data dal comportamento.



**Figura 3.3:** Parte elastica del comportamento



**Figura 3.4:** Parte plastica del comportamento

Si ricava infine:  $\xi_{eff} \gg 38\%$

Analizzando i dati ricavati si nota come essi dovrebbero dar luogo ad una dissipazione leggermente maggiore di quella effettivamente ottenuta con il funzionamento dell'intero dispositivo nella quarta prova. Essendo quest'ultima prova la più significativa, si è deciso di ricavare dal comportamento ottenuto i contributi dei singoli elementi dissipativi che caratterizzeranno il modello numerico: nella tabella seguente questi valori vengono confrontati con quelli ottenuti nelle singole prove.

	Singole prove	4a prova
<b>Elemento Polimerico</b>	6,0%	3,3%
<b>Dissipatore</b>	18,8%	15,0%

## 4. PROVE SPERIMENTALI SU STRUTTURA IN SCALA 1:1

### 4.1. SCOPO

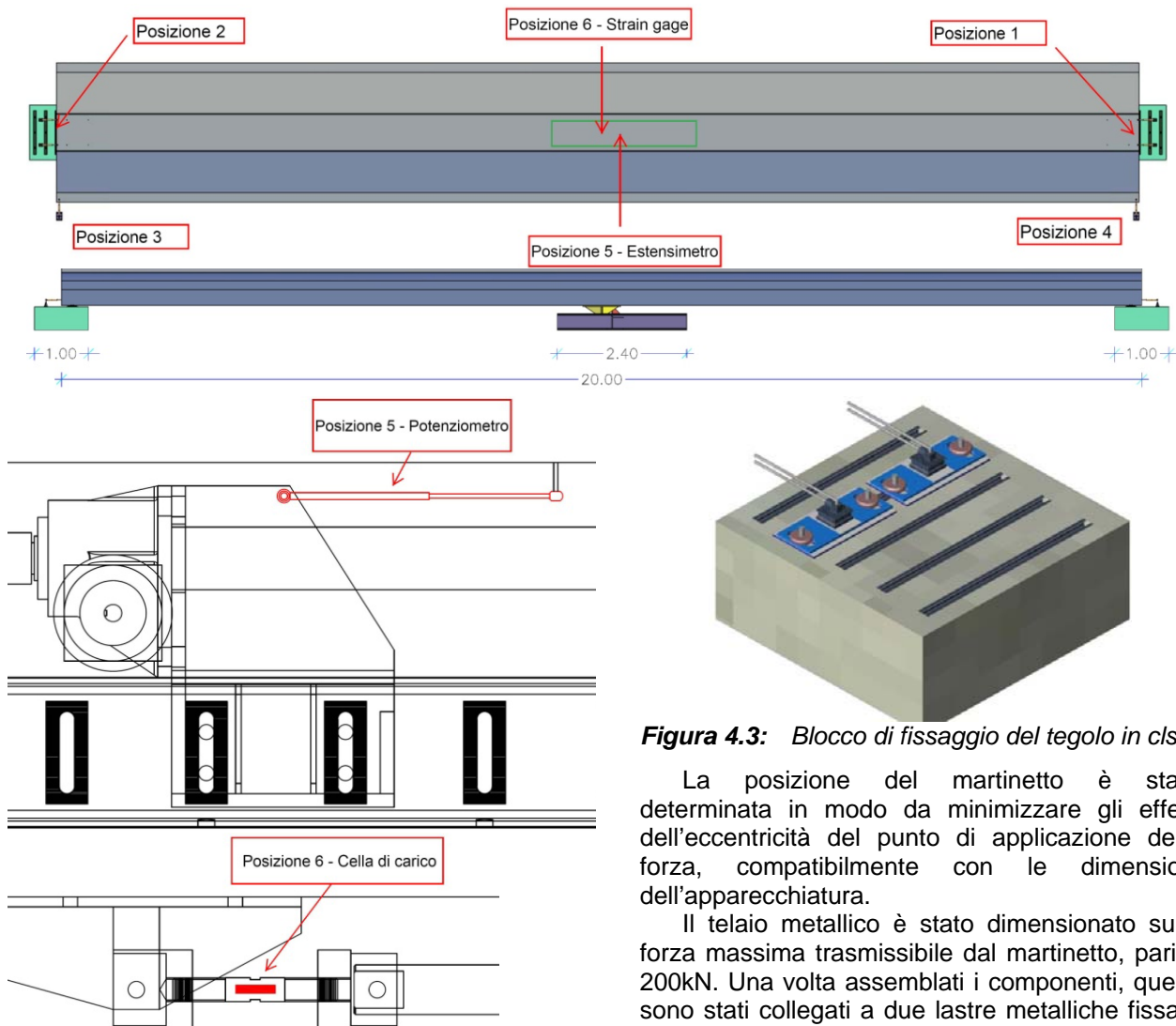
Le prove sperimentali condotte presso la sede della CSP prefabbricati s.p.a. (Ghisalba – BG) hanno avuto lo scopo di verificare il comportamento meccanico della connessione inserita in una struttura in scala reale.

Dai risultati ottenuti è stato possibile avere una conferma del comportamento isteretico stabile della connessione, già individuato nel corso delle prove precedentemente illustrate, e verificare l'assenza di fenomeni di rottura fragile dei punti di ancoraggio lato tegolo e lato trave.

### 4.2. CONFIGURAZIONE DI PROVA

Le prove sono state effettuate su di un tegolo alare di produzione CSP di luce pari a 20m, collegato a due basamenti in calcestruzzo mediante l'utilizzo di 4 connessioni NexFuse e movimentato tramite l'applicazione di una forza nella sezione di mezzeria, generata con un martinetto elettro-meccanico con spinta massima pari a 200kN.

I basamenti in calcestruzzo ed il telaio metallico di sostegno al martinetto sono stati dimensionati in modo da risultare "rigidi" rispetto



**Figura 4.3:** Blocco di fissaggio del tegolo in cls

La posizione del martinetto è stata determinata in modo da minimizzare gli effetti dell'eccentricità del punto di applicazione della forza, compatibilmente con le dimensioni dell'apparecchiatura.

Il telaio metallico è stato dimensionato sulla forza massima trasmissibile dal martinetto, pari a 200kN. Una volta assemblati i componenti, questi sono stati collegati a due lastre metalliche fissate al pavimento con barre filettate e resine epossidiche. Nei basamenti di estremità sono stati collocati 5 anchor channels, per poter effettuare prove ulteriori in caso di rotture impreviste dei punti di fissaggio.

**Figura 4.1:** Strumentazione della prova

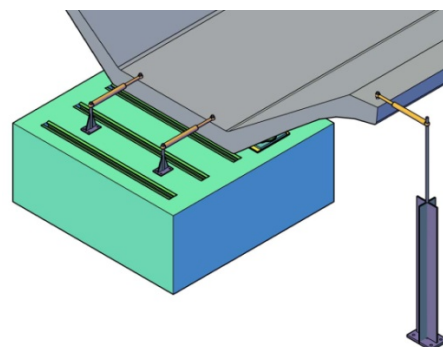
alla sovrastruttura. Gli spostamenti imposti dal martinetto (coassiali al tegolo) vengono trasferiti alle quattro connessioni con minime variazioni, dovute alla deformabilità del tegolo.

Gli spostamenti sono stati rilevati mediante l'uso di estensimetri potenziometrici Penny & Gills. La forza trasmessa dal martinetto è invece stata rilevata tramite l'utilizzo di una cella di carico appositamente realizzata.

La configurazione di prova e la collocazione della strumentazione sono brevemente illustrate nelle figure 4.1-4.4.



**Figura 4.2:** Martinetto di spinta



**Figura 4.4:** Strumentazione predisposta sul blocco di fissaggio

Le quantità rilevate dai potenziometri sono le seguenti:

- 1a / 1b: Traslazioni relative longitudinali.
- 2a / 2b: Traslazioni relative longitudinali.
- 3 / 4: Traslazioni relative trasversali.
- 5: Traslazioni relative longitudinali.
- 6: Forza impressa dal martinetto.

Le prove sono state effettuate in controllo di spostamento, imponendo cicli di carico di ampiezza crescente. In questo modo è stato possibile verificare sia il comportamento in condizioni "standard" (spostamento dei punti di appoggio inferiore alla corsa massima teorica) sia in condizioni "eccezionali" (raggiungimento del fine corsa dei dispositivi).

La tabella seguente riassume i parametri di prova utilizzati nei test.

Test	Tipo	Peso	Ser.viti	$F_{ht}$
1	Ciclica fino a 40mm	149.7kN	51 Nm	25.5kN
2	Spinta massima su 4 connessioni	149.7kN	51 Nm	25.5kN
3	Spinta massima su 2 connessioni	149.7kN	51 Nm	17.3kN

**Tabella 4.1:** Strumentazione predisposta sul blocco di fissaggio

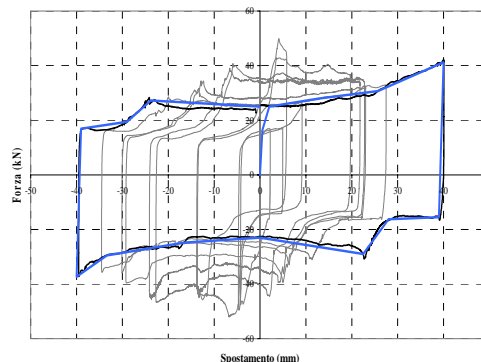
La forza di scorrimento è stata ipotizzata pari al 17% del peso del tegolo (leggermente superiore rispetto al valore utilizzato nelle prove sui componenti), in modo da garantire un serraggio minimo alle viti. Per la determinazione della forza di scorrimento teorica  $F_{ht}$  si è assunto un attrito tra lastra polimerica ed acciaio pari al 6% ed un attrito tra acciaio e dissipatori pari al 16%. Questi valori sono stati ricavati dalle prove sui componenti. Per il materiale polimerico è stato assunto il valore ricavato nella prova sul singolo componente mentre per il dissipatore un valore leggermente inferiore rispetto al 18.8% ottenuto dalla prova sul singolo componente, in quanto i test sull'isolatore assemblato avevano fornito un attrito globale inferiore a quello calcolato come somma dei singoli componenti.

Le prove a fine corsa sono state effettuate sia con le 4 connessioni fissate che su due sole connessioni (rimuovendo le viti dagli anchor channels di un basamento), in modo da trasferire un carico maggiore, avvicinandosi al carico di rottura.

### 4.3. RISULTATI DEI TEST

I cicli forza-spostamento medi ottenuti nel primo test sono riportati nella figura 4.5; la prova è

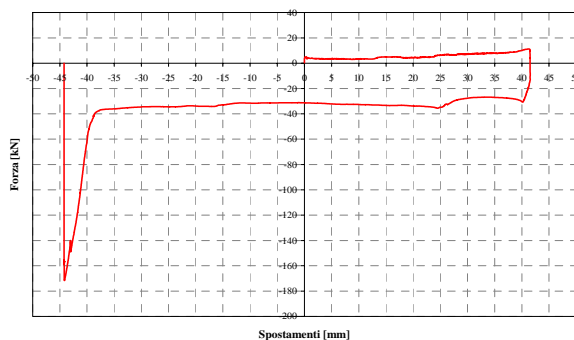
stata eseguita in controllo di spostamento con velocità costante di 0.5mm/sec.



**Figura 4.5:** Cicli forza – spostamento

Dal grafico si nota che il comportamento globale del sistema ricalca quello ottenuto per il singolo componente. Dopo un assettamento iniziale, con picchi di forza che raggiungono i 50kN (33% del carico verticale), la forza di scorrimento si attesta su valori vicini a quelli teorici: lo scorrimento nella fase iniziale avviene per una forza pari a 13kN (pari all'8.7% del carico verticale); il meccanismo dissipativo dei dissipatori viene attivato per una forza pari a 27kN (18% del carico verticale), da confrontare con i 25.5kN teorici.

La seconda e terza prova sono state eseguite per verificare che, in condizione di massimo carico sia in spinta che al tiro, non si manifestassero comportamenti a rottura fragile; nella seconda prova il tegolo è stato sottoposto dapprima a uno spostamento in spinta di 45mm, dopodiché a un tiro fino alla massima forza trasferibile dal martinetto; nella terza prova sono state scollegate due delle 4 connessioni, rimuovendo le viti dalla loro sede, e il tegolo è stato spinto in direzione opposta a quella finale della prova 2.

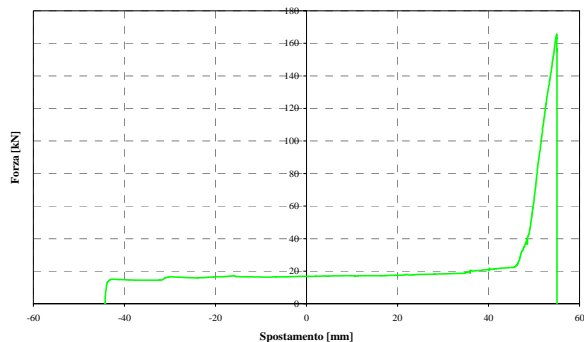


**Figura 4.6:** Forza – spostamento (2a prova)

La forza massima cui i collegamenti sono stati sottoposti è risultata pari a 170kN (pari al 114% del peso del tegolo), senza che si verificassero danneggiamenti apprezzabili nei componenti della connessione. Il carico di rottura per taglio del

sistema di ancoraggio, ricavato da prove sperimentali dall'officina meccanica Maffioletti, risulta pari a  $8 \times 21.4 \times 3 = 514 \text{ kN}$ . Il carico ammissibile è invece pari a  $171.2 \text{ kN}$  (coefficiente di sicurezza pari a 3).

Rimuovendo le viti da due connessioni i carichi ammissibile ed a rottura si dimezzano.



**Figura 4.7:** Forza – spostamento (3a prova)

Dalla figura 4.7 si evidenzia la diminuzione della forza di scorrimento del sistema ( $17 \text{ kN}$  contro  $29 \text{ kN}$  della seconda prova), dovuta in parte alla rimozione della forza d'attrito di due connessioni e in parte alla diminuzione del serraggio delle viti delle connessioni rimanenti, causato dalle deformazioni residue del ciclo precedente.

La forza massima trasmessa, risultata pari a  $164 \text{ kN}$ , non ha provocato danneggiamenti apprezzabili ai punti di ancoraggio. Si è tuttavia manifestata una diminuzione della coppia di serraggio sulle viti, causata dalle deformazioni plastiche del gambo della vite e dei labbri del profilo di ancoraggio.

#### 4.4. CONFRONTO CON I RISULTATI SPERIMENTALI SUI COMPONENTI

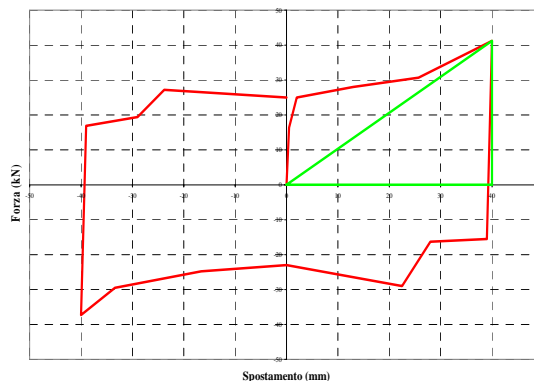
Come per le prove effettuate in laboratorio, vengono ora ricavate le quantità significative della risposta del sistema.

Dal comportamento ciclico forza-spostamento (prova 1), viene ricavato lo smorzamento viscoso equivalente estrapolando l'area elastica e l'area plastica; l'effetto dello smorzamento viscoso equivalente risulta essere:

$$A_{hy} = \sum \left[ \frac{(F_i + F_{i-1})}{2} \cdot (d_i - d_{i-1}) \right] = 4087 \text{ J}$$

$$A_{pl} = \frac{F_{\max} \cdot d_{\max}}{2} = 824 \text{ J}$$

$$\xi = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{A_{hy}}{A_{el}} = 39\%$$



**Figura 4.8:** Confronto comport. elastico/plastico

Nelle prove di laboratorio precedentemente descritte si era ottenuto uno smorzamento equivalente pari al 38%; il contributo offerto dalla rigidità effettiva in direzione orizzontale risulta pari a:

$$k_{eff} = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} = \frac{49,88 - (-52,088)}{40,07 - (-39,53)} = 1290 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

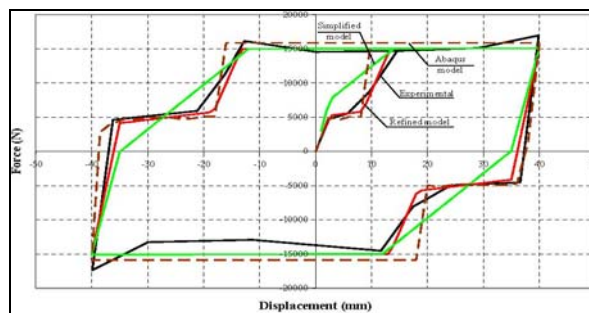
Per avere un termine di confronto, la rigidità elastica di un pilastro a mensola in calcestruzzo Rck50, di sezione  $60 \times 60 \text{ cm}$  e altezza pari a  $8 \text{ m}$ , risulta pari a:

$$K_b = \frac{3 \cdot E \cdot J}{H^3} = \frac{3 \cdot 35 \cdot 10^9 \cdot 10.8 \cdot 10^{-3}}{8^3} = 2215 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

## 5. ANALISI NUMERICHE

### 5.1. Modellazione delle connessioni

Partendo dai dati sperimentali e servendosi dei risultati numerici ottenuti con un programma ad elementi finiti solidi per la modellazione dei componenti, viene estrapolata una curva che simuli il comportamento reale dell'isolatore; diverse tipologie di modellazione sono state provate per identificare quale si avvicinasse maggiormente al comportamento reale.



**Figura 5.1.** Ciclo isteretico del dispositivo

Come si può notare in figura 5.1, c'è una buona corrispondenza in termini di area del ciclo,

e quindi energia dissipata, con tutti i modelli studiati. Il modello più complesso (linea rossa) riesce addirittura a riprodurre il comportamento iniziale prima della dissipazione ed i tratti di scarico-carico.

Dal momento che tutti i modelli hanno un buon comportamento, per non appesantire troppo le analisi che dovranno essere effettuate su edifici con molti isolatori, si è scelto di utilizzare il modello semplificato (linea verde).

La rappresentazione schematica del comportamento nella direzione dell'asse del tegolo è equivalente a quella di due molle in parallelo, come mostrato in figura 5.2. Le proprietà da assegnare ai link nel programma ad elementi finiti si calcolano nel modo seguente:

- si calcola il carico verticale trasmesso dall'appoggio (solitamente  $\frac{1}{4}$  del peso del tegolo, delle finiture e della quota parte dei carichi variabili);
- si calcola la forza limite di scorrimento complessiva dell'isolatore, indicativamente pari al 10-15% del carico verticale trasmesso;
- si calcola la forza limite di scorrimento per attrito sul materiale polimerico, pari a circa il 4-5% del carico verticale e si ricava per sottrazione il pre-carico da assegnare alle viti (si divide per 2 la rimanente quota di carico e si divide per il coefficiente d'attrito dell'elemento dissipativo, pari al 15-18%). La coppia di serraggio verrà determinata in funzione del diametro delle viti,  $T_s = 0.2 N d$  ;
- si costruisce la curva trilineare assegnando ad uno spostamento di 2.5mm (necessario per recuperare i giochi di montaggio) una forza corrispondente alla metà della forza di scorrimento totale, allo spostamento di 14mm (la corsa a vuoto di 9mm più tolleranze di montaggio e deformazioni elastiche) la forza totale di scorrimento ed allo spostamento di 48mm la stessa forza;
- si assegna in parallelo una molla elastica bilineare, che trasmette una forza molto bassa (1-2% di quella massima per non avere problemi numerici) fino allo spostamento massimo di 48mm, e quindi assume rigidità molto elevata (100 volte maggiore di quella iniziale della molla-isolatore);
- il comportamento della connessione in direzione verticale e trasversale all'asse dell'elemento viene infine considerato rigido.

Per verificare l'applicabilità del sistema di connessione dissipativo a strutture reali, sono state eseguite analisi numeriche su un pilastro modello e su di una struttura rappresentativa della

produzione CSP. Nel presente articolo verranno riportati i risultati relativi alle prime.

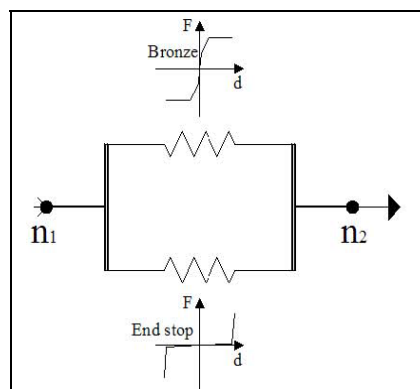


Figura 5.2. Schematizzazione delle connessioni

## 5.2. Analisi numeriche sul capannone tipo

Il pilastro isostatico di altezza pari a 11.3m, sezione da 80x80cm e carico concentrato in sommità pari a 590kN, rappresentabile come un oscillatore a un grado di libertà, è stato progettato secondo le indicazioni dell'Eurocodice 8, in classe di duttilità intermedia e alta, per un'accelerazione al progetto di 0.3g (zona sismica 2, fattore di importanza 1.2) e terreno di categoria B. Le dimensioni della sezione sono state incrementate fino al rispetto del limite di 0.2 sull'indice di stabilità  $\theta$ . Il progetto dell'armatura longitudinale e a taglio è risultato governato dai valori minimi da normativa ( $\rho_l = 1\%$  ;  $\omega_{wd} = 12\%$ ).

Il pilastro così progettato è stato assoggettato a una serie di accelerogrammi spettro-compatibili, generati con il programma SIMQKE. Si è considerata la massa fissata in sommità oppure collegata ad attrito con diversi valori della forza di scorrimento.

Dai risultati delle analisi si osserva una diminuzione degli spostamenti della massa in sommità e delle sollecitazioni al piede del pilastro per valori della forza di scorrimento del 10-15%.

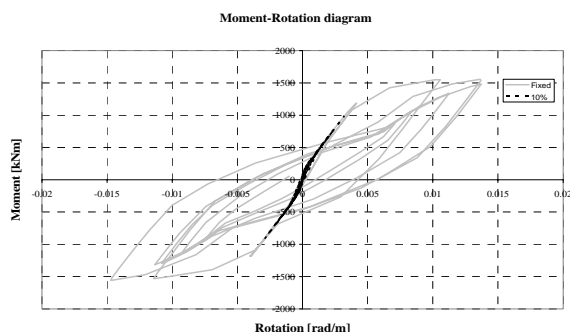
I risultati sono riportati in tabella 5.1

Modello	Forza [kN]	Spostamento [cm]
Rigido	138.32	28.82
Scorr 10%	90.11	17.60
Scorr 15%	115.07	22.83
Scorr 20%	121.94	24.07
Scorr 25%	136.68	28.27

Tabella 5.1. Risultati delle analisi numeriche

La differenza tra modello con vincolo rigido e modello con connessione dissipativa con forza di scorrimento del 10% è pari al 39% termini di spostamento della massa in sommità e al 35% in termini di taglio alla base.

Un aspetto importante del comportamento del pilastro con connessione isteretica in sommità consiste nella risposta sostanzialmente elastica dell'elemento (come richiesto dalle norme tecniche per le costruzioni). Si riporta il diagramma momento-rotazione della sezione di base:



**Figura 5.3.** Curva momento-rotazione alla base

Per il pilastro con connessione dissipativa potrebbero quindi essere omessi i dettagli costruttivi imposti per le strutture antisismiche.

## 6. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo articolo sono stati studiati il comportamento meccanico di una nuova tipologia di connessione dissipativa trave-tegolo per strutture prefabbricate, denominata Nexfuse® e gli effetti della sua applicazione su di un pilastro rappresentativo di una struttura prefabbricata.

Il comportamento sperimentale della connessione è risultato stabile e vicino a quello teorico ipotizzato in sede progettuale, garantendo elevata duttilità e capacità dissipativa.

Gli effetti dell'utilizzo di una connessione dissipativa in luogo di una connessione rigida si traducono in un aumento dell'energia dissipata, a cui corrispondono la riduzione degli spostamenti e delle sollecitazioni indotte sui pilastri e in fondazione.

Sviluppi futuri potranno riguardare studi di applicabilità a diverse tipologie strutturali prefabbricate e la progettazione del collegamento di elementi trave con i pilastri.

## 7. RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata svolta nell'ambito di un contratto di ricerca tra CSP, Officine Maffioletti, Ing. Spadavecchia ed il Dipartimento di Progettazione e Tecnologie dell'Università di Bergamo.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [01] **C. CHRISTOPOULOS, A. FILIATRAULT**, "Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation", IUSS Press, 2006
- [02] **EUROCODE 8**, "Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings" UNI-EN 1998-1:2005
- [03] **L. MARININI**, "Isolation system for Precast Buildings (numerical modeling and structural response)", ROSE School, 2008
- [04] **S. PAMPANIN**, "Forze o spostamenti? Filosofie alternative di progettazione antisismica", Rivista Elite, 2006
- [05] **M.J.N. PRIESTLEY, G.M. CALVI, M.J.N. KOWALSKY**, "Displacement – Based Seismic Design of Structures", IUSS Press, 2006
- [06] **P. SPATTI**, "Isolation system for Precast Buildings (numerical modelling of the components)", ROSE School, 2008