

Corso di aggiornamento

Progetto di edifici antisismici  
con struttura controventata in acciaio

**Telai con controventi e pendoli verticali**

10 - Strutture controventate con pendoli verticali

Spoletto

24-25 marzo 2017

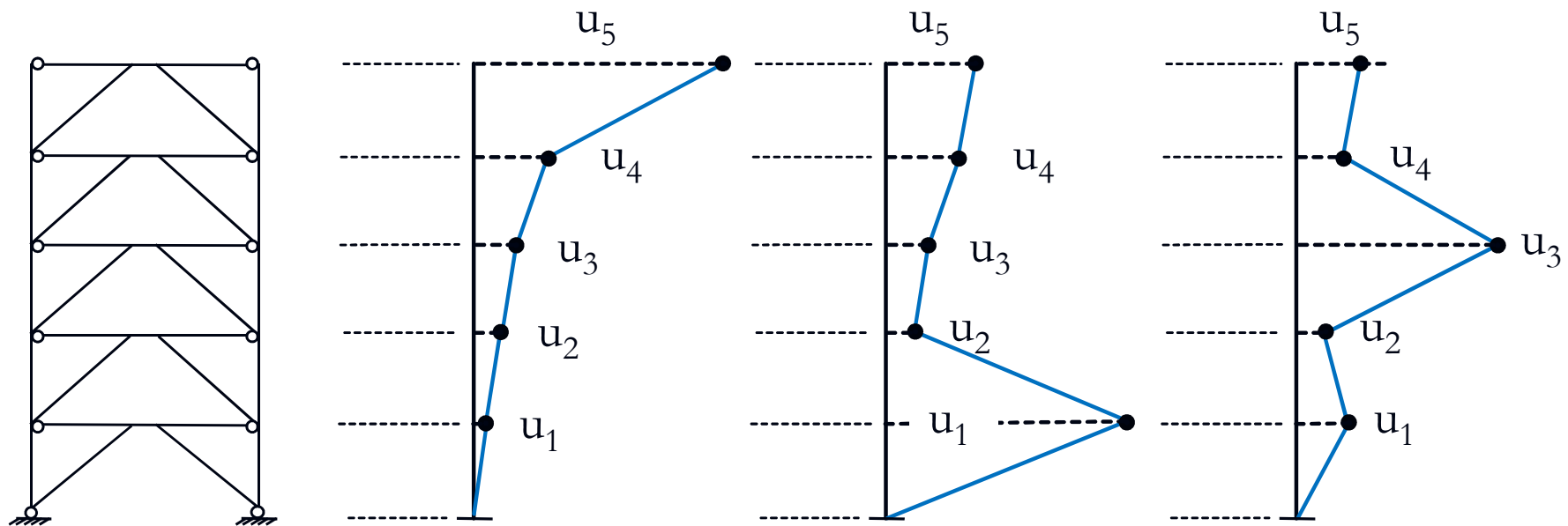
Pier Paolo Rossi

# Strutture controventate con pendoli verticali

# Strutture controventate tradizionali

Risposta sismica

In occorrenza di eventi sismici, le strutture controventate tradizionali spesso sviluppano danni concentrati a pochi piani.



Spostamenti orizzontali in telaio con controventi eccentrici

# Strutture controventate tradizionali

Risposta sismica

Ciò non consente di sfruttare appieno le capacità dissipative della struttura

..... ed è tipico di strutture con controventi sia concentrici che eccentrici



Questo comportamento è dovuto alla bassa capacità di ridistribuzione plastica del danno in elevazione di tali strutture.

# Strutture controventate tradizionali

Capacità di redistribuzione plastica del danno in elevazione

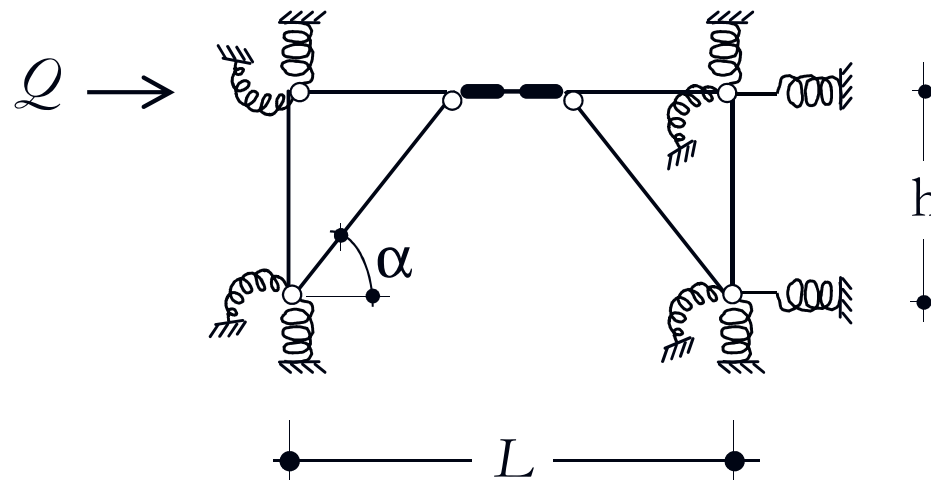
Con il termine «capacità di redistribuzione plastica del danno» si intende la capacità della struttura di uniformare il danno su tutti i piani in occorrenza dell'entrata in campo inelastico di un elemento dissipativo.

$$DDC_i = \frac{\frac{1}{n_s - 1} \cdot \left( \sum_{j=1}^{n_s} \frac{\Delta u_j}{\Delta u_j^{\lim}} \right)_{j \neq i}}{\left( \frac{\Delta u_i}{\Delta u_i^{\lim}} \right)}$$

# Strutture controventate tradizionali

Capacità di redistribuzione plastica del danno in elevazione

Nei telai controventati tradizionali,  
la capacità di redistribuzione plastica del danno dipende  
dalla capacità delle colonne di mantenere un profilo degli  
spostamenti rettilineo



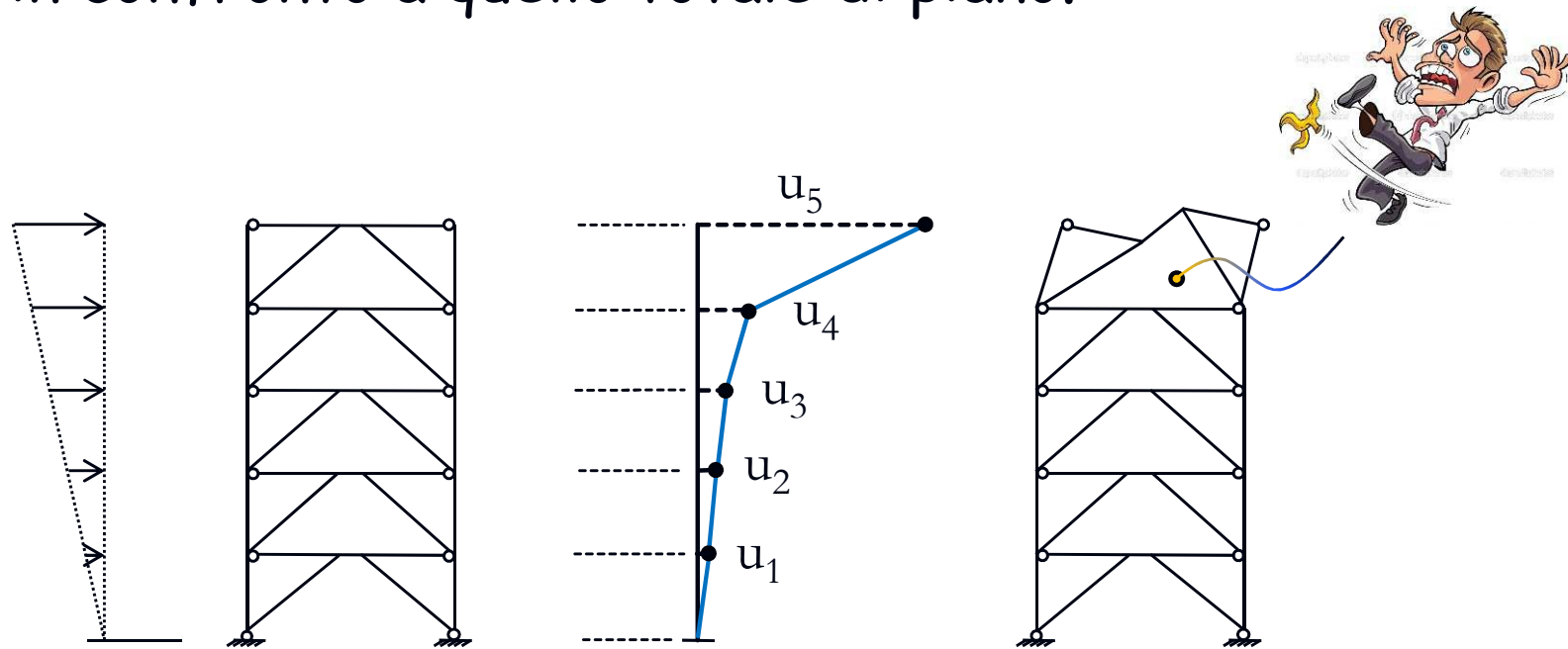
**Nota !**

non tutte le componenti di spostamento determinano danno degli elementi dissipativi

# Strutture controventate tradizionali

Capacità di redistribuzione plastica del danno in elevazione

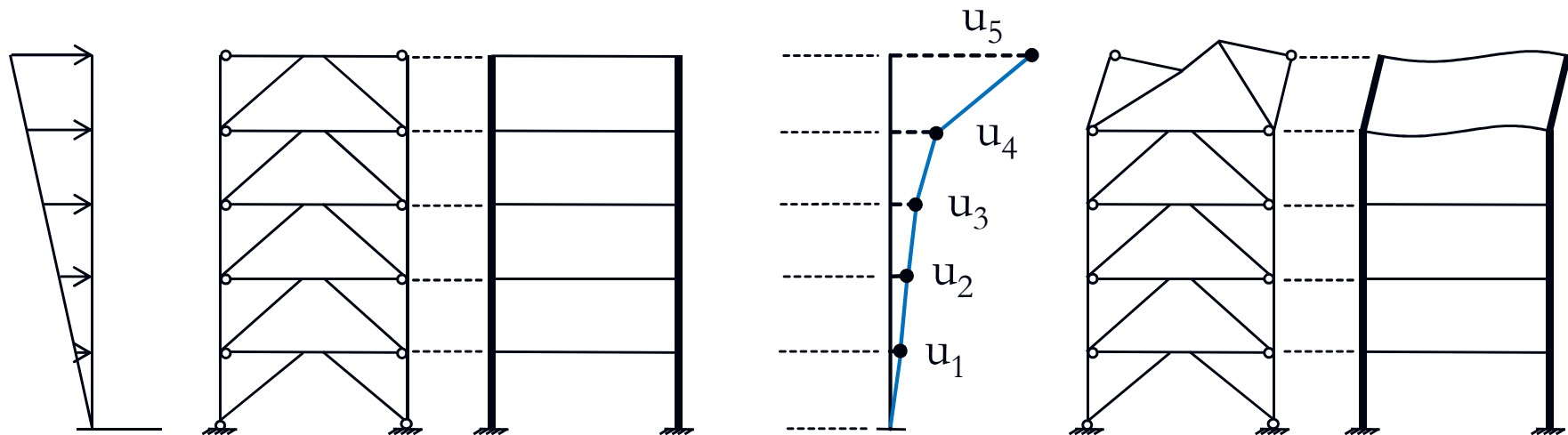
Nei telai controventati tradizionali,  
la capacità di redistribuzione plastica del danno è bassa  
perché ridotto è il valore della rigidezza laterale delle  
colonne in confronto a quello totale di piano.



# Strutture controventate duali

Capacità di redistribuzione plastica del danno in elevazione

Nel passato sono state fatte proposte per incrementare la rigidezza flessionale delle colonne realizzando uno schema di telaio duale.

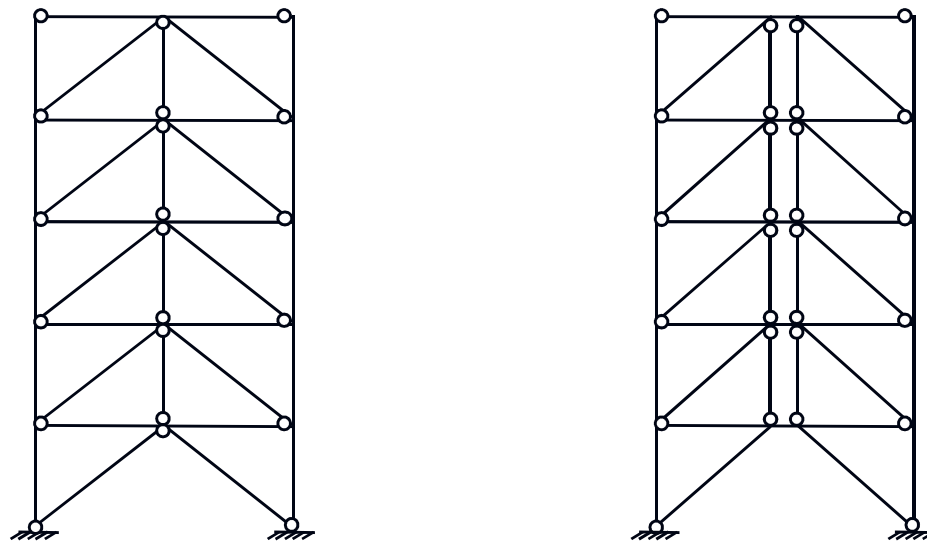


Misure di progetto volte ad ottenere tale risultato possono garantire limitati miglioramenti della risposta ma incrementi non sempre trascurabili dei costi

# Strutture controventate legate

Caratteristiche geometriche

Una differente strategia è stata proposta da altri ricercatori e fondata sull'inserimento di pendoli verticali tra le estremità corrispondenti dei controventi di piani contigui.



Schema di telaio con controventi concentrici o eccentrici con pendoli verticali

# Strutture controventate legate

Caratteristiche comportamentali

Questi sistemi possono essere progettati in modo tale da ottenere :

- Sistemi con controventi e pendoli verticali
- Sistemi con controventi e pareti oscillanti

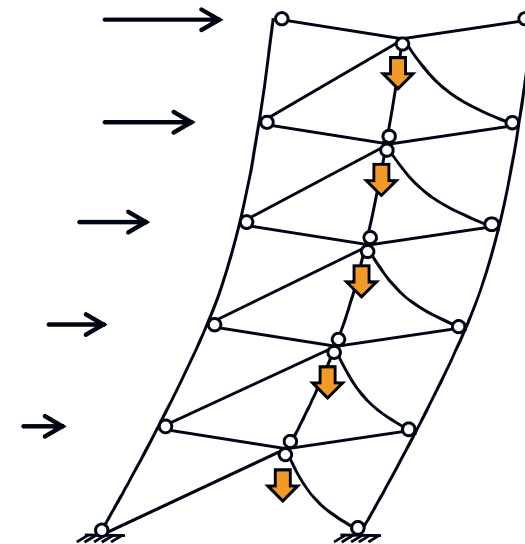
In ogni caso, i pendoli verticali vincolano gli elementi dei vari piani ad aver gli stessi spostamenti verticali (a meno delle deformazioni assiali dei pendoli)

**Strutture controventate  
con pendoli verticali  
(non rocking)**

# Strutture controventate legate

Caratteristiche comportamentali

1. L'ingresso in campo inelastico di un controvento determina una distribuzione non eguale del taglio di quel piano tra i controventi e quindi una forza squilibrata diretta verso il basso.
2. Tale forza determina un abbassamento della trave di piano
3. Per la elevata rigidità assiale dei pendoli, l'abbassamento è pressoché uguale a tutti i piani e causa l'ingresso in campo inelastico di tutti i controventi.



Telaio con controventi concentrici e pendoli verticali

# Strutture controventate legate

Capacità di redistribuzione plastica del danno in elevazione

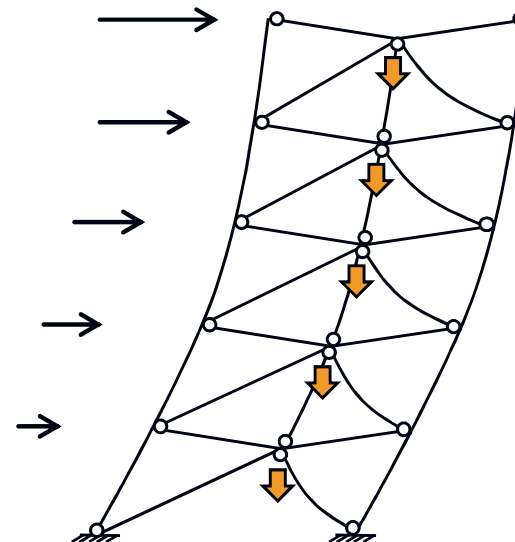
La capacità di redistribuzione plastica del danno dipende dalla rigidezza assiale dei pendoli verticali e delle colonne ed è sostanzialmente più elevata di quella di telai con controventi tradizionali



Danno più uniforme in elevazione



Migliore prestazione sismica  
allo stato limite di salvaguardia  
della vita e prevenzione del  
collasso



Telaio con controventi concentrici e pendoli verticali

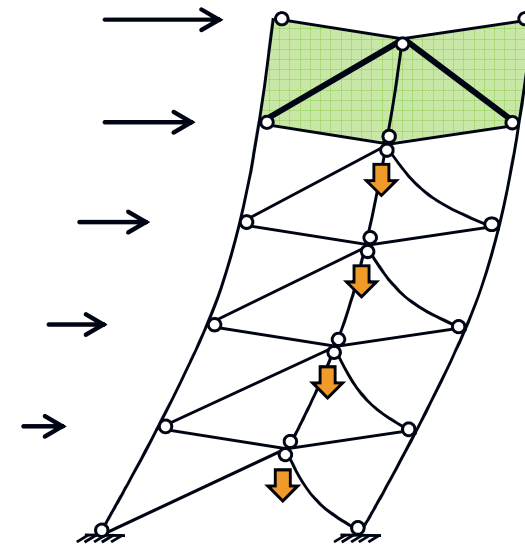
# Strutture controventate legate

Capacità di redistribuzione plastica del danno in elevazione

Alcuni studiosi hanno tuttavia rilevato che tali sistemi potevano presentare instabilità globale in campo plastico.

Per scongiurare tale possibilità, è stato proposto di progettare il piano ultimo in modo tale che rimanesse in campo elastico fino a collasso.

Tale sistema prende il nome di  
«**Sistema sospeso con  
controventi e pendoli verticali**»



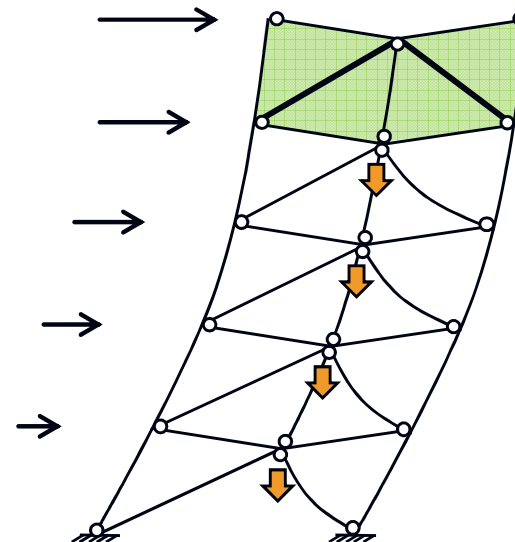
Telaio con controventi concentrici e pendoli verticali

# Strutture controventate legate

Elementi dissipativi e non dissipativi

Gli elementi dissipativi sono rappresentati dai controventi di tutti i piani, ad eccezione di quelli del piano di sommità.

Tutti gli altri elementi sono da progettarsi come non dissipativi e dunque da proteggersi secondo il criterio di gerarchia delle resistenze

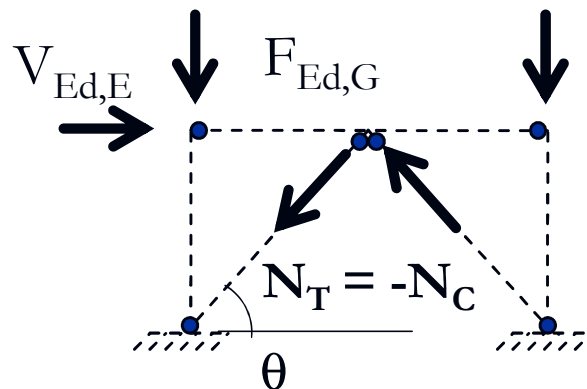


Telaio con controventi concentrici e pendoli verticali

# Strutture controventate sospese

Progetto dei controventi dissipativi

Nell'ambito di una procedura di progetto basata sulle forze, le sollecitazioni di progetto dei controventi sono valutate in funzione dello spettro di progetto:



$$N_T \cong \frac{V_{Ed}}{2 \cos \theta} \leq N_{b,Rd}$$

# Strutture controventate sospese

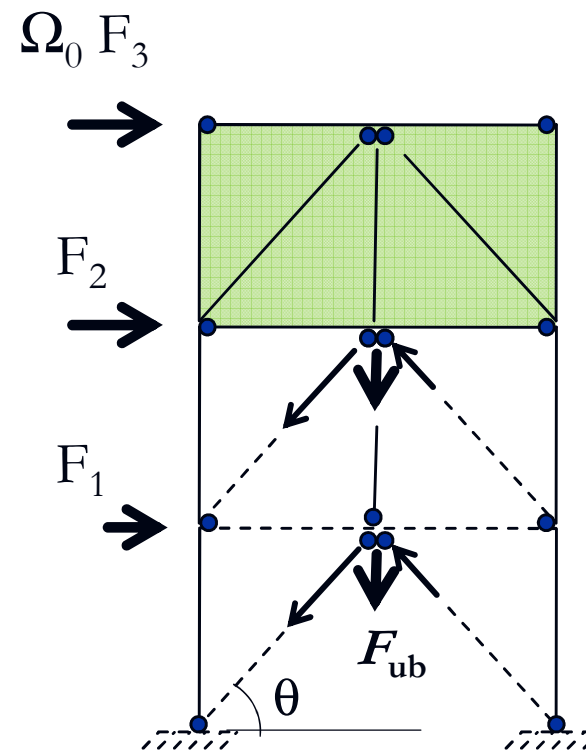
Progetto dei pendoli verticali

Gli elementi non dissipativi sono progettati supponendo che :

- le forze verticali sbilanciate dei controventi si sviluppino simultaneamente a tutti i piani;
- i tagli nelle travi siano trascurabili.

Ad esempio, per i pendoli verticali:

$$N_{\text{Ed,t}}^{(i)} = \sum_{j=1}^{i-1} 1.1 \gamma_{\text{ov}} \underbrace{\left( N_{\text{pl,Rd,d}}^{(j)} - N_{\text{pb,Rd,d}}^{(j)} \right)}_{F_{\text{ub}}} \sin \theta$$



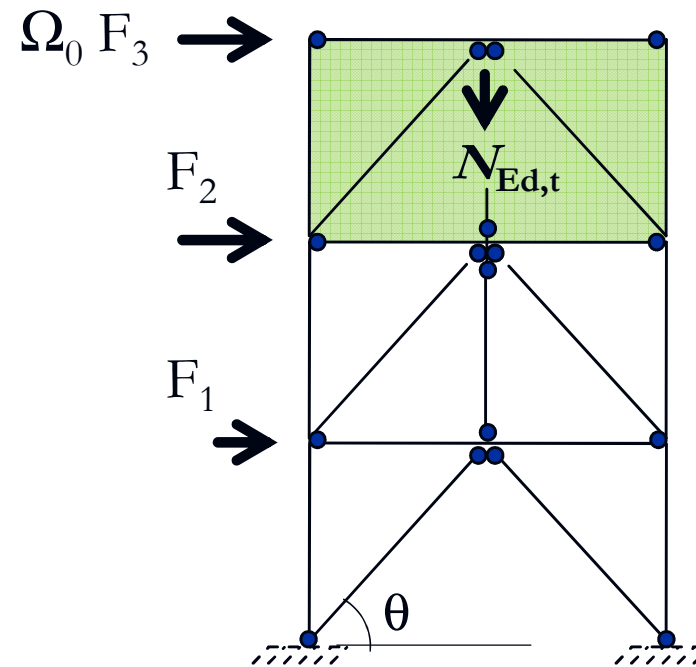
# Strutture controventate sospese

Progetto dei controventi dissipativi

I controventi dell'ultimo piano sono progettati in modo tale che rispondano elasticamente alle forze trasferite da :

- pendoli dell'ultimo piano
- forza sismica di progetto amplificata dell'ultimo piano

$$N_{Ed,d}^{(ns)} = \frac{\Omega_0 F_{Ed}^{(ns)}}{2 \cos \theta} + \frac{N_{Ed,t}^{(ns)}}{2 \sin \theta}$$



# Strutture controventate sospese

## Progetto delle colonne

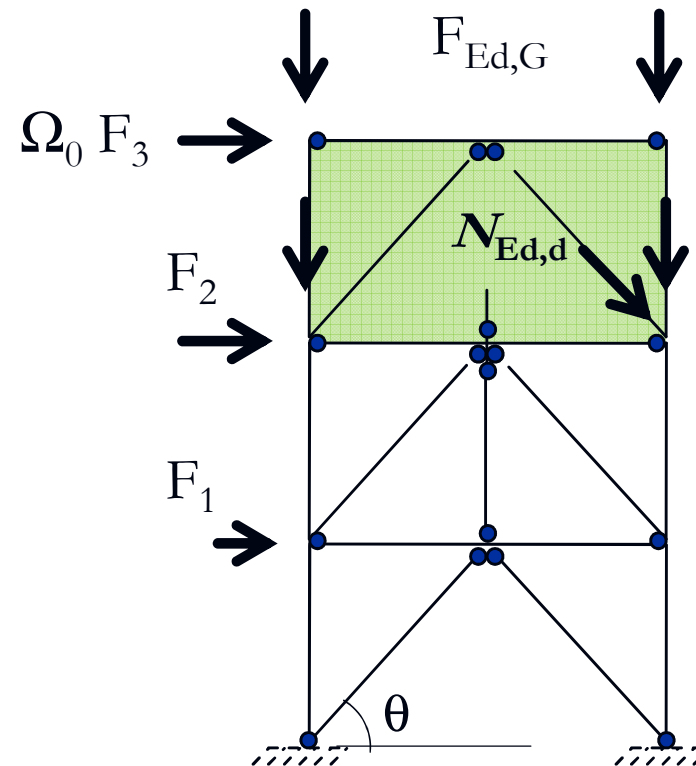
Le colonne dell'ultimo piano sono progettate per soli carichi verticali:

$$N_{Ed,c}^{(ns)} = N_{Ed,G,c}^{(ns)}$$

Le colonne del penultimo piano sono progettate per sostenere:

- carichi verticali
- scarico dei controventi dell'ultimo piano

$$N_{Ed,c}^{(ns-1)} = N_{Ed,c}^{(ns)} + N_{Ed,G,c}^{(ns-1)} + N_{Ed,d}^{(ns)} \sin \theta$$



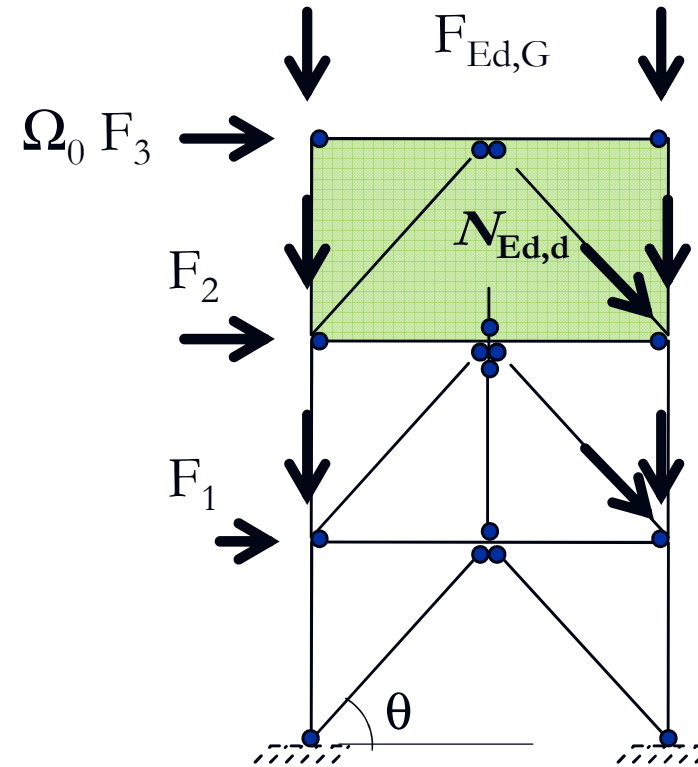
# Strutture controventate sospese

## Progetto delle colonne

Le colonne degli altri piani sono progettate per sostenere :

- carichi verticali
- scarico dei controventi dei piani al di sopra

$$N_{Ed,c}^{(i)} = N_{Ed,c}^{(i+1)} + N_{Ed,G,c}^{(i)} + 1.1\gamma_{ov} N_{b,Rd,d}^{(i+1)} \sin \theta$$



# Strutture controventate sospese

Miglioramenti al progetto secondo Yang e tal.

Gli elementi non dissipativi possono essere progettati supponendo che le forze verticali sbilanciate dei controventi si sviluppino al massimo ai cinque piani più bassi dell'edificio.

Ad esempio, per i pendoli verticali:

$$N_{\text{Ed,t}}^{(i)} = \sum_{j=1}^{n_{\text{lim}}} 1.1 \gamma_{\text{ov}} \left( N_{\text{pl,Rd,d}}^{(j)} - N_{\text{pb,Rd,d}}^{(j)} \right) \sin \theta$$

dove  $n_{\text{lim}} = \min\{i-1; 5\}$

# Strutture controventate sospese

Miglioramenti al progetto secondo Yang et al.

Inoltre :

- *Gli elementi non dissipativi possono essere progettati valutando sia gli sforzi normali che i momenti flettenti*
- *Gli elementi non dissipativi possono essere progettati verificando direttamente l'efficacia della risposta del sistema di sospensione*
- *Gli elementi dissipativi potrebbero essere progettati in acciaio superiore al grado S235 al fine di aumentare la capacità deformativa degli stessi*

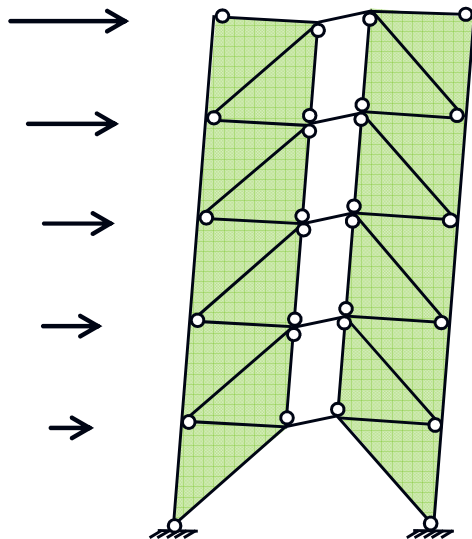
**Strutture oscillanti  
incernierate alla base**

# Strutture controventate oscillanti

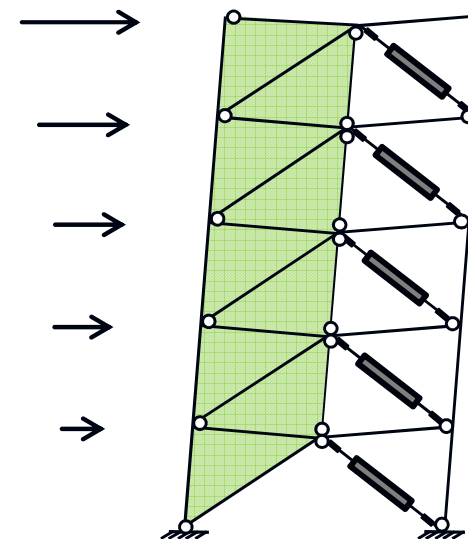
Caratteristiche comportamentali

Gli elementi di un lato del telaio controventato sono progettati in modo da rimanere elastici fino a collasso.

Gli elementi dissipativi possono essere vari



Telaio con controventi eccentrici e pareti oscillanti



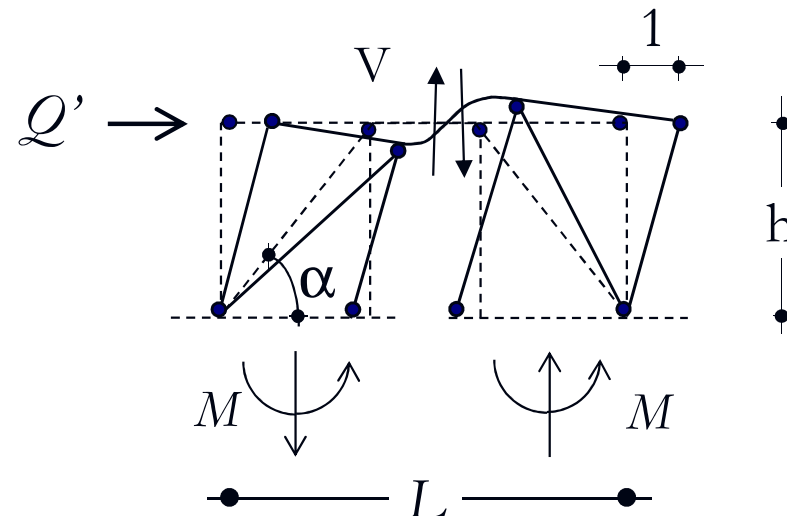
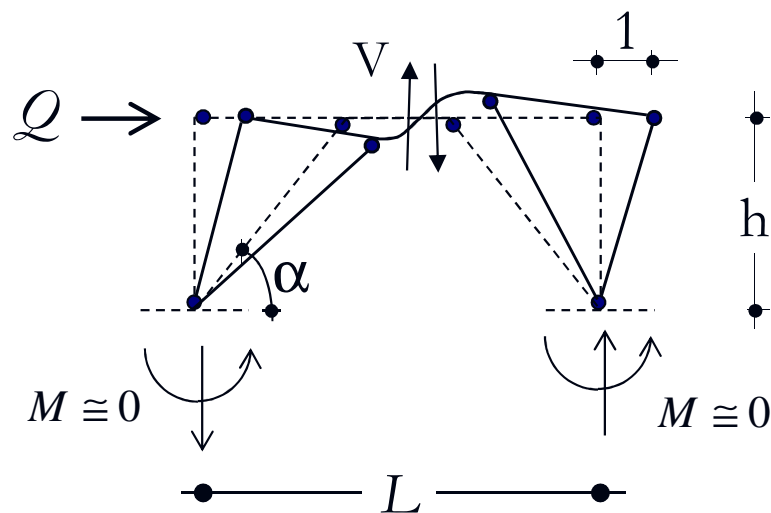
Telaio con controventi concentrici e pareti oscillanti

Tratto da: P.P.Rossi *A design procedure for tied braced frames* Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36, pp.2227-2248, 2007

# Strutture controventate oscillanti

Caratteristiche comportamentali

1. A differenza del telaio con controventi tradizionali, la rigidezza laterale di piano è solo lievemente influenzata dalla rigidezza dell'elemento dissipativo.



## CONSEGUENZA

L'ingresso in campo inelastico degli elementi dissipativi rende poco probabile la concentrazione di elevate deformazioni plastiche.

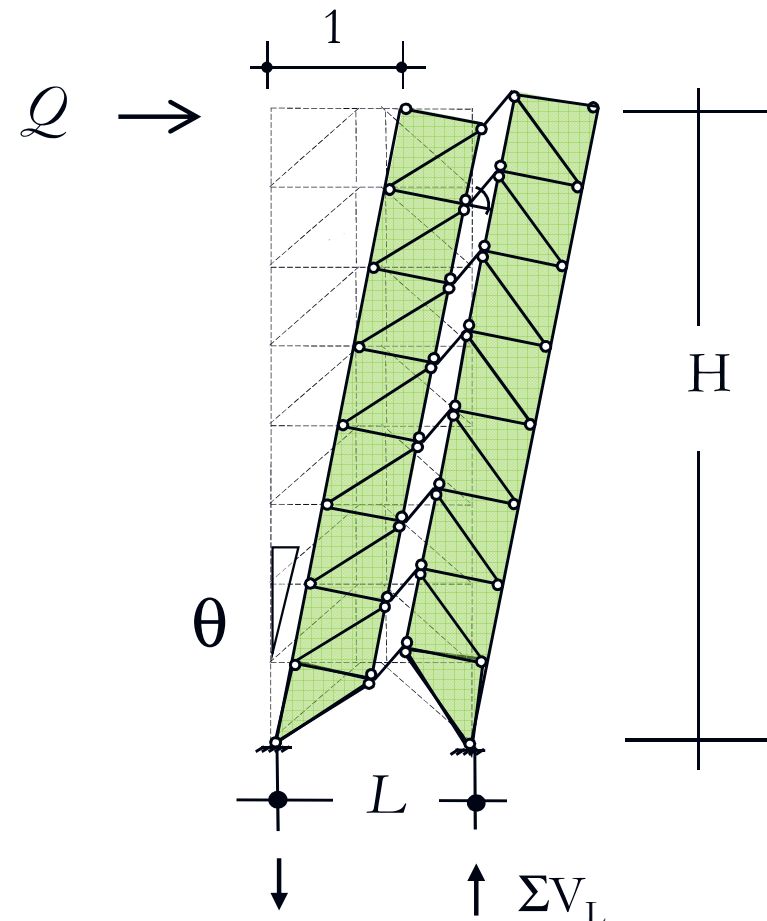
# Strutture controventate oscillanti

Caratteristiche comportamentali

2. La rigidezza laterale globale mostra decrementi crescenti con l'aumentare delle deformazioni inelastiche degli elementi dissipativi.

## CONSEGUENZA

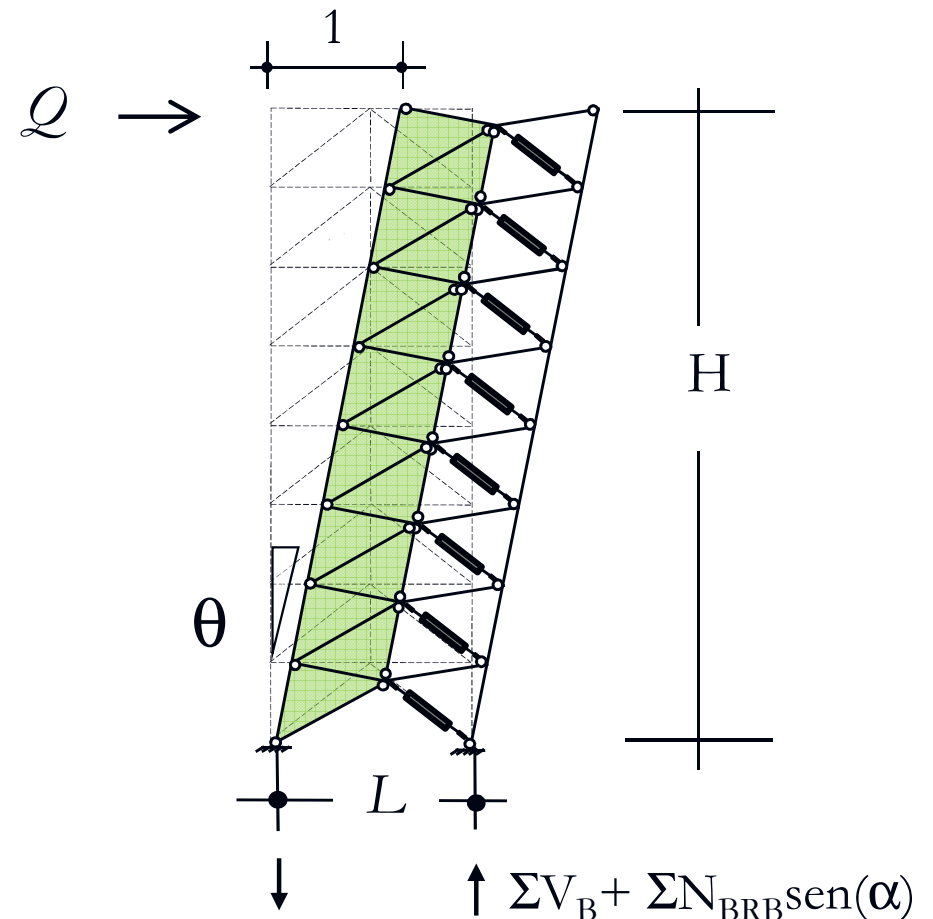
La progressiva deformazione rende la risposta sempre più governata dal moto "rigido" delle sottostrutture elastiche.



# Strutture controventate oscillanti

Caratteristiche comportamentali

- 3.** Nei sistemi con controventi concentrici ...  
è possibile garantire una moderata capacità di ricentraggio, imponendo che la trave risponda in campo elastico fino a collasso della struttura



# Confronto prestazionale

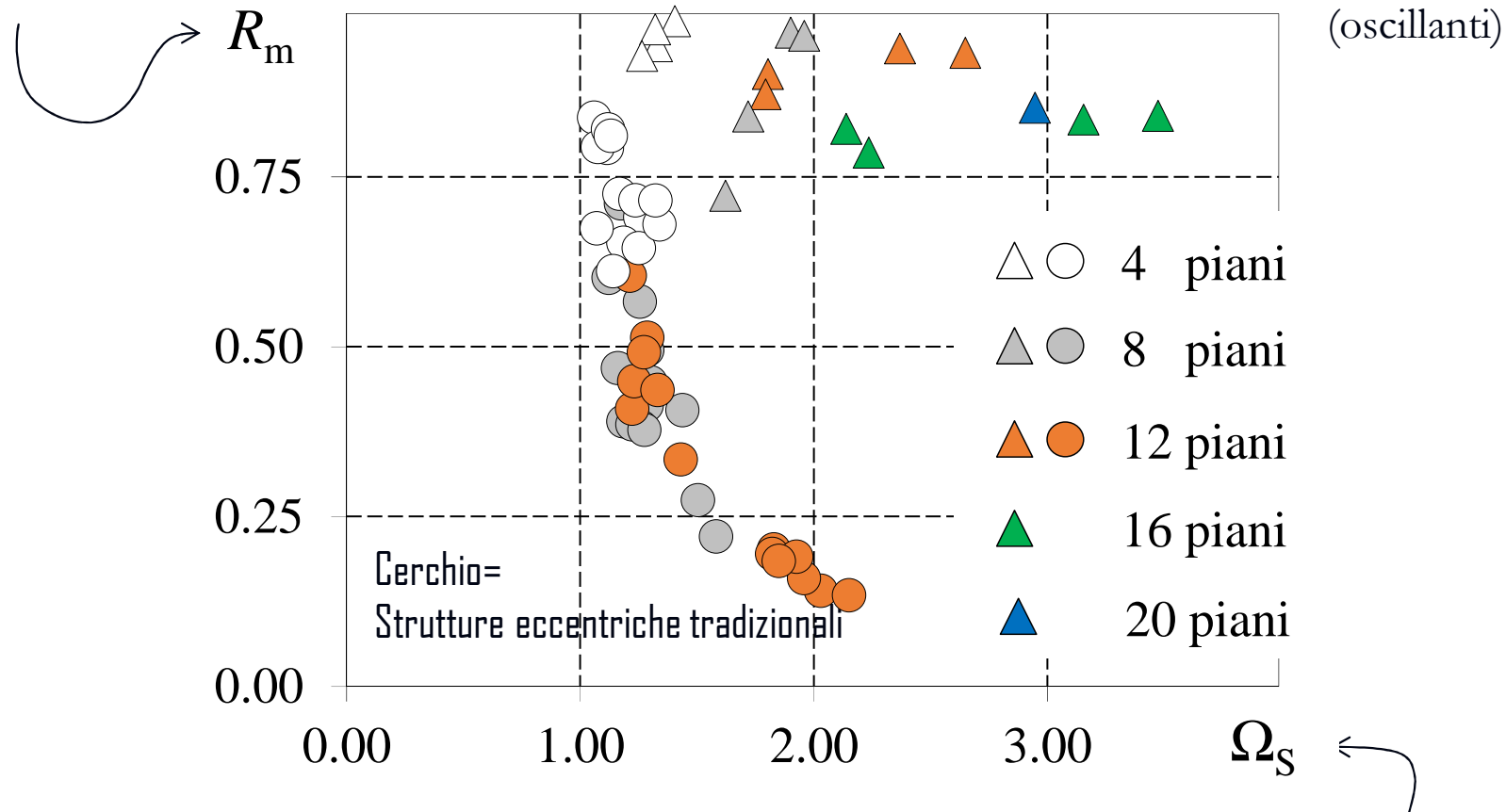
## Strutture con controventi eccentrici : oscillanti e non oscillanti

Valore medio delle massime rotazioni plastiche normalizzate dei link della struttura

Triangolo=

Strutture eccentriche con pendoli verticali

(oscillanti)



### Rapporto tra valore massimo e minimo della sovrarresistenza dei link della struttura

# Strutture oscillanti incernierate

## Vantaggi

1. La presenza di strutture oscillanti evita importanti e rapide riduzioni della rigidezza laterale di piano all'atto dell'ingresso in campo inelastico degli elementi dissipativi.



Sistemi oscillanti progettati in ossequio ai principi del capacity design hanno la capacità di coinvolgere gli elementi dissipativi di tutti i piani nel comportamento inelastico globale prima che sia attinto il collasso strutturale.



Il comportamento sismico di tali strutture non è dipendente dalla distribuzione in elevazione del fattore di sovrarresistenza.

# Strutture oscillanti incernierate

## Svantaggi

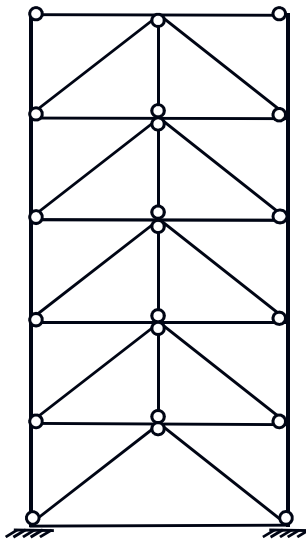
- Moderata capacità di ricentraggio
- Difficoltà nella valutazione delle sollecitazioni di progetto

**Strutture oscillanti  
appoggiate alla base**

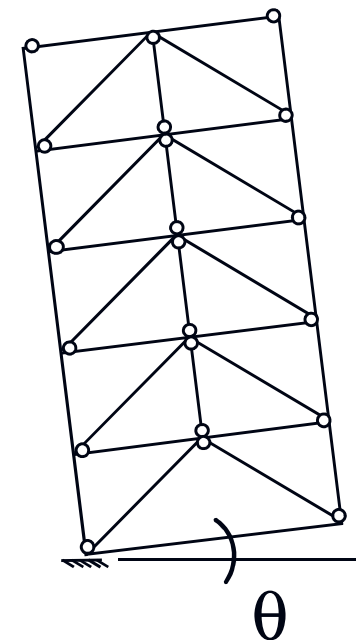
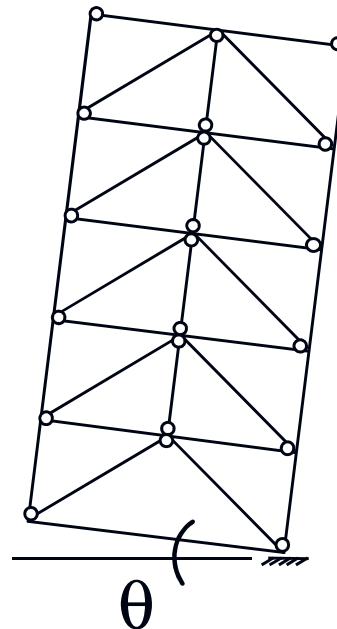
# Strutture oscillanti appoggiate

Caratteristiche comportamentali

Gli elementi del telaio controventato sono progettati in modo da rimanere elastici fino a collasso.



Telaio oscillante appoggiato alla base

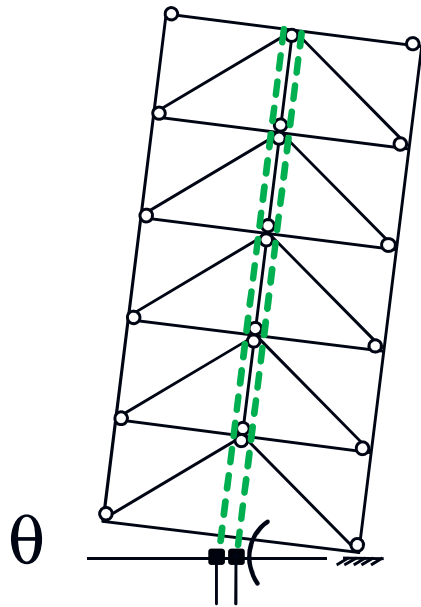


Oscillazione del telaio

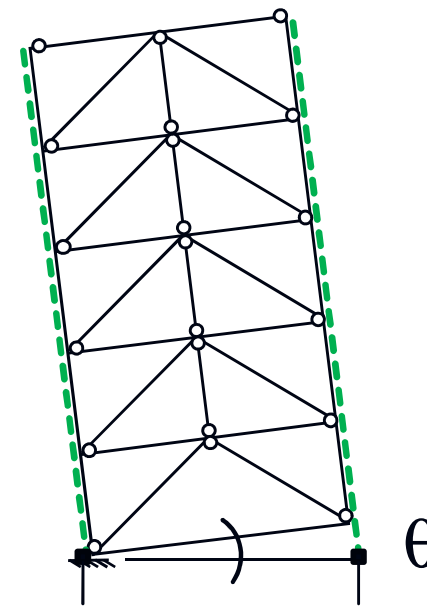
# Strutture oscillanti appoggiate

Caratteristiche comportamentali

Per garantire la capacità di ricentraggio vengono spesso adoperati cavi post-tesi in posizione centrale o eccentrica



Posizione centrale dei cavi post-tesi

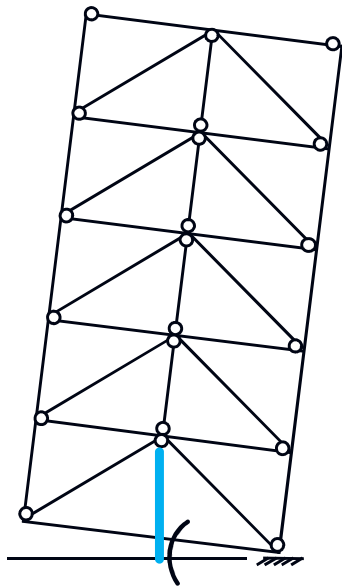


Posizione eccentrica dei cavi post-tesi

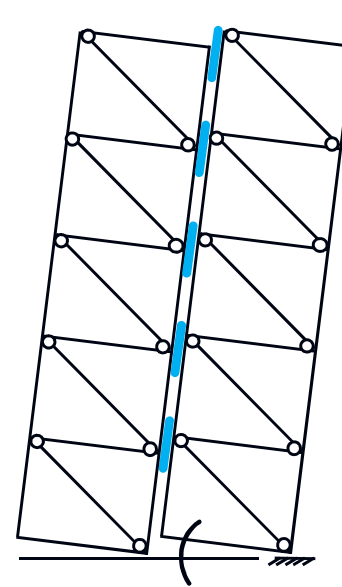
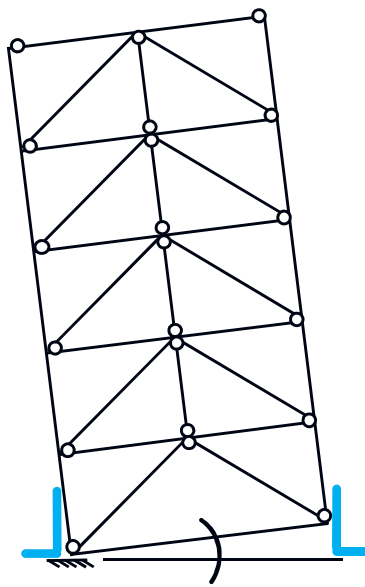
# Strutture oscillanti appoggiate

Caratteristiche comportamentali

Per garantire una buona dissipazione energetica vengono spesso aggiunti dissipatori di varia natura alla base del telaio o al contatto tra telai



Posizione del dissipatore alla base

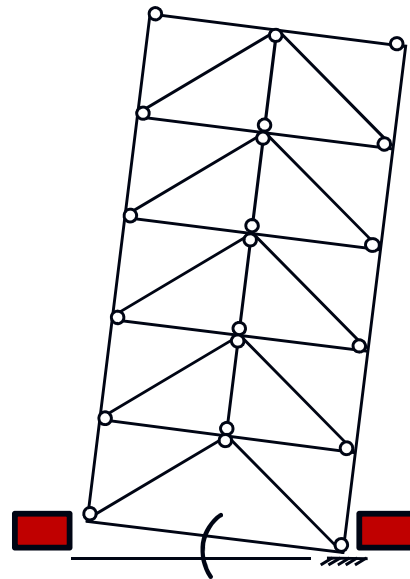


Posizione del dissipatore tra telai

# Strutture oscillanti appoggiate

Caratteristiche comportamentali

Per garantire la resistenza al taglio alla base  
vengono aggiunti blocchi alla base del telaio



Posizione del blocco alla base

# Strutture oscillanti appoggiate

Vantaggi e svantaggi

Vantaggi :

Elevata capacità di redistribuzione plastica del danno

Elevata capacità di ricentraggio

Svantaggi :

Problemi nella connessione a terra

Aumento delle accelerazioni verticali

Difficoltà nella valutazione delle sollecitazioni di progetto

# Applicazioni di strutture oscillanti

# Applicazione 1

Strutture oscillanti incernierate alla base

---



Struttura esistente



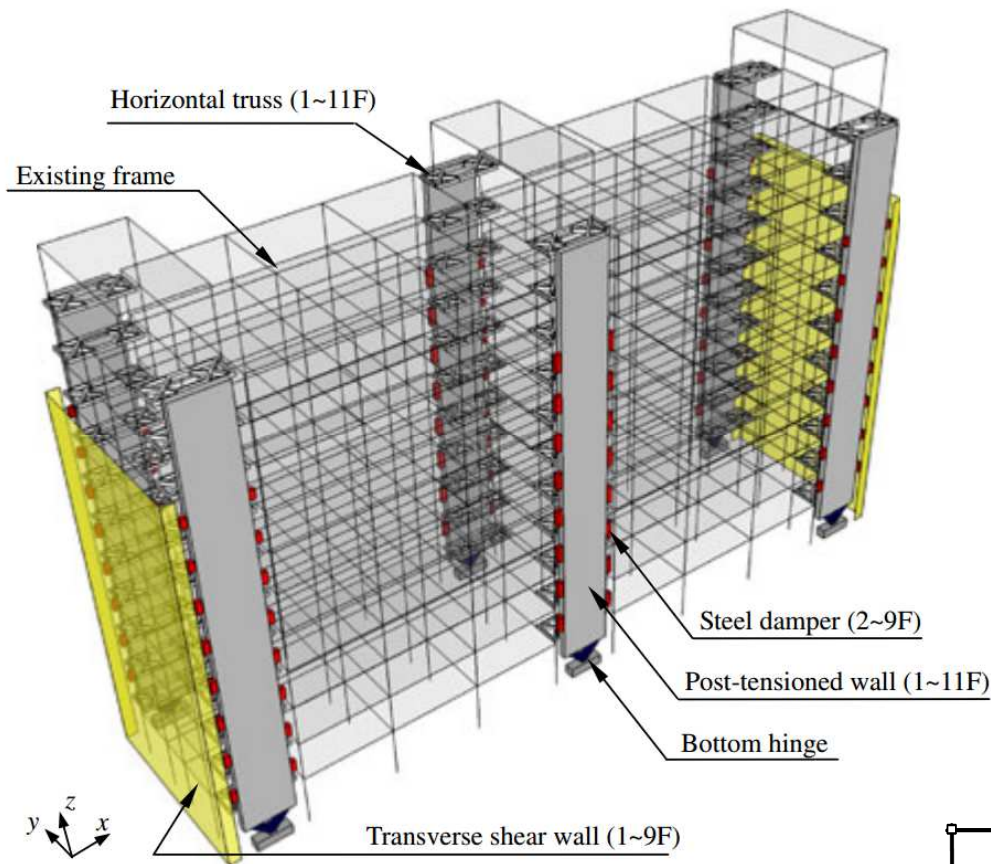
Struttura adeguata

---

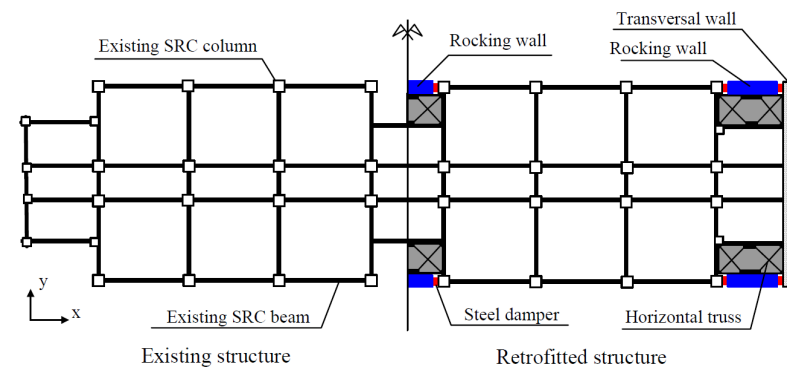
Edificio G3 nel campus Suzukakedai dell'Istituto di Tecnologia di Tokyo

# Applicazione 1

Strutture oscillanti - campus Suzukakedai di Tokyo

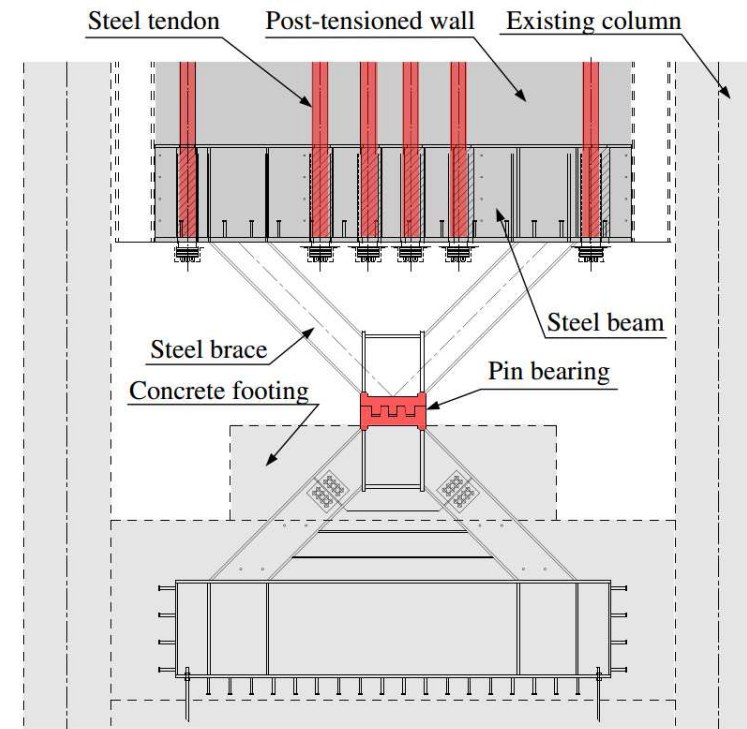
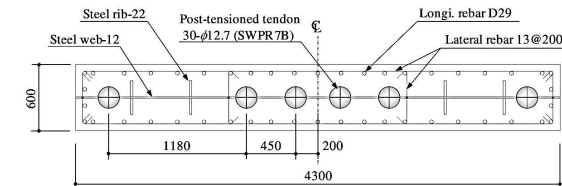
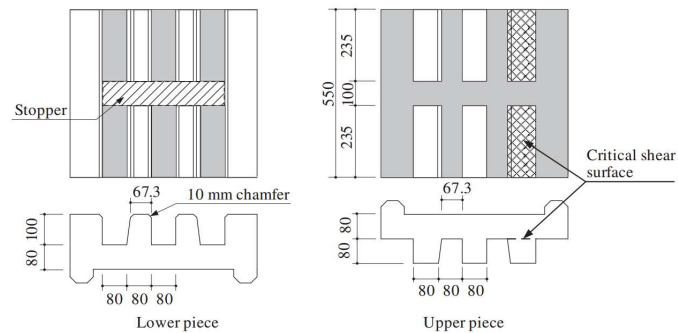
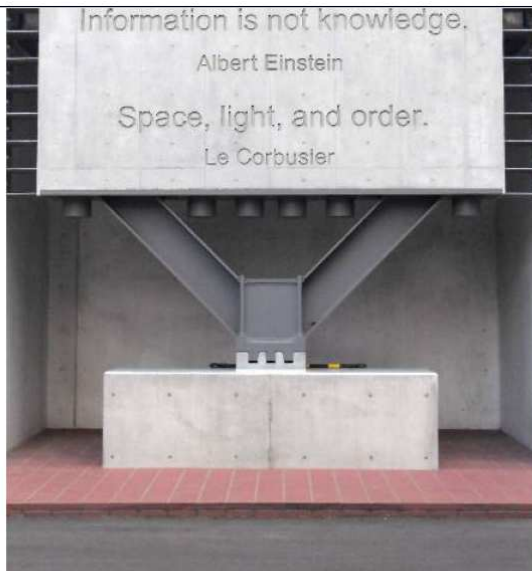


Impostazione generale



# Applicazione 1

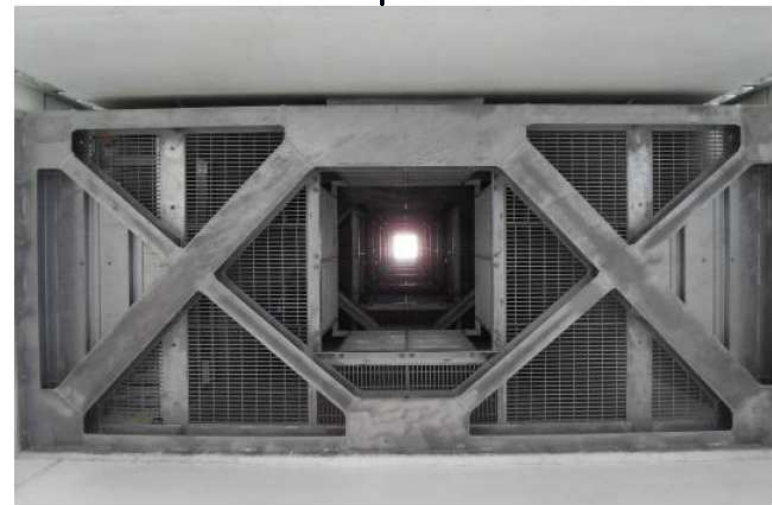
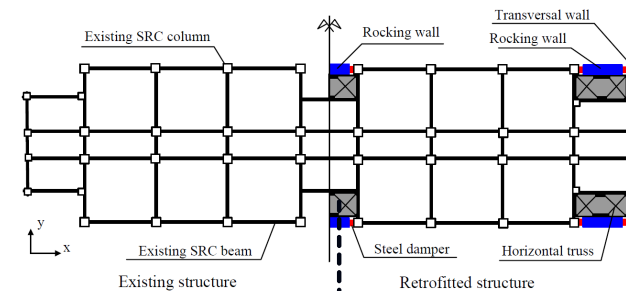
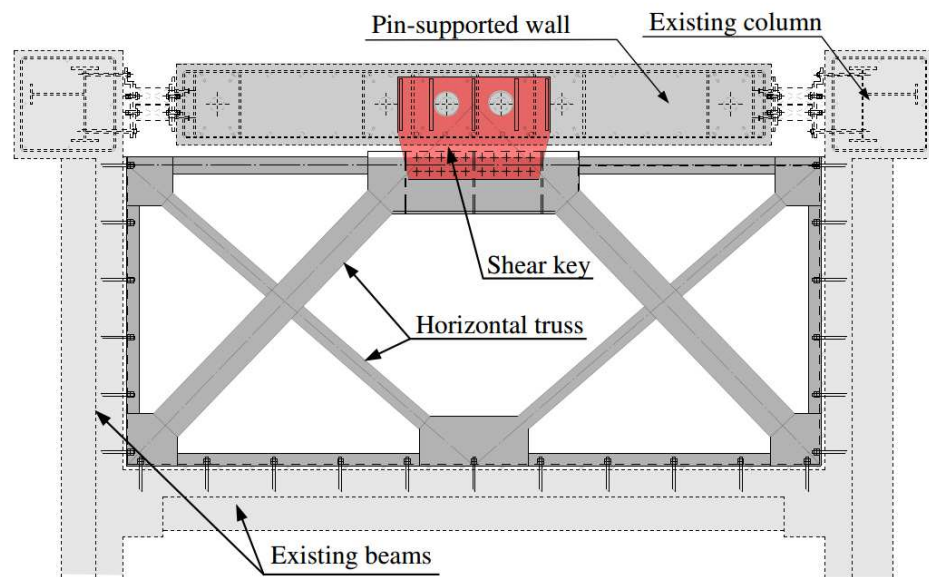
## Strutture oscillanti - campus Suzukakedai di Tokyo



Particolari della cerniera alla base della parete oscillante

# Applicazione 1

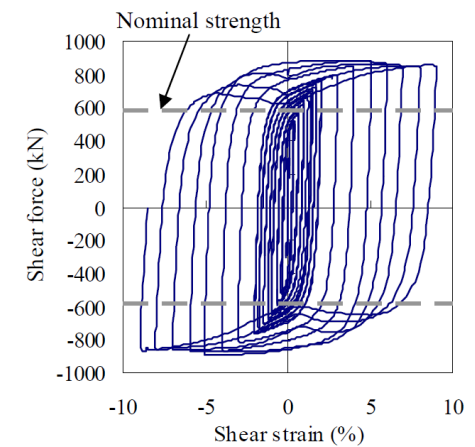
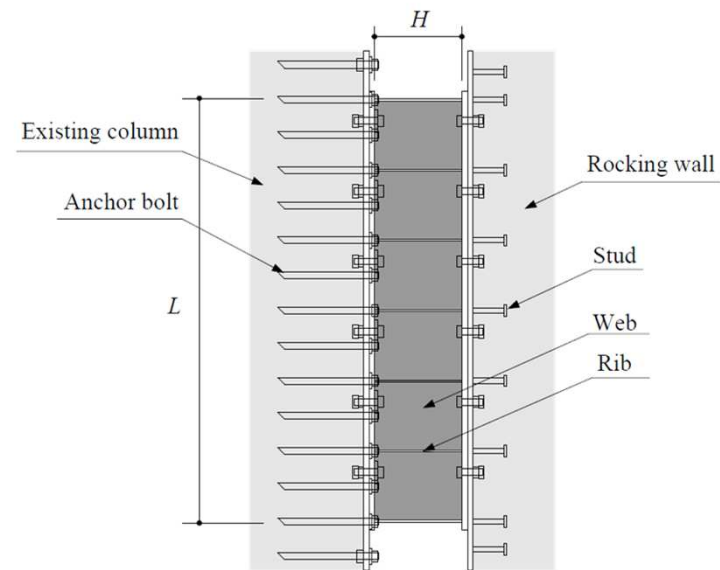
## Strutture oscillanti - campus Suzukakedai di Tokyo



Particolari dell'aggancio della parete oscillante all'impalcato

# Applicazione 1

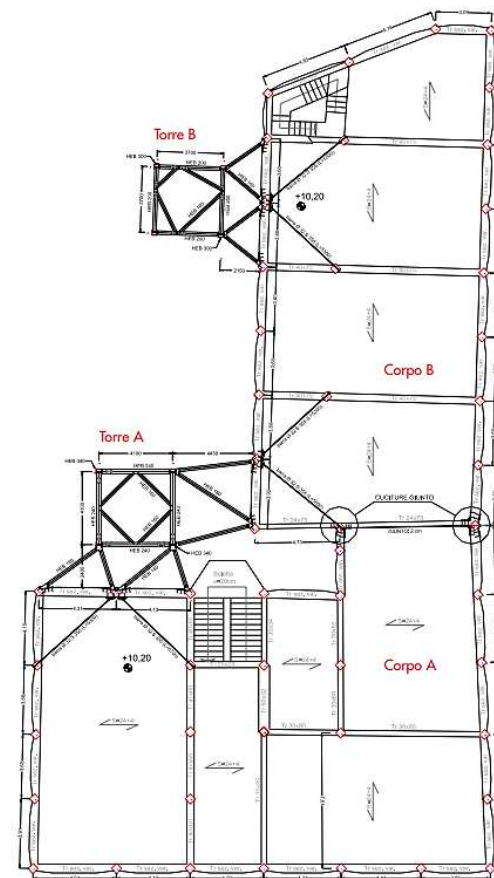
Strutture oscillanti - campus Suzukakedai di Tokyo



Particolari del sistema di dissipazione

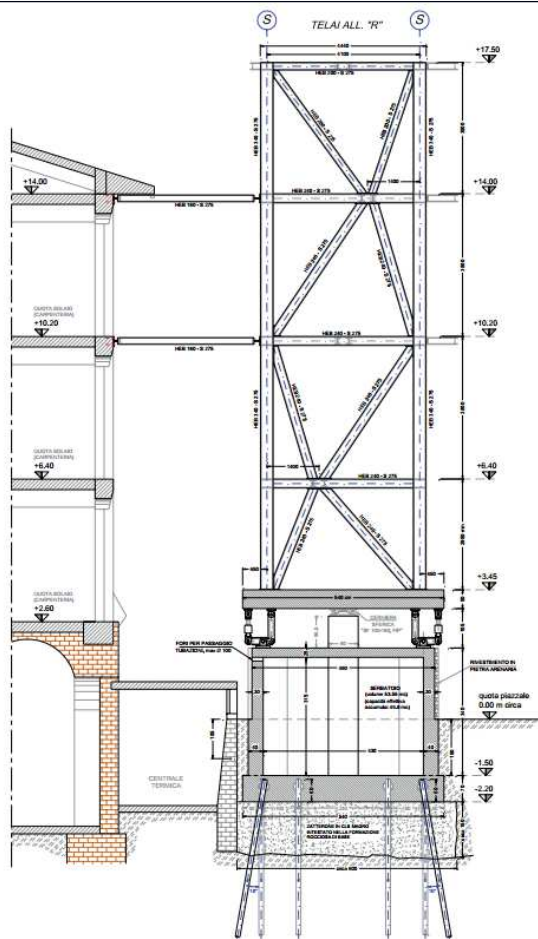
# Applicazione 2

## Strutture oscillanti – torri dissipative



# Applicazione 2

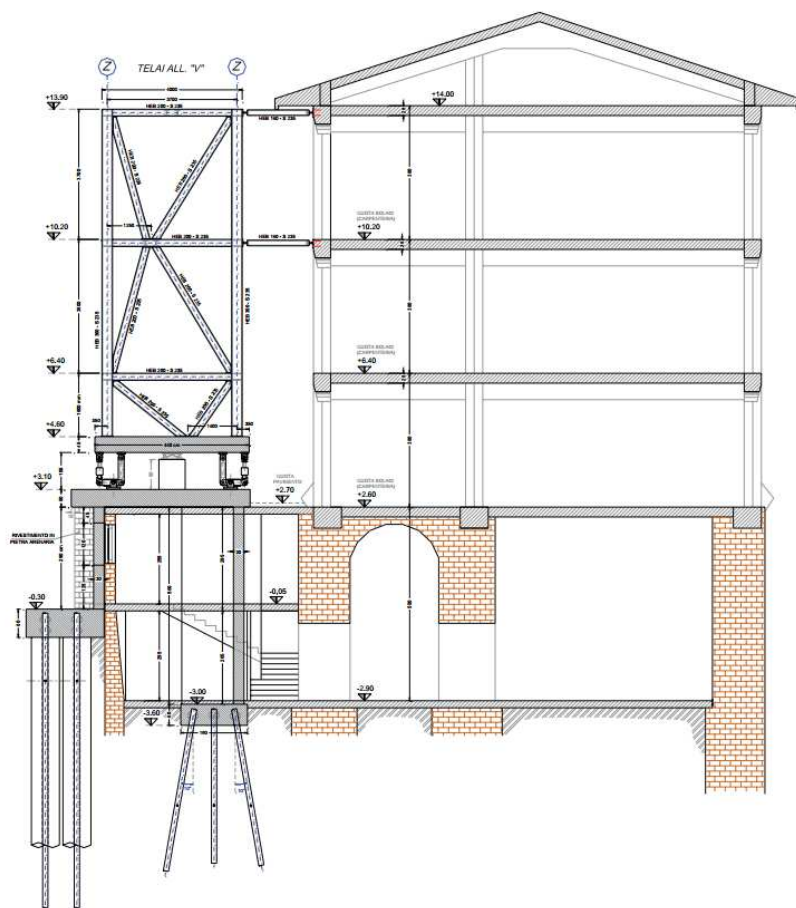
## Strutture oscillanti – Liceo Varano di Camerino



Particolari della torre dissipative A

# Applicazione 2

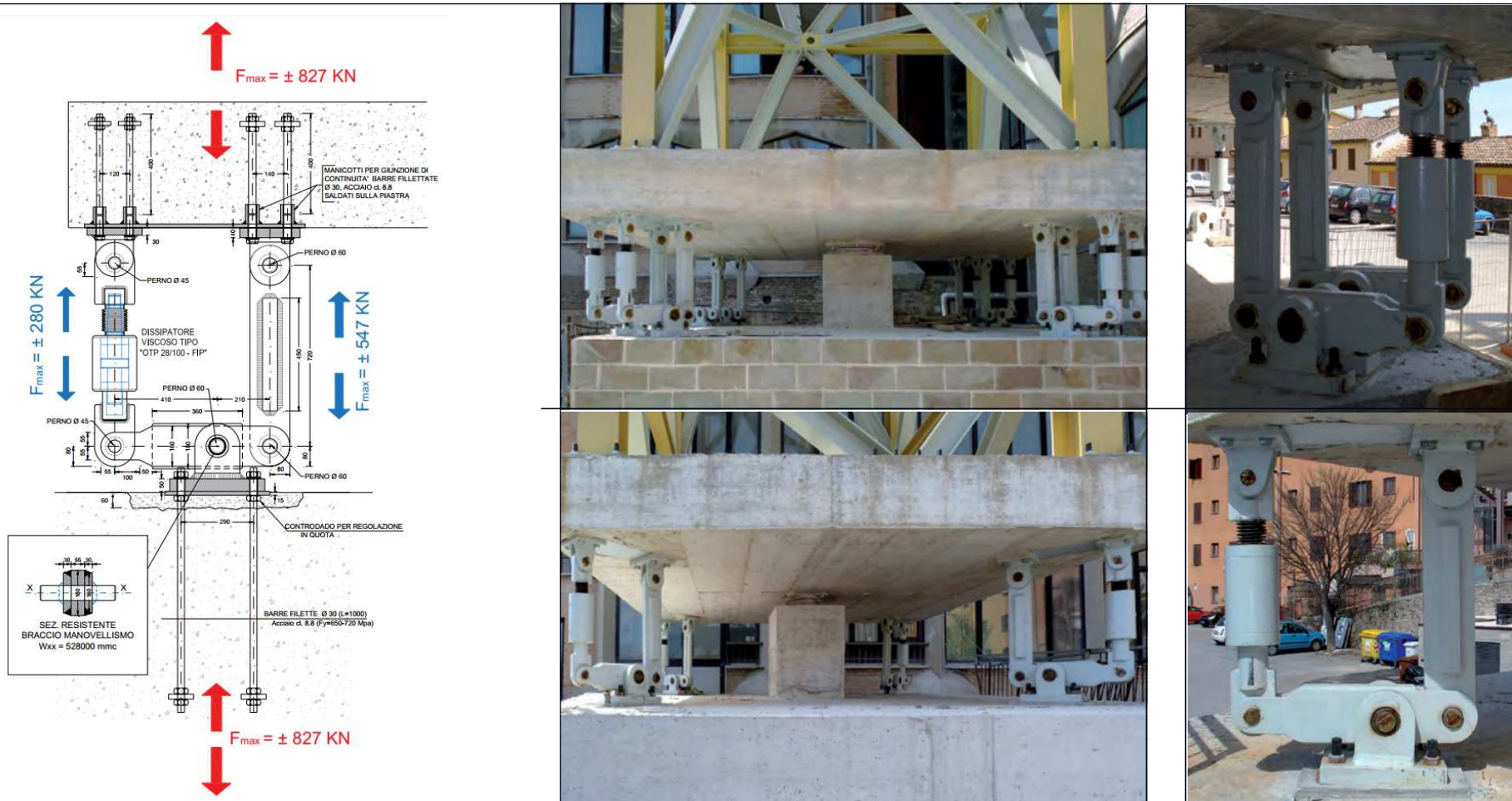
Strutture oscillanti – Liceo Varano di Camerino



Particolari delle torre dissipative B

# Applicazione 2

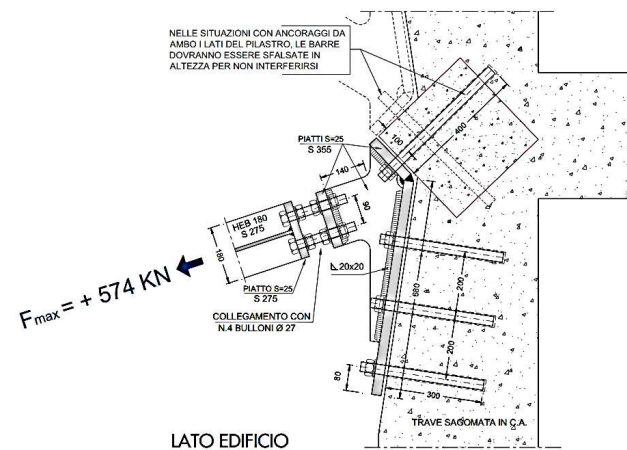
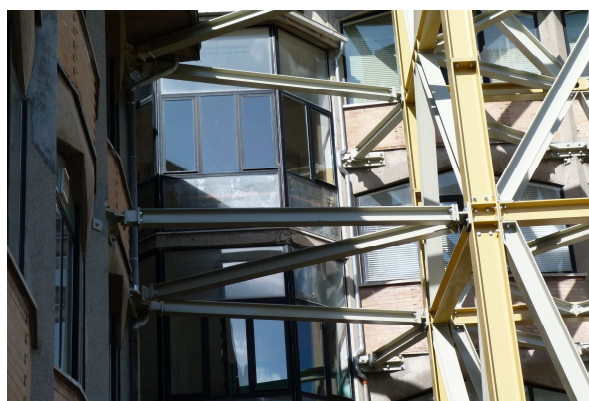
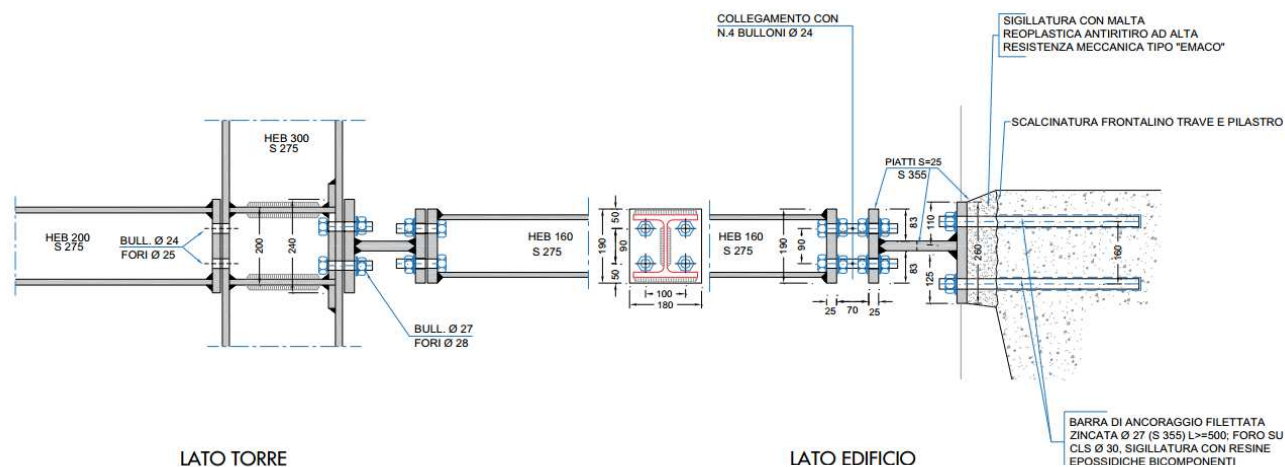
Strutture oscillanti – Liceo Varano di Camerino



Particolari del sistema di dissipazione

# Applicazione 2

## Strutture oscillanti – Liceo Varano di Camerino



Particolari del sistema di aggancio all'impalcato

# Applicazione 3

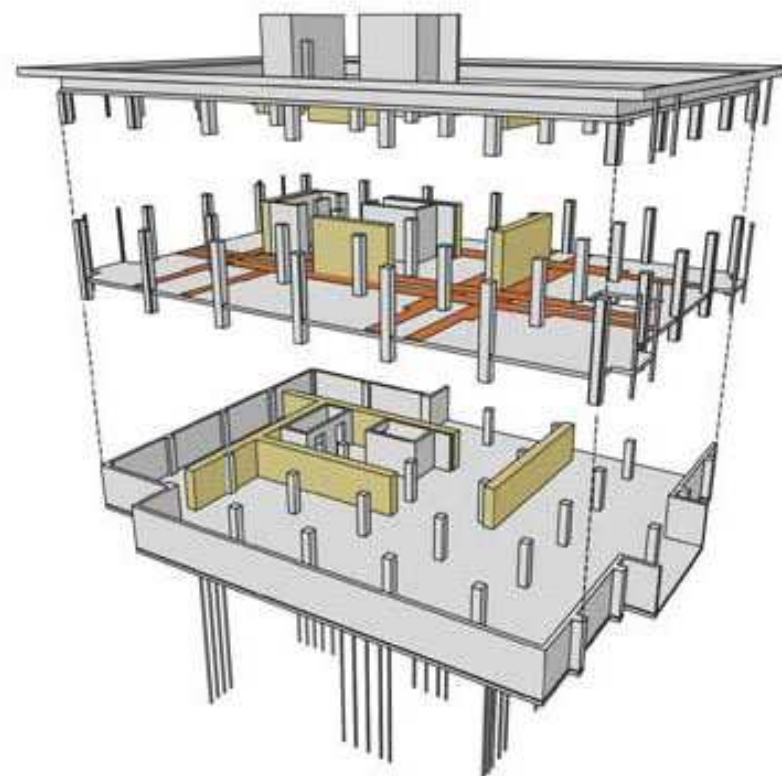
Strutture oscillanti appoggiate a terra (strongback)



Edificio in Berkeley, California

# Applicazione 4

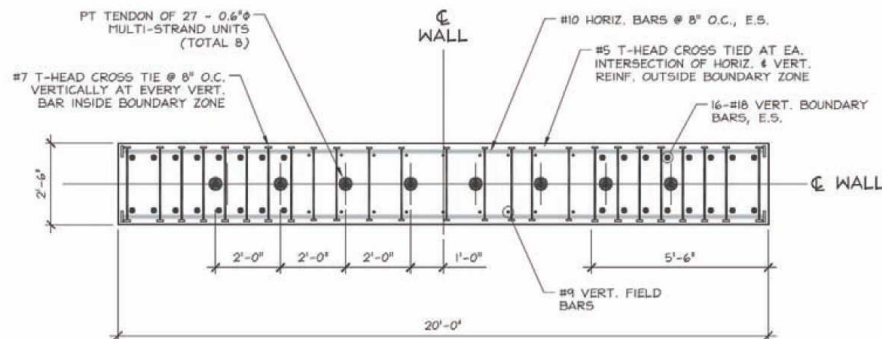
Strutture oscillanti appoggiate a terra



Edificio in 2850 Telegraph Avenue. Berkeley, California

# Applicazione 4

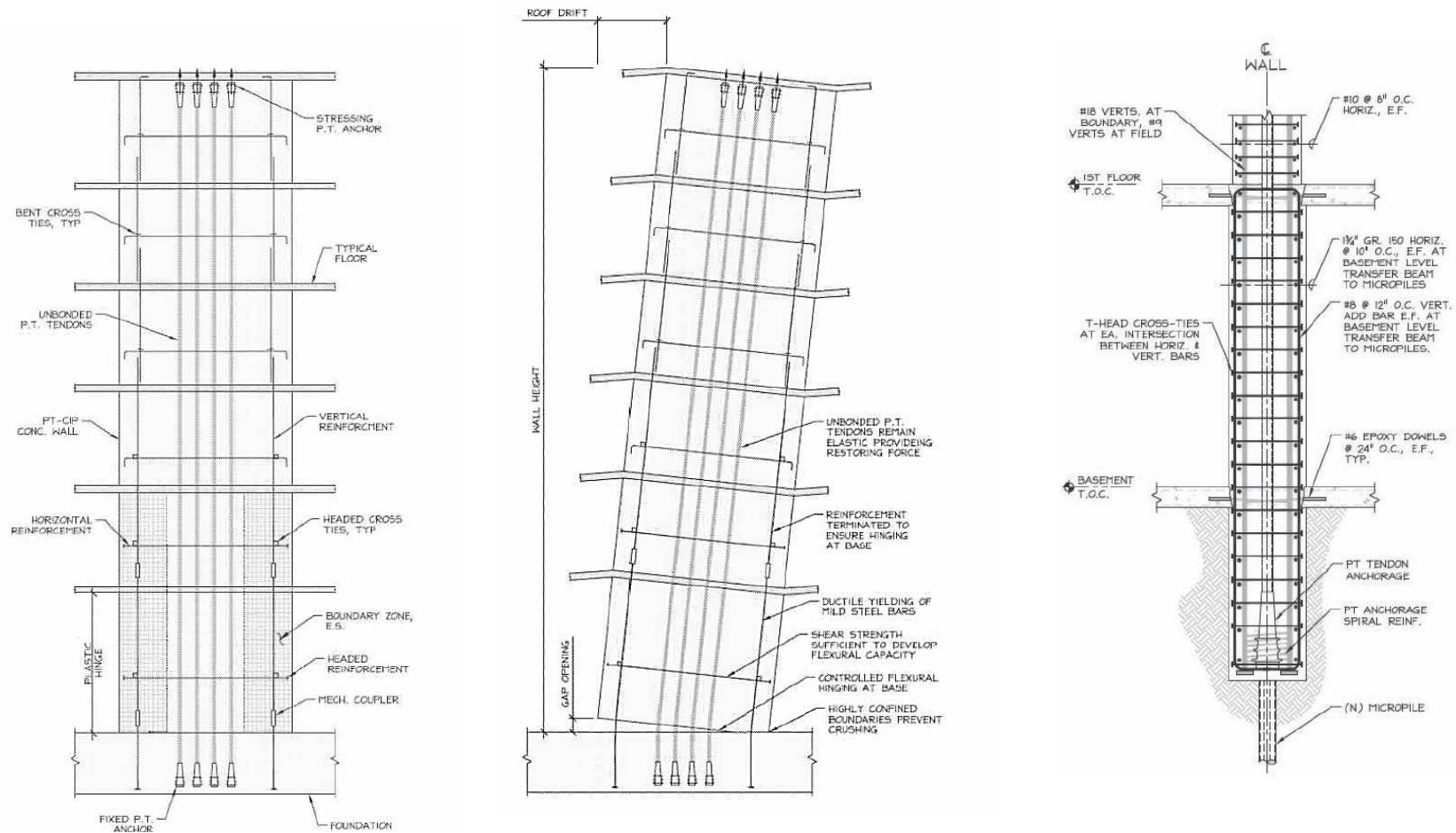
## Strutture oscillanti appoggiate a terra



Edificio in 2850 Telegraph Avenue. Berkeley, California

# Applicazione 4

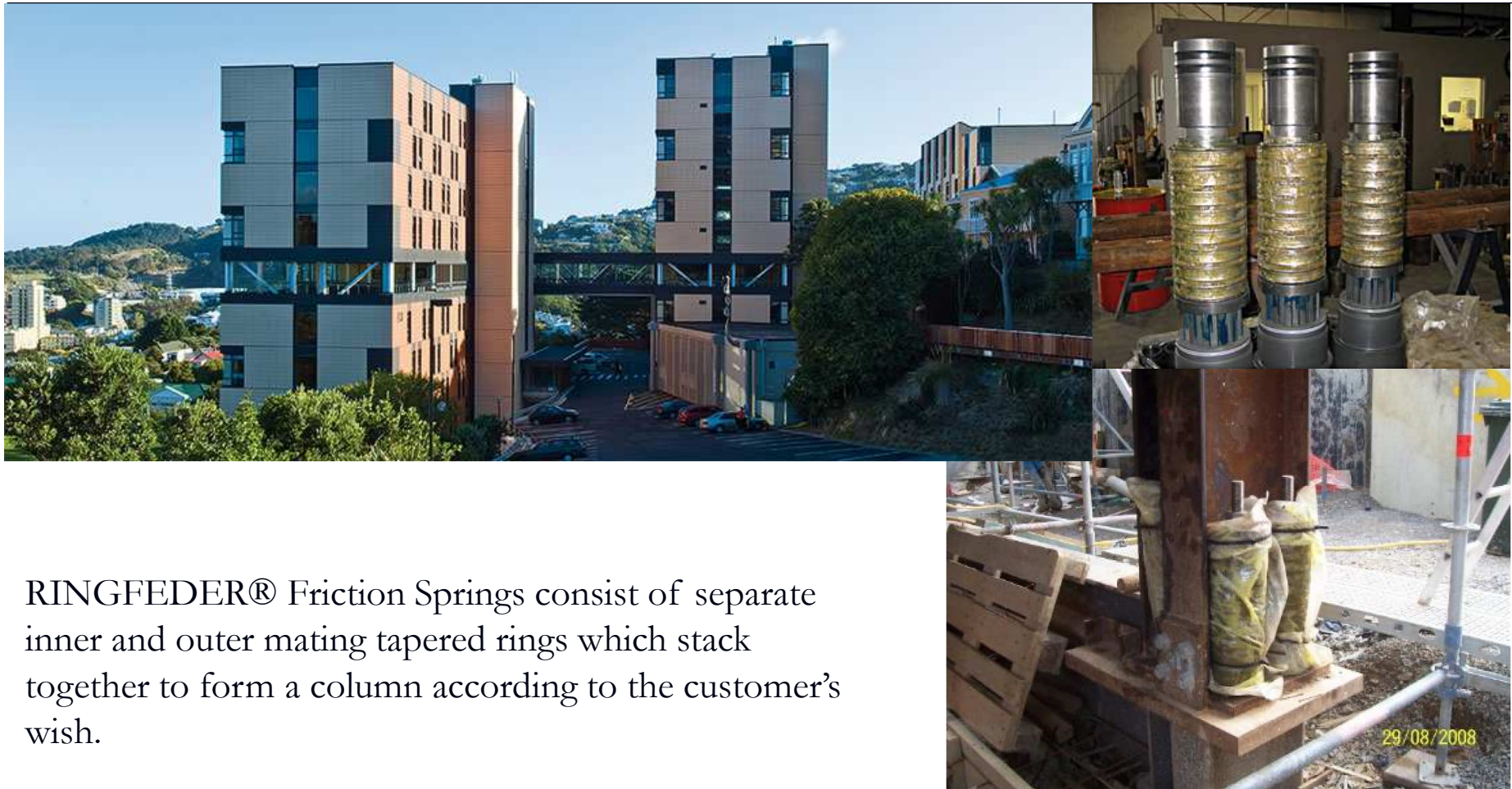
## Strutture oscillanti appoggiate a terra



Edificio in 2850 Telegraph Avenue. Berkeley, California

# Applicazione 5

Strutture oscillanti appoggiate a terra

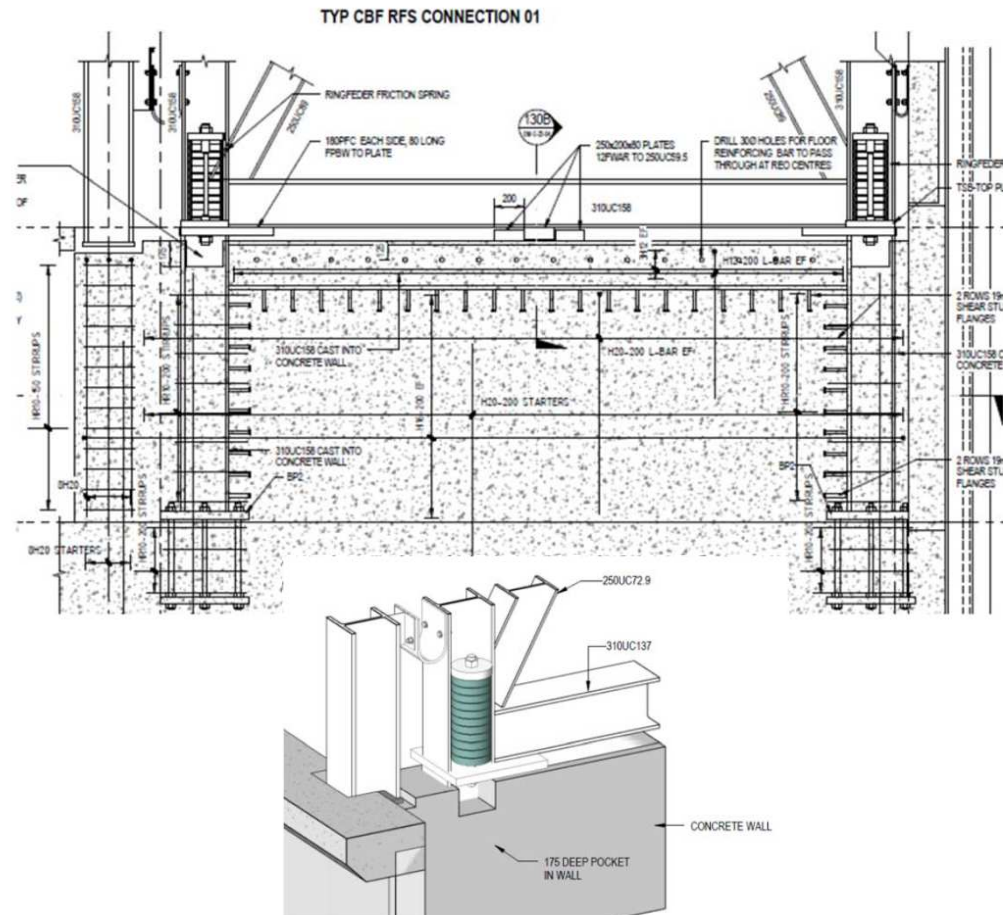
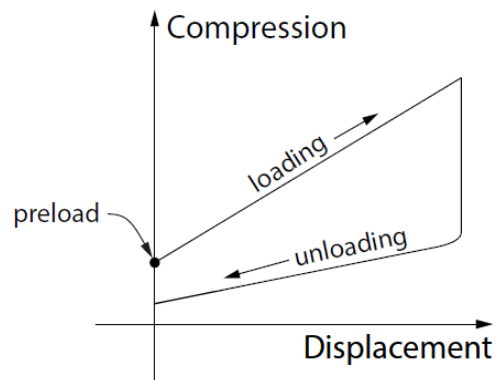
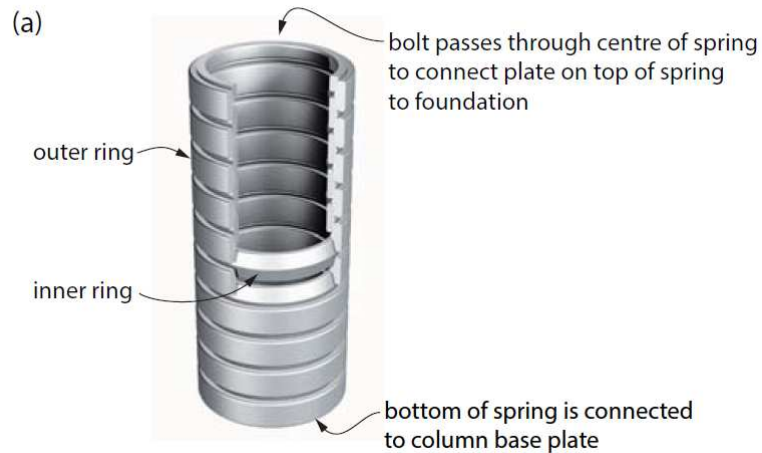
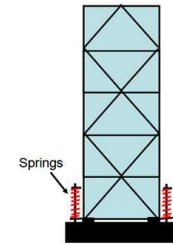


RINGFEDER® Friction Springs consist of separate inner and outer mating tapered rings which stack together to form a column according to the customer's wish.

Te Puni Village Student Accommodation

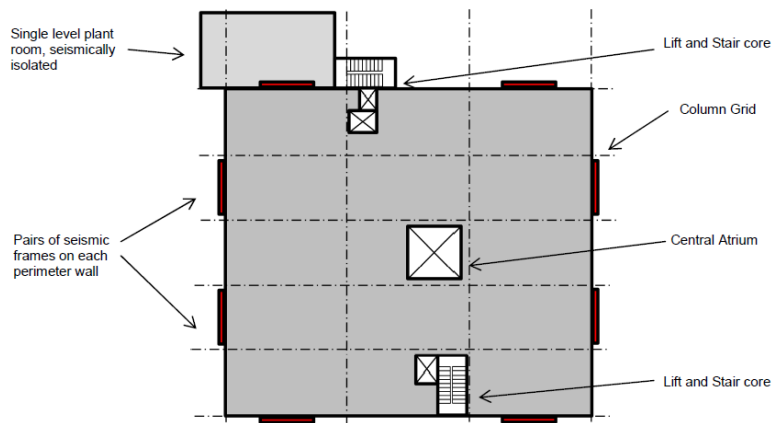
# Applicazione 5

## Strutture oscillanti appoggiate a terra



# Applicazione 6

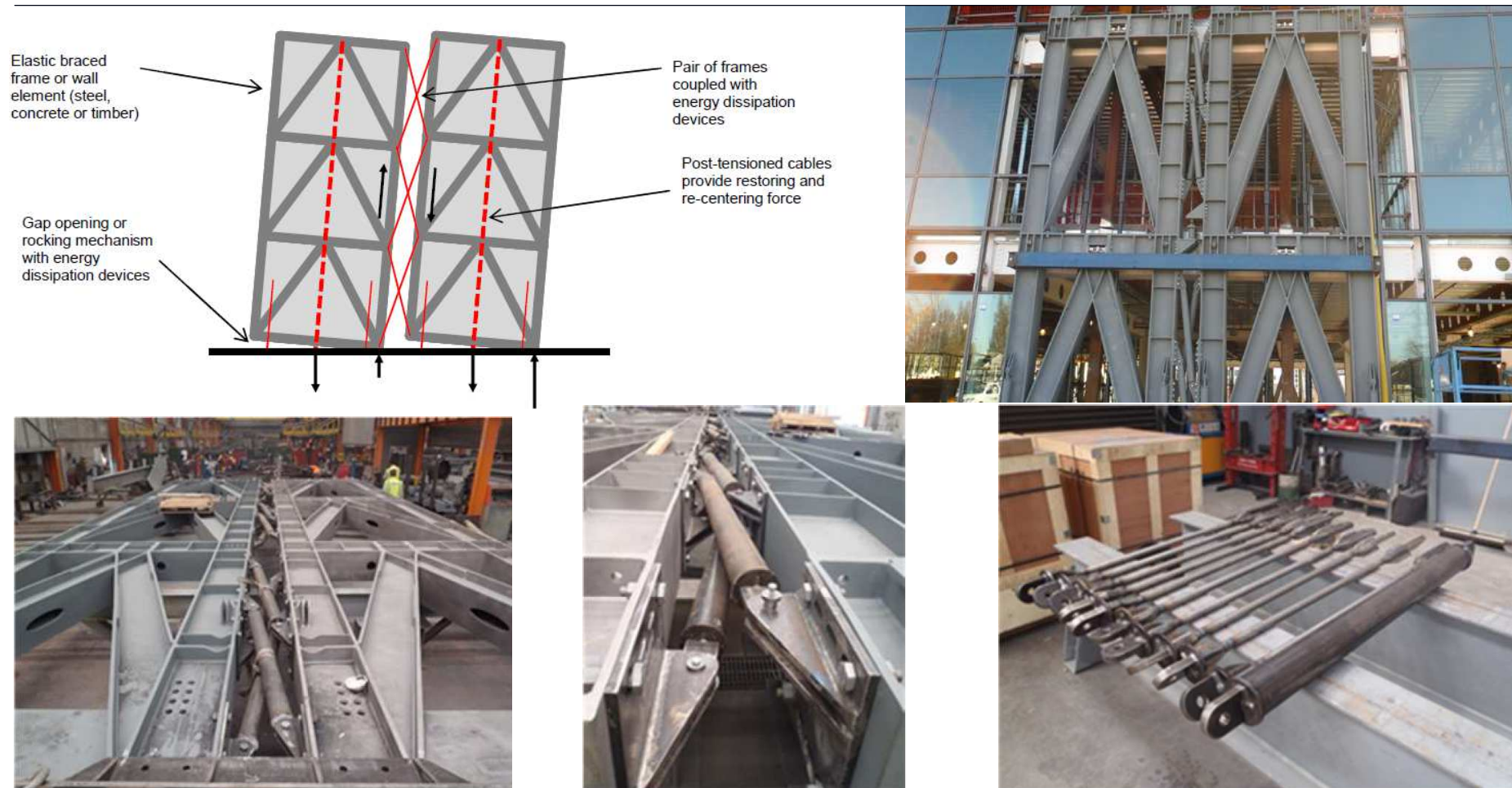
## Strutture oscillanti appoggiate a terra



The Kilmore Street Medical Centre is a new building located in the Christchurch central business district. The building is three stories with over 5000m<sup>2</sup> of specialist medical facilities, including four operating theatres, patient bedrooms and urology, radiology, orthopaedics and fertility clinics. There is over 650m<sup>2</sup> of plant deck on the roof and a further plant room at ground level. Construction commenced in July 2012 and the building is due for completion later in 2013.

# Applicazione 6

## Strutture oscillanti appoggiate a terra



Kilmore Street Medical Centre, Christchurch

**FINE**