

# Protezione sismica degli edifici mediante dissipatori d'energia: la nuova sede della Prefettura de L'Aquila

Enrico Tonon, Manuel Forte, Armando Mammino, Sandro Moro  
*S.I.G.E.S. s.r.l.*

*Keywords: dissipazione, controventi dissipativi, adeguamento sismico, DDBD, L'Aquila.*

## ABSTRACT

Il sisma del 6 Aprile 2009 nell'Abruzzo ha procurato gravi danni a tutta la città di L'Aquila ed alle cittadine limitrofe. La sede della Prefettura, nel centro della città, è stata una delle costruzioni maggiormente danneggiate. Nel presente articolo viene descritta la metodologia adottata per l'adeguamento sismico di un edificio multipiano scelto oggi come nuova sede della Prefettura. Il fabbricato, sito vicino a Piazza del Duomo in Corso Federico II, costruito negli anni '50 del secolo scorso, ha una struttura a telaio in calcestruzzo armato con sei piani fuori terra. Esso viene adeguato sismicamente, secondo le prescrizioni delle NTC 2008, mediante l'inserimento di 144 dissipatori isteretici ad instabilità impedita (BRAD – *Buckling-restrained axial dumpers*) al fine di dissipare l'energia sismica in ingresso. Si descrive il procedimento progettuale seguito, a partire dai predimensionamenti dei dissipatori mediante il metodo DDBD (*Direct displacement based design*), attraverso il criterio della rigidezza proporzionale, fino alle analisi di *Time-History* utilizzate per valutare l'efficacia dell'intervento, seguendo un'originale applicazione dei metodi di verifica previsti dalla normativa. Il progetto è stato approvato ed ora i lavori sono in avanzata fase di esecuzione.

## 1 INTRODUZIONE

La città di L'Aquila è stata profondamente ferita dal sisma del 6 Aprile 2009. Il palazzo della Prefettura ha subito gravi crolli di buona parte della struttura muraria.

Nel 2011, la Prefettura di L'Aquila ha scelto come nuova sede l'edificio sito in Corso Federico II n° 9, ex sede dell'Agenzia delle Entrate.

La normativa italiana prevede che gli edifici ritenuti strategici ai fini della Protezione Civile, sia di nuova costruzione sia esistenti ma con nuova destinazione d'uso, debbano essere in grado di resistere a sismi con tempi di ritorno più elevati rispetto a quanto si dispone per gli edifici non strategici. Per questo motivo la norma colloca tali costruzioni all'interno della classe d'uso IV, rendendone necessario quindi l'adeguamento sismico ai sensi delle NTC 2008.

## 2 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA

L'edificio in oggetto era stato dichiarato inagibile con codice di esito "E", secondo la classificazione della Protezione Civile, per aver subito ingenti danni alle tamponature interne, agli infissi, ai controsoffitti ed agli impianti di distribuzione idrica ed elettrica.

Si tratta di un fabbricato risalente alla fine degli anni '50 del secolo scorso. La pianta presenta forma rettangolare ai piani inferiori, con dimensioni pari a circa 40 m × 28 m, e forma ad H ai piani superiori. Il piano più profondo è completamente interrato, quello meno profondo è parzialmente interrato. In facciata si leggono sei piani fuori terra, con un'altezza massima di circa 26 m dal piano campagna al filo gronda. La struttura portante è costituita da telai in calcestruzzo armato. Le travi hanno sezione a T,

con l'anima intradossata rispetto allo spessore dei solai. I pilastri hanno sezione rettangolare di dimensioni decrescenti con l'altezza dal basso verso l'alto.



Figura 1 - Nuova sede della Prefettura de L'Aquila – Foto Del Monaco

I telai in calcestruzzo sono stati dimensionati anche per sopportare delle modeste forze orizzontali: nelle tavole di progetto, risalenti al 1958, si trova un calcolo del telaio (metodo di cross) in cui viene considerata un'azione sismica presumibilmente conforme al Regio Decreto del 1909. Si tratta di azioni orizzontali che conducono a valori di momento flettente sollecitante ben inferiori rispetto a quelli che si ottengono applicando la normativa antisismica vigente. Gli orizzontamenti sono costituiti da solai in latero-cemento di spessore quasi sempre pari a 16 cm, con luci pari a  $3.3 \div 4.4$  m. Le falde della copertura sono formate da solai inclinati in latero-cemento.

L'edificio è stato fondato in parte sopra una preesistenza che, con ogni probabilità, faceva parte del sistema di strutture ipogee di fondazione dell'edificio adiacente che è oggi sede della Banca d'Italia e che fu costruito un decennio prima. Si tratta di un sistema massiccio, costituito da muri in calcestruzzo molto grossi e da un orizzontamento spesso quasi due metri. La parte di edificio che non poggia su tale preesistenza è fondata su una platea in calcestruzzo non armato spessa 150 cm. Su di essa poggiano dei ristretti plinti in calcestruzzo armato dai quali spiccano i pilastri. Le pareti divisorie interne sono state realizzate mediante elementi in laterizio semipieni.

Il terreno di fondazione è composto da breccie debolmente aggregate e costituite da clasti calcarei e silicei e da sabbia, e da un "coementum" naturale di base limo-argilloso con coesione variabile da punto a punto.

Nella direzione perpendicolare all'"asse lungo" dell'edificio la struttura sismo-resistente è composta solamente da quattro telai concentrati tutti nel corpo centrale: le due "ali" risultano

sprovviste di vere e proprie strutture anti-sismiche in detta direzione. Nella direzione parallela all'"asse lungo" sono presenti numerosi telai concentrati nelle due "ali".

Dopo il sisma del 6 Aprile 2009 la struttura è stata oggetto di due successivi interventi.

Il primo intervento, progettato nel 2010 e realizzato nel 2011, era finalizzato alla riparazione dell'edificio danneggiato dal sisma senza cambiarne la destinazione d'uso (uffici e negozi aperti al pubblico). Questo primo intervento comprendeva le seguenti lavorazioni:

- la ricostruzione o il ripristino delle murature divisorie interne che durante il sisma si erano ribaltate o lesionate;
- il restauro delle strutture in calcestruzzo armato;
- l'inserimento, in alcuni campi del telaio in cemento armato, di strutture di rinforzo in acciaio con funzione di controventamento tradizionale.

La struttura così rinforzata risultava, ai sensi del D.M. 14/01/2008, sismicamente "migliorata" in misura notevole, anche se non "adeguata".



Figura 2 – Telaio di controvento "tradizionale" previsto nel progetto di miglioramento sismico del 2010

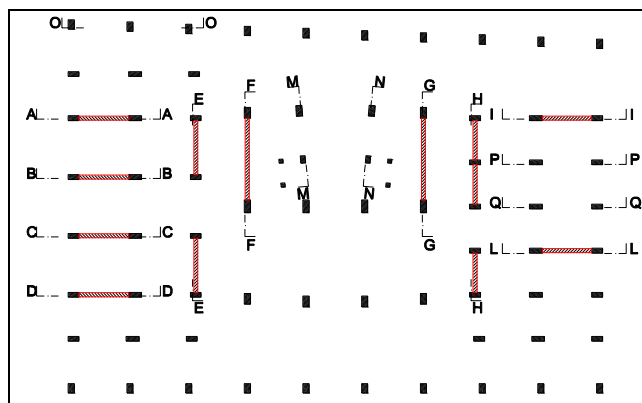


Figura 3 – Pianta dei telai in calcestruzzo con indicati i campi controventati

In seguito alla decisione di realizzare nell'edificio in oggetto la sede della Prefettura, e quindi di cambiarne la destinazione d'uso, si è reso necessario un secondo intervento, oggetto del presente articolo, il cui obiettivo era portare la

struttura all'“adeguamento” sismico. Per raggiungere tale obiettivo si è deciso di inserire nell'edificio dei dispositivi dissipativi sfruttando la presenza dei telai in acciaio inseriti nel primo intervento di “miglioramento” sismico.



Figura 4 – Rottura delle tramezze interne

### 3 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO DI ADEGUAMENTO

L'intervento di adeguamento consiste nel sostituire dei dissipatori isteretici alle diagonali metalliche, in profilo tubolare, dei telai inseriti con l'intervento del 2011. Tali dispositivi sfruttano la plasticizzazione di elementi in acciaio progettati per garantire un comportamento ciclico stabile. I dispositivi impiegati nel caso in oggetto sono i BRAD (*Buckling-Restrained Axial Dampers*, ovvero dei “dissipatori isteretici assiali ad instabilità impedita”) forniti da FIP Industriale.



Figura 5 – Prove di qualifica e di accettazione dei dispositivi Brad

I BRAD, quando sono soggetti a cicli alterni di trazione e compressione, presentano comportamento dissipativo poiché sfruttano l'entrata in campo plastico, per trazione e compressione, di un nucleo interno in acciaio speciale. L'instabilità per compressione delle barre metalliche che si snervano durante i cicli viene impedita dalla presenza di un tubo esterno

coassiale al nucleo interno e riempito di calcestruzzo speciale (cfr. Figura 6).

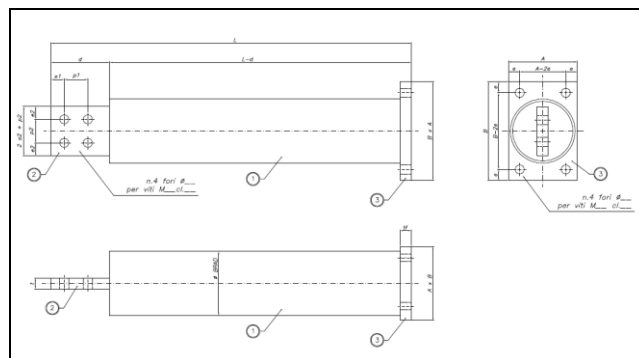


Figura 6 – Schema tipologico del BRAD di FIP Industriale

Questa tipologia di dispositivi è particolarmente adatta ad interventi di miglioramento ed adeguamento di edifici esistenti per i seguenti motivi: si tratta di dispositivi che dissipano energia anche con spostamenti modesti (15 ÷ 20 mm), quindi sono utilizzabili anche su edifici con limitati spostamenti di interpiano; rispetto a dispositivi di tipo viscoso, per spostamenti d'interpiano limitati e per determinate entità di forza, risultano essere più economici. Oltre all'inserimento dei dissipatori nella quasi totalità dei telai metallici, si è reso necessario comunque rinforzare alcuni pilastri mediante l'utilizzo di fibre di carbonio o di placcaggi metallici. Inoltre, nell'intorno dei campi controventati, la struttura è stata rinforzata sia in elevazione sia in fondazione a riscontro di una maggiore concentrazione di forze assiali localizzata nei pilastri.

### 4 CALCOLO DEL SISTEMA DI DISSIPAZIONE

I passaggi fondamentali del calcolo strutturale sono due: la progettazione del sistema di dissipazione; e la successiva verifica della struttura.

La progettazione del sistema dissipativo è stata effettuata mediante un procedimento di predimensionamento in cui è stato adottato il metodo DDBD (*Direct Displacement Based Design*), basato sul controllo degli spostamenti.

I passaggi fondamentali della procedura adottata sono qui di seguito riassunti.

1. Per prima cosa sono state elaborate le curve di capacità della struttura priva di controventi mediante analisi statiche non lineari nelle due direzioni principali dell'edificio, per entrambi i versi e per due distribuzioni di forze previsti dalla normativa. In questo modo si è potuto valutare quale fosse lo spostamento

massimo che la struttura sarebbe stata in grado di sopportare senza subire danni importanti.

2. Sulla base di tali curve si è scelto lo “spostamento obiettivo”, ovvero il massimo spostamento che la struttura era in grado di sopportare.
3. Si è verificato che, allo spostamento-obiettivo fissato, non vi fossero rotture fragili delle sezioni (rotture a taglio) e che le sezioni stesse avessero la sufficiente capacità rotazionale (rotazione plastica delle sezioni di calcestruzzo a flessione ed a presso-flessione).
4. Tramite il metodo DDBD ed il “criterio di rigidezza proporzionale”, sono stati predimensionati i dispositivi dissipativi tali da limitare il massimo spostamento dell’edificio in fase sismica entro lo spostamento obiettivo, e quindi, in virtù della verifica di cui si è detto al punto precedente, entro la capacità di spostamento massima sopportabile dalla struttura senza danno.

Successivamente si è passati alla verifica della struttura e dei dissipatori.

Come si descriverà meglio nel seguito, l’entità dello spostamento obiettivo scelto era comunque tale da far entrare in campo plastico anche il telaio in calcestruzzo esistente. Questo assunto poneva dei problemi di tipo computazionale nella verifica. In particolare sarebbe stato necessario modellare con elementi non lineari non solo i dissipatori ma anche l’intero telaio in calcestruzzo armato, con conseguenti notevoli incrementi dei tempi di calcolo e della difficoltà di elaborazione dei dati.

Per ovviare a questo problema si è deciso di seguire il seguente approccio di verifica:

1. Sono state svolte delle analisi dinamiche non lineari (*Time-History*) con dei modelli in cui la non linearità degli elementi è stata concentrata solamente sui dissipatori isteretici, mentre il resto della struttura è stata modellata come linearmente elastica. In realtà, quando ha raggiunto lo spostamento obiettivo, il telaio in calcestruzzo è già in parte elasticizzato: pertanto, per simulare la rigidezza secante del telaio allo spostamento obiettivo, è stata opportunamente ridotta (da calcolo è risultata una riduzione di circa il 30%) la rigidezza delle sezioni in calcestruzzo armato. In questo modo si è potuto tener

conto della perdita di rigidezza della struttura in calcestruzzo a causa della formazione delle prime cerniere plastiche e, contemporaneamente, modellare solamente i BRAD con elementi finiti di tipo non lineare.

2. Per verificare il telaio in calcestruzzo armato è stato sufficiente verificare che gli spostamenti massimi raggiunti nelle *Time-History* dal telaio non superassero lo spostamento obiettivo prefissato, e che, nel caso del Gruppo 1 di forze, la forma della deformata assunta dal telaio nelle *Time-History* coincidesse con la forma modale dello stesso prima dell’inserimento dei BRAD. Infatti nelle analisi *Push-Over* di verifica era stato applicato, per la distribuzione principale delle forze (Gruppo 1), un profilo di spinta proporzionale alla prima forma modale nella direzione analizzata, ed erano state condotte tutte le verifiche di resistenza e di capacità di rotazione in corrispondenza dello spostamento obiettivo. Quindi, se dopo l’inserimento dei BRAD la forma modale non cambia e lo spostamento massimo si mantiene minore o al più uguale allo spostamento obiettivo, la struttura risulta automaticamente verificata.
3. Per quanto concerne i BRAD, è stato verificato che gli spostamenti massimi allo SLC raggiunti dai dispositivi non superassero mai la capacità di spostamento massima degli stessi.

## 5 PREDIMENSIONAMENTO DEI DISSIPATORI

Per il predimensionamento dei dispositivi antisismici è stato adottato un approccio tipo “metodo agli spostamenti” (*Direct Displacement – Based Design*, DDBD [3]) associato al “criterio di rigidezza proporzionale” [1].

Nel calcolo strutturale “tradizionale” ci si basa usualmente su criteri di progettazione tipo “metodo alle forze”. In un approccio di questo tipo il parametro di partenza è la rigidezza iniziale della struttura. In funzione di quest’ultima e della duttilità stimata (fattore di struttura “*q*”) vengono determinati i valori di progetto in termini di forza, mentre gli spostamenti vengono controllati solo a posteriori.

Nell’approccio agli spostamenti, invece,

l'impostazione di calcolo viene completamente ribaltata. In tali metodi il valore di input è lo spostamento massimo richiesto al sistema. In funzione di questo spostamento vengono progettati la rigidezza e lo smorzamento della struttura tali per cui, per effetto dello spettro sismico della zona in cui si verrà a realizzare l'edificio, sia garantito lo spostamento obiettivo.

Tale approccio si presta molto bene al dimensionamento dei dissipatori nel caso in esame: è infatti possibile stabilire a priori lo spostamento massimo che il telaio in calcestruzzo preesistente è in grado di sopportare, sicché, partendo da questo dato, si può progettare il sistema di controventi dissipativi tale da garantire appunto il non superamento di detto spostamento.

Per il dimensionamento dei dissipatori, all'approccio agli spostamenti si è associato il "criterio della rigidezza proporzionale", con il quale si assume che ad ogni piano della struttura si abbia lo stesso valore del rapporto tra la rigidezza laterale elastica dei controventi dissipativi e la rigidezza del telaio senza controventi. Questo permette di non modificare la "forma modale" principale della struttura a seguito dell'inserimento dei dissipatori: il telaio preesistente ed il sistema di controventi dissipativi lavorano in questo modo come due strutture in parallelo.

Nel seguito si descrive schematicamente, per punti, il metodo di predimensionamento del sistema di controventi dissipativi utilizzato [1]; si indicherà con "F" la struttura in calcestruzzo preesistente e priva di controventi dissipativi, con "D" i dissipatori, e con "B" il tratto di controvento privo di caratteristiche smorzanti e necessario per collegare l'elemento dissipativo alla struttura generale.

#### 1. Analisi statica non lineare della struttura priva di controventi

Si conduce un'analisi statica non lineare (*Push-Over*) della struttura priva di controventi considerando i carichi verticali propri della combinazione sismica ed adottando un profilo di spinta orizzontale proporzionale alla prima forma modale ( $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_n$ ) per le corrispondenti masse di piano ( $m_1, m_2, \dots, m_n$ ). Si ottiene così la curva "{taglio alla base ( $V^F$ )} ↔ {spostamento in sommità ( $d$ )}" della struttura senza controventi.

#### 2. Scelta dello spostamento obiettivo

Si sceglie il valore massimo accettabile dello spostamento in sommità dell'edificio ( $d_p$ ). La scelta può essere fatta secondo differenti criteri: può essere assunto uno spostamento massimo in sommità pari allo 0.3% dell'altezza dell'edificio

[2]; oppure è possibile fissare un massimo spostamento di interpiano tale da non provocare eccessivi danneggiamenti alle parti non strutturali. La scelta è ovviamente anche condizionata dallo stato limite e dalla destinazione d'uso dell'edificio. Nel caso in esame, per mantenere la struttura perfettamente elastica allo SLV, sarebbe necessario imporre che lo spostamento massimo in fase sismica risulti inferiore a circa 3 cm. Come si può notare dalla curva di capacità riportata nella Figura 7 infatti, circa a 3 cm si assiste alla perdita di perfetta rettilineità della curva stessa, il che indica che si stanno formando le prime cerniere plastiche nel telaio in calcestruzzo. Uno spostamento così ridotto per un edificio alto circa 26 metri implicherebbe la disposizione di un sistema di controventi estremamente rigido. Tale scelta risulta quindi eccessivamente limitativa.

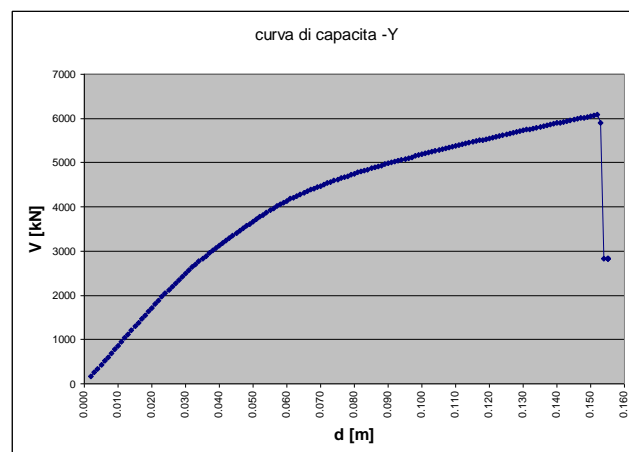


Figura 7 – Curva di capacità della struttura esistente in direzione -Y

Un secondo approccio per stabilire lo spostamento obiettivo può essere il controllo del danneggiamento delle parti non strutturali dell'opera. Per tamponamenti collegati rigidamente alla struttura, che interferiscono con la deformabilità di questa stessa, secondo le NTC 2008 il "drift di piano" dovrebbe risultare inferiore a 0.5%.

Considerando la prima forma modale della struttura, ed imponendo il suddetto limite all'interpiano maggiormente deformabile, si ottiene uno spostamento obiettivo, corrispondente allo spostamento massimo dell'ultimo solaio, pari a 8.5 cm.

Se si considera quale spostamento massimo lo 0.3% dell'altezza dell'edificio, si ottiene:

$$d_p = 0.003 \cdot 26 = 0.078 \text{ m} = 7.8 \text{ cm} \quad (1)$$

Se si osserva infine, in analisi statica non lineare, il progredire delle cerniere plastiche nel modello all'aumentare dello spostamento del punto obiettivo (posto sul baricentro dell'ultimo

solaio), eseguendo nel contempo le verifiche di capacità rotazionale delle cerniere nonché le verifiche degli elementi fragili, si evince che in entrambe le direzioni la struttura può essere spinta sino ad uno spostamento pari a circa 8 cm, valore scelto pertanto come spostamento obiettivo.

### 3. Bilinearizzazione della curva di capacità

La struttura viene schematizzata attraverso un sistema ad un grado di libertà (SDOF) caratterizzato da una curva bilineare ( $V^* - d^*$ ) derivata dall'analoga schematizzazione della curva  $V(F) - d$  (si veda la Figura 8). Poiché è stato fissato lo spostamento obiettivo  $d_p$ , è possibile ricavare tutte le caratteristiche della curva bilinearizzata della struttura e del corrispondente sistema SDOF. In particolare la curva è caratterizzata dalla rigidità elastica iniziale ( $K_i^{(F)} = V_y^{(F)}/d_y^{(F)}$ ), dal rapporto di incrudimento ( $r_F$ ) e dalla duttilità ( $\mu_F = d_p/d_y^{(F)}$ ).

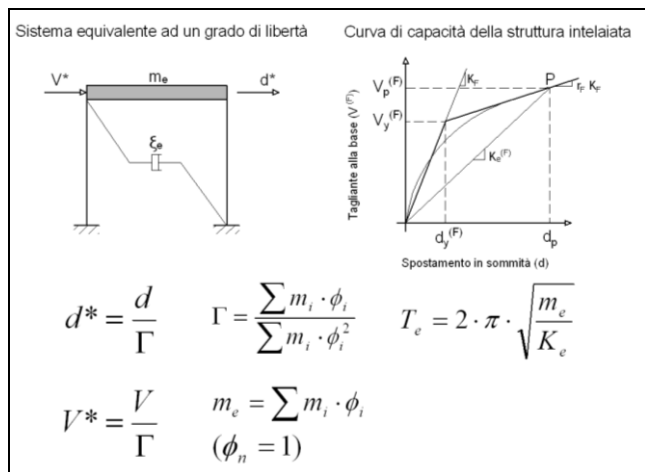


Figura 8 – Bilinearizzazione della curva di capacità

### 4. Calcolo dello smorzamento viscoso equivalente della struttura senza controventi

La risposta della struttura è caratterizzata dalla rigidità secante associata allo spostamento massimo ( $K_e^{(F)} = V_p^{(F)}/d_p$ ), e dallo smorzamento viscoso equivalente associato alla dissipazione isteretica per effetto della plasticizzazione della struttura. Lo smorzamento viscoso equivalente può essere calcolato con la formula:

$$\xi_F^{(h)} (\%) = \kappa \cdot \left( 63.7 \cdot \frac{(\mu_F - 1) \cdot (1 - r_F)}{\mu_F \cdot [1 + r_F \cdot (\mu_F - 1)]} \right) \quad (2)$$

Il parametro  $\kappa$  è un coefficiente riduttivo e dipende dalla tipologia della struttura in esame. Dalle ATC-40 [4] si ricava che, per strutture che manifestano un comportamento con forte degrado delle caratteristiche meccaniche per effetto dell'azione sismica, si può assumere un valore pari a 0.33.

### 5. Calcolo della curva di capacità del sistema SDOF equivalente ai controventi dissipativi

La legge costitutiva del sistema di controventi dissipativi viene schematizzata mediante una curva bilineare rappresentativa di un sistema SDOF sul piano  $V^* - d^*$ , dove  $V^* = V/\Gamma$  e  $d^* = d/\Gamma$ , con:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \cdot \phi_i}{\sum m_i \cdot \phi_i^2} \quad (3)$$

Tale curva è rappresentativa del sistema costituito dai dissipatori e dai tratti di controvento non dissipativi: per tale ragione le grandezze che la caratterizzano riportano l'indice (DB). In particolare la bilineare sarà caratterizzata dalla rigidità elastica iniziale  $\{K_i^{(DB)*} = V_y^{(DB)*}/d_y^{(DB)*}\}$ , dal rapporto di incrudimento  $\{r_{DB}\}$  e dalla duttilità  $\{\mu_{DB} = d_p^*/d_y^{(DB)*}\}$ .

Il corrispondente comportamento viscoso è calcolabile come:

$$\xi_{DB}^{(h)} (\%) = \left( 63.7 \cdot \frac{(\mu_{DB} - 1) \cdot (1 - r_{DB})}{\mu_{DB} \cdot [1 + r_{DB} \cdot (\mu_{DB} - 1)]} \right) \quad (4)$$

La determinazione dell'andamento della curva bilineare del sistema SDOF, equivalente al sistema di controventi, viene svolta iterativamente: si modifica la rigidità, e conseguentemente lo smorzamento viscoso equivalente, del sistema F+DB, sino a far collimare lo spostamento atteso in sommità di quest'ultimo e lo spostamento obiettivo.

### 6. Calcolo dello smorzamento viscoso equivalente del sistema F+DB

Il sistema che cumula unitariamente la struttura ed il complesso dei controventi presenta uno smorzamento totale pari alla media pesata, sui tagli assorbiti in corrispondenza dello spostamento di progetto, tra gli smorzamenti viscosi equivalenti della sola struttura preesistente (F) e dell'apparato dissipativo (DB). A questo va aggiunto il valore dello smorzamento viscoso in campo elastico della struttura  $\xi_V$ , pari al 5% minimo come previsto dal D.M. 2008. È stato trascurato, in questa fase di predimensionamento, il modesto smorzamento dovuto alla plasticizzazione del telaio esistente.

Lo smorzamento viscoso equivalente complessivo quindi può essere calcolato mediante la seguente formula:

$$\xi_e (\%) = \xi_V + \frac{\xi_{DB} \cdot V_p^{(DB)} + \xi_F^{(h)} \cdot V_p^{(F)}}{V_p^{(DB)} + V_p^{(F)}} \quad (5)$$

### 7. Calcolo del periodo efficace del sistema

## F+DB

Noto lo smorzamento viscoso equivalente, è possibile abbattere lo spettro di risposta caratteristico del sito in cui si opera. Entrando nello spettro di risposta, espresso in termini di spostamento, con lo spostamento obiettivo ( $d_p$ ), si ricava il periodo equivalente ( $T_e$ ) dello SDOF che rappresenta il sistema F+DB.

8. Calcolo della rigidità efficace del controvento dissipativo equivalente e verifica dei dati di partenza

Noto il periodo equivalente ( $T_e$ ) del sistema F+DB, si calcola la rigidità secante come:

$$K_e^* = K_e = (m_e \cdot 4 \cdot \pi^2) / T_e^2 \quad (6)$$

La rigidità efficace (o secante) richiesta al sistema dei controventi dissipativi vale:

$$K_e^{(DB)} = K_e - K_e^{(F)} \quad (7)$$

Se la rigidità qui calcolata è uguale alla rigidità secante introdotta al punto 5, allora si conclude che le ipotesi di partenza, circa le caratteristiche dei controventi dissipativi, erano corrette. In caso contrario, è necessario reiterare il calcolo dal punto 5, e considerare la nuova rigidità secante qui calcolata.

9. Calcolo delle proprietà del sistema reale di controventi dissipativi

Si trasforma la curva bilineare di capacità, tracciata sul piano  $V^* - d^*$ , del controvento dissipativo equivalente nella curva di capacità richiesta ai controventi reali nel piano  $V^{(F)} - d$ . In particolare il contributo tagliante richiesto alla base ai controventi, in corrispondenza dello spostamento obiettivo, vale:

$$V_p^{(DB)} = K_e^{(DB)} \cdot d_p \quad (8)$$

Il taglio che risulta quando si verifica lo snervamento del sistema di controventi vale invece:

$$V_y^{(DB)} = \frac{V_p^{(DB)}}{1 + r_{DB} \cdot (\mu_{DB} - 1)} \quad (9)$$

Di seguito si riportano le caratteristiche del sistema DB e F+DB progettato alla fine del procedimento iterativo:

$K_{e,x}^{(DB)*} = K_{e,x}^{(DB)} = 69650$  kN/m (SDOF - X);  
 $K_{e,y}^{(DB)*} = K_{e,y}^{(DB)} = 65900$  kN/m (SDOF - Y);  
 $V_{p,x}^{(DB)*} = 4098.04$  kN (taglio associato allo spostamento del controvento SDOF - X);  
 $V_{p,y}^{(DB)*} = 3954.44$  kN (taglio associato allo spostamento del controvento SDOF - Y);  
 $r_{DB} = 0.01$  (rapporto di incrudimento del controvento SDOF equivalente);

$\mu_{DB} = d_p^* / d_y^{(DB)*} = 3.10$  (duttilità del controvento equivalente).

Lo smorzamento del solo sistema di controventi risulta pari al 41.84%. Lo smorzamento viscoso equivalente complessivo del sistema F+DB, se si assume  $\xi_v$  pari al 5%, vale quindi:

$$\xi_{e,x}(\%) = \xi_v + \frac{\xi_{DB,x} \cdot V_{p,x}^{(DB)} + \xi_{F,x}^{(h)} \cdot V_{p,x}^{(F)}}{V_{p,x}^{(DB)} + V_{p,x}^{(F)}} \cong 25\% \quad (10)$$

$$\xi_{e,y}(\%) = \xi_v + \frac{\xi_{DB,y} \cdot V_{p,y}^{(DB)} + \xi_{F,y}^{(h)} \cdot V_{p,y}^{(F)}}{V_{p,y}^{(DB)} + V_{p,y}^{(F)}} \cong 27\% \quad (11)$$

10. Dimensionamento dei controventi ad ogni piano della struttura

Sulla base del “criterio della rigidità proporzionale” si può assumere che un generico modo di vibrare del telaio senza controventi rimanga praticamente invariato dopo l’inserimento dei controventi, pertanto le caratteristiche dei controventi dissipativi ad ogni piano possono essere determinate secondo lo schema riportato nella Figura 9.

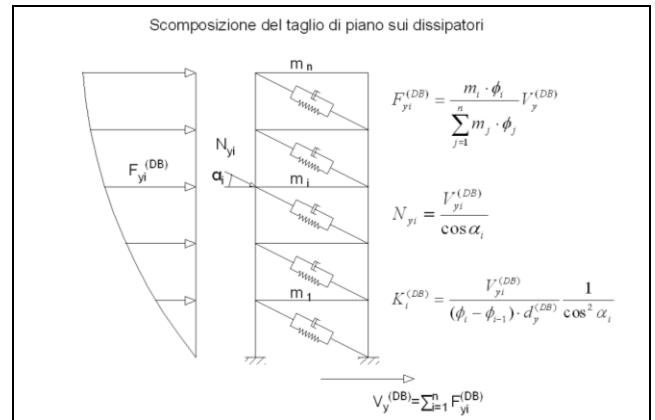


Figura 9 – Dimensionamento dei controventi ad ogni piano della struttura

Nei casi reali è raro che sia presente un solo dispositivo per piano. Pertanto le caratteristiche determinate secondo la Figura 9 rappresentano la somma, su ciascun piano, delle caratteristiche dei singoli dispositivi inseriti in quel piano. È necessario quindi suddividere la rigidità complessiva ed il taglio complessivo sui singoli controventi. Se i controventi sono disposti in maniera simmetrica e presentano tutti la stessa inclinazione, è possibile banalmente dividere le suddette caratteristiche per il numero “n” di dispositivi inseriti: si avranno pertanto “n” dispositivi di caratteristiche identiche ad ogni piano. Se, più genericamente, i dispositivi presentano inclinazioni diverse e posizioni planimetriche non simmetriche, è necessario suddividere la rigidità ed il taglio in maniera disuniforme tra i vari controventi al fine di

assegnare ad ogni dispositivo la quota del taglio di piano proporzionale all'area di influenza che gli compete. Questo passaggio ha l'obiettivo di non modificare la forma dei modi propri di vibrare della struttura, in accordo con il "criterio della rigidità proporzionale".

Infine, va ricordato che le caratteristiche determinate per ciascun dispositivo si riferiscono all'insieme "dispositivo più controvento non dissipativo" (D+B). Per ottenere le caratteristiche del solo dispositivo è necessario scorporare dagli spostamenti caratteristici del sistema D+B le "perdite" dovute alle deformazioni elastiche del tratto di controvento non dissipativo.

## 6 VERIFICA DELLA STRUTTURA CON DISSIPATORI

Come accennato in precedenza, le verifiche sono state svolte mediante analisi non lineari sia statiche che dinamiche. Le analisi statiche non lineari sono necessarie per ricavare le curve di capacità della struttura originaria in calcestruzzo. Sulla base delle curve di capacità è stato anche fissato uno spostamento-target, ovvero uno spostamento al quale la struttura risulta ancora pienamente verificata. Le verifiche della struttura associate allo spostamento-target vengono svolte secondo quanto previsto in normativa: si controlla per gli elementi duttili (travi e pilastri inflessi con e senza sforzo normale) la capacità deformativa, e per gli elementi fragili (meccanismi di taglio in travi, pilastri e nodi non interamente confinati) la resistenza a taglio.

Le verifiche non lineari dinamiche (*Time-History*) sono invece necessarie per valutare l'efficacia dei dissipatori sulla struttura esistente; da tali analisi infatti emerge il risultato ottenuto nel predimensionamento, ovvero che la struttura controventata, grazie alla dissipazione d'energia ed all'introduzione di nuova rigidità, non raggiunge spostamenti massimi superiori allo spostamento-target fissato e mantiene la stessa forma modale che aveva prima dell'inserimento dei dissipatori. Di conseguenza le verifiche di resistenza risultano soddisfatte da quanto determinato con l'analisi statica non lineare descritta in precedenza. Inoltre le analisi *Time-History* sono necessarie per la verifica allo SLC dei dissipatori. Si verifica infatti il massimo spostamento in campo plastico che questi ultimi raggiungono allo SLC, come previsto da normativa.

I dispositivi scelti sono quelli aventi caratteristiche le più prossime possibile a quelle risultanti dal calcolo di predimensionamento. Si

tratta di dispositivi con allungamento a snervamento pari a circa 1.5 mm e limite di deformazione massimo allo SLC pari a 15 mm.

Le analisi dinamiche non lineari dell'edificio sono state svolte tramite il modello tridimensionale già adottato per le analisi statiche non lineari necessarie per valutare le curve di capacità del telaio esistente in calcestruzzo armato. L'analisi sismica è stata eseguita mediante un'analisi dinamica non lineare parziale, poiché le non linearità sono state concentrate nei soli controventi dissipativi. Il modello suddetto, in cui tutte le travi ed i pilastri vengono simulati mediante elementi *beam* lineari, è stato completato mediante l'inserimento dei dissipatori isteretici (BRAD) che sono stati simulati con appositi elementi elasto-plastici non lineari.

Lo smorzamento introdotto per generare la matrice C dell'equazione dinamica del moto è posto pari a 9%; il 5% è lo smorzamento minimo previsto dalla normativa e dovuto alle proprietà intrinseche dei materiali; a questo termine viene aggiunto cautelativamente un 4% che è lo smorzamento prodotto dalla plasticizzazione del telaio in calcestruzzo corrispondente allo spostamento obiettivo. Lo smorzamento viscoso equivalente della struttura esistente  $S$ , corrispondente ad un generico spostamento  $D$ , è stato ricavato dalla curva di capacità secondo la formula di seguito riportata (Chopra, A.K.,2001):

$$v_{eq,S} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{E_{D,S}}{E_{S,S}} \quad (12)$$

in cui si è posto:

$E_{D,S}$  = energia dissipata in un singolo ciclo di ampiezza  $D$ ;

$E_{S,S}$  = energia di deformazione del sistema relativa a  $D$ .

Alla struttura sono state applicate diverse *Time-History*; ogni analisi presenta un accelerogramma diverso per ciascuna delle direzioni orizzontali principali. Sono stati utilizzati 3 gruppi di accelerogrammi spettrocompatibili, e per le verifiche sono stati considerati i risultati più sfavorevoli.

Come si può notare dalla Figura 11, l'inserimento dei dissipatori, e quindi l'inserimento sia di rigidità sia di dissipazione nel modello, ha limitato gli spostamenti del punto di controllo dell'edificio (nodo 607) entro lo spostamento obiettivo di 8 cm. I massimi spostamenti risultano infatti: 1) spostamento in direzione  $X = 7.9 \text{ cm} < 8 \text{ cm}$  (cfr. Figura 11); 2) spostamento in direzione  $Y = 7.4 \text{ cm} < 8 \text{ cm}$ .

La deformata della struttura corrispondente



allo spostamento massimo è pressoché quella modale utilizzata nel predimensionamento dell'opera. In Figura 12 si riporta un confronto fra: gli spostamenti di piano definiti in corrispondenza dello spostamento obiettivo al piano di controllo (l'ultimo), ottenuti da una proporzione con la forma del primo modo di vibrare nella direzione studiata (X); e gli spostamenti ottenuti dall'analisi *time-history*.

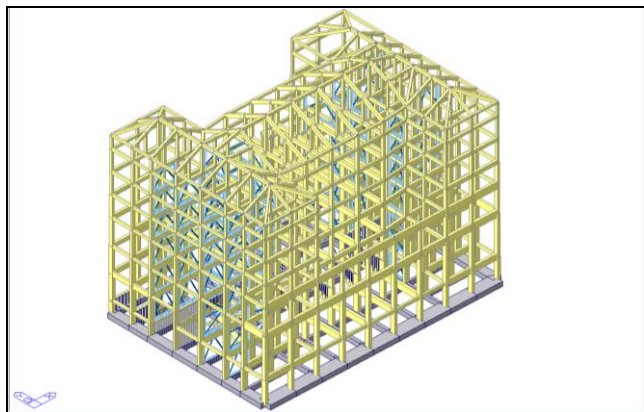


Figura 10 – Modello di calcolo 3D

Come si può notare, le due curve sono pressoché coincidenti, e questo garantisce la validità delle verifiche effettuate sulla struttura esistente e sviluppate mediante l'analisi non lineare statica. Il suddetto confronto per la direzione Y ha fornito risultati analoghi a quelli ottenuti per la direzione X. Ciò conferma la correttezza del predimensionamento dei dissipatori mediante il metodo DDBD.

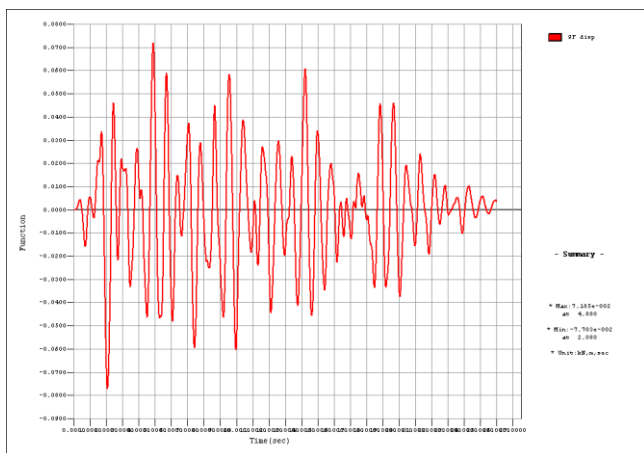


Figura 11 – Spostamento in direzione X del 5° piano

Poiché le forme modali della struttura non sono state modificate, grazie all'inserimento dei dissipatori gli spostamenti massimi raggiunti nelle *Time-History* sono inferiori allo spostamento obiettivo; inoltre, poiché in corrispondenza dello spostamento obiettivo le verifiche condotte mediante l'analisi statica non lineare erano soddisfatte, si conclude che la struttura può considerarsi verificata per la classe sismica richiesta.

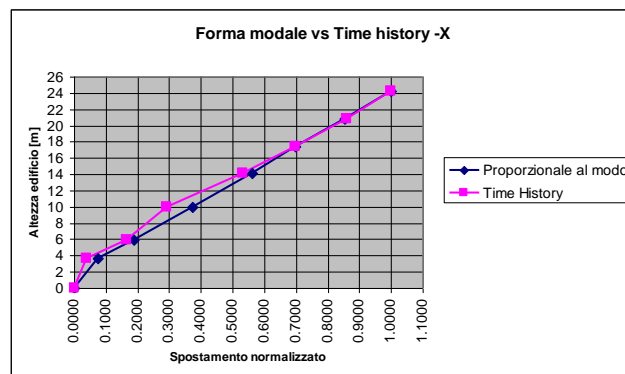


Figura 12 – Confronto degli spostamenti di piano con lo spostamento obiettivo lungo X

Relativamente alla verifica dei dispositivi, sono stati analizzati i risultati per i seguenti stati limite: SLC, SLD, SLO. Il controvento dissipativo presenta un legame costitutivo del tipo elasto-plastico leggermente incrudente come riportato in Figura 13. Allo SLC si è verificato che la forza massima agente sul dispositivo non ecceda la forza limite  $F_2$ , ovvero la forza massima media corrispondente allo spostamento limite  $d_2$ . In Figura 14 si riporta una sezione del modello tridimensionale adottato nelle analisi, tagliata in corrispondenza di uno dei telai controventati (setto G).

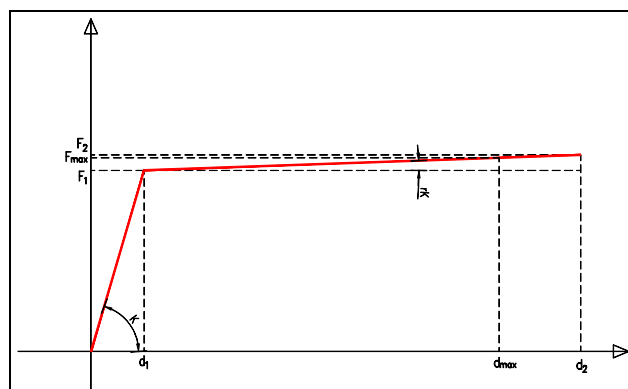


Figura 13 – Legame costitutivo del controvento dissipativo

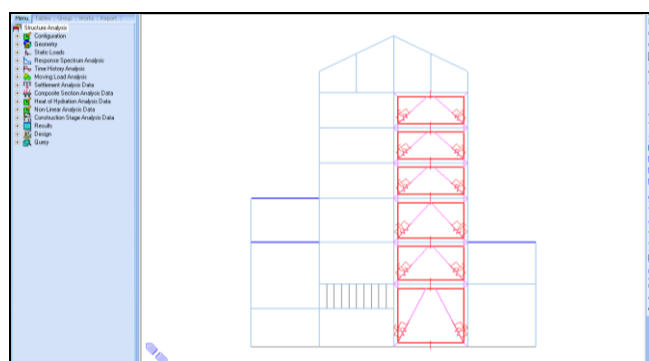


Figura 14 – Sezione setto G

In Figura 15 si riporta il ciclo isteretico compiuto da uno dei dispositivi modellati durante l'analisi dinamica allo SLC.

Per quanto riguarda lo stato limite di danno (SLD), si è osservato che la maggior parte dei dissipatori rimane in campo elastico, e l'ingresso

in campo plastico dei rimanenti dissipatori resta molto contenuto (qualche millimetro).

Per monitorare la struttura, infine, su ciascun dispositivo è previsto il montaggio di uno strumento comparatore in grado di registrare, con precisione di un decimo di millimetro, lo spostamento relativo massimo subito dal BRAD in caso di evento sismico.

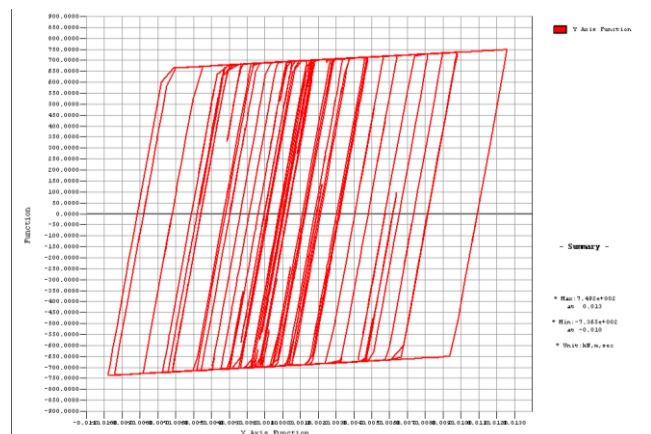


Figura 15 – Ciclo d'isteresi del BRAD 66 per TH3 – SLV

## 7 CONCLUSIONI

Nei paragrafi precedenti è stato presentato il lavoro di adeguamento sismico di un edificio esistente destinato ad ospitare la nuova sede della Prefettura de L'Aquila.



Figura 16 – Telaio con dissipatori

È stato descritto un particolare approccio alla verifica delle strutture esistenti, che sfrutta i risultati ottenuti mediante analisi statiche non lineari limitando l'onere computazionale delle analisi dinamiche non lineari. Infine sono stati descritti i passaggi che conducono al dimensionamento dei dispositivi dissipatori tramite il metodo *Direct Displacement – Based Design*, (DDBD) associato al “criterio di rigidità proporzionale”.



Figura 17 – Telaio con dissipatori

Il progetto ad oggi è in fase di realizzazione avanzata. In Figura 16 ed in Figura 17 sono visibili i dispositivi montati. La chiusura dei lavori è prevista per la metà del 2013.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- [1] Mezzina, M., Raffaele, D., Uva, G., Marano, G.C., 2011. *Progettazione sismo-resistente di edifici in cemento armato*, Città Studi edizioni.
- [2] Bergami, A.V., Nuti, C., 2009. Discussione, applicazione e validazione di una procedura progettuale per la protezione sismica di telai tamponati mediante controventi dissipativi, IF CRASC '09, *I Convegno di ingegneria forense*. Napoli.
- [3] Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J., 2007 *Displacement – Based Siesmic Design of Structures*, IUSS Press.
- [4] Applied Technology Council, 2006. *Siesmic evaluation and retrofit of concrete buildings*, Report ATC-40.
- [5] Parducci, A., 2007. *Progetto delle costruzioni in zona sismica*, Liguori Editore.
- [6] Chopra, A.K., Goel, R.K., 1999. *Capacity-Demand-Diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF system*, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [7] Fajfar, P., Gaspersic, P., 2000. *The N2 method for the seismic damage analysis for RC buildings*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics.25. pp.23-67.
- [8] Pinho, R. *Using Push Over Analysis for Assessment of Building and Bridges*, IUSS Press, Pavia, Italy;
- [9] Sullivan, T.J., Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., 2009. *Introduction to a Model Code for Displacement-Based Seismic Design* Proceedings, ACES Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering, Corfu, Greece.
- [10] Christopoulos, C., Filiatrault, 2006. *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*, IUSS Press, Pavia, Italy.