

Miglioramento sismico di un edificio esistente prefabbricato in C.A. con dispositivi dissipativi viscosi

di Alessandro Pignagnoli¹

Sommario

I dispositivi sismici viscosi, in particolare nel Miglioramento di edifici esistenti, sono poco utilizzati ma consentono di raggiungere facilmente gli obiettivi di progettazione prefissati.

L'articolo tratta la problematica ingegneristica facendo riferimento a un caso reale di edificio prefabbricato in CA "migliorato" sismicamente con questa tecnica.

Vengono trattati nello specifico: il metodo di analisi time history, l'input sismico derivato da una selezione di accelerogrammi naturali e da risposta sismica locale, i risultati ottenuti, i vantaggi per la committenza.

1. L'IMPOSTAZIONE DEL PROGETTO DI MIGLIORAMENTO SISMICO

L'edificio in oggetto, sito a Novellara (RE), presenta struttura prefabbricata in CA, tamponata con pannelli prefabbricati in calcestruzzo. Attualmente esso ospita un'attività commerciale.

La struttura è asimmetrica, quindi irregolare in pianta. Essa necessita di un intervento di miglioramento sismico per raggiungere almeno il 60% della resistenza sismica rispetto al nuovo. A tale scopo è possibile utilizzare il sismabonus.



Immagine Google

Il suolo è caratterizzato da sequenze di argille e limi. Tramite prove in situ è stato classificato di tipo "C".

In base alla verifica sismica effettuata, il livello di sicurezza attuale si attesta al 25% dello spettro SLV, tenendo conto che i vincolamenti mutui degli elementi strutturali sono stati già realizzati a seguito del sisma dell'Emilia 2012. Il periodo fondamentale della struttura si attesta sui 0.8 secondi.

¹ Alessandro Pignagnoli – ingegnere – CPR Ingegneria Stp

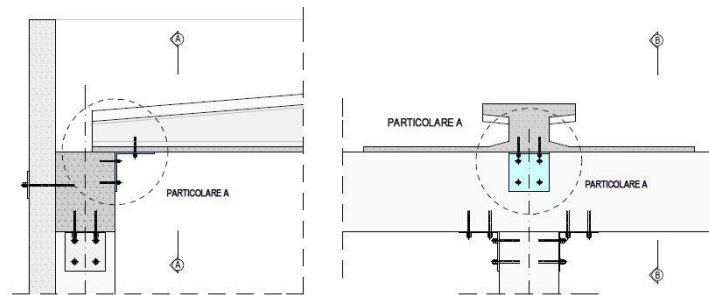


Immagine di alcuni fissaggi eseguiti in Fase 1 (anno 2012)

La richiesta della committenza è stata quella di progettare e realizzare un intervento con il minimo possibile di interventi all'interno, in modo da non ostacolare l'attività commerciale, cioè non provocare costi indiretti per il fermo attività.

Le strade progettuali per il miglioramento sismico, previste anche in normativa, sono le seguenti:

- a. **il rinforzo strutturale, accompagnato da aumento della duttilità:** strada percorribile, ma a prezzo di disagi per l'attività insediata, in quanto richiederebbe un massiccio intervento di rinforzo dei pilastri e delle fondazioni: la strada quindi non è percorribile. Oppure si potrebbe pensare di aggiungere strutture esterne di contrasto e rinforzo: strada percorribile;
- b. **l'inserimento di dispositivi di isolamento alla base:** strada non percorribile nel caso in esame;
- c. **l'inserimento di dispositivi di dissipazione,** tipicamente link dissipativi isteretici o viscosi (damper): strada percorribile.

L'inserimento di dispositivi di dissipazione (Caso "c")

Questa è la tecnica di intervento prescelta, che verrà trattata nel seguito. Si è previsto di applicare dispositivi viscosi, i quali presentano molti vantaggi, pratici ed economici.

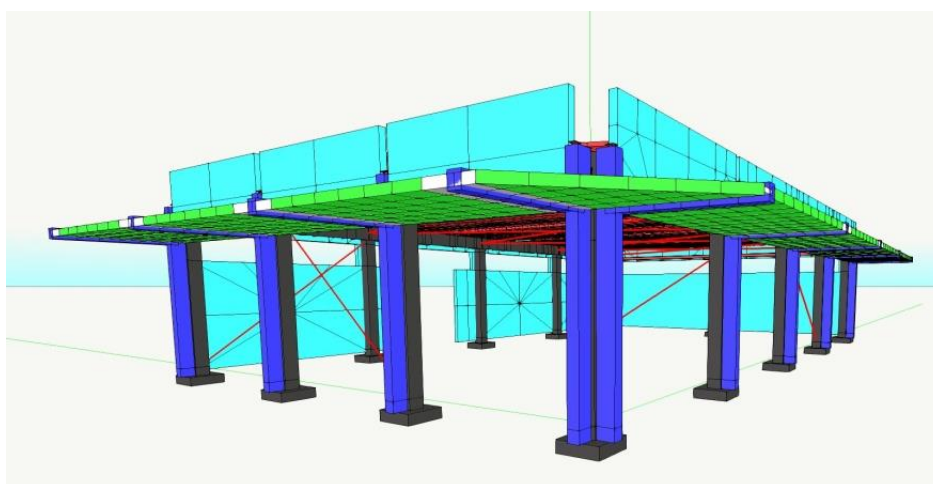


Immagine del modello FEM

Si richiede, come obiettivo progettuale, che la struttura resti sostanzialmente in campo elastico, quindi senza danni strutturali irreversibili, anche in caso di evento sismico con tempo di ritorno di 475 anni (SLV).

2. I DISPOSITIVI SISMICI UTILIZZATI

Nel caso in esame, come detto, sono stati scelti dispositivi a comportamento viscoso puro (la cui forza dipende solo dalla velocità relativa agli estremi) che dissipano completamente l'energia assorbita.

I dispositivi sono trattati in normativa in un apposito capitolo, a cui si rimanda.



Dissipatore viscoso durante le prove di accettazione (per gentile concessione di FIP MEC srl)

L'analisi strutturale con dispositivi viscosi

Una struttura con dispositivi viscosi (damper), com'è noto, non può essere affrontata con metodi semplificati (analisi modale, pushover, ecc). L'analisi sismica è affrontabile solo tramite integrazione al passo delle equazioni del moto.

Breve richiamo: l'equazione dinamica, nel caso a un solo grado di libertà (x), è la seguente:

$$m \ddot{x}(t) + \boxed{C \dot{x}(t)} + K x(t) = -m \ddot{x}_s(t),$$

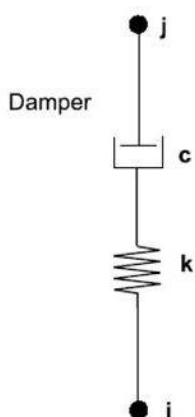
dove:

- $\ddot{x}_s(t)$ è sempre l'accelerazione impressa alla base;
- x è lo spostamento relativo rispetto alla base.

Si è previsto di utilizzare i damper per tutta la dissipazione, per cui si richiede che la struttura esistente resti il più possibile in campo elastico. Quindi la matrice K resta costante. Non è stata inserita dissipazione aggiuntiva, a favore di sicurezza, anche se ciò sarebbe ammesso, e pure corretto. Questa scelta massimizza le azioni sui damper.

Il modello matematico del damper utilizzato è quello di Maxwell, ove la forza trasmessa dipende dalla velocità relativa fra gli estremi i e j . Si ha quindi:

- C è la costante dello smorzatore;



- K rappresenta la rigidezza elastica (normalmente molto alta) posta in serie.

Il comportamento dinamico dello smorzatore “reale” prescelto è del tipo:

$$F = C (\dot{x})^\alpha$$

L'esponente α , stabilito in progetto pari 0,20, fa sì che si realizzi un ciclo di isteresi molto ampio e quasi rettangolare, con una “plasticizzazione” che si manifesta a velocità molto basse.

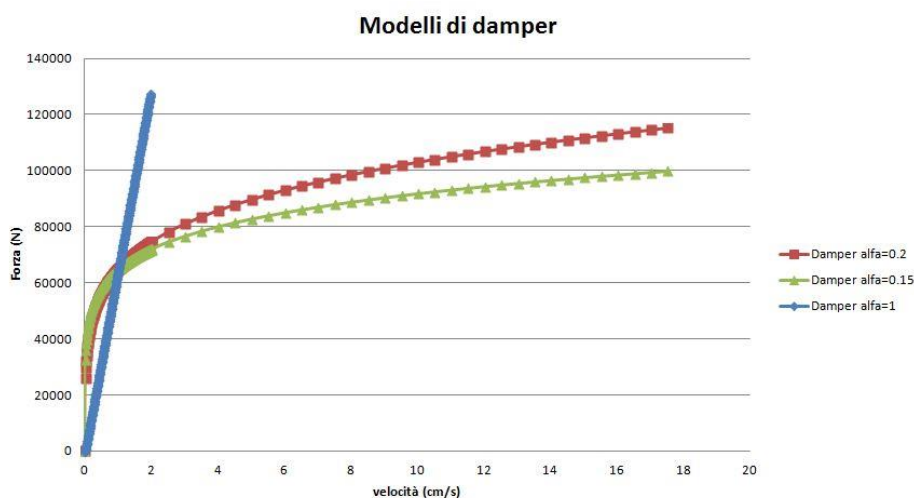
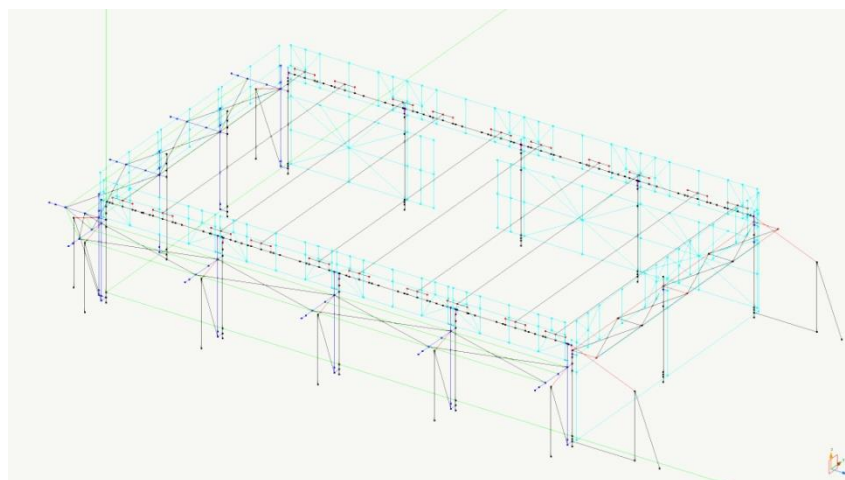


Diagramma della funzione $F = C (\dot{x})^\alpha$, con C costante e α variabile

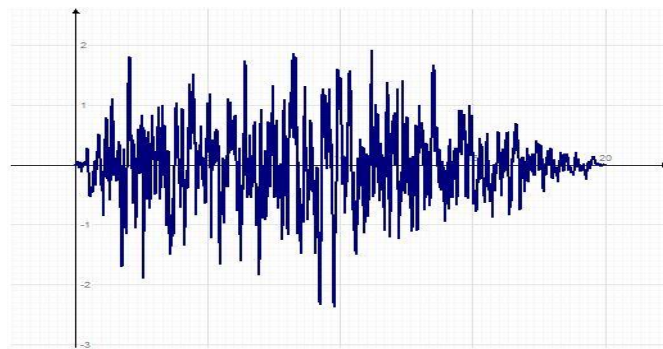
Si è deciso di applicare i dispositivi interponendoli fra i nodi strutturali della copertura e nuove strutture esterne di contrasto, al fine di ridurre al minimo le lavorazioni sulla struttura esistente. Si sarebbe potuto, infatti, inserire i damper sul perimetro, riducendo i costi, ma sarebbe stato necessario rimuovere le vetrate e controventare la copertura dall'interno.



Il modello strutturale

3. L'input sismico: gli accelerogrammi

L'analisi dinamica time history richiede, com'è noto, la scelta di opportuni accelerogrammi di input. Si tratta di un passaggio abbastanza delicato in quanto è il progettista a dover decidere quale "tipo" di input utilizzare.



Esempio di accelerogramma artificiale $a(t)$, con a in $[m/s^2]$ e t in $[s]$

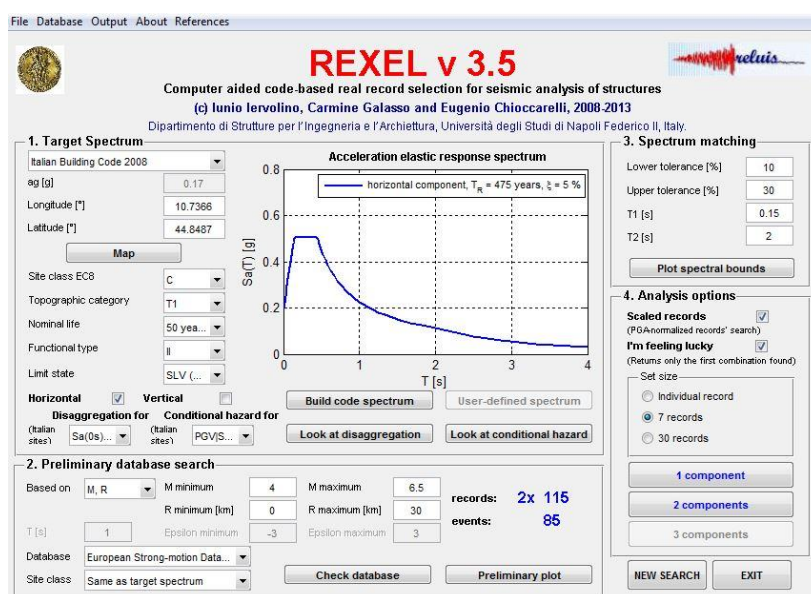
Si è deciso di progettare il Miglioramento sismico al 100% dello spettro SLV, quindi senza riduzioni. Sono stati valutati diversi tipi di segnale di input:

- Accelerogrammi sintetici;
- Accelerogrammi naturali, selezionati tramite Rexel per il suolo "C";
- Accelerogrammi naturali derivati da analisi di risposta sismica locale.

Per brevità non si entrerà nel merito della valutazione delle differenze fra accelerogrammi naturali ed artificiali; per approfondimenti si rimanda alle trattazioni di settore.

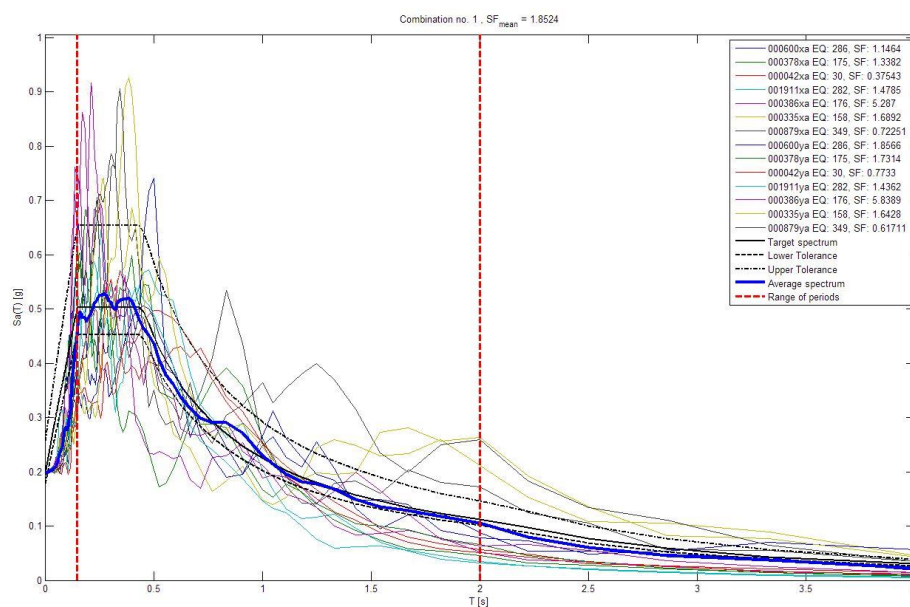
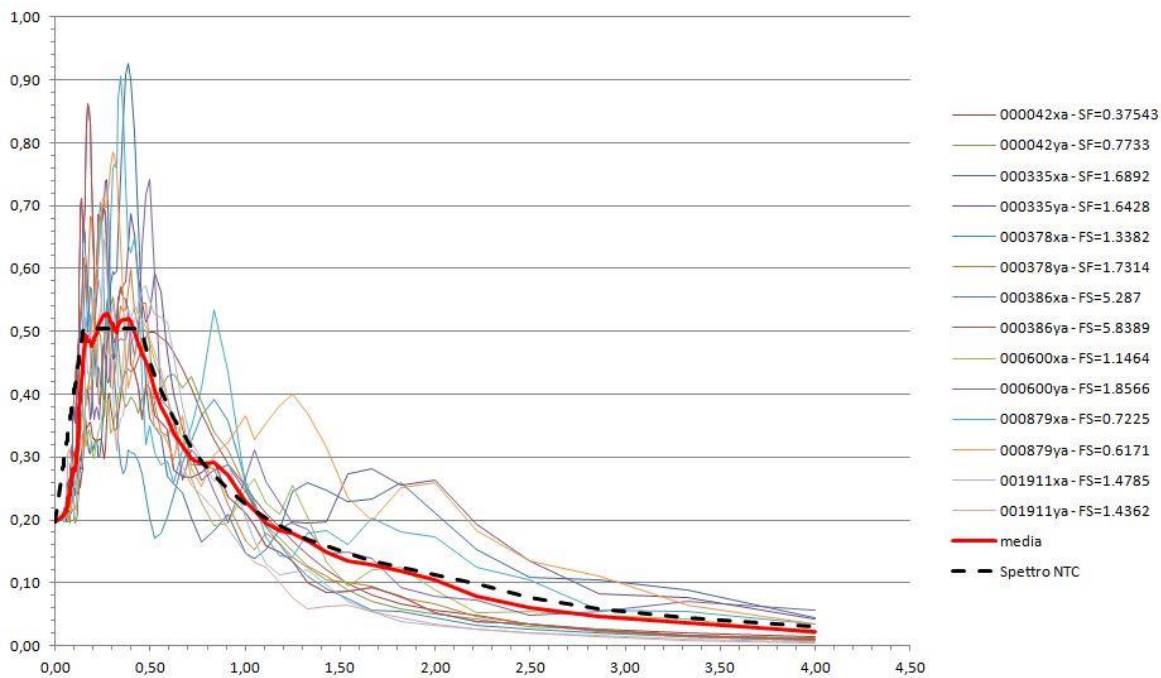
La selezione.

Sono state inserite: le coordinate del sito, le vita reale, lo stato limite prescelto, ecc.



E' stata fatta la ricerca in un database di registrazioni (in questo caso ESMD); come "criterio", oltre al tipo di suolo (tipo C), è stato inserito il range di magnitudo in base alla disaggregazione del sito (da 4 a 6.5) e la distanza dall'epicentro (0-30 km).

Gli accelerogrammi scelti sono, nel loro insieme, spettro-compatibili. Questo requisito viene verificato direttamente dal software utilizzato e mostrato tramite grafici.



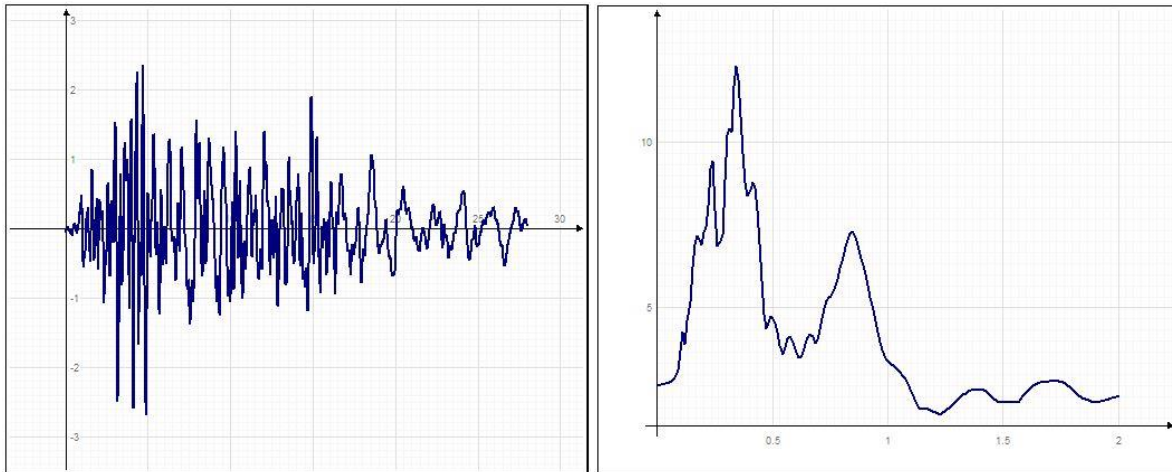
Dimostrazione della spettro-compatibilità e dei fattori di scala applicati

Nota: Nel caso in esame si è imposto un fattore di scala medio non superiore a 2.

Il tipo di terreno: classificazione semplificata del suolo e Analisi di Risposta sismica locale.

Come detto, precedentemente è stato definito il “tipo di terreno” in Rexel, al fine di selezionare accelerogrammi compatibili. Tuttavia si è deciso, come detto, di procedere in due modi:

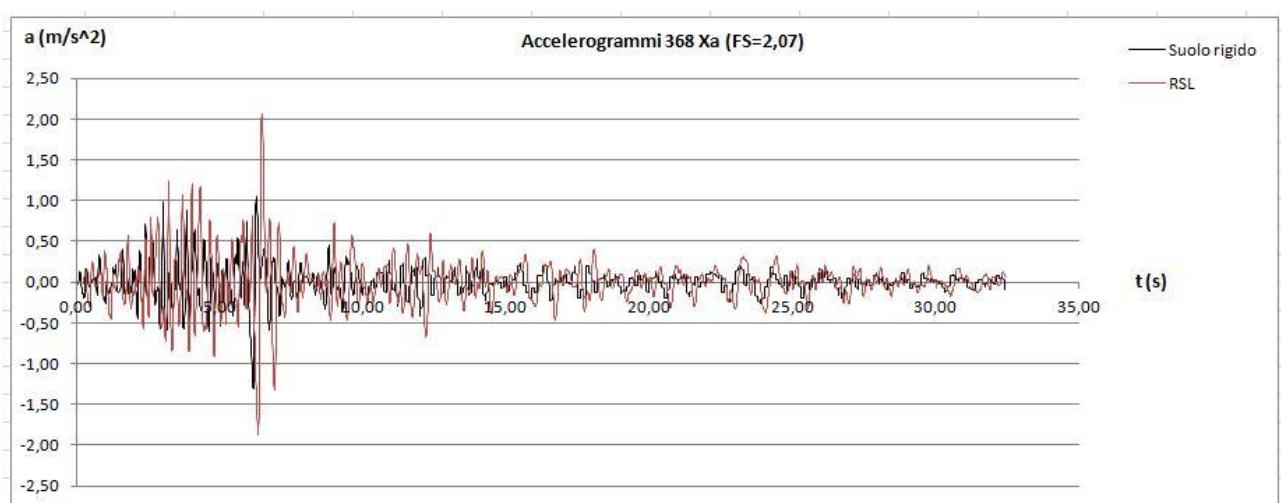
- tramite la classificazione semplificata di normativa, con Terreno tipo “C”, ricavando tramite Rexel il set di 7+7 accelerogrammi (X e Y) idonei, poi opportunamente scalati;
- Tramite analisi di Risposta sismica locale, con modellazione semplificata 1D utilizzando il programma STRATA.



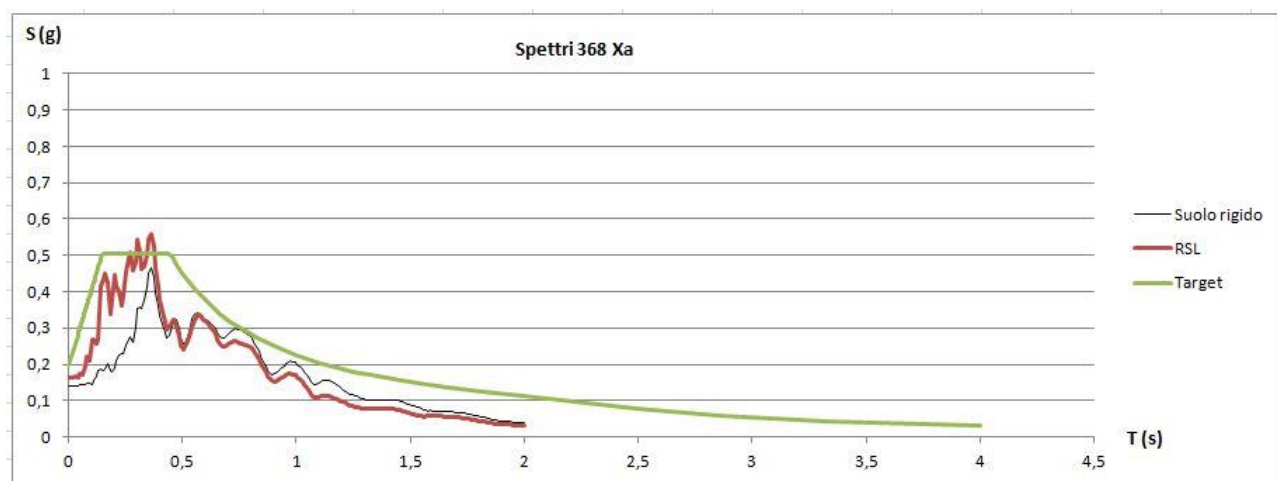
Accelerogramma naturale “879X”- suolo C (non scalato), e relativo spettro in accelerazione (in m/s²)

Accelerogrammi derivati da analisi di risposta sismica locale.

Sono state ripetute le analisi time history anche con un set di 7 segnali (coppie X e Y) derivanti da analisi di RSL (Risposta sismica locale). Tale argomento non verrà qui approfondito, per brevità. Si analizzeranno solo i risultati e le conseguenze sulla struttura. Ogni accelerogramma avrà le proprie caratteristiche in accelerazione, il proprio spettro di Fourier, e la propria energia in ingresso (nella struttura).



Accelerogramma 368 Xa: in nero quello su suolo rigido (scalato); in rosso quello derivato da analisi RSL



Accelerogramma 368 Xa (suolo rigido - scalato) – Spettro Output da analisi RSL 1D (argille)

Osservazioni sul dato di magnitudo del sisma (criterio di selezione)

Il dato di magnitudo, come intervallo min-max, è necessario per la selezione degli accelerogrammi naturali. Esso è un dato energetico “macro”, per cui non è strettamente legato agli esiti dell’analisi, tuttavia è necessario per consentire a Rexel di trovare il set di accelerogrammi “compatibili” con lo spettro del sito.

L’energia in ingresso (nella struttura)

Avendo applicato un fattore di scala ad ogni accelerogramma, ogni segnale sismico selezionato è stato modificato, e quindi altrettanto sarà l’energia in ingresso nella struttura. Per questo è stata fatta la verifica utilizzando anche accelerogrammi derivati da analisi di risposta sismica locale. Inoltre è stata eseguita anche un’analisi “aggiuntiva” per valutare gli effetti dell’accelerogramma dell’Emilia 2012 registrato a Mirandola.

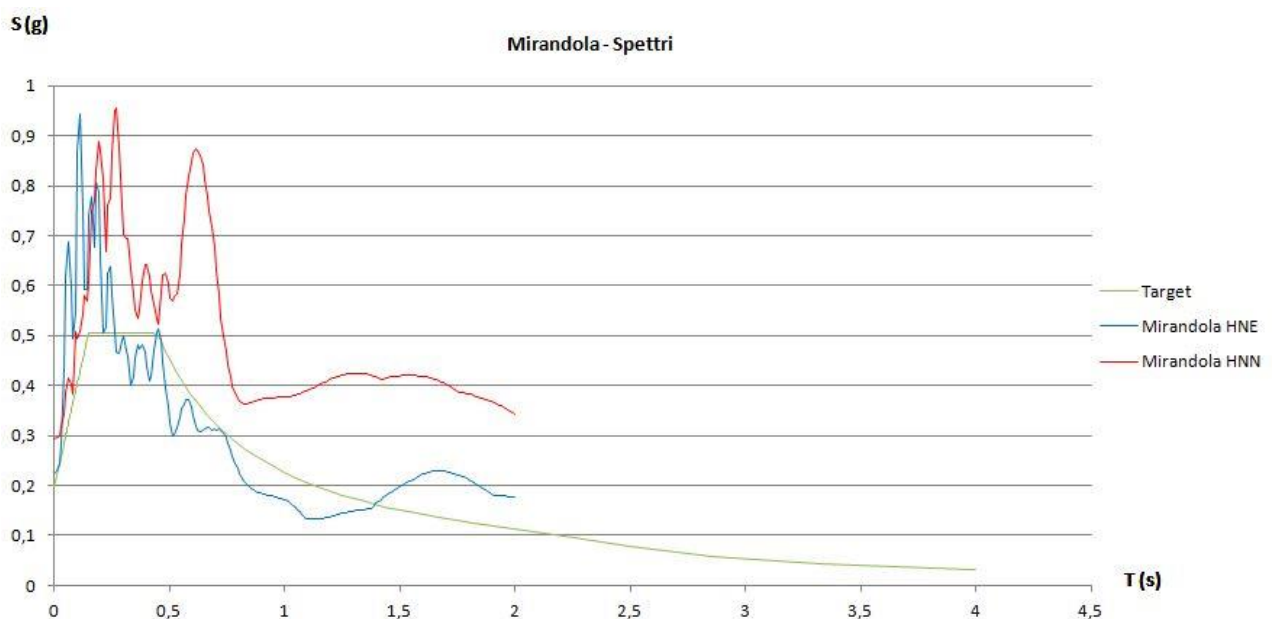
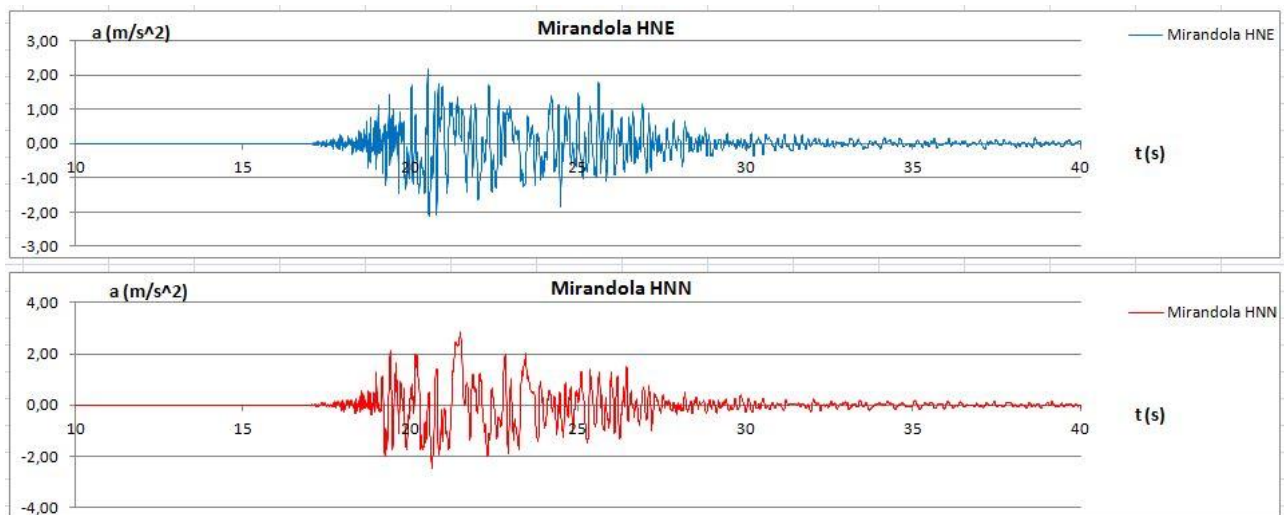
Gli accelerogrammi avranno ovviamente effetti sulla struttura diversi fra loro. Per ciascun set di 7 coppie di accelerogrammi sono state considerate le medie, come previsto dalla NTC.

La scelta del segnale per l’analisi “aggiuntiva”: l’evento sismico dell’Emilia 2012.

Il sisma dell’Emilia è stato un evento di una certa rilevanza, di Magnitudo momento = 6.0, con ipocentro a 8.1 km, caratterizzato da:

- terreno: classificato tipo “C” ($V_{s,30} = 208$ m/s);
- Pga: 218 cm/s² in una direzione (HNE) e 289 cm/s² nella direzione ortogonale (HNN).

Si riportano nel seguito i dati della registrazione della stazione di Mirandola (vicini all’epicentro). Lo spettro mostra accelerazioni molto alte, in un intervallo di periodi molto ampio. Pur trattandosi di un evento raro, è importante verificarne gli effetti sulla struttura, perché registrato in una zona sismo-genetica caratteristica del sito in esame.

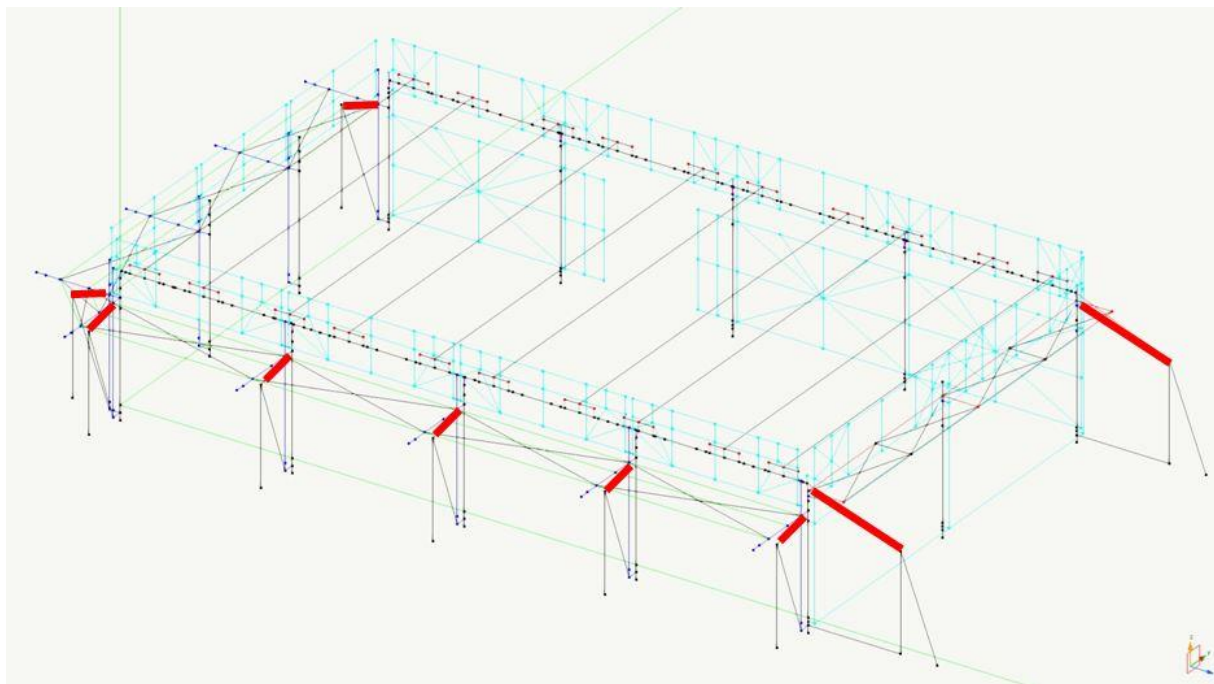


Spettro in accelerazione – Mirandola HNE (Itaca)

4. DETTAGLIO D'ANALISI DINAMICA "TIME HISTORY" CON DAMPER

Una volta selezionati gli accelerogrammi di input, questi sono stati importati nel software ed è stata eseguita l'analisi della struttura.

I dissipatori (in grassetto nell'immagine sottostante) sono stati posti in corrispondenza dei nodi strutturali in cui convergono le masse. Essi, come si è detto, vengono modellati con appositi elementi, assimilabili a bielle la cui forza assiale risulta funzione della velocità relativa fra i nodi i e j .



Modello della struttura prefabbricata migliorata sismicamente con 9 damper (5 in X e 4 in Y)

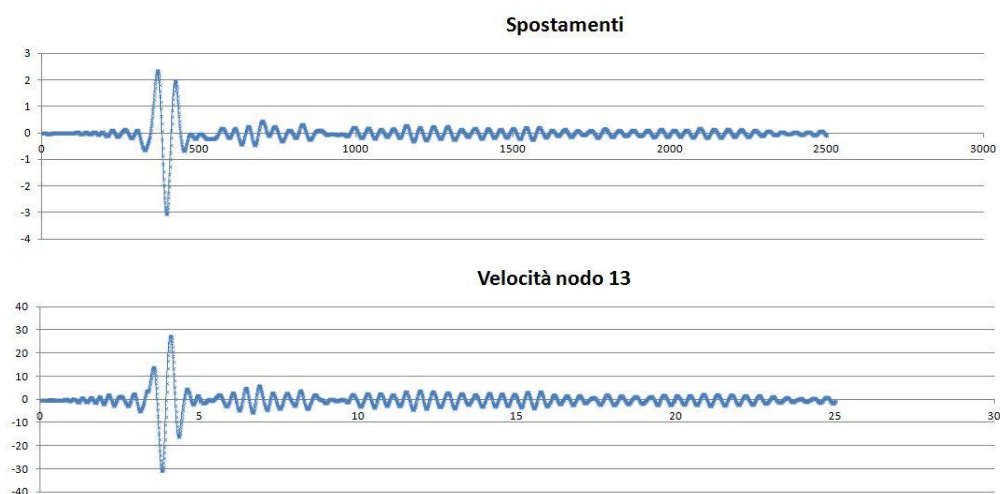
La struttura “esistente” è stata modellata con elementi elastici, verificando a posteriori lo stato di sforzo.

Damper scelti:

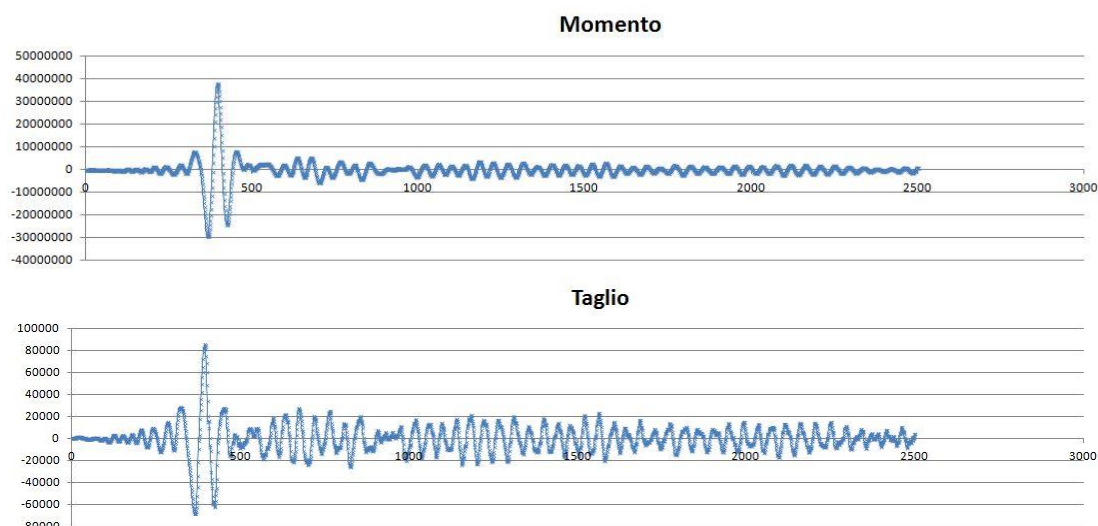
Si deciso di adottare 9 damper tutti uguali, disposti come nell’immagine del modello, aventi le seguenti caratteristiche: $F_{\max} = 70$ kN in corrispondenza di una $V_{\max} = 30$ cm/s e $\alpha = 0.2$; quindi $C = 70.000 / (30)^{0.2} = 35.454$ (N/cm/s).

Risultati:

Si mostreranno nel seguito alcuni risultati significativi per le verifiche: risultati nei nodi (spostamenti, velocità, accelerazioni) e negli elementi (M, N,T), ovviamente tutti in funzione del tempo. Sono stati poi selezionati i massimi e fatte le medie.



Spostamenti (cm) e velocità (cm/s) di un nodo “critico” della struttura



*Momento (N*cm) e Taglio (N) in una sezione di un pilastro "critico"*

Si mostra quindi il riepilogo, con l'azione massima di progetto in termini di media dei massimi (ricordando che non è stato inserito smorzamento aggiuntivo alla Rayleigh né isteresi nei pilastri):

	RISULTATI SLV														MEDIE
	Forzante 0042 X-Y (4)		Forzante 0335 X-Y (5)		Forzante 0378 X-Y (6)		Forzante 0386 X-Y (7)		Forzante 0600 X-Y (8)		Forzante 0879 X-Y (9)		Forzante 1911 X-Y (10)		
	Fs_X=0,375	Fs_Y=0,773	Fs_X=1,69	Fs_Y=1,64	Fs_X=1,34	Fs_Y=1,73	Fs_X=5,30	Fs_Y=5,86	Fs_X=1,15	Fs_Y=1,86	Fs_X=0,725	Fs_Y=0,619	Fs_X=1,483	Fs_Y=1,441	
SPOSTAMENTI Nodi	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	
58 (Damper 2)	2,1		1,3		0,8		1,0	0,6	1,7	1,2	1,2	-	2,0	-	1,4
64 (Damper 1)	2,3		1,3		0,9		1,0	0,6	1,8	1,2	1,3	-	2,5	-	1,6
30 (Damper 5)		2,0		1,3		1,2	1,4	0,6	2,5	1,5	-	1,2	-	1,5	1,3
612 (Damper 7)		2,8		2,6		2,0	1,4	1,2	2,5	2,5	-	2,0	-	2,6	2,2
13 (Damper 3-9)	3,1	1,9	1,7	1,2	1,2	1,1	1,4	0,6	2,5	1,3	1,8	1,0	3,4	1,3	2,2
591 (Damper 4)	2,7		1,6		1,0		1,3	0,7	2,2	1,3	1,5	-	3,0	-	1,9
VELOCITA' Nodi	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	
58 (Damper 2)	21		17		10		14		21		14		26		17,6
64 (Damper 1)	24		18		12		15		23		15		28		19,3
30 (Damper 5)		18		18		15		11	-	18	-	14	-	17	15,9
612 (Damper 7)		27		32		22		16		30		23		30	25,7
13 (Damper 3-9)	31	15	23	15	14	14	18	10	30	16	19	14	35	16	24,3
591 (Damper 4)	27		22		12		16		26		17		32		21,7
Accelerazioni Nodi	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	Massimo X	Massimo Y	
58 (Damper 2)	-		-		-		-		-		-		-		
64 (Damper 1)	-		-		-		-		-		-		-		
30 (Damper 5)		-		-		-		-		-		-		-	
612 (Damper 7)		386		540		420		294		522		300		459	417,3
13 (Damper 3-9)	374	251	340	240	230	225	293	268	398	214	302	220	509	227	349,4
591 (Damper 4)	-		-		-		-		-		-		-		235,0

Sintesi dei risultati delle analisi

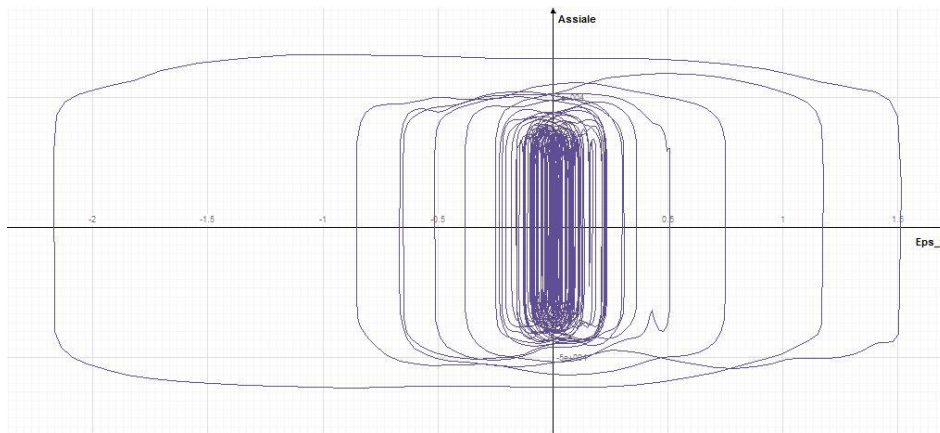
La velocità massima dei dispositivi è, in media, inferiore ai 30 cm/s. Il massimo si attesta a 35 cm/s. Gli spostamenti medi dei nodi non superano i 2 cm, garantendo uno stato di sforzo accettabile nei pilastri. Gli spostamenti differenziali, corrispondenti alla distorsione della copertura, sono dell'ordine del centimetro.

La taratura dei damper e la verifica dei risultati in termini di bilancio energetico.

Volendo mantenere la struttura in campo elastico (che è il target assunto) è chiaro che non si deve oltrepassare un certo limite di spostamenti. Ma anche il taglio massimo trasmesso dai damper non può oltrepassare la resistenza a taglio delle strutture esistenti.

Pertanto, la "taratura" dei damper è un compromesso fra la forza massima F_{max} sopportabile dai nodi strutturali esistenti, corrispondente a tagli e momenti nei pilastri, e lo spostamento differenziale massimo

dei nodi, corrispondente alla escursione massima del damper stesso e alla distorsione della struttura esistente.



Cicli Forza (N) - spostamento (cm) più ampio eseguito dal damper n°7

Si mostra nel seguito il controllo dei risultati in termini energetici, in quanto fisicamente comprensibile con rapidità. A questo scopo è molto utile graficare il bilancio energetico.

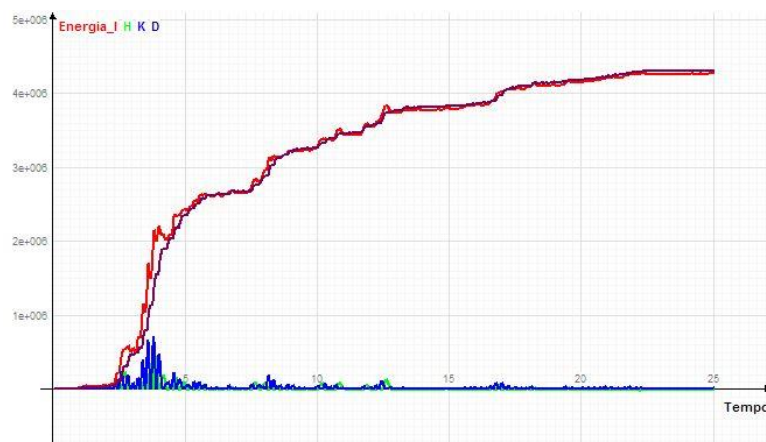
Ricordando che, istante per istante, deve sempre valere il bilancio energetico:

$$I(t) = H(t) + K(t) + D(t) + \text{errore}$$

dove:

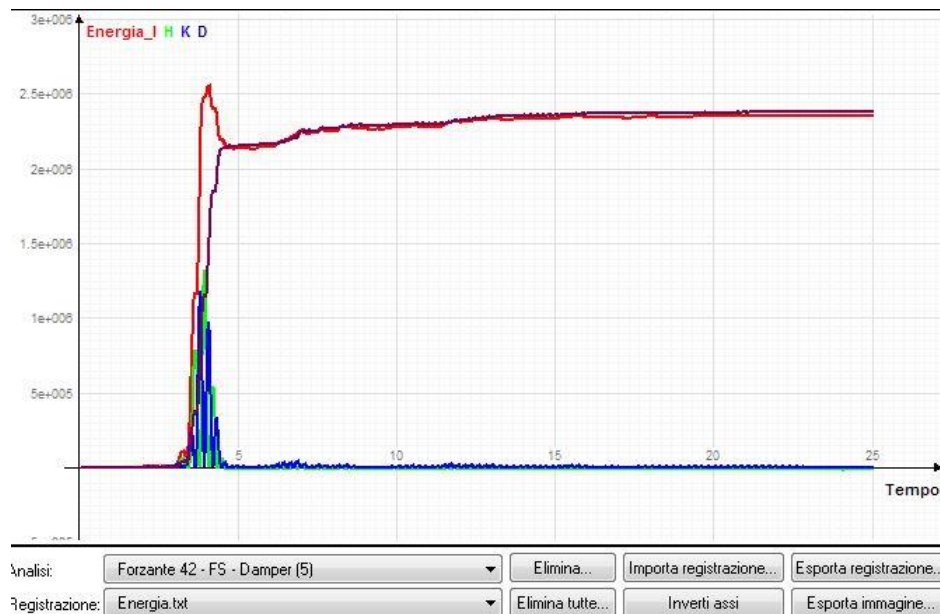
- I = Energia in ingresso (relativa);
- H = En. meccanica (potenziale elastico, in questo caso senza isteresi)
- K = Energia cinetica (relativa)
- D = Energia Dissipata dai damper

Non essendo presente isteresi nelle strutture esistenti, alla fine dell'evento tutta l'energia in ingresso deve essere dissipata dai damper e la struttura deve tornare in stato di quiete nella posizione iniziale, con $H=0$ e $K=0$.

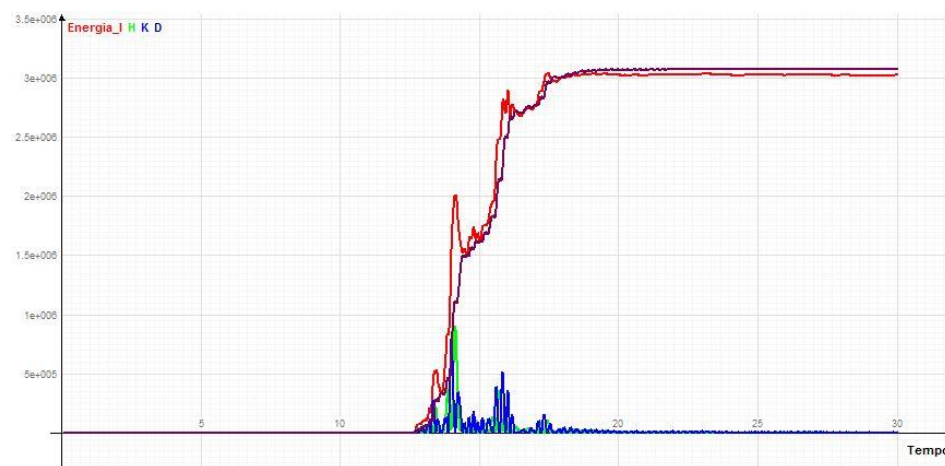


Curve di energia con un accelerogramma di input "distribuito"

Vi sono alcuni accelerogrammi per i quali l'energia sismica impressa alla base riesce ad entrare nella struttura in un tempo estremamente ridotto. In questo caso i dispositivi di dissipazione non riescono a dissipare tutta l'energia istante per istante, per cui la struttura acquista energia cinetica e potenziale di deformazione. Sono questi, quindi, gli accelerogrammi "dimensionanti" per i dispositivi.



Curve di energia con un accelerogramma di input "impulsivo"



Curve di energia con accelerogramma ricavato da analisi RSL (4674 Xa scalato)

Osservazione.

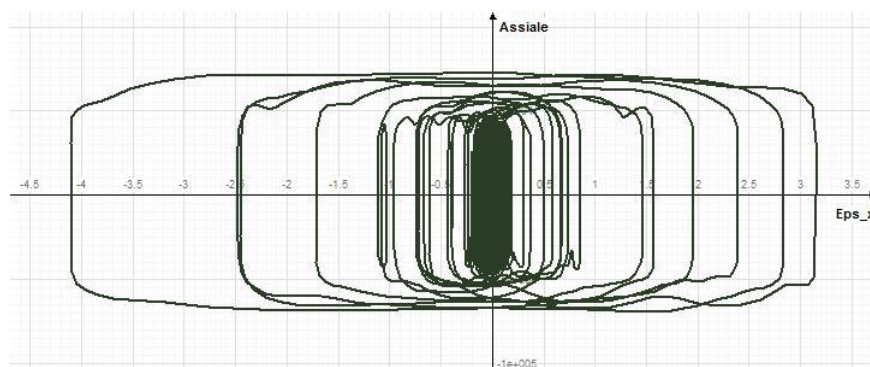
Nella NTC si prescrive solo di prendere, a valle delle analisi, la media dei valori di output (spostamenti, velocità, accelerazioni, sforzi interni); ciò è dovuto al criterio della spettro-compatibilità imposta all'inizio. Tuttavia un dispositivo non deve mai, e per nessun motivo, arrivare a fine corsa. Pertanto, oltre a ripetere le analisi con accelerogrammi compatibili con lo spettro SLC, sempre opportunamente scalati (quindi

alterati), si è deciso di valutare l'effetto anche di un accelerogramma "aggiuntivo" molto gravoso, naturale e senza alterazione, descritto nel seguito.

L'analisi con l' accelerogramma registrato a Mirandola nel Maggio 2012

Si tratta di un evento che, come mostrato in precedenza, ha uno spettro quasi doppio rispetto allo spettro SLV di riferimento, e quindi molto superiore anche allo spettro SLC di normativa, in un intervallo molto ampio di periodi. Si tralascia per semplicità la componente Z. Considerato l'ampio spettro in accelerazione di questo sisma in termini di armoniche, è atteso che molta energia entri nella struttura, la quale presenta un periodo elastico fondamentale di circa 0,8 s.

Si sono valutati gli effetti sul modello. Si mostra in particolare l'effetto sul damper n°7 che è quello, in tutte le analisi precedenti, che presenta gli spostamenti massimi.

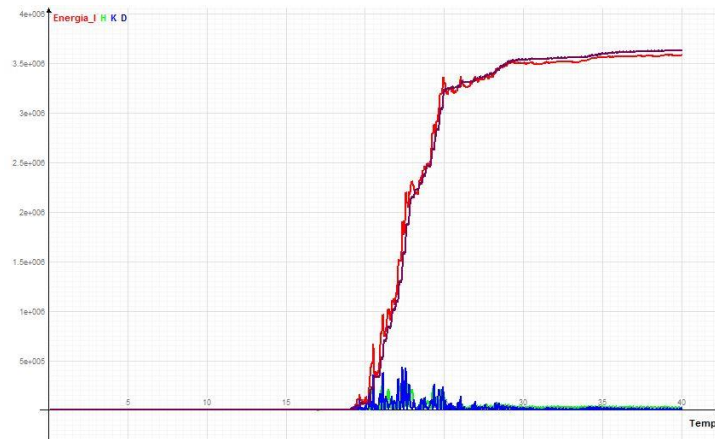


Effetti dell'accelerogramma di Mirandola 2012 sul damper n°7

Gli spostamenti raggiungono un valore circa doppio rispetto alla media dei 7 accelerogrammi precedenti. Nel progetto, quindi, si è adottato questo valore come massimo di verifica.

L'energia in ingresso non è molto diversa dai casi precedenti e, come si vede dal grafico sottostante, viene dissipata molto bene dai damper i quali, tuttavia, lavorano con un'escursione doppia rispetto agli accelerogrammi mostrati in precedenza e quindi con la fuoriuscita della struttura esistente dal campo elastico.

Non si discuterà in questa sede la questione; trattandosi di un evento sismico eccezionale lo si è ritenuto accettabile. Si fa presente soltanto che la perdita di rigidità elastica della struttura esistente non crea particolari problemi al funzionamento dei damper viscosi, i quali soppperiscono tranquillamente, a condizione ovviamente che non arrivino a fine corsa.



Curve di energia con l'accelerogramma di Mirandola (componenti X e Y)

5. Conclusioni:

L'utilizzo dei dispositivi viscosi nel progetto di miglioramento sismico è risultato molto efficace e consente di raggiungere il 100% della resistenza sismica prevista dalla NTC, mantenendo la struttura in campo elastico.

La progettazione richiede una certa attenzione, l'utilizzo di analisi abbastanza complesse e un certo onere di lavoro. Tuttavia l'intervento proposto risponde a tutte le aspettative della committenza.

Anche l'inserimento nella struttura è relativamente semplice. I dispositivi, infatti, sono di limitato ingombro e non richiedono manutenzione. Inoltre essi lavorano per tutti i tipi di azione dinamiche, quindi anche per il vento.

I costi degli interventi, complessivamente, sono gli stessi di un intervento classico di rinforzo (in questo caso non attuabile), ma i costi complessivi reali sono più bassi di quest'ultimo se si considerano anche i costi indotti per interruzione dell'attività, che nel progetto scelto sono nulli.