



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Civile

**Progetto di sistemi di isolamento sismico soggetti ad azione sismica
verticale in siti vicino-faglia**

**Design of seismic isolation systems under vertical ground motions in near
fault-sites**

Relatrice:

Prof.ssa Ing. **Laura Ragni**

Tesi di Laurea di:

Francesco Osimani

Correlatore:

Prof. Ing. **Fabrizio Gara**

A.A. 2022/2023

Sommario

1. Introduzione	6
2. Terremoti Near-Fault	8
2.1. Generalità.....	8
2.2. Terremoti Near-Fault in Italia.....	11
2.3. Fling Step (in riferimento al sisma del 30/10/2016 del Centro Italia) 18	
3. Isolamento sismico alla base	25
3.1. Sisma orizzontale.....	25
3.1.1. Isolatori elastomerici	27
3.1.2. Isolatori a scorrimento.....	32
3.2. Sisma verticale.....	36
3.2.1. Uplift Prevention.....	37
3.2.2. 3D Isolation System	39
4. Caso studio di Castelluccio	48
4.1. Terremoto Umbria-Marche 2016: Castelluccio di Norcia.....	48
4.2. Geologia e geomorfologia del sito	55
4.3. Sismicità del sito.....	57
4.4. Descrizione e inquadramento dell'intervento	57
4.4.1. Ground Isolation (o "Artificial Ground")	58
5. Dimensionamento del sistema di isolamento composto da isolatori elastomerici HDRB	66
5.1. Analisi dei carichi.....	66
5.1.1. Peso proprio della piastra	66
5.1.2. Carichi permanenti strutturali e non strutturali degli edifici.....	67
5.1.3. Sovraccarico di servizio relativo agli edifici.....	71
5.1.4. Neve.....	73
5.1.5. Area rimanente	73

5.1.6.	Analisi dei carichi: tabella riassuntiva	73
5.2.	Soluzione I: Piastra piana rettangolare	74
5.2.1.	Modellazione	78
5.2.1.1.	Modellazione con elementi shell.....	79
5.2.1.2.	Modellazione con constrain di piano	80
5.2.2.	Analisi modale.....	81
5.2.3.	Analisi dinamica lineare.....	82
5.2.4.	Risultati SLV, SLD e SLO.....	86
5.3.	Soluzione II: Piastra su tre elevazioni	90
5.3.1.	Predimensionamento	90
5.3.2.	Modellazione: elementi shell e frame	93
5.3.3.	Analisi modale.....	95
5.3.4.	Analisi dinamica lineare.....	97
5.3.5.	Distribuzione masse disuniformi.....	97
5.3.6.	Distribuzione masse parziali	99
5.4.	Soluzione III: Piastra su cinque elevazioni	100
5.4.1.	Predimensionamento	100
5.4.2.	Modellazione: Elementi frame	102
5.4.3.	Ridistribuzione delle masse.....	103
5.5.	Studio della parete verticale	108
5.5.1.	Sforzo assiale nella parete	110
5.5.1.1.	Sforzo assiale nel modello a cinque elevazioni	115
6.	Dimensionamento del sistema di isolamento alla base composto da	
	isolatori a scorrimento	120
6.1.	Predimensionamento	120
6.2.	Modellazione degli isolatori.....	124
6.3.	Time history.....	127
6.3.1.	input accelerometrici	128

6.3.2.	Modellazione non lineare	137
6.4.	Soluzione I: Isolatori a pendolo semplice con $\zeta=2\%$	148
6.5.	Soluzione II: Isolatori a pendolo semplice con $\zeta=5\%$ e edifici....	160
6.6.	Soluzione III: Isolatori a pendolo semplice in parallelo a dispositivi dissipativi viscosi	170
6.7.	Isolamento 3D	184
7.	Conclusioni	205
	Bibliografia.....	208
	Ringraziamenti	210

1. Introduzione

La progettazione antisismica degli edifici di nuova costruzione, così come l'adeguamento o il miglioramento sismico degli edifici esistenti, è uno degli argomenti di maggior dibattito negli ultimi anni in ambito strutturale. Le soluzioni tecniche proposte e applicate hanno raggiunto un livello che permette di ottenere un danneggiamento basso o assente degli elementi strutturali e non strutturali, mantenendone, quindi, la funzionalità.

Tuttavia, i recenti sismi che hanno interessato la penisola italiana hanno evidenziato un'elevata vulnerabilità degli edifici nei confronti dell'azione verticale, soprattutto in zona epicentrale, ancora non sufficientemente indagata. Tale fenomeno ha interessato per esempio il centro Italia durante la sequenza sismica di Amatrice-Norcia-Visso del 2016, nella quale numerosi centri storici sono stati distrutti anche in conseguenza del suddetto fenomeno, con la connessa perdita di numerose vite umane.

Tra questi vi è il centro storico di Castelluccio di Norcia, borgo fortemente danneggiato a seguito la scossa avvenuta la mattina del 30 ottobre 2016 con epicentro a pochi chilometri da esso. Per la sua ricostruzione è stato affidato dal comune di Norcia all'Università di Perugia l'incarco per uno studio condotto preliminare che vede la ricostruzione dell'intero centro con lo stesso aspetto che aveva prima del sisma, seguendo la filosofia del "lì dov'era, così com'era" ma applicando le recenti tecniche di protezione sismica. Lo studio in particolare prevede l'applicazione di una recente tecnica definita "artificial ground", la quale estende l'isolamento sismico tradizionale dal singolo edificio ad un'intera area urbana. La particolarità della soluzione proposta è che allo scopo di seguire l'andamento della quota del versante è stata pensata una piastra isolata unica che si sviluppa su diversi gradoni. Da tale studio emerge la assoluta efficacia del sistema di isolamento proposto nei confronti delle azioni orizzontali (registrate dalla stazione sismica posta nel paese) ma la necessità di approfondire lo studio nei confronti dell'elevata componente verticale registrata.

L'obiettivo della presente tesi è quello di approfondire alcuni aspetti specifici di tale progetto come: (i) l'effetto dei gradoni e quindi della diversa quota degli isolatori costituenti il sistema di isolamento e (ii) gli effetti della componente sismica verticale, prendendo in considerazione diversi sistemi di isolamento. In particolare, vengono paragonate tra loro le due metodologie di isolamento sismico ad oggi più diffuse: l'isolamento con isolatori elastomerici e con

isolatori a scorrimento a superficie curva. A tale scopo è stato utilizzato il software “SAP2000” per lo svolgimento di analisi modali, dinamiche lineare e dinamiche non lineari.

La parte iniziale della tesi riporta un approfondimento terremoti near-fault, descritti dalle norme come eventi sismici aventi distanza epicentrale minore di 15 km. In generale tali eventi sono particolarmente impulsivi e sono caratterizzati da componenti verticali di accelerazioni simili o addirittura superiori a quelle orizzontali. In particolare, l’attenzione è stata concentrata sulle problematiche principali riscontrate durante il sisma avvenuto nel centro Italia nel 2016 e gli effetti prodotti sulla proiezione del piano di faglia e in aree limitrofe ad esso.

Successivamente viene fatta una panoramica sui sistemi di isolamento sismico alla base ad oggi maggiormente utilizzati, sia da un punto di vista normativo (ai sensi della norma Italia NTC2018 ed Europea UNI EN 15129), che progettuale. I sistemi di isolamento sono suddivisi in due principali categorie, differenziando la trattazione tra i dispositivi usualmente impiegati per la mitigazione degli effetti delle azioni orizzontali e quelli impiegati per la componente verticale, che derivano dal campo più ampio di protezione degli edifici nei confronti delle vibrazioni verticali di varia natura (ambientale e/o antropica).

Infine, nel quinto e sesto capitolo viene affrontato il dimensionamento dei sistemi di isolamento. Più nello specifico, nel quinto capitolo è descritta la progettazione del sistema di isolamento formato da dispositivi in gomma ad alto smorzamento (HDRB) soggetti ad azione sismica orizzontale, partendo da uno schema semplice di piastra rettangolare piana isolata alla base. Il modello e le relative analisi (modali e dinamiche lineari) vengono poi articolate nel corso del capitolo. Nel sesto capitolo vengono poi introdotti gli isolatori a scorrimento in diverse configurazioni, utilizzando in questo caso le analisi non lineari (time history) come richiesto dalle NTC 2018 per questa categoria di isolatori. Per tali analisi inizialmente sono stati utilizzati gli accelerogrammi artificiali compatibili con gli spettri di normativa (per lo SLD, SLV e SLC) sia in direzione orizzontale che verticale. Successivamente sono stati presi in considerazione anche gli accelerogrammi reali registrati dalla stazione di misura di Castelluccio durante l’evento sismico relativo al 30 ottobre 2016.

2. Terremoti Near-Fault

L'applicazione di sistemi di isolamento sismico risulta ormai ampiamente diffusa su scala mondiale, grazie ai quali si riesce a superare i limiti della progettazione convenzionale antisismica e proteggere gli edifici anche per terremoti di intensità più elevate garantendo il soddisfacimento delle verifiche da normativa ai diversi Stati Limite. L'efficacia di tali dispositivi viene meno, però, quando si verificano forti sismi verticali. Le NTC 2018 al § 3.2.3 considerano il sisma come scomposto su tre componenti traslazionali nelle tre direzioni dello spazio (trascurando quelle rotazionali). Molto spesso la componente verticale (associata al movimento sussultorio) risulta trascurata, in quanto la norma specifica che nel caso di edifici di nuova costruzione va considerato lo spettro in direzione Z per:

- Luci maggiori di 20 m degli elementi orizzontali
- Presenza di eventuali elementi precompressi
- Presenza di elementi a mensola con luci che superino i 4 m
- Strutture di tipo spingente
- Presenza di pilastri in falso
- Piani sospesi

Nel caso, dunque, di sisma verticale superiore a quello di progetto, si riscontrerebbe negli isolatori un'inefficacia legata alla loro incompatibilità con gli sforzi di trazione. Un esempio si trova a Castelluccio, dove la componente verticale del sisma avvenuto il 16 ottobre 2016 ha raggiunto valori di picco registrati intorno a 2g. Questo fenomeno risulta non trascurabile nei terremoti near-fault, oggetto di studio nella presente tesi, i quali verranno descritti e presi in considerazione nei seguenti paragrafi.

2.1. Generalità

Negli ultimi anni, in Italia, sono stati registrati sismi di magnitudo più o meno importanti, accumulati tutti da forti danni agli edifici, compresa la scomparsa di interi comuni. Si pensi al terremoto di Santa Venerina (CT) registrato il 29 ottobre 2002 avente M4.5, quello dell'Aquila (6 Aprile 2009) con M5.9 e del centro Italia (26 Ottobre 2016) con M6.5. Suddetti sismi (ma non unici negli anni), hanno registrato gravi danni e crolli che hanno portato alla perdita di numerose vite umane. La caratteristica che principalmente accumuna molti dei terremoti catastrofici che si verificano nella penisola è quella di una profondità

dell'ipocentro minore di 10 km. Essi vennero denominati dai codici statunitensi (UBC,1997) come “near-fault earthquakes”, che sta a sottolineare la bassa profondità dell'ipocentro. Risulta necessario, dunque, ricercare la funzionalità delle strutture in condizioni sismiche severe come quelle dei sismi appena descritti, per i quali le forze dovute allo scuotimento risultano amplificate anche in termini di durata, e strettamente correlate ai meccanismi di propagazione della rottura. In particolare, i principali effetti dei near-source earthquakes sono la direzionalità progressiva (“forward directivity”) e il cedimento a gradino (“fling-step”). Il primo è legato al fatto che in prossimità della sorgente vengono registrati dei segnali di tipo impulsivo caratterizzato da alte frequenze dovuti alla velocità di rottura della faglia paragonabile con quella di propagazione delle onde S. Il secondo tipo di spostamento si verifica in direzione parallela alla faglia (a differenza della direzionalità progressiva che si verifica in direzione normale a quella della faglia) e si mostra come un insieme di cedimenti permanenti.

Una delle conseguenze maggiori dei terremoti poco profondi risulta essere quella di presentare uno spettro in accelerazione verticale simile (se non superiore) a quello orizzontale (Ramadan et al, 2021). In particolare, risulta di notevole interesse studiare quello che è il rapporto tra la componente verticale e orizzontale V/H (Erdik et al., 2022).

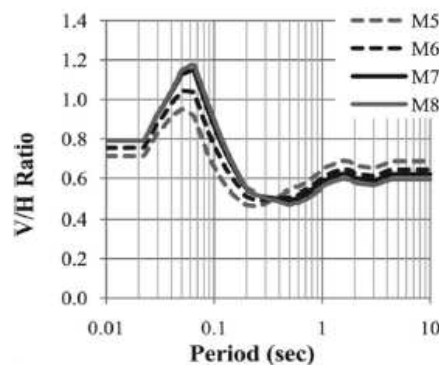


Figura 1_ V/H ratio per un terremoto strike-slip (faglia normale o inversa) a 5 km dall'ipocentro (Erdik et al., 2022)

Nel presente grafico, derivato dalla registrazione di un sisma near-source in un sito roccioso, si mostra come per bassi periodi e intervalli brevi, la componente verticale supera quella orizzontale, per poi decrescere e stabilizzarsi per periodi superiori ad 1 s circa. Prendendo in considerazione un sito caratterizzato da terreni sciolti (VS30 pari circa a 270 m/s) gli effetti risultano ancora più gravosi,

evidenziando una componente verticale circa doppia di quella orizzontale per intervalli di tempo maggiori.

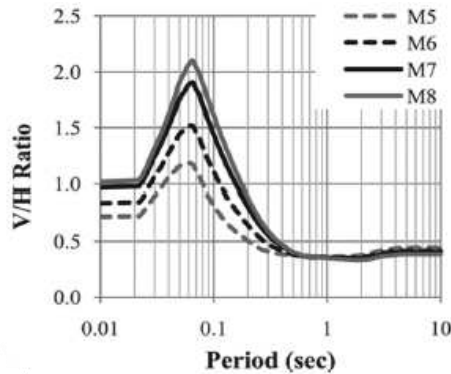


Figura 2_ V/H ratio per un terremoto strike-slip (faglia normale o inversa) a 5 km dall'ipocentro su terreni sciolti

Risulta dunque di fondamentale importanza seguire una progettazione consona che prenda in considerazione questo fenomeno. Tuttavia, i diversi codici di progetto non risultano adeguatamente esaustivi in materia di terremoti near-fault. Nell'UBC 1997 sono stati introdotti dei fattori amplificativi dello spettro elastico di progetto in modo uniforme in termini di velocità e accelerazione. Suddetti fattori amplificativi variano al variare della distanza di faglia, in particolare, per faglie locate a distanze inferiori di 2 km, l'amplificazione arriva ad essere compresa tra il 50 e il 100%.

Nell'Eurocodice 8 non sono presenti importanti indicazioni in materia, se non nella parte 2, dove, in materia di ponti, vengono citati i terremoti near-source imponendo l'utilizzo di specifici spettri di risposta per opere a distanze inferiori di 10 km dalla faglia.

Le prescrizioni normative presenti nella prima norma statunitense relativa all'Uniform Building Code (UBC 1997) sono state implementate negli anni nel documento di riferimento per la progettazione di edifici ASCE/SEI 7-22, nella quale è espresso che per edifici situati vicino faglia deve essere preso come riferimento uno spettro in accelerazione maggiore. In particolare, in quello che viene definito come "The risk targeted maximum considered earthquake (MCER)", deve essere considerato un rischio di collasso strutturale pari all'1% per un periodo di riferimento pari a 50 anni e va utilizzato un approccio deterministico basato sull'utilizzo di un fattore amplificativo di 1.8 applicato alla risposta mediana di un terremoto caratteristico relativo alla faglia

dominante. Appare comunque chiaro che la componente sismica verticale non è trattata in modo esaustivo nelle varie norme mondiali, ma in qualche modo viene ripresa da tutte. A titolo di esempio, si riporta in fig. 3 il confronto tra tutte le norme in vigore del rapporto VH considerato in esse.

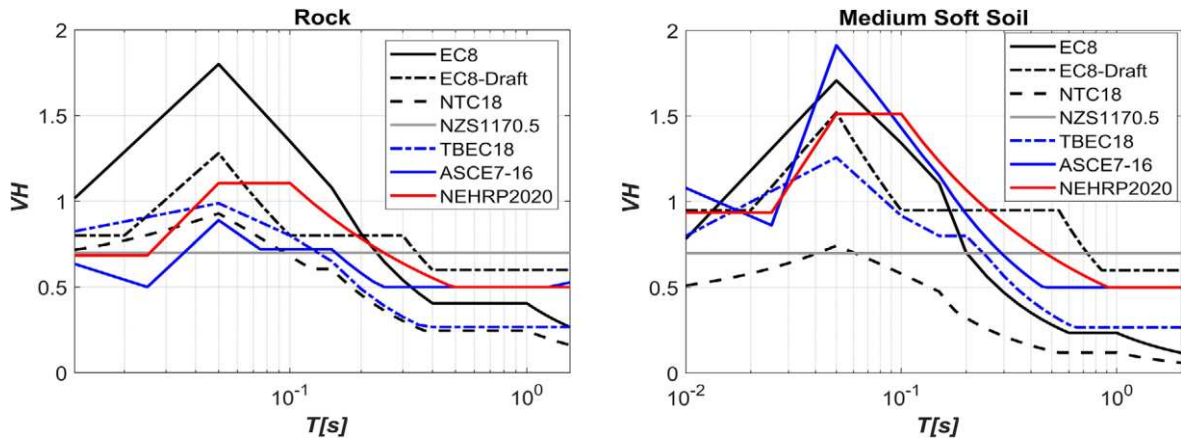


Figura 3 _Rapporto VH di progetto ottenuto per ogni norma (Ramadan et al, 2021)

La forte componente verticale presente nei sismi near-fault pregiudica, dunque, il funzionamento di tutti i sistemi di isolamento, in quanto la trazione sviluppata per cedimenti del terreno e gravante sui dispositivi (fling step) potrebbe risultare eccessiva. Ne deriva la necessità di studiare nuove soluzioni di isolamento sismico da applicare alla base degli edifici nei siti critici, come l'aggiunta di dispositivi dissipativi posti in serie o in parallelo con gli isolatori; soluzioni innovative in via di sviluppo e che verranno mostrate nei paragrafi successivi.

2.2. Terremoti Near-Fault in Italia

Si focalizza ora l'attenzione sulla situazione italiana, con riferimento ai sismi near-fault. Si è già visto come la componente verticale possa superare in maniera importante quella orizzontale e quindi fornire una domanda significativa alle opere ordinarie per siti con distanze inferiori a 15 km dalla faglia principale. Sebbene esempi per la stima dell'accelerazione orizzontale siano stati sviluppati (GMPEs) lo stesso non vale per quelli relativi alla

componente verticale; in particolar modo, essi non sono stati sviluppati fino alla fine del progetto NGA-West 2, nel quale si sono derivati modelli empirici per la stima dell'accelerazione di picco al suolo (Gulerce et al, 2017).

L'Italia si divide in due principali zone sismiche, in corrispondenza delle catene montuose delle Alpi e degli Appennini, le quali presentano, però, caratteristiche diverse di subduzione delle placche: nelle Alpi la placca Europea converge rispetto a quella Adriatica superiore (meccanismo di contrazione), mentre negli Appennini la placca Adriatica subduce sotto quella Europea (meccanismo estensivo).

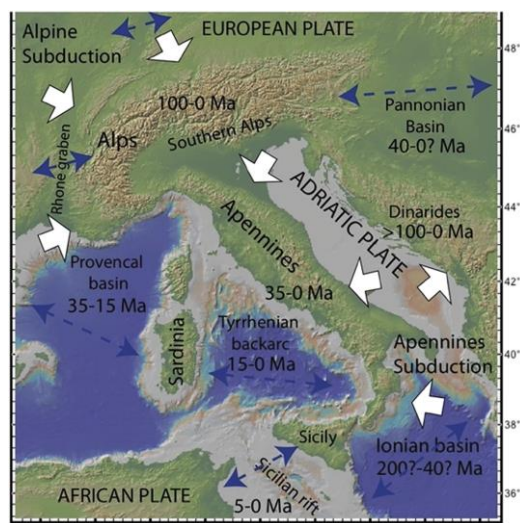


Figura 4_ Movimento delle placche (Doglioni et al, 2022)

Queste due catene hanno generato e generano tutt'ora la quasi totalità degli eventi sismici italiani, in media 15000-20000 all'anno. La maggioranza di questi si sono generati per il movimento estensionale dovuto alla subduzione appenninica. In contesti di faglie trascorrenti e contrattili l'energia immagazzinata è di tipo elastica, mentre in ambienti tettonici estensionali è di tipo gravitazionale, e da qui ne deriva una differenziazione della tipologia sismica in "elastoquakes" e "earthquakes". Inoltre, altra differenza risiede nel fatto che per un movimento estensivo delle placche la durata dell'evento sismico risulta maggiore, in quanto i volumi in gioco si muovono in direzione della forza di gravità, a differenza dei meccanismi tettonici dove l'andamento è opposto a quello gravitativo. Di conseguenza, stimati quelli che sono i diversi

volumi in gioco, si possono dedurre le diverse magnitudo massime che ogni zona d'Italia può avere, rappresentate in Fig. 5.

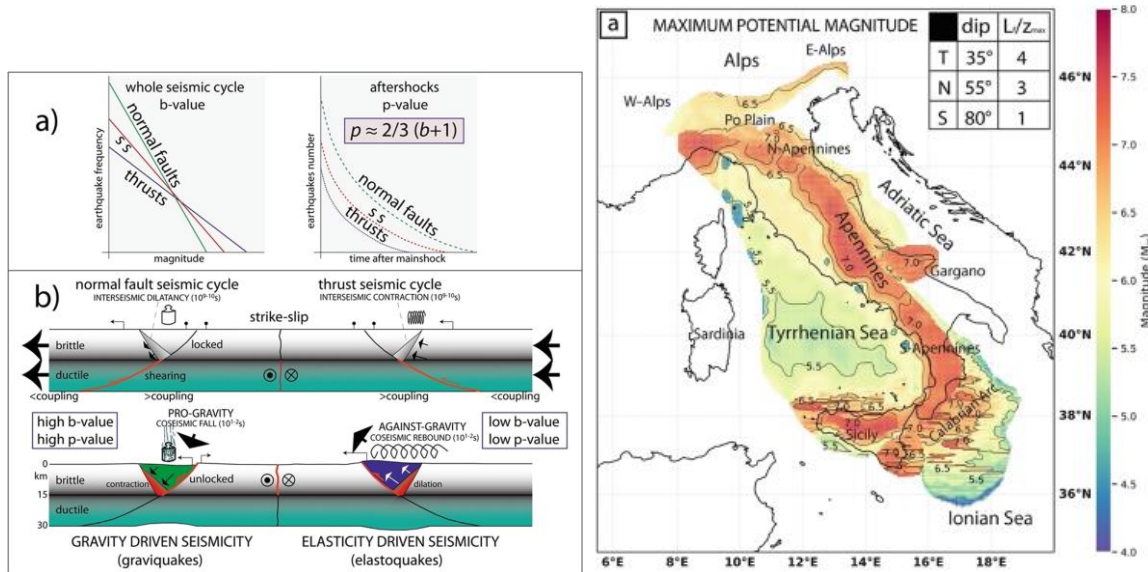


Figura 5_Differenza movimenti estensivo e tettonico a sinistra e Magnitudo massima per ogni zona d'Italia a destra (Doglioni et al, 2022)

Risulta dunque valida l'affermazione sopra riportata che vede i terremoti derivanti da un meccanismo di faglia estensivo di magnitudo maggiore rispetto a quelli di tipo tettonico; si nota infatti come in corrispondenza della catena Appenninica le magnitudo registrate siano sensibilmente maggiori, con medie che si aggirano attorno a $M_w=6.5-7$.

Gli effetti indotti da un sisma vengono definiti cosismici, e possono essere primari e secondari. Gli effetti primari sono quelli legati alle deformazioni istantanee e permanenti del suolo, definite come cosismiche, e sono comprese all'interno della faglia sismogenetica. Gli effetti secondari sono invece indiretti e relativi allo scuotimento della superficie terrestre, legato ai diversi tipi di onde sismiche (e quindi di vibrazioni). Le conseguenze delle vibrazioni non sono solamente connesse al danneggiamento degli edifici, ma anche con eventi geologici come frane, smottamenti o fenomeni di liquefazione. Grazie allo sviluppo di nuove tecnologie di cattura ed elaborazione dei dati post-sisma i satelliti riescono ad evidenziare in modo preciso quella che è l'area epicentrale interessata dalle deformazioni cosismiche. Ne consegue che è nell'area epicentrale (dominio attivo) mostrata in figura 6 che i movimenti verticali cosismici sono più ampi, e quando il terreno collassa verticalmente per effetto del sisma, il carico gravante su un edificio diminuisce e l'eventuale attrito tra i blocchi (si pensi ad un edificio in muratura) viene meno, facilitando il taglio

imposto dallo scuotimento orizzontale, sfociando in effetti maggiori, se non disastrosi (Norcia). Una tecnica d'acquisizione dati in termini di cedimento cosismico di un'area molto utilizzata è quella relativa alla metodologia inSAR. Tale metodo si basa sull'acquisizione di due immagini satellitari mediante lo stesso dispositivo, sulla stessa orbita e nella stessa posizione ma inizialmente in condizioni pre-sisma e successivamente in condizioni post-sisma (Liberatore et al., 2019).

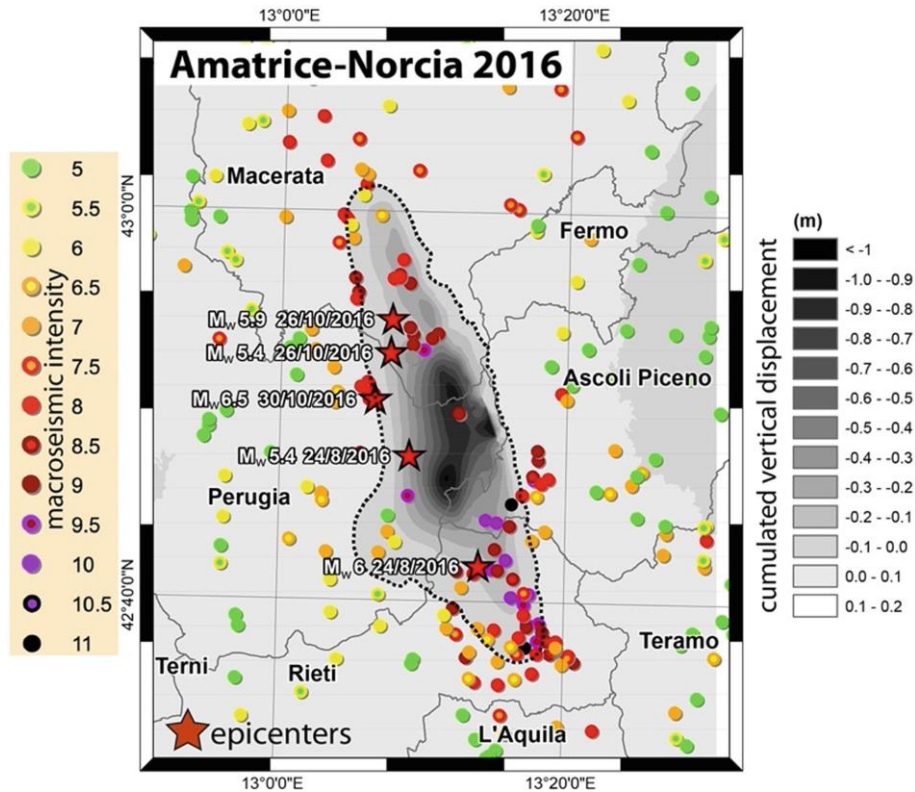


Figura 6_ Dominio attivo terremoto Umbria Marche 2016 (Doglioni et al, 2022)

In figura 6 si evince come le massime intensità sismiche durante gli eventi sismici del Centro Italia del 2016 siano state registrate all'interno della zona di subsidenza cosismica dedotta dai dati inSAR. Al di fuori di tale dominio le vibrazioni indotte vanno via via decrescendo come intensità, fatta eccezione di alcuni piccoli siti che hanno subito delle amplificazioni locali.

Risulta interessante analizzare quello che succede contemporaneamente all'interno e all'esterno della zona epicentrale. In particolare, si riporta un'immagine che mostra la differenza in accelerazione verticale e in movimento verticale accaduta a Norcia durante l'evento del 30 ottobre 2016 con $M_w=6.5$ che ha visto la distruzione del centro storico di Castelluccio.

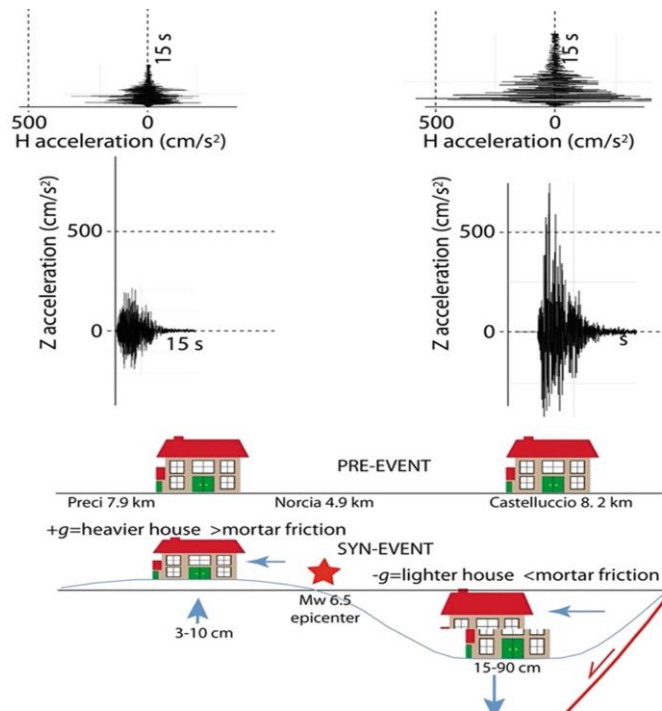


Figura 7_Accelerazione al suolo in alto; sollevamento e cedimento cosismico in basso (Doglioni et al, 2022)

Preci e Castelluccio sono due comuni della provincia di Norcia vicini tra loro. Lo stesso evento sismico ha causato nei due dei movimenti cosismici differenti; in particolar modo si evince che Preci è stato caratterizzato da un sollevamento cosismico, mentre Castelluccio da un cedimento. Questo ha causato nel secondo sito una diminuzione dello stato di compressione nei muri degli edifici, che, in concomitanza dell'azione tagliante maggiore dovuta allo scuotimento, ha portato al crollo. La porzione di terreno soggetta a scorrimento normale viene definita come volume “attivo”, in quanto il fenomeno di scorrimento si sovrappone con quello di taglio dovuto alle onde sismiche. Al di fuori di questa zona si trova quello che può essere definito come volume “passivo”, nel quale la suddetta sovrapposizione può essere trascurata.

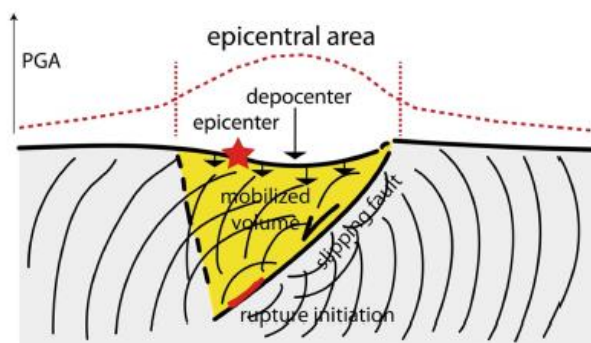


Figura 8_Mobilizzazione delle onde sismiche in concomitanza al cedimento indotto dalla faglia normale (Doglioni et al)

Inoltre, nella porzione di territorio nella quale i due fenomeni si sovrappongono, vengono registrati i valori maggiori di PGA, e questa può essere definita quella che fin qui si è chiamata “Area Epicentrale”, concetto che rende chiara la fig. 7 nella quale è illustrato che Castelluccio ha subito un’accelerazione maggiore rispetto a Preci.

Focalizzando l’attenzione sul sisma avvenuto il 30 ottobre 2016, che come già indicato, ha interessato principalmente il confine Marche-Umbria, è interessante studiare quella che è la componente verticale registrata dalle stazioni di CLO (Castelluccio) e CNE (Castel Sant’angelo sul Nera). Si riporta a tal scopo la figura 8.

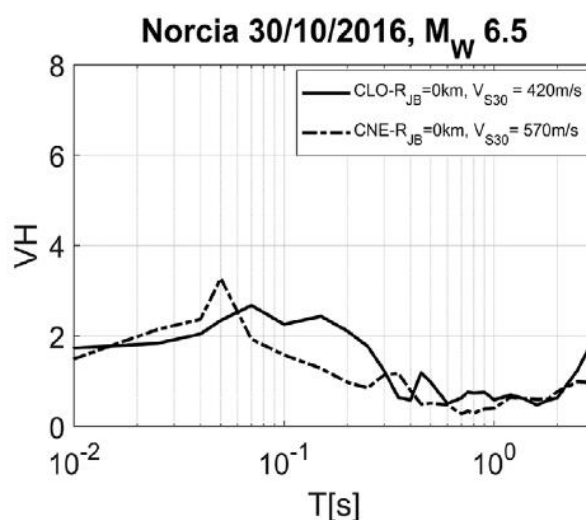


Figura 9_Rapporto V/H stazione CLO e CNE (Ramadan et al, 2021)

Nel presente elaborato si evince come la componente verticale, per periodi che vanno fino a 0,5 s circa, ha raggiunto e mantenuto un’intensità sismica pari al doppio di quella orizzontale. Il patrimonio delle costruzioni italiane è ricco di edifici bassi in muratura, e che quindi si affidano fortemente all’attrito presente

tra i blocchi. Le fluttuazioni del carico assiale influenzano fortemente la flessione e la capacità delle strutture a resistere a sollecitazioni taglianti, e tanto maggiore è questo effetto quanto più ci si avvicina alla sorgente. Di conseguenza è forte l'esigenza di studiare un approccio che consenta l'acquisizione e l'elaborazione di spettri verticali per la progettazione delle strutture. Si è visto che l'approccio migliore e più comunemente utilizzato è quello di generare il file relativo allo spettro verticale facendo uso di modelli empirici per il rapporto V/H (Ramadan et al, 2021). In particolare, si è voluto creare un "ground motion model" (GMM) per lo studio dello spettro in accelerazione, PGA e anche per la velocità di picco riferite ai sismi italiani. Il set di dati utilizzati fa riferimento, di conseguenza, alla situazione italiana, ed è stato denominato come ITA18. Nel presente, sono stati inseriti 5778 record di movimenti sismici per 156 eventi, dei quali il 90% risultano rappresentativi della sismicità italiana. La procedura si basa sull'utilizzo di un fattore d'aggiustamento per la componente verticale dei terremoti near-source, il quale viene calibrato in relazione al set di dati ITA18. Il risultato che si ottiene da tale approccio è un GMM empirico in termini di spettro di risposta (VH), PGA e PGV per terremoti superficiali in Italia. Il fattore di aggiustamento utilizzato "F_{ns}" (Fattore near-source) è calibrato utilizzando il dataset ITA18 e il dataset NESS, come mostrato in fig. 10.

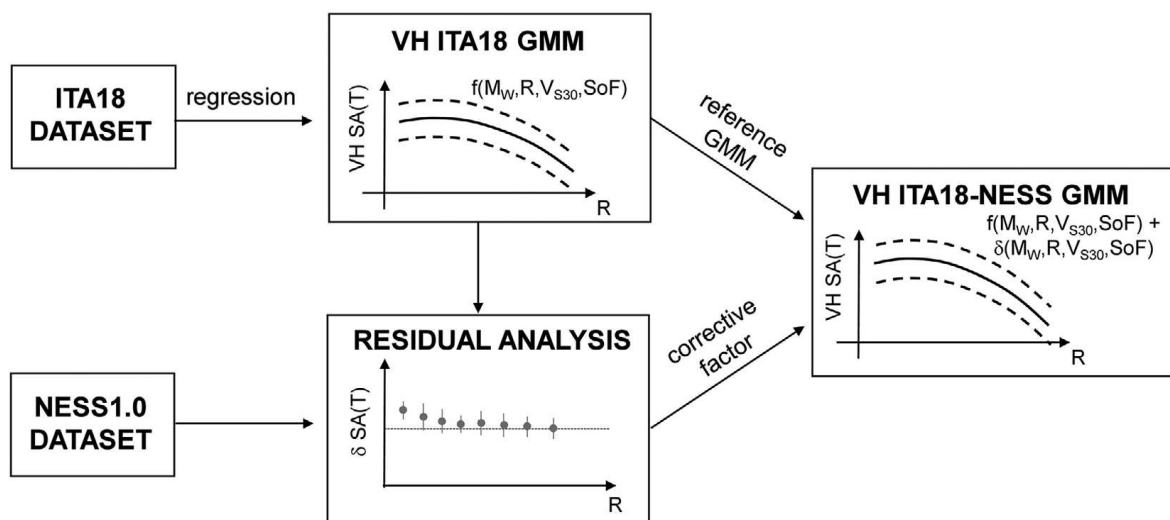


Figura 10_Procedura d'acquisizione del modello, partendo da dataset ITA18 e NESS (Ramadan et al, 2021)

Così facendo si riescono ad ottenere modelli realistici, sia in termini di VH che di H, anche per siti vicino alle sorgenti. L'applicazione del fattore near-source consente il miglioramento sulla previsione di un modello regionale basato esclusivamente sul dataset ITA18, il quale risente della vicinanza della faglia

(l'aggiustamento risulta essere significativo all'interno di un raggio di 10 km con centro locato nella faglia e per M_w maggiori di 6.5). È ovvio che un'adeguata calibrazione del modello basato su amplificazioni non lineari in funzione della distanza dall'ipocentro sarebbe più accurata, ma la suddetta procedura consente comunque una stima precisa e semplice per la valutazione del rischio sismico e per applicazioni ingegneristiche.

2.3. Fling Step (in riferimento al sisma del 30/10/2016 del Centro Italia)

Come già mostrato in precedenza, un sisma porta con sé effetti primari e secondari. Tra gli effetti primari spicca quello che è chiamato cedimento a gradino (o “fling step”). In particolare, l'energia elastica accumulata da due faglie per lungo tempo viene rilasciata improvvisamente, e si genera un rimbalzo elastico (componente dinamica del moto) e una deformazione statica del terreno (può arrivare ad essere dell'ordine di centinaia di cm). La misura di questi due può essere effettuata mediante utilizzo di strumenti accelerometrici, e risulta di notevole interesse nell'ingegneria, in particolar modo nelle applicazioni a edifici isolati alla base o strutture particolarmente estese come i ponti. La valutazione della componente di spostamento permanente del terreno però è tutt'altro che semplice, in quanto le onde sismiche registrate dagli strumenti non coincidono perfettamente con il reale movimento del terreno, in quanto sono presenti disturbi alle alte e basse frequenze o errori di correzione della baseline (attualmente, la maggior parte degli strumenti di elaborazione dati rimuovono il contenuto a bassa frequenza del segnale). Quest'ultima consiste nel correggere alcuni disturbi di lungo periodo sui segnali accelerometrici; il modo più semplice consiste nel sottrarre all'accelerogramma il suo valore medio, il quale dovrebbe essere nullo per assicurare che alla fine del moto il profilo delle velocità sia nullo. Un altro modo consiste nel sottrarre all'accelerogramma il valore medio del sisma pre-evento, qual ora gli strumenti di misura siano in grado di captare il moto prima che il sisma si verifichi. Altri metodi più sofisticati consistono nella suddivisione in intervalli del profilo delle velocità (integrale del profilo in accelerazione), nella stima delle derivate strumentali e successiva rimozione di esse. Un sisma, dunque, è caratterizzato da una componente di accelerazione (onda sinusoidale), dalla quale si risale anche alla forma della velocità e, quindi, dello spostamento, come mostrato in figura 11.

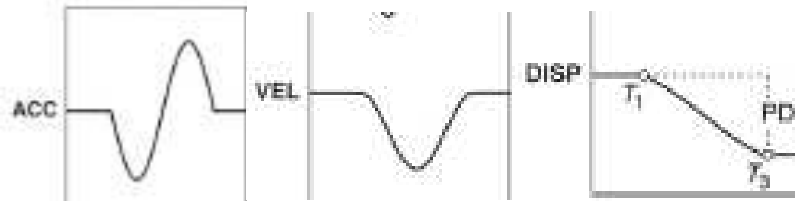


Figura 11 _componente di accelerazione, velocità e spostamento dovute ad un sisma (D'Amico et al, 2019)

Il contributo in accelerazione genera onde unilaterali di velocità e una componente lineare in spostamento, il quale può presentarsi anche dell'ordine di centinaia di centimetri (Permanent Displacement PD). La captazione di questi segnali di spostamento però non è semplice, in quanto sono presenti diversi errori strumentali che possono portare a stime distorte, come già sopra descritto. Risulta dunque importante migliorare gli schemi di elaborazione al fine di preservare i dati a lungo periodo in modo tale da analizzare i cedimenti tettonici quando presenti. Ad oggi i modelli per la valutazione dei cedimenti del terreno sono pochi (Abrahamson 2002, Kamai et al., 2014, Burks e Baker 2016). Nel presente paragrafo si andrà ad analizzare un modello sviluppato negli ultimi anni per la stima del fling step applicato al sisma del 30 ottobre 2016 a Castelluccio. Scopo della presente trattazione vuole essere quello di far comprendere l'importanza della stima del suddetto fenomeno e la sua influenza nel costruito, analizzandolo con il metodo proposto da d'Amico et al. nel 2019 in "Fling Effects from Near-Source Strong-Motion Records: Insights from the 2016 Mw 6.5 Norcia, Central Italy, Earthquake", denominato eBASCO (extended BASeline COrrrection), il quale vuole essere un metodo di correzione della linea di base per registrazioni accelerometriche vicine alle sorgenti. La soprariportata figura 27 mostra la forma ideale di un'onda d'accelerazione, la quale non si scosta dalla baseline, e che può essere integrata ricavando un profilo di velocità nulla pre e post evento sismico e un andamento dello spostamento pressoché lineare che tende ad assumere una forma costante. La realtà è ben diversa, in quanto il segnale risulta essere soggetto a picchi e distorsioni; nel metodo proposto da D'Amico si va a suddividere la storia temporale in tre periodi diversi, andando a trilinearizzare la risposta ottenuta in termini di spostamento integrando due volte il profilo di accelerazione.



Figura 12_Rispettivamente il profilo di accelerazione diviso in tre diversi intervalli, il profilo di velocità e lo spostamento trilinearizzato ottenuti con il metodo eBASCO (D'amico et al., 2019)

Il profilo di velocità fino a T1 (quindi il lasso di tempo che caratterizza gli istanti pre-evento) viene calcolato come segue:

$$V_i(t) = A_i t$$

Dove:

- t: tempo
- A_i : pendenza della linea che fitta il profilo di velocità pre-evento

Il profilo che va da T2 in poi (profilo post evento) viene ulteriormente corretto utilizzando un adattamento ai minimi quadrati, rimuovendo così il profilo lineare:

$$V_f(t) = V_{0,f} + A_f t$$

Con:

- A_f : pendenza della linea che fitta il profilo di velocità post evento
- $V_{0,f}$: intercetta

Il profilo corretto dell'accelerazione e dello spostamento vengono ottenuti integrando e derivando il corretto andamento delle storie temporali della velocità.

Nel profilo di spostamento si evidenziano diverse linee tratteggiate. Esse indicano la presenza di più soluzioni della convergenza per l'andamento

estrapolato. Questo perché esso dipende strettamente dalla scelta dei punti T1 e T2, e di conseguenza varia sensibilmente al variare dei due parametri. Il metodo eBASCO applica una procedura che diminuisce il grado di soggettività nella scelta dei parametri, in modo tale da ricavare il miglior profilo che meglio incorpora il reale comportamento del sito (si rimanda la lettura per la spiegazione del metodo all'articolo sopracitato). Si riportano di seguito i profili di spostamento ottenuti mediante diversi modelli, evidenziandone le principali differenze. Si nota come l'approccio mediante eBASCO (linea rossa) abbia fornito stime ragionevoli dell'abbassamento del terreno.

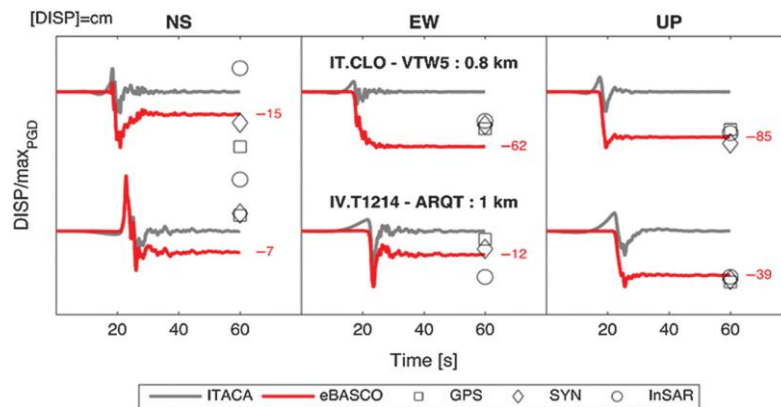


Figura 13_ Comparazione tra "italian accelerometric archive" (ITACA) e eBASCO. Vengono riportati anche i valori ottenuti mediante GPS (quadrati), inSAR (cerchi) e synthetic (rombi). Rispettivamente componenti Nord-Sud, Est-Ovest e verticale (D'amico et al., 2019)

La carenza di registrazioni vicino alle sorgenti rappresenta lo svantaggio delle equazioni predittive per il PD del terreno. Mettendo a confronto i segnali spostamento elaborati mediante ITACA ed eBASCO si vede come il primo metodo tagli i segnali di spostamento per basse frequenze, facendo tornare i profili di spostamento (e velocità) prossimi alla linea di base. Continuando in termini di differenza fra le due tipologie di dati, risulta interessante cogliere il confronto tra le forme d'onda di spostamento per le stazioni situate sopra e attorno alla faglia al variare della distanza dalla faglia RJB in figura 14.

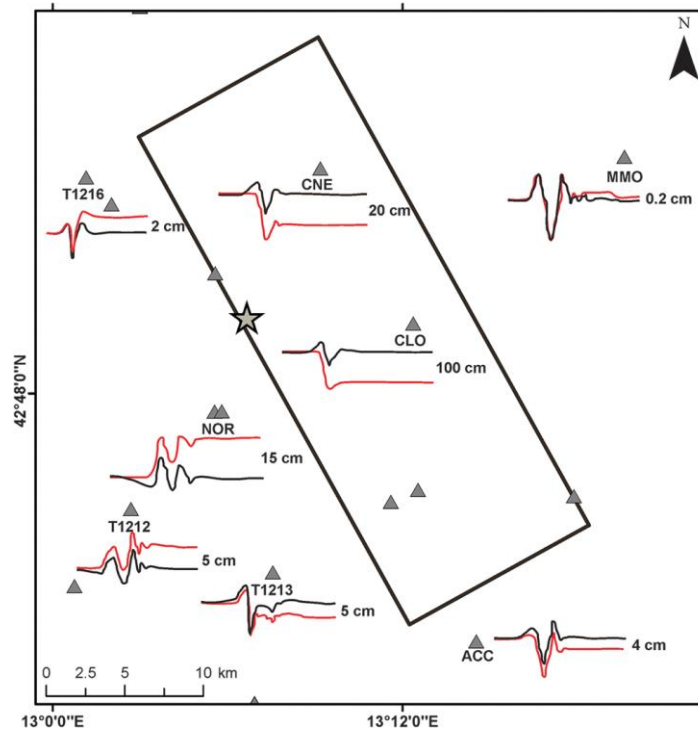


Figura 14 _profili di spostamento ITACA (in grigio) e eBASCO (in rosso) all'interno e all'esterno della faglia (rettangolo) (D'Amico et al., 2019)

Spiccano gli spostamenti verticali permanenti subito dai centri all'interno della faglia, con RJB < 3 km, evidenziando misure che vanno dai 15 cm ai 100 cm; in particolare, si sottolinea un cedimento registrato a Castelluccio di 100 cm. Misure che tendono ad annullarsi aumentando la distanza RJB, tendendo ad un'uniformità dei profili d'onda. Si vede come per distanze dalla faglia superiori a 10 km l'impatto della correzione della baseline risulta affievolirsi. Le differenze presenti sono dovute al fatto che lo schema di elaborazione ITACA rimuove la parte a bassa frequenza del segnale, mentre l'elaborazione eBASCO applica una correzione a tratti della baseline, mantenendo l'offset presente nel profilo di cedimento. Prendendo come riferimento soltanto la stazione di Castelluccio, si possono 1) notare i valori dello spettro in accelerazione, della velocità e dello spostamento subito dal sito, 2) confrontare le forme dei diversi diagrammi. Salta all'occhio però, osservando figura 15, come l'elaborazione alle basse frequenze, dovuta all'elaborazione dati ITACA, non pregiudica pesantemente il profilo in spostamento, a differenza di quello in accelerazione e velocità.

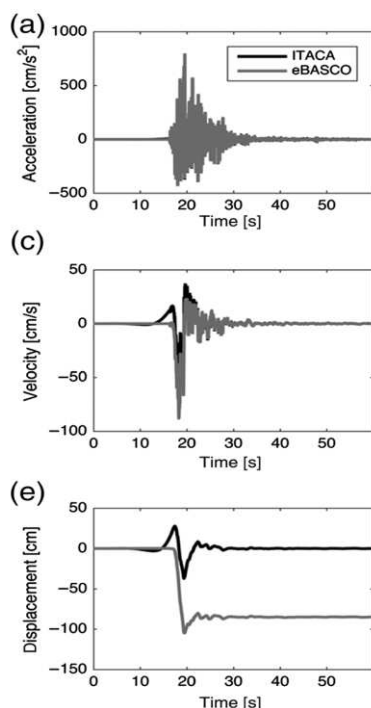


Figura 15_dati ITACA (in nero) e eBASCO (in grigio) della stazione di CLO (D'Amico et al., 2019)

Si può notare come per periodi superiori a 5 s i valori in spostamento differiscano più del 25% tra loro. È interessante, inoltre, indagare quello che è il profilo di spostamento; anzitutto si mostra una grossa differenza tra le due metodologie di acquisizione ed elaborazione dati, per le quali eBASCO fornisce dei risultati più gravosi (si ricorda che ITACA tende a tagliare i dati alle basse frequenze, sfociando in profili di spostamento e velocità nulli), ma ancora più di impatto è la deformazione cosismica registrata dell'ordine di 100 cm. Valori di cedimenti così alti possono essere visti molto bene a occhio nudo. A titolo di esempio, si evidenzia nella figura seguente, un esempio di scarpata cosismica avvenuta a Valle delle Fonti; si può notare una parte grigia esposta agli agenti atmosferici in contrasto con una più chiara, protetta dalle precipitazioni esterne in quanto si trovava sottoterra.



Figura 16_ Cedimento cosismico a Valle delle Fonti

3. Isolamento sismico alla base

L'isolamento sismico alla base, insieme alle tecniche di dissipazione d'energia, sono nuove metodologie sviluppate negli anni che permettono la realizzazione di nuovi edifici (e adeguamento degli esistenti) garantendo livelli prestazionali superiori a quelli delle strutture convenzionali. In particolar modo, la progettazione convenzionale antisismica degli edifici si basa sui concetti di rigidità e duttilità; il primo consiste nel conferire alla struttura un comportamento rigido per limitare i danni degli elementi non strutturali, mentre il secondo vuole conferire all'edificio un comportamento duttile per sismi con maggiori intensità di quello con cui è stata fatta la progettazione, percorribile attraverso la gerarchia delle resistenze.

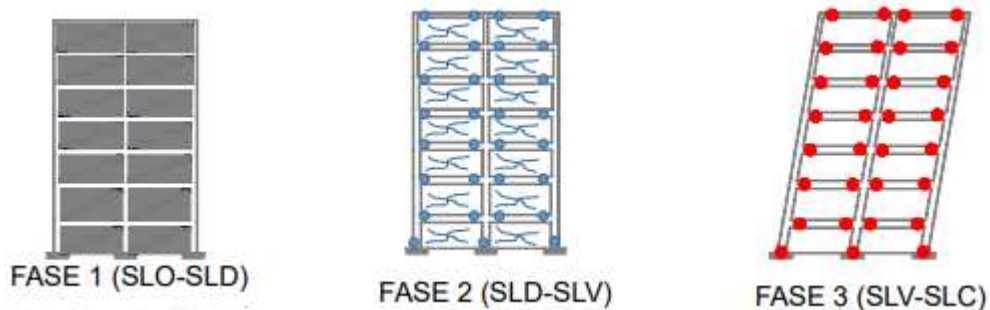


Figura 17_ FASE 1: edificio integro; FASE 2: Danneggiamento elementi non strutturali; FASE 3: Danneggiamento elementi strutturali e non strutturali senza crolli

Con l'introduzione dei sistemi di isolamento, invece, si riesce a raggiungere una condizione che non prevede danno agli elementi strutturali e non strutturali fino al raggiungimento dello SLV, riuscendo inoltre a garantire le verifiche di stabilità allo SLV e di funzionalità allo SLD per gli edifici in classe III e IV.

3.1. Sisma orizzontale

Scopo dell'isolamento sismico alla base è quello di disaccoppiare il moto della struttura da quello del terreno mediante applicazione di isolatori, i quali dovranno essere sufficientemente rigidi verticalmente per far fronte ai carichi verticali, ma deformabili sul piano orizzontale per consentire al terreno di spostarsi secondo l'input sismico, riuscendo a garantire un'oscillazione alla sovrastruttura che non comporti effetti indesiderati, conferendo anche la

possibilità di riprogettare la struttura considerando un fattore di riduzione delle forze in altezza q pari a 1. In particolare, i dispositivi d'isolamento devono:

- Avere bassa rigidezza orizzontale
- Avere buona capacità dissipativa
- Fungere da appoggi

Inoltre, caratteristiche aggiuntive possono essere:

- Rigidezza nei confronti delle azioni di piccola entità come vento, traffico o sismi con bassa energia
- Ricentraggio

Più nello specifico, attraverso l'introduzione dei dispositivi di isolamento, si va a innalzare il periodo fondamentale della struttura, abbattendo la domanda prestazionale richiesta durante un sisma in termini di accelerazione.

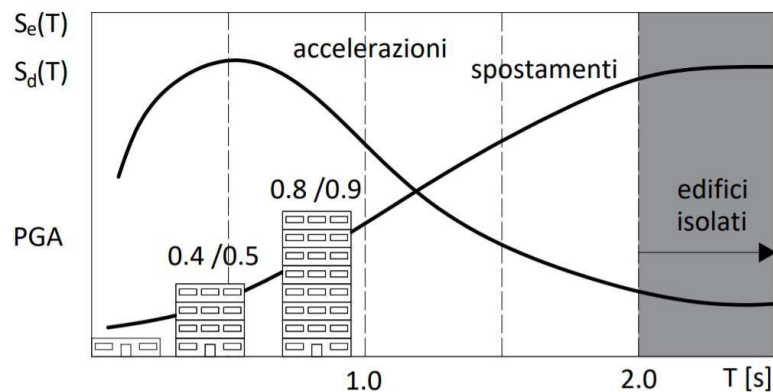


Figura 18_Funzionamento isolatori su spettro di risposta in accelerazione e spostamento

I parametri principali per la progettazione degli isolatori sono:

- K_b : è la rigidezza del sistema di isolamento
- C_b : è la dissipazione del sistema di isolamento

Mediante questi due parametri è possibile determinare quelli che sono:

- $\zeta_b = \zeta_{is}$ ovvero lo smorzamento di progetto dell'isolatore, definito come

$$\xi_b = \frac{c_b}{2m\omega_b} = \xi_{is}$$

- $T_b = T_{is}$, ovvero il periodo del sistema di isolamento, che in fase di progettazione viene inizialmente fissato dal progettista, per poi essere ricavato in modo effettivo una volta definito lo spettro di progetto.

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k_b}}$$

3.1.1. Isolatori elastomerici

Gli isolatori elastomerici sono costituiti da una gomma ad alto smorzamento vulcanizzata a piastre di acciaio intermedie e di estremità, come illustrato in figura 19.

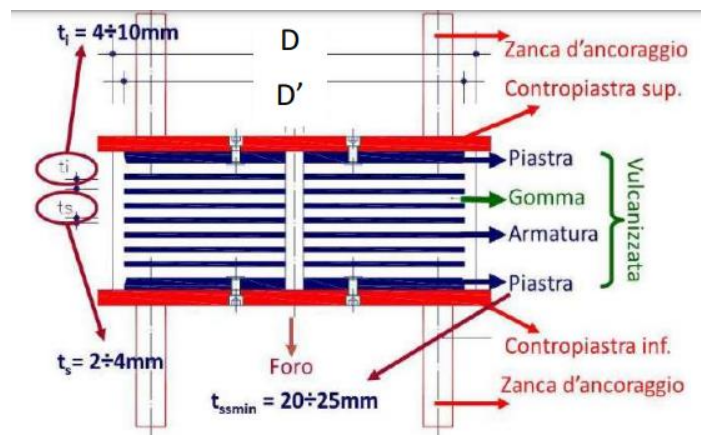


Figura 19_geometria isolatore

Vengono definiti due parametri univoci per tali dispositivi:

- **Fattore di forma primario** S_1 : Solitamente compreso tra 20 e 30, è indice di rigidità verticale.

$$S_1 = \frac{A_{compressa}}{A_{laterale}} = \frac{\pi \left(\frac{D'}{2} \right)^2}{D' \pi t_i} = \frac{D'}{4t_i}$$

- **Fattore di forma secondario** S_2 : Solitamente compreso tra 3 e 5, è indice di stabilità per carichi verticali in configurazione deformata.

$$S_2 = \frac{D'}{t_e} \quad t_e = \sum t_i$$

Se sottoposto ad un'azione orizzontale, l'isolatore si deformerà in corrispondenza degli strati di gomma, mentre i piatti in acciaio rimarranno indeformabili. Tale deformazione γ è un parametro fondamentale nella classificazione del dispositivo, e viene definita come:

$$\gamma = d/t_e$$

Dove:

- D è lo spostamento di progetto dell'isolatore
- t_e è l'altezza totale di gomma, definita come somma dei singoli strati.

Essendo la forza di richiamo dell'isolatore definita come

$$F_{is} = A_{is} \cdot \tau = A_{is} \cdot G_d \cdot \gamma = \frac{A_{is} \cdot G_d}{h_{is}} d$$

si può dedurre che la rigidezza a taglio è:

$$k_{is} = \frac{F_{is}}{d} = \frac{A_{is} \cdot G_d}{h_{is}}$$

Dove:

- A_{is} è l'area dell'isolatore

- h_{is} è l'area totale in gomma (=t_e)
- G_d è il modulo di rigidezza a taglio (secante), definito come

$$G_d = \frac{\tau_{\max}}{\gamma_{\max}}$$

In realtà, però, il comportamento della gomma dipende dall'ampiezza di deformazione; dunque, ne risulta che

$$k_{is} = \frac{G_d(\gamma)A_{is}}{h_{is}}$$

Si evidenziano dunque diverse caratteristiche, e, quindi, un diverso comportamento della gomma se sottoposta a deformazioni di entità variabile.

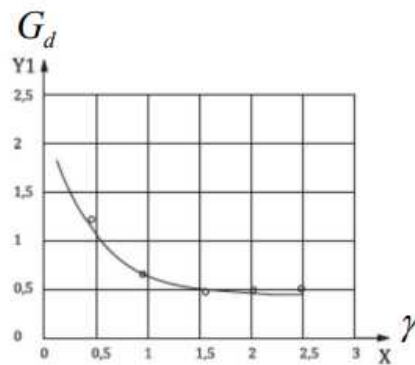


Figura 20 - Andamento modulo di taglio G

Tutti i parametri nominali dell'isolatore sono definiti sulla base di deformazione a taglio γ pari a 1.

Le verifiche degli isolatori secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni vengono eseguite allo SLC, e prevedono:

- 1) Verifica a massima deformazione dovuta al sisma

$$\gamma_s < \gamma_{t,\max}$$

- 2) Verifica alla massima deformazione locale

$$\gamma_t < \gamma_{t,\max}$$

3) Verifica a trazione delle piastre in acciaio

$$\sigma_s < f_{y,k}$$

4) Verifica carico massimo ammissibile

$$N_{\max} < N_{\text{adm}}$$

5) Verifica di trazione

$$T_{\max} < T_{\text{adm}}$$

In tale studio vengono prese in considerazione la 1) e la 4), essendo step fondamentali per il dimensionamento del dispositivo. Le verifiche previste dalla EN 15129 sono le stesse previste dalle NTC, con alcune differenze:

1) Verifica massima deformazione dovuta al sisma

$$\gamma_b \gamma_x d_{bd} = 1.15 * d_2$$

2) Deformazione locale (si rimanda alla UNI 1337-3)

$$\gamma_t = \gamma_c + \gamma_s + \gamma_a = 1.5V / (G_{\text{din}} S_1 A_r) + d_2 / t_e + a^2 2t_e \leq 5$$

- $V = N_{\max}$

- $a^2 (\sqrt{a_x^2 + a_y^2}) \frac{D^2}{4}$

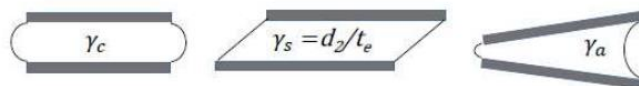


Figura 21 _deformazioni isolatore

3) Verifica a trazione delle piastre in acciaio

$$\sigma_s = 1.3V * (t_1 + t_2) / (A_r t_s) < f_{y,k}$$

- t_s : spessore piastre d'acciaio $\geq 2\text{mm}$
- t_1, t_2 : spessori strati di elastomero adiacenti alla piastra d'acciaio

4) Verifica carico massimo ammissibile

$$P_{cr,0} = \frac{\lambda G_{din} A_r D' S_1}{T_q} = \lambda G_{din} A_r S_1 S_2$$

Dove:

- $\lambda = 1.1 / 1.3$ (circolari/rettangolari)
- $A_r = A' = \pi D'^2 / 4$

Per $\frac{P_{cr,0}}{2} \geq N_{ed,max} \geq \frac{P_{cr,0}}{4}$ si ha che $N_{ed,max} \leq \frac{(1-0.7\delta)P_{cr,0}}{2}$

Per $N_{ed,max} \leq \frac{P_{cr,0}}{4}$ si ha che $\delta \leq 0.7$

Dove:

- $\delta = \frac{d_{ed}}{D'} = \frac{\gamma_x d_{bd}}{D'}$, $\gamma_x = 1.2 \rightarrow \delta = \frac{d_2}{D'}$

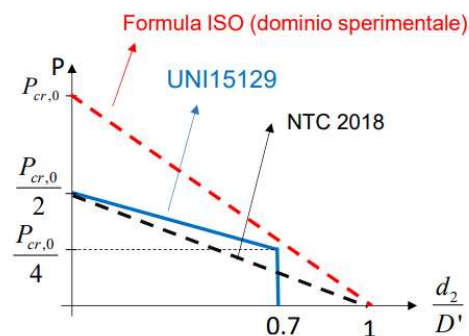


Figura 22 - dominio di resistenza (NTC, UNI 15129, sperimentale)

Si può vedere, dal grafico sopra riportato, come le norme UNI, per spostamenti δ minori di 0.7, consentono di eseguire la verifica con carichi critici maggiori rispetto alle norme italiane. Questo sottolinea come quest'ultime siano più

cautelative. Per tale motivo, nel presente elaborato, si è deciso di prendere in considerazione la verifica da NTC.

5) Verifica a trazione

$$\sigma_{tr} = \frac{T_{max}}{A_{is}} \leq \min (2G; 1 \text{ MPa})$$



Figura 23 _Esempio d'applicazione di un isolatore elastomerico al di sopra di un pilastro

3.1.2. Isolatori a scorrimento

Il primo isolatore a scorrimento brevettato fu il “pendolo Viscardini”, nel 1909, che prende il nome dall’inventore stesso. Tale tipologia di dispositivo si basava su un corpo sferico libero di ruotare in ogni direzione tra due superfici curve.

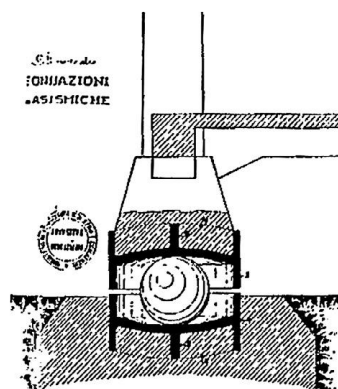


Figura 24 _pendolo Viscardini (Calvi et al., 2018)

Tale isolatore aveva caratteristiche di capacità verticale e orizzontale accettabili, paragonabili con quelle dei nuovi dispositivi, ma il difetto consisteva in una forza di primo distacco molto bassa, causando mobilità alla sovrastruttura anche per azioni di piccola entità (vento e azioni accidentali).

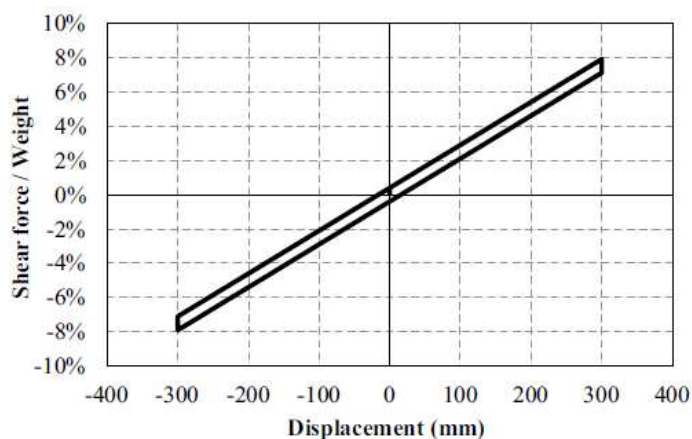


Figura 25 _legame costitutivo del pendolo Viscardini (Calvi et al., 2018)

Il pendolo Viscardini, negli anni (più precisamente dal 1987 circa), venne sostituito con un dispositivo più avanzato, il quale faceva affidamento sull'attrito: il Friction Pendulum System. Il sistema d'isolamento in questione riesce a soddisfare domande in spostamento elevate, caratteristica che rese subito efficace la sua applicazione in California (terremoto di Prieta 1989 e Northridge 1994). Questi erano basati su cuscinetto di scorrimento composto da materiale a basso attrito (Teflon), e prendeva il nome di PTFE. Il coefficiente d'attrito sviluppato nel dispositivo varia al variare del peso agente su di esso, con una legge non lineare.

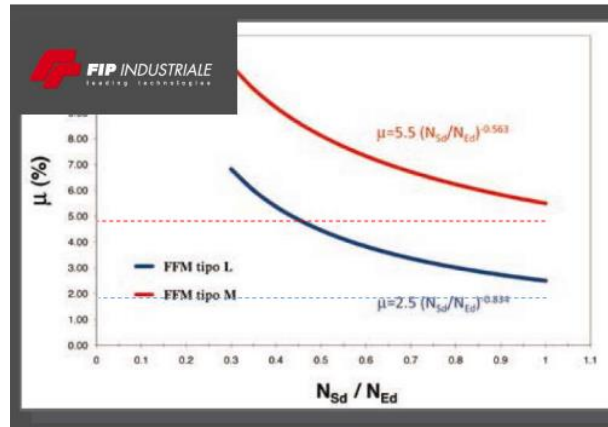


Figura 26 _legge di variazione del coefficiente d'attrito in funzione del carico agente. In blu quella per materiali a basso attrito e in rosso quella per medio attrito (Catalogo Fip Industriale)

Il comportamento del dispositivo può essere studiato come un sistema rigido plastico incrudente, come mostrato in figura 27:

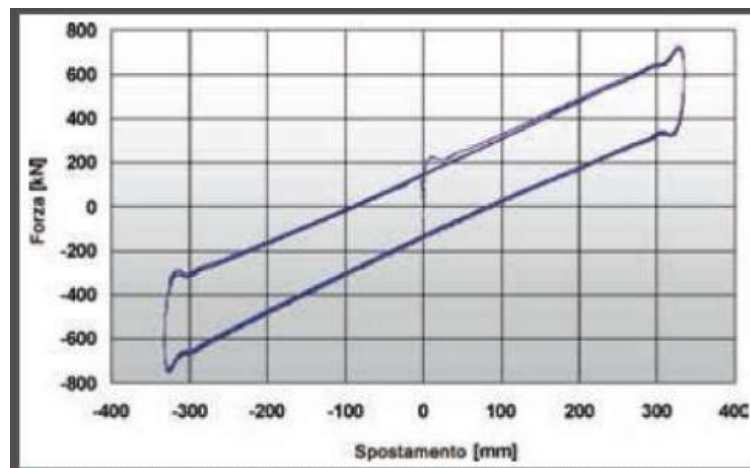


Figura 27 _legame costitutivo Forza spostamento per un isolatore ad attrito (Catalogo Fip Industriale)

per il quale valgono le seguenti:

- $T_{is} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d})}}$
- $\xi_{is} = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\frac{d}{\mu R} + 1}$

Il dimensionamento dei piatti e la corsa disponibile nel dispositivo sono parametri progettuali, e vengono definiti in fase di progetto.

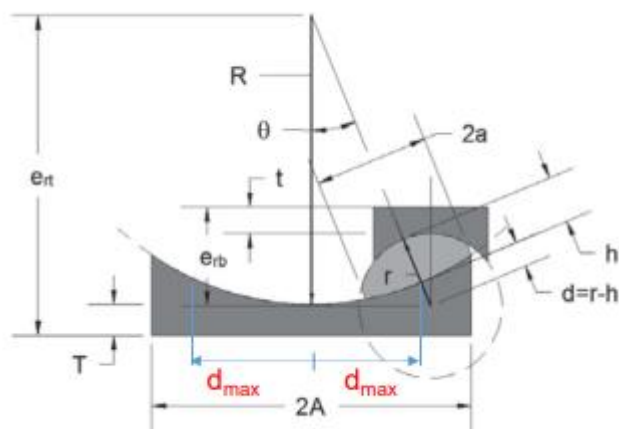


Figura 28_Schema funzionamento di un dispositivo ad attrito a singola superficie di scorrimento

Il limite maggiore degli isolatori a scorrimento è l'assenza di dispositivi di fine corsa. Più nello specifico, se dovesse esserci un sisma maggiore di quello con cui si è progettato il dispositivo, la pasticca potrebbe uscire dal suo alloggiamento e il sistema potrebbe, di conseguenza, andare in crisi. In realtà la pasticca presenta una resistenza maggiore se parte di essa esce dall'alloggiamento, in quanto la superficie di contatto diminuisce e la pressione aumenta. È ovvio, però, che questa è una situazione che deve essere scongiurata, in quanto porterebbe comunque l'isolatore in condizioni limite. In America sono stati brevettati dei dispositivi di ritenuta che fungono da fine corsa per la pasticca, ma non sono reperibili in Europa. Negli anni, nei vari continenti del mondo, la ricerca ha portato alla realizzazione di nuovi aggiornamenti del dispositivo, in modo tale da migliorarne la performance nei lati in cui presentava più carenze. In particolare, si evidenziano lo sviluppo e l'introduzione degli isolatori a scorrimento a doppia curvatura (Double Curvature Friction Pendulum) e quelli a tripla curvatura (TFP).

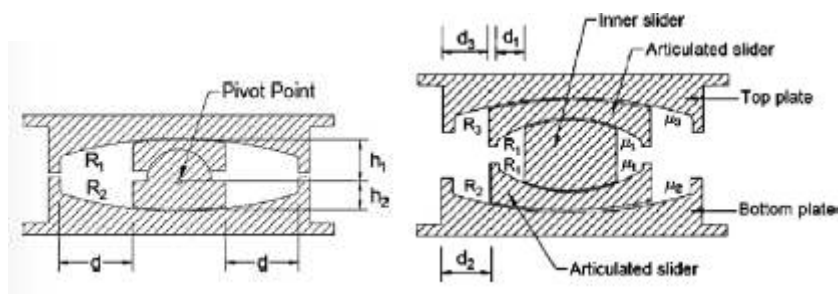


Figura 29_DCFP a sinistra e TFP a destra (Calvi et al., 2018)

Le verifiche da eseguire nei dispositivi sono diverse, molte garantite dal produttore. Tra le più importanti, in fase di progetto si elencano:

- **Verifica dello spostamento allo SLC:** Automaticamente verificata, in quanto la scelta del dispositivo viene fatta sulla base dello spostamento di progetto. Si ribadisce il concetto in materia la norma non considera coefficienti di sicurezza sullo spostamento di progetto, di conseguenza è sensibilità del progettista considerare un valore che consenta di tener conto di sismi maggiori di quello di progetto;
- **Verifica a trazione:** Non sono ammessi sforzi di trazione nei dispositivi.

3.2. *Sisma verticale*

Si è visto nei precedenti paragrafi come la componente sismica verticale sia fortemente dannosa per gli edifici (in combinazione con la sollecitazione ciclica di taglio dovuta allo scuotimento orizzontale del terreno), in particolar modo per le strutture abitative che compongono la maggioranza del patrimonio costruito italiano. Negli anni sono stati scoperti, messi in atto e sviluppati sistemi di isolamento sismico (isolatori in gomma e dispositivi a scorrimento a singola e doppia superficie ad esempio), i quali si basano sul disaccoppiamento del moto del suolo con quello della struttura, facendo oscillare quest'ultima a periodi maggiori di 2-2,5 secondi, diminuendo (o addirittura escludendo) il rischio di crollo o semplicemente di danneggiamento, il tutto a discapito di spostamenti maggiori (Clemente et al., 2019). Tuttavia, la ormai certa riduzione e gestione della componente orizzontale attraverso isolatori sismici sia cosa nota, non lo si può dire per quella verticale, che verrebbe comunque ancora trasmessa alla sovrastruttura, in quanto dispositivi che funzionano per movimenti orizzontali siano inefficaci per quelli in direzione Z. I dispositivi di isolamento elastomerici, come appena riportato, migliorano il comportamento sul piano orizzontale della struttura, ma la loro flessibilità più o meno accentuata provoca un cambiamento del contenuto in frequenza verticale della sovrastruttura, rischiando di far ricadere il sistema sul pianerottolo dello spettro in accelerazione lungo Z, amplificandone quello che è il moto sussultorio. Concetto diverso per quanto riguarda gli isolatori a scorrimento, i quali risultano più rigidi verticalmente e rendono il moto in direzione Z della struttura simile a quello che avrebbe se fosse a base fissa (Zhou et al., 2016). Le due soluzioni maggiormente studiate sono state quelle di sviluppare un sistema di isolamento tridimensionale (3D isolation system) che consenta appunto l'aumento del periodo di oscillazione della struttura (riferito al primo modo di

vibrare) nelle tre direzioni, e un accoppiamento del sistema di isolamento orizzontale con sistemi dissipativi verticali.

3.2.1. Uplift Prevention

Nella presente sezione viene analizzato un metodo in fase di sviluppo per la prevenzione ai terremoti con forte componente verticale. Come già esplicitato, la componente verticale sismica, in concomitanza ai cedimenti cosismici, può generare una decompressione sugli edifici e nei sistemi di isolamento. Se per le strutture in CA questo può essere più facilmente gestito, lo stesso non si può dire per i complessi in muratura, nei quali le tensioni di trazione causano una forte diminuzione della resistenza. Negli isolatori, il fenomeno è ancora più grave, in quanto i classici sistemi di isolamento non sono resistenti nei confronti degli stati di trazione (gli elastomerici possono sopportare una trazione fino a 2G o 1 Mpa, mentre non è ammessa negli isolatori a scorrimento). Una tecnica in fase di sviluppo viene definita come “uplift prevention” nella quale non si vuole far sollevare la struttura a priori. L’isolatore in questione prende il nome di “XY-FP isolator” e si basa sull’utilizzo di un dispositivo semplice ad attrito nel piano orizzontale (da cui FP) con un sistema di prevenzione al sollevamento aggiuntivo (Roussis e Constantinou, 2006). Il sistema è composto da due guide orizzontali poste perpendicolarmente tra loro che consentono il movimento bidirezionale (XY) scorrendo reciprocamente una sull’altra. Sul piano orizzontale, come mostrato in figura 30, lungo i due assi principali di scorrimento, il moto risulta disaccoppiato, di conseguenza si può esprimere il legame costitutivo del dispositivo rispetto al sistema di assi locali.

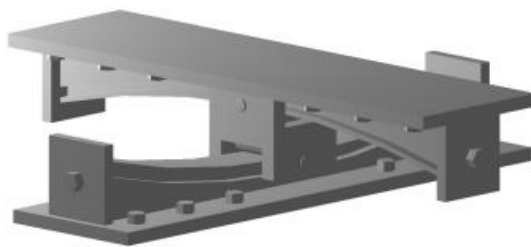


Figura 30_XY-FP Isolator (Roussis e Constantinou, 2006)

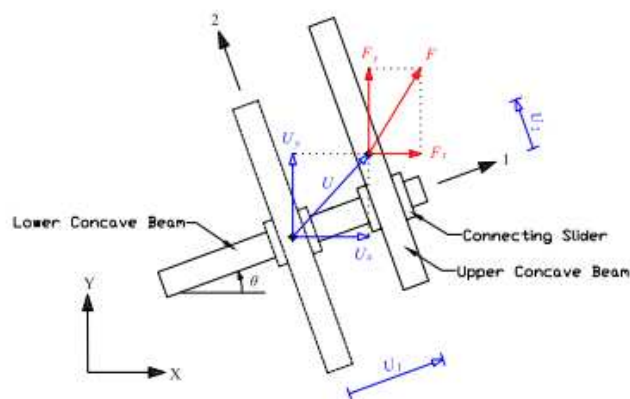


Figura 31 _funzionamento del dispositivo in pianta (Roussis e Constantinou, 2006)

Inoltre, il legame costitutivo dovrà essere espresso sia in termini di sforzo normale che di trazione. In generale, la forza normale che agisce sul dispositivo varia in funzione della componente verticale sismica, e può essere espressa come:

$$N = W \left(1 + \frac{\ddot{u}_{gv}}{g} + \frac{N_{OM}}{W} \right)$$

Dove:

- W è il peso agente sul dispositivo
- \ddot{u}_{gv} è l'accelerazione al suolo verticale
- N_{OM} è una forza addizionale dovuta agli effetti del momento ribaltante.

Di esempi negli anni di dispositivi a sollevamento controllato ve ne sono ormai diversi. Il primo fu un dispositivo accoppiabile in parallelo con sistemi di isolamento orizzontali, studiato in Giappone (Sumitomo Construction) nel 1990. Se ne trova un'applicazione nell'edificio Excel 10 Minami Koshigaya, e si basa su due bracci in acciaio ortogonali tra loro collegati alla base della struttura e alla fondazione che si incastrano nel caso in cui la struttura subisse un sollevamento che supera un limite progettuale. Un altro esempio fu implementato nel 1992 da Nagarajaiah et al. che prevede un accoppiamento di appoggi scorrevoli piani in Teflon e un'unità di ricentraggio composta da molle elicoidali; il tutto veniva protetto nei confronti del sollevamento da profili in acciaio a L. Lo stesso schema e concetto di questi dispositivi è stato poi ripreso sugli isolatori a superficie curva (Oakland Bay Bridge, San Francisco). Per quanto riguarda la

prevenzione all'uplifting in edifici isolati, è stato proposto da Logiadis et al. (1996) quelli che vengono definiti come “isolatori sismici precompressi”, dove vengono disposti cavi pretensionati che forniscono resistenza al sollevamento in termini di compressione aggiuntiva. Questo metodo può essere usato sia con isolatori elastomerici che a scorrimento.

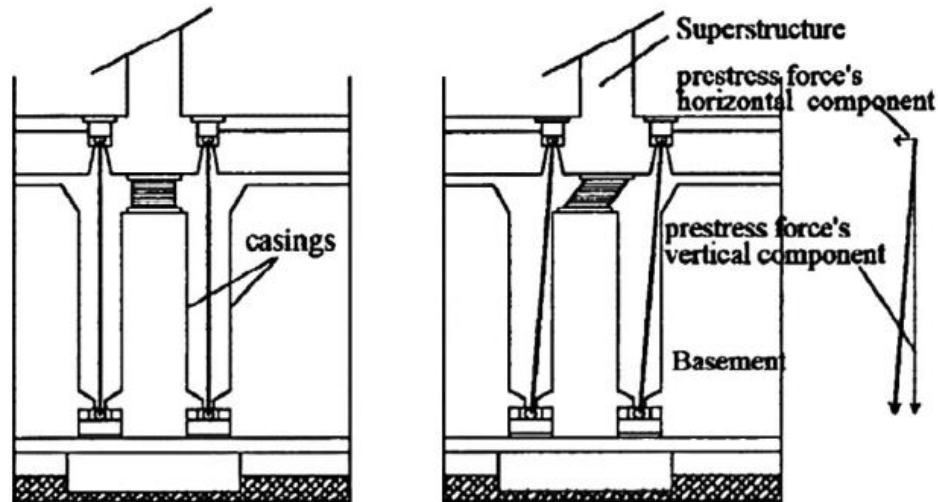


Figura 32_isolatori precompressi in gomma. A sinistra la configurazione indeformata e a destra quella deformata (Calvi et al., 2018)

3.2.2. 3D Isolation System

I primi esempi di tale tipo di isolamento risiedono in Giappone, dove inizialmente si è cercato di modificare i parametri progettuali degli isolatori in gomma vulcanizzata a piastre d'acciaio nella costruzione di un laboratorio in cemento armato e nella progettazione di un reattore raffreddato al sodio. Lo step successivo alla progettazione di un isolatore in gomma con parametri modificati è stato quello di utilizzare delle molle elicoidali che fossero flessibili nelle tre direzioni (metodo GERB). Applicazioni di tale metodologia risiedono nel collocamento di suddette molle al di sotto del Ministero giapponese dell'economia, del commercio e dell'industria (Fast Breeder Reactors o "FBR"). Tale metodo di progetto, partito dall'applicazione su un reattore giapponese, è stato poi esteso al campo edilizio, al di sotto di un appartamento di tre piani in CA a Tokyo. Nel panorama mondiale, negli ultimi anni, diversi tipi di dispositivi si stanno consolidando, che vanno dalla modifica progettuale di sistemi di isolamento in gomma, a dispositivi principalmente funzionanti ad aria, a molle tronco coniche e altri.

- **Thick-rubber-layer bearing (isolatori elastomerici a basso fattore di forma)**

Tali sistemi vennero inseriti in un edificio in CA dalla Kajima Corporation. In particolare, furono utilizzati 18 isolatori elastomerici in gomma naturale laminata a lastre d'acciaio affiancati da un sistema di smorzamento verticale formato da 14 barre d'acciaio e ammortizzatori ad olio per ridurre quella che è l'oscillazione in direzione Z.

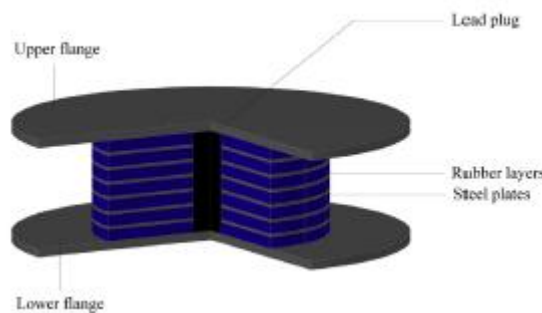


Figura 33_thick rubber layer bearing schema (Zhou et al., 2016)

La geometria ricercata prevede un diametro in gomma di 1600 mm e l'interposizione di dieci strati di materiale di spessore 30 mm l'uno.

Scopo dei suddetti dispositivi vuole essere quello di aumentare la flessibilità verticale.

Un altro studio sugli isolatori elastomerici per l'isolamento verticale è stato fatto negli Stati Uniti, dove si è cercato di portare la frequenza d'isolamento in direzione Z tra i 0,5 e i 3 Hz.

- **GERB system (molle elicoidali)**

Il sistema GERB consiste nella posa in opera di molle elicoidali in un dispositivo che funziona sia orizzontalmente che verticalmente. In particolare, le molle non forniscono smorzamento e di conseguenza risulta necessaria la combinazione con ammortizzatori. Di particolare importanza è la frequenza verticale, la quale viene resa maggiore di circa 3-5 volte quella orizzontale; questo per scongiurare eccessivi movimenti lungo Z dovute a variazioni di carico, vento e altri carichi.

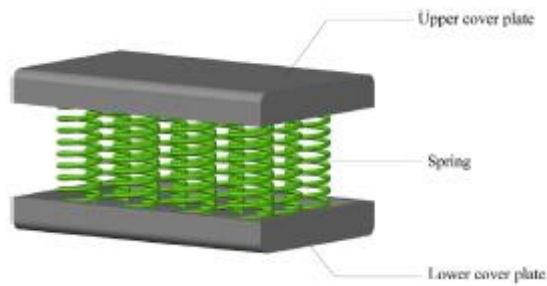


Figura 34_GERB System (Zhou et al., 2016)

Il limite principale di questi dispositivi risiede nell'accoppiamento che persiste fra le due componenti di movimento; più semplicemente avviene un disturbo dello spostamento orizzontale dovuto alle vibrazioni verticali indotte dalle molle a causa delle non linearità geometriche (Wang, 2019). L'applicazione delle molle GERB prevede, spesso, l'accoppiamento di un damper. I damper consistono in dissipatori fluido-viscosi basati sulla legge

$$F_d = cv^\alpha$$

Dove:

- F_d è la forza dissipata
- c è una costante di smorzamento
- v è la velocità
- a è una costante fornita dal produttore



Figura 35_dispositivi fluido-viscosi

Possono essere di tipo lineare o non lineare a seconda del valore di α ; nel caso in questione è stato considerato un coefficiente pari a 1, e di conseguenza

rientrano nel campo dei lineari. Il loro scopo si basa sul dissipare energia in modo proporzionale alla velocità con cui si muove il pistone all'interno.

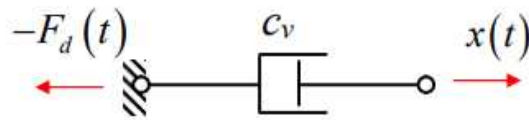


Figura 36_Funzionamento damper

Essendo dispositivi lineari, le caratteristiche principali sono che:

- L'energia dissipata è proporzionale alla pulsazione e all'ampiezza al quadrato

$$E_d^1 = \int_0^{2\pi/\omega} F_d(t) \dot{x}(t) dt = \pi c_v A^2 \omega$$

- La risposta non cambia con l'ampiezza
- Se raddoppia lo spostamento, raddoppia la forza dissipata

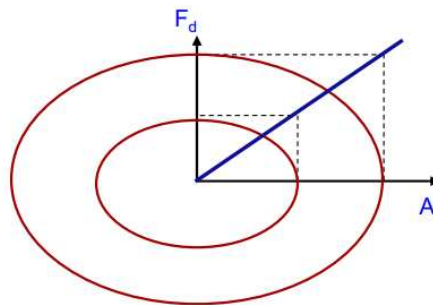


Figura 37_ciclo ampiezza-forza dissipata per un dispositivo fluido-viscoso lineare

Se posti in parallelo con un sistema rigido (una molla), si ottengono dei dissipatori viscosi rinentranti, ovvero dispositivi cilindro/pistone caratterizzati da un legame costitutivo in cui la forza di reazione F dipende sia dalla velocità v che dallo spostamento x secondo la legge:

$$F_d = Kx + cv^\alpha$$

Dove:

- K è la rigidezza della molla
- X è lo spostamento subito dalla molla

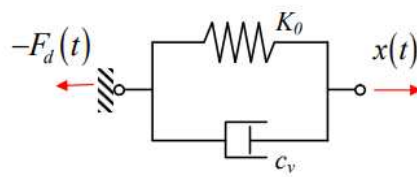


Figura 38_Schema di funzionamento di un dispositivo viscoso

In generale, i dispositivi viscosi:

- Hanno un'adeguata rigidità e dissipazione
- Hanno le caratteristiche variabili con la velocità
- Sono ricentranti
- Non hanno bisogno di sostituzione dopo un sisma
- Sono efficaci per piccole vibrazioni
- Sono molto sensibili alla temperatura

L'accoppiamento di un sistema di dissipazione verticale e le molle GERB viene chiamato "Base Control System" (BCS). In particolare modo, le molle sono disposte sotto la base della struttura per sostenere il carico verticale. Non c'è quasi nessuna forma di dipendenza tra i valori di rigidità orizzontale e verticale, pertanto, la descrizione numerica dei dispositivi è relativamente semplice.



Figura 39_Applicazione BCS (Nawrotzki et al., 2020)

- **Rolling Seal Type air spring (molle ad aria)**

I rolling seal type air spring sono dispositivi di isolamento orizzontale e verticale che si basano sulla collaborazione di un cuscinetto in gomma laminata

(funzionante in direzione orizzontale) con una molla a sospensione pneumatica (o ad aria) che funziona in direzione verticale. In figura 40 si mostra uno schema del dispositivo in questione: compartimento d'aria avente diametro di circa 1,4 m e 3 m di altezza; la pressione di progetto a riposo è di 1,6 Mpa, studiata per arrivare a 2 Mpa in condizioni sismiche; la frequenza target si aggira intorno ai 0,5 Hz.

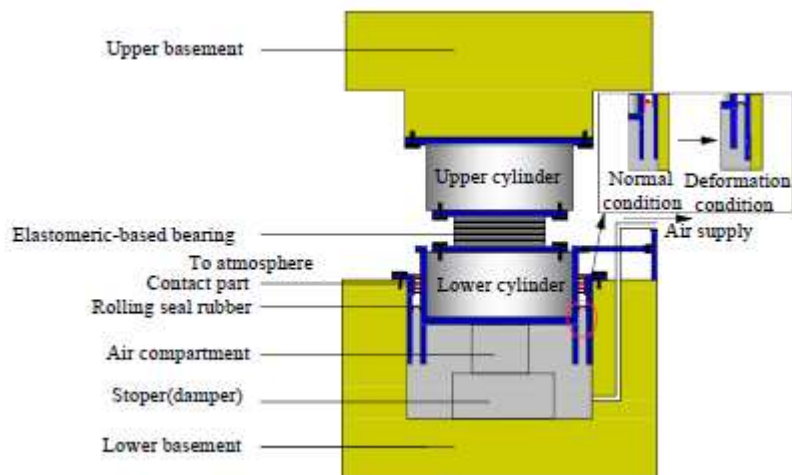


Figura 40_rolling seal type air spring (Zhou et al., 2016)

Questi dispositivi dovrebbero essere accoppiati con dei sistemi di soppressione al rocking, in quanto tale fenomeno può instaurarsi poiché il centro di massa dell'FBR e del piano di isolamento non coincidono (più precisamente, quest'ultimo si trova ad una quota inferiore). Il movimento oscillatorio che ne deriva può aumentare gli spostamenti e le accelerazioni in direzione orizzontale subite dalla sovrastruttura. Inoltre, l'effetto rocking può aumentare la componente orizzontale in termini di forze e spostamenti dei dispositivi posizionati nelle parti più limitrofe della pianta. Una soluzione trovata è quella di interporre perimetralmente alla pianta dei sistemi idraulici che controllino l'oscillazione della sovrastruttura.

- **Cable reinforced air spring**

Come illustrato in figura 41, il concetto di isolamento alla base che viene proposto è quello di una molla pneumatica il cui scopo è quello di protezione ed isolamento delle strutture mediante l'utilizzo di aria compressa.

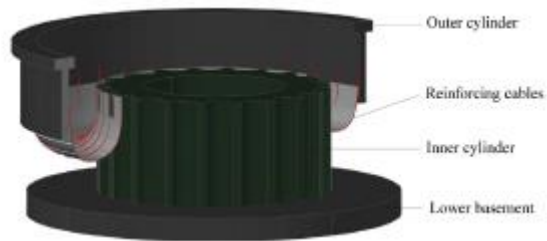


Figura 41 _ Schema cable reinforced air spring (Zhou et al., 2016)

Il dispositivo è composto da un foglio in gomma compresso fra due cilindri (interno ed esterno), entrambi solidali ad un basamento (il cilindro interno risulta solidale al basamento inferiore e quello esterno al basamento superiore). Generalmente, il cilindro interno misura un diametro di 6 m, mentre quello esterno 8 m, dimensioni che forniscono una capacità di spostamento orizzontale di 1 m. Lo spostamento verticale viene garantito dalla distanza tra la parte superiore del cilindro interno e il basamento superiore. L'altezza del cilindro interno misura circa 3 m, e l'aria pressurizzata tra i due cilindri ha una pressione di 1,4 MPa. Mediante l'utilizzo di tali dispositivi si riesce a garantire sia lo spostamento in direzione orizzontale che verticale, concetto che garantisce l'isolamento 3D ricercato mediante l'utilizzo di un solo dispositivo.

- **Hydraulic 3D isolation system (sistemi idraulici)**

Come riportato in figura 38, lo schema di funzionamento si basa sull'accoppiamento di un dispositivo formato da un isolatore in gomma alla base sopra al quale alloggia un cilindro a funzionamento idraulico (fig. 42a) e un banco di accumulatori contenenti azoto pressurizzato (fig. 42b), il quale viene regolato a pressione per fornire resistenza nei confronti dei carichi verticali di servizio.

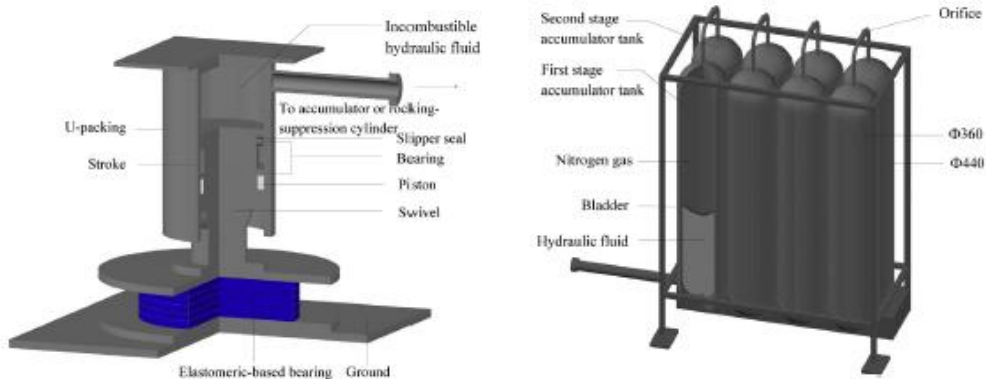


Figura 42a) Isolatore; b) accumulatore (Zhou et al., 2016)

Il principio di funzionamento è simile a quello visto per le molle ad aria, con la differenza che qui la pressione dell'aria in condizioni di esercizio viene portata fino a 15 Mpa, mentre in condizioni sismiche fino a 20 Mpa. Le principali attenzioni da porre al sistema sono riferite all'attrito pistone-cilindro e il raggiungimento dello smorzamento viscoso desiderato.

- **Coned disk springs (Molle a dischi tronco-conici)**

Sistemi di isolamento molto versatili composti da molle a forma conica progettate per fornire una frequenza verticale che può arrivare ad 1 Hz con diametri esterni che possono aggirarsi intorno ad 1 m e diametri interni di 0.5 m.

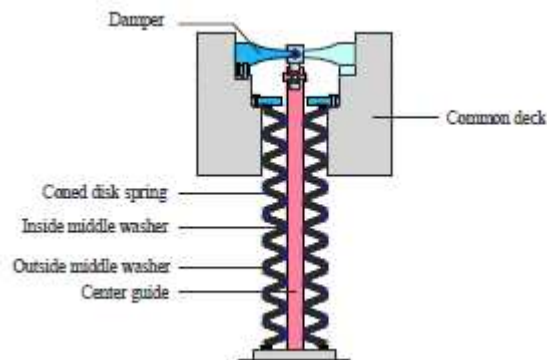


Figura 43_Coned disk spring (Zhou et al., 2016)

Agendo sui parametri progettuali si può variare il movimento verticale permesso dai dispositivi. Lo smorzamento fornito dal sistema è dovuto ad ammortizzatori cedevoli in acciaio. L'accoppiamento di questi sistemi con dispositivi in gomma che funzionano per i movimenti orizzontali permette di raggiungere l'isolamento 3D. Esperimenti condotti da Fujita et al. hanno confermato il funzionamento di questi sistemi, con piccole componenti di rocking. In particolare, l'applicazione dei dispositivi ha ridotto la frequenza verticale in modo significativo per periodi minori di 0,15 s; in contemporanea, riduzioni maggiori in frequenza sono state registrate anche per la componente orizzontale. Lo schema geometrico è basato su una piastra di collegamento superiore, molle a disco coniche impilate tra loro, una guida verticale e una piastra inferiore. È di particolare importanza la rigidità verticale del dispositivo, in quanto nell'insieme va sostenuta la sovrastruttura, altrimenti

questa sarà libera di tremare o ribaltarsi se sottoposta ad azioni orizzontali (Wang, 2019).

In sintesi, si sono mostrati quelli che sono ad oggi i principali sistemi che permettono un isolamento 3D delle opere. Vengono ora riportate le principali caratteristiche per ognuno di essi (estratto da “Potentiality of Using Vertical and Three-Dimensional Isolation Systems in Nuclear Structures” di Zhou et al., 2016).

DISPOSITIVO	FREQUENZA VERTICALE (Hz)	FREQUENZA ORIZZONTALE (Hz)	NOTE
Thick rubber-layer bearing	3-8	0.3-0.5	-
GRB System	3-5 volte quella orizzontale	-	Accoppiamento moto X-Y e Z
Rolling seal type air spring	0.5	0.36	Richiedono soppressione del rocking
Cable reinforced air spring	0.35	0.27	-
Hydraulic 3D isolation system	0.5-0.67	0.54	-
Coned disk springs	1-3	0.5	Minor amplificazione della risposta verticale per basse eccitazioni

4. Caso studio di Castelluccio

Castelluccio è un piccolo paese in provincia di Norcia (1452 m s.l.m.), all'interno del parco nazionale dei Monti Sibillini, caratteristico per i suoi vasti campi di fiori che si estendono per gran parte del sito, meta turistica per molte persone. La costruzione di edifici, negli anni, è stata resa molto compatta, e ha interessato principalmente la porzione a Sud del colle, in quanto più esposta al sole.

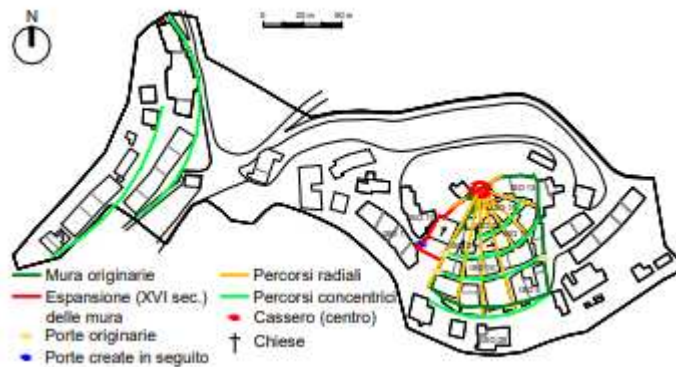


Figura 44_ orografia Castelluccio (Valluzzi et al., 2007)

Il centro era circondato da una cinta muraria allargata nel 1550, in modo tale da comprendere al loro interno la chiesa di S. Maria Assunta. Il corpo architettonico del paese presentava una variabilità di casistiche. In particolare, si possono notare forti aggregazioni di edifici, ma anche strutture isolate, per lo più comprendenti stalle, chiese e singole abitazioni isolate.

4.1. Terremoto Umbria-Marche 2016: Castelluccio di Norcia

La mattina del 30 ottobre 2016 venne registrata nel centro Italia un terremoto di magnitudo 6,5 con epicentro tra Norcia, Preci e Castelsantangelo sul Nera (Ramadan et al, 2021). La violenta scossa causò il crollo della Basilica di San Benedetto (Norcia), riducendo a macerie gran parte dell'edilizia storica del posto, ridusse in macerie il centro di Castelluccio (Norcia) e molte persone persero la vita. Il presente sisma ebbe inizio il 24 agosto 2016, scossa che segnò l'avvio della sequenza sismica che si propagò tra Amatrice, Norcia e Visso, con epicentro registrato tra Accumoli e Arquata del Tronto, provocando 299 vittime. Per comprendere in maniera più precisa l'accaduto, nel presente paragrafo si analizza la situazione pre e post sisma, con riferimento al centro

storico di Castelluccio di Norcia, evidenziando quelle che erano le principali vulnerabilità sismiche e analizzando gli interventi in fase di studio.

Castelluccio è un paese compreso tra le catene montuose del Monte Vettore e del Monte Patino particolarmente sensibile a scosse sismiche, di cui si hanno notizie a partire dal 1328, anno nel quale è stato registrato un sisma di forte intensità che ha causato il danneggiamento di molti edifici nel territorio nursino. Il sito presenta la forte presenza di rocce calcaree con intercalazioni silicee (circa tra il 5% e il 10%), caratterizzate dalla successione geologica SFLPS per i primi 10 m di profondità e l'unità LPS per profondità superiori ai 20 m. Da tali informazioni risulta possibile classificare il terreno in categoria B. L'altopiano in cui è situato il centro presenta un dislivello di circa 100 m dai terreni formanti le piane, evidenziando delle pendenze medie dei versanti intorno al 45%.

Nonostante la notevole eterogeneità relativa al patrimonio edilizio presente fino al 2016 nel territorio, alcune similitudini possono essere riscontrate tra gli edifici. Più nello specifico si evidenziano:

- Discontinuità tra gli aggregati dovute a differenti momenti di costruzione;
- Eterogeneità dei materiali utilizzati e dubbi sulla loro efficacia (pietrame);
- Sfalsamenti tra edifici dovute alla morfologia tipica di un pendio;
- Irregolarità in pianta e in altezza;
- Aperture nei complessi in muratura;
- Interventi di consolidamenti non eseguiti in maniera opportuna.



Figura 45_Vulnerabilità sismiche presenti negli edifici all'inizio degli anni 2000 (Valluzzi et al., 2007)

Prima degli anni 2000 la fascia appenninica umbro-marchigiana è stata sede di rilevanti sismi, studi geotecnici eseguiti in quegli anni avevano già dimostrato come la particolare conformazione geomorfologica e geologica del terreno poteva essere sede di amplificazioni gravose dei sismi. Uno studio di vulnerabilità sismica del paese, eseguito nel 2007 da Valluzzi et al., e riportato in “Analisi di vulnerabilità sismica degli aggregati storici: il caso di Castelluccio di Norcia”, aveva già dimostrato come gran parte degli isolati presentava giudizi molto severi, come riportato in figura 46.

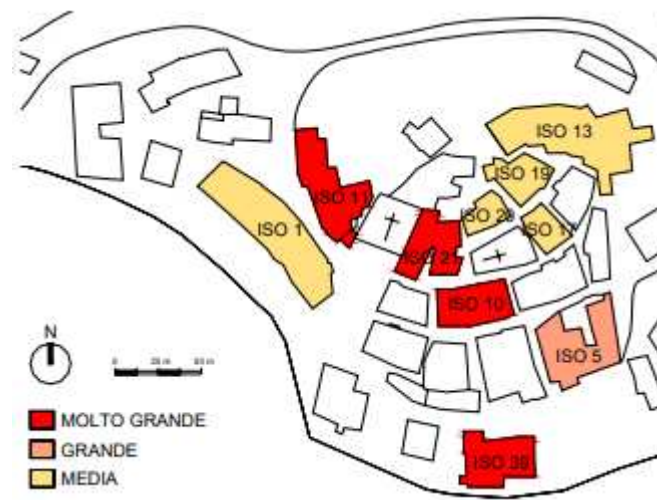


Figura 46 _Analisi di vulnerabilità sismica degli isolati (Valluzzi et al., 2007)

Lo studio sopracitato aveva, dunque, già evidenziato la precarietà degli edifici nei confronti di possibili cinematici fuori piano, in quanto le stesse verifiche non risultavano soddisfatte.

Come già sopracitato, il sisma del 30 ottobre 2016 rase al suolo il centro di Castelluccio, sottolineando l'inadeguatezza delle costruzioni presenti per far fronte ad un terremoto come quello in questione. In particolare, si evidenziano picchi in accelerazione in direzione verticale pari al doppio dell'accelerazione di gravità. I danni al paese sono stati molti; tra crolli di abitazioni e edifici si sono registrati abbassamenti fino a 100 cm (Vedi §2.3). I danni sono stati enormi, con crolli della maggior parte delle abitazioni, come mostrato nelle immagini a seguire.



Figura 47_spaccatura Monte Vettore (immagini Protezione Civile)



Figura 48_Castelluccio post sisma 2016 (immagini Vigili Del Fuoco)



Figura 49_Castelluccio post sisma 2016 (Vigili del Fuoco)



Figura 50_Castelluccio post sisma (Vigili del Fuoco)



Figura 51_Castelluccio post sisma (Vigili del Fuoco)



Figura 52_Castelluccio post sisma (Vigili del Fuoco)



Figura 53_Castelluccio post sisma 206 (La Repubblica)

Recentemente sono partiti studi e progetti che hanno come scopo quello di far rinascere il borgo di Castelluccio mediante tecnica di isolamento sismico. In particolar modo, si evidenzia il progetto che vede Castelluccio risorgere al di sopra di una piastra in calcestruzzo armato isolata sismicamente alla base. Intervento che si estende per oltre 6000 m² in pianta e 25 m in altezza.

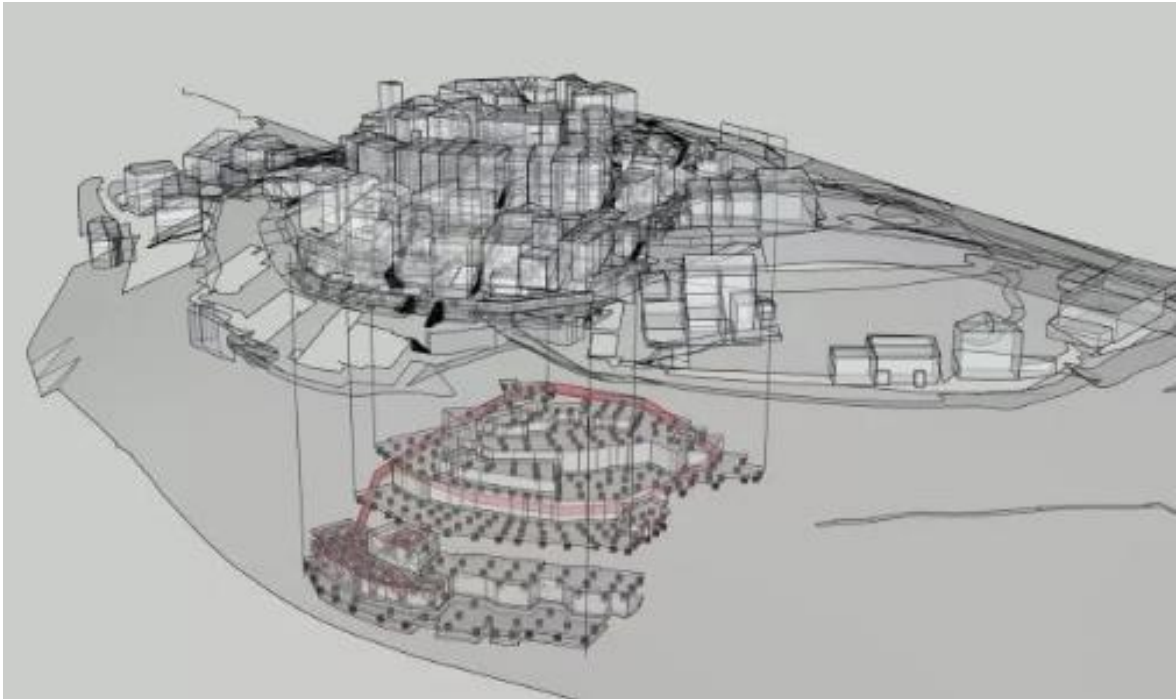


Figura 54 _tecnica di ground isolation (Mezzi, 2021)

4.2. *Geologia e geomorfologia del sito*

Il sito presenta la forte presenza di rocce calcaree con intercalazioni silicee (circa tra il 5% e il 10%), caratterizzate dalla successione geologica SFLPS per i primi 10 m di profondità e l'unità LPS per profondità superiori ai 20 m. Da tali informazioni risulta possibile classificare il terreno in categoria B. Le analisi effettuate nel versante posto a Nord del colle hanno ipotizzato la possibile presenza di un fenomeno gravitativo causato dallo sciame sismico del 2016.

L'altopiano in cui è situato il centro presenta un dislivello di circa 100 m dai terreni formanti le piane, evidenziando delle pendenze medie dei versanti intorno al 45%. Di seguito si mostra una tabella riassuntiva delle condizioni geologiche dell'intera area:

PROPRIETÀ FISICHE E GEOFISICHE						
LOCALITÀ	UNITÀ GEOLOGICA	UNITÀ GEOLOGICO TECNICHE	$V_{s,min} - V_{s,max}$ [m/s]	$V_{s,media}$ assegnata [m/s]	Curve G/G0	γ_t [KN/m ³]
CASTELLUCCIO	MAIOLICA E DIASPRI ALTERATI AFFIORANTI	SFLPS	345 _ 756	550	LOPRESTI, 2000	23
CASTELLUCCIO	DIASPRI INALTERATI	LPS	850	850	---	23
CASTELLUCCIO	MAIOLICA INALTERATA	LPS	850	850	---	23,5
CASTELLUCCIO	DEPOSITI DETRITICI	GM_fd	305 _ 430	350	ROLLINS, 1998	19,5

Tabella 1_Caratteristiche terreno CLO

Le porzioni di territorio interessata dagli interventi di ricostruzione sono la prima e la seconda in tabella, e quindi interessata da unità geologiche SFLPS per 10 m di profondità e da LPS per una profondità di 20 m.

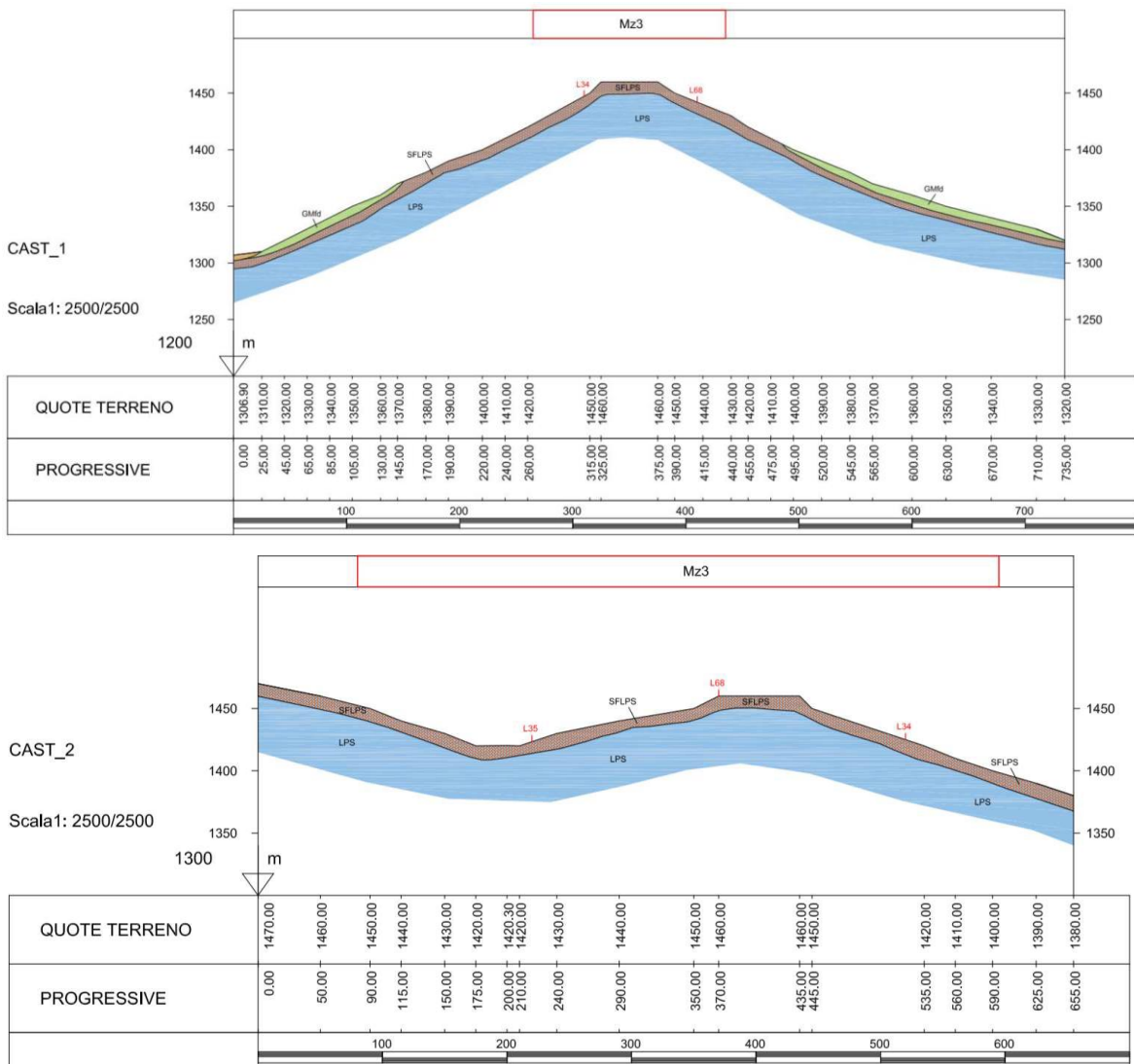


Figura 55_Sezioni geologiche CLO

4.3. Sismicità del sito

L'area di Castelluccio risulta particolarmente sensibile a scosse sismiche, di cui si hanno notizie a partire dal 1328, anno nel quale è stato registrato un sisma di forte intensità che ha causato il danneggiamento di molti edifici nel territorio nursino, con conseguenti perdite di vite. Diversi eventi hanno poi interessato la zona fino ad arrivare al sisma del 2016 (comunque non ultimo evento registrato fino ad oggi), di magnitudo 6.5, il quale ha raso al suolo il paese, evidenziando la necessità di costruire in maniera adeguata a far fronte alla faglia Alto Tiberina, avente dimensioni di circa 30 per 60 chilometri. In tale zona la crosta terrestre risulta sottoposta ad un meccanismo estensionale che produce spostamenti leggermente maggiori di un millimetro all'anno.

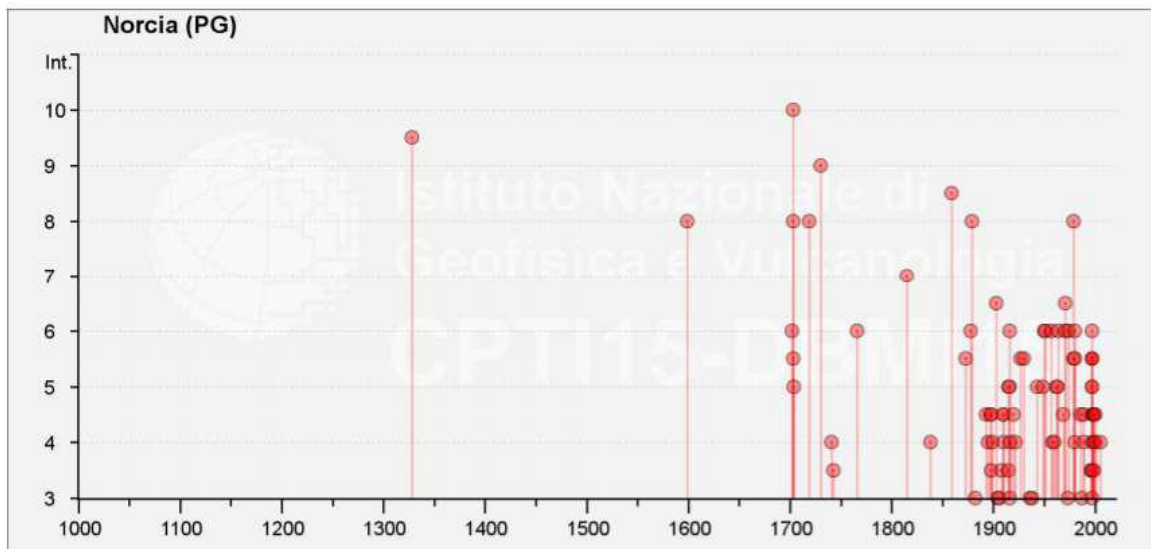


Figura 56_sismicità dell'area

4.4. Descrizione e inquadramento dell'intervento

Nella seguente sezione viene illustrata una soluzione di isolamento sismico mediante la tecnica del ground isolation applicata al centro storico di Castelluccio di Norcia (PG), colpito da un violento sisma il 30 ottobre del 2016.

La suddetta tecnica permette l'isolamento alla base di un numero maggiore di edifici mediante l'interposizione di una piastra (nel seguente studio verrà interposta una piastra gradonata) al di sopra della quale risulta possibile la ricostruzione della porzione di paese esattamente com'era prima del sisma.

Inoltre, attraverso l'applicazione della suddetta, si supera il problema dell'eccessiva vicinanza tra edifici, i quali, nel caso di semplice isolamento, saranno soggetti a spostamenti relativi diversi, e quindi liberi di interagire fra loro, e della disomogeneità delle masse delle costruzioni in elevazione.

4.4.1. Ground Isolation (o "Artificial Ground")

Tra le tecniche di isolamento sismico ormai sviluppate nel mondo, sta prendendo largo quella che viene chiamata "ground isolation". Tale tecnica viene applicata nell'isolamento di interi quartieri e complessi edilizi, e si basa sull'interposizione di una piastra in cemento armato al di sotto del complesso da isolare in modo tale da rendere solidale ogni singolo edificio poggiante sulla piastra stessa con gli altri. Nella ricostruzione del centro storico di Castelluccio, a seguito degli eventi sismici del 2016, è stato proposto l'utilizzo della presente tecnica, con il posizionamento di una piastra di circa 6500 m² gradonata per far fronte alla pendenza del centro.

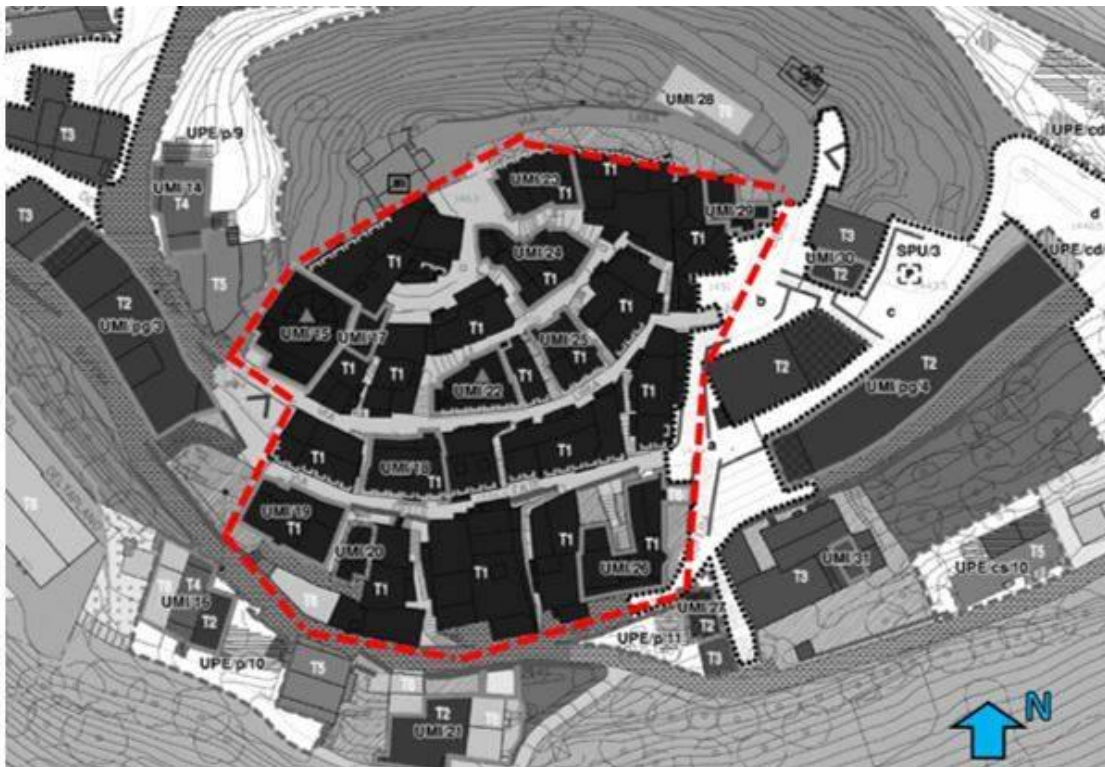


Figura 57 _individuazione dell'area di intervento (Mezzi, 2022)

La ricostruzione del sito è stata proposta con l'idea "lì dov'era, così com'era", ovvero lo scopo è quello di ricostruire l'intero borgo con lo stesso aspetto che aveva precedentemente al sisma del 2016, applicando quelli che sono gli interventi di adeguamento sismico. Castelluccio presentava 18 aggregati in muratura con pochi piani fuori terra (massimo 3) e due chiese (Santa Maria dell'Assunta e la chiesa del Sacramento) per un'estensione planimetrica di circa 4000 m². La piastra studiata presenta uno spessore di 0,7 m, derivante da uno studio di analisi dei carichi che stima gli edifici e i riempimenti necessari di terreno, posta a gradoni, profilo che permette di ricostruire il profilo originario posto in pendenza sul versante.

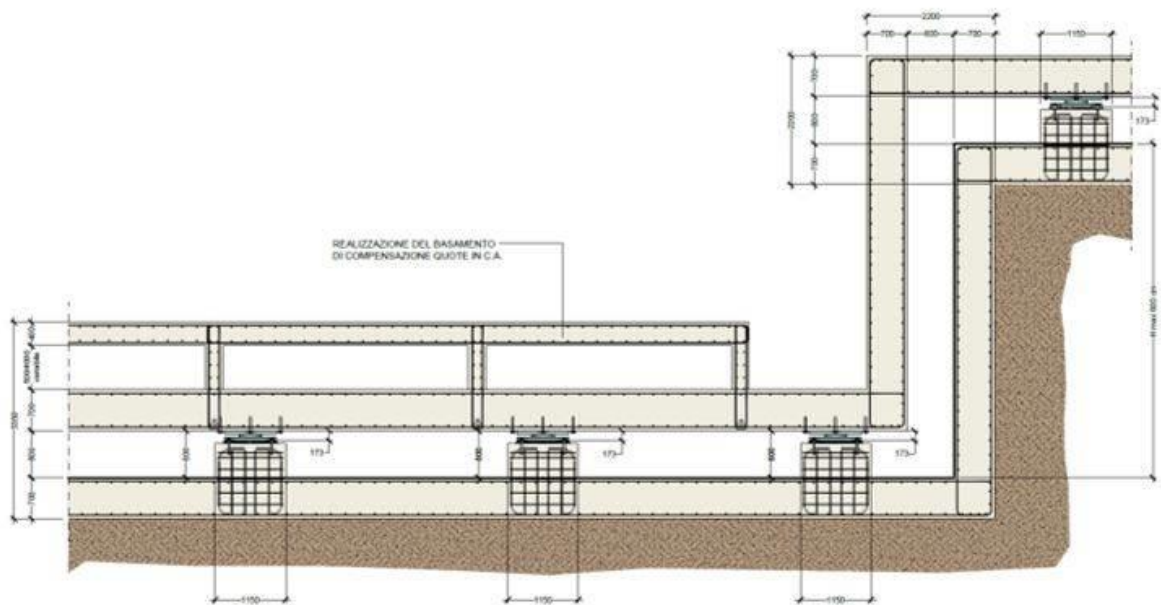


Figura 58 _sezione piastra (Mezzi, 2022)

Nella figura soprariportata si vedono degli elementi di sostegno chiamati "baggioli", che svolgono una funzione di supporto degli isolatori. Tra la piastra isolata e le fondazioni viene prevista una differenza di quota di 1,50 m, per consentire lo spazio sufficiente per l'ispezione (0,80 m di altezza utile). La difficoltà maggiore nella realizzazione dell'intervento risiede sul mantenimento delle quote originali degli edifici pre-sisma. Difatti, la piastra dovrà essere studiata in modo tale da fornire la possibilità di ricostruire gli edifici nella loro posizione originaria.

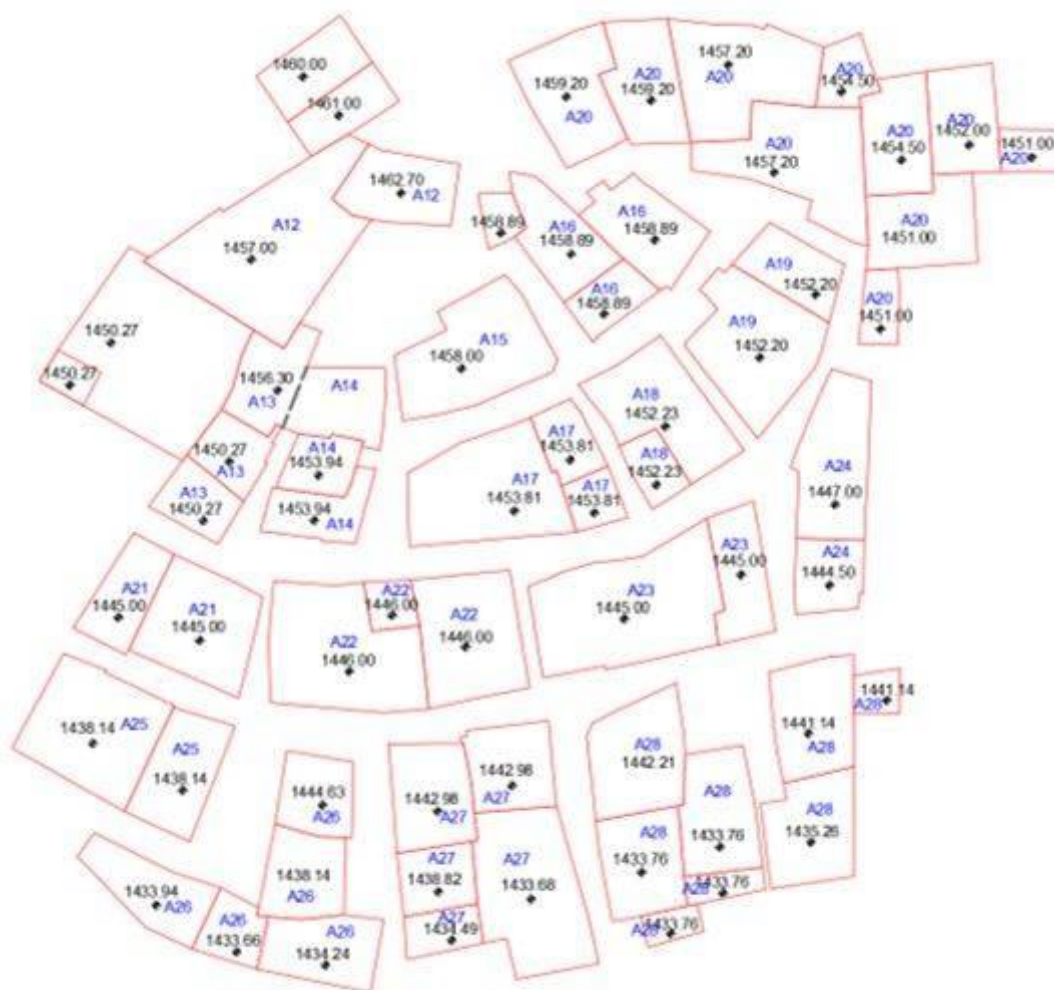


Figura 59 quote d'imposta degli aggregati (Mezzi, 2022)

Al di sotto della piastra, come già sopra riportato, vengono posti gli isolatori sismici. Nel presente elaborato si focalizzerà l'attenzione sul progetto di un adeguato sistema di isolamento, che tenga conto anche della componente sismica verticale, e dunque verrà fatto uso di uno schema più semplice che studia lo sviluppo della piastra in CA in una sezione, e non nelle tre dimensioni. In particolare, lo studio prevede il posizionamento di più di 300 isolatori, studiati in diverse soluzioni (dagli elastomerici semplici, all'isolamento 3D, passando per quelli ad attrito a superficie singola), posti ad un interasse di circa 5 m tra loro. Vengono, inoltre, disposti al di sopra della piastra armata di calcestruzzo degli elementi scatolari rigidi che consentono il raggiungimento delle quote d'imposta di alcuni edifici. Il posizionamento di tali elementi è stato studiato per utilizzarli poi come seminterrati o comunque adibiti ad uso pubblico. Viene riportata ora una sezione tipo che mostra lo schema studiato per la ricostruzione, il quale prevede quindi il posizionamento della fondazione,

la piastra isolata, i baggioli, gli isolatori, eventuali basamenti di compensazione per le quote d'imposta, terreno di riporto e gli edifici.

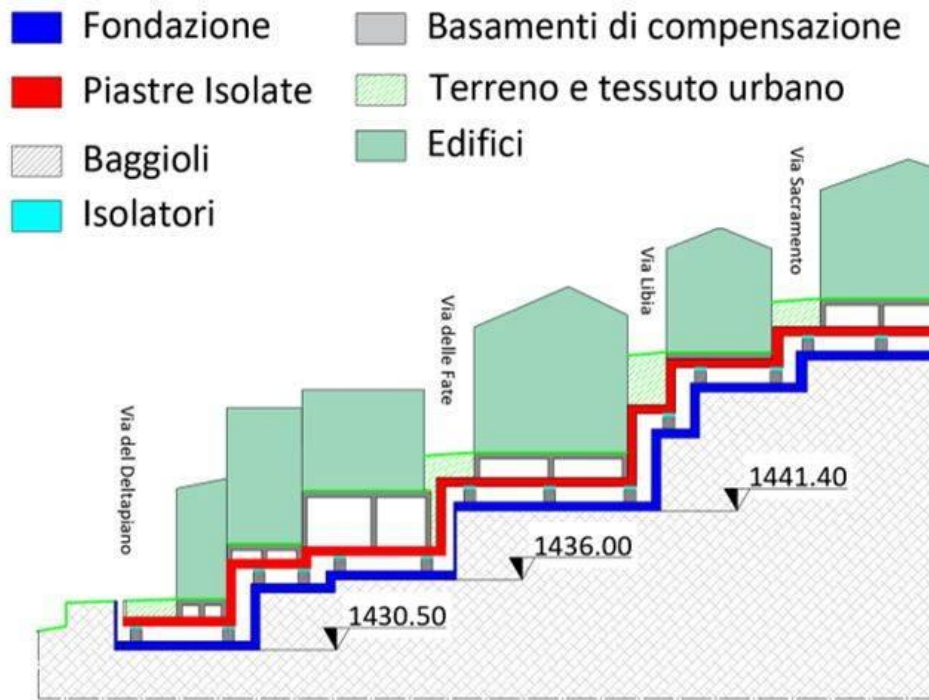


Figura 60_Schema dell'intervento in sezione (Mezzi, 2022)



Figura 61_focus su un edificio sopra la piastra (Mezzi, 2022)

Dunque, in conclusione, lo scopo principale della tecnica di “artificial ground” permette l’isolamento di più edifici contemporaneamente, permettendo la loro costruzione a danno zero, ossia capaci di portare forti terremoti senza subire danni agli elementi strutturali e non strutturali, ed inoltre permette di diminuire il numero di giunti presenti, limitando le criticità relative alla distribuzione non omogenea delle strutture. Nel mondo sono già presenti degli esempi della presente tecnica di isolamento:

- La scuola Francesco Jovine di San Giuliano di Puglia;



Figura 62_Scuola Francesco Jovine

- L’Ospedale del Mare di Napoli è stato isolato con 327 HDRB (sono stati utilizzati HDRB con diametro di 600 mm e $G=0,8$ Mpa in numero di 122, 108 con diametro di 650 mm e $G=1,4$ Mpa, ed infine 97 con diametro di 800 mm e $G=1,4$ Mpa).



Figura 63_Ospedale del Mare di Napoli

- Sagamihara (Tokyo). Sono stati utilizzati 48 isolatori elastomerici con nucleo in piombo (LRB), 102 isolatori ad attrito (SD) a superficie piana, 83 isolatori a ricircolo di sfere (BB). Il complesso isolato presenta 21 edifici residenziali che arrivano fino a 14 piani ed è stato conferito un periodo fondamentale alla sovrastruttura di 6,7 s, con spostamenti di progetto fino ad 80 cm.



Figura 64_Sagamihara (Tokyo)

- A Pechino, nel 2006, è stato progettato il quartiere “Isolation House Building on Subway Hub”, comprendente 50 edifici. La struttura isolata presenta due piani, schema che ha consentito la costruzione al suo interno di servizi di ferrovia e metropolitana. Tale costruzione rappresenta la più grande area isolata sismicamente del mondo (240.000 m²).



Figura 65_Sezione dell'Isolation House Building on Subway Hub

- Adana Health Complex, Turchia. Il complesso edilizio è un ospedale (il più grande isolato al mondo) formato da 4 edifici principali ed altri di servizio estesi per un'area complessiva di circa 300.000 m², nel quale

sono stati posti più di 1500 isolatori a scorrimento a superficie curva (FP).



Figura 66_Adana Health Complex

- Apple Campus2, California. Il sistema di isolamento comprende 700 isolatori a pendolo su una superficie complessiva che si estende per circa 780.000 m².



Figura 67_Apple Campus2

- Progetto C.A.S.E., L'Aquila. Progetto completato in 9 mesi consistente nella realizzazione di 185 edifici isolati alla base, caratterizzato da tecnica di "ground isolation" con il posizionamento di 7000 isolatori sismici.



Figura 68 _progetto C.A.S.E. (L'Aquila)

5. Dimensionamento del sistema di isolamento composto da isolatori elastomerici HDRB

Nel presente capitolo viene trattata quella che è l'ipotesi di isolamento alla base del sito di Castelluccio di Norcia mediante l'utilizzo di dispositivi elastomerici (in gomma ad alto smorzamento).

(in gomma ad alto smorzamento).

5.1. Analisi dei carichi

La definizione dei carichi agenti viene fatta suddividendo le seguenti azioni:

- Peso proprio del sistema, comprensivo di piastra (piana e pareti) e terreno di riporto (P_{g1})
- Peso permanente portato associato ai soli edifici sopra la piastra (P_{g21} e P_{g22})
- Peso permanente della porzione di piastra su cui non poggiano gli edifici (P_{g21} e $P_{g22,rim}$)
- Sovraccarico di servizio degli edifici ($P_{q,edifici}$)
- Sovraccarico di servizio relativo alla porzione di piastra su cui non gravano in maniera diretta gli edifici ($P_{q,rim}$)
- Carico della neve sugli edifici ($P_{q,edifici,neve}$) e carico della neve associato alla porzione di piastra libera ($P_{q,rim,neve}$).

5.1.1. Peso proprio della piastra

La piastra viene considerata avente uno spessore di 0.7 m.

	AREA	SPESSORE	γ	TOTALE	TOTALE AL m^2
	$[m^2]$	$[m]$	$[kN/m^3]$	$[kN]$	$[kN/m^2]$
PIASTRA	6270	0.7	25	109725	17.5

Tabella 2_Caratteristiche piastra

Il peso totale attribuibile alla piastra è dunque

$$P_{g1} = 143125 \text{ kN}$$

A tale carico viene aggiunto un sovraccarico dovuto al terreno di riporto al di sopra della piastra stessa pari a

$$P=51000\text{kN}$$

	AREA	SPESSORE	γ	TOTALE	TOTALE AL m ²
	[m ²]	[m]	[kN/m ³]	[kN]	[kn/m ²]
PIASTRA	6800	0.7	25	119000	17.5
TERRENO RIPORTO	6800.0	0.4	18.75	51000	7.5

Tabella 3 _Caratteristiche piastra e terreno di riporto

Infine, essendo Castelluccio sviluppato a quota variabile, si inserisce anche il peso proprio delle pareti verticali.

	AREA	SPESSORE	γ	TOTALE	TOTALE AL m ²
	[m ²]	[m]	[kN/m ³]	[kN]	[kn/m ²]
PIASTRA	6800	0.7	25	119000	17.5
TERRENO RIPORTO	6800	0.4	18.75	51000	7.5
PARETE	2000	0.5	25	25000	12.5
					37.5

Tabella 4 _Caratteristiche piastra, terreno di riporto e parete

5.1.2. Carichi permanenti strutturali e non strutturali degli edifici

Per quanto riguarda l'analisi de carichi attribuibile agli edifici, si è consultato un precedente studio dell'area dell'università degli studi di Perugia, a cura di Marco Mezzi ("studi applicativi di una soluzione di isolamento sismico al suolo (ground isolation) per la restituzione urbana sismicamente sicura di Castelluccio di Norcia), di cui se ne riporta il calcolo.

AGGREGATI	PIASTRA	EDIFICI	AREA EDIFICIO	n°PIANI	G1+G2	PESO (g21+g22)	p (G1+G2)
n°	n°	n°	m ²	n°	kN/m ²	kN	kN/m ²
A12	1	1	192,9	3	12	6944,4	36
		2	63,24	2	12	1517,76	24
A13	1	1	53,04	3	12	1909,44	36
		2	37,69	3	12	1356,84	36
		3	37,22	4	12	1786,56	48
A14	1	1	54,45	3	12	1960,2	36

		2	34,06	3	12	1226,16	36
		3	42,63	3	12	1534,68	36
A15	1	1	119,2	3	12	4291,2	36
A16	1	1	61,38	3	12	2209,68	36
		2	69,28	3	12	2494,08	36
		3	32,25	3	12	1161	36
A17	1	1	128,56	3	12	4628,16	36
		2	32,36	2	12	776,64	24
		3	22,9	3	12	824,4	36
A18	1	1	95,79	4	12	4597,92	48
		2	26,27	2	12	630,48	24
A19	1	1	119,16	4	12	5719,68	48
		2	48,2	4	12	2313,6	48
A20	1	1	20,81	4	12	998,88	48
		2	65,8	4	12	3158,4	48
		3	61,8	2	12	1483,2	24
		4	22,48	1	12	269,76	12
		5	74,66	3	12	2687,76	36
		6	23,33	2	12	559,92	24
		7	120,3	2	12	2887,2	24
		8	114,42	3	12	4119,12	36
		9	71,28	3	12	2566,08	36
		10	85,66	4	12	4111,68	48
A21	1	1	50,54	4	12	2425,92	48
		2	98,22	4	12	4714,56	48

A22	1	1	19,37	4	12	929,76	48
		2	106,72	4	12	5122,56	48
		3	143,69	4	12	6897,12	48
A23	1	1	169,61	4	12	8141,28	48
		2	55,84	4	12	2680,32	48
A24	1	1	91,02	3	12	3276,72	36
		2	41,81	4	12	2006,88	48
A25	2	1	121,62	4	12	5837,76	48
		2	69,8	4	12	3350,4	48
A26	2	1	47,9	3	12	1724,4	36
		2	57,81	3	12	2081,16	36
		3	63,71	3	12	2293,56	36
		4	31,9	2	12	765,6	24
		5	63,29	1	12	759,48	12
A27	2	1	70,53	3	12	2539,08	36
		2	60,84	2	12	1460,16	24
		3	134,92	3	12	4857,12	36
		4	40,56	3	12	1460,16	36
		5	26,99	3	12	971,64	36
A28	2	1	87,82	4	12	4215,36	48
		2	77,58	4	12	3723,84	48
		3	16,51	1	12	198,12	12
		4	70,09	3	12	2523,24	36
		5	75,75	3	12	2727	36
		6	77,83	3	12	2801,88	36
		7	17,73	3	12	638,28	36
		8	14,92	1	12	179,04	12
CHIESA	1	1	213,6	1	12	2563,2	12

Tabella 5_Caratteristiche edifici

Il peso permanente portato associato agli edifici risulta dunque:

$$P_{g21,g22} = 154590.48 \text{ kN}$$

5.1.3. Sovraccarico di servizio relativo agli edifici

AGGREGATI	PIASTRA	EDIFICI	AREA EDIFICIO	n°PIANI	Q	PESO Q	p (Q)
n°	n°	n°	m ²	n°	kN/m ²	kN	kN/m ²
A12	1	1	192,9	3	2	1157,4	6
		2	63,24	2	2	252,96	4
A13	1	1	53,04	3	2	318,24	6
		2	37,69	3	2	226,14	6
		3	37,22	4	2	297,76	8
A14	1	1	54,45	3	2	326,7	6
		2	34,06	3	2	204,36	6
		3	42,63	3	2	255,78	6
A15	1	1	119,2	3	2	715,2	6
A16	1	1	61,38	3	2	368,28	6
		2	69,28	3	2	415,68	6
		3	32,25	3	2	193,5	6
A17	1	1	128,56	3	2	771,36	6
		2	32,36	2	2	129,44	4
		3	22,9	3	2	137,4	6
A18	1	1	95,79	4	2	766,32	8
		2	26,27	2	2	105,08	4
A19	1	1	119,16	4	2	953,28	8
		2	48,2	4	2	385,6	8
A20	1	1	20,81	4	2	166,48	8
		2	65,8	4	2	526,4	8
		3	61,8	2	2	247,2	4
		4	22,48	1	2	44,96	2
		5	74,66	3	2	447,96	6
		6	23,33	2	2	93,32	4
		7	120,3	2	2	481,2	4

		8	114,42	3	2	686,52	6
		9	71,28	3	2	427,68	6
		10	85,66	4	2	685,28	8
A21	1	1	50,54	4	2	404,32	8
		2	98,22	4	2	785,76	8
A22	1	1	19,37	4	2	154,96	8
		2	106,72	4	2	853,76	8
		3	143,69	4	2	1149,52	8
A23	1	1	169,61	4	2	1356,88	8
		2	55,84	4	2	446,72	8
A24	1	1	91,02	3	2	546,12	6
		2	41,81	4	2	334,48	8
A25	2	1	121,62	4	2	972,96	8
		2	69,8	4	2	558,4	8
A26	2	1	47,9	3	2	287,4	6
		2	57,81	3	2	346,86	6
		3	63,71	3	2	382,26	6
		4	31,9	2	2	127,6	4
		5	63,29	1	2	126,58	2
A27	2	1	70,53	3	2	423,18	6
		2	60,84	2	2	243,36	4
		3	134,92	3	2	809,52	6
		4	40,56	3	2	243,36	6
		5	26,99	3	2	161,94	6
A28	2	1	87,82	4	2	702,56	8
		2	77,58	4	2	620,64	8
		3	16,51	1	2	33,02	2
		4	70,09	3	2	420,54	6
		5	75,75	3	2	454,5	6
		6	77,83	3	2	466,98	6
		7	17,73	3	2	106,38	6
		8	14,92	1	2	29,84	2
CHIESA	1	1	213,6	1	2	427,2	2

Tabella 6_Caratteristiche carichi variabili edifici

Il sovraccarico accidentale degli edifici è dunque pari a

$$P_{q,edifici} = 25765.08 \text{ kN}$$

5.1.4. Neve

Il calcolo della neve è eseguito secondo la procedura NTC2018, per la quale:

$$q_s = q_{sk} + \mu_i + C_E + C_t$$

Calcolo Neve (zona II)		
Grandezza	Valore	
q_{sk}	1.5	kN/m ²
a_s	1453.6	m
$q_{sk} \cdot a_s > 200 \text{ m}$	9.22	kN/m ²
μ_i	0.8	/
C_E	1	/
C_t	1	/
q_s	7.38	kN/m ²

Tabella 7_calcolo neve

Tale calcolo risulta per singolo edificio, quindi il totale risulta pari a:

$$P_{q,edifici} = 33197 \text{ kN}$$

5.1.5. Area rimanente

Area	2120.36	m ²
P _{g21,g22,rim}	106018	kN
P _{q,rim}	12722.16	kN
P _{q,rim,neve}	16962.88	kN

Tabella 8_carichi associati all'area senza edifici

5.1.6. Analisi dei carichi: tabella riassuntiva

Viene ora riportata una tabella riassuntiva nella quale si illustrano tutti i carichi sopra raccontati.

CARICHI			TOTALI [KN]				
Pg1	170000	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pg1_MURI	25000	kN	170000	25000	260608.48	38487.24	50159.88
Pg21,g22	154590.5	kN	CARICHI PER UNITA' DI SUPERFICIE [KN/m ²]				
Pq,edifici	25765.08	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pq,edifici,neve	33197	kN	25.0	12.5	41.6	6.1	8.0
Pg1,g22,rim	106018	kN	CARICHI DISTRIBUITI [KN/m]				
Pq,rim	12722.16	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pq,rim,neve	16962.88	kN	125.0	62.5	207.8	30.7	40.0

Tabella 9 _tabella riassuntiva dei carichi agenti sul sistema

Vengono inoltre riportati i risultati sismici in termini di peso e massa, sia riferiti all'area totale dell'intervento che all'area relativa ad una striscia di piastra di dimensioni 20x85, in quanto si è partiti da quest'ipotesi, come mostrato nel seguito, per l'analisi, in quanto risulta una soluzione più semplice con la quale si sono studiati i comportamenti sismici.

Ψ_q	0.3	
Ψ_{neve}	0.2	
	totale	Striscia 20x85
Peso sismico [kN]	425311.6	115315.8
Massa sismica [kg]	43354.90601	11754.9187

Tabella 10 _Peso e massa in combinazione sismica associati all'intero sistema e un sottosistema che viene preso in considerazione per le successive analisi

5.2. Soluzione I: Piastra piana rettangolare

Nel percorso che porterà alla configurazione finale della piastra, si sono fatti tre principali step, che hanno visto l'evolversi della piastra partendo da una soluzione piana di 20x85 m esplicita in tale paragrafo. Questa soluzione non rispecchia la vera disposizione degli isolatori, ed inoltre il peso proprio della piastra risulterà decurtato del peso proprio riferito ai muri di spessore 0.6 m; quindi, anche le masse in gioco saranno minori.

	AREA	SPESSORE	γ	TOTALE	TOTALE AL m ²
	[m ²]	[m]	kN/m ³	[kN]	[kN/m ²]
PIASTRA	6800	0.7	25	119000	17.5
TERRENO RIPORTO	6800.0	0.4	18.75	51000	7.5
PARETE	0	0	25	0	0
					25

Tabella 11_peso proprio sovrastruttura

E di conseguenza, ne derivano tali carichi:

CARICHI			TOTALI [KN]				
Pg1	170000	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pg1_MURI	0	kN	170000	0	260608.48	38487.24	50159.88
Pg21,g22	154590.48	kN	CARICHI PER UNITA' DI SUPERFCIE [KN/m ²]				
Pq,edifici	25765.08	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pq,edifici,neve	33197	kN	25.0	0.0	38.3	5.7	7.4
Pg1,g22,rim	106018	kN	CARICHI DISTRIBUITI [KN/m]				
Pq,rim	12722.16	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pq,rim,neve	16962.88	kN	125.0	0.0	191.6	28.3	36.9

Tabella 12_analisi dei carichi per lo schema senza elevazioni

Viene comunque presa in considerazione tale configurazione, in quanto, se pur imprecisa, consente la comprensione del problema e del modello di calcolo.

Nell'esposizione delle generalità relative a Castelluccio di Norcia sono stati definiti i seguenti parametri:

CASTELLUCCIO						
LATITUDINE	LONGITUDINE	ag	F0	Tc*	CAT SOTTOSUOLO	CAT TOP
°	°	g	/	s	/	/
42'829	13'206	0.406	2'439	0.365	B	T3

Tabella 13_Caratteristiche CLO

Una volta effettuata l'analisi dei carichi, e quindi ricavata quella che è la massa in combinazione sismica, si sono riassunti nella seguente tabella i diversi

coefficienti e parametri necessari alla progettazione del sistema di isolamento. Si sottolinea l'adozione di un coefficiente di smorzamento $\zeta = 15\%$. In prima battuta si è ipotizzato un periodo di isolamento teorico di 2.5 secondi, considerando una maglia di isolatori avente dimensione totale di 80x85 m, per la quale sono risultati necessari 306 isolatori disposti ad interasse di 5 metri in entrambe le direzioni del piano.

AREA OCCUPATA	6800	m ²
AREA EDIFICI	4194.64	m ²
MASSA ISOLATA	46606	t=kNs ² /m
T _{is}	2.5	s
ξ	15	%
n _{is}	306	HDRB
V _n	100	anni
C _u	2	/
V _r	200	anni

Tabella 14 _ Calcolo della prima ipotesi di disposizione degli isolatori elastomerici

Una volta definito il periodo teorico di isolamento, si è calcolata la rigidezza totale del sistema

$$k_{is} = \left(\frac{2\pi}{T_{is}}\right)^2$$

riportata poi ai singoli dispositivi, semplicemente dividendola per il numero degli stessi. La rigidezza del dispositivo è necessaria per poter valutare i diversi cataloghi dei fornitori e scegliere l'isolatore avente rigidezza più simile possibile a quella ottenuta in precedenza.

Una volta definita la rigidezza, ai fini della scelta progettuale, va determinato lo spostamento di progetto del dispositivo. Questo viene ricercato direttamente dallo spettro di progetto allo SLC di norma.

Una volta definito lo spettro, si entra nei risultati con il periodo di isolamento determinato inizialmente, così da ricavare l'accelerazione spettrale, e, quindi, lo spostamento richiesto. In particolare, si è entrati con un periodo $T = 2.562$ s, il quale ha fornito uno spostamento richiesto di 29.7 cm. Tale spostamento è stato aumentato, per tener conto di effetti torsionali, di un coefficiente pari a

1.2, ottenendo così uno spostamento massimo di progetto pari a 35.6 cm. Su tale base, si sono scelti isolatori forniti da FIP industriale aventi spostamento di progetto pari a 400 mm, modello **SI-S 800/200**, dove la S indica che si sta utilizzando una gomma soft.

SPOSTAMENTO 400 mm										
SI-S	V kN	F_{zd} kN	K_e kN/mm	K_v kN/mm	D_g mm	t_e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-S 450/204	20	1780	0.31	362	450	204	343	393	500	300
SI-S 500/204	135	2780	0.39	519	500	204	343	393	550	369
SI-S 550/203	300	3580	0.47	594	550	203	327	377	600	419
SI-S 600/200	540	4540	0.57	683	600	200	312	362	650	471
SI-S 650/207	820	5440	0.64	743	650	207	313	363	700	540
SI-S 700/200	1240	6890	0.77	861	700	200	307	367	750	669
SI-S 800/200	2730	11950	1.01	1356	800	200	307	367	850	871
SI-S 900/204	3990	15850	1.25	1564	900	204	318	378	950	1136
SI-S 1000/210	5385	20320	1.50	1772	1000	210	326	406	1050	1590
SI-S 1100/210	7860	27460	1.81	2441	1100	210	326	406	1150	1919
SI-S 1200/208	9540	28700	2.18	2778	1200	208	316	396	1250	2207

Figura 69_Estratto caratteristiche isolatori con spostamento di progetto di 40 cm (FIP Industriale)

SI-S 800/200						
D'	t_i	t_s	S1	S1_{calc}	S2	S2_{calc}
mm	mm	mm	-	-	-	-
780	10	3	19.5	19.5	3.9	3.9
				OK		OK

Tabella 15_Rispettivamente: Diametro in gomma, altezza singolo strato in gomma, altezza singolo strato d'acciaio, fattore di forma primario; fattore di forma primario calcolato; fattore di forma secondario; fattore di forma secondario calcolato

Di seguito si riportano i risultati ottenuti.

K _{is,tot}	284244.607	kN/m
K _{is,i}	928.904	kN/m
K _{is,i}	0.929	kN/mm
T _{SLC}	2.562	s
S _a	0.182	g
d	296.9	mm
d _{max}	356	mm
SI-S 800/200		
V _{cr/2}	2730	kN
VERIFICA 4	N_{max}<V_{cr/2}	OK
d	400	mm
K _{is,eff}	1.01	kN/mm
T _{is,eff}	2.40	s
t _e	200	mm
γ	2	
G _d	0.4	Mpa
VERIFICA 1	γ_s < γ_{MAX}	OK

Tabella 16_ Calcolo del sistema d'isolamento e verifiche degli isolatori

Si sottolinea che con tale soluzione le verifiche risultano accettate, e il periodo di isolamento ottenibile è di 2.4 secondi, leggermente minore di quello ipotizzato inizialmente di 2.5 s.

5.2.1. Modellazione

Per la modellazione, essendo l'opera una piastra di pianta rettangolare, si è scelto di analizzare una striscia dell'intera figura, di dimensioni 20x85 m, avente quindi 5 isolatori sullo sviluppo trasversale ad interasse di 5 m e 18 dispositivi sullo sviluppo longitudinale, avente ancora interasse di 5m. La semplice geometria che caratterizza tale soluzione, grazie soprattutto all'assenza dei muri verticali, ha permesso la modellazione con l'ausilio sia di elementi shell (modellando dunque l'intera piastra con lo spessore reale) che con i constrain di piano, immaginando dunque il comportamento di piano infinitamente rigido al di sopra dei dispositivi. Si sono poi confrontati i risultati dei due differenti modelli, sia in termini modali, sia in termini strutturali.

5.2.1.1. Modellazione con elementi shell

Suddetta modellazione è caratterizzata dall'inserimento della geometria reale all'interno del programma di calcolo, così da avere l'effettiva rigidezza nei piani degli elementi presenti.

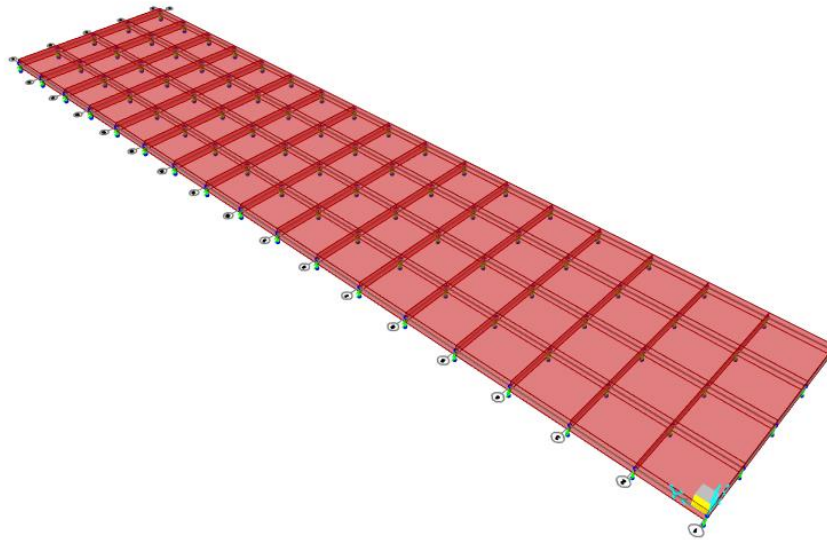


Figura 70_schema 20x85 m con elementi shell

La definizione della sezione è stata fatta mediante l'introduzione di elementi shell:

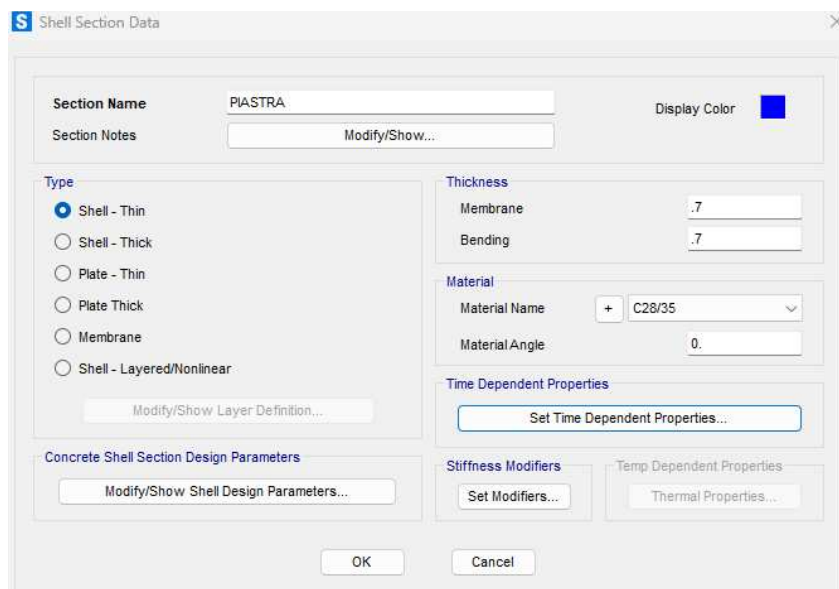


Figura 71_inserimento elementi shell su SAP2000

Per la modellazione degli isolatori, volendo eseguire un'analisi dinamica lineare, è stato considerato un comportamento lineare dei dispositivi. Tale

applicazione è stata fatta utilizzando la funzione “link/support properties” del software, il quale va a modellare gli isolatori come molle elastiche di cui se ne può modificare la rigidità nelle tre direzioni dello spazio. In particolare, in direzione X e Y è stata considerata una rigidità pari a quella effettiva desunta dal catalogo Fip Industriale, mentre per quella in direzione verticale è stata fatta l’ipotesi di infinita rigidità, spuntando la voce “fixed”, così da ottenere un comportamento rigido in direzione verticale. Infine, dovrà essere definito un vincolo di incastro anche al nodo inferiore componente il link, in quanto gli isolatori richiedono un comportamento a piano rigido sia inferiormente che superiormente. Si riporta di seguito un esempio di modellazione degli isolatori.

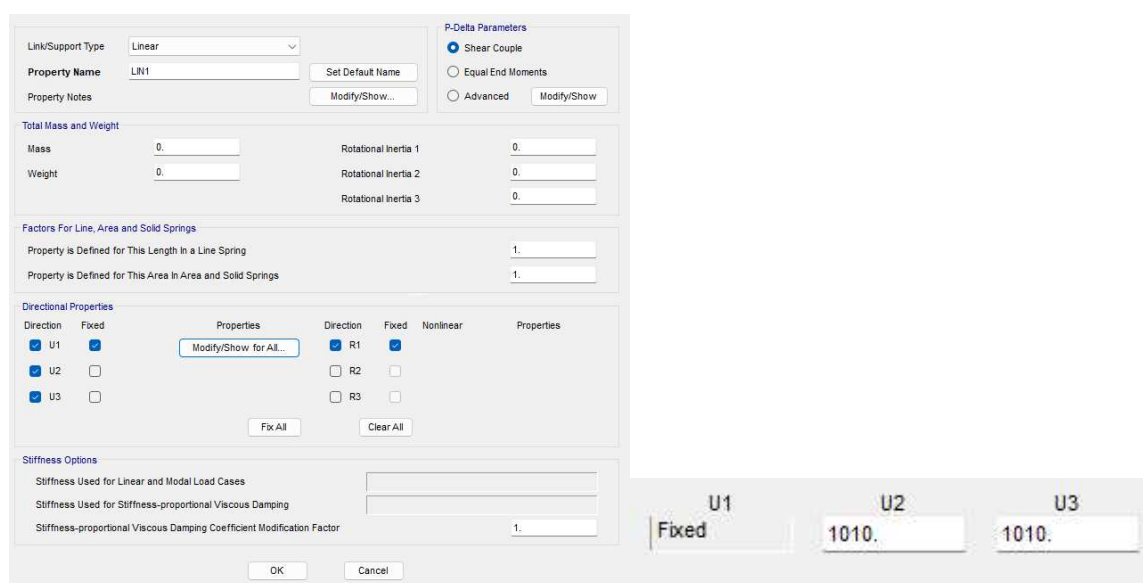


Figura 72 _modellazione link lineare (isolatore) su SAP2000

Infine, per un corretto funzionamento del sistema, è necessario andare a definire degli elementi FRAME che collegano le piastre ai link lineari. Per non andare ad aggiungere massa, nella definizione di tali elementi è stato dato un materiale non avente peso.

Una volta modellata la geometria del sistema si è passati all’applicazione dei carichi, preliminarmente definiti durante la relativa analisi, per la quale si rimanda al §5.1.

5.2.1.2. Modellazione con constrain di piano

Come spiegato prima, per un confronto dei risultati, si è scelto di modellare la piastra anche andando a definirne lo “scheletro” con elementi frame su link

lineari. Per la definizione delle sezioni il procedimento è analogo a prima, con la sola differenza che qua non si sono definiti elementi shell, ma solo FRAME, i quali, come nel modello precedente, non devono avere peso, altrimenti andrebbero ad aggiungere massa sismica al sistema.

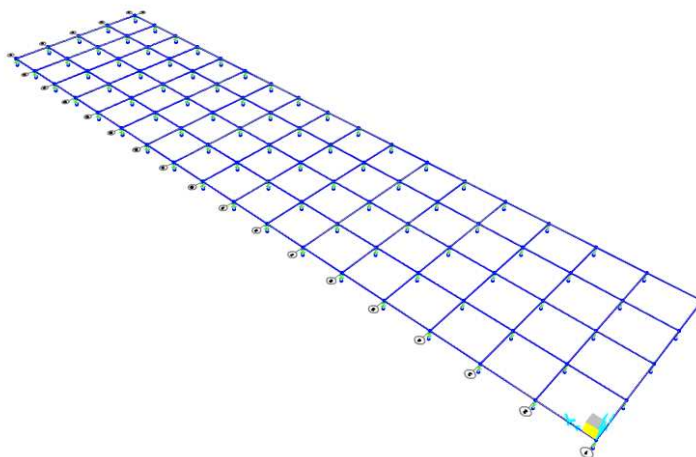


Figura 73_Schema 20x85 m con constrain di piano

Il passo successivo è stato quello di andare a definire i constrain di piano, i quali forniscono un comportamento rigido al sistema, evitando spostamenti relativi fra i nodi.

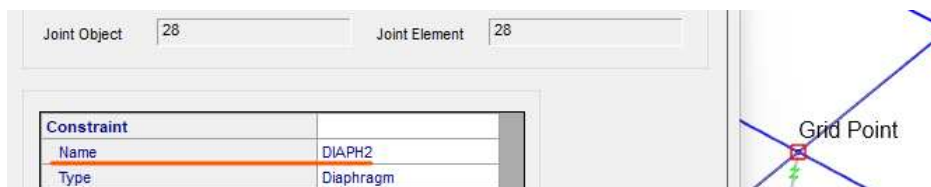


Figura 74_assegnazione constrain di piano al singolo nodo

5.2.2. Analisi modale

Il primo tipo di analisi effettuata è stata quella modale, con la quale si sono volute indagare le caratteristiche dei modi propri di vibrare della struttura. In particolare, si è interrogato il periodo dei primi tre modi, per il quale ci si aspettava che fosse simile a quello effettivo trovato in fase di progettazione dei dispositivi. Tale analisi è stata svolta per entrambi i modelli, per i quali si ricercava un'analogia fra i risultati, così da avere una conferma che il procedimento adottato fosse giusto. Si riportano di seguito i risultati rispettivamente del modello con elementi shell e di quello avente i constrain di piano.

OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless	RX Unitless	RY Unitless	RZ Unitless
MODAL	Mode	1	2.296185	1	4.232E-14	0	1	4.232E-14	0	0	0	0
MODAL	Mode	2	2.296099	4.232E-14	1	0	1	1	0	0	0	0
MODAL	Mode	3	1.304763	0	0	0	1	1	0	0	0	0.99999

	OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless	RX Unitless
	MODAL	Mode	1	2.307793	1	0	0	1	0	0	0
	MODAL	Mode	2	2.304849	0	1	0	1	1	0	0
▶	MODAL	Mode	3	2.177544	0	0	0	1	1	0	0

Figura 75_risultati analisi modale rispettivamente del MODELLO SHELL e MODELLO CONTRAIN

Come si evince dagli screen sopra riportati, il periodo di oscillazione relativo ai primi due modi del sistema risulta simile a quello stabilito in precedenza, seppur leggermente minore. Queste differenze possono essere ritenute accettabili, in quanto il modello risulta una semplificazione del problema reale, e non si è tenuto conto dell'effettiva distribuzione delle masse, ipotizzandone una uniforme su tutta la porzione.

Si nota come il moto sia puramente traslazionale nei primi due modi (nelle direzioni ortogonali sul piano orizzontale) e puramente rotazionale nel terzo.

Infine, i risultati dei due modelli sono gli stessi in termini di periodo, e questo sta a sottolineare, oltre il corretto funzionamento degli stessi, che la modellazione è stata ipotizzata correttamente.

5.2.3. Analisi dinamica lineare

Allo scopo di andare ad indagare il comportamento sismico del sistema, si è eseguita un'analisi dinamica lineare. Tale tipo di analisi è caratterizzata dall'inserimento di uno spettro di risposta nel programma di calcolo per determinare gli effetti dell'azione sismica. Gli effetti vanno poi combinati fra loro, ma non in modo lineare, bensì mediante l'utilizzo di alcune formule da normativa. In particolare, bisogna utilizzare una combinazione quadratica completa degli effetti relativi a ciascun modo, come di seguito riportato:

$$E = \left(\sum_j \sum_i \rho_{ij} E_i E_j \right)^{1/2}$$

Dove:

- E_j è il valore dell'effetto relativo al modo j-esimo

- ρ_{ij} è il coefficiente di correlazione tra il modo i e il modo j -esimo

Questo è dovuto al fatto che durante il sisma gli effetti massimi associati ad un modo di vibrare non si verificano nello stesso istante in cui sono massimi quelli relativi ad un altro modo di vibrare.

Per la valutazione delle sollecitazioni e delle deformazioni vanno considerati tutti i modi aventi massa partecipante superiore al 5% e un numero di modi tale che la somma delle masse partecipanti sia superiore all'85%.

In termini di componenti orizzontali, per la valutazione dell'azione sismica, va tenuto conto di un contributo sul piano (trascurando in questo caso la componente verticale) aggiuntivo relativo alla direzione ortogonale a quella considerata. In particolare, può essere considerato un termine aggiuntivo alla semplice azione sismica nella direzione considerata, pari al 30% del valore massimo ottenuto applicando l'altra componente:

$$1,00E_x + 0,30E_y$$

Si illustra ora il procedimento utilizzato per l'impostazione e l'esecuzione della suddetta analisi.

Anzitutto si è inserito sul programma di calcolo lo spettro allo Stato limite di Collasso, in quanto il progetto dell'isolatore è stato eseguito a tale stato limite come indicato dalle norme.

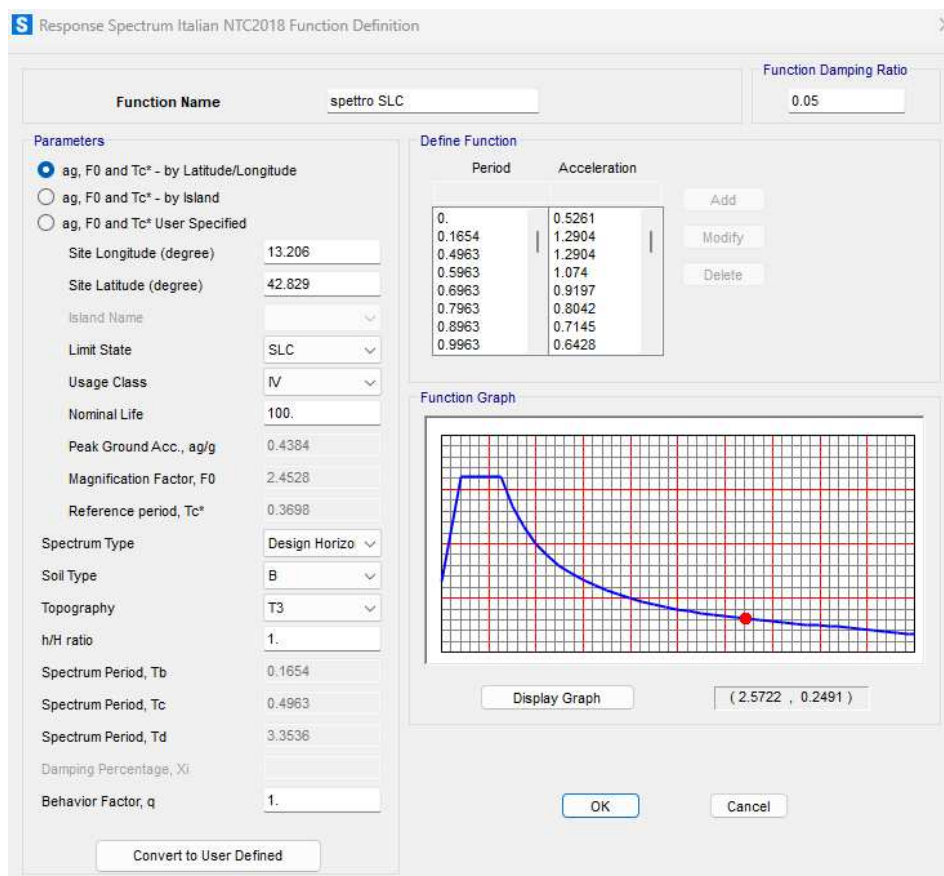


Figura 76_Inserimento dello spettro di progetto allo SLC su SAP2000

Successivamente, per la valutazione e la combinazione dell'azione sismica, sono stati definiti due casi di carico (sul piano orizzontale). In tale sezione è stato possibile scegliere la combinazione degli effetti desiderata e l'entità dell'azione sismica nelle due direzioni. Di seguito si riporta un esempio in direzione X (1 per il programma).

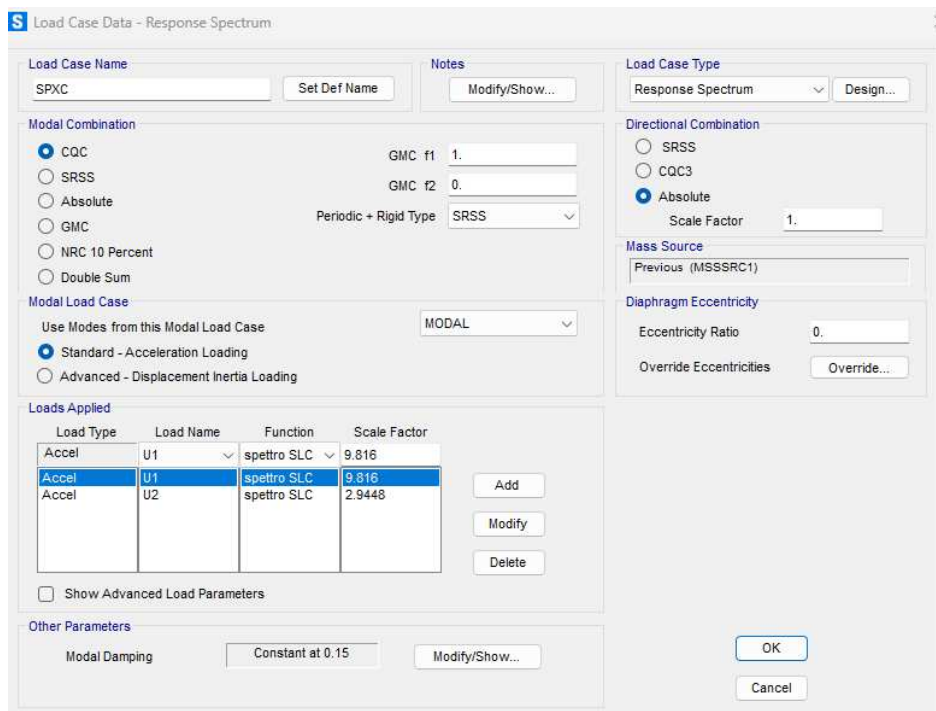


Figura 77_Combinazione degli effetti nelle diverse direzioni (SAP2000)

Infine, si sono combinati linearmente gli effetti del sisma con quelli dei carichi verticali (in combinazione sismica da NTC18).

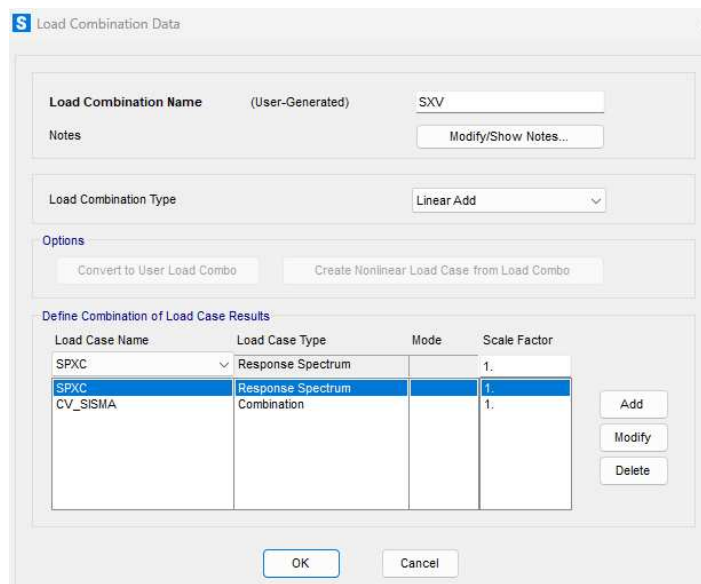


Figura 78_combinazione sismica

Una volta inserita l'azione sismica, l'entità e la combinazione degli effetti, si è lanciata l'analisi, andando a ricercare i risultati in termini di masse sugli isolatori e spostamenti ai nodi. Una volta ricavate tali grandezze vanno poi confrontate con quelli calcolati in fase di progettazione (bisogna porre attenzione che sul software non sono state definite eccentricità accidentali, dunque lo spostamento è da confrontare con quello calcolato senza eccentricità), evidenziando o meno una corretta modellazione del sistema. In termini di massa, si ricorda che è stata modellata una porzione di piastra pari a $\frac{1}{4}$ di quella reale, di conseguenza andrebbe preliminarmente valutata la massa del sistema su tale spicchio. Di seguito si riportano i risultati ottenuti rispettivamente per il modello con elementi shell e quello con il graticcio di travi ed i constrain di piano:

	progettazione	modello shell	modello constrain
M [kg]	12124.2	12139	12139.8
$u_{\max,abs}$ [m]	0.29	0.27	0.27

Tabella 17 Risultati in termini di massa sismica e spostamento ottenuto nella progettazione e nei due modelli

Come si evince dalla tabella qui riportata, si evidenziano dei risultati del tutto analoghi tra quelli ottenuti in fase di progetto e quelli restituiti dai modelli.

Questo ha sottolineato come la modellazione è ben riuscita, e ha posto dunque le basi per i paragrafi successivi, nei quali si è andata a ricercare una soluzione più vicina a quella reale, cercando di introdurre i gradoni nel sistema.

5.2.4. Risultati SLV, SLD e SLO

A titolo esclusivamente informativo, è stato valutato il periodo di isolamento anche agli altri stati limite sismici. In particolare, è stato estratto lo spettro da norma anche allo Stato Limite di salvaguardia della vita, di danno e di operatività, i quali hanno necessitato di una semplice iterazione.

Il procedimento generale è stato quello di valutare il rapporto tra il modulo di taglio reale e quello a deformazione γ pari a 1, previa valutazione della γ_{eff} del dispositivo. Una volta noto tale valore, si è potuta trovare la rigidezza

corrispondente allo stato limite considerato, e, di conseguenza, il periodo di isolamento effettivo. I risultati ottenuti hanno evidenziato un abbassamento dello spostamento richiesto (effetti torsionali esclusi), ma un abbassamento non significativo del periodo di oscillazione.

	SLC	SLV	SLD	SLO
$d_{\text{richiesto}}$ [cm]	35.6	25.5	10.7	7.8
T_{iso} [s]	2.3	2.3	2.22	2.13

Tabella 18_Risultati in termini di spostamento e periodo di isolamento per i diversi Stati Limite

- **SLV**

In tale caso non è stato necessario effettuare iterazioni, in quanto la deformazione effettiva ricadeva comunque nel campo a modulo di taglio costante.

1	K_{SLC}	1.01	kN/mm
	$T_{\text{iso},1}$	2.452	s
	S_a	0.171	g
	d_1	255	mm
	γ_1	1.28	
	$G_{\text{din}}/G_{\text{din}(g=1)}$	1	
	G_{din}	0.4	Mpa
	K_{SLV}	1.01	kN/mm
	$T_{\text{iso,eff}}$	2.40	s

Tabella 19_Modulo dinamico, rigidezza e periodo di isolamento ottenuti per lo SLV

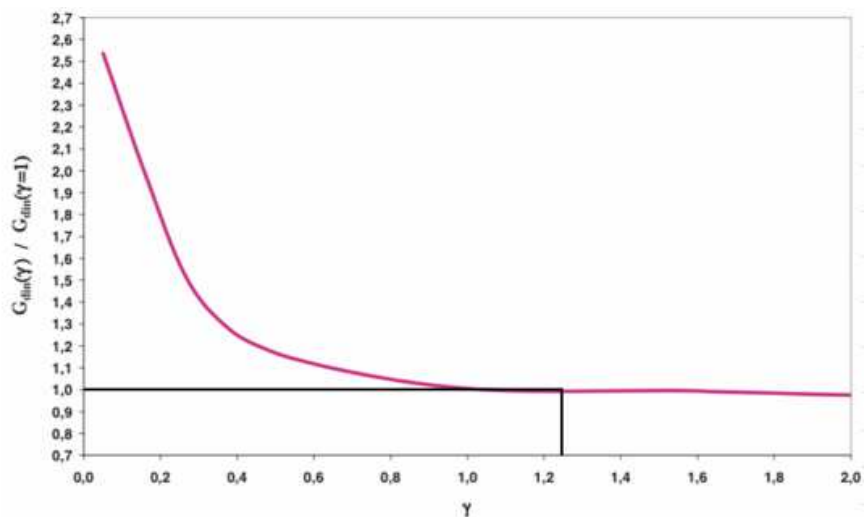


Figura 79_Singola iterazione allo SLV per il raggiungimento della convergenza in termini di periodo di isolamento nel legame costitutivo dell'isolatore (FIP Industriale)

- **SLD**

1	K_{SLC}	1.01	kN/mm
	$T_{iso,1}$	2.424	s
	Sa	0.076	g
	d1	111	mm
	γ_1	0.55	
	$G_{din}/G_{din(\gamma=1)}$	1.15	
	G_{din}	0.46	Mpa
	K_{SLV}	1.16	kN/mm
	$T_{iso,eff}$	2.24	s
2	$T_{iso,2}$	2.25	s
	Sa	0.08	g
	d2	107	mm
	γ_1	0.53	
	$G_{din}/G_{din(\gamma=1)}$	1.17	
	G_{din}	0.468	Mpa
	K_{SLV}	1.18	kN/mm
	$T_{iso,eff}$	2.22	s

Tabella 20_Risultati ottenuti allo SLD

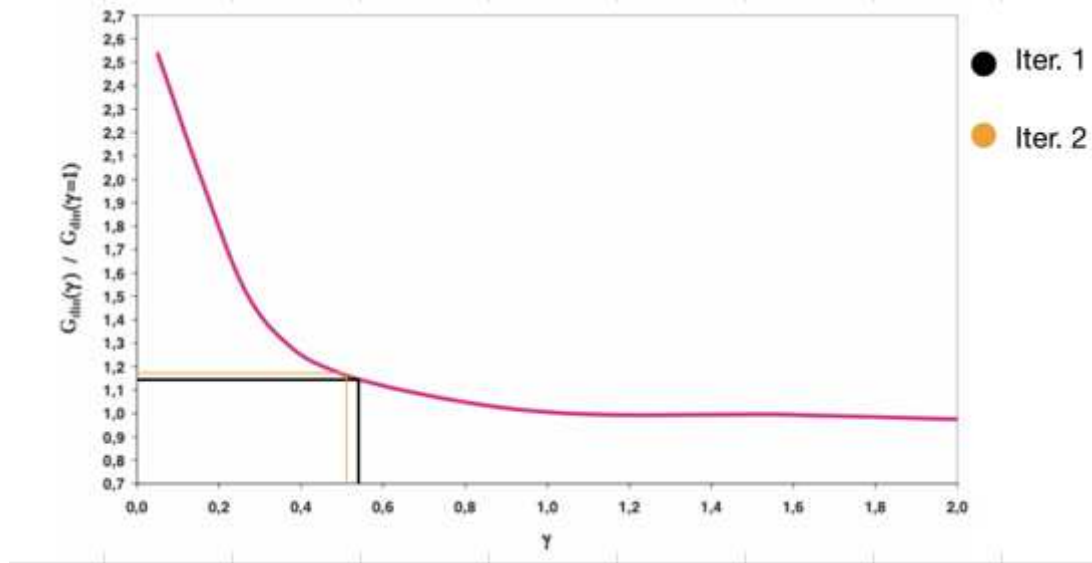


Figura 80_Singola iterazione allo SLD per il raggiungimento della convergenza in termini di periodo di isolamento nel legame costitutivo dell'isolatore (FIP Industriale)

- SLO

1	K_{SLC}	1.01	kN/mm
	$T_{iso,1}$	2.379	s
	Sa	0.057	g
	$d1$	80	mm
	γ_1	0.40	
	$G_{din}/G_{din}(\gamma=1)$	1.25	
	G_{din}	0.5	Mpa
	K_{SLV}	1.26	kN/mm
	$T_{iso,eff}$	2.14	s
2	$T_{iso,2}$	2.12	s
	Sa	0.07	g
	$d2$	77.56	mm
	γ_1	0.39	
	$G_{din}/G_{din}(\gamma=1)$	1.27	
	G_{din}	0.508	Mpa
	K_{SLV}	1.28	kN/mm
	$T_{iso,eff}$	2.13	s

Tabella 21_Risultati ottenuti allo SLO

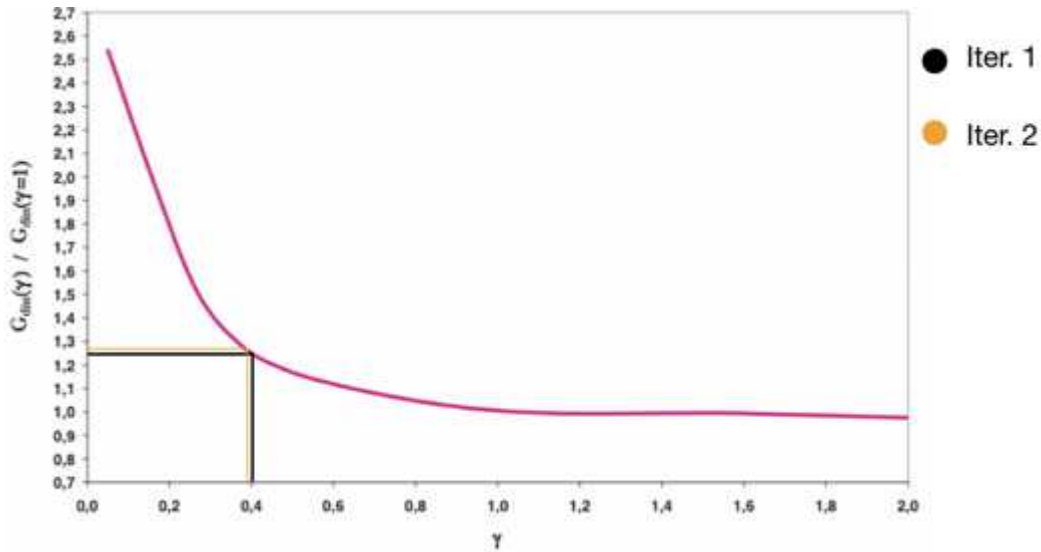


Figura 81_Singola iterazione allo SLV per il raggiungimento della convergenza in termini di periodo di isolamento nel legame costitutivo dell'isolatore (FIP Industriale)

5.3. Soluzione II: Piastra su tre elevazioni

In tale configurazione si sono andate ad inserire tre elevazioni per ricercare una variabilità dei risultati in altezza e per cercare di comprendere il comportamento del sistema con la presenza dei muri. Si ricorda che scopo del presente studio è quello di arrivare ad analizzare un modello avente cinque elevazioni, e quindi più complesso dal punto di vista della progettazione rispetto a quello descritto nel paragrafo precedente. Nella presente sezione non verranno riportate le immagini presenti nella precedente, inerenti all'inserimento dei parametri di modellazione e analisi.

Per avere una visione ancora più globale e chiara del sistema globale, e per avvicinarsi ancora di più alla configurazione reale, dopo una prima analisi si sono andate ad inserire le masse in modi diversi, rispettivamente in modo uniforme, simmetrico e totalmente disuniforme.

5.3.1. Predimensionamento

Il primo step è stato quello di definire le dimensioni dei muri, ricercando di coprire l'intero dislivello necessario (circa 24 metri). Per esigenze costruttive è stato considerato uno sviluppo in altezza di 8 m per parete di 0.6 m di spessore. L'inserimento di tali elementi comporta un incremento nel peso da applicare al modello.

CARICHI			TOTALI [KN]				
Pg1	170000	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pg1_MURI	25000	kN	170000	25000	260608.48	38487.24	50159.88
Pg21,g22	154590.5	kN	CARICHI PER UNITA' DI SUPERFICIE [KN/m ²]				
Pq,edifici	25765.08	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pq,edifici,neve	33197	kN	25.0	12.5	41.6	6.1	8.0
Pg1,g22,rim	106018	kN	CARICHI DISTRIBUITI [KN/m]				
Pq,rim	12722.16	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pq,rim,neve	16962.88	kN	125.0	62.5	207.8	30.7	40.0

Tabella 22_Analisi dei carichi

La presenza di muri verticali ha evidenziato la necessità di raddoppiare il numero degli isolatori in corrispondenza di essi, altrimenti non si avevano vincoli (in termini soprattutto di rigidità verticale) capaci di contrastare la deformazione della superficie verticale. Di conseguenza, essendo già di modesta entità il periodo ottenuto dalla modellazione precedente (circa $T_{iso}=2.3$ s), per evitare di irrigidire troppo il sistema a causa della presenza di più isolatori, si sono utilizzati due tipologie differenti di dispositivi. Per la valutazione di quest'ultimi sono stati calcolati i carichi verticali agenti sui nodi della piastra in funzione dell'area di influenza degli stessi. In sintesi, sono state considerate diverse aree di influenza, le quali sono poi state moltiplicate per il peso sismico preliminarmente determinato ($\frac{\text{peso sismico totale}}{\text{Area totale occupata}}$).

PESO SISMICO	517311.6	kN
	82.5	KN/m2
MASSA SISMICA	52733.1	tonn
Nmax [25 m ²]	2062.6	kN
N [6.25 m ²]	515.7	kN
N [15 m ²]	1237.6	kN
N [12.5 m ²]	1031.3	kN

Tabella 23_Calcolo del carico verticale su ogni posizione possibile del dispositivo

Nelle porzioni centrali delle singole elevazioni si sono lasciati i dispositivi **SI-S 800/200**, mentre per la seconda tipologia è stata fatta la scelta di dispositivi **Si-S 700/200**. Si riportano di seguito le verifiche effettuate sui dispositivi ed il nuovo sistema utilizzato visto in maniera globale.

SIS 800/200			SIS 700/200					
n	195	/	n	162	/			
k_e	1.01	kN/mm	k_e	0.77	kN/mm	Caratteristiche finali		
k_v	808	kN/mm	k_v	616	kN/mm	$K_{is,tot}$	321.69	kN/mm
$V_{cr}/2$	2730	kN	$V_{cr}/2$	1240	kN	$T_{ISO,EFF}$	2.35	s
N_{Ed}	2063	kN	N_{Ed}	1238	kN	Sa	0.19	g
VERIFICA		ok	VERIFICA		ok	d	0.30	m

Tabella 24_Verifiche isolatori

SPOSTAMENTO 400 mm										
SI-S	V kN	F_{Ed} kN	K_e kN/mm	K_v kN/mm	D_g mm	t_e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-S 450/204	20	1780	0.31	362	450	204	343	360	500	300
SI-S 500/204	135	2780	0.39	519	500	204	343	360	550	369
SI-S 550/203	300	3560	0.47	594	550	203	327	377	600	419
SI-S 600/200	540	4540	0.57	683	600	200	312	362	650	471
SI-S 650/207	820	5440	0.64	743	650	207	313	363	700	540
SI-S 700/200	1240	6990	0.77	861	700	200	307	367	750	609
SI-S 800/200	2730	11950	1.01	1356	800	200	307	367	800	671
SI-S 900/204	3990	15850	1.25	1564	900	204	318	378	950	1136
SI-S 1000/210	5385	20320	1.50	1772	1000	210	326	406	1050	1590
SI-S 1100/210	7860	27460	1.81	2441	1100	210	326	406	1150	1919
SI-S 1200/208	9540	28700	2.18	2778	1200	208	316	396	1250	2207

Figura 82_Scelta dei dispositivi dal catalogo FIP Industriale

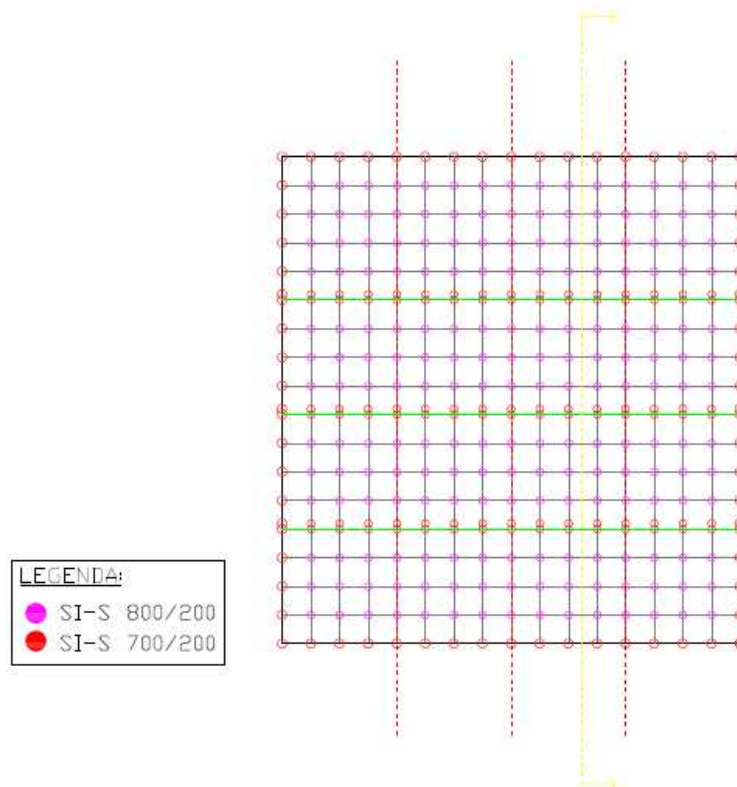


Figura 83_Pianta dello schema a tre elevazioni

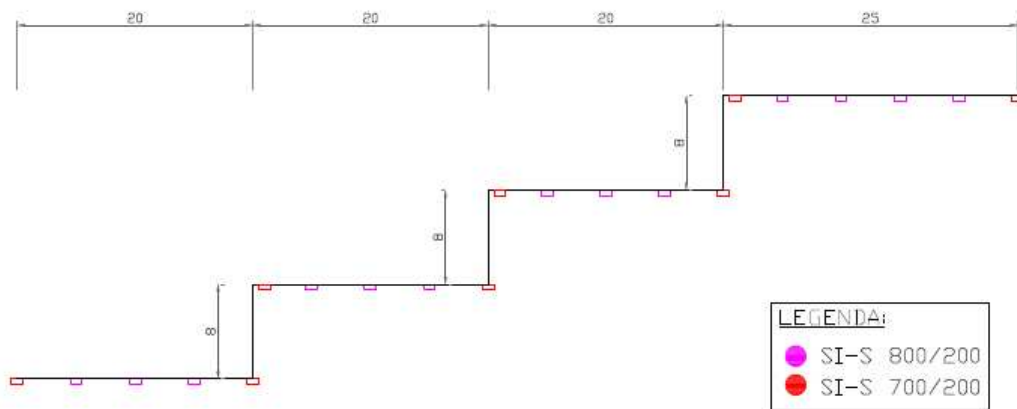


Figura 84 _Sezione dello schema

5.3.2. Modellazione: elementi shell e frame

Nello schema presente, la modellazione è stata eseguita distintamente passando dall'analisi modale a quella dinamica lineare. In particolar modo, nel ricavare le informazioni sui modi di vibrare fondamentali della struttura, la modellazione ha visto l'uso di elementi shell, come eseguito nelle sezioni precedenti. Tuttavia, gli elementi shell si sono rivelati inefficaci nell'analisi dinamica lineare, in quanto SAP2000 non arrivava a convergenza dopo l'inserimento di uno spettro sismico. A supporto di tale affermazione si mostra, di seguito, il diagramma dei momenti flettenti agenti sul sistema modellato con elementi shell e derivanti dall'inserimento in input di uno spettro allo SLC.

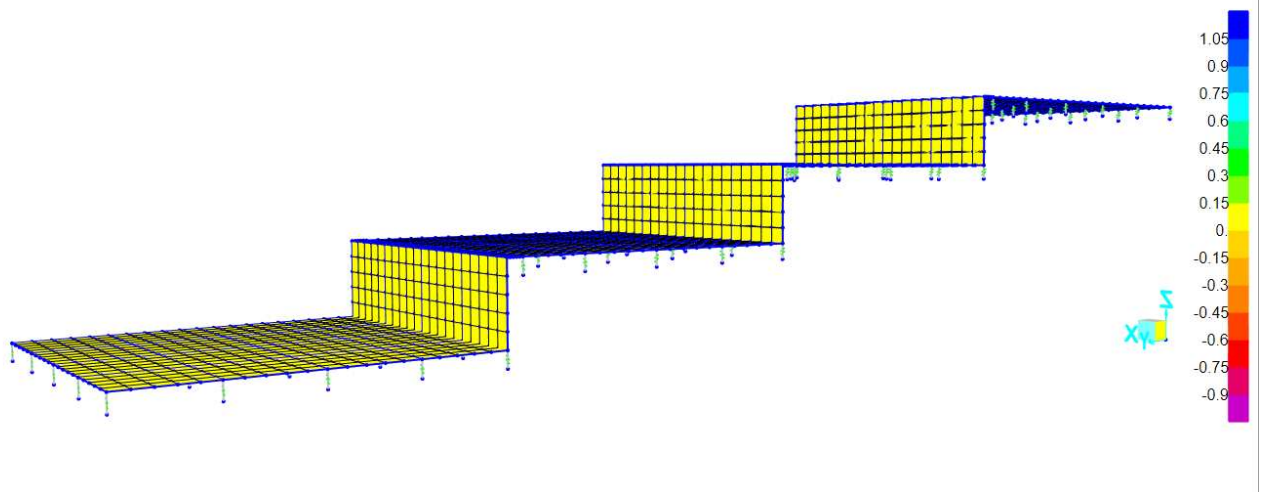


Figura 85 - modello elementi shell

Si nota un diagramma dei momenti nullo in ogni sezione. Di conseguenza, il nuovo modello per l'analisi dinamica lineare è stato creato definendo un elemento frame di dimensioni 5x0.7 m per modellare la piastra e uno di dimensioni 5x0.6 m per i muri. La definizione degli isolatori è analoga a quella descritta al paragrafo precedente.

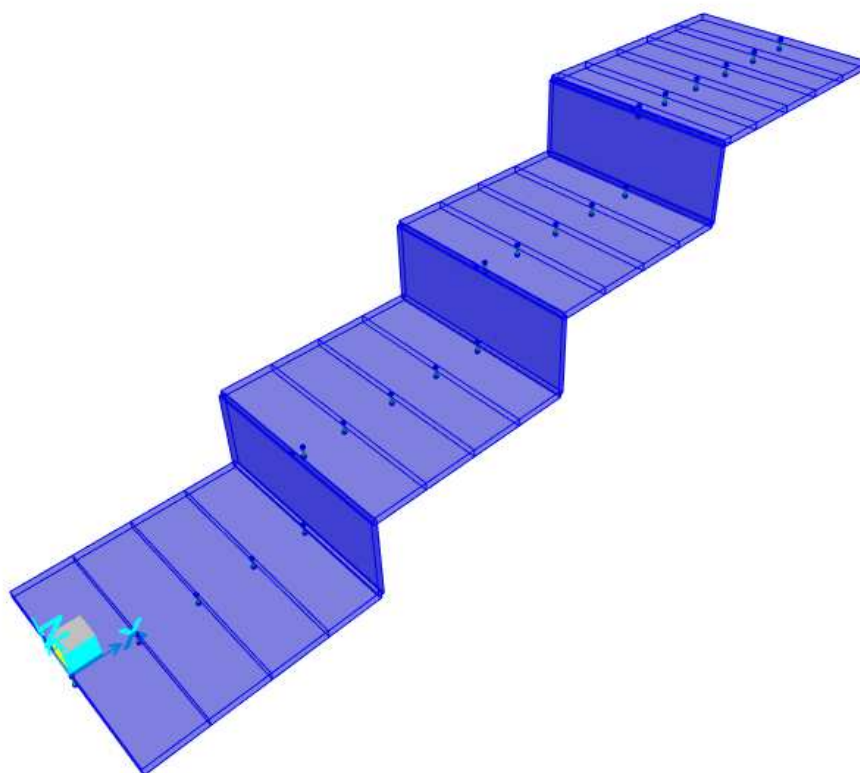


Figura 86 - modello elementi frame (vista estrusa)

5.3.3. Analisi modale

A differenza dell'analisi eseguita in precedenza, è stata eseguita un'analisi piana, in quanto il sistema ne permette l'esecuzione. Si riportano in tale paragrafo i risultati dell'analisi modale. In particolare, come nella configurazione precedente, si vanno a ricercare le caratteristiche relative ai modi di vibrare della struttura, interrogando il periodo del primo modo, corrispondente a quello del sistema d'isolamento. Come già sopra riportato, nella presente analisi è stato possibile l'utilizzo di un modello più corretto che vede la piastra rappresentata da elementi shell.

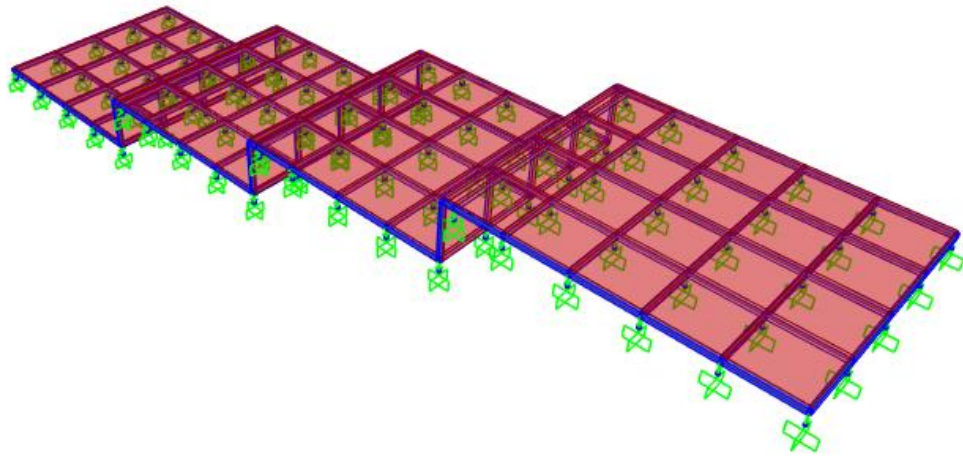


Figura 87 - modello shell tre elevazioni

Tale sistema è stato caricato uniformemente su tutte le shell, dando in output un periodo del primo modo di vibrare pari a 2.26 s, e quindi perfettamente confrontabile con la progettazione eseguita.

OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX KN-m	UY KN-m	UZ KN-m
MODAL	Mode	1	2.263971	111.898481	-0.001509	-1.198E-07
MODAL	Mode	2	2.263928	-0.001509	-111.898695	0.000205
MODAL	Mode	3	1.360973	0.008673	-2.7E-05	-1.1E-05
MODAL	Mode	4	0.717425	-0.223284	1.2E-05	-1.2E-05
MODAL	Mode	5	0.632713	3.083E-06	0.05345	0.289898
MODAL	Mode	6	0.434432	-0.007962	-1.733E-06	-0.000213
MODAL	Mode	7	0.34384	2E-05	-0.016198	-0.027066
MODAL	Mode	8	0.314221	0.029767	1.3E-05	0.000308
MODAL	Mode	9	0.258839	-3.939E-06	-0.003985	-0.11783
MODAL	Mode	10	0.056025	-0.000829	-3.852E-07	9.4E-05
MODAL	Mode	11	0.051207	-0.001231	5.572E-07	-0.00013
MODAL	Mode	12	0.046202	9.362E-06	1.51E-08	9.7E-05

Figura 88 - risultati modello shell tre elevazioni (confronto)

5.3.4. Analisi dinamica lineare

Nel presente paragrafo verranno riportati i risultati connessi all'analisi dinamica lineare. Si sono andati a ricercare gli spostamenti dei nodi, i quali hanno mostrato i seguenti valori.

SXC	Combination	Max	0.295203
SXC	Combination	Min	-0.295022

Tabella 25_Valori di spostamento ottenuti dal modello (SAP2000)

I valori ottenuti (massimo e minimo assoluti) risultano perfettamente congruenti a quello ottenuto dallo spettro, pari a 30 cm.

5.3.5. Distribuzione masse disuniformi

Volendo rendere la configurazione sempre più analoga a quella reale, si sono andate ad inserire le masse in modo completamente disuniforme. Questo causa indubbiamente una modifica nei modi e nei momenti flettenti sul muro.

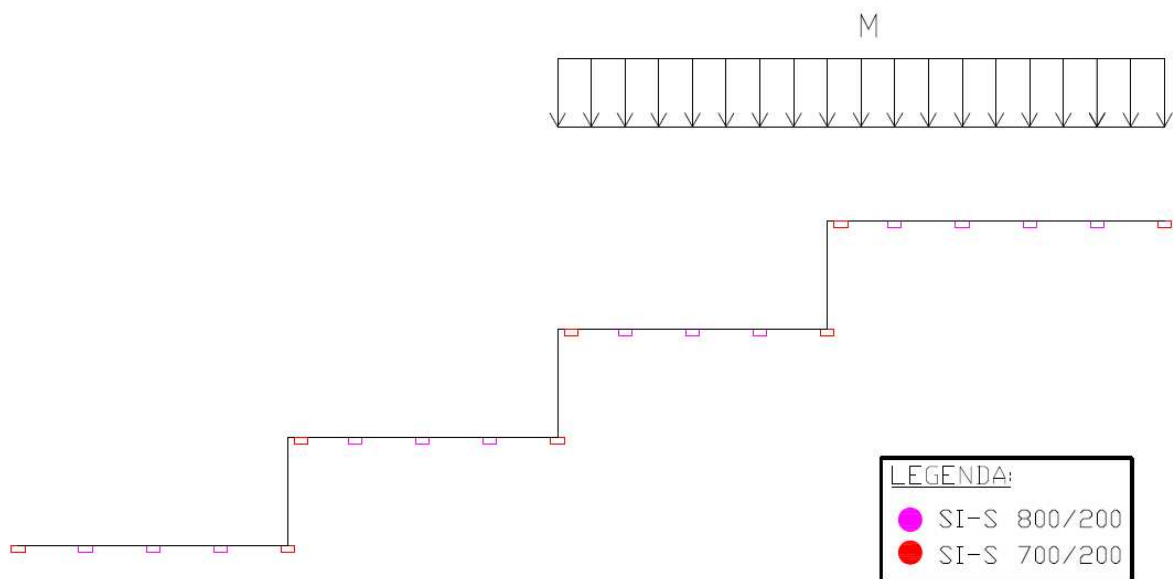


Figura 89 - Masse completamente disuniformi

Si è andato ad interrogare il comportamento del muro in termini di momenti, considerando la combinazione sismica in direzione X (perpendicolare al piano di minor rigidezza delle pareti verticali) al variare dello spessore dello stesso, come di seguito riportato.

Elevazione	spessore pilastro	Masse uniformi		Masse disuniformi	
		M^+	M^-	M^+	M^-
[-]	[m]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
1	0.2	40.6	-40.1	611	-611
	0.4	98	-99	2053	-2053
	0.6	129.6	-139	2551	-2559
2	0.2	34.3	-33.6	1712	-1712
	0.4	52	-52	4198	-4200
	0.6	35.2	-43.3	4947	-4955
3	0.2	28.5	-27.9	990	-989
	0.4	25.1	-25.8	2754	-2755
	0.6	57.4	-66.4	2879	-2890

Tabella 26_Valori dei momenti flettenti nelle tre elevazioni

Si ribadisce che la presenza di masse non uniformemente distribuite causa sul muro un momento flettente, massimo sulla seconda elevazione, il quale rappresenta anche lo spartiacque tra aree caricate e no. L'adozione del modello con elementi frame ha reso possibile tale valutazione, in quanto, come esplicito in precedenza, mediante elementi shell il programma non forniva nessun momento.

5.3.6. Distribuzione masse parziali

Si è interrogato il comportamento delle pareti utilizzando anche una configurazione di masse ancora più casuale. Come prima, tale ipotesi è stata fatta con lo scopo di valutare il momento flettente che nasce nei muri. Di seguito si riporta lo schema di carico adottato nel sistema.

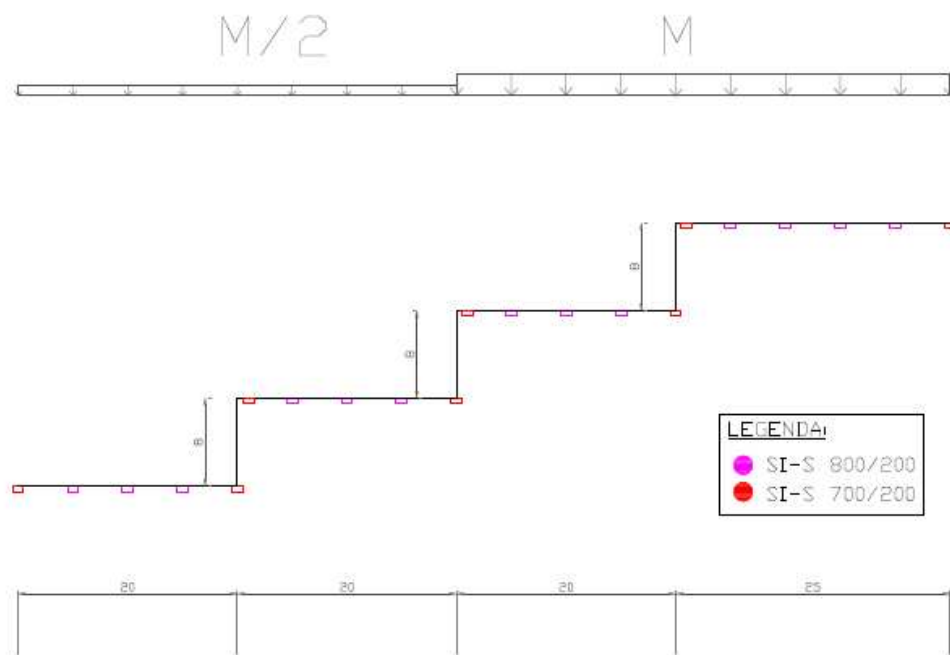


Figura 90 - masse parziali

Con i relativi risultati.

Elevazione	spessore pilastro	Masse uniformi		Masse disuniformi		Masse parziali	
		M ⁺	M ⁻	M ⁺	M ⁻	M ⁺	M ⁻
[-]	[m]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
1	0.2	40.6	-40.1	611	-611	1003	-1003
	0.4	98	-99	2053	-2053	2398	-2399
	0.6	129.6	-139	2551	-2559	2914	-2923
2	0.2	34.3	-33.6	1712	-1712	1433	-1433
	0.4	52	-52	4198	-4200	3216	-3216
	0.6	35.2	-43.3	4947	-4955	3609	-3617
3	0.2	28.5	-27.9	990	-989	910	-909
	0.4	25.1	-25.8	2754	-2755	2080	-2081
	0.6	57.4	-66.4	2879	-2890	2066	-2075

Tabella 27 _Valori dei momenti flettenti nelle tre elevazioni al variare della distribuzione delle masse

Si ottiene, come logicamente ci si poteva aspettare, che il momento maggiore sulla parete lo si ha nella seconda elevazione con la configurazione di masse parzialmente uniformi, in quanto lo spostamento relativo a masse discordi dato dal secondo modo di vibrare è maggiore.

5.4. Soluzione III: Piastra su cinque elevazioni

L'ultimo step è stato quello di definire un modello nel quale fossero presenti cinque elevazioni. Anche qui è stata utilizzata la modellazione mediante elementi frame, in quanto tale soluzione mira alla comprensione del comportamento delle pareti verticali. Per lo studio modale e dinamico degli isolatori si rimanda al capitolo relativo alla piastra piana.

5.4.1. Predimensionamento

Ugualmente a quanto fatto in precedenza per la soluzione a tre elevazioni, viene anzitutto studiato quello che è lo sviluppo in pianta della piastra, andando a raddoppiare gli isolatori in prossimità della parete e utilizzando le due stesse tipologie già viste in precedenza. Essendo il dislivello sempre di circa 25 m e il numero di pareti pari a cinque, ne risulta un numero maggiore di dispositivi.

SIS 800/200			SIS 700/200					
n	165	/	n	226	/			
k_e	1.01	kN/mm	k_e	0.77	kN/mm	Caratteristiche finali		
k_v	808	kN/mm	k_v	616	kN/mm	$K_{is,tot}$	340.67	kN/mm
$V_{cr}/2$	2730	kN	$V_{cr}/2$	1240	kN	$T_{ISO,EFF}$	2.28	s
N_{Ed}	1749	kN	N_{Ed}	1049	kN	Sa	0.19	g
VERIFICA		ok	VERIFICA		ok	d	0.25	m

Tabella 28_Scelta degli isolatori

La configurazione in pianta adottata risulta dunque la seguente:

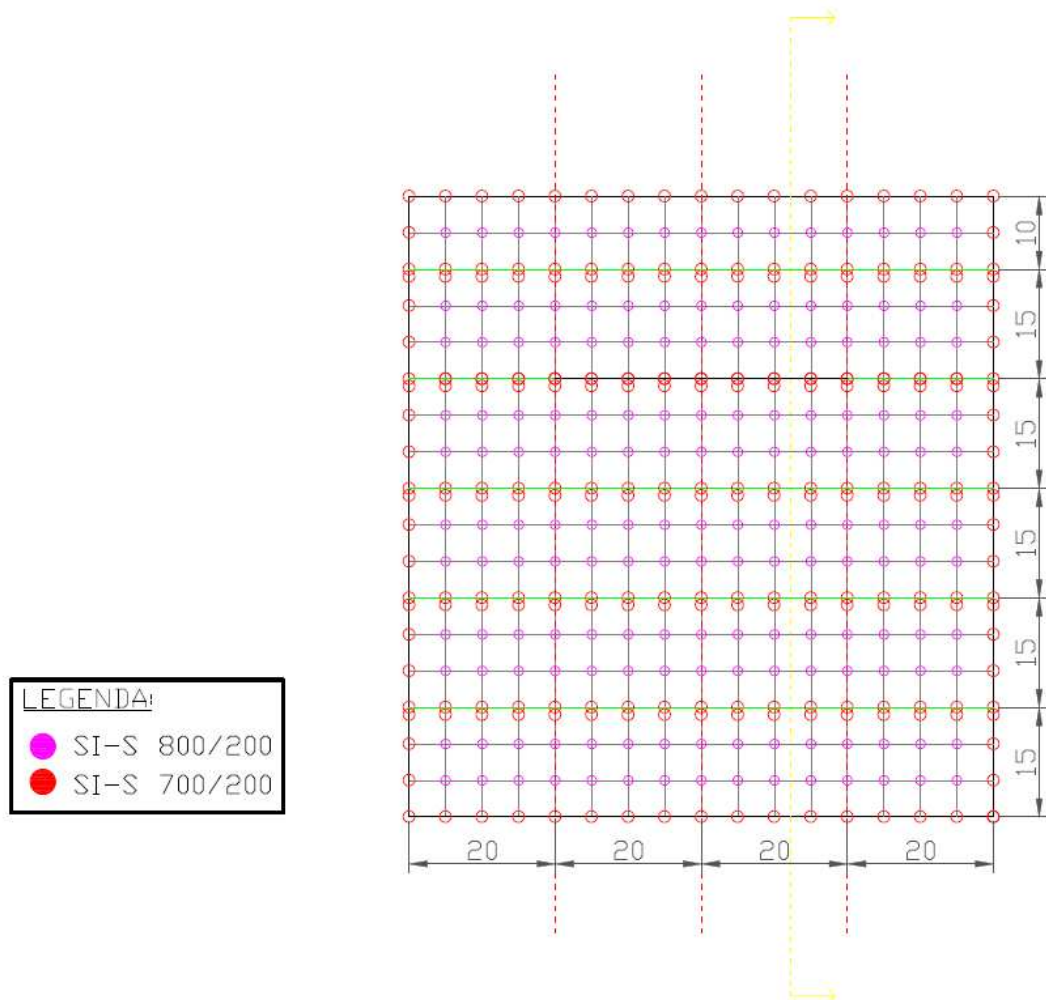


Figura 91 - pianta schema a sei gradoni

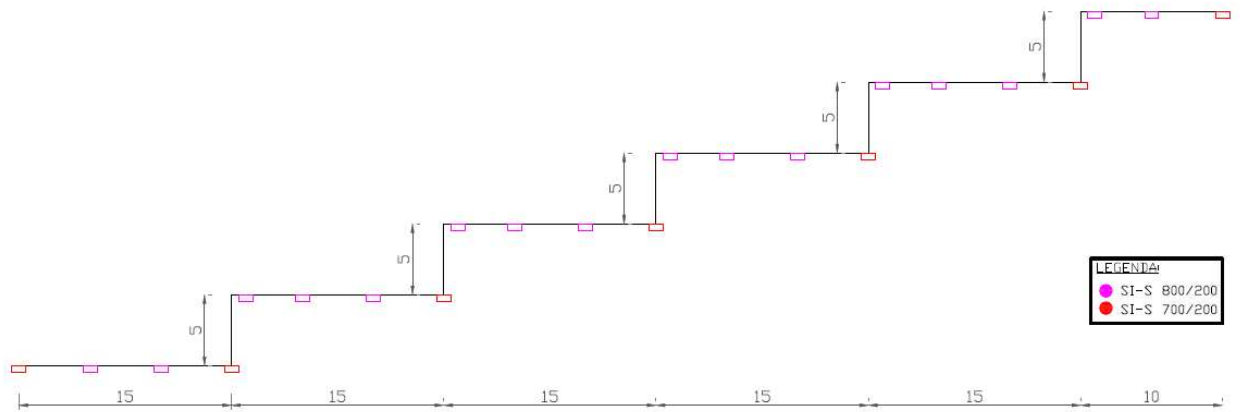


Figura 92 - schema altimetrico a sei gradoni

5.4.2. Modellazione: Elementi frame

La modellazione del sistema è stata eseguita utilizzando elementi frame di dimensioni 5x0.7 m (piastre orizzontali) e 5x0.6 m (piastre verticali), ottenendo il seguente modello, sviluppato su cinque elevazioni.

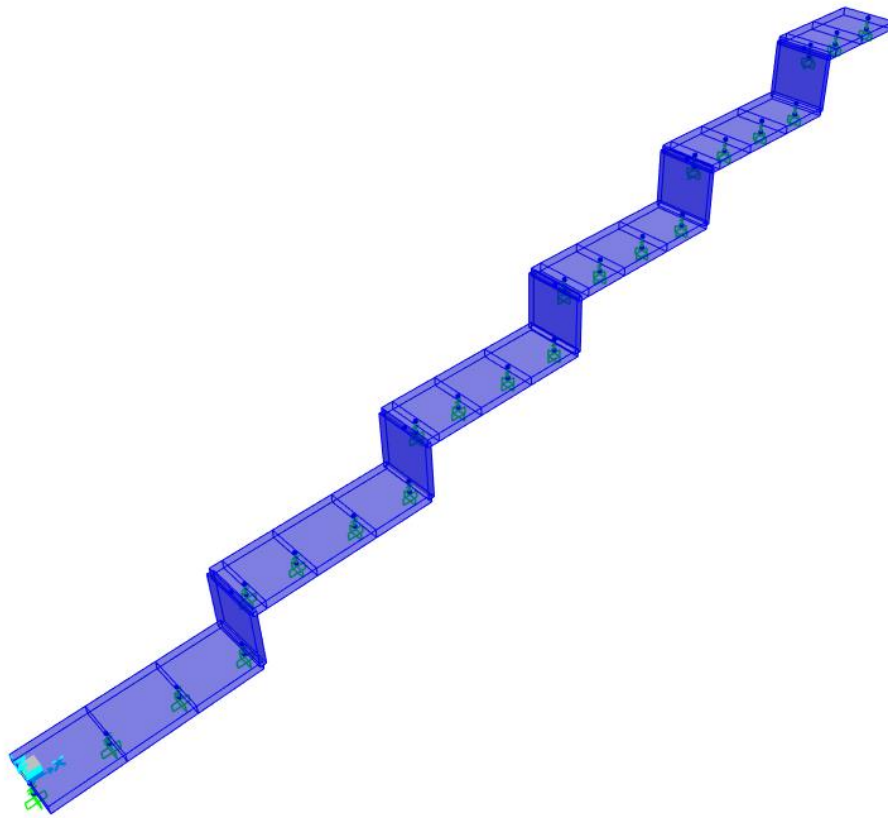


Figura 93 - modello a sei gradoni

I carichi sono stati inseriti utilizzando tre schemi diversi:

- Masse uniformi
- Masse disuniformi
- Masse parziali

Tali schemi hanno permesso la valutazione del momento flettente sugli elementi verticali, variandone lo spessore.

5.4.3. Ridistribuzione delle masse

Gli schemi utilizzati nelle analisi precedenti hanno evidenziato come, al variare della distribuzione dei carichi agenti sulla piastra, gli elementi verticali presentano una forte variabilità in termini di sollecitazioni agenti. Scopo del presente modello, dunque, è quello di fornire la base per uno studio

approfondito del suddetto fenomeno, utile al fine di ricercare la soluzione migliore.

Una volta inserito lo spettro, si sono ricercate inizialmente le sollecitazioni flettenti presenti nelle diverse elevazioni in combinazione sismica, con una distribuzione omogenea dei carichi, per le quali si riportano i diagrammi di seguito.

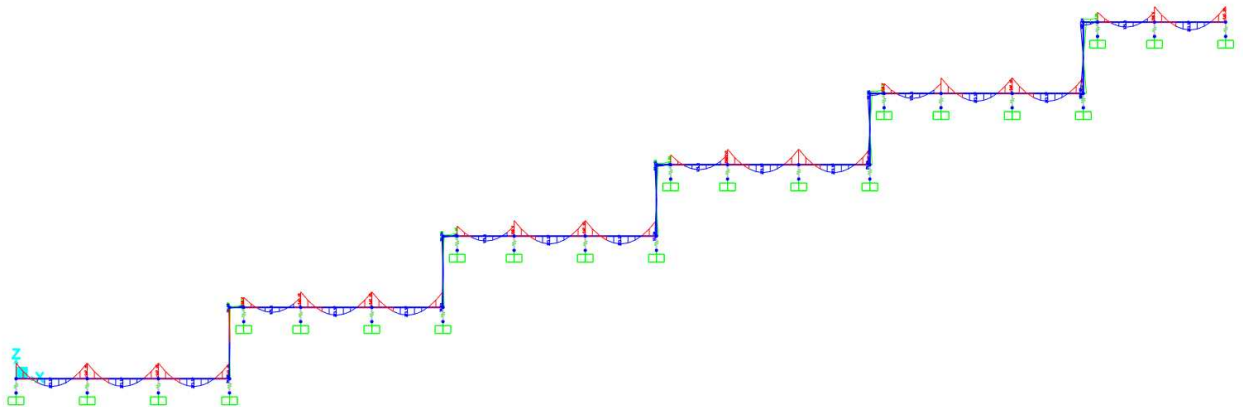


Figura 94 - Diagramma dei momenti piastra

Si comprende che nelle pareti verticali nasce un piccolo momento dell'ordine massimo dei 100 kNm, cosa non realistica, in quanto si può comprendere che i carichi, nella realtà, non saranno applicati in modo uniforme sull'intera porzione, in quanto la distribuzione degli edifici in un sito come Castelluccio presenterà delle disuniformità. Risulta quindi utile andare a cambiare la configurazione, ponendosi nelle situazioni estreme, avendo così un quadro più completo della situazione.

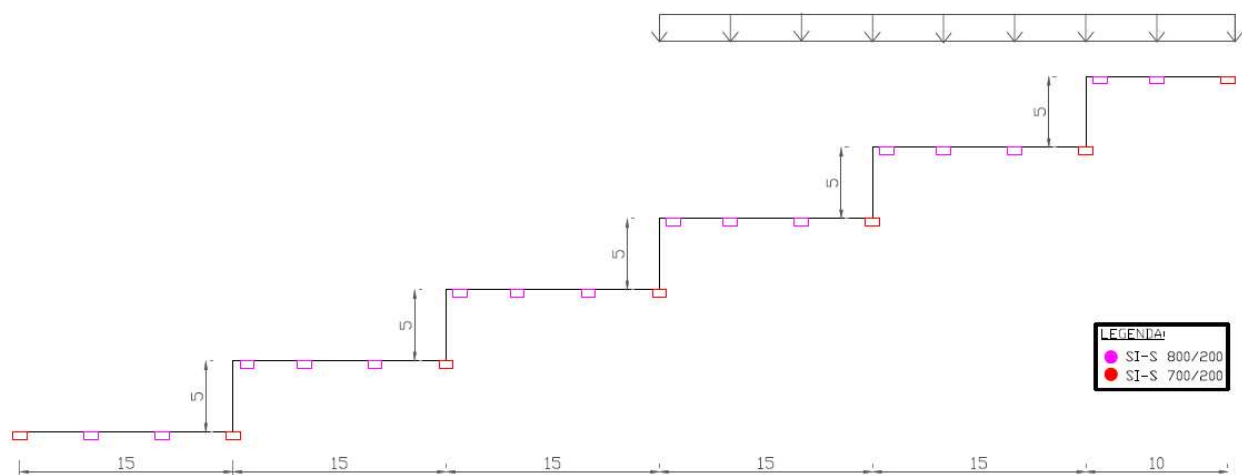


Figura 95 - masse disuniformi

In tale schema si vede il carico applicato per intero a metà piastra, producendo il seguente stato deformativo.

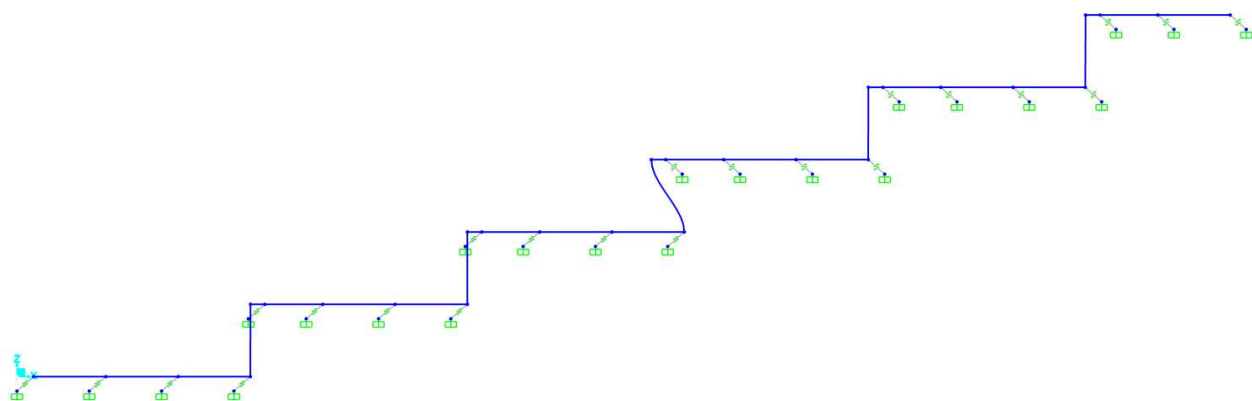


Figura 96 - deformata secondo sisma in X

La parete più sollecitata risulta essere la terza in altezza, al confine tra porzione carica e scarica. In particolare, gli spostamenti, rispettivamente alla base e in testa alla parete, risultano essere:

	$u_{base} [cm]$	$u_{testa} [cm]$
Parete 3	0.2857	-0.2844

La seconda configurazione vede l'applicazione di una massa pari alla metà di quella totale nella porzione più bassa del sistema

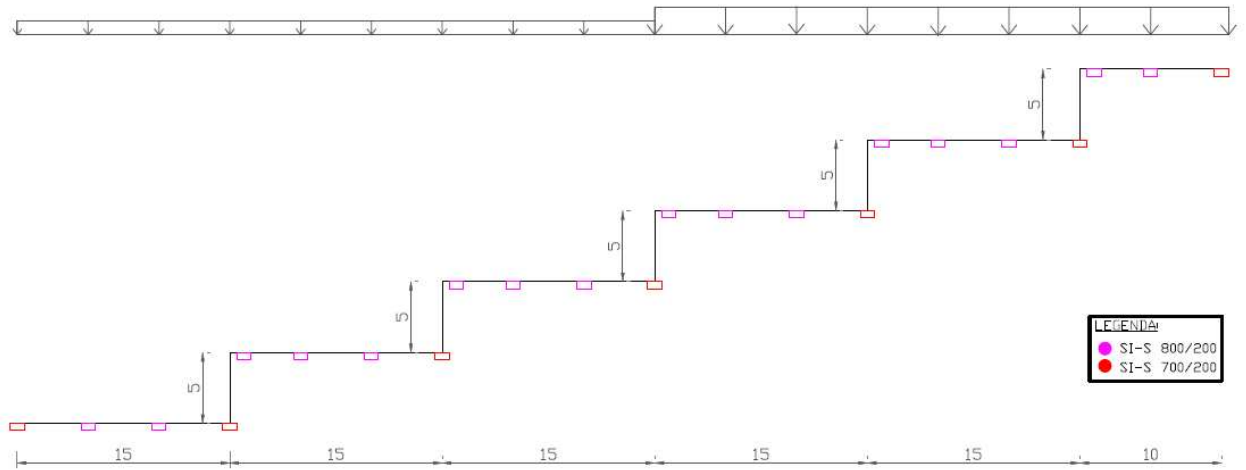


Figura 97 - masse parziali

avente il seguente diagramma dei momenti e deformazione

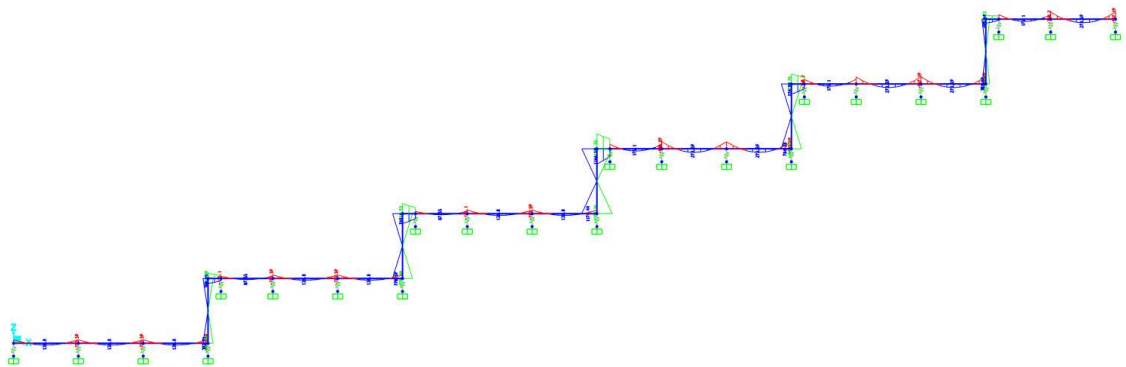


Figura 98 - diagramma momenti

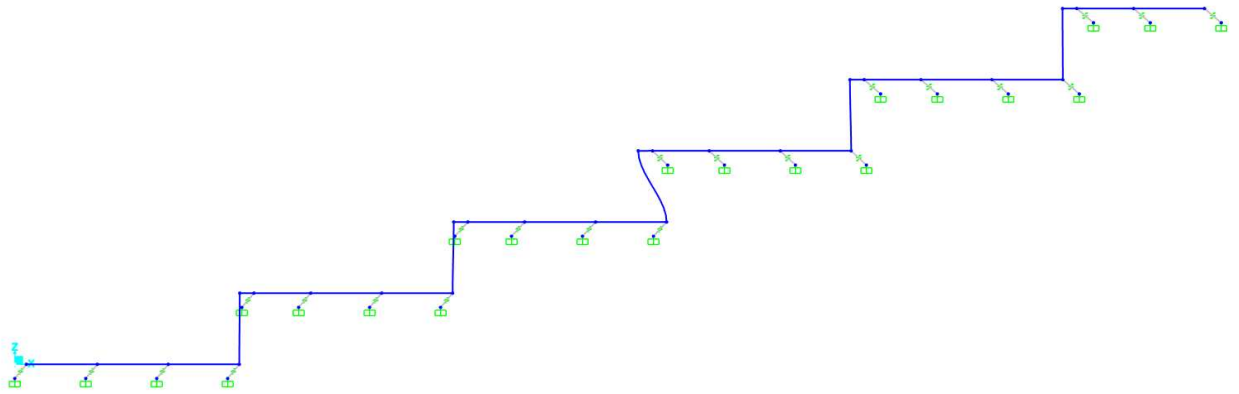


Figura 99 - deformata secondo sisma in X

	$u_{base} [cm]$	$u_{testa} [cm]$
<i>Parete 3</i>	0.2314	-0.2686

Nascono quindi dei momenti flettenti sicuramente più alti rispetto a quelli dello schema avente una distribuzione uniforme delle masse, con concentrazione delle sollecitazioni all'interfaccia della variazione dei carichi. Si riportano di seguito i valori precisi dei momenti massimi (positivi e negativi) estratti.

Elevazione	spessore pilastro	Masse uniformi		Masse disuniformi		Masse parziali	
		M ⁺	M ⁻	M ⁺	M ⁻	M ⁺	M ⁻
[-]	[m]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
1	0.2	27	-27	557	-557	393	-393
	0.4	27.4	-28	1085	-1085	539	-540
	0.6	47.2	-49	1210	-1210	578	-580
2	0.2	38.8	-38.6	1176	-1177	771	-771
	0.4	23.6	-24.2	2130	-2130	1012	-1013
	0.6	9.7	-11.4	2317	-2317	1054	-1055
3	0.2	55.3	-55.1	1986	-1986	1174	-1174
	0.4	53.7	-54.2	3206	-3206	1471	-1472
	0.6	45.4	-47.1	3437	-3437	1522	-1523
4	0.2	79.7	-79.6	1461	-1461	785	-785
	0.4	89.2	-89.8	2102	-2102	905	-906
	0.6	91	-92.7	2136	-2137	908	-910
5	0.2	108.3	-108.3	720	-720	301	-301
	0.4	124.5	-125.3	828	-828	298	-300
	0.6	136.7	-138.6	781	-783	277	-278

Tabella 29_Valori dei momenti flettenti sulle elevazioni al variare della distribuzione delle masse

5.5. Studio della parete verticale

Si concentra ora l'attenzione sul muro. In particolare, tirate fuori le sollecitazioni di momento flettente, si vuole ricercare quello che è il momento resistente. La valutazione della sicurezza secondo le NTC 2018 è fatta nei riguardi degli stati limite ultimi (SLU), e risulta espressa dalla relazione:

$$R_d \geq E_d$$

Dove:

- R_d : Valore di progetto del momento resistente, funzione del valore caratteristico della resistenza, definito come frattile al 5% attraverso l'espressione $R_d = R_k / \gamma_M$
- E_d : Azione sollecitante.

Il momento sollecitante che viene preso in considerazione è quello maggiore del modello a cinque elevazioni con lo spessore del muro pari a 0.6 m, essendo poi la geometria reale dell'intervento.

5.5.1. Sforzo assiale nella parete

Nei precedenti paragrafi si è studiato il comportamento a flessione del muro, il quale ha evidenziato un problema di verifica del momento flettente. Tale studio è stato condotto ipotizzando uno sforzo assiale nullo, andando a semplificare quella che è la reale situazione in configurazione sismica. In particolare, la sollecitazione normale su tale porzione di struttura risulta variabile nelle tre configurazioni diverse di distribuzione delle masse, evidenziando anche problemi di elevata trazione non compatibili, i quali producono dei momenti resistenti minori. In tale paragrafo si andranno ad illustrare e spiegare le varie casistiche viste sopra, da un punto di vista di sforzi di compressione e trazione. Per favorire una più semplice comprensione del problema, vengono spiegati di seguito i concetti applicati in un modello di semplice geometria, composto da una singola elevazione di altezza di 5 m con caratteristiche geometriche analoghe a quelle della reale geometria. L'unica ipotesi aggiuntiva che viene fatta nelle varie casistiche è quella di trascurare il peso proprio del muro.

- **MASSE UNIFORMI**

La configurazione avente una distribuzione uniforme delle masse risulta la seguente,

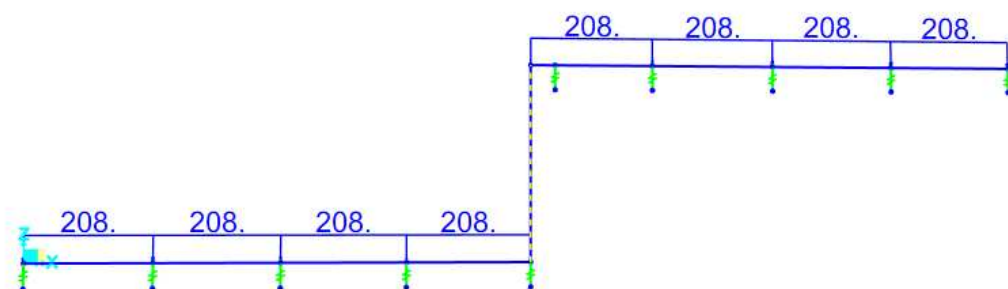


Figura 101_ configurazione a masse uniformi

dove si riporta, solo da esempio, un carico di 208 kN/m che corrisponde al carico permanente non strutturale dovuto agli edifici su di una larghezza di 5 m (larghezza della zona di influenza di ogni isolatore).

Con tale disposizione, la risultante della forza di inerzia che subisce il sistema durante il sisma, si posiziona al centro del muro, essendo identici i carichi gravanti sulle porzioni di piastra.

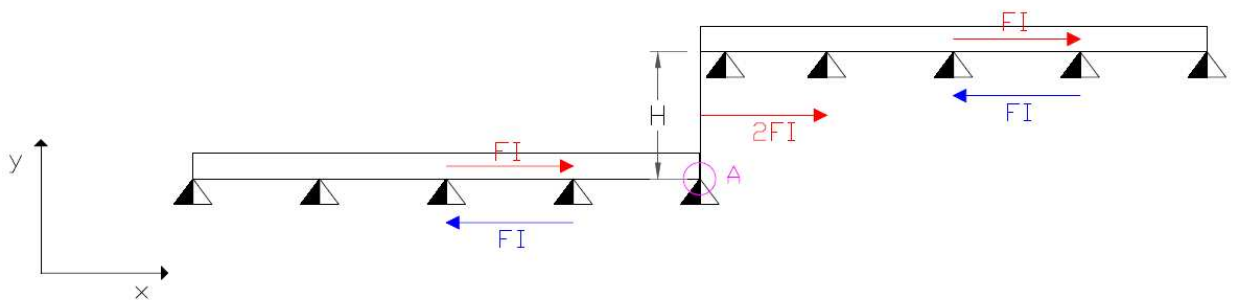


Figura 102- Masse uniformi; equilibrio forze d'inerzia

Il sistema dunque risulta in equilibrio, come dimostra l'equilibrio alla rotazione del punto A.

$$2F_I * H/2 - F_I * H = 0$$

Di conseguenza, non nasceranno sforzi di trazione o compressione sugli isolatori per equilibrare lo schema, quindi il muro risulterà scarico.

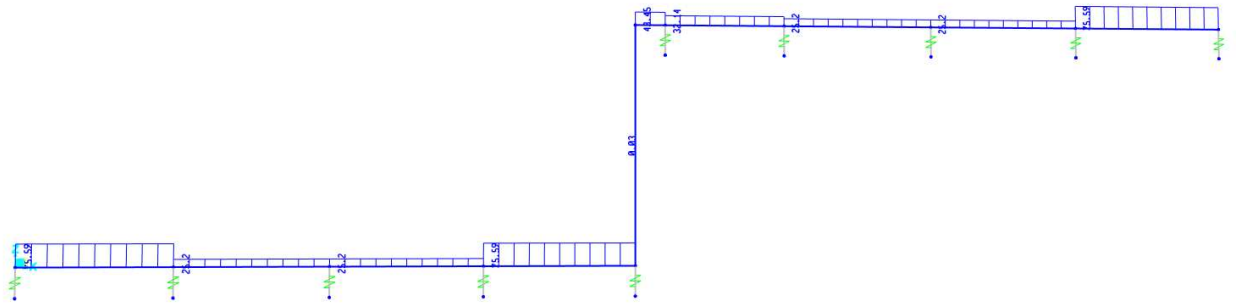


Figura 103_diagramma di N (combinazione solo sisma SPCX)

$$N_{Ed,muro} = 0 \text{ kN}$$

Tale risultato, inoltre, sottolinea l'assenza di sollecitazioni flettenti e taglianti importanti sul muro, che diventerebbero pressoché nulle se si trascurasse il peso proprio della parete stessa.

- **MASSE DISUNIFORMI**

L'estremo opposto della configurazione sopra riportata è quando si ha tutta la massa concentrata in una singola elevazione ($Z=5 \text{ m}$). Tale disposizione produce un disequilibrio delle forze d'inerzia che deve essere compensato da reazioni di trazione e compressione aggiuntive sugli isolatori, essendo il sisma un'azione ciclica.

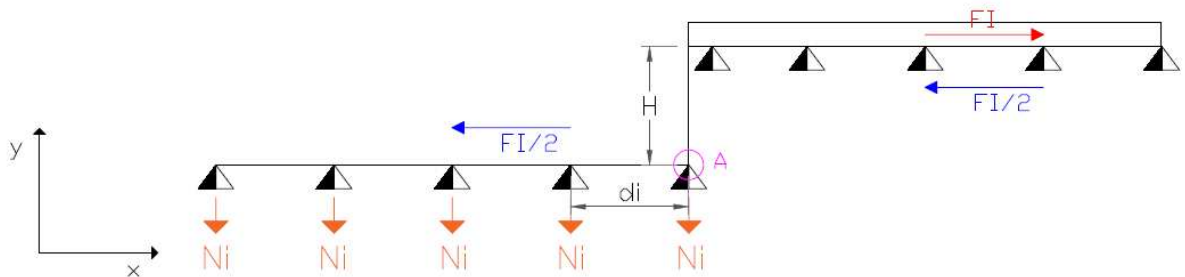


Figura 104_Forze d'inerzia nella configurazione a masse disuniformi

Se si facesse l'equilibrio intorno al polo A, senza considerare le reazioni sugli isolatori, si otterrebbe un'equazione non soddisfatta.

$$F_I * H - F_{I/2} * H \neq 0$$

Di conseguenza si ottiene un momento flettente aggiuntivo necessario ad equilibrare tale equazione. Nel sistema, il suddetto momento è fornito dalla nascita di reazioni assiali sugli isolatori tali per cui:

$$M = F_{I/2} * H = \sum_i N_i * d_i$$

Le conseguenze principali di tale problema sono:

- Nascita di sforzi assiali sugli isolatori con conseguente nascita di trazione importante sul muro
- Momento flettente importante sul muro
- Tagli importanti sul muro

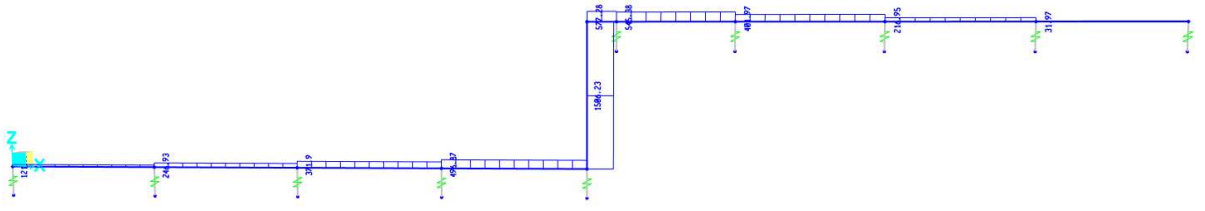


Figura 105_diagramma N (solo sisma SPXC)

$$N_{Ed,muro} = 1506 \text{ kN}$$

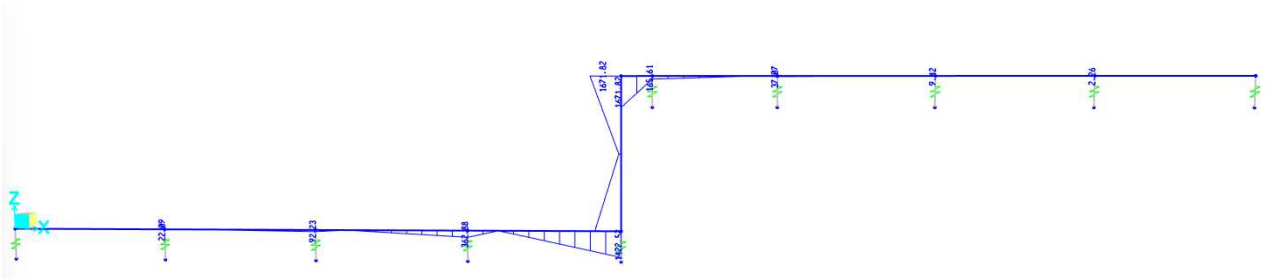


Figura 106_diagramma M (SPXC)

$$M_{Ed,muro,max} = 1671 \text{ kNm}$$

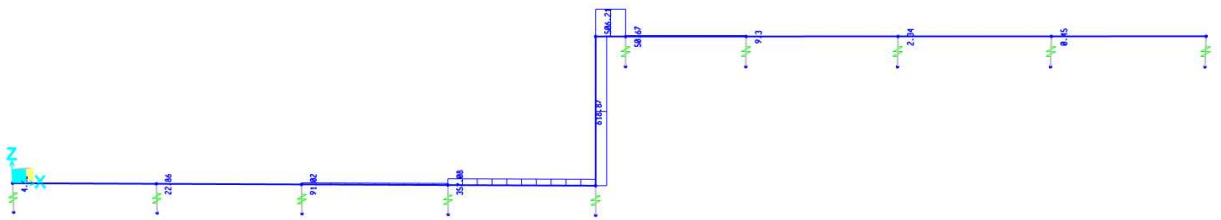


Figura 107_Diagramma V (SPXC)

$$V_{Ed,muro} = 618 \text{ kN}$$

5.5.1.1. Sforzo assiale nel modello a cinque elevazioni

Una diversa distribuzione delle masse, dunque, nel caso di sistema isolato sismicamente alla base con dispositivi in gomma, porta alla nascita di sforzi assiali importanti sulle pareti. Lo studio effettuato in precedenza sul modello a singola elevazione ha reso chiaro il problema, il quale è stato riportato sul sistema finale oggetto della presente tesi.

- **MASSE UNIFORMI**

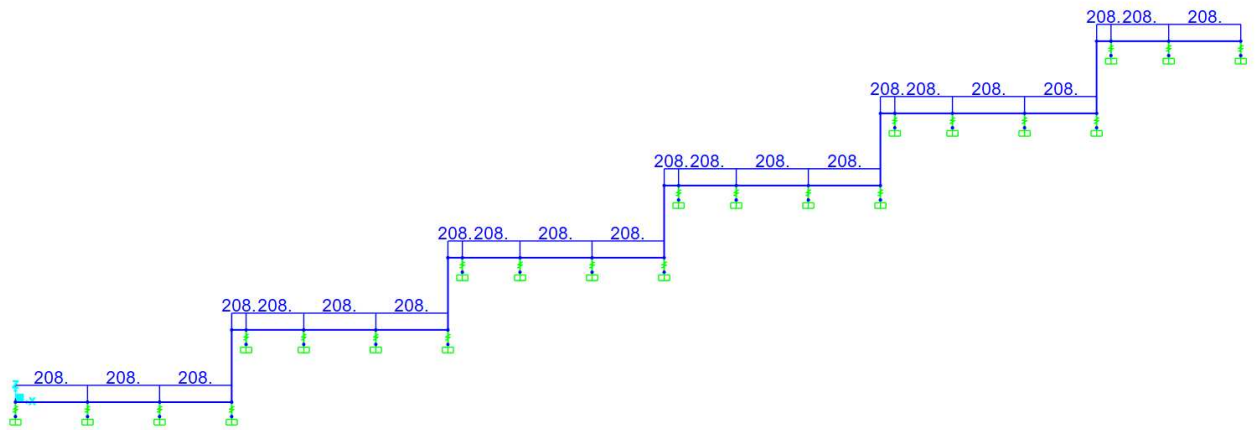


Figura 108_schema di carico masse uniformi

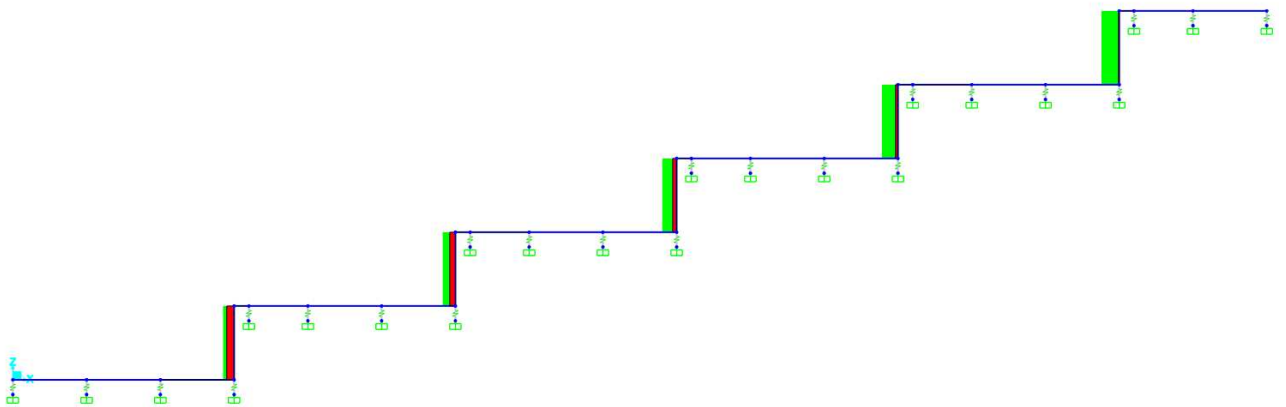


Figura 109_diagramma N (CV + sisma SXC)

$$N^-_{Ed,muro,max} = -132 \text{ kN (ultima elevazione)}$$

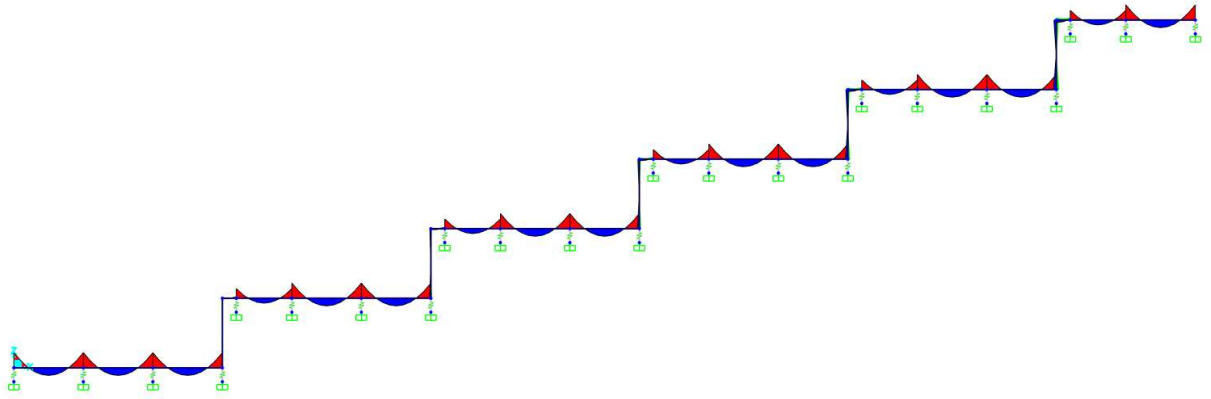


Figura 110_diagramma M (CV+ sisma SXC)

$$M_{Ed,muro,max} = 103 \text{ kNm (ultima elevazione)}$$

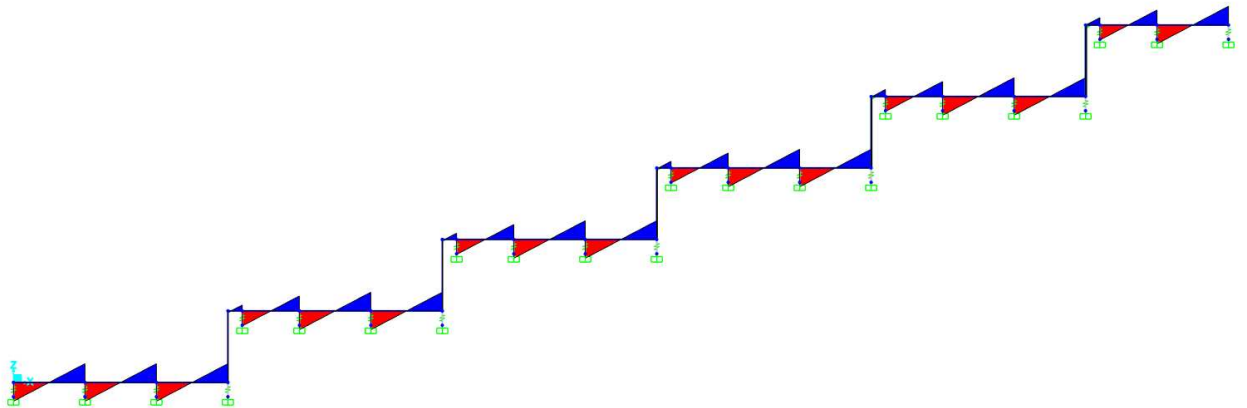


Figura 111_diagramma V (CV+ sisma SXC)

$$V_{ed,muro,max} = 38 \text{ kN (ultima elevazione)}$$

- **MASSE DISUNIFORMI**

I carichi vengono distribuiti ora su metà sistema, come di seguito riportato.

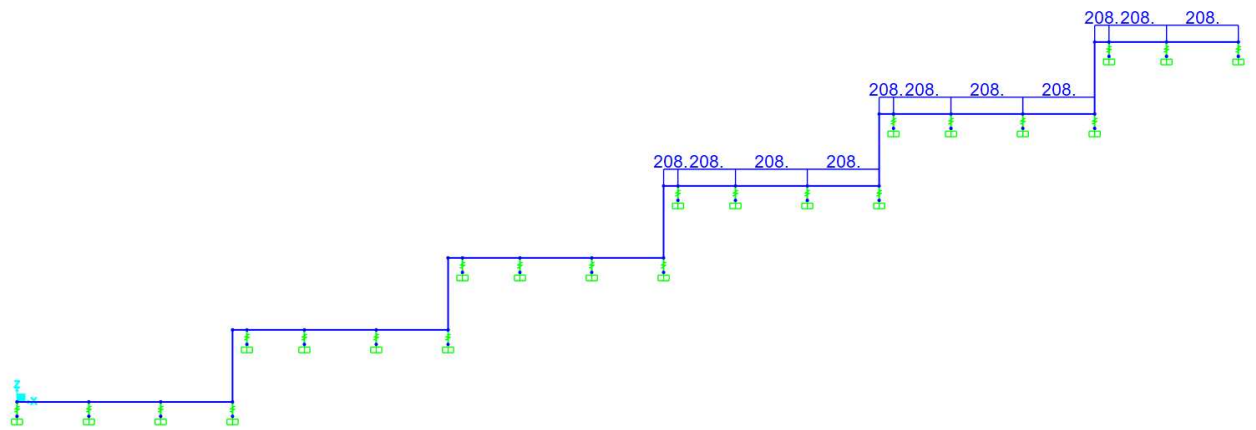


Figura 112_schema di carico: masse disuniformi

Si ottengono i seguenti diagrammi:

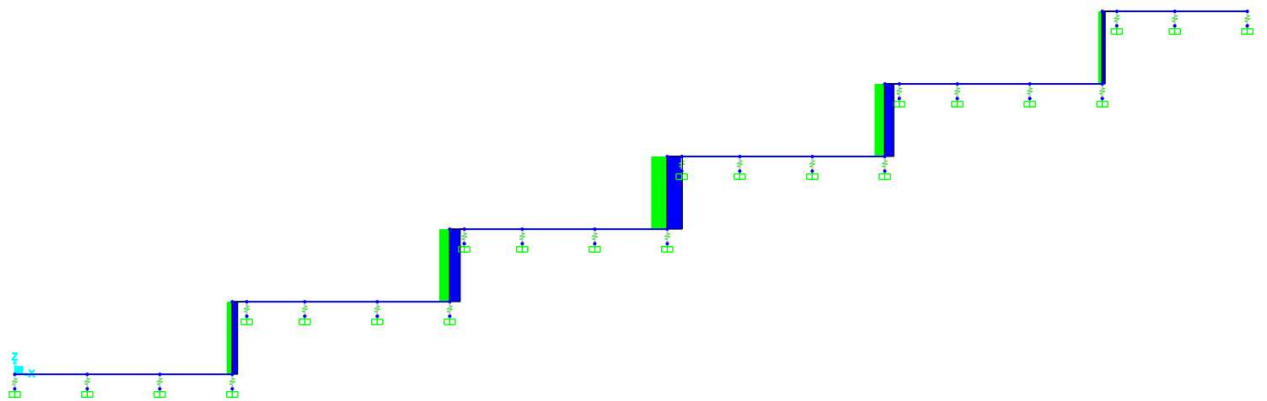


Figura 113_diagramma N (CV + sisma SXC)

$$N^+_{Ed,muro} = 1280 \text{ kN (di trazione)}$$

$$N^-_{Ed,muro} = -1280 \text{ kN (di compressione)}$$

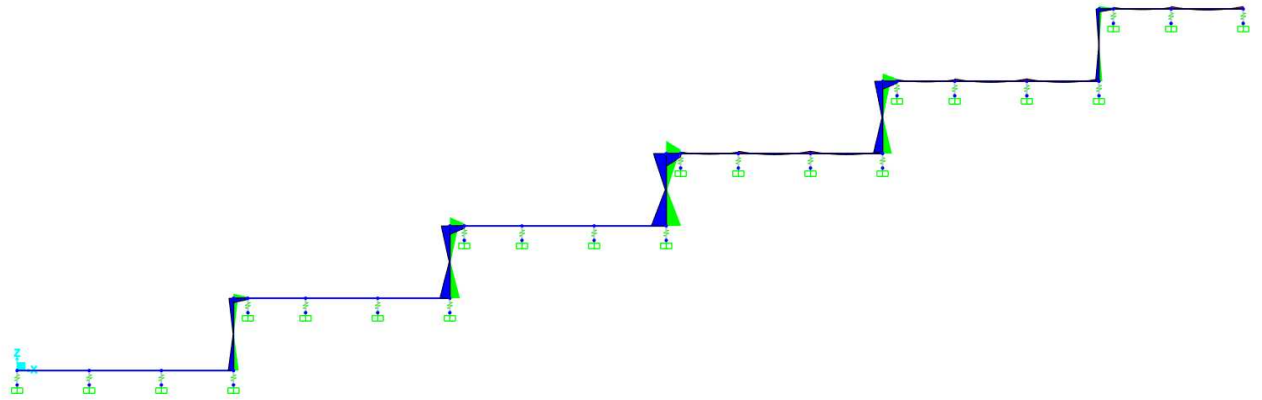


Figura 114_diagramma M (CV + sisma SXC)

$$M_{Ed,max,muro} = 3440 \text{ kNm}$$

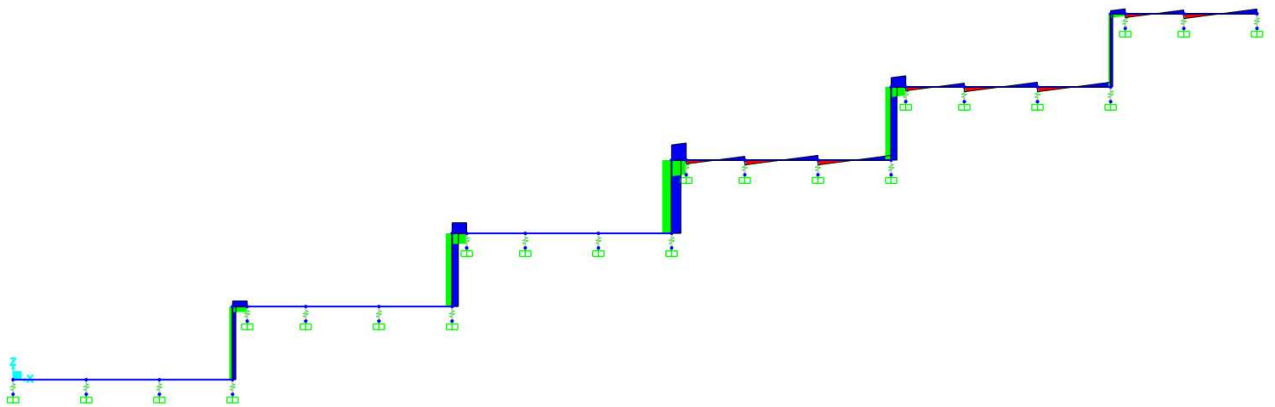


Figura 115_diagramma V (CV + sisma SXC)

$$V_{Ed,max,muro} = 1280 \text{ kN}$$

Tutte le massime sollecitazioni si ottengono sulla terza elevazione, essendo l'interfaccia tra la porzione caricata e quella non caricata. Sulla base dei valori ottenuti, tenendo conto quindi dell'intero stato di tensione a cui è soggetto il sistema, può essere ricercato il dominio resistente considerando un'armatura di $\Phi 22/20''$.

6. Dimensionamento del sistema di isolamento alla base composto da isolatori a scorrimento

Nel capitolo 5 si è visto come un sistema di isolamento sismico alla base composto da soli isolatori elastomerici produca degli effetti indesiderati dovuti alla forte influenza dello schema stesso dalla distribuzione dei carichi. Questo fenomeno è causato dal fatto che il funzionamento orizzontale dei dispositivi in gomma è pressoché indipendente dalle condizioni di carico verticale, e di conseguenza, una progettazione che vede distribuiti un numero di isolatori maggiore a 300, divisi in sole due tipologie, provoca gli effetti ottenuti. Nel presente capitolo si vuole ripercorrere lo stesso progetto visto sopra utilizzando degli isolatori a pendolo semplice. Il progetto e il funzionamento di questa tipologia, a differenza degli HDRB, dipende strettamente dalle condizioni di carico verticale agente in testa, e di conseguenza ogni isolatore sarà studiato con un processo operativo in funzione dell'effettiva massa che grava su di esso. Questa proprietà deve, quindi, porre rimedio al problema di dipendenza dalle masse prima ottenuto.

6.1. Predimensionamento

Il predimensionamento dei dispositivi a pendolo pone le basi sulle stesse analisi effettuate in fase iniziale per gli elastomerici, di cui vengono riportati i valori.

AREA OCCUPATA	6800	m ²
AREA EDIFICI	4194.64	m ²
MASSA ISOLATA	537187	t=kNs ² /m
Tis	2.3	s

CARICHI			TOTALI [KN]				
Pg1	170000	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pg1_MURI	25000	kN	170000	25000	260608.48	38487.24	50159.88
Pg21,g22	154590.5	kN	CARICHI PER UNITA' DI SUPERFCIE [KN/m ²]				
Pq,edifici	25765.08	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pq,edifici,neve	33197	kN	25.0	12.5	41.6	6.1	8.0
Pg1,g22,rim	106018	kN	CARICHI DISTRIBUITI [KN/m]				
Pq,rim	12722.16	kN	Pg1_PIASTRA	Pg1_MURI	PESO (g21+g22)	PESO Q	PESO NEVE
Pq,rim,neve	16962.88	kN	125.0	62.5	207.8	30.7	40.0

	AREA	SPESSORE	γ	TOTALE	TOTALE AL m ²
	[m ²]	[m]	[kN/m ³]	[kN]	[kn/m ²]
PIASTRA	6800	0.7	25	119000	17.5
TERRENO RIPORTO	6800	0.4	18.75	51000	7.5
PARETE	2000	0.5	25	25000	12.5
					37.5

Tabella 30_a) Dati di partenza riferiti al sistema; b) Analisi dei carichi c) Peso proprio piastra, terreno di riporto e muri

Il progetto di dispositivi che funzionano ad attrito risulta essere iterativo, in quanto il periodo di isolamento e lo smorzamento dipendono strettamente dallo spostamento, che deve essere ottenuto da uno spettro di risposta caratterizzato da un determinato valore di smorzamento. Si è partiti, dunque, da un periodo di primo tentativo e da un raggio e coefficiente d'attrito fissati per ogni dispositivo.

μ_{eff}	0.025	/
R	3700	mm

Tabella 31_raggio e coefficiente d'attrito fissati per ogni dispositivo

Si è partiti da uno spettro di progetto allo SLC smorzato di un fattore $\zeta=5\%$ e dal periodo sopra riportato di 2.3 secondi, con il seguente procedimento.

FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE LATITUDINE

13.20600 42.82900

Ricerca per comune

REGIONE PROVINCIA COMUNE

Piemonte Torino Agliè

Elaborazioni grafiche

Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

Elaborazioni numeriche

Tabella parametri

Reticolo di riferimento

Controllo sul reticolo

- Sito esterno al reticolo
- Interpolazione su 3 nodi
- Interpolazione corretta

Interpolazione

superficie rigata



La "Ricerca per comune" utilizza le ... coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che ... all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

Nodi del reticolo intorno al sito



INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

Figura 117_ricerca del sito per coordinate

FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) - V_{Nj} info

Coefficiente d'uso della costruzione - c_{Uj} info

Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) - V_{Rj} info

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) - T_{Rj} info

Stati limite di esercizio - SLE	SLO - $P_{VR} = 81\%$	120
	SLD - $P_{VR} = 63\%$	201
Stati limite ultimi - SLU	SLV - $P_{VR} = 10\%$	1898
	SLC - $P_{VR} = 5\%$	2475

Elaborazioni

Grafici parametri azione

Grafici spettri di risposta

Tabella parametri azione

Strategia di progettazione



LEGENDA GRAFICO

--□-- Strategia per costruzioni ordinarie

---■--- Strategia scelta

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

Figura 118_parametri di progetto dell'opera

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite
Stato Limite considerato: **SLC** info

Risposta sismica locale

Categoria di sottosuolo: **B** info $S_s = 1.000$ $C_s = 1.342$ info

Categoria topografica: **T3** info $h/H = 1.000$ $S_T = 1.200$ info

(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

Compon. orizzontale

Spettro di progetto elastico (SLE) Smorzamento ξ (%): **5** $\eta = 1.000$ info

Spettro di progetto inelastico (SLU) Fattore q_0 : **1** Regol. in altezza: **no** info

Compon. verticale

Spettro di progetto Fattore q : **1** $\eta = 1.000$ info

Elaborazioni

Grafici spettri di risposta ▶▶▶

Parametri e punti spettri di risposta ▶▶▶

Spettri di risposta

— Spettro di progetto - componente orizzontale
— Spettro di progetto - componente verticale
— Spettro elastico di riferimento (Cat. A-T1, $\xi = 5\%$)

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

Figura 119_Inserimento dei parametri per l'ottenimento dello spettro di progetto

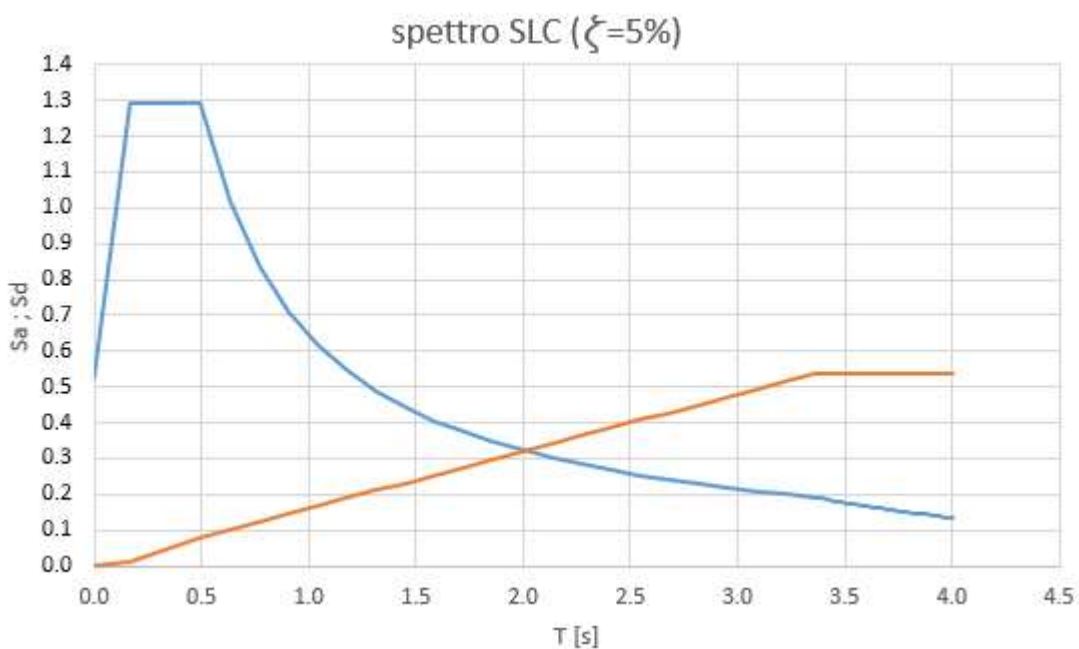


Figura 120_Spettro di progetto allo SLC orizzontale in accelerazione (blu) e in spostamento (rosso)

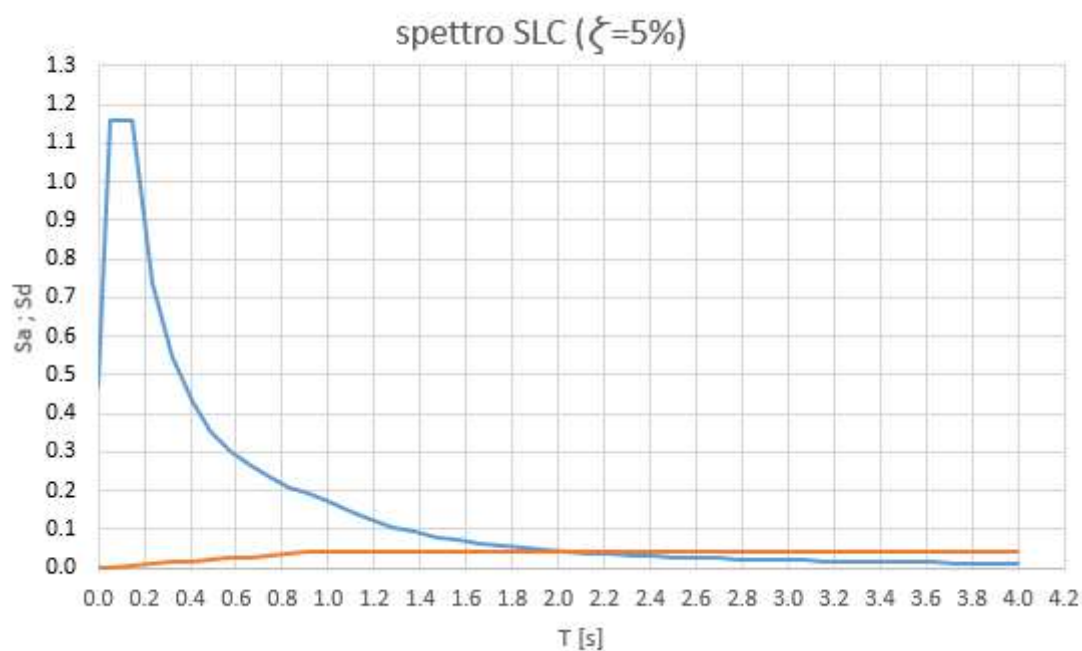


Figura 121_Spettro di progetto allo SLC verticale in accelerazione (blu) e in spostamento (rosso)

Si sono, dunque, ottenuti gli spettri qui riportati, dai quali si sono poi ricavati i dati di accelerazione e spostamento con i quali è stata portata avanti l'iterazione fino a convergenza (in particolar modo da quello orizzontale), per i quali vengono mostrati i risultati:

$T_{iso,5}$	3.40	s
ζ_5	0.14	/
D_5	0.325	m

Tabella 32_Periodo, smorzamento e spostamento di progetto degli isolatori a pendolo

6.2. Modellazione degli isolatori

In tale sezione viene riportato il processo di modellazione che ha coinvolto i singoli dispositivi, in quanto, essendo dipendenti dal carico che grava su di essi, è stata indispensabile una valutazione mediante SAP2000 che li restituisse in output. Il sistema di partenza è quello finale studiato nel capitolo del dimensionamento dei dispositivi elastomerici, che conta cinque elevazioni e sei sviluppi orizzontali, di 5 m di larghezza, modellato con elementi frame.

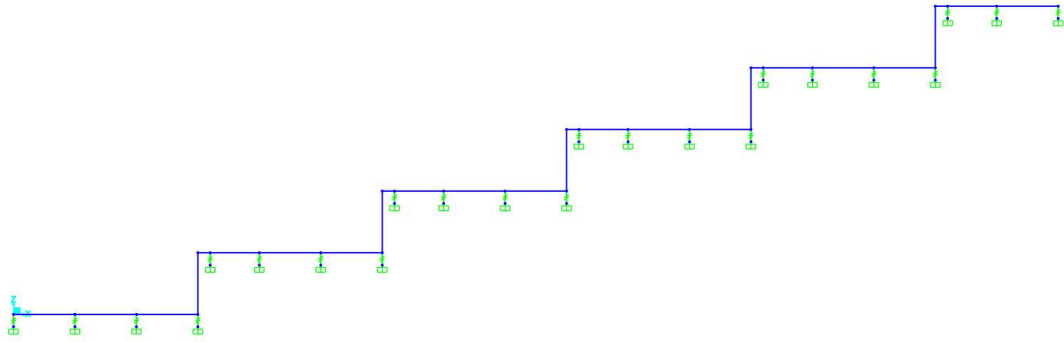


Tabella 33 _schema iniziale per lo studio degli isolatori (SAP2000)

Per l'inserimento degli isolatori sono stati utilizzati dei link lineari incastrati alla base, con i parametri di progetto studiati in fase di predimensionamento, fornendo un valore di rigidezza infinito in direzione verticale e fittizio sull'orizzontale.

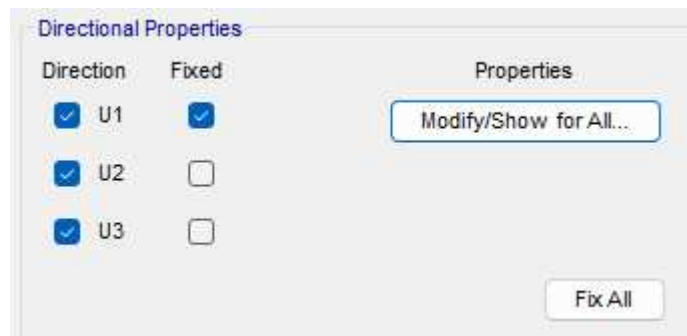


Tabella 34 _Rigidezza infinita in direzione verticale (SAP2000)

Una volta inseriti nel modello, è stato possibile effettuare un'analisi, dalla quale si sono poi ricavati i valori di carico verticale per ogni link nella combinazione non sismica (CV_SLU), sulla base del quale si sono scelti i dispositivi presenti nei cataloghi dei fornitori.

NODO	COMBINAZIONE	F3	μ_{eff}	K_{iso}	ζ_{iso}	COMBINAZIONE	F3	N_{Ed}
[-]	[-]	[kN]	[-]	[kN/m]	[-]	[-]	[kN]	[kN]
1	CV_SISMA	789.41	0.025	274.1	0.1403	CV_SLU	1231.6	2000
2	CV_SISMA	2181.36	0.025	757.4	0.1403	CV_SLU	3403.26	3500
3	CV_SISMA	2128.94	0.025	739.2	0.1403	CV_SLU	3321.49	3500
4	CV_SISMA	797.25	0.025	276.8	0.1403	CV_SLU	1243.83	2000
5	CV_SISMA	1130.15	0.025	392.4	0.1403	CV_SLU	1763.2	2000
6	CV_SISMA	1790.01	0.025	621.5	0.1403	CV_SLU	2792.7	3000
7	CV_SISMA	2222.84	0.025	771.8	0.1403	CV_SLU	3467.97	3500
8	CV_SISMA	772.29	0.025	268.1	0.1403	CV_SLU	1204.89	2000
9	CV_SISMA	1139.08	0.025	395.5	0.1403	CV_SLU	1777.14	2000
10	CV_SISMA	1790.46	0.025	621.6	0.1403	CV_SLU	2793.4	3000
11	CV_SISMA	2222.47	0.025	771.6	0.1403	CV_SLU	3467.4	3500
12	CV_SISMA	771.5	0.025	267.9	0.1403	CV_SLU	1203.66	2000
13	CV_SISMA	1140.13	0.025	395.8	0.1403	CV_SLU	1778.78	2000
14	CV_SISMA	1790.35	0.025	621.6	0.1403	CV_SLU	2793.23	3000
15	CV_SISMA	2223.01	0.025	771.8	0.1403	CV_SLU	3468.24	3500
16	CV_SISMA	772.75	0.025	268.3	0.1403	CV_SLU	1205.62	2000
17	CV_SISMA	1138.65	0.025	395.3	0.1403	CV_SLU	1776.47	2000
18	CV_SISMA	1789.72	0.025	621.4	0.1403	CV_SLU	2792.25	3000
19	CV_SISMA	2224.98	0.025	772.5	0.1403	CV_SLU	3471.32	3500
20	CV_SISMA	864.77	0.025	300.2	0.1403	CV_SLU	1349.17	2000
21	CV_SISMA	949.9	0.025	329.8	0.1403	CV_SLU	1481.99	2000
22	CV_SISMA	2148.15	0.025	745.8	0.1403	CV_SLU	3351.45	3500
23	CV_SISMA	794.3	0.025	275.8	0.1403	CV_SLU	1239.24	2000
F3_TOT		33572.47				F3_TOT	52378.3	

Tabella 35_Parametri degli isolatori

In tabella si possono osservare i dati ricavati per ogni isolatore. In particolare, si osserva la denominazione per ogni link (utile al fine del riconoscimento su SAP2000), il carico in combinazione sismica (CV_SISMA) su ogni dispositivo, il coefficiente d'attrito calcolato, la rigidezza orizzontale, lo smorzamento orizzontale, il carico in combinazione non sismica (CV_SLU) allo SLU per ogni dispositivo e, infine, il carico massimo per ogni dispositivo fornito dal produttore. Ottenute le rigidezze sul piano orizzontale per ogni isolatore è stata poi inserita sul software per eseguire le analisi. In particolare, si sono ricercate le sollecitazioni flettenti agenti sul muro ed eventuali sforzi di trazione nei dispositivi, per i quali si ricorda che non sono ammessi sforzi di

trazione. Come distribuzione dei carichi è stata fatta quella disuniforme, in modo tale da analizzare la situazione più sfavorevole.

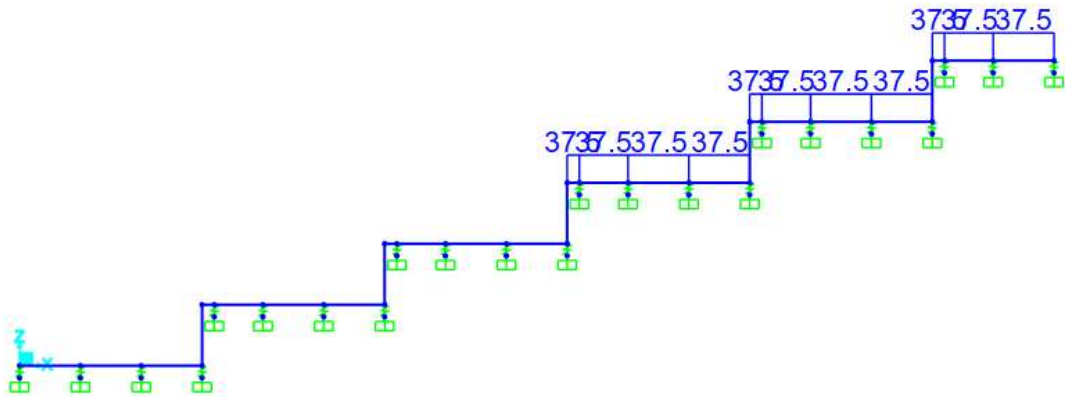


Figura 122_Distribuzione disuniforme dei carichi (carico di esempio relativo ai pesi propri degli elementi strutturali)

Lo schema qui rappresentato ha fornito il seguente diagramma dei momenti.

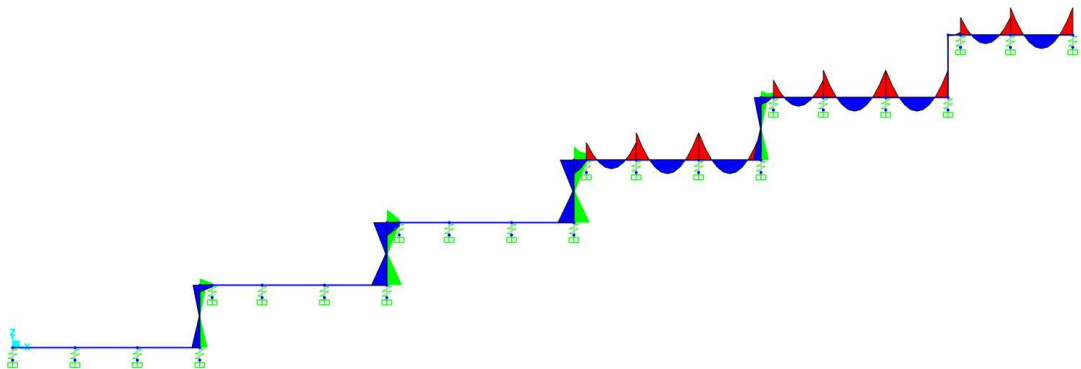


Figura 123_diagramma dei momenti per distribuzione dei carichi disuniforme

$$M_{Ed,muro,max} = \pm 298 \text{ kNm (terza elevazione)}$$

Di conseguenza, i valori ottenuti sono del tutto in linea con i momenti resistenti del capitolo precedente.

6.3. Time history

Una volta conclusa la modellazione in campo lineare degli edifici per la valutazione dello stato tensionale sul sistema strutturale, si sono eseguite delle

analisi dinamiche non lineari per ispezionare più a fondo il comportamento dei dispositivi di isolamento. In particolare, lo scopo delle time histories, nello studio effettuato, è stato quello di andare a ricercare i legami costitutivi degli isolatori per vedere se andassero in trazione.

Le analisi dinamiche non lineari si basano sull'integrazione diretta delle equazioni del moto concentrando le non linearità sui dispositivi di isolamento. Le equazioni di equilibrio dinamico sono date da:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = q(t)$$

Con:

- M: matrice delle masse
- C: matrice di smorzamento
- K: matrice delle rigidezze
- u, \dot{u} , \ddot{u} : spostamento, velocità e accelerazione della struttura
- q: carico applicato

6.3.1. input accelerometrici

Le analisi sono state svolte simulando l'input sismico attraverso accelerogrammi spettro compatibili forniti dal software SIMQKE_GR e con il segnale reale misurato dalla stazione di Castelluccio del 30/10/2016. Per quanto riguarda la parte degli accelerogrammi artificiali, le analisi sono state condotte con set di 3 accelerogrammi orizzontali e verticali per meglio rispettare le condizioni previste dalle NTC18, ovvero:

- la durata della parte pseudo-stazionaria degli accelerogrammi deve essere almeno pari a 10s. Quindi $TLVL \geq 10$;
- il numero di accelerogrammi o, per analisi spaziali, di gruppi di accelerogrammi deve essere almeno pari a 3. Quindi $NPA \geq 3$;
- l'ordinata spettrale media non dovrà presentare uno scarto in difetto superiore al 10%, rispetto alla corrispondente dello spettro elastico, in alcun punto del maggiore tra gli intervalli $0,15s \div 2,0s$ e $0,15s \div 2T$, in cui T è il periodo fondamentale di vibrazione della struttura in campo elastico, per le verifiche agli stati limite ultimi, e $0,15 s \div 1,5 T$, per le verifiche agli stati limite di esercizio. Quindi $TS < 0,15$ e $TL > 2,0 s$ o $2T$ ma $\leq 4 s$.

All'interno del software vanno inserite le coordinate del sito:

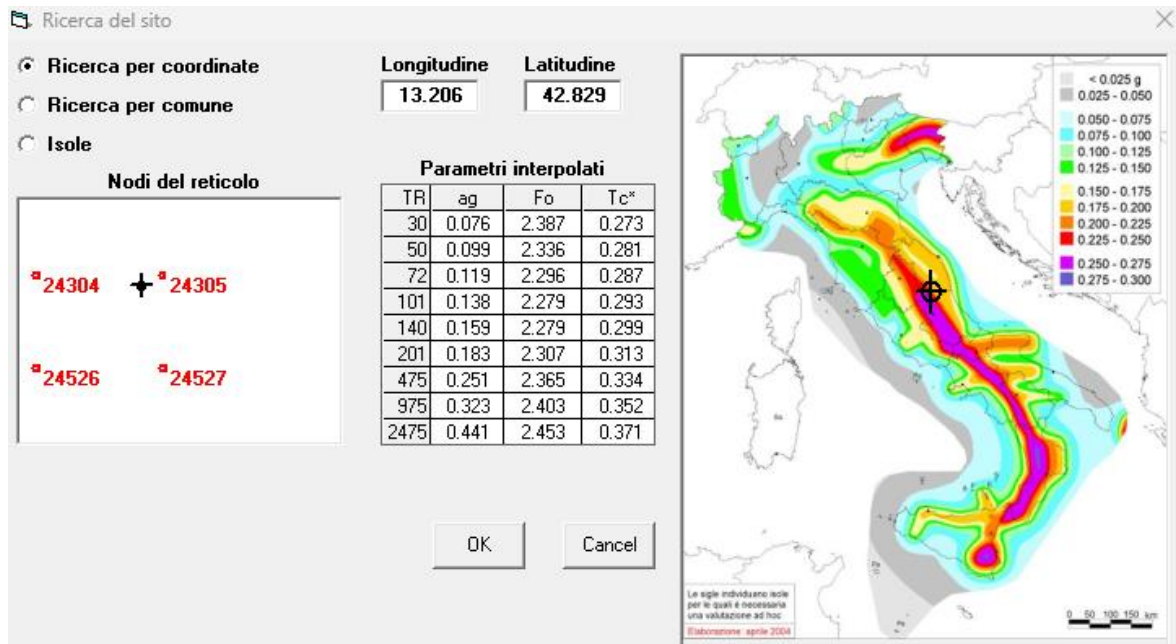


Figura 124_Definizione delle coordinate del sito d'interesse

Vanno, successivamente, definiti:

- Il periodo di riferimento V_R
- Lo stato limite
- Le caratteristiche sulla geomorfologia del sito
- La componente ricercata

Sulla base delle coordinate scelte, il software determinerà in modo automatico i valori di a_g , F_0 e T_c^* .

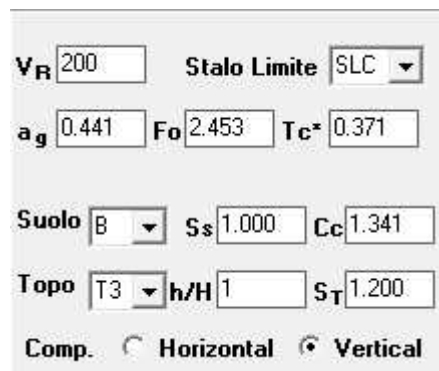


Figura 125_Parametri di progetto dello spettro (SIMQKE_GR)

Successivamente, premendo il pulsante “SIMQKE”, vengono richiesti i dati di input per la generazione degli accelerogrammi, definiti di seguito:

- TS: valore inferiore dello spettro di risposta desiderato
- TL: valore superiore dello spettro di risposta desiderato
- TRISE: inizio della parte stazionaria dell'accelerogramma
- TLVL: durata della parte stazionaria (min 10s secondo NTC)
- DUR: durata totale dell'accelerogramma
- NCYCLE: numero di iterazioni per meglio regolarizzare lo spettro di risposta
- AGMX: accelerazione massima del terreno (viene impostata automaticamente)
- NPA: numero di accelerogrammi statisticamente indipendenti da generare
- IIX: numero intero dispari che serve per iniziare la generazione casuale degli accelerogrammi
- AMOR: coefficiente di smorzamento viscoso.

Si riportano dunque gli accelerogrammi generati e i relativi spettri ai diversi Stati Limite presi in esame.

- **COMPONENTE ORIZZONTALE (SIMQKE_GR)**

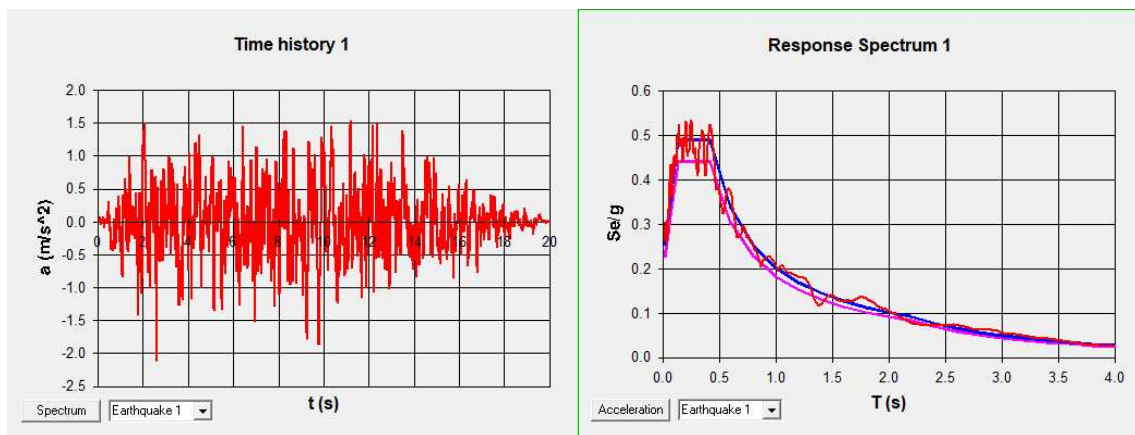


Figura 126_Time history 1, SLD

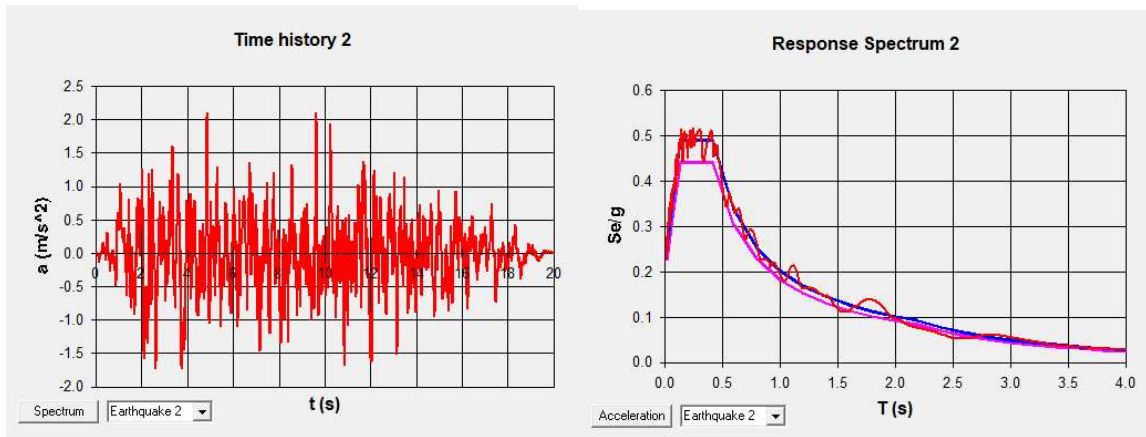


Figura 127_Time history 2, SLD

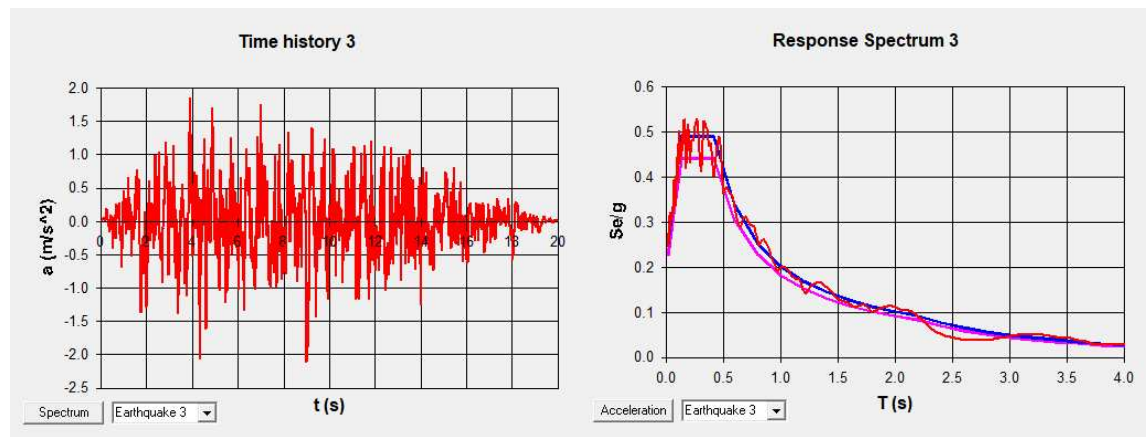


Figura 128_Time history 3, SLD

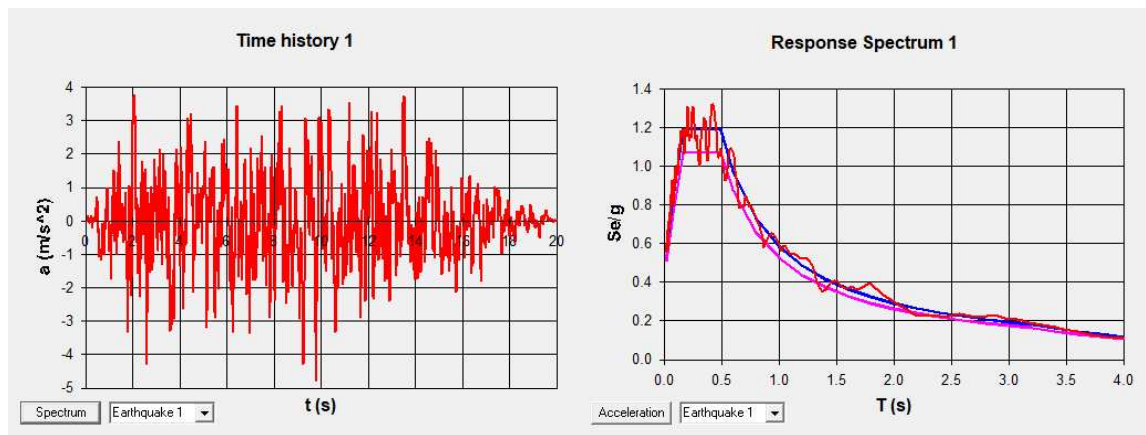


Figura 129_Time history 1, SLV

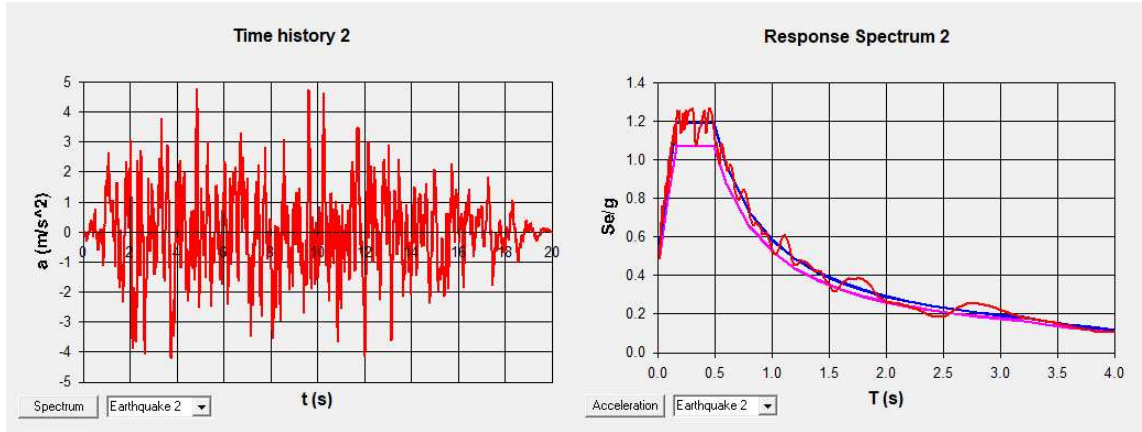


Figura 130_Time history 2, SLV

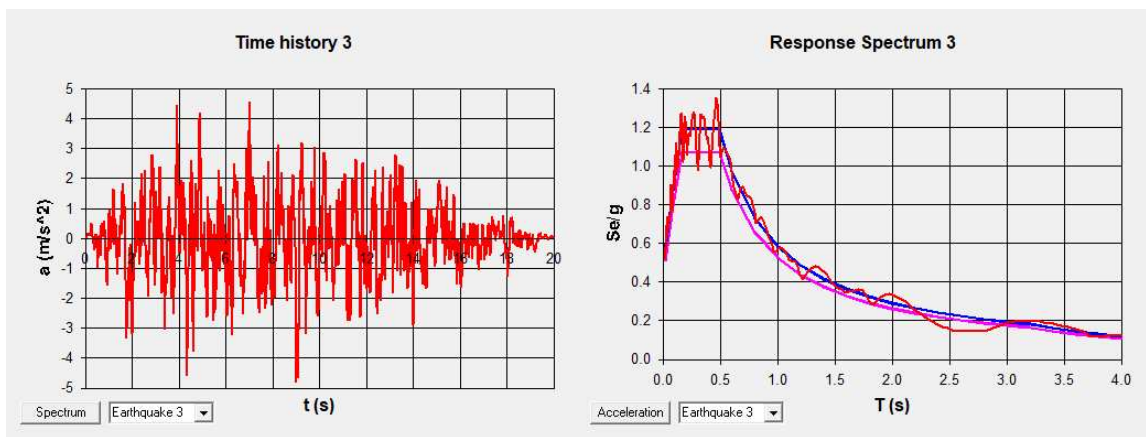


Figura 131_Time history 3, SLV

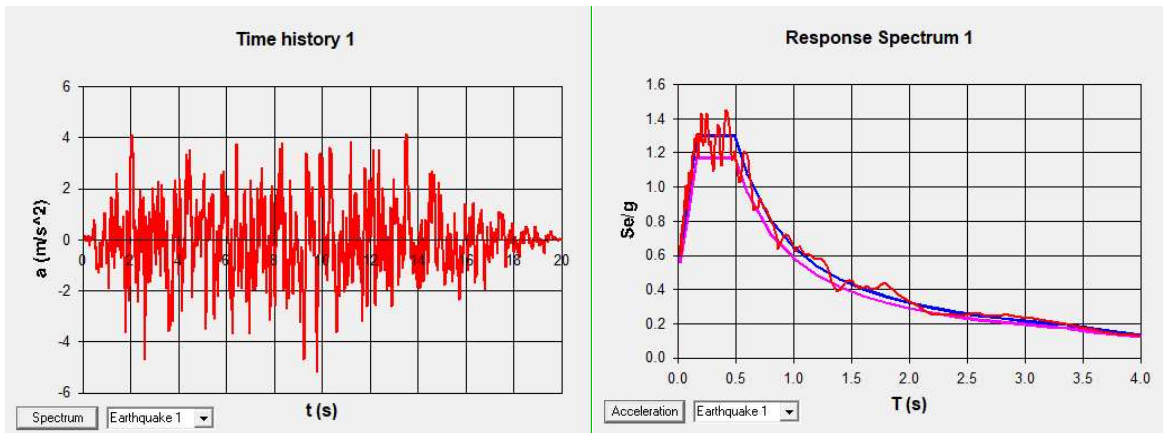


Figura 132_Time history 1, SLC

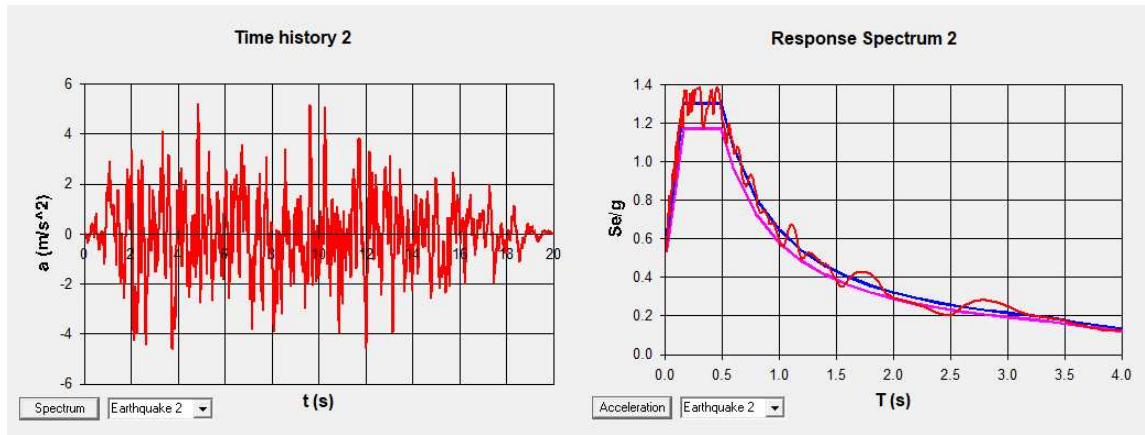


Figura 133_Time history 2, SLC

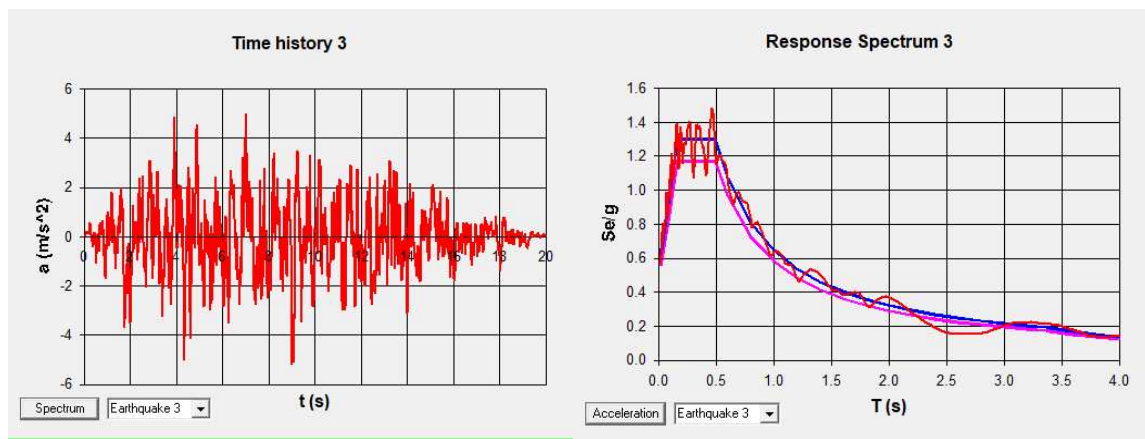


Figura 134_Time history 3, SLC

- **COMPONENTE VERTICALE (SIMQKE_GR)**

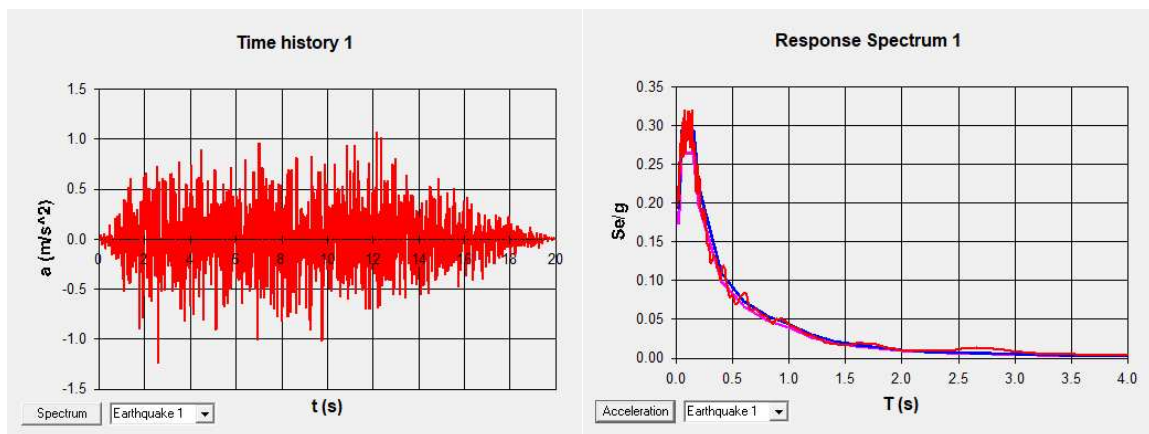


Figura 135_Time history 1, SLD

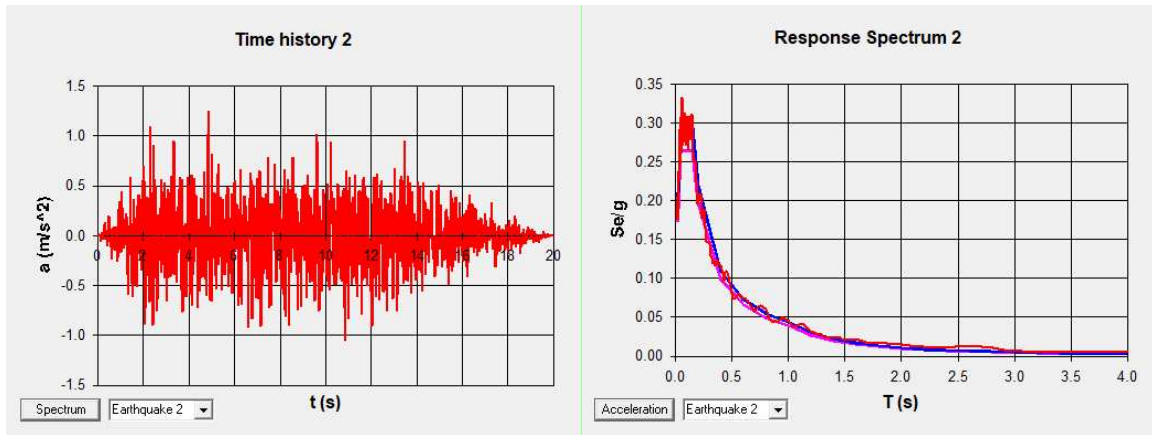


Figura 136_Time history 2, SLD

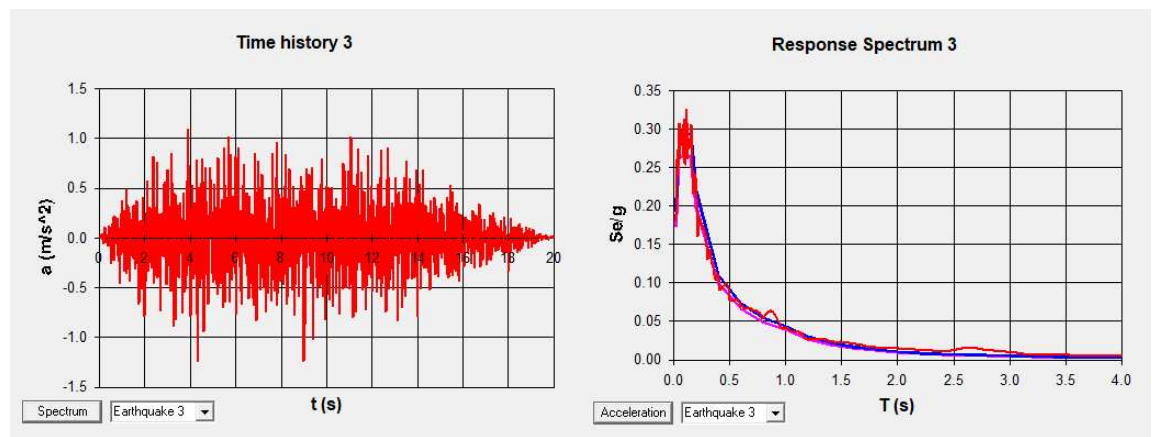


Figura 137_Time history 3, SLD

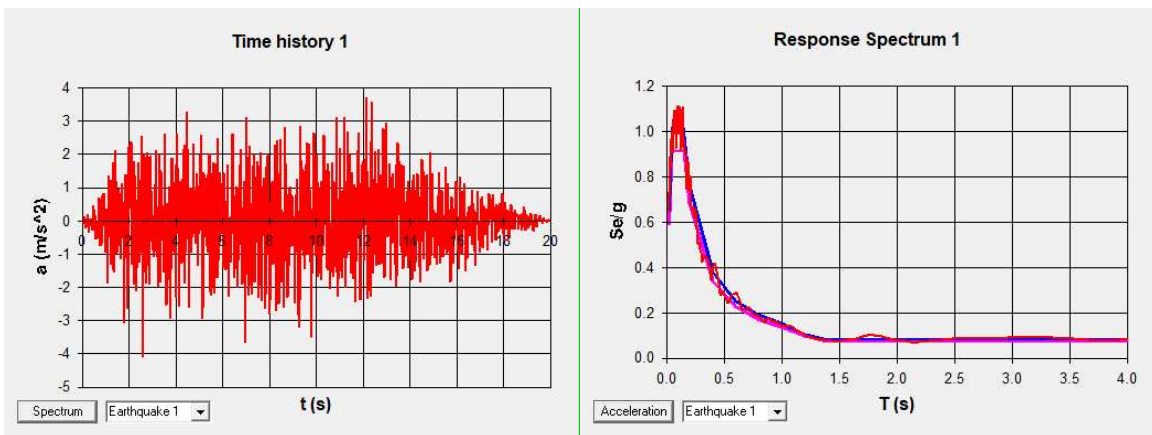


Figura 138_Time history 1, SLV

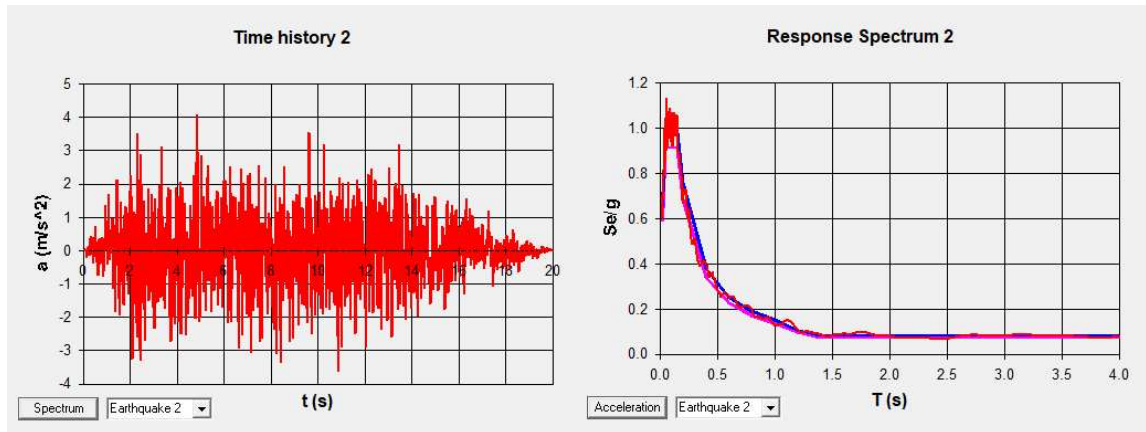


Figura 139_Time history 2, SLV

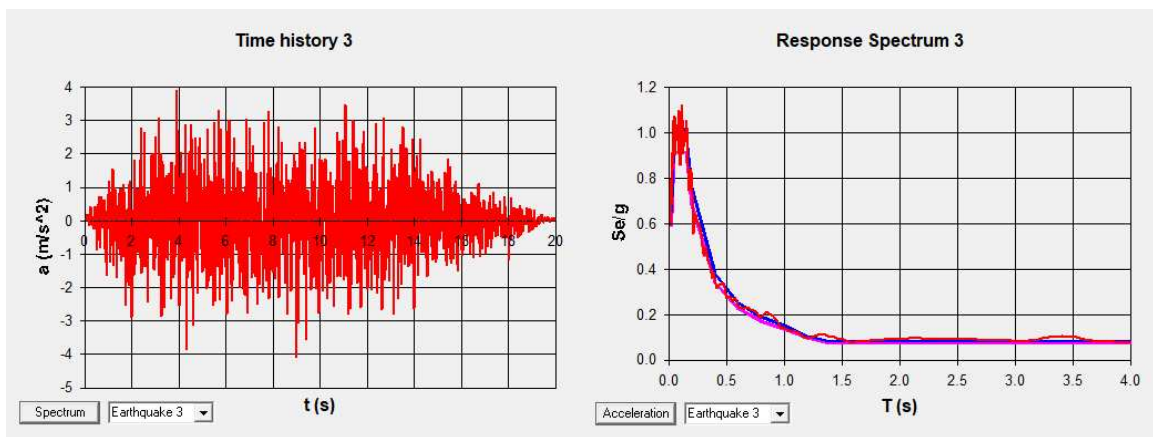


Figura 140_Time history 3, SLV

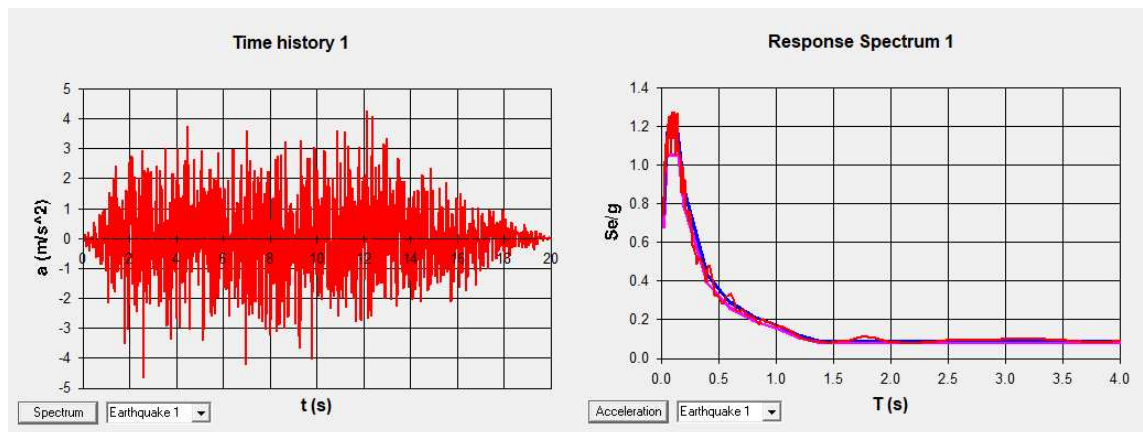


Figura 141_Time history 1, SLC

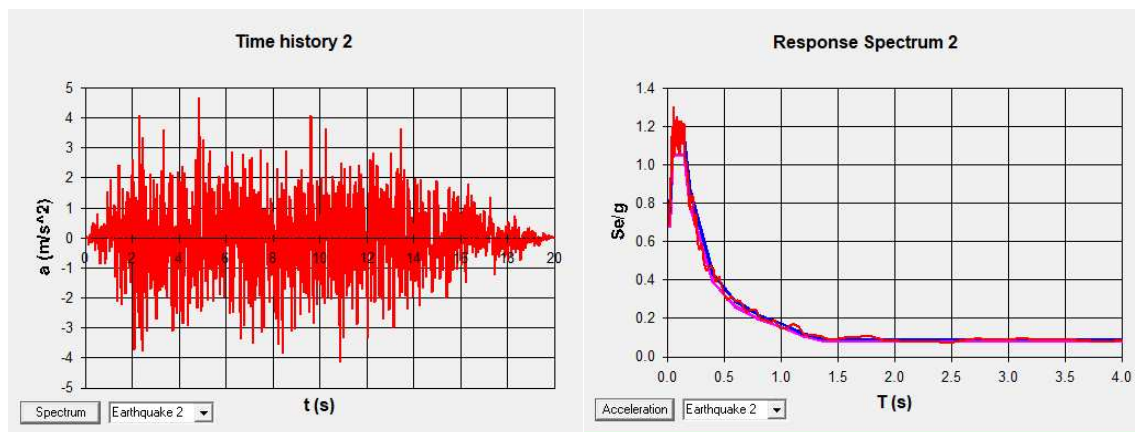


Figura 142_Time history 2, SLC

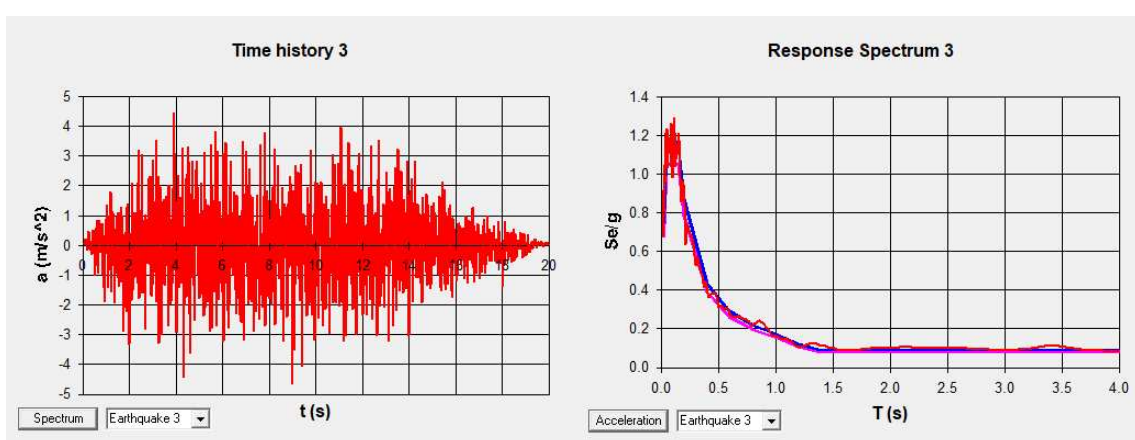


Figura 143_Time history 3, SLC

- **RESISTRAZIONE CASTELLUCCIO 30/10/2016**

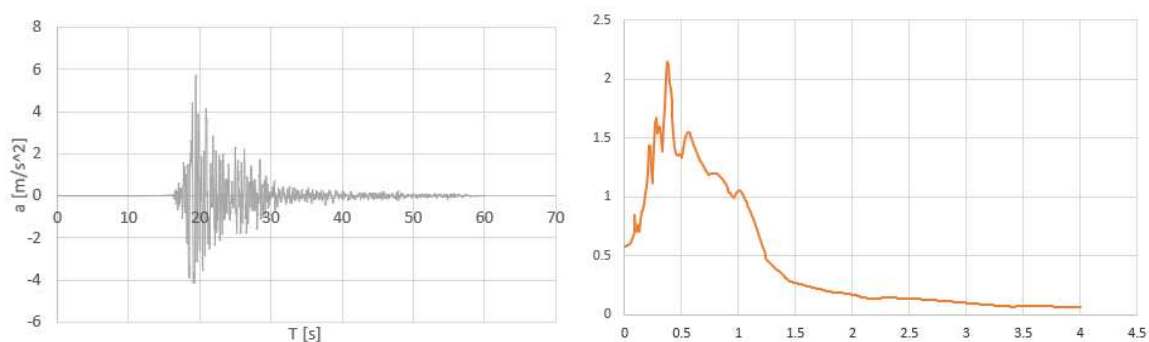


Figura 144_Accelerogramma e spettro orizzontale (NS) registrati dalla stazione di CLO il 30/10/2016

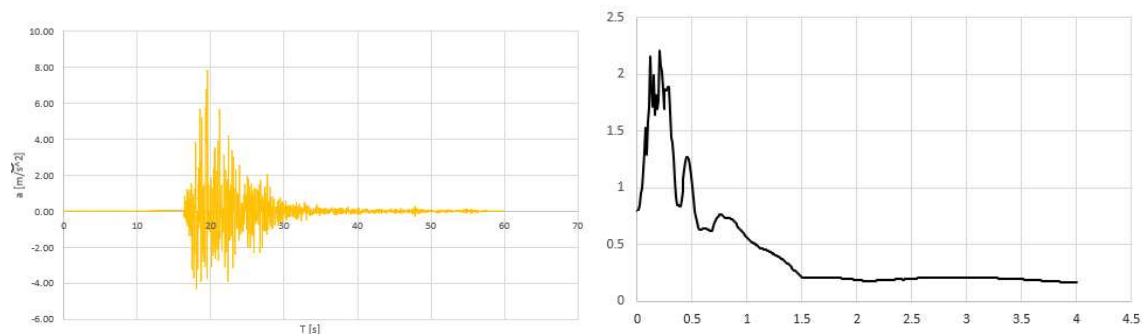


Figura 145_Accelerogramma e spettro verticali (Z) registrati dalla stazione di CLO il 30/10/2016

Già dal confronto degli accelerogrammi verticali si può notare una notevole differenza nel contenuto in frequenza (gli accelerogrammi registrati, essendo reali, risultano avere un contenuto in energia minore rispetto a quelli generati artificialmente), e un forte picco in accelerazione verticale avvenuto a Castelluccio e captato dalla stazione il 30/10/2016.

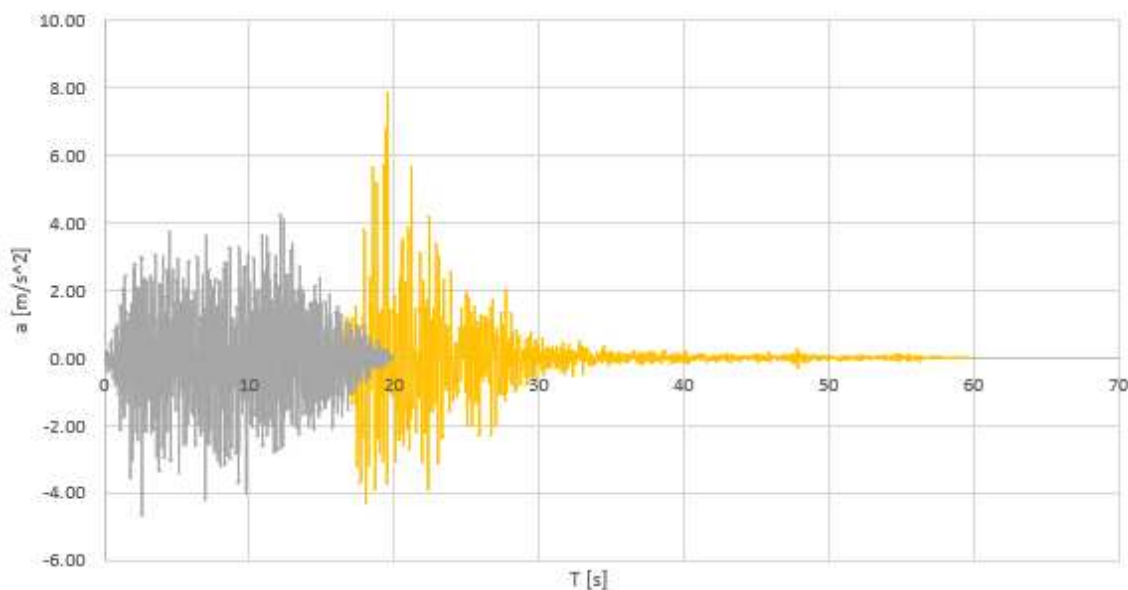


Figura 146_Confronto accelerogramma registrato (in giallo) e simulato da SIMQKE_GR allo SLC (in grigio)

6.3.2. Modellazione non lineare

Nel modello sui cui si andranno poi ad eseguire analisi non lineari è di fondamentale importanza, prima di tutto, definire una condizione iniziale che definisce lo stato della struttura alla partenza dell'analisi dinamica non lineare stessa. Di conseguenza si è definita una fase di riferimento per l'inizio delle

time histories con una push over (analisi statica non lineare) che tiene conto dei carichi verticali in condizione sismica, sotto riportata.

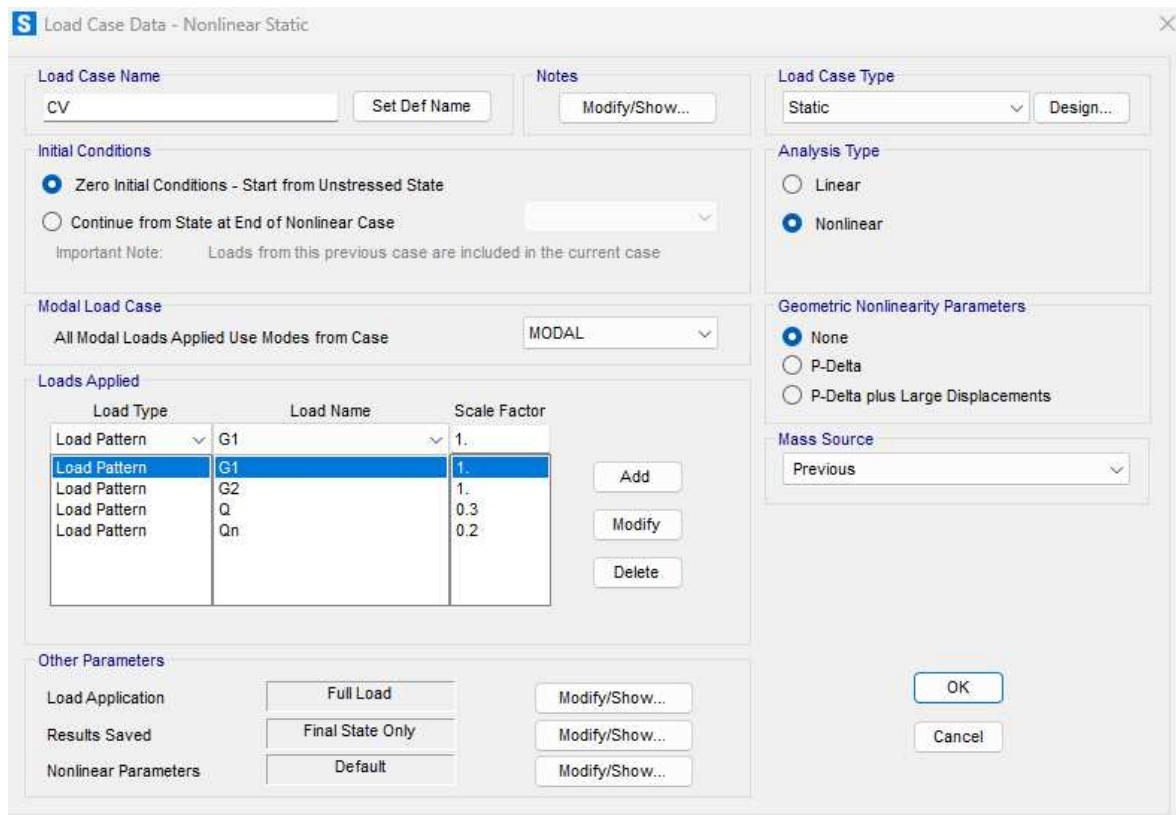


Figura 147_Definizione push-over (SAP2000)

Successivamente, sono stati inseriti nel SAP2000 gli accelerogrammi riportati al §6.3. In particolare, sono stati esportati da SIMQKE come file di testo e importati sul SAP in numero pari a 2 per gli accelerogrammi artificiali orizzontali, pari a 1 per quelli artificiali verticali e per quelli di Castelluccio. Si riporta, da esempio, il primo accelerogramma orizzontale allo SLC importato nel programma.

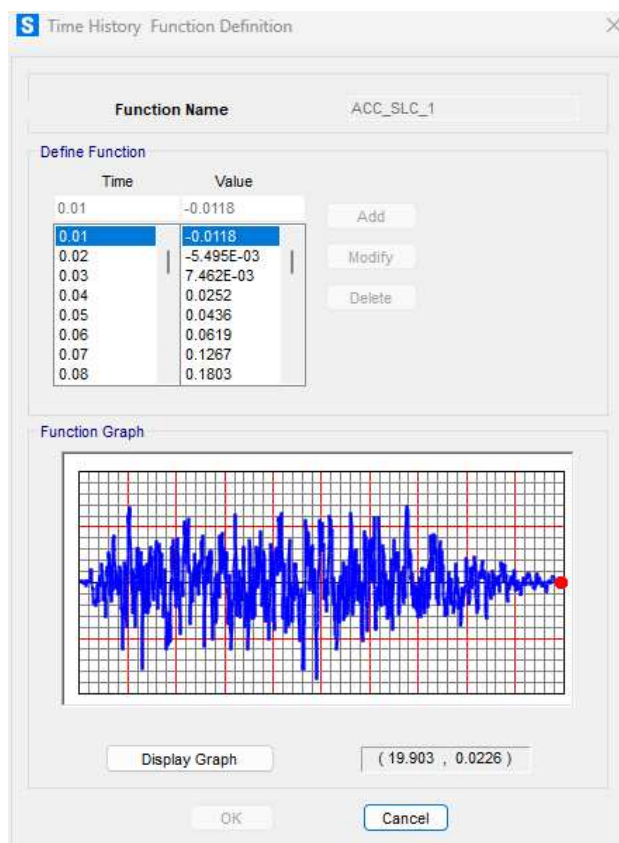


Figura 148_Importazione degli accelerogrammi (SAP2000)

Definiti gli accelerogrammi, si sono poi introdotti i casi di analisi dinamica non lineare del tipo “Direct Integration”. Più nello specifico, le analisi sono state fatte ai diversi Stati Limite (SLD, SLV, SLC) e con i valori di accelerazioni registrati a Castelluccio, e per ognuno di essi sono stati considerati due accelerogrammi: orizzontale e verticale.

S Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History

Load Case Name: TH_XZ_SLD Set Def Name Modify/Show... Notes

Load Case Type: Time History Design...

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case CV

 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	ACC_SLD_1	1.
Accel	U3	ACC_SLD_Z	1.

Add Modify Delete

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:

- Number of Output Time Steps: 2500
- Output Time Step Size: 0.01

Other Parameters:

- Damping: None Modify/Show...
- Time Integration: Hilber-Hughes-Taylor Modify/Show...
- Nonlinear Parameters: Default Modify/Show...

Analysis Type:

- Linear
- Nonlinear

Solution Type:

- Modal
- Direct Integration

Geometric Nonlinearity Parameters:

- None
- P-Delta
- P-Delta plus Large Displacements

History Type:

- Transient Consider Collapse
- Periodic

Mass Source: MSSSRC1

OK Cancel

Figura 149_Time history SLD

S Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History

Load Case Name: TH_XZ_SLV Set Def Name Modify/Show... Notes

Initial Conditions

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case CV

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case

Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	ACC_SLV_1	1.
Accel	U1	ACC_SLV_1	1.
Accel	U3	ACC_SLV_Z	1.

Add Modify Delete

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data

Number of Output Time Steps: 2500

Output Time Step Size: 0.01

Other Parameters

Damping: None Modify/Show...

Time Integration: Hilber-Hughes-Taylor Modify/Show...

Nonlinear Parameters: Default Modify/Show...

Load Case Type: Time History Design...

Analysis Type: Nonlinear

Solution Type: Direct Integration

Geometric Nonlinearity Parameters: None

History Type: Transient Consider Collapse

Mass Source: MSSSRC1

OK Cancel

Figura 150_Time history SLV

S Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History

Load Case Name: TH_XZ_SLC Set Def Name Modify/Show... Notes

Initial Conditions

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case CV

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case

Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	ACC_SLC_1	1.
Accel	U1	ACC_SLC_1	1.
Accel	U3	ACC_SLC_Z	1.

Add Modify Delete

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data

Number of Output Time Steps: 5000

Output Time Step Size: 5.000E-03

Other Parameters

Damping: None Modify/Show...

Time Integration: Hilber-Hughes-Taylor Modify/Show...

Nonlinear Parameters: Default Modify/Show...

Load Case Type: Time History Design...

Analysis Type: Linear Nonlinear

Solution Type: Modal Direct Integration

Geometric Nonlinearity Parameters: None P-Delta P-Delta plus Large Displacements

History Type: Transient Periodic Consider Collapse

Mass Source: MSSSRC1

OK Cancel

Figura 151_Time history SLC

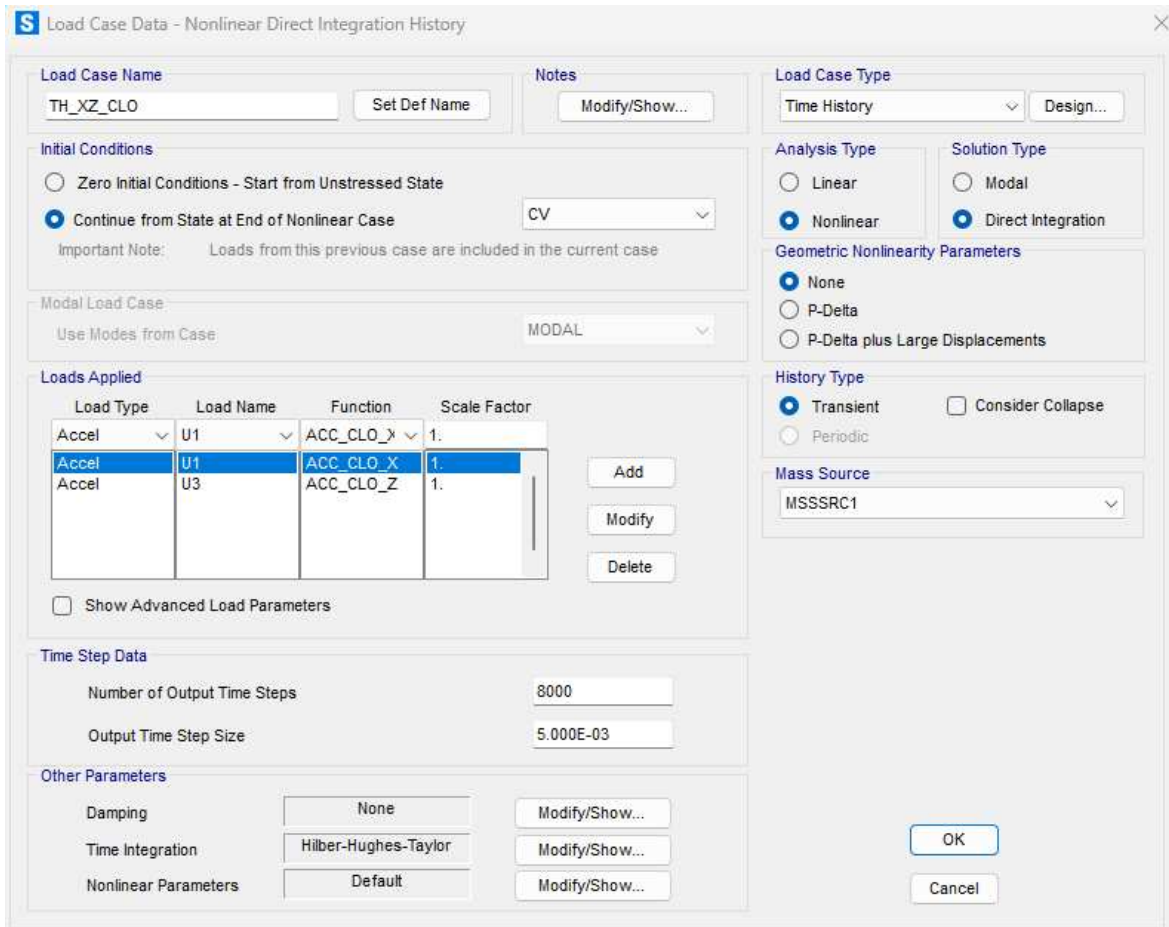


Figura 152_Time history CLO

La modellazione è stata svolta concentrando le non linearità negli isolatori, rappresentati da un legame costitutivo definito dal software “friction isolator”. Si tratta di un isolatore biassiale ad attrito che accoppia le proprietà di attrito e le deformazioni a taglio. Di particolare importanza è la funzione di “GAP assiale”, presente di default nel legame, la quale conferisce al link l’incapacità di resistere a trazione. Tale modello fu proposto da Wen e Park.

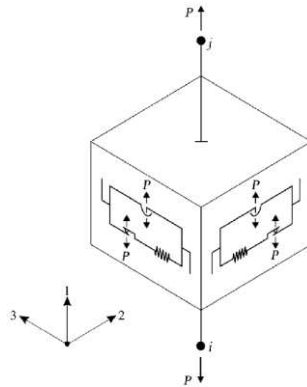


Figura 153_Modello proposto da Wen e Park (SAP2000)

Nelle direzioni U1 e U2 è stata considerata una rigidezza pari al valore della rigidezza del ramo iniziale in condizioni di riposo dei dispositivi fino all'attivazione del sistema:

$$K = \frac{N_m \mu}{s_0}$$

Dove:

- N_m è il carico medio sugli isolatori in combinazione sismica;
- s_0 è lo spostamento in condizioni di riposo pari a 0,001 m;
- μ è il coefficiente d'attrito medio pari a 0,025

Viene approssimativamente adottato un valore di K in direzione orizzontale di 100.000 kN/m.

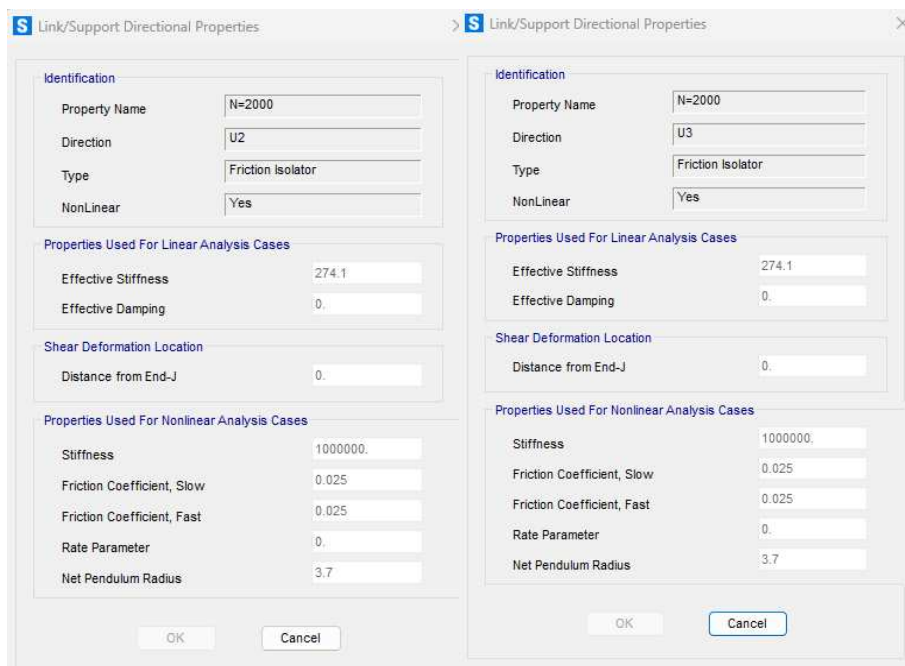


Figura 154_Caratteristiche isolatori con $N_{adm}=2000$ (fornito dal produttore) in U2 e U3

In direzione U1 il grado di libertà deve essere sbloccato, in modo tale da poter far partire l'analisi da una condizione iniziale dettata dai carichi verticali in combinazione sismica, seguendo uno schema di analisi statica non lineare. La rigidezza in questa direzione è stata valutata partendo dal carico massimo che l'isolatore può sopportare (fornito dal produttore) normalizzato rispetto a 0,001 m. Di seguito si riportano i valori di rigidezza verticale per ogni link.

NODO	K_v	NODO	K_v
[-]	[kN/m]	[-]	[kN/m]
1	2000000	14	3000000
2	3500000	15	3500000
3	3500000	16	2000000
4	2000000	17	2000000
5	2000000	18	3000000
6	3000000	19	3500000
7	3500000	20	2000000
8	2000000	21	2000000
9	2000000	22	3500000
10	3000000	23	2000000
11	3500000		
12	2000000		
13	2000000		

Tabella 36 K_v per ogni isolatore

Infine, è stato ritenuto interessante andare a disporre anche una possibile configurazione di edifici al di sopra della piastra, modellati con elementi frame. Questo perché si è voluto studiare se la loro presenza influisse sul sistema aumentando lo smorzamento verticale. Dunque, la modellazione del complesso

edilizio è stata fatta in modo semplificato, in quanto lo scopo principale non era quello di studiare il loro comportamento sotto sisma. Di conseguenza, sono stati definiti due materiali nuovi, uno per i muri e uno per i solai. Per il primo è stata considerata una muratura di mattoni pieni, mentre per il secondo il classico cemento armato.

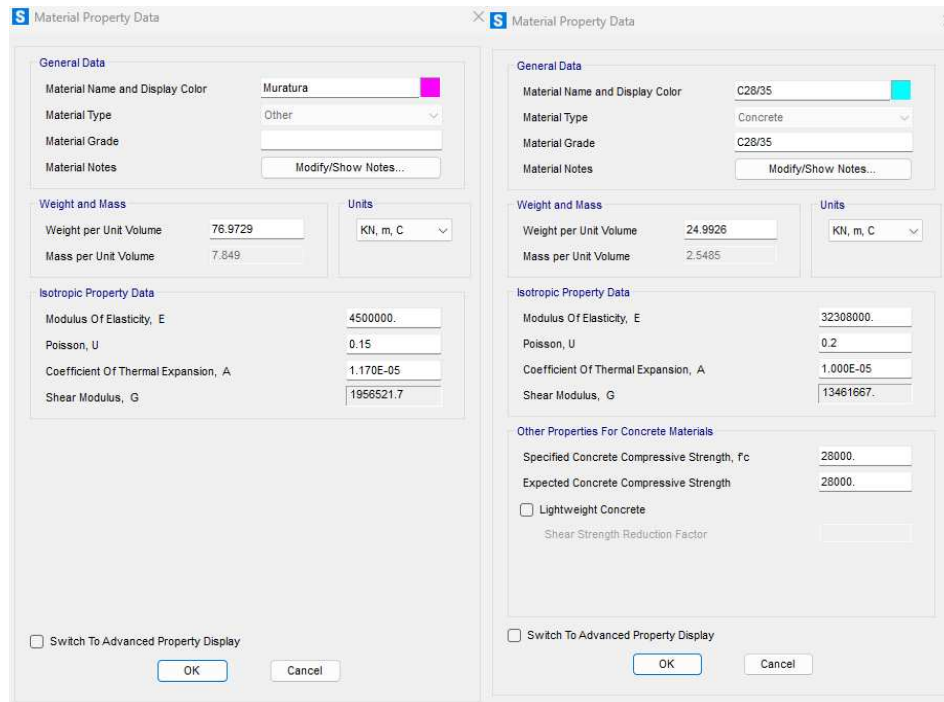


Figura 155 _Modellazione materiali usati per le pareti verticali e i solai degli edifici (SAP2000)

Per fornire capacità dissipativa in direzione verticale anche agli edifici si è agito sui materiali. Più nello specifico, l'equazione del moto, in uno studio sismico, richiede la conoscenza della matrice di dissipazione $[C]$. Questa viene comunemente ricercata per combinazione lineare della matrice delle masse $[M]$ e delle rigidezze $[K]$.

$$[C]=a_0[K]+a_1[M]$$

Il software utilizzato è in grado di considerare il comportamento dissipativo cercato in modo automatico, dandogli in input i valori di a_0 e a_1 . Il calcolo di questi parametri prevede la conoscenza del periodo di vibrare verticale del sistema (in quanto la dissipazione ricercata è quella verticale) e lo smorzamento riferito al materiale. I coefficienti a_0 e a_1 possono essere calcolati come segue:

$$a_0 = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i+\omega_j}\zeta \quad \text{e} \quad a_1 = \frac{2}{\omega_i+\omega_j}\zeta$$

Ne consegue che il coefficiente da fornire al SAP è strettamente legato al valore di smorzamento considerato. Si riporta, come esempio, il valore dei coefficienti considerando un coefficiente di smorzamento della sovrastruttura pari al 5%:

ANALISI LINEARE (parametri materiale: Rayleigh)			
ω_1	131.72	a_1	0.0004
ω	131.72	a_0	6.5861

Tabella 37_Coefficienti alla Rayleigh (Ryan e Polanco, 2008)

Valori che sono poi stati inseriti sul SAP.

Figura 156_Inserimento dei coefficienti alla Rayleigh su SAP2000

Definiti i materiali si sono poi assegnate le sezioni agli elementi frame. Per gli elementi verticali è stata considerata una parete in muratura di 0,3 m di spessore, mentre per gli orizzontamenti è stato preso come riferimento un pacchetto di solaio avente 0,25 m di altezza.

Figura 157_Sezione muro edifici (SAP2000)

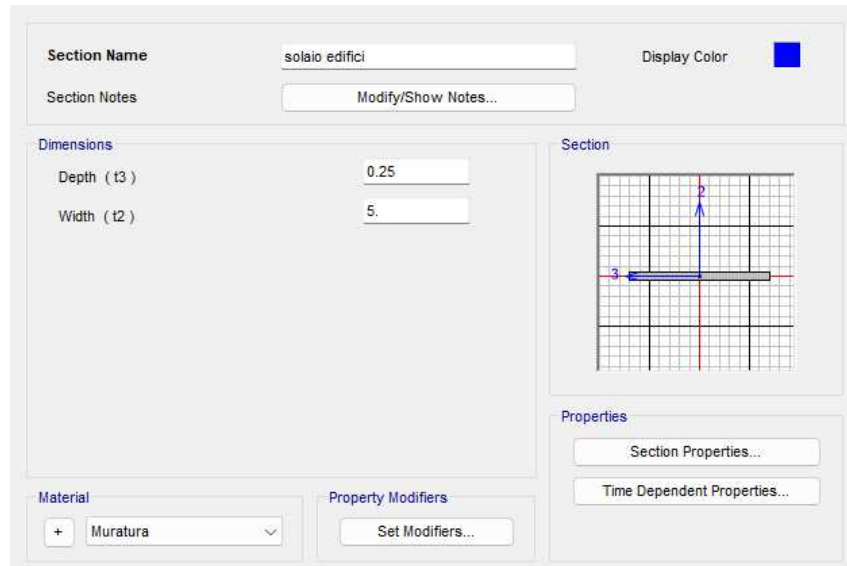


Figura 158_Sezione solaio edifici (SAP2000)

Lo schema finale ottenuto risulta il seguente, caratterizzato dal sistema piastra composta da sei orizzontamenti sotto la quale alloggianno gli isolatori, che svolge la funzione d'appoggio per gli edifici.

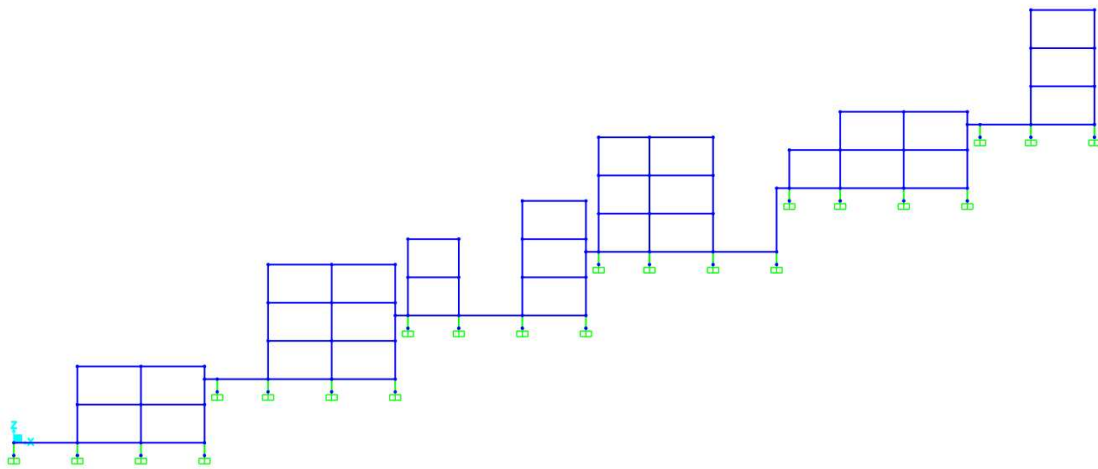


Figura 159_Schema piastra con edifici (SAP2000)

6.4. Soluzione I: Isolatori a pendolo semplice con $\xi=2\%$

La prima soluzione vede l'applicazione degli isolatori a scorrimento modellati nei capitoli precedenti concentrando sui dispositivi stessi una dissipazione in direzione verticale pari al 2%. L'importanza nel fornire ai dispositivi un determinato valore di dissipazione in direzione Z risiede nel fatto che gli stessi non possono essere soggetti a sforzi di trazione, in quanto, facendo affidamento sull'attrito scambiato tra la pasticca e la superficie di scorrimento, non

funzionerebbero. Per la determinazione dei valori dei parametri sulla verticale si è fatto uso di nozioni da letteratura, in particolare:

- $\omega_v = \frac{2\pi}{T_{iso,vert}}$
- $C_{is,v} = \frac{2K_v}{\omega_v} \zeta$

Dove $T_{iso,vert}$ è il periodo d'isolamento verticale della struttura, ricavato dal SAP eseguendo un'analisi modale e pari a 0,048 s. Essendo sei gli orizzontamenti presenti nel modello, il primo periodo fondamentale di vibrare della struttura in direzione verticale è risultato essere il settimo.

OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless
MODAL	Mode	1	3.410343	1	0	9.858E-14
MODAL	Mode	2	0.767861	2.032E-07	0	2.637E-07
MODAL	Mode	3	0.407562	1.434E-08	0	2.853E-08
MODAL	Mode	4	0.292292	3.386E-09	0	4.989E-07
MODAL	Mode	5	0.242452	1.232E-09	0	2.049E-07
MODAL	Mode	6	0.220984	3.669E-10	0	2.593E-07
MODAL	Mode	7	0.047799	5.109E-17	0	0.68494
MODAL	Mode	8	0.047733	1.668E-16	0	0.00029
MODAL	Mode	9	0.047623	2.562E-16	0	0.08315
MODAL	Mode	10	0.047473	2.238E-16	0	0.00116
MODAL	Mode	11	0.0472	5.224E-17	0	0.06007
MODAL	Mode	12	0.046991	3.75E-16	0	0.00411

Tabella 38_Risultati analisi modale struttura (SAP2000)

Così facendo, è stato possibile ricavare i dati da fornire in direzione U1 ad ogni isolatore.

ANALISI NON LINEARE					
NODO	K_v	ζ	$T_{H,V} (sap)$	ω_v	C_{IS}
[-]	[kN/m]	[-]	[s]	[s ⁻¹]	[kNs/m]
1	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2
2	3500000.0	0.02	0.048	130.9	1069.5
3	3500000.0	0.02	0.048	130.9	1069.5
4	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2
5	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2
6	3000000.0	0.02	0.048	130.9	916.7
7	3500000.0	0.02	0.048	130.9	1069.5
8	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2
9	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2
10	3000000.0	0.02	0.048	130.9	916.7
11	3500000.0	0.02	0.048	130.9	1069.5
12	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2
13	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2
14	3000000.0	0.02	0.048	130.9	916.7
15	3500000.0	0.02	0.048	130.9	1069.5
16	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2
17	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2
18	3000000.0	0.02	0.048	130.9	916.7
19	3500000.0	0.02	0.048	130.9	1069.5
20	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2
21	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2
22	3500000.0	0.02	0.048	130.9	1069.5
23	2000000.0	0.02	0.048	130.9	611.2

Tabella 39_Parametri in direzione U1 degli isolatori

Eseguita la modellazione degli isolatori è stata poi lanciata l'analisi dinamica non lineare. I risultati ricercati sono stati i cicli degli isolatori, prendendo come significativo un dispositivo per orizzontamento, sia in direzione orizzontale (comportamento a taglio sotto azione verticale), che in direzione verticale. In particolar modo, dai primi era possibile vedere il legame costitutivo dell'isolatore, mentre dai secondi risultava semplice ed intuitivo vedere se fosse presente della trazione.

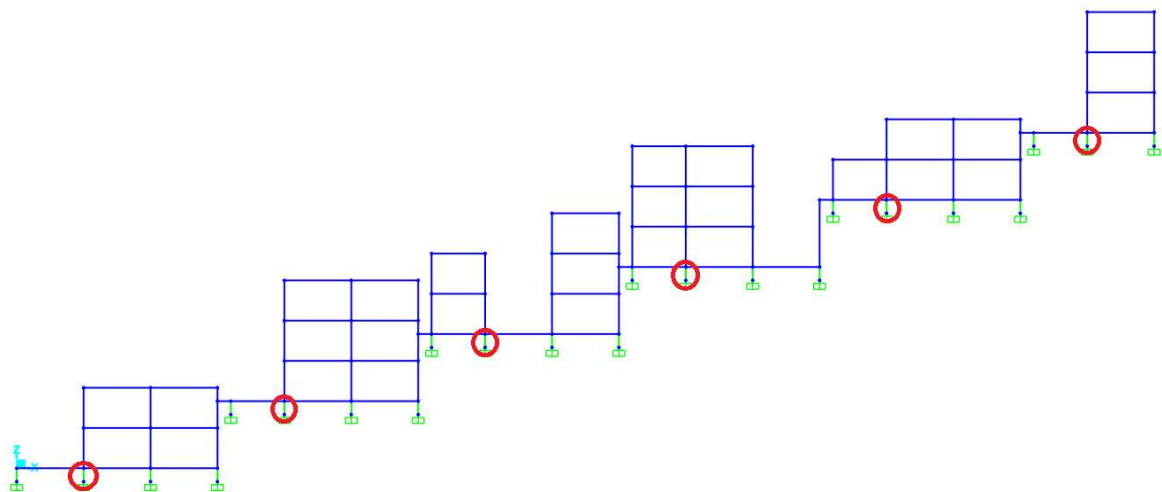


Figura 160_isolatori di riferimento (SAP2000)

- SLD

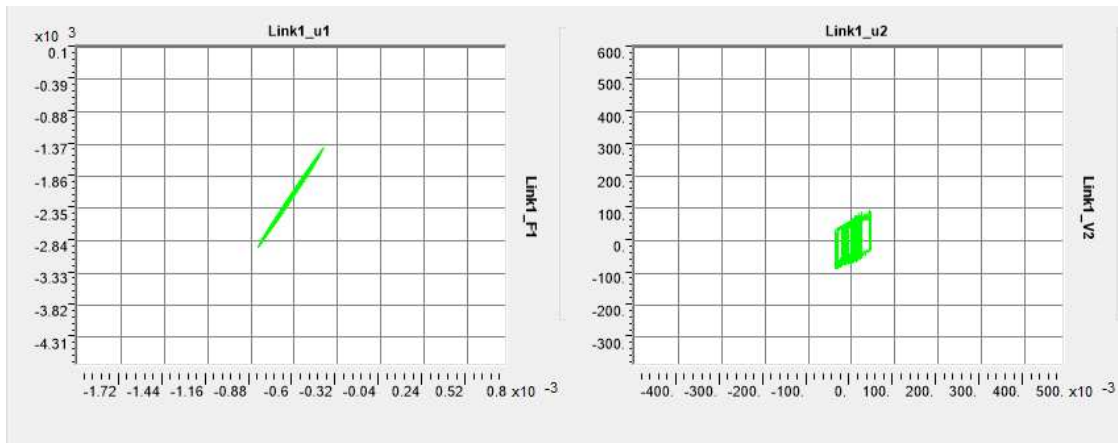


Figura 161_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

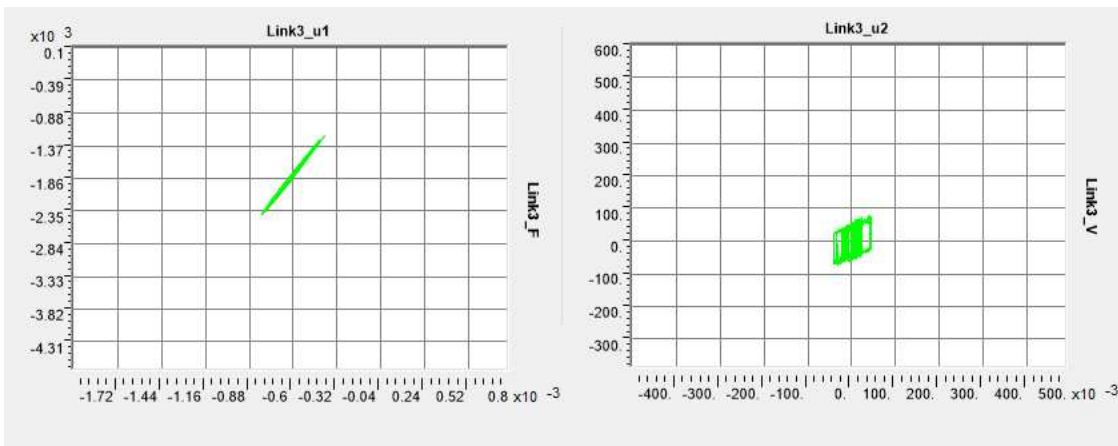


Figura 162_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

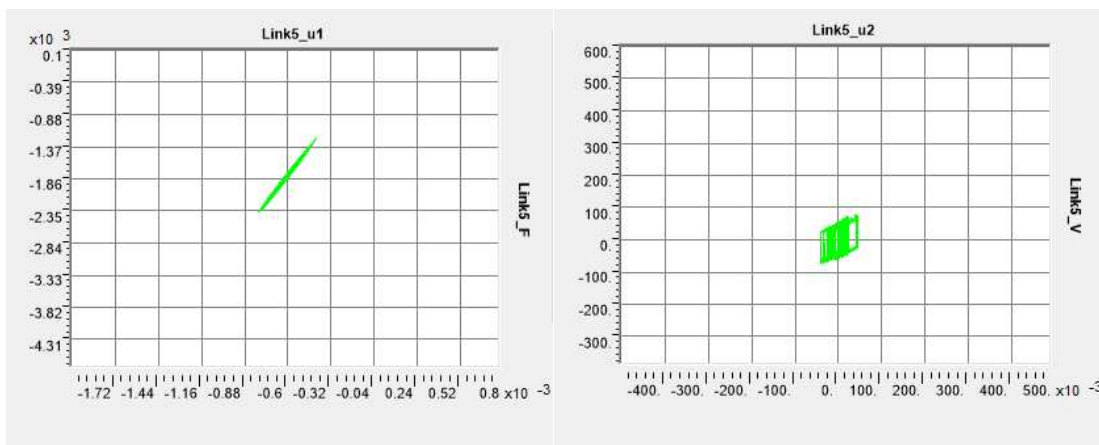


Figura 163_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

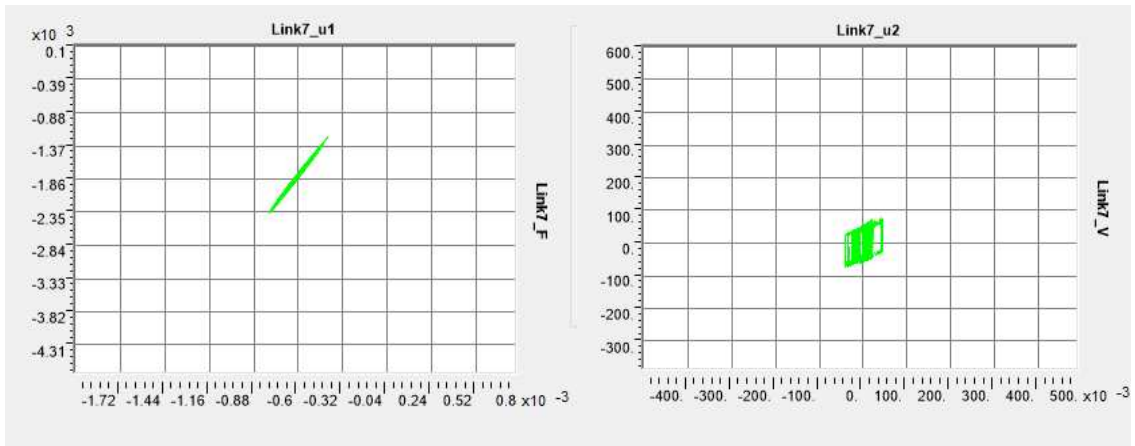


Figura 164_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

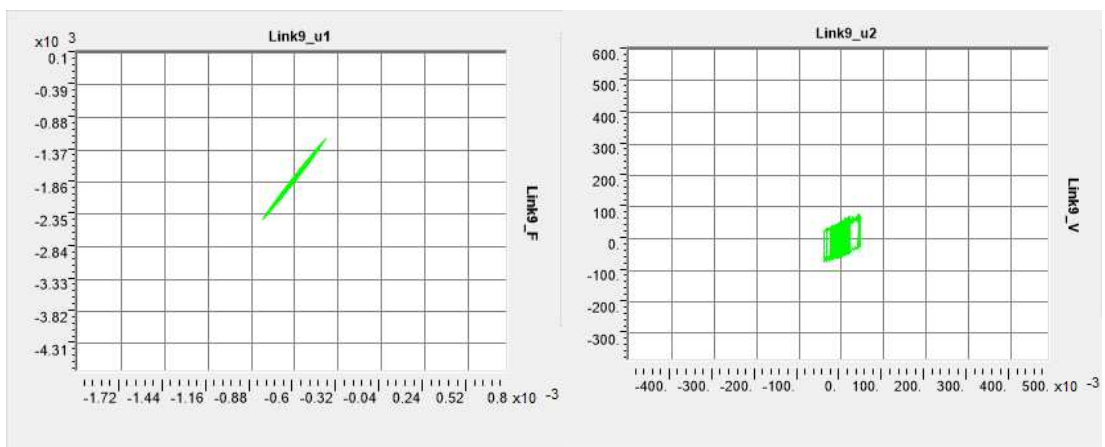


Figura 165_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

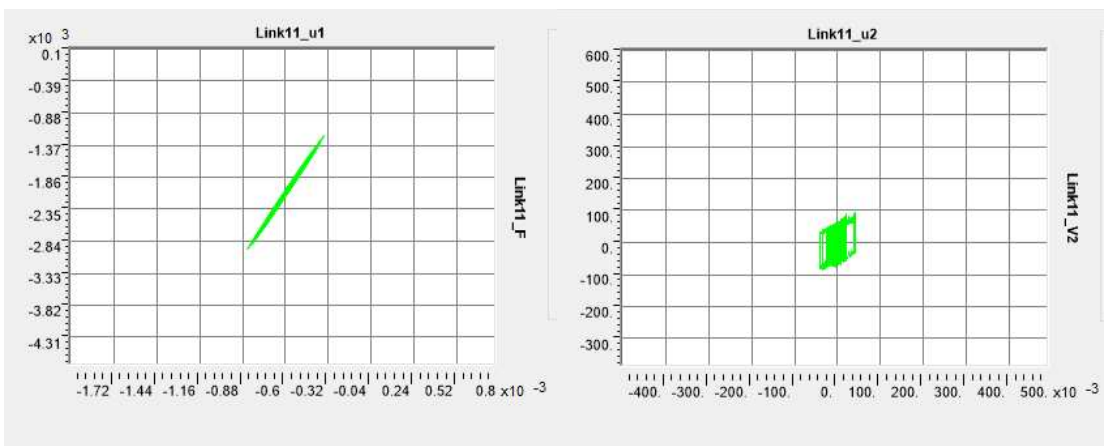


Figura 166_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- SLV

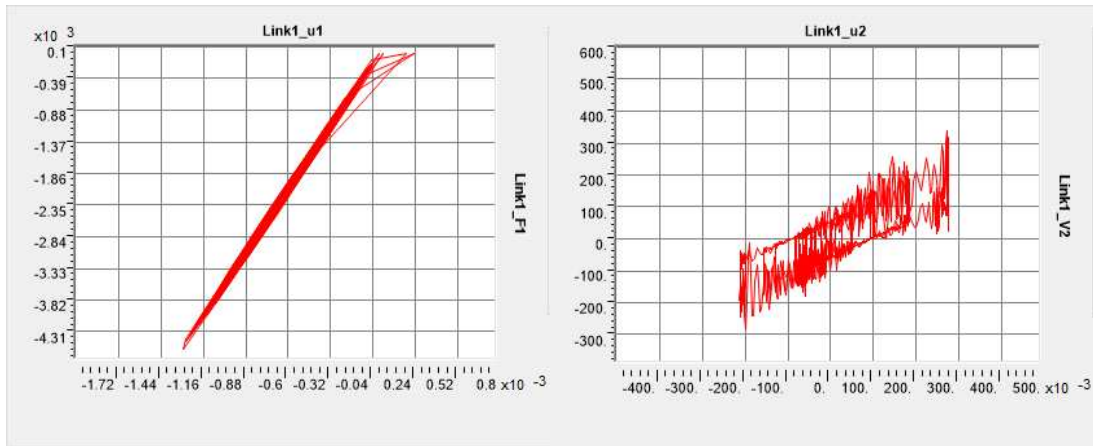


Figura 167_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

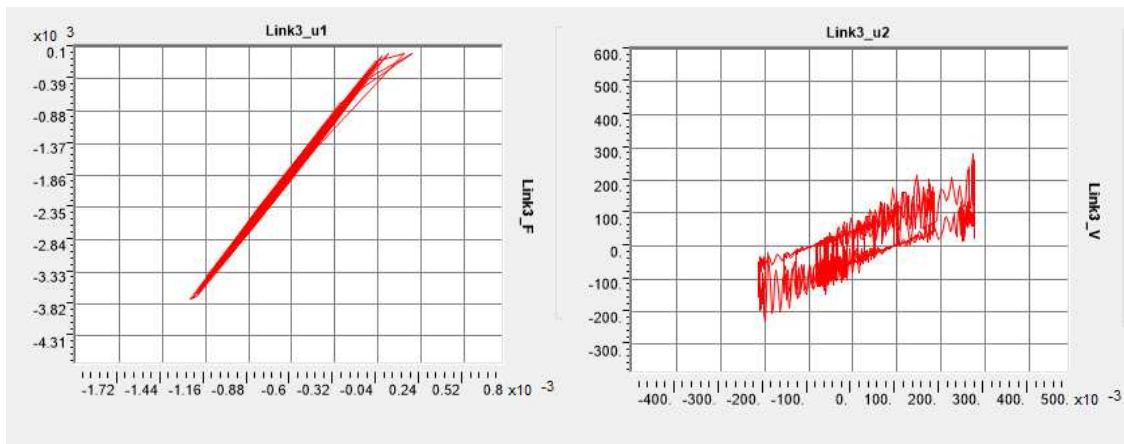


Figura 168_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

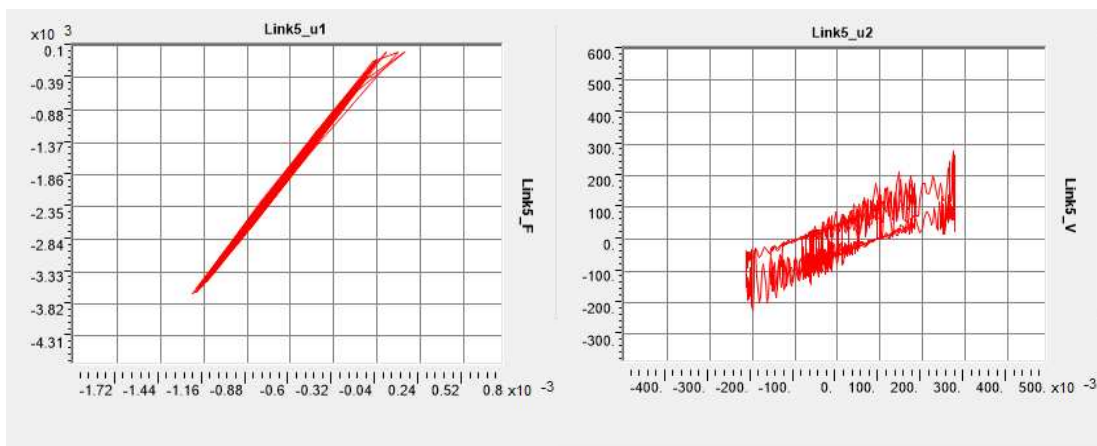


Figura 169_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

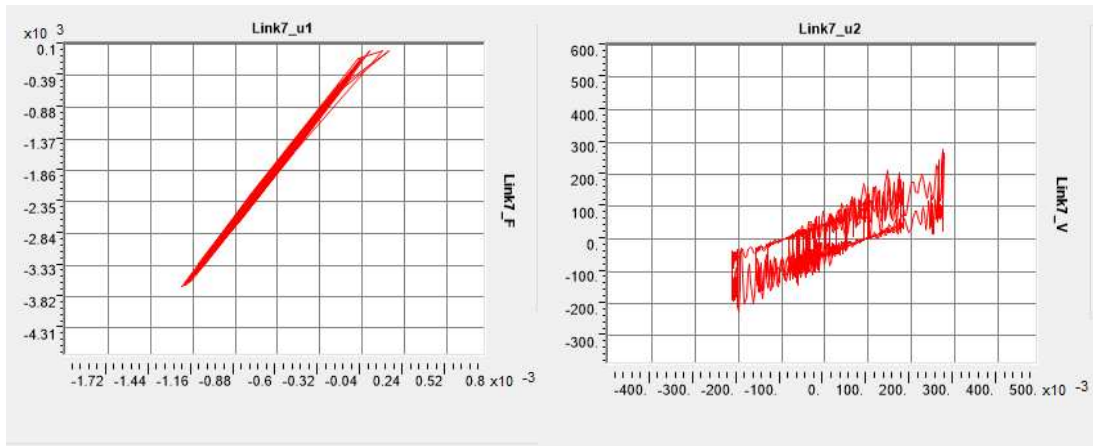


Figura 170_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

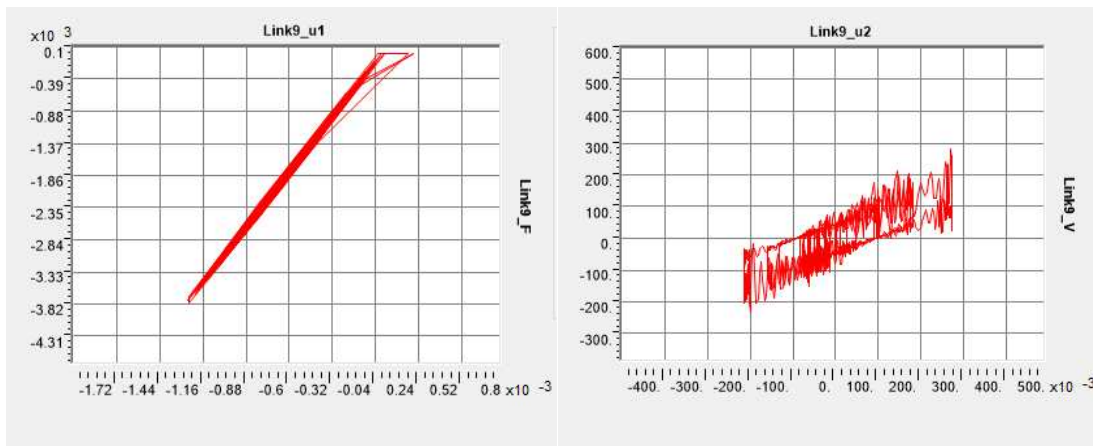


Figura 171_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

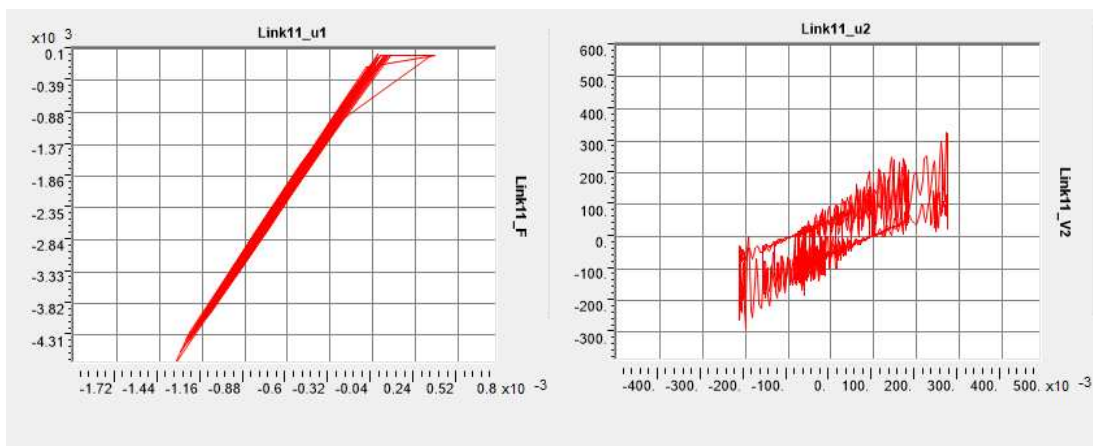


Figura 172_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- SLC

Per i diagrammi forza-spostamento in direzione U1 la scala di riferimento è stata presa diversa, perché, come si riscontra nei successivi grafici, la forza esercitata sul dispositivo risultava molto grande.

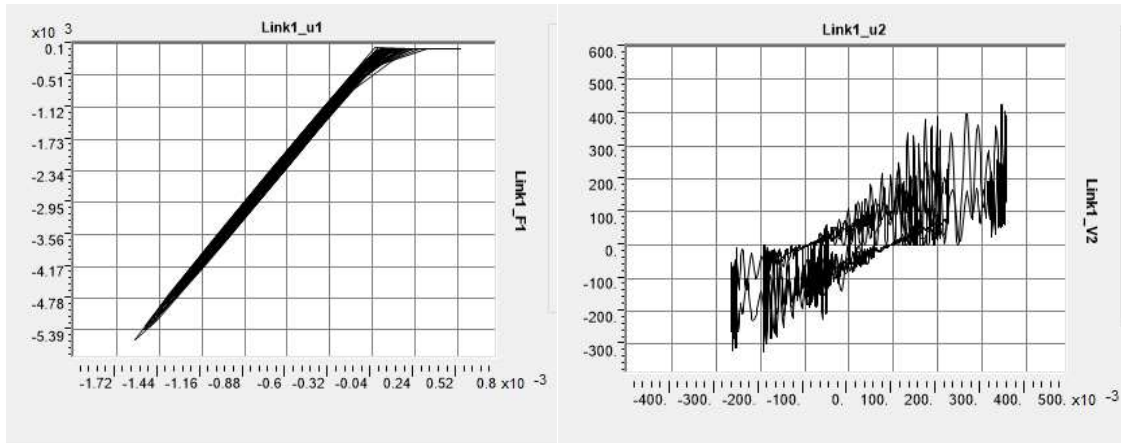


Figura 173_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

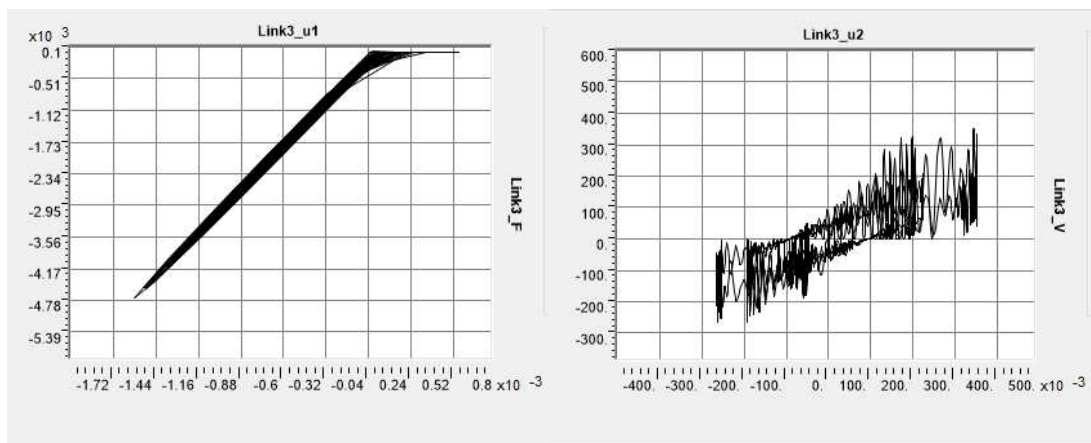


Figura 174_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

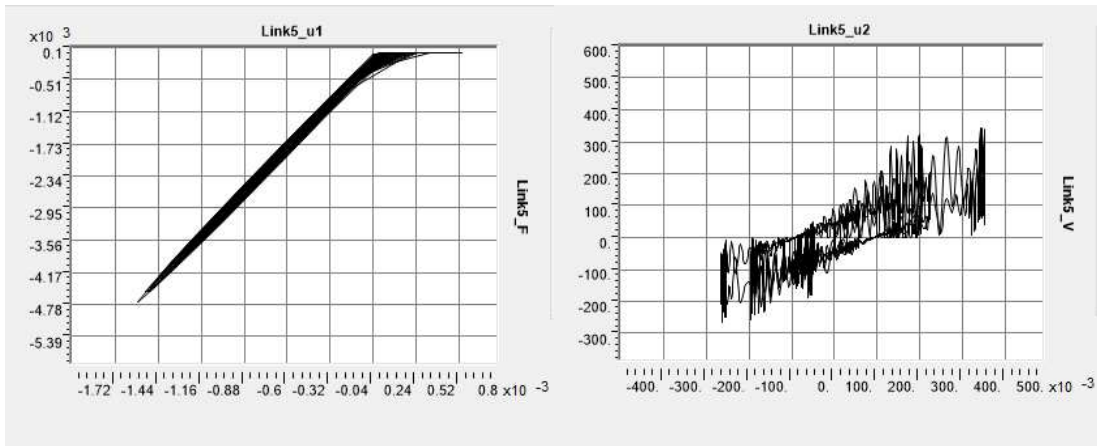


Figura 175_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

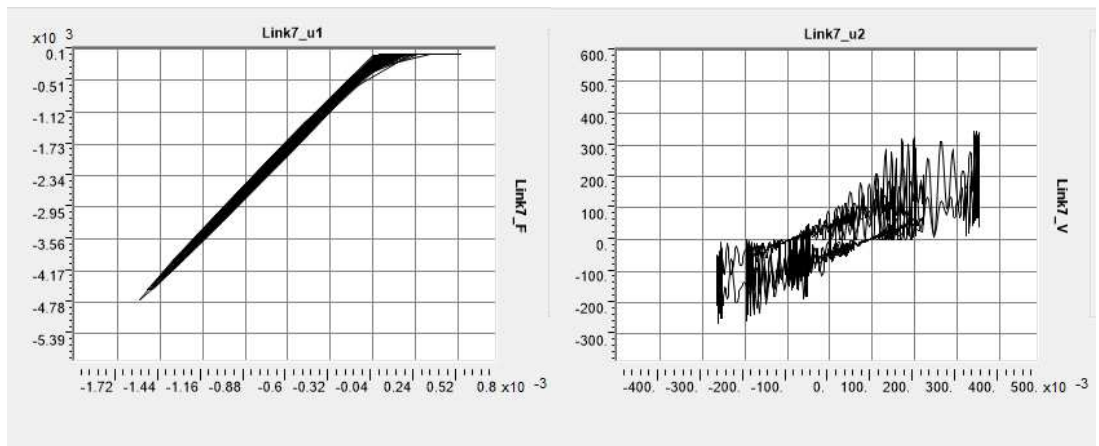


Figura 176_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

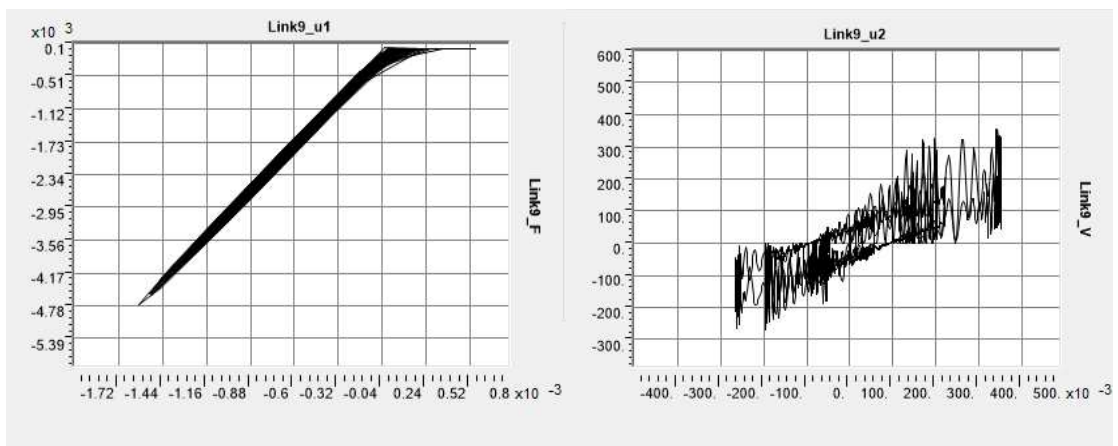


Figura 177_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

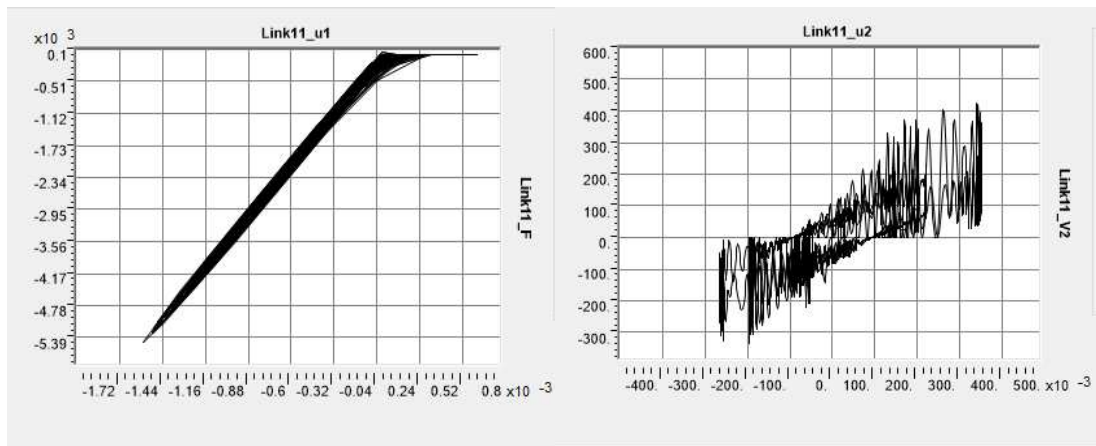


Figura 178_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- CLO

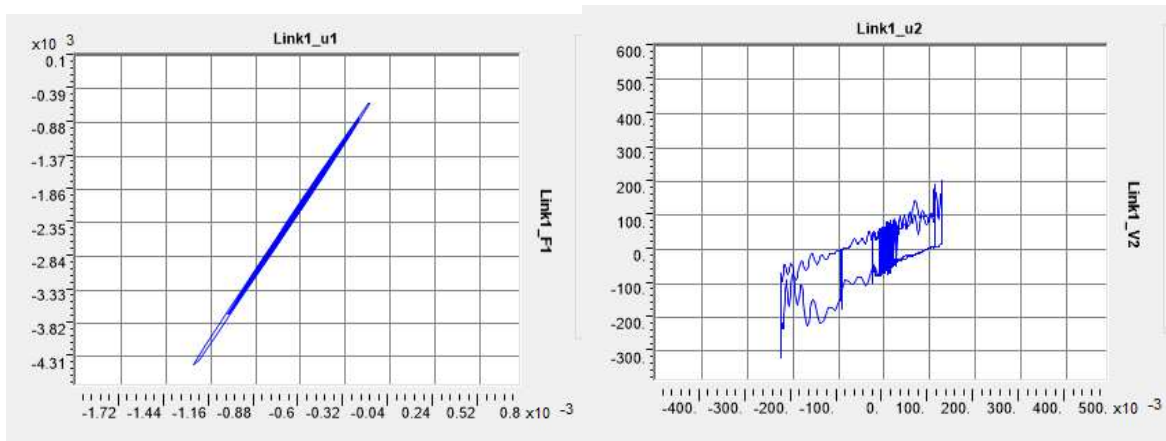


Figura 179_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

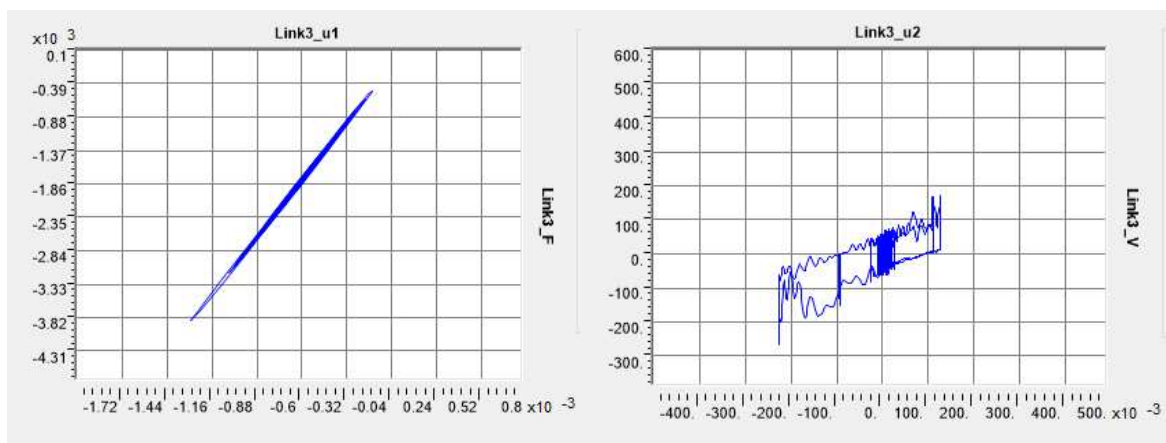


Figura 180_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

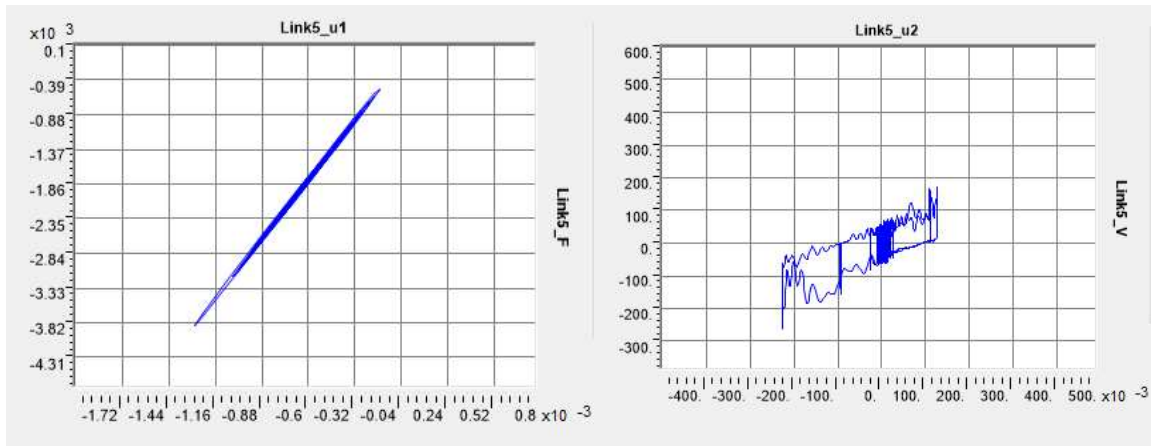


Figura 181_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

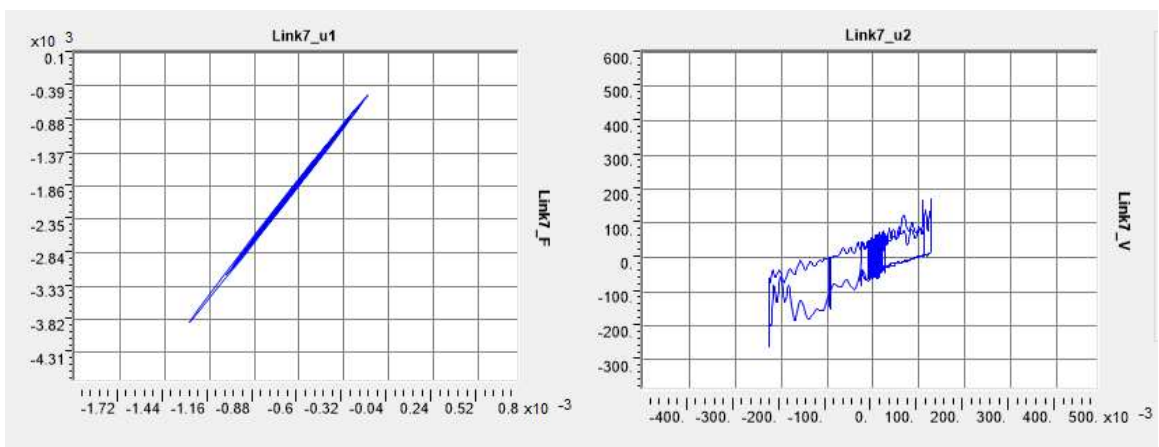


Figura 182_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

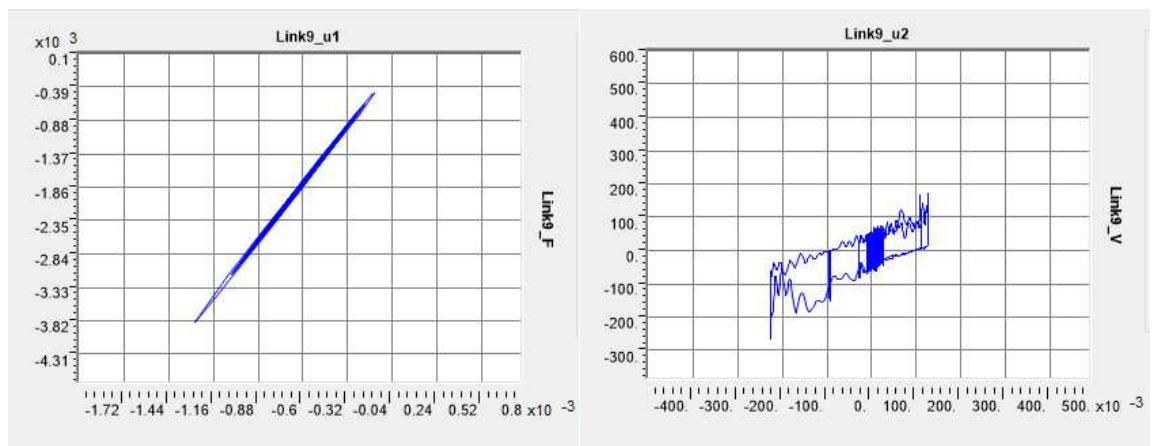


Figura 183_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

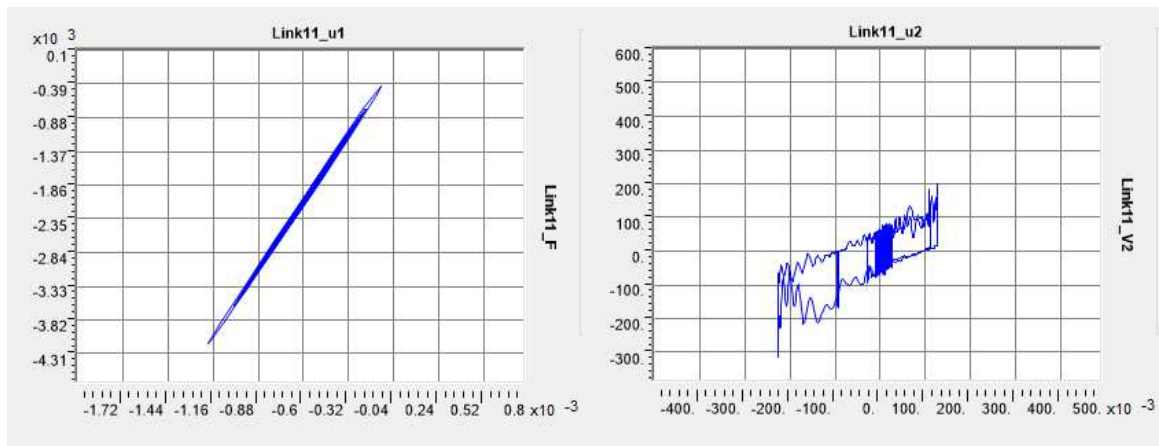


Figura 184 _Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

Si evince, dunque, che il sistema con uno smorzamento al 2% concentrato negli isolatori, per sismi allo SLC e SLV produce trazione negli isolatori, in quanto nel legame determinato dalla forza e lo spostamento verticale, la forza stessa arriva a zero e lo spostamento diventa positivo. Si riscontrano, inoltre, delle forze verticali allo SLC molto alte maggiori di quelle ottenute dall'accelerogramma verticale registrato a Castelluccio, il quale risulta essere a sua volta maggiore di quello allo SLC in termini di PGA. Una spiegazione a tal fenomeno può essere che il contenuto in frequenza degli accelerogrammi generati artificialmente da SIMQKE è molto più grande di quello misurato da accelerometri nelle stazioni di misura. La dissipazione fornita al sistema risulta essere bassa, e non capace di dissipare tutta quell'energia in ingresso.

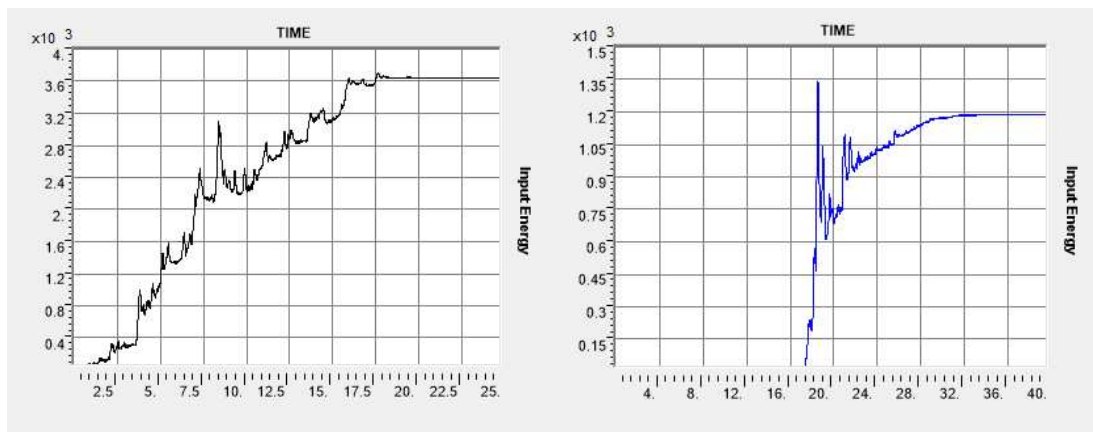


Figura 185 _Contenuto energetico in input allo SLC da norma (a sinistra) e registrato dalla stazione di CLO (a destra)

6.5. Soluzione II: Isolatori a pendolo semplice con $\zeta=5\%$ e edifici

Per cercare di diminuire la trazione nei dispositivi, si sono inseriti gli edifici concentrando anche su di essi un'aliquota di dissipazione verticale attraverso i coefficienti a_0 e a_1 alla Rayleigh. La modellazione del sistema composto da piastra e isolatori è la stessa eseguita nel paragrafo precedente, portando lo smorzamento fornito dal sistema d'isolamento dal 2% al 5%, e aggiungendo, inoltre, capacità dissipativa fornita dagli edifici dovuta a un coefficiente $\zeta=5\%$.

ANALISI LINEARE					
NODO	K_v	ζ	$T_{is,v}$ (top)	ω_v	C_{is}
[·]	[kN/m]	[·]	[s]	[s ⁻¹]	[kNs/m]
1	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9
2	3500000.0	0.05	0.048	130.9	2673.8
3	3500000.0	0.05	0.048	130.9	2673.8
4	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9
5	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9
6	3000000.0	0.05	0.048	130.9	2291.8
7	3500000.0	0.05	0.048	130.9	2673.8
8	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9
9	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9
10	3000000.0	0.05	0.048	130.9	2291.8
11	3500000.0	0.05	0.048	130.9	2673.8
12	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9
13	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9
14	3000000.0	0.05	0.048	130.9	2291.8
15	3500000.0	0.05	0.048	130.9	2673.8
16	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9
17	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9
18	3000000.0	0.05	0.048	130.9	2291.8
19	3500000.0	0.05	0.048	130.9	2673.8
20	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9
21	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9
22	3500000.0	0.05	0.048	130.9	2673.8
23	2000000.0	0.05	0.048	130.9	1527.9

Tabella 40 parametri degli isolatori con $\zeta=5\%$

Le analisi sono state svolte considerando anche qui gli isolatori 1, 3, 5, 7, 9 e 11 allo SLD, SLV, SLV e per l'accelerogramma registrato dalla stazione di Castelluccio, nelle direzioni X e Z. Risulta importante estrapolare dal modello anche quelli che sono i dati modali della struttura, in quanto gli edifici non vanno ad aggiungere massa alla struttura (già considerata nell'applicazione dei carichi dei paragrafi precedenti).

OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless
MODAL	Mode	1	3.410342	1	0	8.477E-14
MODAL	Mode	2	0.743844	1.801E-07	0	2.665E-07
MODAL	Mode	3	0.39265099...	1.101E-08	0	1.909E-08
MODAL	Mode	4	0.279021	2.401E-09	0	4.389E-07
MODAL	Mode	5	0.230407	1.231E-09	0	2.819E-07
MODAL	Mode	6	0.213181	3.864E-10	0	3.163E-07
MODAL	Mode	7	0.047791	5.378E-17	0	0.68976
MODAL	Mode	8	0.047723	1.853E-16	0	3.842E-06
MODAL	Mode	9	0.04761	2.598E-16	0	0.08749
MODAL	Mode	10	0.047448	2.094E-16	0	0.0016
MODAL	Mode	11	0.047182	5.089E-17	0	0.05788
MODAL	Mode	12	0.046963	2.395E-16	0	0.00409

Figura 186_Risultati analisi modale (SAP2000)

Si può notare, infatti, come i periodi fondamentali di vibrare della struttura rimangono pressoché invariati.

In termini di analisi non lineari, i risultati ottenuti vengono divisi per Stato limite, e sono mostrati in termini di legame forza-spostamento sulla verticale (U1) e sul piano orizzontale (U2).

- **SLD**

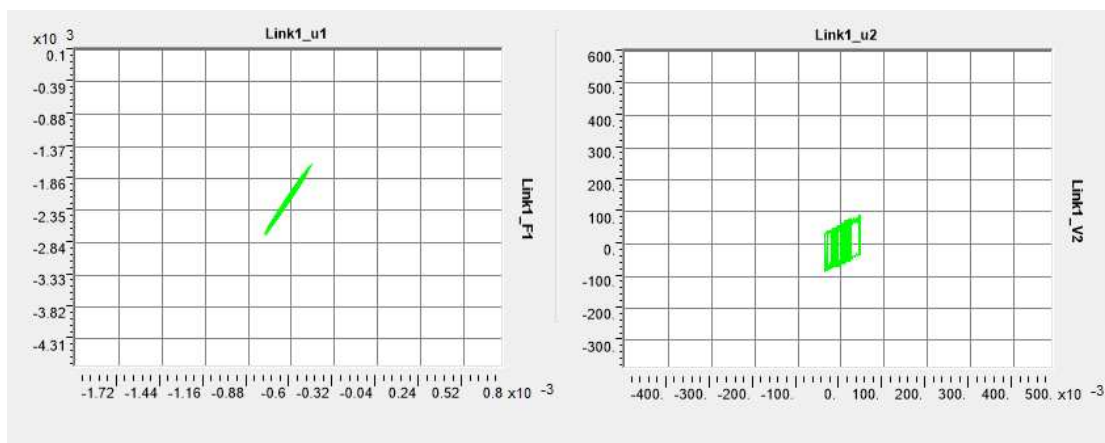


Figura 187_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

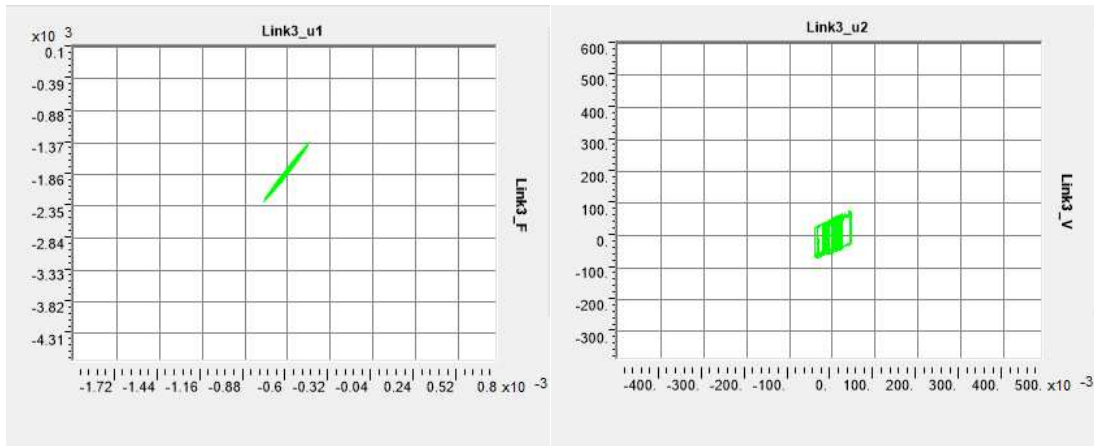


Figura 188_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

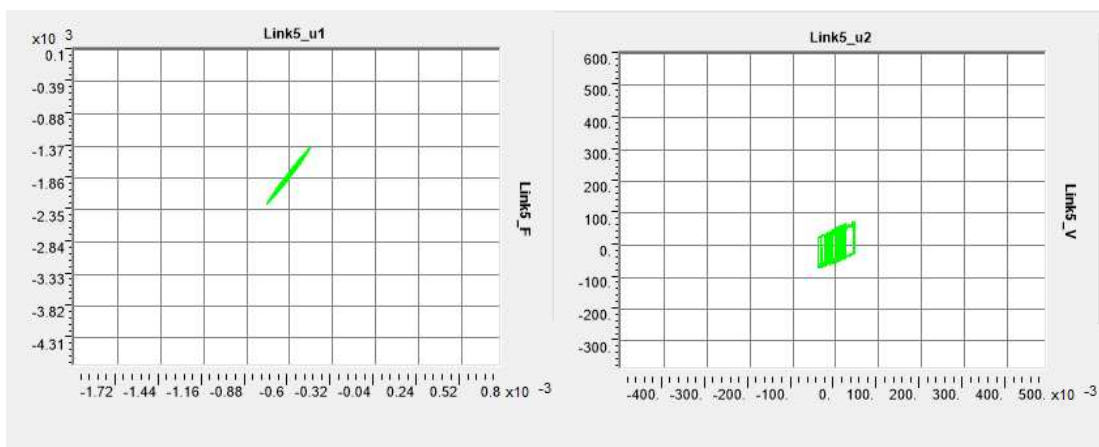


Figura 189_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

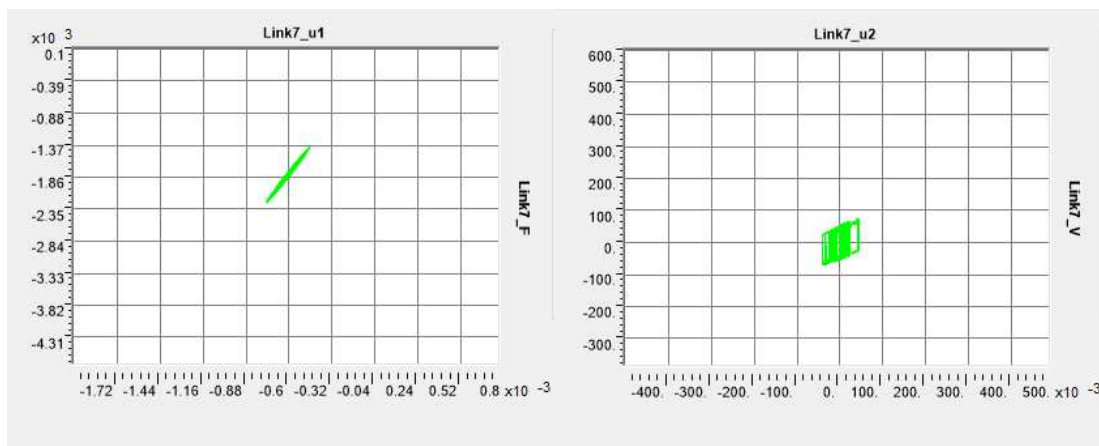


Figura 190_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

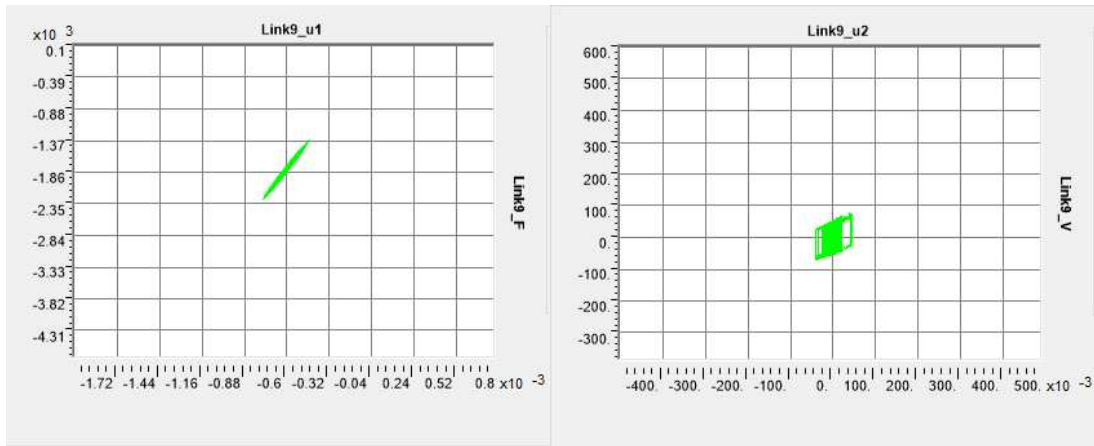


Figura 191_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

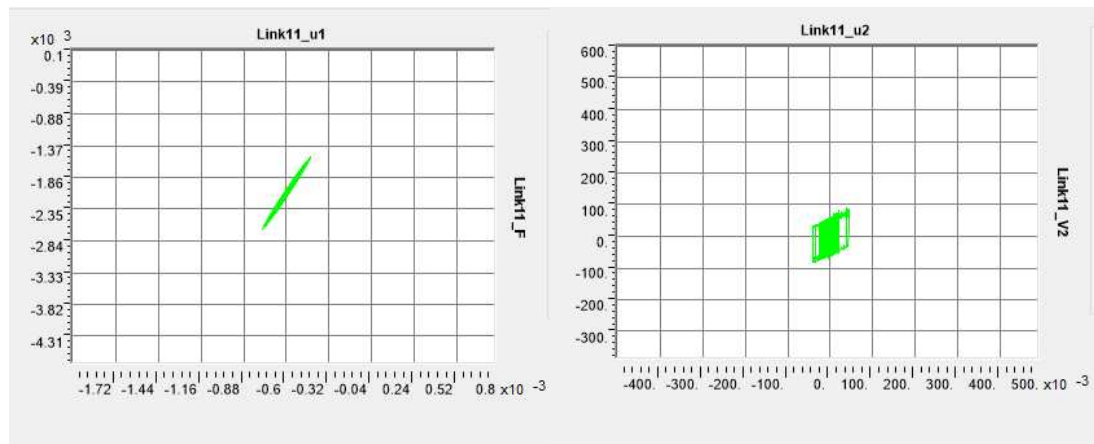


Figura 192_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- **SLV**

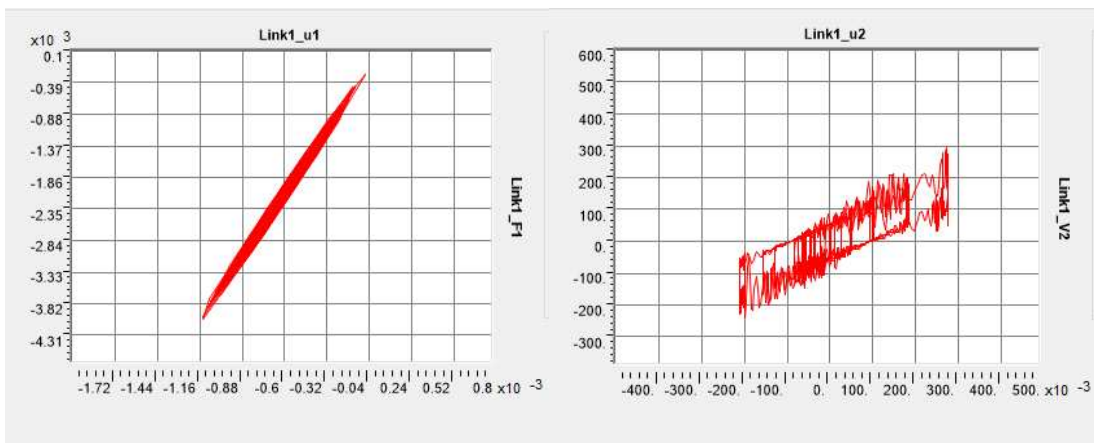


Figura 193_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

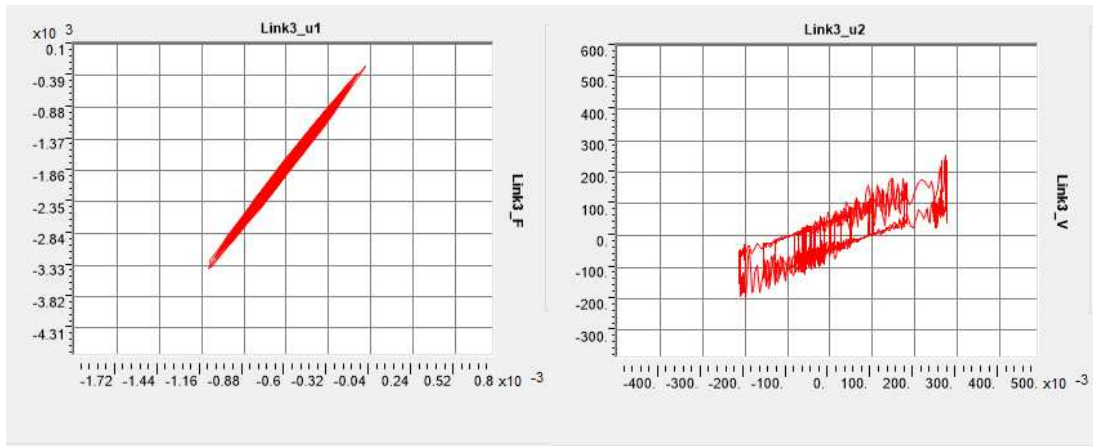


Figura 194_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

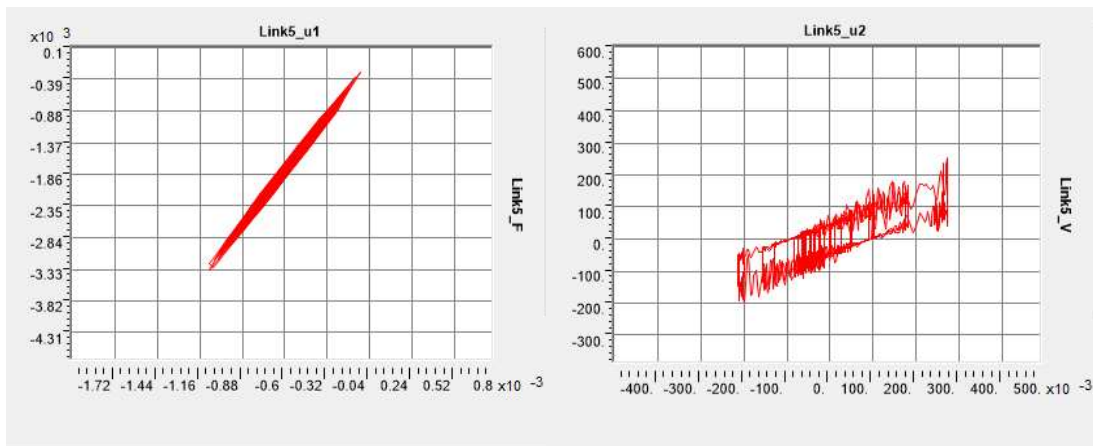


Figura 195_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

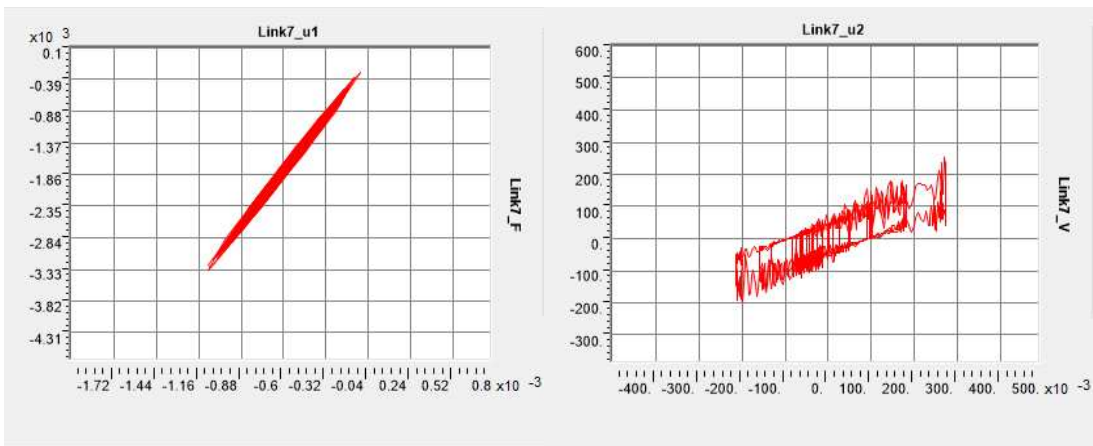


Figura 196_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

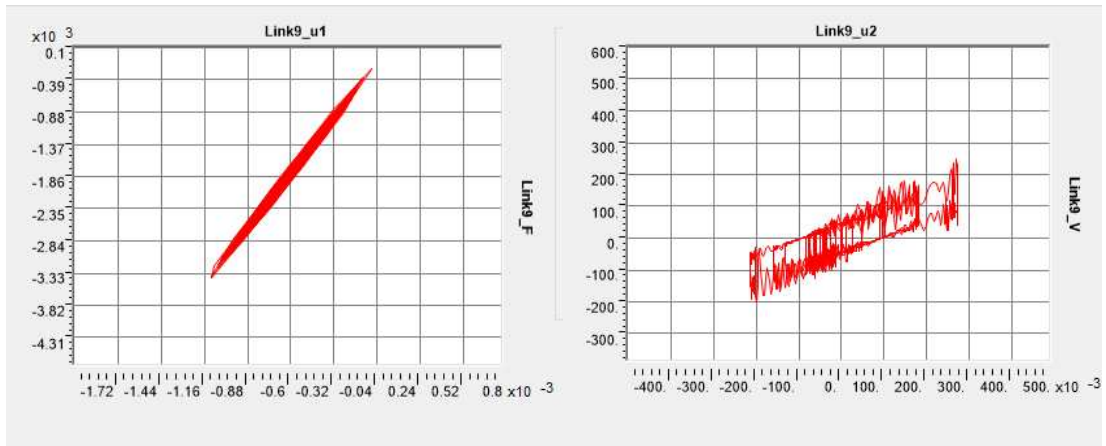


Figura 197_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

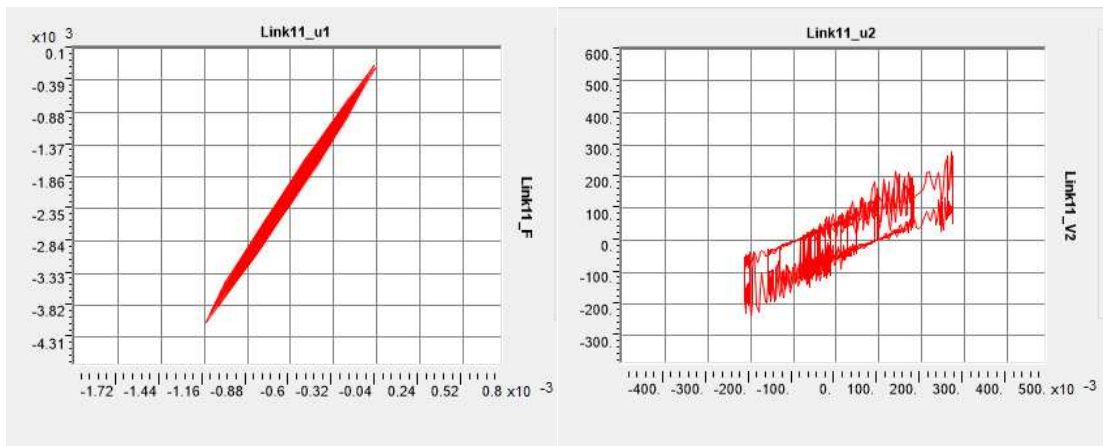


Figura 198_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- SLC

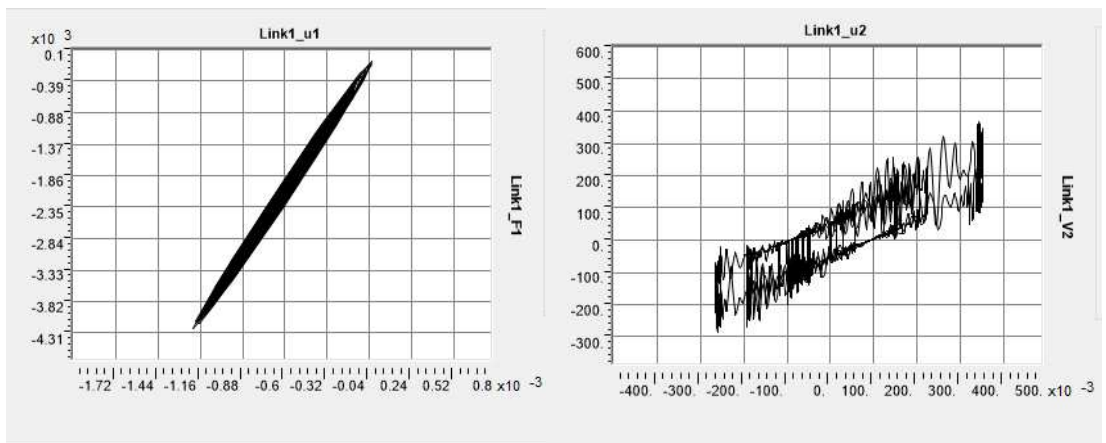


Figura 199_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

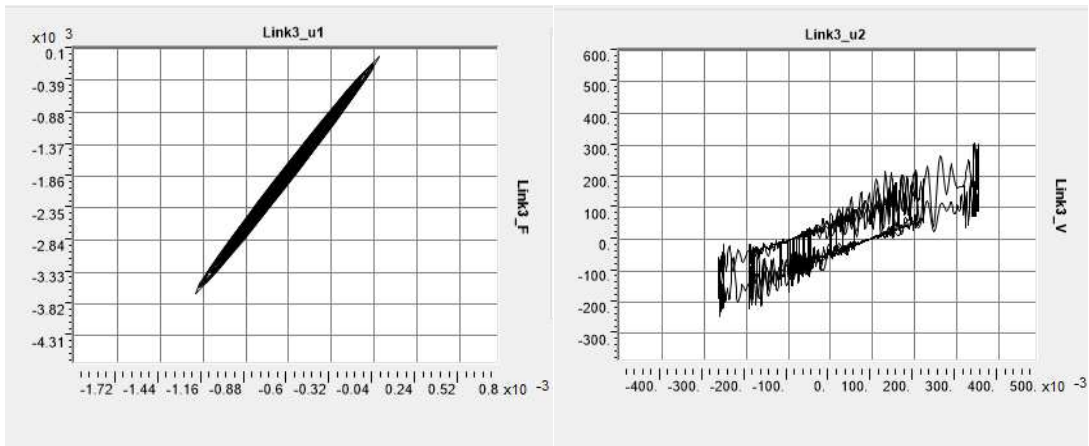


Figura 200_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

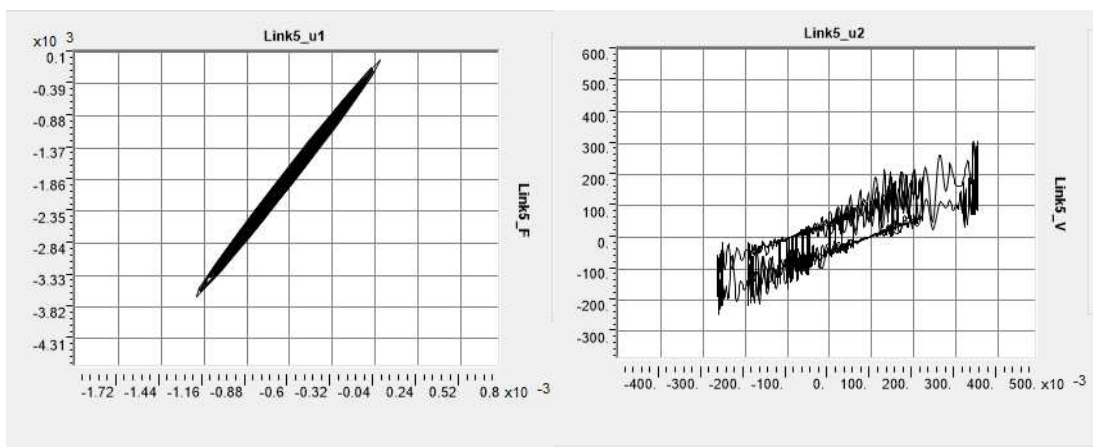


Figura 201_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

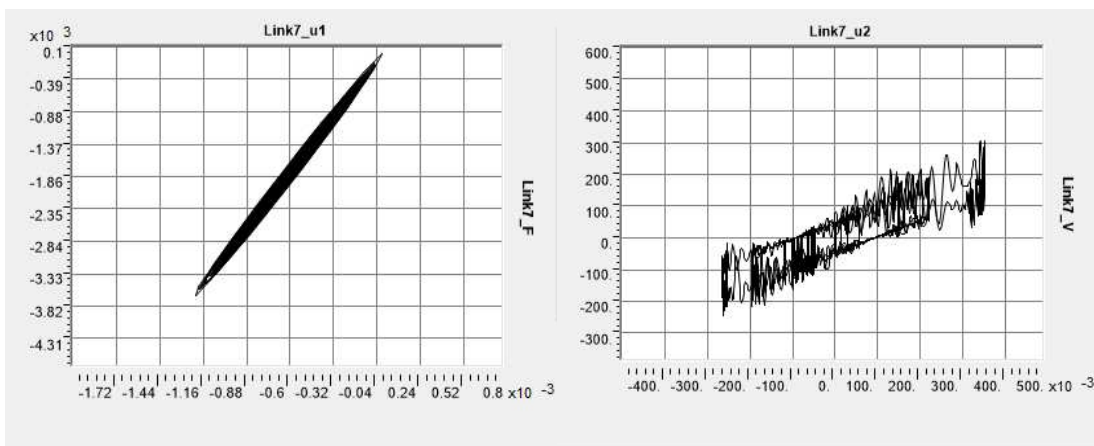


Figura 202_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

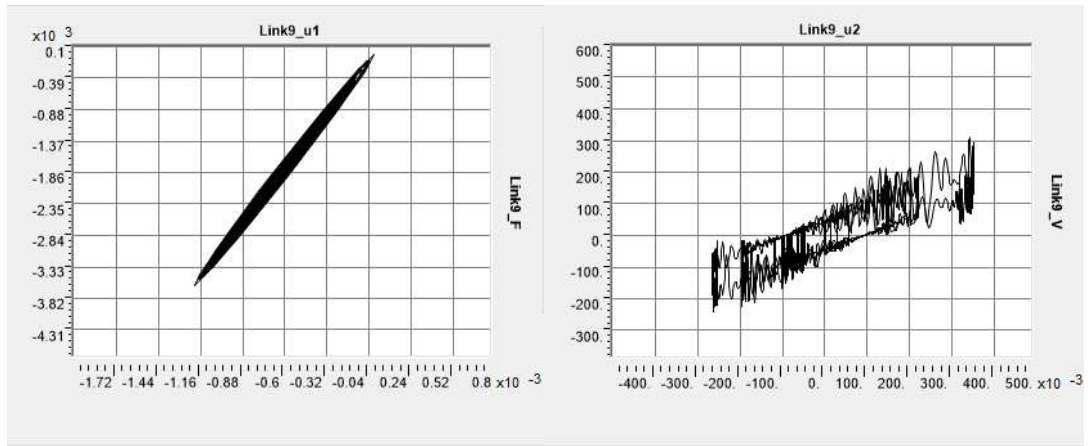


Figura 203_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

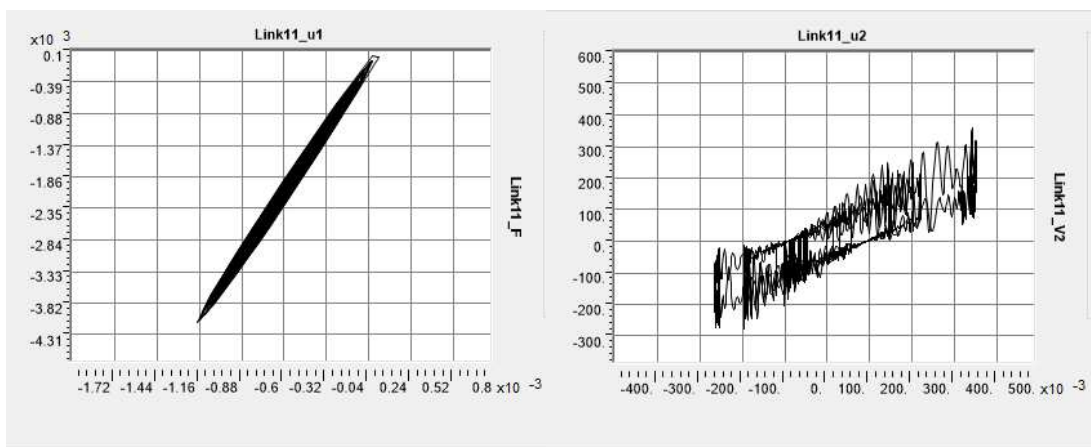


Figura 204_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- CLO

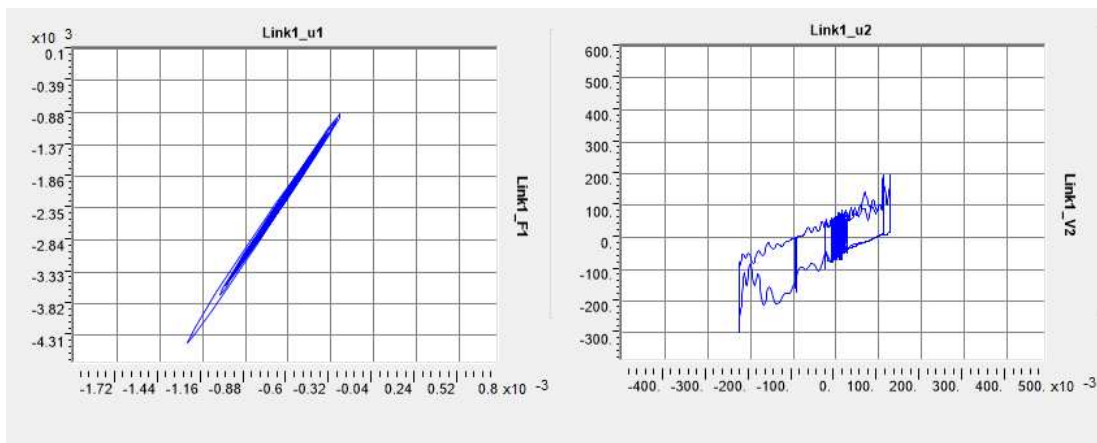


Figura 205_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

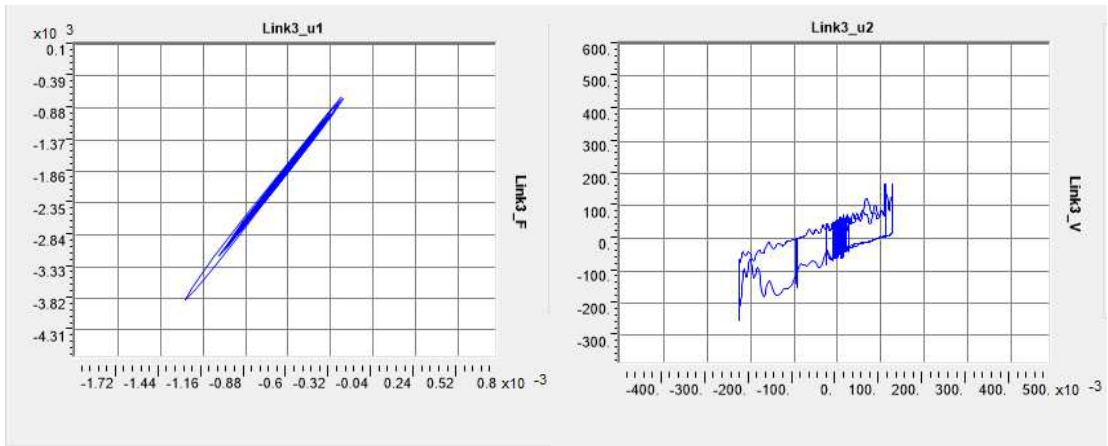


Figura 206_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

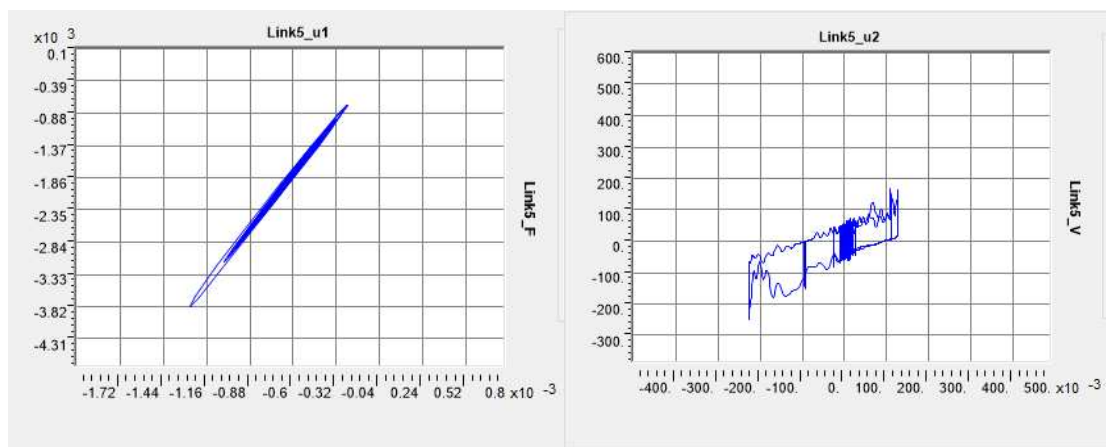


Figura 207_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

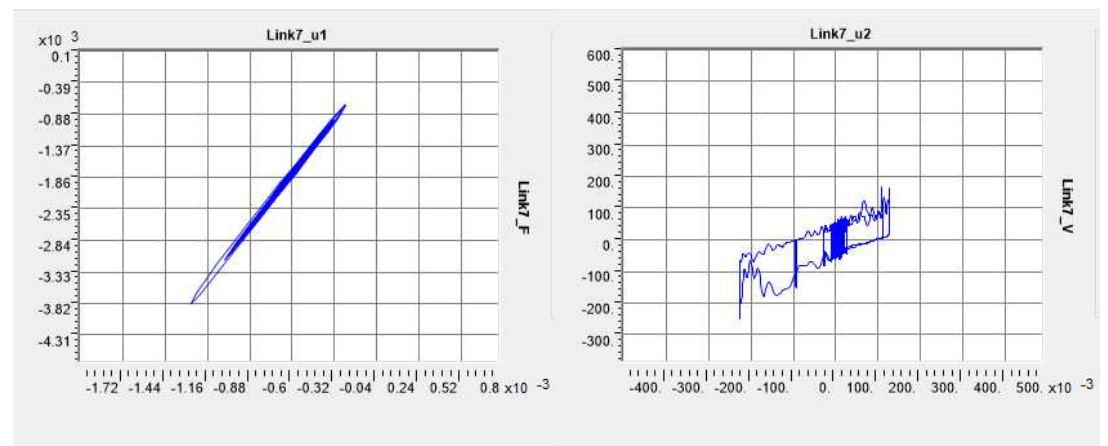


Figura 208_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

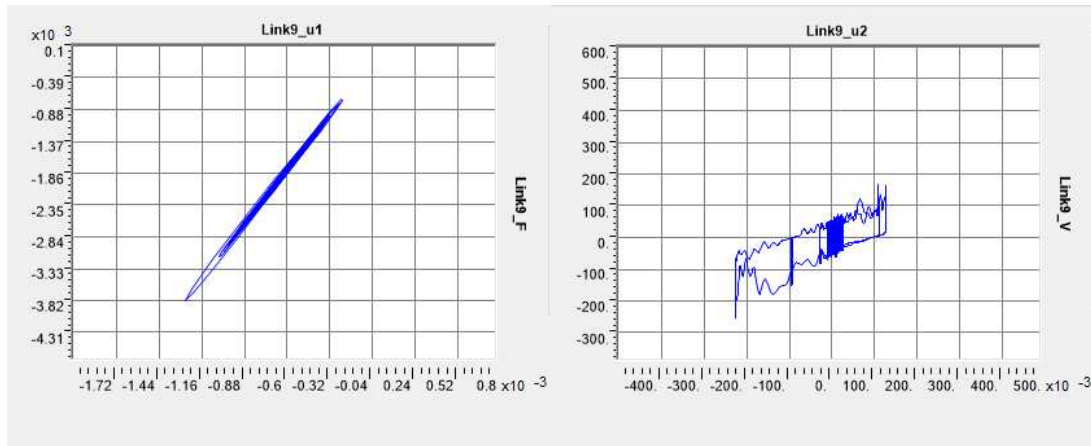


Figura 209_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

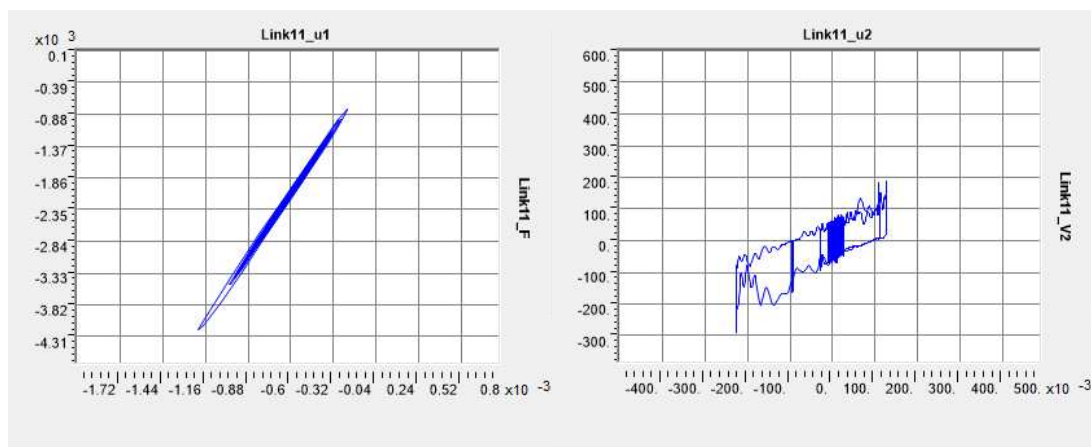


Figura 210_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

Risulta interessante notare come la dissipazione aggiunta non fornisce grosse variazioni allo SLO e CLO per i dispositivi che già dal caso con $\zeta=2\%$ non andavano in trazione, ma abbate di molto i cicli allo SLV e SLC. Questo fenomeno può essere spiegato dal fatto che gli stessi dispositivi, non alzandosi, fanno sì che il peso della piastra non cada al di sopra di essi, e quindi di ottengono forze di compressioni minori. Per i cicli allo SLD e CLO, gli isolatori rimanevano compressi anche con uno smorzamento del 2%, dunque non c'è molta differenza con quelli ottenuti in questo modello, se non per valori poco minori di sforzo assiali. I cicli orizzontali risultano stabilizzati per effetto dell'assenza di trazione, presentando comunque dei picchi trascurabili.

6.6. Soluzione III: Isolatori a pendolo semplice in parallelo a dispositivi dissipativi viscosi

Nel §6.5. si è visto come concentrando la dissipazione negli edifici e nel sistema d'isolamento, entrambi gli elementi con un coefficiente $\zeta=5\%$, si riesce ad eliminare il problema della trazione sui dispositivi. Il concetto che sta alla base del modello visto, però, è puramente teorico; andrebbe introdotto un elemento capace di fornire quella capacità dissipativa per un determinato spostamento. Si è voluto allora introdurre nello schema un damper posto in parallelo con ogni isolatore. La modellazione del damper è stata fatta considerando un legame costitutivo presente nel SAP chiamato "Damper-Exponential" sbloccando un solo grado di libertà in direzione U1, in quanto si vuole concentrare il suo utilizzo per la dissipazione verticale, al quale è stato dato il valore di dissipazione C che nel precedente paragrafo era stato dato all'isolatore. In termini di rigidezza, è stato dato al dissipatore un valore fittizio pari a 100000. Il valore della costante C è dato dal tipo di isolatore a cui è accoppiato il dispositivo, attraverso la formula $C_{diss} = \frac{2K_v}{\omega_v} \zeta$.

The screenshot shows the 'Property Definition' dialog for a 'Damper - Exponential' element in SAP2000. The 'Property Name' is 'Damper (N=2000)'. The 'Link/Support Type' is 'Damper - Exponential'. The 'P-Delta Parameters' section has 'Shear Couple' selected. The 'Total Mass and Weight' section has 'Mass' and 'Weight' set to 0. The 'Factors for Line, Area and Solid Springs' section has 'Property is Defined for This Length in a Line Spring' and 'Property is Defined for This Area in Area and Solid Springs' both set to 1. The 'Directional Properties' section has 'U1' selected under 'Direction' and 'NonLinear' checked. The 'Stiffness Options' section has 'Effective Stiffness from Zero, Else Nonlinear' selected for linear and modal load cases, and 'Initial Stiffness (K0)' selected for stiffness-proportional viscous damping. The 'Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor' is set to 1. The 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

Figura 211 _Modellazione damper (SAP2000)

Identification	
Property Name	Damper (N=2000)
Direction	U1
Type	Damper - Exponential
NonLinear	Yes
Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	0.
Effective Damping	0.
Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	1000000.
Damping Coefficient	1527.9
Damping Exponent	1.

Figura 212_Inserimento valori di rigidezza, dissipazione e coefficiente della velocità forniti al dissipatore (SAP2000)

Le analisi non lineari sono state eseguite sul piano orizzontale e verticale con riferimento ai link 1, 3, 5, 7, 9 e 11 ai diversi stati limite (SLD, SLV e SLC) e utilizzando gli accelerogrammi registrati dalla stazione CLO il 30/10/2016, le quali hanno fornito i seguenti risultati.

- **SLD**

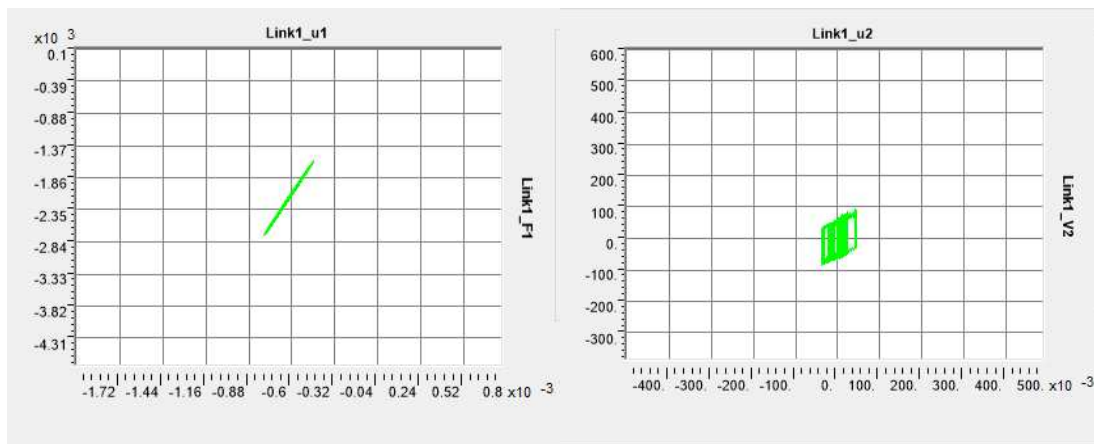


Figura 213_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

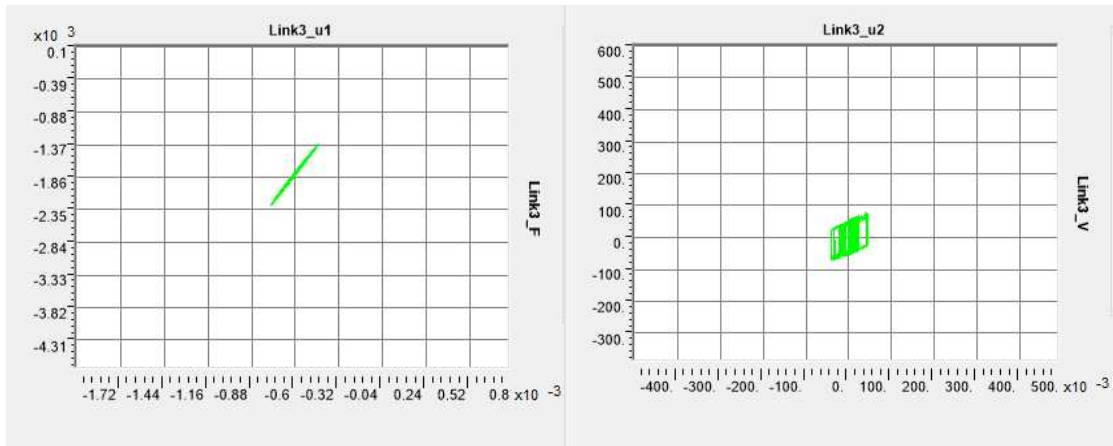


Figura 214_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

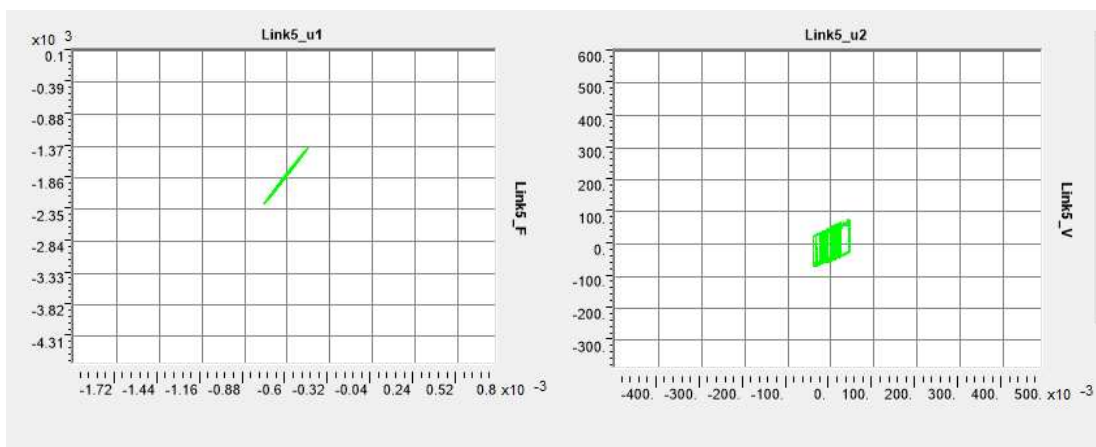


Figura 215_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

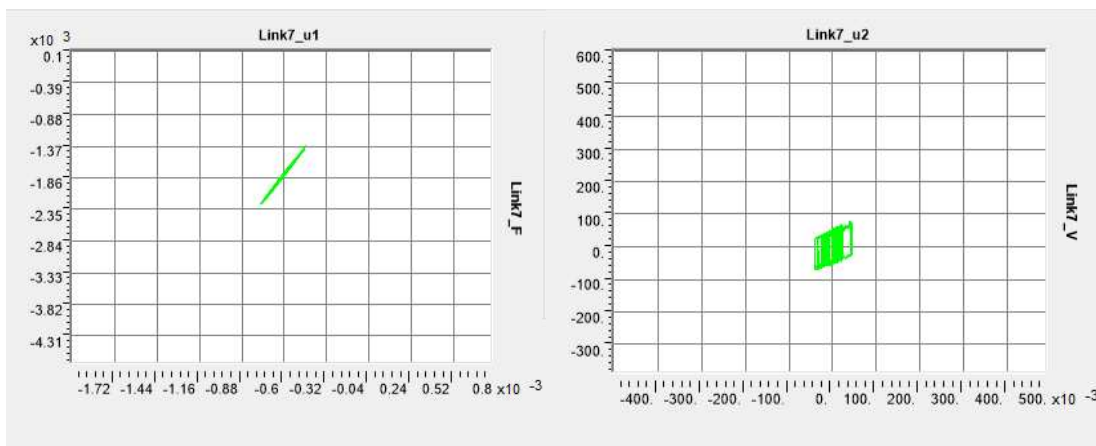


Figura 216_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

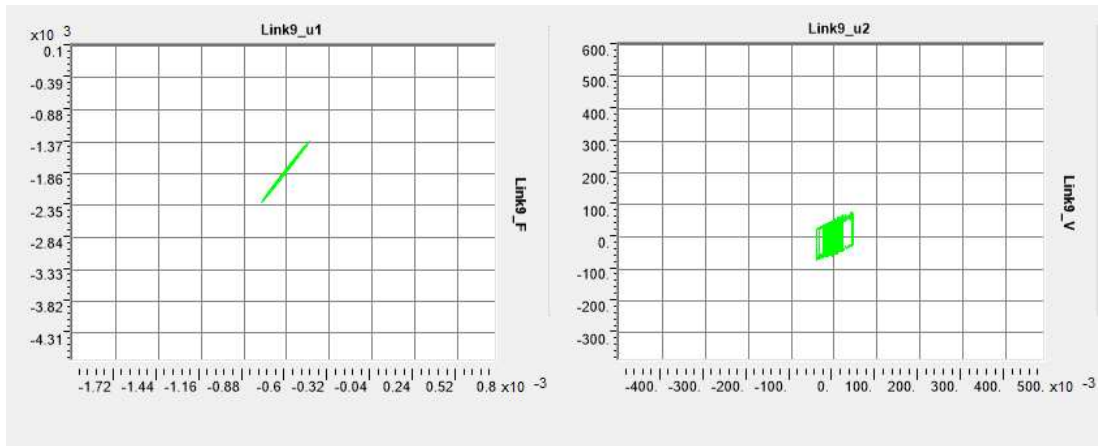


Figura 217_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

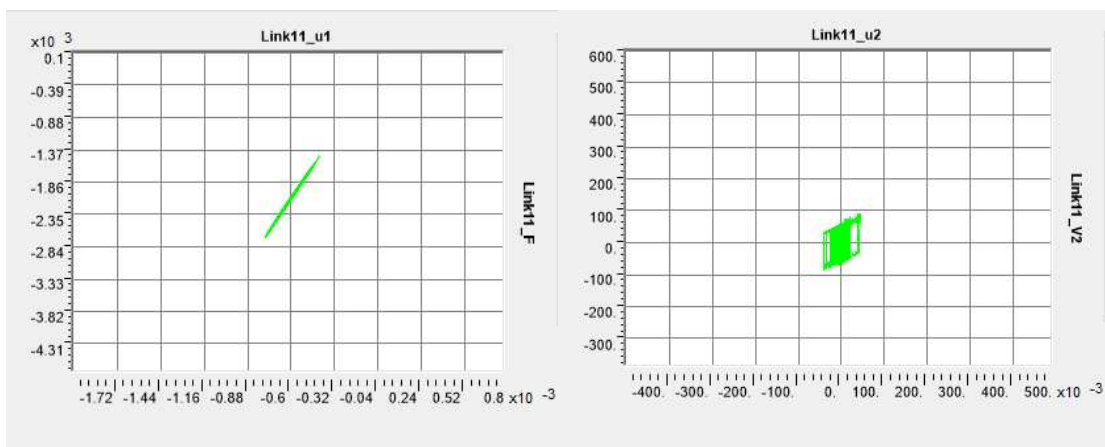


Figura 218_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- **SLV**

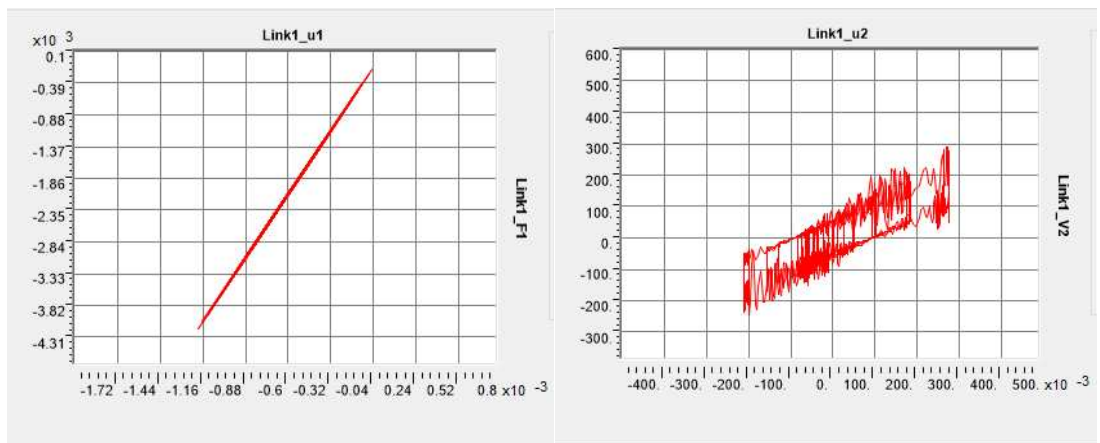


Figura 219_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

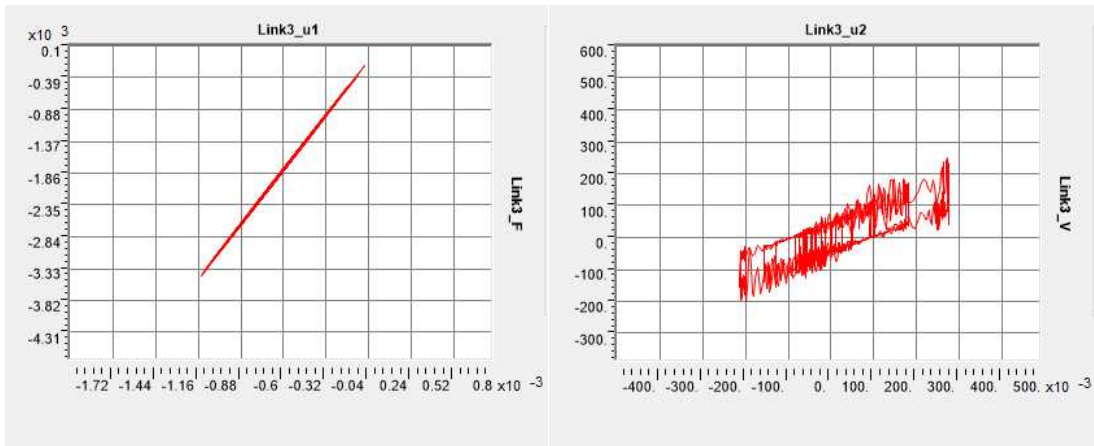


Figura 220_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

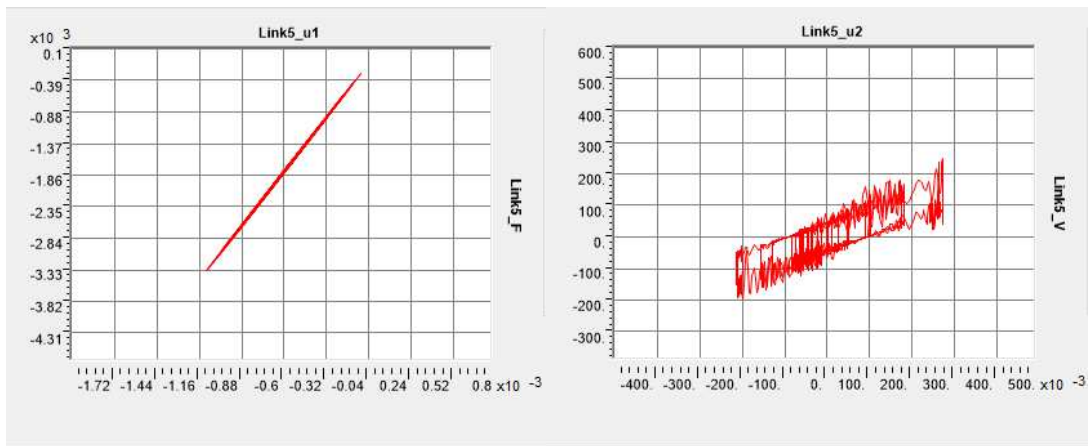


Figura 221_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

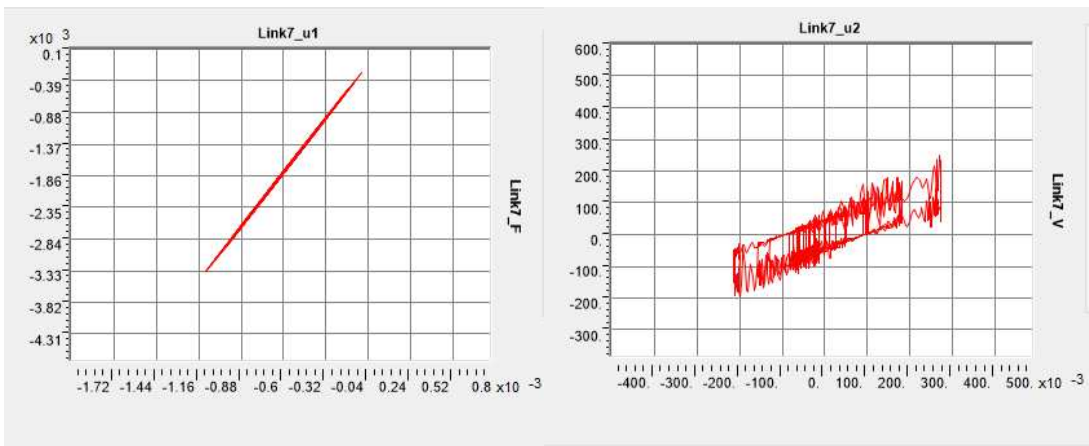


Figura 222_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

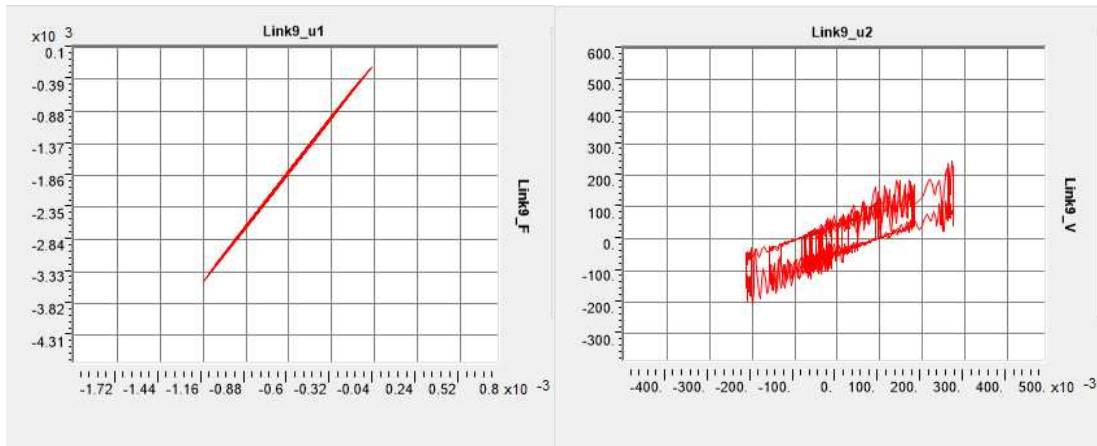


Figura 223_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

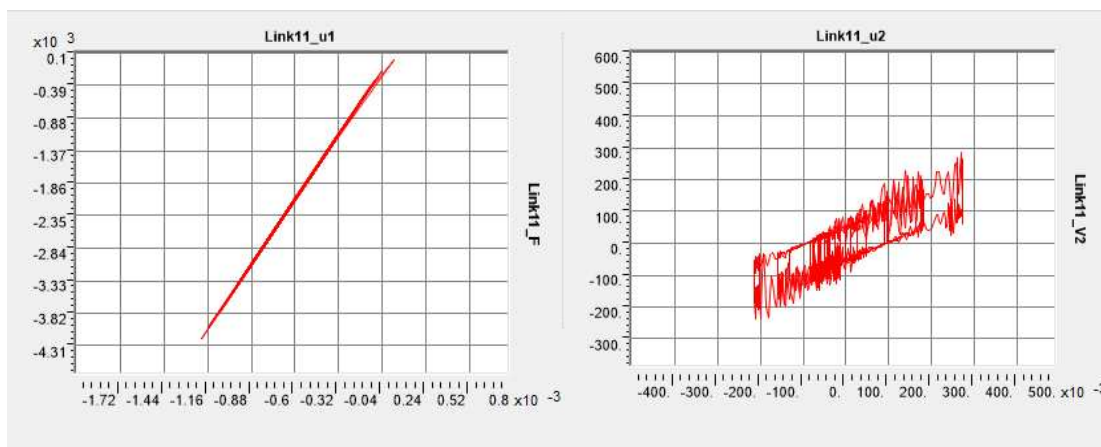


Figura 224_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- SLC

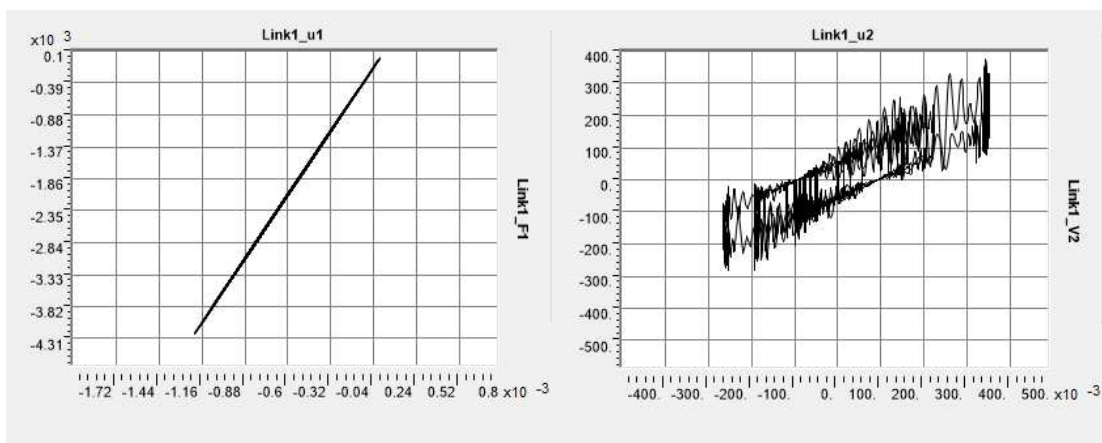


Figura 225_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

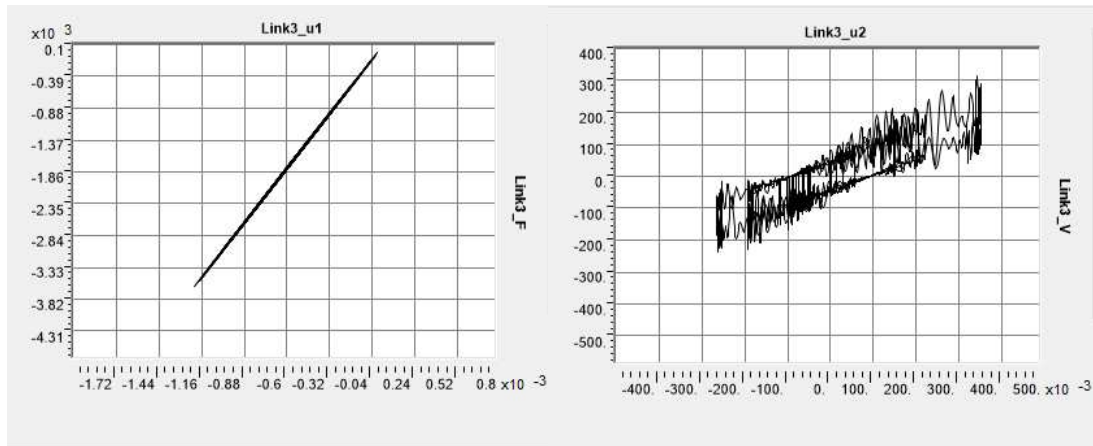


Figura 226_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

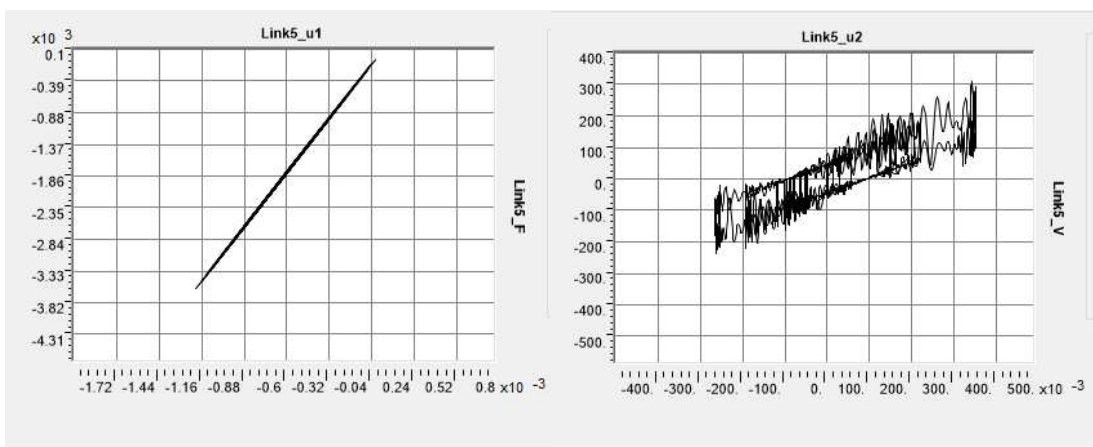


Figura 227_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

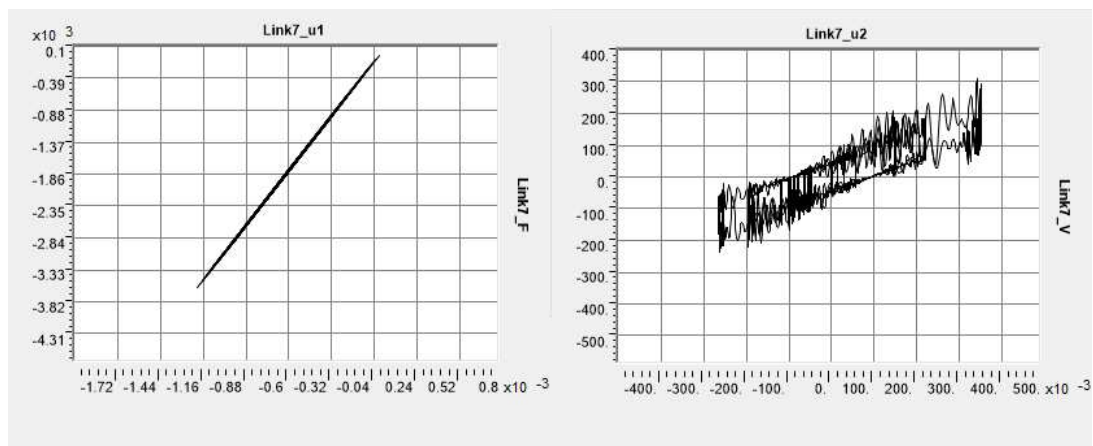


Figura 228_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

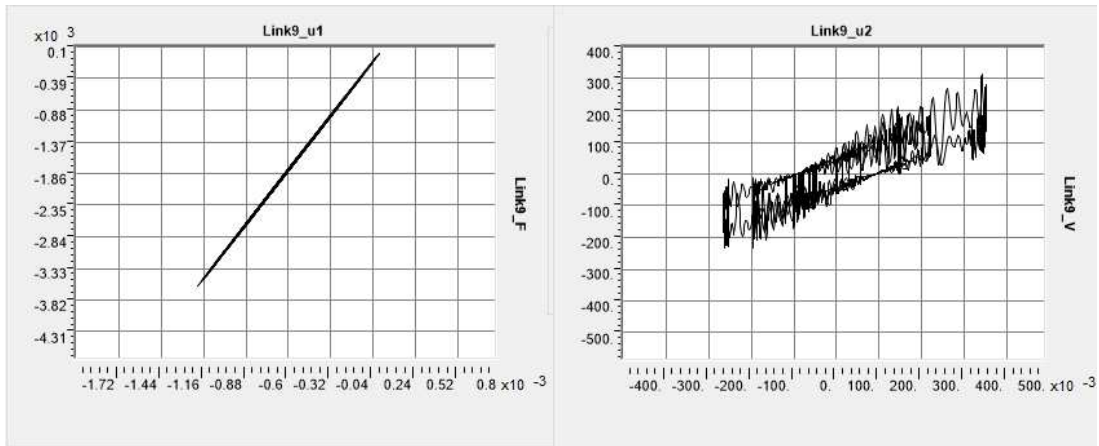


Figura 229_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

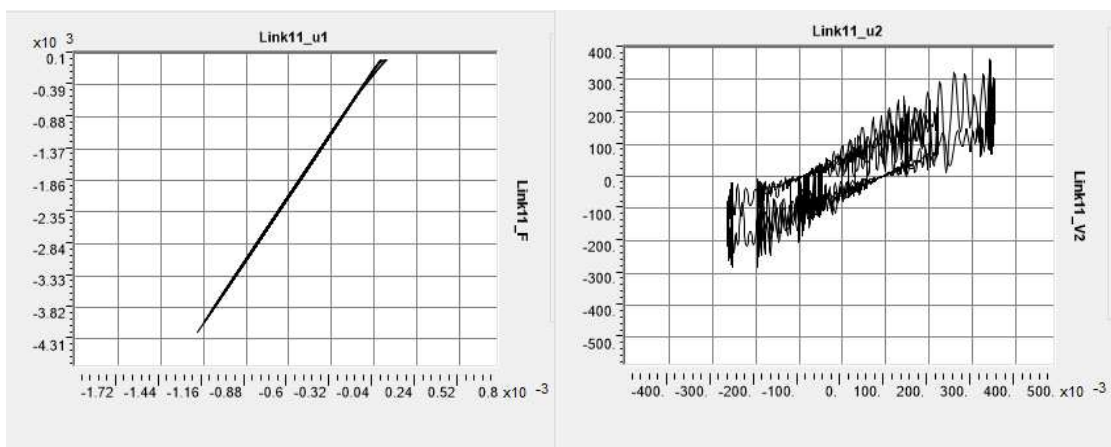


Figura 230_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- CLO

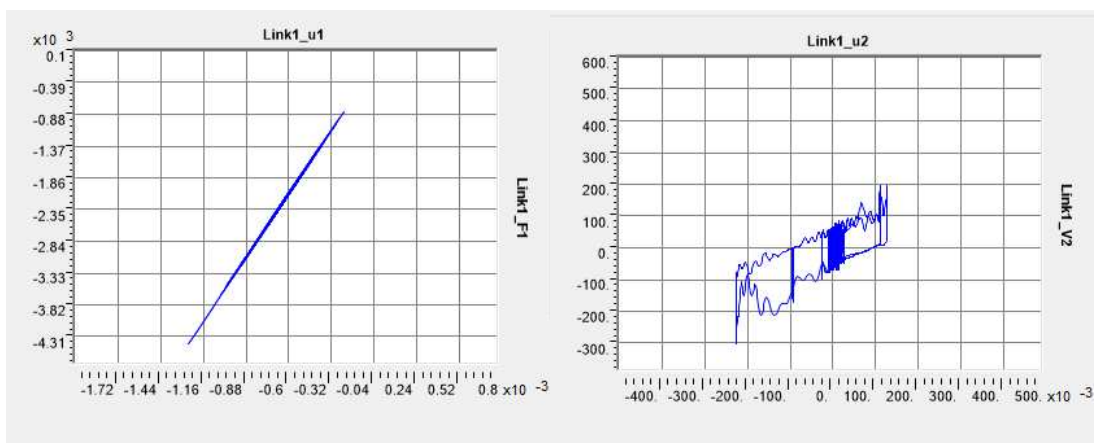


Figura 231_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

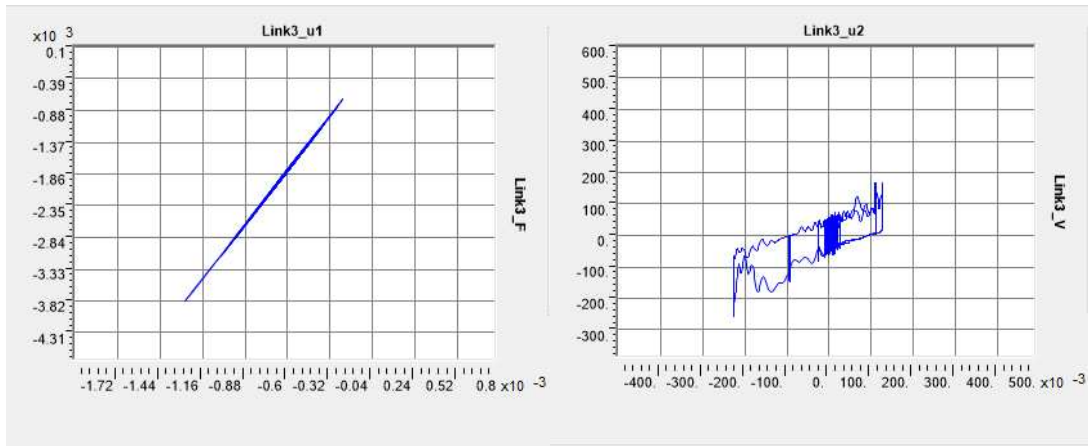


Figura 232_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

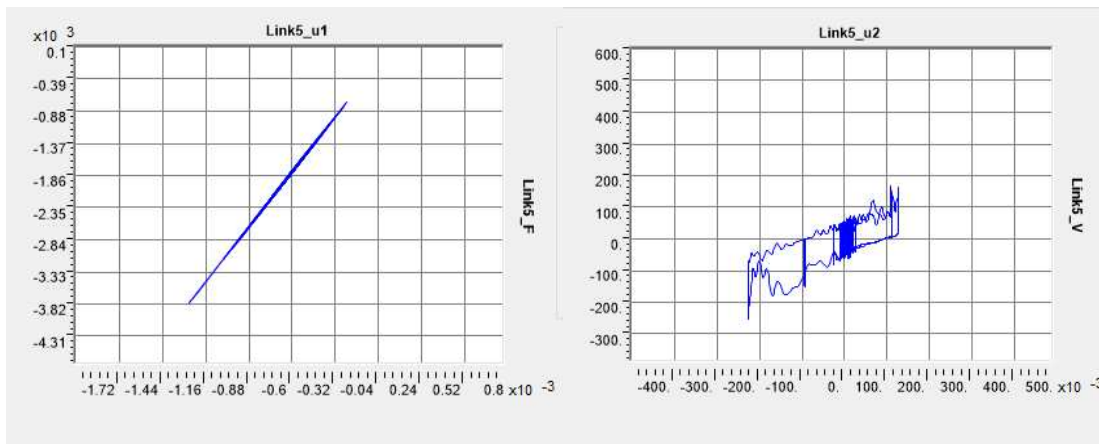


Figura 233_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

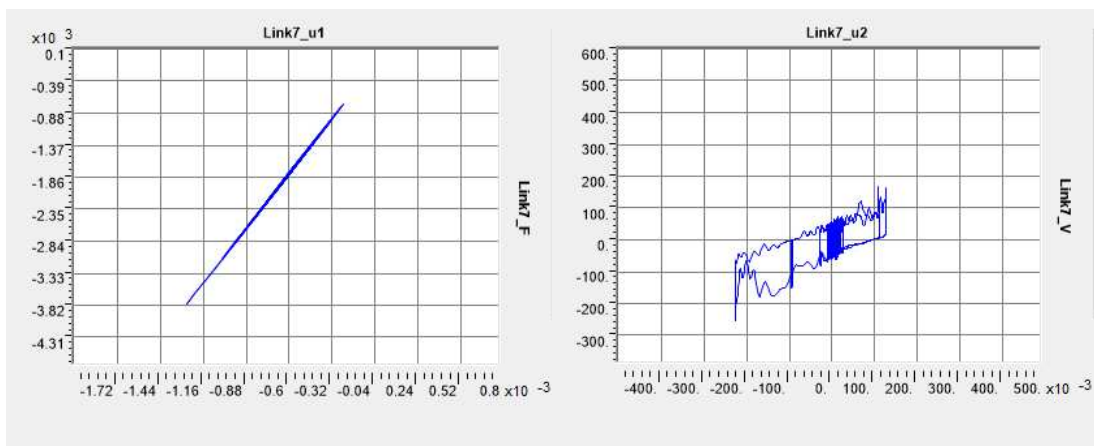


Figura 234_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

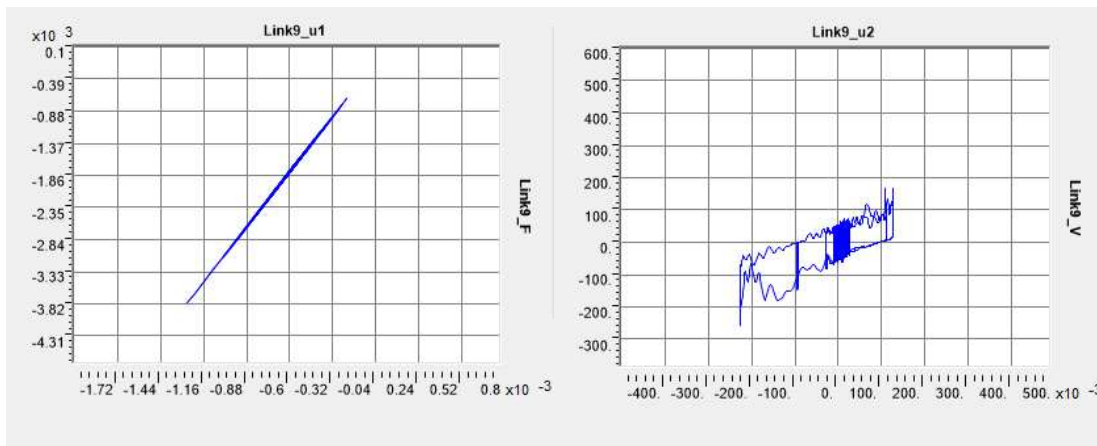


Figura 235_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

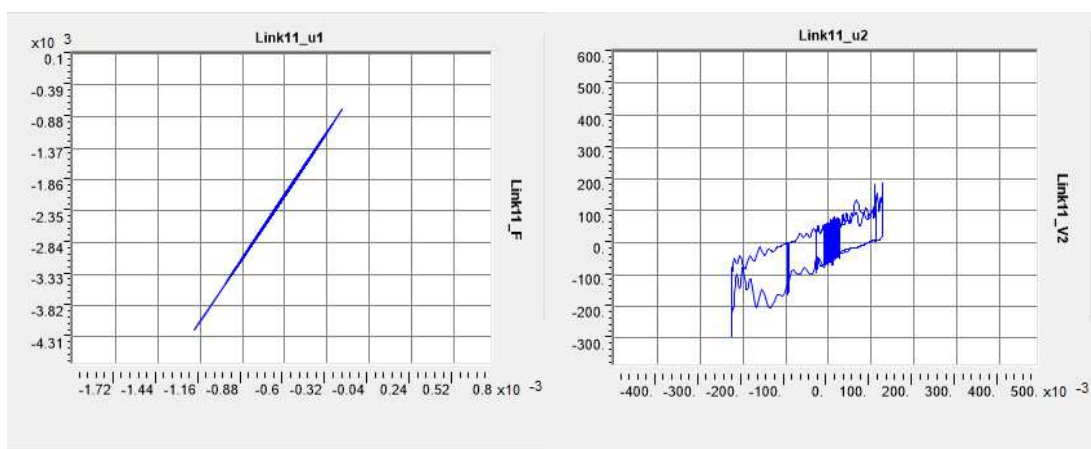


Figura 236_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

Nel presente modello, oltre i cicli dei dispositivi d'isolamento, risulta interessante guardare quelli che sono i legami costitutivi forza-spostamento in direzione U1 dei dissipatori viscosi ai vari stati limite. Vengono presi in considerazione quelli accoppiati con gli isolatori di riferimento per le precedenti analisi, di conseguenza, si mostreranno i link 42, 38, 39, 40, 41 e 48.

- SLD

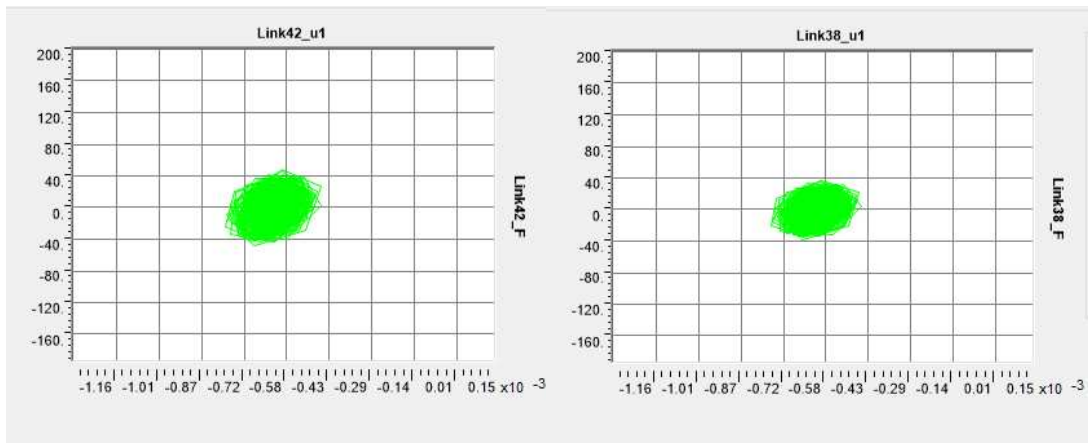


Figura 237_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 42-38

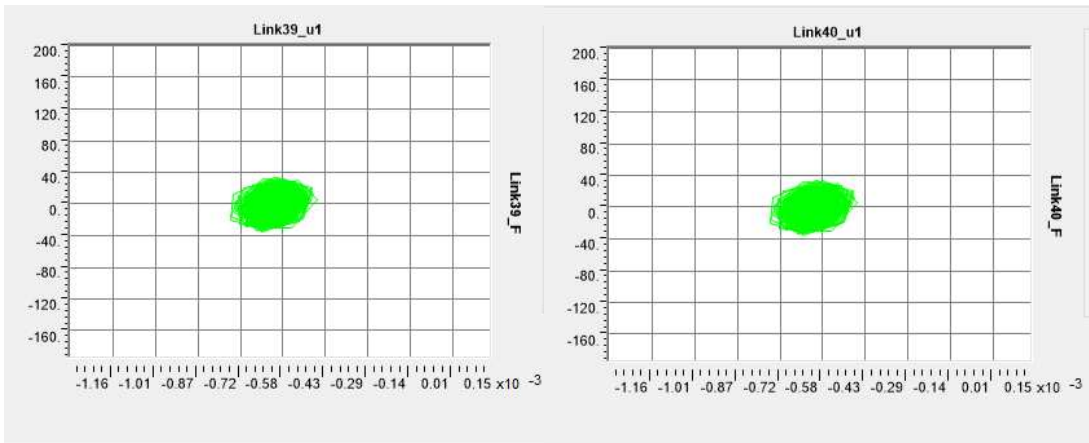


Figura 238_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 39-40

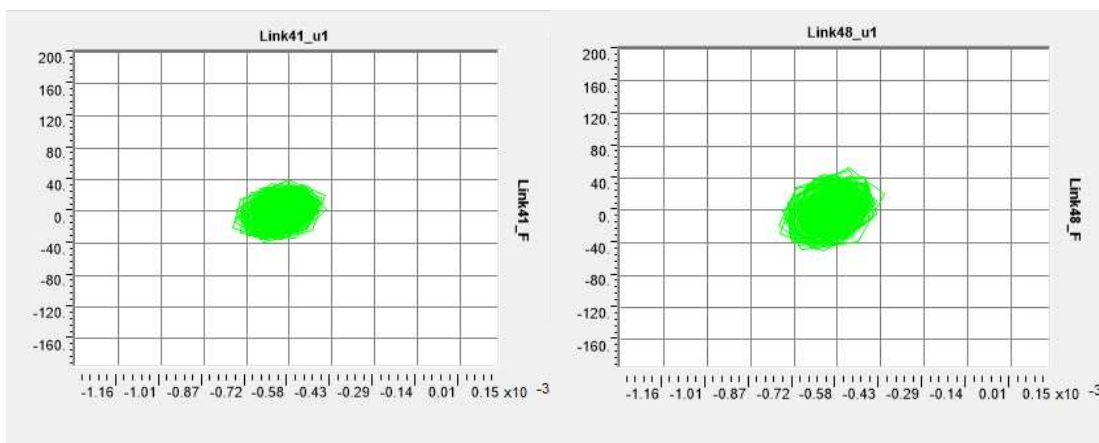


Figura 239_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 41-48

- SLV

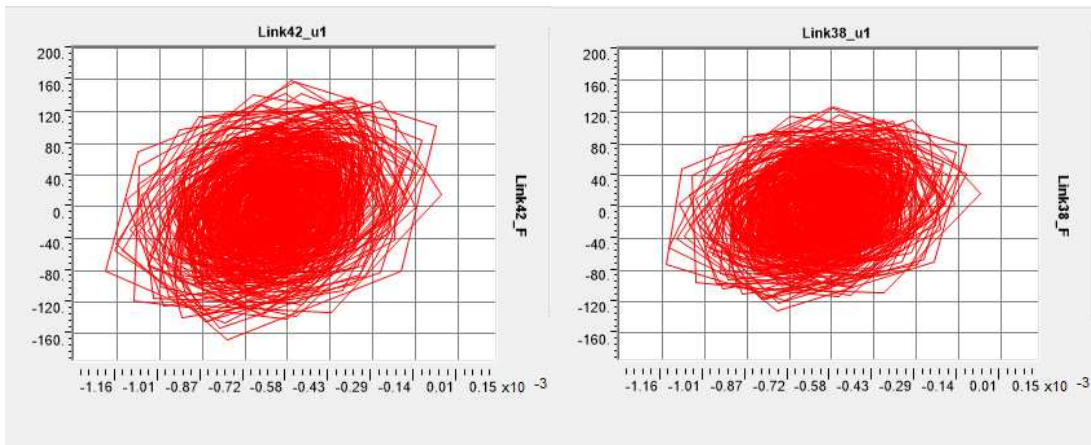


Figura 240_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 42-38

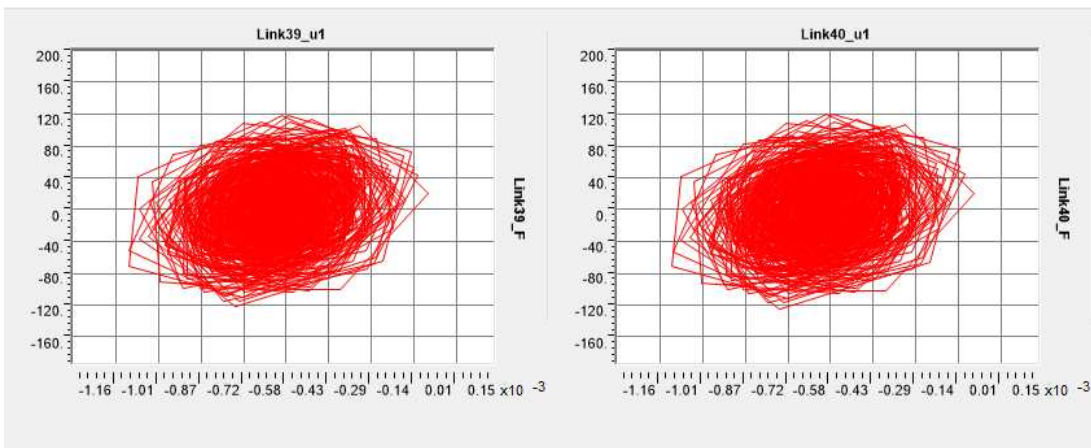


Figura 241_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 39-40

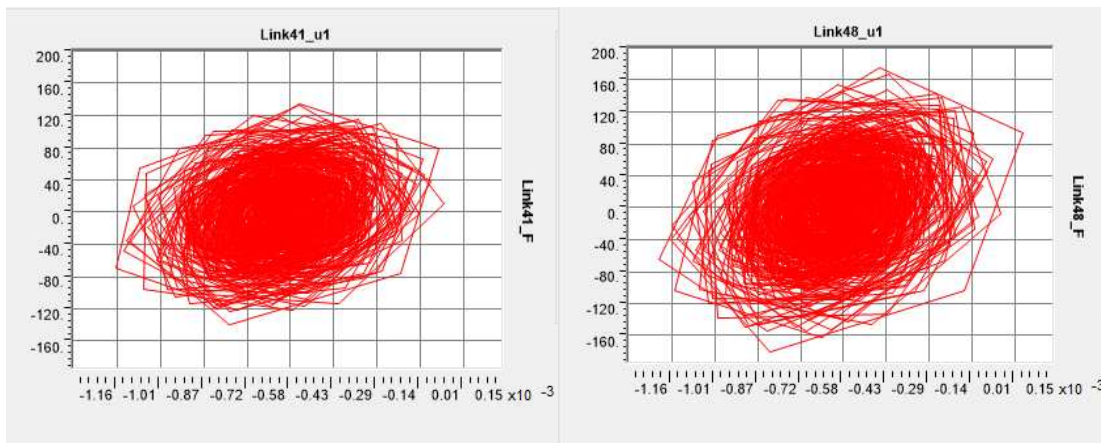


Figura 242_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 41-48

- SLC

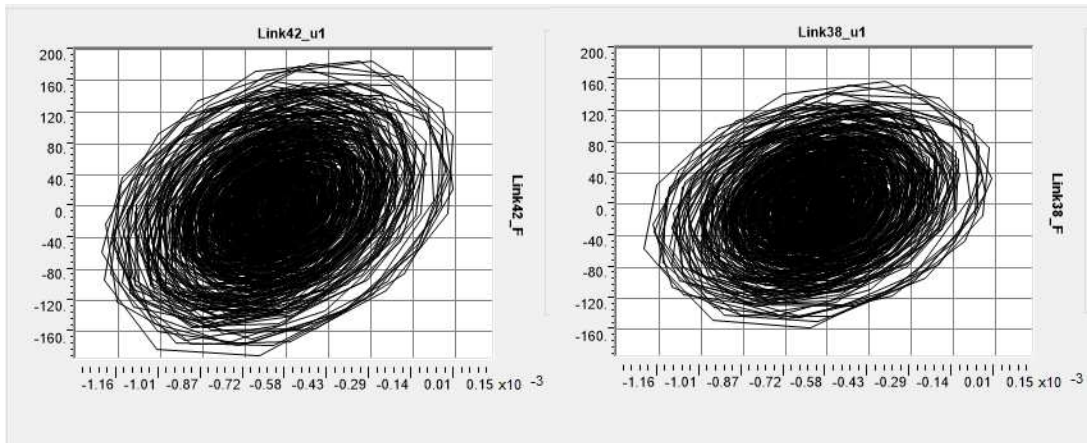


Figura 243_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 42-38

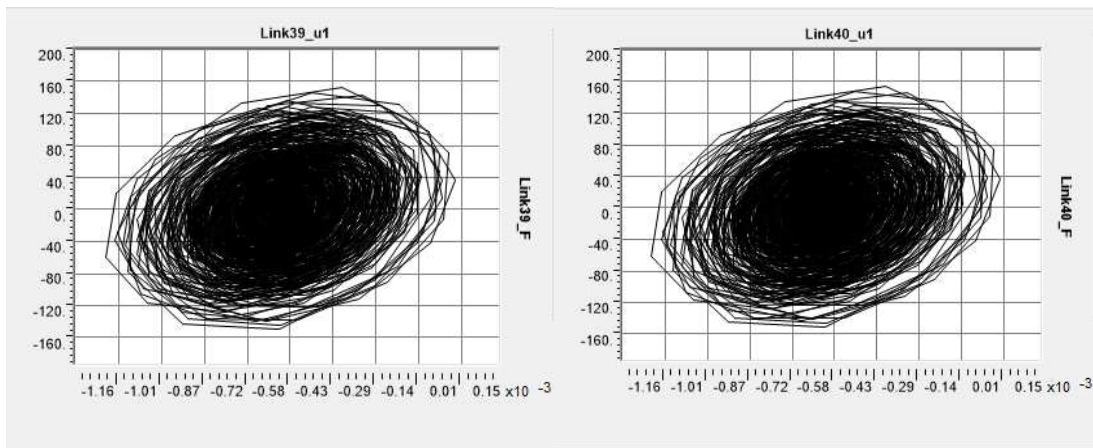


Figura 244_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 39-40

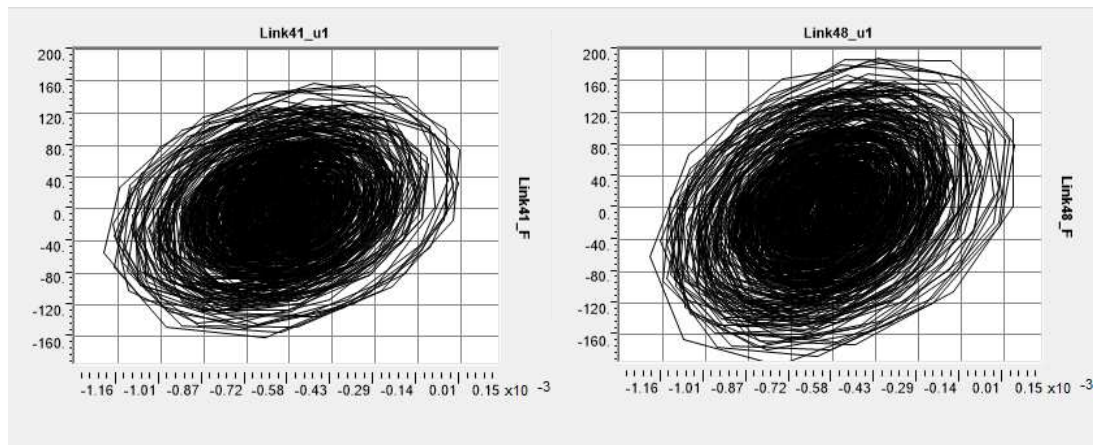


Figura 245_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 41-48

- CLO

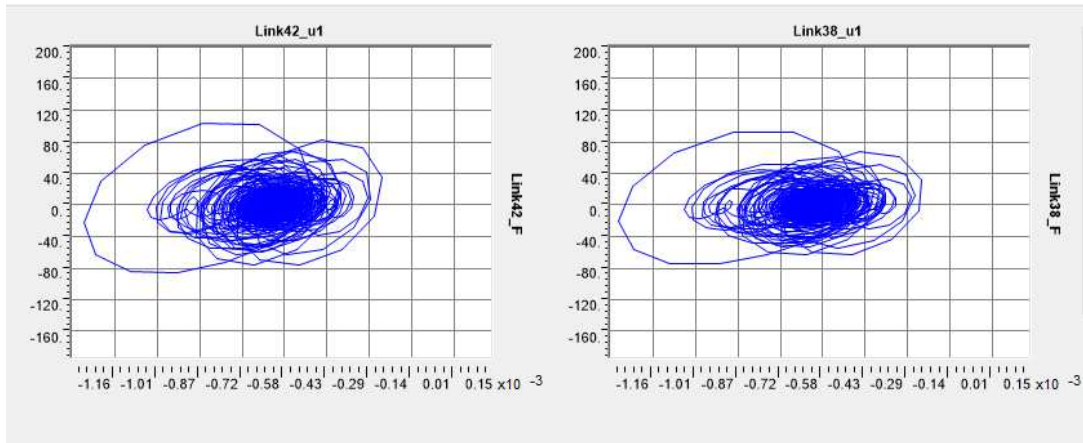


Figura 246_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 42-38

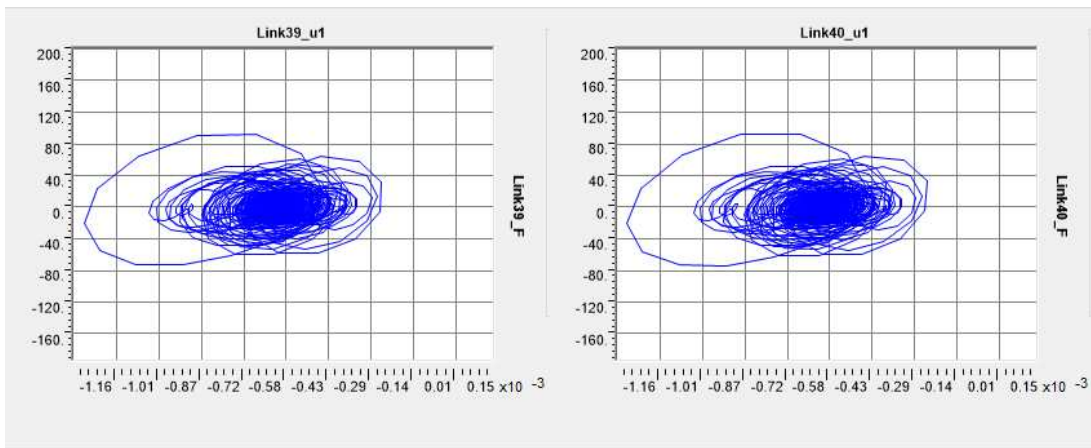


Figura 247_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 39-40

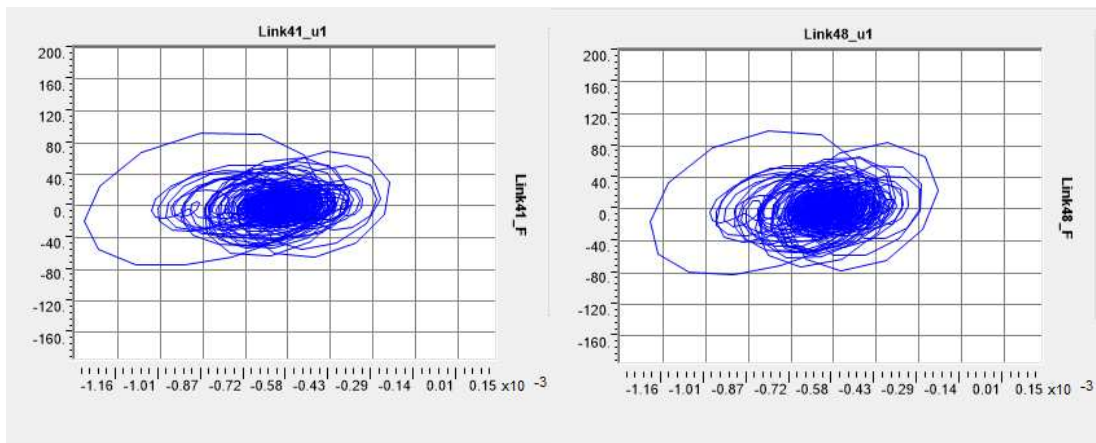


Figura 248_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 41-48

Analizzando i cicli degli isolatori, si può notare che sono uguali a quelli ottenuti per il modello al §6.5., se non per qualche leggera differenza nel contenuto energetico. Questo sta a sottolineare che la modellazione dei damper nei quali si va a concentrare la capacità dissipativa, non influenza la risposta, in termini di cicli forza-spostamento, dei dispositivi d'isolamento. Ponendo l'attenzione sui dissipatori viscosi, invece, si possono vedere quelli che sono i legami costitutivi degli stessi, caratterizzati da cicli ellittici inclinati, in quanto è stata data una componente di rigidità anche ad essi. È importante sottolineare che, circa tutti i dispositivi, per sismi allo SLC o CLO, arrivano a dissipare forze verticali medie di circa 200 kN con spostamenti massimi di 1,2 mm. Il concetto è che si sta richiedendo ad un dispositivo di dissipare una grande quantità d'energia in pochi mm di spostamento. Un elemento di questo rendimento non è possibile realizzarlo, anche perché il poco gioco a disposizione in termini di spostamento andrebbe perso per fenomeni come la comprimibilità del fluido e assestamenti delle connessioni del dispositivo stesso alla struttura.

6.7. Isolamento 3D

Nella presente sezione viene preso in considerazione un isolamento 3D, andando ad inserire un sistema in serie composto dall'isolatore a scorrimento (che svolge la funzione d'isolamento sul piano orizzontale) e un dispositivo viscoso composto da una molla e un dissipatore posizionati in parallelo tra loro (svolge la funzione di dissipare l'energia verticale). Il presente sistema va a schematizzare quello visto al §3.2.2. Questo va a completare la trattazione avvenuta al §6.6., nella quale si era visto che accoppiando un isolatore e un dissipatore si eliminava il problema della trazione sui dispositivi andando a dissipare l'energia in ingresso, ma si richiedeva l'ausilio di un dispositivo che dissipasse molta energia in spostamenti dell'ordine del mm.

La modellazione al SAP prevede in prima cosa l'inserimento di un link non lineare che va a simulare il comportamento del sistema d'isolamento orizzontale. Questo viene fatto, come visto nei precedenti paragrafi, utilizzando il legame costitutivo del "friction isolator" presente nel software, e concentrando in esso solo le proprietà di rigidità orizzontale e verticale in funzione del carico verticale. Sulla base di ciò, sono stati definiti tre tipi di isolatori, a carico massimo ammissibile dichiarato dal produttore di 2000, 3000 e 3500 kN. Dal carico massimo ammissibile dichiarato dal produttore per ogni

isolatore si è valutato il valore di rigidità verticale in direzione U1, stimandolo come:

$$K_v = \frac{N_{adm}}{0.001}$$

I valori di Kv sono stati inseriti nei parametri per l'analisi non lineare dei friction isolator in direzione U1.

The image displays three panels of software settings for a friction isolator with a load N=2000kN. The top panel shows the nonlinear analysis case for direction U1, with a stiffness of 2000000 and a damping coefficient of 0. The middle panels show the same settings for directions U2 and U3, including identification parameters (Property Name: N=2000, Direction: U2/U3, Type: Friction Isolator, NonLinear: Yes), linear analysis cases (Effective Stiffness: 274.1, Effective Damping: 0), shear deformation location (Distance from End-J: 0), and detailed nonlinear analysis cases (Stiffness: 1000000, Friction Coefficient Slow/Fast: 0.025, Rate Parameter: 0, Net Pendulum Radius: 3.7).

Figura 249_Proprietà isolatore con N=2000kN rispettivamente lungo U1, U2 e U3

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	3000000.
Damping Coefficient	0.

Identification	
Property Name	N=3000
Direction	U2
Type	Friction Isolator
NonLinear	Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	757.4
Effective Damping	0.14

Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	1000000.
Friction Coefficient, Slow	0.025
Friction Coefficient, Fast	0.025
Rate Parameter	0.
Net Pendulum Radius	3.7

Identification	
Property Name	N=3000
Direction	U3
Type	Friction Isolator
NonLinear	Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	757.4
Effective Damping	0.14

Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	1000000.
Friction Coefficient, Slow	0.025
Friction Coefficient, Fast	0.025
Rate Parameter	0.
Net Pendulum Radius	3.7

Figura 250_Proprietà isolatore con $N=3000kN$ rispettivamente lungo $U1$, $U2$ e $U3$

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	3500000.
Damping Coefficient	0.

Identification	
Property Name	N=3500
Direction	U2
Type	Friction Isolator
NonLinear	Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	757.4
Effective Damping	0.14

Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	1000000.
Friction Coefficient, Slow	0.025
Friction Coefficient, Fast	0.025
Rate Parameter	0.
Net Pendulum Radius	3.7

Identification	
Property Name	N=3500
Direction	U3
Type	Friction Isolator
NonLinear	Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	757.4
Effective Damping	0.14

Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	1000000.
Friction Coefficient, Slow	0.025
Friction Coefficient, Fast	0.025
Rate Parameter	0.
Net Pendulum Radius	3.7

Figura 251_Proprietà isolatore con $N=3500kN$ rispettivamente lungo $U1$, $U2$ e $U3$

Per la modellazione della molla e del dissipatore si sono usati, invece, un link lineare e un legame costitutivo del software già visto nei paragrafi precedenti definito “Damper Exponential”, per i quali è stato sbloccato solo il grado di libertà U1. Nel primo si è andato ad inserire il valore della rigidezza verticale necessaria, calcolata come:

$$K_{v,is} = \frac{K_{v,tot}}{n_{is}} = \frac{1}{n_{is}} \left(\frac{2\pi}{T_{is,target}} \right)^2 M_{tot}$$

Dove:

- $K_{v,is}$ è la rigidezza verticale della singola molla
- $K_{v,tot}$ è la rigidezza verticale dell'intero sistema
- n_{is} è il numero di molle presenti
- M_{tot} è la massa totale del sistema
- $T_{is,target}$ è il periodo di isolamento verticale che si vuole raggiungere relativo al primo modo di vibrare fondamentale della sovrastruttura.

Per la valutazione di $T_{is,target}$ è stato anzitutto valutato lo spettro verticale allo SLC. Il periodo verticale di vibrare dello schema prima dell'intervento si era visto essere pari a 0,48 s, per il quale si ricade in prossimità dell'inizio del pianerottolo dello spettro in accelerazione. Qui si hanno spostamenti bassi ma forti accelerazioni. Scopo dell'introduzione delle molle vuole essere quello di aumentare tale periodo, prendendo come $T_{is,target}$ iniziale 0,3 s, per il quale si ricade ben oltre lo spettro.

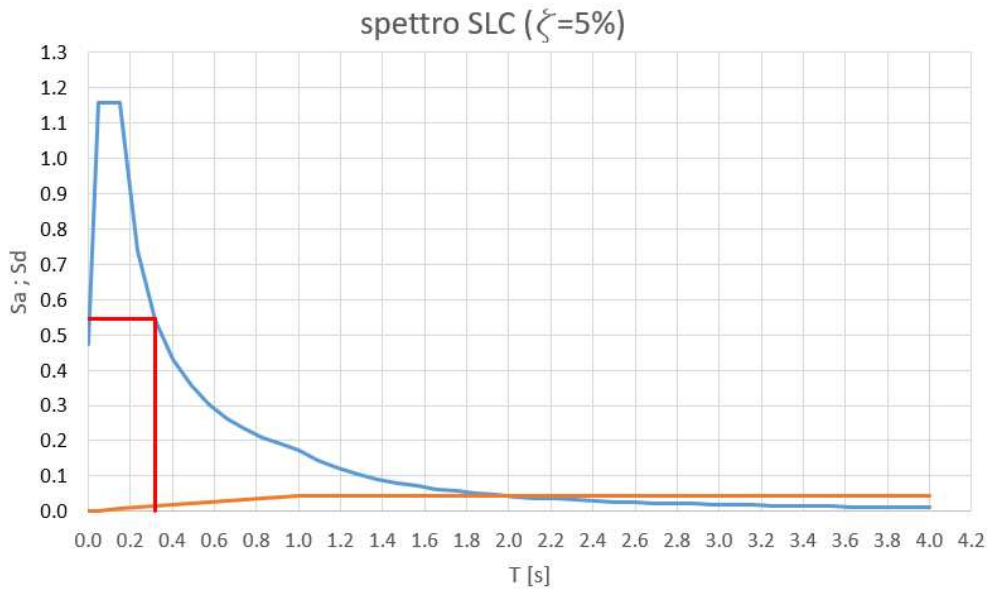


Figura 252_spettro verticale allo SLC smorzato al 5%

Secondo tale schema di calcolo, è stato assegnato ad ogni molla una rigidezza $K_{v, is}$ pari a 50483 kN/m, e quindi approssimabile a 50000 kN/m.

Al dissipatore è stata assegnato un valore di rigidezza fittizio pari a 100000 kN/m per renderlo abbastanza rigido sul piano verticale e una costante di dissipazione calcolata come:

$$C_v = \frac{2\zeta_v K_{v, is}}{\omega_v}$$

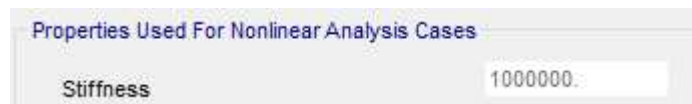


Figura 253_Rigidezza, costante di dissipazione e coefficiente della velocità dei dissipatori viscosi

La costante C del damper ha visto un ragionamento di calcolo maggiormente elaborato. Più nello specifico, si sono andati a valutare lo spettro da norma e quello registrato dalla stazione di CLO nell'evento del 30/10/2016, entrambi smorzati sia al 5% che al 28%.

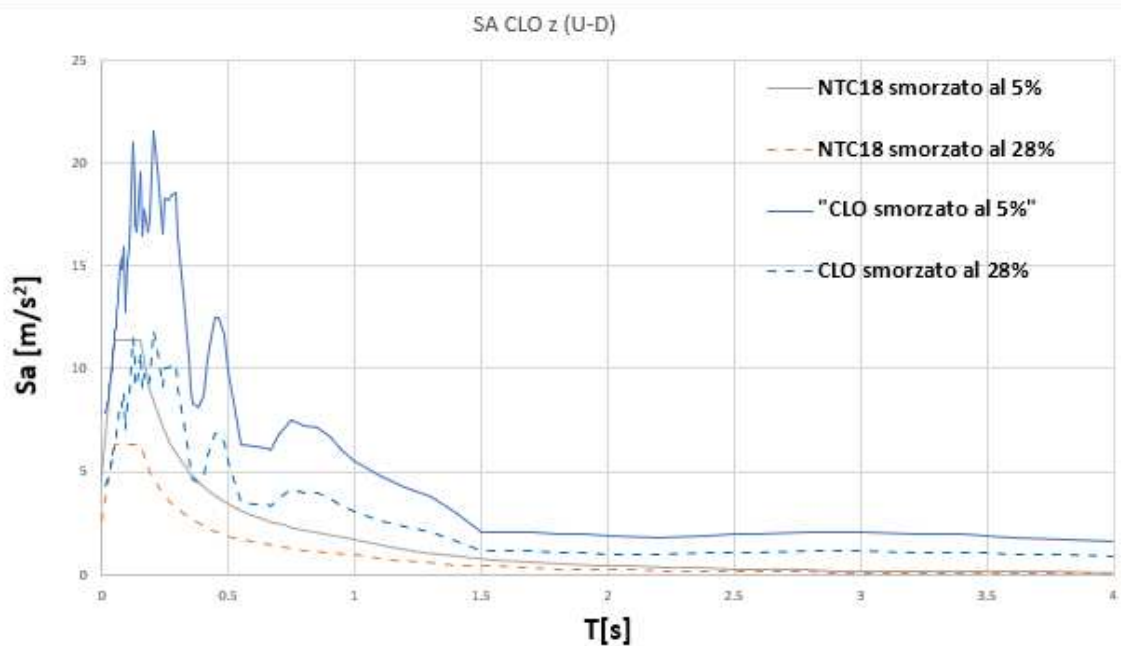


Figura 254_Spettro da norma allo SLC e registrato da CLO smorzati al 5% e 28%

Si mostra ora uno zoom dello stesso spettro di figura 254 in modo tale da evidenziare i valori compresi tra 0 e 1 s, intervallo in cui è compreso il valore di periodo verticale pre e post modellazione.

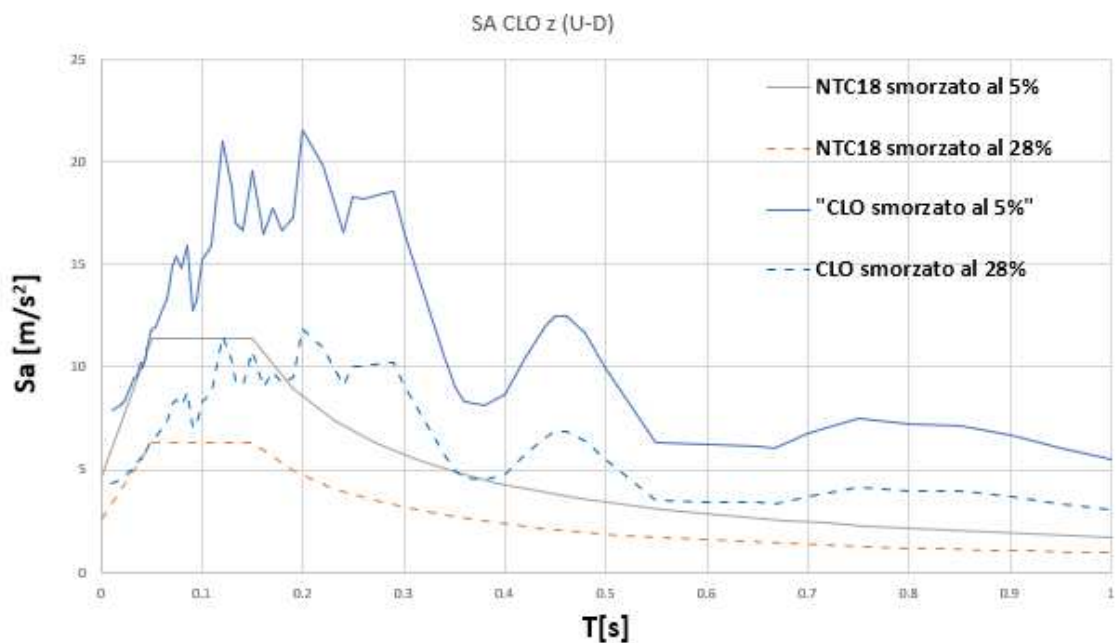


Figura 255_Valori di accelerazione verticale smorzati da norma e CLO compresi tra 0 e 1 s

Come si può notare dallo spettro, per raggiungere valori di T_{iso} pari a 0,3 s, in modo tale da essere sufficientemente distanti dal pianerottolo, è necessario fornire al sistema un valore di smorzamento intorno al 28%. Questo perché, se si considerasse un $\zeta=5\%$, gli isolatori non avrebbero problemi di trazione per un sisma allo SLC da norma, in quanto per $T_{iso}=0,3$ s e $\zeta=5\%$ si otterrebbe un'accelerazione verticale molto inferiore a 10 m/s^2 , e quindi a “g”.

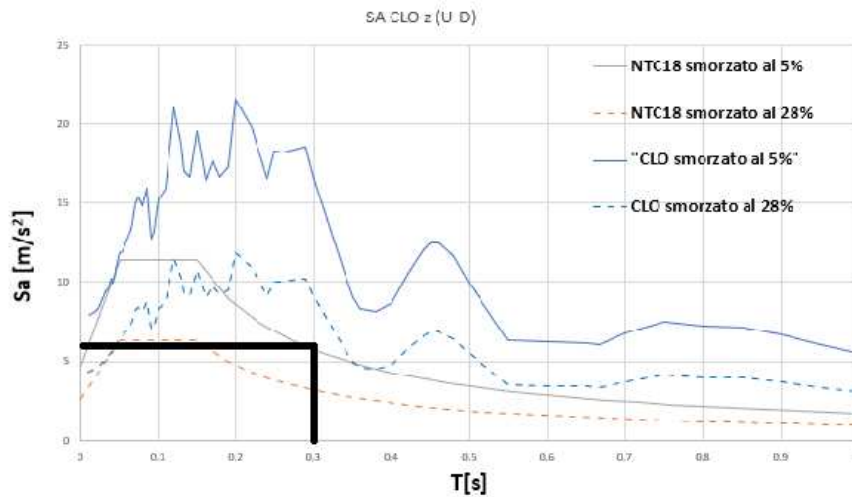


Figura 256_Accelerazione per $T=0.3$ s allo SLC

Il problema lo si avrebbe, però, per l'accelerogramma registrato da CLO, in quanto si arriverebbe a circa 17 m/s^2 . Perciò, la scelta dello smorzamento da affidare al dissipatore ricade su un valore di $\zeta=28\%$, in modo tale da avere un'accelerazione verticale che non produca trazione nei dispositivi.

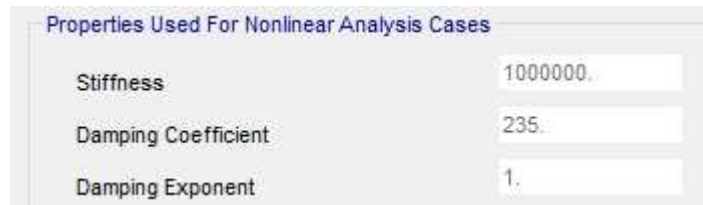


Figura 257_Parametri dissipatore

L'inserimento dei tre elementi appena descritti nel SAP è stato fatto andando a definire il Friction Isolator tra due nodi e al di sotto il sistema in parallelo formato da molla e dissipatore incastrati alla base per simulare il piano rigido.

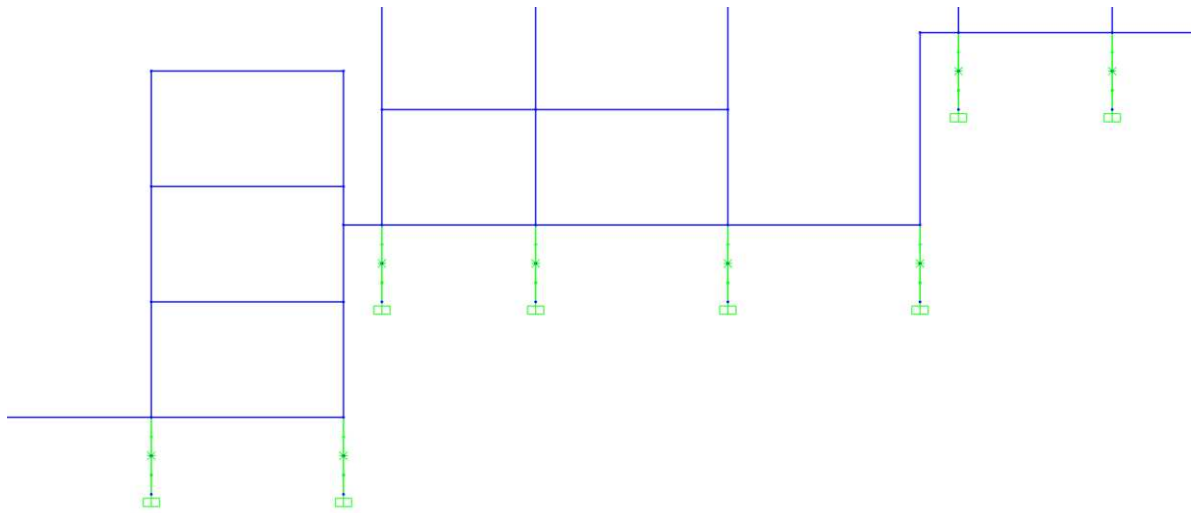


Figura 258_Focus sulla modellazione del sistema d'isolamento 3D

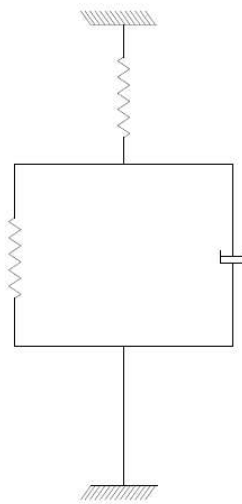


Figura 259_Schema di funzionamento del sistema d'isolamento

Finita la modellazione del sistema si è anzitutto svolta un'analisi modale, per andare a vedere se il periodo di vibrare in direzione verticale della sovrastruttura tendesse effettivamente a 0,3 s come da progetto.

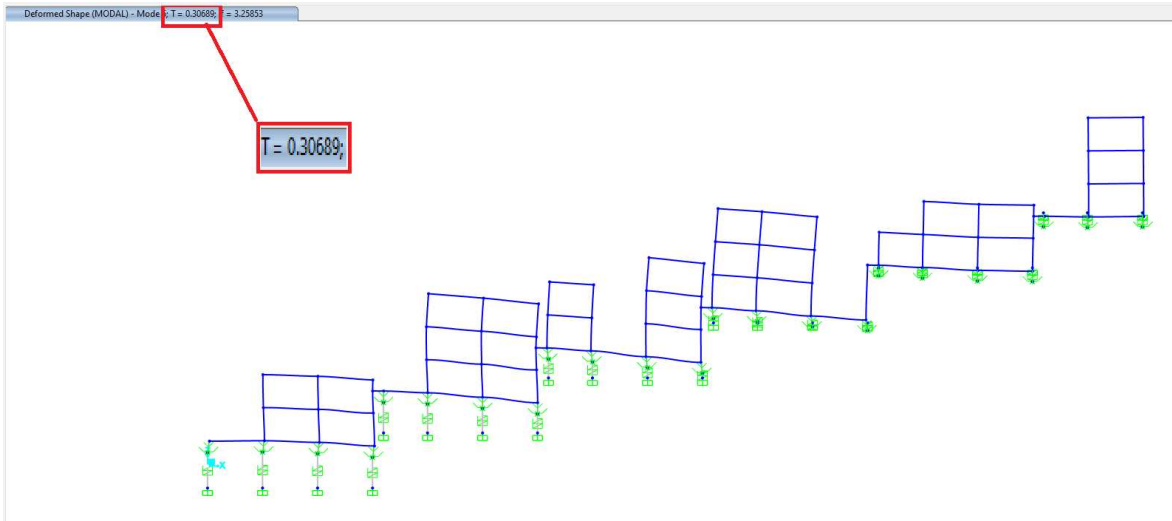


Figura 260 _primo modo di vibrare in direzione verticale del modello.

Appurato, dunque, che il modello fornisce i risultati ricercati in termini di dati modali, si sono svolte le analisi dinamiche non lineari. In particolar modo, sono stati analizzati i cicli forza-spostamento dei dissipatori rappresentati dai link 71, 75, 79, 83, 87 e 91, e degli isolatori corrispondenti ai link 1, 3, 5, 7, 9 e 11.

ISOLATORI

- SLD

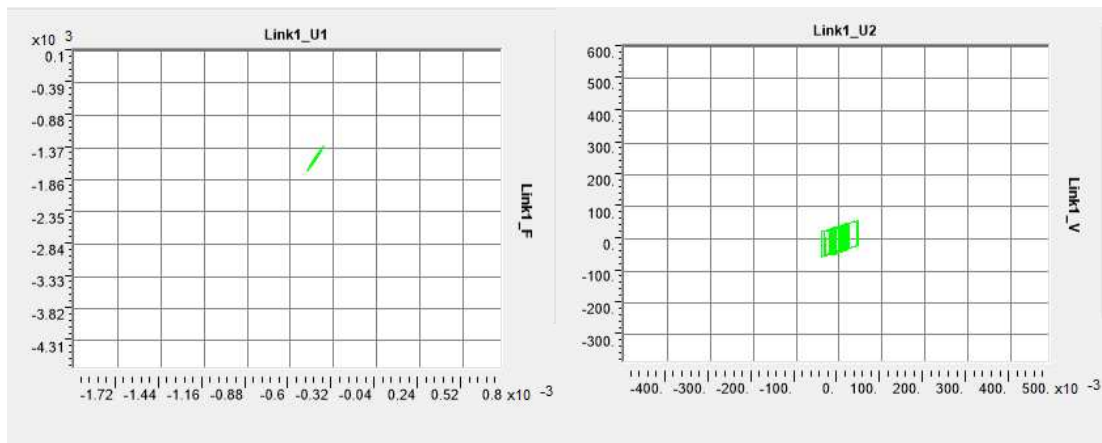


Figura 261 _Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

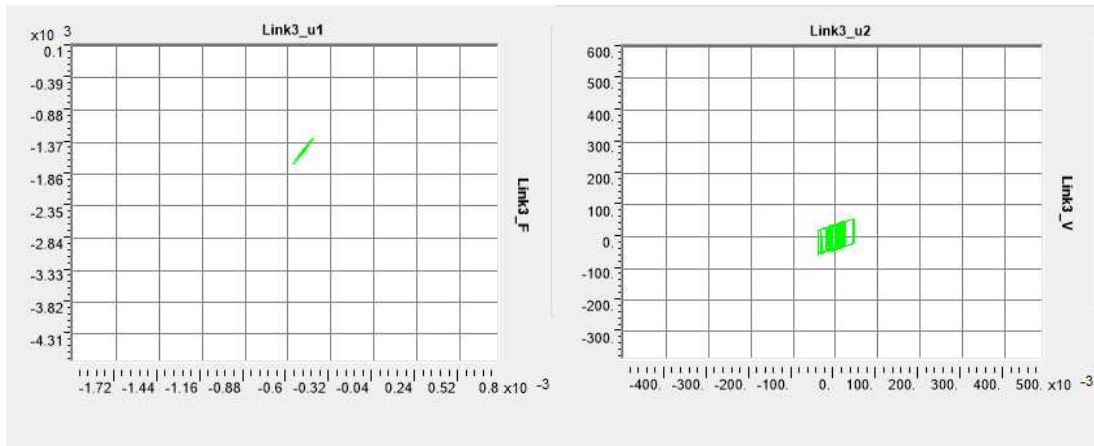


Figura 262_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

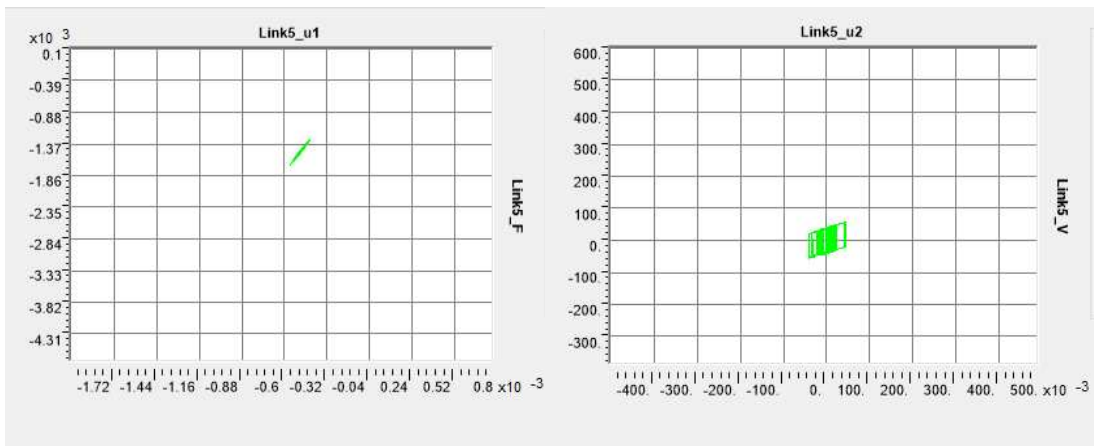


Figura 263_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

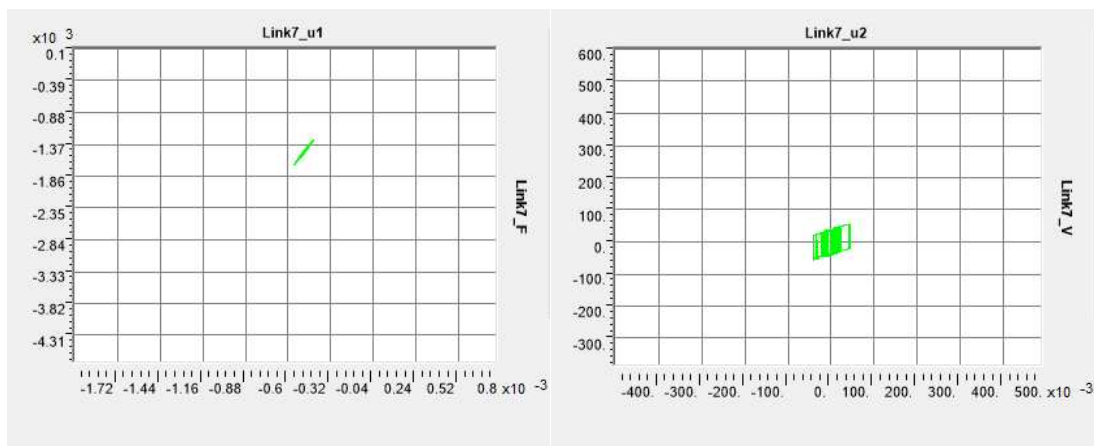


Figura 264_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

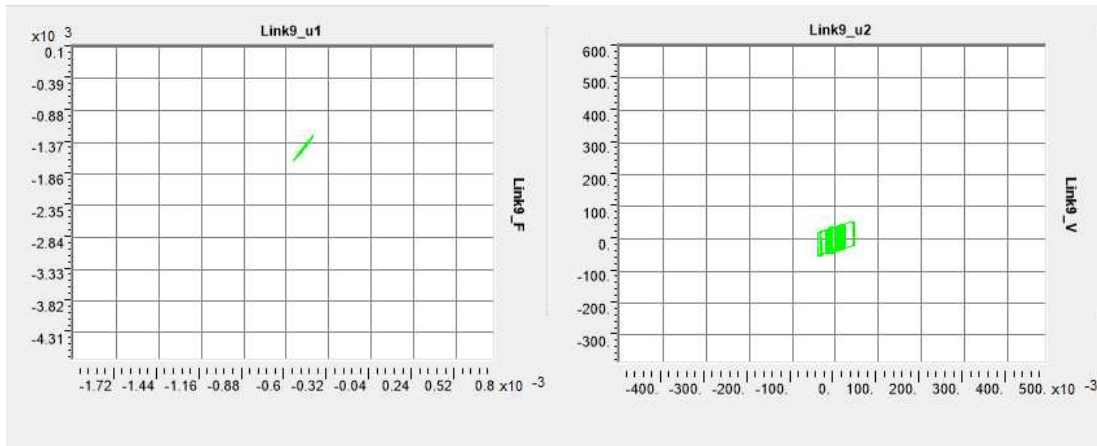


Figura 265_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

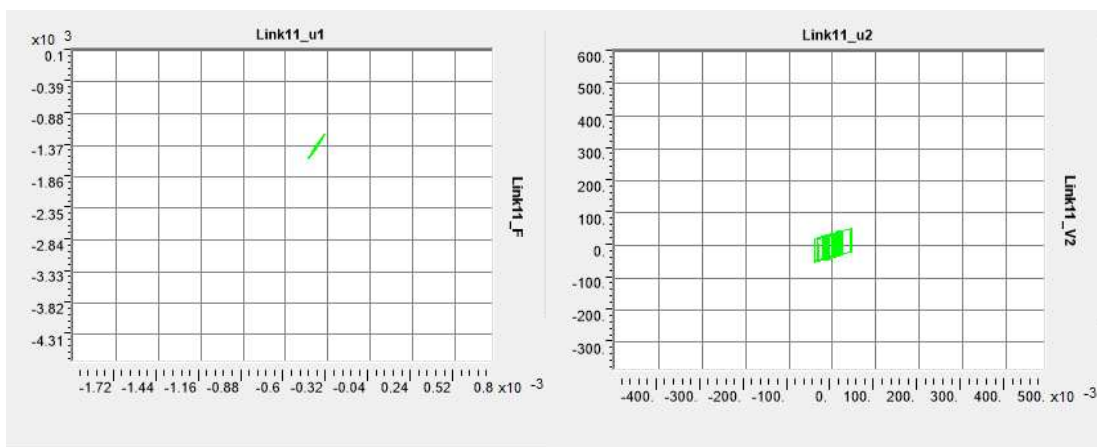


Figura 266_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- SLV

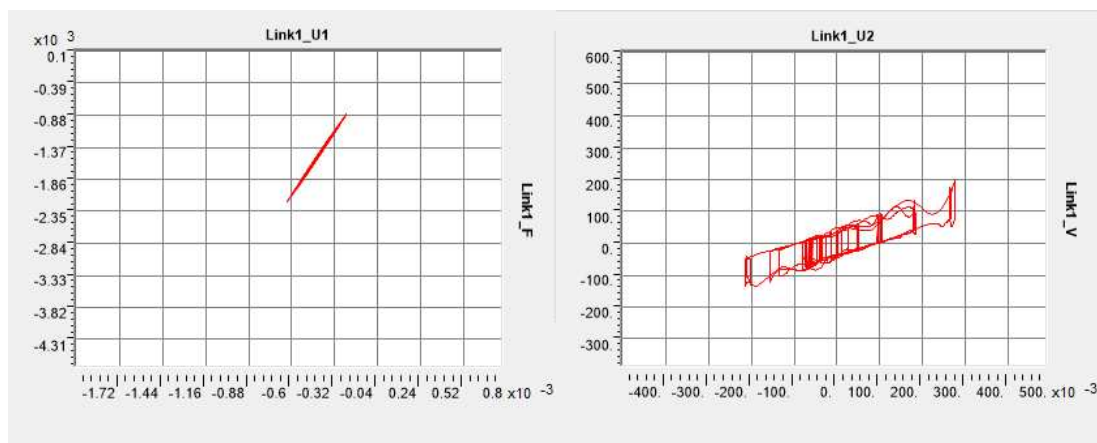


Figura 267_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

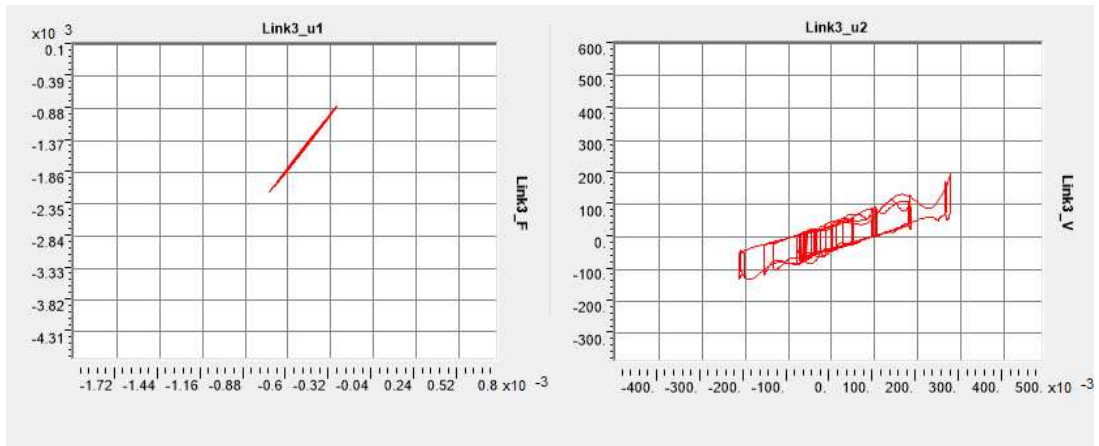


Figura 268_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

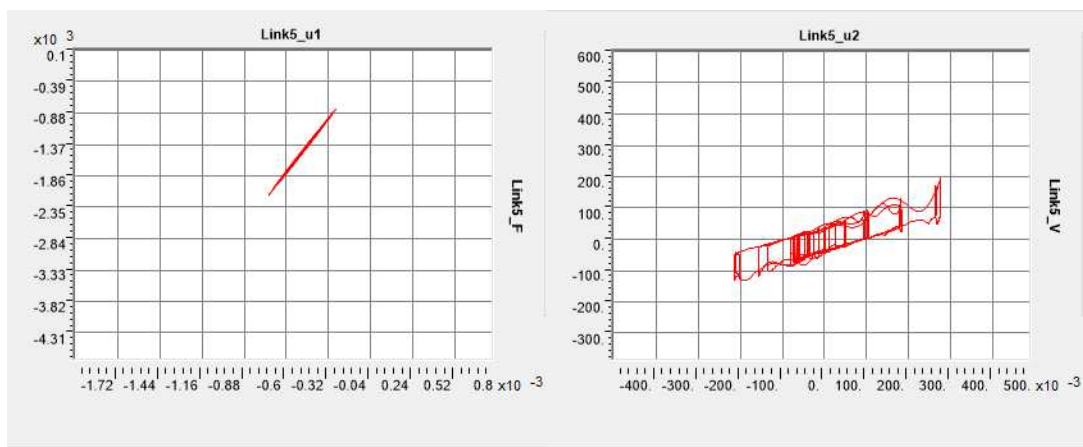


Figura 269_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

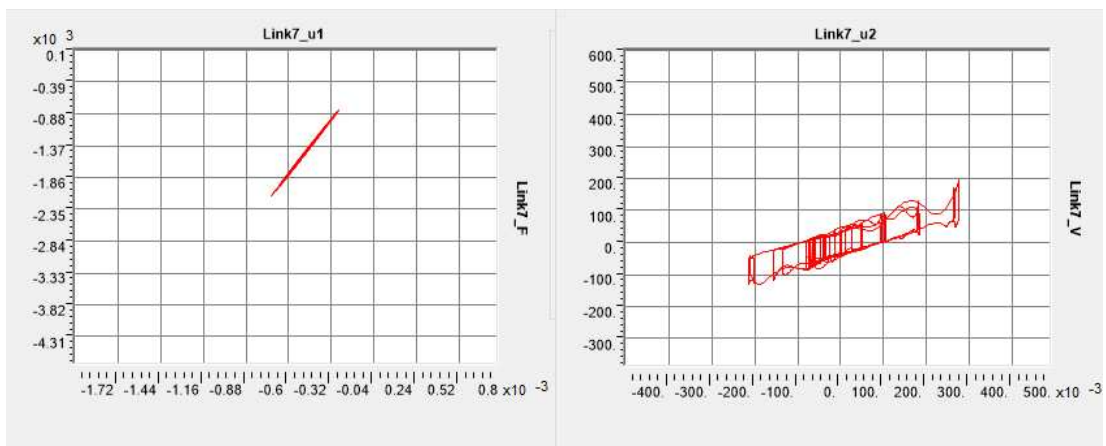


Figura 270_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

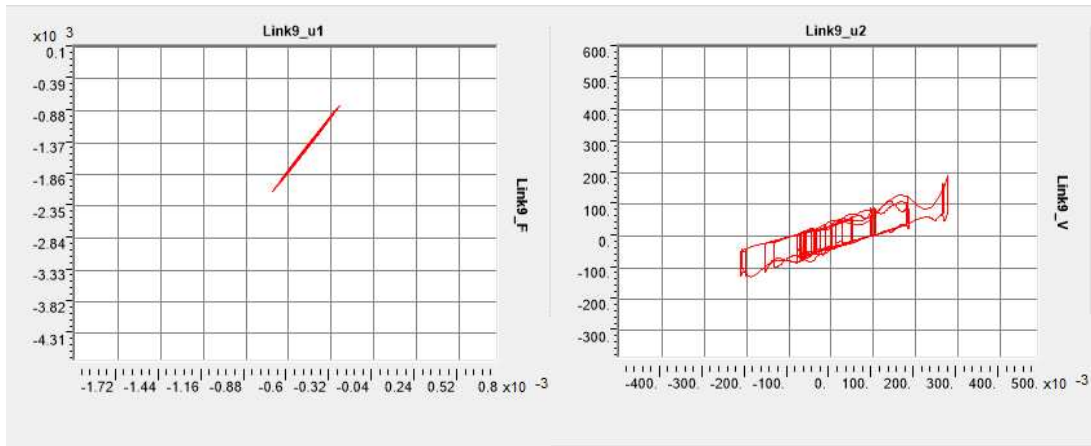


Figura 271_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

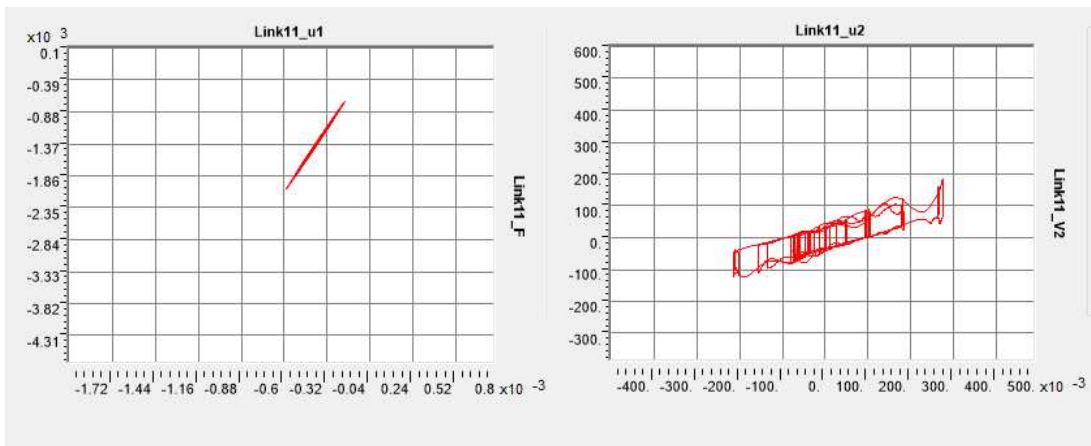


Figura 272_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- SLC

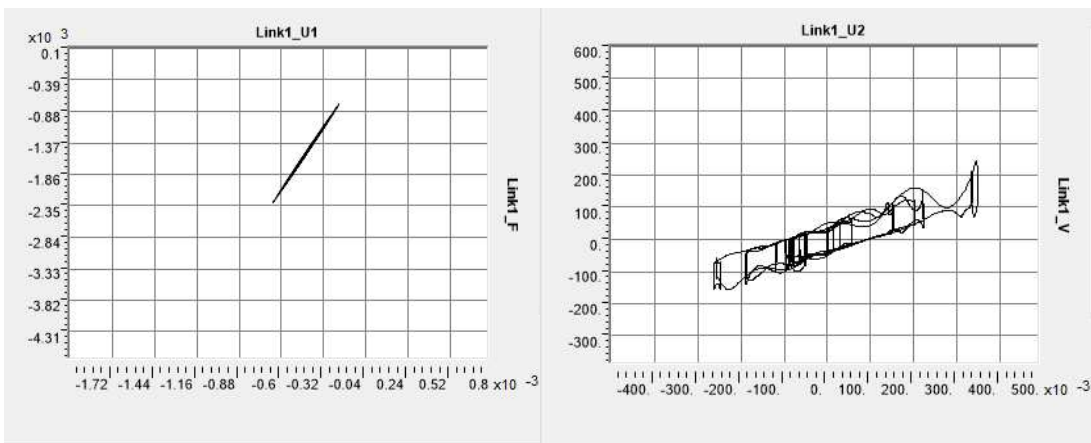


Figura 273_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

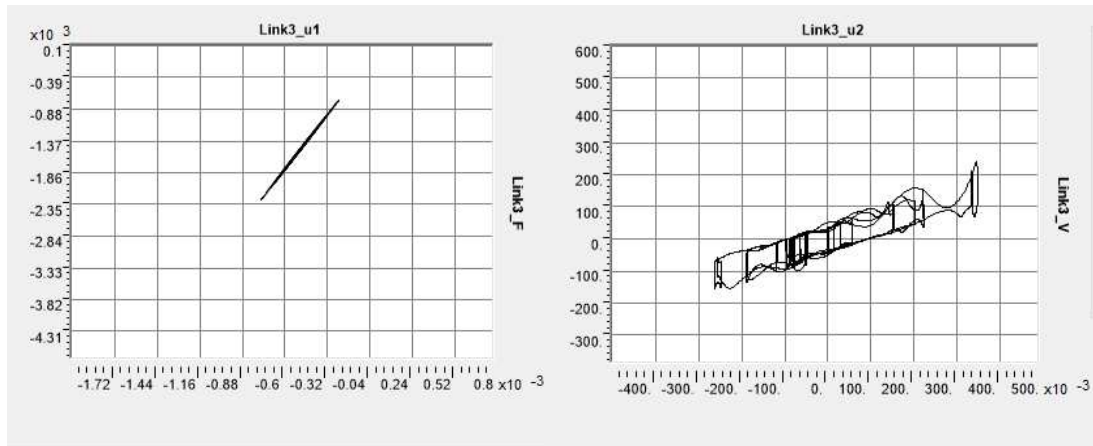


Figura 274_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

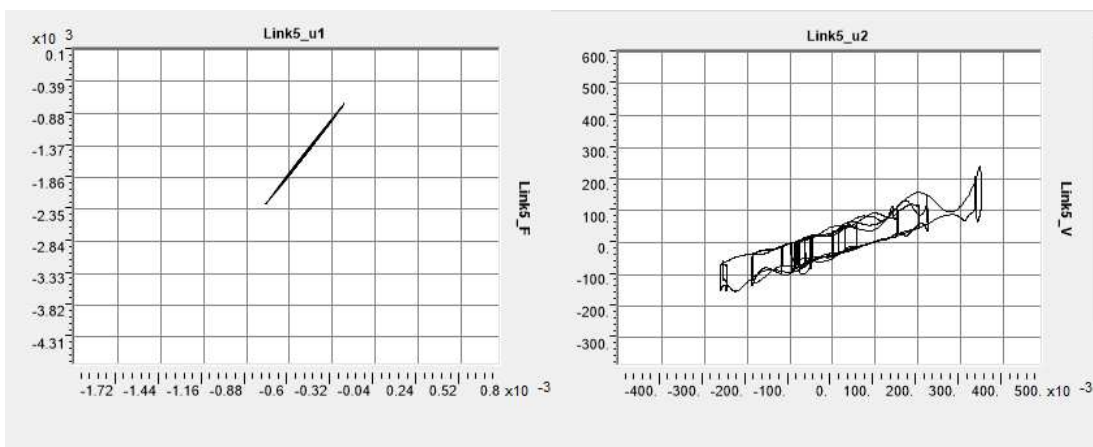


Figura 275_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

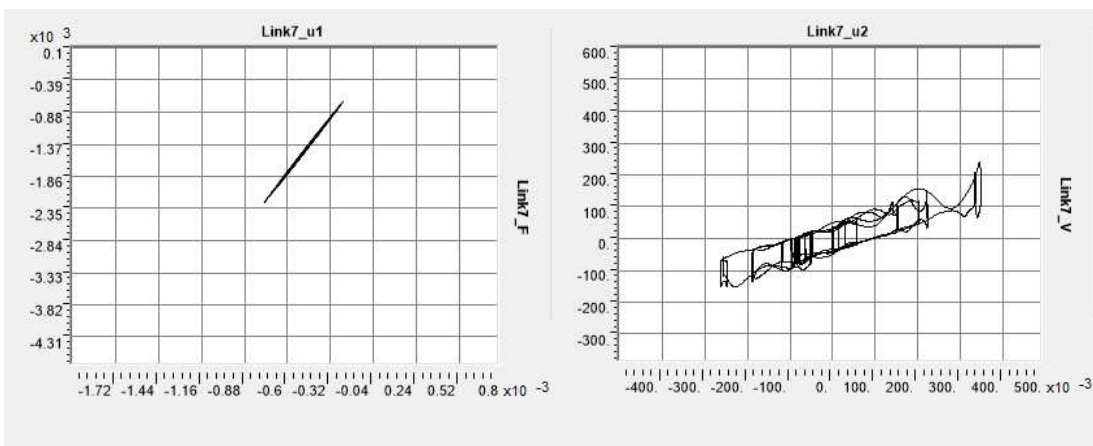


Figura 276_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

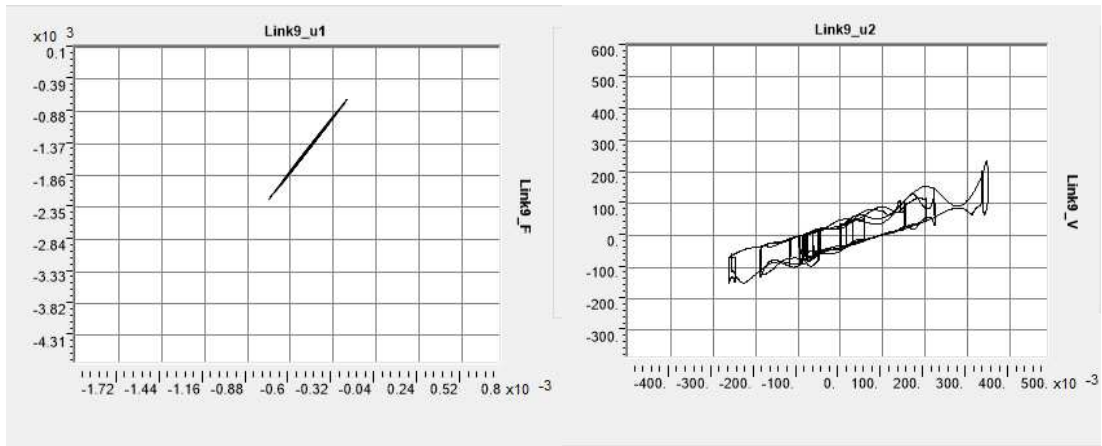


Figura 277_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

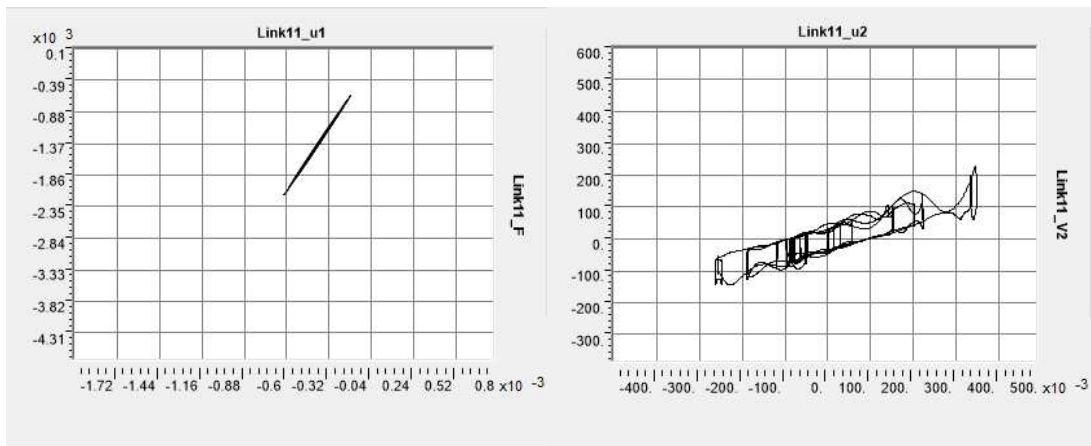


Figura 278_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

- **CLO**

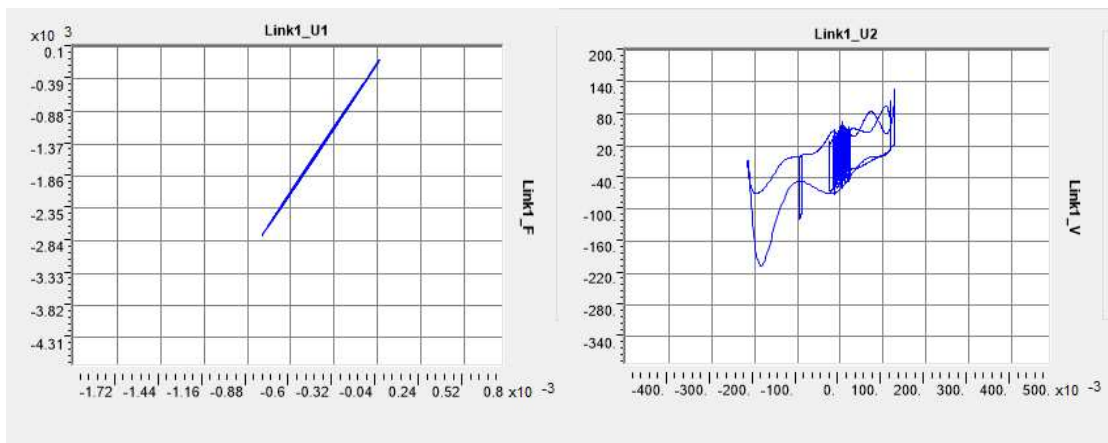


Figura 279_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 1

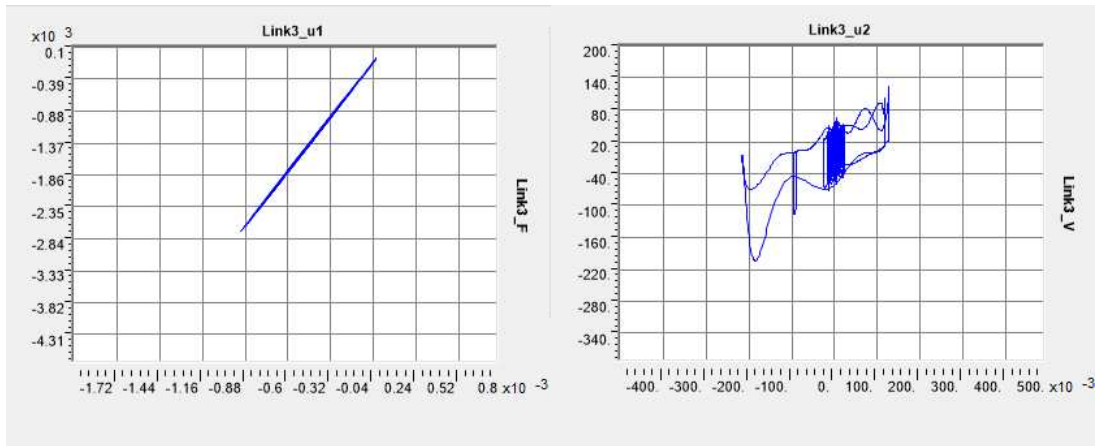


Figura 280_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 3

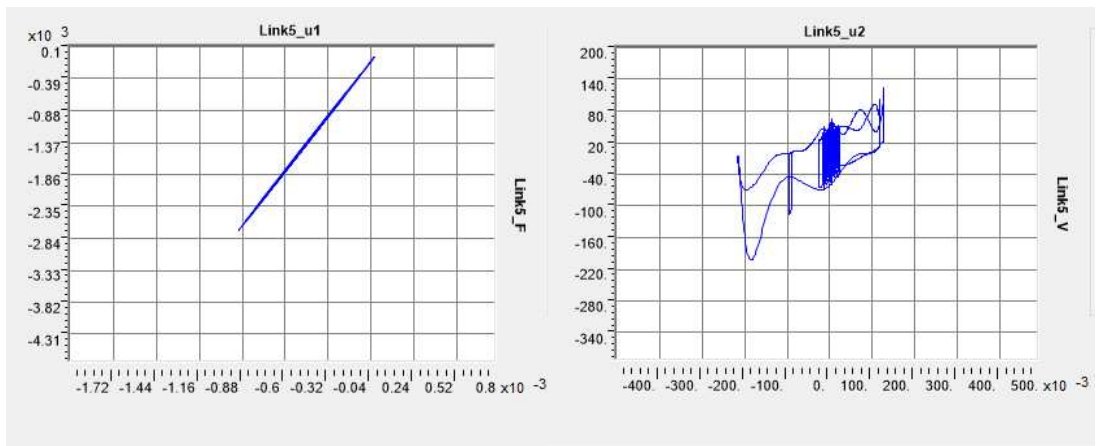


Figura 281_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 5

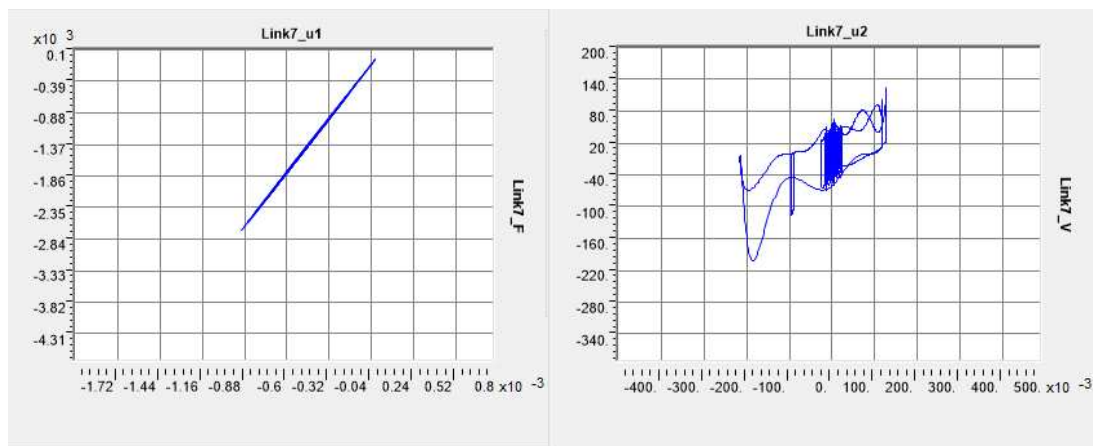


Figura 282_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 7

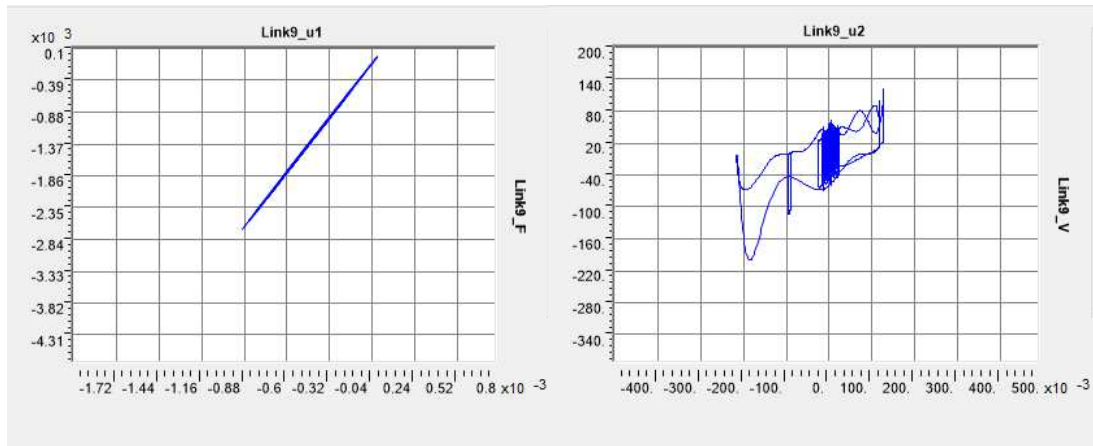


Figura 283_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 9

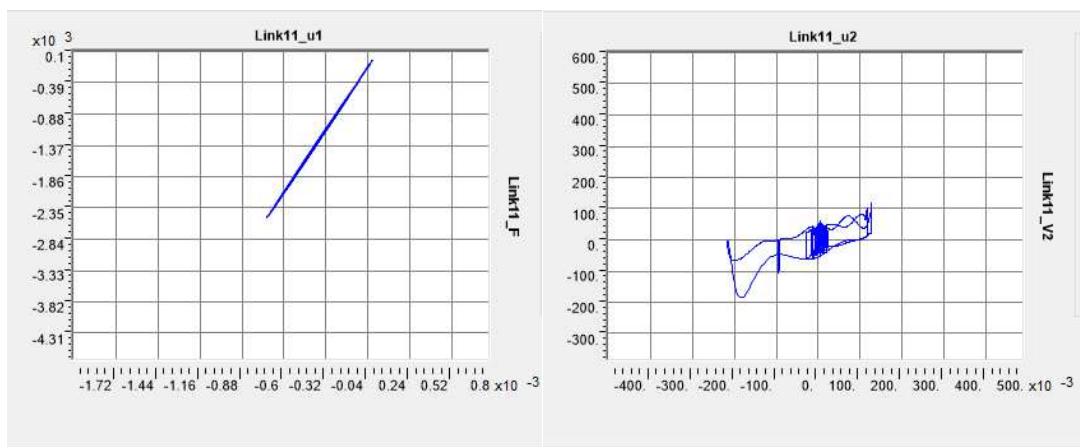


Figura 284_Legame forza-spostamento in direzione verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) per il link 11

DISSIPATORI

- SLD

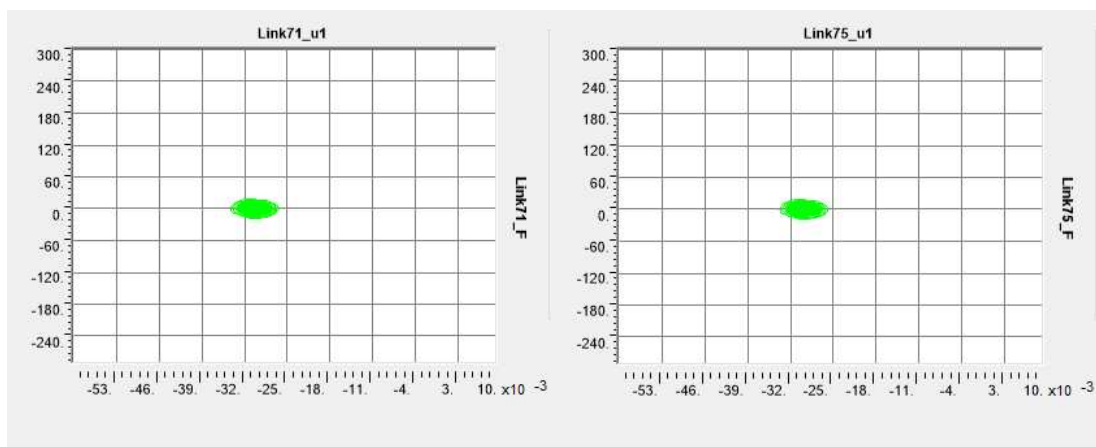


Figura 285_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 71-75

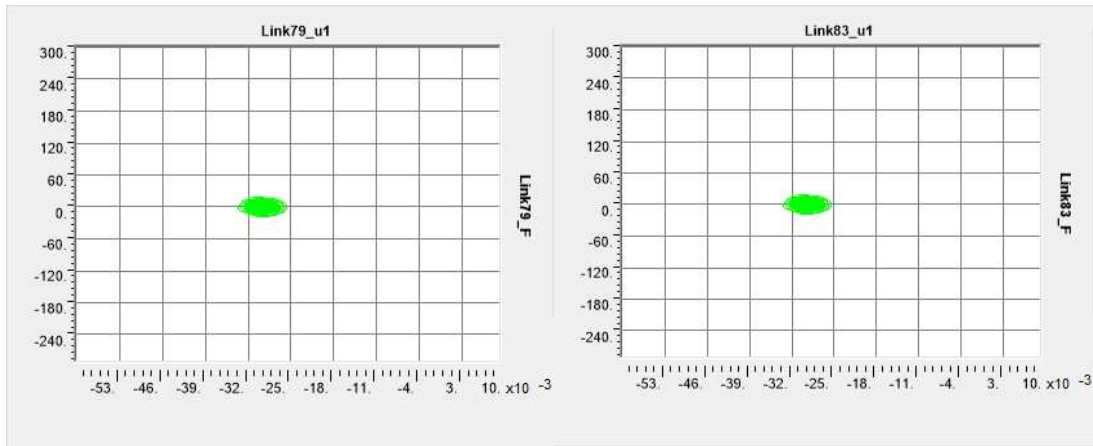


Figura 286_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 79-83

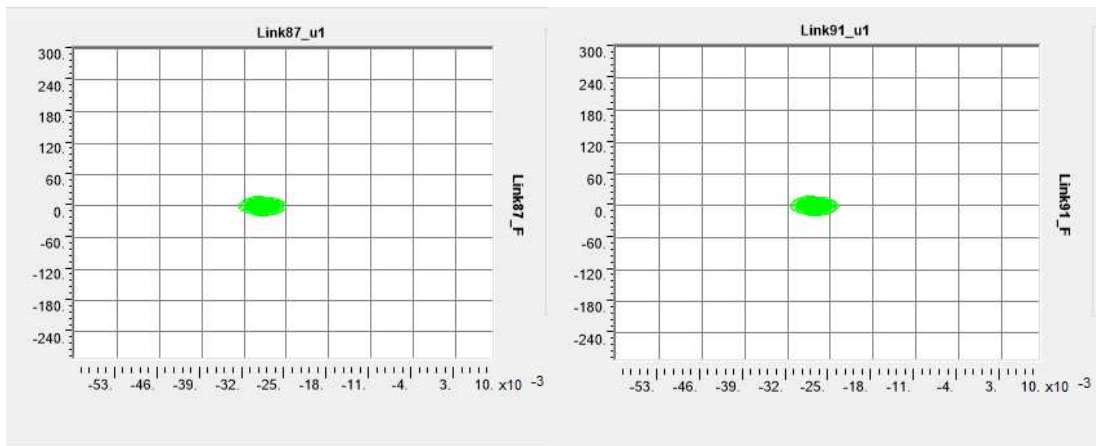


Figura 287_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 87-91

• SLV

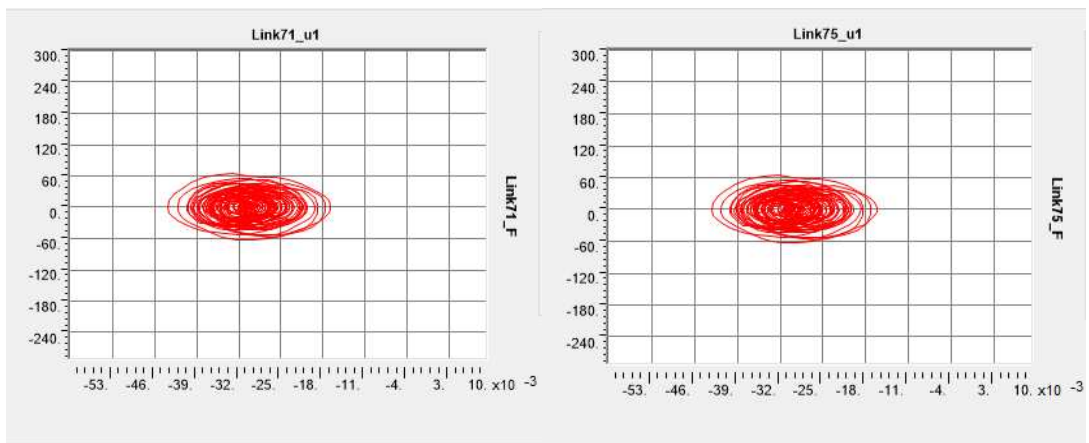


Figura 288_Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 71-75

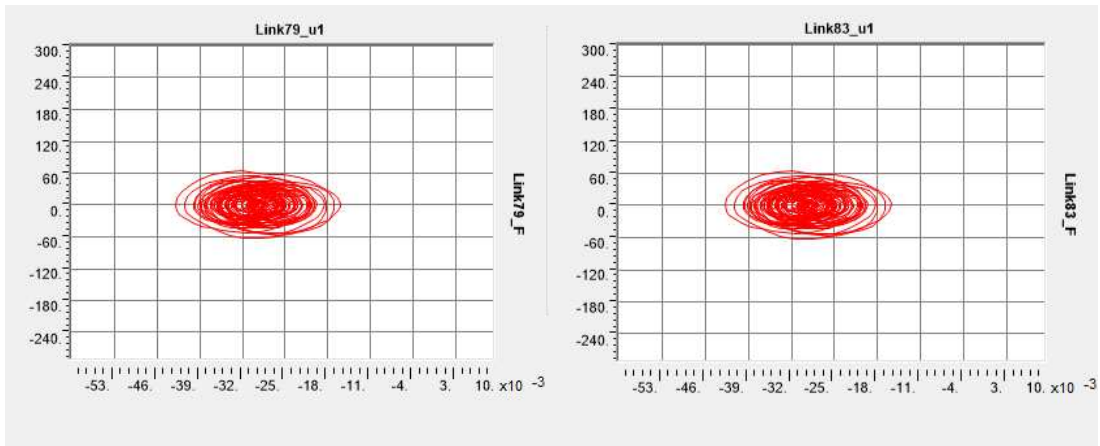


Figura 289__Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 79-83

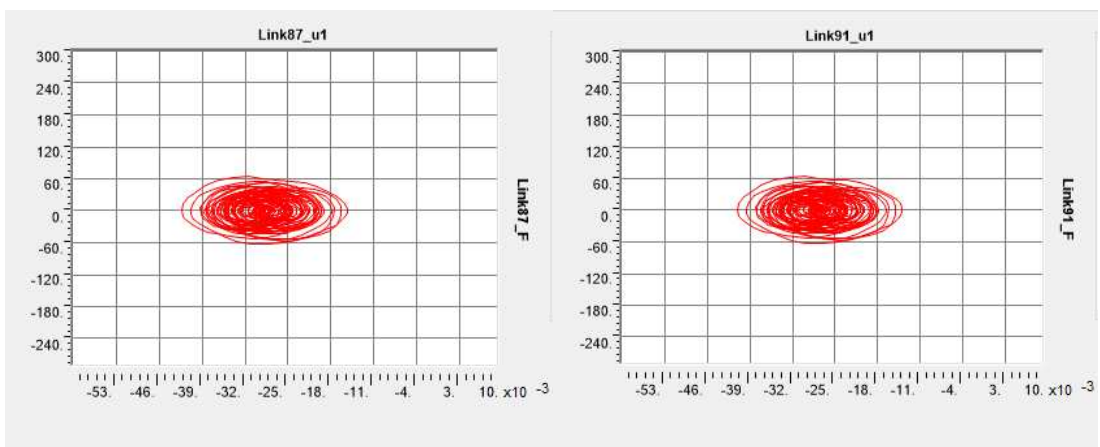


Figura 290__Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 87-91

- SLC

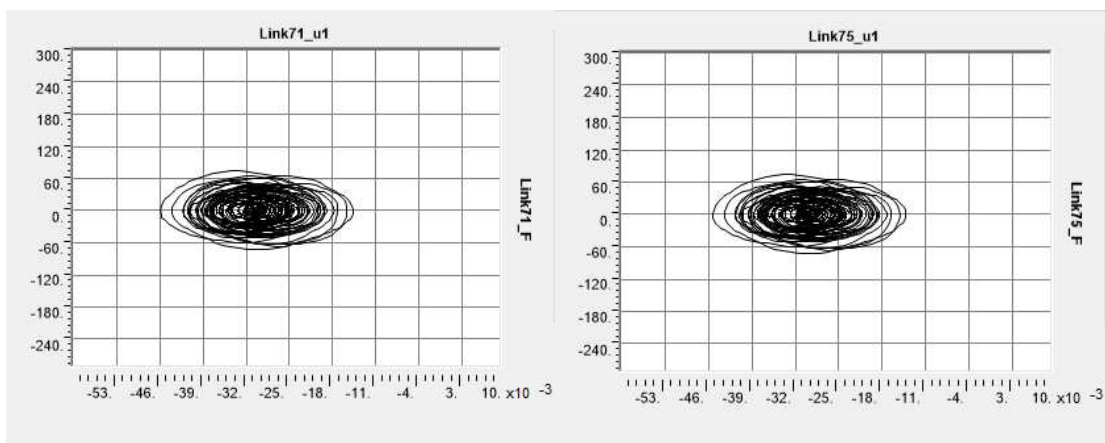


Figura 291__Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 71-75

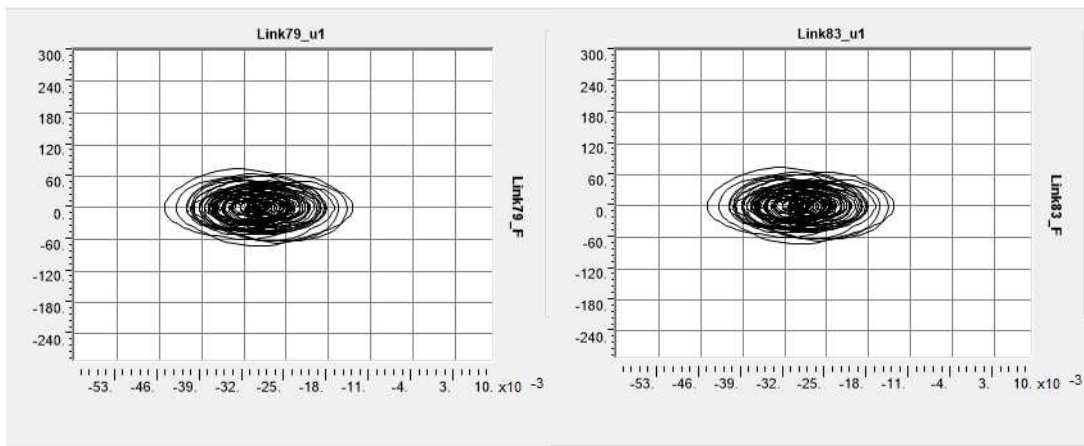


Figura 292__Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 79-83

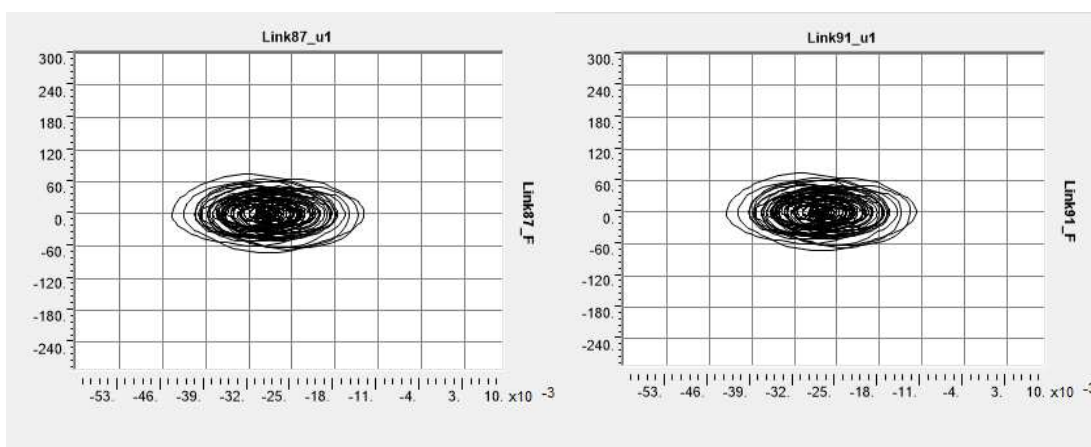


Figura 293__Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 87-91

- **CLO**

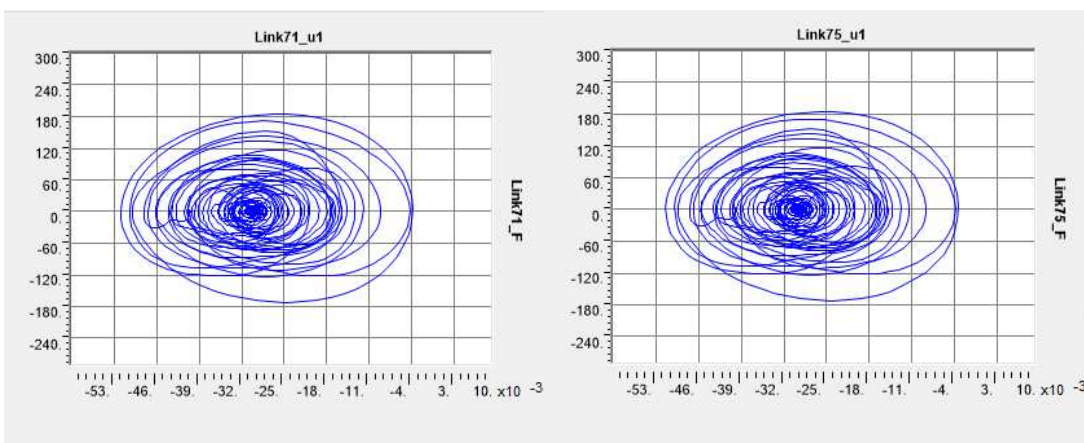


Figura 294__Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 71-75

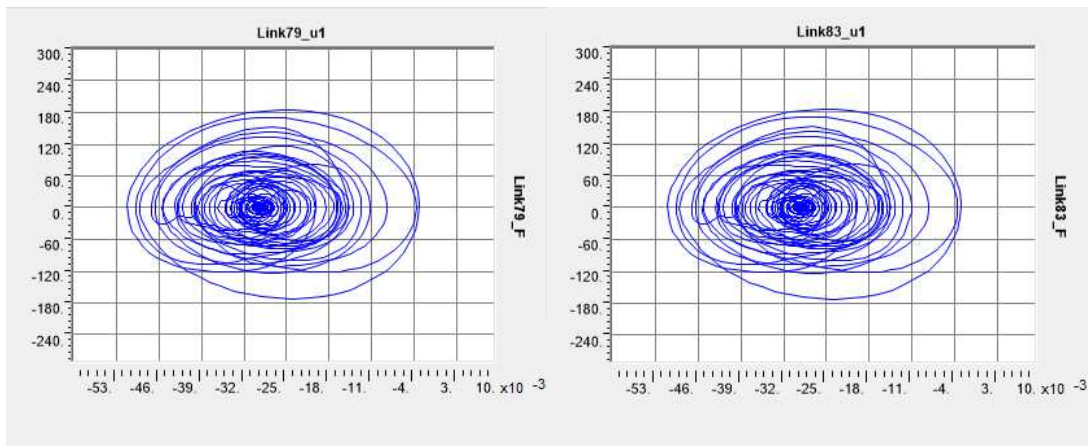


Figura 295__Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 79-83

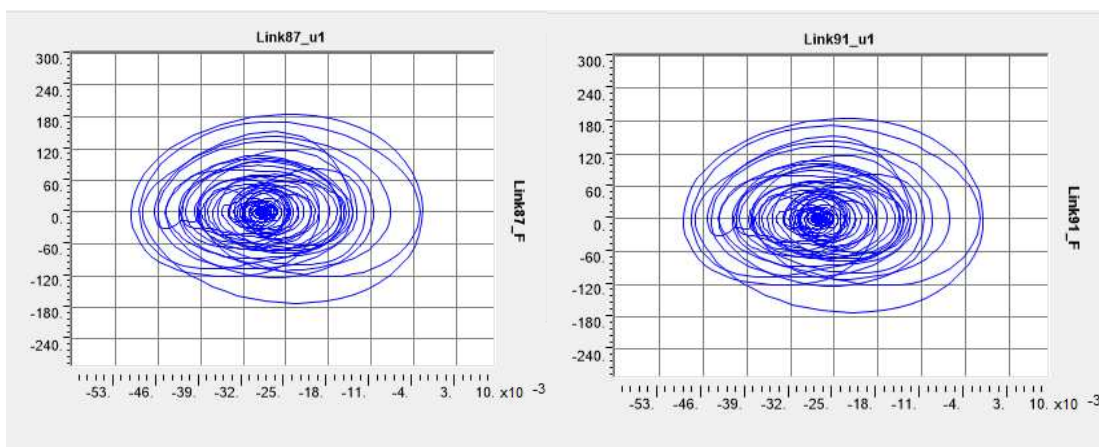


Figura 296__Ciclo forza-spostamento in direzione U2 per i link 87-91

Osservando i legami costitutivi degli isolatori (fig. 261-284), si nota come, con uno smorzamento al 28%, si riesce a far funzionare bene il sistema, eliminando problemi di trazione. A differenza degli altri modelli studiati nel corso della tesi, con un sistema di isolamento 3D studiato sulla base di un periodo verticale di 0,3 s si ottengono maggiori forze per il caso di CLO. Dai cicli dei dissipatori, invece, nasce il problema che allo scopo di dissipare l'energia in ingresso, i dissipatori devono essere liberi di spostarsi fino a 60 mm in compressione per sismi di intensità pari a quello di Castelluccio, spostamenti non compatibili con la sovrastruttura in condizioni di esercizio.

7. Conclusioni

Nel presente elaborato di tesi è stata approfondita la tecnica dell'”artificial ground” per siti near-fault. La tecnica consiste nell'estensione del concetto di isolamento sismico a scala urbana, per l'isolamento alla base di interi quartieri o porzioni di paesi. Particolare attenzione è stata posta alla componente sismica verticale, che può essere particolarmente importante nei siti near-fault e quindi può rappresentare una grossa problematica nei confronti del funzionamento del sistema di isolamento. Nell'ambito della trattazione progettuale è stato preso come riferimento lo studio della ricostruzione del centro storico di Castelluccio di Norcia, fortemente danneggiato dal terremoto del 30 ottobre 2016, per il quale si prevede la ricostruzione del paese la stessa disposizione edilizia presente prima del sisma, ma al di sopra di una piastra gradonata isolata alla base che segue il versante della collina.

Come prima cosa è stato eseguito il predimensionamento del sistema d'isolamento composto da isolatori in gomma ad alto smorzamento (HDRB), che ha portato all'adozione di dispositivi tipo SI-S 800/200. Le analisi condotte sul modello di piastra piana di dimensioni 80x85 m, appoggiata su link lineari hanno mostrato un periodo di isolamento di 2,3 s con uno spostamento degli isolatori di circa 30 cm.

Lo step successivo è stato quello di definire all'interno del modello le gradonate, introducendo le pareti verticali ma prendendo come riferimento una porzione di piastra di 20x85 m e utilizzando elementi frame al fine di semplificare le analisi

Prima sono state considerate 3 pareti da 8 metri poi il caso più realistico di sei orizzontamenti con 5 pareti da circa 5 metri. In entrambi i casi sono stati adottati dispositivi SI-S 800/200 nelle porzioni centrali degli sviluppi orizzontali e SI-S 700/200 nelle porzioni laterali e in prossimità dei muri. In entrambi i casi le analisi modali e dinamiche lineari hanno fornito risultati molto simili a quelli ottenuti con il primo modello. Su tali modelli è stata inoltre studiata la sensibilità dei dispositivi elastomerici alla disposizione dei carichi verticali. In particolar modo, si è visto che per diverse combinazioni delle masse, si sono registrate importanti sollecitazioni di trazione e flessione sulle pareti verticali, difficilmente fronteggiabili con armatura ordinaria.

Vista la sensibilità degli HDRB al problema sopra descritto, è stato dimensionato un sistema di isolamento composto da dispositivi a scorrimento

su superficie curva (raggio 3,7 m) ad attrito controllato, pari al 2,5% e caratterizzati da tre livelli di carico massimo ammissibile dichiarato dal produttore pari a 2000, 3000 e 3500 kN. Il loro comportamento è stato investigato tramite analisi dinamiche non lineari comprendenti l'azione orizzontale e verticale, considerando sia accelerogrammi spettrocompatibili da norma allo SLD, SLV e SLC (generati con il software SIMQKE_GR), che l'input accelerometrico registrato a Castelluccio durante l'evento sismico del 30 ottobre 2016.

La modellazione è avvenuta prendendo come schema di riferimento quello predisposto per gli isolatori in gomma, modellando la non linearità dei dispositivi, mediante l'elemento "friction isolator" presente nel Sap 2000. Lo studio dell'isolamento alla base è avvenuto anche qui per step successivi di approfondimento del loro comportamento sotto sisma verticale. Più nello specifico, nel primo modello, composto dalla piastra in CA gradonata isolata alla base da isolatori a pendolo semplice, si è fornita una dissipazione pari al 2% concentrata nei dispositivi. Le analisi dinamiche non lineari hanno mostrato forze di trazione nei legami forza-spostamento degli isolatori durante il sisma allo SLV e allo SLC, mentre non si evidenziano problemi allo SLD e per l'input accelerometrico registrato dalla stazione di Castelluccio (CLO).

Allo scopo di mantenere gli isolatori in compressione si è allora fornita una dissipazione pari al 5% e si sono introdotti gli edifici al di sopra della piastra. Nella modellazione del complesso edilizio non è stata considerata la massa in termini di carico agente sul sistema, in quanto già presa in considerazione durante l'analisi dei carichi, ma la loro presenza è stata utile per aggiungere dissipazione verticale considerando un coefficiente di smorzamento pari al 5% e inserito nel SAP2000 come parametri non lineari alla Rayleigh. Tale soluzione ha eliminato il problema visto precedentemente in termini di trazione negli isolatori. I risultati forniti dalle analisi, infatti, hanno mostrato dei cicli forza-spostamento dei dispositivi totalmente in compressione. Inoltre, mentre i legami allo SLD e CLO sono rimasti molto simili al caso precedente, l'assenza di impatto verticale allo SLV e SLC, ha determinato un abbassamento notevole delle forze sviluppate negli isolatori durante l'evento sismico.

Successivamente, al fine di approfondire il significato della dissipazione introdotta, sono stati introdotti dei dispositivi viscosi in grado di fornire la dissipazione richiesta, modellati come link definiti dal SAP2000 come "Damper Exponential" e posti in parallelo ai "friction isolator", ai quali è stato

dato solo il valore di rigidità verticale, scorporandoli, dunque, del valore di dissipazione verticale. I risultati delle analisi hanno confermato la correttezza delle analisi precedenti rendendo possibile plottare i cicli forza-spostamento inerenti ai dispositivi di dissipazione. Quello che è emerso è che ai dissipatori è richiesto di dissipare una notevole quantità di energia, con forze medie di circa 200 kN, ma in pochi mm di corsa. Pretendere un rendimento così alto da un dissipatore è utopico, in quanto la sola comprimibilità del fluido e gli assestamenti in opera delle connessioni tra dispositivo stesso e struttura, utilizzerebbero tutta la corsa disponibile.

Visti i risultati ottenuti, si è progettata e analizzata l'ipotesi finale di isolamento 3D con periodo e smorzamento verticale pari rispettivamente a 0,3 s e al 28%. Questo è stato modellato al SAP 2000 disponendo in serie un isolatore a scorrimento, che lavora per il sisma orizzontale, e un sistema composto da una molla verticale posta in parallelo con un dissipatore viscoso ai quali è affidato il compito di smorzare l'energia verticale in ingresso. Le time histories effettuate sul modello hanno evidenziato un comportamento in linea con quanto previsto in fase di progetto con assenza di trazione negli isolatori, cicli orizzontali degli isolatori lineari, caratterizzati dalla scarsa presenza di picchi isolati, legami costitutivi forza-spostamento dei dissipatori quasi perfettamente ellittici, lievemente inclinati a causa della rigidità verticale e forze medie dissipate dai dispositivi viscosi di circa 200 kN, con corse massime richieste pari a ± 20 mm per l'accelerazione ottenuta mediante CLO.

In conclusione, si è ottenuto per step successivi un sistema d'isolamento in grado di proteggere gli edifici posti al di sopra di una piastra gradonata in CA in relazione sia alla componente sismica orizzontale che verticale. Tuttavia, le analisi svolte sono state condotte su un modello semplificato, che ha preso in considerazione solo una "striscia" del reale schema 3D previsto per il caso preso in esame di Castelluccio di Norcia. La complessa geometria dell'intervento previsto richiede sicuramente una modellazione più accurata e realistica del sistema e delle relative sovrastrutture, per comprendere il reale comportamento dell'insieme tenendo conto anche dell'influenza delle interazioni tra edifici e delle non simmetrie.

Bibliografia

- [1] Experimental and analytical study of seismically isolated structures with uplift restraint, Panayiotis Roussis and Michael Constantinou, 2004;
- [2] Analisi di vulnerabilità sismica degli aggregati storici: il caso di Castelluccio di Norcia, M.R. Valluzzi, M. Munari, C. Modena, G. Cardani, L. Binda, 2007
- [3] Problems with Rayleigh Damping in Base-Isolated Buildings, L. Ryan Keri and Jose Polanco, 2008;
- [4] Potentiality of Using Vertical and Three- Dimensional Isolation Systems in Nuclear Structures, Zhiguang Zhou, Jenna Wong, Stephen Mahin, 2016;
- [5] Ground Motion Prediction Equations for the Vertical Ground Motion Component Based on the NGA-W2 Database, Zeynep Gülerce, Ronnie Kamai, Norman A. Abrahamson, 2017;
- [6] Sviluppo storico dei sistemi di isolamento sismico ad attrito, Paolo M. Calvi¹, Giulia Faga², Gian Michele Calvi, 2018;
- [7] Fling Effects from Near-Source Strong-Motion Records: Insights from the 2016 Mw 6.5 Norcia, Central Italy, Earthquake, Maria D'Amico, Chiara Felicetta, Erika Schiappapietra, Francesca Pacor, František Gallovič, Roberto Paolucci, Rodolfo Puglia, Giovanni Lanzano, Sara Sgobba, and Lucia Luzi, 2019;
- [8] Adeguamento sismico di edifici in muratura mediante isolamento alla base, P. Clemente, F. Saitta, G. Buffarini, G. Bongiovanni, Ingenio;
- [9] Effects of coseismic ground vertical motion on masonry constructions damage during the 2016 Amatrice-Norcia (Central Italy) earthquakes, Domenico Liberatore, Carlo Doglioni, Omar AlShawa, Simone Atzori, Luigi Sorrentino, 2019;
- [10] Tests, model, and applications for coned-disc-spring vertical isolation bearings, Wei Wang, Xingxing Wang, 2019;
- [11] Multi-Directional Base Isolation System for Coupled Horizontal and Vertical Seismic Excitations, Mohammad Masoud Pourmasoud, James B. P. Lim, Iman Hajirasouliha and Daniel McCrum, 2020;

- [12] Studi applicativi di una soluzione di isolamento sismico al suolo (ground isolation) per la restituzione urbana sismicamente sicura di CASTELLUCCIO DI NORCIA, Marco Mezzi, 2021;
- [13] An empirical model for the vertical-to-horizontal spectral ratios for Italy, Fadel Ramadan, Chiara Smerzini, Giovanni Lazano, Francesca Pacor, 2021;
- [14] Isolamento sismico del suolo per la ricostruzione di Castelluccio di Norcia, Marco Mezzi, pubblicato sulla rivista Ingenio nel 2019;
- [15] Origin of Seismicity in Italy as a Clue for Seismic Hazard, Carlo Doglioni, 2023;
- [16] Near-Fault Earthquake Ground Motion and Seismic Isolation Design, Mustafa Erdik, Bahadır ,Sadan, Cüneyt Tüzün, Mine B. Demircioglu-Tumsa, Ömer Ülker, and Ebru Harmandar, 2023;
- [17] Mechanical Properties of Thick Rubber Bearings Used in Over-Track Buildings, Ying Zhou, Zengde Zhang, and Michalis F. Vassiliou, 2023;
- [18] Recent development and trends in 3D earthquake protection systems, P. Nawrotzki, D. Siepe, Y. Enomoto, 17WCEE;
- [19] Manuale SAP2000, Structural Analysis Program, Computers and Structures, Inc;
- [20] Materiale del corso “Sistemi avanzati per la protezione sismica delle costruzioni”, Ragni Laura;
- [21] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto 17 gennaio 2018, “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni” (pubblicato sulla G.U. n. 42 – Suppl. Ordinario n. 8 – del 20 febbraio 2018);
- [22] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Circolare 21/01/2019 21 gennaio 2019, n.7 C.S.LL.PP., “Istruzioni per l’applicazione dell’Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni” di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018;
- [23] UNI EN 15129: Dispositivi antisismici.

Ringraziamenti

Al termine del mio percorso universitario vorrei ringraziare le persone che più hanno contribuito per me nel raggiungimento di questo traguardo speciale.

Anzitutto vorrei ringraziare la professoressa e ingegnere Laura Ragni, la quale mi ha fornito le competenze e il suo aiuto nell'approfondire con la tesi un tema che mi ha sempre appassionato.

Un ringraziamento speciale va a mio padre e mia madre, che non solo mi hanno permesso di poter studiare, ma hanno sempre fatto di tutto per realizzare i miei sogni, mandandomi a studiare in giro per l'Italia e mettendo pezze ad ogni mio errore, sopportando le mie lamentele sotto sessione. Con loro vorrei ringraziare anche Lorenza e Laura, che hanno sofferto in disparte e in silenzio per i miei esami e la mia carriera, ma mi hanno sempre fatto sentire il loro appoggio, rischiando di far prendere fuoco a Falconara con le candele accese negli anni. Grazie anche a Marco, che insieme a mia madre, ha visto la peggior versione di me nei modi di fare e ha sopportato il mio ripetere fino a notte fonda ogni giorno.

Vorrei che chiunque leggesse o ascoltasse queste parole sappia che il primo anno di magistrale ho affrontato un periodo buio, nel quale il pensiero di abbandonare l'università si è fatto sentire più volte. Nel corso degli anni ho sempre visto lo studio come un'attività in cui non avevo limiti, nella quale se mi applicavo, riuscivo, e non essere rimasto a Torino mi ha distrutto mentalmente. Non sarei qui, molto probabilmente, se non ci fosse stato Andrea, che, aldilà dell'aiuto che mi ha sempre dato nella preparazione degli esami, ha messo da parte il suo studio per potermi mettere nelle condizioni di recuperare il semestre perso. Non scorderò mai che il giorno dopo essere tornato da Torino e aver fatto l'iscrizione in Ancona, senza aver partecipato ad alcuna lezione, mi hai preso dicendomi "tra due settimane c'è l'esame di materiali, lo fai con me, preparati". Tra me e me ho pensato che fossi matto, non sapevo neanche di cosa parlasse quella materia; eppure, grazie al tuo aiuto, avevo appena scelto di portare a casa il primo 30 della magistrale, che mi ha ridato l'energia per rimettermi sui libri. Quindi, anche se mi sono dilungato, grazie Andre, sei stato veramente una fonte di ispirazione nel percorso universitario e, soprattutto, un grande amico.

Un grazie anche a Chiara e Alessio, che nell'anno di convivenza che abbiamo avuto mi hanno preparato i pranzi ogni giorno e mi hanno sentito rimbombare

per casa le stesse materie per interi mesi senza dire una parola: i coinquilini che tutti vorrebbero. Chiara, forse stavolta è arrivato il momento di offrirti una bevuta.

Un grazie speciale anche a mia cugina Alessia, con la quale abbiamo condiviso lo stesso percorso studi, dall'asilo alla magistrale, e che nel corso degli anni mi ha sempre e solo spronato a fare meglio senza lamentarmi.

Tra tutti i miei amici, i quali mi hanno sempre sostenuto in quello che facevo, vorrei citare particolarmente Luca, che dal primo anno di università, sul suo balcone del b&b, fino all'ultimo, con i discorsi a Posatora, ha sempre dato un grosso valore alle mie scelte formative, facendomi sentire sempre al pari di tutti, e non indietro, nella carriera lavorativa.

Infine, ma non meno importante, vorrei ringraziare Marica. Ha vissuto con me la parte finale dell'università, la più ardua mentalmente, nella quale l'ansia per la tesi e l'incidente che ho avuto l'hanno costretta a passare intere giornate dentro casa con me. È stato molto importante per me, perché la leggerezza che mi hai trasmesso mi ha permesso di fare lo sprint finale e chiudere tutti i discorsi.