

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



**CALCOLO DI UN SISTEMA DI CONTROLLO STRUTTURALE
SEMI-ATTIVO**

**CALCULATION OF A SEMI-ACTIVE STRUCTURAL
CONTROL SYSTEM**

Relatore: Chiar.mo
Prof. Ing. Gara Fabrizio

Tesi di laurea di:
Speranzoni Luca

Correlatore: Chiar.mo
Prof. Ing. Ragni Laura
Prof. Ing. Davì Fabrizio

Anno Accademico: 2020/2021

Alla mia famiglia,

Indice

1. Introduzione.....	pag.4
2. Gli eventi sismici.....	pag.6
3. La misura del moto sismico.....	pag.13
4. Il rischio sismico.....	pag.18
5. Le analisi ed il calcolo dell'azione sismica di progetto.....	pag.21
6. Il controllo strutturale.....	pag.58
6.1 Il controllo strutturale attivo.....	pag.60
6.2 Il controllo strutturale passivo.....	pag.64
6.3 Il controllo strutturale semi- attivo.....	pag.71
7. Calcolo di un controllo strutturale semi-attivo mediante l'utilizzo di smorzatori magnetoreologici.....	pag.113
8. Conclusioni.....	pag.417
9. Bibliografia.....	pag.429
10. Ringraziamenti.....	pag.43

1. Introduzione

Secondo le attuali Norme Tecniche (NTC 2018) per le costruzioni relative alla progettazione antisismica, i terremoti vengono fronteggiati grazie alla formazione di meccanismi dissipativi endogeni (che hanno origini interne), ovvero, per quanto riguarda le strutture in calcestruzzo armato, tramite la plasticizzazione a flessione delle estremità delle travi, in modo da evitare le rotture fragili a taglio e preservando l'integrità dei nodi e dei pilastri. La formazione del meccanismo cinematico globale viene pilotata imponendo in fase di progetto un'appropriata gerarchia delle resistenze, rispettivamente a partire dalle fondazioni, dai nodi, dai pilastri e dalle travi, in modo che le zone di plasticizzazione (zone critiche dove si concentrano tutti gli effetti della non linearità della struttura) vengano dimensionate con opportuni rapporti di sovreresistenza rispetto alle zone non critiche (la capacità degli elementi fragili dovrà essere maggiore o al massimo uguale della capacità degli elementi duttili moltiplicati per un fattore di sovreresistenza γ_{rd}). Tale meccanismo di protezione si basa quindi sul danneggiamento strutturale e sulle caratteristiche di dissipazione delle zone critiche, da cui scaturisce il comportamento duttile della struttura (campo plastico o campo delle deformazioni irreversibili) che permette a quest'ultima di fronteggiare i sismi più severi. Il rapporto tra lo spostamento ultimo dell'edificio (d_u) e lo spostamento di plasticizzazione (d_y) fornisce il valore di duttilità della struttura ($\mu=d_u/d_y$). Affinchè l'edificio non arrivi al collasso è necessario che la capacità della struttura (d_u) sia maggiore o al massimo uguale rispetto alla domanda sismica (d_{max}).

La progettazione sismica avviene considerando le caratteristiche del sito di costruzione correlato ad una determinata pericolosità sismica di base. Successivamente, in funzione di un valore di riferimento dell'azione sismica (V_R), di una certa probabilità di superamento (P_{VR}) e di un determinato stato limite considerato (SLE, SLU), si procede al calcolo dell'azione sismica di progetto mediante l'utilizzo degli spettri di risposta. Per gli stati

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

limite di esercizio lo spettro di progetto da considerare è lo spettro elastico ($S_d = S_{el}$), mentre per gli stati limite ultimi lo spettro di progetto da considerare è ottenuto dividendo lo spettro elastico per un fattore di struttura q ($S_d = S_{el}/q$). Il fattore di struttura q rappresenta le capacità dissipative della costruzione e si calcola mediante la seguente formula:

$$q = q_0 \times K_R$$

dove q_0 è il fattore di struttura massimo, funzione della tipologia strutturale (strutture a telaio, strutture a pareti, strutture miste telaio-pareti, strutture a pendolo inverso, strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano, strutture deformabili torsionalmente), del tipo di elemento strutturale (pilastro, trave, nodo, ecc.), della classe di duttilità (CD" A" classe di duttilità alta e CD" B" classe di duttilità bassa) e del rapporto α_u/α_1 (dove α_1 è il valore dell'azione sismica per il quale avviene la formazione della prima cerniera plastica a flessione nel primo elemento strutturale e α_u è il valore dell'azione sismica per il quale avviene la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere labile la struttura). Il coefficiente K_R , invece, è funzione della regolarità in altezza della struttura ed è pari ad 1 per le strutture regolari e pari a 0,8 per quelle irregolari.

Detto ciò, il progetto oggetto di questa tesi di laurea magistrale in ingegneria civile, consiste nel calcolare un sistema di controllo strutturale semi-attivo realizzato con l'applicazione di smorzatori magnetoreologici e di valutare i relativi vantaggi rispetto ai classici sistemi di controllo passivi, realizzati ad esempio mediante l'utilizzo di dissipatori fluido-viscosi, oramai presenti sul mercato internazionale da vari anni. Gli smorzatori magnetoreologici sono dei dispositivi innovativi di smorzamento dell'energia sismica, composti da un sistema idraulico cilindro-pistone, dove all'interno è presente un particolare fluido "intelligente o smart" detto fluido magnetoreologico, avente elevata viscosità e capace di variare la sua configurazione interna in funzione del campo magnetico applicato mediante un determinato voltaggio elettrico fornito ad un elettrocalamita (allineamento unidirezionale delle particelle colloidali presenti al suo interno e relativa formazione delle cosiddette fibrille).

Un sistema di controllo semi-attivo consiste in un'evoluzione di un sistema di controllo passivo, associando alle caratteristiche di affidabilità e si-

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

curezza tipiche di quest'ultimo, l'efficacia prestazionale tipica dei sistemi di controllo attivi. Tale sistema di controllo è di tipo "fail-safe" (a prova di errore), in quanto è in grado di funzionare anche passivamente, senza l'ausilio di una fonte di energia esterna (0V), assumendo il comportamento analogo a quello di un dissipatore viscoso. In ogni caso, durante il suo funzionamento standard, il voltaggio di progetto richiesto è relativamente basso, dell'ordine di circa 0-2,25V (potenza massima minore di 50W), confermandoci che sarà sufficiente l'utilizzo di una semplice batteria (12-24V), garantendo un notevole risparmio economico rispetto ad un sistema di controllo attivo.

2. Gli eventi sismici

Fin dal passato, gli eventi sismici italiani, hanno condizionato la vita quotidiana di molte persone residenti in zone potenzialmente attive.

Basti pensare al quadro generale dei sismi avvenuti in ordine cronologico dal 1900 fino ad oggi. Si riporta una tabella che elenca i principali sismi italiani per data di avvenimento e località:

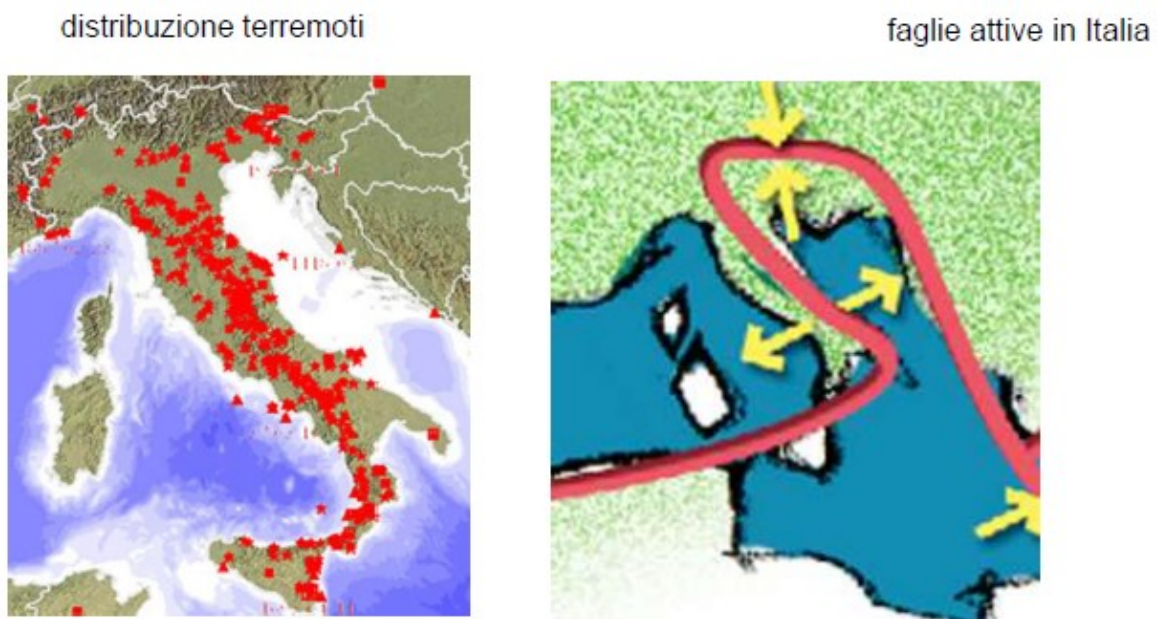
Data	Area	Intensità	Magnitudo M_w
08.09.1905	Calabria	X - XI	7.1
23.10.1907	Calabria	IX	5.9
28.12.1908	Stretto di Messina (Calabria, Sicilia)	XI	7.2
07.06.1910	Irpinia (Basilicata)	IX	5.9
27.10.1914	Garfagnana (Toscana)	VII	5.8
13.01.1915	Avezzano (Abruzzo)	XI	7.0
17.05.1916	Mar Adriatico settentrionale	VIII	5.9
16.08.1916	Mar Adriatico settentrionale	VIII	5.9
26.04.1917	Monterchi - Citerna (Toscana - Umbria)	IX - X	5.8
10.11.1918	Appennino forlivese (Emilia Romagna)	VIII	5.8
29.06.1919	Mugello (Toscana)	IX	6.2
07.09.1920	Garfagnana (Toscana)	X	6.5
07.03.1928	Capo Vaticano (Calabria)	VIII	5.9
23.07.1930	Irpinia (Campania)	X	6.7
30.10.1930	Senigallia (Marche)	VIII - IX	5.9
18.10.1936	Bosco Cansiglio (Veneto)	IX	5.9
03.10.1943	Ascolano (Marche)	IX	5.8
21.08.1962	Irpinia (Campania)	IX	6.2
15.01.1968	Valle del Belice (Sicilia)	X	6.1
06.05.1976	Friuli	IX - X	6.4
15.09.1976	Friuli	VIII - IX	5.9
15.04.1978	Golfo di Patti (Sicilia)	VIII	6.1
19.09.1979	Valnerina (Umbria)	VIII - IX	5.9
23.11.1980	Irpinia (Campania, Basilicata)	X	6.9
07.05.1984	Lazio - Abruzzo	VIII	5.9
05.05.1990	Potentino (Basilicata)	VII - VIII	5.8
26.09.1997	Umbria - Marche	IX	6.0
31.10.2002	Molise	VIII - IX	5.8
06.04.2009	Abruzzo	IX - X	6.3
20.05.2012			5.9
29.05.2012	Pianura Padana Emiliana (Emilia Romagna)	VIII*	5.7
24.08.2016	Amatrice-Accumuli		6.0
26.10.2016	Visso		5.9
30.10.2016	Norcia		6.5

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Figura 1. Tabella dei sismi principali dal 1900 ad oggi.

Detto ciò, si può affermare che, a causa delle caratteristiche geologiche del territorio italiano, il verificarsi di eventi sismici rappresentano situazioni di normale quotidianità.

La distribuzione nazionale dei terremoti segue, prevalentemente, l'andamento della faglia Gloria che separa la placca Euroasiatica da quella Africana, come viene mostrato nella figura rappresentativa sottostante:



La distribuzione dei terremoti segue in generale il confine tra la placca Africana e quella Euroasiatica (teoria della tettonica a zolle).

Figura 2. La distribuzione dei terremoti in Italia e la faglia Gloria.

La faglia Gloria è una grande "spaccatura" della crosta terrestre che inizia nei pressi delle isole Azzorre, parte in direzione est verso Gibilterra e prosegue fino alla Sicilia, dove disegna un arco, intorno alla Calabria, prendendo la direzione degli Appennini e risalendo lo stivale fino alle Alpi. Qui curva nuovamente e ridiscende, seguendo le coste croate, albanesi e poi greche, dove vira verso creta, attraversa Cipro e sale in Turchia dove prende il nome di Faglia Est Anatolica.

I fenomeni sismici lungo il confine tra la placca Euroasiatica e quella Africana (Faglia Gloria) vengono spiegati mediante la Teoria della tettonica a placche. Questa teoria, spiega il modello dinamico della Terra su cui concordano la maggior parte degli scienziati che si occupano di "scienze della Terra", secondo cui quest'ultima è suddivisa in placche

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

principali (placca Euroasiatica, Antartica, Nordamericana, Sudamericana, Africana, Pacifica, Indo-Australiana) e secondarie (placca Nazca, Cocos, Caraibica, Scotia, Araba, Filippine, Juan de Fuca, Anatoliana).

La teoria della tettonica a placche è in grado di spiegare moltissimi fenomeni presenti sulla Terra: l'attività sismica, l'orogenesi (ovvero l'insieme dei fenomeni geologici che portano alla formazione delle catene montuose), la disposizione geografica dei vulcani, le variazioni chimiche delle rocce magmatiche, la formazione di strutture come le fosse oceaniche e gli archi vulcanici, la distribuzione geografica della flora e della fauna fossili durante le ere geologiche e i motivi per cui le attività vulcaniche e sismiche sono concentrate su determinate zone specifiche.

La base su cui partire per la comprensione della tettonica a placche è accettare che, in origine, il mantello fosse coperto da magma, il quale incominciò a solidificarsi quando la roccia fluida raggiunse il livello di temperatura inferiore a quella di fusione, a causa dell'assenza di sorgenti di calore capaci di mantenere le condizioni precedenti.

Sulla base di studi geofisici e petrologici (studi approfonditi di rocce, minerali e loro tessiture), si è riconosciuto che la crosta terrestre (strato più esterno della Terra), insieme con il mantello superiore (o mantello esterno) sottostante, forma la cosiddetta litosfera, un involucro caratterizzato da un comportamento fragile anche alla scala del tempo geologico, con uno spessore che va da 0 a 100km per la litosfera oceanica raggiungendo un massimo di 200km per quella continentale.

La litosfera, composta dalla crosta terrestre ed il mantello superiore, è suddivisa in una decina di placche tettoniche (dette anche zolle tettoniche) principali, di varie forme e dimensioni, e di placche secondarie, paragonate a "zattere che galleggiano" (in equilibrio isostatico) sullo strato immediatamente sottostante al mantello superiore, ovvero l'astenosfera (strato interposto fra la litosfera ed il mantello inferiore). In questo strato, esteso fra 100-300km di profondità, dove le rocce sono parzialmente fuse, a causa delle variazioni di temperatura, pressione e dei lunghi tempi di applicazione degli sforzi, pur trovandoci in uno stato semi-solido, si registra un comportamento plastico (ovvero un comportamento simile ad un fluido avente elevata viscosità), i cui movimenti (pari a pochi cm all'anno) diventano significativi su scala geologica (ovvero per tempi di milioni di anni). Queste caratteristiche dell'astenosfera, permettono alle zolle tettoniche superiori presenti nella litosfera (che comprende la crosta terrestre ed il mantello superiore), di muoversi l'una accanto all'altra, con la possi-

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

bilità di collidere (formazione di una catena montuosa se si avvicinano due zolle continentali come la catena montuosa dell'Himalaya o formazione di una fossa oceanica se si avvicinano due zolle oceaniche come la fossa delle Marianne), di effettuare dei movimenti di subduzione (dove la zolla più pesante, scivola al di sotto di quella più leggera. Dei classici esempi sono la formazione di rilievi in prossimità del mare, dove la zolla oceanica, essendo più pesante rispetto a quella continentale, sprofonda sotto di essa. Il Monte Conero in Ancona o il Monte San Bartolo a Pesaro, sono dei tipici esempi di subduzione) o di allontanarsi fra loro formando le dorsali oceaniche (quando queste zolle oceaniche si allontanano, danno origine ad un'estensione della litosfera fino alla formazione di una spaccatura, dove fuoriesce il materiale effusivo proveniente dal mantello e, successivamente, per via della solidificazione di quest'ultimo, avviene la formazione delle cosiddette dorsali oceaniche).

Per tali motivi, l'estensione e la forma di continenti ed oceani, hanno subito importanti trasformazioni nel corso della loro storia geologica.

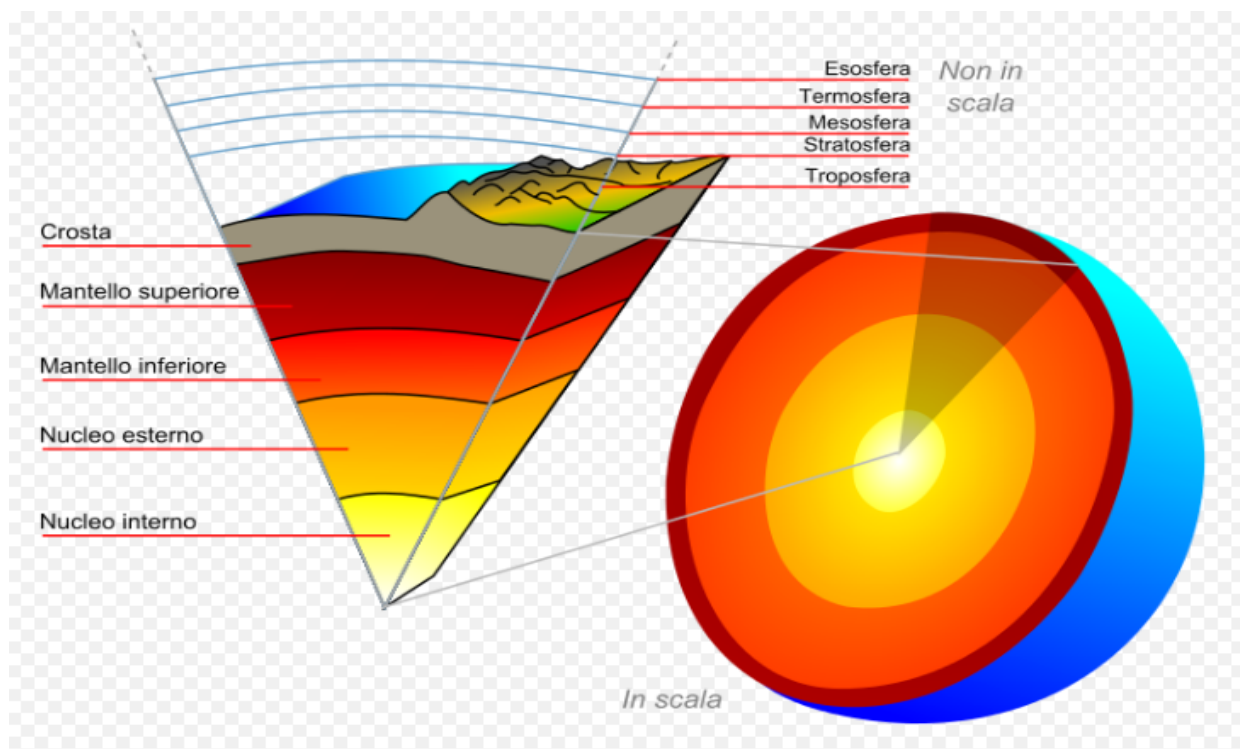


Figura 3. La struttura interna della Terra.

Nella figura sopra, si nota che la Terra è formata da "gusci concentrici" di materiale diverso, rispettivamente dall'esterno verso l'interno:

- Crosta terrestre;

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

- Mantello superiore (o esterno);
- Mantello inferiore (o interno);
- Nucleo esterno;
- Nucleo interno.

Preliminary Determination of Epicenters 358,214 Events, 1963 - 1998

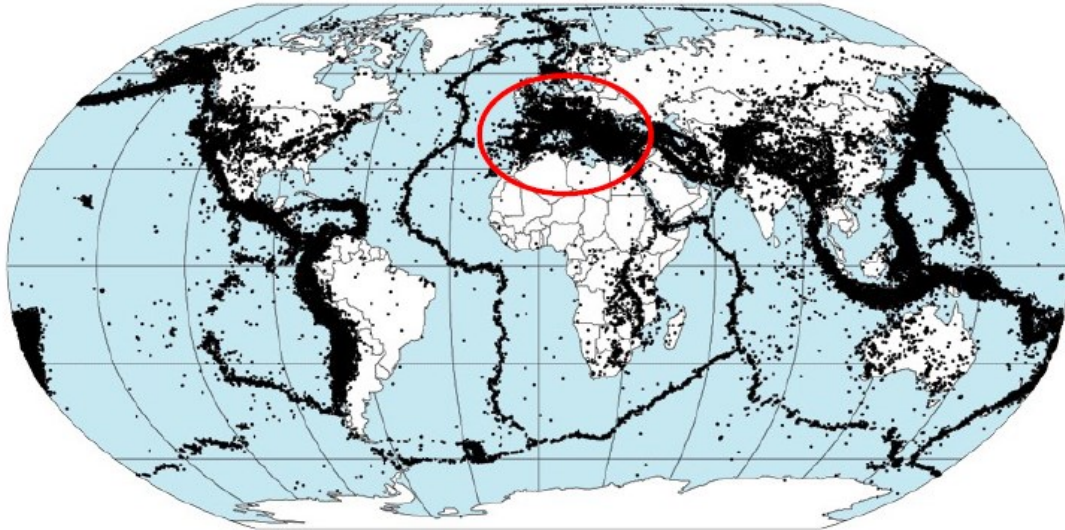


Figura 4. La distribuzione dei terremoti nel mondo.

Dopo aver spiegato la teoria della tettonica a placche e la struttura interna della terra, si passa all'analisi degli eventi sismici meglio conosciuti come terremoti.

I terremoti (dal latino "movimenti della terra") sono delle vibrazioni o assestamenti della crosta terrestre, provocati da uno spostamento improvviso di una massa rocciosa nel sottosuolo.

Tali spostamenti sono generati dalle forze di natura tettonica che agiscono costantemente all'interno della crosta terrestre provocando una lenta deformazione fino al raggiungimento del carico di rottura con conseguente liberazione di energia elastica in una zona interna della Terra detta ipocentro, punto al di sotto della crosta terrestre, nel quale ha avuto origine il terremoto in considerazione. Tipicamente, viene localizzato al di sotto di fratture preesistenti della crosta, dette faglie.

La proiezione dell'ipocentro sulla superficie terrestre è detta epicentro, nel quale si manifestano gli effetti più importanti di un evento sismico. Durante la manifestazione di quest'ultimo, infatti, viene accumulata energia di deformazione, in maniera proporzionale all'entità del sisma e, rilasciata

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

successivamente, sotto forma di onde sismiche, le quali saranno responsabili di eventuali danni a costruzioni.

Le onde sismiche si suddividono in onde di volume (onde P e onde S) e onde di superficie (onde R e onde L).

Le onde di volume sono quelle presenti alla sorgente del sisma. La loro velocità di propagazione dipende dalla densità e dalle proprietà elastiche della roccia. Le onde di volume si suddividono in onde longitudinali (onde P) e onde trasversali (onde S).

Le onde P, dette anche onde primarie o longitudinali, sono le onde più veloci ($v=4-8\text{km/s}$) e si propagano longitudinalmente rispetto alla direzione di propagazione del sisma, causando compressioni e rarefazioni del mezzo (diminuzione di compattezza). Tali onde si propagano in solidi, liquidi e gas. Mostrano piccole ampiezze, bassi periodi ed hanno un potenziale di danneggiamento relativamente basso.

Le onde S, dette anche onde secondarie o di taglio, sono onde più lente ($v=2-4\text{km/s}$) rispetto alle onde P ($v=4-8\text{km/s}$) e si propagano trasversalmente rispetto alla direzione di propagazione del sisma.

Il loro moto può essere separato in una componente orizzontale (S_H) e in una verticale (S_V). Tali onde si propagano solo nei solidi. Mostrano grandi ampiezze, periodi modesti ed hanno un potenziale di danneggiamento significativo.

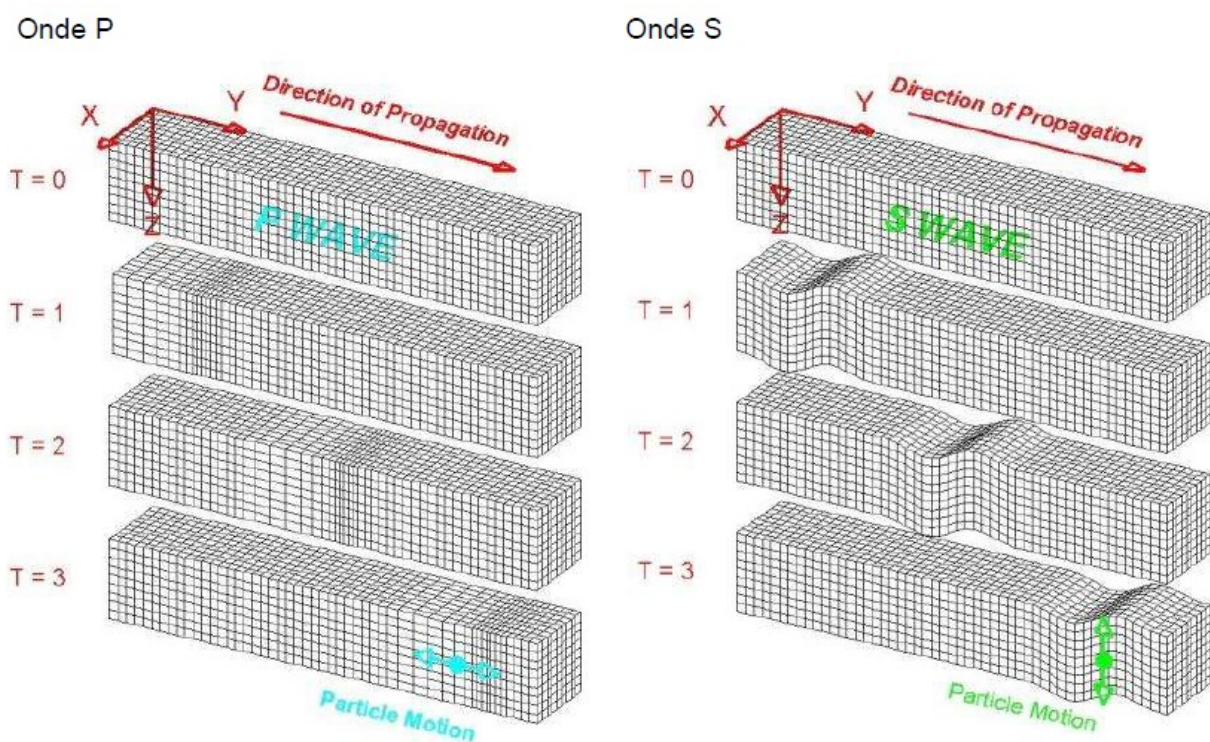


Figura 5. La rappresentazione delle onde P e delle onde S.

Le onde di superficie, invece, nascono dall'intersezione delle onde di volume con la superficie terrestre. Queste onde inducono grandi spostamenti tanto da essere chiamate "moto principale". Sono maggiormente individuabili nel caso di terremoti superficiali e comunque al crescere della distanza dall'epicentro.

Le onde di superficie si suddividono in onde di Love (onde L) e onde di Rayleigh (onde R).

Le onde di Love, sono formate dalla composizione delle onde P con la componente orizzontale delle onde di taglio (S_H). Il moto è orizzontale e perpendicolare alla direzione di propagazione del sisma. Hanno grandi ampiezze, lunghi periodi ed un potenziale di danneggiamento importante.

Le onde di Rayleigh, nascono dalla composizione delle onde P con la componente verticale delle onde di taglio (S_V). Il moto delle particelle avviene in senso antiorario su una ellisse (orbite ellittiche) avente l'asse maggiore perpendicolare alla superficie terrestre. Hanno grandi ampiezze ed un potenziale di danneggiamento rilevante.

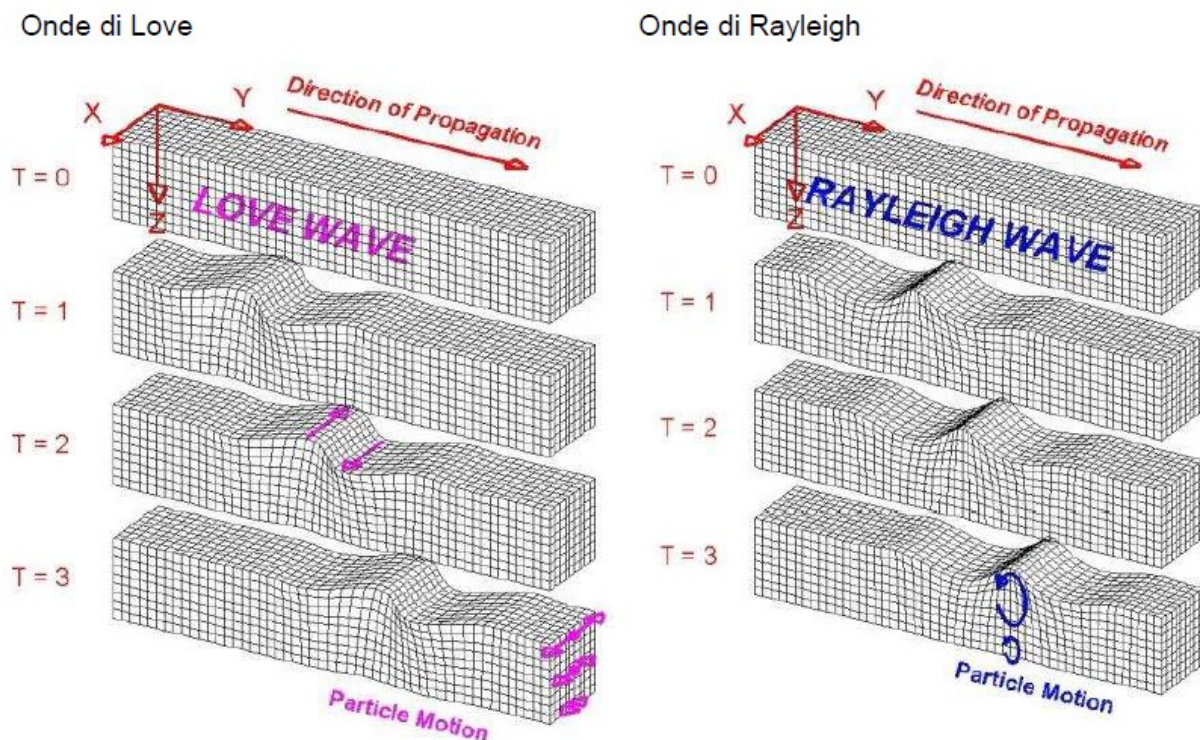


Figura 6. Le onde di Love e le onde di Rayleigh.

3. La misura del moto sismico

La misura dell'entità di un evento sismico può avvenire in diverse maniere: esistono misurazioni qualitative (o non strumentali) e misurazioni quantitative (o strumentali). In entrambi i casi sono comunque misure globali non utilizzabili ai fini della progettazione strutturale.

Le misure qualitative del moto sismico (intensità macrosismica) sono basate sull'osservazione dei danni alle strutture, effetti sulla superficie terrestre e reazione dell'uomo. Sono dunque misure non strumentali e soggettive, in quanto, dipendenti dalla densità abitativa, dalla tipologia di costruzioni tipiche di una determinata zona e dalla familiarità della popolazione al terremoto. La scala che si basa su questo tipo di misurazioni è la scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS), suddivisa in 12 livelli. Il livello 1 è quello più basso, mentre il livello 12 è quello il più pericoloso. La scala viene definita in funzione degli effetti risentiti da:

- Esseri umani
- Oggetti e terreno
- Edifici secondo la propria classe di vulnerabilità

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Tipo di struttura		Classe di vulnerabilità					
		A	B	C	D	E	F
MURATURA	Ciotoli, pietra sbazzata	○					
	Mattoni crudi	○	—				
	Pietra squadrata	—	○				
	Pietra monumentale	—	—	○	—		
	Mattoni	—	○	—			
	Mattoni con solai in CA		—	○	—		
	Muratura in blocchi armati			—	○	—	
CALCESTRUZZO ARMATO	Telaio senza progettazione antisismica (PA)	—	—	○	—		
	Telaio con PA moderata		—	—	○	—	
	Telaio con PA avanzata			—	—	○	—
	Pareti senza PA		—	○	—		
	Pareti con PA moderata			—	○	—	
	Pareti con PA avanzata				—	○	—
Strutture in acciaio				—	—	○	—
Strutture in legno			—	—	○	—	

○ Classe di vulnerabilità più probabile
 — Classe meno probabile
 ---- Casi eccezionali

Figura 7. Tabella riferita agli effetti della scala MCS.

La scala Mercalli-Cancani-Sieberg (1930)

Grado	Denominazione del terremoto	Descrizione degli effetti
I	Impercettibile	Rilevato soltanto da sismografi.
II	Molto leggero	Sentito soltanto da persone estremamente sensibili o nervose, in perfetta quiete e quasi sempre nei piani superiori dei caseggiati.
III	Leggero	Anche in zone densamente abitate viene percepito come terremoto, soltanto da una piccola parte degli abitanti nell'interno delle case, come nel caso del passaggio di un pesante mezzo. Da alcuni viene riconosciuto come terremoto soltanto dopo averne parlato con altri.
IV	Moderato	All'aperto il terremoto è percepito da pochi. Nelle case è notato da numerose persone ma non da tutti, a seguito del tremolio o di oscillazioni leggere di mobili. Cristalleria e vasellame, posti a breve distanza, urtano come al passaggio di un pesante autocarro su strada dissestata. Finestre tintinnano; porte, travi e assi in legno scricchiano; cricchiano i soffitti. In recipienti aperti, i liquidi vengono leggermente mossi. Si ha la sensazione che in casa si sia rovesciato un oggetto pesante; si oscilla con tutta la sedia o il letto come una barca. In generale questi movimenti non provocano paura a meno che le persone non si siano innervosite o spaventate a causa di terremoti precedenti. In rari casi i dormienti si svegliano.

Figura 8. Tabella dal I al IV grado della scala MCS.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Grado	Denominazione del terremoto	Descrizione degli effetti
V	Abbastanza forte	Nel pieno delle attività giornaliere, il sisma viene percepito da numerose persone nelle strade e se sensibili anche in campo aperto. In casa si avverte in seguito allo scuotere dell'intero edificio. Piante e piccoli rami di cespugli ed alberi si muovono con evidenza, come se ci fosse un vento moderato. Oggetti pendenti come lampade, tendaggi, lampadari non troppo pesanti entrano in oscillazione, campanelle suonano. Gli orologi a pendolo si fermano od oscillano con maggior periodo, a seconda della direzione della scossa se perpendicolare o normale al moto di oscillazione. A volte orologi a pendolo fermi riprendono il movimento. La luce elettrica guizza o viene a mancare in seguito a movimenti della linea. I quadri urtano, battono contro le pareti oppure si spostano; da recipienti colmi e aperti vengono versate piccole quantità di liquido; ninnoli e oggetti del genere possono cadere come pure gli oggetti addossati alle pareti; arredi leggeri possono essere spostati di poco; mobili ritronano; porte ed imposte sbattono; vetri delle finestre si infrangono. Quasi tutti i dormienti si svegliano. Sporadici gruppi di persone fuggono all'aperto.
VI	Forte	Il terremoto viene notato da tutti con paura, molti fuggono all'aperto, alcuni hanno la sensazione di instabilità. Liquidi si muovono fortemente; quadri, libri e oggetti simili cadono dalle pareti e dagli scaffali; porcellane si frantumano; suppellettili assai instabili, e perfino pezzi di arredo vengono spostati se non rovesciati; piccole campane in cappelle e chiese, e orologi di campanili battono. Case isolate, solidamente costruite subiscono danni leggeri; spaccature all'intonaco, caduta del rinzafo di soffitti e di pareti. Danni più forti, ma non ancora pericolosi si hanno sugli edifici mal costruiti. Qualche tegola e pietra di camino cade.

Figura 9. Tabella dal V al VI grado della scala MCS.

Grado	Denominazione del terremoto	Descrizione degli effetti
VII	Molto forte	Notevoli danni vengono provocati ad oggetti di arredamento anche di grande peso. Grandi campane rintoccano. Corsi d'acqua, stagni e laghi si agitano e s'intorbidiscono a causa della melma smossa. Qua e là, parte delle sponde di sabbia e ghiaia scivolano via. Varia la portata delle sorgenti. Danni moderati a numerosi edifici costruiti solidamente: piccole spaccature nei muri; caduta di toppe piuttosto grandi della incalcinatura e dello stucco, a volte anche di mattoni. Caduta generale di tegole. Molti fumaioles vengono lesi da incrinature. Camini già danneggiati si rovesciano sopra il tetto danneggiandolo. Da torri e costruzioni alte cadono decorazioni mal fissate. Quando la casa è a pareti intelaiate, i danni all'intonaco e all'intelaiatura sono più gravi. In casi isolati distruzione di case mal costruite oppure riattate.
VIII	Rovinoso	Interi rami d'albero pendono rotti e perfino si staccano. Anche i mobili più pesanti vengono spostati lontano e a volte rovesciati. Statue, monumenti in chiese, in cimiteri e parchi pubblici, ruotano sul proprio piedistallo oppure si rovesciano. Solidi muri di cinta in pietra si rompono e crollano. Circa un quarto delle case è gravemente lesa, alcune crollano, molte diventano inabitabili; gran parte di queste cadono. Negli edifici intelaiati cade gran parte della tamponatura. Case in legno vengono schiacciate o rovesciate. Spesso campanili di chiese e di fabbriche con la loro caduta causano danni agli edifici vicini più di quanto non avrebbe fatto da solo il terremoto. In pendii e terreni acquitrinosi si formano crepe. In terreni bagnati si ha l'espulsione di sabbia e di melma.

Figura 10. Tabella dal VII al VIII grado della scala MCS.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Grado	Denominazione del terremoto	Descrizione degli effetti
IX	Distruttivo	Circa la metà di case in pietra sono distrutte; molte crollano; la maggior parte diviene inabitabile. Case ad intelaiature sono divelte dalle proprie fondamenta e crollano; travi strappate a seconda delle circostanze contribuiscono alla rovina.
X	Completamente distruttivo	Gravissima distruzione di circa 3/4 degli edifici, la maggior parte crolla. Perfino costruzioni solide di legno e ponti subiscono gravi lesioni, alcuni vengono distrutti. Argini e dighe ecc., chi più, chi meno, sono danneggiati notevolmente, binari leggermente piegati e tubature (gas, acqua e scarichi) vengono troncate, rotte e schiacciate. Nelle strade lastricate e asfaltate si formano crepe e per pressione sporgono large pieghe ondose. In terreni meno densi e più umidi si creano spaccature fino alla larghezza di più decimetri; si notano parallelamente ai corsi d'acqua spaccature che raggiungono larghezze fino a un metro. Non solo pezzi di terreno scivolano dai pendii, ma interi macigni rotolano a valle. Grossi massi si staccano dagli argini dei fiumi e da coste scoscese; riviere basse subiscono spostamenti di masse sabbiose e fangose, per cui il livello del terreno viene notevolmente variato. Le sorgenti subiscono frequenti cambiamenti di livello dell'acqua. Da fiumi, canali e laghi ecc. le acque vengono gettate contro le sponde.
XI	Catastrofico	Crollo di tutti gli edifici in muratura, resistono soltanto le capanne di legno e le costruzioni ad incastro di grande elasticità. Anche i ponti più sicuri crollano a causa della caduta di pilastri in pietra o del cedimento di quelli in ferro. Binari si piegano fortemente e si spezzano. Tubature interrate vengono spaccate e rese irreparabili. Nel terreno si manifestano vari mutamenti di notevole estensione, a seconda della natura del suolo, si aprono grandi crepe e spaccature; soprattutto in terreni soffici e acquitrinosi il dissesto è considerevole sia orizzontalmente che verticalmente. Ne segue il trabocco di sabbia e melma con diverse manifestazioni. Sono frequenti lo sfaldamento di terreni e la caduta di massi.
XII	Grandemente catastrofico	Non regge alcuna opera dell'uomo. Lo sconvolgimento del paesaggio assume aspetti grandiosi. Corsi d'acqua sia superficiali che sotterranei subiscono mutamenti vari, si formano cascate, scompaiono laghi, fiumi deviano.

Figura 11. Tabella dal IX al XII grado della scala MCS.

Le misure quantitative del moto sismico (magnitudo), invece, sono basate sulla misura strumentale della massima ampiezza delle onde sismiche di volume o di superficie ed è dunque una grandezza strumentale ed oggettiva. La scala che si basa su questo tipo di misurazioni è la scala Richter, suddivisa in 7 livelli, che calcola la magnitudo locale (M_L) mediante la seguente formula:

$$M_L = \log (A/A_0)$$

A = Massima ampiezza dell'onda sismica considerata (mm);

A_0 = Ampiezza dell'onda sismica di magnitudo $M_L = 0$ ($A_0 = 10^{-3}$ mm).

La magnitudo locale M_L , misura la massima ampiezza A ($\mu = 10^{-3}$ mm) delle onde sismiche registrate da un sismografo (strumento di misura che risponde alla variazione temporale del moto del terreno e ne effettua la registrazione) standard di tipo Wood-Anderson (un sismografo sensibile alle onde sismiche di periodo $T=1$ s) situato ad una distanza di 100km dall'epicentro. In base a tale formula, Richter definì che un terremoto di magnitudo $M_L=0$, è caratterizzato da un' ampiezza $A_0=10^{-3}$ mm, mediante la registrazione di un sismografo di tipo Wood-Anderson, posizionato a

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

100km di distanza dall'epicentro. Nella pratica, data l'impossibilità di disporre, per ogni evento sismico, di un sismografo posizionato a 100km di distanza dall'epicentro, si ricorre ad un grafico particolare che rappresenta il terreno campione definito da Richter:

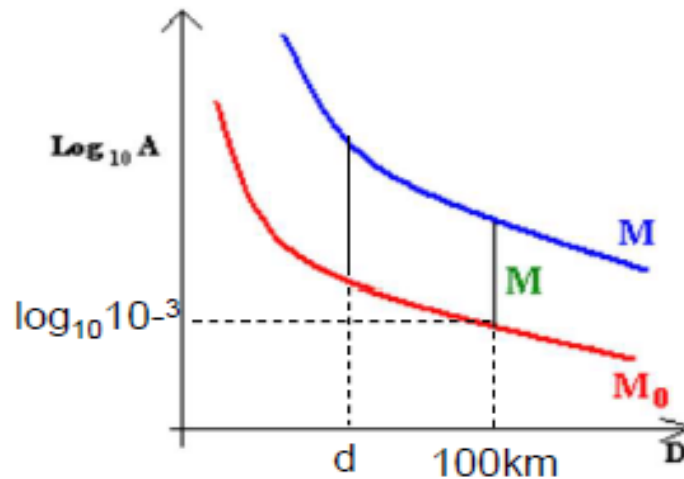


Figura 12. Curve logaritmiche della legge di attenuazione di Richter.

M_0 = Curva che rappresenta il terremoto di magnitudo 0.

Dal momento che, le curve della legge di attenuazione riferite all'ampiezza delle onde sismiche analizzate, sono sensibilmente parallele fra loro, la magnitudo locale è la differenza tra le curve (esprese in scala logaritmica) e può essere calcolata a qualsiasi distanza dall'epicentro:

$$M_L = \log (A/A_0) = \log (A) - \log (A_0)$$

dove:

A = Massima ampiezza dell'onda sismica considerata (mm);

A_0 = Ampiezza dell'onda sismica di magnitudo $M_L = 0$ ($A_0 = 10^{-3}$ mm).

Tuttavia tale metodo presenta delle limitazioni:

- Serve un sismometro di tipo Wood-Anderson (sensibile alle onde sismiche di periodo $T=1$ s) che satura per $M_L > 7$.
- La curva di attenuazione stabilita da Richter è quella della California, ed è definita per $d < 600$ km.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo



MAGNITUDO ed INTENSITÀ Macrosismica hanno dunque significati molto diversi, ma possono essere approssimativamente correlate.

Gli effetti che una scossa sismica provoca (intensità macrosismica), dipendono non solo dalla "forza" del terremoto (magnitudo), ma anche da altri fattori, come la distanza dall'epicentro, le caratteristiche di resistenza degli edifici, le caratteristiche dei terreni su cui essi poggiano, la morfologia del territorio e così via.

Figura 13. Tabella di confronto fra le due scale di misurazione.

4. Il rischio sismico

Dal punto di vista ingegneristico, è importante analizzare il concetto di rischio sismico. Per spiegare tale concetto, bisognerà introdurre tre importanti definizioni, rispettivamente: pericolosità, vulnerabilità ed esposizione sismica.

La sismicità indica la frequenza e la forza con cui si manifestano i terremoti, ed è una caratteristica fisica del territorio. Se conosciamo la frequenza e l'energia associate ai terremoti che caratterizzano un territorio, e attribuiamo un valore di probabilità al verificarsi di un evento sismico di una data magnitudo in un certo intervallo di tempo, possiamo definirne la pericolosità sismica. La pericolosità sismica sarà tanto più elevata quanto più probabile sarà il verificarsi di un terremoto di elevata magnitudo, a parità di intervallo di tempo considerato.

La predisposizione di una costruzione ad essere danneggiata, invece, si definisce vulnerabilità. Quanto più un edificio è vulnerabile (per tipologia, progettazione inadeguata, scadente qualità dei materiali e modalità di costruzione, scarsa manutenzione), tanto maggiori saranno le conseguenze.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Infine, il termine esposizione è strettamente correlato, in maniera proporzionale, alla rilevanza sociale della costruzione in esame, ovvero alla sua importanza strategica. Inoltre, anche la densità della popolazione o delle costruzioni civili in una determinata zona influenzano il grado di esposizione in quanto contribuiscono ad aumentarlo.

E' possibile analizzare tale concetto (esposizione sismica) considerando due diversi momenti:

- prima del sisma: quantità e qualità dei beni esposti;
- dopo il sisma: l'esposizione esprime il valore delle perdite causate dal terremoto in funzione dell'aspetto economico, artistico, culturale, numero di persone ferite, di senzatetto ed eventuali morti.

Ora, dopo aver definito, la pericolosità, la vulnerabilità e l'esposizione sismica, possiamo definire il cosiddetto rischio sismico come il prodotto fra questi tre termini:

$$\text{Rischio sismico} = \text{Pericolosità} \times \text{Vulnerabilità} \times \text{Esposizione}$$



Figura 14. Pericolosità, vulnerabilità ed esposizione sismica.

Per quanto riguarda la nostra nazione, l'Italia ha una pericolosità sismica medio-alta (per frequenza e intensità dei fenomeni), una vulnerabilità molto elevata (per fragilità del patrimonio edilizio, infrastrutturale, industriale, produttivo e dei servizi) e un'esposizione altissima (per densità abitativa e presenza di un patrimonio storico, artistico e monumentale unico al mondo). Pertanto, la nostra Penisola è dunque ad elevato rischio sismico, in

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

termini di vittime, danni alle costruzioni e costi diretti e indiretti attesi a seguito di un terremoto.

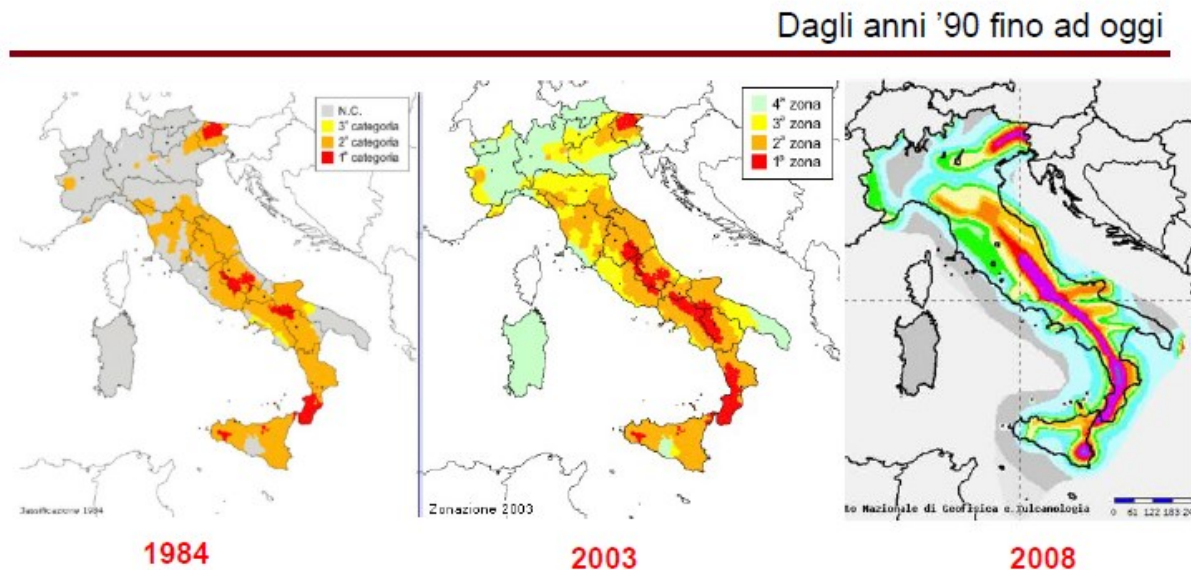


Figura 15. L'evoluzione delle mappe di pericolosità sismica.

Come possiamo vedere dalla figura 15, le mappe di pericolosità sismica (mappe che descrivono la probabilità che un evento sismico avvenga in una determinata zona) hanno subito un'importante evoluzione nel corso degli anni permettendo una più accurata descrizione dei fenomeni sismici in tutta la nostra penisola.

Nel 1984, l'Italia era suddivisa in tre categorie di pericolosità sismica, rispettivamente: prima, seconda, terza. Le località del territorio nazionale che non ricadevano all'interno delle tre categorie, venivano inserite nelle zone dette "non classificate".

La prima categoria era quella più pericolosa, dove dovevano essere adottate delle normative sismiche più restrittive. Seguivano poi la seconda e la terza categoria. Nelle zone "non classificate", invece, non venivano adottate normative di progettazione sismica, in quanto, la pericolosità tipica di queste località, era francamente trascurabile ai fini del calcolo strutturale.

Nel 2003, grazie all'aggiornamento delle normative tecniche, viene aggiunta una quarta categoria, dove la scelta di imporre l'obbligo di progettare secondo le normative sismiche spettava alle regioni incluse in tale categoria, come ad esempio la Sardegna.

Successivamente, nel 2008, viene introdotto il concetto di sismicità locale (microzonazione sismica), in linea con le normative europee fornite dall'Eurocodice 8 (novità per gli SLE, SLU ed i concetti di duttilità strutturale), mediante l'attribuzione diretta dell'azione sismica a partire dai dati

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

in sito, garantendo un'analisi più attendibile in merito ai reali fenomeni sismici presenti in tutto il territorio nazionale.

Inoltre, vengono espresse delle indicazioni tecniche-strutturali per ogni tipologia di opera realizzata (in calcestruzzo armato, in calcestruzzo armato precompresso con cavi pre-tesi e post-tesi, in acciaio, in muratura, in legno, per edifici misti, edifici con isolamento sismico e per i ponti).

Ad oggi, con l'entrata in vigore della nuova normativa tecnica delle costruzioni (NTC 2018), non vengono eliminati i concetti di base per il calcolo dell'azione sismica (espressi dalla normativa precedente) ma, vengono effettuate solo delle modifiche, correzioni ed eventuali integrazioni affinché, tale normativa, risulti maggiormente comprensibile agli occhi degli ingegneri, architetti e geometri che lavorano in campo nazionale.

5. Le analisi e il calcolo dell'azione sismica di progetto

L'attuale normativa tecnica per le costruzioni (NTC 2018) prevede che è possibile utilizzare uno fra i quattro metodi di analisi sismica proposti per il calcolo della domanda in presenza dell'azione sismica.

Le analisi strutturali sono le seguenti:

- analisi statica lineare;
- analisi statica non lineare;
- analisi dinamica lineare o modale;
- analisi dinamica non lineare.

Se si considera una struttura regolare in pianta ed in altezza è possibile approssimare il suo comportamento strutturale a quello di un oscillatore semplice (1 GDL) avente periodo di vibrare coincidente con il periodo principale (T_1) del primo modo di vibrare, effettuando così, un'analisi dinamica semplificata detta analisi statica lineare. L'analisi statica lineare (o metodo delle forze laterali) consiste nell'applicazione di forze statiche orizzontali al sistema strutturale, equivalenti alle forze d'inerzia indotte dall'azione sismica. La distribuzione di forze statiche in altezza viene assunta affine agli spostamenti del primo modo di vibrare, ovvero con intensità crescente al crescere della quota dell'impalcato ed assumendo un an-

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

damento approssimativamente lineare. Per poter adottare tale analisi, la costruzione deve rispettare i due seguenti requisiti:

- il periodo fondamentale (T_1) del primo modo di vibrare della struttura non deve superare $2,5T_C$ o T_D ($T_1 < 2,5T_C$ o $T_1 < T_D$), dove T_C è il periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale, mentre T_D è il periodo di inizio del tratto a spostamento costante dello spettro in accelerazione orizzontale;
- la costruzione deve essere regolare in altezza ($K_R=1$).

Il periodo principale T_1 , correlato al primo modo di vibrare della struttura, viene calcolato in maniera approssimata, evitando in tal modo di eseguire un'analisi modale (un'analisi che tiene conto di tutti i modi propri di vibrare aventi massa partecipante superiore al 5% e comunque sia che consideri un numero di modi la cui massa partecipante totale sia superiore all'85% rispetto alla massa sismica totale dell'edificio preso in considerazione). Il periodo T_1 viene utilizzato per calcolare l'azione sismica, adottando lo spettro di risposta di progetto ($S_d = S_e I / q$).

Per tener conto delle capacità dissipative della struttura si utilizza un fattore q , detto fattore di struttura che si calcola mediante la seguente formula:

$$q = q_0 \times K_R$$

dove q_0 è il fattore di struttura massimo, funzione della tipologia strutturale (strutture a telaio, strutture a pareti, strutture miste telaio-pareti, strutture a pendolo inverso, strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano, strutture deformabili torsionalmente), del tipo di elemento strutturale (pilastro, trave, nodo, ecc.), della classe di duttilità (CD"A" classe di duttilità alta e CD"B" classe di duttilità bassa) e del rapporto α_u / α_1 (dove α_1 è il valore dell'azione sismica per il quale avviene la formazione della prima cerniera plastica a flessione nel primo elemento strutturale e α_u è il valore dell'azione sismica per il quale avviene la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere labile la struttura). Il coefficiente K_R , invece, è funzione della regolarità in altezza della struttura ed è pari ad 1 per le strutture regolari e pari a 0,8 per quelle irregolari.

Non si effettua alcuna combinazione degli effetti in quanto si considera solo il modo di vibrare principale della struttura (il primo). Per costruzioni

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

civili o industriali che non superino i 40 m di altezza e la cui massa sia distribuita in modo approssimativamente uniforme lungo l'altezza, T_1 (espresso in secondi), può essere stimato, in assenza di calcoli più dettagliati, mediante l'utilizzo della seguente formula:

$$T_1 = 2\sqrt{d_{\max}}$$

dove d è lo spostamento laterale elastico del punto più alto dell'edificio (espresso in metri), ottenuto dalla combinazione di carico sismica $[G_1+G_2+\psi_{2j}Q_{k,j}]$, applicata in direzione orizzontale. Inoltre, per una stima più approssimata e speditiva, è possibile ancora utilizzare la vecchia formulazione delle NTC 2008 grazie alla circolare del 21 gennaio 2019, N.7. La formulazione è la seguente:

$$T_1 = C_1 H^{3/4}$$

dove H è l'altezza dell'edificio dal piano di posa della fondazione espresso in metri e C_1 è un coefficiente che vale 0,085 per costruzioni a telaio in acciaio o in legno, 0,075 per costruzioni a telaio in cemento armato, 0,050 per costruzioni in muratura o di qualsiasi altra tipologia.

La combinazione di carico sismica comprende i seguenti carichi:

- G_1 = Carichi permanenti strutturali;
- G_2 = Carichi permanenti non strutturali;
- ψ_{2j} = Coefficiente di combinazione sismica;
- $Q_{k,j}$ = Carichi variabili.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Figura 16. Tabella dei coefficienti Ψ_{0j} , Ψ_{1j} , Ψ_{2j} .

In ogni caso, dopo aver stimato il periodo principale della struttura (T_1) mediante la formula precedente, si entra nel grafico dello spettro di risposta di progetto e si determina il valore dell'accelerazione spettrale corrispondente ($S_d(T_1)$). Successivamente si calcolano le forze sismiche di piano (F_i), le quali saranno distribuite secondo la forma del primo modo di vibrare della struttura stimato in modo approssimativo. Analiticamente, la forza sismica di piano (F_i) da applicare nel baricentro di piano a ciascuna massa della costruzione è data dalla formula seguente:

$$F_i = F_h [(z_i W_i) / (\sum_j z_j W_j)]$$

F_h = Forza sismica totale o taglio alla base max = $[S_d(T_1) / g W \lambda]$ (kN);

F_i = Forza sismica di piano nel baricentro della massa i -esima (kN);

W_i, W_j = Pesi, rispettivamente, della massa i e della massa j (kN);

Z_i, Z_j = Quote, rispetto al piano di fondazione, delle masse i e j (m);

$S_d(T_1)$ = Ordinata o accelerazione spettrale dello spettro di risposta di progetto in funzione del periodo principale T_1 (g);

W = Peso complessivo della costruzione (kN);

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

λ = Coefficiente pari a 0,85 se $T_1 < 2T_C$ e la costruzione ha almeno tre orizzontamenti ed uguale ad 1 in tutti gli altri casi (-);

g = Accelerazione di gravità pari a $9,81\text{m/s}^2$.

Successivamente, per determinare il massimo taglio alla base ($V_{b_{\max}}=V_{b_1}$) si effettua la somma statica di tutte le forze sismiche di piano e la si inverte di verso. I restanti tagli di piano inerenti ai piani superiori, si ottengono sottraendo al taglio massimo alla base ($V_{b_{\max}}=V_{b_1}$) le rispettive forze sismiche di piano (F_i). Pertanto per avere il taglio di piano relativo al piano 2 e al piano 3 si effettuano le seguenti operazioni:

$$V_{b_2} = [V_{b_{\max}} - F_1];$$

$$V_{b_3} = [V_{b_{\max}} - (F_1 + F_2)].$$

La figura sottostante mostra una distribuzione statica lineare applicata ad un telaio generico a più piani e a più campate.

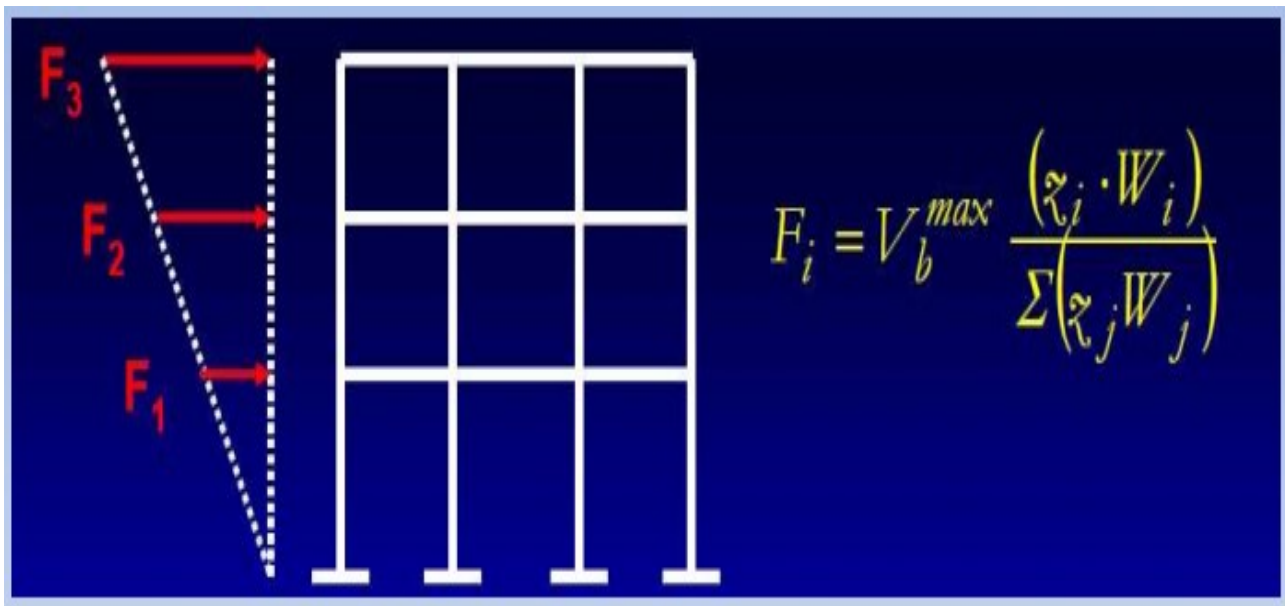


Figura 17. Analisi statica lineare.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

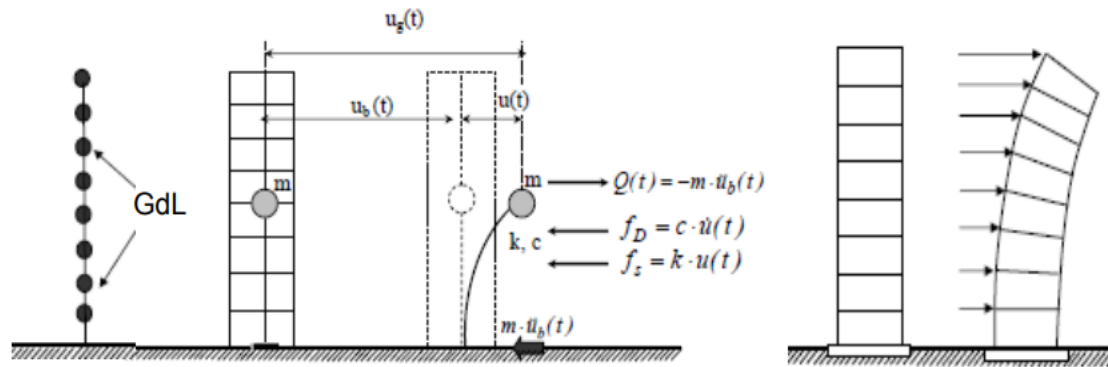


Figura 18. Deformata strutturale in un'analisi statica lineare.

Inoltre si deve tener conto dell'eccentricità accidentale del centro di massa ($e=5\%L$) mediante l'applicazione di carichi statici costituiti da momenti torcenti di valore pari alla risultante orizzontale della forza sismica agente al piano i -esimo (F_i) moltiplicata per l'eccentricità accidentale del baricentro delle masse rispetto alla sua posizione di calcolo.

$$\text{Momento torcente in } x = Mt_x = F_{i_x} e_y$$

$$\text{Momento torcente in } y = Mt_y = F_{i_y} e_x$$

La seconda tipologia di analisi è l'analisi statica non lineare (o analisi di pushover, letteralmente "spingi oltre"), dove l'azione sismica viene modellata mediante forze statiche fatte crescere monotonamente. Tale analisi richiede che al sistema strutturale reale sia associato un sistema strutturale equivalente non lineare. Nel caso in cui il sistema equivalente sia caratterizzato da un solo grado di libertà (sistema S-DOF), si applicano i carichi gravitazionali e, per la direzione considerata dell'azione sismica, in corrispondenza degli orizzontamenti della costruzione (baricentri delle masse di piano), forze orizzontali proporzionali alle forze d'inerzia aventi risultante il taglio alla base (V_b). Tali forze sono opportunamente scalate in modo da far crescere monotonamente, sia in direzione positiva che negativa e fino al raggiungimento delle condizioni di collasso locale o globale, lo spostamento orizzontale d_c di un punto di controllo coincidente con il centro di massa dell'ultimo livello della costruzione (sono esclusi eventuali torrioni). Vanno considerati anche punti di controllo alternativi, come le estremità della pianta dell'ultimo livello, quando sia significativo l'accoppiamento di traslazioni e rotazioni (moto accoppiato).

Il diagramma V_b-d_c rappresenta la curva di capacità strutturale.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

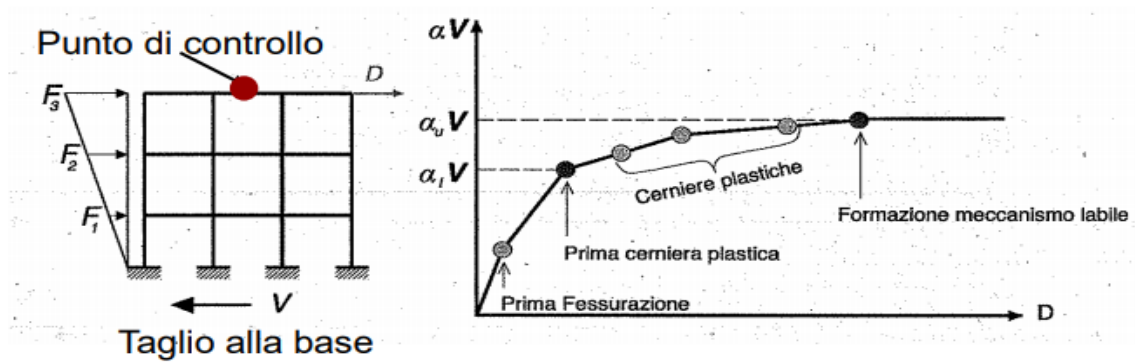


Figura 19. Curva di pushover.

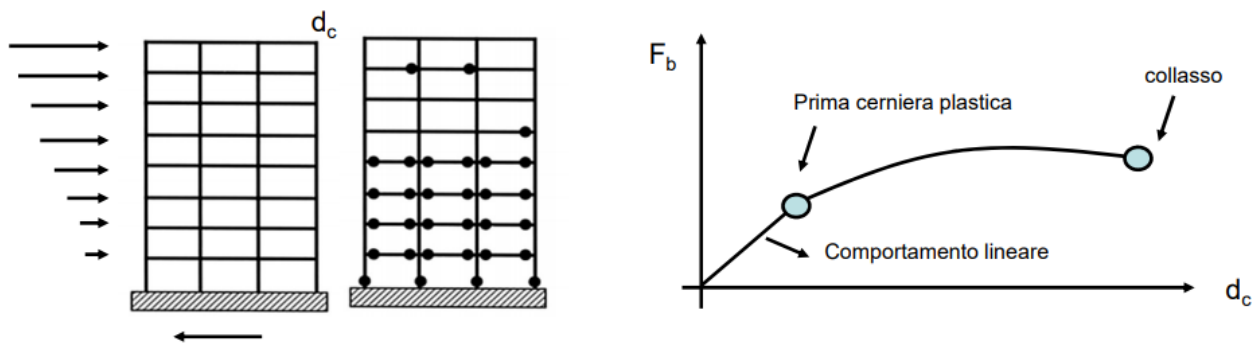


Figura 20. Formazione delle cerniere plastiche.

La non linearità della struttura si manifesta nelle zone di formazione delle cerniere plastiche, ovvero alle estremità per le travi di appoggio e alla base dei pilastri. In queste zone, avviene la maggior dissipazione di energia plastica, contrastando gli effetti di un eventuale evento sismico.

La curva di capacità o curva di pushover rappresenta le capacità prestazionali della struttura in considerazione, mediante lo studio di un modello non lineare, permettendoci di effettuare un'analisi più accurata rispetto ad un'analisi statica lineare equivalente, la quale utilizza un modello lineare della struttura. Se la risposta viene valutata mediante un'analisi statica non lineare, ciascuna delle due componenti orizzontali (insieme a quella verticale, ove necessario) sono applicate separatamente (in direzione x : $E=1E_x+1E_z$ e in direzione y : $E=1E_y+1E_z$), a differenza dell'analisi dinamica non lineare dove le due componenti orizzontali e la componente verticale ove necessario, vengono applicate in contemporanea. Detto questo, per i massimi effetti si assumono i valori più sfavorevoli.

Inizialmente, si devono considerare almeno due distribuzioni di forze d'inerzia, ricadenti l'una nelle distribuzioni principali (Gruppo 1) e l'altra nelle distribuzioni secondarie (Gruppo 2).

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

I gruppi descritti dalla normativa sono i seguenti:

- Gruppo 1 - Distribuzioni principali: se il modo di vibrare fondamentale nella direzione considerata ha una partecipazione di massa non inferiore al 75% della massa sismica totale, si applica una delle due distribuzioni seguenti:
 - a) distribuzione proporzionale alle forze statiche, utilizzando come seconda distribuzione la a) del Gruppo 2;
 - b) distribuzione corrispondente ad un andamento di accelerazioni proporzionale alla forma del modo fondamentale di vibrare (ϕ_1 avente periodo T_1) nella direzione considerata (push modo).

In tutti i casi può essere utilizzata la distribuzione corrispondente all'andamento delle forze di piano agenti su ciascun orizzontamento calcolate mediante un'analisi dinamica lineare (o modale), considerando tutti i modi aventi massa partecipante superiore al 5% e comunque sia un numero di modi la cui massa partecipante totale sia superiore all'85% della massa sismica totale. L'utilizzo di questa distribuzione è obbligatorio se il periodo fondamentale della struttura T_1 è superiore a $1,3T_C$ ($T_1 > 1,3T_C$), dove T_C è il periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro di risposta elastico in accelerazione orizzontale.

- Gruppo 2 - Distribuzioni secondarie:
 - a) distribuzione di forze, desunta da un andamento uniforme di accelerazioni lungo l'altezza della costruzione (push massa);
 - b) distribuzione adattiva, che cambia al crescere dello spostamento dc del punto di controllo in funzione della plasticizzazione della struttura;
 - c) distribuzione multimodale, considerando almeno sei modi significativi di vibrare della struttura (solitamente i primi sei modi propri di vibrare).

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Detto questo, le distribuzioni di forze d'inerzia più utilizzate dagli ingegneri progettisti sono le seguenti:

- PushModo (punto b inerente al gruppo 1 della distribuzione principale): che fornisce una distribuzione di forze proporzionali al primo modo di vibrare della struttura (ovvero quello principale);
- PushMassa (punto a inerente al gruppo 2 della distribuzione secondaria): che fornisce una distribuzione di forze proporzionali alla massa della struttura (accelerazioni costanti in altezza).

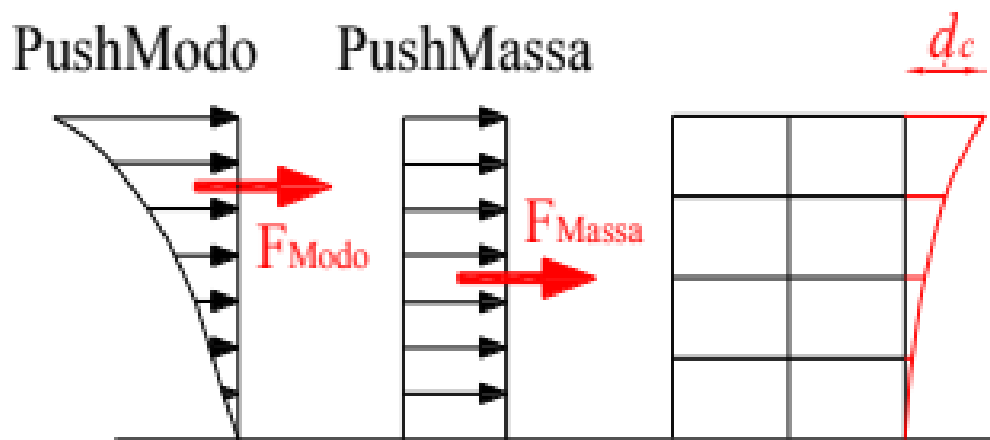


Figura 21. Distribuzione di forze: PushModo e PushMassa.

La curva di pushover rappresenta la capacità della struttura (du^*) che dovrà poi essere confrontata con la domanda fornita dall'azione sismica (S_d). La verifica andrà eseguita mediante il metodo globale di verifica N_2 prescritto dalla normativa tecnica per le costruzioni vigente. Tale metodo si basa sulla considerazione di due modelli non lineari:

- il sistema M-DOF (sistema ad n gradi di libertà, rappresentato dai telai spaziali multipiano);
- il sistema S-DOF (sistema ad 1 grado di libertà, rappresentato dall'oscillatore semplice).

Gli step da eseguire per applicare il metodo N_2 sono i seguenti:

- Step 1: Scelta della distribuzione di forze d'inerzia da applicare alla struttura (ad esempio PushModo e PushMassa) e successiva costruzione della curva di pushover, rappresentata dal grafico V_b-d_c .

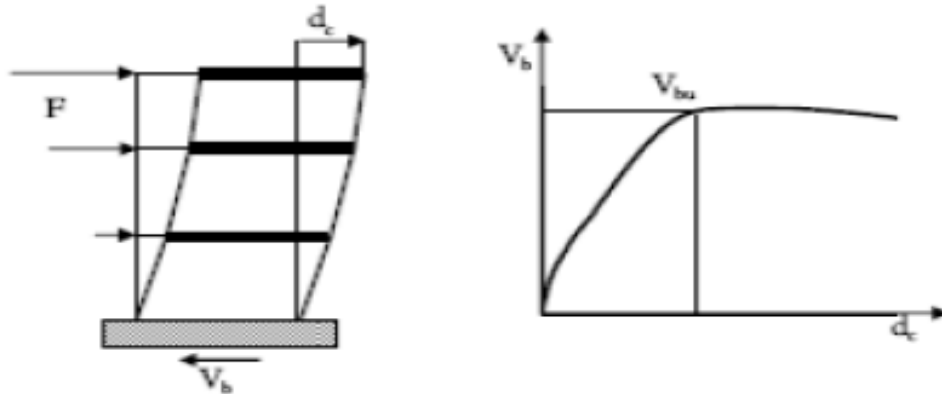


Figura 22. Distribuzione di forze triangolare e curva di pushover.

- Step 2: Trasferimento da un sistema M-DOF ad un sistema S-DOF.

Questo passaggio è necessario in quanto, la domanda sismica per i vari stati limite, è formulata in termini di spettro di risposta, che per definizione fa riferimento ad un oscillatore semplice (1GDL). Questo avviene dividendo le ascisse e le ordinate della curva di capacità della struttura per il fattore di partecipazione modale (Γ_i) mediante le seguenti formule:

$$F^* = V_b/\Gamma = \text{Forza ridotta}$$

$$d^* = d_c/\Gamma = \text{Spostamento ridotto}$$

$$m_i^* = (\sum_j m_j \phi_{i,j})^2 / (\sum_j m_j \phi_{i,j}^2) = \text{Massa partecipante i-esimo modo}$$

$$\Gamma_i = (\phi M \tau) / (\phi M \phi) = (\sum_j m_j \phi_{i,j}) / (\sum_j m_j \phi_{i,j}^2) = \text{Fattore di partecipazione modale i-esimo modo (dove } \phi \text{ è la forma modale, } \tau \text{ è il vettore di trascinamento nella direzione del sisma considerato ed } M \text{ è la matrice di massa del sistema)}$$

- Step 3: Determinazione della curva bilineare equivalente.

Alla curva di capacità o curva di pushover del sistema strutturale, occorre sostituire una curva bilineare equivalente avente un primo tratto elastico ed un secondo tratto perfettamente plastico (determinazione del comportamento bilineare equivalente). Il tratto elastico si individua ponendo il passaggio per il punto $0,6F_{b,max}$ ($0,7F_{b,max}$ per le murature) della curva di capacità del sistema equivalente (curva bilineare equivalente). La forza di

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

plasticizzazione F_y^* , invece, si individua ponendo l'uguaglianza delle aree sottese dalla curva bilineare equivalente e dalla curva di capacità strutturale per lo spostamento massimo d_u^* . Tale spostamento massimo corrisponde ad una riduzione di resistenza $\leq 0,15F_{b_{max}}$ ($d_u^* = \min(0,85F_{b_{max}}; \text{spostamento in corrispondenza della non verifica della prima cerniera plastica}$)).

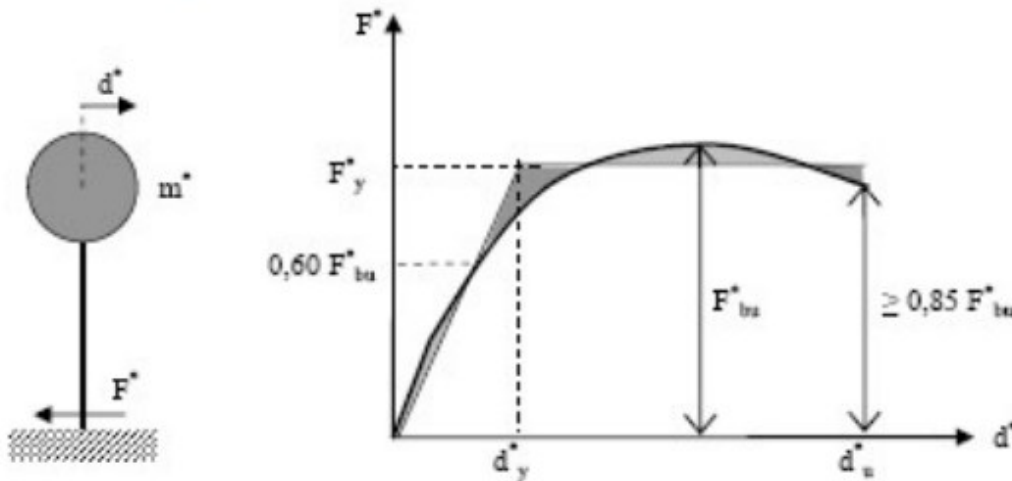
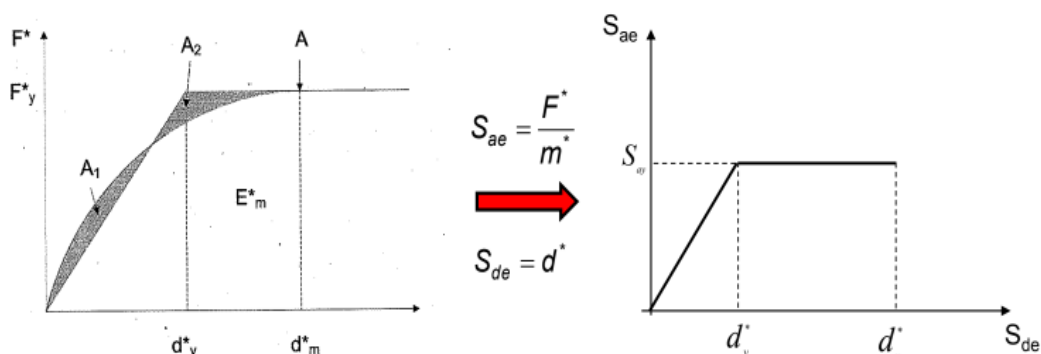


Figura 23. Oscillatore semplice e diagramma bilineare equivalente.

- Step 4: Riporto la curva di capacità bilinearizzata nel piano ADRS (Acceleration displacement response spectrum).

Nel piano ADRS, la curva bilineare ha in ordinata la pseudo-accelerazione spettrale (S_{ae}) e in ascissa lo spostamento relativo spettrale (S_{de}). La curva di capacità nel piano ADRS può essere ottenuta semplicemente scalando le ordinate, ovvero i valori della forza F^* , per la massa partecipante m^* , in modo da ottenere un'accelerazione.

I valori di spostamento della curva dell'oscillatore elasto-plastico non necessitano, al contrario, di essere modificati.



Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Figura 24. Curva bilineare equivalente nel piano ADRS.

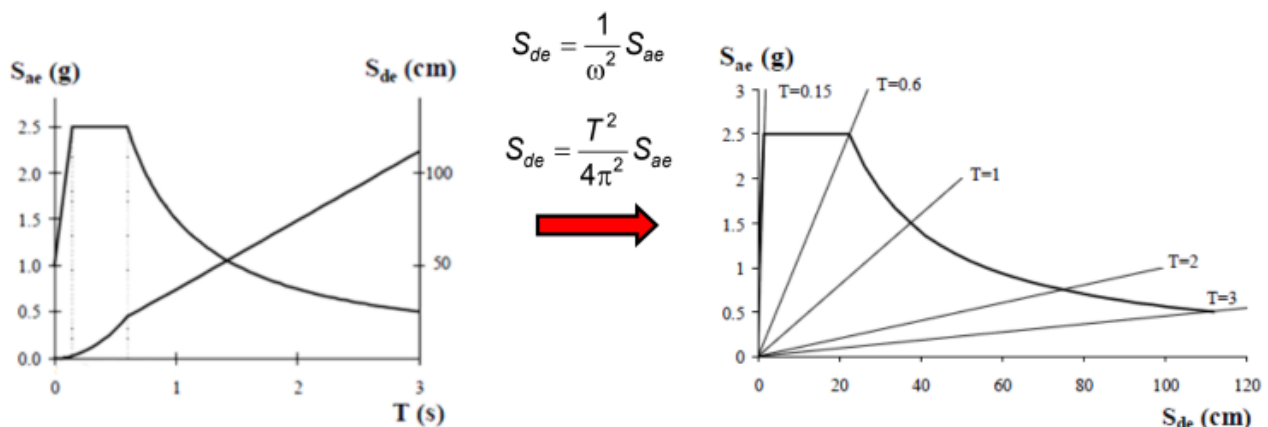
- Step 5: Riporto la curva di domanda nel piano ADRS.

Si riporta la curva di domanda, rappresentata dallo spettro elastico da normativa, corrispondente allo stato limite indagato (SLO, SLD, SLV, SLC) nel piano ADRS.

Oltre allo spettro elastico, si riporta anche lo spettro di progetto, opportunamente ridotto per tener conto delle capacità dissipative della struttura, mediante il fattore di struttura q che si calcola mediante la seguente formula:

$$q = q_0 \times K_R$$

dove q_0 è il fattore di struttura massimo, funzione della tipologia strutturale (strutture a telaio, strutture a pareti, strutture miste telaio-pareti, strutture a pendolo inverso, strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano, strutture deformabili torsionalmente), del tipo di elemento strutturale (pilastro, trave, nodo, ecc.), della classe di duttilità (CD" A" classe di duttilità alta e CD" B" classe di duttilità bassa) e del rapporto α_u/α_1 (dove α_1 è il valore dell'azione sismica per il quale avviene la formazione della prima cerniera plastica a flessione nel primo elemento strutturale e α_u è il valore dell'azione sismica per il quale avviene la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere labile la struttura). Il coefficiente K_R , invece, è funzione della regolarità in altezza della struttura ed è pari ad 1 per le strutture regolari e pari a 0,8 per quelle irregolari.



Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Figura 25. Trasferimento della curva di domanda nel piano ADRS.

S_{ae} = Accelerazione spettrale (g);

S_{de} = Spostamento spettrale (cm);

$\xi = c/(2m\omega) =$ Coefficiente di smorzamento viscoso (%);

$T =$ Periodo di vibrazione = $2\pi/\omega = 2\pi \sqrt{(m/k)}$ (s);

$\omega =$ Pulsazione naturale o frequenza propria = $2\pi/T = 2\pi \sqrt{(k/m)}$ (rad/s).

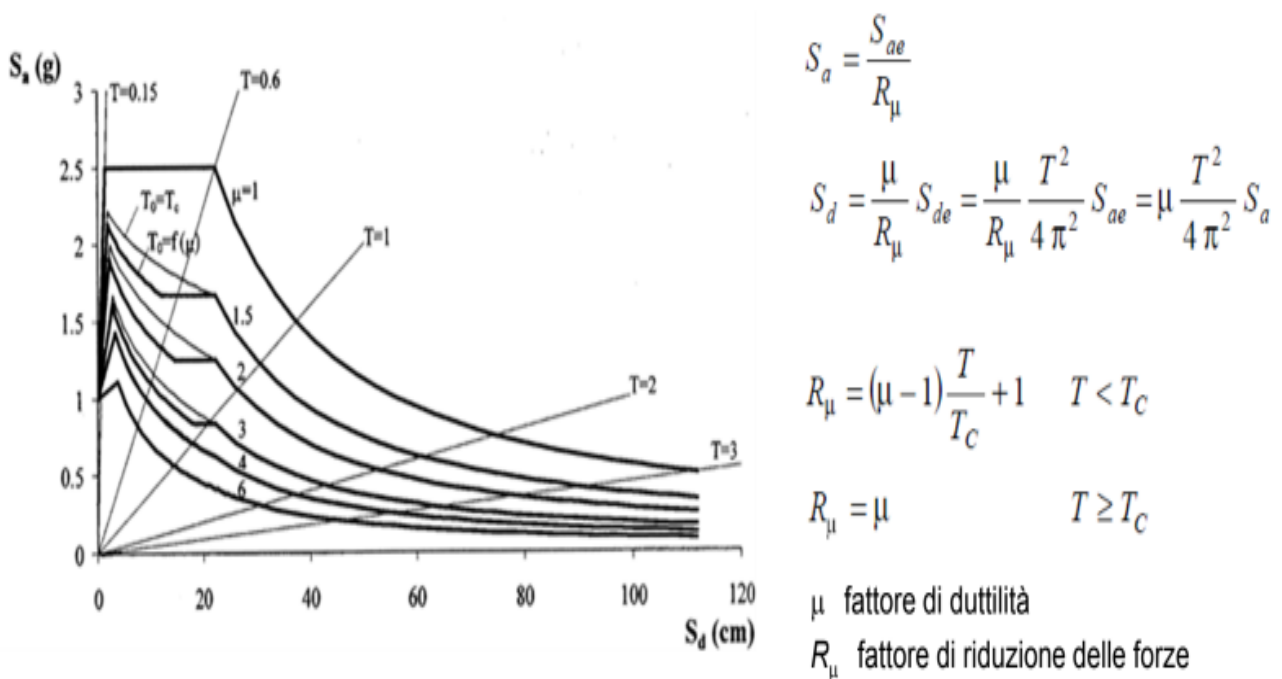


Figura 26. Curva di domanda nel piano ADRS.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo



μ fattore di duttilità

Rapporto tra

- lo spostamento di domanda S_d e

- lo spostamento a snervamento d_y^* dell'oscillatore equivalente.

Figura 27. Diagramma della duttilità in funzione del periodo.

- Step 6: Si confrontano la curva di capacità bilinearizzata della struttura con la domanda nel piano ADRS.

$$k^* = \frac{F_y^*}{d_y^*} \quad T^* = 2\pi\sqrt{\frac{m^*}{k^*}} \quad R_\mu = \frac{S_{ae}}{S_{ay}}$$

$$\boxed{T^* < T_c}$$

$$S_d = \mu \frac{S_{de}}{R_\mu} = \frac{S_{de}}{R_\mu} \left(1 + (R_\mu - 1) \frac{T_c}{T^*} \right)$$

$$\mu = (R_\mu - 1) \frac{T_c}{T^*} + 1$$

$$\boxed{T^* \geq T_c}$$

$$S_d = S_{de}$$

$$\mu = R_\mu$$

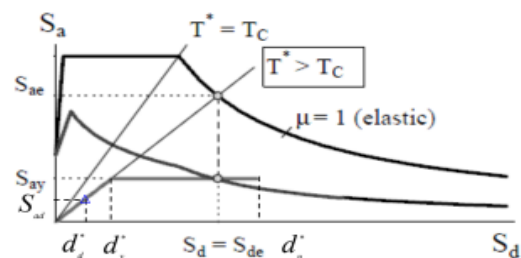
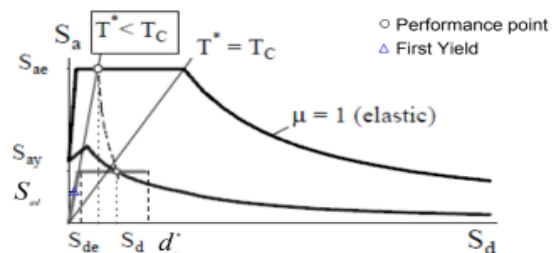


Figura 28. Confronto fra la curva di capacità e la curva di domanda nel piano ADRS.

La verifica dello stato limite considerato risulta soddisfatta se la capacità ultima della struttura ($du^* = \min(0,85F_{b_{max}}; \text{spostamento in corrispondenza della non verifica della prima cerniera plastica})$) è maggiore della domanda in termini di spostamento (S_d):

$$du^* > S_d$$

Tuttavia, questa tipologia di analisi, presenta due principali limiti:

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

- da verificare l'applicazione a sistemi molto irregolari in pianta, in quanto, a causa della probabile rotazione della struttura, la risposta ad un sisma in una direzione coinvolge sia i telai nella direzione principale che quelli nell'altra direzione, non rendendo possibile la riduzione ad un problema piano, come prevede la procedura di verifica dell'analisi statica non lineare che analizza separatamente la risposta strutturale nelle due direzioni x e y;
- Non applicabili a sistemi con dissipazione o isolamento qualora presenti componenti con comportamento legati alla velocità ($F=cV^\alpha$), in quanto l'analisi statica non lineare è un'analisi pseudo statica (nel senso che l'incremento delle forze avviene in maniera pseudo statica e non chiama in causa la reale velocità/accelerazione della forzante sismica).

La terza tipologia di analisi sismica è l'analisi dinamica lineare o analisi modale che consiste nell'esecuzione dei seguenti punti:

- determinazione dei modi propri di vibrare della struttura mediante l'esecuzione dell'analisi modale;
- calcolo dell'effetto dell'azione sismica per ciascun modo di vibrare utilizzando lo spettro di risposta di progetto;
- combinazione dei primi due punti. Gli effetti dell'azione sismica, calcolati per ciascun modo di vibrare del sistema, vengono combinati fra loro (in quanto è praticamente impossibile che tutti i modi di vibrare attingano ai valori massimi nello stesso istante), adottando una delle due regole di combinazione prescritte dalla normativa, ovvero la CQC (combinazione quadratica completa), valida quando i modi propri di vibrare sono linearmente dipendenti e si verificano contemporaneamente (modi di vibrare accoppiati fra loro) e l'SRSS (Square root of sum of squares o radice quadrata della somma dei quadrati), valida nell'ipotesi in cui i contributi massimi dei singoli modi propri di vibrare siano linearmente indipendenti e non si verificano nello stesso istante temporale (modi di vibrare perfettamente disaccoppiati fra loro).

$$E = \sqrt{\sum_i \sum_j \rho_{ij} E_i E_j}$$

Figura 29. Formula inerente alla combinazione quadratica completa

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

(CQC).

dove:

E = Valore dell'effetto considerato (ad esempio: taglio, momento, spostamento o rotazione);

E_i = Valore dell'effetto relativo al modo i ;

E_j = Valore dell'effetto relativo al modo j ;

ρ_{ij} = Coefficiente di correlazione tra il modo i ed il modo j .

$$\rho_{ij} = \frac{8\sqrt{\xi_i \cdot \xi_j} \cdot (\beta_{ij} \cdot \xi_i + \xi_j) \cdot \beta_{ij}^{3/2}}{(1 - \beta_{ij}^2)^2 + 4 \cdot \xi_i \cdot \xi_j \cdot \beta_{ij} (1 + \beta_{ij}^2) + 4 \cdot (\xi_i^2 + \xi_j^2) \cdot \beta_{ij}^2}$$

Figura 30. Coefficiente di correlazione tra il modo i ed il modo j nel caso di differenti smorzamenti tra i modi i e j .

$$\rho_{ij} = \frac{8\xi^2\beta_{ij}^{3/2}}{(1 + \beta_{ij}) \cdot [(1 - \beta_{ij})^2 + 4\xi^2\beta_{ij}]}$$

Figura 31. Coefficiente di correlazione tra il modo i ed il modo j nel caso di uguale smorzamento ξ tra i modi i e j .

$$E = \sqrt{\sum_i E_i^2}$$

Figura 32. Formula inerente alla radice quadrata della somma dei quadrati (SRSS; E_i = Valore dell'effetto relativo al modo i).

L'analisi dinamica lineare viene spesso definita analisi modale con spettro di risposta elastico (SLE) o di progetto (SLU) in quanto, tramite quest'ultimo, avviene la modellazione dell'azione sismica. L'analisi modale viene applicata ad un modello lineare tridimensionale di una struttura, che non presenta particolari vincoli in merito alla regolarità in pianta ed in altezza (le strutture possono essere non regolari in pianta ed in altezza). La

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

normativa vigente prescrive che, per poter cogliere in maniera accurata e con ridotta approssimazione gli effetti dell'azione sismica sulle strutture, è necessario considerare tutti i modi propri di vibrare aventi massa partecipante superiore al 5% e comunque sia un numero di modi la cui massa partecipante totale sia superiore all'85% rispetto alla massa sismica totale. Le analisi dinamiche lineari (come quelle statiche lineari) per strutture dissipative (SLU) sono possibili grazie al concetto di fattore di struttura (q) e spettro di progetto ($S_d = S_{el}/q$) che tiene conto, in maniera semplificata, delle capacità dissipative della struttura legate al suo comportamento duttile (capacità di una struttura a deformarsi plasticamente). Il fattore di struttura q , pertanto, sarà proporzionale alla duttilità della struttura presa in esame, in quanto fornirà l'entità dell'abbattimento dello spettro elastico in maniera più o meno rilevante, riducendo la massima accelerazione orizzontale agente sulla struttura a parità di periodo considerato. Il fattore di struttura q viene calcolato mediante la seguente formula:

$$q = q_0 \times K_R$$

dove q_0 è il fattore di struttura massimo, funzione della tipologia strutturale (strutture a telaio, strutture a pareti, strutture miste telaio-pareti, strutture a pendolo inverso, strutture a pendolo inverso intelaiate monopiano, strutture deformabili torsionalmente), del tipo di elemento strutturale (pilastro, trave, nodo, ecc.), della classe di duttilità (CD"A" classe di duttilità alta e CD"B" classe di duttilità bassa) e del rapporto α_u/α_1 (dove α_1 è il valore dell'azione sismica per il quale avviene la formazione della prima cerniera plastica a flessione nel primo elemento strutturale e α_u è il valore dell'azione sismica per il quale avviene la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere labile la struttura). Il coefficiente K_R , invece, è funzione della regolarità in altezza della struttura ed è pari ad 1 per le strutture regolari e pari a 0,8 per quelle irregolari.

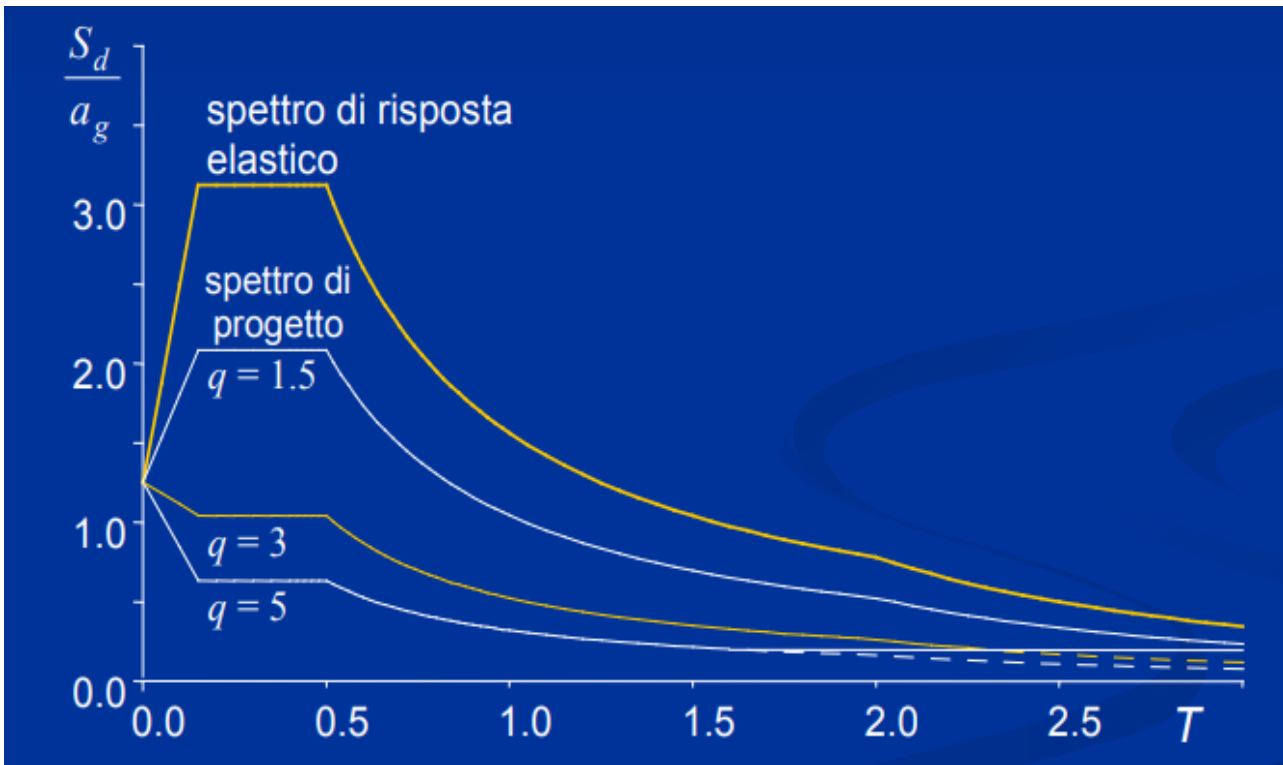


Figura 33. Spettro di risposta elastico e spettri di progetto al variare del fattore di struttura q .

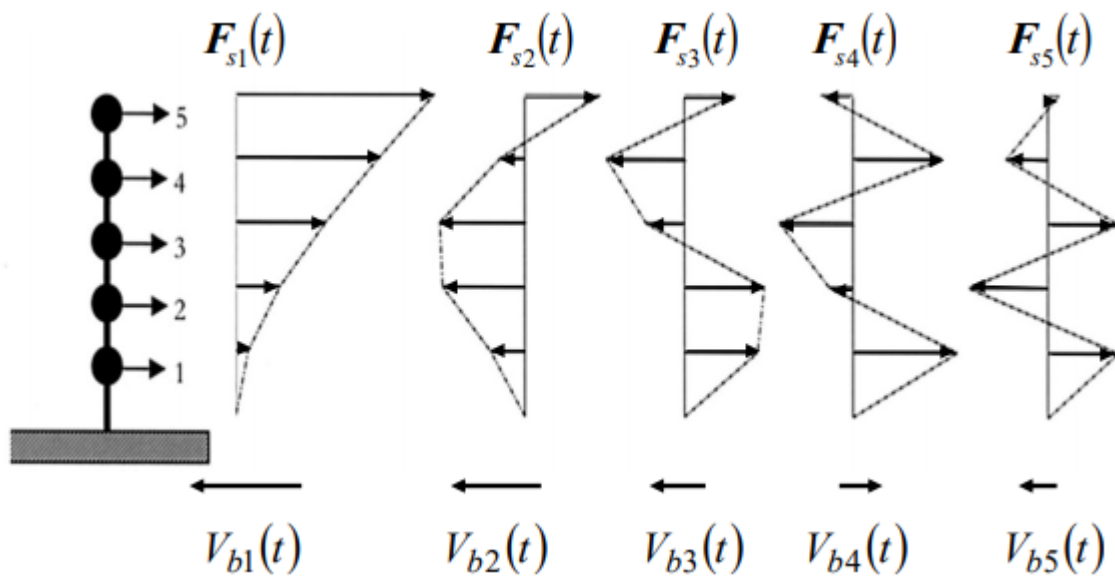


Figura 34. Modi propri di vibrare di una struttura di cinque piani.

Dalla figura sovrastante si nota che il modo principale di vibrazione della struttura, a masse concordi, è il primo modo, avente sia il periodo T_1 che la relativa forza di taglio alla base (V_{b1}) più elevati. Dal secondo modo in

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

poi fino al quinto, invece, si evidenziano che i modi di vibrare diventano a masse discordi nonché una riduzione dei periodi di vibrazione (T) e delle forze di taglio alla base (V_b).

La quarta ed ultima tipologia di analisi sismica è l'analisi dinamica non lineare che consiste nel calcolo della risposta sismica della struttura mediante integrazione diretta delle equazioni del moto, utilizzando un modello non lineare della struttura e modellando l'azione sismica mediante l'inserimento delle storie temporali del moto del terreno (ovvero tramite le "time histories" o accelerogrammi). Essa ha lo scopo di valutare il comportamento dinamico della struttura in campo non lineare, consentendo il confronto tra duttilità richiesta (dal sisma) e duttilità disponibile (della struttura) in funzione degli stati limite ultimi (SLV, SLC), nonché di verificare l'integrità degli elementi strutturali nei confronti di possibili comportamenti fragili (che si manifestano, ad esempio, durante le classiche rotture a taglio).

Si possono scegliere di adottare tre o sette gruppi di storie temporali. Ogni storia temporale descrive due componenti orizzontali ed una verticale (ove necessario) dell'azione sismica. L'insieme delle tre componenti (due orizzontali, tra loro ortogonali ed una verticale) costituiscono un gruppo di accelerogrammi o di storie temporali del moto del terreno.

Nell'ipotesi che si adottano tre storie temporali, si valutano gli effetti sulla struttura utilizzando i valori più massimi più sfavorevoli.

Se, invece, si sceglie di utilizzare sette storie temporali del moto sismico differenti, gli effetti sulla struttura sono rappresentati dalla media dei valori massimi più sfavorevoli. Nel caso in cui sia necessario valutare gli effetti della variabilità spaziale del moto sismico, l'analisi dinamica non lineare può essere eseguita imponendo alla base della costruzione storie temporali del moto del terreno differenziate, ma coerenti tra loro e generate in accordo con lo spettro di risposta appropriato per ciascun vincolo. In alternativa, si potranno eseguire analisi dinamiche con moto sincrono (caratterizzato da coincidenza e accordo temporale di fasi) tenendo in dovuto conto gli effetti pseudo-statici/dinamici indotti dagli spostamenti relativi (sovrapposizione degli effetti dinamici, valutati mediante le storie temporali del moto del terreno, con quelli pseudo statici, indotti dagli spostamenti relativi).

E' preferibile utilizzare accelerogrammi naturali spettro-compatibili con lo spettro di risposta di riferimento, generati ad esempio attraverso il programma Rexel 3.5, in quanto sono quelli che forniscono una rappresenta-

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

zione più ottimale dell'azione sismica in termini di intensità espressa in magnitudo, di distanza epicentrale espressa in km e di durata complessiva dell'evento sismico espressa in secondi.

Tuttavia è consentito anche l'uso di accelerogrammi artificiali, generati ad esempio dal programma Simquake, a condizione che la loro durata sia stabilita sulla base della magnitudo e degli altri parametri fisici che determinano la scelta del valore inerente alla massima accelerazione orizzontale al suolo (a_g) e del valore che tiene conto dell'amplificazione stratigrafica e topografica del sito in esame ($S=S_s \times S_t$). In assenza di studi specifici, la durata della parte pseudo-stazionaria degli accelerogrammi artificiali deve essere almeno pari a 10 secondi. Inoltre la parte pseudo-stazionaria deve essere preceduta e seguita da tratti di ampiezza crescenti da zero e decrescenti a zero, di modo che la durata complessiva dell'accelerogramma sia non inferiore a 25 secondi. Gli accelerogrammi artificiali devono avere uno spettro di risposta elastico coerente con lo spettro di risposta adottato nella progettazione. La coerenza con lo spettro elastico è da verificare in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi spettro-compatibili, per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente pari a $\xi=5\%$. L'ordinata spettrale media non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10%, rispetto alla corrispondente componente dello spettro target elastico. L'uso di accelerogrammi artificiali non è ammesso nelle analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici.

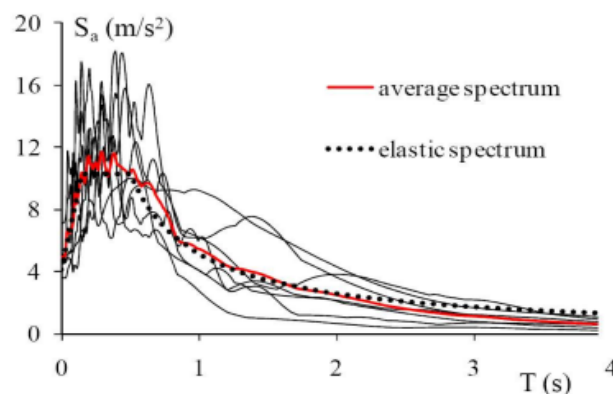


Figura 35. Spettro medio, spettro elastico e accelerogrammi.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

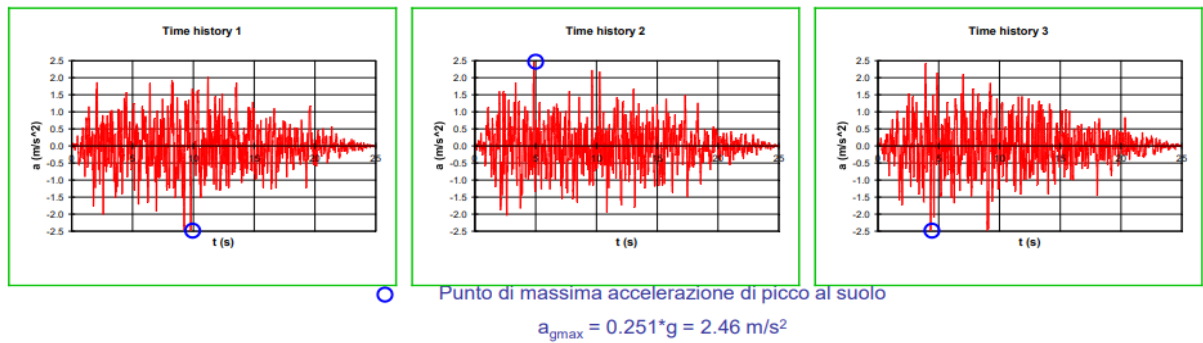


Figura 36. Storie temporali del moto sismico (3 time histories).

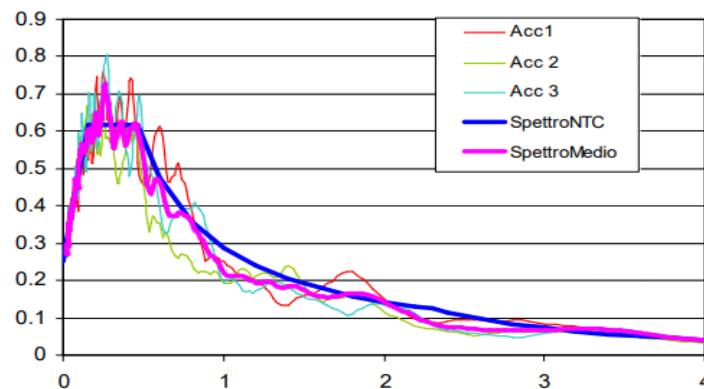


Figura 37. Spettro NTC, spettro medio e accelerogrammi 1-2-3.

In un'analisi dinamica non lineare, la risposta sismica è valutata applicando simultaneamente le due componenti orizzontali accelerometriche (e quella verticale, ove necessario) mediante la seguente espressione:

$$E = E_x + E_y + E_z$$

L'analisi dinamica non lineare deve essere confrontata con un'analisi dinamica lineare (o modale) con spettro di risposta di progetto ($S_d = S_{el}/q$), al fine di controllare le differenze in termini di sollecitazioni globali alla base della struttura (in particolare in termini di taglio alla base V_b).

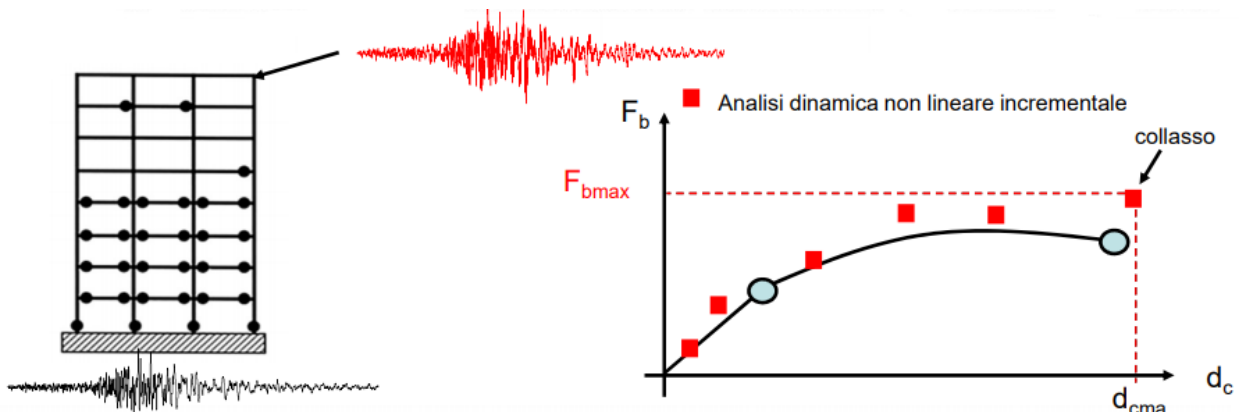


Figura 38. Analisi dinamica non lineare incrementale.

Il vantaggio principale di fare un'analisi dinamica non lineare è quello di poterla applicare a qualsiasi tipologia strutturale, indipendentemente da vincoli di regolarità in pianta ed in altezza (perciò adatta anche per strutture fortemente irregolari), strutture dotate di dispositivi sismici dipendenti dalla velocità (ad esempio dissipatori viscosi caratterizzati da un legame costitutivo: $F=cV^\alpha$) e strutture con dispositivi sismici innovativi. Nel caso delle strutture con isolamento alla base (mediante l'applicazione di isolatori elastomeri SI, isolatori elastomeri con nucleo in piombo, isolatori a scorrimento a superficie curva FIP e FIP-D, isolatori a scorrimento con superficie piana con dissipatori VEL, VEP, VOP, VOTP, VELOTP), l'analisi dinamica non lineare è obbligatoria quando il sistema d'isolamento non può essere rappresentato da un sistema lineare equivalente. In queste condizioni, pertanto, si adotterà un modello non lineare che rappresenti il sistema d'isolamento in maniera ottimale.

Detto questo, si può affermare che l'analisi dinamica non lineare è l'analisi strutturale più complessa e più sofisticata che esiste.

Tuttavia anche questa analisi presenta degli aspetti "negativi" da tenere in considerazione:

- l'utilizzo di campioni di storie accelerometriche che non rappresentano perfettamente le caratteristiche dell'azione sismica, che per sua natura si presenta poco armonica e altamente aleatoria;
- il maggior onere computazionale da parte del progettista nella scelta dei parametri progettuali non lineari.

Dopo aver spiegato le tipologie di analisi strutturale sismica si procede con il calcolo dell'azione sismica di progetto vera e propria.

L'evoluzione del quadro normativo ha determinato il passaggio da uno scenario in cui l'azione sismica veniva determinata individuando la zona sismica in cui ricadeva il sito di costruzione e il relativo grado di sismicità, allo scenario attuale (NTC 2018) in cui l'azione sismica è definita puntualmente su tutto il territorio nazionale, in funzione delle coordinate di latitudine (ϕ) e longitudine (λ), delle caratteristiche topografiche (categorie topografiche: T_1, T_2, T_3, T_4), delle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo (categorie di sottosuolo: A, B, C, D, E), del valore dell'azione sismica di riferimento ($V_R=V_N \times C_U$, dove V_N è la vita nominale dell'opera e C_U è il coefficiente della classe d'uso di riferimento ovvero classe 1, classe 2, classe 3, classe 4), della probabilità di superamento (P_{VR}), dello stato

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

limite considerato (stati limite d'esercizio: SLO, SLD; stati limite ultimi: SLV, SLC). Detto questo, in presenza dell'azione sismica, la normativa vigente stabilisce quattro stati limite suddivisi in stati limite di esercizio e stati limite ultimi.

A ciascuno stato limite viene associata una determinata probabilità di superamento (P_{VR}) che diminuisce all'aumentare della gravità dello stato limite preso in considerazione, in quanto, è meno probabile che venga superato uno stato limite ultimo rispetto ad uno stato limite di esercizio.

Gli stati limite di esercizio si suddividono in:

- Stato limite di operatività (SLO) con P_{VR} pari all'81% (frequente). A seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi.

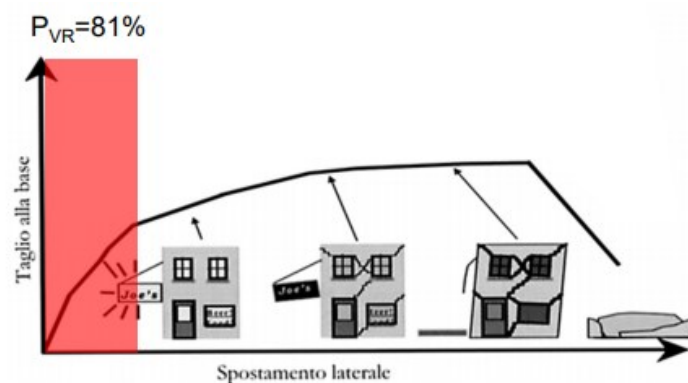


Figura 39. Stato limite di operatività.

- Stato limite di danno (SLD) con P_{VR} pari al 63% (occasionale). A seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

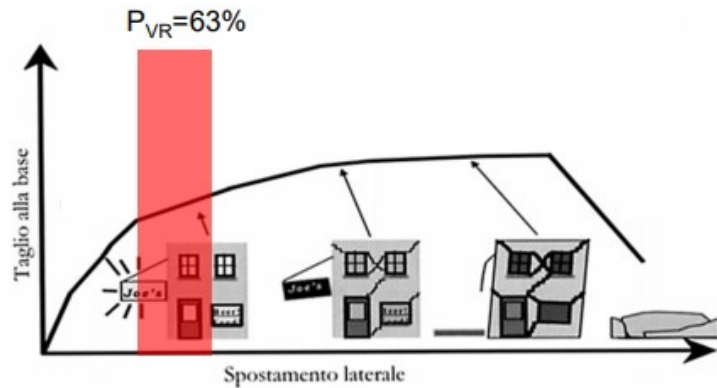


Figura 40. Stato limite di danno.

Mentre gli stati limite ultimi si suddividono in:

- Stato limite di salvaguardia della vita con P_{VR} pari al 10% (raro). A seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.

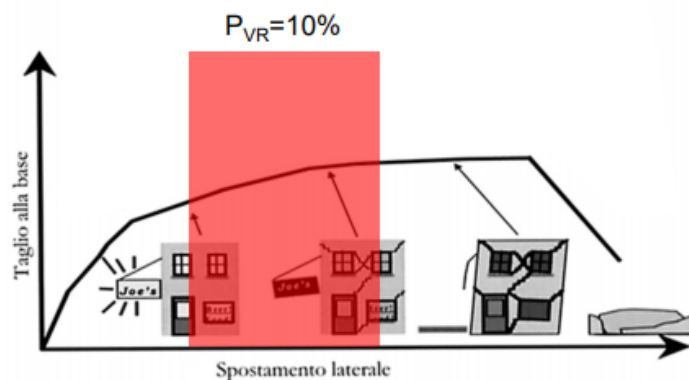


Figura 41. Stato limite di salvaguardia della vita.

- Stato limite di collasso con P_{VR} pari al 5% (molto raro). La costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

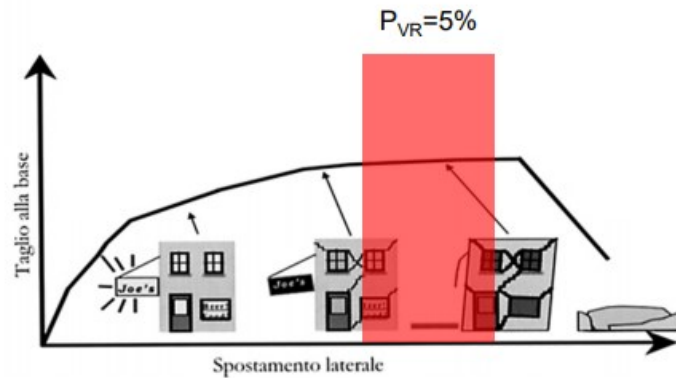


Figura 42. Stato limite di collasso.

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U :

$$V_R = V_N \times C_U \geq 35 \text{ anni}$$

dove:

V_R = Periodo di riferimento dell'azione sismica;

V_N = Vita nominale della costruzione in funzione della sua tipologia;

C_U = Coefficiente della classe d'uso di riferimento (classe 1, classe 2, classe 3, classe 4).

Tipologie di costruzione		V_N (Anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	30
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Figura 43. Tabella inerente alla vita nominale V_N delle costruzioni.

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite:

- Classe d'uso I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

- Classe d'uso II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in classe d'uso III o in classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.
- Classe d'uso III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.
- Classe d'uso IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Classe d'uso	I	II	III	IV
Coefficiente C_U	0.70	1.00	1.50	2.00

Figura 44. Tabella inerente al coefficiente C_U della classe d'uso.

La vita nominale di un'opera strutturale V_N è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata.

Vita nominale (V_N)	Periodo di riferimento dell'azione sismica (V_R)			
	Classe d'uso			
	I	II	III	IV

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

≤ 10	35	35	35	35
≥ 50	≥ 35	≥ 50	≥ 75	≥ 100
≥ 100	≥ 70	≥ 100	≥ 150	≥ 200

Tabella 45. Tabella inerente al periodo di riferimento dell'azione sismica.

Noto il periodo di riferimento dell'azione sismica di una costruzione (V_R) e la probabilità di superamento (P_{VR}) corrispondente ad un prefissato stato limite (SLO, SLD, SLV, SLC), è possibile calcolare il tempo di ritorno (T_R) relativo all'azione sismica considerata.

Stati limite	P_{VR} : Probabilità di superamento (%)	
Stati limite di esercizio	SLO	81
	SLD	63
Stati limite ultimi	SLV	10
	SLC	5

Figura 46. Probabilità di superamento in funzione dello stato limite.

Il tempo di ritorno viene calcolato mediante la seguente formula:

$$T_R = [-(V_R) / \ln(1-P_{VR})] = [-(C_{UX}V_N) / \ln(1-P_{VR})]$$

Stati limite		T_R in funzione di V_R (Anni)
Stati limite di esercizio	SLO	30 anni $\leq T_R = 0,60V_R$
	SLD	$T_R = V_R$
Stati limite ultimi	SLV	$T_R = 9,50V_R$
	SLC	$T_R = 19,50V_R \leq 2475$ anni

Figura 47. Tabella inerente al calcolo del T_R in funzione del V_R .

Noto il periodo di ritorno T_R dell'azione sismica si possono ricavare i parametri della pericolosità sismica di base (a_g, F_0, T_C^*).

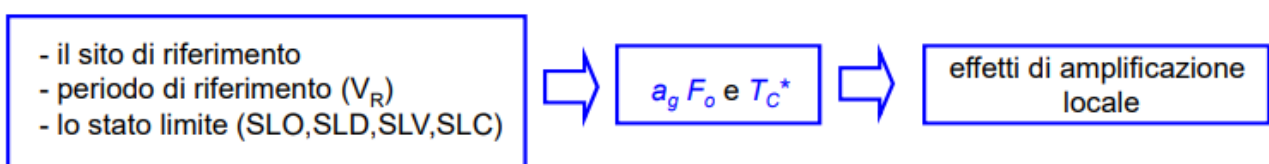


Figura 48. Schema per il calcolo della risposta sismica locale.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Le azioni sismiche di progetto sono calcolate partendo dalla pericolosità sismica di base definita da uno studio condotto dall'INGV (Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia) i cui risultati sono disponibili in rete e liberamente consultabili. Dalla pericolosità sismica di base si ricava la pericolosità sismica locale o risposta sismica locale tenendo conto delle amplificazioni sismiche derivanti dalle condizioni topografiche e stratigrafiche specifiche del sito di costruzione.

La Normativa Tecnica di riferimento (NTC 2018) prescrive due diverse modalità per la valutazione dell'azione sismica sulle costruzioni:

- attraverso l'utilizzo degli spettri di risposta elastici in accelerazione, calcolati sulla base della pericolosità sismica di base definita dall'INGV;
- attraverso l'utilizzo di accelerogrammi spettro-compatibili (storie temporali del moto sismico del terreno), purchè compatibili con la pericolosità sismica di base definita dall'INGV.

Lo spettro di risposta elastico in pseudo-accelerazione è espresso da una forma spettrale (spettro normalizzato) riferita ad uno smorzamento convenzionale pari a $\xi=5\%$, moltiplicata per il valore della accelerazione orizzontale massima (a_g) su sito di riferimento rigido orizzontale (categoria di sottosuolo A e categoria topografica T_1) e condizioni di campo libero. Sia la forma spettrale che il valore dell'accelerazione orizzontale massima (a_g), variano al variare della probabilità di superamento (P_{VR}) nel periodo di riferimento dell'azione sismica considerato ($V_R=V_N \times C_U$).

Gli spettri di risposta elastici vengono definiti in funzione di tre parametri fondamentali (a_g , F_0 , T_C^*) che definiscono la pericolosità sismica di base.

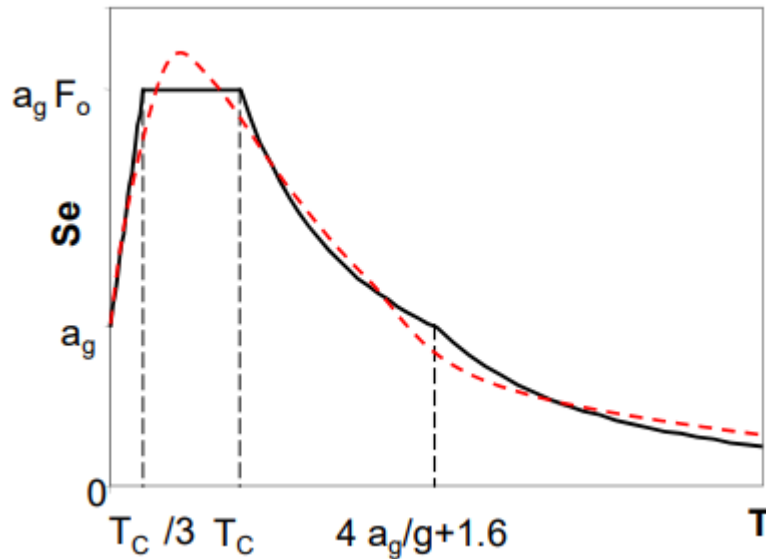


Figura 49. Spettro di risposta elastico in pseudo-accelerazione orizzontale fornito dalle NTC (in nero) e spettro elastico di riferimento (in rosso).

Nella figura sovrastante è possibile distinguere i seguenti parametri:

- S_e = Accelerazione orizzontale spettrale (asse delle ordinate);
- T = Periodo di vibrazione (asse delle ascisse);
- a_g = Accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_0 = Fattore di amplificazione dello spettro di risposta elastico in pseudo-accelerazione orizzontale avente valore minimo pari a 2,2;
- $T_B = T_C/3$ = Periodo di inizio del tratto ad accelerazione costante dello spettro di risposta elastico in pseudo-accelerazione orizzontale, espresso in secondi;
- T_C = Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro di risposta elastico in pseudo-accelerazione orizzontale, espresso in secondi (la formula per il calcolo di tale periodo è la seguente: $T_C = T_C^* \times C_C$, dove T_C^* è il periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in pseudo-accelerazione orizzontale per un terreno di categoria di sottosuolo A e categoria topografica T1, C_C è un coefficiente relativo alla categoria di sottosuolo adottata);
- $T_D = [(4a_g/g)+1,60]$ = Periodo di inizio del tratto a spostamento costante dello spettro di risposta elastico in pseudo-accelerazione orizzontale, espresso in secondi.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Il valore di a_g viene desunto direttamente dalla pericolosità sismica di base (o di riferimento) mentre, i parametri F_0 e T_C^* sono calcolati in modo che gli spettri di risposta elastici in accelerazione, velocità e spostamento forniti dalle NTC 2018 (rappresentato nella figura sovrastante dallo spettro di risposta elastico di colore nero) approssimino al meglio i corrispondenti spettri di risposta elastici di riferimento in accelerazione, velocità e spostamento (rappresentato nella figura sovrastante dallo spettro di risposta elastico di colore rosso).

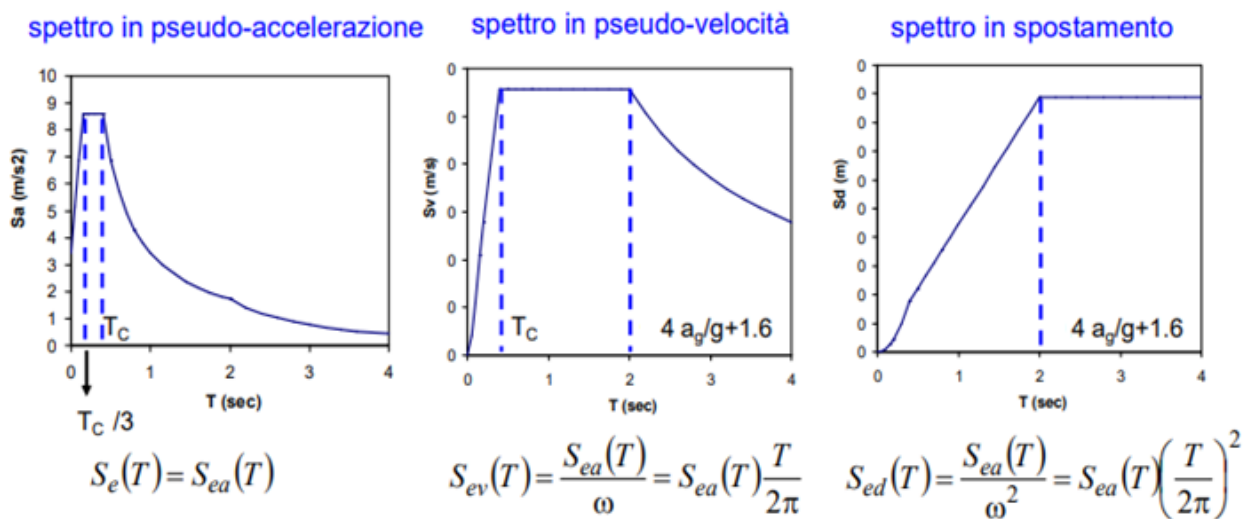


Figura 50. Spettri elastici in pseudo-accellerazione, in pseudo-velocità e in pseudo-spostamento.

Dalla figura sovrastante, è possibile fare due osservazioni importanti:

- La pericolosità sismica di base (o di riferimento) e quindi i parametri a_g , F_0 , T_C^* dipendono dal sito dove sorge la costruzione, dalla probabilità di superamento (P_{VR}) e dal periodo di riferimento dell'azione sismica (V_R) che sono fissati dalla Normativa in base ai diversi stati limite presi in considerazione.
- Poiché la pericolosità sismica di base del sito è definita con riferimento al suolo di categoria A, categoria topografica T_1 e condizioni di campo libero, è necessario valutare l'effetto della pericolosità sismica locale (o risposta sismica locale) legata alla tipologia di sottosuolo e alle condizioni topografiche.

Le condizioni stratigrafiche del volume di terreno interessato dall'opera e le condizioni topografiche determinano una modifica delle onde sismiche in superficie in termini di ampiezza dell'oscillazione, durata e contenuto in frequenza. L'azione sismica che emerge in superficie viene definita ri-

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

sposta sismica locale. Per tener conto delle condizioni stratigrafiche e topografiche, la normativa tecnica definisce cinque categorie di sottosuolo (A, B, C, D, E) e quattro categorie topografiche (T₁, T₂, T₃, T₄).

La categoria di sottosuolo viene determinata sulla base della velocità di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 metri di profondità ($V_{s,30}$) nel sottosuolo.

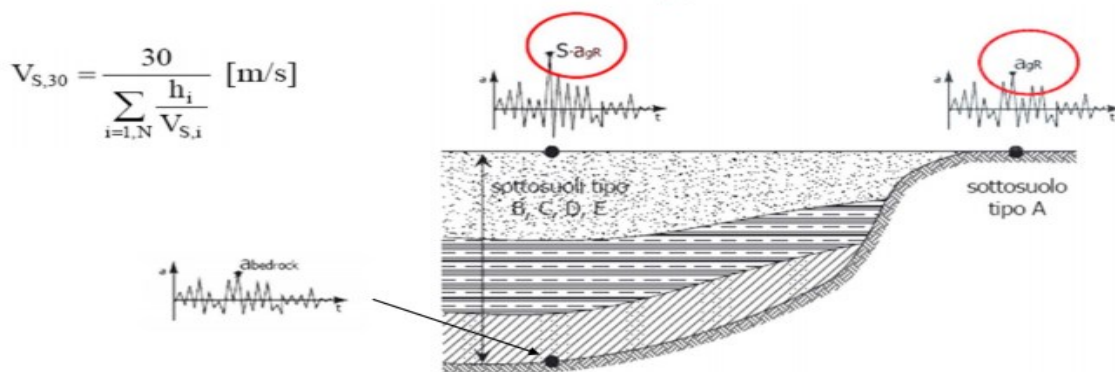


Figura 51. Rappresentazione delle onde di taglio.

Il calcolo della velocità di propagazione delle onde di taglio può essere effettuato mediante la formula seguente:

$$V_{s,30} = [30 / (\sum_i (h_i / V_{s,i}))] \text{ (m/s)}$$

Successivamente per caratterizzare i terreni a grana grossa (sabbie e ghiaie) in maniera più dettagliata, si può effettuare una prova penetrometrica standard o prova penetrometrica dinamica (SPT) che permette di determinare la resistenza penetrometrica dinamica equivalente mediante la determinazione del numero equivalente di colpi $N_{spt,30}$ ($N_{SPT,2} + N_{SPT,3}$, il primo avanzamento viene scartato per limitare gli errori nella misurazione).

Mentre per i terreni a grana fine (limi e argille) si fa riferimento alla resistenza non drenata equivalente $Cu_{,30}$, calcolata mediante la seguente formula:

$$Cu_{,30} = [\sum_i h_i / (h_i Cu_{,i})]$$

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

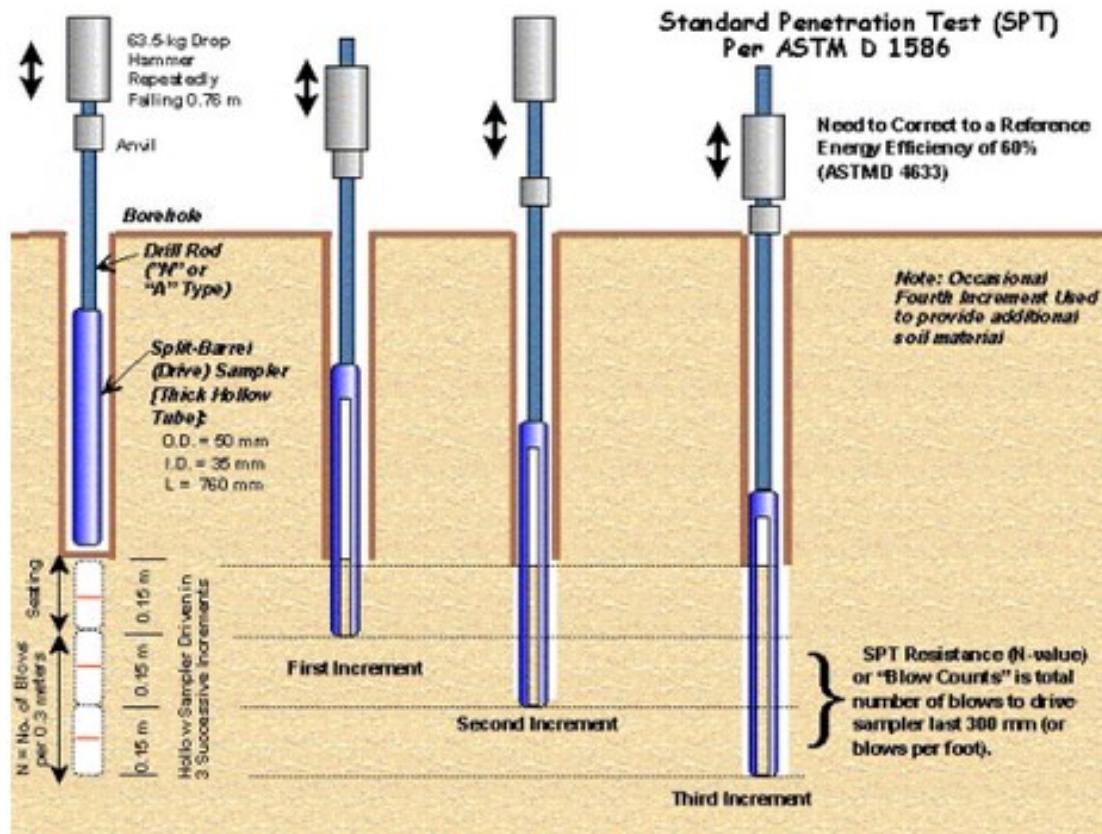


Figura 52. Prova penetrometrica standard o dinamica (SPT).

La velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,30}$ è definita dall'espressione

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s,i}}} \text{ [m/s]}.$$

La resistenza penetrometrica dinamica equivalente $N_{SPT,30}$ è definita dall'espressione

$$N_{SPT,30} = \frac{\sum_{i=1,M} h_i}{\sum_{i=1,M} \frac{h_i}{N_{SPT,i}}}.$$

La resistenza non drenata equivalente $c_{u,30}$ è definita dall'espressione

$$c_{u,30} = \frac{\sum_{i=1,K} h_i}{\sum_{i=1,K} \frac{h_i}{c_{u,i}}}.$$

Nelle precedenti espressioni si indica con:

- h_i spessore (in metri) dell' i -esimo strato compreso nei primi 30 m di profondità;
- $V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;
- $N_{SPT,i}$ numero di colpi N_{SPT} nell' i -esimo strato;
- $c_{u,i}$ resistenza non drenata nell' i -esimo strato;
- N numero di strati compresi nei primi 30 m di profondità;
- M numero di strati di terreni a grana grossa compresi nei primi 30 m di profondità;
- K numero di strati di terreni a grana fina compresi nei primi 30 m di profondità.

Figura 53. Formule relative a $V_{s,30}$, $N_{SPT,30}$, $C_{u,30}$.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Figura 54. Tabella inerente alle categorie di sottosuolo.

Per sottosuoli appartenenti alle ulteriori categorie S1 ed S2 è necessario predisporre specifiche analisi per la definizione delle azioni sismiche, particolarmente nei casi in cui la presenza di **terreni suscettibili di liquefazione** e/o di **argille d'elevata sensibilità** possa comportare fenomeni di collasso del terreno.

Categoria	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.



NTC2018



Cond.
statiche



Cond.
dinamiche

Figura 55. Tabella inerente ai terreni suscettibili di liquefazione e/o di argille d'elevata sensibilità.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

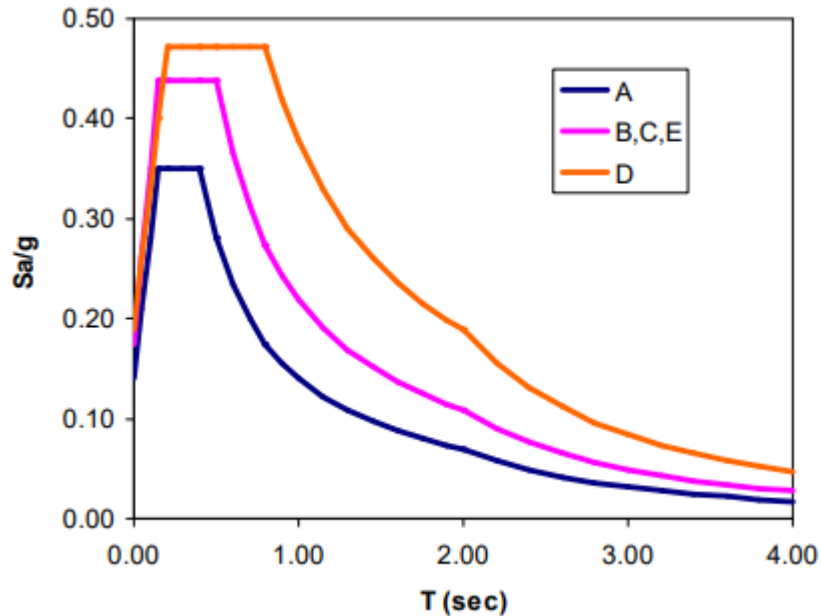


Figura 56. Spettri di risposta elastici a confronto in un terreno di categoria A, B, C, D, E.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Figura 57. Tabella inerente alle categorie topografiche.

Queste categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali (creste o dorsali allungate) e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

Le condizioni topografiche e stratigrafiche influiscono sull'entità dell'azione sismica attraverso il coefficiente S che moltiplica le ordinate dello spettro di risposta. Tale coefficiente è definito nel seguente modo:

$$S = S_S \times S_T$$

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

- S_S = Coefficiente di amplificazione stratigrafica che dipende dalla categoria di sottosuolo e dai parametri F_0 e a_g .
- S_T = Coefficiente di amplificazione topografica che dipende dalla categoria topografica.

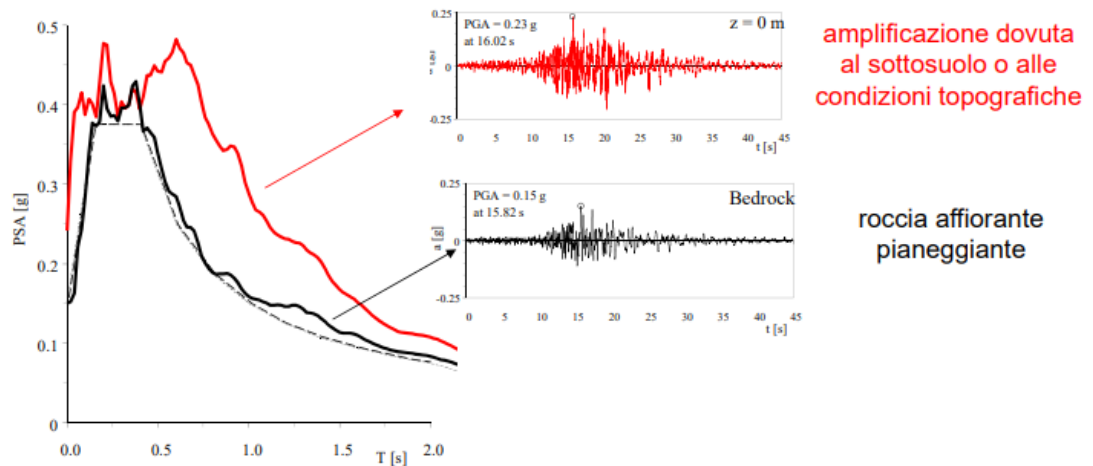


Figura 58. Amplificazione sismica stratigrafica e topografica.

Categoria sottosuolo	S_S	C_C
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

S_T varia linearmente con l'altezza del pendio assumendo alla base $S_T = 1$

Figura 59. Tabella inerente al calcolo dei parametri S_S , C_C , S_T .

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Dopo aver determinato i parametri S_S , C_C (funzione della categoria di sottosuolo), S_T , si procede al calcolo della componente orizzontale dell'azione sismica funzione della pericolosità sismica locale ($S_e(T)$) mediante le seguenti relazioni:

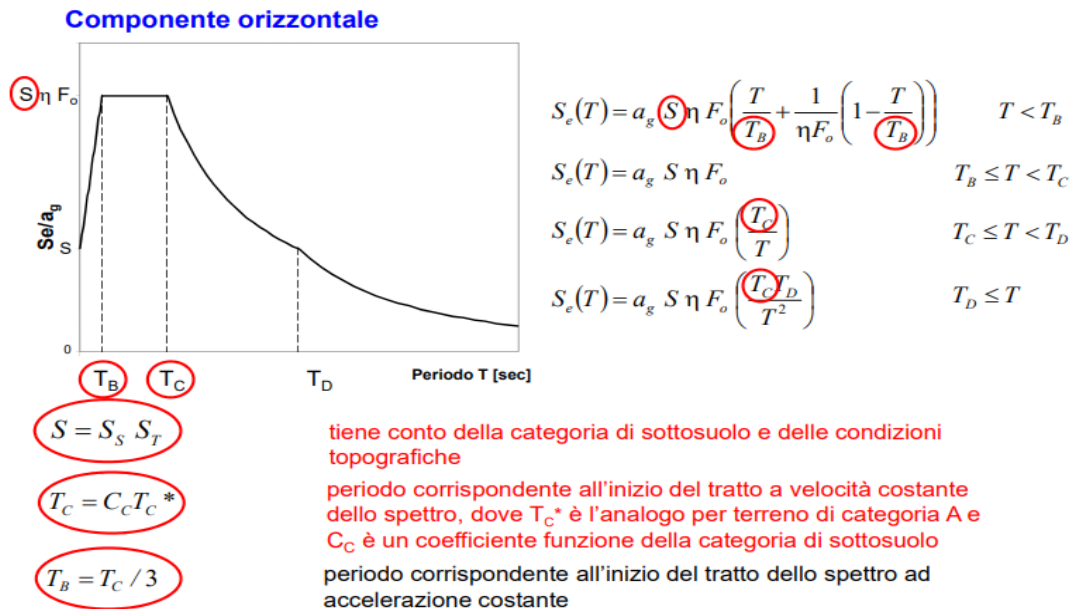


Figura 60. Calcolo della componente orizzontale dell'azione sismica.

Il parametro η altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali ξ diversi dal 5%, mediante la relazione:

$$\eta = [\sqrt{(10/(5+\xi))}] \geq 0.55$$

Il valore di ξ , espresso in percentuale, è valutato sulla base di materiali, tipologia strutturale e terreno di fondazione.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Componente verticale

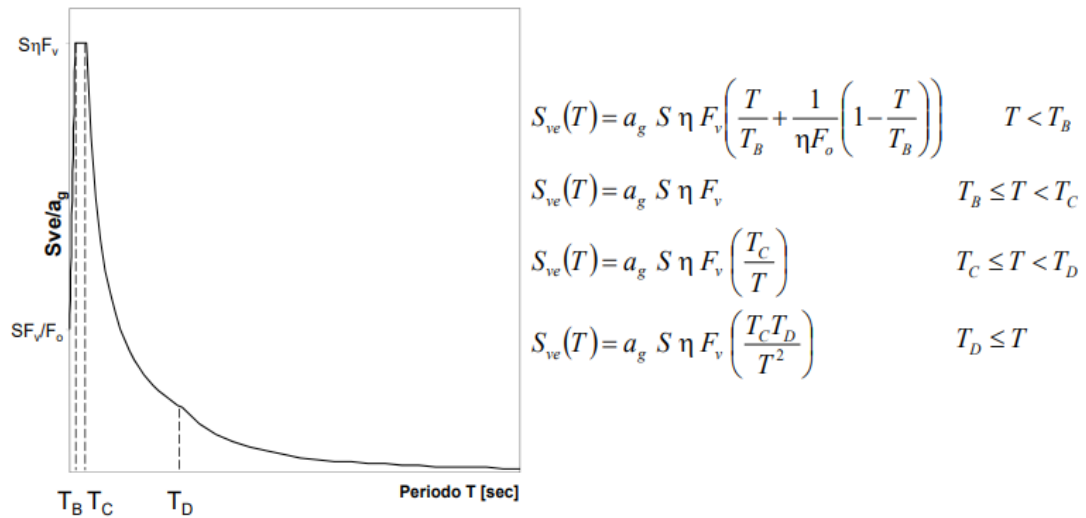


Figura 61. Spettro di risposta elastico relativo alla componente verticale dell'azione sismica.

$$F_v = 1.35 F_o \left(\frac{a_g}{g} \right)^{0.5}$$

quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale

Il fattore di amplificazione S_s si considera indipendente dalla stratigrafia (salvo più accurate determinazioni)

Categoria di sottosuolo	S_s	T_B	T_C	T_D
A, B, C, D, E	1,0	0,05 s	0,15 s	1,0 s

Il coefficiente topografico S_T può essere ricavato dalla stessa tabella valida per la definizione della componente orizzontale

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Figura 62. Parametri per il calcolo della componente verticale dell'azione sismica.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Dal punto di vista delle componenti direzionali, l'azione sismica è definita da tre componenti: due traslazionali (x,y) e una verticale (z).

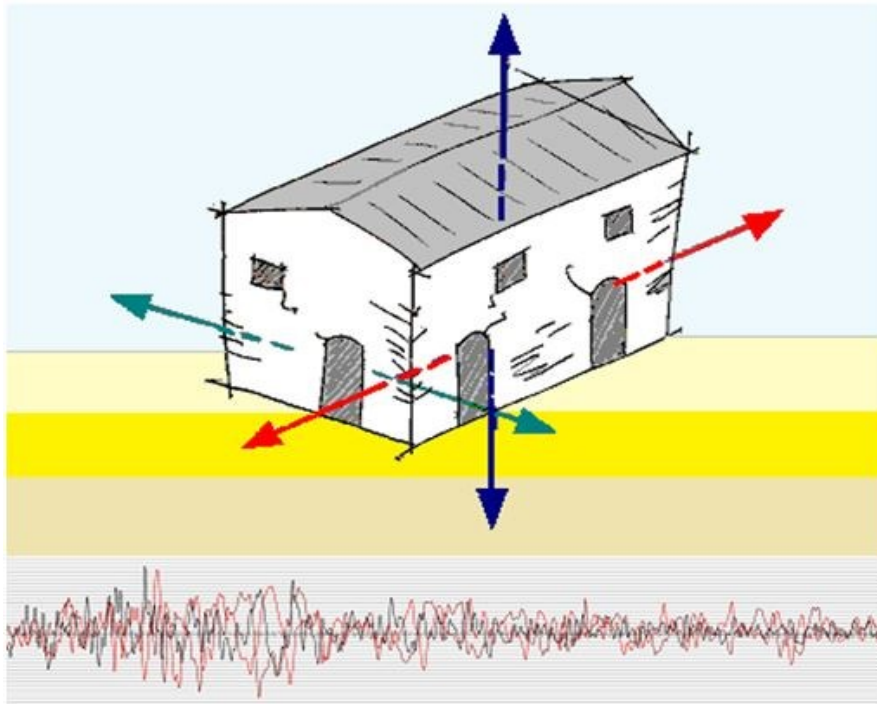


Figura 63. Rappresentazione delle componenti direzionali dell'azione sismica.

Le componenti del sisma vengono definite mediante l'accelerazione massima e il relativo spettro di risposta.

Solitamente, vengono considerate solo le componenti traslazionali (X,Y) del sisma, trascurando la componente verticale (Z).

La componente verticale (Z), invece, va considerata solo se si verifica una o più delle seguenti condizioni:

- presenza di elementi orizzontali di luce superiore a 20 metri;
- elementi precompressi (ad eccezioni di solai con luce inferiore a 8 metri);
- elemento a mensola con luce superiore a 4 metri;
- strutture di tipo spingente (tetti in legno a falde, archi e volte in muratura);
- pilastri in falso;
- edifici con piani sospesi;
- ponti.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

In aggiunta alle condizioni sopra citate, il sito di riferimento dovrà essere caratterizzato da un'accelerazione massima orizzontale al suolo pari a $a_g \geq 0,15g$ (dove g è l'accelerazione di gravità pari a $9,81 \text{ m/s}^2$).

In caso contrario, ovvero se le condizioni sopra esposte non si verificassero, la componente verticale del sisma (z) potrà essere trascurata.

Per quanto riguarda la scelta del fattore di struttura q , relativo alla componente verticale dell'azione sismica può essere assunto pari a $q=1,5$ per qualunque tipologia strutturale e per qualsiasi materiale utilizzato nella costruzione, eccetto che per i ponti dove $q=1$. Il basso valore del fattore di struttura ($q=1$ per i ponti e $q=1,5$ per le restanti tipologie strutturali) associato alla componente verticale dell'azione sismica, è giustificato dalla modesta quantità di energia dissipata durante le oscillazioni verticali delle strutture prese in analisi.

6. Il controllo strutturale

Il tradizionale approccio alla progettazione in zona sismica consiste in una progettazione classica secondo resistenza (forced based design, FBD), ovvero in una valutazione degli stati di sollecitazione indotti dalle azioni sismiche di progetto seguita da un confronto con le sollecitazioni resistenti proprie di ciascuna sezione, in funzione delle caratteristiche dei materiali. In una seconda fase, introducendo i corrispettivi legami costitutivi (sforzi-deformazioni), si procede alla verifica degli stati di deformazione subiti dalla struttura, accertandosi che siano inferiori ai valori previsti dalla normativa vigente.

La ricerca di metodi di analisi in grado di consentire una quantificazione economica dei danni a livello preventivo, ha portato negli ultimi anni allo sviluppo e alla codifica procedurale della cosiddetta progettazione secondo prestazione o in capacità (performance based design, PBD), basata sul rispetto di standard prestazionali predefiniti in funzione del tipo di terremoto e del rischio sismico di riferimento. Questa nuova filosofia di progetto si traduce nel dimensionare gli elementi strutturali in modo tale che, in corrispondenza dei diversi sismi, ciascuno con differente probabilità di verificarsi in un certo sito, la loro risposta fornisca delle prestazioni tali da garantire la salvaguardia delle vite umane e di minimizzare i danni materiali alle opere di ingegneria civile. Durante la progettazione in capacità, si verifica che la resistenza degli elementi fragili sia maggiore o al massimo uguale della resistenza degli elementi duttili moltiplicata per un coefficiente di sovrarresistenza (che tiene conto delle incertezze sul materiale e sul modello di calcolo e varia in funzione dell'elemento strutturale e del tipo di sollecitazione considerata) rispettando così una determinata gerarchia delle resistenze a partire dalle fondazioni, dai nodi, dai pilastri e dalle travi e prevedendo la dinamica dell'eventuale collasso strutturale mediante l'attivazione delle cerniere plastiche (le prime si formeranno alle estremità delle travi), ovvero nelle zone dove si manifestano, in prevalenza, gli effetti della non linearità della struttura presa in considerazione.

Una più moderna ed efficace strategia di prevenzione e mitigazione del rischio sismico è rappresentata dal controllo strutturale. Con tale termine si vuole indicare l'insieme dei concetti e dei dispositivi in grado di modificare la risposta di una struttura soggetta a carichi dinamici brevi ed intensi (di natura sismica e/o aereodinamica), al fine di attenuare le vibrazioni in-

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

dotte su di essa o, addirittura, di opporsi alle forze esterne sollecitanti e di proteggerne lo stato di servizio prestabilito.

Il controllo strutturale viene ottenuto inserendo in maniera opportuna, nella costruzione, dei sistemi ausiliari in grado di modificare, nel più breve intervallo di durata dell'azione dinamica, le caratteristiche strutturali, essenzialmente la rigidezza (k) e lo smorzamento (ξ).

Il controllo strutturale si suddivide in: attivo, passivo e semi-attivo.

La più recente tipologia di controllo strutturale, è senza dubbio rappresentata dai sistemi di controllo semi-attivi. I sistemi di controllo semi-attivi, rappresentano un compromesso fra un sistema di controllo attivo ed uno passivo. Essi mantengono l'affidabilità e la sicurezza dei sistemi di controllo passivi, pur sfruttando le caratteristiche dei parametri regolabili di un sistema di controllo attivo (elevata efficacia prestazionale). I sistemi di controllo semi-attivi includono dispositivi di controllo della rigidità, smorzatori elettoreologici (variazione della resistenza tangenziale al flusso del fluido in funzione della variazione del campo elettrico), smorzatori magnetoreologici (variazione della resistenza tangenziale al flusso del fluido in funzione della variazione del campo magnetico), dispositivi di controllo dell'attrito (che sfruttano l'attrito tra due superfici di un dispositivo per dissipare l'energia sismica), smorzatori con fluidi viscosi (che sfruttano la viscosità del fluido per dissipare l'energia sismica), smorzatori a massa accordata (o tuned mass damper, che accordano una massa solida esterna, come un blocco di calcestruzzo, al moto di vibrazione della struttura, smorzando l'energia in ingresso) e smorzatori liquidi accordati (o tuned liquid damper, che accordano una massa liquida, come un serbatoio pieno d'acqua, al moto di vibrazione della struttura, smorzando l'energia in ingresso).

Un tutorial sui concetti e le applicazioni del controllo strutturale sismico è stato recentemente preparato da un gruppo americano adibito alla ricerca su questi particolari temi innovativi, fornendo un eccellente riferimento per gli ingegneri e gli architetti di tutto il mondo. In tali ricerche, è emerso che il sistema di controllo e la struttura, non si comportano come sistemi dinamici indipendenti ma, piuttosto, interagiscono tra loro. Questa interazione controllo-struttura è indicata nella figura sottostante dalla linea tratteggiata tra il sistema di controllo e la struttura. Inoltre, gli effetti di interazione si verificano anche tra l'eccitazione e la struttura (cioè l'interazione suolo-struttura) e tra i sensori e la struttura (solitamente trascurabile in quanto fornisce un effetto minore).

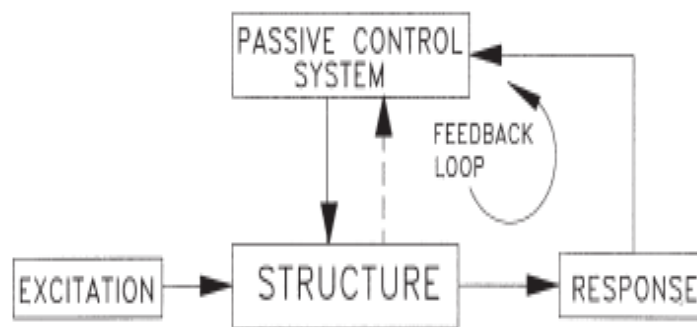


Figura 64. Esempio di interazione struttura-sistema di controllo passivo indicato dalla linea tratteggiata.

6.1 Il controllo attivo

Un sistema di controllo attivo può essere definito come un sistema che richiede tipicamente una grande fonte di energia per il funzionamento di attuatori elettroidraulici o elettromeccanici, che forniscono forze di controllo in controfase rispetto allo spostamento della struttura in esame.

Tali forze di controllo, generate dagli attuatori sopra citati, si basano su informazioni di feedback della struttura (risposta strutturale) e/o informazioni feedforward dall'eccitazione esterna (previsione strutturale). Le misure registrate dalla risposta e/o dall'eccitazione sono monitorate da un controllore (un computer) che, sulla base di un algoritmo di controllo predeterminato, determina il segnale di controllo appropriato per il funzionamento degli attuatori. La generazione di forze di controllo da parte di attuatori elettroidraulici e/o elettromeccanici richiede grandi fonti di energia, che sono dell'ordine di 10kW per piccole strutture e possono raggiungere diversi megawatt (1MW=1000W) per grandi strutture.

Per poter spiegare i principi base di funzionamento di un sistema di controllo attivo, si sceglie di considerare un semplice sistema strutturale caratterizzato da un solo grado di libertà (sistema SDOF), costituito da una massa m , da una molla ad elasticità lineare e di rigidità k e da uno smorzatore con coefficiente di smorzamento c . Questo sistema SDOF viene sottoposto ad un carico sismico attraverso una accelerazione del terreno data da $x''_g(t)$ all'istante t . Il modello eccitato, schematizzato nella figura sottostante, risponde con uno spostamento $x(t)$ rispetto al terreno, che soddisfa l'equazione di equilibrio dinamico o del moto del sistema:

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = -mx''_g(t)$$

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

dove $x(t)$ è lo spostamento all'istante t , $x'(t)$ è la velocità all'istante t , $x''(t)$ è l'accelerazione all'istante t , m è la massa del sistema, c è il coefficiente di smorzamento del sistema, k è la rigidezza del sistema e $x''_g(t)$ è l'accelerazione del terreno all'istante t .

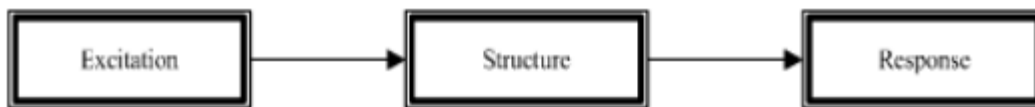


Figura 65. Schema di una struttura eccitata da una sollecitazione sismica.

Ora, per un sistema di controllo attivo, l'equazione del moto diventa:

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = -mu(t) - mx''_g(t)$$

dove $x(t)$ è lo spostamento all'istante t , $x'(t)$ è la velocità all'istante t , $x''(t)$ è l'accelerazione all'istante t , m è la massa del sistema, c è il coefficiente di smorzamento del sistema, k è la rigidezza sistema, $u(t)$ è la forza di controllo all'istante t esplicita dal dispositivo attivo e $x''_g(t)$ è l'accelerazione del terreno all'istante t .

Si espone ora lo schema di un controllo strutturale attivo:

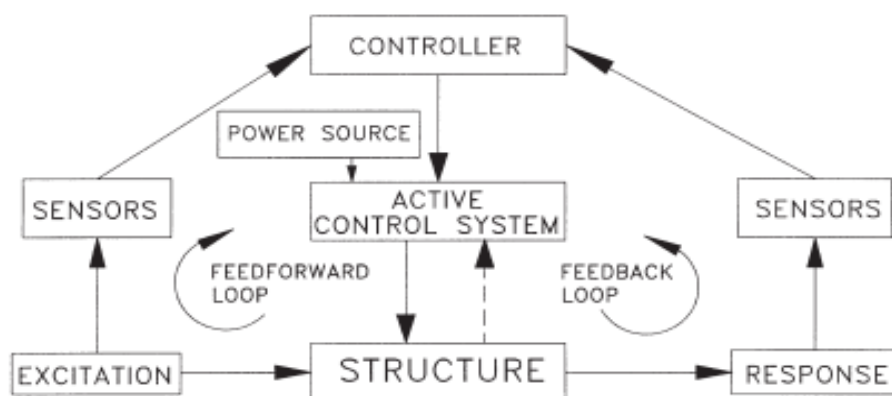


Figura 66. Schema di un controllo strutturale attivo.

Tuttavia, esistono anche degli aspetti delicati da tenere in considerazione, quando si sceglie di utilizzare questi sistemi di controllo strutturale. Questi

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

aspetti, ci permettono di ottimizzare il nostro sistema di controllo garantendo degli standard di sicurezza molto elevati.

Il primo aspetto molto delicato del controllo attivo è la differenza di fase esistente tra la dinamica degli attuatori e la dinamica della struttura. In tutti i circuiti di controllo, infatti, tra l'elaborazione e l'emissione del segnale elettrico da parte della centralina e l'azionamento degli attuatori intercorre un certo lasso di tempo. Se questo ritardo è tale da innescare inversioni di fase delle forze, il sistema diventa instabile, ossia viene fornita energia alla costruzione anziché dissiparla o attenuarla. Pertanto si cercherà di assegnare un'adeguata rigidità di base alla struttura al fine di evitare eventuali danni provocati dall'applicazione del sistema di controllo attivo.

L'eventuale gap relativo al ritardo di segnale può essere limitato effettuando delle regolari manutenzioni sui dispositivi elettronici.

Il secondo aspetto altrettanto delicato per il controllo attivo è la necessità di un'elevata energia esterna per la loro attivazione (circa 10kW per piccole strutture fino a diversi megawatt per grandi strutture), rendendo tali sistemi poco economici. Per pro, l'elevato dispendio energetico richiesto da questi sistemi di controllo, bilancia la possibilità di fronteggiare gli eventuali sismi più disastrosi, in quanto, si hanno a disposizione forze di controllo di entità elevate.

Il terzo ed ultimo aspetto da tener in considerazione è la necessità di avere continuità di corrente elettrica, in quanto, nell'ipotesi avvenga un eventuale black out elettrico, dovuto ad un importante evento sismico, il sistema di controllo attivo risulterebbe fuori uso creando gravi disagi alla struttura in esame. Tale aspetto, può essere limitato, inserendo nel sistema una batteria di alimentazione di riserva esplicita da un generatore di corrente elettrica e/o da un impianto fotovoltaico ben progettato.

Una panoramica del controllo strutturale attivo è fornita da Soong et al., Fujino et al., ATC, IASC. Tale tecnica, è stata utilizzata in varie parti del mondo, ad esempio, in Giappone, nella Shinjuku Park Tower e nel Kyobashi Seiwa Building di Tokyo. In entrambi gli edifici si è installato un sistema di controllo attivo detto a massa smorzante attiva (o active mass damper o AMD) avente l'obiettivo di ridurre le ingenti vibrazioni strutturali causate dall'azione del vento o dalle eventuali sollecitazioni sismiche.

Ad esempio, il Kyobashi Seiwa Building di Tokyo, si presenta come una struttura particolare, infatti, si sviluppa su 11 piani ma ha una quadratura totale di soli 423m². Il dispositivo di controllo attivo è costituito da due masse attive, la prima di 4t (t=tonnellate) si occupa di ridurre il moto tra-

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

sversale dell'edificio, mentre, la seconda di 1t si occupa di ridurre il suo moto torsionale. Pertanto, la massa totale del sistema AMD, installato nel Kyobashi Seiwa Buiding, è quindi di 5t, pari all'1,25% della massa totale dell'intero edificio equivalente a 400t.



Figura 67. Applicazione di un sistema di controllo attivo a massa smorzante controllata nel Shinjuku park tower di Tokio.

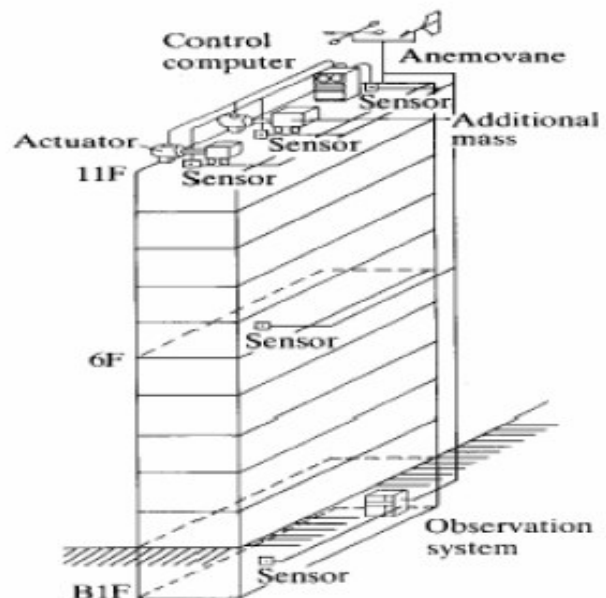


Figura 68. Applicazione di un sistema di controllo attivo a massa smorzante controllata nel Kyobashi Seiwa Building di Tokyo.

6.2 Il controllo passivo

Il controllo strutturale passivo rappresenta tutti i sistemi di protezione dalle vibrazioni che non necessitano di energia esterna per essere operativi. Il loro funzionamento si basa sul moto proprio della struttura, secondo una tipica strategia di controllo a ciclo aperto: le deformazioni strutturali vengono utilizzate per sviluppare il controllo delle forze agenti, attraverso moti relativi o conversione dell'energia in calore. I dispositivi supplementari di dissipazione dell'energia possono assumere molte forme e dissipare l'energia attraverso una varietà di meccanismi tra cui lo snervamento dell'acciaio dolce, l'azione viscoelastica nei materiali simili alla gomma, il taglio di un fluido viscoso, l'orifizio del fluido e l'attrito fra due superfici. Per poter spiegare i principi base di funzionamento di un sistema di controllo passivo, si sceglie di considerare un semplice sistema strutturale caratterizzato da un solo grado di libertà (sistema SDOF), costituito da una massa m , da una molla ad elasticità lineare e di rigidità k e da uno smorzatore con coefficiente di smorzamento c . Questo sistema SDOF viene sottoposto ad un carico sismico attraverso una accelerazione del terreno data da $x''_g(t)$ all'istante t . Il modello eccitato, schematizzato nella figura sottostante, risponde con uno spostamento $x(t)$ rispetto al terreno, che soddisfa l'equazione di equilibrio dinamico o del moto del sistema:

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = - mx''_g(t)$$

dove $x(t)$ è lo spostamento all'istante t , $x'(t)$ è la velocità all'istante t , $x''(t)$ è l'accelerazione all'istante t , m è la massa del sistema, c è il coefficiente di smorzamento del sistema, k è la rigidità del sistema e $x''_g(t)$ è l'accelerazione del terreno all'istante.

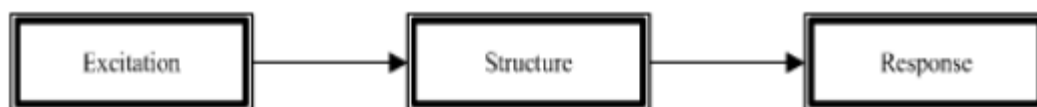


Figura 69. Schema di una struttura eccitata da una sollecitazione sismica.

Ora, per un sistema di controllo passivo, l'equazione del moto diventa:

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) + \Gamma x(t) = - (m + m^*) \ddot{x}_g(t)$$

dove $x(t)$ è lo spostamento all'istante t , $\dot{x}(t)$ è la velocità all'istante t , $\ddot{x}(t)$ è l'accelerazione all'istante t , m è la massa del sistema, c è il coefficiente di smorzamento del sistema, k è la rigidità del sistema, Γ è un generico operatore integro-differenziale, $\Gamma x(t)$ è la forza di risposta smorzante esplicita dal dispositivo passivo all'istante t ($F=cV^\alpha$), m^* è la massa del dispositivo di dissipazione passiva (ovvero la massa del PED=passive energy dissipation, la quale risulta molto minore rispetto alla massa generale del sistema strutturale, $m^* \ll m$) e $\ddot{x}_g(t)$ è l'accelerazione del terreno all'istante t .

Il termine $\Gamma x(t)$, ovvero la forza esplicita dal dispositivo passivo all'istante t , modifica le proprietà strutturali del sistema, con l'obiettivo di ottenere una migliore risposta alle sollecitazioni dinamiche, prodotte dal movimento del suolo; inoltre la specifica forma di $\Gamma x(t)$ dipende dal tipo di dispositivo passivo adottato.

Si espone ora lo schema di un controllo strutturale passivo:

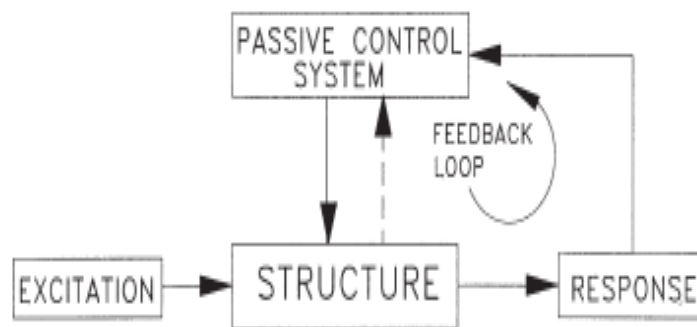


Figura 70. Schema di un controllo strutturale passivo.

L'isolamento sismico e la dissipazione di energia sono le due tecniche di controllo strutturale passivo che negli ultimi anni hanno trovato maggiore applicazione nel campo dell'ingegneria civile. L'isolamento sismico prevede l'interposizione tra la struttura e la fondazione di elementi aventi bassa rigidità in direzione orizzontale (isolatori elastomeri, a scorrimento e metallici a rotolamento), al fine di disaccoppiare il moto del terreno da quello della sovrastruttura (la struttura si sposta di moto rigido) e deflettere l'energia sismica in ingresso.



Figura 71. Deformata di un edificio fisso alla base (a sinistra) e con isolamento sismico (a destra).

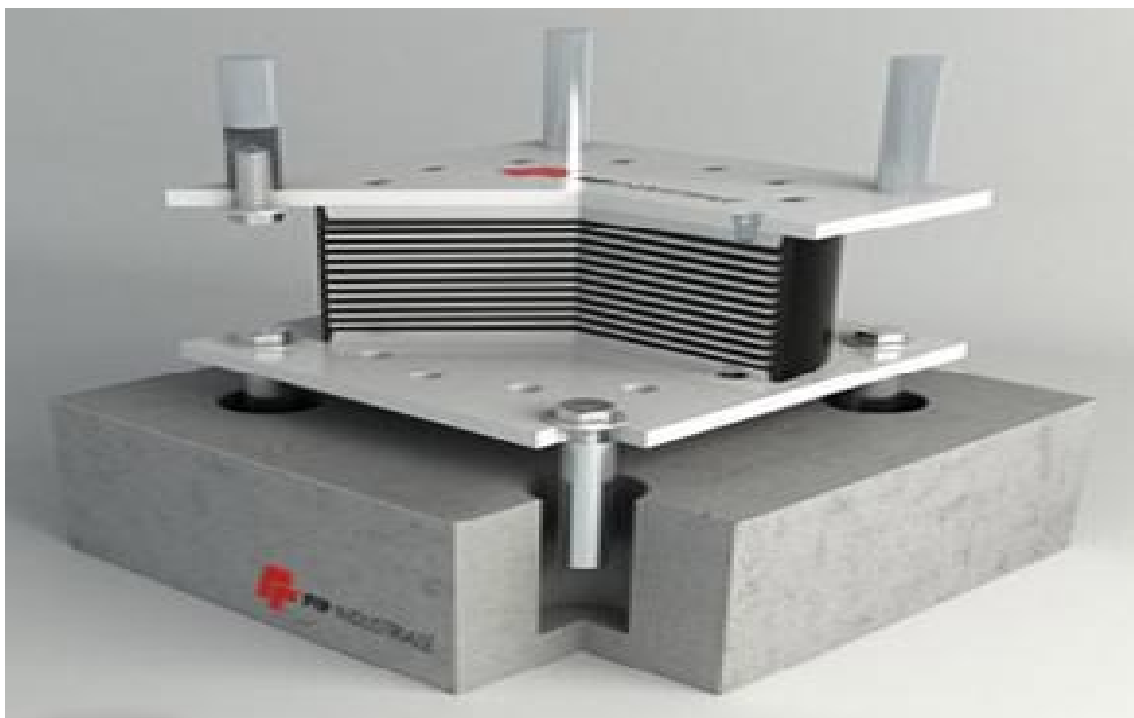


Figura 72. Isolatore elastomero alla base della struttura.

La dissipazione di energia, invece, consiste nell'inserire nella struttura degli elementi (solitamente dei controventi) in grado di dissipare per isteresi del materiale (caratteristica di un sistema di reagire in ritardo alle sollecitazioni applicate e in dipendenza dello stato precedente), per attrito tra superfici a contatto o per il comportamento viscoso di fluidi, gran parte

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Pagina 68

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

dell'energia ceduta dal sisma alla struttura. I dissipatori (o smorzatori) a fluido viscoso possono essere installati sia in strutture a base fissa che isolate. Essi possono garantire un livello di smorzamento viscoso equivalente superiore al 50% rispetto ad una classica struttura, permettendo di controllare la forza di reazione (in funzione del dispositivo scelto) e di limitare fortemente le sollecitazioni nella struttura in caso di terremoti di elevata intensità. Questi dispositivi garantiscono una risposta stabile nell'intervallo di velocità di progetto (V); per movimenti lenti essi reagiscono trasmettendo una forza di modesta intensità oppure rimangono bloccati fino al raggiungimento di una forza predefinita. Questi dispositivi possono essere impiegati anche per smorzare le vibrazioni dovute al vento (azione considerata prevalentemente orizzontale) in strutture di elevata altezza, prevenendo eventuali danni agli elementi strutturali ed incrementando i comfort degli occupanti.

I dissipatori a fluido viscoso sono essenzialmente costituiti da un cilindro riempito con fluido avente elevata viscosità detto "siliconico" e da un pistone che collega due camere, libero di muoversi in entrambe le direzioni. La dissipazione di energia avviene tramite la resistenza tangenziale del fluido nel circuito idraulico.

La tipica legge di risposta del dissipatore viscoso (VD) è la seguente:

$$F = c V^{\square}$$

dove:

F = Forza di smorzamento (o di risposta) del dissipatore viscoso (kN);

c = Costante di dissipazione del dissipatore viscoso funzione del dispositivo passivo adottato (kN/m*s);

V = Velocità di progetto (m/s);

\square = Esponente della velocità funzione del tipo di dissipatore viscoso (tipicamente $0.1 < \square < 1$).

I dispositivi viscosi sono compatti, permettono un'ampia casistica di connessioni alla struttura e dissipano una grande quantità d'energia. Il risultato è quindi una maggior sicurezza ed affidabilità delle opere ingegneristiche, garantendo la completa funzionalità anche in seguito ad eventi di ele-

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

vata intensità. I dissipatori viscosi riducono gli sforzi e le deformazioni poichè la forza di smorzamento esplicita dal dispositivo (F), funzione della velocità di progetto, è in controfase con gli sforzi (principalmente dovuti agli spostamenti relativi). Considerando una struttura durante il terremoto, lo sforzo è massimo quando gli elementi resistenti raggiungono lo spostamento massimo. Raggiunto lo spostamento massimo, il moto si inverte ($V=0$) per ritornare verso la posizione iniziale. Di conseguenza, la velocità aumenta fino a raggiungere il suo valore massimo, dove coincide anche la forza di smorzamento massima esplicita dal dissipatore viscoso ($F=cV^\alpha$). Questo comportamento, quindi, permette di minimizzare gli sforzi e di attenuare le vibrazioni della struttura.

La risposta dei dissipatori viscosi è modellabile in molti software che permettono l'analisi del comportamento dinamico delle strutture, mediante elementi "ad hoc" capaci di implementare la legge di funzionamento dello smorzatore ($F=cV^\alpha$). Effettuando l'analisi dinamica non lineare della struttura (ovvero l'analisi più precisa che la normativa vigente prescrive di eseguire), mediante la modellazione dell'azione sismica del terreno attraverso le storie temporali del moto sismico (time histories o accelerogrammi), si riesce a valutare il beneficio fornito dai dispositivi viscosi, in termini di forze-spostamenti, ovvero forze di smorzamento e spostamenti di progetto di quest'ultimi.

Per il progetto di un dissipatore viscoso, sono necessari dei dati di input che il progettista strutturale (ingegnere, architetto) deve fornire alla ditta produttrice.

I dati di input sono i seguenti:

- F = Forza massima di smorzamento del dissipatore viscoso (calcolata mediante l'analisi dinamica non lineare).
- du_{\max} = Massimo spostamento di progetto (dinamico più statico dovuto alla variazione di temperatura, ai fenomeni irreversibili quali il creep, il ritiro ecc. e calcolato mediante l'analisi dinamica non lineare).
- Spazio disponibile per l'installazione del dispositivo.
- $F=cV^\alpha$ = Legge di risposta del dissipatore viscoso.

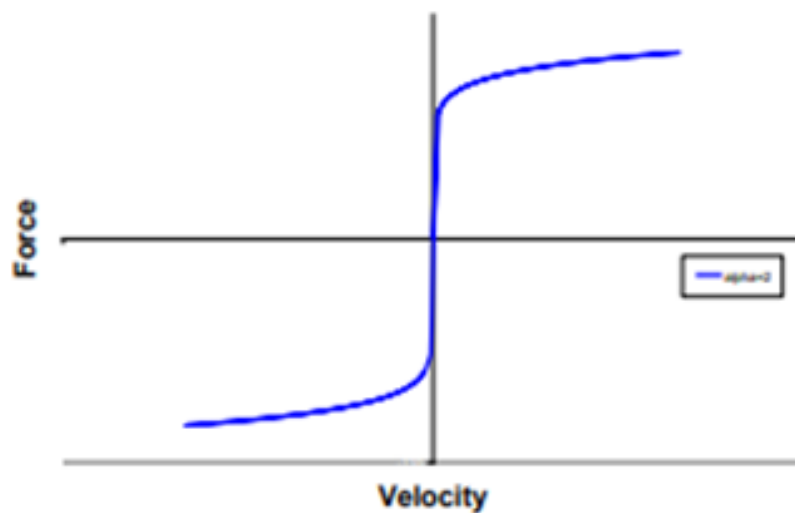


Figura 73. Legge di risposta di uno smorzatore viscoso passivo (VD) nel piano forza-velocità.



Figura 74. Smorzatore viscoso passivo.

Rispetto ai dissipatori viscosi lineari ($\alpha=1$), quelli non lineari ($\alpha \neq 1$), offrono, a parità di forza di smorzamento massima (F) e spostamento massimo (du_{\max}), una maggiore capacità dissipativa.

Questa caratteristica è evidenziata dal grafico sottostante, dove è possibile osservare che il ciclo di isteresi forza-spostamento di un dissipatore viscoso non lineare, presenta un'area maggiore e quindi una maggior dissipazione di energia ($\alpha=0.15$ ed area di colore blu), rispetto a quella correlata ai dissipatori viscosi lineari ($\alpha=1$ ed area di colore rosso).

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

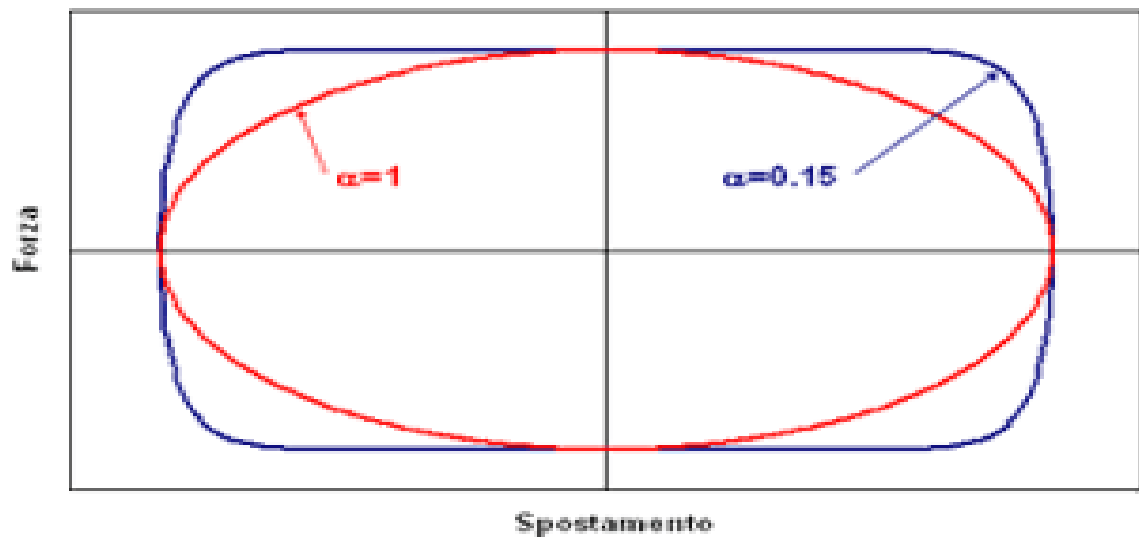


Figura 75. Confronto tra un ciclo di isteresi forza-spostamento di uno smorzatore viscoso lineare (in rosso) e non lineare (in blu).



Figura 76. Applicazione di controventi dissipativi su una struttura.

6.3 Il controllo semi-attivo

Un sistema di controllo semi-attivo può essere definito come un sistema che tipicamente richiede una piccola fonte di energia esterna per il funzionamento (per esempio una semplice batteria da 10W) e utilizza il movimento della struttura per sviluppare le forze di controllo, la cui grandezza può essere regolata dalla fonte di energia esterna. I sistemi di controllo semi-attivo sono stati considerati solo molto recentemente per applicazioni di controllo strutturale. Un sistema di controllo semi-attivo ha generalmente origine da un sistema di controllo passivo che è stato successivamente modificato per consentire la regolazione delle proprietà meccaniche come la rigidità (k) e lo smorzamento (ξ). Pertanto, possiamo definirlo come un'evoluzione del controllo strutturale passivo. Per esempio, i classici dispositivi di dissipazione dell'energia mediante il taglio del fluido viscoso (shear strain), l'orifizio del fluido (apertura e chiusura mediante un'elettrovalvola) o l'attrito di scorrimento, sono stati modificati per comportarsi in modo semi-attivo. Le proprietà meccaniche di questi sistemi possono essere regolate in base al feedback della struttura (risposta strutturale) o in base al feedforward dall'eccitazione esterna (previsione strutturale). Come in un sistema di controllo attivo, sono presenti degli attuatori, dei sensori, un circuito elettrico ed un controllore (un computer) che monitora ed elabora le misure di feedback e di feedforward, generando un segnale di comando appropriato da inviare agli attuatori del sistema di controllo. Analogamente, come per un sistema di controllo passivo, le forze di controllo vengono sviluppate come risultato del movimento della struttura stessa, con la peculiarità di effettuare una regolazione appropriata (basata su un determinato algoritmo di controllo gestito dal computer) delle principali proprietà meccaniche (rigidità e smorzamento). Tali forze di controllo, agiscono principalmente per opporsi al movimento del sistema strutturale, garantendo la stabilità globale della struttura. Come abbiamo già detto, i sistemi di controllo semi-attivi, richiedono, generalmente, una piccola quantità di potenza esterna per il loro funzionamento, dell'ordine di circa 10W, permettendo così un risparmio in termini di fabbisogno energetico, rispetto ai classici sistemi di controllo attivi, dove l'energia richiesta va da 10kW per piccole strutture a diversi MW per grandi strutture. I sistemi di controllo semi-attivi sono stati proposti già dal 1920, da Ivers, Miller e Karnopp, in campo dell'ingegneria meccanica, quando furono rilasciati i primi brevetti per gli ammortizzatori, che utilizzavano una massa supportata elasticamente per azionare una valvola

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

idraulica (nessuna potenza richiesta) o utilizzavano un'elettrovalvola per dirigere il flusso del fluido (piccola quantità di potenza richiesta).

Per poter spiegare i principi base di funzionamento di un sistema di controllo semi-attivo, si sceglie di considerare un semplice sistema strutturale caratterizzato da un solo grado di libertà (sistema SDOF), costituito da una massa m , da una molla ad elasticità lineare e di rigidezza k e da uno smorzatore con coefficiente di smorzamento c . Questo sistema SDOF viene sottoposto ad un carico sismico attraverso una accelerazione del terreno data da $x''_g(t)$ all'istante t . Il modello eccitato, schematizzato nella figura sottostante, risponde con uno spostamento $x(t)$ rispetto al terreno, che soddisfa l'equazione di equilibrio dinamico o del moto del sistema:

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = - mx''_g(t)$$

dove $x(t)$ è lo spostamento all'istante t , $x'(t)$ è la velocità all'istante t , $x''(t)$ è l'accelerazione all'istante t , m è la massa del sistema, c è il coefficiente di smorzamento del sistema, k è la rigidezza del sistema e $x''_g(t)$ è l'accelerazione del terreno all'istante t .

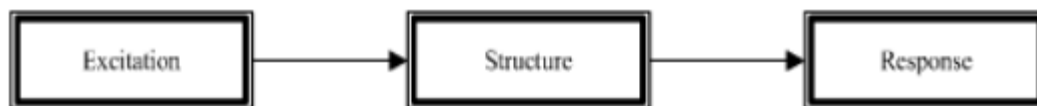


Figura 77. Schema di una struttura eccitata da una sollecitazione sismica.

Ora, per un sistema di controllo semi-attivo, l'equazione del moto diventa:

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) + \Gamma x(t) = - (m + m^*) x''_g(t)$$

dove $x(t)$ è lo spostamento all'istante t , $x'(t)$ è la velocità all'istante t , $x''(t)$ è l'accelerazione all'istante t , m è la massa del sistema, c è il coefficiente di smorzamento del sistema, k è la rigidezza del sistema, Γ è un generico operatore integro-differenziale, $\Gamma x(t)$ è il termine che si occupa della variazione delle proprietà meccaniche della struttura all'istante t , come la rigidezza e lo smorzamento, da parte degli attuatori, in funzione delle sollecitazioni esterne applicate (nei sistemi di controllo passivi, invece, il termine $\Gamma x(t)$ è funzione della tipologia di dispositivo passivo scelto), m^*

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

è la massa del dispositivo di dissipazione passivo ($m^* \ll m$) e $\ddot{x}_g(t)$ è l'accelerazione del terreno all'istante t .

Pertanto, l'equazione del moto per i sistemi di controllo semi-attivi è analoga a quella dei sistemi passivi, con la differenza nel termine $\square x(t)$.

Si espone ora lo schema di un controllo strutturale semi-attivo:

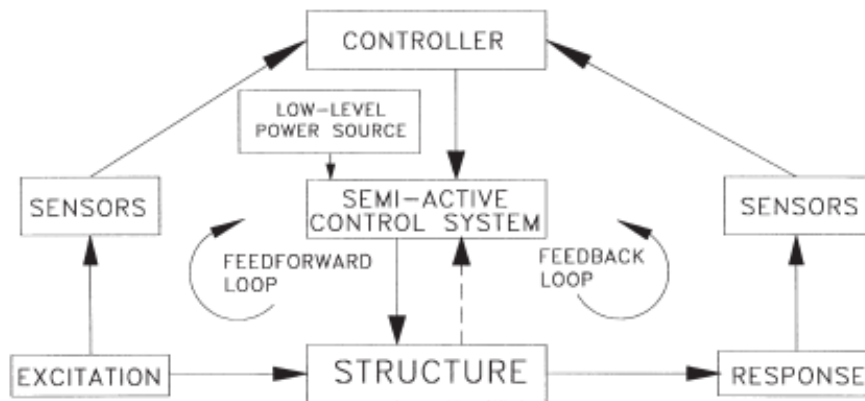


Figura 78. Schema di un controllo strutturale semi-attivo.

Nel campo dell'ingegneria strutturale, la prima applicazione del controllo strutturale semi-attivo, per sistemi soggetti a carichi ambientali (vento e/o sisma), sembra essere stata proposta da Hrovat et al. nel 1983 e da Spencer negli Stati Uniti. I sistemi di controllo semi-attivi esaminati, includono dispositivi di controllo della rigidità, smorzatori elettroreologici, smorzatori magnetoreologici, dispositivi di controllo dell'attrito, smorzatori a fluidi viscosi, smorzatori a massa accordata (tuned mass damper o TMD) e smorzatori liquidi accordati (tuned liquid damper o TLD).

Si espongono ora i principali sistemi di controllo semi-attivi:

- Dispositivi di controllo della rigidità. I dispositivi di controllo semi-attivi della rigidità sono utilizzati per modificare la rigidità e quindi le caratteristiche di vibrazione naturale della struttura a cui sono fissati. Tali sistemi sono stati studiati per il controllo della risposta sismica da Kobori et al., Nemir et al., Loh e Ma, Yamada e Kobori, Yang et al. e Nagarajaiah. Il sistema di controllo semi-attivo della rigidità, proposto da Kobori et al., monitora principalmente la rigidità di un edificio per stabilire una condizione non risonante durante i terremoti. La risonanza è un fenomeno fisico che avviene

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

quando la frequenza propria di vibrazione della struttura uguaglia quella delle onde sismiche del terreno causando un'amplificazione del moto sismico ($\omega_{\text{struttura}} = \omega_{\text{terreno}}$). I dispositivi di rigidità semi-attivi sono inseriti o rilasciati in modo da includere o non includere, rispettivamente, la rigidità del sistema di controventamento della struttura. La figura sottostante mostra uno schema del dispositivo di rigidità semi-attivo in una disposizione di controventatura a chevron (o a "V rovescia"). Il dispositivo è composto da un sistema idraulico cilindro-pistone regolato da un'elettrovalvola di controllo, normalmente chiusa (elevata rigidità), inserita nel tubo che collega le due camere del cilindro. L'elettrovalvola può essere accesa o spenta, aprendo o chiudendo così, rispettivamente, il percorso del flusso del fluido attraverso il tubo. Quando la valvola è chiusa, vi è un aumento di rigidità, in quanto, il fluido non può scorrere e blocca efficacemente la trave ai controventi sottostanti. Al contrario, quando la valvola è aperta (bassa rigidità), vi è una riduzione di rigidità, in quanto, il fluido scorre liberamente e disinnesta il collegamento tra la trave ed i controventi sottostanti. Il funzionamento di ogni dispositivo eroga una potenza pari a 20W. I dispositivi di controllo della rigidità semi-attivi sono stati installati all'interno dei controventi a chevron (o a "V rovescia") di una struttura in acciaio a tre piani in scala reale a Tokyo, in Giappone. Sono state utilizzate tre diverse configurazioni di rigidità: controventi sbloccati, controventi bloccati solo nel primo piano e controventi bloccati in tutti i piani. La frequenza naturale ($\omega = 2\pi/T = 2\pi\sqrt{k/m}$) del primo modo di vibrare con i sostegni sbloccati è di 1Hz (periodo $T=1s$ e massima flessibilità della struttura), mentre quella con i controventi bloccati a tutti i piani è di 2,5Hz (periodo $T=1/2,5=0,4s$ e massima rigidità della struttura). È stato sviluppato un algoritmo di controllo, gestito da un computer, che utilizza informazioni feedforward (previsione strutturale) inerenti all'accelerazione misurata alla base della struttura mediante l'utilizzo di particolari sensori accelerometrici. Tali sensori, utilizzano l'accelerazione misurata alla base della struttura per stimare la sua risposta nelle tre diverse configurazioni di rigidità prese in esame. Ad ogni passo temporale dell'analisi, viene determinata la configurazione di rigidità che fornisce la risposta minore e, successivamente, vengono inviati i rispettivi segnali

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

elettrici di comando ai dispositivi di controllo. Il tempo richiesto per regolare l'elettrovalvola di controllo è di circa 30ms (ricordando che un millisecondo è pari a $1/1000s=0.001s$; perciò $30ms=30/1000=0.03s$). Kobori et al. riferiscono sulle prestazioni dei dispositivi di controllo semi-attivi della rigidezza, per la struttura a tre piani sopra descritta, sottoposta a due terremoti differenti aventi magnitudo pari a 4,9 e 5,7 (la magnitudo è una misura oggettiva dell'energia meccanica sprigionata da un evento sismico all'ipocentro, basandosi sull'ampiezza delle onde sismiche registrate dai sismografi in superficie e viene misurata mediante la scala Richter). Sono stati analizzati due differenti casi di risposta strutturale sismica: struttura priva di controllo semi-attivo e struttura con il controllo semi-attivo. Nel sistema non controllato, il modello analitico è della stessa configurazione come nel caso controllato (stesso modello di calcolo di partenza), tranne che con i dispositivi di controllo della rigidità semi-attivi rimossi e i controventi attaccati direttamente alle travi in tutti e tre i piani. Nel sistema controllato, invece, i dispositivi semi-attivi di controllo della rigidità, sono inseriti e collegano le travi dai controventi sottostanti. I due terremoti consistevano principalmente in un movimento ad alta frequenza. Questa condizione è stata riconosciuta nella struttura controllata mediante il suo sistema di controllo, che ha sbloccato i controventi (apertura dell'elettrovalvola e riduzione della rigidezza) durante l'intero terremoto, assumendo le caratteristiche di un sistema relativamente flessibile e quindi evitando un movimento di tipo risonante (ovvero evitando che la frequenza dell'onda sismica del terreno, diventasse uguale alla frequenza propria della struttura, causando un'amplificazione dell'azione sismica). Detto ciò, esiste un problema nei sistemi di controllo semi-attivi della rigidezza, causato dalle eventuali modifiche discontinue di quest'ultima. Le modifiche discontinue della rigidezza, comportano degli errori nel modello di calcolo, che potrebbero falsare i risultati dell'analisi strutturale. Nel tentativo di alleviare a questo genere di problemi, Nagarajaiah ha recentemente sviluppato un dispositivo di controllo semi-attivo della rigidezza e dello smorzamento che è in grado di modificare entrambi le caratteristiche in modo continuo. Il dispositivo di controllo consiste in molle non lineari e smorzatori viscosi. Attraverso delle prove sperimentali su tavola vibrante,

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

applicate ad un modello strutturale a singolo grado di libertà (SDOF) su piccola scala, hanno dimostrato che il dispositivo è in grado di mantenere una condizione non risonante per il movimento sinusoidale in ingresso, modificando le proprietà di rigidità e smorzamento del dispositivo tra due serie di valori in modo da minimizzare il fattore di ingrandimento dinamico, salvaguardando la sicurezza strutturale.

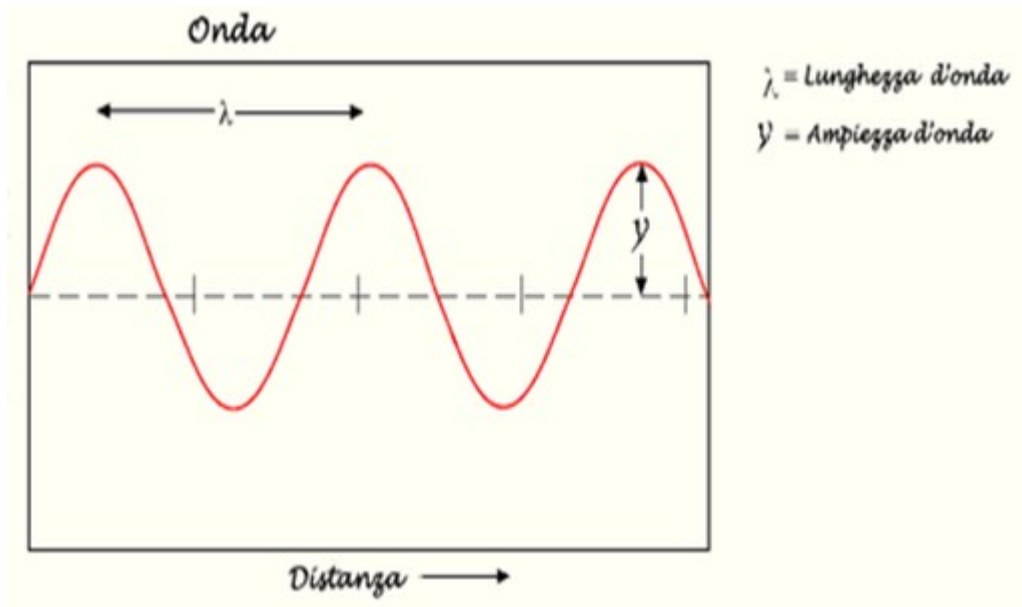


Figura 79. Schema di un'onda sismica armonica di lunghezza λ ed ampiezza y .

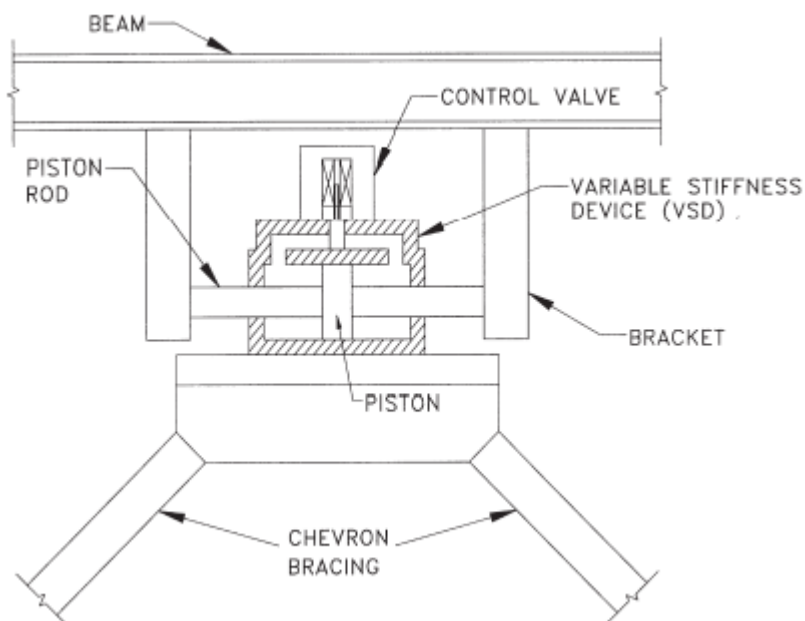


Figura 80. Dispositivo di controllo della rigidità (Kobori).

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

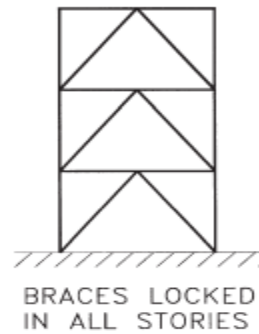


Figura 81. Posizionamenti dei dispositivi di controllo della rigidità.

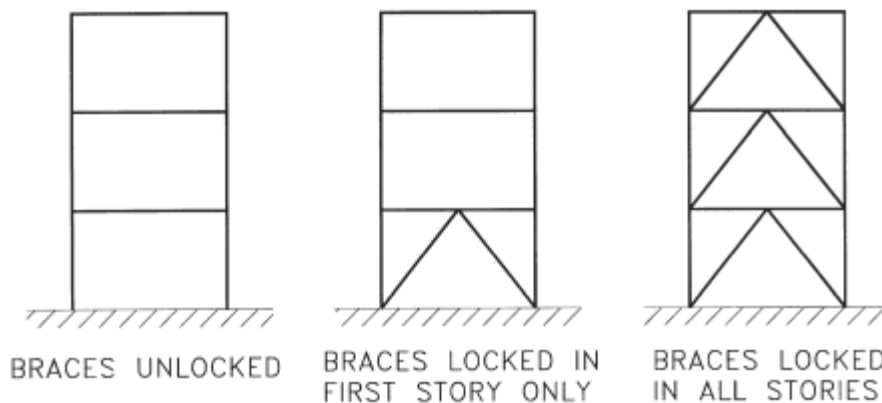


Figura 82. Configurazioni strutturali a rigidità diverse: controventi sbloccati, controventi bloccati solo al primo piano e controventi bloccati in tutti i piani.

- Smorzatori elettroreologici. Gli smorzatori elettroreologici (ER) sono dei dispositivi, generalmente costituiti da un sistema idraulico cilindro-pistone contenente un particolare fluido detto elettroreologico. Un fluido elettroreologico è un particolare fluido “intelligente o smart” capace di variare la sua resistenza tangenziale allo scorrimento in funzione della variazione di un determinato campo elettrico applicato. Il prototipo di fluido elettroreologico è una miscela di un olio minerale contenente delle particelle colloidali di alluminio-silicato, aventi dimensioni pari a circa $100\mu\text{m}$. In assenza di campo elettrico il fluido ER fluisce liberamente, mentre in presenza di un campo elettrico, il fluido assume un comportamento visco-plastico. Quando viene applicato un campo elettrico, le particelle si polarizzano e si dispongono in maniera allineata

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

formando delle vere e proprie fibre unidirezionali (dette fibrille), distribuendo uniformemente l'energia elettrica applicata ed aumentando la resistenza tangenziale allo scorrimento del fluido. La nascita di questa nuova configurazione (fibre unidirezionali), modifica notevolmente le proprietà del fluido. Tale modifica è possibile notarla nella figura sottostante:

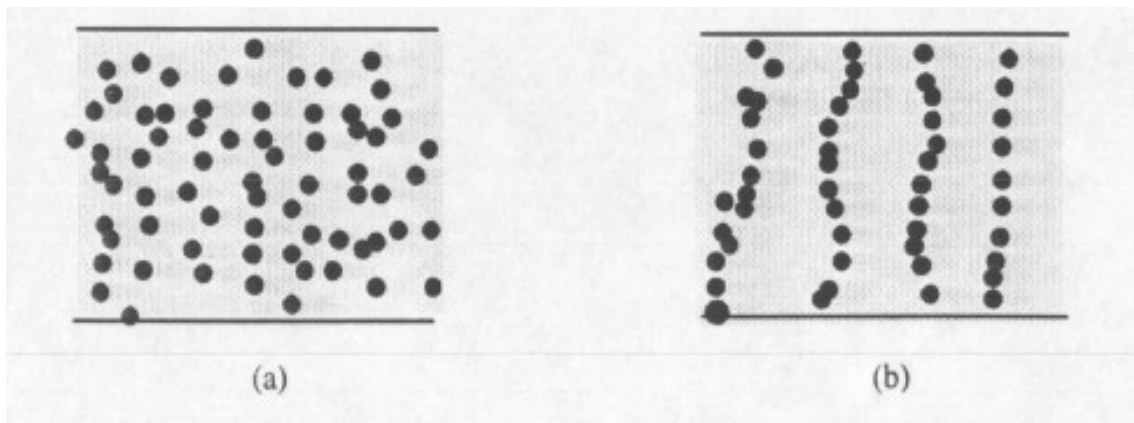


Figura 83. La struttura delle particelle in un fluido elettroreologico: a) Particelle del fluido posizionate in ordine casuale in assenza di campo elettrico; b) Allineamento delle particelle in fibre unidirezionali in presenza di campo elettrico.

Ora, considerando il caso di un flusso costante e completamente sviluppato, gli sforzi di taglio (o tensioni tangenziali) dei fluidi ER possono essere modellati come somma di una componente costante (τ_y) e di una componente Newtoniana ($\eta\dot{\gamma} = \eta d\gamma/dt$), presentando un comportamento equivalente ad un modello fisico, costituito da un elemento caratterizzato da attrito di Coulomb posto in parallelo con uno smorzatore a viscosità lineare. Un modello siffatto è denominato modello della visco-plasticità di Bingham caratterizzato al livello di tensione-deformazione dalla seguente equazione:

$$\tau = [\tau_y \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta\dot{\gamma}]$$
$$(\text{Pa}) = [(\text{Pa}) + (\text{Pa}\cdot\text{s}) (1/\text{s})]$$

dove:

τ = Tensione tangenziale di risposta del fluido (Pa);

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

τ_y = Tensione tangenziale di snervamento del fluido (Pa);

$\text{sgn}(\gamma)$ = Funzione segno;

η = Coefficiente di viscosità dinamica del fluido (Pa*s);

γ = Deformazione a taglio del fluido (-);

t = Tempo di applicazione del carico (s);

$\gamma' = d\gamma/dt$ = Velocità di deformazione a taglio del fluido (1/s).

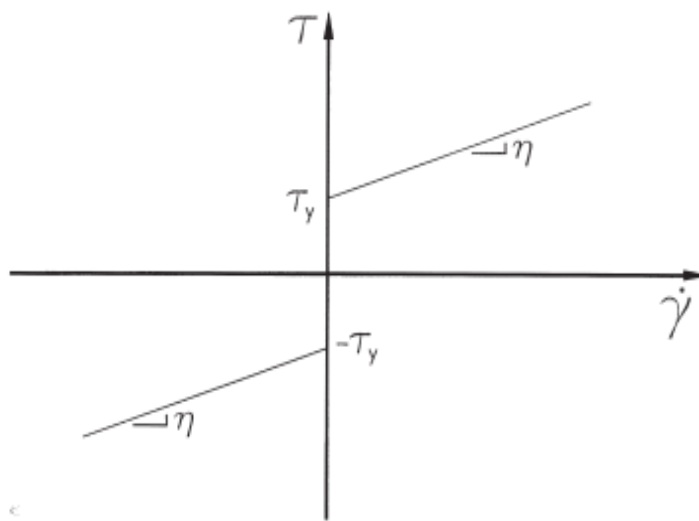


Figura 84. Modello della visco-plasticità di Bingham.

Si noti che, per i fluidi ER che assumono un comportamento visco-plastico, il valore della tensione tangenziale di snervamento (τ_y), aumenta linearmente con la variazione di campo elettrico applicato, mentre il coefficiente di viscosità dinamica (η) può essere considerato indipendente dal campo (il coefficiente di viscosità dinamica è il coefficiente angolare della retta, ovvero la sua pendenza dal punto di vista geometrico, che è considerata costante, come rappresentato nella figura sovrastante). In condizioni di carico armonico, la risposta isteretica (l'isteresi è la capacità di un sistema di reagire in ritardo in funzione delle sollecitazioni applicate e dello stato precedente) di un materiale secondo Bingham, a livello di forza-spostamento, è rappresentato nella figura sottostante:

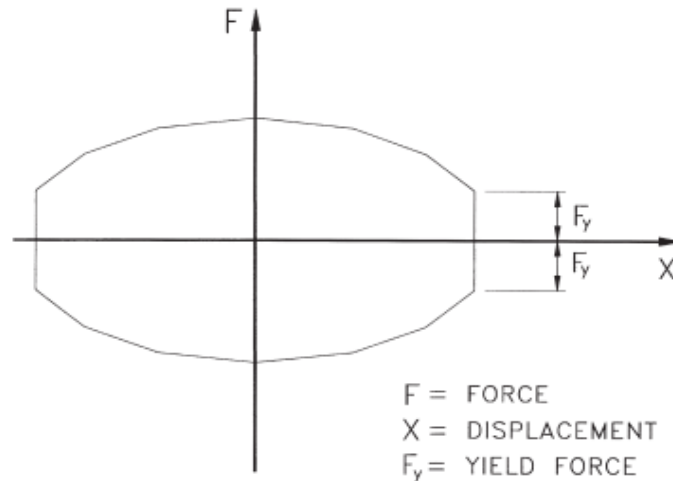


Figura 85. Cicli di isteresi ideali per un materiale secondo Bingham al livello di forza-spostamento.

Così, sotto un dato moto armonico, all'aumentare del campo elettrico, l'anello di isteresi forza-spostamento mostrato nella figura sovrastante, si espande in direzione verticale a causa di un aumento della forza necessaria allo snervamento (F_y) garantendo un livello di dissipazione superiore.

I fluidi ER attualmente disponibili mostrano delle tensioni di snervamento massime dell'ordine di 5-10kPa. Il modello di Bingham, è strettamente valido per un flusso stazionario e completamente sviluppato ma, come dimostrato da Gavin et al. per scopi progettuali ed ingegneristici, fornisce anche una previsione sufficientemente accurata del comportamento del materiale per condizioni di flusso instabile, che sono da aspettarsi per smorzatori ER, i quali, controllano la risposta di strutture soggette ad eccitazioni transitorie ed irregolari, a causa del carattere fortemente aleatorio dell'azione sismica.

Il comportamento dinamico a taglio di questi particolari fluidi, è stato studiato sperimentalmente da Ehrgott e Masri, come mostrato nella figura sottostante:

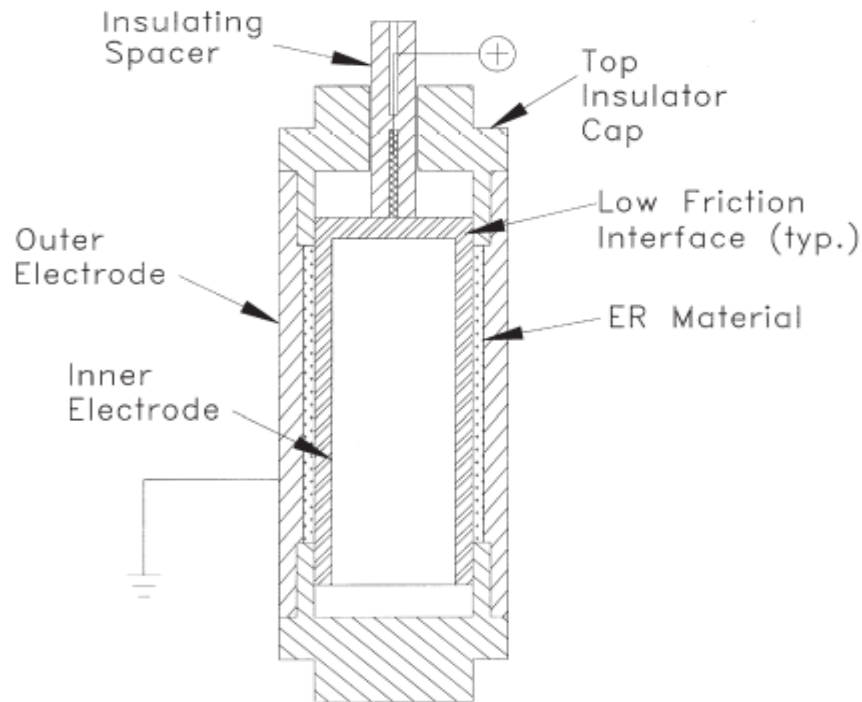


Figura 86. Disposizione di prova usata da Ehr Gott per valutare il comportamento dinamico a taglio dei fluidi elettroeologici.

Secondo la disposizione di prova usata da Ehr Gott, il fluido ER è contenuto tra due cilindri coassiali (aventi lo stesso asse), quello esterno è elettricamente messo a terra (mediante un cavo conduttore ed avente potenziale elettrico nullo) mentre a quello interno è applicato un voltaggio di corrente. Quando il cilindro interno si sposta rispetto a quello esterno, il fluido ER è sottoposto a sollecitazioni di taglio (viene “tranciato”). La corsa, ovvero lo spostamento massimo dello smorzatore, è di $\pm 2,54$ cm. I dati sperimentali di Ehr Gott e Mastri mostrano che all’aumentare del campo elettrico, l’aumento di energia dissipata dal fluido non è lineare, ma aumenta secondo potenze di ordine maggiore. Per caratterizzare il comportamento non lineare dello smorzatore è stato impiegato un algoritmo d’interpolazione, ottenendo una funzione scalare della forza generata dallo smorzatore in dipendenza dello stato del sistema.

Altri studi sperimentali sono stati realizzati da Gavin su uno smorzatore ER in scala ridotta. Il dispositivo sperimentale di Gavin è costituito da un attuatore, capace di determinare il moto di un pistone immerso in un fluido ER contenuto all’interno di un

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

recipiente, aperto superiormente, come mostrato nella figura sottostante:

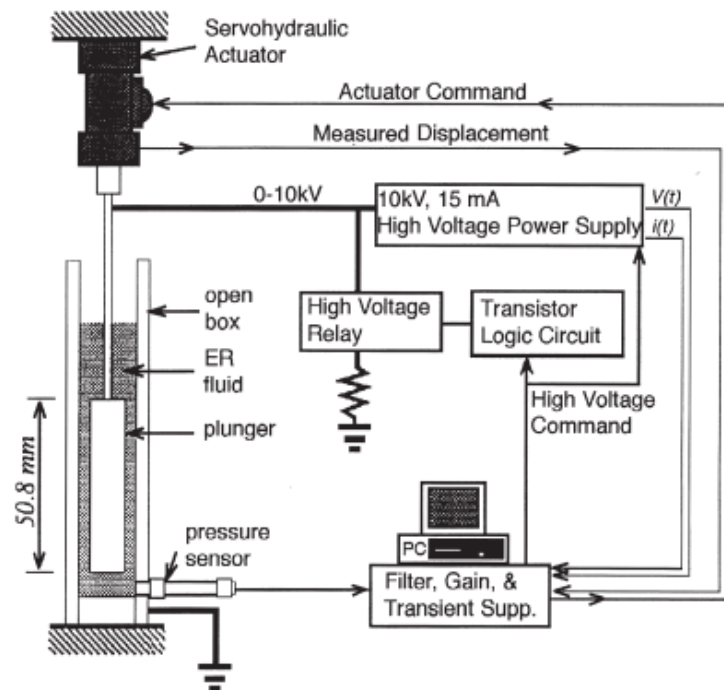


Figura 87. Test inerente uno smorzatore elettroreologico su piccola scala secondo Gavin per valutare l'idoneità del modello di Bingham.

Il campo elettrico è generato caricando il pistone e collegando elettricamente a terra il recipiente. Il campo elettrico può variare tra 0 e 3,2kV/mm (1kV/mm=1MV/m). Il fluido elettroreologico è composto da un olio minerale contenente particelle di alluminio e silicio da 100 μ m. La tensione di snervamento (τ_y), data nel modello della visco-plasticità di Bingham, ha dimostrato di variare con il campo elettrico secondo una legge di potenza della forma:

$$\tau_y = k \varepsilon^p$$

dove:

τ_y = Tensione tangenziale di snervamento del fluido;

k = Costante;

ε = Intensità del campo elettrico applicato;

p = Esponente che tipicamente varia da 1,2 a 2,5 per i fluidi ER.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Durante la prova si sono rilevati dei cicli di isteresi forza-spostamento, i quali, sono mostrati nella figura sottostante in cui lo spostamento imposto è una funzione sinusoidale con una frequenza di 0,83 Hz ed un'ampiezza crescente. Si noti che, la forma dei cicli di isteresi forza-spostamento, è coerente ed assimilabile al comportamento idealizzato dal modello di Bingham (e quindi è possibile confermare la validità di tale modello). Per azionare lo smorzatore era richiesta una potenza di soli 5W ma, la forza di picco sviluppata durante la prova, era stata di soli 40N.

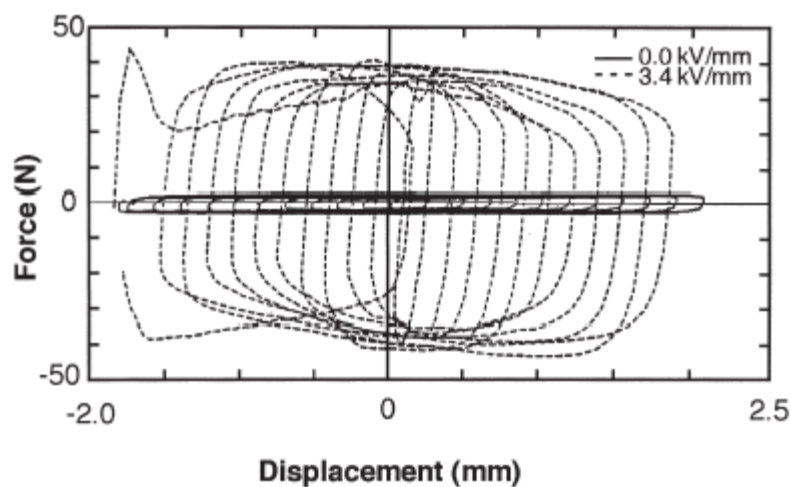


Figura 88. Cicli di isteresi forza-spostamento per lo smorzatore elettroreologico testato da Gavin ed assimilabili al comportamento ideale.

Gavin ha eseguito degli ulteriori test su un dispositivo ER di dimensioni maggiori, costituito da un contenitore chiuso, in cui erano disposti nove piatti rettangolari interconnessi ed un fluido ER. Il movimento dei piatti obbligava il fluido a passare attraverso gli interspazi dei piatti elettricamente carichi. Per questo dispositivo sperimentale, il fluido ER è costituito da una base di cherosene contenente particelle in alluminio e silicio delle dimensioni di qualche micron, presenta un coefficiente di viscosità di 0,5Pa*s e la tensione di snervamento varia in accordo alla legge prima riportata ($\tau_y = K\varepsilon^p$). Il confronto tra i cicli di isteresi forza-spostamento inerenti al caso di studio con quelli del modello ideale di Bingham, ha

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

rivelato la validità di tale modello per le esigenze progettuali ma non per la stima accurata del comportamento isteretico.

Gavin va ricordato anche per aver descritto uno smorzatore elettroreologico a parete in piccola scala. Il dispositivo è costituito da un piatto metallico, rigidamente collegato al soffitto ed immerso in un recipiente di profondità ridotta, contenente materiale elettroreologico e rigidamente collegato al pavimento. La geometria di questi dispositivi sembra molto adatta per le applicazioni degli smorzatori ER. Nel caso di velocità di deformazione di taglio elevate ($\dot{\gamma}$), le forze prodotte dal sistema ER sono dominate dall'aliquota viscosa, che non è controllabile, poiché il coefficiente di viscosità (η) è praticamente indipendente dal campo elettrico. Al contrario, nel caso di piccole velocità di deformazione di taglio ($\dot{\gamma}$), le forze sono dominate dalla tensione di snervamento (τ_y), che è controllata dalla modulazione del campo elettrico, per questo gli smorzatori ER devono operare in condizioni di ridotta velocità di deformazione di taglio, così da aver un buon intervallo di forza controllabile mediante uno specifico algoritmo. Per lo smorzatore a parete di tipo ER, la forza di smorzamento esplicita può essere semplicemente determinata come il prodotto della superficie bagnata del piatto metallico e la tensione di taglio espressa dalla relazione di Bingham ($\tau = \tau_y + \eta d\gamma/dt$).

Ora mostriamo la tabella riassuntiva delle caratteristiche degli smorzatori ER ed alcuni esempi applicativi in campo ingegneristico civile e medico.

Tensione tangenziale di snervamento (τ_y)	5-10kPa
Massima forza esplicitabile	300kN
Potenza di alimentazione	$\leq 50W$
Voltaggi richiesti	2000-5000V
Tempo di risposta	30ms (30ms=0.03s)
Range di temperatura di lavoro	-10/50°C

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Viscosità dinamica	1Pa*s (1kV/mm=1MV/m; t=25°C)
Dimensioni delle particelle	1-100µm
Percentuale di particelle sospese	15-40%
Applicazione in controventi	Si
Applicazioni in sistemi di isolamento sismico alla base	Si

Figura 89. Tabella delle caratteristiche degli smorzatori ER.

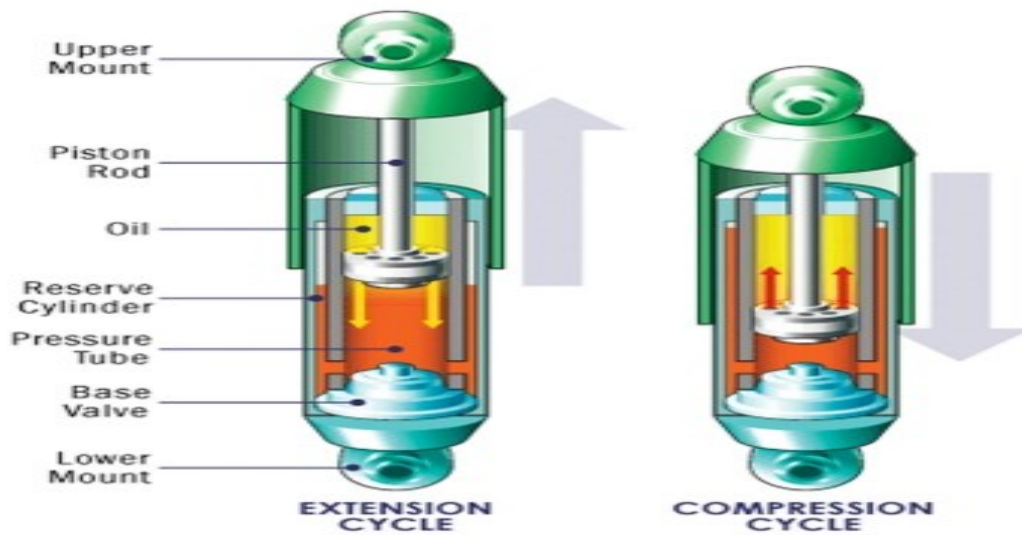


Figura 90. Particolare di un sistema cilindro-pistone con fluido elettroreologico.

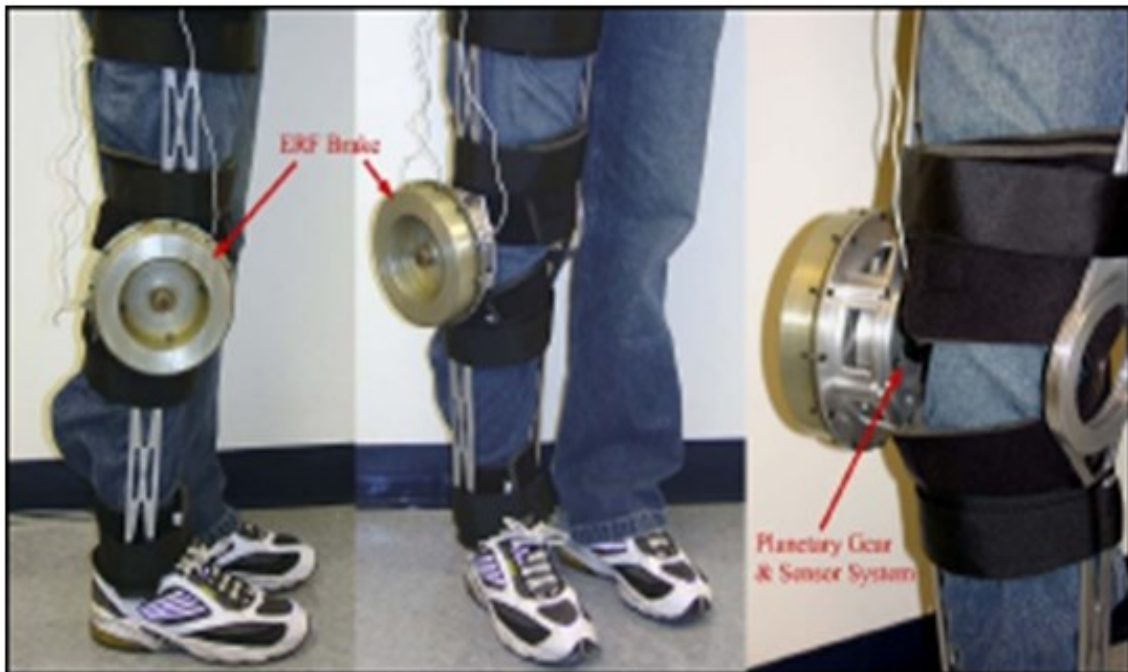


Figura 91. Apparecchio medico per la riabilitazione del ginocchio che utilizza un fluido elettroreologico.



Figura 92. Controventi dissipativi con fluidi elettroreologici.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

- Gli smorzatori magnetoreologici (MR) sono l'equivalente magnetico di quelli elettroreologici, infatti presentano un comportamento molto simile ad eccezione della condizione che il controllo è governato dall'applicazione di un campo magnetico, anziché di un campo elettrico. Un campo magnetico può essere creato da cariche elettriche in moto, cioè da una corrente, oppure da un magnete permanente (elettrocalamita). I dispositivi MR sono tipicamente costituiti da un sistema idraulico cilindro-pistone, contenente un particolare fluido "intelligente o smart" detto magnetoreologico, costituito da particelle colloidali polarizzabili dell'ordine del micron, capace di variare la sua resistenza tangenziale allo scorrimento in funzione della variazione di un determinato campo magnetico. In assenza di campo magnetico, il fluido MR fluisce liberamente, mentre in presenza di un campo magnetico, il fluido assume un comportamento visco-plastico. In particolare, quando viene applicato un campo magnetico, le particelle si polarizzano e si dispongono in maniera allineata formando delle vere e proprie fibre unidirezionali (dette fibrille), distribuendo uniformemente l'energia magnetica applicata ed aumentando la resistenza tangenziale allo scorrimento del fluido. La nascita di questa nuova configurazione (fibre unidirezionali) modifica notevolmente le proprietà del fluido. Tale modifica è possibile notarla nella figura sottostante:

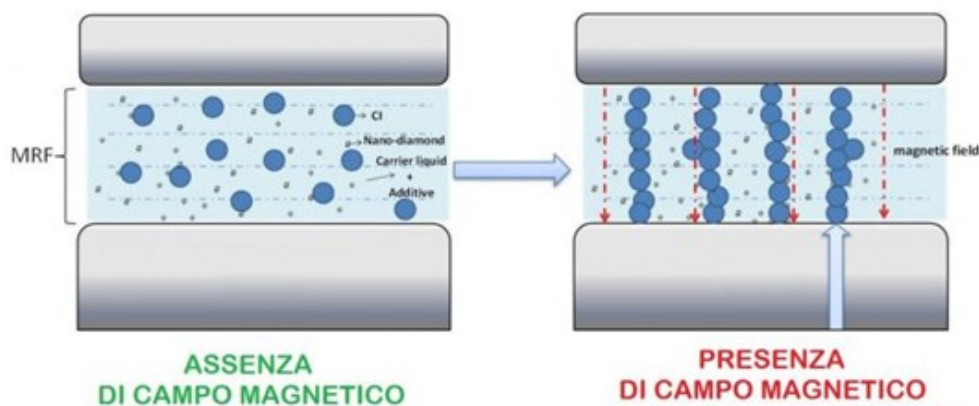


Figura 93. La struttura delle particelle in un fluido MR.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

I materiali MR presentano delle tensioni tangenziali di snervamento massime pari a $\tau_y=50-100\text{kPa}$, quindi di un ordine di grandezza maggiore rispetto agli smorzatori ER, caratterizzati da valori di 5-10kPa. Inoltre, rispetto a quest'ultimi, i dispositivi magnetoreologici, a parità di prestazioni, presentano ingombri minori, sono scarsamente sensibili alle variazioni termiche e alle eventuali impurità, presenti durante il processo di costruzione. Gli smorzatori MR richiedono scarse potenze di alimentazione (in genere $<50\text{W}$) come i colleghi ER ma, rispetto ad essi, sono alimentati da una corrente in bassa tensione pari a 12-24V (il volt misura la differenza di potenziale elettrico ed è definito da $1\text{V}=1\text{J}/1\text{C}=1\text{W}/1\text{A}$, mentre l'ampere misura l'intensità di corrente ed è definito da $1\text{A}=1\text{C}/1\text{s}=1\text{W}/1\text{V}$), contro i 2000-5000V dei fluidi ER. Come gli smorzatori elettroreologici anche i magnetoreologici presentano, rispetto ai dispositivi viscosi di tipo semi-attivo, una maggiore semplicità meccanica, data dall'assenza di parti meccaniche in movimento come una valvola, così riducendo l'eventuale manutenzione ed i relativi costi aggiuntivi associati ad essa.

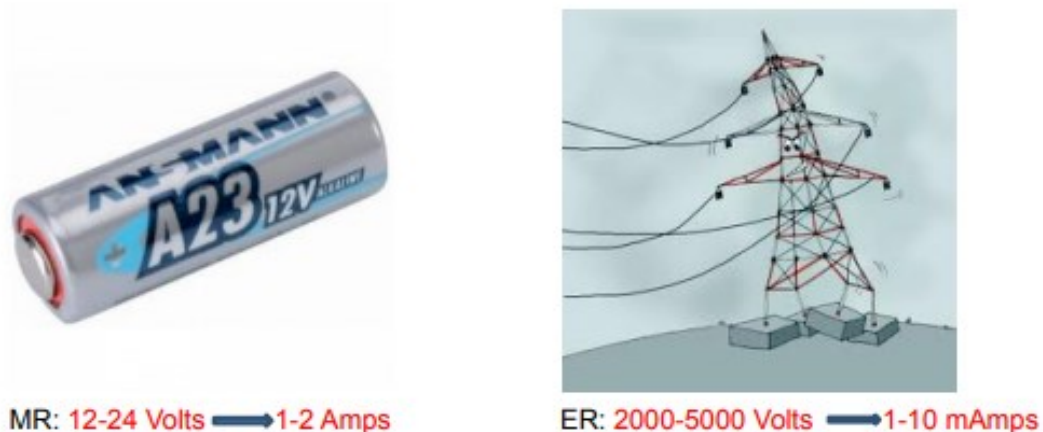


Figura 94. Confronto fra i differenti voltaggi per i fluidi MR ed ER.

Ora, considerando il caso di un flusso costante e completamente sviluppato, gli sforzi di taglio (o tensioni tangenziali) dei fluidi MR possono essere modellati come somma di una componente costante (τ_y) e di una componente Newtoniana ($\eta\gamma'=\eta d\gamma/dt$), presentando un comportamento equivalente ad un modello fisico costituito da un

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

elemento caratterizzato da attrito di Coulomb posto in parallelo con uno smorzatore a viscosità lineare. Un modello siffatto è denominato modello della visco-plasticità di Bingham caratterizzato al livello di tensione-deformazione dalla seguente equazione:

$$\tau = [\tau_y \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma}]$$
$$(\text{Pa}) = [(\text{Pa}) + (\text{Pa} \cdot \text{s}) (1/\text{s})]$$

dove:

τ = Tensione tangenziale di risposta del fluido (Pa);

τ_y = Tensione tangenziale di snervamento del fluido (Pa);

$\operatorname{sgn}(\dot{\gamma})$ = Funzione segno;

η = Coefficiente di viscosità dinamica del fluido (Pa*s);

$\dot{\gamma}$ = Deformazione a taglio del fluido (-);

t = Tempo di applicazione del carico (s);

$\dot{\gamma} = d\gamma/dt$ = Velocità di deformazione a taglio del fluido (1/s).

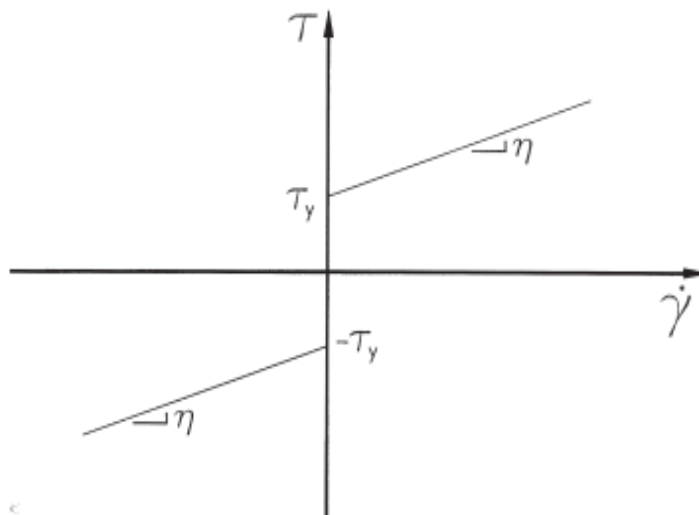


Figura 95. Modello della visco-plasticità di Bingham.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Si noti che, per i fluidi MR che assumono un comportamento visco-plastico, il valore della tensione di snervamento (τ_y), aumenta linearmente con la variazione di campo magnetico applicato, mentre il coefficiente di viscosità dinamica (η) può essere considerato indipendente dal campo (il coefficiente di viscosità dinamica è il coefficiente angolare della retta, ovvero la sua pendenza dal punto di vista geometrico, che è considerata costante, come rappresentato nella figura sovrastante). In condizioni di carico armonico, la risposta isteretica (l'isteresi è la capacità di un sistema di reagire in ritardo in funzione delle sollecitazioni applicate e dello stato precedente) di un materiale secondo Bingham, a livello di forza-spostamento, è rappresentato nella figura sottostante:

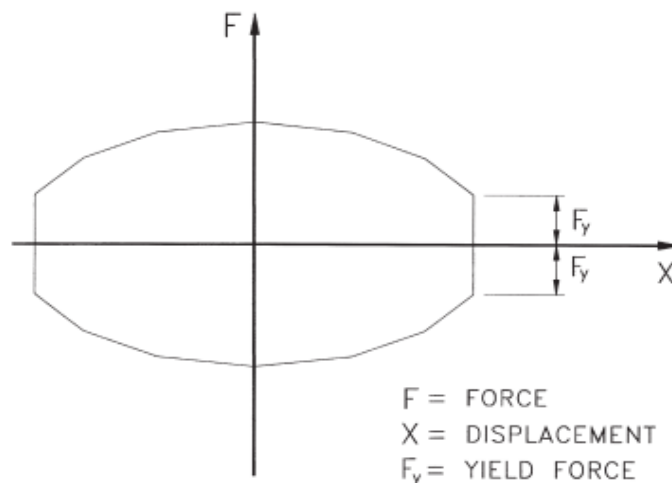


Figura 96. Cicli di isteresi ideali per un materiale secondo Bingham al livello di forza-spostamento.

Così, sotto un dato moto armonico, all'aumentare del campo magnetico, l'anello di isteresi forza-spostamento mostrato nella figura sovrastante, si espande in direzione verticale a causa di un aumento della forza necessaria allo snervamento (F_y) garantendo un livello di dissipazione superiore.

I fluidi MR attualmente disponibili mostrano delle tensioni di snervamento massime dell'ordine di 50-100kPa. Il modello di Bingham è strettamente valido per un flusso stazionario e completamente sviluppato ma, come dimostrato da Spencer e Carlson per scopi progettuali ed ingegneristici, fornisce anche una previsione sufficientemente accurata del comportamento del

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

materiale per condizioni di flusso instabile, che sono da aspettarsi per smorzatori MR, i quali, controllano la risposta di strutture soggette ad eccitazioni transitorie ed irregolari a causa del carattere fortemente aleatorio dell'azione sismica.

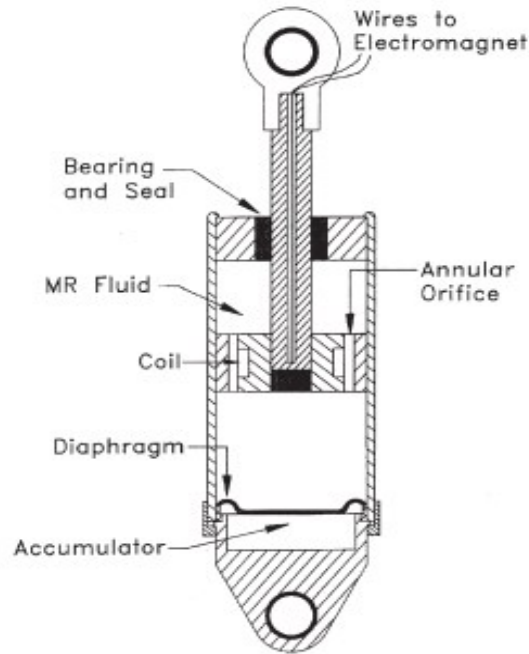


Figura 97. Particolare costruttivo di uno smorzatore con fluido MR in scala ridotta testato da Spencer.

Dyke e Spencer hanno presentato un prototipo di smorzatore magnetoreologico, con una corsa di $\pm 2,5$ cm, capace di produrre una forza di 3 kN e dotato di pistone idraulico come mostrato nella figura sovrastante. Un'elettrocalamita situata all'interno della testa del pistone è impiegata per generare il campo magnetico. La potenza di picco necessaria al funzionamento del dispositivo è inferiore a 10W. Per uno spostamento imposto di ampiezza 1,5 cm e frequenza 2,5 Hz in corrispondenza di diversi livelli di tensione elettrica applicata (0V; 0,75V; 1,5V; 2,25V) si hanno le risposte mostrate nella figura sottostante:

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

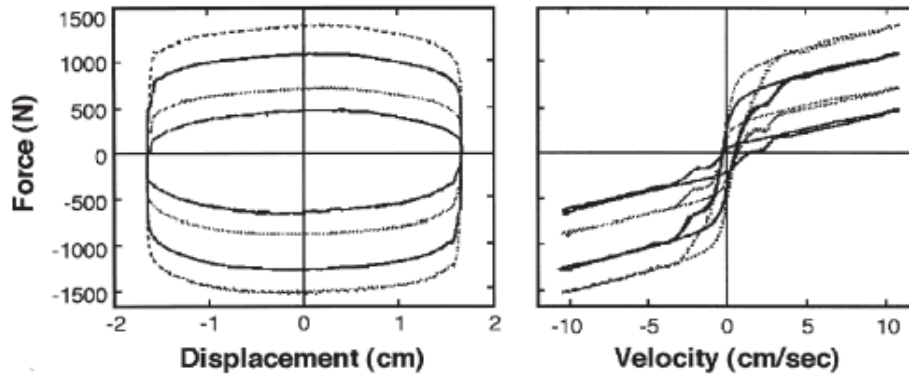


Figura 98. Risposta dinamica dello smorzatore MR per quattro differenti intensità di campo magnetico applicato.

Per una differenza di potenziale elettrico pari a 0V, il comportamento dello smorzatore MR è analogo a quello di un classico smorzatore viscoso lineare ($F=cV^{\alpha}$), mentre per i livelli compresi tra 0 e 2,25V, lo smorzatore mostra un comportamento analogo a quello di un dispositivo costituito da un elemento caratterizzato da attrito Coulomb, disposto in parallelo con uno smorzatore viscoso lineare ($\tau = [\tau_y \text{sgn}(\gamma) + \eta\gamma']$). Si è notato come nell'intervallo tra 0-2,25V, la forza di smorzamento varia in modo lineare in funzione della tensione di voltaggio applicata, mentre per valori maggiori di 2,25V si ha una saturazione.

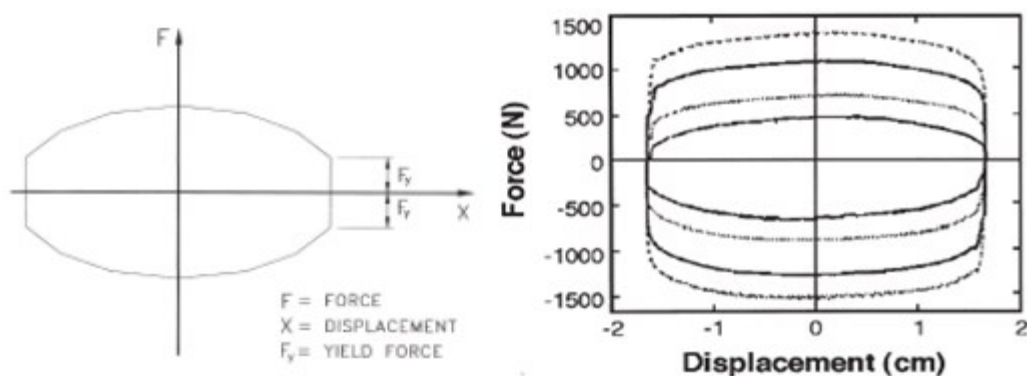


Figura 99. Analogia dei cicli di isteresi forza-spostamento tra il modello ideale di Bingham (a sinistra) ed il modello sperimentale (a destra).

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Dai diagrammi riportati nella pagina precedente si desume come il comportamento del sistema è di tipo fail-safe (a prova di errore), infatti nell'eventualità di una interruzione della potenza di alimentazione (0V) lo smorzatore funziona come un dispositivo viscoso passivo con una determinata forza di snervamento (τ_y).

Spencer e Carlson hanno sviluppato uno smorzatore per applicazioni ad edifici civili in scala 1:1, eseguendo una serie di test presso l'università di Notre Dame, negli Stati Uniti. Lo smorzatore presenta una geometria semplice, in cui la parete del cilindro fa parte del circuito magnetico e la sezione di passaggio attraverso la valvola magnetica è costituita dall'intera area, compresa tra il diametro esterno del pistone e quello interno del cilindro. Lo smorzatore in esame è rappresentato nella figura sottostante:

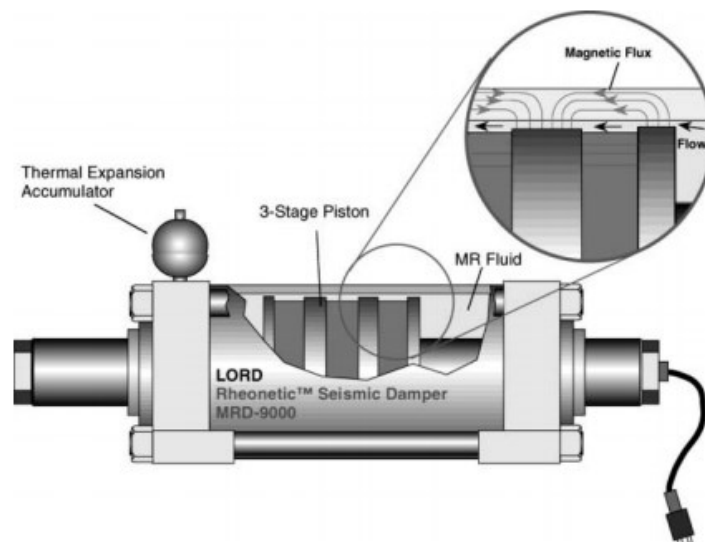


Figura 100. Schema di uno smorzatore MR da 200kN di Spencer e Carlson.

Al contrario dello smorzatore MR in scala ridotta, questo smorzatore presenta un pistone a doppio stelo, il quale non richiede la presenza di un accumulatore per assorbire le variazioni di volume prodotte dal moto del singolo stelo del pistone. Tuttavia, nel dispositivo a doppio stelo, è presente un accumulatore per assorbire l'espansione termica del fluido. La corsa massima è di $\pm 8\text{cm}$, la forza di controllo massima è di 200 kN a fronte di una potenza richiesta di soli 22W.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Stroke	± 8 cm
F_{\max} / F_{\min}	10.1 @ 10 cm/s
Cylinder Bore (ID)	20.32 cm
Max. Input Power	< 50 watts
Max. Force (nominal)	200,000 N
Effective Axial Pole Length	8.4 cm
Coils	3×1050 turns
Fluid $\eta_p / \tau_{y(\text{field})}^2$	2×10^{-10} s/Pa
Fluid η_p	1 Pa-s
Fluid $\tau_{y(\text{field})}$ max	70 kPa
Gap	2 mm
Active Fluid Volume	~ 90 cm ³
Wire	16 gauge
Inductance (L)	6.6 henries
Coil Resistance (R)	3×7.3 ohms

Figura 101. Dati di progetto dello smorzatore di Spencer e Carlson.

Lo smorzatore inoltre presenta un coefficiente di viscosità (η) pari a 1Pa*s, una tensione massima di snervamento (τ_y) pari a 70kPa, risulta lungo 1m e pesa circa 2,5kN. Nel dispositivo sono contenuti circa 5 litri di fluido magnetoreologico, ma in un dato istante del tempo solo 90cm³ sono sottoposti al campo magnetico. La comunità scientifica dopo le esperienze, condotte da Spencer e Carlson sullo smorzatore da 200kN, ha assistito nel 2001 alla prima implementazione di uno smorzatore magnetoreologico su un edificio. Infatti due smorzatori da 300kN sono stati installati tra il terzo ed il quinto piano del Tokyo Natural Museum of Engineering Science and Innovation Building. I due smorzatori sono stati realizzati dalla Sanwa Tekki Corporation, impiegando fluido MR della Lord Corporation. Successivamente, in Cina, si è avuta un'altra realizzazione con smorzatori magnetoreologici: in un progetto di miglioria del ponte sul lago Dongting vengono installati due smorzatori MR per ciascun cavo del ponte, con l'obiettivo di ridurre le vibrazioni dei cavi indotte dalla pioggia e dal vento.

Altre applicazioni degne di nota, si sono realizzate in Giappone con l'installazione di uno smorzatore MR da 40t su un edificio residenziale, congiunto all'adozione di isolatori elastomeri alla base.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Ora mostriamo la tabella riassuntiva delle caratteristiche degli smorzatori MR ed alcuni esempi applicativi in campo ingegneristico civile.

Tensione tangenziale di snervamento (τ_y)	50-100kPa
Massima forza esplicabile	400kN
Potenza di alimentazione	$\leq 50W$
Voltaggi richiesti	0-2,25V
Tempo di risposta	30ms (30ms=0.03s)
Range di temperatura di lavoro	-30/300°C
Viscosità dinamica	1Pa*s (1kV/mm=1MV/m; t=25°C)
Dimensioni delle particelle	1-100 μ m
Percentuale di particelle sospese	15-40%
Applicazione in controventi	Si
Applicazioni in sistemi di isolamento sismico alla base	Si

Figura 102. Tabella delle caratteristiche degli smorzatori MR.



Figura 103. Smorzatori MR applicati al ponte di Forchheim in Germania.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo



Figura 104. Applicazione di smorzatori MR al Ponte Sutong in Cina.



Figura 105. Applicazione di 20 smorzatori MR al ponte Dubrovnik in Croazia.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

- Dispositivi per il controllo dell'attrito. I dispositivi di controllo dell'attrito semi-attivi sono utilizzati come dissipatori inseriti nelle controventature di un edificio o all'interno di sistemi di isolamento. Nel campo della meccanica, l'attrito è uno dei metodi più efficienti ed economici per frenare corpi in moto. Recentemente, sono stati sviluppati ed applicati con particolare successo su strutture civili per il controllo delle vibrazioni sismiche. L'impiego della tipologia di dissipatori ad attrito, rispetto ad altri dispositivi di controllo strutturale, comporta vantaggi legati al costo di applicazione, relativamente basso, all'utilizzo di materiali poco soggetti al degrado, all'assenza di possibili perdite di fluido ed ancora alla ridotta manutenzione necessaria anche dopo sismi intensi. Tra gli svantaggi di questi dispositivi si ricordano ad esempio gli spostamenti residui al termine dell'intervento. Uno smorzatore della tipologia, preso in esame, è costituito da un'interfaccia di scorrimento tra due parti, rivestite da materiale d'attrito, e da un meccanismo, che produce una forza di chiusura normale all'interfaccia (N). Il dispositivo di controllo dell'attrito si attiva quando la forza esterna supera quella di primo distacco (soglia prestabilità), ovvero la forza che determina il moto relativo tra le due superfici di attrito. Diversamente, il sistema di controllo si comporta in modo analogo ad un normale controvento passivo (ovvero quando la forza esterna sollecitante è minore rispetto alla forza di primo distacco relativa alle due superfici di attrito). Durante un sisma, pertanto, l'energia dissipata dallo smorzatore è proporzionale alla forza di scorrimento (F), esplicita dal sistema di controllo semi-attivo. Tale forza di scorrimento (F) può essere regolata variando la forza di chiusura normale (N), in modo da ottimizzare la risposta della struttura in esame.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Uno smorzatore ad attrito può essere schematizzato impiegando un modello di attrito di Coulomb, in cui la forza di scorrimento prodotta (F) è data da:

$$F = \mu N$$

$$(N) = (-) (N)$$

dove:

F = Forza di scorrimento prodotta (N);

μ = Coefficiente di attrito dinamico, dovuto all'interazione tra due superfici che scorrono l'una rispetto all'altra (-);

N = Forza di chiusura normale alla superficie di attrito (N).

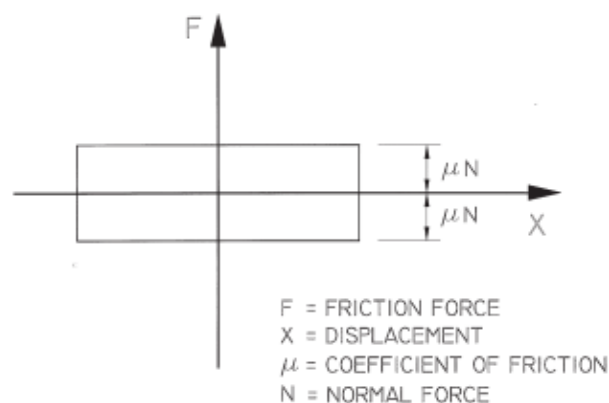


Figura 106. Ciclo di isteresi idealizzato per il dispositivo di controllo dell'attrito di Coulomb e sottoposto ad un moto armonico.

All'aumentare della forza di chiusura normale (N), il ciclo di isteresi nel piano forza-spostamento, si allarga in direzione verticale, aumentando così la forza di scorrimento prodotta dal dispositivo di controllo dell'attrito e, di conseguenza, la quantità di energia dissipata per ogni ciclo.

I primi a pensare ad una possibile applicazione di dispositivi per il controllo dell'attrito semi-attivi furono Ferri ed Heck nel 1992. Con i loro studi mostrarono che il dispositivo presenta, rispetto agli smorzatori viscosi, il grande vantaggio di generare forze di controllo

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

elevate anche nel caso di piccole velocità di scorrimento relativo tra le due superfici.

Gli attuatori, responsabili di generare le forze di chiusura normali (N), compatibili con i dispositivi di controllo dell'attrito, sono stati molteplici nel corso della storia. Ad esempio, ricordiamo gli attuatori idraulici (che utilizzano lo scorrimento del fluido in un sistema cilindro-pistone), gli attuatori pneumatici (che utilizzano l'aria compressa), gli attuatori piezoelettrici (che si deformano elasticamente mediante l'applicazione di un potenziale elettrico) e gli attuatori che si occupano di variare la pressione di un gas.

Nel 1995 Kannan impiegò un attuatore di tipo idraulico per variare la forza di chiusura normale (N), proporzionale all'aumento della forza di scorrimento (F) e quindi dell'aumento di energia dissipata dal dispositivo di controllo dell'attrito semi-attivo.

Successivamente, Pandaya descrisse delle prove sperimentali, condotte su un edificio in scala ridotta di quattro piani, installato su una tavola vibrante monodirezionale e dotato di smorzatori ad attrito variabile, disposti nelle controventature di ogni piano (controventature ad X). Gli smorzatori semi-attivi, impiegati da Pandaya sono costituiti da un interfaccia di attrito su cui agisce una forza di chiusura normale (N), generata da un attuatore pneumatico (o ad aria compressa). Il principale svantaggio degli attuatori pneumatici, impiegati nei dispositivi di Kannan e Pandaya, è il ritardo con cui si genera la forza di chiusura normale (N) richiesta, che rende impossibile una rapida modulazione della forza di scorrimento (F).

Ad oggi, la tecnologia più promettente da applicare ai dispositivi per il controllo dell'attrito, è quella degli attuatori piezoelettrici. Tali attuatori piezoelettrici, composti da materiali cristallini come il quarzo, hanno la caratteristica di avere le particelle interne che si polarizzano generando una differenza di potenziale (misurata in volt, dove $1V=1J/1C=1W/1A$) quando sono soggetti ad una deformazione meccanica (effetto piezoelettrico diretto) e al tempo stesso di deformarsi in maniera elastica quando sono attraversati da corrente (effetto piezoelettrico inverso o effetto Lippmann).

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

La figura sottostante mostra lo schema di un materiale piezoelettrico (ad esempio il quarzo) soggetto ad una deformazione meccanica di compressione:

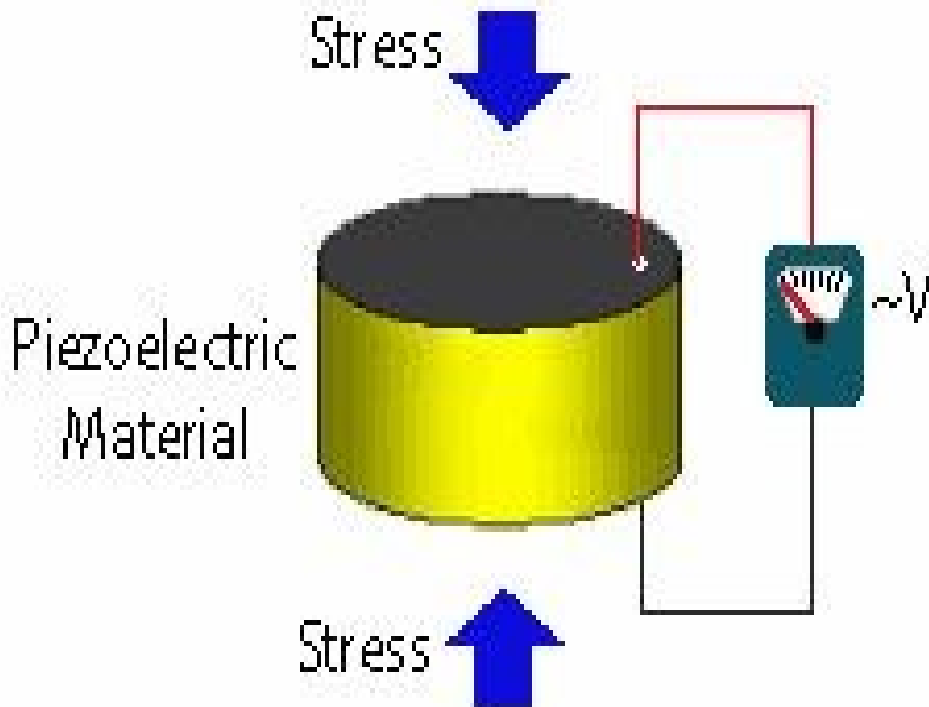


Figura 107. Schematizzazione di un materiale piezoelettrico (quarzo) soggetto ad una deformazione meccanica di compressione (effetto piezoelettrico diretto).

Una delle prime applicazioni degli attuatori piezoelettrici è stata in campo aerospaziale, per limitare le vibrazioni meccaniche.

Un interessante studio sperimentale e numerico sull'efficacia degli smorzatori ad attrito con attuatore piezoelettrico è stato pubblicato da Chen e Chen nel 2000. Gli autori hanno condotto delle prove su un modello di un edificio di tre piani in scala 1:4, installato su una tavola vibrante unidirezionale dell'Università del Missouri-Rolla, negli Stati Uniti. Il modello, lungo 1,22m, profondo 0,61m ed alto 2,54m, è costituito da una struttura in acciaio, rinforzata da controventi disposti ad X nella direzione trasversale.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Lo smorzatore è installato tra un supporto ed il primo piano dell'edificio come mostrato nella figura sottostante:

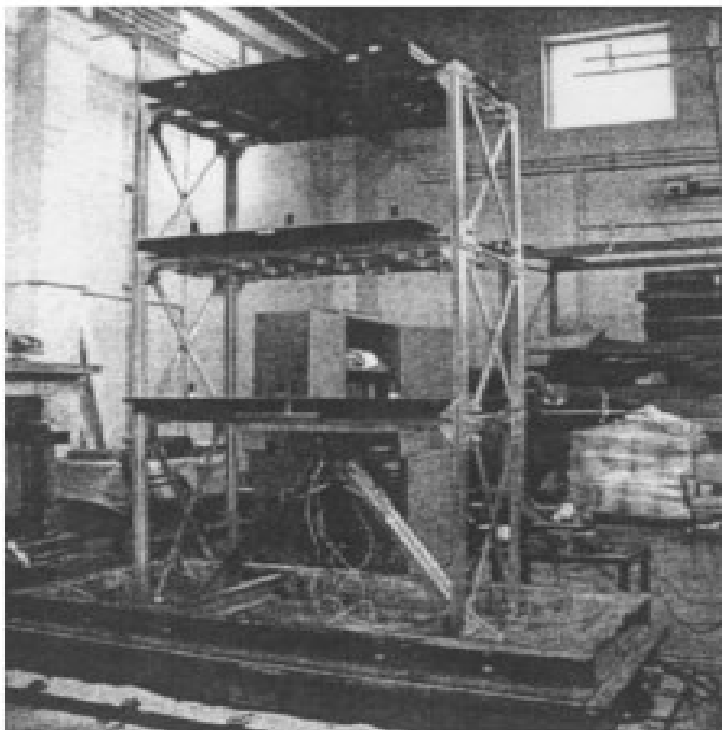


Figura 108. Modello di un edificio di tre piani in scala 1:4, disposto su tavola vibrante progettato da Chen e Chen nel 2000.

Il dispositivo smorzante, sperimentato, ha dimensioni 0,254x0,152 x0,102m e prevede quattro attuatori piezoelettrici per generare la forza di chiusura normale (N).

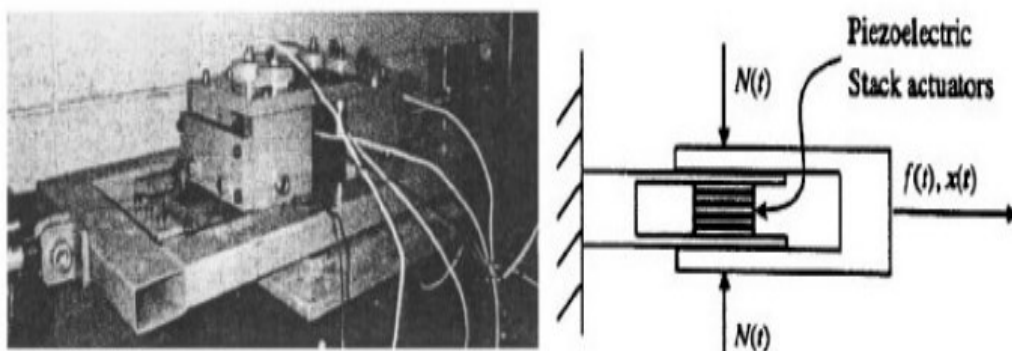


Figura 109. Smorzatore ad attrito variabile con attuatori piezoelettrici.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Lo smorzatore è stato sottoposto a delle prove di caratterizzazione mediante segnali armonici, rilevando i cicli di isteresi forza-spostamento. In questa prova il precarico della forza di chiusura normale era di 1,78kN ed i voltaggi forniti variavano da 0 a 1000V. Il legame tra forza di chiusura normale esercitata dal dispositivo ed il voltaggio applicato può essere rappresentato da questa relazione :

$$N(t) = N_{pre} + [(4EA d_{33} V(t))/h]$$

dove $N(t)$ è la forza di chiusura normale, N_{pre} è la forza normale di precarico, E il modulo di Young, A l'area trasversale di ciascun attuatore, d_{33} la costante di accoppiamento elettromeccanico (funzione del tipo di materiale piezoelettrico adottato), V il voltaggio di corrente ed h è l'altezza dell'attuatore.

La possibilità di descrivere il legame forza normale di chiusura-voltaggio mediante la relazione lineare sovraesposta, è stata verificata sperimentalmente, applicando nel caso dei precarichi di 89N, 133N e 178N, i voltaggi di 200V, 400V, 600V, 800V, 1000V, ottenendo i dati riportati nella figura sottostante:

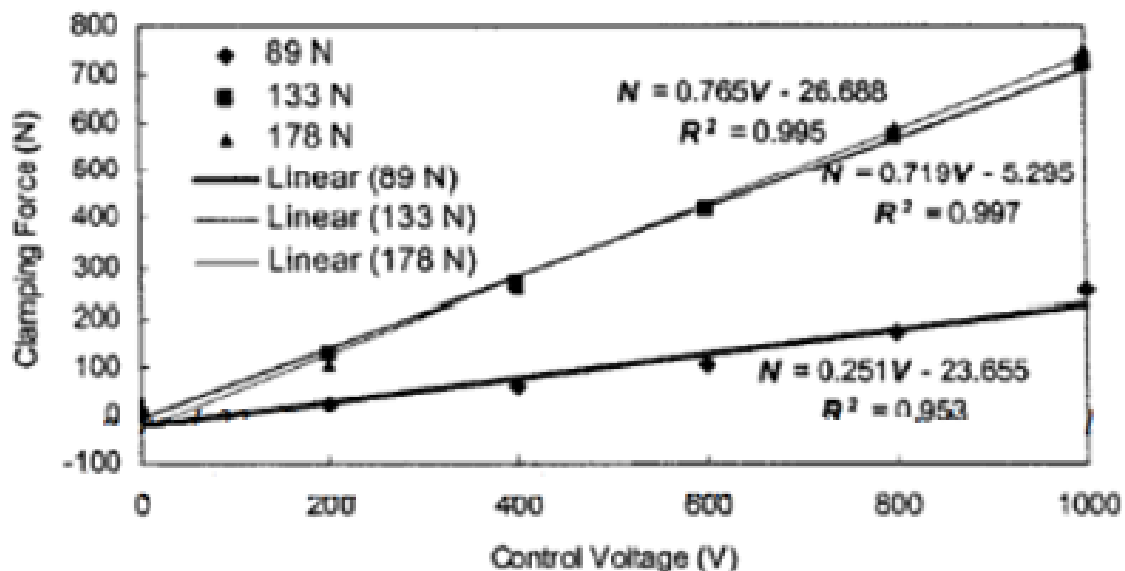


Figura 110. Interpolazione dei dati sperimentali della forza di chiusura normale per diversi valori di precarico e voltaggi adottati.

I risultati indicano che il comportamento dello smorzatore esaminato è indipendente dal precarico quando esso supera il valore di 133N. La misura della forza di chiusura normale esercitata da ciascun

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

attuatore è stata affidata a quattro celle di carico, posizionate all'interno dello smorzatore, mentre la misura degli spostamenti è stata affidata a quattro trasduttori di spostamento lineare. Gli autori del lavoro hanno utilizzato come sollecitazioni sismiche per la tavola vibrante e per le simulazioni numeriche i segnali della componente N-S del sisma di El Centro del 1940, la componente S69E del sisma Taft del 1952, la componente N-S del sisma Northridge del 1994 e la componente N-S del sisma di Kobe del 1995. Per ciascun sisma sono stati previsti quattro livelli di PGA (peak ground acceleration o massima accelerazione al suolo), indicati con numeri da 1 a 4. Per i sismi di livello più alto, gli autori non hanno eseguito test sperimentali ma solo le simulazioni, in virtù del vincolo di spostamento massimo della tavola di $\pm 2,54$ cm (spostamento massimo della tavola vibrante limitato). I dati relativi al caso non controllato sono confrontati con i dati riscontrati nel caso in cui gli smorzatori ad attrito sono presenti ma non alimentati, per cui funzionano da dispositivi passivi, e con quelli della situazione in cui sono attivati. Dal confronto dei dati, si evince che il sistema di controllo, proposto da Chen e Chen, riduce sia lo spostamento relativo tra i piani e sia la loro accelerazione. Nel confronto con la risposta della struttura controllata passivamente, il sistema semi-attivo riduce il valore massimo di spostamento dei piani del 36% e la massima accelerazione del 28% nel caso del sisma K4 (sisma Kobe con livello PGA uguale a 4). È però importante notare come nel caso di sollecitazioni sismiche meno intense come la K1 (sisma Kobe con livello PGA uguale a 1), le differenze tra i casi della struttura controllata in modo passivo ed in modo semi-attivo si riducono. Pertanto, il sistema di protezione semi-attivo, è ottimale per sismi violenti, dove i suoi benefici apportati alla struttura sono rilevanti. Inoltre, le simulazioni eseguite parallelamente alle prove sperimentali, sono ben correlate con i dati delle prove di laboratorio ad indicare la bontà del modello analitico impiegato.

Tuttavia, per scalare il dispositivo proposto, così da adottarlo su un grande edificio in scala 1:1, bisognerà considerare la necessità di produrre una forza di chiusura normale sufficientemente intensa in modo da generare una forza di controllo adeguata allo scorrimento. Per raggiungere quest'obiettivo, si potranno adottare materiali piezoelettrici caratterizzati da una costante di accoppiamento

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

elettromeccanico più elevata (d_{33}) o anche smorzatori con superfici d'attrito multiple.

Recentemente, in uno studio per il controllo strutturale di un ponte a due campate, condotto presso l'Università di Girona in Spagna, sono stati utilizzati dei dispositivi semi-attivi ad attrito variabile, azionati da attuatori che si occupano della variazione di pressione di un gas, capaci di esplicare una intensa forza di controllo pari a 2250kN, ponendo questa classe di dispositivi ai vertici in termini di massima forza di controllo esplicabile. Il dispositivo, impiegato all'Università di Girona, è denominato Uhide-fbr ed è composto da due piatti di acciaio e da un insieme di inserti in bronzo. Uno dei piatti d'acciaio funge da guida per gli inserti di bronzo mentre l'altro presenta una faccia opportunamente lavorata ed in contatto con gli inserti, fornendo così la superficie di attrito. La regolazione della forza di attrito avviene variando la pressione di un gas. Infatti, dietro uno dei piatti è situata una camera a tenuta e mediante il gas, contenuto in un serbatoio, si varia la pressione, quindi la forza di chiusura normale (N) sulla superficie di scorrimento e di conseguenza quella di scorrimento (F). La pressione del gas è gestita da un'unità di controllo.

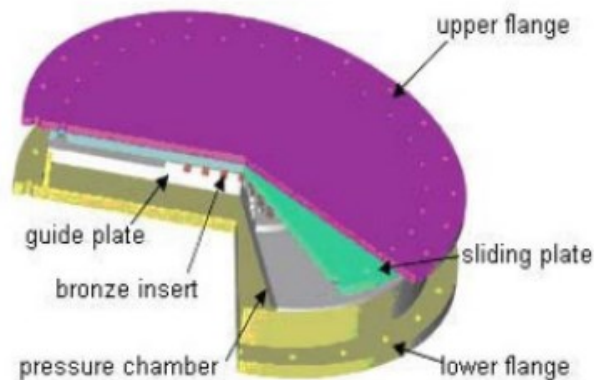


Figura 111. Dispositivo semi-attivo per il controllo dell'attrito, noto come Uhide-fbr.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

- Smorzatori a fluido viscoso. Gli smorzatori a fluido viscoso semi-attivi, sono in genere costituiti da un cilindro idraulico, contenente un pistone, che separa il cilindro in due camere. Quando il pistone si muove, il fluido all'interno dello smorzatore è forzato a passare attraverso dei fori. La differenza di pressione tra le due camere e quindi la forza esplicata dallo smorzatore è regolata da una valvola di controllo esterna, inserita in un circuito di by-pass, che connette le due parti del cilindro. La valvola può essere costituita da una valvola a solenoide per un controllo di tipo on-off oppure da una servovalvola (o elettrovalvola) per un controllo di tipo continuo. Entrambi le tipologie di valvole regolano il flusso direzionale del fluido al fine di controllare la forza esplicata dal sistema idraulico cilindro-pistone.

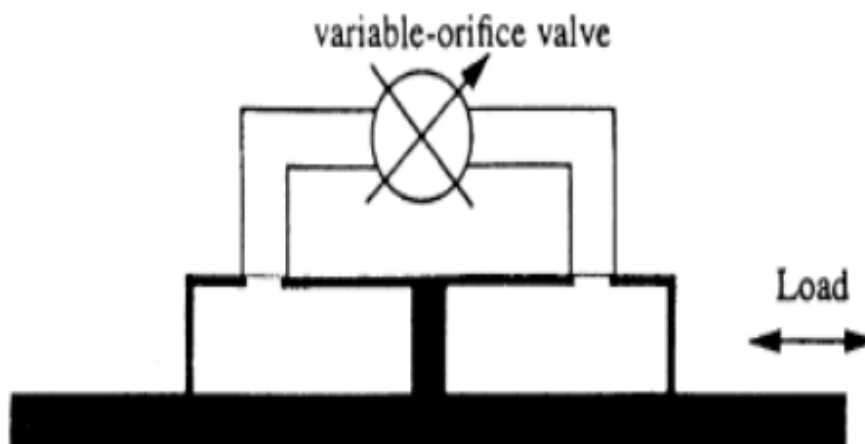


Figura 112. Schema di uno smorzatore a fluido viscoso semi-attivo.

La prima applicazione di uno smorzatore viscoso semi-attivo è stata progettata da Patten, negli Stati Uniti. Quest'ultimo ha inserito degli smorzatori a fluido viscoso semi-attivi ad un ponte della highway I-35, passante per Oklahoma, per controllare le vibrazioni, indotte dal traffico. Il tempo di risposta degli smorzatori viscosi semi-attivi era di circa 30ms.

Successivamente, nell'ambito delle ricerche per realizzare un controllo strutturale semi-attivo per i ponti di una highway americana, Kawashima ha compiuto uno studio analitico e sperimentale su tali dispositivi. Il dispositivo oggetto di studio è costituito da uno smorzatore con un condotto di bypass esterno, dotato di due servovalvole che funzionano anche come valvole di

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

sicurezza, poiché si aprono se la differenza di pressione eccede un limite prefissato. La forza massima esplicabile dal sistema cilindro-pistone è di 200kN, la corsa massima di ± 13 cm, l'ingombro assiale di 1,2m e la potenza necessaria richiesta dalla servovalvola è di 50W.

Questo dispositivo è rappresentato dalla figura sottostante:

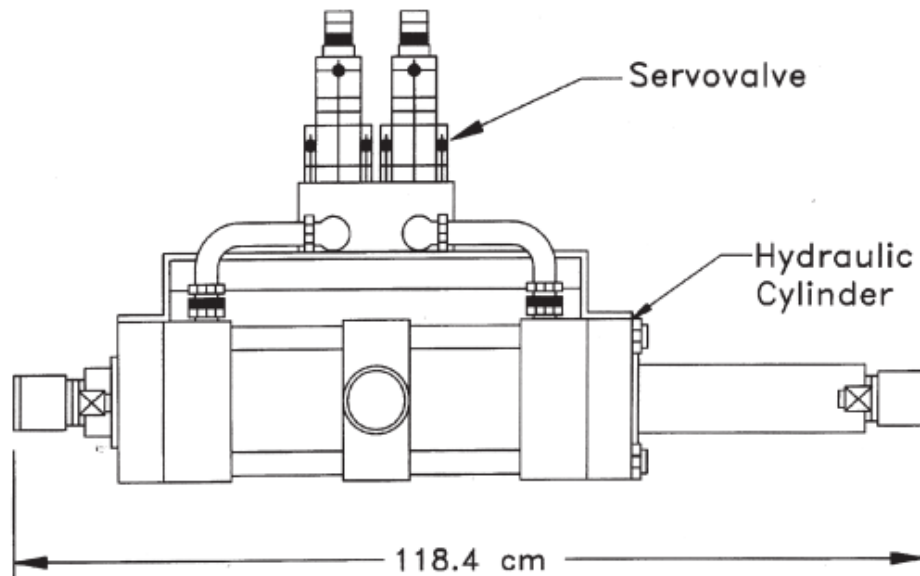


Figura 113. Schema del dispositivo testato da Kawashima.

Kwashima ha svolto dei test sperimentali sul modello in scala di un ponte con una sola luce, avente quattro piloni alti 1,60m, dimensioni del piano stradale di 7,60x2,00m e quattro smorzatori viscosi semi-attivi installati tra il piano stradale e ciascun pilone. La struttura è stata sottoposta ad una accelerazione di tipo sismico e si è osservata una riduzione della sua risposta con gli smorzatori semi-attivi rispetto al caso con smorzatori non installati, conseguendo una riduzione del 46% dell'accelerazione del piano stradale e dell' 86% del suo spostamento.

Un semplice modello che descrive il comportamento dinamico del sistema sull'intervallo di frequenze d'interesse per le applicazioni del controllo strutturale è costituito da uno smorzatore linearmente viscoso con un coefficiente di smorzamento dipendente dalla tensione elettrica applicata, data dalla seguente espressione:

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

$$F = c(V) * x'^{\alpha}$$

dove:

c = Coefficiente di smorzamento (c varia in funzione della tensione elettrica di comando della valvola);

V = Tensione elettrica di comando della valvola (V);

x' = Velocità della testa del pistone rispetto al cilindro (mm/s);

α = Esponente della velocità ($\alpha=1$ per uno smorzatore viscoso lineare ed $\alpha \neq 1$ per uno smorzatore viscoso non lineare).

Il comportamento, descritto da questo modello, è illustrato nei diagrammi forza-velocità e forza-spostamento, nel caso di un moto armonico, riportati nelle figure sottostanti:

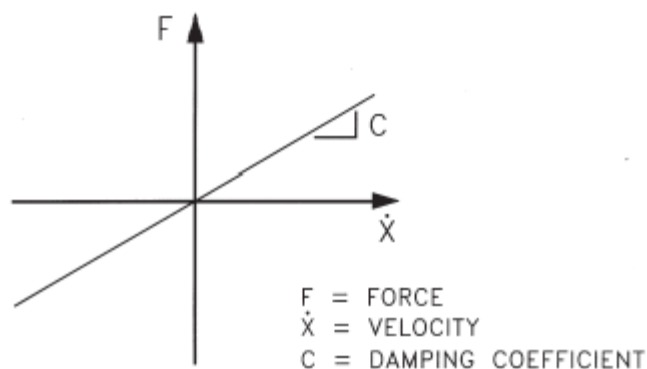


Figura 114. Comportamento ideale di uno smorzatore linearmente viscoso sollecitato da un moto armonico nel piano forza-velocità.

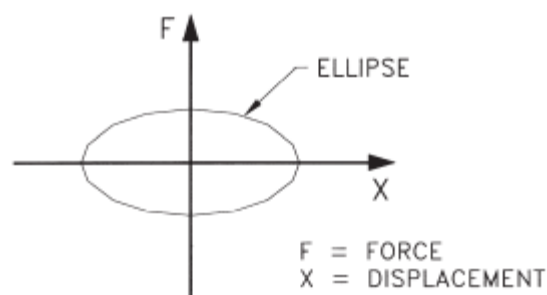


Figura 115. Comportamento ideale di uno smorzatore linearmente viscoso sollecitato da un moto armonico nel piano forza-spostamento.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

E' importante notare che, considerando una sollecitazione di moto armonico, vi è proporzionalità diretta tra il coefficiente di smorzamento (c) e la tensione elettrica (V), in quanto, all'aumentare di quest'ultima, il coefficiente di smorzamento c aumenta. Di conseguenza, i cicli ideali forza-spostamento, riportati nella figura sovrastante, si allargano in direzione verticale, comportando un aumento dell'energia dissipata per ciclo. Inoltre, nel caso dello smorzatore con servovalvola (controllo di tipo continuo), il coefficiente di smorzamento (c), può variare in modo continuo tra un valore massimo ed uno minimo, invece per lo smorzatore con solenoide (controllo di tipo on-off) la grandezza c può assumere solo il valore massimo o quello minimo.

In riferimento allo smorzatore con elettrovalvola, rappresentato nella figura sottostante, sono riportati i cicli di isteresi forza-spostamento, nel caso di pistone soggetto ad un moto con legge sinusoidale e di sette differenti livelli della tensione di comando (0V, 0.75V, 1V, 1.25V, 2V e 3V). Si può notare come la forma dei cicli di isteresi è simile a quella ellittica del modello ideale di uno smorzatore viscoso lineare, ad indicare che il modello matematico dato dall'equazione $[F=c(V)x'^\alpha$; dove $\alpha=1$ per uno smorzatore viscoso lineare] è accettabile per le frequenze del test.

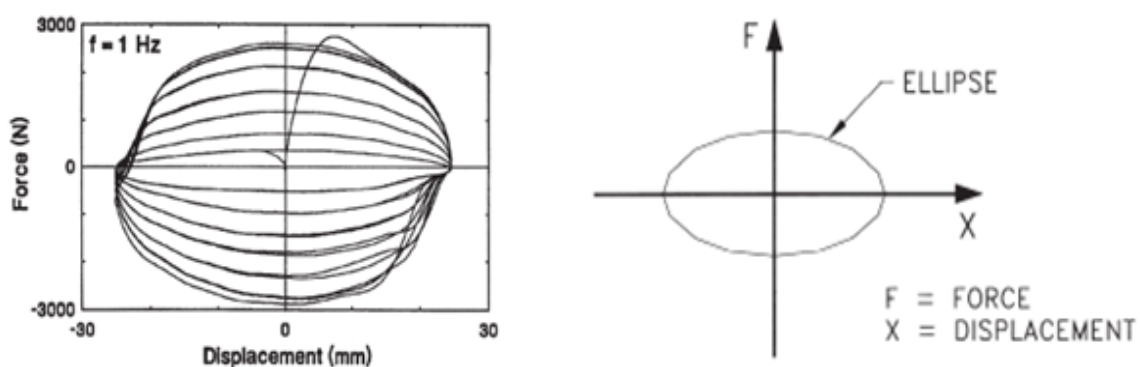


Figura 116. Analogia dei cicli di isteresi forza-spostamento inerenti al caso studio (a sinistra) con quelli del modello ideale (a destra) per uno smorzatore viscoso lineare.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Utilizzando le informazioni sperimentali contenute nei cicli di isteresi, appena mostrati nella figura sovrastante, si ha che il coefficiente di smorzamento (c) è pari a $2,5 \text{ N*s/mm}$ per tensione di comando di 0 V e 17 N*s/mm per tensione di comando di 3 V e varia linearmente tra $0,75 \text{ V}$ e 2 V . Il tempo necessario per modificare la valvola dalla posizione richiesta per lo smorzamento massimo a quella per lo smorzamento minimo è minore di 30 ms . Sempre dagli stessi cicli d'isteresi si nota come l'energia, dissipata per ciascun ciclo, è discreta anche per tensione di comando nulla (0 V), per questo il dispositivo è di tipo fail-safe (a prova di errore).

- Smorzatori a massa accordata (tuned mass damper o TMD) e smorzatori a liquido accordati (tuned liquid damper o TLD).
Gli smorzatori a massa accordata (tuned mass damper) consistono essenzialmente in un sistema massa-molla-smorzatore ad un solo grado di libertà (SDOF) che è tipicamente montato all'ultimo piano di una struttura composta da più livelli. Nei sistemi a massa smorzante accordata, si utilizza, ad esempio, un blocco di calcestruzzo, il quale viene accordato alla frequenza naturale della struttura espressa in $\text{Hz}=1/\text{s}$ ($\omega=1/T=2\pi/T=2\pi/\sqrt{(k/m)}$) in modo da ottenere un sistema che attenua rapidamente le oscillazioni sismiche. Un'alternativa ai tuned mass damper è rappresentata dai tuned liquid damper, dove il sistema massa-molla-smorzatore è sostituito da un serbatoio riempito di acqua o di un altro fluido.
Nel tentativo di migliorare l'efficacia degli smorzatori a liquido accordati per le alte frequenze di movimento strutturale, Lou et al. hanno proposto uno smorzatore a liquido accordato semi-attivo. Il comportamento dello smorzatore semi-attivo è controllato modificando la lunghezza di un serbatoio idraulico, ovvero mediante la regolazione dei deflettori mobili inseriti nel serbatoio. Attraverso la variazione della lunghezza del serbatoio, si varia la frequenza propria del fluido e, di conseguenza, la dissipazione di energia del sistema strutturale. Mediante dei test sperimentali su una semplice struttura modello massa-molla con un serbatoio d'acqua montato sopra la massa (struttura) e sottoposto ad un movimento armonico casuale, hanno dimostrato l'efficacia di diverse lunghezze del serbatoio per il controllo ottimale della risposta strutturale, garantendo un'adeguata dissipazione di energia sismica.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

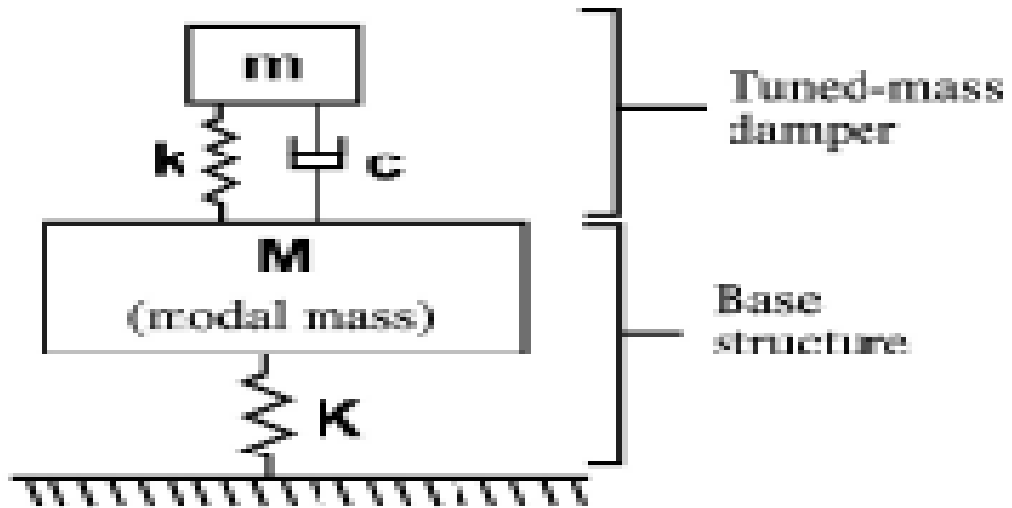


Figure 1 Operating principle of a tuned-mass damper (TMD)

Figura 117. Schema di un sistema a massa smorzante accordata (tuned mass damper o TMD).



Figura 118. Sistema a massa smorzante accordata nel grattacielo Taipei 101 in Taiwan (tuned mass damper o TMD).



Figura 119. Sidney Tower dotata di un sistema a massa smorzante accordata (tuned mass dumper o TMD).



Figura 120. Citigroup Center a New York dotato di un sistema a massa smorzante accordata (tuned mass dumper o TMD).

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

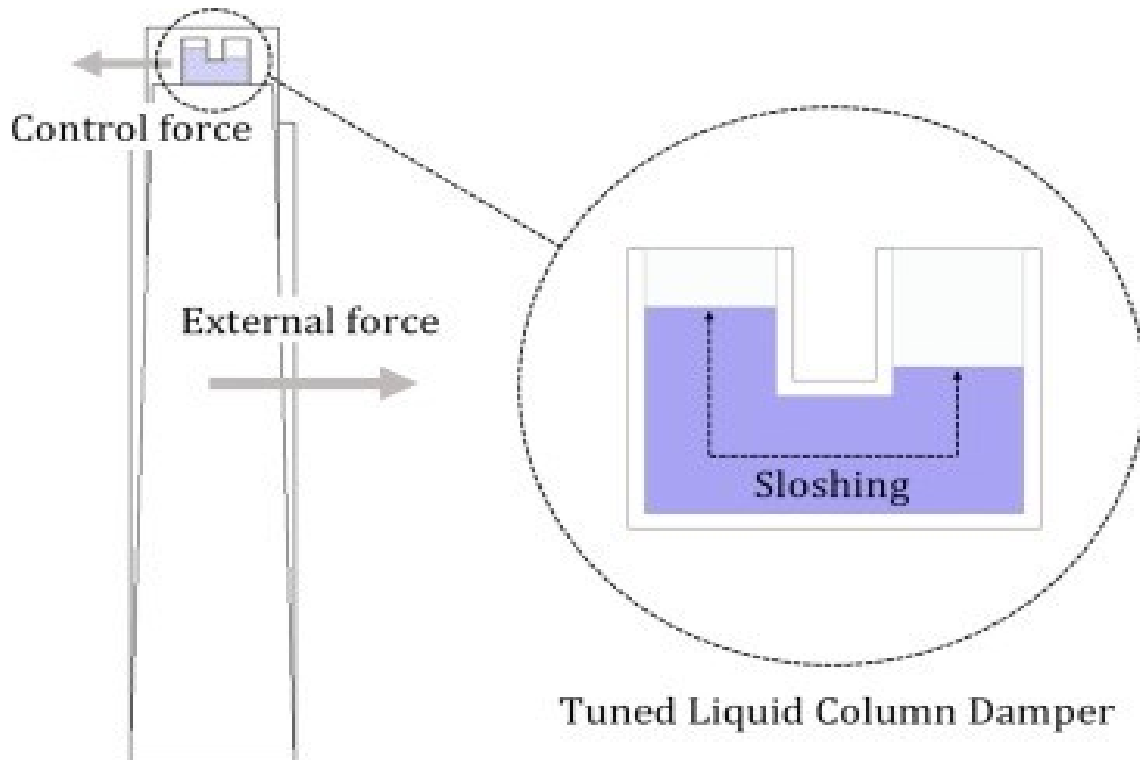


Figura 121. Schema di un sistema a massa liquida smorzante accordata (tuned liquid damper o TLD).



Figura 122. Sistema a massa liquida smorzante accordata nel Grattacielo One Rincon Hill South Tower in California (tuned liquid damper o TLD).

7. Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo mediante l'utilizzo di smorzatori magnetoreologici

La struttura presa in considerazione riguarda un edificio di civile abitazione situato nel comune di Apiro (Mc) caratterizzato da un'altitudine pari a $a_s=480\text{m}$ rispetto al livello medio del mare, con coordinate geografiche di latitudine $\phi=43^\circ,3944$ N e longitudine $\lambda=13,1358$ E, espresse nel riferimento WGS84 (sistema di coordinate geografiche mondiale basate su un ellissoide di riferimento e utilizzate anche nel sistema GPS). L'edificio in esame è costituito da sei piani fuori terra e una mansarda non abitabile. I primi tre piani, di altezza 3,35m, sono adibiti ad uffici aperti al pubblico (cat. B2), mentre i restanti tre, alti 3,05m, ad abitazione (cat. A). La pianta dell'edificio è riconducibile a quella rettangolare con lato maggiore di 19,80m e lato minore di 14m, con rientranze sempre rettangolare (4x4,30m) sugli spigoli nelle quali vengono inseriti i balconi sporgenti di 1,65m. Al piano 5 sono presenti due coperture piane praticabili che riducono l'area interna di 4m ognuna sul lato maggiore dando luogo ad una forma rettangolare di 11,80x14m. Il sesto piano consiste in una mansarda non abitabile ($h_{\max}=1,77\text{m}$) avente copertura a padiglione con pendenza del 30% (angolo di inclinazione della copertura di $16^\circ,6992$).

Il collegamento verticale dei vari piani è reso possibile da una scala realizzata in cemento armato posizionata al centro della struttura e da un ascensore standard. La scala in c.a. poggia sulle relative travi di interpiano di dimensioni 30x35cm evitando così di inserire dei pilastri a supporto del pianerottolo di interpiano e favorendo la stabilità di quest'ultimo.

In base ai parametri meccanici del terreno desunti dai risultati delle prove geotecniche SPT (standard penetration test o prova dinamica) in foro si è notato che la resistenza meccanica del terreno non era ottimale in superficie, pertanto si è scelto di adottare una tipologia di fondazione profonda, il plinto su monopalo (lunghezza pari a 11,80m e diametro pari a 0,60m) sotto ai pilastri e il plinto su bipalo (lunghezza pari a 11,80m e diametro pari a 0,60m) sotto ai setti in cemento armato (quattro setti posizionati nei fili fissi numero 1-4-17-20, con il lato maggiore lungo x di dimensioni 1,00x0,20m e quattro setti posizionati nei fili fissi 6-9-12-15, con il lato minore lungo x di dimensioni 0,20x0,80m). Per ridurre gli eventuali cedimenti differenziali si sono collegati, in entrambi le direzioni (x ed y), i

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

plinti rettangolari di fondazione (dimensioni inerenti alle sezioni trasversali: 3,00x1,50h m per i plinti sotto i setti in c.a. e 1,20x1,50h m per i plinti sotto ai pilastri) mediante dei cordoli in cemento armato (0,50x0,80h m).

In questo progetto si farà riferimento alla normativa vigente: Ministero delle Infrastrutture, D.M. 22 marzo 2018 “Norme tecniche delle costruzioni”.

Per quanto riguarda i materiali, saranno adottati:

Calcestruzzo C25/30:

- Resistenza cubica caratteristica a compressione: $R_{ck} = 30\text{N/mm}^2$
- Resistenza cilindrica caratteristica a compressione: $f_{ck} = 0,83 \cdot R_{ck} = 24,9\text{N/mm}^2$
- Resistenza media a compressione: $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 32,9\text{N/mm}^2$
- Resistenza media a trazione: $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2,56\text{N/mm}^2$
- Resistenza media a trazione per inflessione: $f_{ctm} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 1,79\text{N/mm}^2$
- Modulo di elasticità: $E_{cm} = 22000(f_{cm}/10)^{0.3} = 31447,16\text{N/mm}^2$

Acciaio B450C:

- Resistenza caratteristica di snervamento: $f_{yk} = 450\text{N/mm}^2$
- Modulo di elasticità: $E_s = 210000\text{N/mm}^2$

Per passare dalle resistenze caratteristiche alle resistenze di progetto si adottano opportuni coefficienti di sicurezza sui materiali, forniti dalla normativa:

- coefficiente parziale di sicurezza sul calcestruzzo: $\gamma_c = 1,50$
- coefficiente parziale di sicurezza sull'acciaio: $\gamma_s = 1,15$

Si noti che il coefficiente parziale di sicurezza del calcestruzzo è maggiore rispetto a quello dell'acciaio, questo per compensare le incertezze legate all'eterogeneità del materiale e le differenze tra resistenza convenzionale (caratteristica) e quella che si realizza effettivamente una volta in opera.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

In conclusione verranno utilizzati i seguenti valori di resistenza di progetto per calcestruzzo e acciaio:

- Resistenza di progetto del cls: $f_{cd} = 0,85 \cdot f_{ck} / \gamma_c = 14,11 \text{ N/mm}^2$;
- Resistenza di progetto dell'acciaio: $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 391,30 \text{ N/mm}^2$.

Ora si espongono le tavole del progetto in esame in scala 1:100 senza l'applicazione dei dissipatori sismici:

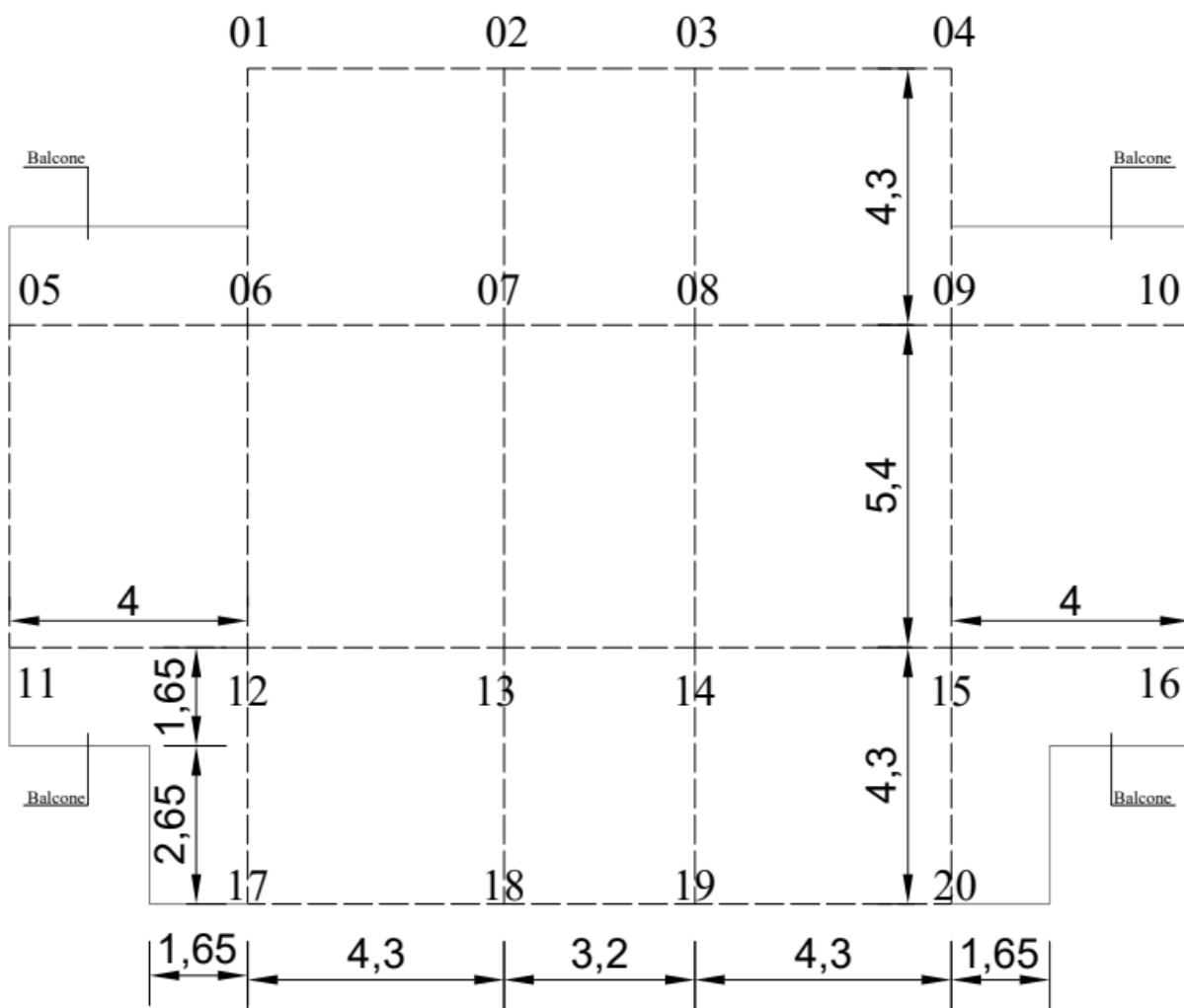


Figura 123.Pianta dei fili fissi.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

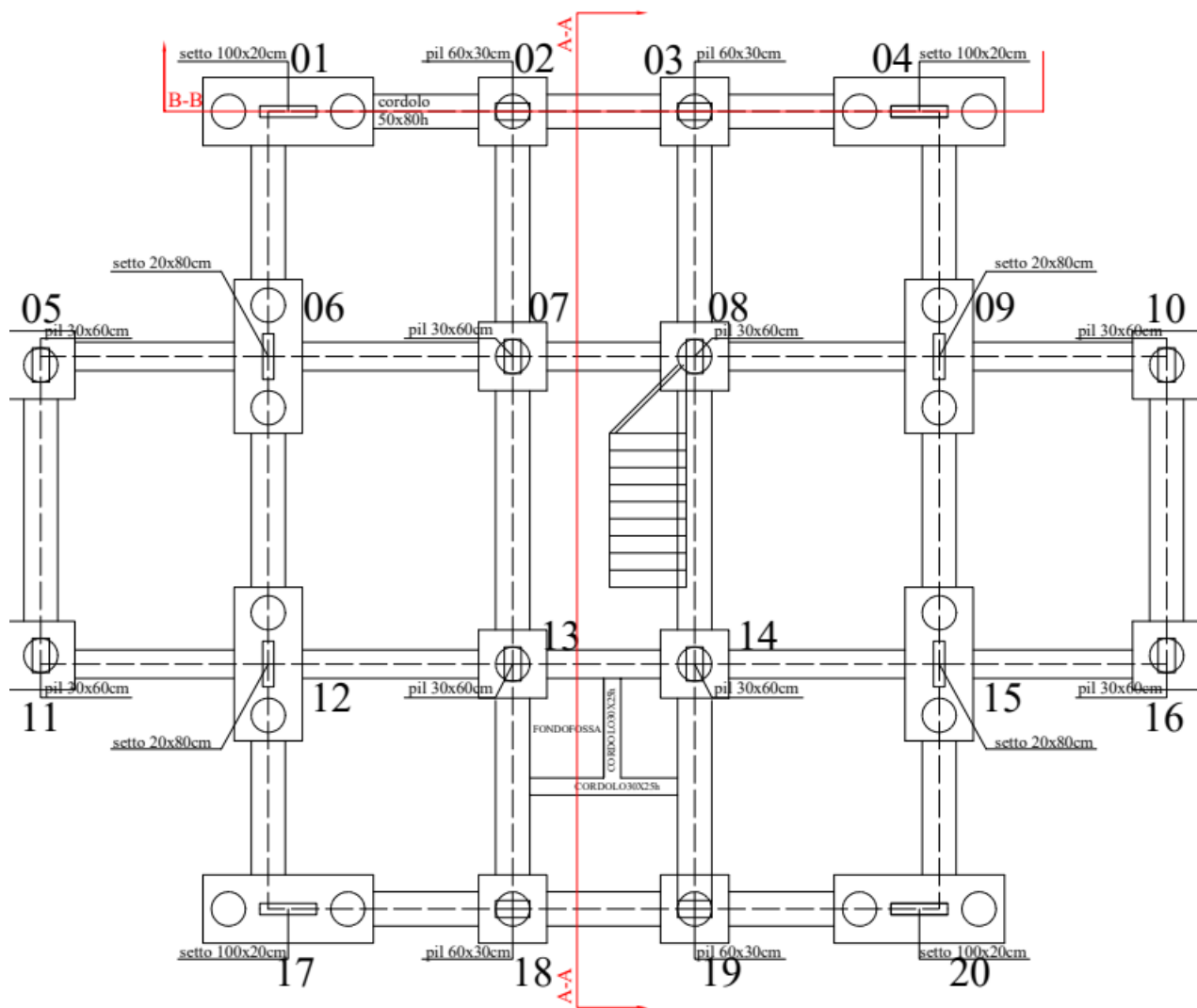


Figura 124. Carpenteria delle fondazioni.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

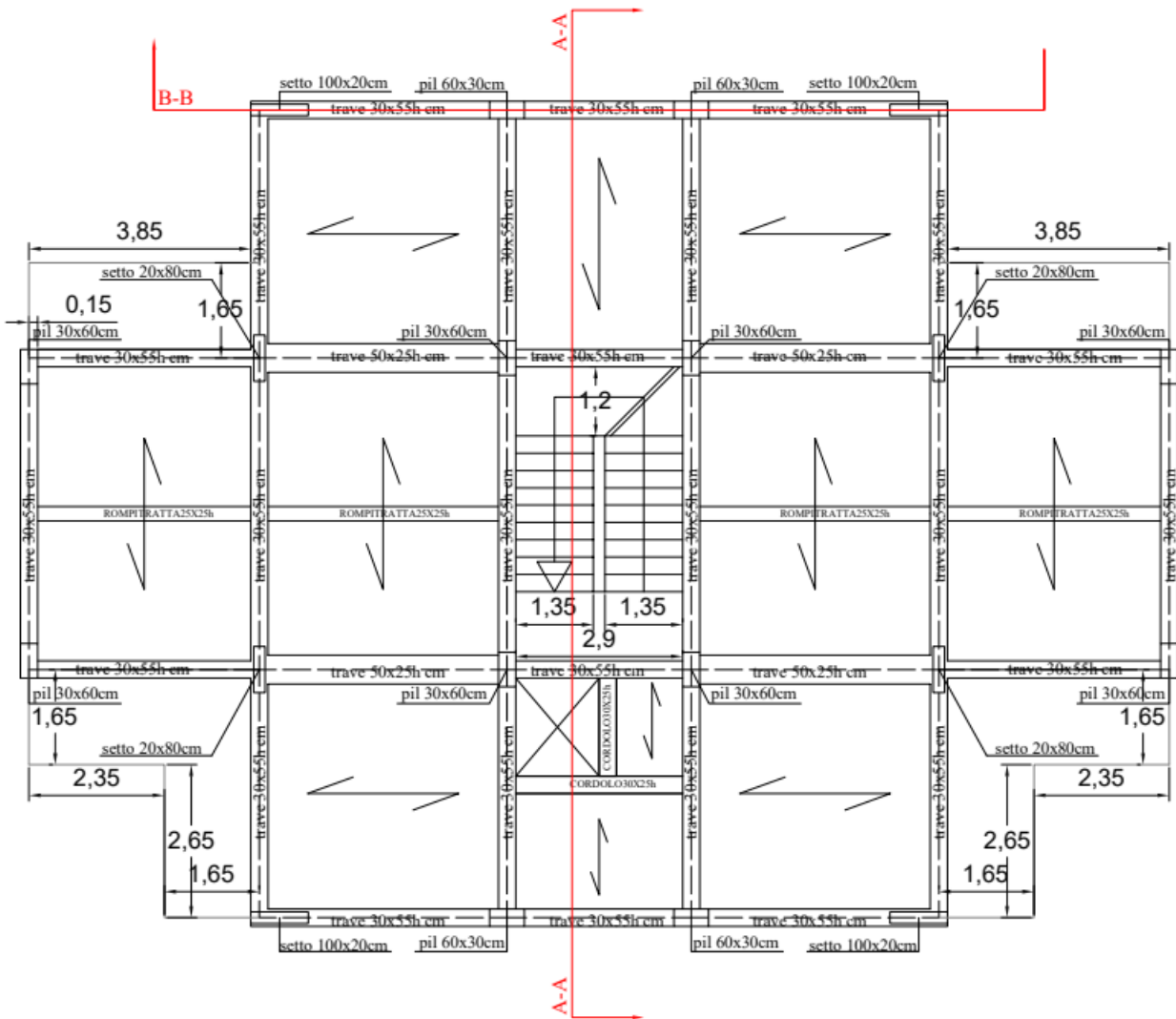


Figura 125. Carpenteria del piano primo.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

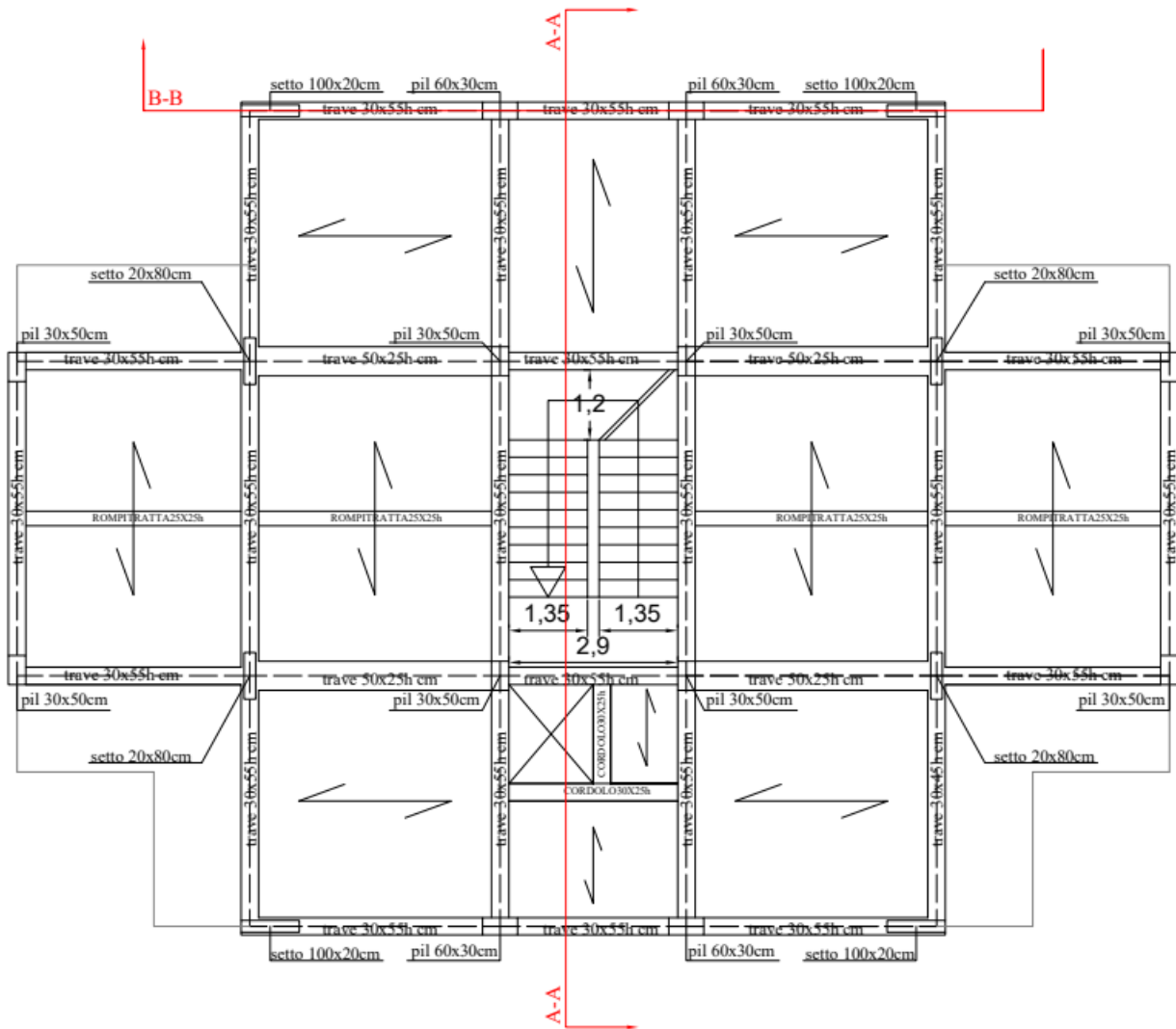


Figura 126. Carpenteria del piano secondo.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

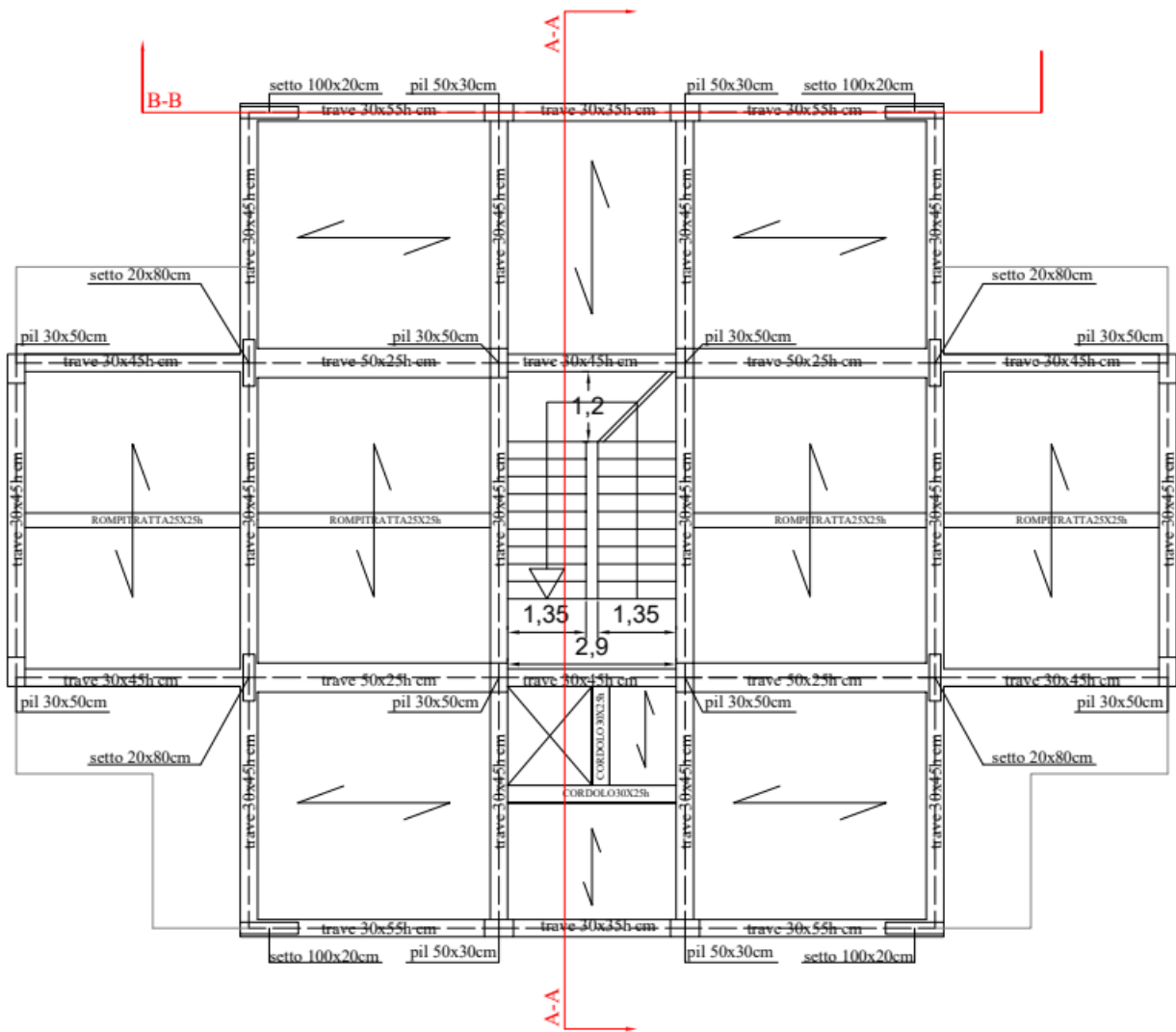


Figura 127. Carpenteria del piano terzo.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

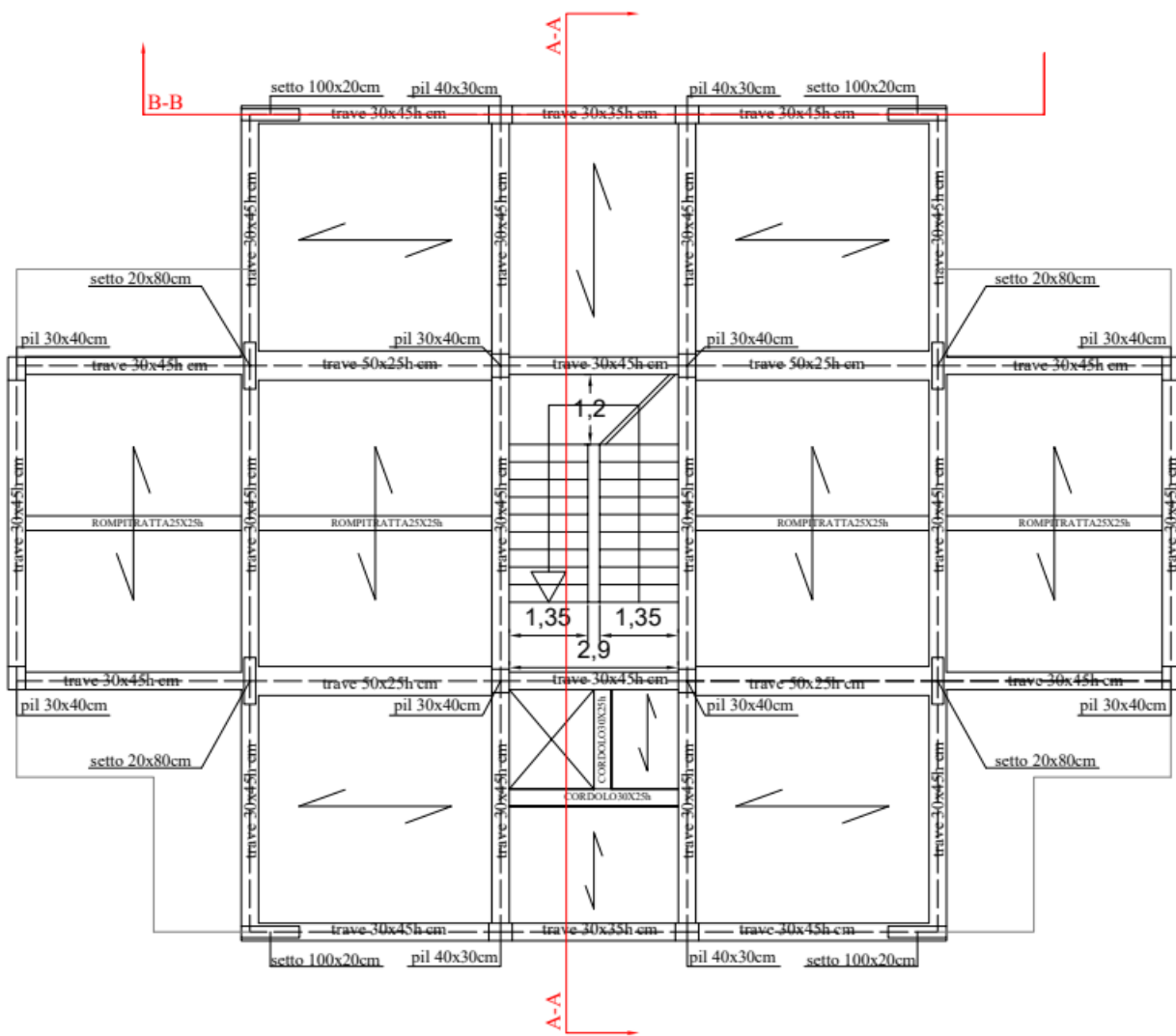


Figura 128. Carpenteria del piano quarto.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

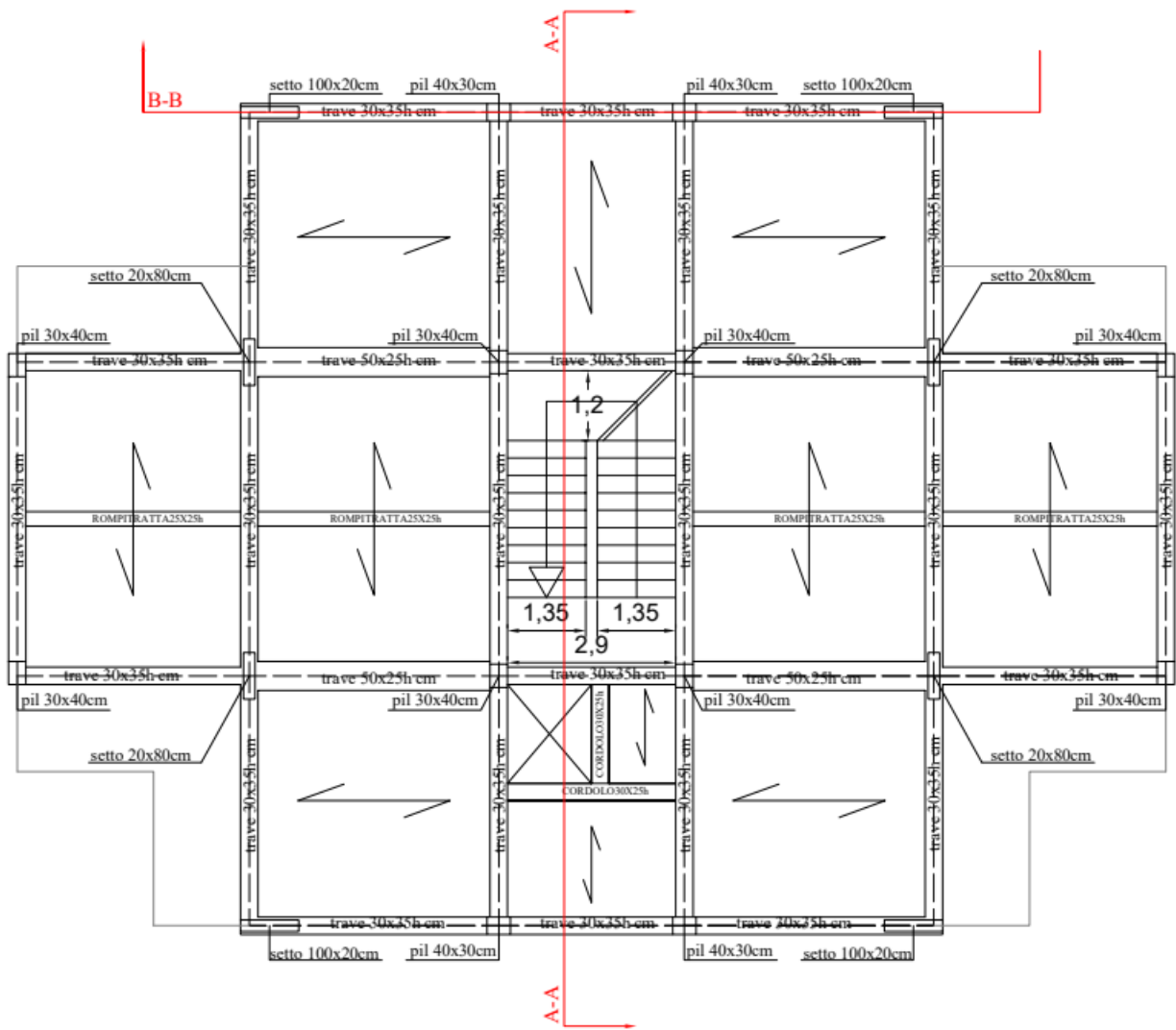


Figura 129. Carpenteria del piano quinto.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

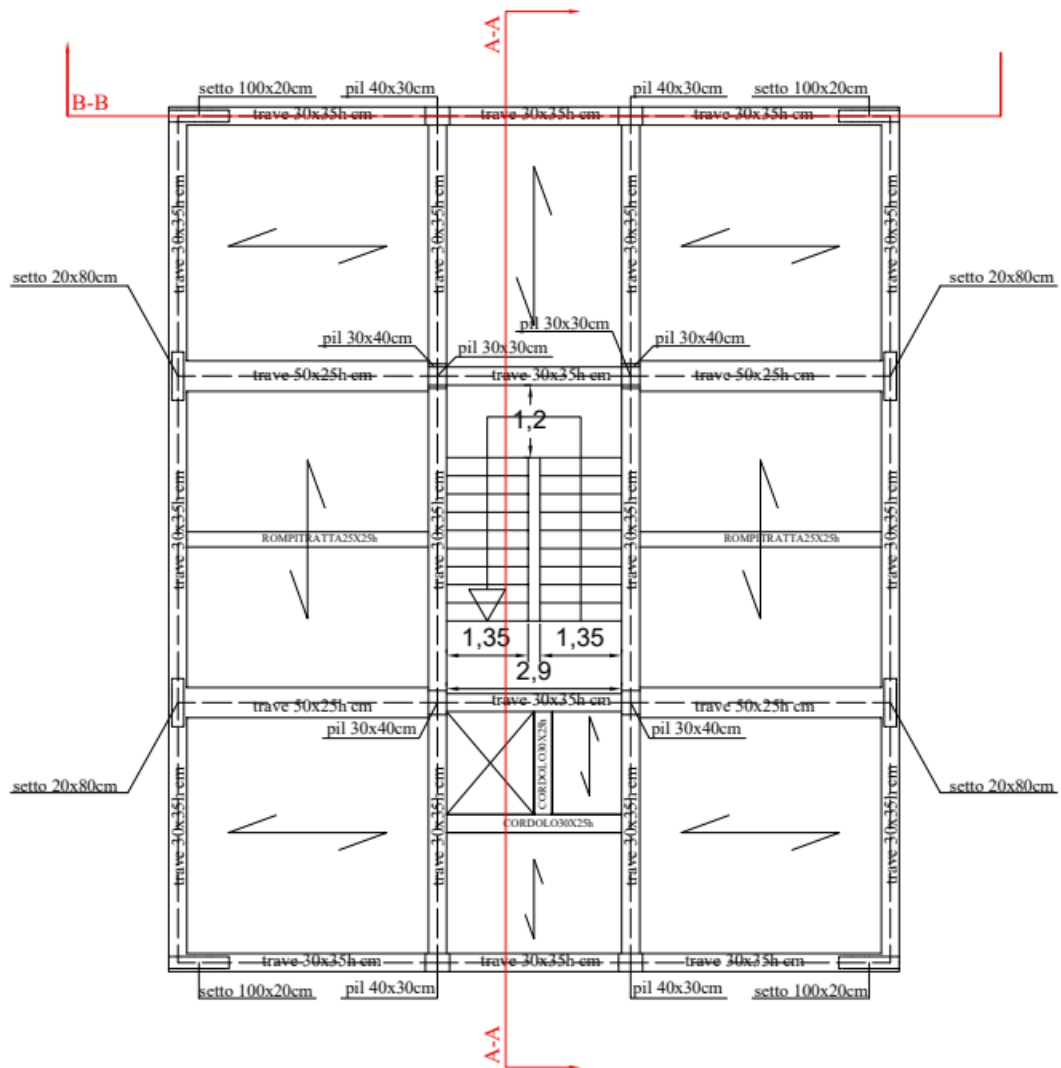


Figura 130. Carpenteria del piano sesto.

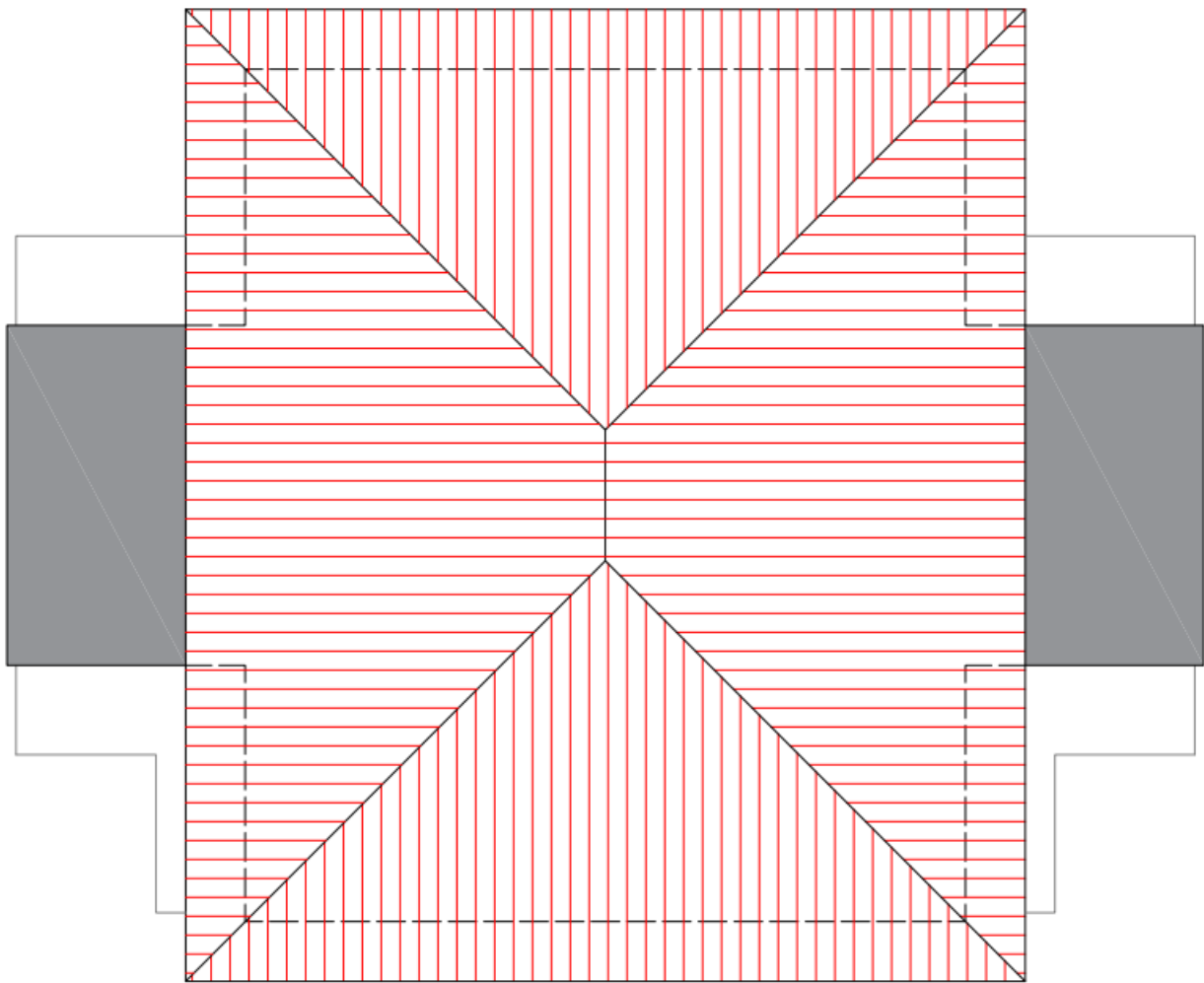


Figura 132. Pianta della copertura.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

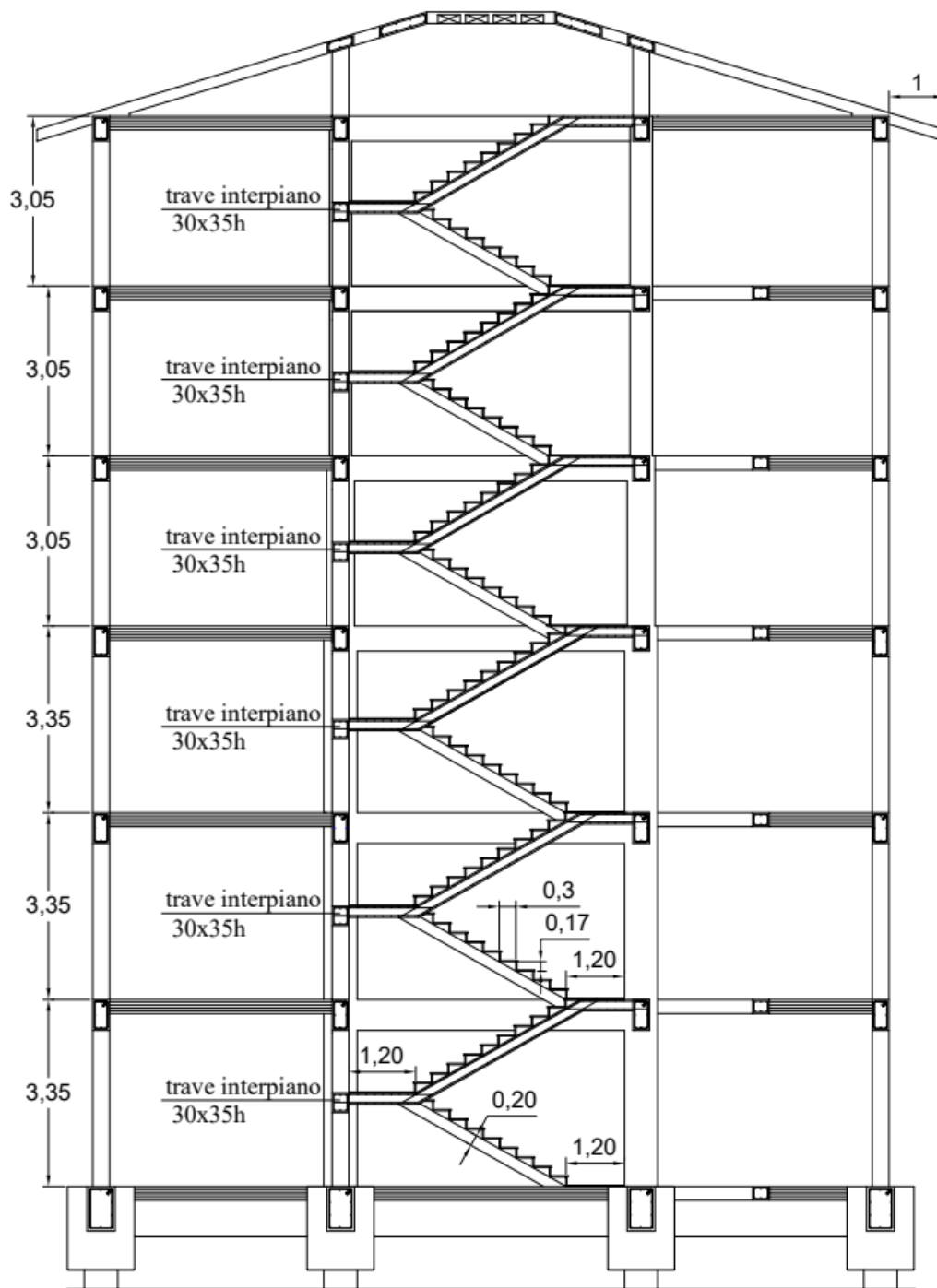


Figura 133. Sezione trasversale A-A.

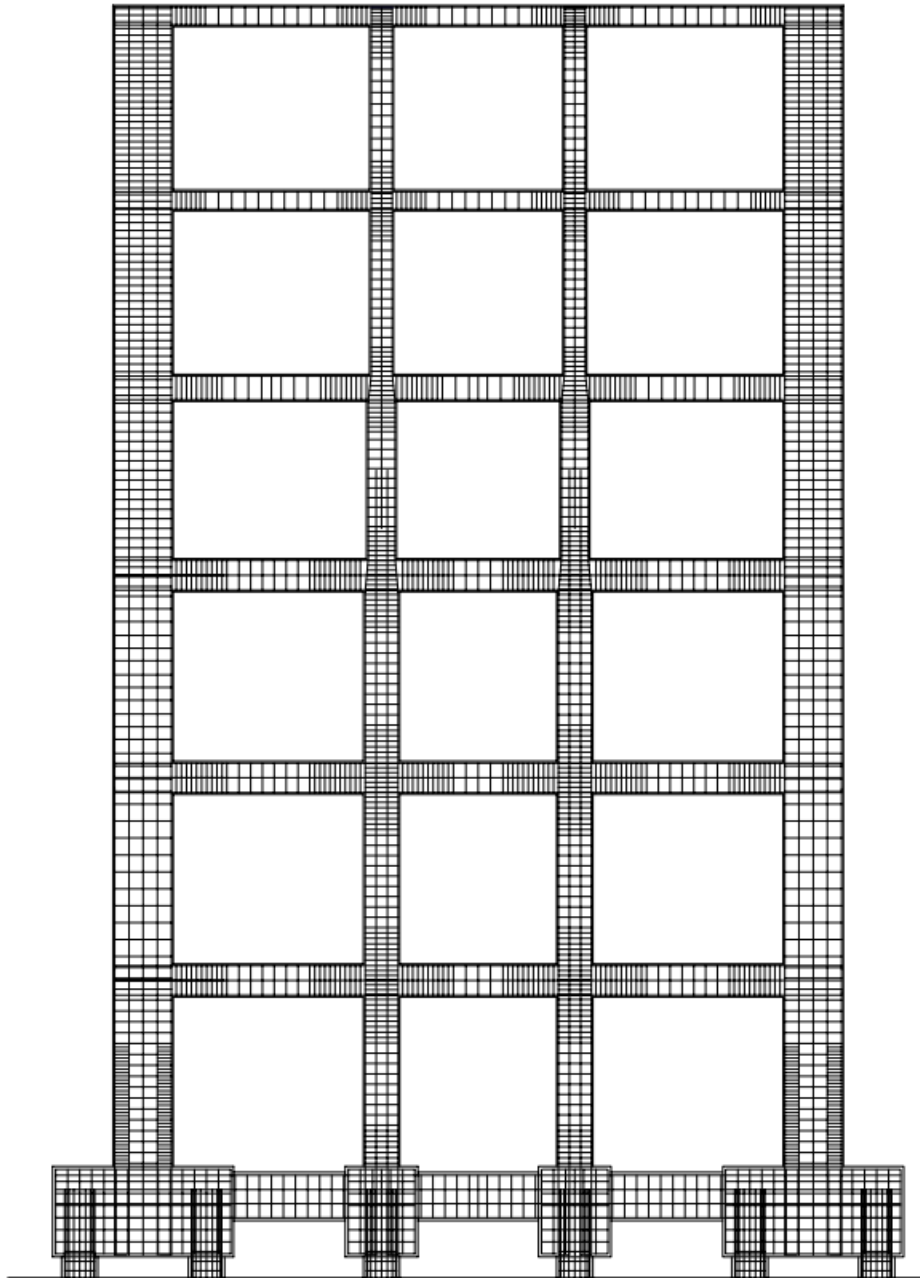


Figura 134. Sezione trasversale B-B.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Si procede dunque riportando l'analisi dei carichi relativa per ogni elemento strutturale e non strutturale presenti in questo progetto.

Per i solai (solai standard) si sceglie di utilizzare la tipologia di solaio in latero-cemento con travetti gettati in opera e blocchi di alleggerimento in laterizio. Il dimensionamento iniziale dei solai viene svolto considerando la seguente formula:

$$h_{\text{solaio minima}} = 1/25 L_{\text{calcolo}_{\text{max}}} = 540/25 = 21,60\text{cm}$$

Il solaio di interpiano standard viene dunque realizzato con una pignatta alta 20cm e una soletta di 5cm in calcestruzzo armato (altezza della soletta necessaria per considerare il comportamento rigido del solaio nel suo piano) per un'altezza totale di 25cm (altezza strutturale del solaio da calcolo, ovvero 20+5cm) in modo da soddisfare l'altezza minima di 21,60cm derivante dal dimensionamento iniziale. Da catalogo si sceglie la pignatta RBO50 (50x20hx25cm) e una base del travetto di 10cm (interasse travetti pari a 0,50m). Sempre dal catalogo deriva il peso del pacchetto travetto-pignatta (altezza del pacchetto pari a 0,20m esclusa la soletta in c.a.) di 1,75kN/m².

La tabella sottostante mostra l'analisi dei carichi effettuata:

Voce	Spessore (m)	Peso specifico (kN/m ³)	Peso (kN/m ²)
Intonaco	0,015	20	0,30
Travetto/pignatta (RBO: 50x20hx25cm)	0,20		1,75
Soletta in c.a.	0,05	25	1,25
Massetto	0,065	20	1,30
Piastrelle in gres	0,02	20	0,40

Ottenendo un carico permanente G_k pari a 5kN/m². Oltre a questo carico permanente avremo il peso dei divisori pari a 2kN/m², il carico variabile da civile abitazione cat.A pari a 2kN/m² o da uffici aperti al pubblico cat.B2 pari a 3kN/m². In totale avremo un carico per civile abitazione pari a 9kN/m² e per gli uffici aperti al pubblico pari a 10kN/m².

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Si prosegue con l'analisi dei carichi relativa ai balconi, considerandoli come il continuo dei solai, usando dunque gli stessi travetti e le stesse pignatte, ma con strati superiori differenti. Per la balaustra in acciaio (peso lineare di 0,3kN/m) si ragiona moltiplicando il peso della stessa per la sua lunghezza e dividendo per l'area del balcone ($0,3 \cdot (1,65+4) / (1,65 \cdot 4) = 0,26 \text{ kN/m}^2$), ottenendo un carico utilizzabile esattamente come gli altri. La tabella sottostante mostra l'analisi dei carichi effettuata:

Voce	Spessore (m)	Peso specifico (kN/m ³)	Peso (kN/m ²)
Intonaco	0,015	20	0,3
Travetto/pignatta (RBO50: 50x20hx25 cm)	0,20		1,75
Soletta in c.a.	0,05	25	1,25
Massetto in pendenza (2%)	0,065	20	1,3
Guaina impermeabilizzante	0,005	20	0,1
Piastrelle in gres	0,02	20	0,4
Balaustra			0,26

Ottenendo un carico permanente G_k pari a $5,36 \text{ kN/m}^2$. Oltre a questo carico avremo un carico variabile sui balconi pari a 4 kN/m^2 ed il carico neve analogo a quello delle coperture piane pari a $5,07 \text{ kN/m}^2$. In totale avremo un carico pari a $14,43 \text{ kN/m}^2$.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Si prosegue con l'analisi dei carichi delle coperture piane praticabili. La tabella sottostante mostra l'analisi dei carichi effettuata:

Voce	Spessore (m)	Peso specifico (kN/m ³)	Peso (kN/m ²)
Intonaco	0,015	20	0,3
Travetto/pignatta (RBO: 50x20hx25cm)	0,20		1,75
Soletta in c.a.	0,05	25	1,25
Coibentazione con pannello in lana di roccia	0,05	0,9	0,045
Massetto in pen- denza (2%)	0,035	20	0,7
Guaina impermea- bilizzante	0,005	20	0,1
Piastrelle in gres	0,02	20	0,4

Ottenendo un carico permanente G_k pari a $4,55\text{kN/m}^2$. Oltre a questo carico avremo un carico variabile sulla copertura piana praticabile pari a 4kN/m^2 ed il carico neve che viene calcolato mediante la spiegazione seguente.

Si riporta il calcolo del carico neve per entrambi le coperture dell'edificio (copertura a padiglione o piana praticabile) mediante la seguente formula:

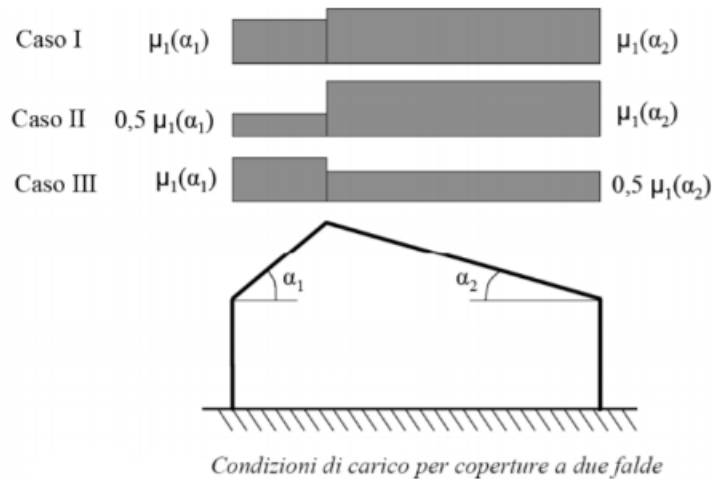
$$q_s = \mu_i q_{sk} C_E C_T$$

dove:

q_s = Carico neve sulla copertura (carico verticale);

μ_i = Coefficiente di forma della copertura. La figura sottostante mostra le tabelle inerenti al suo calcolo:

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo



Valori del coefficiente di forma

Coefficiente di forma	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8 \cdot \frac{(60 - \alpha)}{30}$	0,0

Figura 135. Tabella del coefficiente di forma della copertura.

q_{sk} = Valore caratteristico di riferimento per il carico da neve al suolo fornito dalla normativa per un periodo di ritorno di 50 anni. Esso dipende dalle condizioni locali di clima e di esposizione, considerando la variabilità delle precipitazioni nevose da zona a zona.

Ora, tenendo in considerazione che l'ubicazione dell'edificio è nel comune di Apiro (Mc), Zona II Mediterranea e che l'altezza sul livello del mare del sito di realizzazione è pari a $a_s=480 \text{ m} > 200 \text{ m}$, otteniamo un valore di q_{sk} espresso dalla seguente formula:

$$q_{sk}=0,85[1+(a_s/481)^2]=0,85[1+(480/481)^2]=1,70\text{kN/m}^2$$

(per entrambi le tipologie di coperture).

Successivamente si scelgono i coefficienti C_E (coefficiente di esposizione) e C_T (coefficiente termico) pari ad 1 in quanto si è fatto riferimento ad una topografia normale ovvero ad un'area in cui non è presente una significativa rimozione della neve sulla costruzione prodotta dal vento, a

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

causa del terreno, altre costruzioni o alberi (C_E). Inoltre viene trascurata la riduzione del carico a causa dello scioglimento della stessa, causata dalla perdita di calore della costruzione (C_T). Infine si è considerato un coefficiente che tiene conto della forma della copertura (μ_i) pari a 0,8 (in quanto l'inclinazione della copertura a padiglione pari a $16^\circ,6992$ è compreso fra 0 e 30°). In base ai valori dei coefficienti sopra determinati otteniamo un valore del carico neve (carico verticale) sulla copertura a padiglione pari a:

$$q_s = \mu_i q_{sk} C_E C_T = 0,8 * 1,70 * 1 * 1 = 1,36 \text{ kN/m}^2$$

Di conseguenza, il carico perpendicolare alle travi di copertura, sarà pari a $1,36 * \cos(16^\circ,6992) = 1,30 \text{ kN/m}^2$.

Mentre, per la copertura piana praticabile (caso di copertura adiacente o vicina a costruzioni più alte), si è considerato un coefficiente di forma differente che tiene conto di due contributi:

- lo scivolamento della neve della copertura superiore per $\alpha = 16^\circ,6992 > 15^\circ$: $\mu_s = (\mu_1 a) / 2l_s = (0,8 * 5,90) / 2 * (2 * 3,05) = 0,3869$;
- la redistribuzione della neve sulla copertura piana operata dal vento: $(\mu_w = (b_1 + b_2 / 2h) = (11,8 + 4 / 2 * 3,05) = 2,59 < 3,58 = 2 * 3,05 / 1,70 = \gamma_{neve} h / q_{sk}$ e comunque $0,80 < \mu_w < 4$). La lunghezza della zona in cui si forma l'accumulo di neve è data da $l_s = 2h$ e comunque $5 < l_s < 15 \text{ m}$. Nel caso in cui $b_2 < l_s$ il valore del coefficiente di forma al livello della fine della copertura posta a quota inferiore dovrà essere valutato per interpolazione lineare tra i valori di μ_1 e μ_2 .

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Coperture adiacenti o vicine a costruzioni più alte

$$\mu_2 = \mu_s + \mu_w$$

Contributo scivolamento μ_s

calcolato in ragione del 50% del carico totale massimo insistente sulla falda della copertura superiore, valutato con riferimento al valore del coefficiente di forma appropriato per detta falda.

$$\begin{aligned} \mu_s &= 0 & \alpha &\leq 15^\circ \\ \mu_s &= \mu_1 a / 2l_s & \alpha &> 15^\circ \end{aligned}$$

Contributo vento μ_w

$$0.8 \leq \mu_w = (b_1 + b_2) / 2h \leq \gamma h / q_{sk} \leq 4.0$$

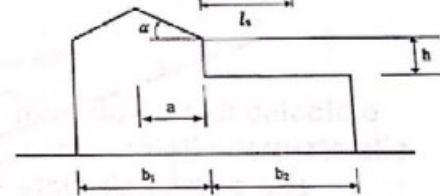
$\gamma=2$ peso per unità di volume della neve

caso (i)
assenza di vento

$$\mu_1$$

caso (ii)
scivolamento
e vento

$$\mu_2$$



$$5 \text{ m} \leq l_s = 2h \leq 15 \text{ m}$$

Figura 136. Tabella dei coefficienti di forma per coperture adiacenti o vicine a costruzioni più alte.

Pertanto il coefficiente finale sarà pari a $\mu_2 = 0,3869 + 2,59 = 2,98$. Mentre il carico neve finale (carico verticale) sulla copertura piana praticabile sarà dato dalla seguente formula:

$$q_s = \mu_i q_{sk} C_E C_T = 2,98 * 1,70 * 1 * 1 = 5,07 \text{ kN/m}^2$$

In totale avremo un carico sulla copertura piana pari a $13,62 \text{ kN/m}^2$.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Si prosegue con l'analisi dei carichi della copertura a padiglione, scegliendo di alleggerire il solaio riducendo la sua altezza strutturale a 16+4cm. La tabella sottostante mostra l'analisi dei carichi effettuata:

Voce	Spessore (m)	Peso specifico (kN/m ³)	Peso (kN/m ²)
Intonaco	0,015	20	0,3
Travetto/pignatta (RBO50: 50x16hx25 cm)	0,16		1,45
Soletta in c.a.	0,04	25	1
Coibentazione con pannello in lana di roccia	0,05	0,90	0,045
Massetto	0,035	20	0,70
Guaina impermea- bilizzante	0,005	10	0,05
Tegole			0,6

Ottenendo un carico permanente G_k inclinato pari a $4,15\text{kN/m}^2$ (carico perpendicolare alle travi di copertura). Oltre a questo carico permanente avremo il carico variabile inclinato per la copertura a padiglione pari a $0,48\text{kN/m}^2$ (dato da $0,50 \cdot \cos 16^\circ,6992 = 0,48\text{kN/m}^2$, dove $0,50\text{kN/m}^2$ è il carico variabile verticale relativo alla categoria H_1 delle coperture e sottotetti ammissibili per sola manutenzione) ed il carico neve inclinato pari a $1,30\text{kN/m}^2$ (dato da $1,36 \cdot \cos 16^\circ,6992 = 1,30\text{kN/m}^2$, dove $1,36\text{kN/m}^2$ è il carico variabile verticale sulla copertura a padiglione).

In totale avremo un carico perpendicolare alle travi di copertura pari a $5,93\text{kN/m}^2$.

Si prosegue con l'analisi dei carichi del cornicione di copertura. La tabella sottostante mostra l'analisi dei carichi effettuata:

Voce	Spessore (m)	Peso specifico (kN/m ³)	Peso (kN/m ²)
Intonaco	0,015	20	0,3
Soletta in c.a.	0,20	25	5
Tegole			0,60

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Ottenendo un carico permanente G_k pari a $5,9\text{kN/m}^2$. Oltre a questo carico permanente avremo il carico variabile verticale per i cornicioni pari a $0,5\text{kN/m}^2$ ed il carico neve verticale pari a $1,36\text{kN/m}^2$. I carichi variabili sono analoghi a quelli della copertura a padiglione. In totale avremo un carico pari a $7,76\text{kN/m}^2$.

Si prosegue con l'analisi dei carichi delle tamponature. La tabella sottostante mostra l'analisi dei carichi effettuata:

Voce	Spessore (m)	Peso specifico (kN/m^3)	Peso (kN/m^2)
Intonaco esterno	0,03	20	0,60
Muratura esterna (semipieno 12x5,5hx25cm)	0,12	16	1,92
Intonaco rustico	0,02	20	0,4
Coibentazione con pannello in lana di roccia	0,05	0,90	0,045
Muratura interna (forati da 6x25hx25cm)	0,06	11	0,66
Intonaco interno	0,02	20	0,40

Ottenendo un carico permanente G_k pari a $4,025\text{kN/m}^2$ relativo alle tamponature delle scale. Considerando un'altezza di piano pari a $3,35\text{m}$ e delle travi di altezza pari a $0,60\text{m}$, avremo un carico lineare pari a $11,07\text{kN/m}$ ($2,75*4,025=11,07\text{kN/m}$). Mentre, considerando un'altezza di piano pari a $3,05\text{m}$ e delle travi di altezza pari a $0,60\text{m}$, avremo un carico lineare pari a $9,86\text{kN/m}$ ($2,45*4,025=9,86\text{kN/m}$).

Per ottenere le tamponature esterne, invece, basterà considerare un'intercapedine di 5cm (peso trascurabile) e un grado di apertura dell'80% ($\alpha=0,80$, caso con sole finestre) ottenendo, per un'altezza di piano pari a $3,35\text{m}$, un carico pari a $8,86\text{kN/m}$ ($11,07*0,80=8,86\text{kN/m}$) e per un'altezza di piano pari a $3,05\text{m}$, un carico pari a $7,89\text{kN/m}$ ($9,86*0,8=7,89\text{kN/m}$).

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Si prosegue con l'analisi dei carichi relativa ai pianerottoli delle scale. La tabella sottostante mostra l'analisi dei carichi effettuata:

Voce	Spessore (m)	Peso specifico (kN/m ³)	Peso (kN/m ²)
Intonaco	0,015	20	0,30
Soletta in c.a.	0,20	25	5
Pavimentazione in marmo	0,02	20	0,40

Ottenendo un carico permanente G_k pari a $5,7\text{kN/m}^2$. Oltre a questo carico permanente avremo il carico variabile dei pianerottoli delle scale pari a 4kN/m^2 . In totale avremo un carico pari a $9,70\text{kN/m}^2$.

Infine, si conclude con l'analisi dei carichi relativi alla scala in c.a.

Per la scala in c.a. si effettua un'unica analisi considerando un'altezza di piano di $3,35\text{m}$ andando a favore di sicurezza (l'errore è comunque molto marginale). Per calcolare il peso si va innanzitutto a dimensionare la scala a due rampe con un dislivello di $3,35\text{m}$ e una lunghezza della singola rampa di $2,7\text{m}$. Ipotizzando una alzata di 17cm si otterranno 20 alzate ($n^\circ\text{alzate}=335/17=19,70\approx 20$), dunque l'alzata di progetto diventerà $16,75\text{cm}$ ($\text{alzata progetto}=335/20=16,75\text{cm}$) e ne verranno inserite 10 per ogni rampa ($16,75\times 10\times 2\text{rampe}=335\text{cm}$). Per le pedate si avrà: $2,7\text{m}/(10-1)=30\text{cm}$. Pertanto avremo un'alzata di progetto pari a $16,75\text{cm}$ e una pedata di progetto pari a 30cm .

Si prosegue dunque al calcolo del peso del singolo gradino: consideriamo inizialmente l'area triangolare del gradino pari a $30\times 16,75/2=251,25\text{cm}^2$ con un peso del cls alleggerito di 20kN/m^3 otterremo un carico lineare di $0,503\text{kN/m}$ ($\text{carico lineare}=20\times 251,25/10000=0,503\text{kN/m}$). Per le due lastre di marmo di copertura dell'alzata e della pedata si usa uno spessore di 2cm , ottenendo, per la pedata (considerando una sporgenza di 2 ulteriori cm) $B=34\text{cm}$ e $s=2\text{cm}$, mentre per l'alzata andranno tolti i 2cm della pedata sottostante ottenendo $H=16,75-2=14,75\text{cm}$ e $s=2\text{cm}$ per un'area totale di $97,5\text{ cm}^2$ ($\text{area totale}=34\times 2+14,75\times 2=97,5\text{cm}^2$). Considerato il peso specifico del marmo di 28kN/m^3 , otterremo un peso totale delle lastre (pedata+alzata) di $0,273\text{kN/m}$ ($\text{peso lastre marmo}=97,5/10000\times 28=0,273\text{kN/m}$) e un peso totale del gradino per unità di profondità di $0,776\text{kN/m}$ ($\text{peso totale gradino}=0,503+0,273=0,776\text{kN/m}$)

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

e, dividendo per 30cm di pedata otterremo un carico distribuito superficiale del gradino di $2,585\text{N/m}^2$ (peso gradino distribuito= $0,776/0,30=2,586\text{kN/m}^2$). Considerando ora uno spessore di intonaco di 1,5cm ($\gamma=20\text{ kN/m}^3$) e una soletta di calcestruzzo armata di 20cm ($\gamma=25\text{kN/m}^3$) otterremo un carico di $7,886\text{ kN/m}^2$ (carico totale scala= $2,586+(20\times 0,015)+(25\times 0,20)=7,886\text{kN/m}^2$) che, diviso per il coseno dell'angolo di inclinazione della rampa ($29^\circ,45$), risulta di $9,056\text{ kN/m}^2$ (carico verticale per poterlo sommare ai carichi variabili verticali). In totale avremo un carico verticale agente sulla scala in cemento armato pari a $9,056\text{kN/m}^2$.

Dopo aver effettuato l'analisi dei carichi si passa alla spiegazione del sistema di controllo semi-attivo. Questo sistema di controllo innovativo è stato realizzato mediante l'utilizzo di particolari dissipatori detti magnetoreologici. Esso rappresenta un'evoluzione ai classici sistemi di controllo strutturale passivi, applicati oramai da diversi anni in campo nazionale ed internazionale. In particolare i sistemi di controllo semi-attivi uniscono l'affidabilità e la sicurezza dei sistemi di controllo strutturale passivi all'efficacia prestazionale tipica dei sistemi di controllo attivi.

Il sistema di controllo semi-attivo funziona nel seguente modo: in condizioni standard, ovvero quando non viene fornita energia elettrica al dissipatore (0V), essi assumono il classico comportamento di un dissipatore viscoso lineare regolato dalla seguente legge costitutiva:

$$F = c V^\alpha$$

dove:

F = Forza di smorzamento del dissipatore viscoso (kN);

c = Costante di dissipazione del dissipatore viscoso ($\text{kN/m}^*\text{s}$);

V = Velocità di progetto (m/s);

α = Coefficiente funzione del tipo di dissipatore scelto che indica se quest'ultimo assume un comportamento lineare ($\alpha=1$ come nel caso in esame) o non lineare ($\alpha\neq 1$ e solitamente $\alpha=0,15$).

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

In particolare, in condizioni standard, il comportamento dello smorzatore magnetoreologico viene assimilato a quello di un dissipatore viscoso della tipologia FB. I dissipatori che si comportano secondo questa tipologia hanno la caratteristica di non influenzare la forma modale del telaio ma di lavorare per gli spostamenti di piano. Essi sono integrati ad una struttura reticolare esterna incastrata alla base, realizzata con profili in acciaio della tipologia HEA260 e collegati ai baricentri dei solai di piano, ipotizzati da calcolo infinitamente rigidi nei loro piani (altezza soletta del solaio pari a 5cm). In generale, secondo tale configurazione, gli spostamenti di piano del dissipatore viscoso vengono calcolati mediante la seguente formula:

$$s_{i,j} = s_{u,i} \phi_{i,j}$$

dove:

$s_{i,j}$ = Spostamento del dissipatore del modo i -esimo relativi al j -esimo piano (m);

$s_{u,i}$ = Spostamento massimo del punto di controllo posizionato nel baricentro dell'ultimo piano dove viene applicato l'ultimo dissipatore relativo al modo di vibrare i -esimo (m);

$\phi_{i,j}$ = Forma modale del modo i -esimo relativo al piano j -esimo. La forma modale è rappresentata dal vettore degli spostamenti relativi al modo i -esimo del piano j -esimo (-).

Nel progetto in esame verrà considerato sia il modo di vibrare principale (modo 1 traslazionale in x) relativo al periodo principale T_1 pari a 1,355s che il modo di vibrare secondario (modo 2 traslazionale in y) relativo al periodo T_2 pari a 1,227s, considerando il sisma nelle due direzioni ed ottenendo un modello di calcolo più ottimale e attendibile alla realtà. Pertanto, quando si considera il modo di vibrare principale, l'espressione relativa al calcolo degli spostamenti di piano del dissipatore viscoso diventa la seguente:

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

$$s_{1,j} = s_{u,1} \phi_{1,j}$$

dove:

$s_{1,j}$ = Spostamento del dissipatore del modo 1 relativi al j-esimo piano (m);

$s_{u,1}$ = Spostamento massimo del punto di controllo posizionato nel baricentro dell'ultimo piano dove viene applicato l'ultimo dissipatore relativo al modo di vibrare principale (m);

$\phi_{1,i}$ = Forma modale del modo 1 relativo al j-esimo piano. La forma modale è rappresentata dal vettore degli spostamenti relativi al modo 1 del piano j-esimo (m).

Mentre quando si considera il modo di vibrare secondario, l'espressione relativa al calcolo degli spostamenti di piano del dissipatore viscoso diventa la seguente:

$$s_{2,j} = s_{u,2} \phi_{2,j}$$

dove:

$s_{2,j}$ = Spostamento del dissipatore del modo 2 relativi al j-esimo piano (m);

$s_{u,2}$ = Spostamento massimo del punto di controllo posizionato nel baricentro dell'ultimo piano dove viene applicato l'ultimo dissipatore relativo al modo di vibrare secondario (m);

$\phi_{2,j}$ = Forma modale del modo 2 relativo al j-esimo piano. La forma modale è rappresentata dal vettore degli spostamenti relativi al modo 2 del piano j-esimo (-).

La figura sottostante mostra la classica configurazione strutturale del sistema di dissipazione collegato ad un telaio generico che non influenza la forma modale del telaio ma lavora per gli spostamenti di piano:

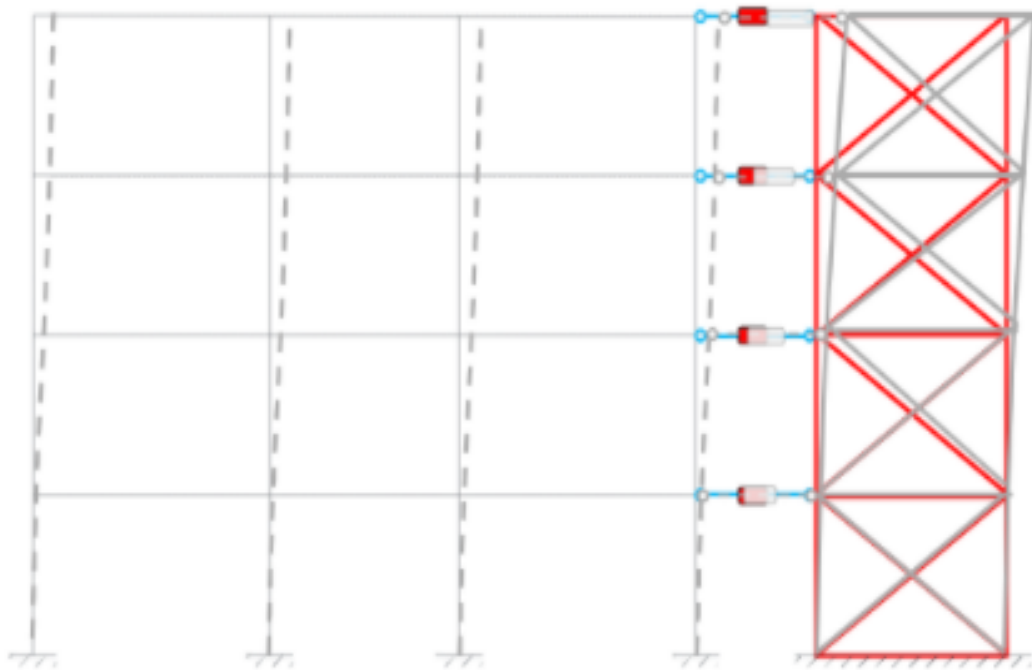


Figura 137. Configurazione del sistema di protezione sismica che non influenza la forma modale del telaio ma lavora per gli spostamenti di piano.

Nel momento in cui viene variato il campo magnetico mediante un voltaggio di corrente elettrica (compreso tra 0-2,25V) applicato ad un elettrocalamità, il dissipatore assume un comportamento equivalente ad un modello fisico, costituito da un elemento caratterizzato da attrito di Coulomb posto in parallelo con uno smorzatore a viscosità lineare.

Un modello siffatto è denominato modello della visco-plasticità di Bingham caratterizzato al livello di tensione-deformazione dalla seguente equazione:

$$\tau = [\tau_y \operatorname{sgn}(\gamma) + \eta(\gamma')] = [\tau_y \operatorname{sgn}(\gamma) + \eta(d\gamma/dt)]$$

$$P_a = [(P_a) + (P_a * s) (1/s)]$$

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

dove:

τ = Tensione tangenziale di risposta del fluido (Pa);

τ_y = Tensione tangenziale di snervamento del fluido (Pa);

$\text{sgn}(\gamma) =$ Funzione segno;

η = Coefficiente di viscosità dinamica del fluido (Pa*s);

γ = Deformazione a taglio del fluido (-);

t = Tempo di applicazione del carico (s);

$\dot{\gamma} = d\gamma/dt =$ Velocità di deformazione a taglio del fluido (1/s).

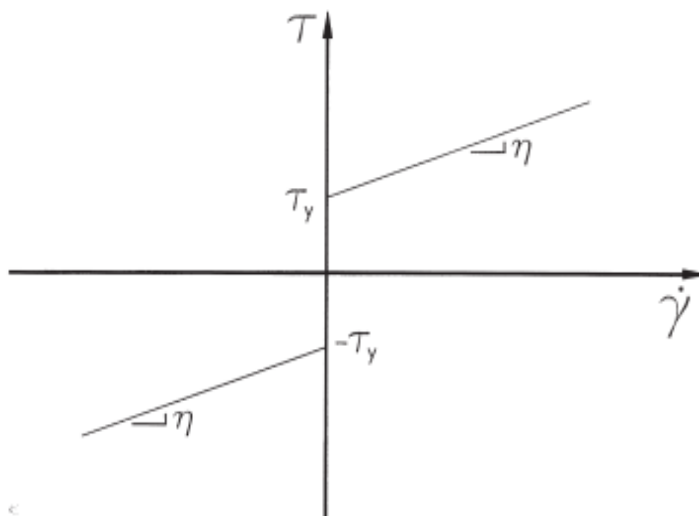


Figura 138. Modello della visco-plasticità di Bingham.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Secondo tale comportamento il valore della tensione di snervamento (τ_y), aumenta linearmente con la variazione di campo elettrico applicato, mentre il coefficiente di viscosità dinamica (η) può essere considerato indipendente dal campo (il coefficiente di viscosità dinamica è il coefficiente angolare della retta, ovvero la sua pendenza dal punto di vista geometrico, che è considerata costante, come rappresentato nella figura sovrastante).

In condizioni di carico armonico, la risposta isteretica di un materiale secondo Bingham, a livello di forza-spostamento, è rappresentato nella figura sottostante:

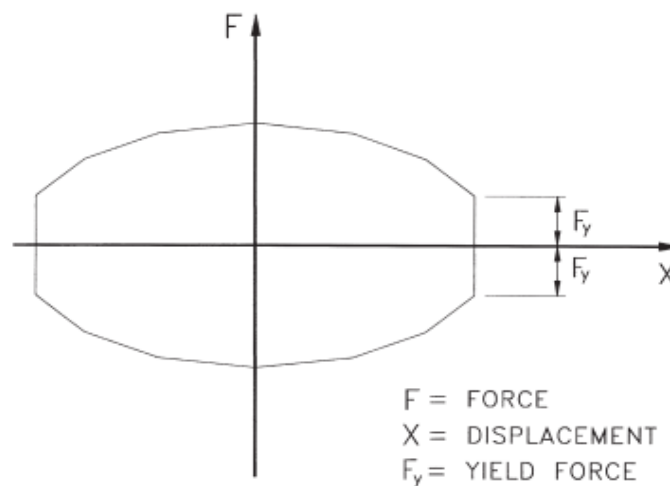


Figura 139. Cicli di isteresi ideali per un materiale secondo Bingham.

Così, sotto un dato moto armonico, all'aumentare del campo magnetico, l'anello di isteresi forza-spostamento mostrato nella figura sovrastante, si espande in direzione verticale a causa di un aumento della forza necessaria allo snervamento (F_y) garantendo un livello di dissipazione superiore. La forza allo snervamento F_y discende da considerazioni energetiche sui cicli isteretici che descrivono il comportamento dissipativo di una struttura. In generale l'energia dissipata dai dispositivi viscosi presenti in un sistema strutturale ha la seguente espressione:

$$W_{\text{viscoso}} = W_d = \pi \omega_t \sum_i (c_i s_{i,j}^2)$$

Nel caso in esame, invece, viene aggiunto un contributo derivante dalla forza di snervamento, ottenendo un area del ciclo di isteresi maggiore

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

(somma di un ciclo isteretico viscoso lineare e di un ciclo isteretico attrittivo) e quindi un'energia dissipata più elevata.

La figura sottostante ci mostra la sovrapposizione dei cicli di isteresi rappresentati nei diagrammi forza-spostamento:

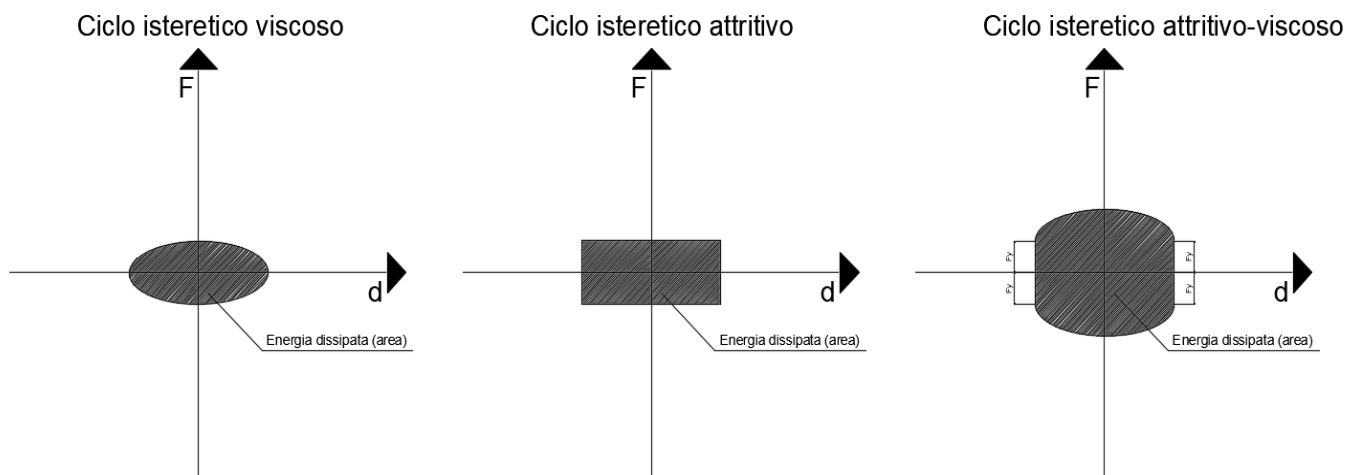


Figura 140. Cicli di isteresi ideali per un dissipatore magnetoreologico alimentato.

L'espressione dell'energia dissipata dal dissipatore magnetoreologico alimentato, pertanto, è espressa dalla seguente formula:

$$W_{tot} = W_{viscoso} + W_{attrittivo} = [\pi \omega_t \sum_i (c_i s_{i,j}^2)] + [4F_y \sum_i s_{i,j}]$$

Di conseguenza, la formula utilizzata per il calcolo della forza di snervamento F_y è la seguente:

$$F_y = (\xi_d \pi \sum_i W_j s_{i,j}^2) / (2 \sum_i s_{i,j})$$

Mentre la forza F di smorzamento totale del dissipatore magnetoreologico viene calcolata secondo il modello di Bingham espresso in termini ingegneristici utilizzando le forze di dissipazione mediante la seguente espressione:

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

$$F = F_y + F_d = [(\xi_d \pi \sum_i W_j s_{i,j}^2)/(2 \sum_i s_{i,j})] + [c (\omega s_{i,j})]$$

dove:

F = Forza di dissipazione totale del dissipatore magnetoreologico (kN);

F_y = Forza di snervamento del dissipatore magnetoreologico (kN);

F_d = Forza di dissipazione viscosa del dissipatore magnetoreologico (kN);

c = Costante di dissipazione del dissipatore magnetoreologico (kN/m*s);

$\omega = 2\pi/T$ = Pulsazione propria inerente al modo di vibrare i -esimo e correlata al periodo di vibrazione T del modo i -esimo (rad/s);

$s_{i,j}$ = Spostamento del dissipatore del modo i -esimo relativi al j -esimo piano (m);

$V = \omega s_{i,j}$ = Velocità di progetto (m/s);

ξ_d = Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente del sistema dissipativo (%);

W_j = Massa sismica del j -esimo piano (kN).

Superata la soglia di alimentazione del 2,25V, otteniamo una saturazione della risposta del dissipatore magnetoreologico, permettendoci un risparmio dal punto di vista economico, nonché di affermare che il range di lavoro ottimale va da 0 a 2,25V. Dopo aver spiegato il funzionamento del dissipatore magnetoreologico inserito nel sistema di controllo strutturale semi-attivo, si procede all'analisi preliminare della nostra struttura per renderci conto della situazione di partenza.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Inizialmente si è scelto di effettuare un'analisi dinamica lineare o modale per valutare gli spostamenti allo SLV della struttura presa in esame, facendo in modo che quest'ultima rimanga in campo elastico, ovvero il campo delle deformazioni reversibili, applicando il limite sugli spostamenti di interpiano pari allo 0,5% dell'altezza di piano per entrambi le direzioni di analisi ($dr x < 0,5\% \cdot h_{piano}$ e $dr y < 0,5\% \cdot h_{piano}$).

I risultati dell'analisi modale sono i seguenti:

Analisi modale				
Modo	T	Ux	Uy	Rz
(-)	(s)	(-)	(-)	(-)
1	1,355	0,784	0	0
2	1,227	0	0,791	0
3	1,111	0	0	0,774
4	0,514	0	0	0
5	0,510	0	0	0
6	0,508	0	0	0
7	0,507	0	0	0
8	0,507	0	0	0
9	0,460	0,125	0	0,001
10	0,418	0	0,122	0
11	0,385	0,001	0	0,128
12	0,295	0	0	0
13	0,244	0,047	0	0
14	0,233	0	0,045	0
15	0,201	0	0	0,053
16	0,191	0	0	0
17	0,195	0	0	0
18	0,152	0,020	0	0
19	0,150	0	0,016	0
20	0,148	0	0	0
21	0,130	0	0,001	0

Da questi risultati è possibile affermare che la struttura presenta i primi tre modi di vibrare perfettamente disaccoppiati: il primo modo è traslazionale in x (78,4% di massa partecipante traslazionale in x), il secondo modo è traslazionale in y (79,1% di massa partecipante traslazionale in y) e il ter-

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

zo modo rotazionale in z (77,4% di massa partecipante rotazionale in z). Come abbiamo detto in precedenza, per il calcolo dei dissipatori faremo riferimento ai primi due modi di vibrare della struttura: il primo modo di vibrare sarà traslazionale in x con un periodo $T1=1,355s$ ed il secondo modo di vibrare sarà traslazionale in y con un periodo $T2=1,227s$.

Tra i risultati dell'analisi dinamica lineare (o modale) vengono analizzati quelli relativi agli spostamenti di piano del pilastro d'angolo numero 17, essendo quello più sollecitato ed andando così a favore della sicurezza strutturale, secondo la combinazione sismica allo SLV, dove si considera il sisma prevalente al 100% nella direzione in esame ed il 30% nell'altra direzione e viceversa ($SLV_x=1E_x+0,30E_y$ e $SLV_y=1E_y+0,30E_x$).

Si procede con il calcolo degli spostamenti allo SLV. Gli spostamenti d_E sotto l'azione sismica di progetto allo SLV si ottengono moltiplicando il fattore di duttilità in spostamento μ_d per i valori degli spostamenti (d_{Ee}) ottenuti dall'analisi statica lineare o da quella dinamica lineare (caso in esame) nelle due direzioni analizzate mediante l'espressione seguente:

$$d_E = \pm \mu_d * d_{Ee}$$

dove:

- $\mu_d = q$, se $T1 \geq Tc$ (caso in esame in quanto $T1=1,355s > 0,4565s = Tc$);
- $\mu_d = 1+(q-1)*Tc/T1$, se $T1 < Tc$.

Si riportano le tabelle inerenti ai calcoli degli spostamenti allo SLV relativi alla struttura con smorzamento totale pari al 5% e la verifica effettuata sugli spostamenti di interpiano per entrambi le direzioni di analisi in modo da mantenere la struttura in campo elastico, ovvero il campo delle deformazioni di piccole entità o reversibili:

N° piano (-)	U1x (Sap) (m)	U2y (Sap) (m)	T1 (s)	Tc (s)	$\mu_d=q$ (-)	U1x (SLV) (m)	U1y (SLV) (m)
1	0,005585	0,004998	1,355	0,4565	4,14	0,0231	0,0207
2	0,012909	0,011319	1,355	0,4565	4,14	0,0534	0,0469
3	0,019959	0,017795	1,355	0,4565	4,14	0,0826	0,0737

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

4	0,026022	0,023158	1,355	0,4565	4,14	0,1077	0,0959
5	0,03187	0,02792	1,355	0,4565	4,14	0,1319	0,1156
6	0,036356	0,031299	1,355	0,4565	4,14	0,1505	0,1296

N° piano	h (m)	ξ_{tot} (%)	η (%)	U1x (SLV) (m)	U1y (SLV) (m)	dr x (m)	dr y (m)	0,5%h (m)	Verifica x (-)	Verifica y (-)
1	3,35	5	1	0,0231	0,0207	0,0231	0,0207	0,0168	Non Ok	Non Ok
2	3,35	5	1	0,0534	0,0469	0,0303	0,0262	0,0168	Non Ok	Non Ok
3	3,35	5	1	0,0826	0,0737	0,0292	0,0268	0,0168	Non Ok	Non Ok
4	3,05	5	1	0,1077	0,0959	0,0251	0,0222	0,0153	Non Ok	Non Ok
5	3,05	5	1	0,1319	0,1156	0,0242	0,0197	0,0153	Non Ok	Non Ok
6	3,05	5	1	0,1505	0,1296	0,0186	0,0140	0,0153	Non Ok	Ok

Dai risultati ottenuti si evidenzia che, come prevedibile, le verifiche risultano non soddisfatte in quanto il dr x e il dr y sono maggiori del valore limite pari allo 0,5% h piano (escluso il dr y del piano 6), pertanto la struttura entra in campo plastico.

Detto questo, si è scelto di effettuare un calcolo preliminare per capire il grado di smorzamento viscoso necessario a far rimanere la struttura in campo elastico. Inizialmente, per semplicità di calcolo, si è scelto di simulare l'applicazione di dissipatori viscosi lineari equivalenti ai dissipatori magnetoreologici alimentati ($F=cV^\alpha$), capaci di garantire un grado di dissipazione superiore ($\xi_{tot}=28\%$) rispetto a quella standard del telaio ($\xi_{tot}=5\%$). I dissipatori sismici saranno posizionati ai piani 3, 4, 5 e inseriti in due telai in x (telaio 5-6-7-8-9-10 e telaio 11-12-13-14-15-16) e in due telai in y (telaio 17-12-6-1 e telaio 20-15-9-4)) per garantire una risposta sismica della struttura simmetrica e ottimale in entrambi le direzioni di analisi. Tali dissipatori non vengono applicati ai piani 1 e 2 in quanto i relativi spostamenti allo SLV sono di piccola entità, pertanto la loro applicazione sarebbe superflua. Inoltre non vengono applicati neanche al piano 6 per la non compatibilità sul piano architettonico in quanto quest'ultimo presenta una planimetria discretamente ridotta rispetto al piano sottostante.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Si riporta la tabella di verifica degli spostamenti allo SLV, calcolata mediante un calcolo preliminare su Excell, con un grado di smorzamento totale pari al 28% ($U_{SLV_ξ}=28\%=U_{SLV_ξ}=5\%*\eta_{28\%}$):

N° piano	h	ξ_{tot}	η	U1x (SLV)	U1y (SLV)	dr x	dr y	0,5%h	Verifica x	Verifica y
(-)	(m)	(%)	(%)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(-)	(-)
1	3,35	28	0,5505	0,0127	0,0114	0,0127	0,0114	0,0168	Ok	Ok
2	3,35	28	0,5505	0,0294	0,0258	0,0167	0,0144	0,0168	Ok	Ok
3	3,35	28	0,5505	0,0455	0,0406	0,0161	0,0148	0,0168	Ok	Ok
4	3,05	28	0,5505	0,0593	0,0528	0,0138	0,0122	0,0153	Ok	Ok
5	3,05	28	0,5505	0,0726	0,0636	0,0133	0,0109	0,0153	Ok	Ok
6	3,05	28	0,5505	0,0829	0,0713	0,0102	0,0077	0,0153	Ok	Ok

Dai risultati ottenuti si evidenzia che le verifiche risultano soddisfatte in quanto il dr x e il dr y sono minori del valore limite pari allo 0,5% h piano, pertanto la struttura rimane in campo elastico.

Dopo aver effettuato il controllo sugli spostamenti di interpiano ed aver stabilito che per far rimanere la struttura in campo elastico è necessario un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente pari al 28% (correlato al parametro massimo di η compatibile da normativa, ovvero $\eta=0,5505 \geq 0,55$), mediante l'utilizzo di dissipatori viscosi equivalenti ai dissipatori magnetoreologici, si procede con il calcolo preliminare dei dissipatori viscosi equivalenti e dei dissipatori magnetoreologici (non alimentati e alimentati).

Per progettare i dissipatori viscosi equivalenti bisognerà calcolare la loro costante di dissipazione c, espressa in kN/m*s e le rispettive forze di dissipazione F_d espresse in kN. Il calcolo della costante di dissipazione dei dissipatori sismici viene effettuato mediante l'applicazione della formula inversa del coefficiente di smorzamento viscoso equivalente per sistemi dissipativi (ξ_d). La costante c sarà costante a tutti i piani come prescrive il comportamento del dissipatore viscoso lineare e sarà calcolata in entrambi le direzioni (x ed y) considerando l'azione sismica a 360 gradi. La formula per il calcolo della costante c è la seguente:

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

$$c = [(2 \omega \xi_d (\sum_j W_j s_{i,j}^2)) / (\sum_j s_{i,j}^2)]$$

$$[\text{kN/m*s}]$$

dove:

ξ_d = Smorzamento del dissipatore viscoso (ipotizzato dal progettista per iterazione ed espresso in percentuale);

$\omega = 2\pi/T$ = Pulsazione propria inerente al modo di vibrare i-esimo e correlata al periodo di vibrazione T del modo i-esimo (rad/s);

W_j = Massa sismica del piano j-esimo (kN);

$s_{i,j}$ = Spostamento del dissipatore del modo i-esimo relativi al j-esimo piano (m);

Mentre la formula per il calcolo delle forze di dissipazione F_d è la seguente:

$$F_d = c V^\alpha = c (\omega s_{i,j})^\alpha$$

$$[\text{kN}]$$

dove:

c = costante di dissipazione dei dissipatori viscosi (kN/m*s);

$\omega = 2\pi/T$ = Pulsazione propria inerente al modo di vibrare i-esimo e correlata al periodo di vibrazione T del modo i-esimo (rad/s);

$s_{i,j}$ = Spostamento del dissipatore del modo i-esimo relativi al j-esimo piano (m);

$V = (\omega s_{i,j})$ = Velocità di progetto (m/s);

α = Coefficiente funzione del tipo di dissipatore scelto che indica se quest'ultimo assume un comportamento lineare (come nel caso in esame $\alpha=1$) o non lineare ($\alpha \neq 1$ e solitamente $\alpha=0,15$).

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Le tabelle sottostanti mostrano i calcoli preliminari effettuati:

N° piano	W _j (kN)	T ₁ (s)	Direzione x		ξ _d (%)	ξ _{tot} (%)	η (-)
			ω ₁ = 2π/T ₁ (rad/s)	ξ _t (%)			
3	306,21	1,355	4,6370	5	23	28	0,5505
4	298,55	1,355	4,6370	5	23	28	0,5505
5	271,91	1,355	4,6370	5	23	28	0,5505
							≥0,55

N° piano	s _{1,j} (m)	s _{u,1} (m)	φ _{1,j} (-)	Direzione x		c (kN/m*s)	F _{dj} = c ω ₁ s _{1,j} (kN)
				(W _j s _{1,j} ²) (kNm ²)	S _{1,j} ² (m ²)		
3	0,0455	0,0726	0,6263	0,6336	0,0021	612,33	129,15
4	0,0593	0,0726	0,8165	1,0500	0,0035	612,33	168,39
5	0,0726	0,0726	1,0000	1,4344	0,0053	612,33	206,23
				3,1180	0,0109		
				Σ(W _j s _{1,j} ²)	Σ(s _{1,j} ²)		

N° piano	W _j (kN)	T ₂ (s)	Direzione y		ξ _d (%)	ξ _{tot} (%)	η (-)
			ω ₂ = 2π/T ₂ (rad/s)	ξ _t (%)			
3	306,21	1,227	5,1208	5	23	28	0,5505
4	298,55	1,227	5,1208	5	23	28	0,5505
5	271,91	1,227	5,1208	5	23	28	0,5505
							≥0,55

N° piano	s _{2,j} (m)	s _{u,2} (m)	φ _{2,j} (-)	Direzione y		c (kN/m*s)	F _{dj} = c ω ₂ s _{2,j} (kN)
				(W _j s _{2,j} ²) (kNm ²)	s _{2,j} ² (m ²)		
3	0,0406	0,0636	0,6374	0,5036	0,0016	676,79	140,55

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

4	0,0528	0,0636	0,8294	0,8316	0,0028	676,79	182,91
5	0,0636	0,0636	1,0000	1,1009	0,0040	676,79	220,52
				2,4361	0,0085		
				$\Sigma(W_j s_{2,j}^2)$	$\Sigma(s_{2,j}^2)$		

Dato che si è scelto di posizionare i dissipatori sismici in due telai in direzione x (telaio 5-6-7-8-9-10 e telaio 11-12-13-14-15-16) e in due telai in direzione y (telaio 17-12-6-1 e telaio 20-15-9-4) si dimezzerà le costanti di dissipazione calcolate in precedenza nel calcolo preliminare per ogni direzione di analisi. Le tabelle finali inerenti alle costanti di dissipazione definitive (da inserire nel programma di calcolo agli elementi finiti) sono le seguenti:

Parametri di progetto					
Direzione x					
N° piano	T1	ξ tot	η	c/2	Fdj/2
(-)	(s)	(%)	(-)	(kN/m*s)	(kN)
3	1,355	28	0,5505	306,17	64,58
4	1,355	28	0,5505	306,17	84,19
5	1,355	28	0,5505	306,17	103,12
			$\geq 0,55$		

Parametri di progetto					
Direzione y					
N° piano	T2	ξ tot	η	c/2	Fdj/2
(-)	(s)	(%)	(-)	(kN/m*s)	(kN)
3	1,227	28	0,5505	338,39	70,27
4	1,227	28	0,5505	338,39	91,45
5	1,227	28	0,5505	338,39	110,26
			$\geq 0,55$		

Per progettare preliminarmente il dissipatore magnetoreologico non alimentato da corrente elettrica, si utilizzerà la stessa teoria dei dissipatori viscosi lineari relativa la calcolo del coefficiente di dissipazione c e delle forze di dissipazione Fd, con l'unica differenza di utilizzare un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente dissipativo pari a circa la metà del caso con i dissipatori viscosi equivalenti come prescrive la teoria sullo smorzamento fornito dai dissipatori magnetoreologici ($\xi_d = 23/2 = 11,5\%$).

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Mentre per progettare preliminarmente il caso del dissipatore magnetoreologico alimentato, che logicamente garantisce una dissipazione superiore rispetto al caso non alimentato, bisognerà aggiungere alla forza di dissipazione viscosa F_d , la forza di snervamento F_y , calcolata mediante la seguente formula:

$$F_y = (\xi_d \pi \sum_i W_j s_{i,j}^2) / (2 \sum_i s_{i,j})$$

Le tabelle sottostanti mostrano i calcoli preliminari effettuati:

N° piano	W_j (kN)	T_1 (s)	Direzione x				
			$\omega_1 = 2\pi/T_1$ (rad/s)	ξ_t (%)	ξ_d (%)	ξ_{tot} (%)	η (-)
3	306,21	1,355	4,6370	5	11,5	16,5	0,6820
4	298,55	1,355	4,6370	5	11,5	16,5	0,6820
5	271,91	1,355	4,6370	5	11,5	16,5	0,6820
							$\geq 0,55$

$s_{1,j}$ (m)	$s_{u,1}$ (m)	$\phi_{1,j}$ (-)	Direzione x					
			$(W_j s_{1,j}^2)$ (kNm ²)	$s_{1,j}^2$ (m ²)	c (kN/m*s)	F_y (kN)	$F_d = c \omega_1 s_{1,j}$ (kN)	$F = F_y + F_d$ (kN)
0,0455	0,0726	0,6263	0,6336	0,0021	306,17	51,86	64,58	116,43
0,0593	0,0726	0,8165	1,0500	0,0035	306,17	51,86	84,19	136,05
0,0726	0,0726	1,0000	1,4344	0,0053	306,17	51,86	103,12	154,97
0,1774			3,1180	0,0109				
$\Sigma s_{1,j}$			$\Sigma(W_j s_{1,j}^2)$	$\Sigma(s_{1,j}^2)$				

N° piano	W_j (kN)	T_2 (s)	Direzione y				
			$\omega_2 = 2\pi/T_2$ (rad/s)	ξ_t (%)	ξ_d (%)	ξ_{tot} (%)	η (-)
3	306,21	1,227	5,1208	5	11,5	16,5	0,6820
4	298,55	1,227	5,1208	5	11,5	16,5	0,6820
5	271,91	1,227	5,1208	5	11,5	16,5	0,6820
							$\geq 0,55$

$s_{2,j}$ (m)	$s_{u,2}$ (m)	$\phi_{2,j}$ (-)	Direzione y					
			$(W_j s_{2,j}^2)$ (kNm ²)	$s_{2,j}^2$ (m ²)	c (kN/m*s)	F_y (kN)	$F_d = c \omega_2 s_{2,j}$ (kN)	$F = F_y + F_d$ (kN)

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

0,0406	0,0636	0,6374	0,5036	0,0016	338,39	51,90	70,27	122,18
0,0528	0,0636	0,8294	0,8316	0,0028	338,39	51,90	91,45	143,35
0,0636	0,0636	1,0000	1,1009	0,0040	338,39	51,90	110,26	162,16
0,1570			2,4361	0,0085				
$\Sigma s_{2,j}$			$\Sigma(W_j s_{2,j}^2)$	$\Sigma(s_{2,j}^2)$				

Dato che si è scelto di posizionare i dissipatori sismici in due telai in direzione x (telaio 5-6-7-8-9-10 e telaio 11-12-13-14-15-16) e in due telai in direzione y (telaio 17-12-6-1 e telaio 20-15-9-4) si dimezzerà le costanti di dissipazione calcolate in precedenza nel calcolo preliminare per ogni direzione di analisi. Le tabelle finali inerenti alle costanti di dissipazione definitive (da inserire nel programma di calcolo agli elementi finiti) sono le seguenti:

Parametri di progetto

Direzione x

N° piano	T1	ξ_t	ξ_d	ξ_{tot}	η	c/2	Fd/2	Fy/2	F/2
(-)	(s)	(%)	(%)	(%)	(-)	(kN/m*s)	(kN)	(kN)	(kN)
3	1,355	5	11,5	16,5	0,6820	153,08	32,39	25,93	58,22
4	1,355	5	11,5	16,5	0,6820	153,08	42,09	25,93	68,03
5	1,355	5	11,5	16,5	0,6820	153,08	51,56	25,93	77,49

Parametri di progetto

Direzione y

N° piano	T2	ξ_t	ξ_d	ξ_{tot}	η	c/2	Fd/2	Fy/2	F/2
(-)	(s)	(%)	(%)	(%)	(-)	(kN/m*s)	(kN)	(kN)	(kN)
3	1,227	5	11,5	16,5	0,6820	169,20	35,14	25,95	61,09
4	1,227	5	11,5	16,5	0,6820	169,20	45,73	25,95	71,68
5	1,227	5	11,5	16,5	0,6820	169,20	55,13	25,95	81,08

Dopo aver effettuato la progettazione preliminare dei dissipatori sismici, si procede con la modellazione vera e propria nel programma di calcolo agli elementi finiti Sap 2000. L'analisi scelta è l'analisi dinamica non lineare con integrazione al passo delle equazioni del moto. Il metodo di calcolo per l'integrazione delle equazioni al moto utilizzato dal software segue la teoria di Hilger-Hughes-Taylor. In un'analisi dinamica non lineare, l'azione sismica viene modellata mediante le storie temporali del moto del terreno ovvero gli accelerogrammi. Gli accelerogrammi sono dei diagrammi in funzione del tempo che rappresentano le accelerazioni indotte al suolo in un dato sito, in tre direzioni perpendicolari tra loro durante un determinato evento sismico.

Per modellare l'azione sismica, si possono usare 3 gruppi di accelerogrammi o 7 gruppi di accelerogrammi (1 gruppo di accelerogrammi è composto da 1 per ogni direzione di analisi: 1 accelerogramma in x, 1 accelerogramma in y ed eventualmente 1 accelerogramma in z ove necessario). Se si sceglie di utilizzare 3 gruppi di accelerogrammi la risposta della struttura sarà valutata considerando il massimo fra i valori ottenuti per ogni direzione di analisi, mentre se si considera, come nel caso in esame, 7 accelerogrammi, la risposta strutturale sarà valutata facendo la media dei valori massimi ottenuti. In ogni caso la scelta è a discrezione del tecnico progettista. In un'analisi dinamica non lineare, secondo la normativa tecnica italiana di riferimento NTC 2018, la risposta strutturale va valutata applicando simultaneamente tutti gli accelerogrammi del medesimo gruppo considerato secondo l'espressione seguente:

$$E = 1 E_x + 1 E_y + 1 E_z$$

Nel caso in esame, si trascura la componente z in quanto non rientra nei casi in cui sarebbe necessario considerarla (elementi orizzontali con luce superiore di 20m, elementi a mensola con luce superiore a 4m, elementi precompressi ad esclusione dei solai con luce inferiore a 8m, strutture spingenti, pilastri in falso, piani sospesi, ponti). La prima cosa che viene fatta prima di effettuare la modellazione al programma di calcolo agli elementi finiti è la determinazione degli accelerogrammi naturali spettro compatibili con lo spettro di risposta elastico allo SLV ($q=1$) mediante il programma Rexel 3.5 progettato dal professor Iunio Iervolino. Gli

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

accelerogrammi naturali rappresentano la miglior soluzione di modellazione dell'azione sismica in quanto sono molto assimilabili agli eventi sismici reali in termini di intensità espressa in magnitudo, distanza epicentrale espressa in km, durata dell'evento sismico espresso in secondi.

Detto questo, nel programma Rexel 3.5 si definisce lo spettro elastico allo SLV inserendo le coordinate geografiche del sito in termini di latitudine ($\phi=43^{\circ},3944$) e di longitudine ($\lambda=13^{\circ},1358$), la categoria di sottosuolo (categoria B), la categoria topografica (categoria T3), la vita nominale dell'opera ($V_N=50$ anni), la classe d'uso (II) e lo stato limite considerato (SLV). Si inseriscono inoltre i range di magnitudo minima e massima ($M=6-7$), la distanza epicentrale ($R=0-30$ km) espressa in km, i limiti di tolleranza e l'intervallo del periodo dello spettro elastico ed il numero di accelerogrammi da considerare (7 records). Infine si seleziona la finestra 2 components (x e y) e si ricavano i risultati nella cartella di output del programma.

Si espone ora una tabella relativa alle caratteristiche dei sismi considerati e le immagini relative alla determinazione degli accelerogrammi naturali spettro compatibili nel programma Rexel 3.5:

Sito del sisma (-)	Data (-)	Mw	R (km)	PGA x (m/s ²)	PGA y (m/s ²)	PGV x (m/s ²)	PGV y (m/s ²)	Cat. Suolo (-)
Montenegro	24/05/1979	6.2	20	0,56	0,54	0,04	0,04	B
Friuli	15/09/1976	6	14	13,84	23,19	0,12	0,19	B
Ano Liosia (Grecia)	07/09/1999	6	18	10,87	0,84	0,1	0,1	B
Montenegro	15/04/1979	6.9	25	4,45	30	0,39	0,25	B
Umbria Marche	26/09/1997	6	11	51,38	45,38	0,32	0,29	B
Montenegro	15/04/1979	6.9	24	28,8	23,61	0,39	0,47	B
Campano Lucano (Appennino tra Campania- Basilicata)	23/11/1980	6.9	16	15,26	17,25	0,27	0,27	B
Valori medi		6,41	18,3	2,43	2,19	0,23	0,23	B

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

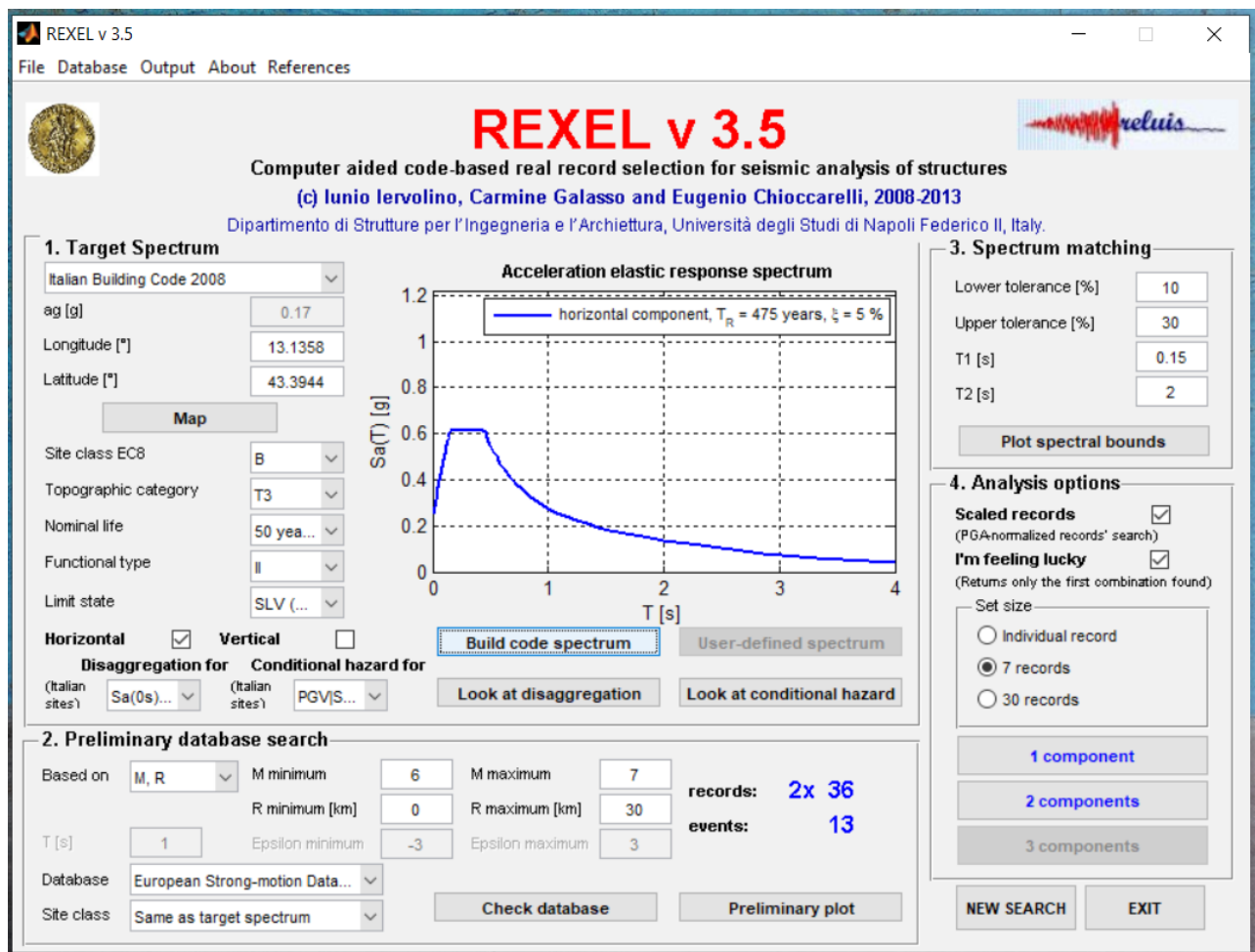


Figura 141. Immagine 1 relativa alla definizione dello spettro target nel programma REXEL 3.5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

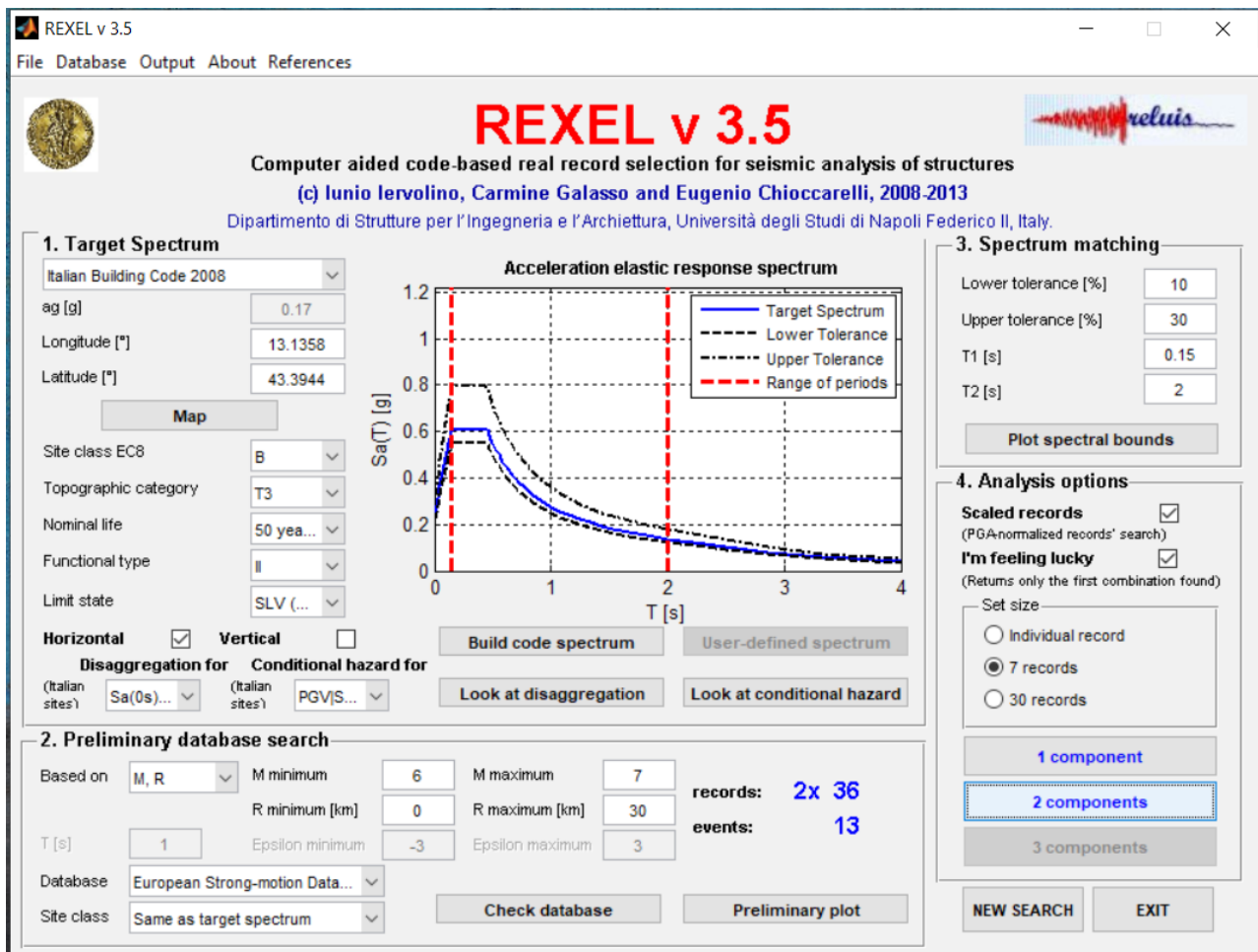


Figura 142. Immagine 2 relativa alla ricerca degli accelerogrammi naturali spettro compatibili nel programma Rexel 3.5.

Dall'immagine sovrastante si evidenzia che il data base di riferimento per la ricerca degli accelerogrammi naturali è quello della European Strong-motion (data base europeo), l'intervallo di magnitudo è compreso tra $6 < M < 7$, l'intervallo inerente alla distanza epicentrale è compreso tra $0 < R < 30$ km e che sono stati selezionate 36 registrazioni accelerometriche relative a 13 eventi sismici tra i quali il software Rexel effettuerà la sua successiva selezione. Successivamente si procede alla definizione delle specifiche di selezione dello spettro compreso nell'intervallo tra $10 < \text{tolerance} < 30\%$ e all'intervallo del periodo compreso tra $0,15 < T < 2$ s. Il software ricercherà le combinazioni di accelerogrammi il cui spettro medio rientra nei limiti di tolleranza nell'intervallo di periodi selezionato. Infine si selezionano le opzioni dell'analisi: "Scaled records" e "I'm feeling lucky". La prima opzione permette di ricercare le combinazioni di accelerogrammi scalati rispetto alla PGA del sito limitando lo scostamento del singolo spettro dallo spettro target di riferimento, mentre

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

la seconda opzione permette di fermare la ricerca degli accelerogrammi alla prima combinazione spettro compatibile.

Dopo aver determinato gli accelerogrammi naturali spettro compatibili, si passa ora alla modellazione al Sap 2000. La prima operazione da fare è l'inserimento degli accelerogrammi attraverso la voce `define > function > time history > add new function`. Si riportano le immagine relative degli accelerogrammi inseriti per entrambi le direzioni di analisi x e y:

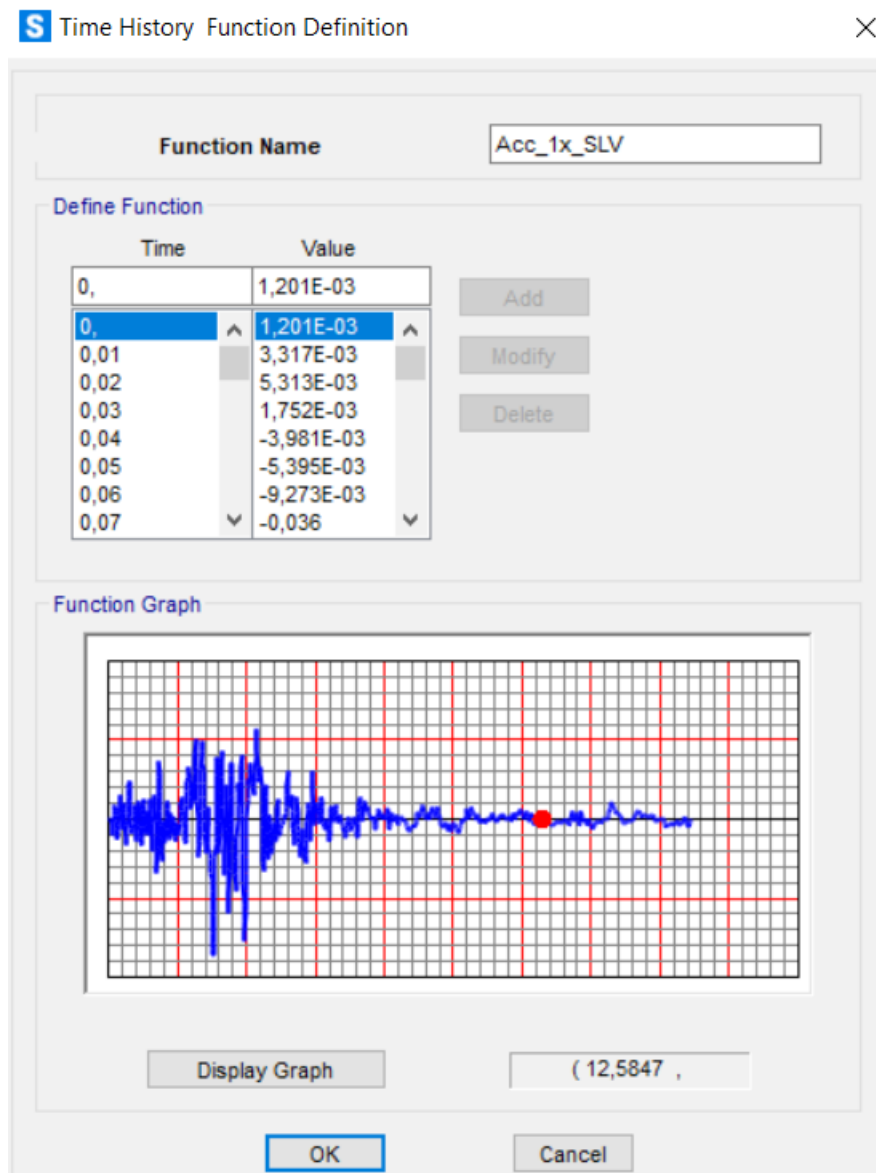


Figura 143. Accelerogramma1 in direzione x.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

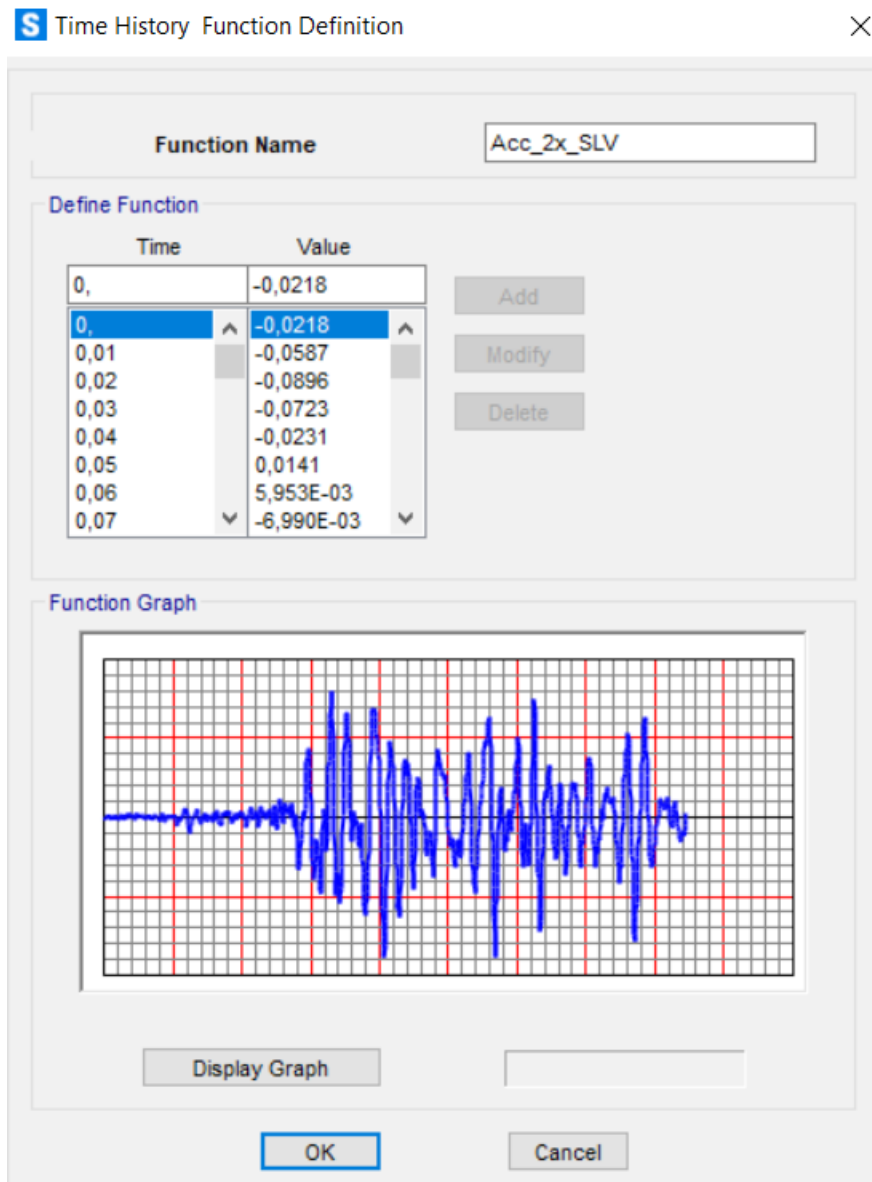


Figura 144. Accelerogramma 2 in direzione x.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

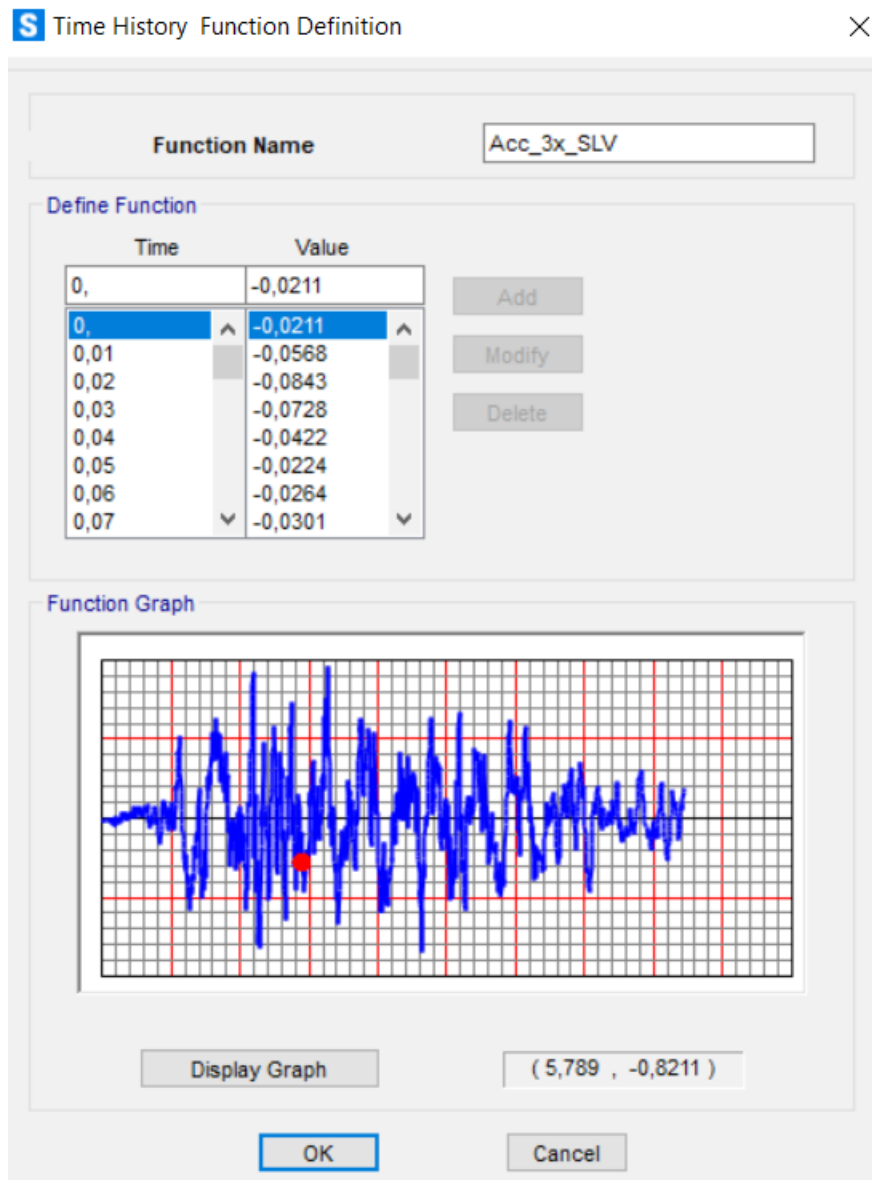


Figura 145. Accelerogramma 3 in direzione x.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

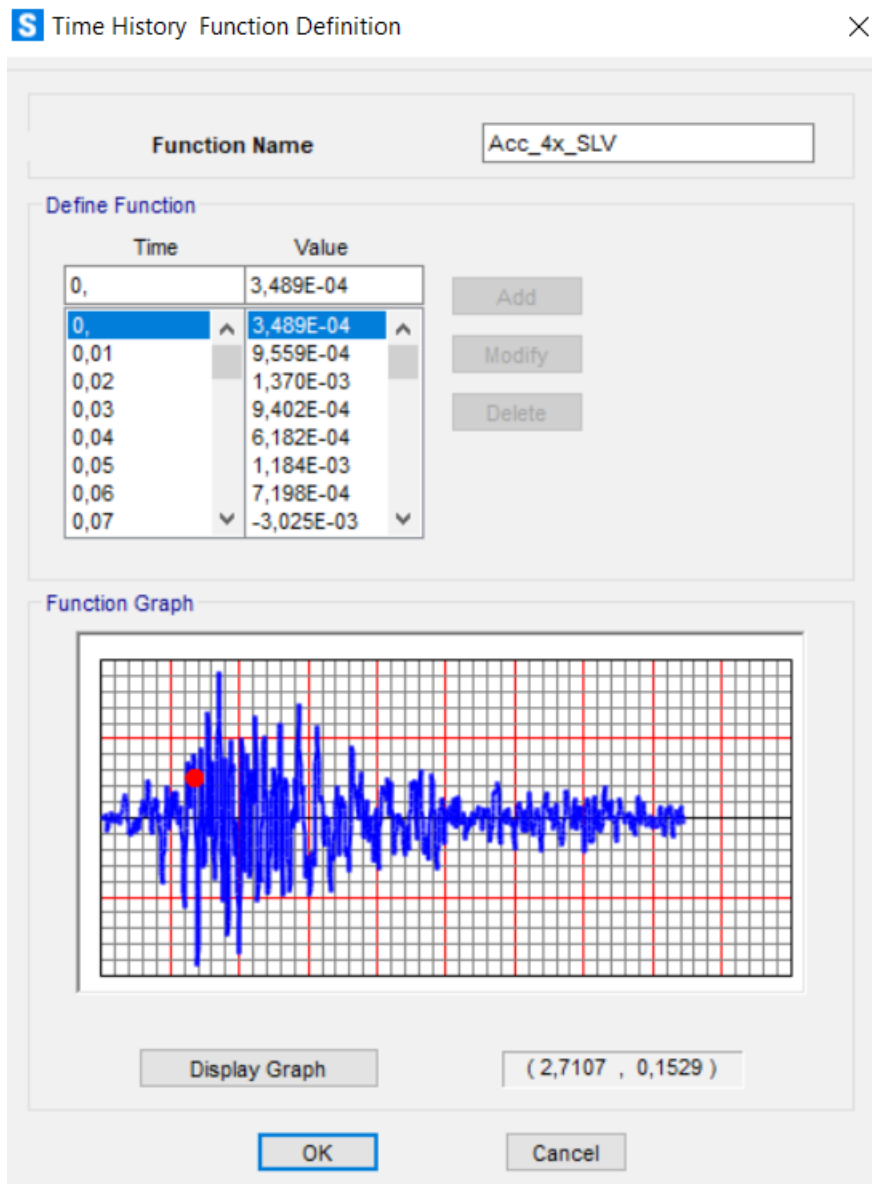


Figura 146. Accelerogramma 4 in direzione x.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

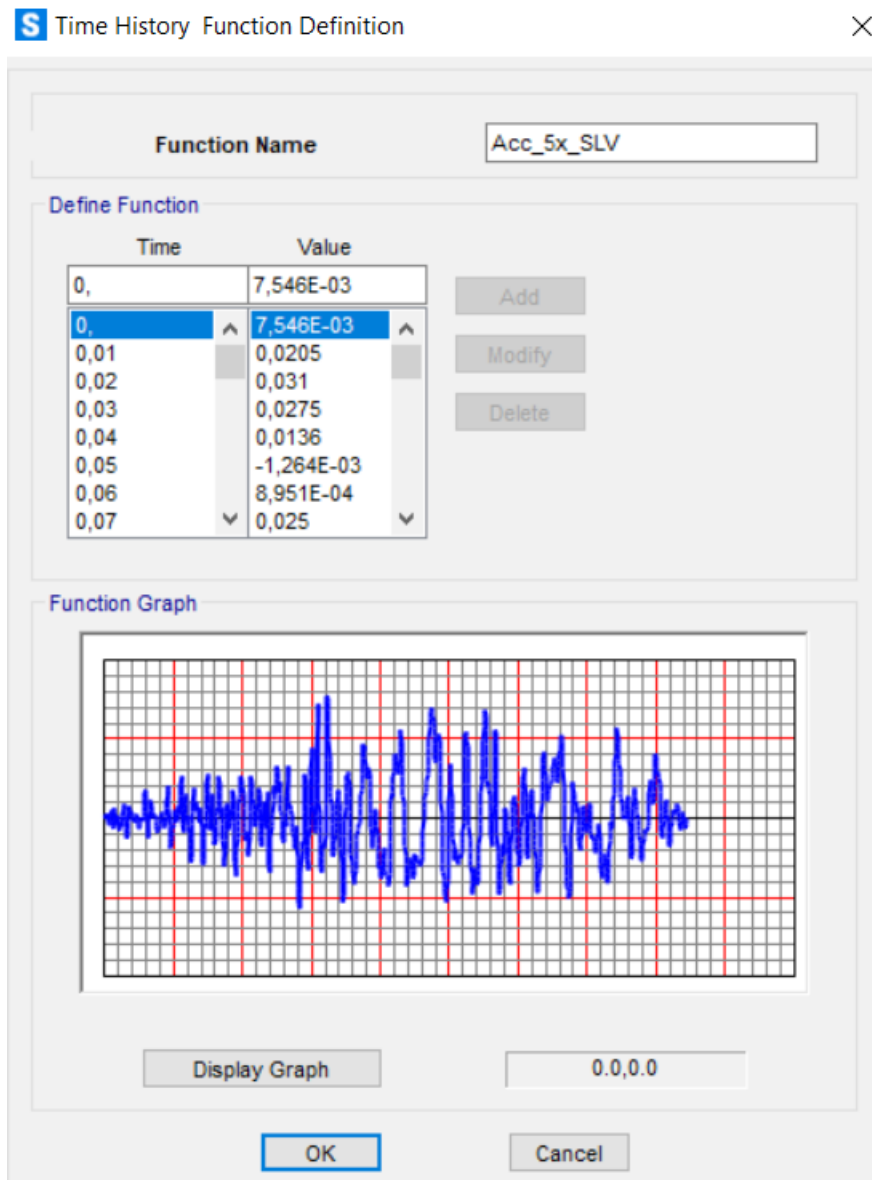


Figura 147. Accelerogramma 5 in direzione x.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

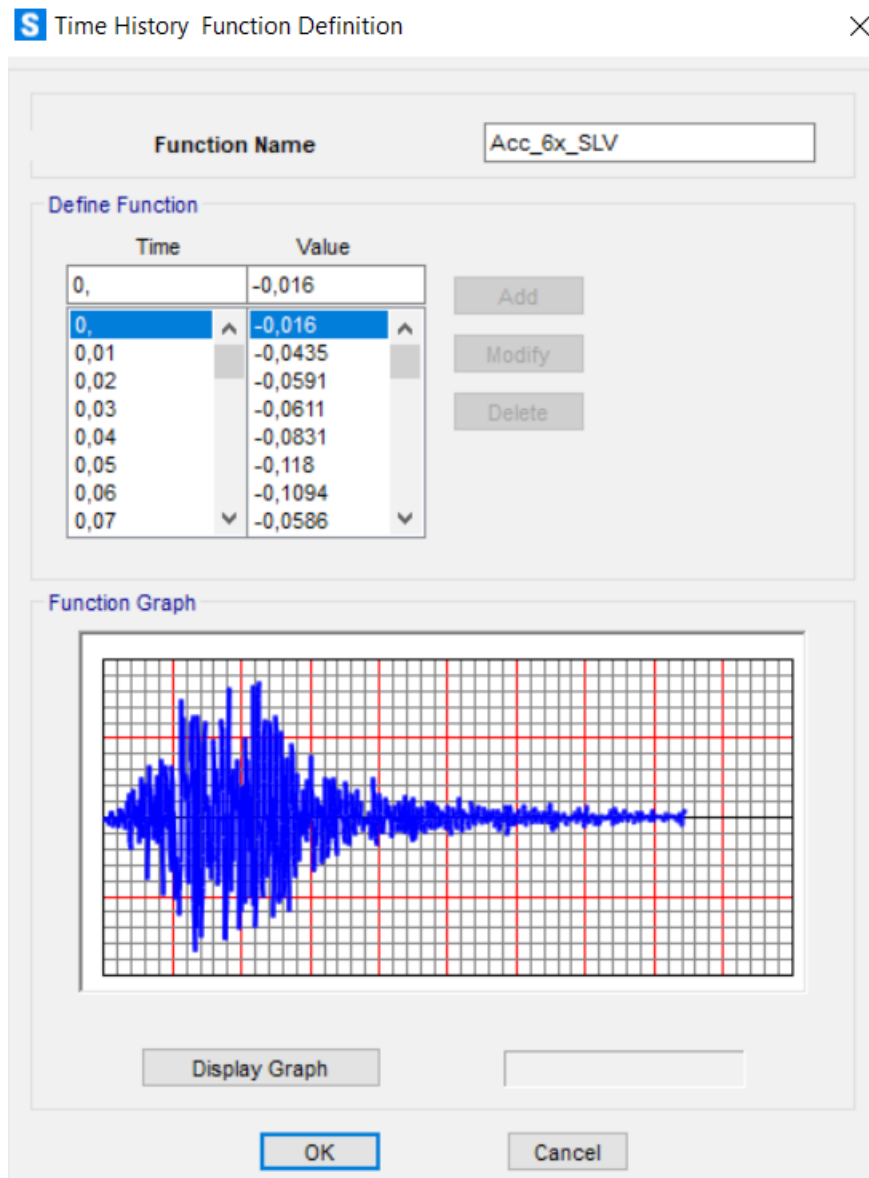


Figura 148. Accelerogramma 6 in direzione x.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

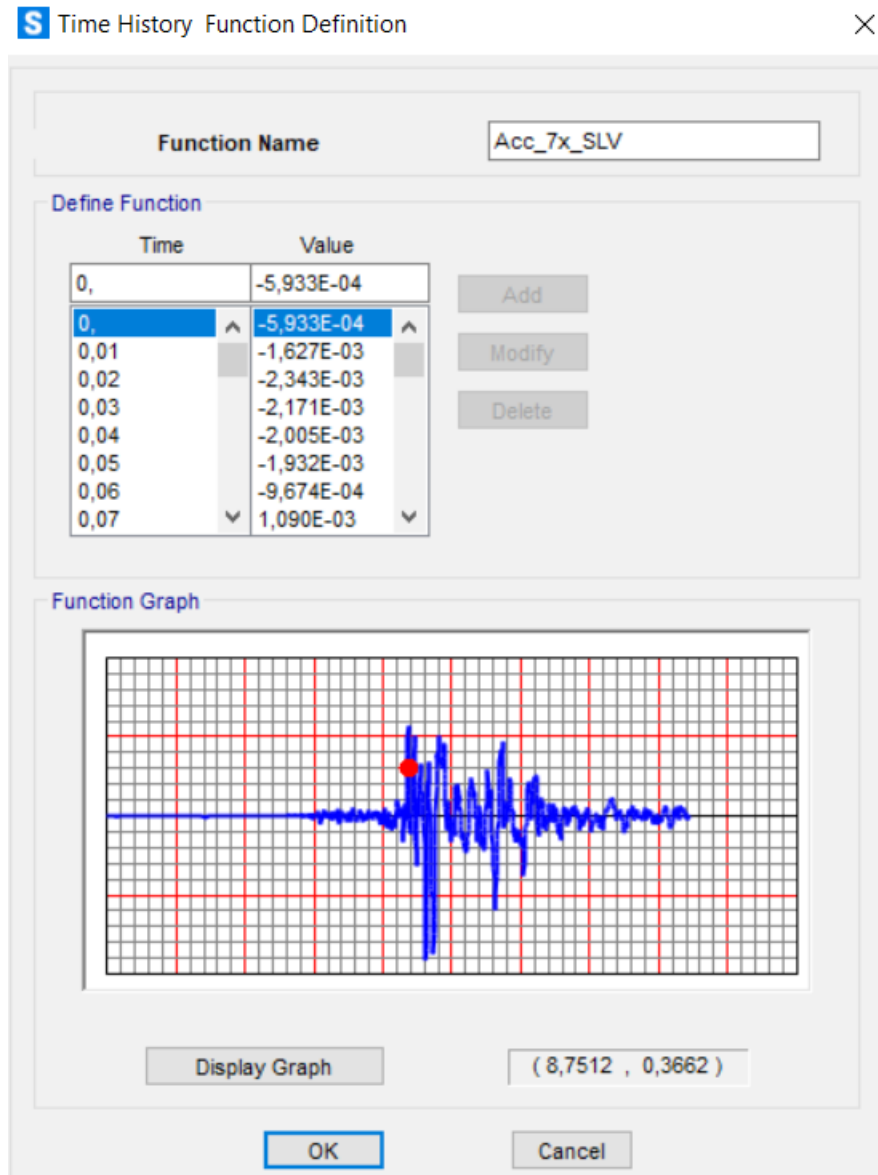


Figura 149. Accelerogramma 7 in direzione x.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

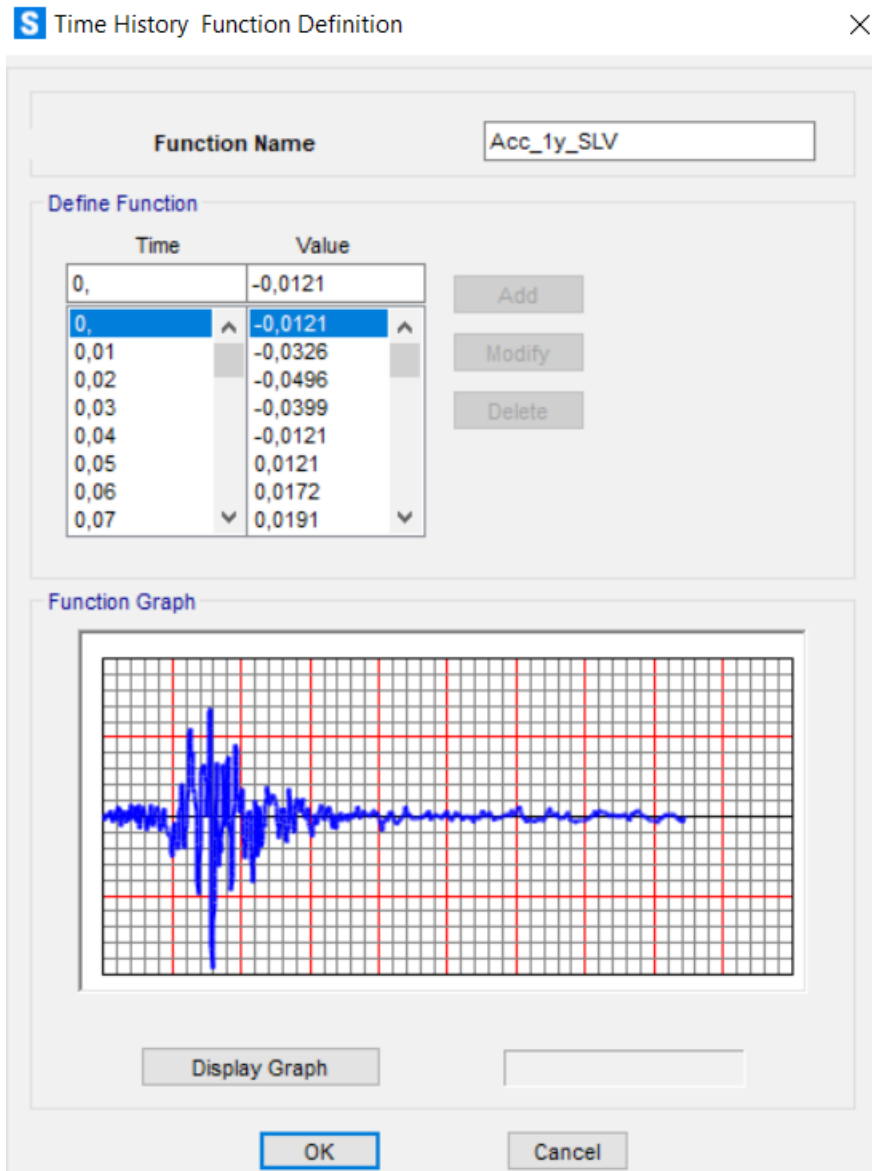


Figura 150. Accelerogramma 1 in direzione y.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

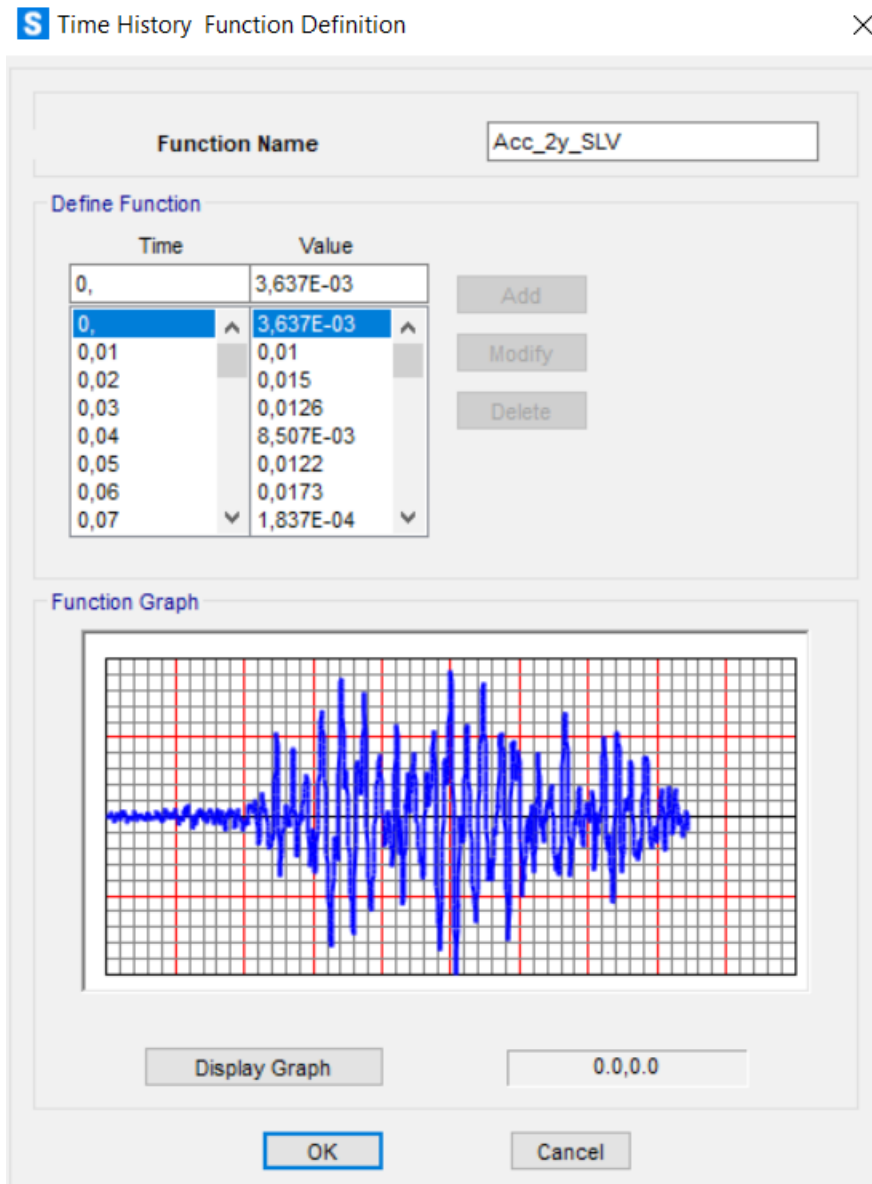


Figura 151. Accelerogramma 2 in direzione y.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

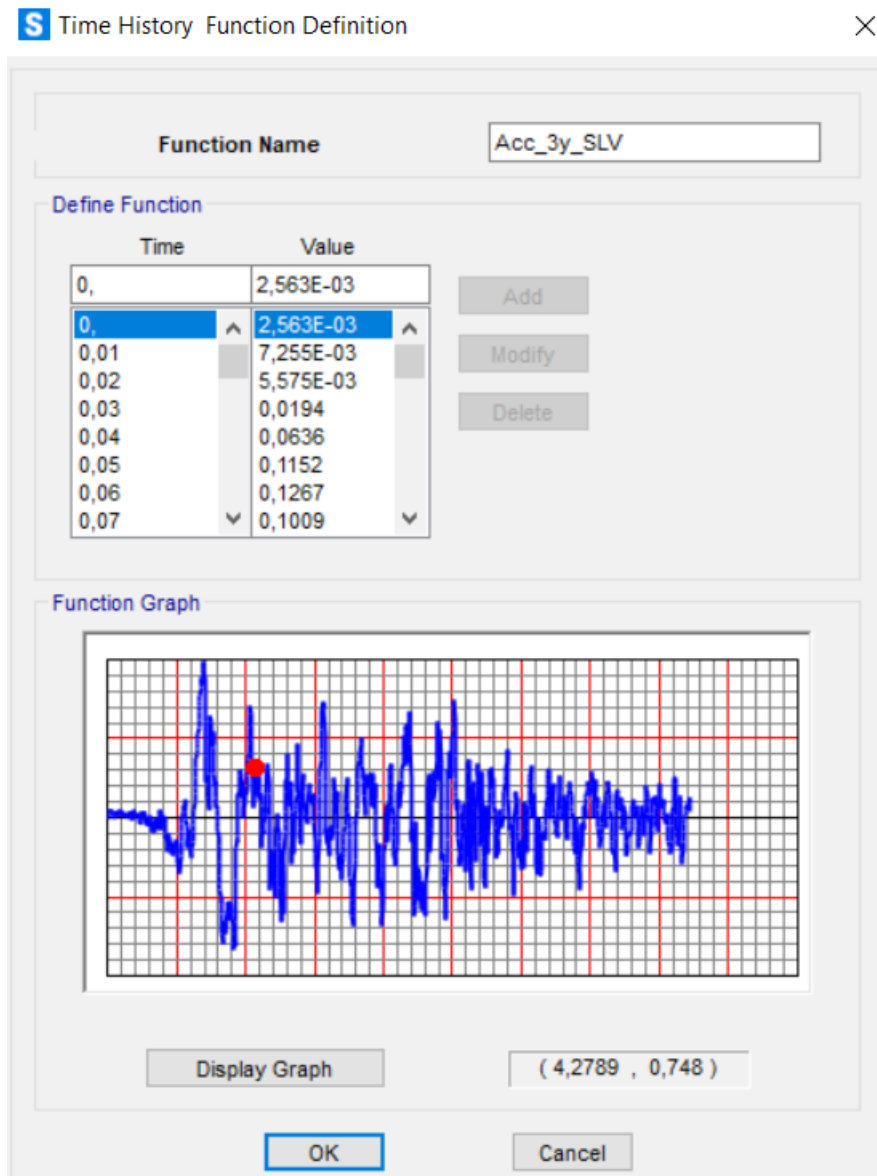


Figura 152. Accelerogramma 3 in direzione y.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

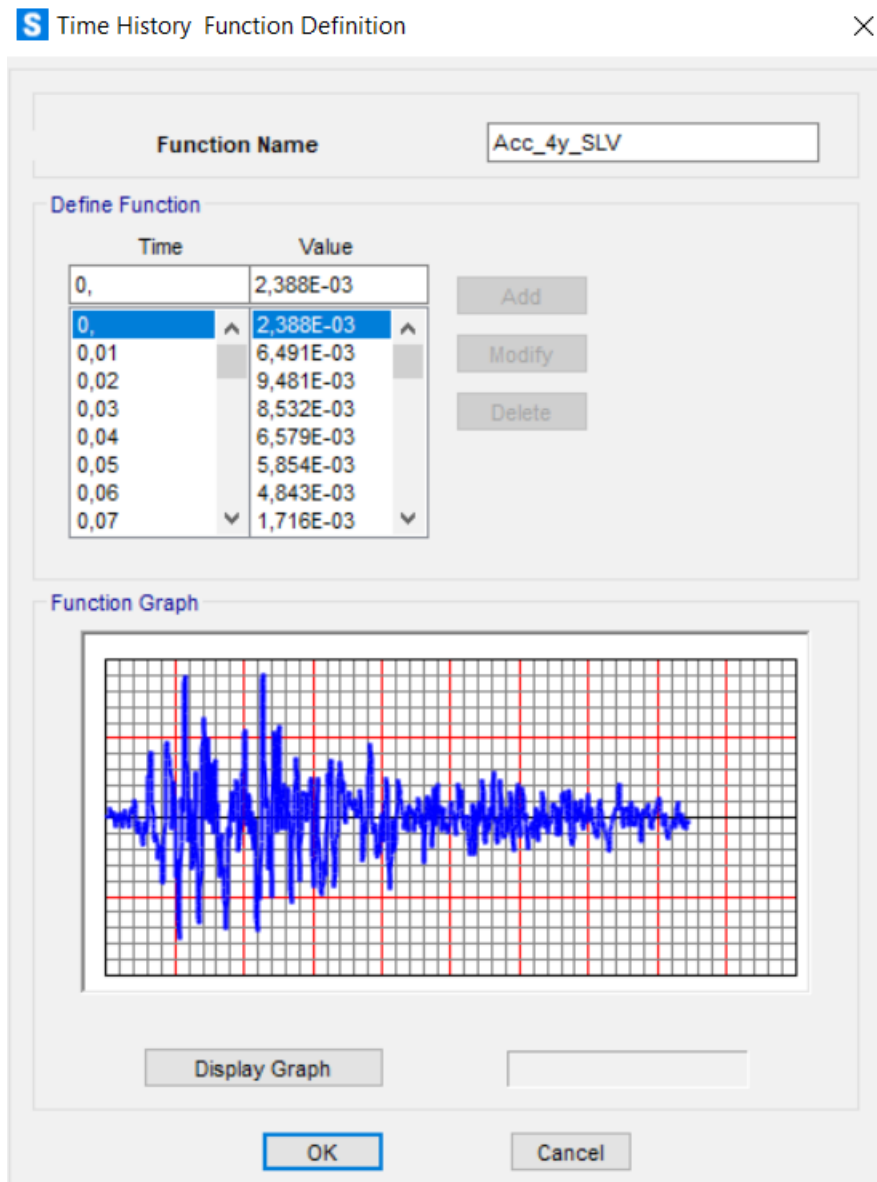


Figura 153. Accelerogramma 4 in direzione y.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

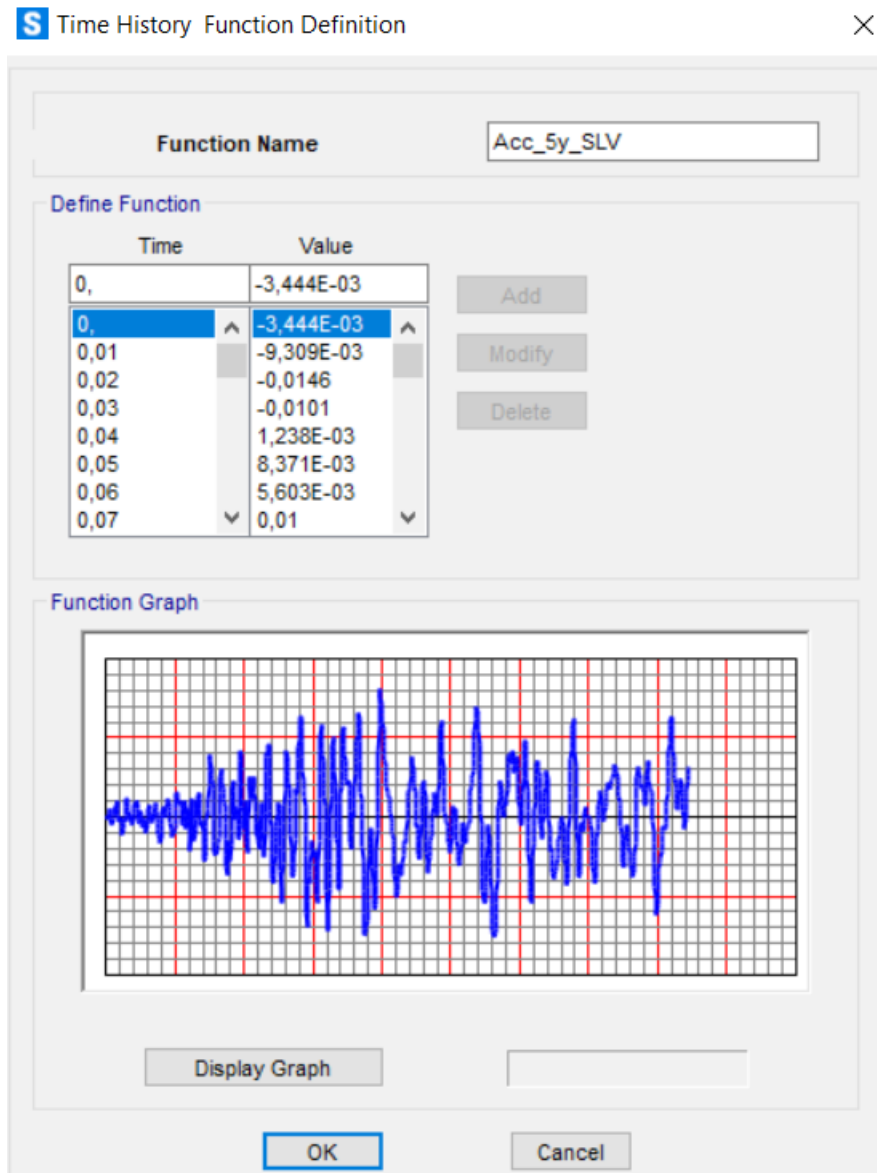


Figura 154. Accelerogramma 5 in direzione y.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

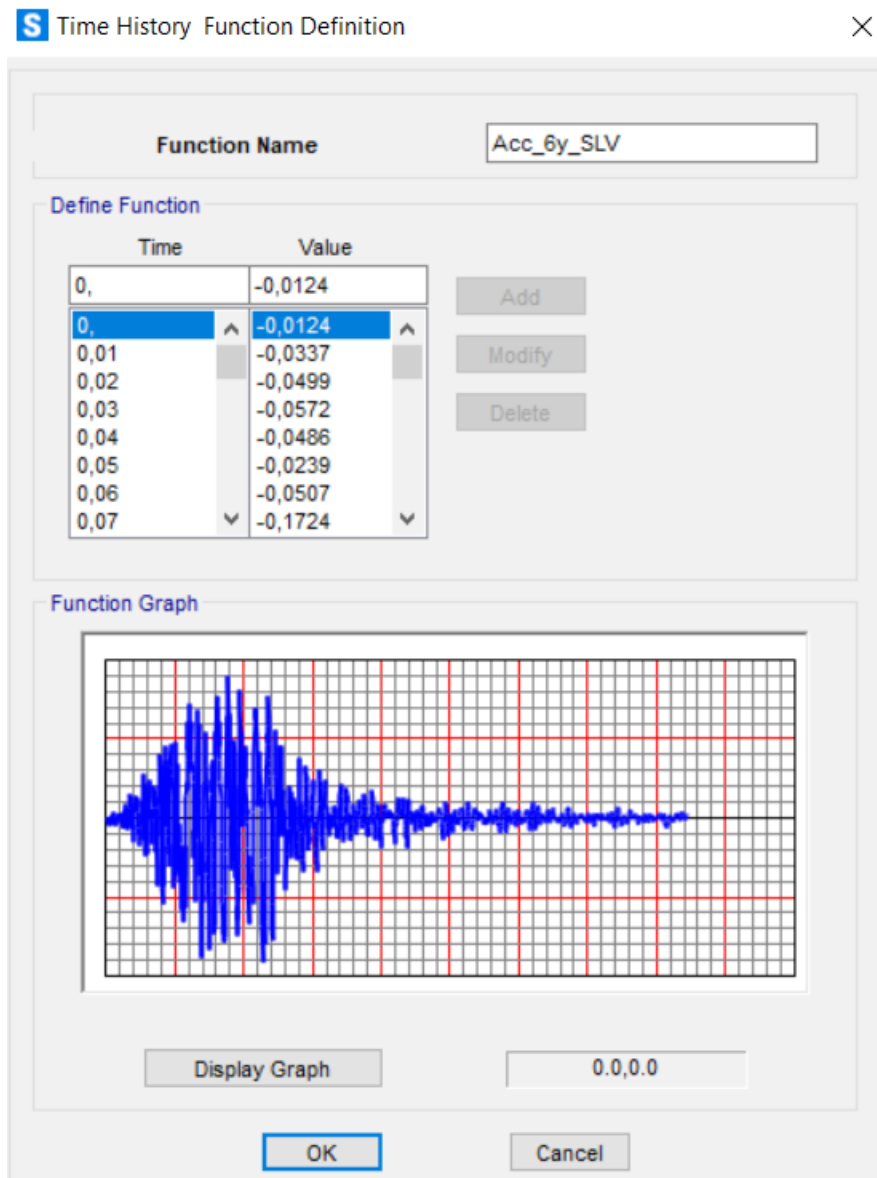


Figura 155. Accelerogramma 6 in direzione y.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

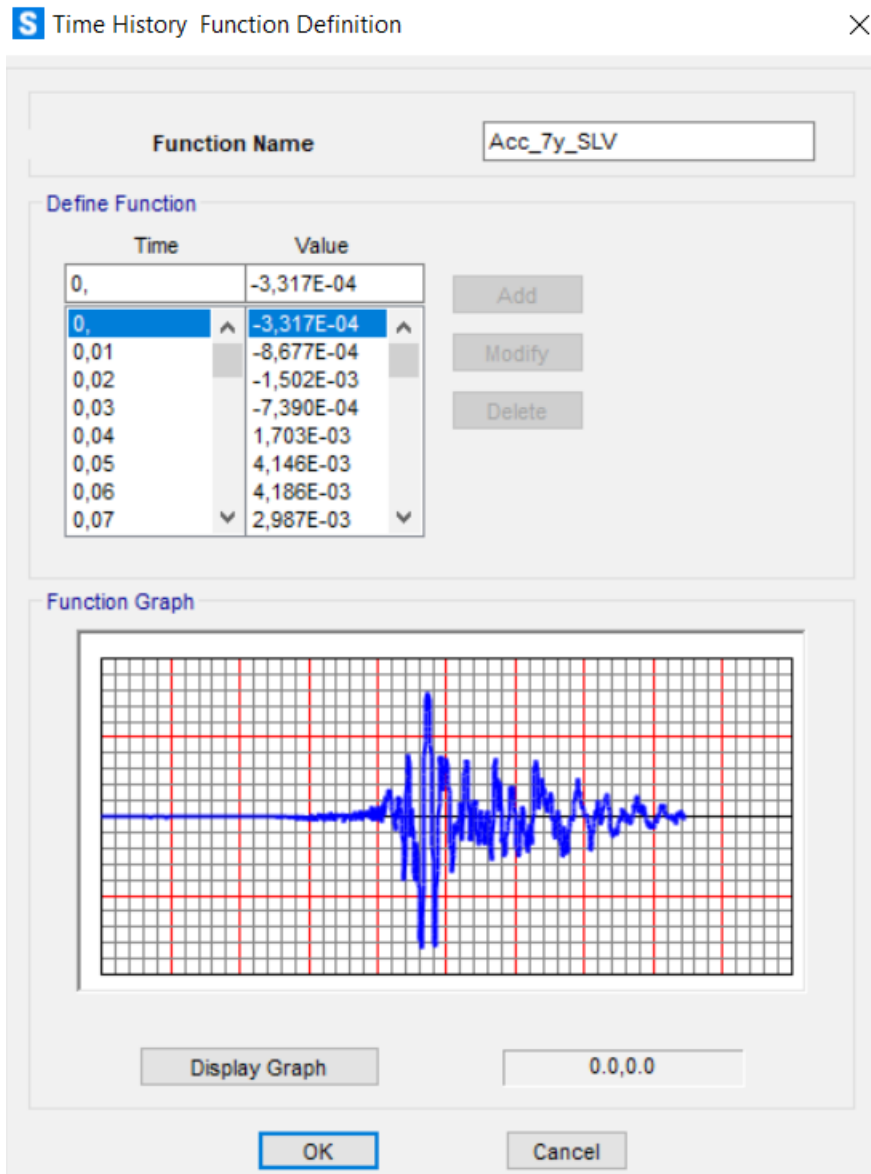


Figura 156. Accelerogramma 7 in direzione y.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Dopo aver esposto gli accelerogrammi inseriti al Sap 2000 nelle due direzioni di analisi, si procede con l'inserimento dei casi di analisi dinamica non lineare combinando gli accelerogrammi in una direzione con quelli ortogonali nell'altra direzione in esame, inserendo come fattore di scala 1 in quanto gli accelerogrammi naturali spettro compatibili con lo spettro elastico allo SLV sono espressi in m/s^2 . Dato che abbiamo considerato 7 gruppi di accelerogrammi per entrambi le direzioni di analisi (x e y) avremo 7 casi di analisi dinamica non lineare rispettivamente TH1_SLV, TH2_SLV, TH3_SLV, TH4_SLV, TH5_SLV, TH6_SLV, TH7_SLV.

Si espongono ora le immagini relative ai load cases inseriti:

The screenshot shows the 'Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History' dialog box. The 'Load Case Name' is 'TH1_SLV'. The 'Load Case Type' is 'Time History'. The 'Analysis Type' is 'Nonlinear' and the 'Solution Type' is 'Direct Integration'. The 'Geometric Nonlinearity Parameters' are set to 'None'. The 'History Type' is 'Transient'. The 'Mass Source' is 'Previous'. The 'Time Step Data' section shows 'Number of Output Time Steps' as 2500 and 'Output Time Step Size' as 0,01. The 'Loads Applied' table is as follows:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	Acc_1x_SLV	1,
Accel	U1	Acc_1x_SLV	1,
Accel	U2	Acc_1y_SLV	1,

The 'Other Parameters' section shows 'Damping' as 'Proportional', 'Time Integration' as 'Hilber-Hughes-Taylor', and 'Nonlinear Parameters' as 'Default'. There are 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom right.

Figura 157. Caso di analisi dinamica non lineare 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History ×

Load Case Name
TH2_SLV Set Def Name Modify/Show...

Initial Conditions
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Nonlinear Case ▼
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_2x_SLV	1,
Accel	U1	Acc_2x_SLV	1,
Accel	U2	Acc_2y_SLV	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: Proportional 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 Consider Collapse
 Periodic

Mass Source
Previous ▼

OK
Cancel

Figura 158. Caso di analisi dinamica non lineare 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History ×

Load Case Name
TH3_SLV Set Def Name Modify/Show...

Initial Conditions
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Nonlinear Case ▼
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_3x_SLV ▼	1, ▲
Accel	U1	Acc_3x_SLV	1, ▲
Accel	U2	Acc_3y_SLV	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 Proportional Modify/Show...
Time Integration Hilber-Hughes-Taylor Modify/Show...
Nonlinear Parameters Default Modify/Show...

Load Case Type
Time History ▼ Design...

Analysis Type
 Linear Modal
 Nonlinear Direct Integration

Solution Type

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

History Type
 Transient Consider Collapse
 Periodic

Mass Source
Previous ▼

OK
Cancel

Figura 159. Caso di analisi dinamica non lineare 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History

✕

Load Case Name
TH4_SLV

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

Modal Load Case
Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	Acc_4x_SLV	1,
Accel	U1	Acc_4x_SLV	1,
Accel	U2	Acc_4y_SLV	1,

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data
Number of Output Time Steps: 2500
Output Time Step Size: 0,01

Other Parameters
Damping: Proportional
Time Integration: Hilber-Hughes-Taylor
Nonlinear Parameters: Default

Load Case Type
Time History

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
Previous

Buttons: Add, Modify, Delete, Modify/Show..., OK, Cancel

Figura 160. Caso di analisi dinamica non lineare 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History ×

Load Case Name
TH5_SLV 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 ▼
Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type
 Linear
 Nonlinear

Solution Type
 Modal
 Direct Integration

Modal Load Case
Use Modes from Case MODAL ▼

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

History Type
 Transient Consider Collapse
 Periodic

Mass Source
Previous ▼

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel ▼	U1 ▼	Acc_5x_SLV ▼	1, ▲
Accel	U1	Acc_5x_SLV	1, ▲
Accel	U2	Acc_5y_SLV	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 Proportional Modify/Show...
Time Integration Hilber-Hughes-Taylor Modify/Show...
Nonlinear Parameters Default Modify/Show...

OK
Cancel

Figura 161. Caso di analisi dinamica non lineare 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History ×

Load Case Name
TH6_SLV Set Def Name Notes Modify/Show...

Load Case Type
Time History Design...

Initial Conditions
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Nonlinear Case ▼
Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type
 Linear **Solution Type**
 Nonlinear Modal
 Direct Integration

Modal Load Case
Use Modes from Case MODAL ▼

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

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	
Accel	U1	Acc_6x_SLV	1,	
Accel	U2	Acc_6y_SLV	1,	

Add Modify Delete

Show Advanced Load Parameters

History Type
 Transient Consider Collapse
 Periodic

Mass Source
Previous ▼

Time Step Data
Number of Output Time Steps 2500
Output Time Step Size 0,01

Other Parameters
Damping Proportional Modify/Show...
Time Integration Hilber-Hughes-Taylor Modify/Show...
Nonlinear Parameters Default Modify/Show...

OK
Cancel

Figura 162. Caso di analisi dinamica non lineare 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History ×

Load Case Name: TH7_SLV Set Def Name Modify/Show...

Notes: Design...

Initial Conditions

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case ▼

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_7x_SLV	1,	
Accel	U1	Acc_7x_SLV	1,	▲
Accel	U2	Acc_7y_SLV	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: Proportional 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: Previous ▼

OK Cancel

Figura 163. Caso di analisi dinamica non lineare 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Dopo aver inserito tutti i casi di analisi dinamica non lineare, analoghi per i quattro modelli di calcolo analizzati, si definiscono nello specifico i quattro casi studio:

- Modello di base senza i dissipatori sismici;
- Modello con i dissipatori magnetoreologici non alimentati (0V);
- Modello con i dissipatori magnetoreologici alimentati (0-2,25V);
- Modello con i dissipatori viscosi equivalenti ai dissipatori magnetoreologici alimentati.

Il primo modello che viene analizzato è il modello base senza l'applicazione dei dissipatori sismici. Grazie a questo modello è possibile fare mente locale sulla nostra situazione iniziale di partenza attraverso un'analisi dinamica non lineare che descriva il comportamento post-elastico della nostra struttura presa in esame. Si procede con l'analisi della struttura mediante il comando `analyze > run analysis > run now`.

Si espongono ora i risultati dell'analisi dinamica non lineare ottenuti come media dei massimi valori letti nei load cases definiti in precedenza (TH1_SLV, TH2_SLV, TH3_SLV, TH4_SLV, TH5_SLV, TH6_SLV, TH7_SLV) in termini di spostamenti di piano, accelerazioni relative e assolute di piano, velocità relative e assolute di piano:

Spostamenti di piano:

N° piano	h piano	dx	dy	dr x	dr y	0,5% h piano
(-)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	3,35	0,0188	0,0161	0,0188	0,0161	0,0168
2	3,35	0,0429	0,0360	0,0242	0,0199	0,0168
3	3,35	0,0655	0,0563	0,0225	0,0203	0,0168
4	3,05	0,0852	0,0741	0,0197	0,0178	0,0153
5	3,05	0,1052	0,0912	0,0200	0,0171	0,0153
6	3,05	0,1228	0,1034	0,0176	0,0121	0,0153

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

N° piano (-)	dr x (m)	dr y (m)	0,5% h piano (m)	Verifica	Verifica	Rapporto	Rapporto
				x (-)	y (-)	dr x (%)	dr y (%)
1	0,0188	0,0161	0,0168	NonOk	Ok	0,56	0,48
2	0,0242	0,0199	0,0168	NonOk	NonOk	0,72	0,59
3	0,0225	0,0203	0,0168	NonOk	NonOk	0,67	0,61
4	0,0197	0,0178	0,0153	NonOk	NonOk	0,64	0,59
5	0,0200	0,0171	0,0153	NonOk	NonOk	0,66	0,56
6	0,0176	0,0121	0,0153	NonOk	Ok	0,58	0,40

Dai risultati ottenuti si evidenzia che gli spostamenti di interpiano (dr x e dr y) superano il limite prestabilito, eccetto che per il piano 1 e per il piano 6 in direzione y, pertanto sarà necessario inserire un sistema di dissipazione esterno per far rimanere la struttura in campo elastico o comunque sia intorno ai valori di riferimento ($drx < 0,5\%h_{piano}$ e $dry < 0,5\%h_{piano}$).

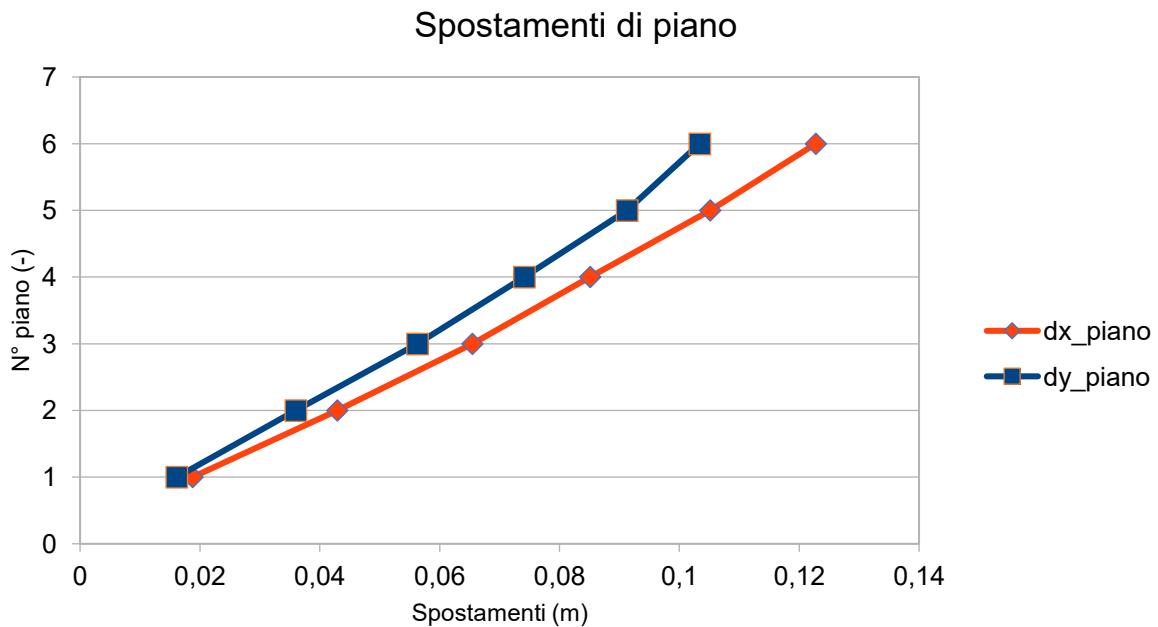


Figura 164. Spostamenti di piano del modello base.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Accelerazioni relative di piano:

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s ²)	(m/s ²)
1	3,35	2,3023	1,9110
2	3,35	3,6521	3,1862
3	3,35	4,0238	3,7804
4	3,05	4,2338	3,8093
5	3,05	4,4672	3,8074
6	3,05	5,5038	4,8852

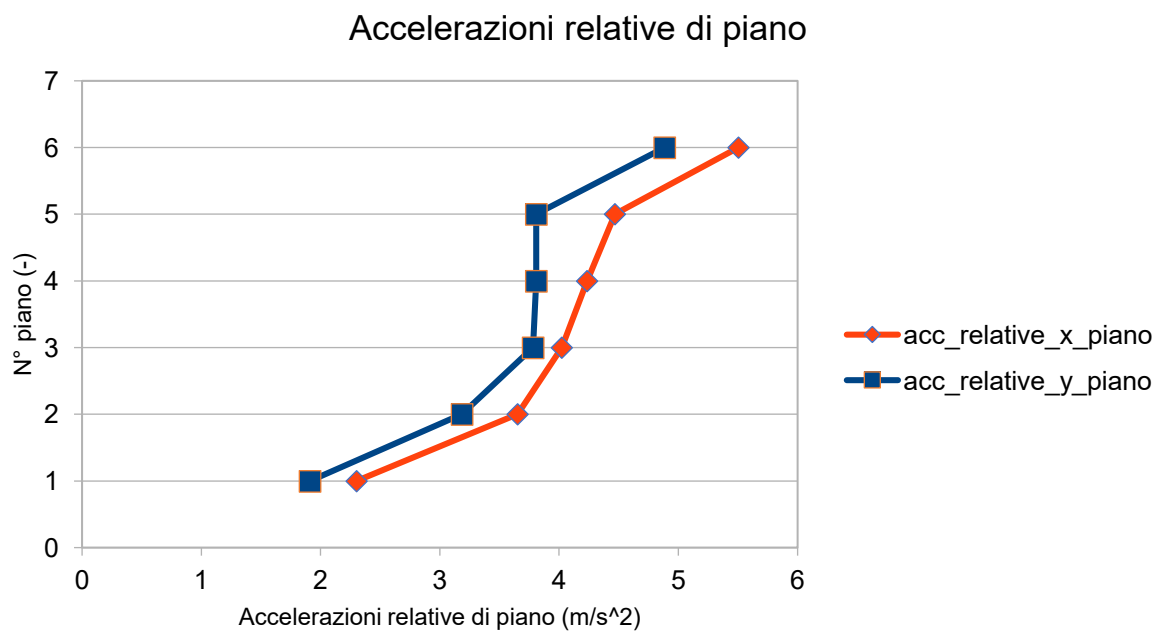


Figura 165. Accelerazioni relative di piano del modello base.

Accelerazioni assolute di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s ²)	U2y (m/s ²)
1	3,35	2,0705	1,8095
2	3,35	2,5781	2,2074
3	3,35	2,4745	2,4362
4	3,05	2,5327	2,5522
5	3,05	2,8347	2,8607
6	3,05	3,6845	3,4232

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

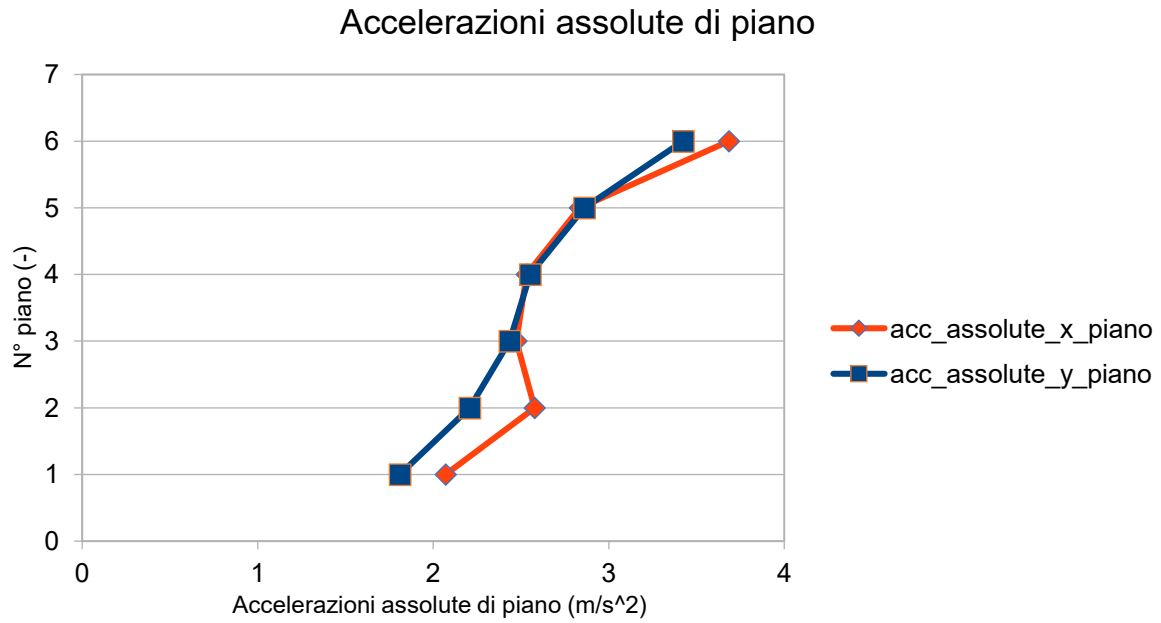


Figura 166. Accelerazioni assolute di piano del modello base.

Velocità relative di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s)	U2y (m/s)
1	3,35	0,1393	0,1199
2	3,35	0,2951	0,2488
3	3,35	0,3992	0,3529
4	3,05	0,4555	0,4291
5	3,05	0,5533	0,5138

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

6 3,05 0,6715 0,6089

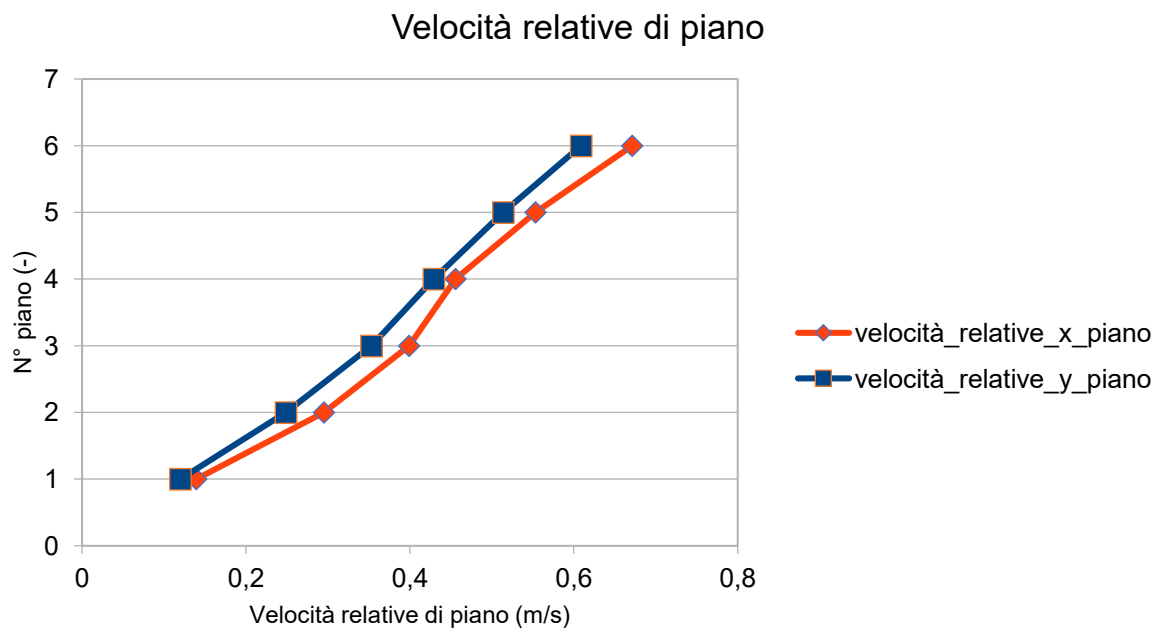


Figura 167. Velocità relative di piano del modello base.

Velocità assolute di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s)	U2y (m/s)
1	3,35	1,0930	1,2618
2	3,35	1,1131	1,2725
3	3,35	1,1367	1,2939
4	3,05	1,1537	1,3308

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

5	3,05	1,1713	1,3790
6	3,05	1,1955	1,4186

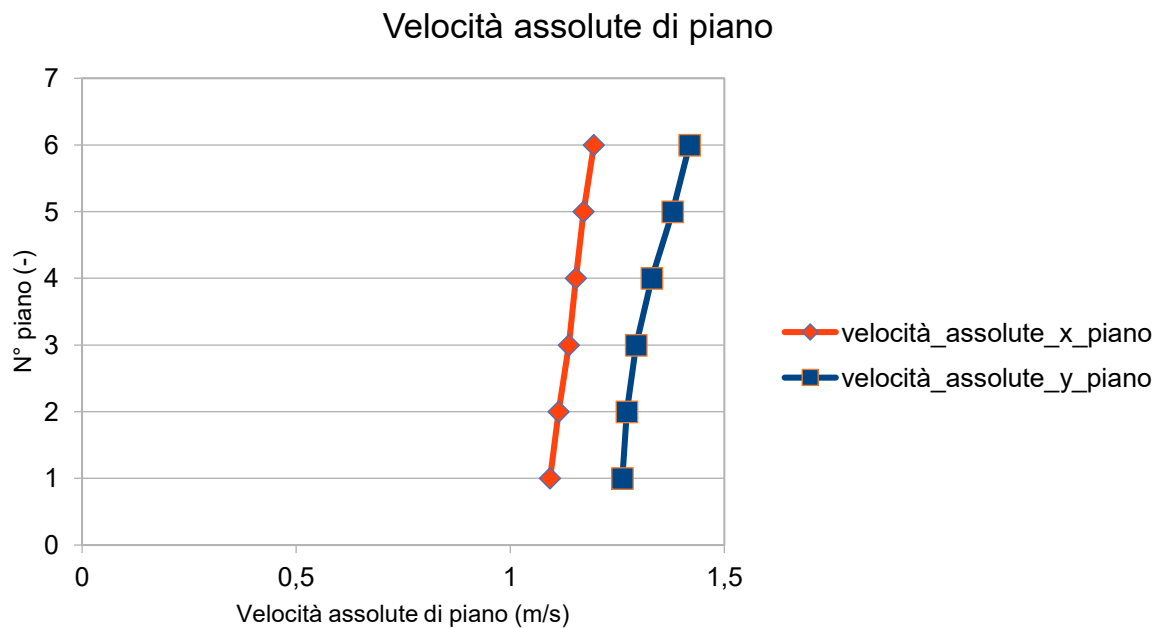


Figura 168. Velocità assolute di piano del modello base.

In condizioni standard, ovvero quando non viene variato il campo magnetico del dissipatore magnetoreologico mediante l'applicazione di un voltaggio di corrente elettrica, quest'ultimo assume il comportamento di un dissipatore viscoso lineare. Pertanto, il secondo modello che viene analizzato è quello con i dissipatori magnetoreologici non alimentati dalla corrente elettrica. Nel programma di calcolo questi dissipatori vengono modellati con elementi linear link. Inizialmente si definiscono i linear link con queste operazioni: define > section properties > link/support proper-

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Pagina 187

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

ties. Poi si inseriscono le rispettive costanti di dissipazione relative al local axis U1 (asse locale assiale dell'elemento linear link). Le tabelle finali inerenti alle costanti di dissipazione definitive (da inserire nel programma di calcolo agli elementi finiti) sono le seguenti:

Parametri di progetto							
Direzione x							
N° piano	T1	ξ_t	ξ_d	ξ_{tot}	η	c/2	Fd/2
(-)	(s)	(%)	(%)	(%)	(-)	(kN/m*s)	(kN)
3	1,355	5	11,5	16,5	0,6820	153,08	32,39
4	1,355	5	11,5	16,5	0,6820	153,08	42,09
5	1,355	5	11,5	16,5	0,6820	153,08	51,56

Parametri di progetto							
Direzione y							
N° piano	T2	ξ_t	ξ_d	ξ_{tot}	η	c/2	Fd/2
(-)	(s)	(%)	(%)	(%)	(-)	(kN/m*s)	(kN)
3	1,227	5	11,5	16,5	0,6820	169,20	35,14
4	1,227	5	11,5	16,5	0,6820	169,20	45,73
5	1,227	5	11,5	16,5	0,6820	169,20	55,13

Si espongono ora delle immagini relative alla modellazione per una maggior chiarezza:

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Link/Support Property Data ×

Link/Support Type:

Property Name:

Property Notes:

P-Delta Parameters

Shear Couple

Equal End Moments

Advanced

Total Mass and Weight

Mass	<input type="text" value="0,"/>	Rotational Inertia 1	<input type="text" value="0,"/>
Weight	<input type="text" value="0,"/>	Rotational Inertia 2	<input type="text" value="0,"/>
		Rotational Inertia 3	<input type="text" value="0,"/>

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring:

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs:

Directional Properties

Direction	Fixed	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for All..."/>	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>		

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases:

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping:

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor:

Figura 169. Immagine 1 relativa alla modellazione del dissipatore viscoso in direzione x nel modello con dissipatore magnetoreologico non alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Linear Link/Support Directional Properties ×

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0,					

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
153,08					

Shear Distance from End J

U2

U3

Units

KN, m, C ▼

Figura 170. Immagine 2 relativa alla modellazione del dissipatore viscoso in direzione x nel modello con dissipatore magnetoreologico non alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Link/Support Property Data

×

Link/Support Type: Linear

Property Name: Dissipatore viscoso in y

Property Notes: Modify/Show...

P-Delta Parameters

- Shear Couple
- Equal End Moments
- Advanced

Modify/Show

Total Mass and Weight

Mass: 0, Rotational Inertia 1: 0,

Weight: 0, Rotational Inertia 2: 0,

Rotational Inertia 3: 0,

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1,

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1,

Directional Properties

Direction	Fixed	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for All...	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>		

Fix All Clear All

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases: []

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping: []

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor: 1,

OK Cancel

Figura 171. Immagine 1 relativa alla modellazione del dissipatore viscoso in direzione y nel modello con dissipatore magnetoreologico non alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Linear Link/Support Directional Properties

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2

U3

Units

KN, m, C

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0,					

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
169,2					

OK Cancel

Figura 172. Immagine 2 relativa alla modellazione del dissipatore viscoso in direzione y nel modello con dissipatore magnetoreologico non alimentato.

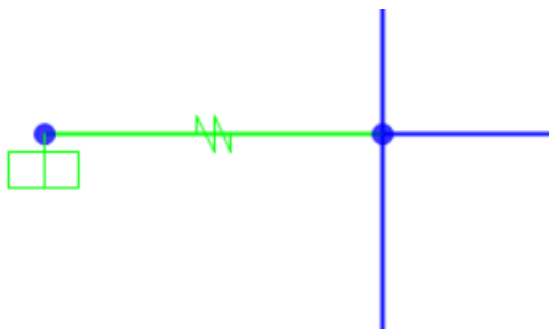


Figura 173. Schema del dissipatore viscoso nel modello con dissipatore magnetoreologico non alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Definiti i linear link, si disegnano i dissipatori magnetoreologici non alimentati ai piani 3, 4, 5 dei due telai in x (telaio 5-6-7-8-9-10 e telaio 11-12-13-14-15-16) e dei due telai in y (telaio 17-12-6-1 e telaio 20-15-9-4) con il comando draw 2 joint link impostando per tutti gli elementi una lunghezza pari ad 1m, un'inclinazione orizzontale ($\alpha=0$) e correlandoli ai rispetti linear link creati in precedenza per ogni direzione di analisi. Inoltre per rendere la modellazione più ottimale, viene simulato il collegamento di incastro, nel nodo esterno del dissipatore, con la struttura reticolare in acciaio realizzata con profili HEA260 ed incastrata a terra, mediante la seguente procedura: assign > joint > restraints > selezionare il vincolo d'incastro.

Dopo aver completato la modellazione si procede con l'analisi della struttura mediante il comando analyze > run analysis > run now.

Si espongono ora i risultati dell'analisi dinamica non lineare ottenuti come media dei massimi valori letti nei load cases definiti in precedenza (TH1_SLV, TH2_SLV, TH3_SLV, TH4_SLV, TH5_SLV, TH6_SLV, TH7_SLV) in termini di spostamenti di piano, accelerazioni relative e assolute di piano, velocità relative e assolute di piano, spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi forza-spostamento dei dissipatori magnetoreologici non alimentati:

Spostamenti di piano:

N° piano	h piano	dx	dy	dr x	dr y	0,5% h piano
(-)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	3,35	0,0147	0,0127	0,0147	0,0127	0,0168
2	3,35	0,0331	0,0280	0,0184	0,0152	0,0168
3	3,35	0,0503	0,0435	0,0171	0,0155	0,0168
4	3,05	0,0655	0,0579	0,0152	0,0144	0,0153
5	3,05	0,0836	0,0716	0,0181	0,0137	0,0153
6	3,05	0,0980	0,0815	0,0145	0,0099	0,0153

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

N° piano (-)	dr x (m)	dr y (m)	0,5% h piano (m)	Verifica	Verifica	Rapporto	Rapporto
				x (-)	y (-)	dr x (%)	dr y (%)
1	0,0147	0,0127	0,0168	Ok	Ok	0,44	0,38
2	0,0184	0,0152	0,0168	NonOk	Ok	0,55	0,45
3	0,0171	0,0155	0,0168	NonOk	Ok	0,51	0,46
4	0,0152	0,0144	0,0153	Ok	Ok	0,50	0,47
5	0,0181	0,0137	0,0153	NonOk	Ok	0,59	0,45
6	0,0145	0,0099	0,0153	Ok	Ok	0,47	0,33

Dai risultati ottenuti si evidenzia una condizione migliore in termini di spostamenti di interpiano rispetto al modello di base dove la verifica era non soddisfatta in nessun piano e in nessuna direzione di analisi. In questo modello, gli spostamenti di interpiano sono perfettamente verificati nella direzione y ma non completamente verificati nella direzione x. In particolare il limite dr x viene superato ai piani 2, 3 e 5. Tuttavia, in questi piani dove la verifica non è matematicamente soddisfatta, lo scarto dal valore limite è piuttosto trascurabile come è possibile notare nella tabella sovrastante (Rapporto_drx_2=0,55%h_piano; Rapporto_drx_3=0,51%h_piano; Rapporto_drx_5=0,59%h_piano).

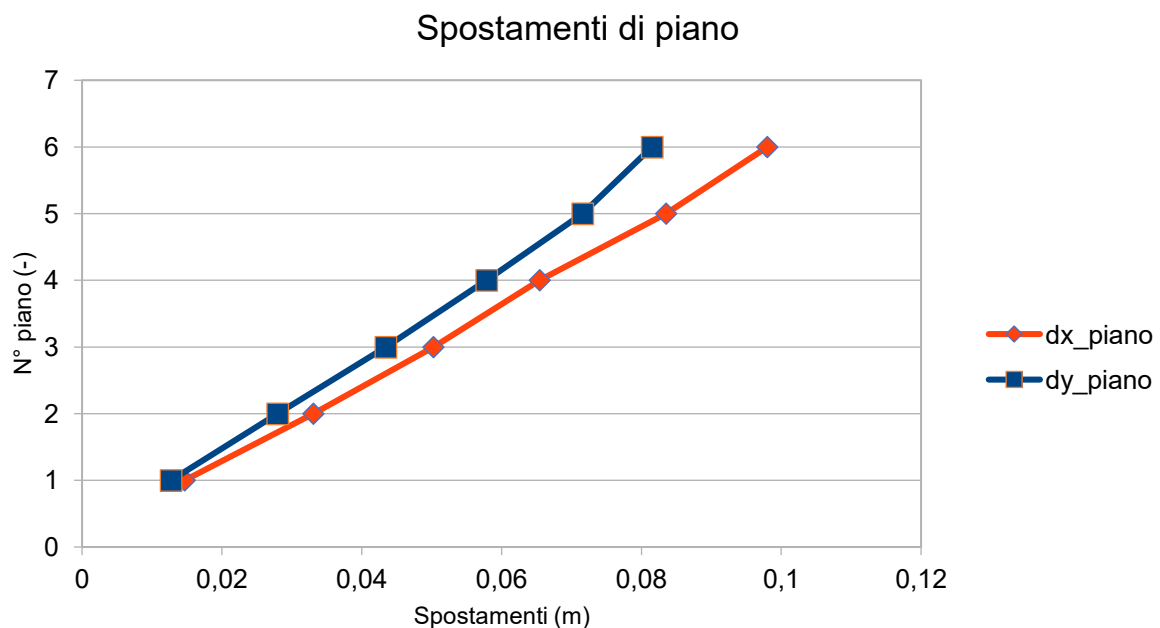


Figura 174. Spostamenti di piano del modello con dissipatori magnetoreologici non alimentati.

Accelerazioni relative di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s ²)	U2y (m/s ²)
1	3,35	2,2270	1,8880
2	3,35	3,4895	3,0563
3	3,35	3,7571	3,5335
4	3,05	3,7661	3,4505
5	3,05	3,9461	3,3414
6	3,05	4,8846	4,3274

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

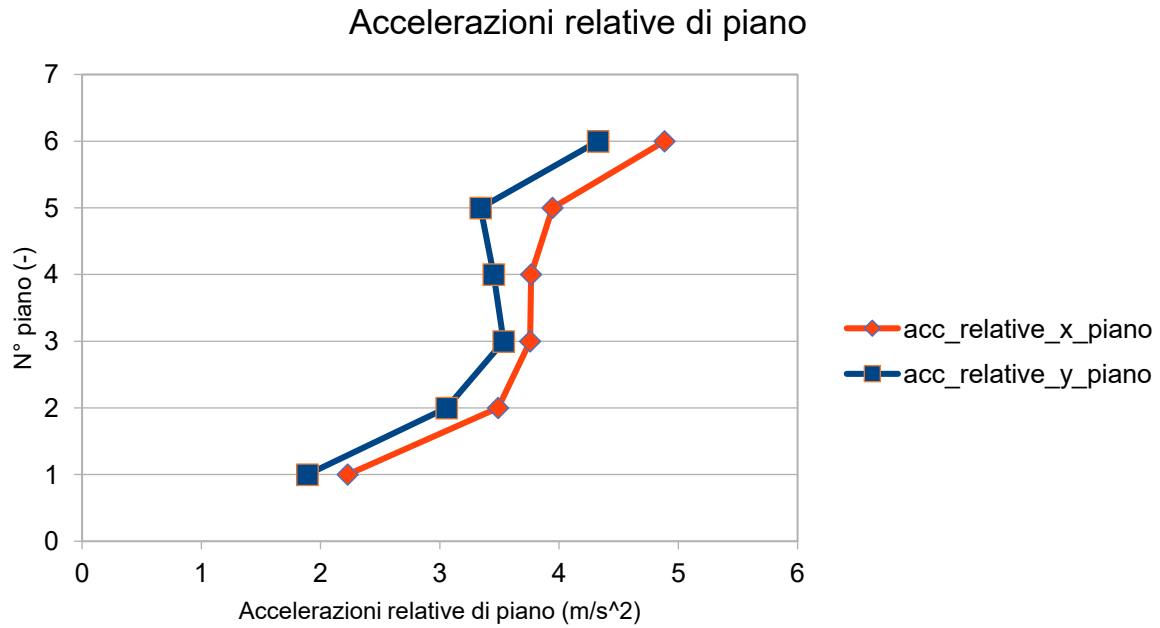


Figura 175. Accelerazioni relative di piano del modello con dissipatori magnetoreologici non alimentati.

Accelerazioni assolute di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s ²)	U2y (m/s ²)
1	3,35	2,0935	2,0166
2	3,35	2,4757	2,5916
3	3,35	2,4245	2,5704
4	3,05	2,1537	2,2162
5	3,05	2,3825	2,2525
6	3,05	3,8469	3,4850

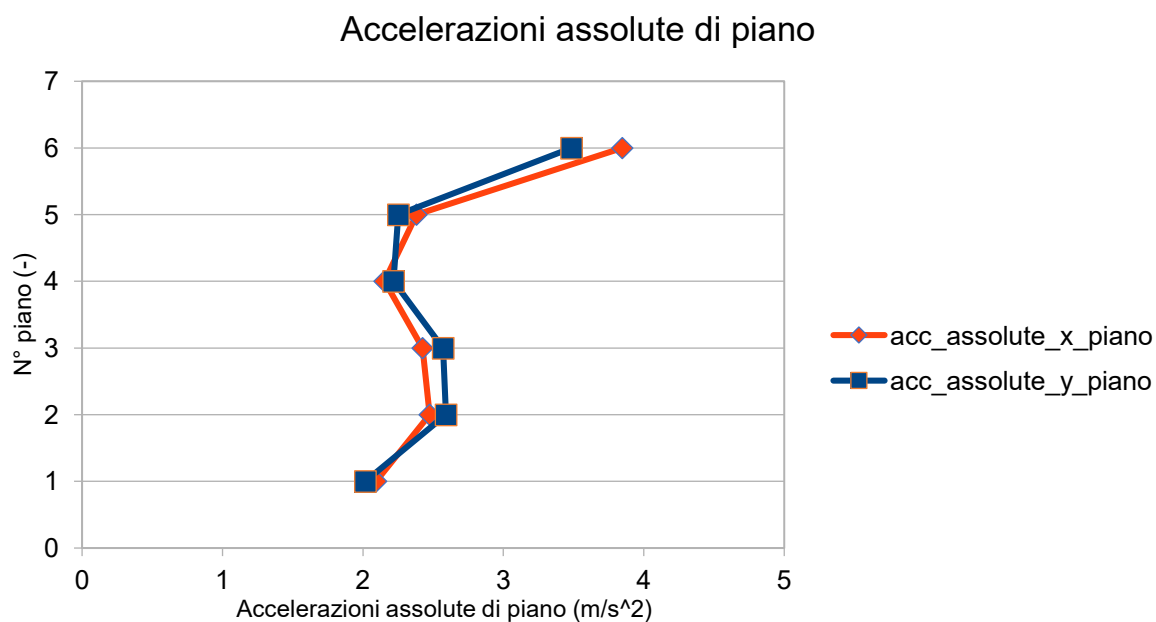


Figura 176. Accelerazioni assolute di piano del modello con dissipatori magnetoreologici non alimentati.

Velocità relative di piano:

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s)	(m/s)
1	3,35	0,1208	0,1043
2	3,35	0,2477	0,2106
3	3,35	0,3245	0,2855
4	3,05	0,3634	0,3395
5	3,05	0,4533	0,4117
6	3,05	0,5629	0,4950

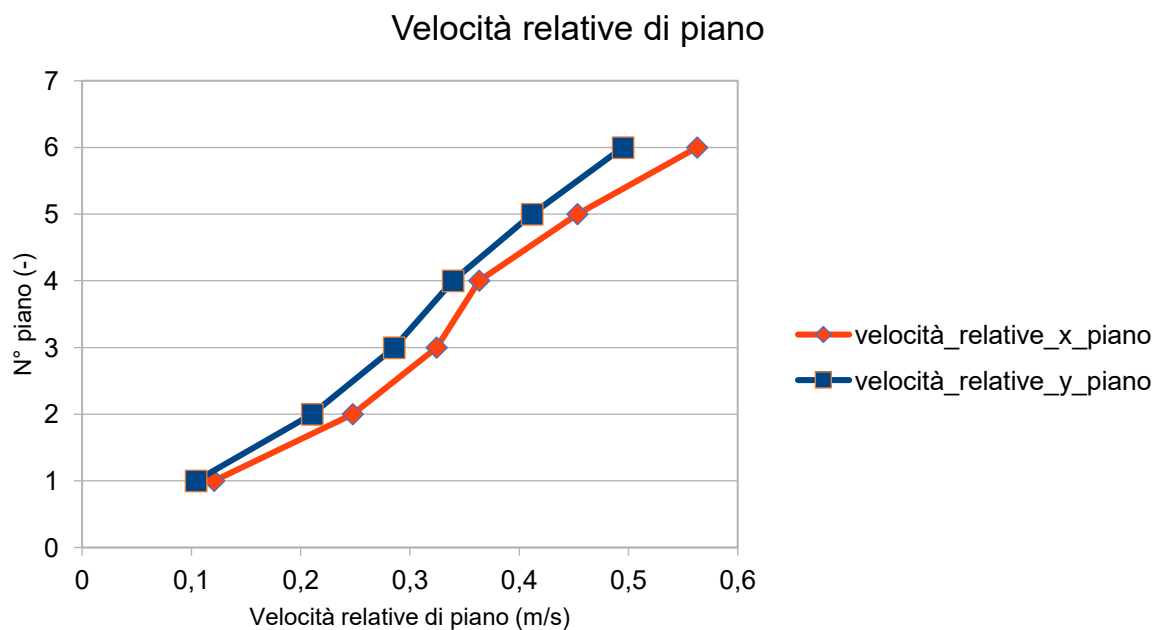


Figura 177. Velocità relative di piano del modello con dissipatori magnetoreologici non alimentati.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Velocità assolute di piano:

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s)	(m/s)
1	3,35	1,0914	1,2599
2	3,35	1,1015	1,2679
3	3,35	1,1127	1,2742
4	3,05	1,1228	1,2909
5	3,05	1,1366	1,3250
6	3,05	1,1526	1,3549

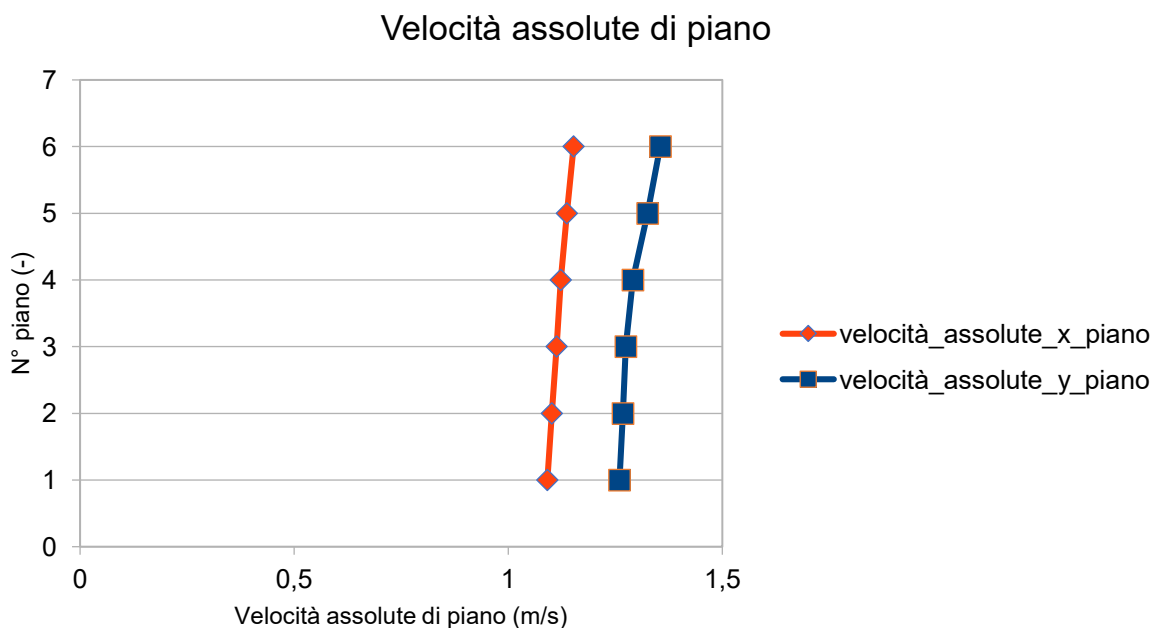


Figura 178. Velocità assolute di piano del modello con dissipatori magnetoreologici non alimentati.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori magnetoreologici non alimentati del telaio 5-6-7-8-9-10 in direzione x:

Telaio 5-6-7-8-9-10 (direzione x)			
N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	27	0,0484	0,0059
4	26	0,0633	0,0061
5	25	0,0803	0,0057

Telaio 5-6-7-8-9-10 (direzione x)		
N° piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	27	46,87
4	26	53,46
5	25	67,90

Piano 3:

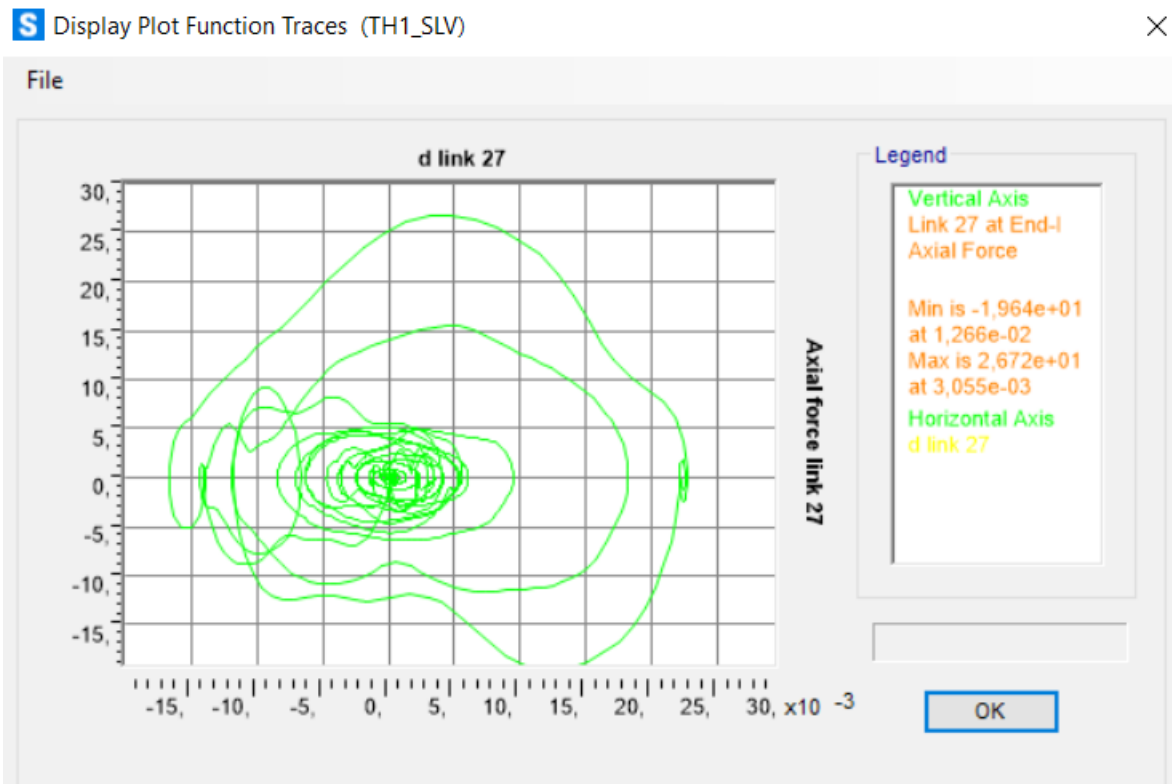


Figura 179. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

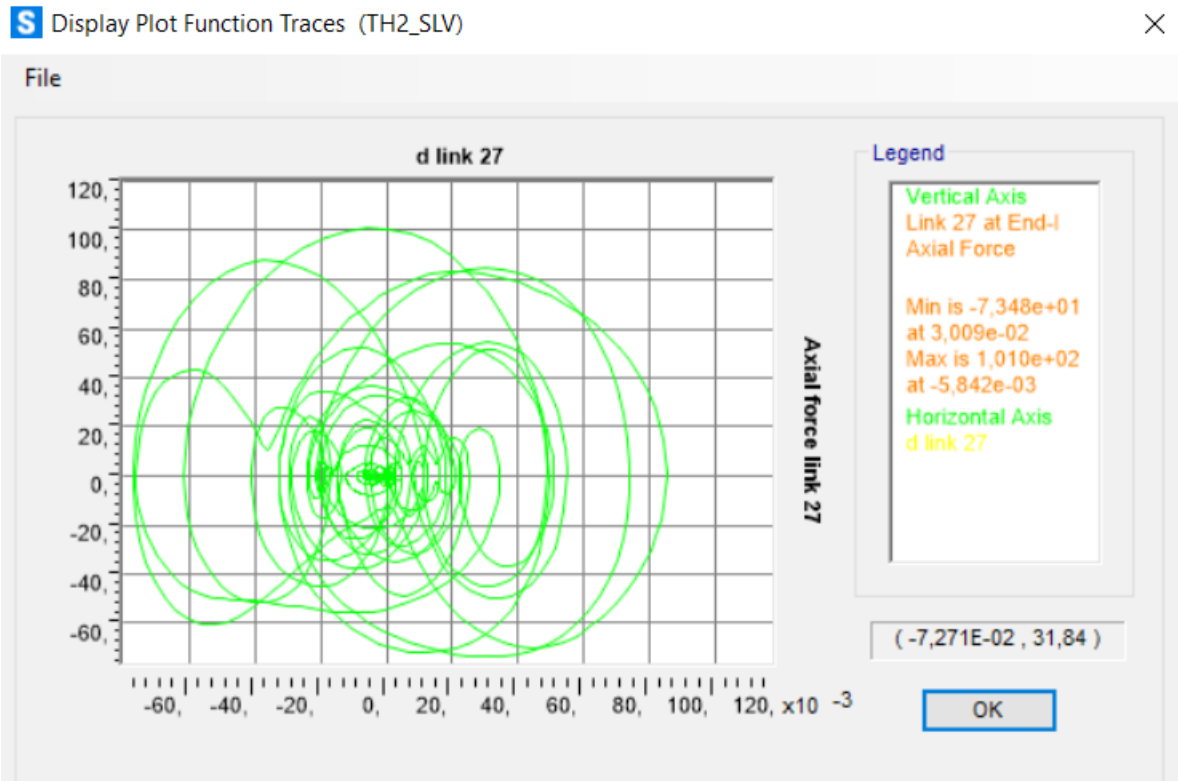


Figura 180. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

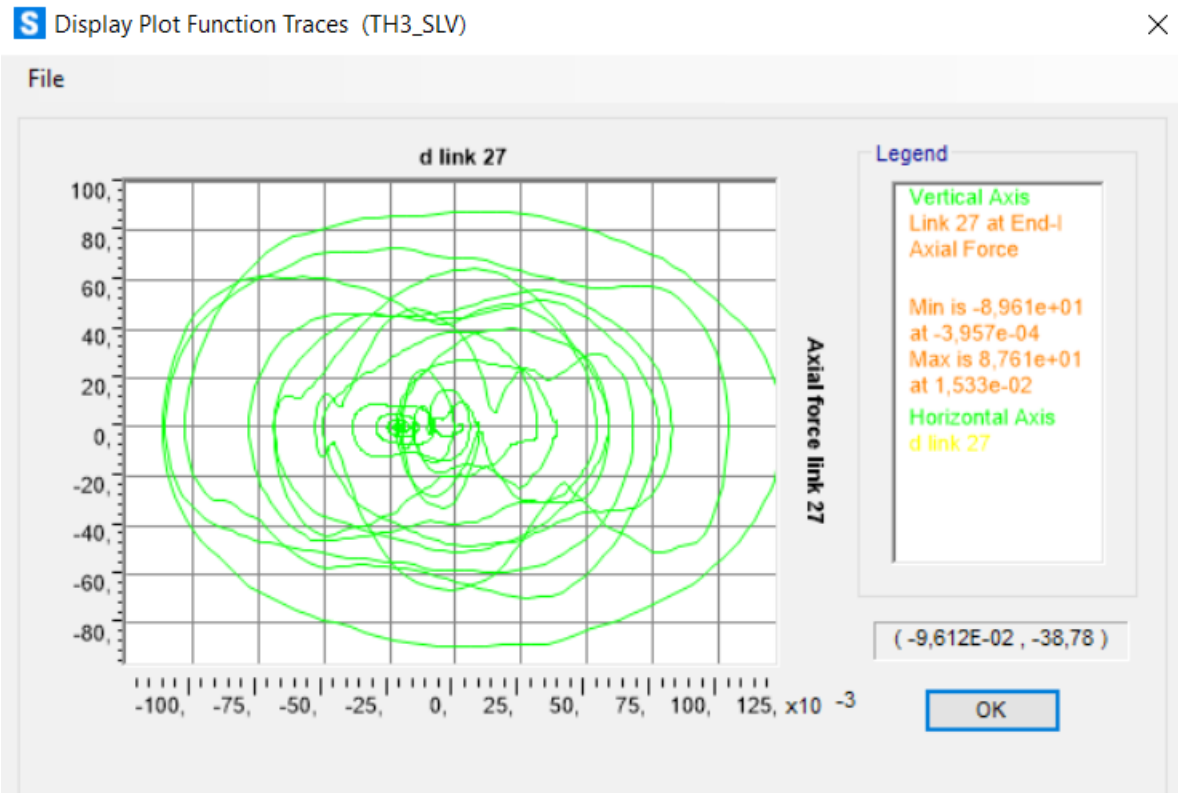


Figura 181. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

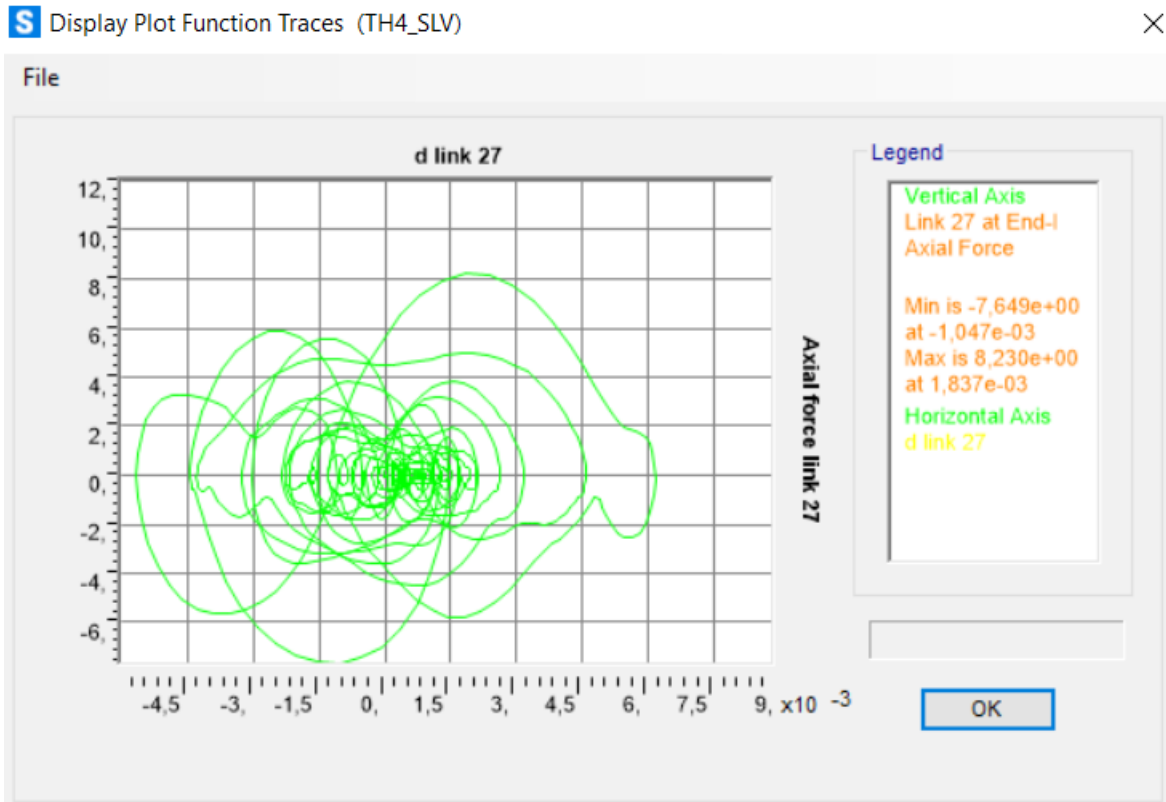


Figura 182. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

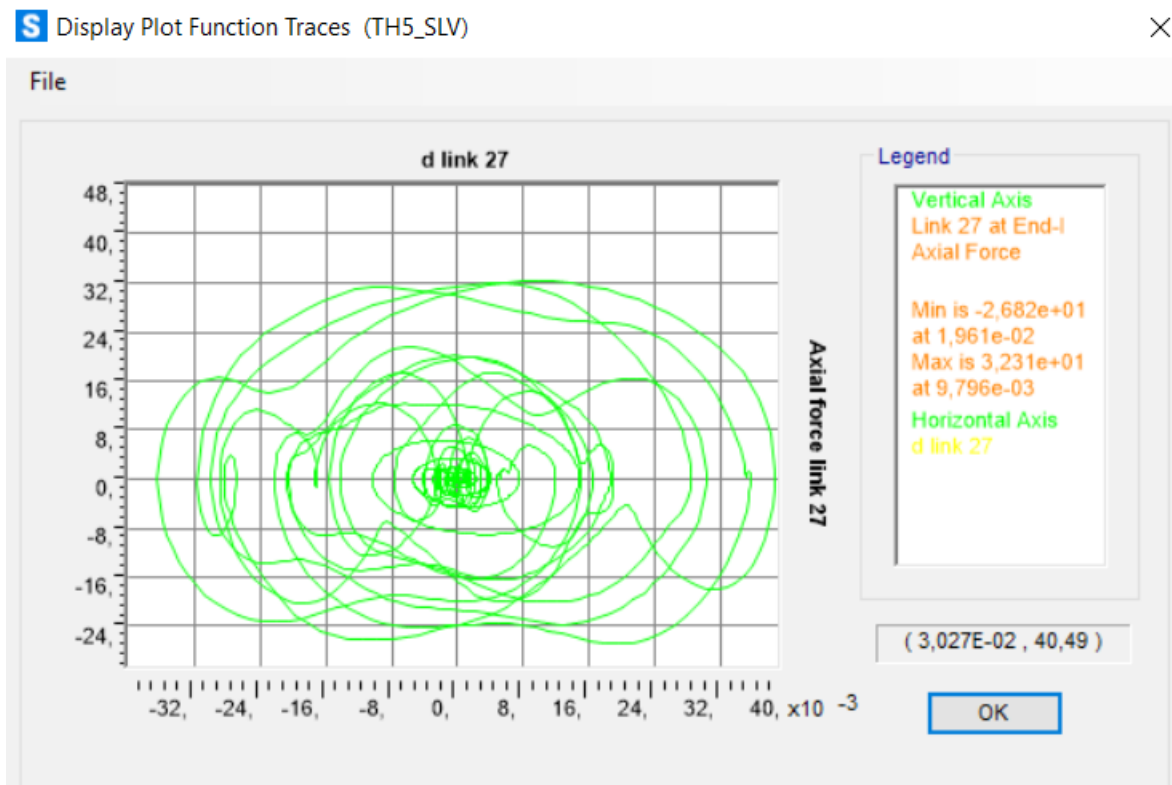


Figura 183. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

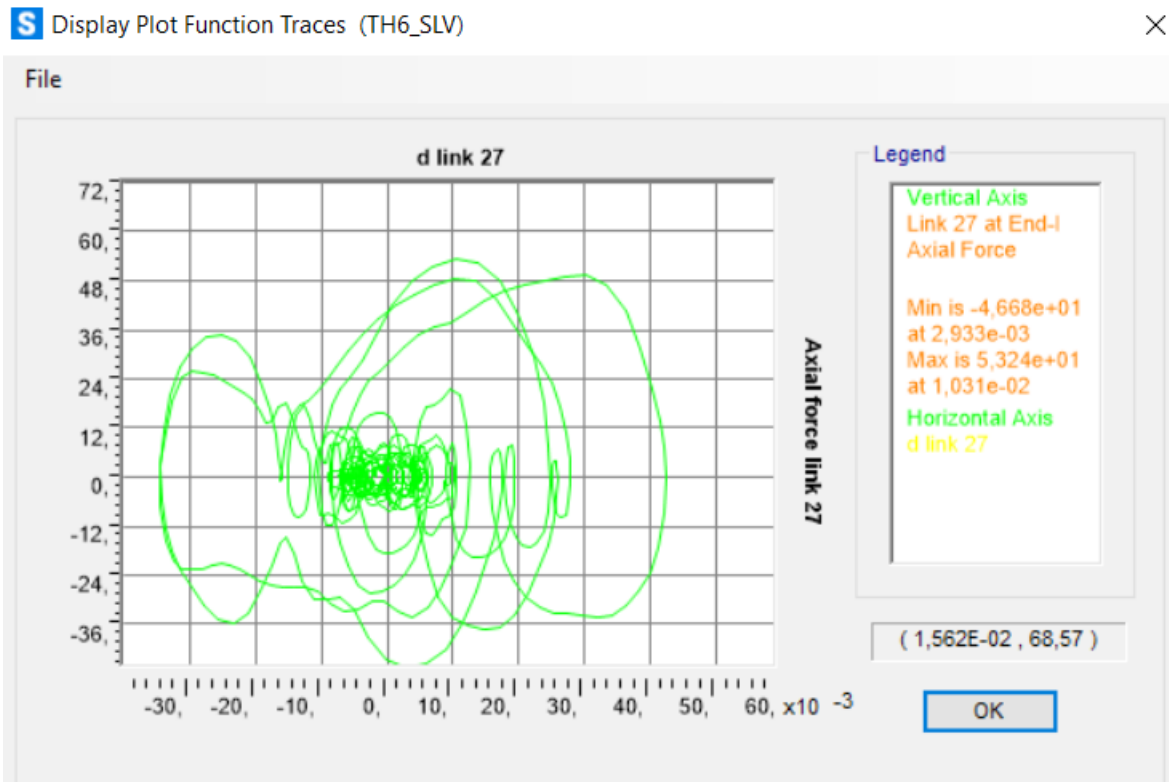


Figura 184. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

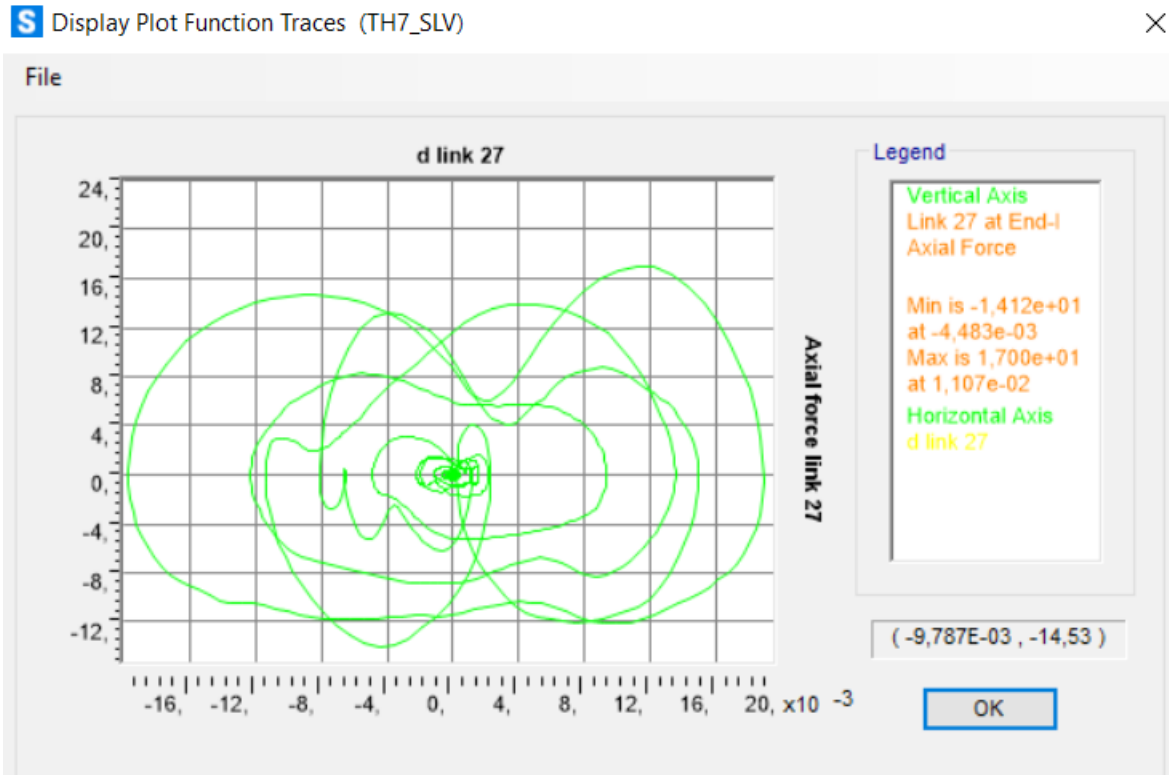


Figura 185. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

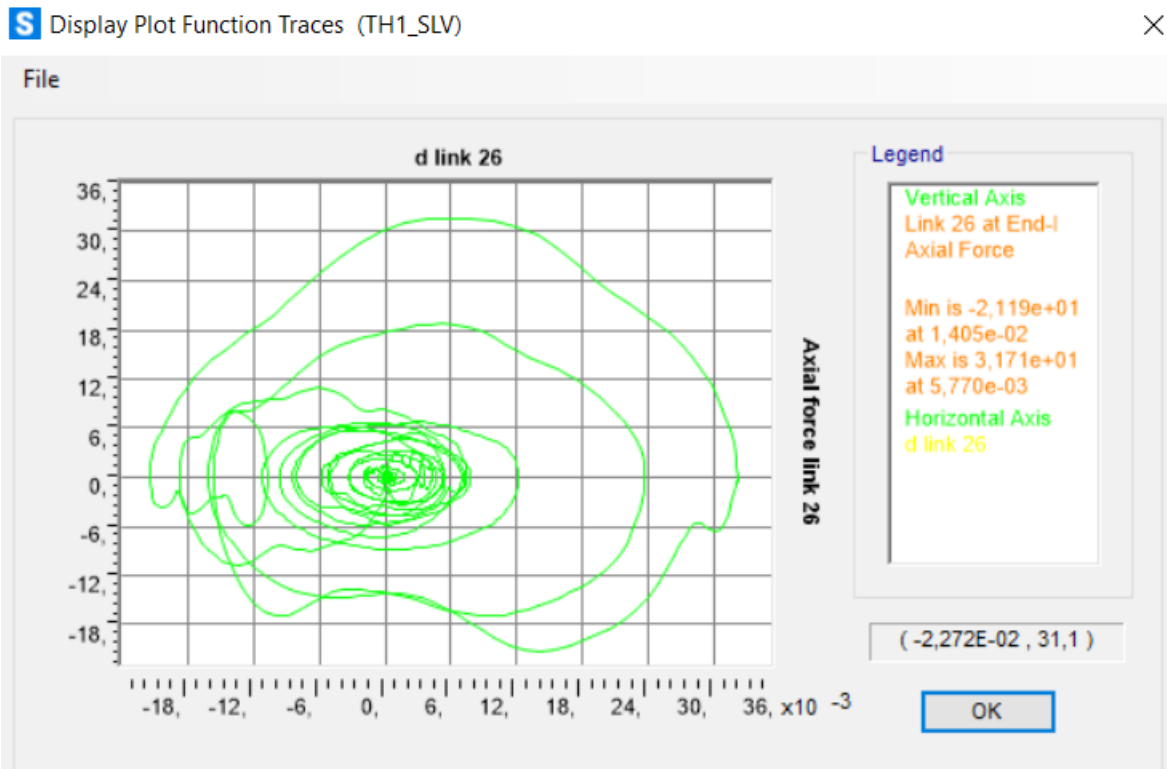


Figura 186. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

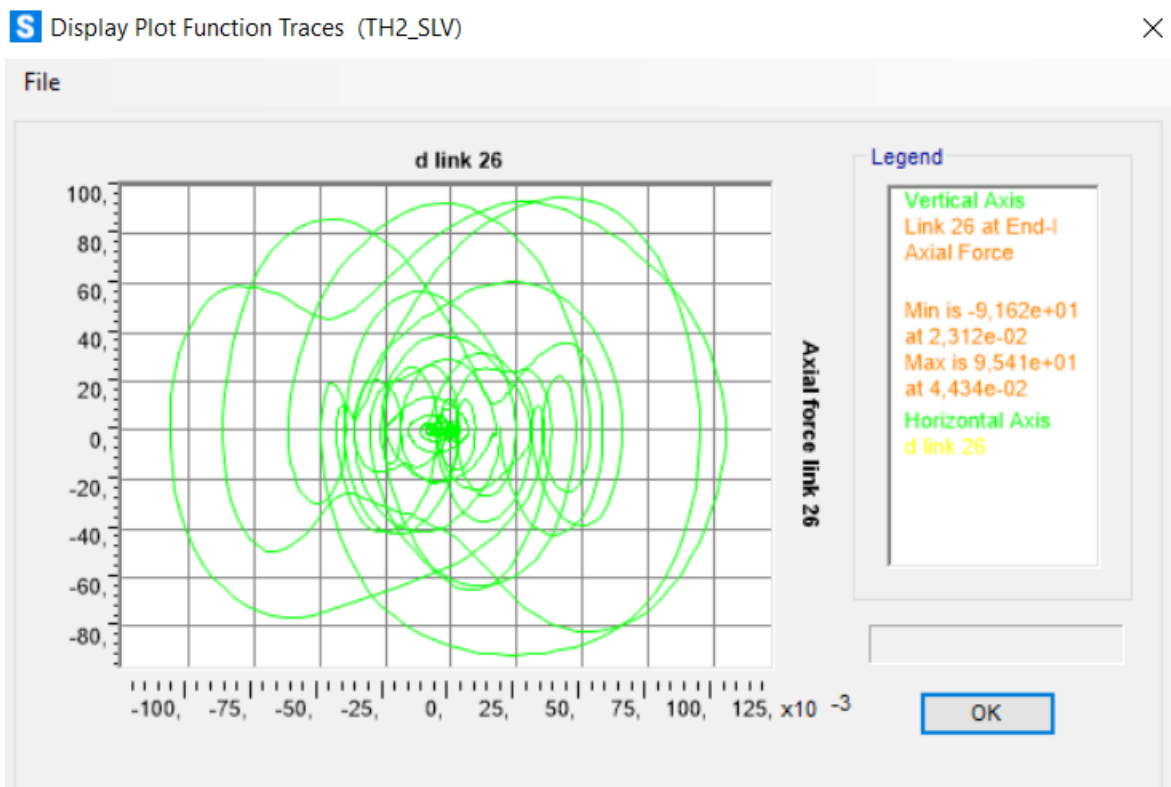


Figura 187. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

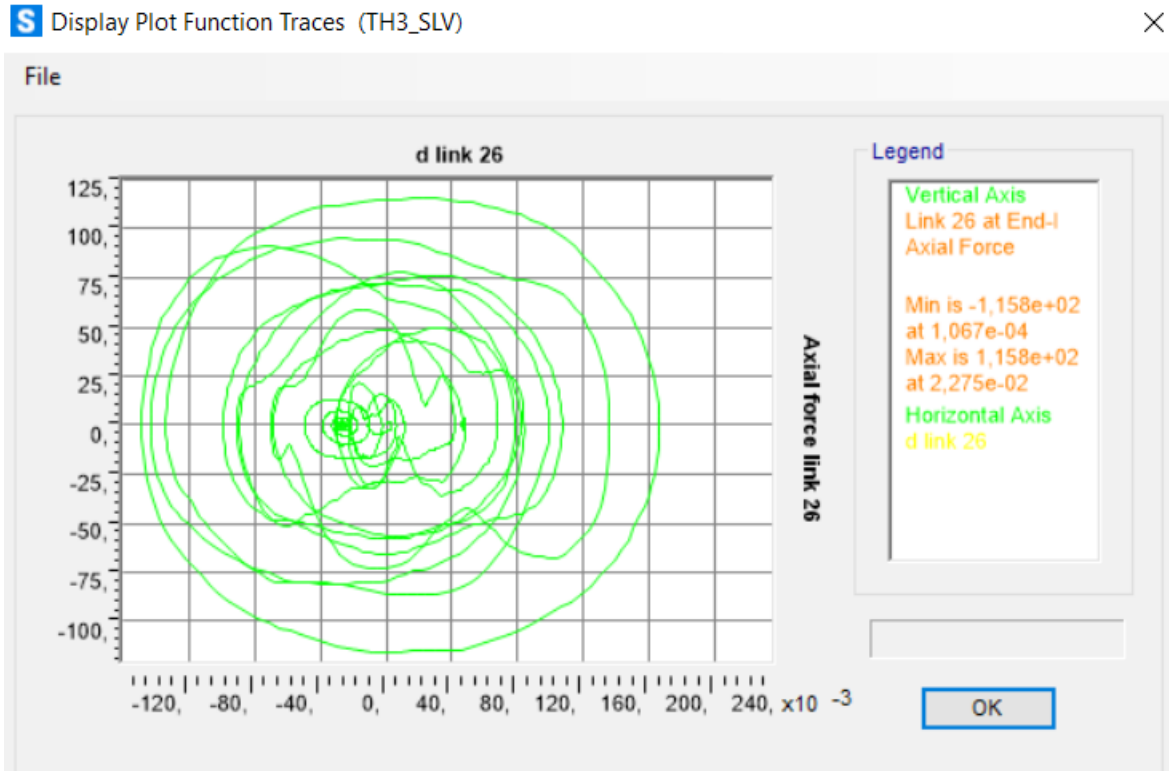


Figura 188. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

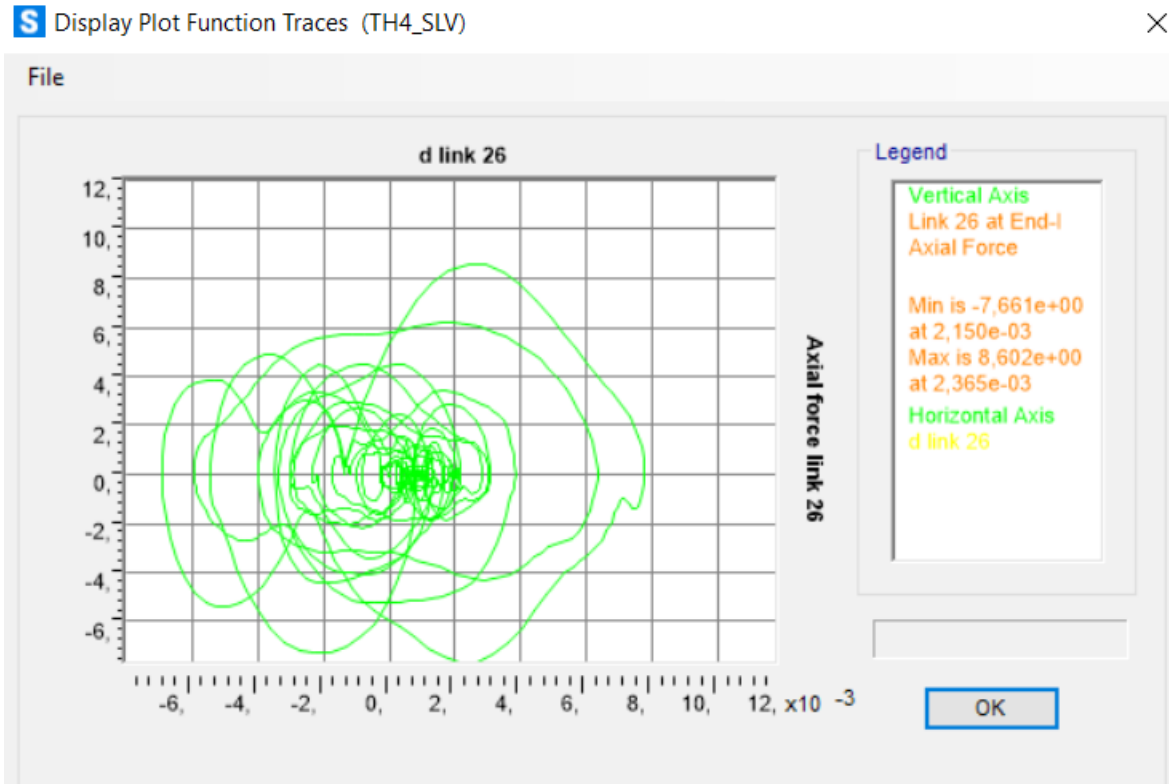


Figura 189. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

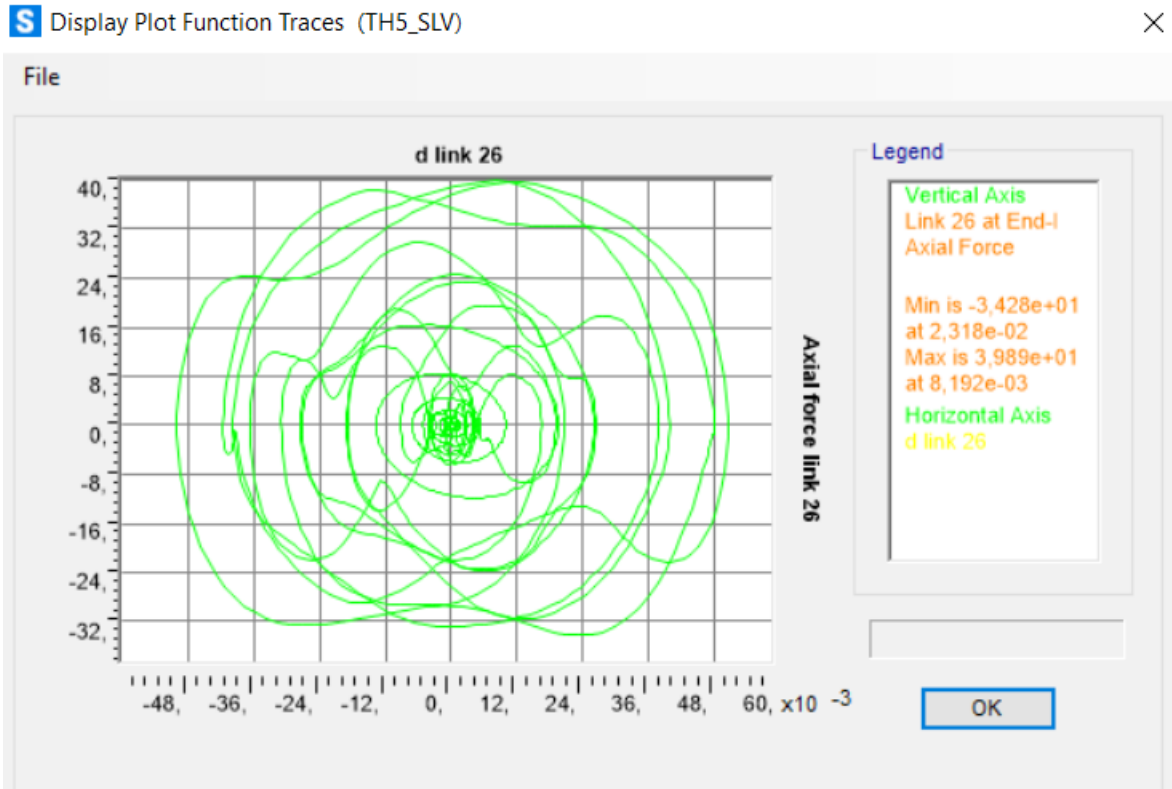


Figura 190. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

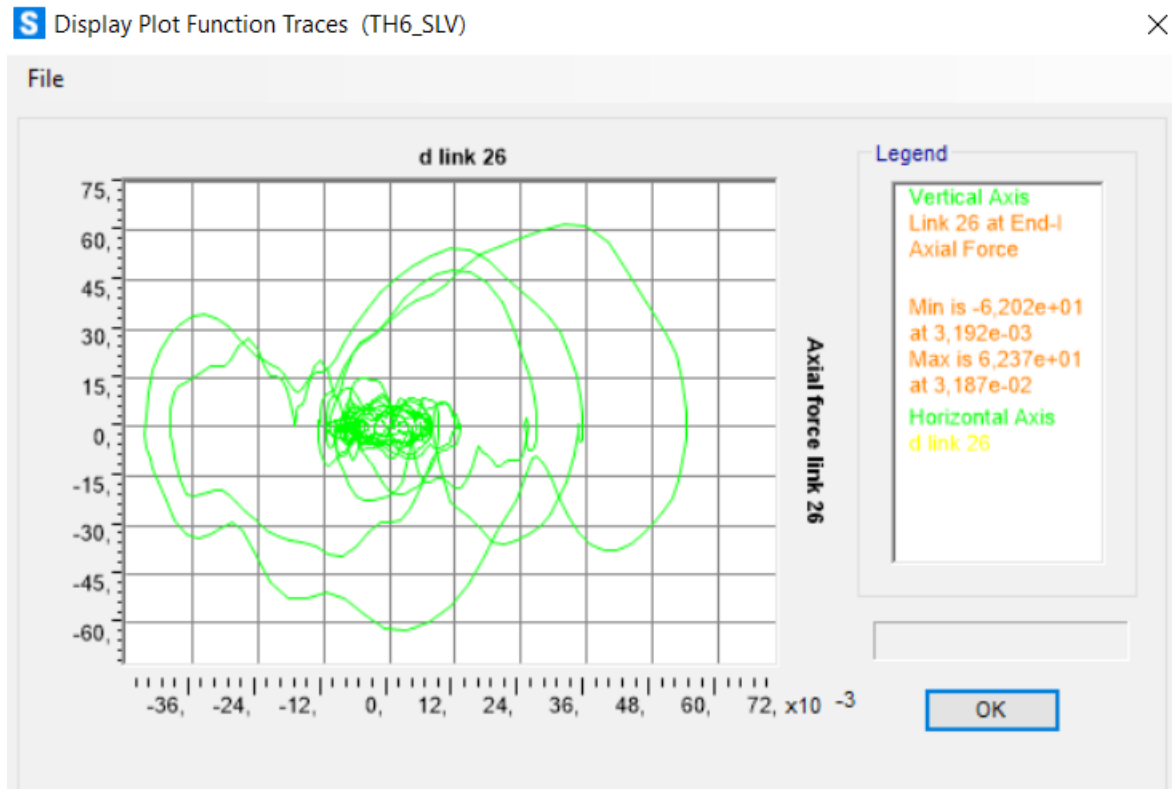


Figura 191. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

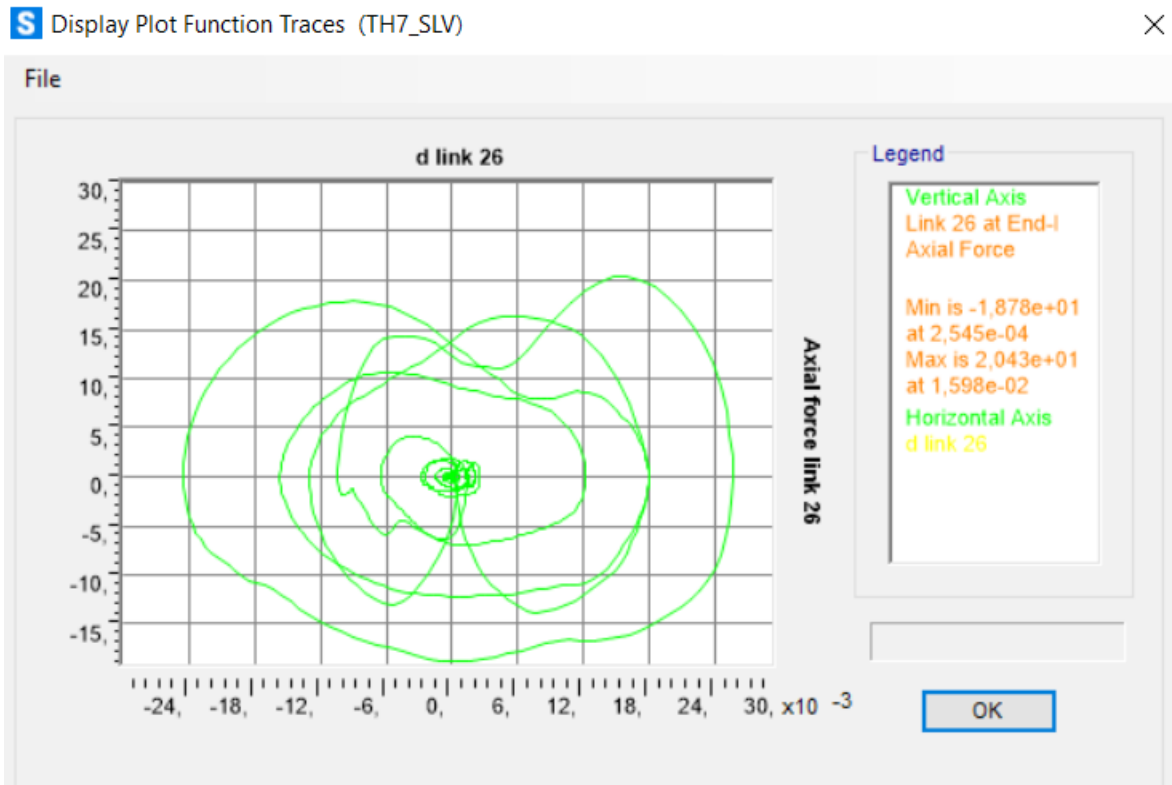


Figura 192. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

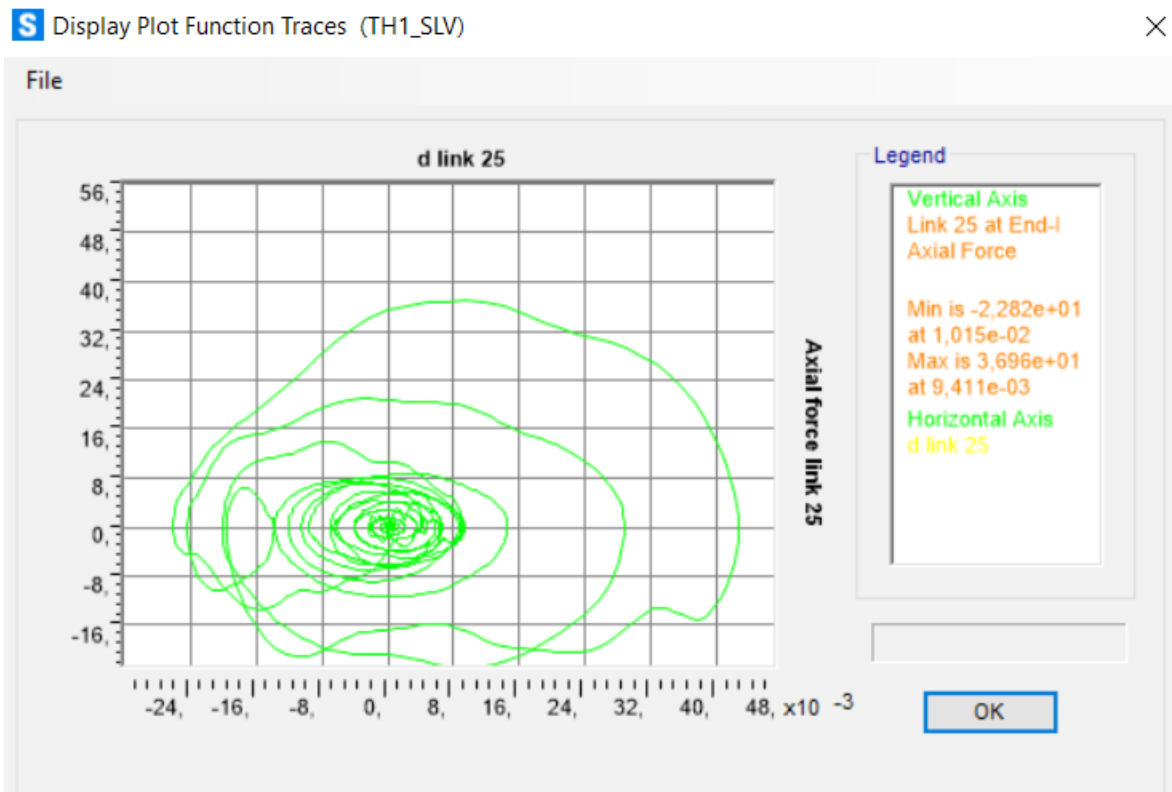


Figura 193. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

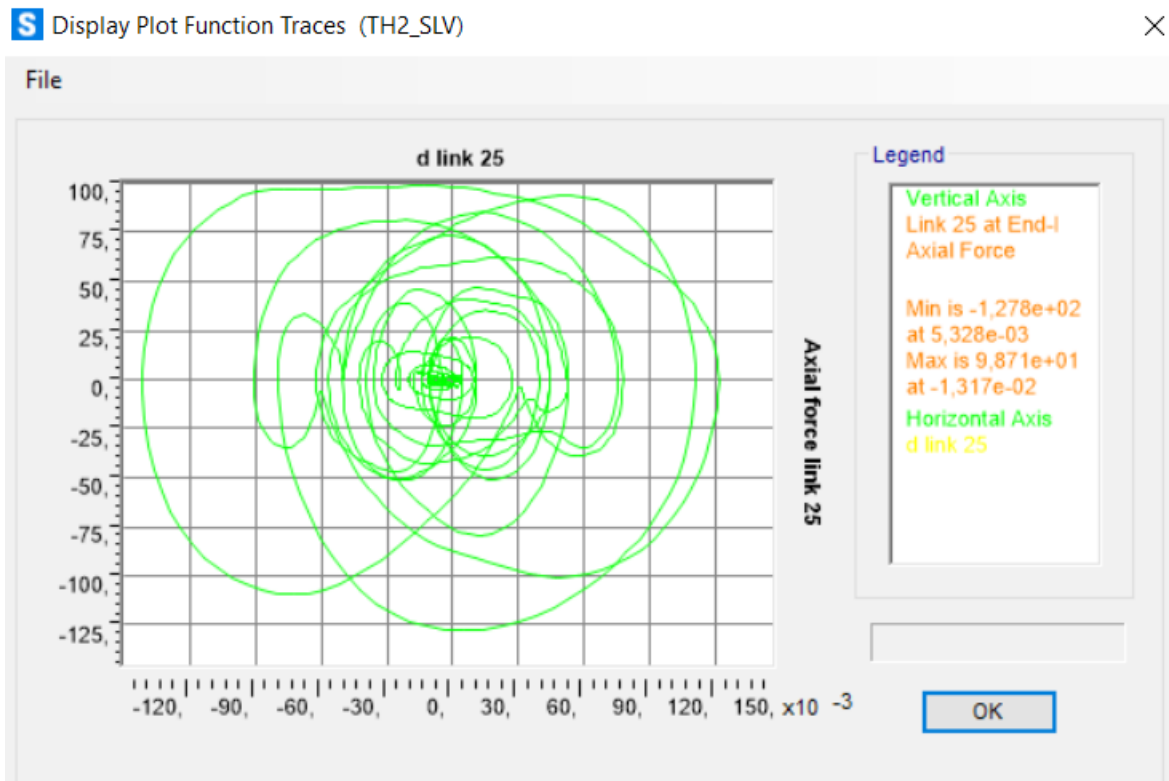


Figura 194. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

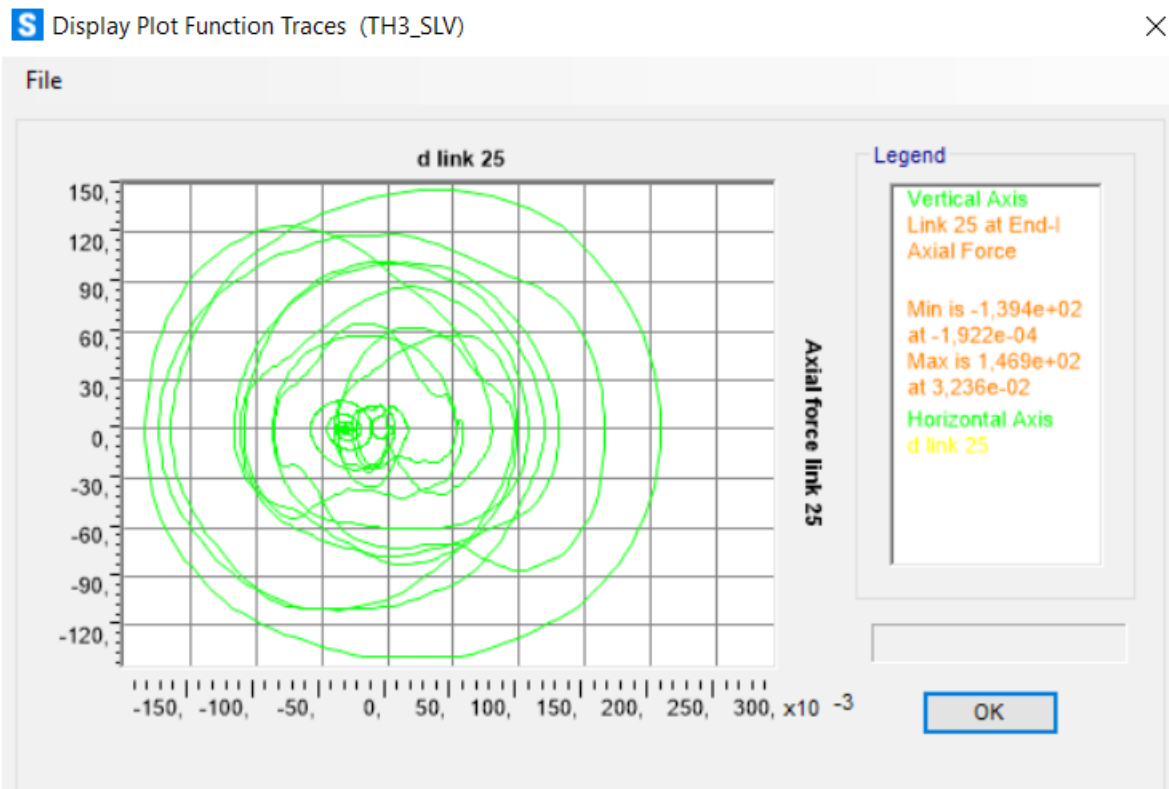


Figura 195. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

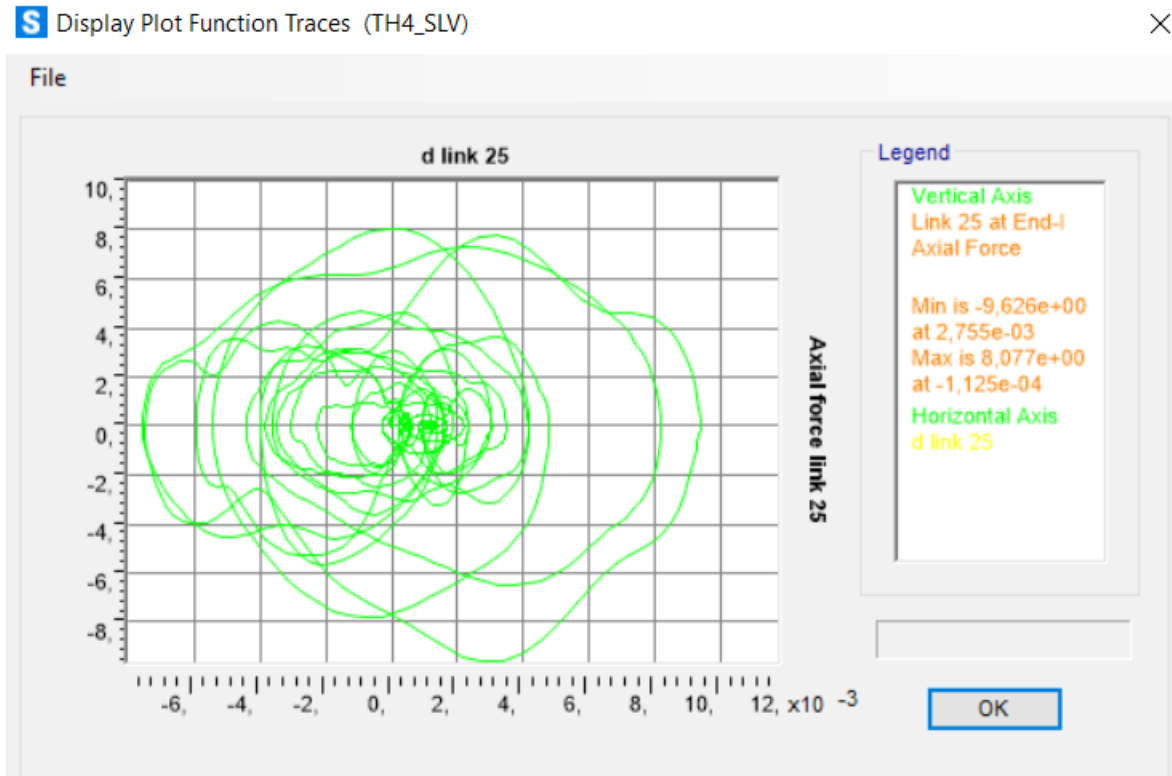


Figura 196. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

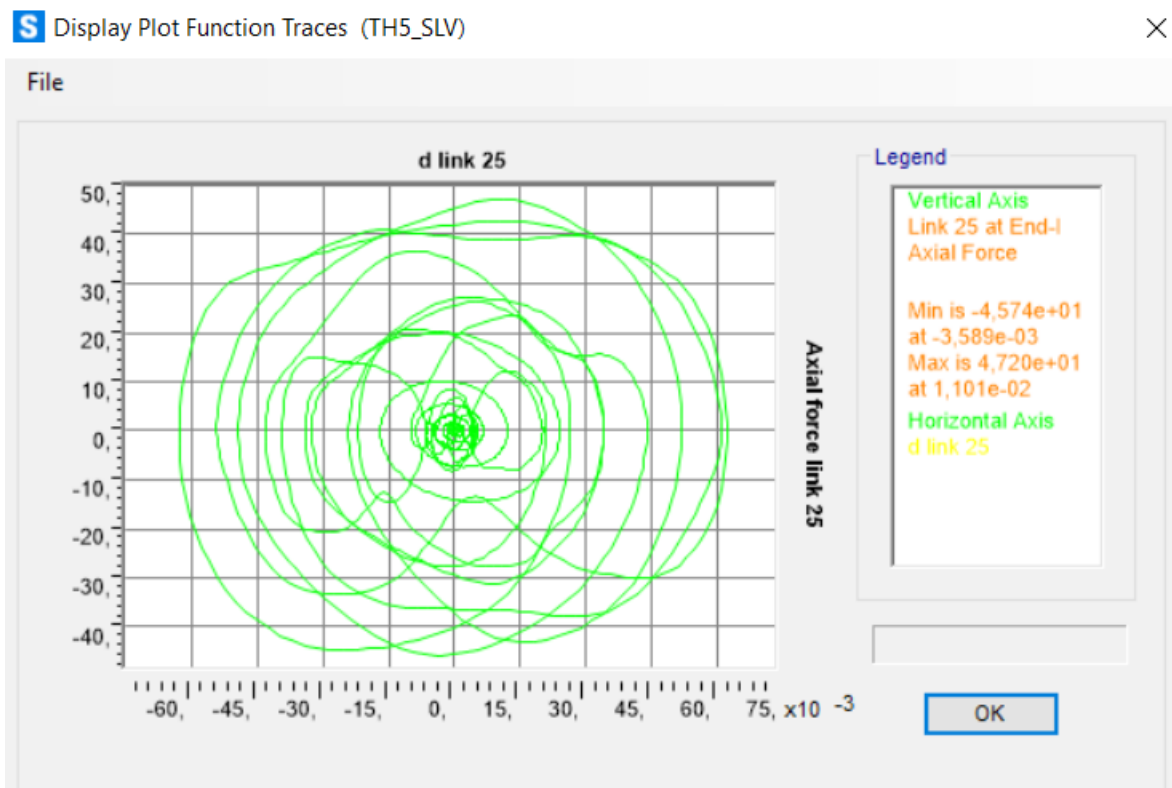


Figura 197. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

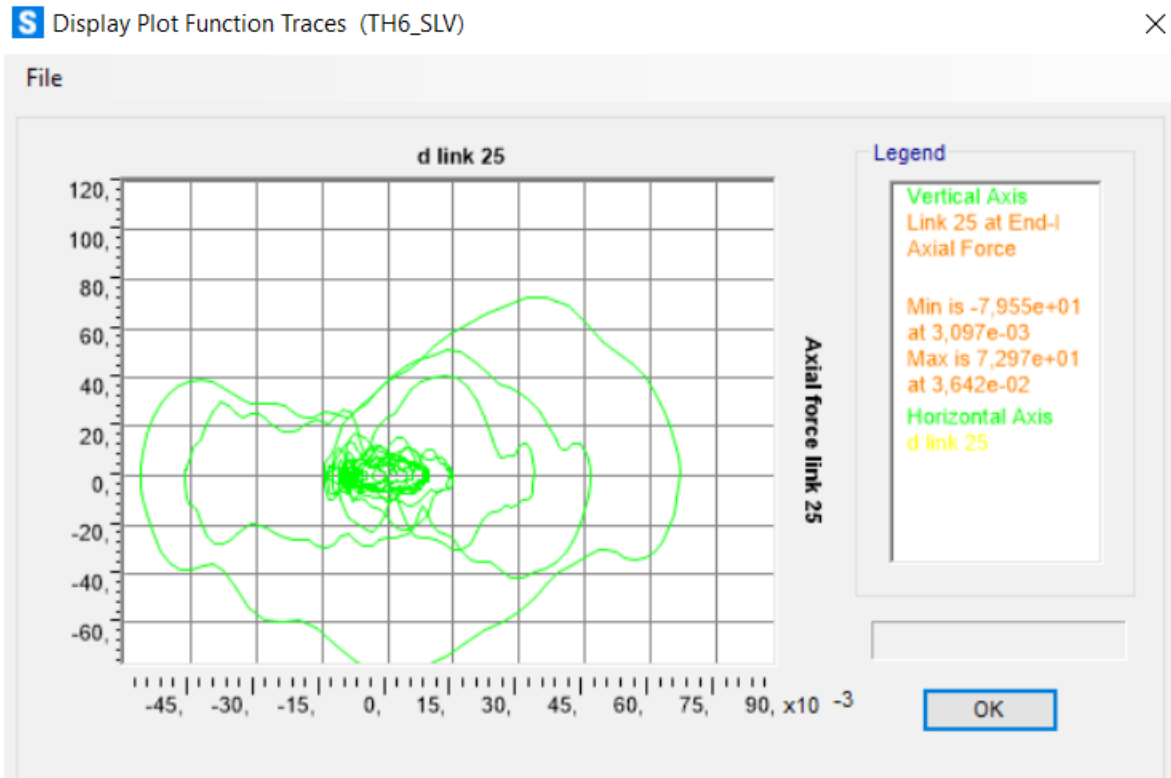


Figura 198. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

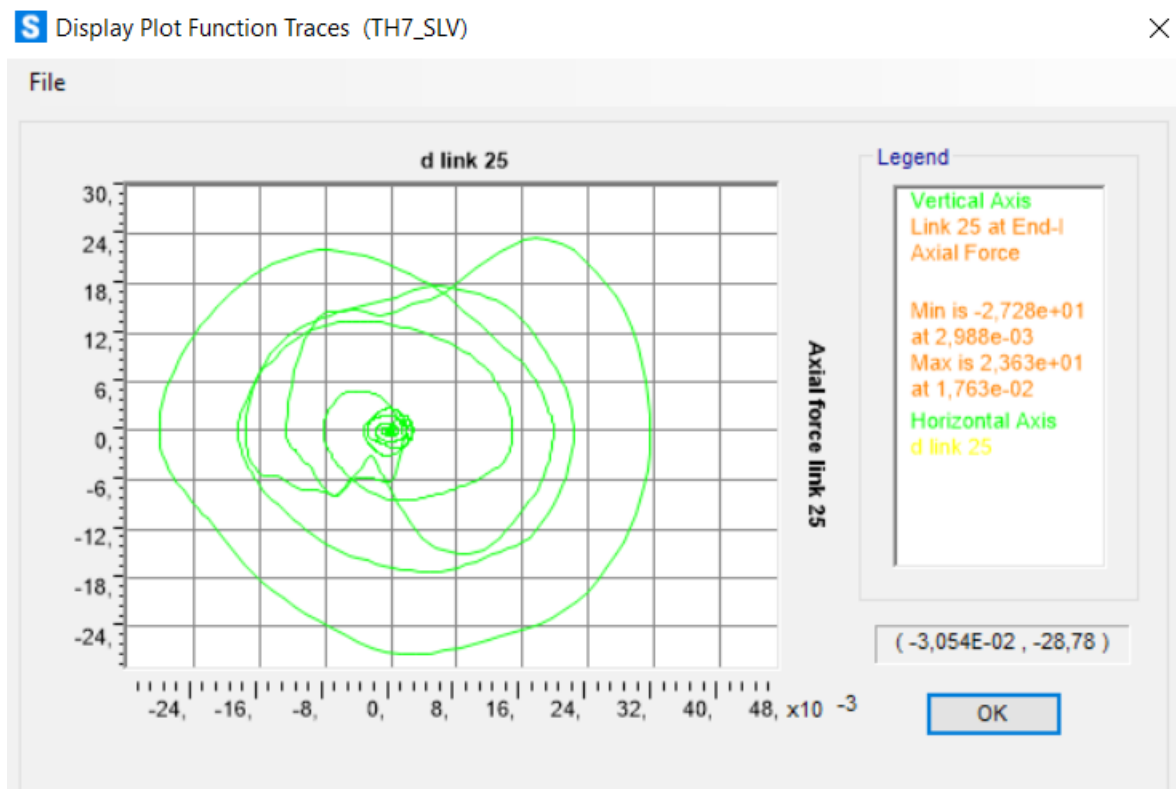


Figura 199. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori magnetoreologici non alimentati del telaio 11-12-13-14-15-16 in direzione x:

Telaio 11-12-13-14-15-16 (direzione x)			
N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	24	0,0492	0,0059
4	23	0,0643	0,0062
5	22	0,0820	0,0058

Telaio 11-12-13-14-15-16 (direzione x)		
N° piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	24	48,35
4	23	54,67
5	22	68,69

Piano 3:

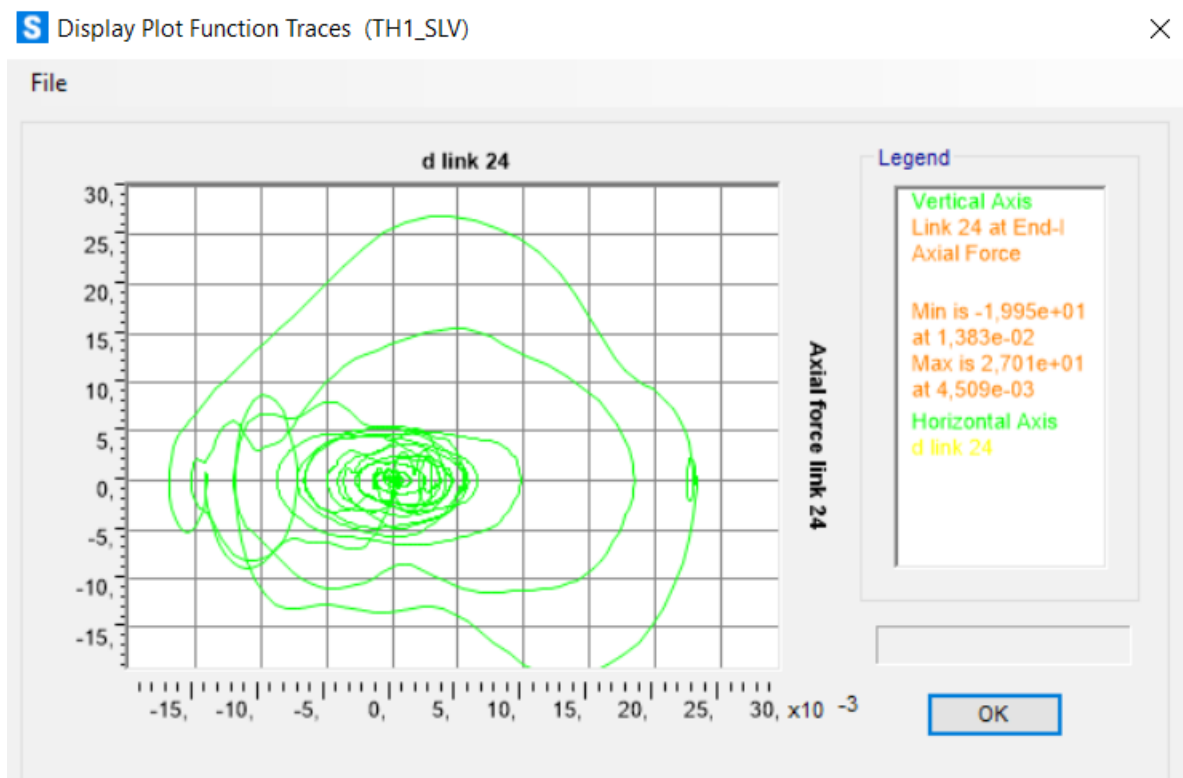


Figura 200. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

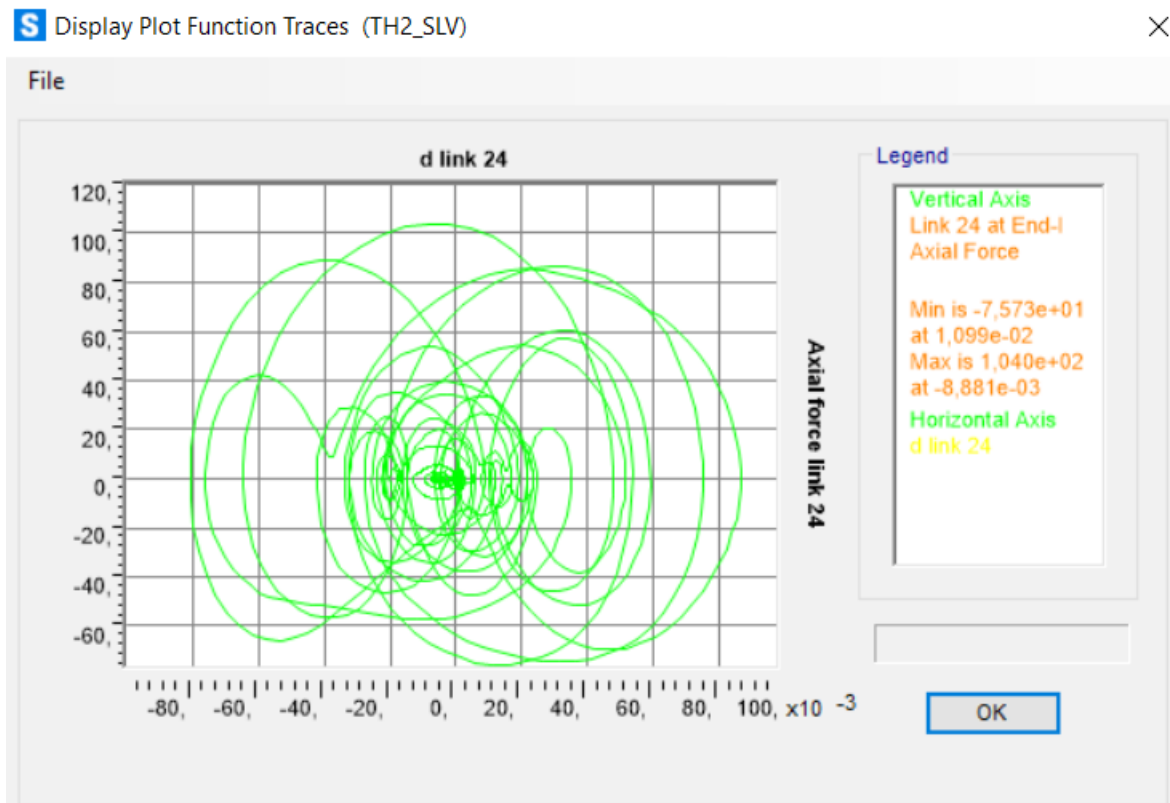


Figura 201. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

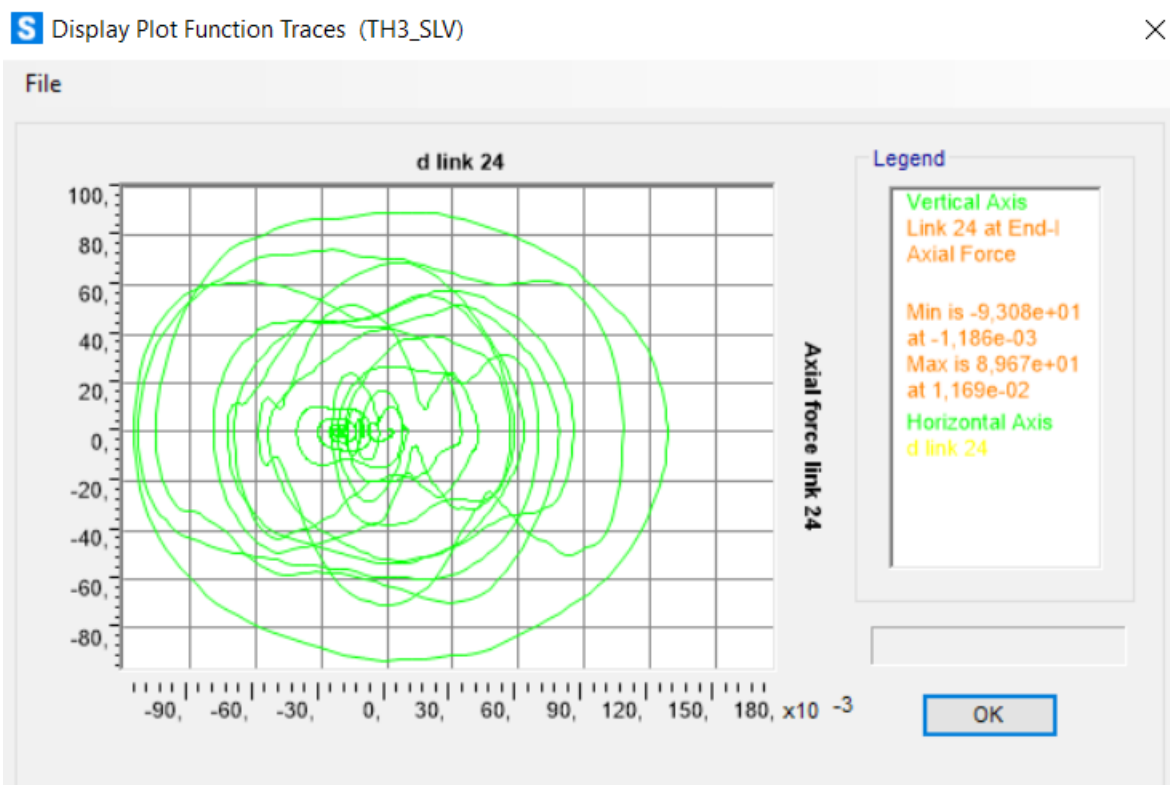


Figura 202. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

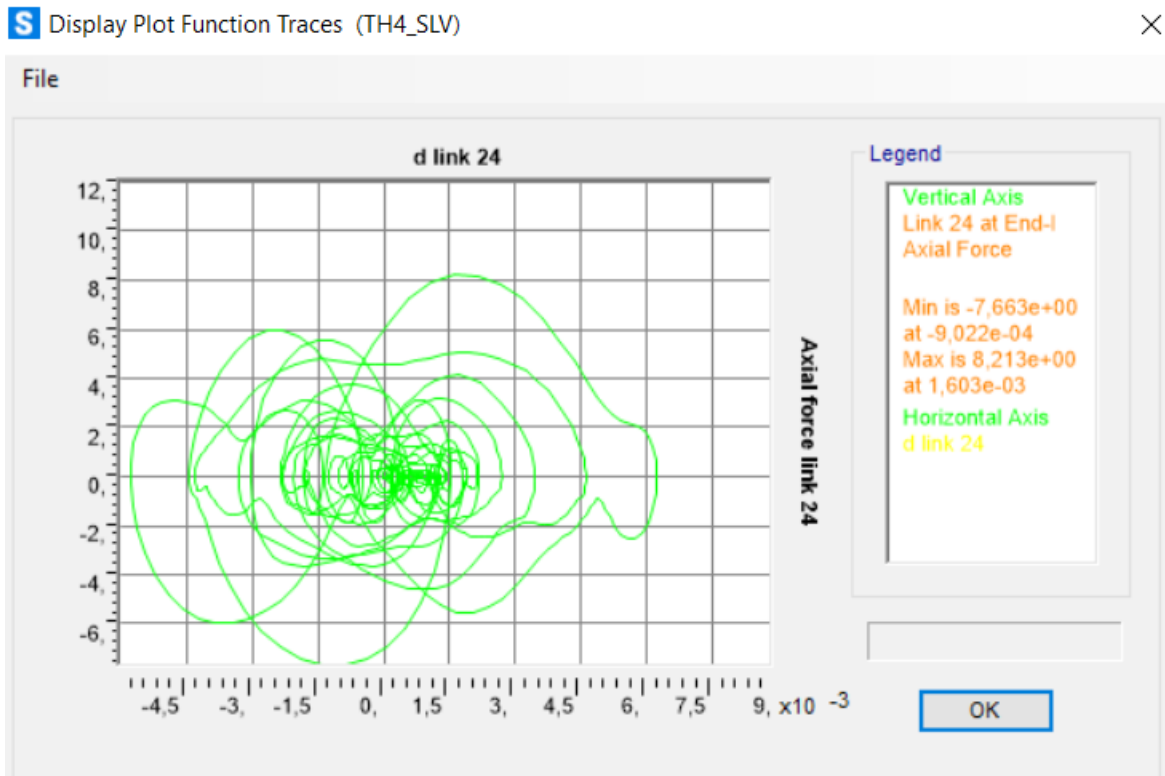


Figura 203. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

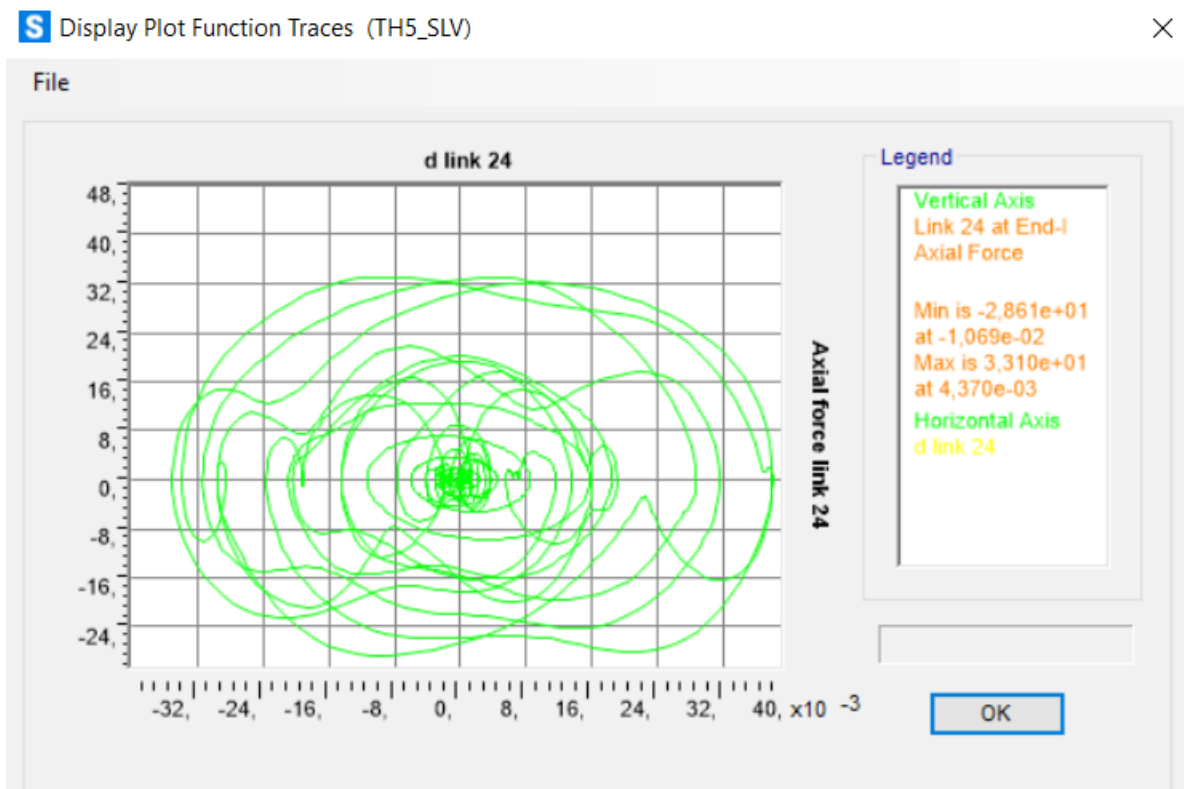


Figura 204. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

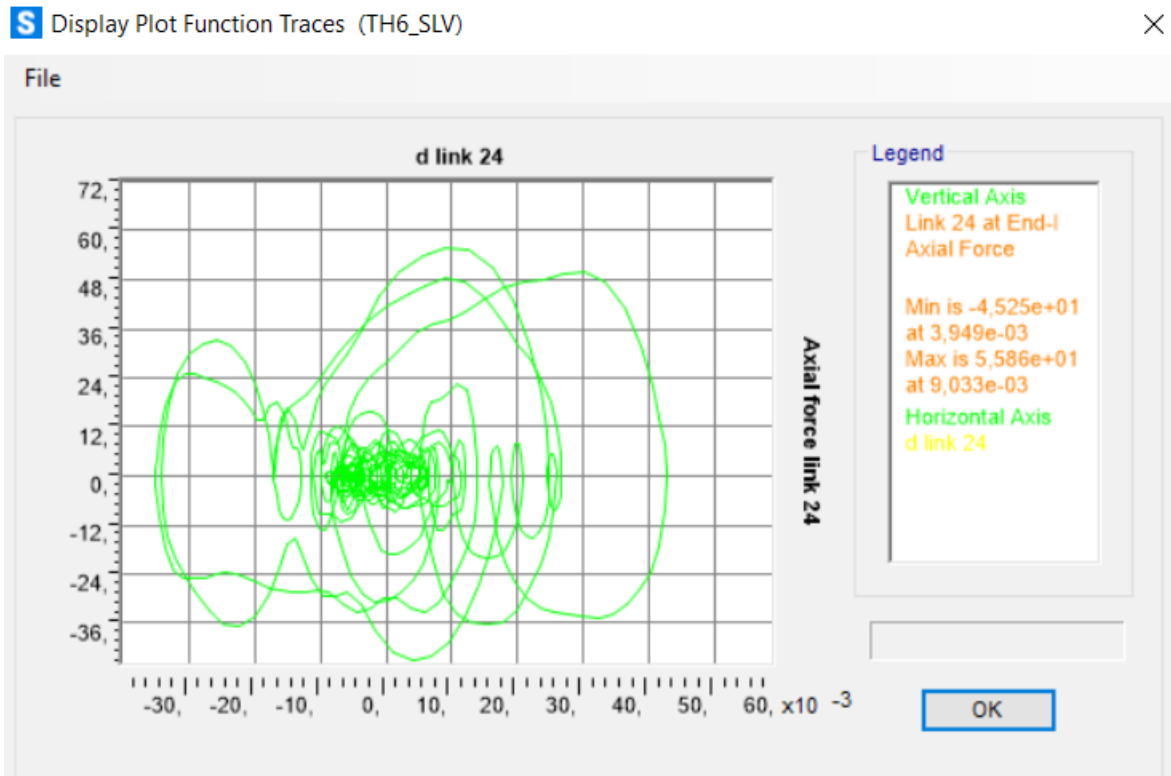


Figura 205. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

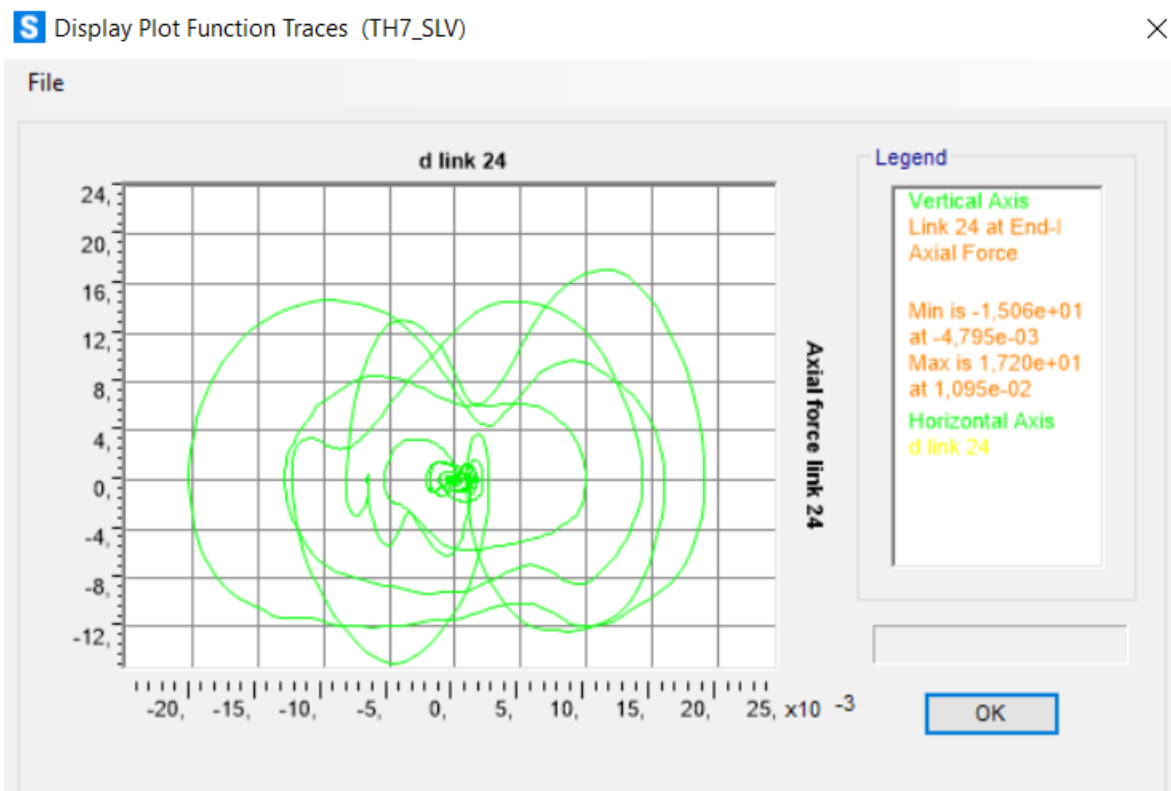


Figura 206. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

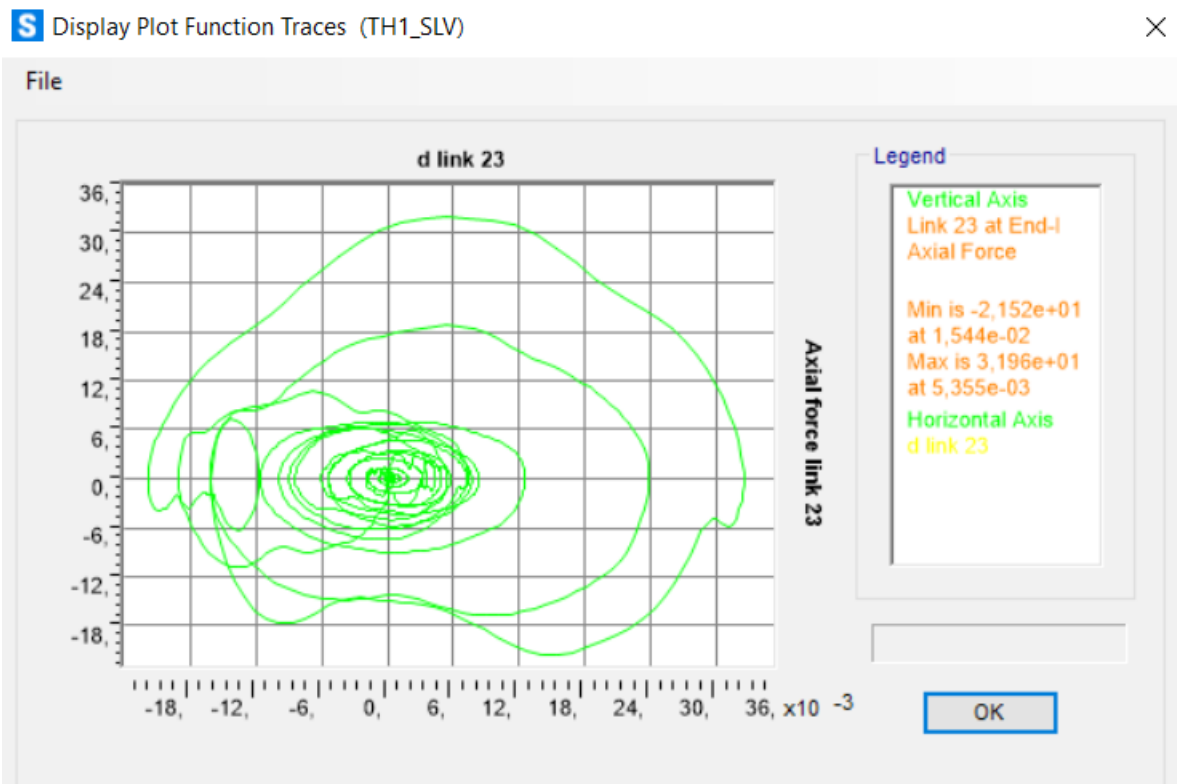


Figura 207. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

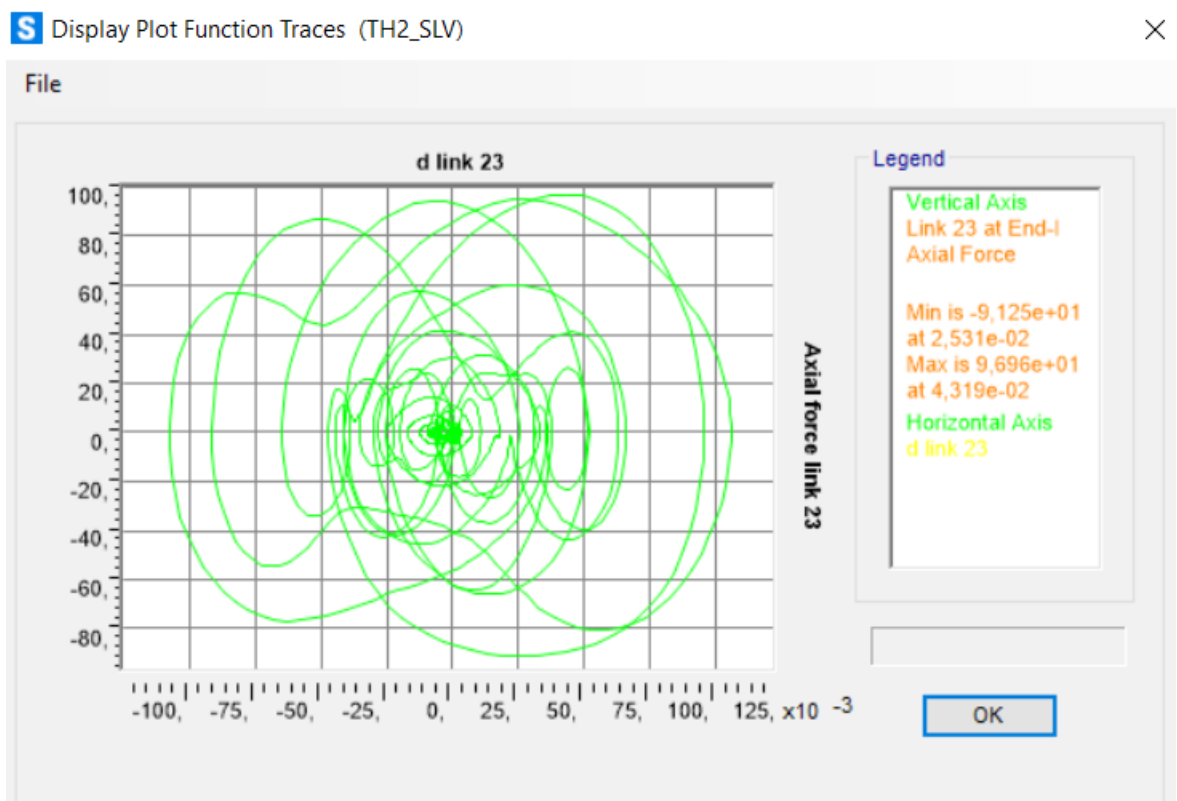


Figura 208. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

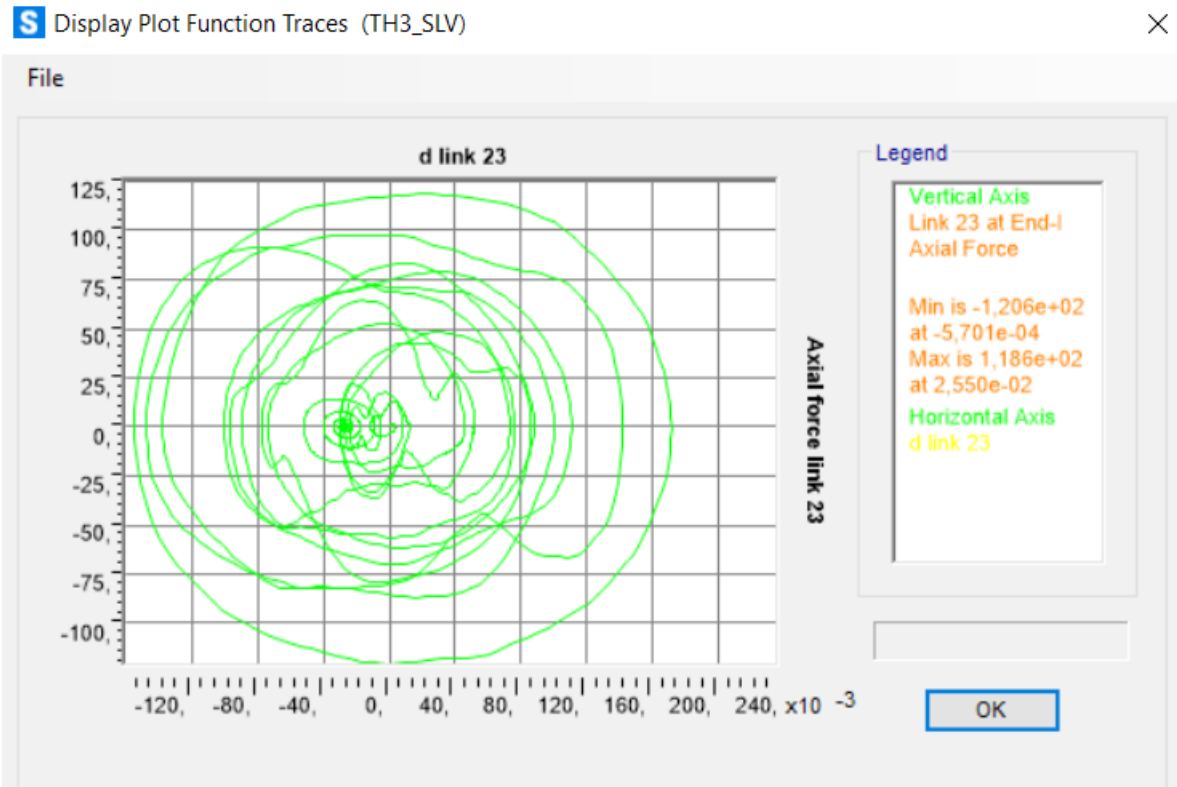


Figura 209. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

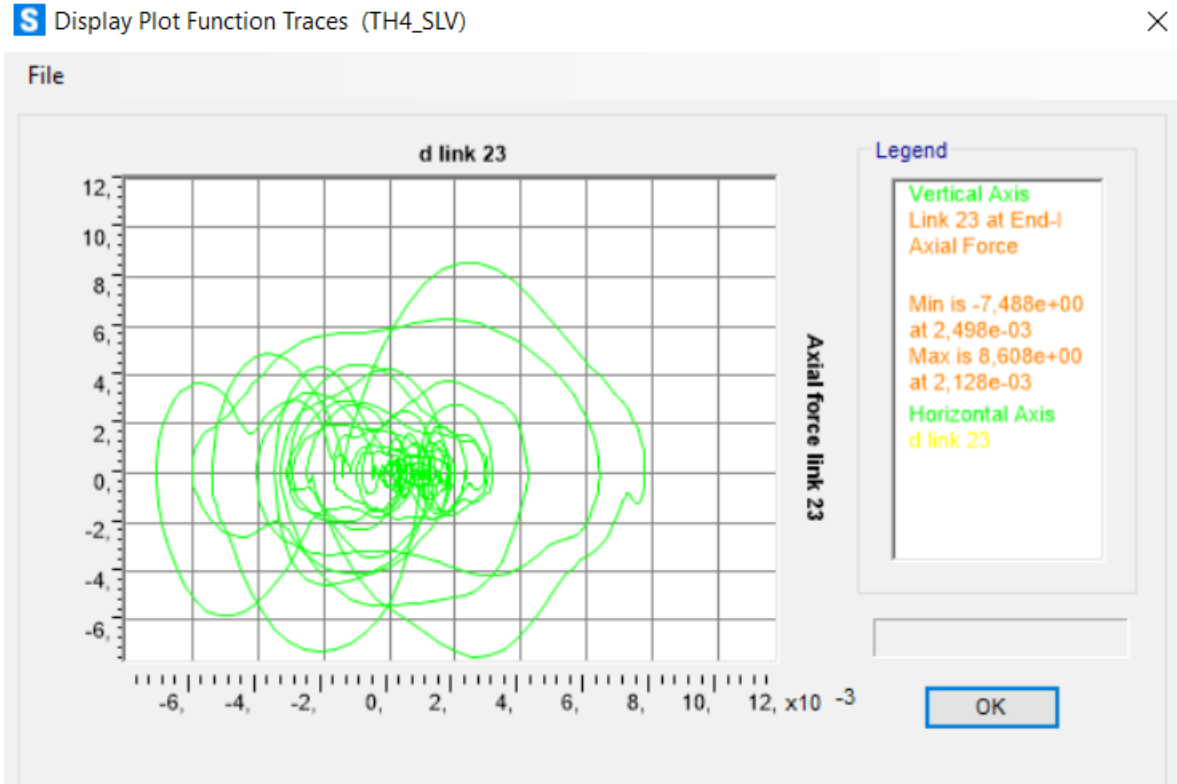


Figura 210. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

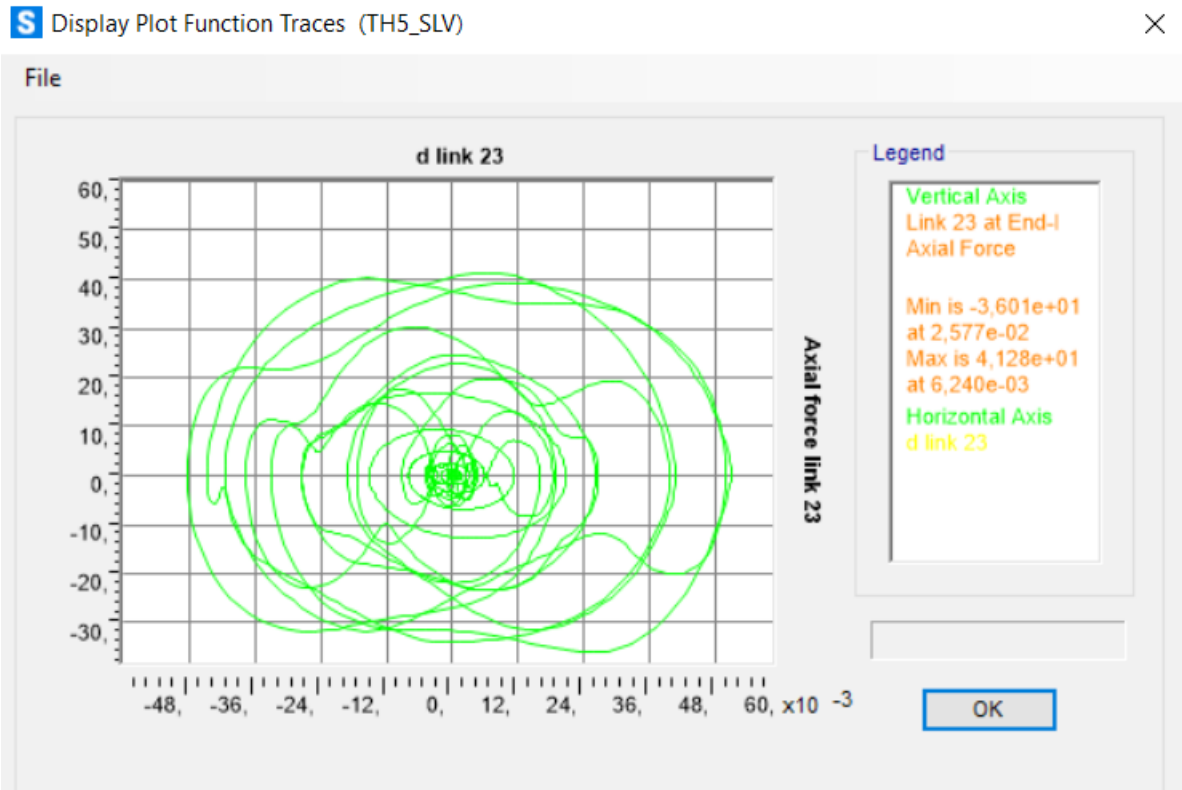


Figura 211. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

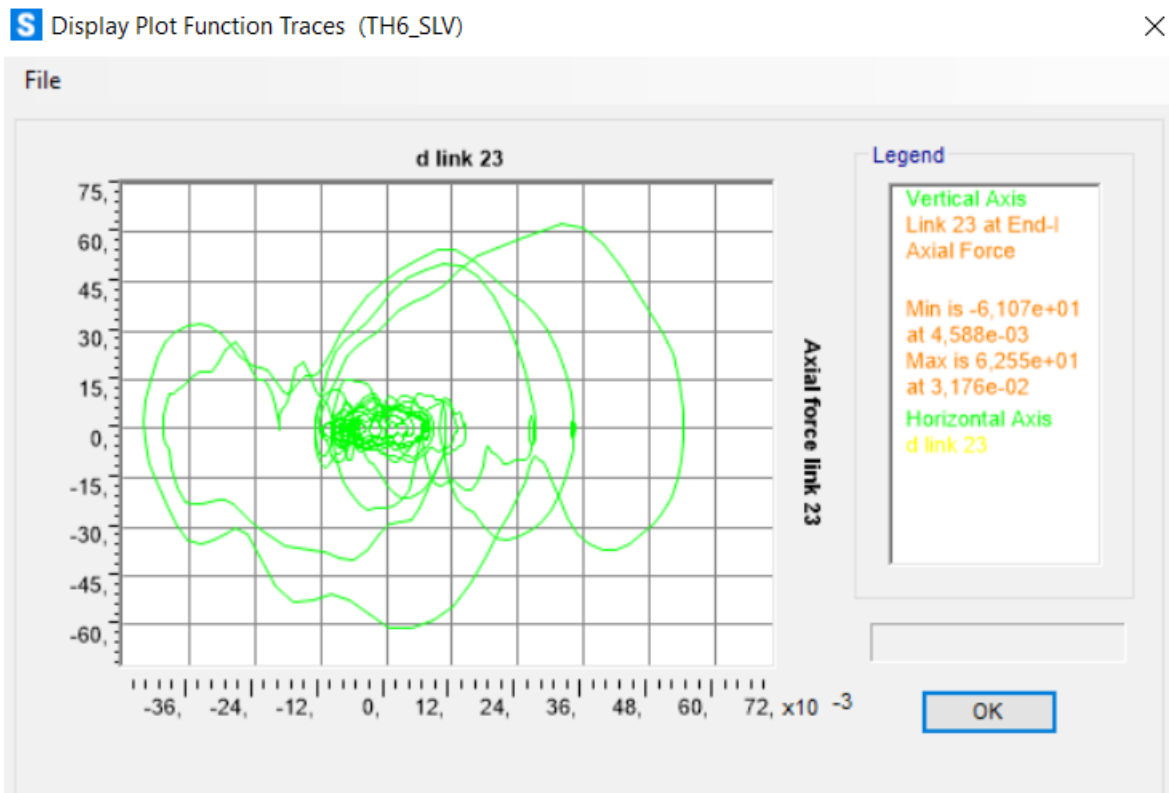


Figura 212. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

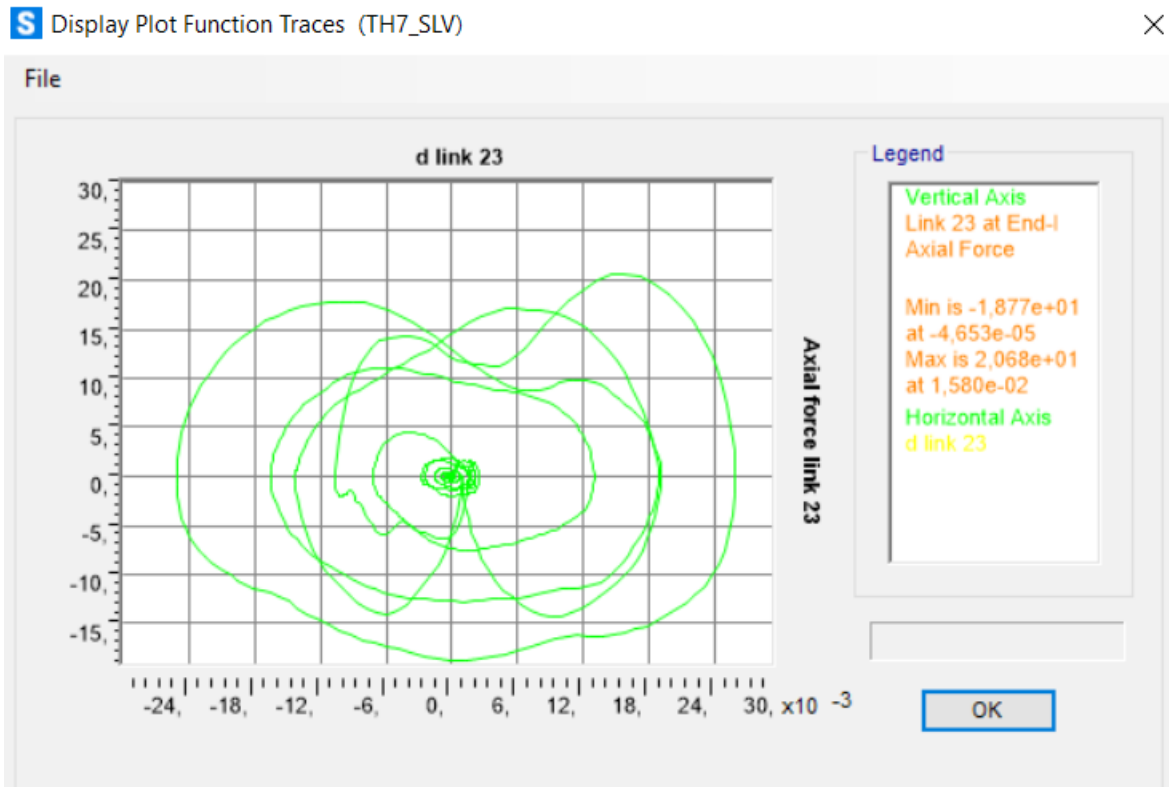


Figura 213. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

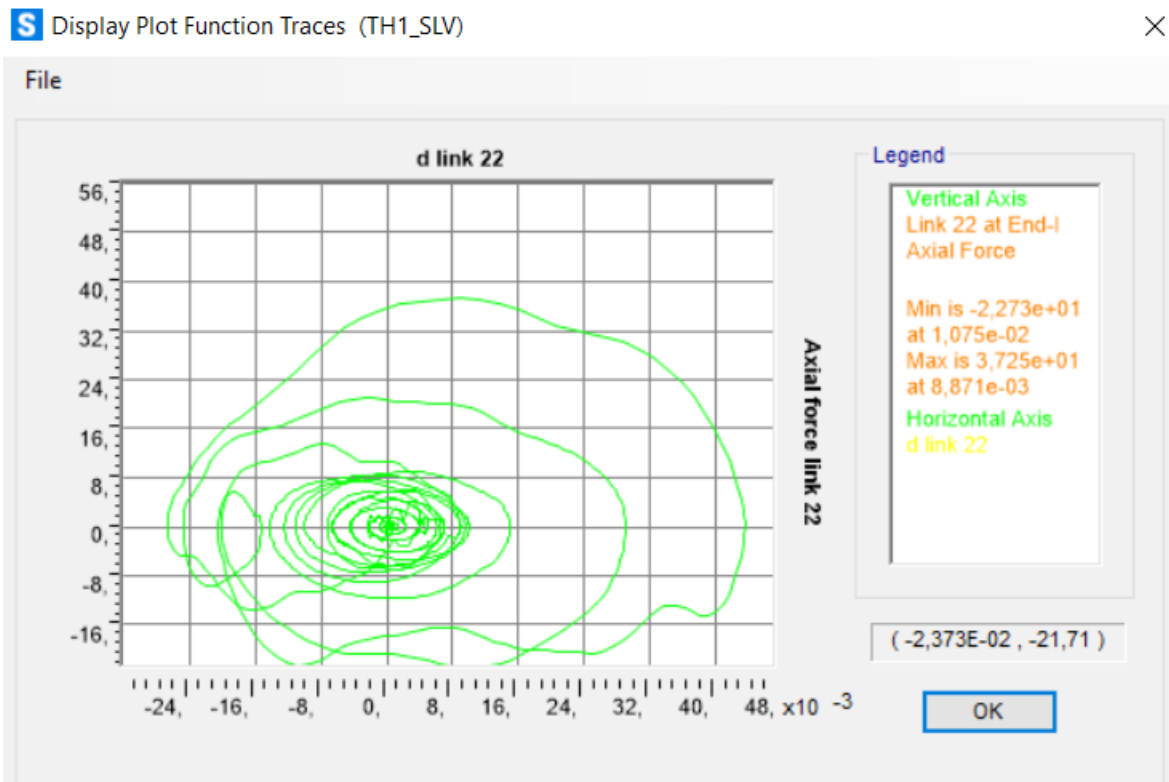


Figura 214. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

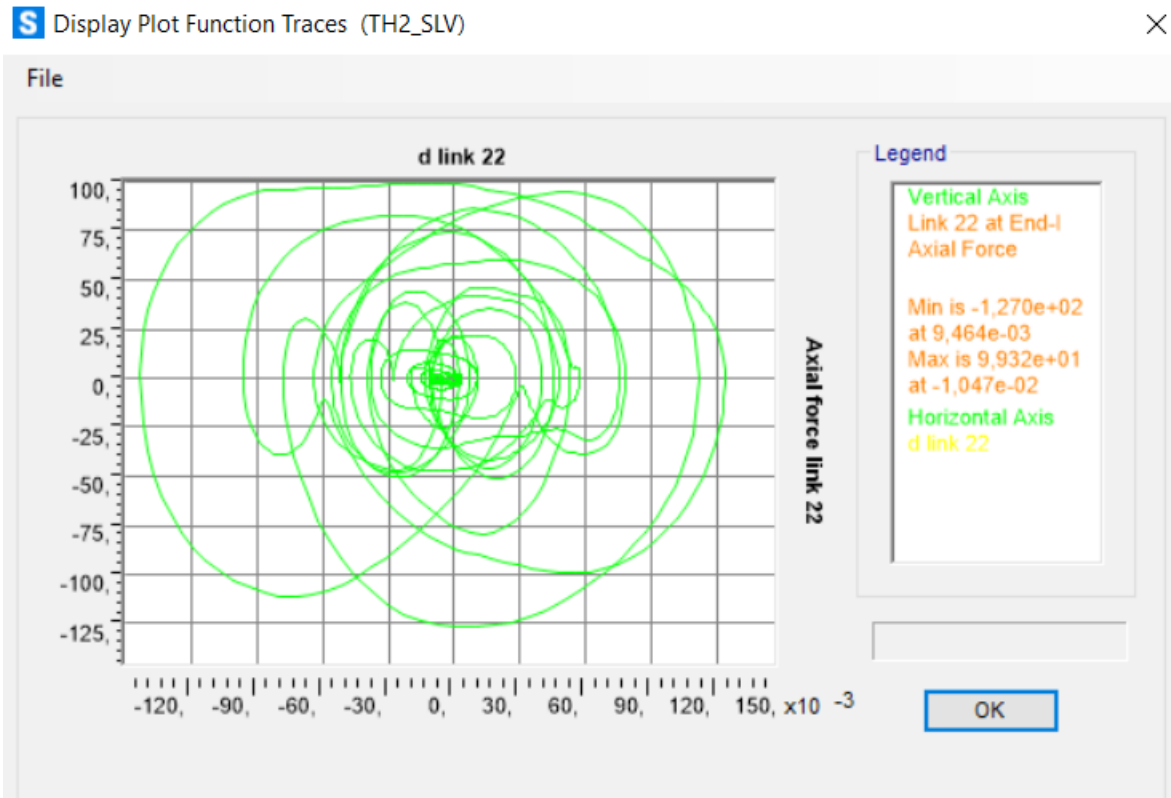


Figura 215. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

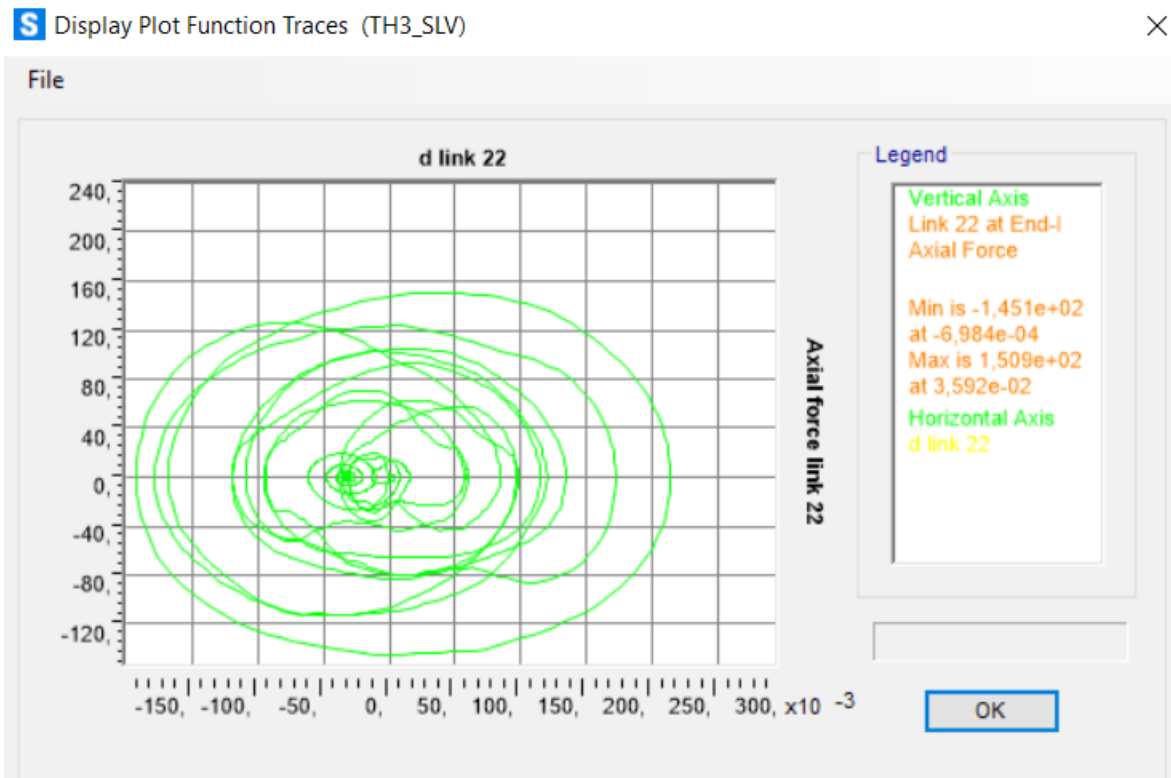


Figura 216. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

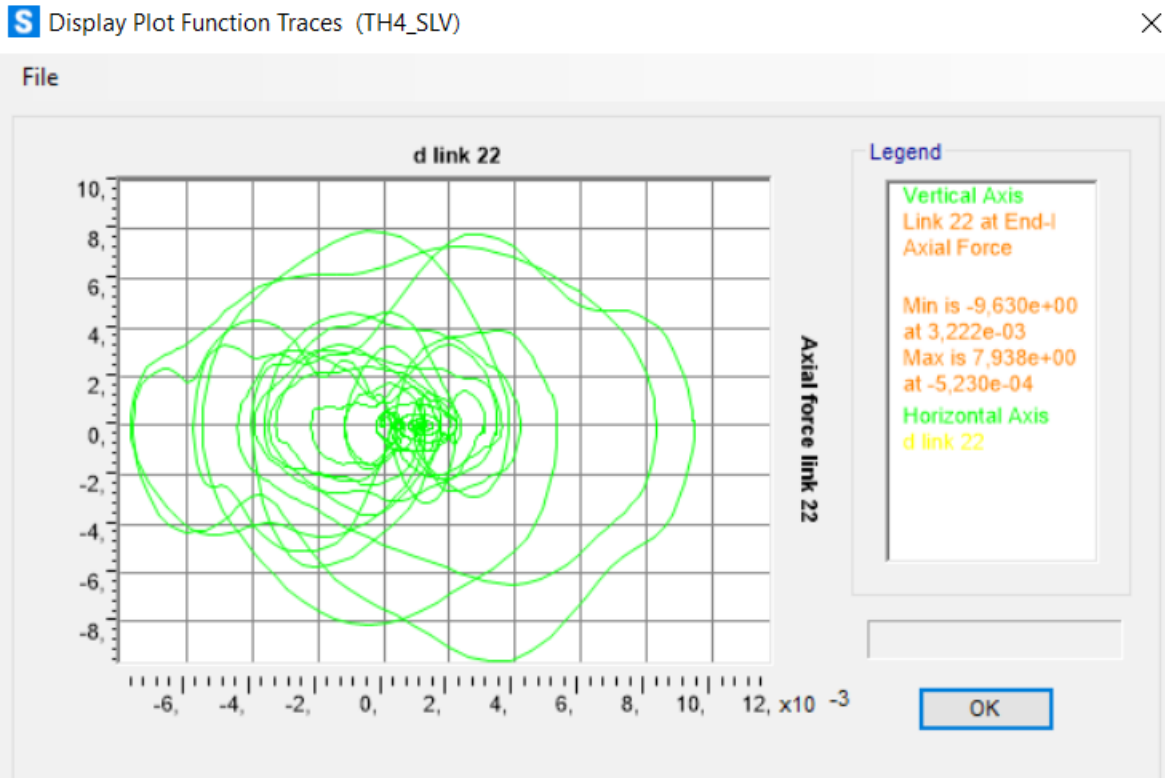


Figura 217. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

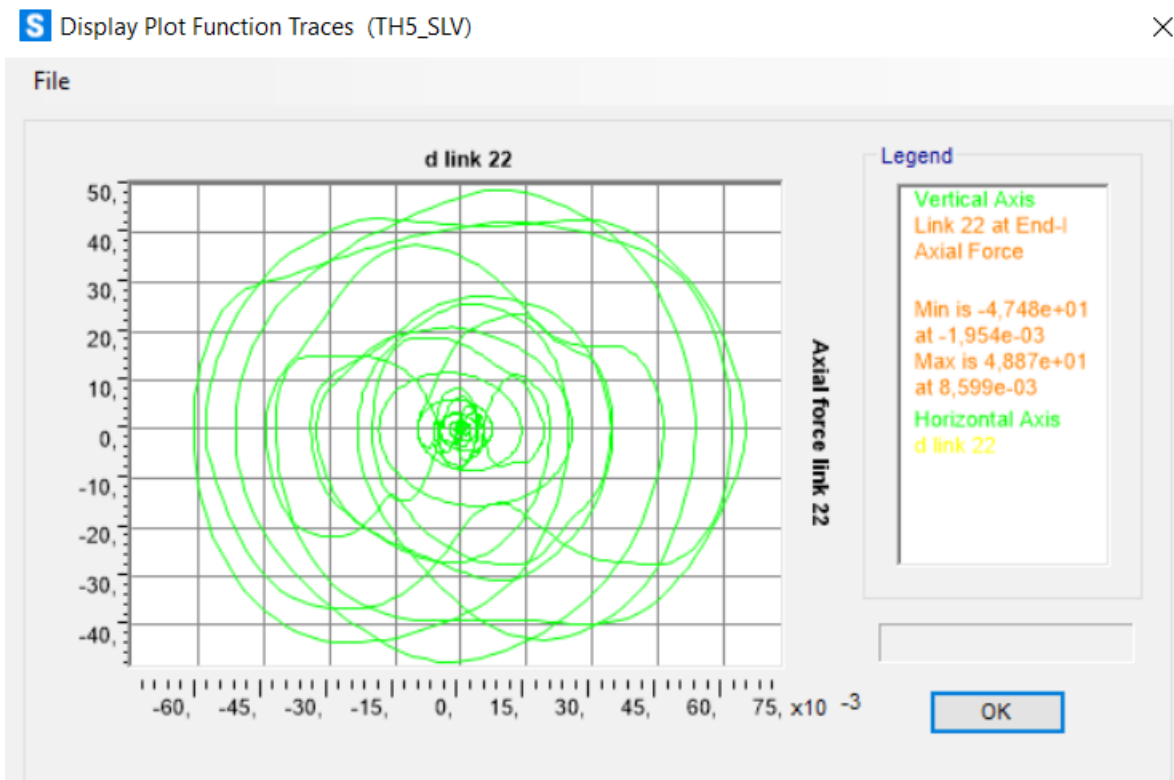


Figura 218. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

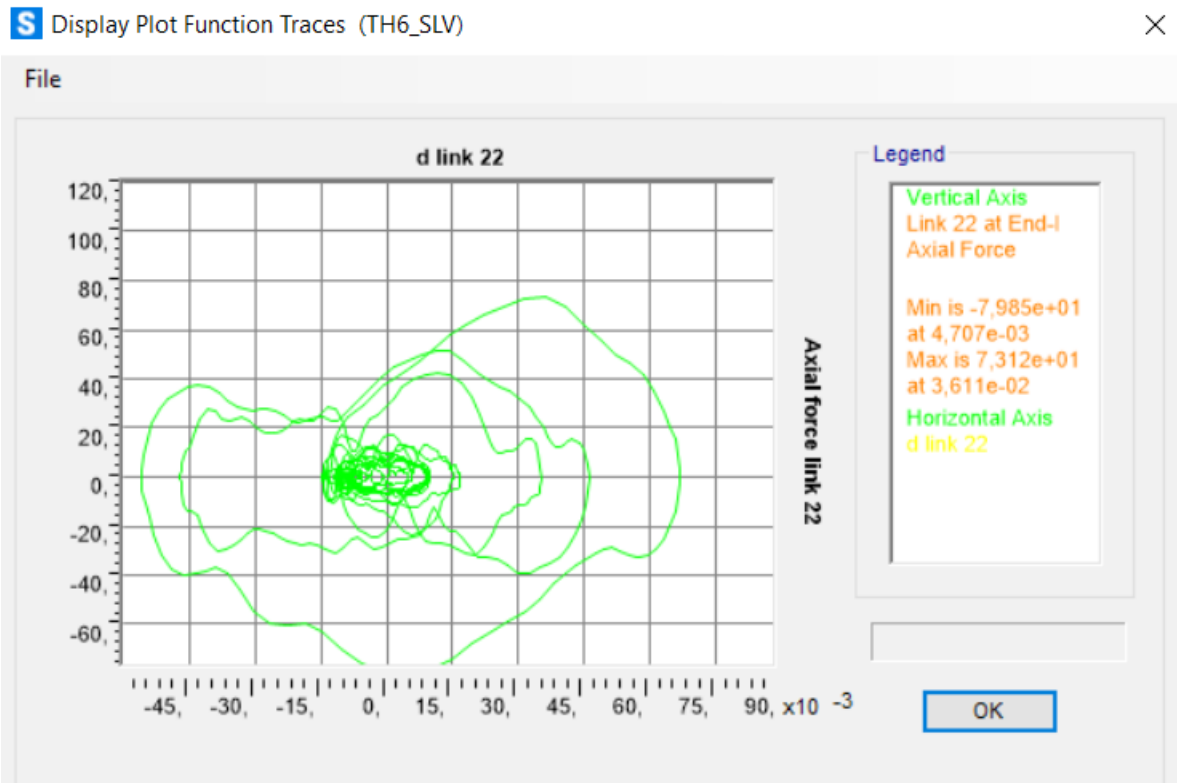


Figura 219. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

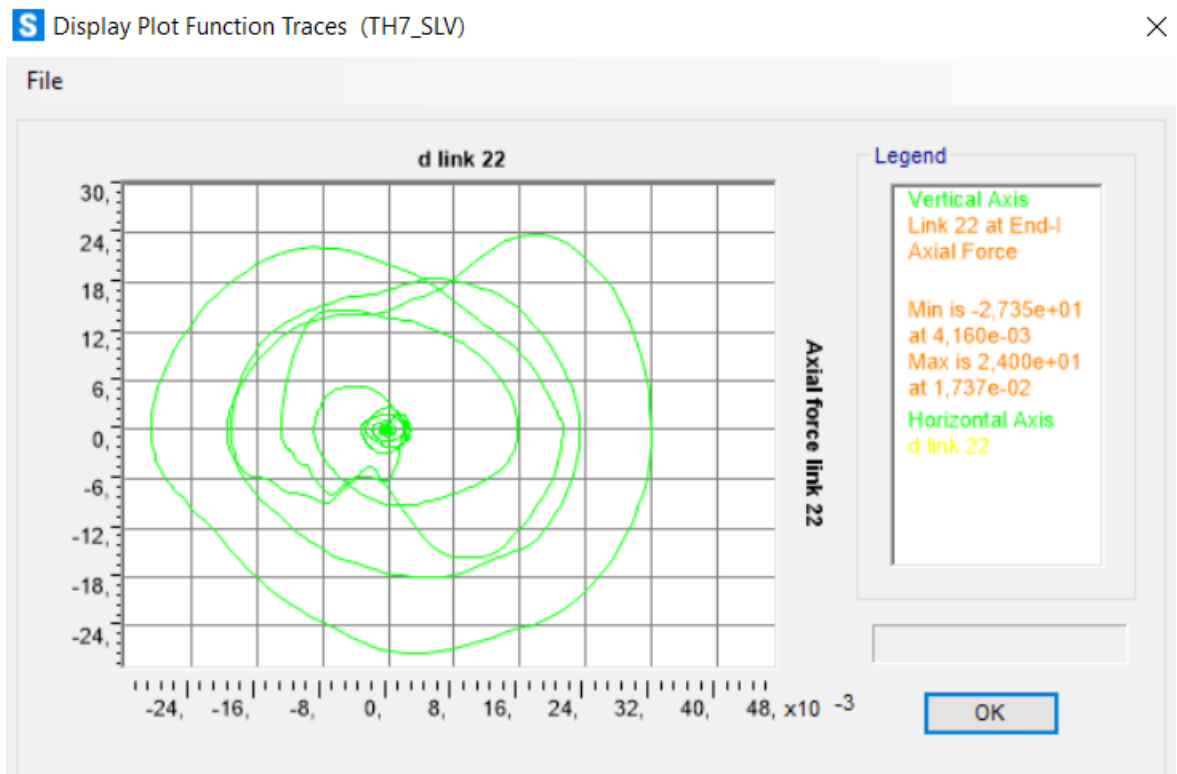


Figura 220. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori magnetoreologici non alimentati del telaio 17-12-6-1 in direzione y:

Telaio 17-12-6-1 (direzione y)			
N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	15	0,0435	0,0051
4	14	0,0579	0,0053
5	13	0,0716	0,0059

Telaio 17-12-6-1 (direzione y)		
N° piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	15	48,31
4	14	57,45
5	13	69,66

Piano 3:

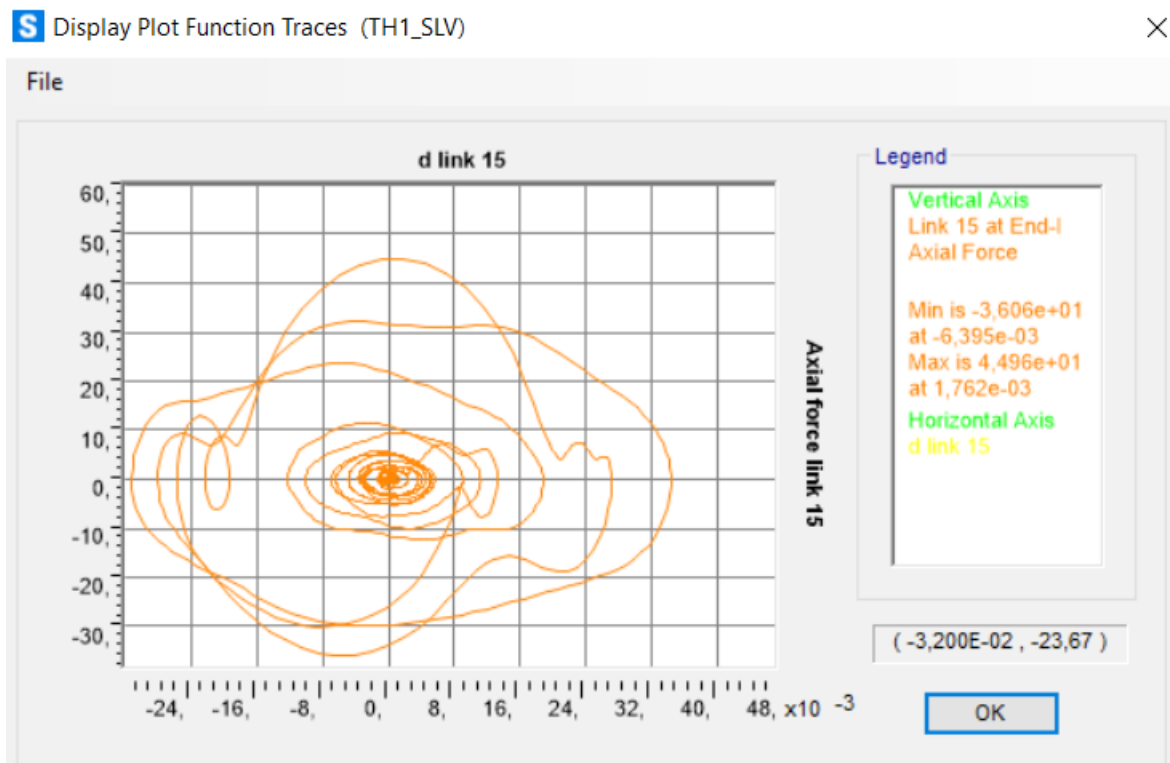


Figura 221. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

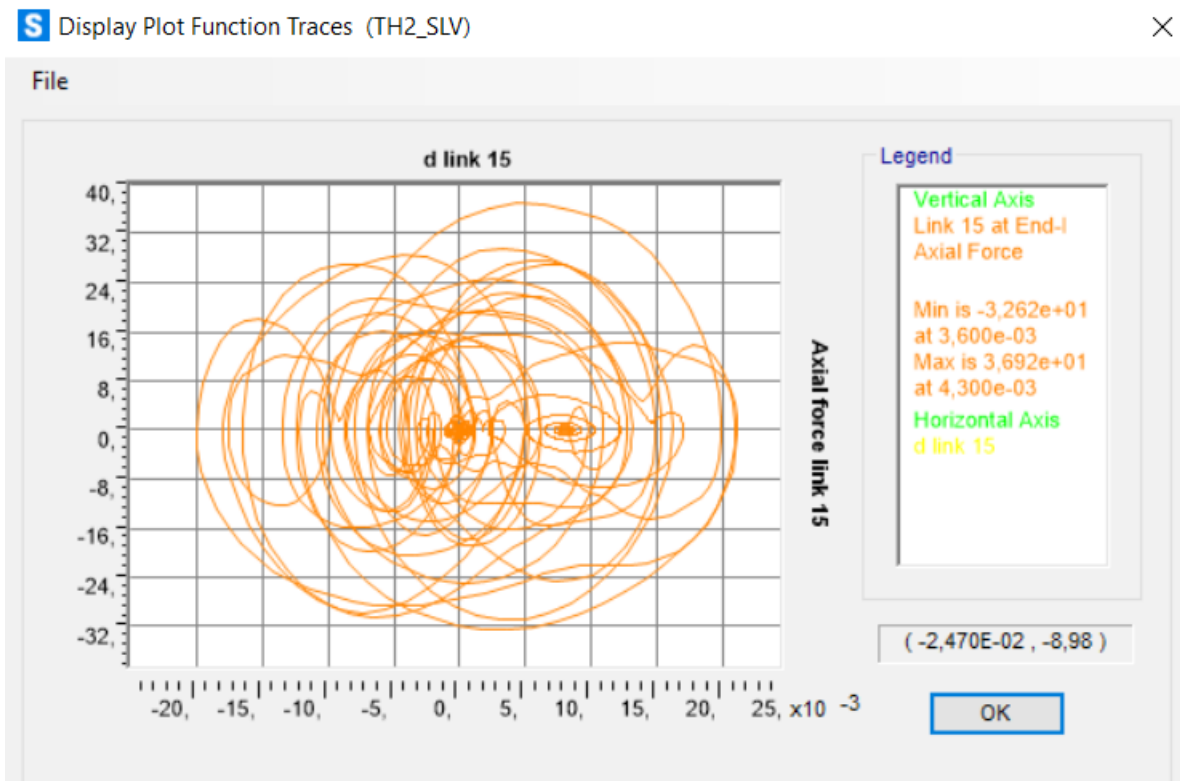


Figura 222. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

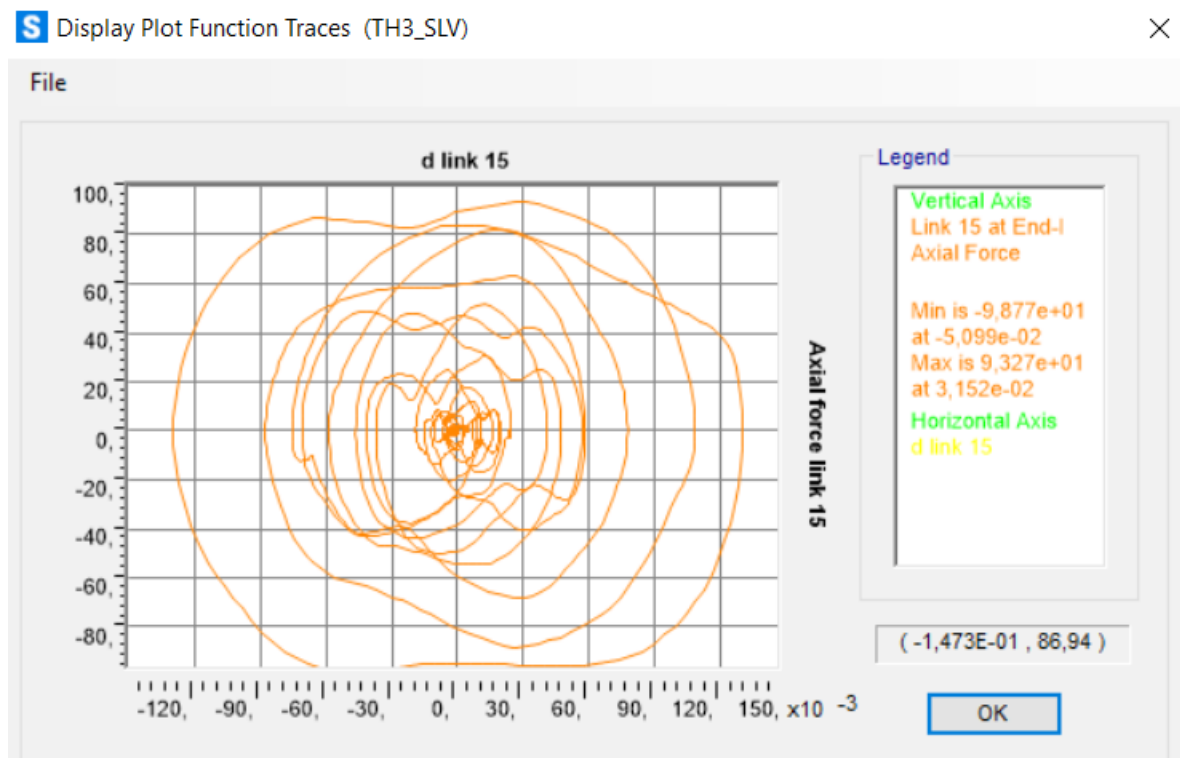


Figura 223. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

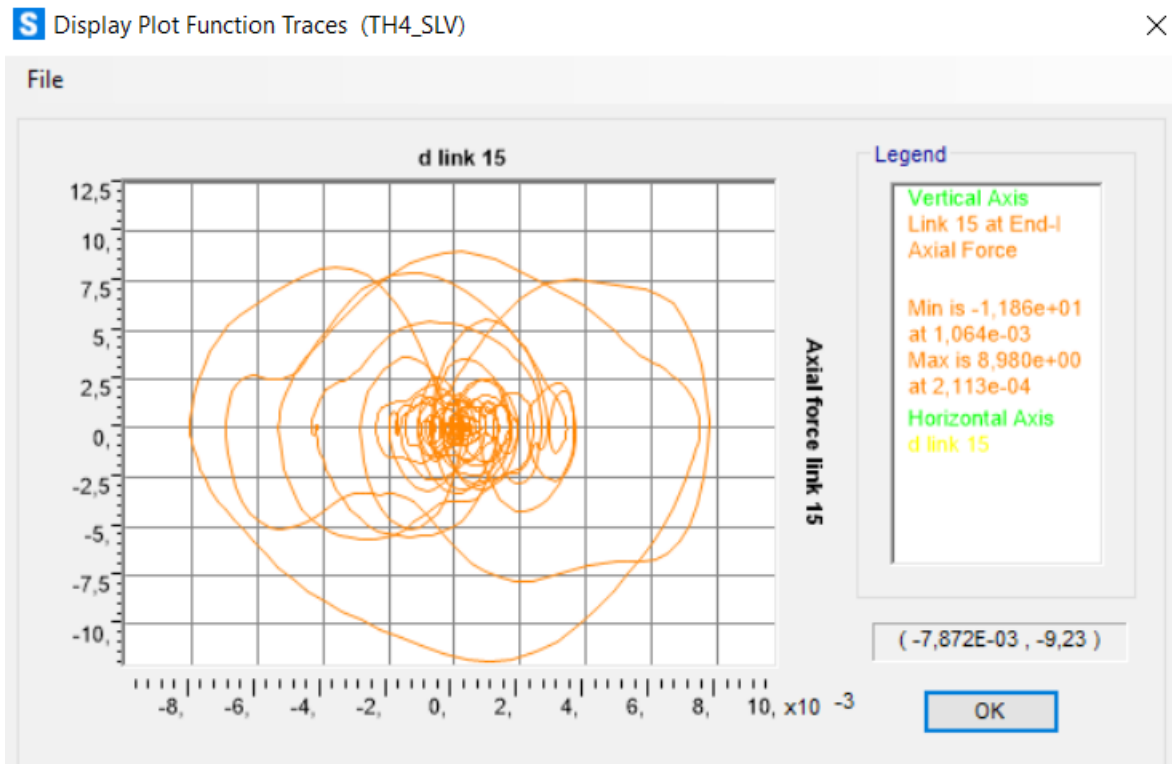


Figura 224. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

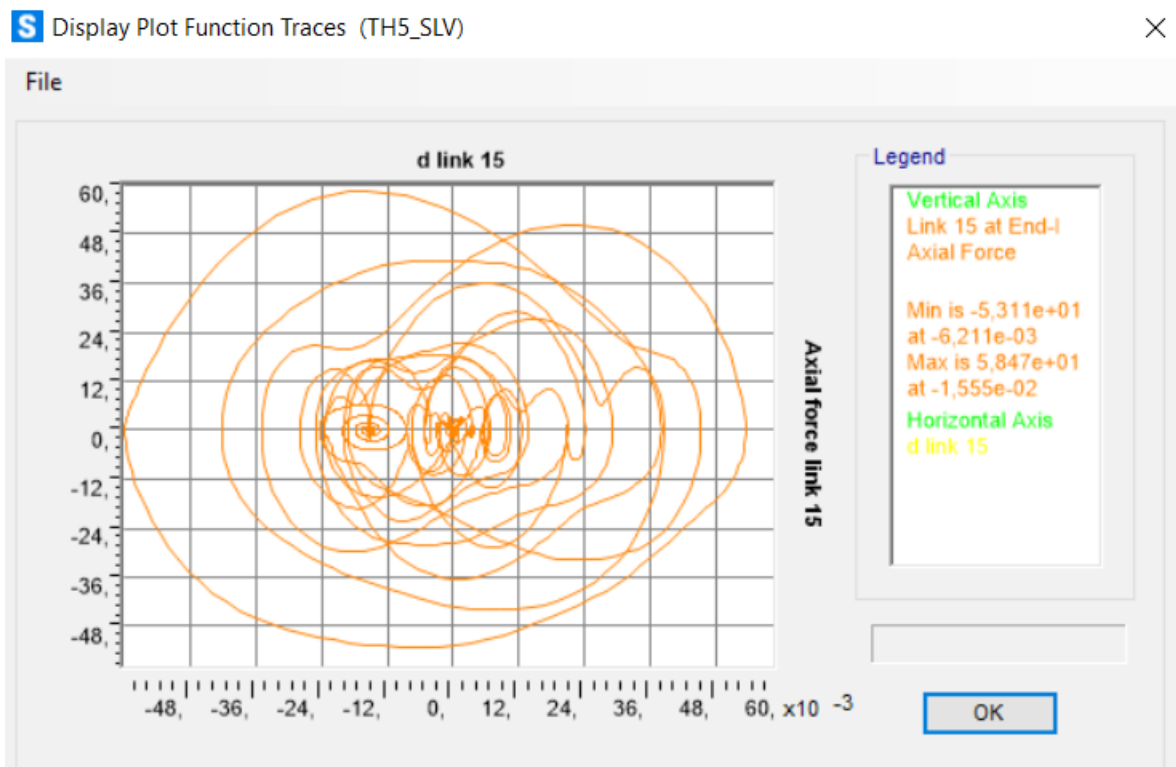


Figura 225. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

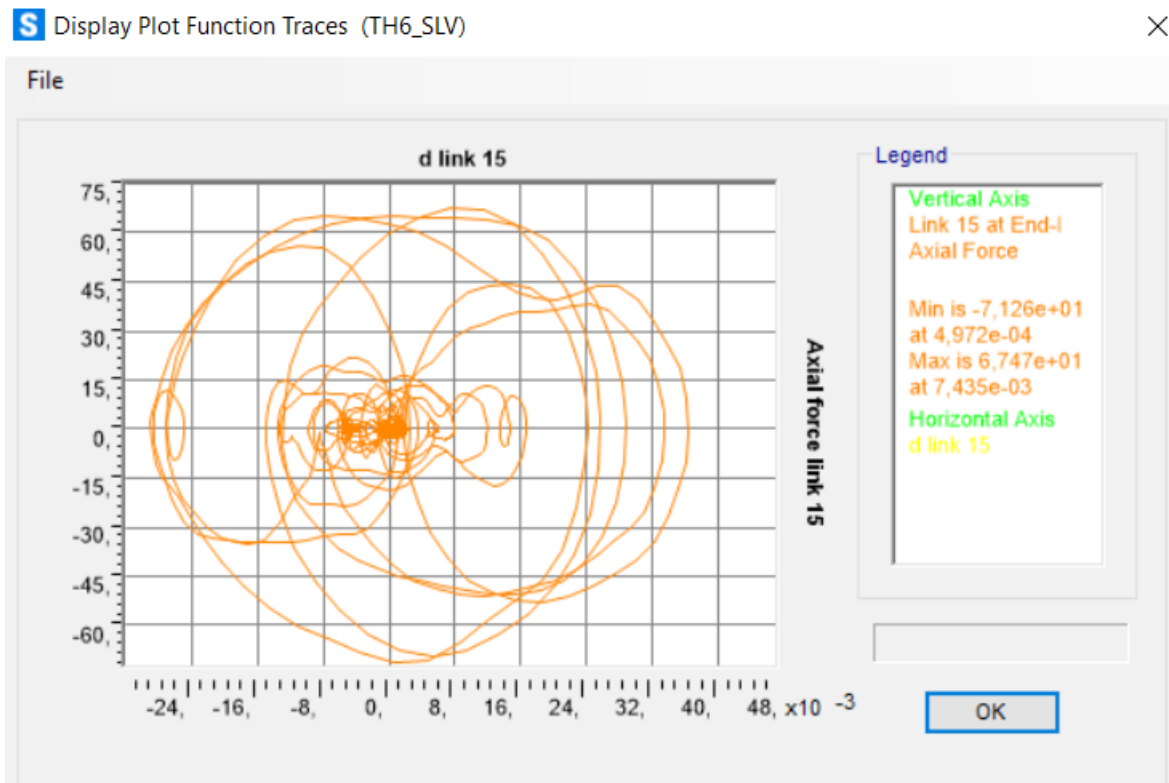


Figura 226. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

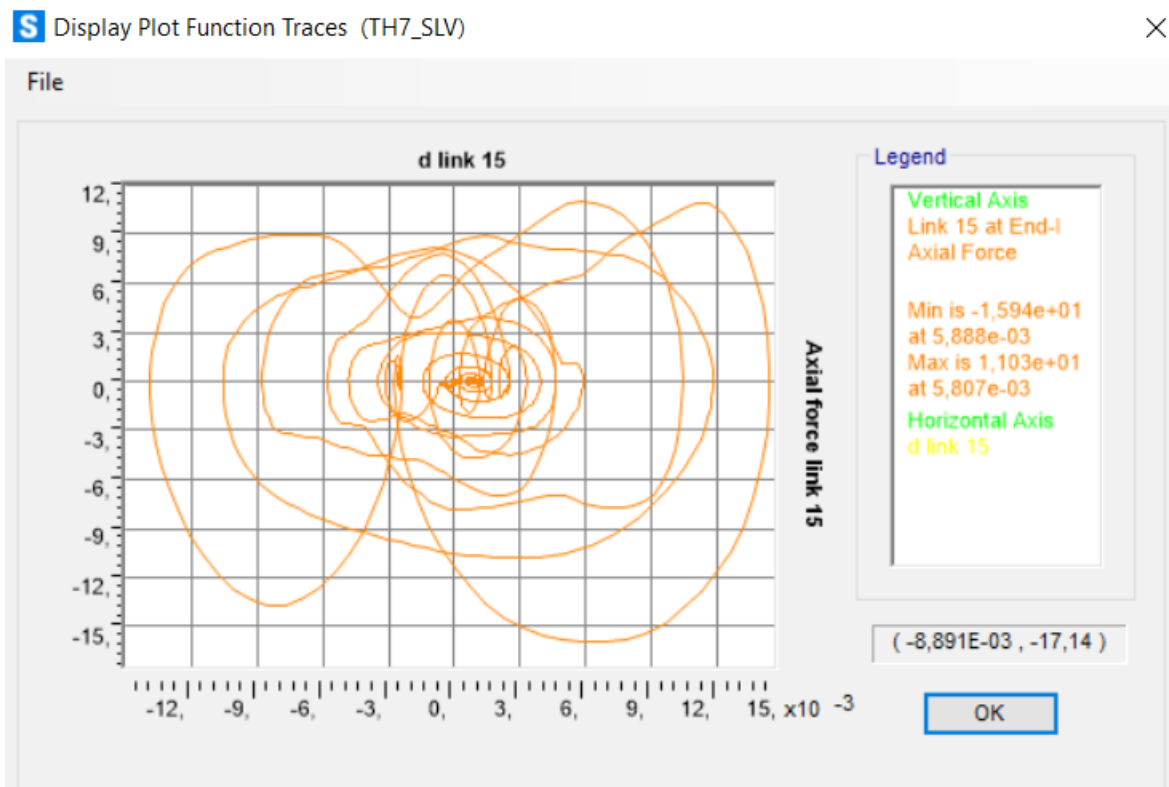


Figura 227. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

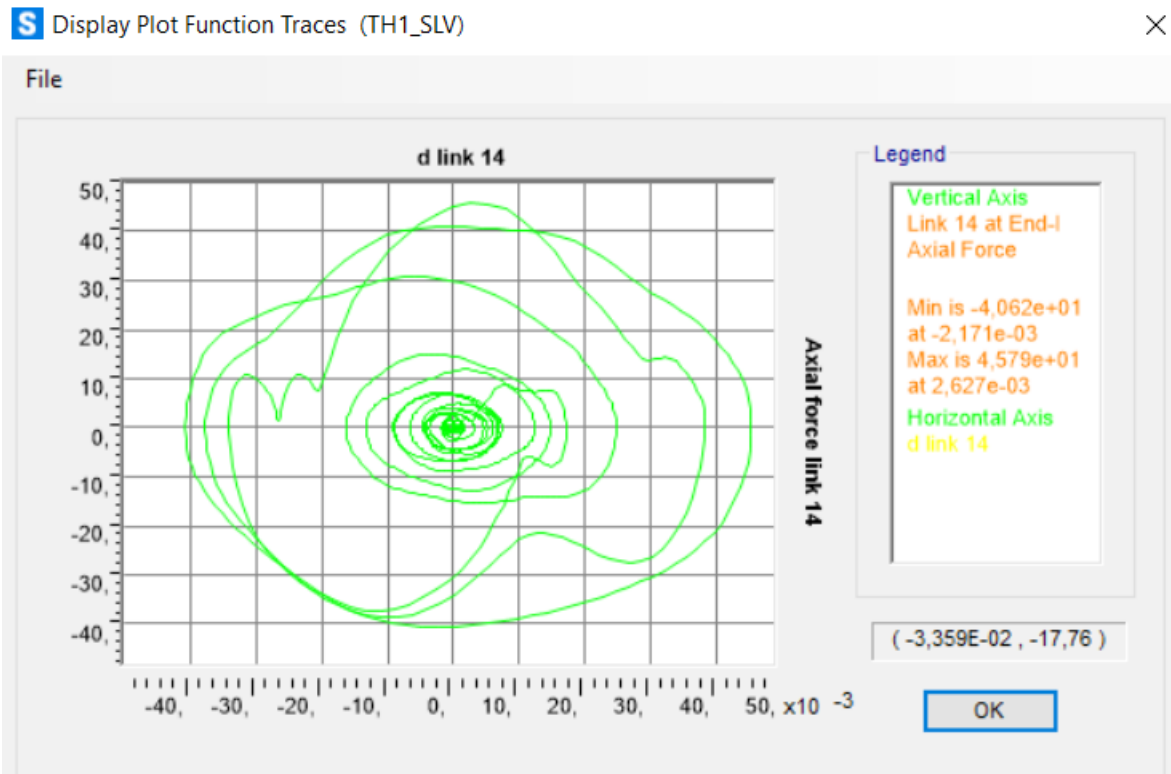


Figura 228. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

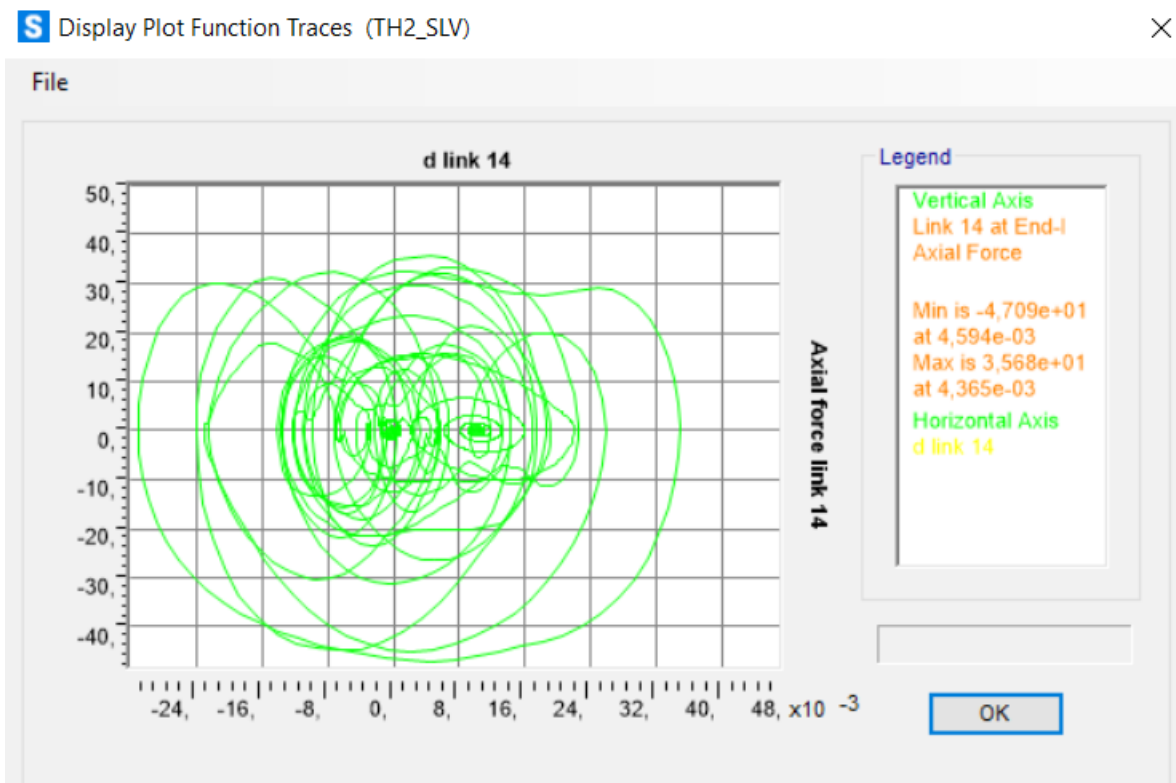


Figura 229. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

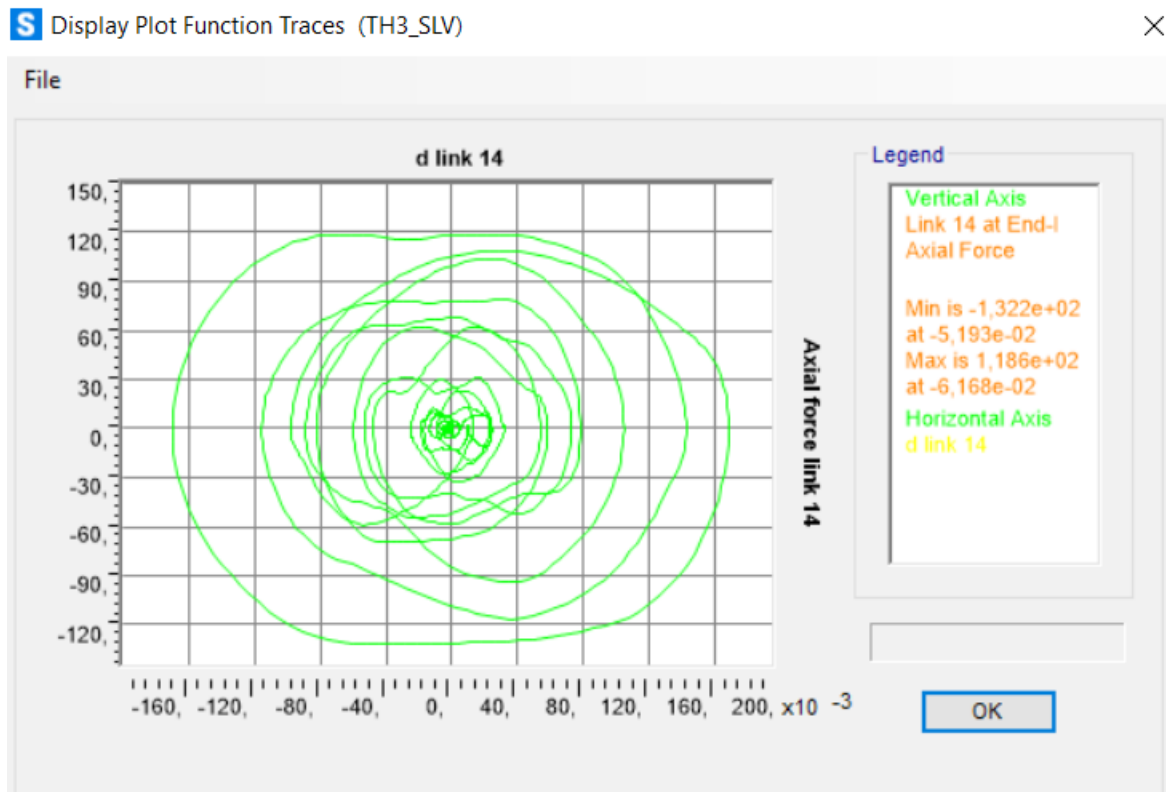


Figura 230. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

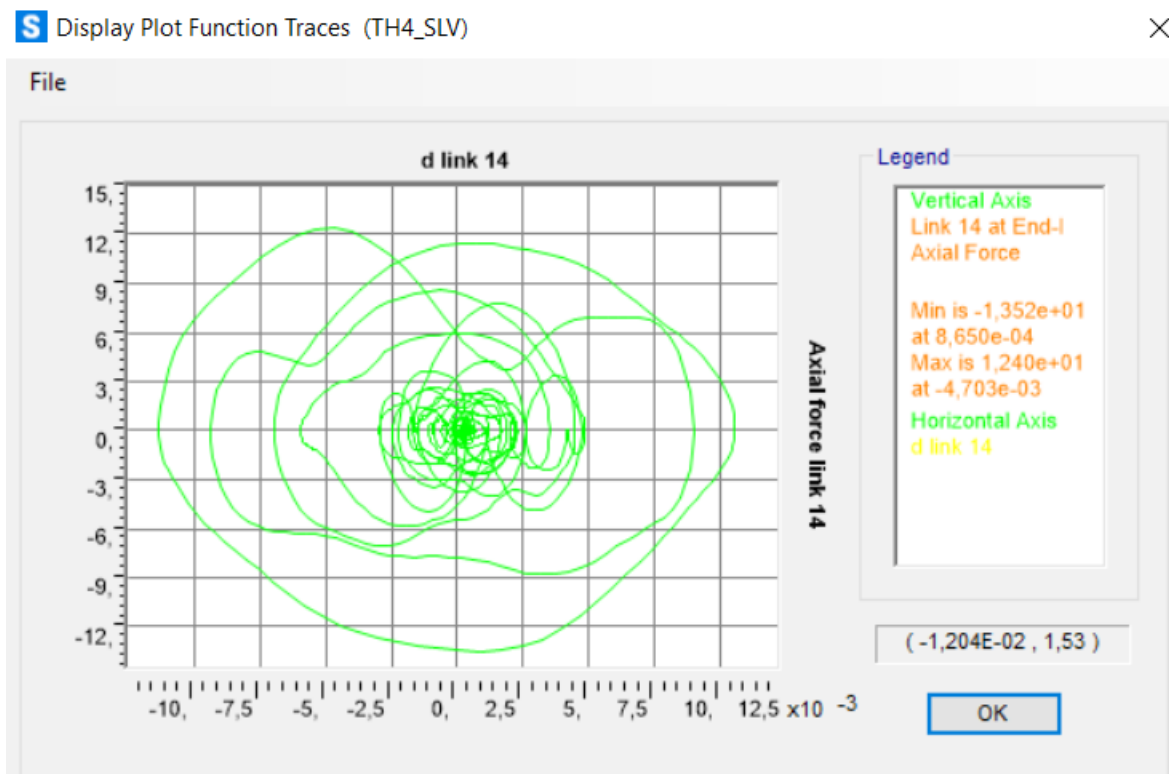


Figura 231. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

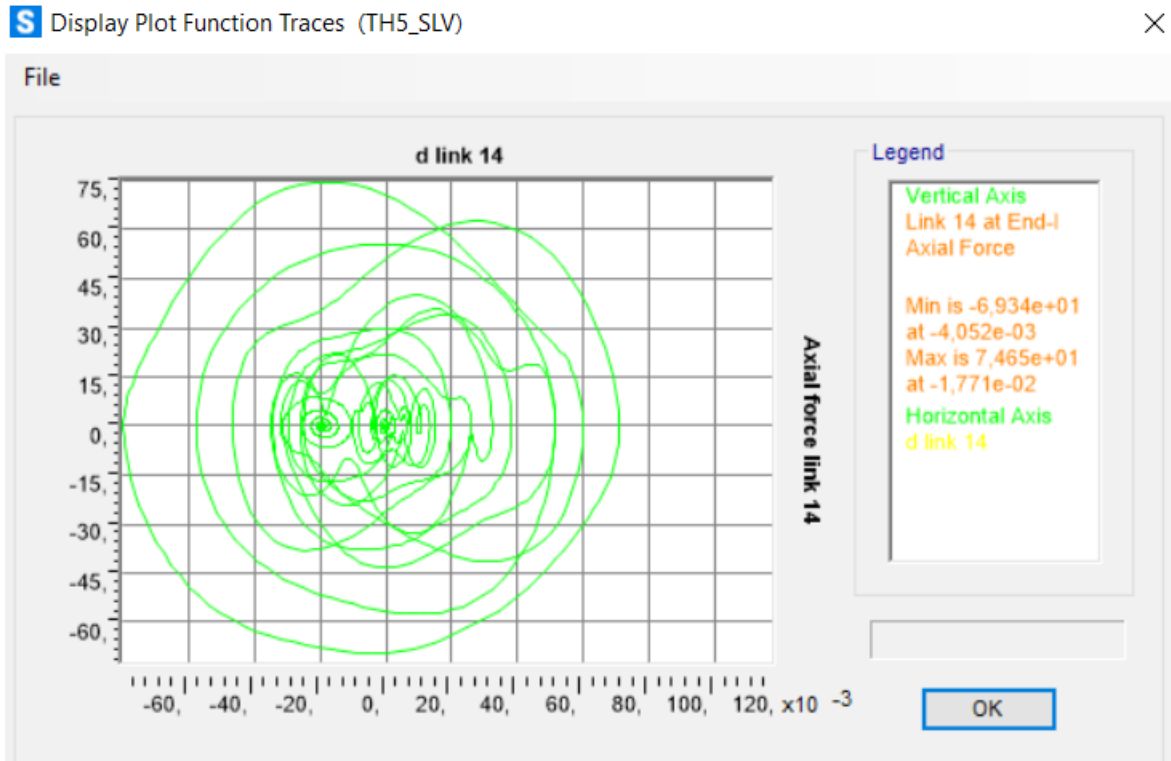


Figura 232. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

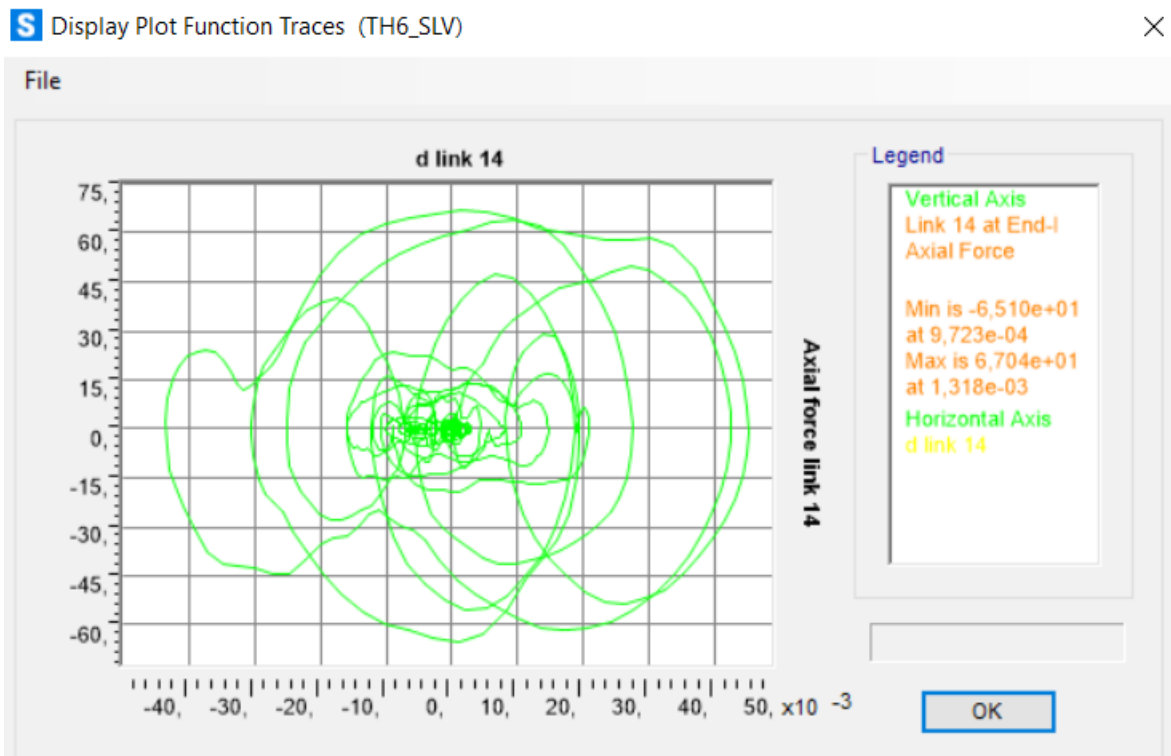


Figura 233. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

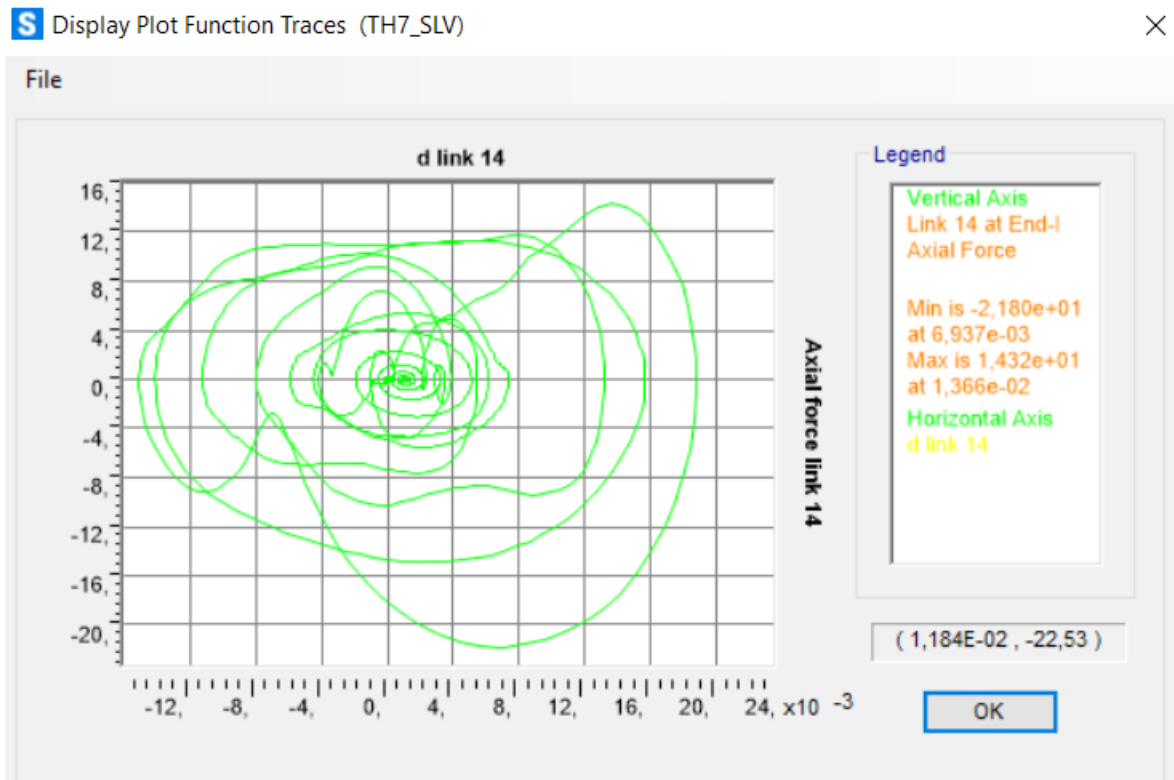


Figura 234. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

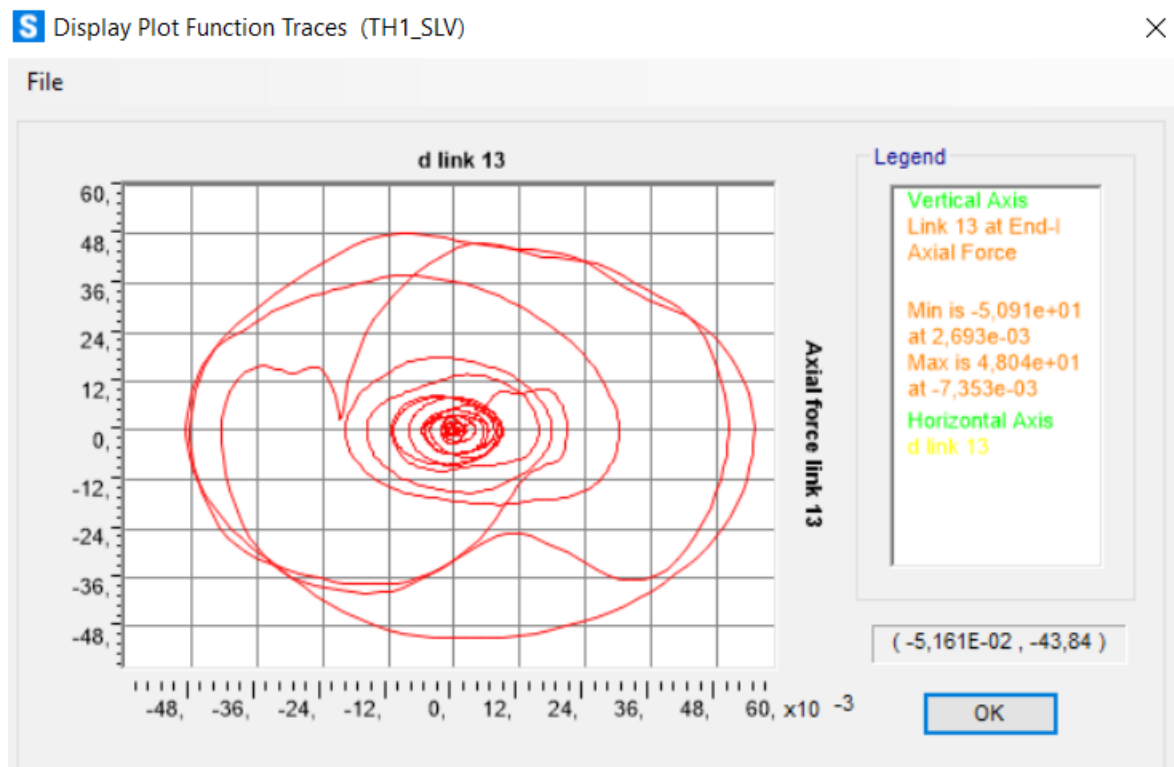


Figura 235. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

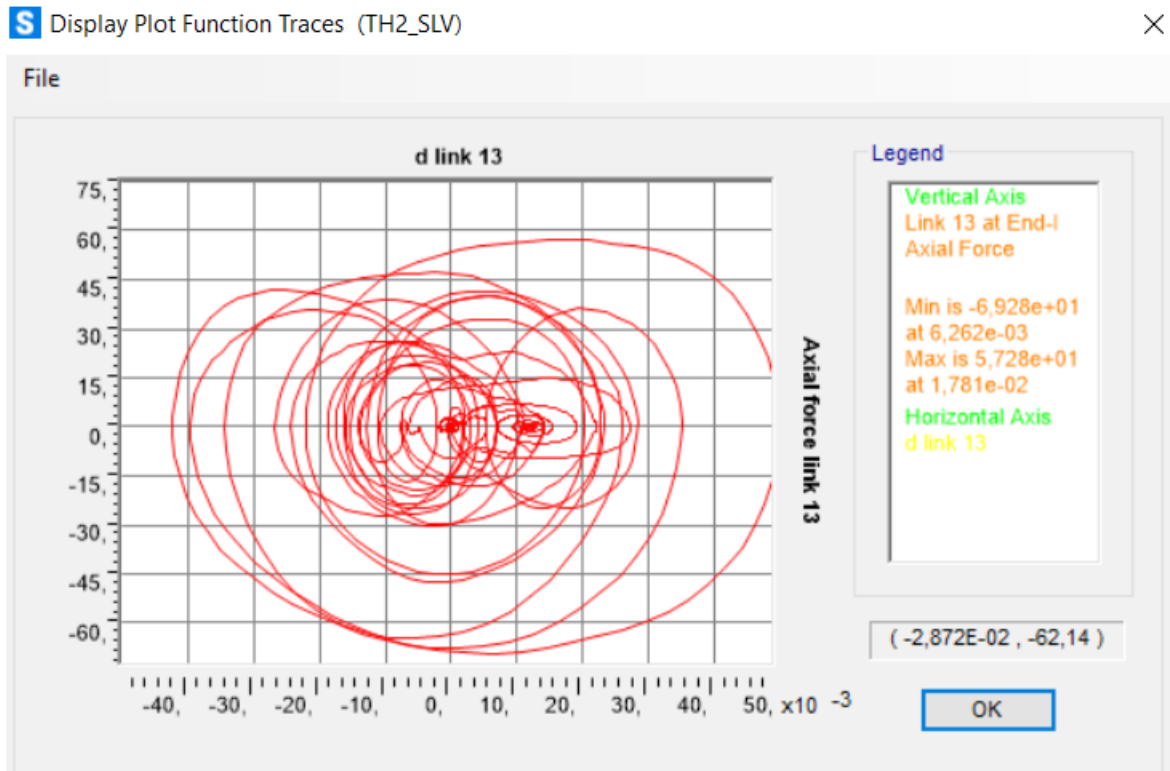


Figura 236. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

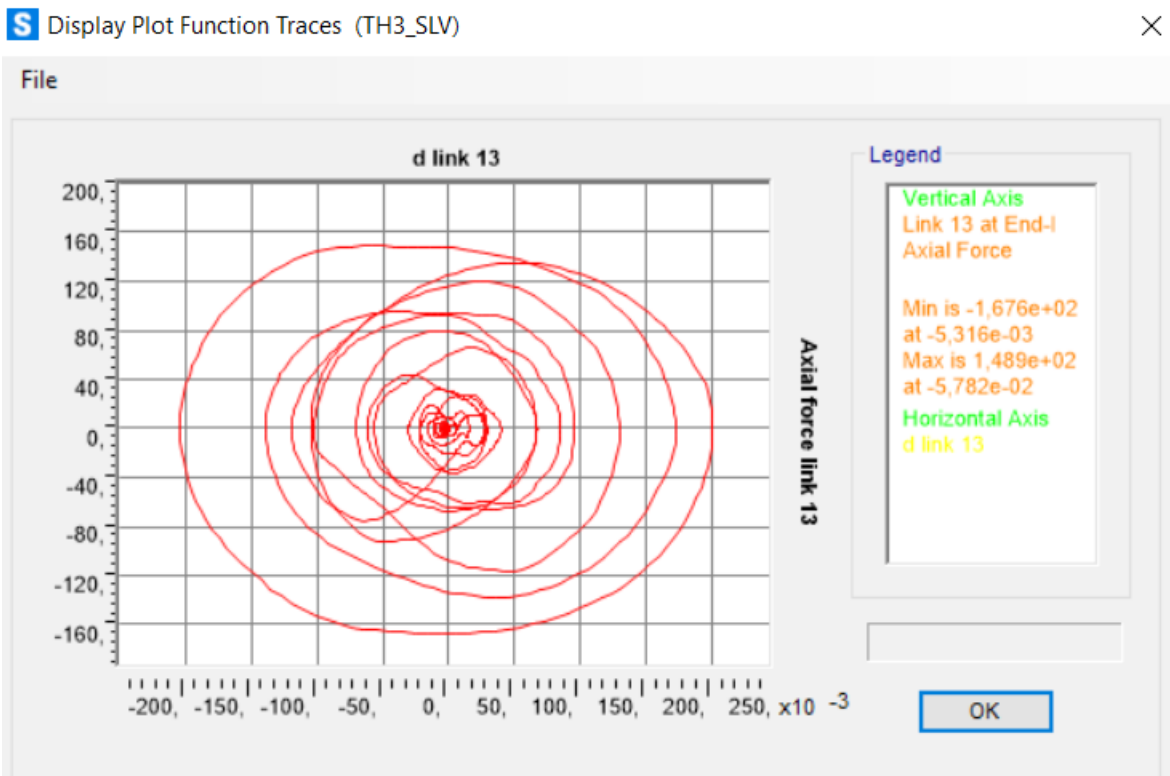


Figura 237. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

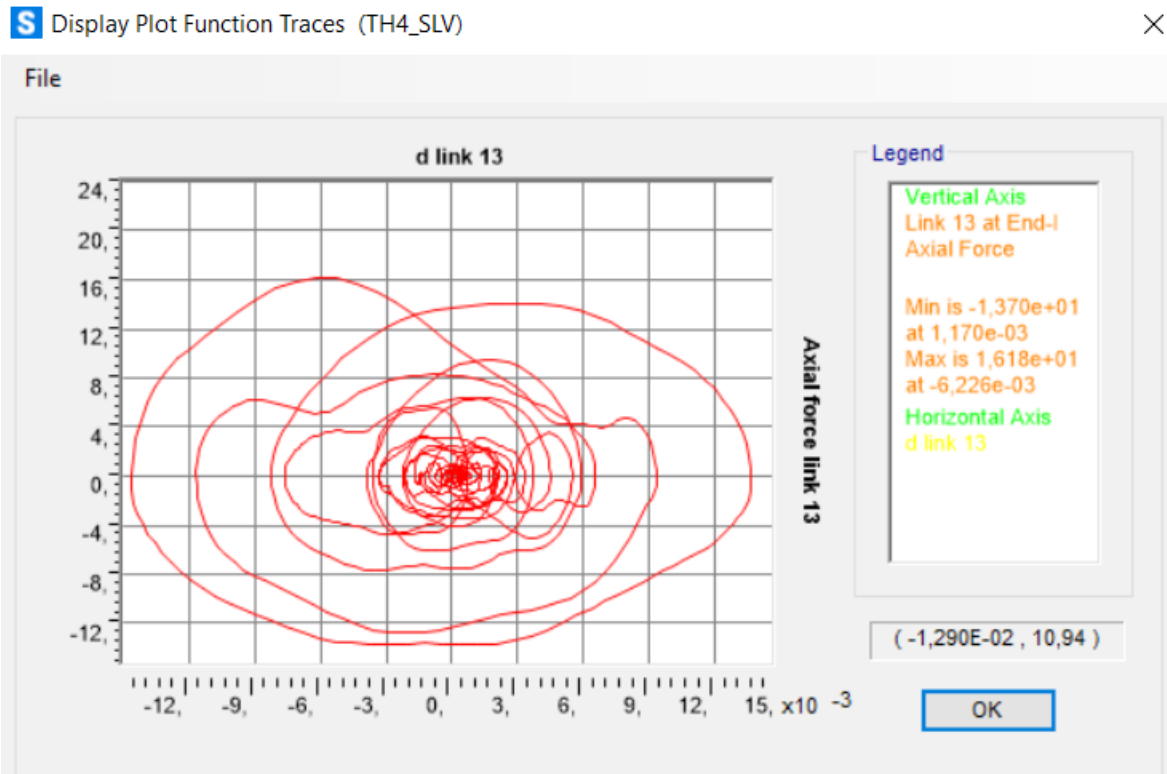


Figura 238. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

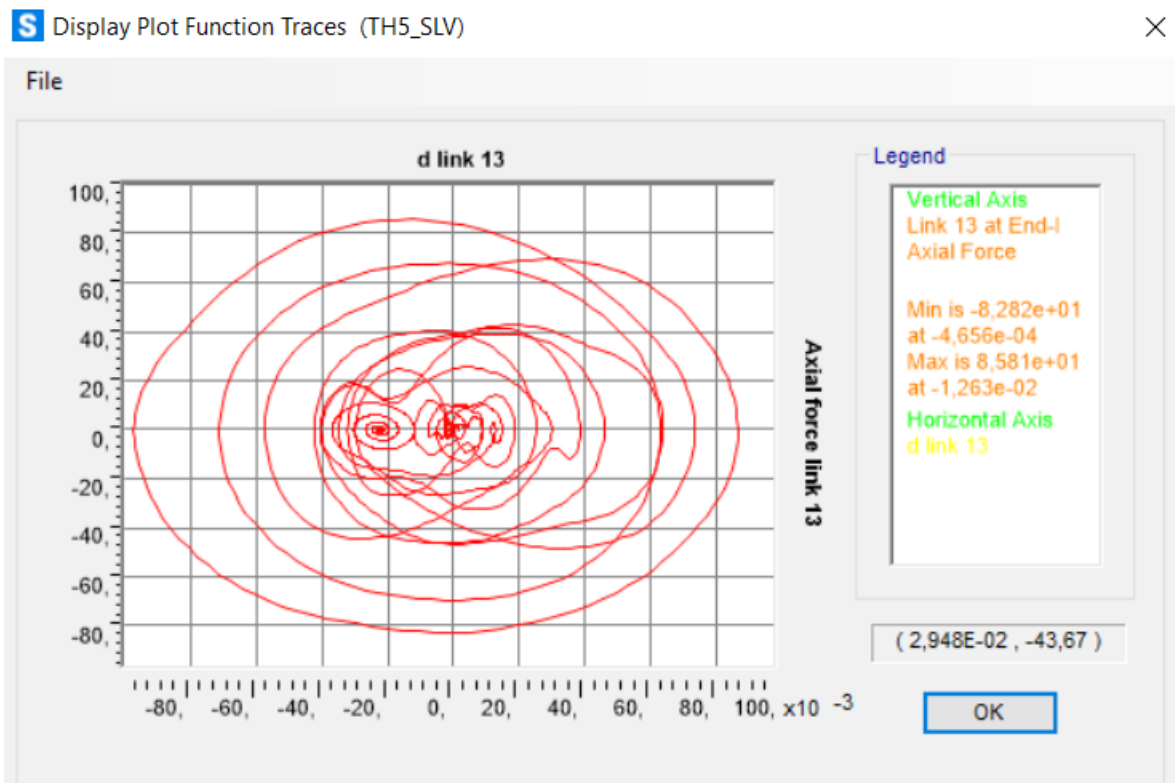


Figura 239. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

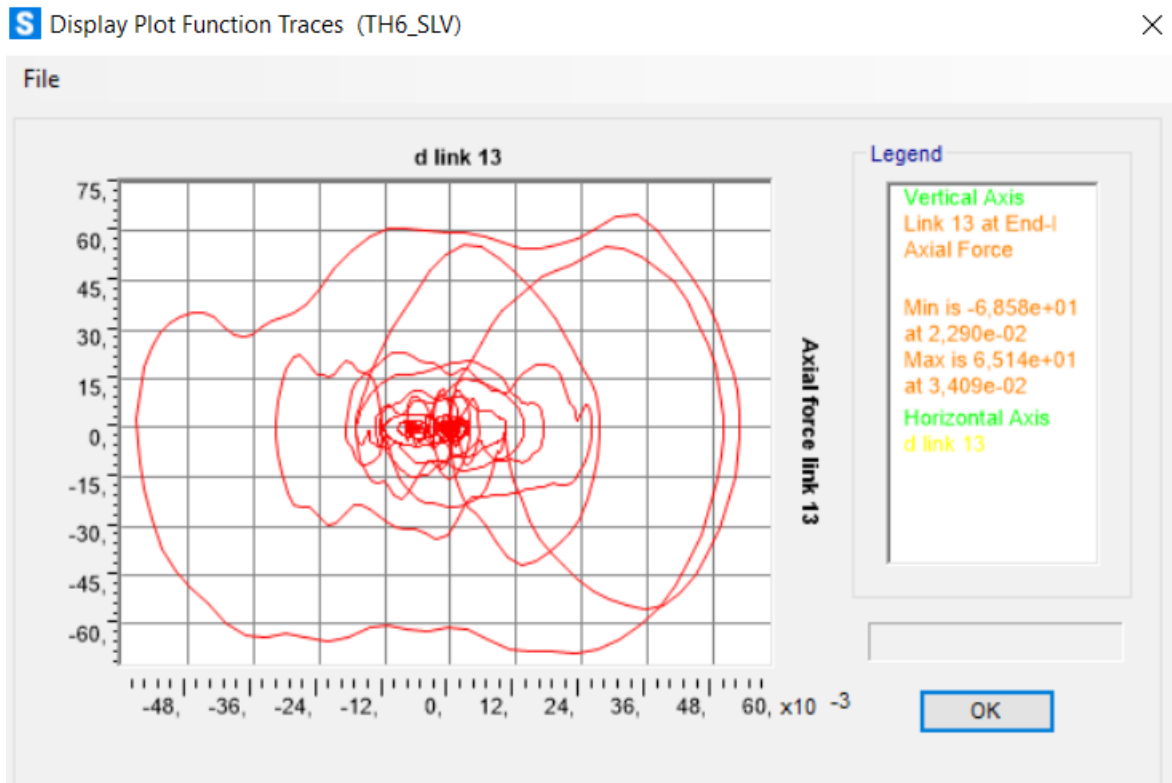


Figura 240. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

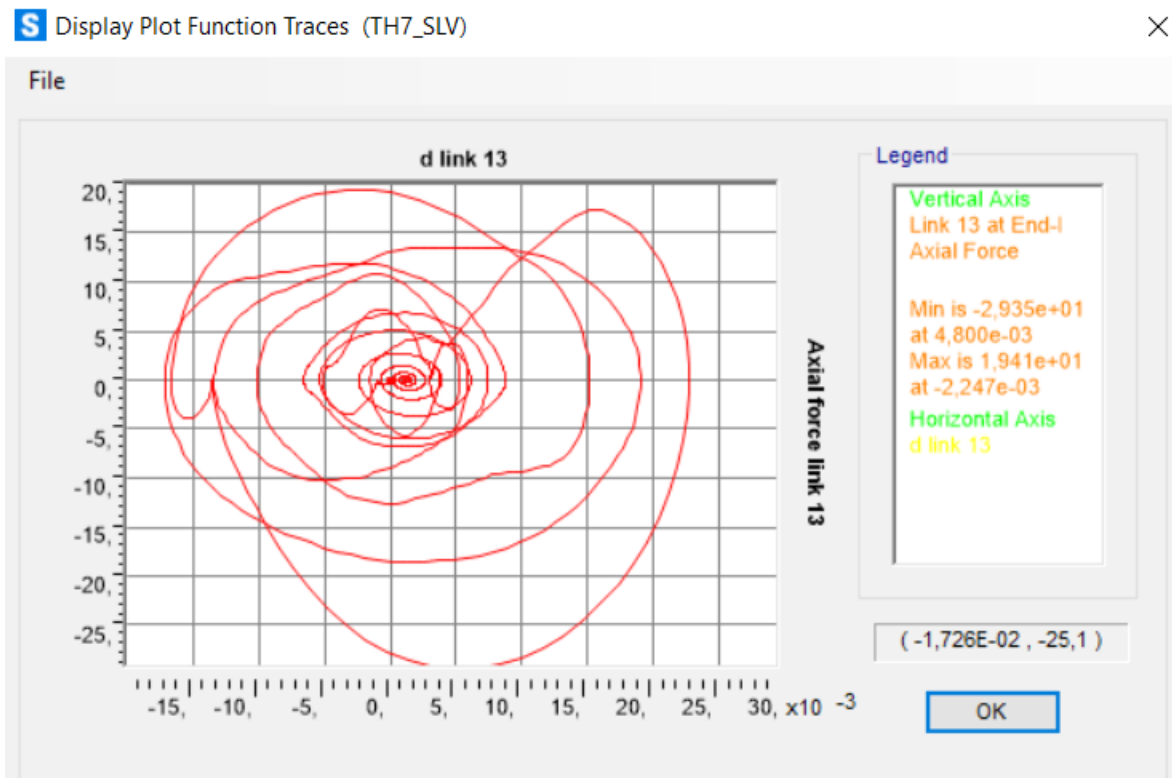


Figura 241. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori magnetoreologici non alimentati del telaio 20-15-9-4 in direzione y:

Telaio 20-15-9-4 (direzione y)

N°piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	16	0,0411	0,0058
4	20	0,0546	0,0061
5	21	0,0676	0,0069

Telaio 20-15-9-4 (direzione y)

N°piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	16	45,63
4	20	55,12
5	21	66,69

Piano 3:

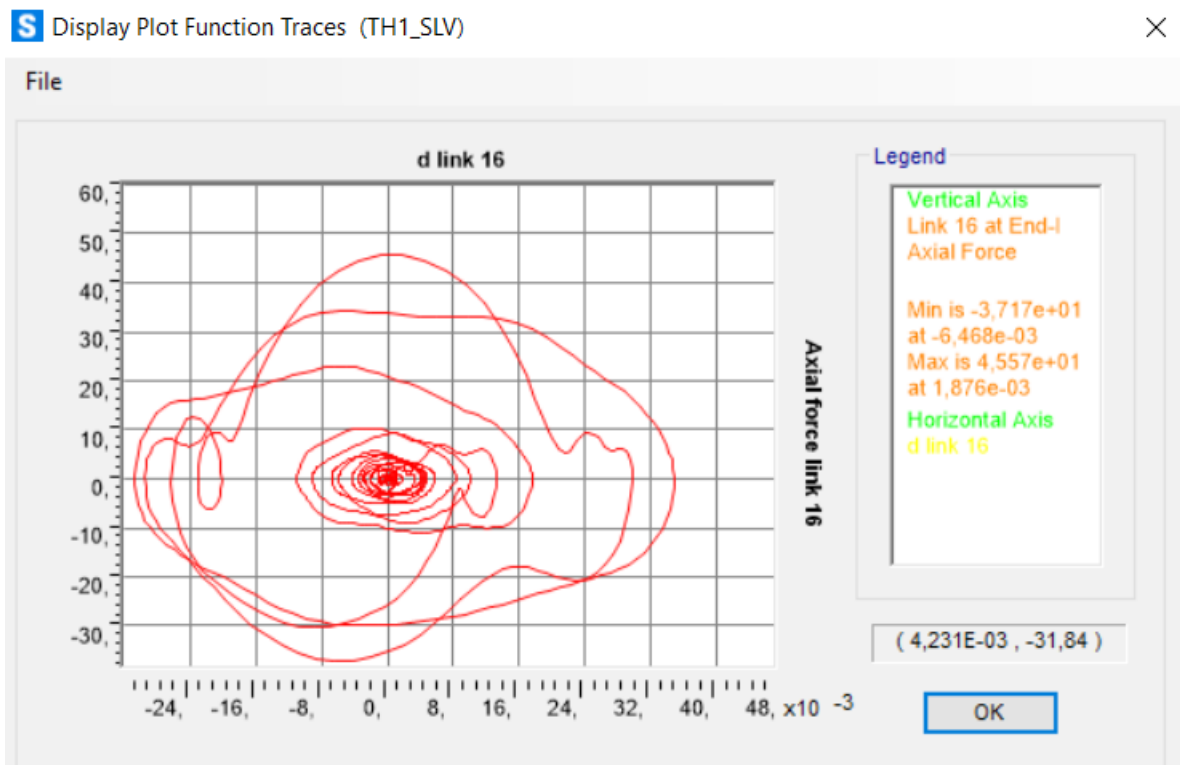


Figura 242. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

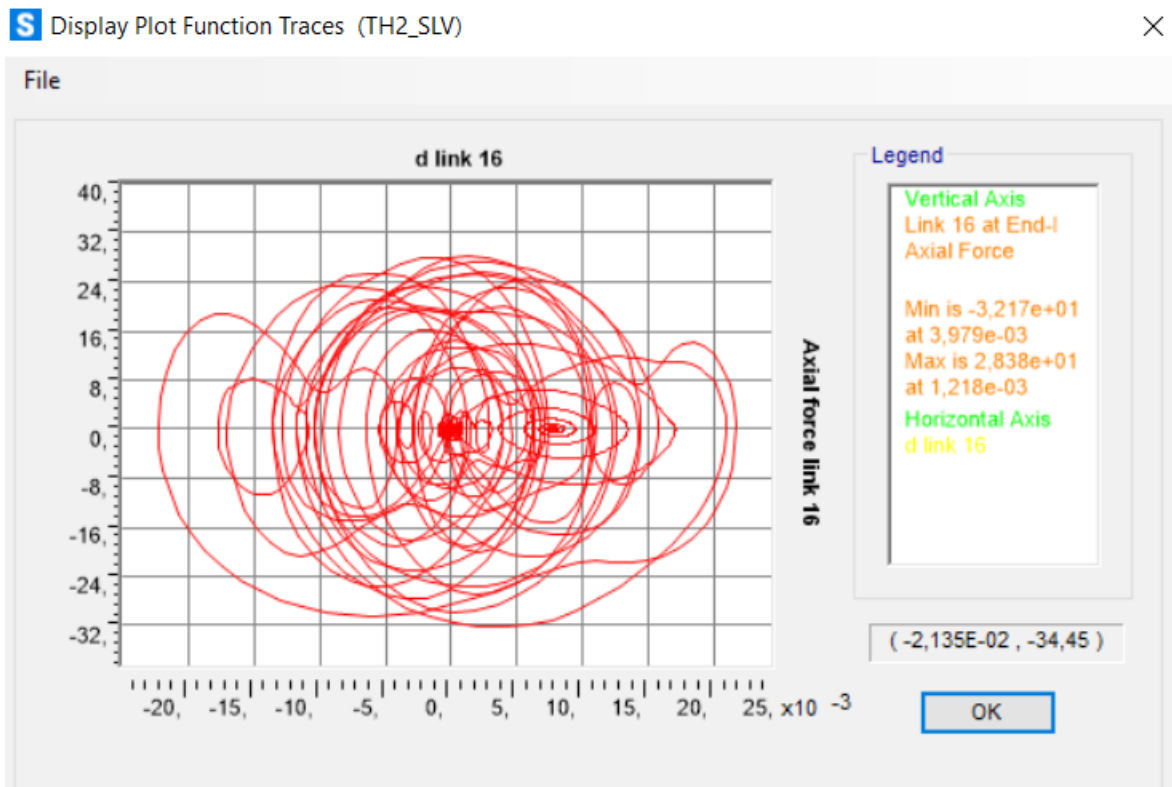


Figura 243. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

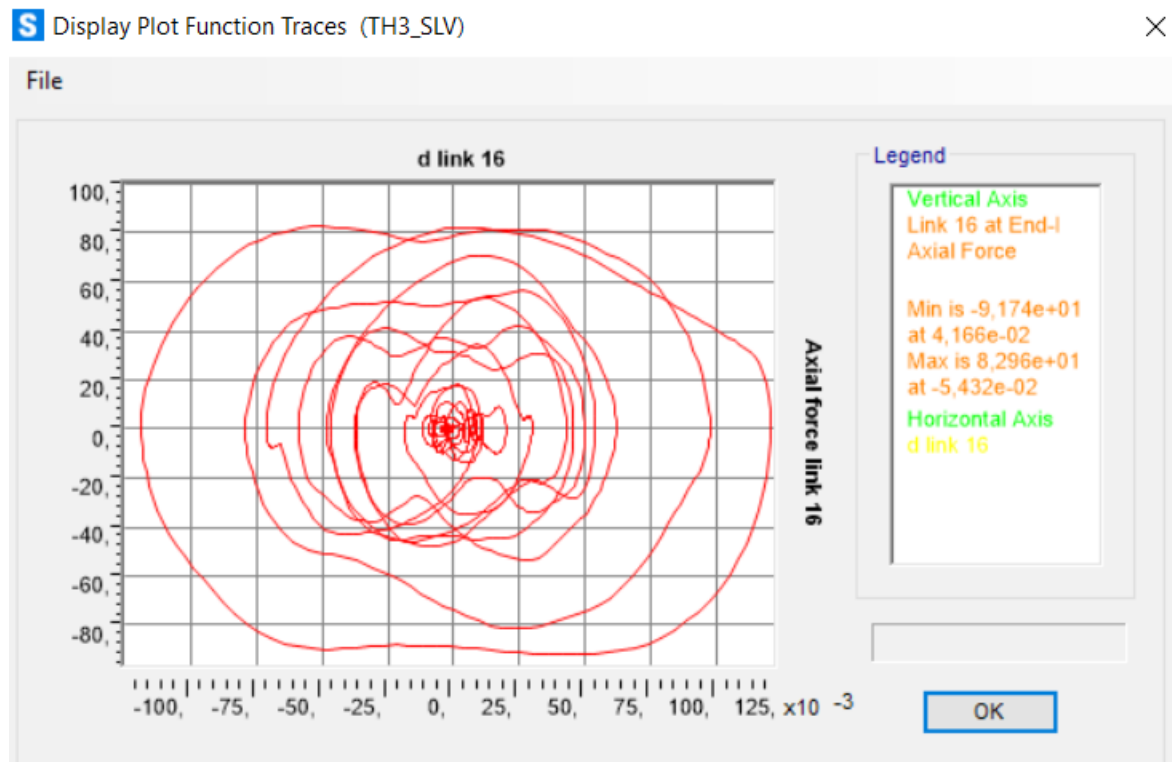


Figura 244. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

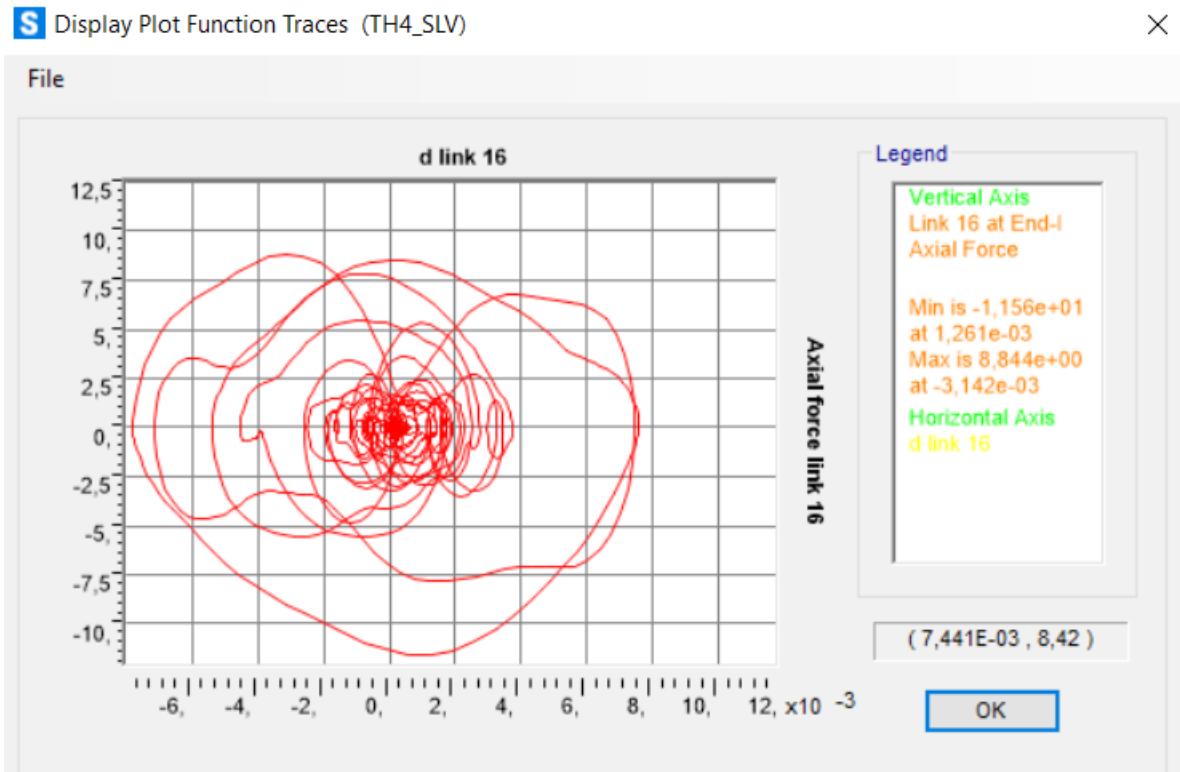


Figura 245. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

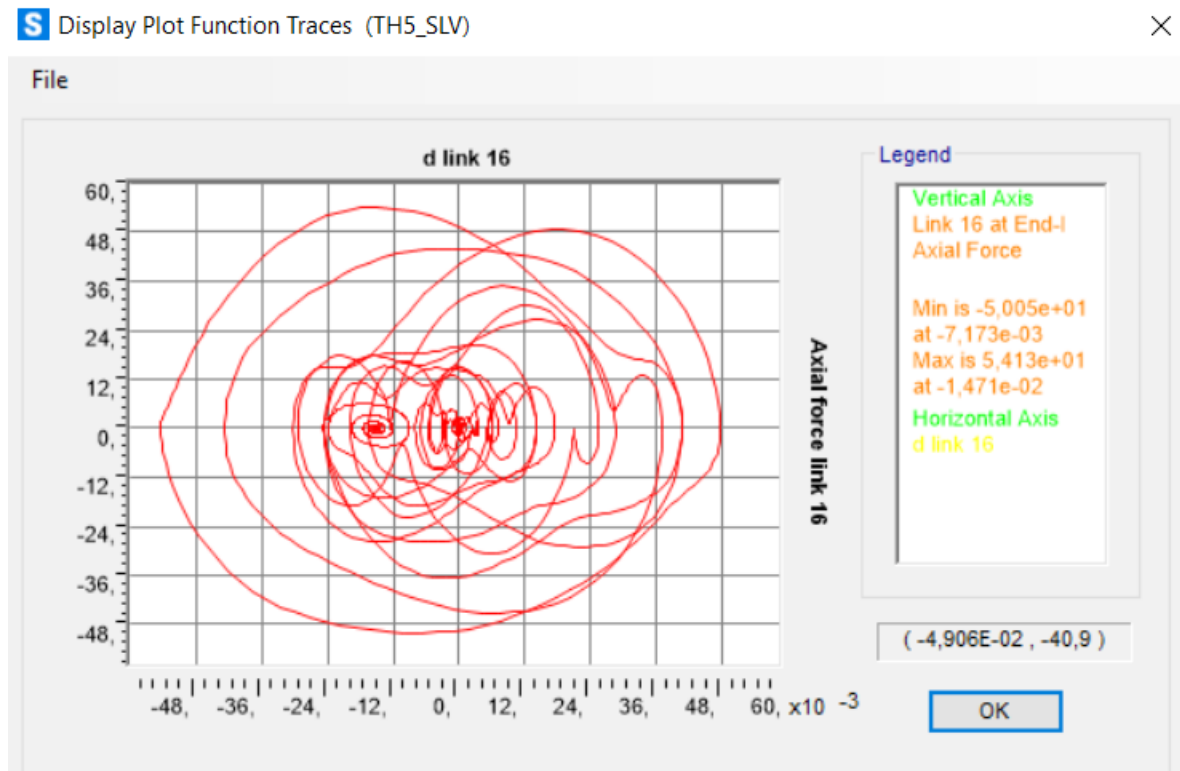


Figura 246. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

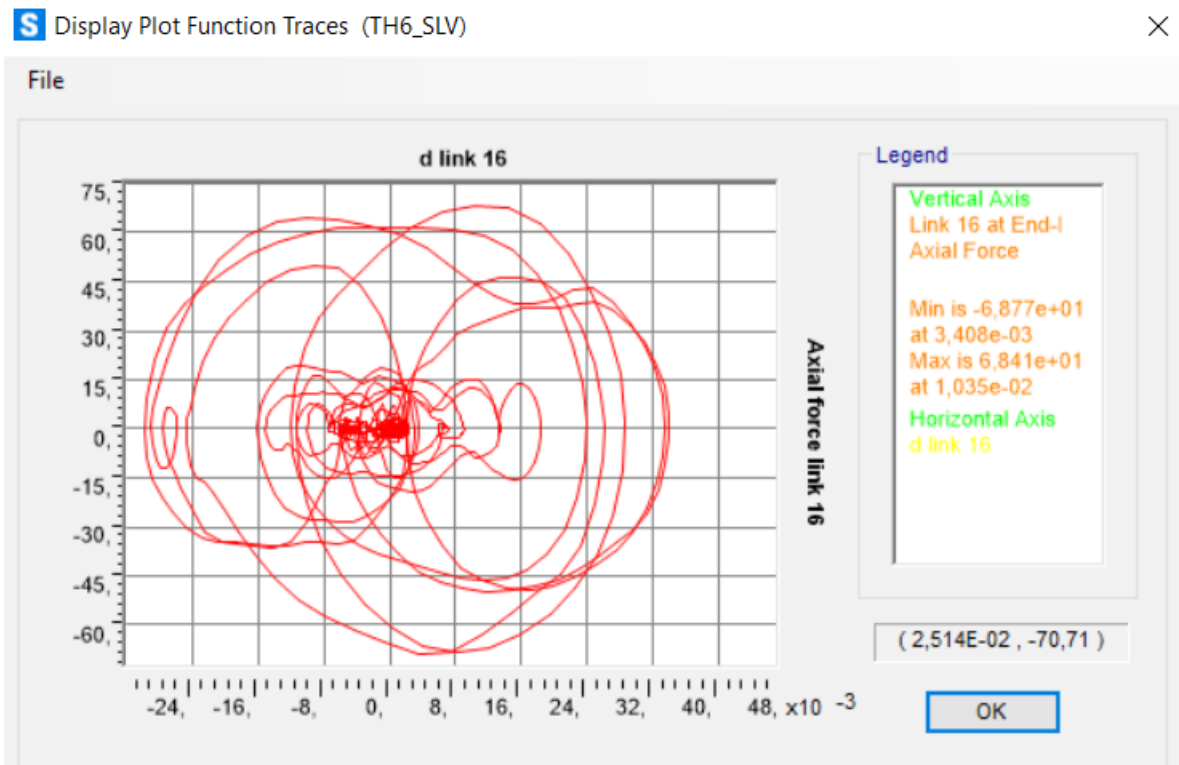


Figura 247. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

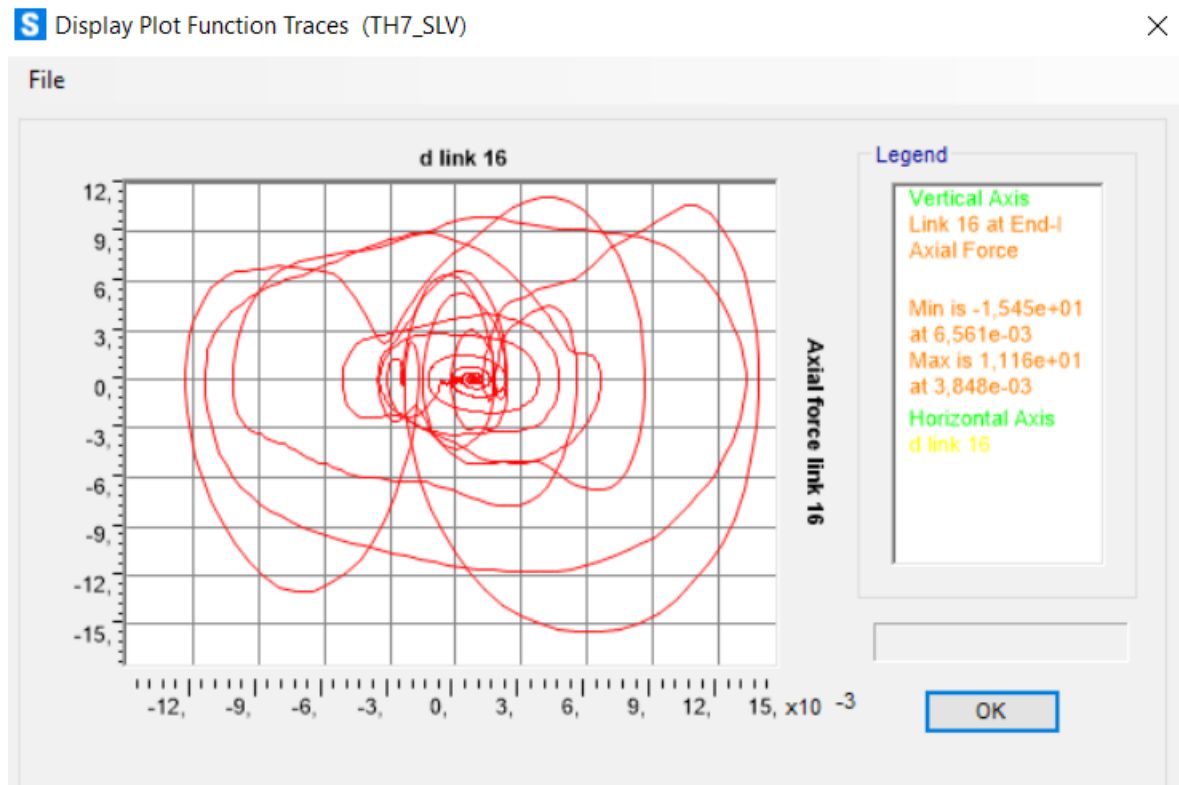


Figura 248. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

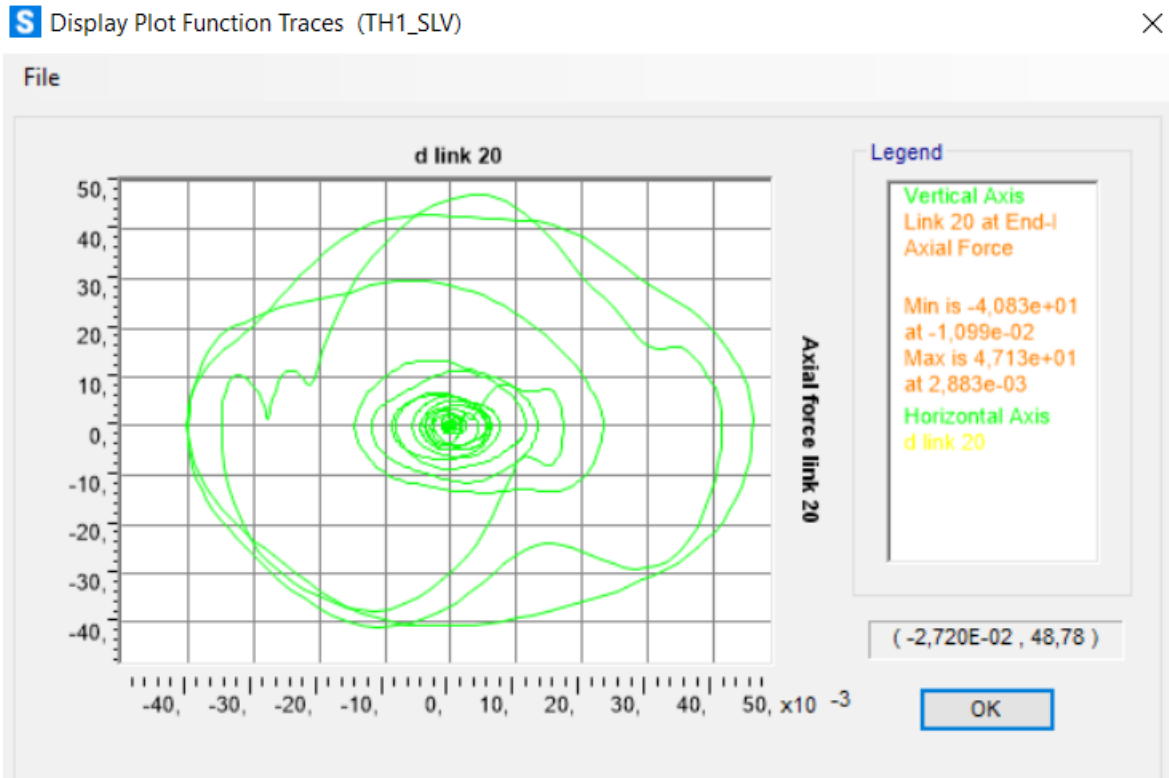


Figura 249. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

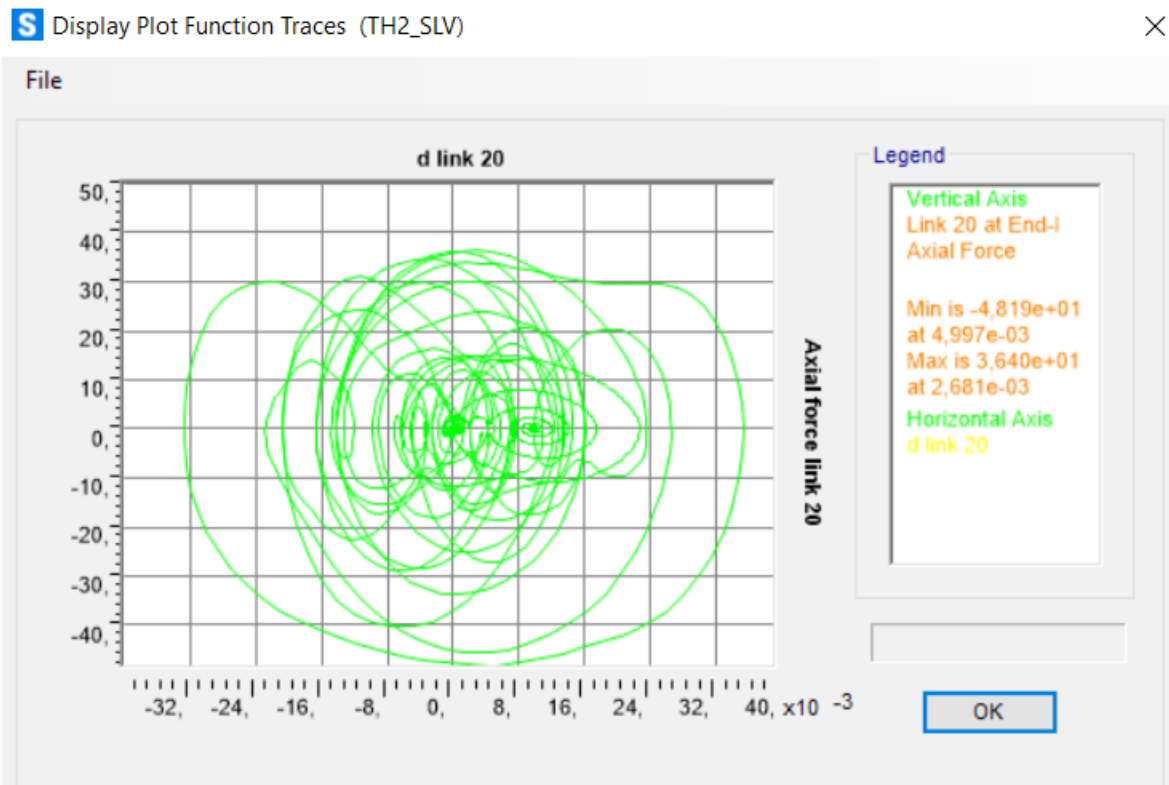


Figura 250. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

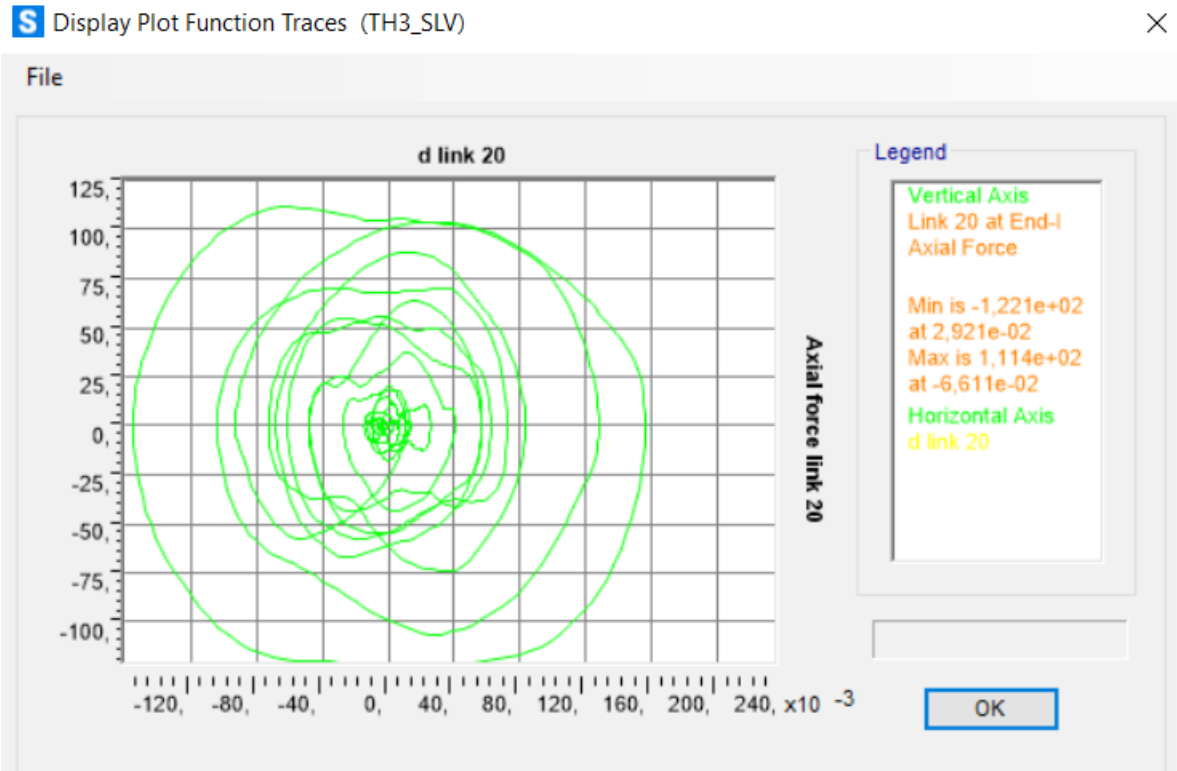


Figura 251. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

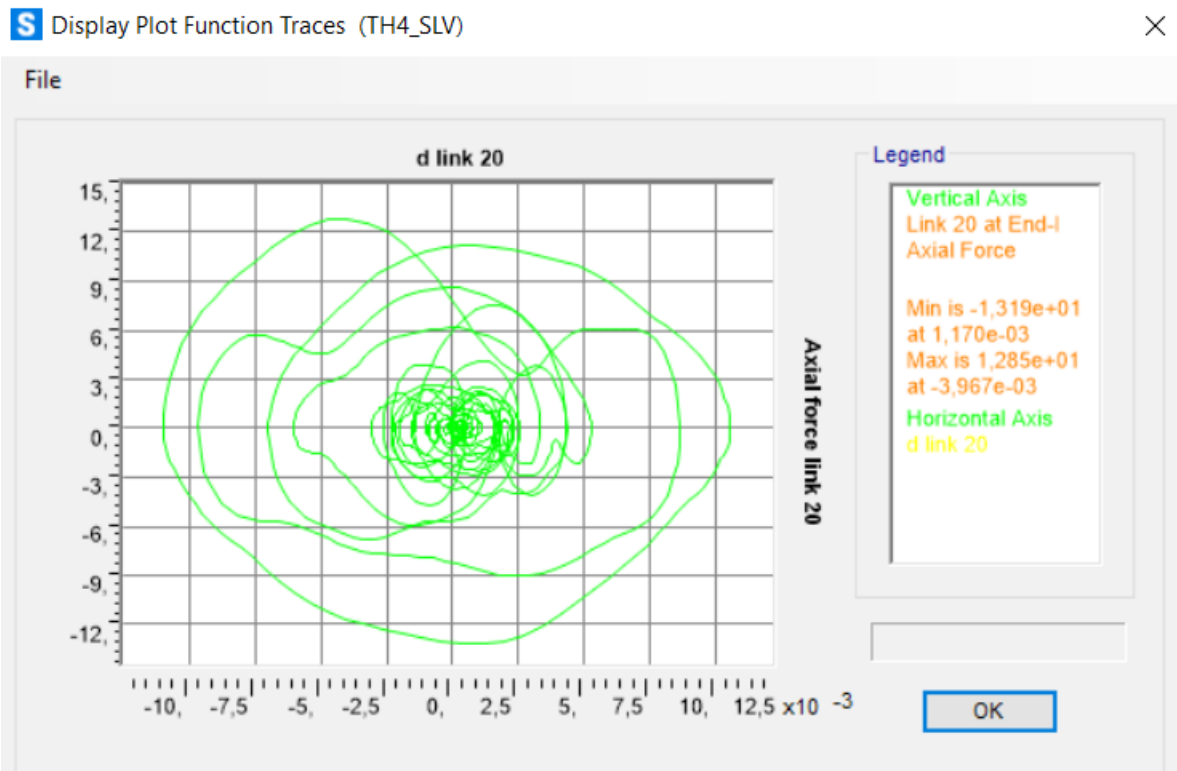


Figura 252. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

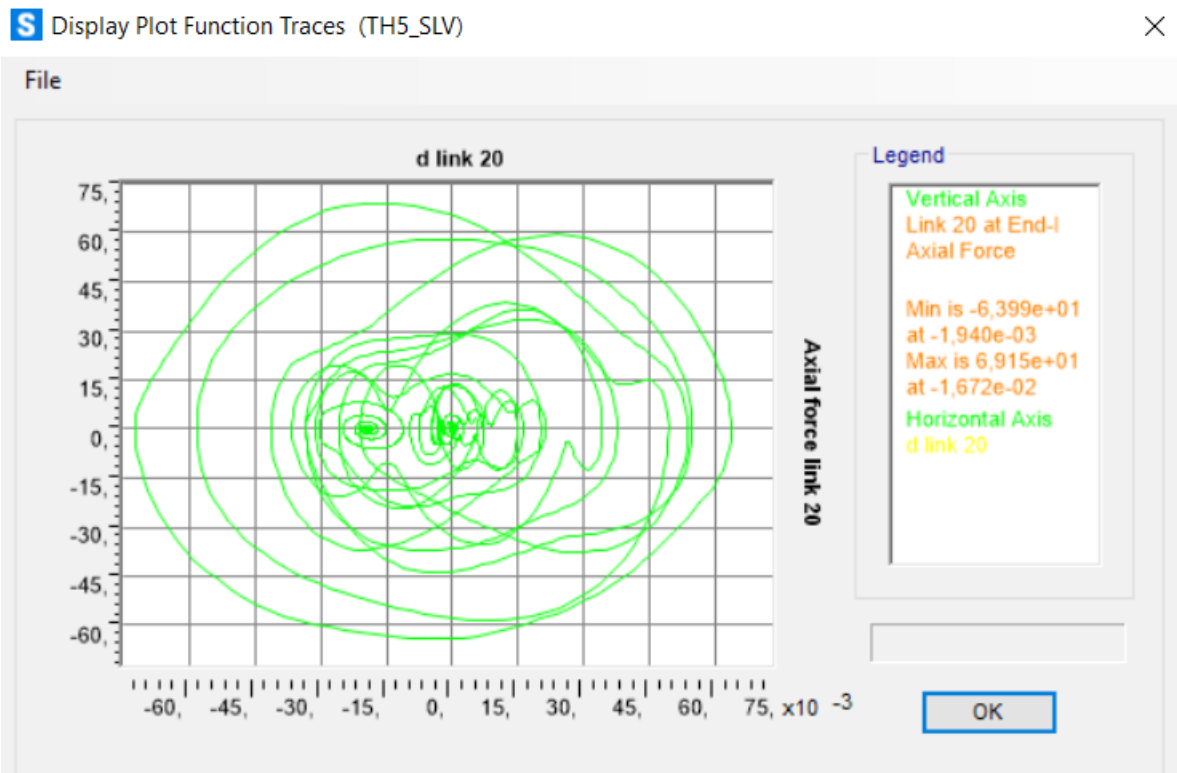


Figura 253. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

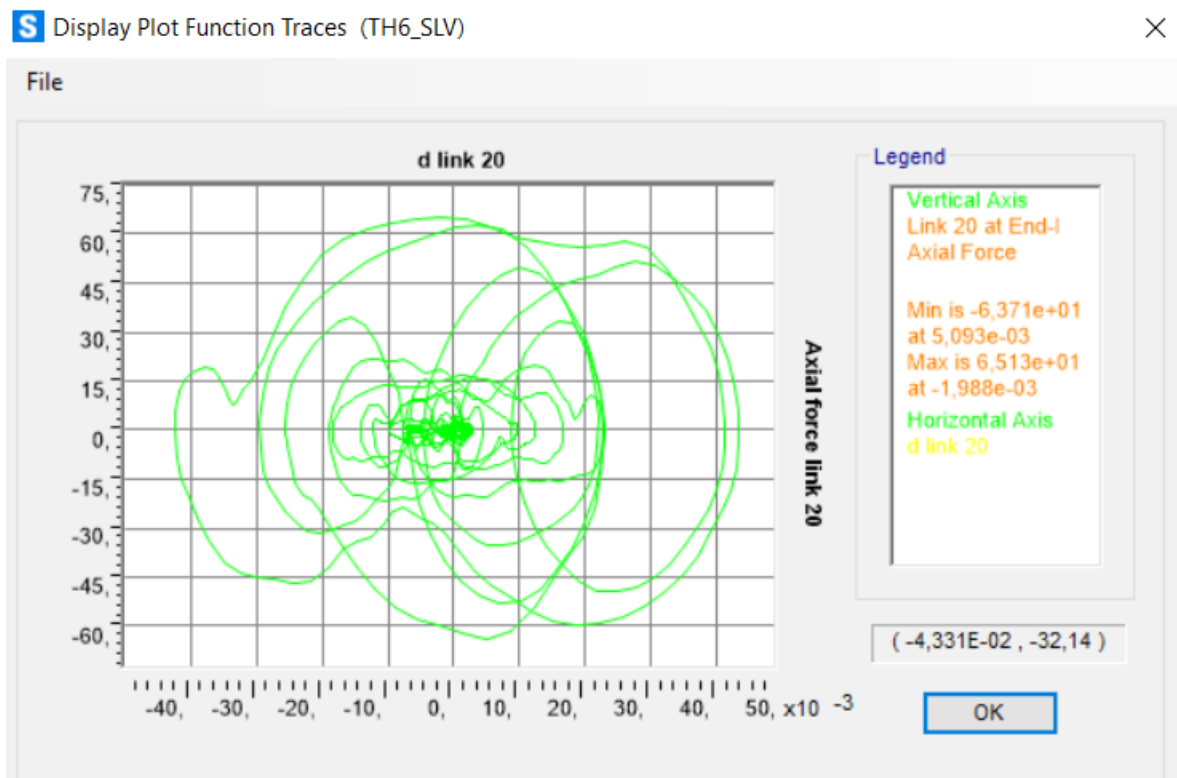


Figura 254. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

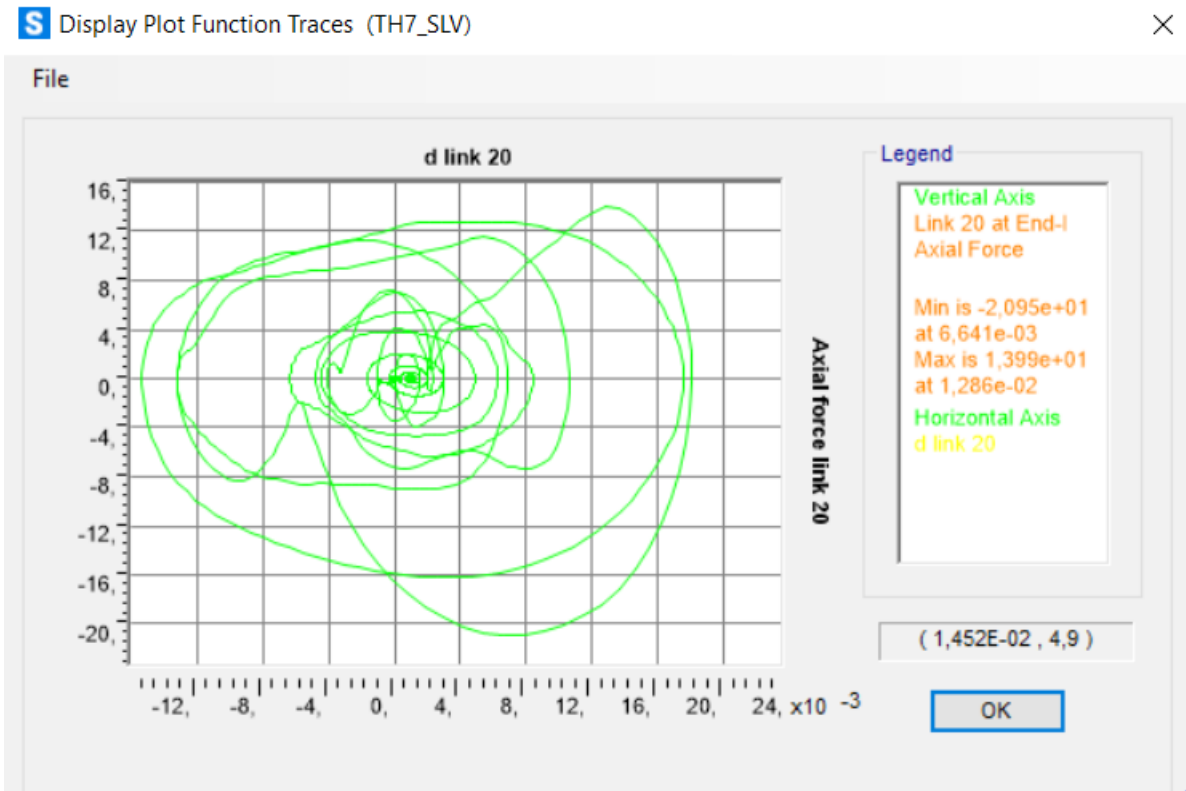


Figura 255. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

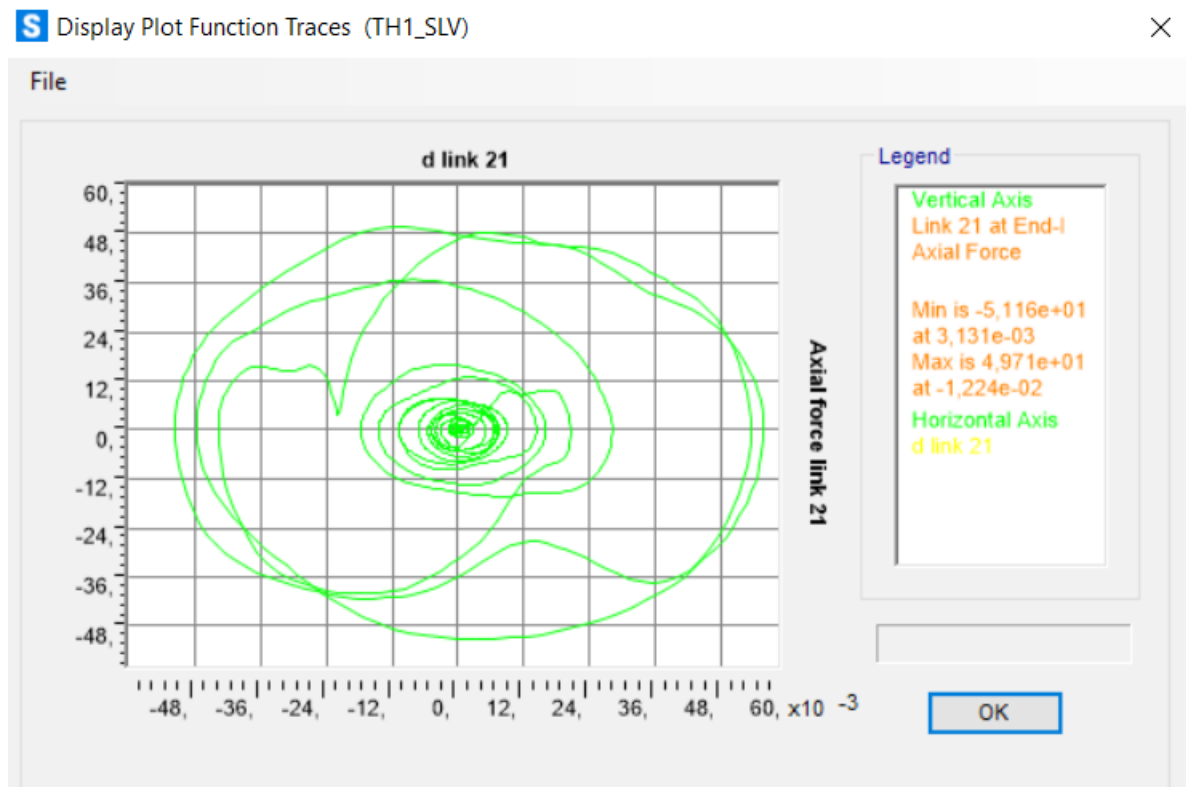


Figura 256. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

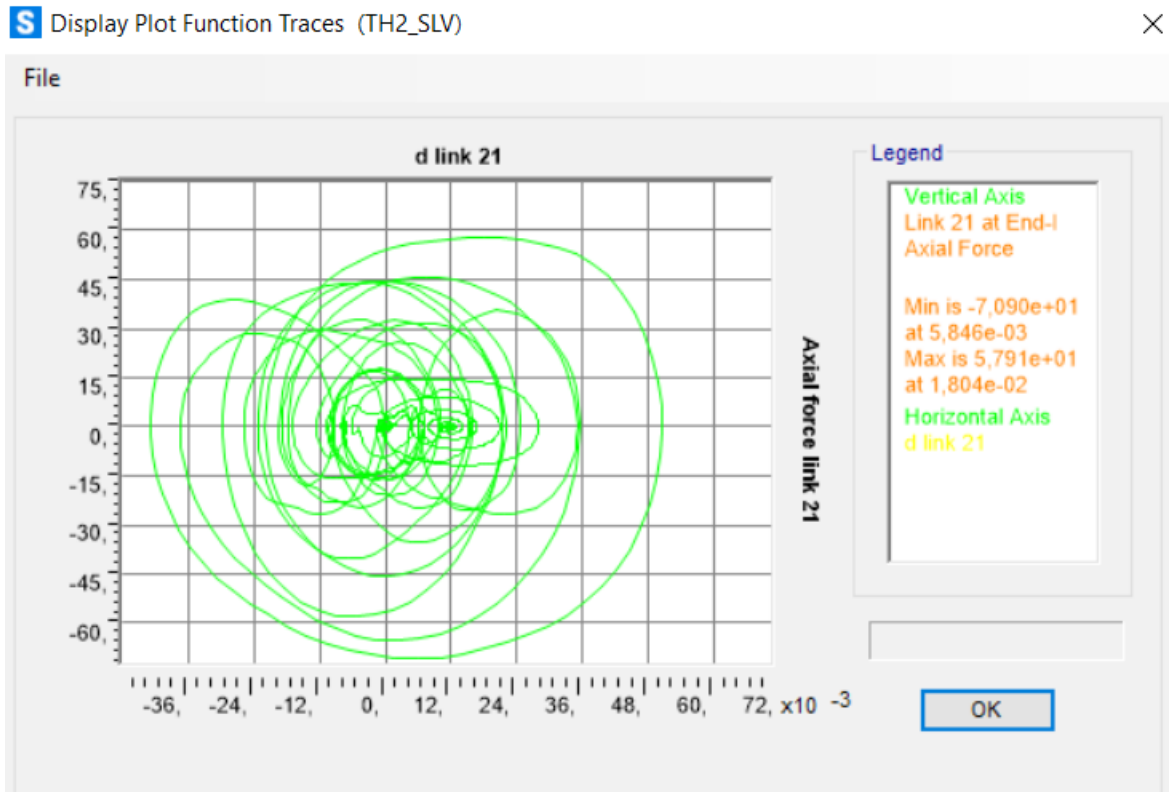


Figura 257. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

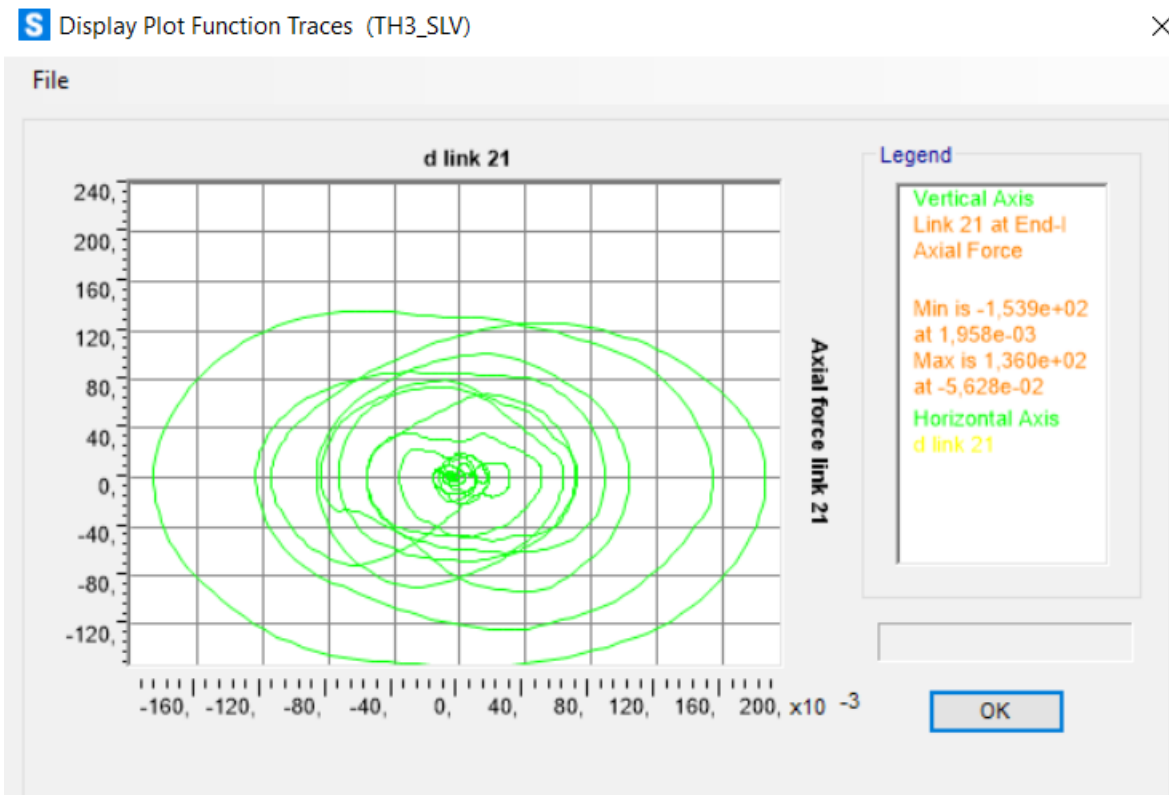


Figura 258. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

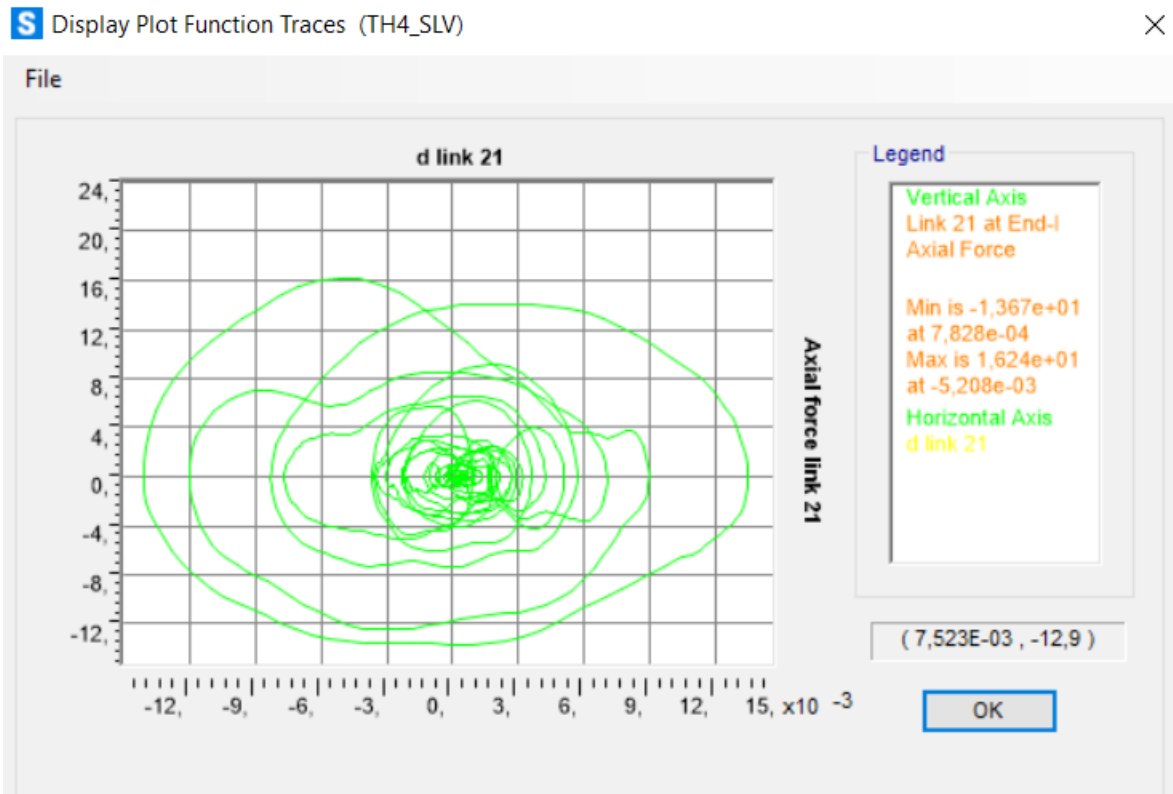


Figura 259. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

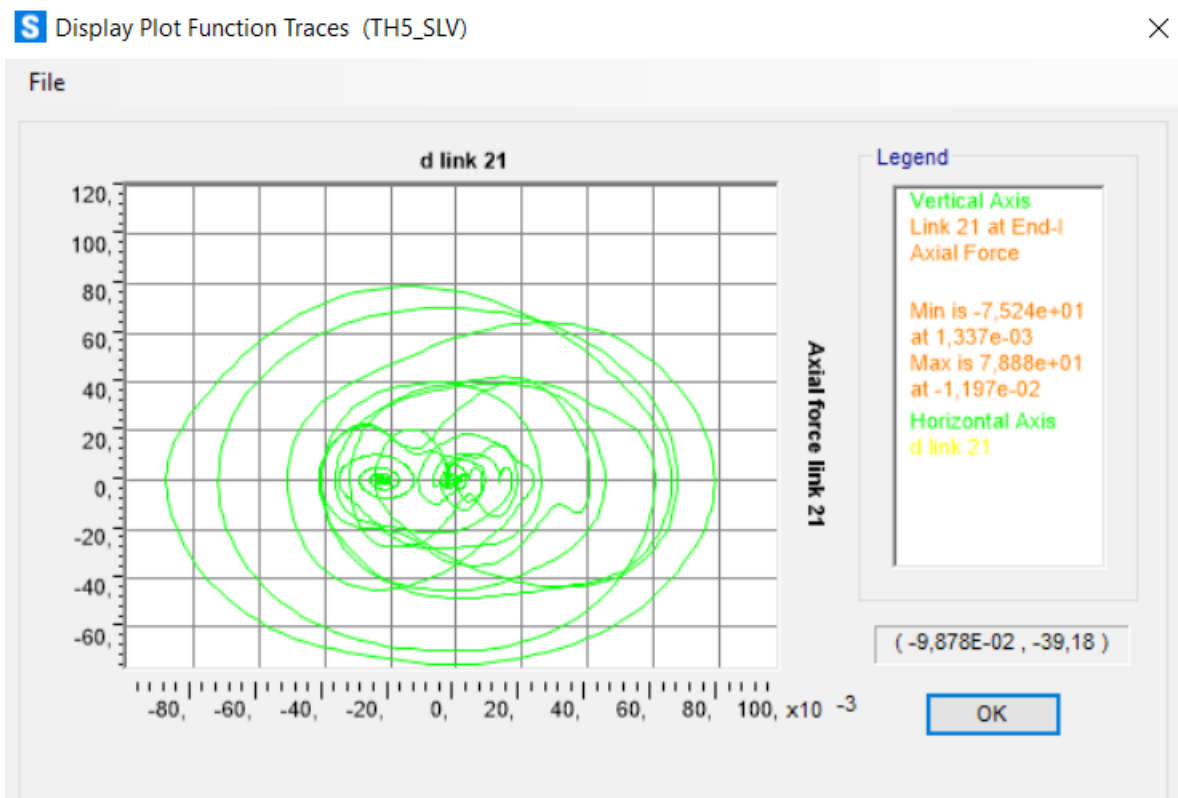


Figura 260. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

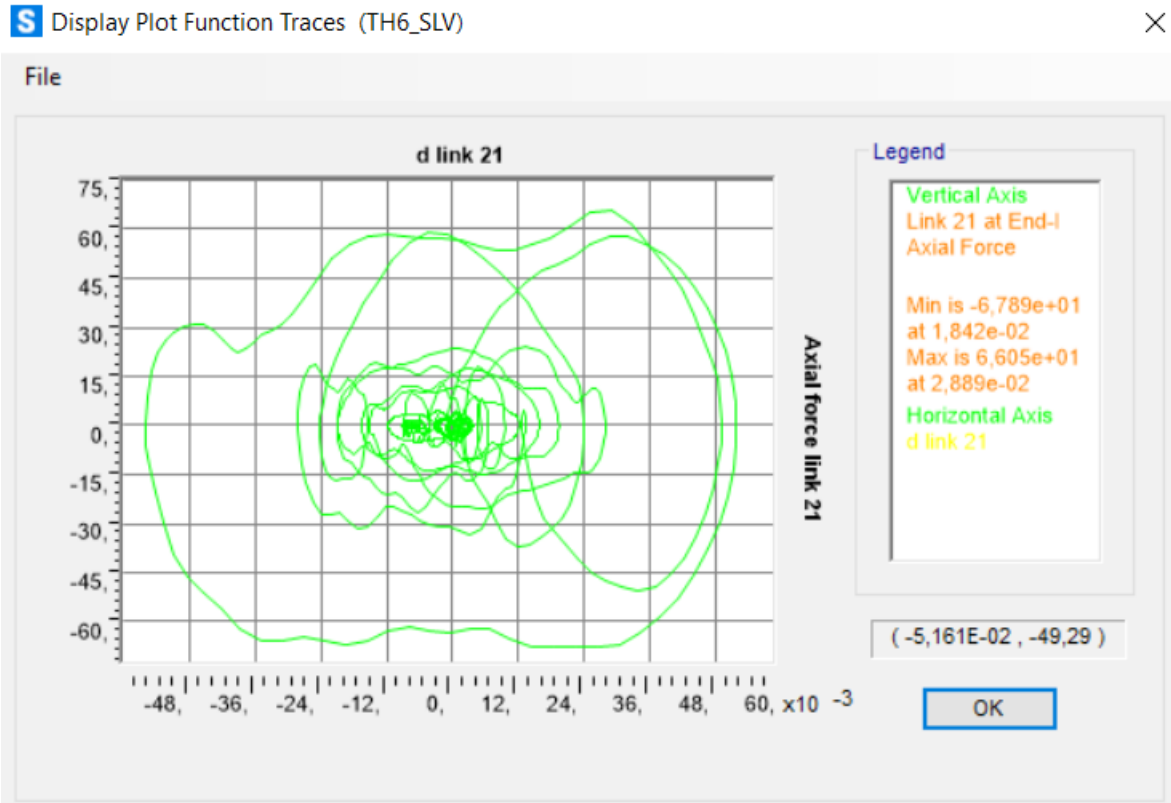


Figura 261. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

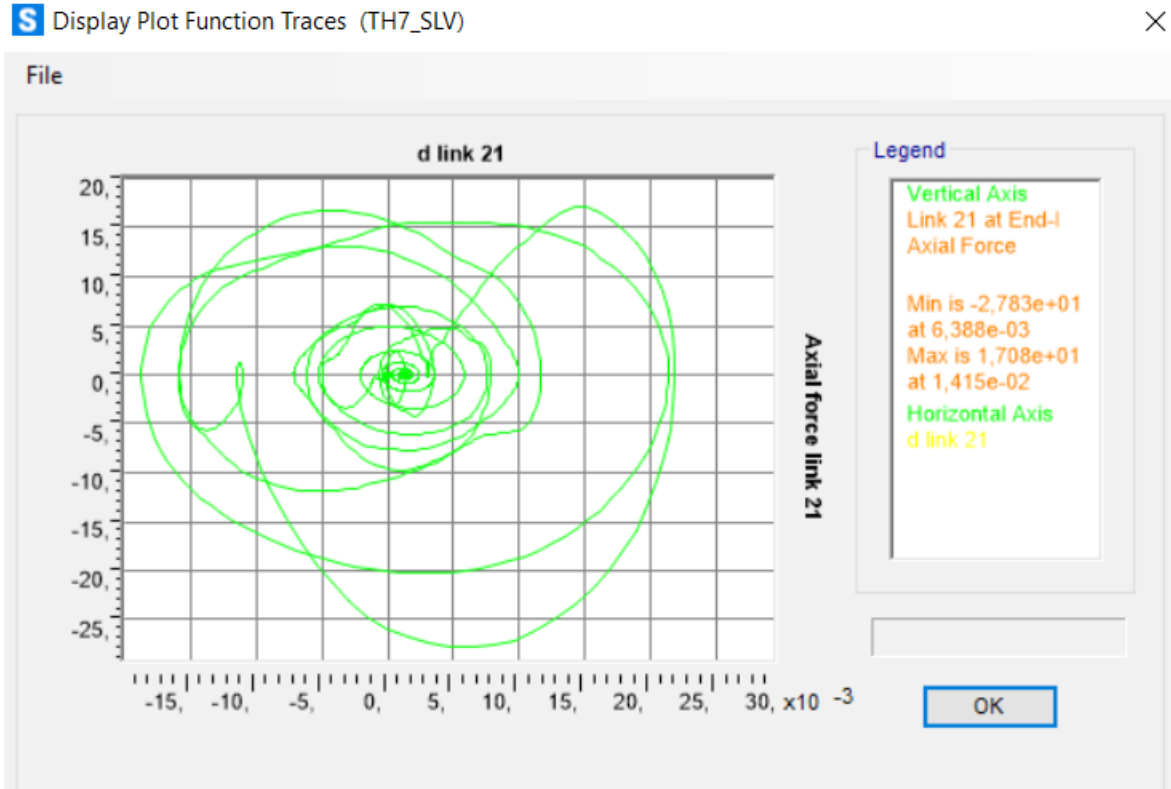


Figura 262. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Si procede allo studio del terzo modello preso in considerazione ovvero quello con i dissipatori magnetoreologici alimentati.

Nel momento in cui viene variato il campo magnetico mediante un voltaggio di corrente elettrica (compreso tra 0-2,25V) applicato ad un elettrocalamità, il dissipatore assume un comportamento equivalente ad un modello fisico, costituito da un elemento caratterizzato da attrito di Coulomb posto in parallelo con uno smorzatore a viscosità lineare. In particolare, si è scelto di attivare l'alimentazione del dissipatore magnetoreologico quando viene superata una soglia prestabilita in termini di spostamento di interpiano in x o in y pari a 0,0153m per tutti i piani, permettendo alla struttura di rimanere in campo elastico. Si è scelto questo valore come soglia limite in termini di spostamento di interpiano, in quanto, dopo aver analizzato il modello con i dissipatori magnetoreologici non alimentati, si è evidenziato che tale valore rappresenta il limite elastico nei piani 2, 3 e 5 in direzione x. Questo è possibile notarlo nella tabella sottostante inerente agli spostamenti di interpiano del modello con i dissipatori magnetoreologici non alimentati:

N° piano	dr x	dr y	0,5% h piano	Verifica x	Verifica y	Rapporto dr x	Rapporto dr y
(-)	(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(%)	(%)
1	0,0147	0,0127	0,0168	Ok	Ok	0,44	0,38
2	0,0184	0,0152	0,0168	NonOk	Ok	0,55	0,45
3	0,0171	0,0155	0,0168	NonOk	Ok	0,51	0,46
4	0,0152	0,0144	0,0153	Ok	Ok	0,50	0,47
5	0,0181	0,0137	0,0153	NonOk	Ok	0,59	0,45
6	0,0145	0,0099	0,0153	Ok	Ok	0,47	0,33

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

La modellazione al Sap 2000 del dissipatore magnetoreologico alimentato consiste nel sovrapporre due tipologie di dissipatori:

- un dissipatore viscoso modellato con elementi linear link;
- un dissipatore elasto-plastico modellato secondo la teoria di Wen del 1976.

Inizialmente si procede definendo i due dissipatori mediante la seguente procedura: define > section properties > link/support properties. Poi si inseriscono le rispettive costanti di dissipazione nel primo dissipatore viscoso relative al local axis U1 (asse locale assiale dell'elemento linear link) e le forze di snervamento F_y nel secondo dissipatore elasto-plastico per entrambi le direzioni di analisi.

Le tabelle finali inerenti alle costanti di dissipazione definitive (da inserire nel programma di calcolo agli elementi finiti) sono le seguenti:

Parametri di progetto									
Direzione x									
N° piano	T1	ξ_t	ξ_d	ξ_{tot}	η	c/2	Fd/2	Fy/2	F/2
(-)	(s)	(%)	(%)	(%)	(-)	(kN/m*s)	(kN)	(kN)	(kN)
3	1,355	5	11,5	16,5	0,6820	153,08	32,39	25,93	58,22
4	1,355	5	11,5	16,5	0,6820	153,08	42,09	25,93	68,03
5	1,355	5	11,5	16,5	0,6820	153,08	51,56	25,93	77,49

Parametri di progetto									
Direzione y									
N° piano	T2	ξ_t	ξ_d	ξ_{tot}	η	c/2	Fd/2	Fy/2	F/2
(-)	(s)	(%)	(%)	(%)	(-)	(kN/m*s)	(kN)	(kN)	(kN)
3	1,227	5	11,5	16,5	0,6820	169,20	35,14	25,95	61,09
4	1,227	5	11,5	16,5	0,6820	169,20	45,73	25,95	71,68
5	1,227	5	11,5	16,5	0,6820	169,20	55,13	25,95	81,08

La figura sottostante mostra i parametri specifici inseriti nel programma di calcolo:

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Link/Support Property Data ×

Link/Support Type:

Property Name:

Property Notes:

P-Delta Parameters

Shear Couple
 Equal End Moments
 Advanced

Total Mass and Weight

Mass	<input type="text" value="0,"/>	Rotational Inertia 1	<input type="text" value="0,"/>
Weight	<input type="text" value="0,"/>	Rotational Inertia 2	<input type="text" value="0,"/>
		Rotational Inertia 3	<input type="text" value="0,"/>

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring:

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs:

Directional Properties

Direction	Fixed	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for All..."/>	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>		

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases:

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping:

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor:

Figura 263. Immagine 1 relativa alla modellazione del dissipatore viscoso in direzione x nel modello con dissipatore magnetoreologico alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Linear Link/Support Directional Properties ×

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0,					

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
153,08					

Shear Distance from End J

U2

U3

Units

KN, m, C

Figura 264. Immagine 2 relativa alla modellazione del dissipatore viscoso in direzione x nel modello con dissipatore magnetoreologico alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Link/Support Property Data ×

Link/Support Type:

Property Name:

Property Notes:

P-Delta Parameters

Shear Couple
 Equal End Moments
 Advanced

Total Mass and Weight

Mass	<input type="text" value="0,"/>	Rotational Inertia 1	<input type="text" value="0,"/>
Weight	<input type="text" value="0,"/>	Rotational Inertia 2	<input type="text" value="0,"/>
		Rotational Inertia 3	<input type="text" value="0,"/>

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring:

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs:

Directional Properties

Direction	Fixed	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for All..."/>	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>		

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases:

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping:

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor:

Figura 265. Immagine 1 relativa alla modellazione del dissipatore viscoso in direzione y nel modello con dissipatore magnetoreologico alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Linear Link/Support Directional Properties

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2

U3

Units

KN, m, C

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0,					

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
169,2					

OK Cancel

Figura 266. Immagine 2 relativa alla modellazione del dissipatore viscoso in direzione y nel modello con dissipatore magnetoreologico alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Link/Support Property Data

×

Link/Support Type: Plastic (Wen)

Property Name: Dissipatore plastico in x Set Default Name

Property Notes: Modify/Show...

P-Delta Parameters

Shear Couple

Equal End Moments

Advanced Modify/Show

Total Mass and Weight

Mass	<input type="text" value="0,"/>	Rotational Inertia 1	<input type="text" value="0,"/>
Weight	<input type="text" value="0,"/>	Rotational Inertia 2	<input type="text" value="0,"/>
		Rotational Inertia 3	<input type="text" value="0,"/>

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring:

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs:

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...	<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...	<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases: Effective Stiffness from Zero, Else Nonlinear

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping: Initial Stiffness (K0)

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor:

OK Cancel

Figura 267. Immagine 1 relativa alla modellazione del dissipatore plastico in direzione x nel modello con dissipatore magnetoreologico alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Link/Support Directional Properties ×

Identification	
Property Name	Dissipatore plastico in x
Direction	U1
Type	Plastic (Wen)
NonLinear	Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	0,
Effective Damping	0,

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	100000,
Yield Strength	25,93
Post Yield Stiffness Ratio	0,
Yielding Exponent	10,

Figura 268. Immagine 2 relativa alla modellazione del dissipatore plastico in direzione x nel modello con dissipatore magnetoreologico alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Link/Support Property Data

×

Link/Support Type: Plastic (Wen)

Property Name: Dissipatore plastico in y

Property Notes: Modify/Show...

P-Delta Parameters

- Shear Couple
- Equal End Moments
- Advanced

Modify/Show

Total Mass and Weight

Mass: 0, Rotational Inertia 1: 0,
Weight: 0, Rotational Inertia 2: 0,
Rotational Inertia 3: 0,

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1,
Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1,

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...	<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...	<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases: Effective Stiffness from Zero, Else Nonlinear

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping: Initial Stiffness (K0)

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor: 1,

OK Cancel

Figura 269. Immagine 1 relativa alla modellazione del dissipatore plastico in direzione y nel modello con dissipatore magnetoreologico alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

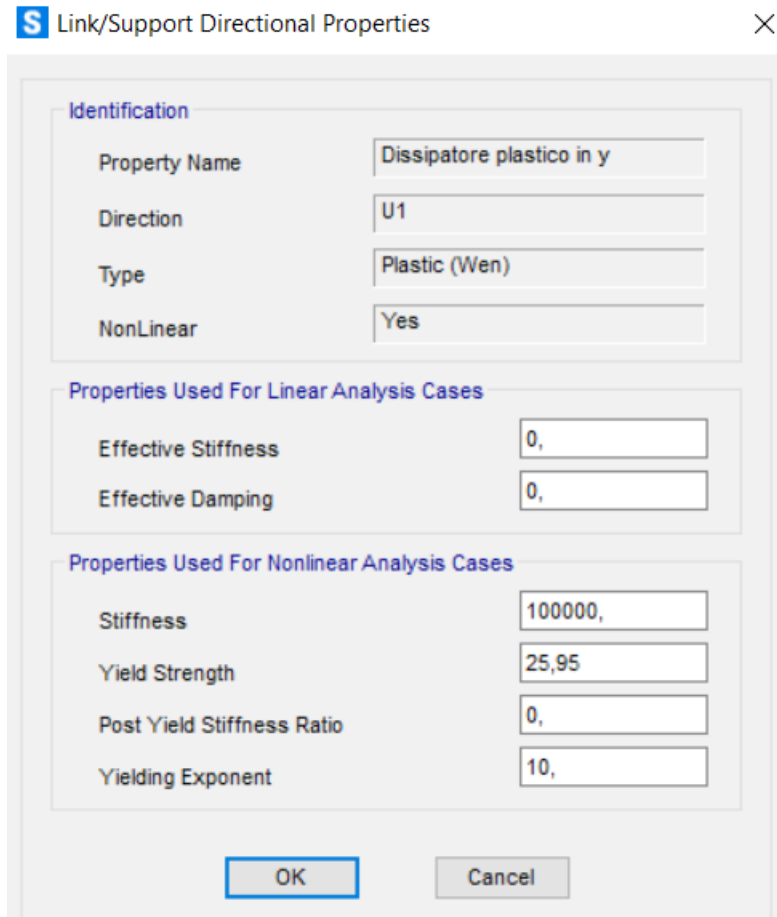


Figura 270. Immagine 2 relativa alla modellazione del dissipatore plastico in direzione y nel modello con dissipatore magnetoreologico alimentato.

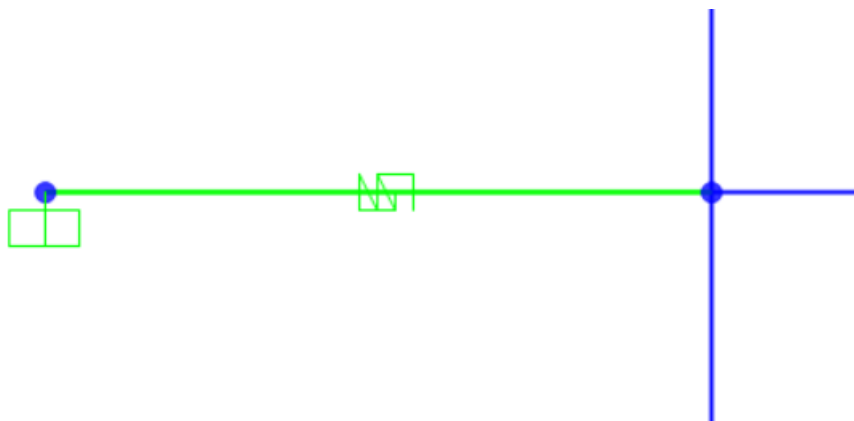


Figura 271. Schema del dissipatore magnetoreologico alimentato.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Definiti i linear link e i plastic link, si disegnano i dissipatori magnetoreologici alimentati ai piani 3, 4, 5 dei due telai in x (telaio 5-6-7-8-9-10 e telaio 11-12-13-14-15-16) e dei due telai in y (telaio 17-12-6-1 e telaio 20-15-9-4) con il comando draw 2 joint link impostando per tutti gli elementi una lunghezza pari ad 1m, un'inclinazione orizzontale ($\alpha=0$) e correlandoli ai rispetti link (linear link e plastic link) creati in precedenza per ogni direzione di analisi. Inoltre per rendere la modellazione più ottimale, viene simulato il collegamento di incastro, nel nodo esterno del dissipatore, con la struttura reticolare in acciaio realizzata con profili HEA260 ed incastrata a terra, mediante la seguente procedura: assign > joint > restraints > selezionare il vincolo d'incastro.

Dopo aver completato la modellazione si procede con l'analisi della struttura mediante il comando analyze > run analysis > run now.

Si espongono ora i risultati dell'analisi dinamica non lineare ottenuti come media dei massimi valori letti nei load cases definiti in precedenza (TH1_SLV, TH2_SLV, TH3_SLV, TH4_SLV, TH5_SLV, TH6_SLV, TH7_SLV) in termini di spostamenti di piano, accelerazioni relative e assolute di piano, velocità relative e assolute di piano, spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi forza-spostamento dei dissipatori magnetoreologici alimentati:

Spostamenti di piano:

N° piano	h piano	dx	dy	dr x	dr y	0,5% h piano
(-)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	3,35	0,0080	0,0071	0,0080	0,0071	0,0168
2	3,35	0,0168	0,0147	0,0088	0,0076	0,0168
3	3,35	0,0240	0,0219	0,0072	0,0072	0,0168
4	3,05	0,0311	0,0284	0,0071	0,0066	0,0153
5	3,05	0,0392	0,0345	0,0081	0,0061	0,0153
6	3,05	0,0456	0,0397	0,0064	0,0051	0,0153

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

N° piano (-)	dr x (m)	dr y (m)	0,5% h piano (m)	Verifica	Verifica	Rapporto	Rapporto
				x (-)	y (-)	dr x (%)	dr y (%)
1	0,0080	0,0071	0,0168	Ok	Ok	0,24	0,21
2	0,0088	0,0076	0,0168	Ok	Ok	0,26	0,23
3	0,0072	0,0072	0,0168	Ok	Ok	0,21	0,21
4	0,0071	0,0066	0,0153	Ok	Ok	0,23	0,22
5	0,0081	0,0061	0,0153	Ok	Ok	0,27	0,20
6	0,0064	0,0051	0,0153	Ok	Ok	0,21	0,17

Dai risultati ottenuti si evidenzia un netto miglioramento rispetto al caso precedente in quanto l'alimentazione elettrica fornita al dissipatore magnetoreologico, garantisce un livello di dissipazione superiore grazie alla nascita della componente attritiva (F_y). Detto questo, la verifica è perfettamente soddisfatta in entrambi le direzioni di analisi, pertanto la struttura rimane in campo elastico.

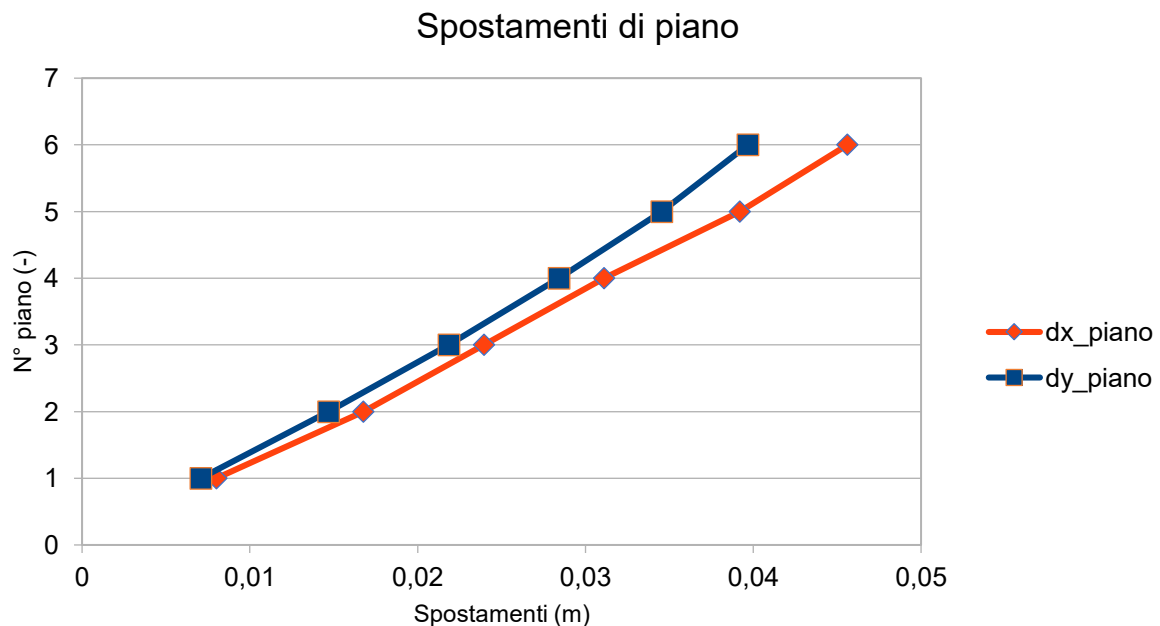


Figura 272. Spostamenti di piano del modello con dissipatori magnetoreologici alimentati.

Accelerazioni relative di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s ²)	U2y (m/s ²)
1	3,35	2,3320	1,8511
2	3,35	3,2100	2,8387
3	3,35	2,9833	2,8064
4	3,05	2,6761	2,6527
5	3,05	2,8564	2,6417
6	3,05	3,8227	3,3422

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

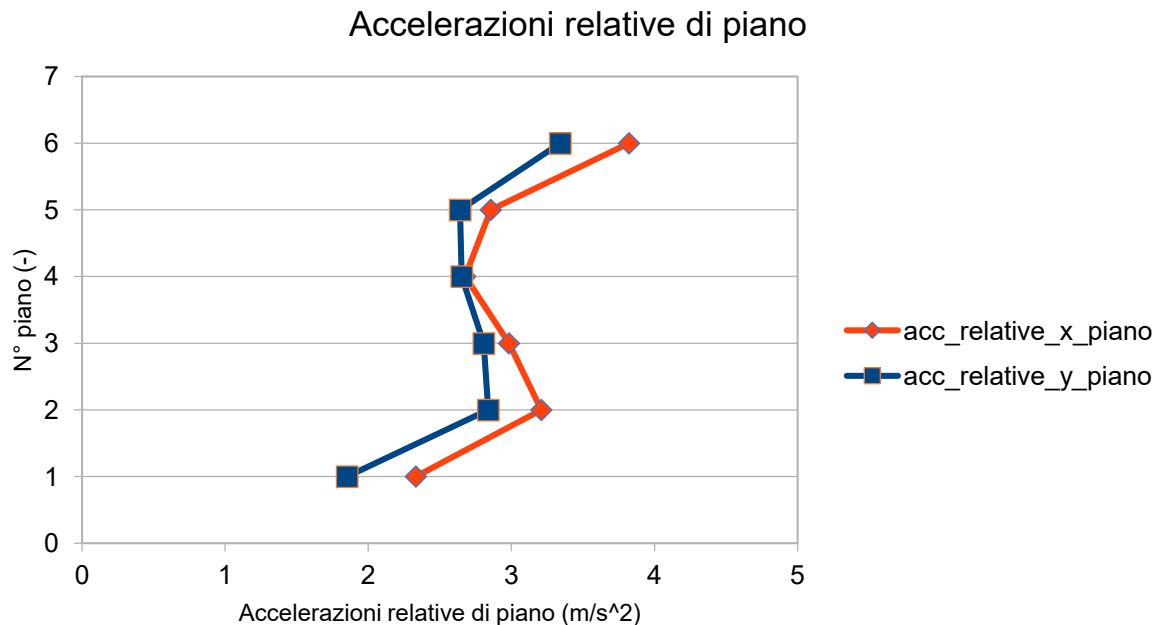


Figura 273. Accelerazioni relative di piano del modello con dissipatori magnetoreologici alimentati.

Accelerazioni assolute di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s ²)	U2y (m/s ²)
1	3,35	2,0757	2,1412
2	3,35	2,3451	2,5322
3	3,35	1,8461	1,9580
4	3,05	1,4531	1,5665
5	3,05	1,4609	1,4226
6	3,05	2,1429	2,2280

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

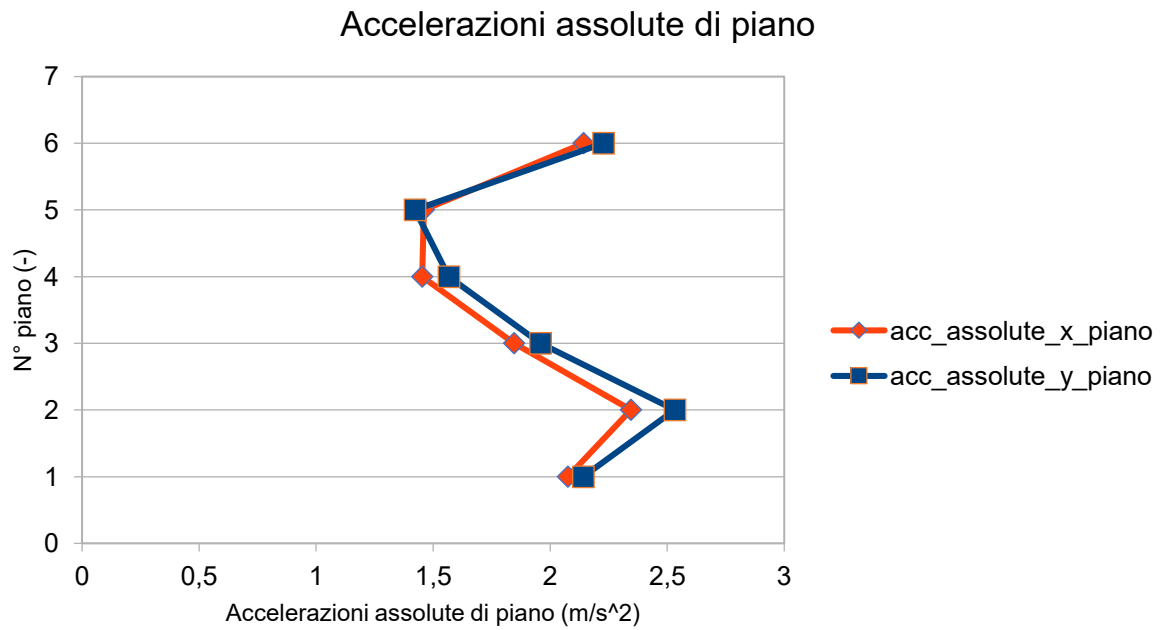


Figura 274. Accelerazioni assolute di piano del modello con dissipatori magnetoreologici alimentati.

Velocità relative di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s)	U2y (m/s)
1	3,35	0,0828	0,0807
2	3,35	0,1480	0,1452
3	3,35	0,1683	0,1655
4	3,05	0,1958	0,1855
5	3,05	0,2394	0,2229
6	3,05	0,3018	0,2534

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

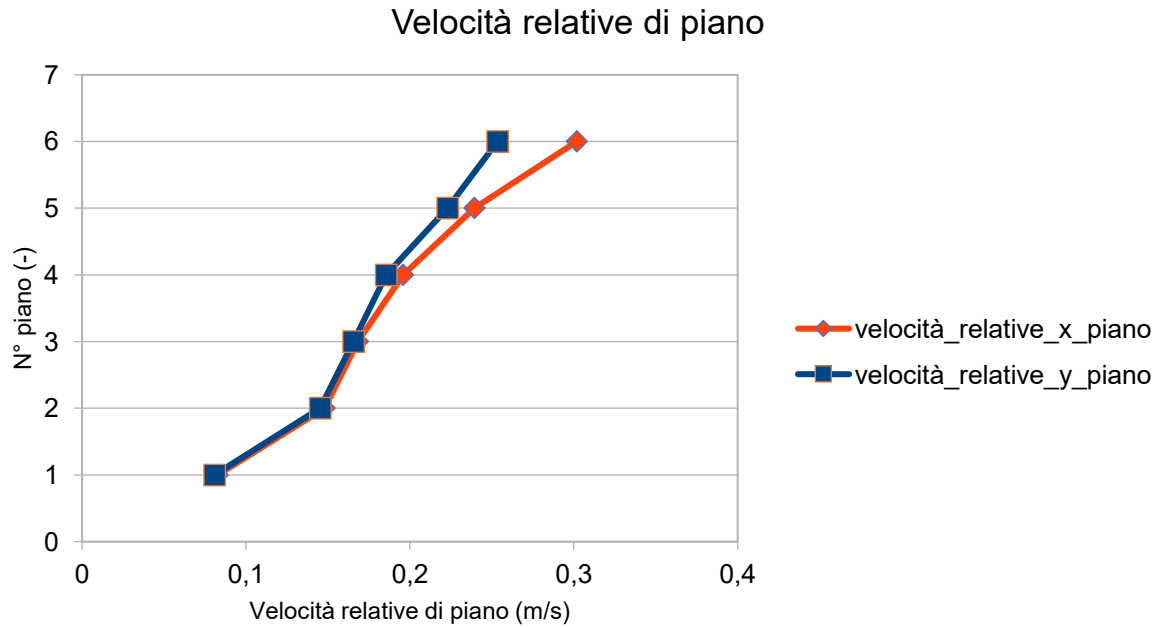


Figura 275. Velocità relative di piano del modello con dissipatori magnetoreologici alimentati.

Velocità assolute di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s)	U2y (m/s)
1	3,35	1,0955	1,2562
2	3,35	1,1016	1,2592
3	3,35	1,0954	1,2553
4	3,05	1,0942	1,2522
5	3,05	1,0989	1,2496
6	3,05	1,1053	1,2518

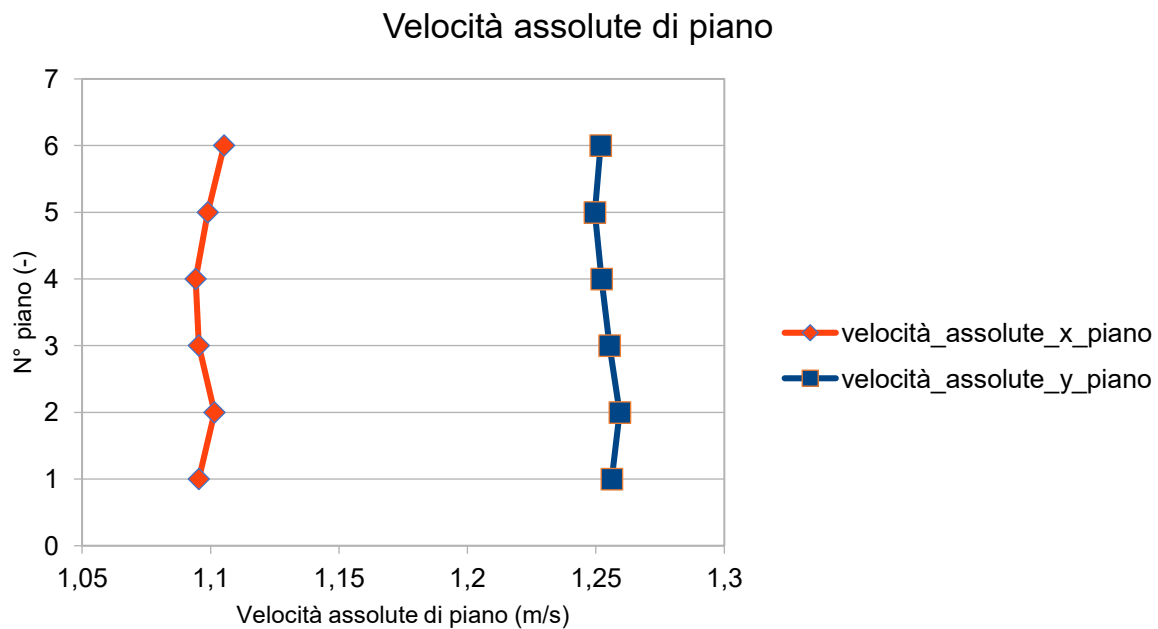


Figura 276. Velocità assolute di piano del modello con dissipatori magnetoreologici alimentati.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori magnetoreologici alimentati del telaio 5-6-7-8-9-10 in direzione x.

Dissipatore viscoso:

Telaio 5-6-7-8-9-10 (direzione x)			
N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	27	0,0235	0,0030
4	26	0,0304	0,0030
5	25	0,0382	0,0028

Telaio 5-6-7-8-9-10 (direzione x)		
N° piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	27	25,16
4	26	29,51
5	25	36,15

Piano 3:

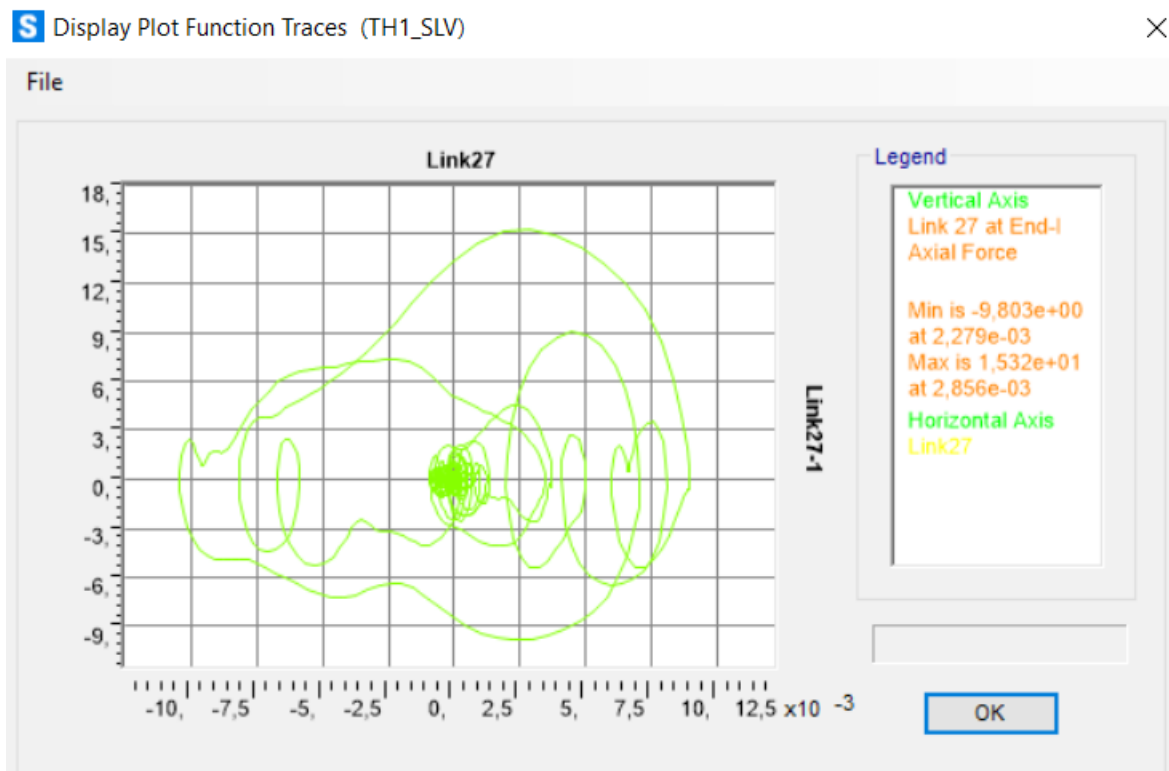


Figura 277. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

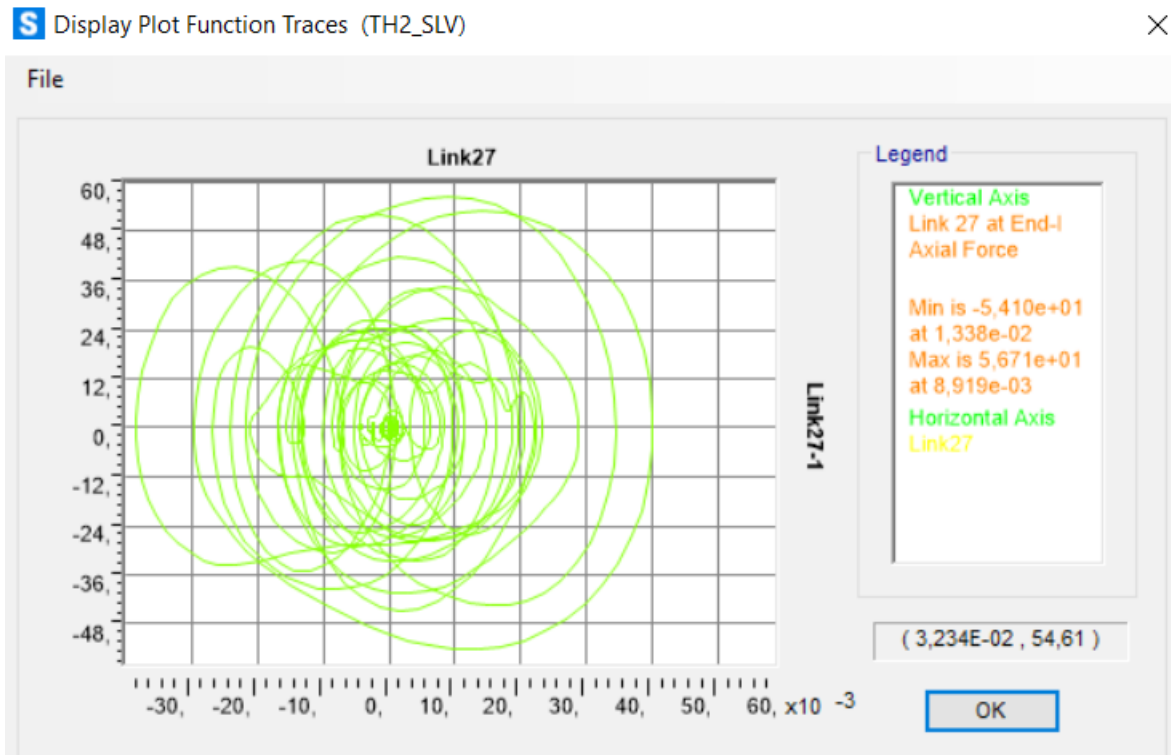


Figura 278. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

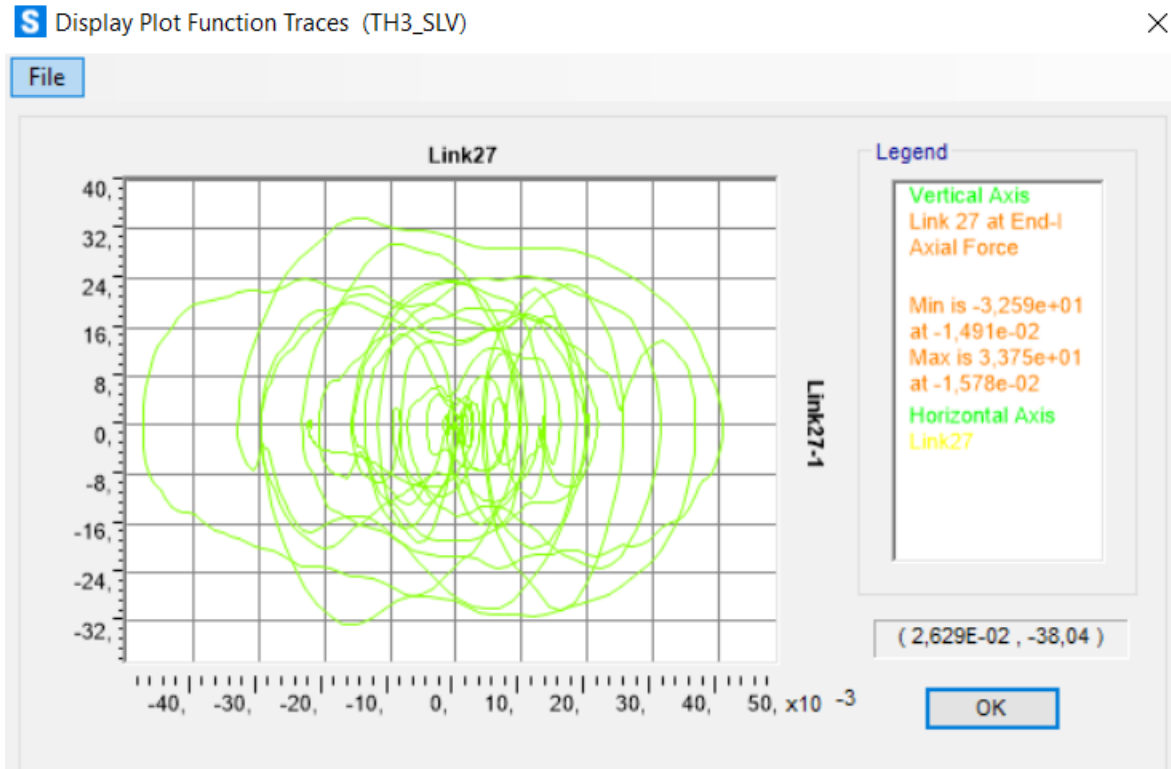


Figura 279. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

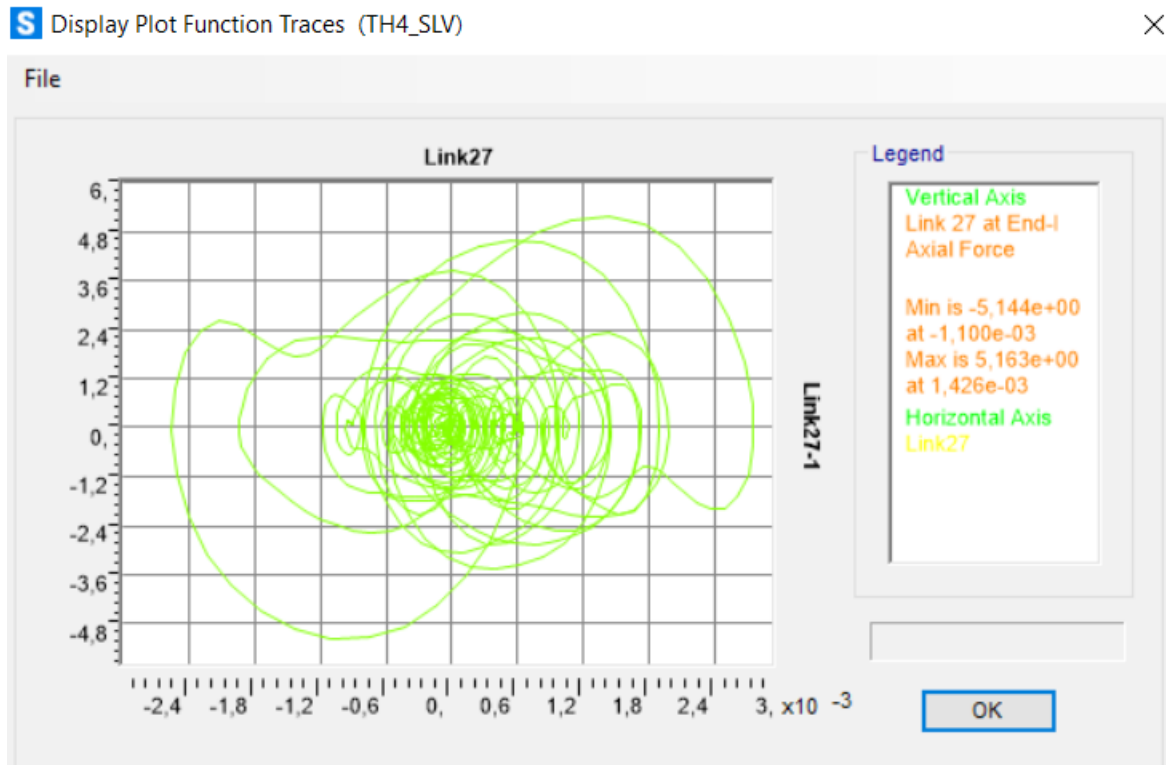


Figura 280. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

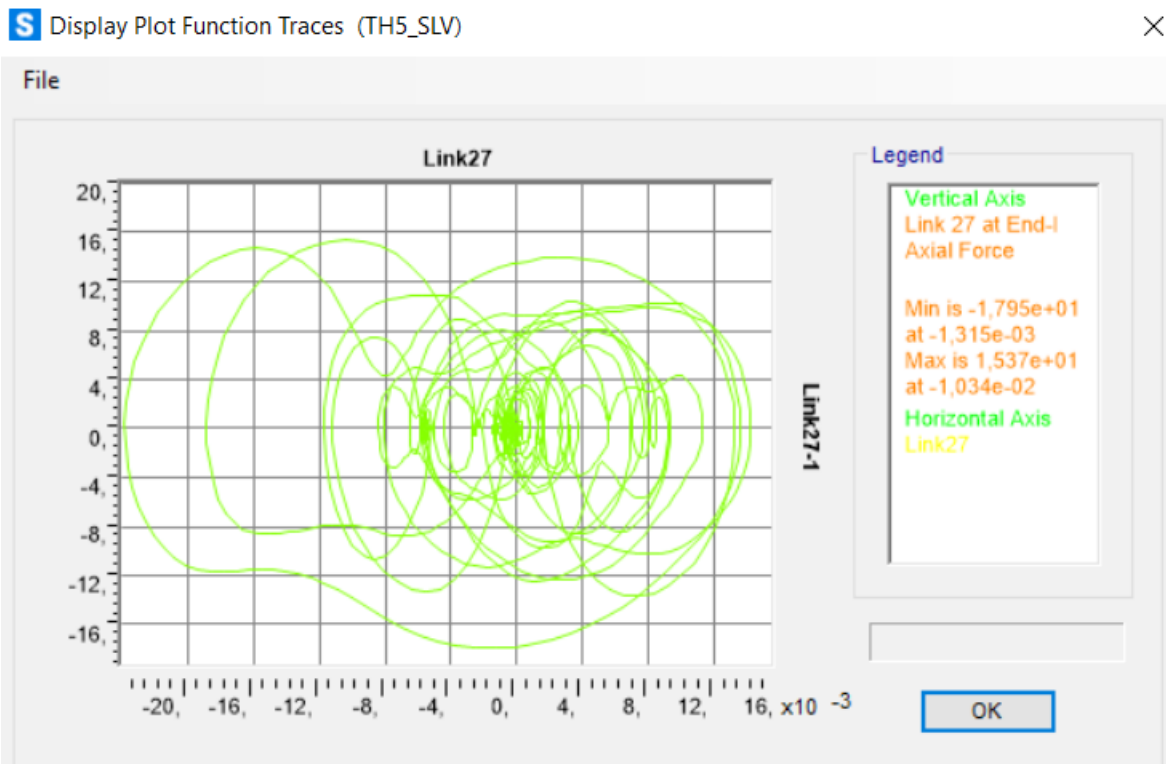


Figura 281. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

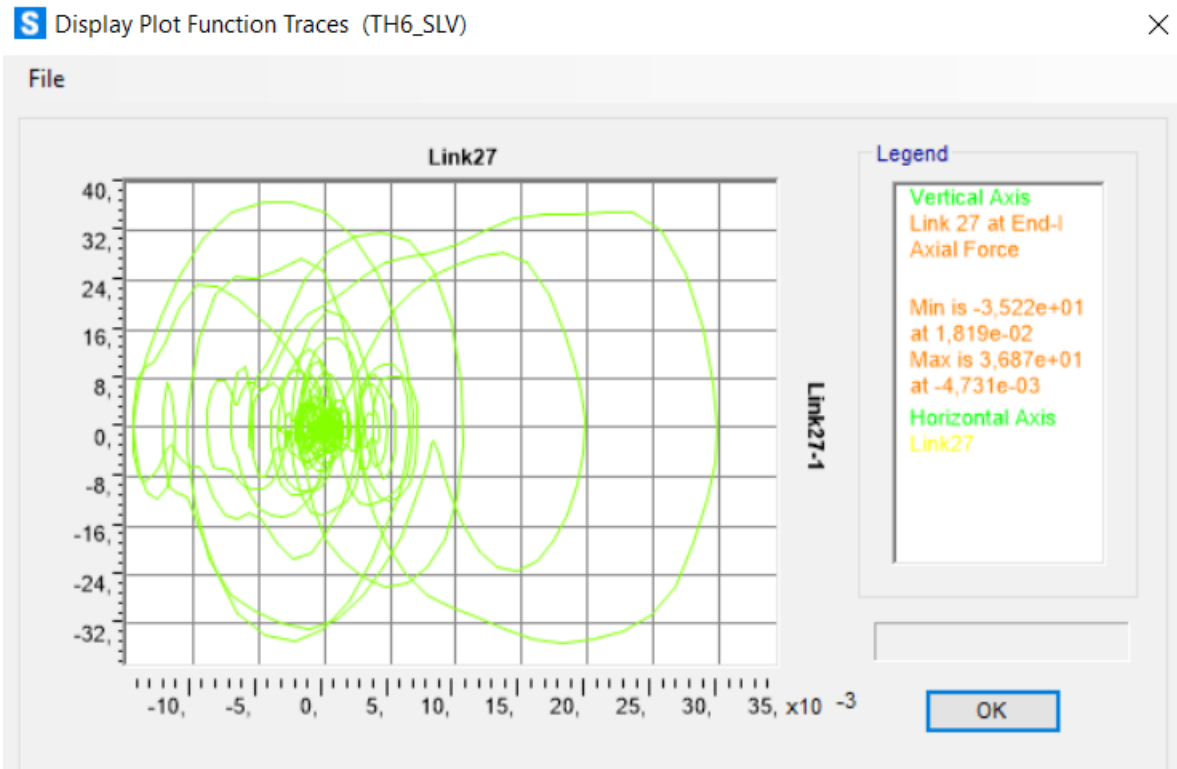


Figura 282. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

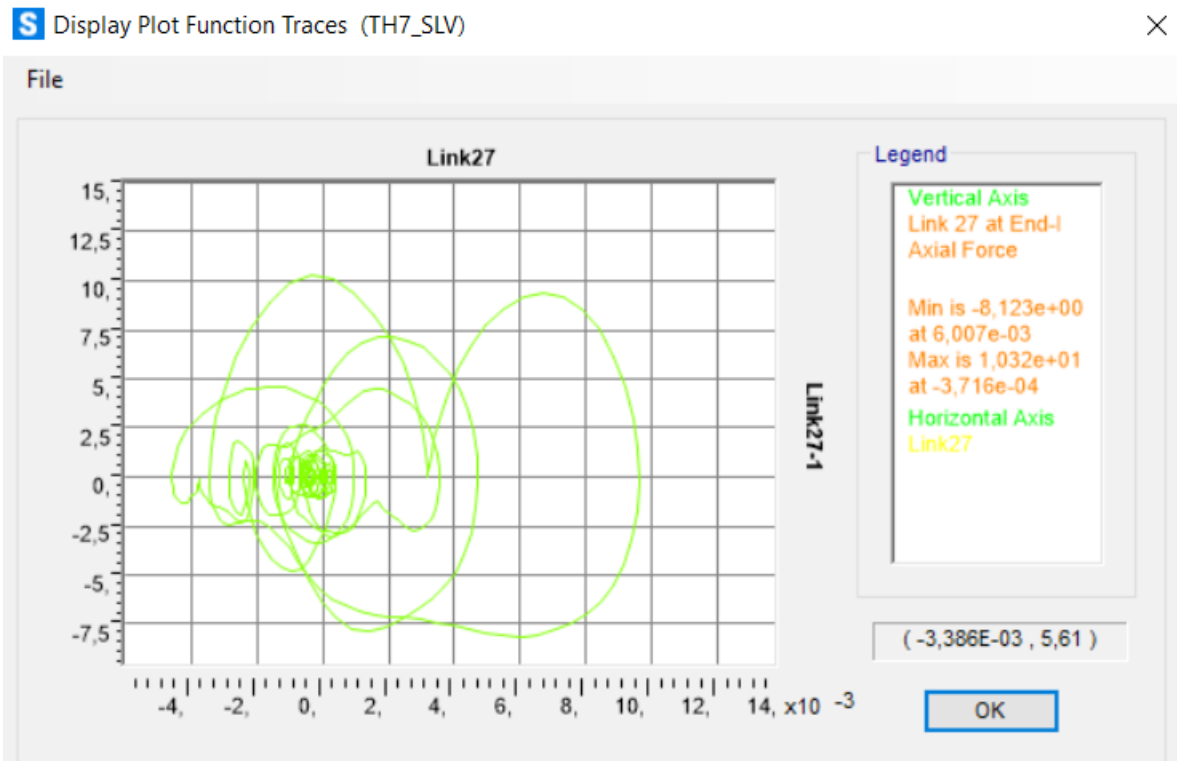


Figura 283. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

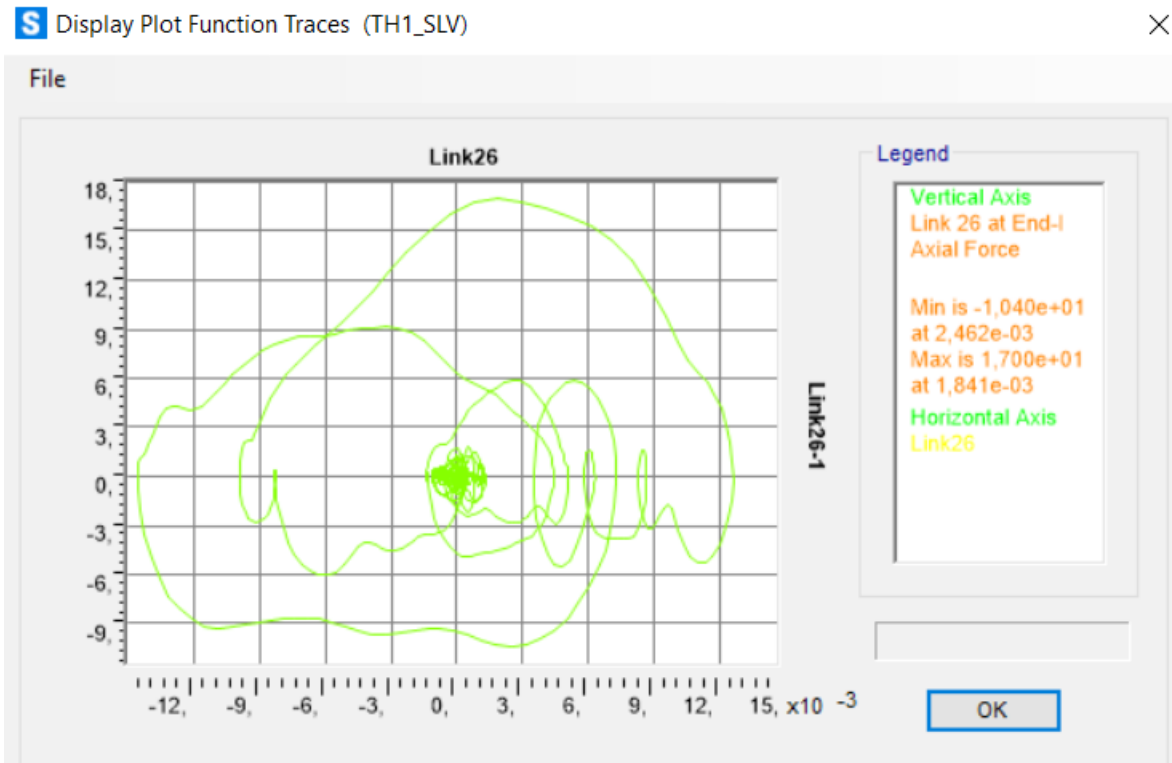


Figura 284. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

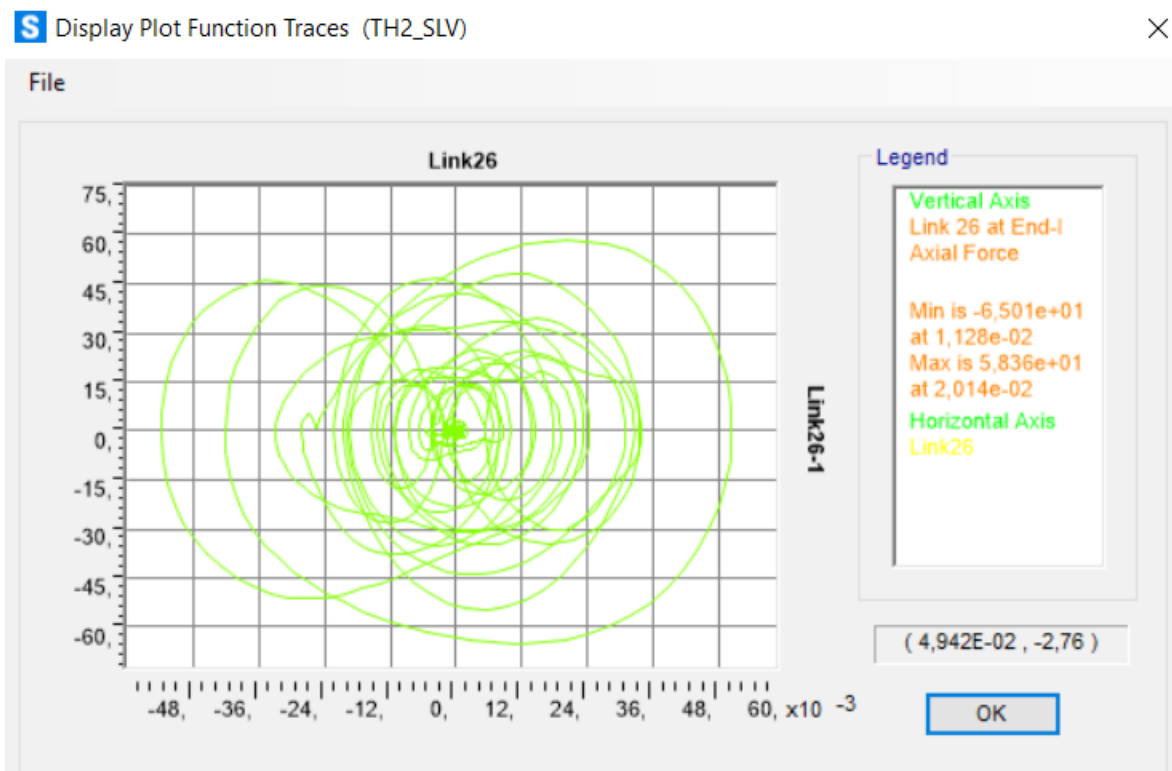


Figura 285. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

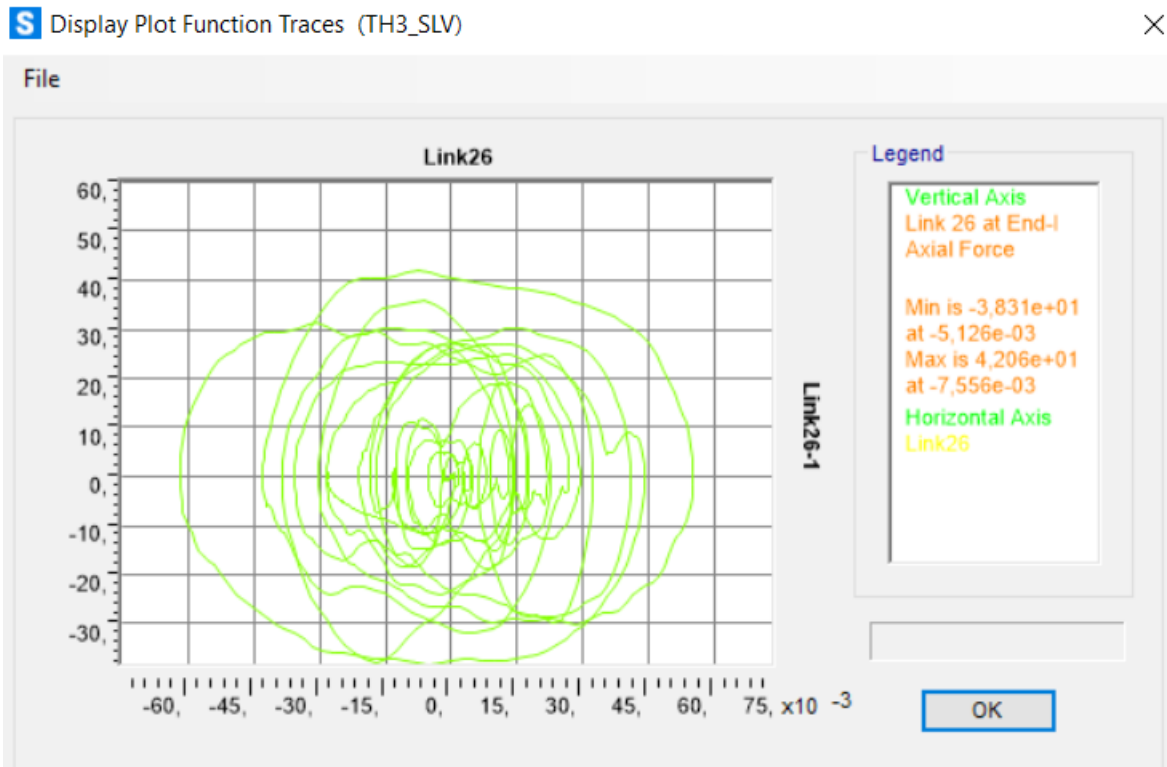


Figura 286. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

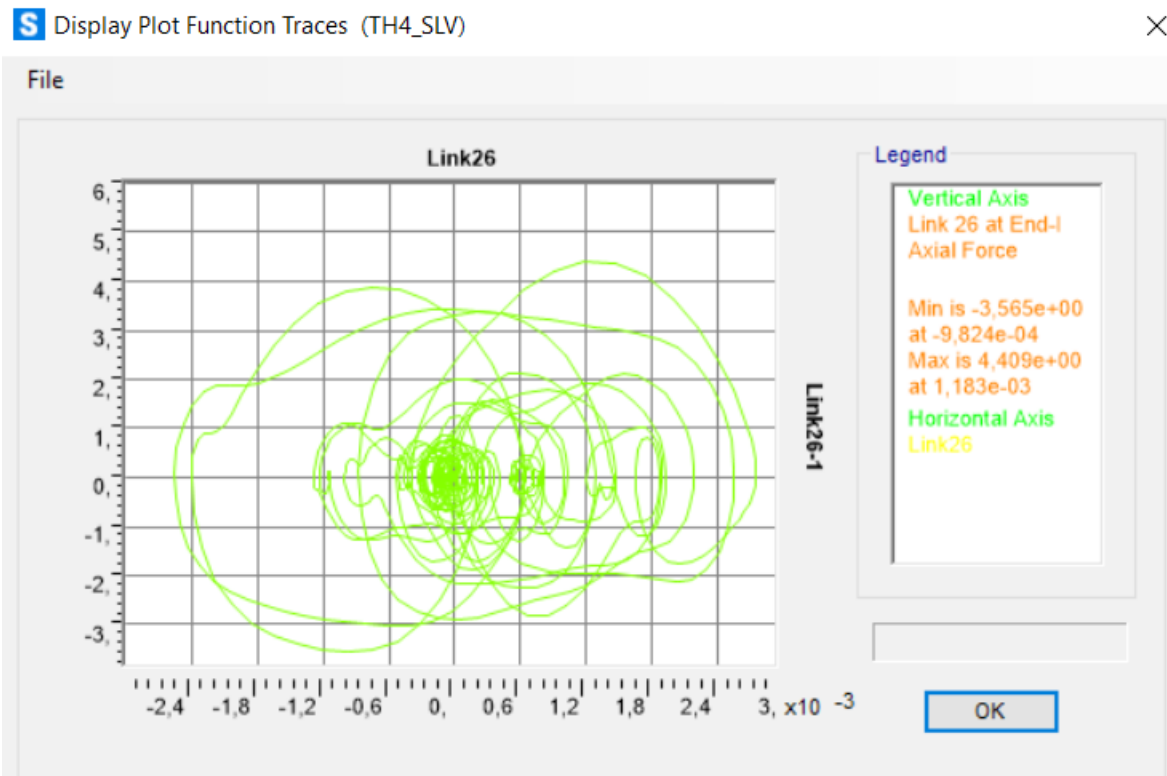


Figura 287. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

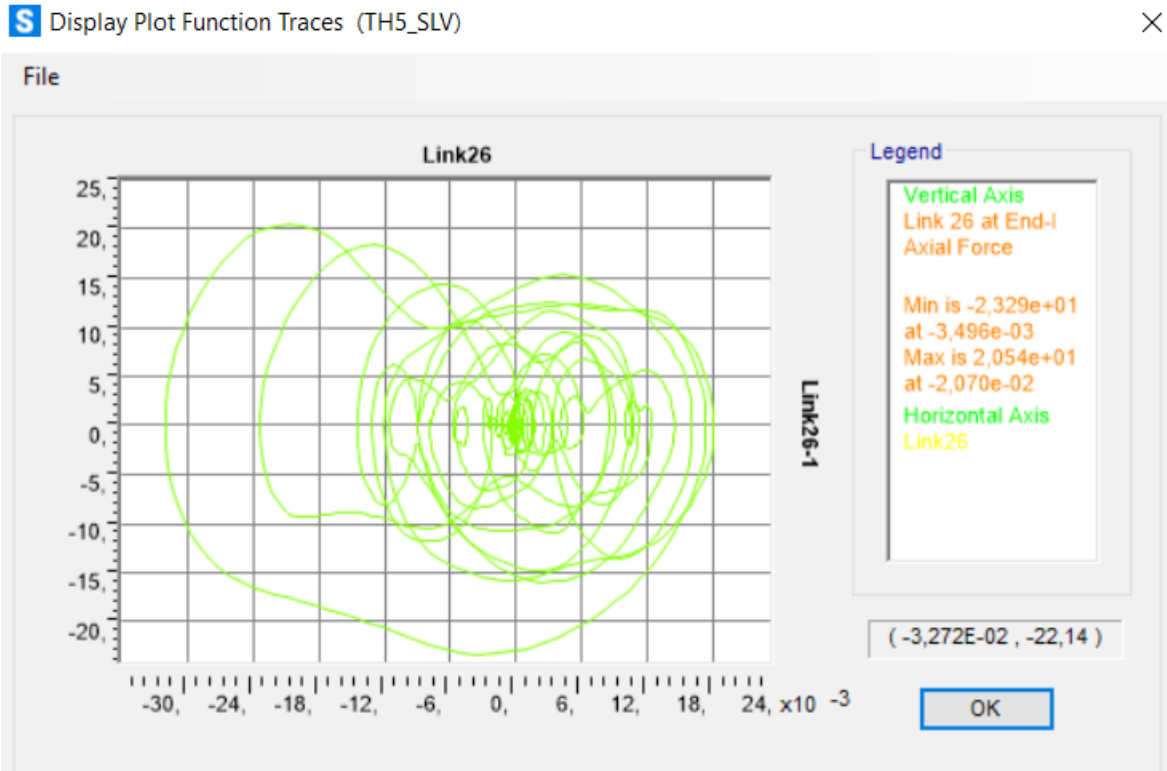


Figura 288. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

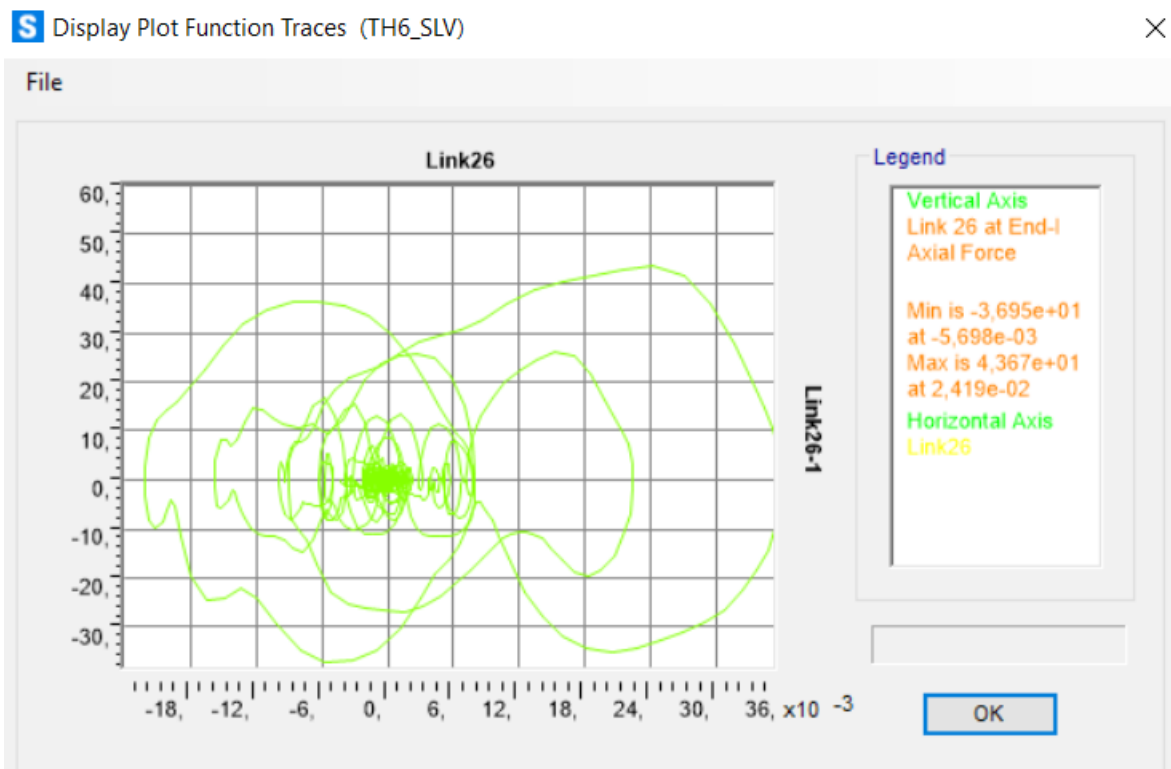


Figura 289. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

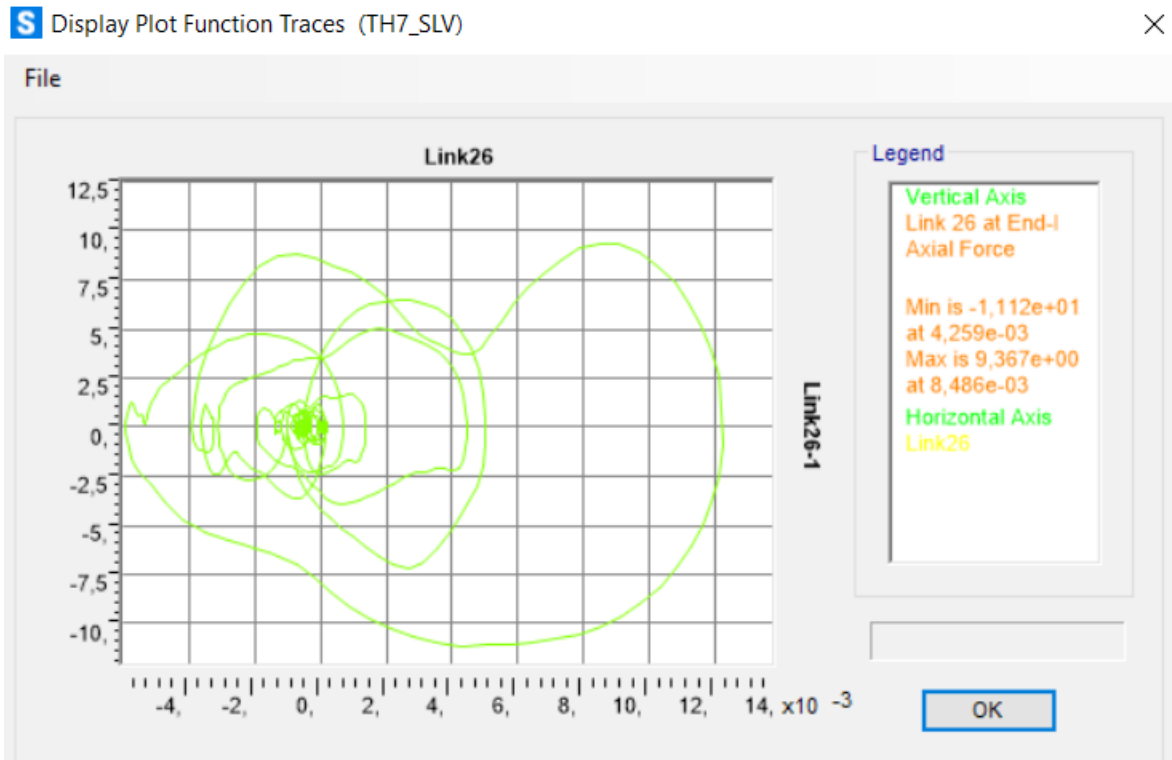


Figura 290. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

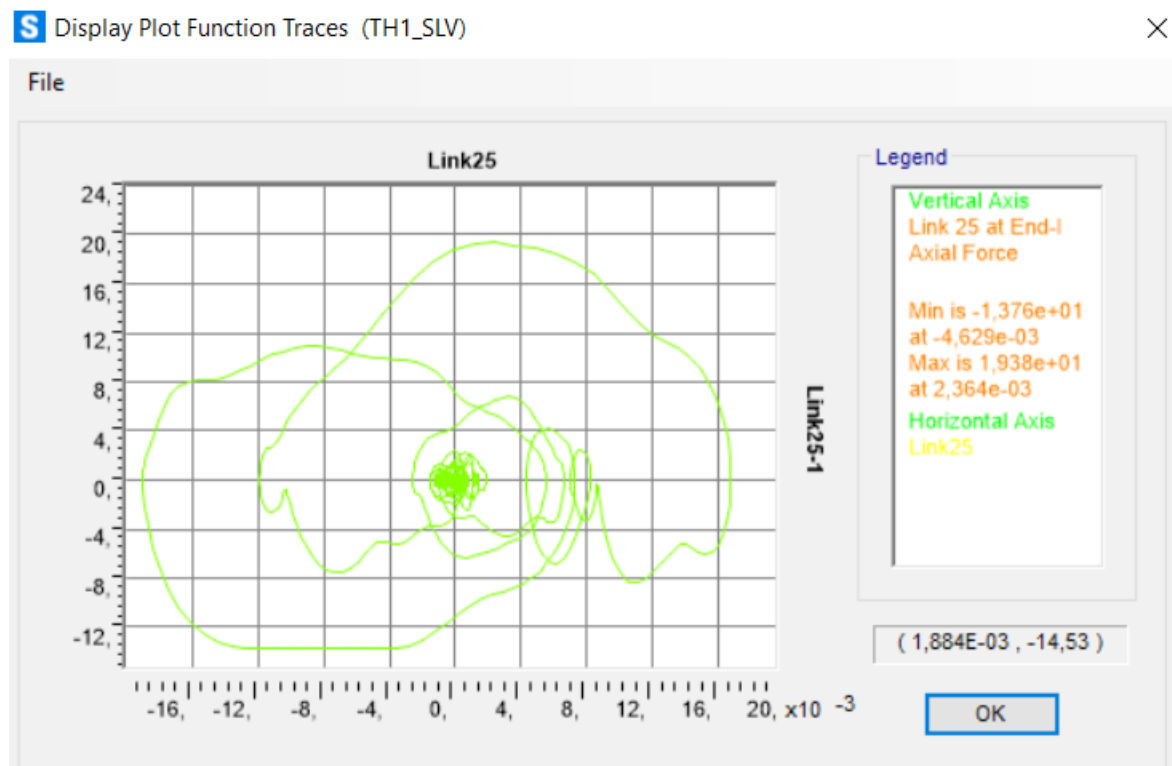


Figura 291. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

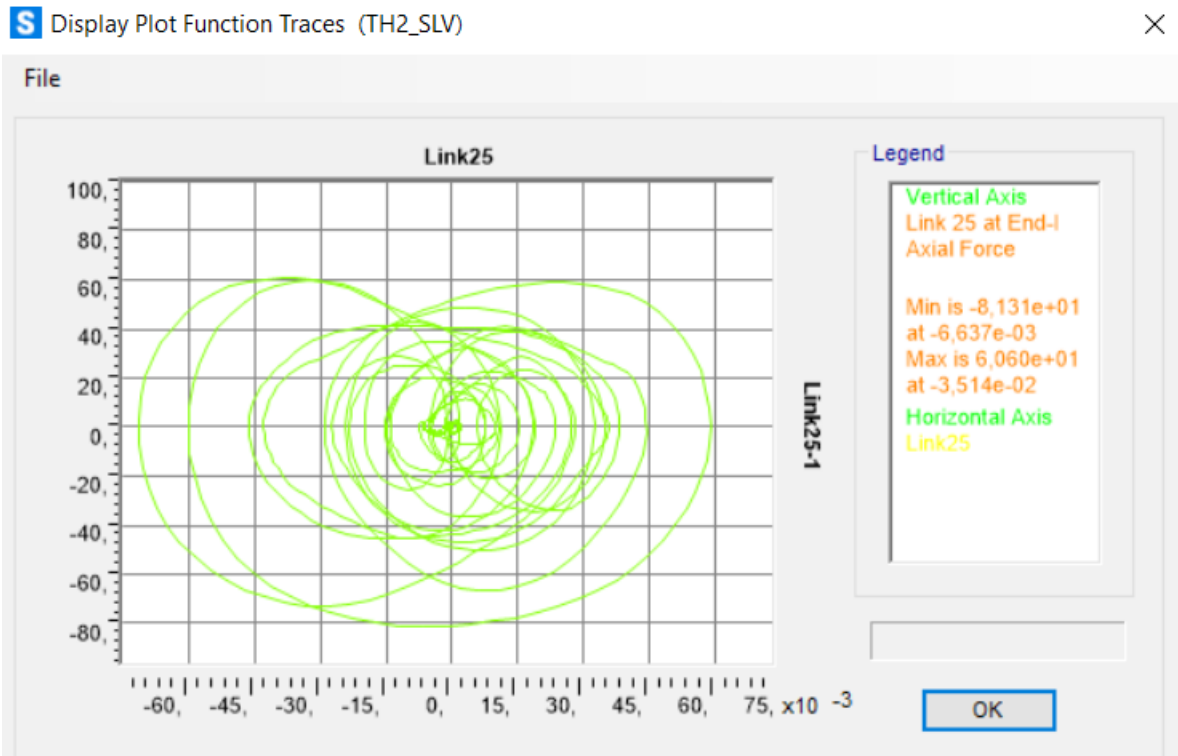


Figura 292. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

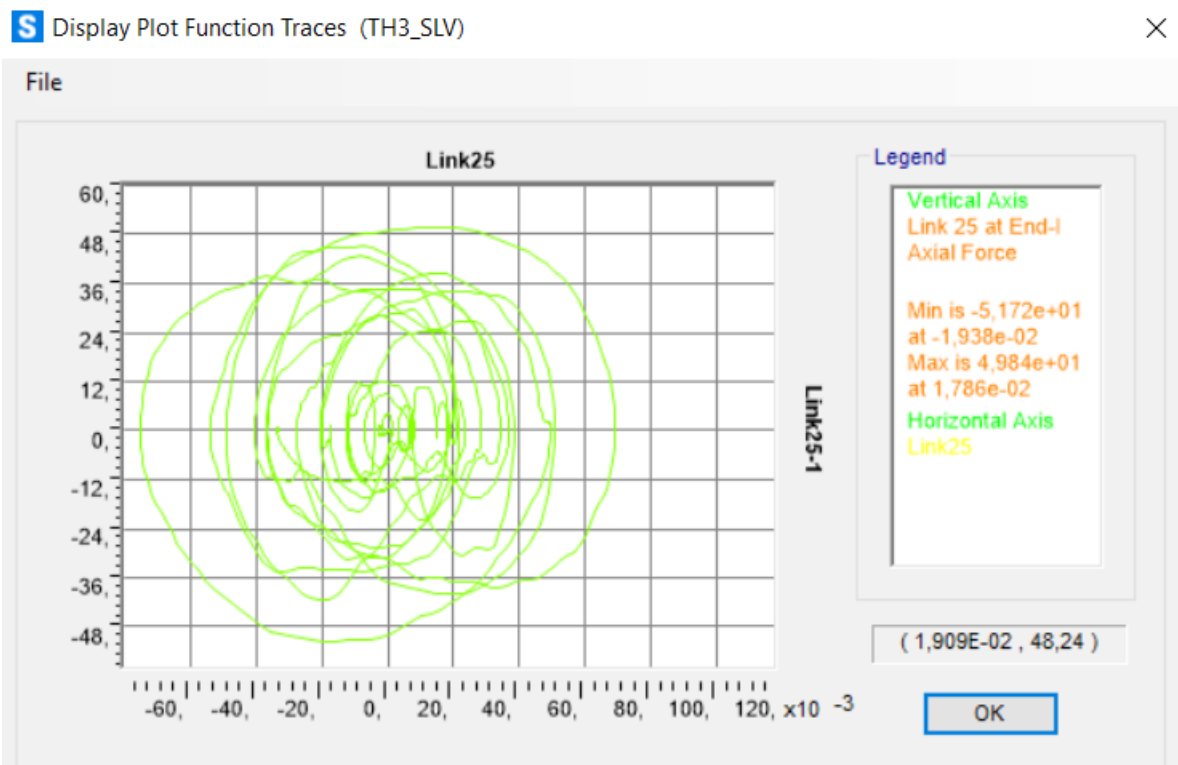


Figura 293. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

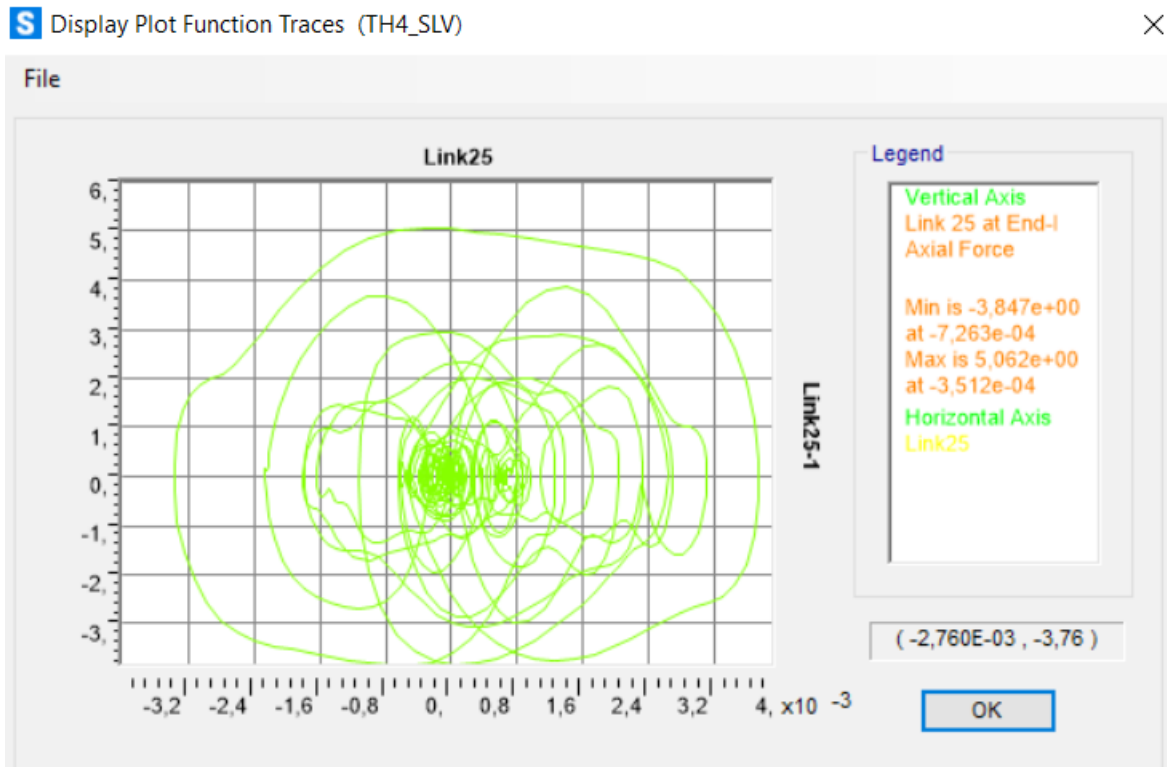


Figura 294. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

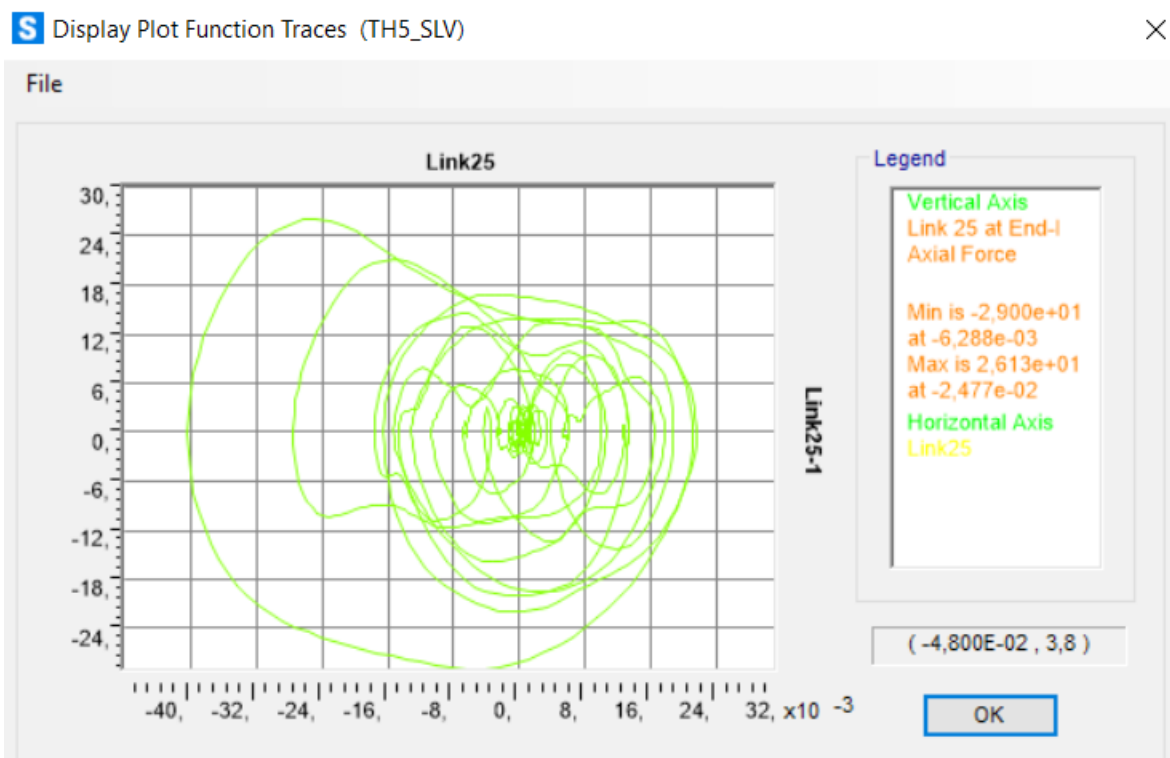


Figura 295. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

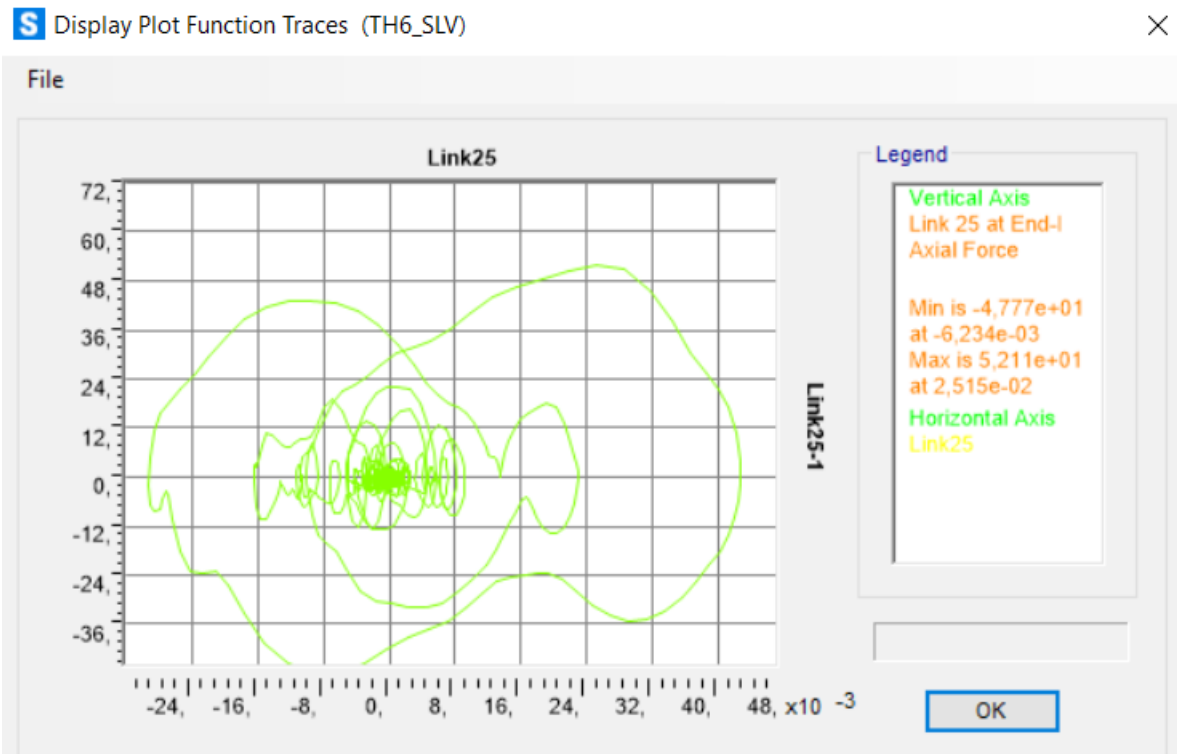


Figura 296. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

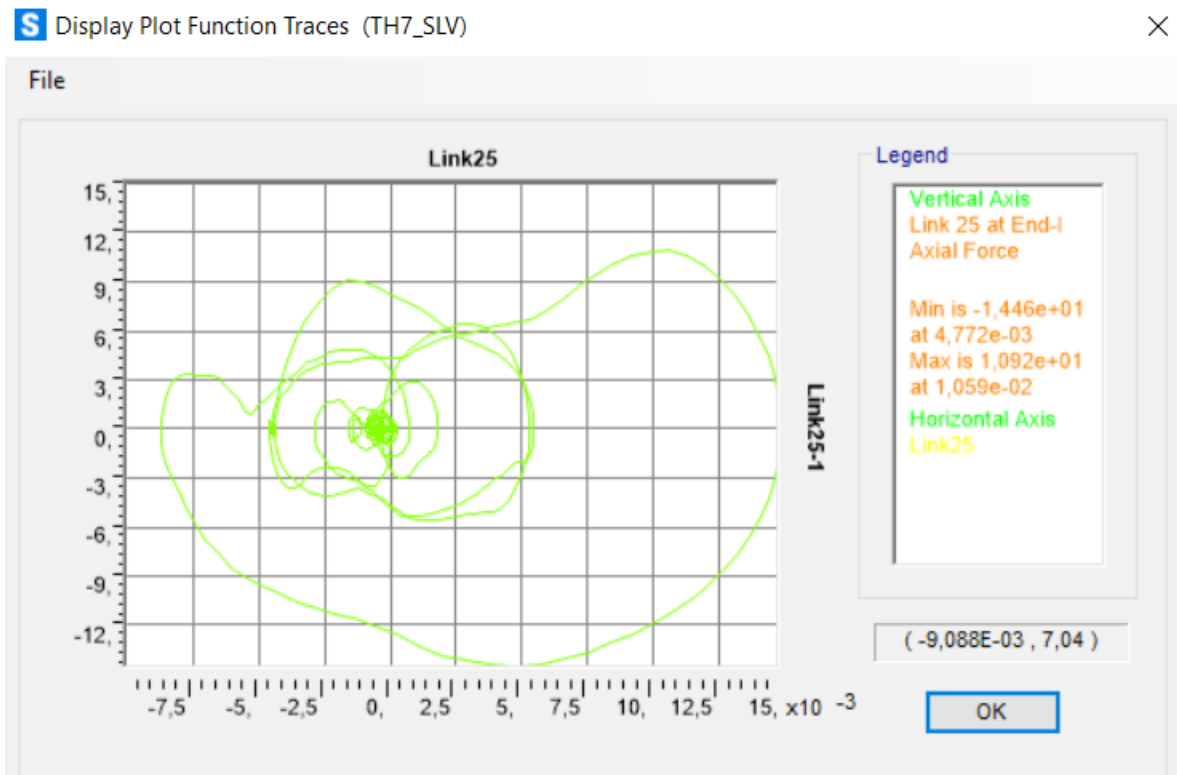


Figura 297. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Dissipatore elasto-plastico:

Telaio 5-6-7-8-9-10 (direzione x)			
N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	10	0,0235	0,0030
4	11	0,0304	0,0030
5	12	0,0382	0,0028

Telaio 5-6-7-8-9-10 (direzione x)		
N° piano	N° label	Fy
(-)	(-)	(kN)
3	10	25,93
4	11	25,93
5	12	25,93

Piano 3:

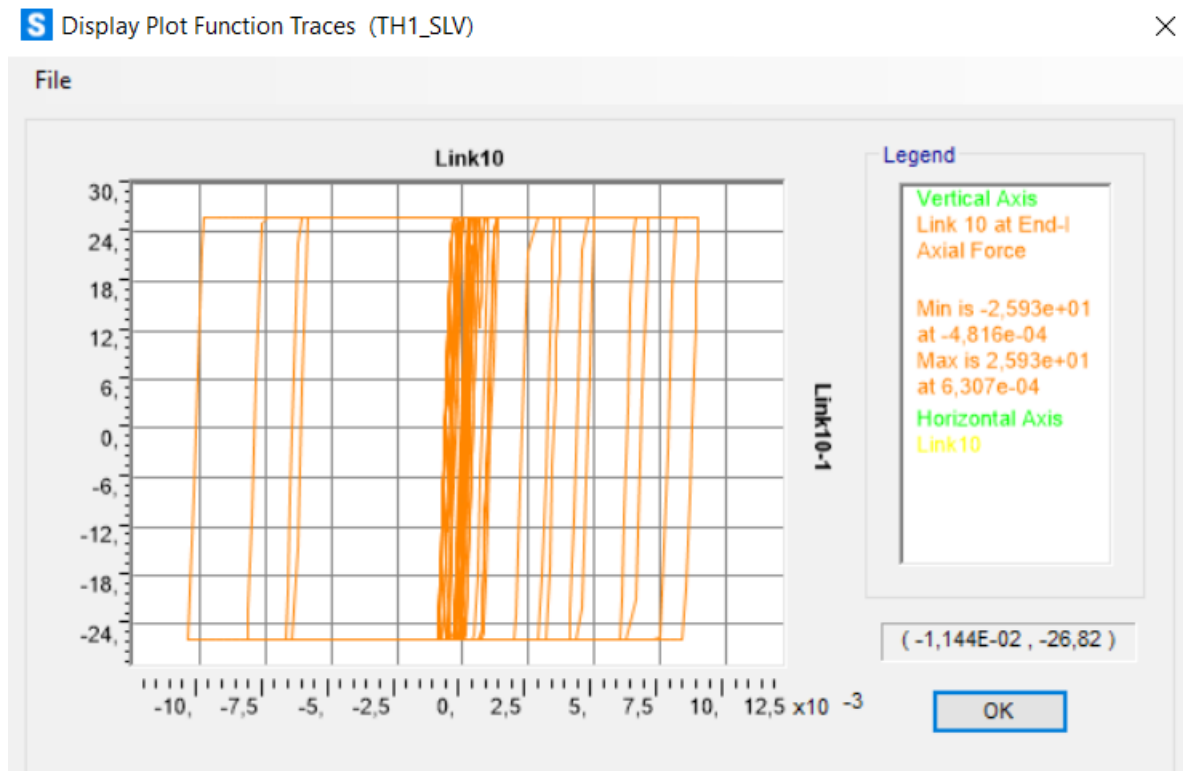


Figura 298. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

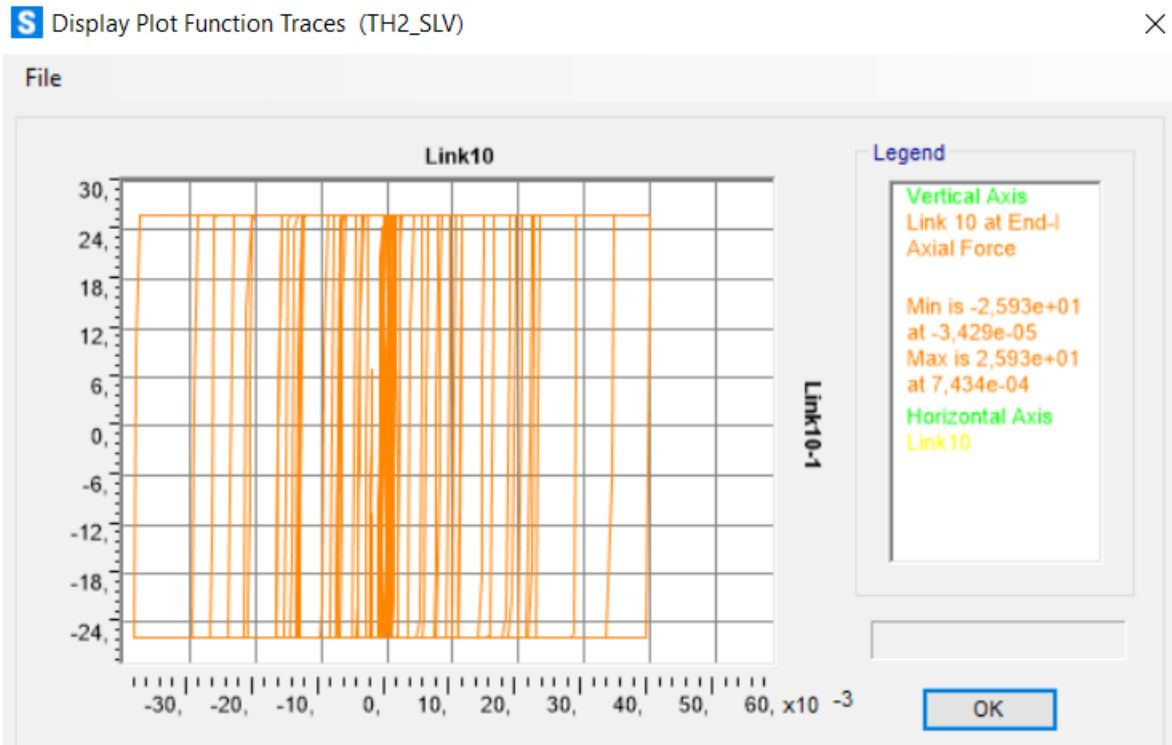


Figura 299. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

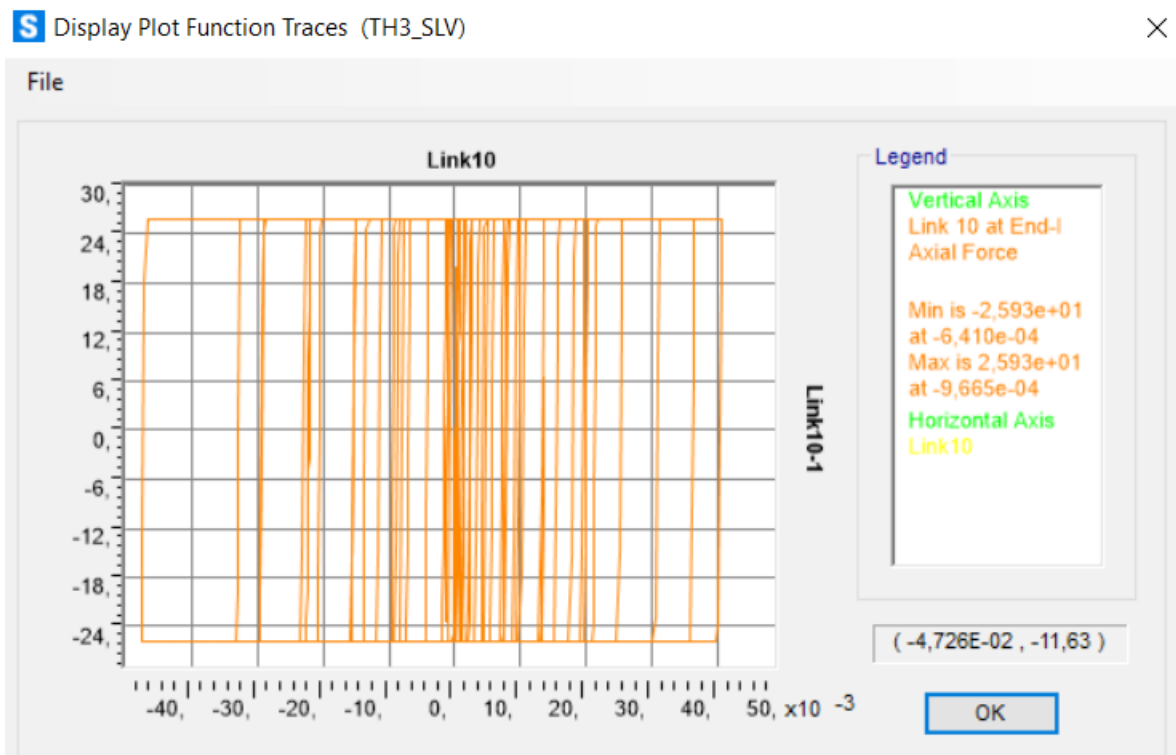


Figura 300. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

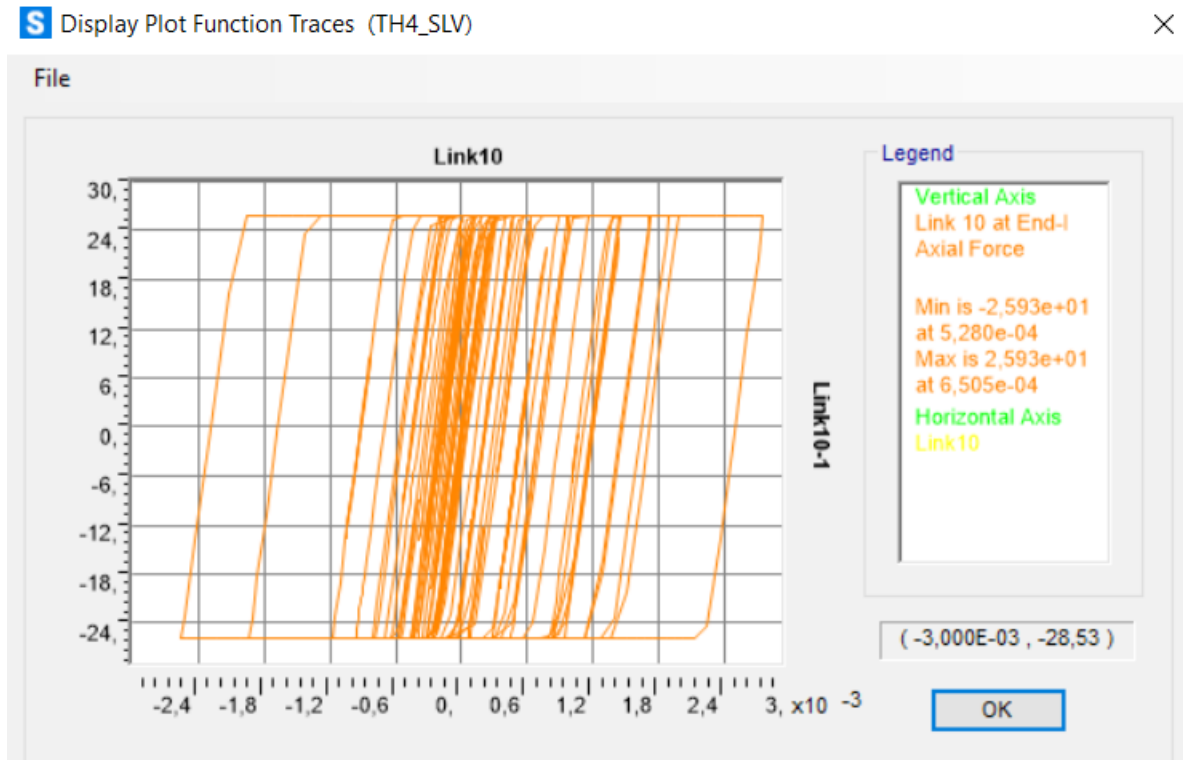


Figura 301. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

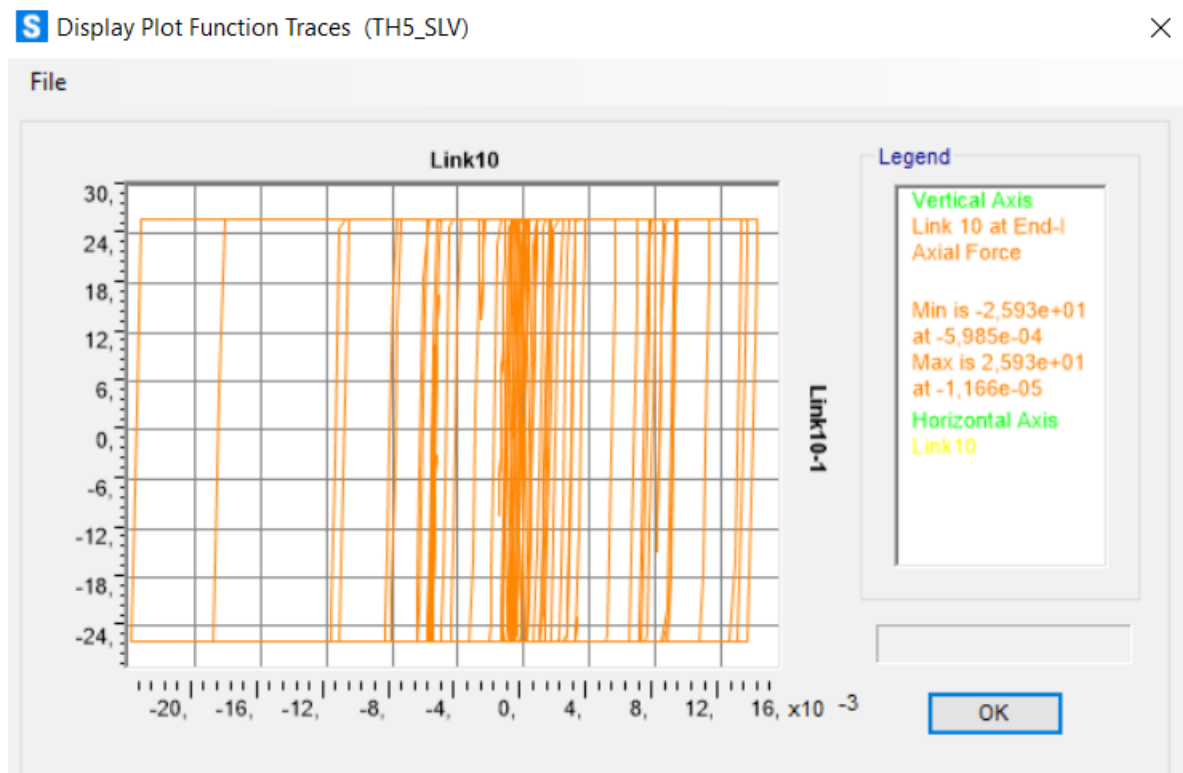


Figura 302. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

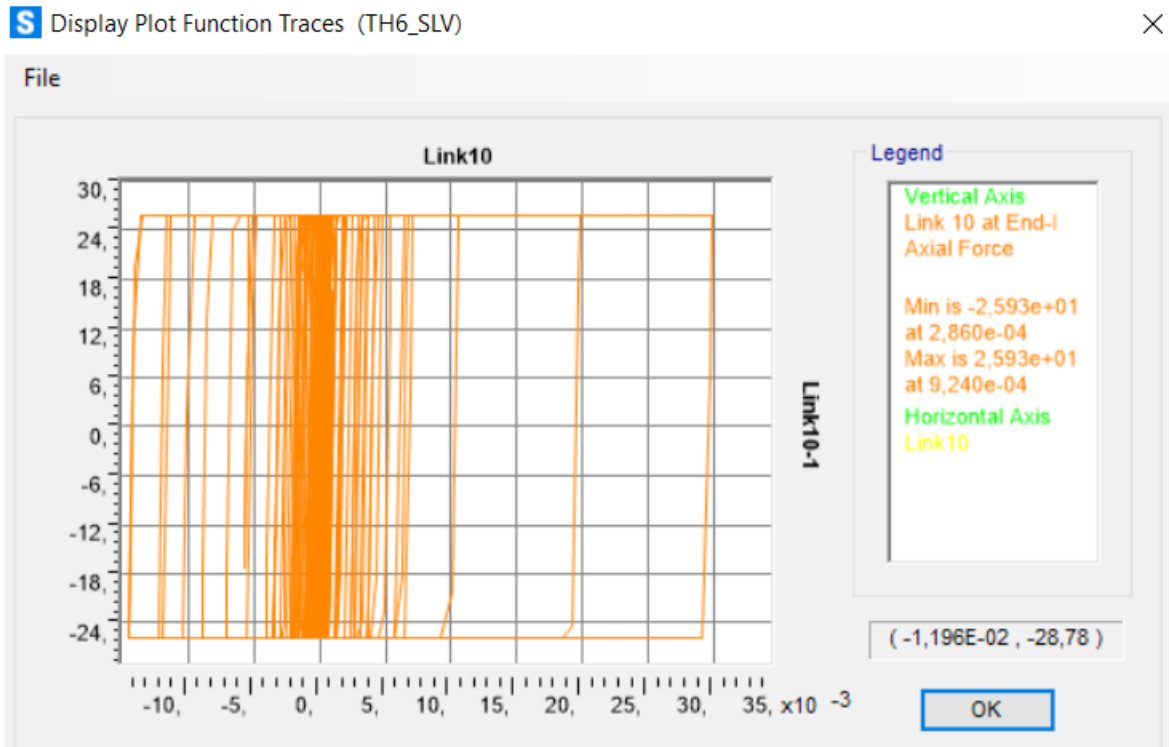


Figura 303. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

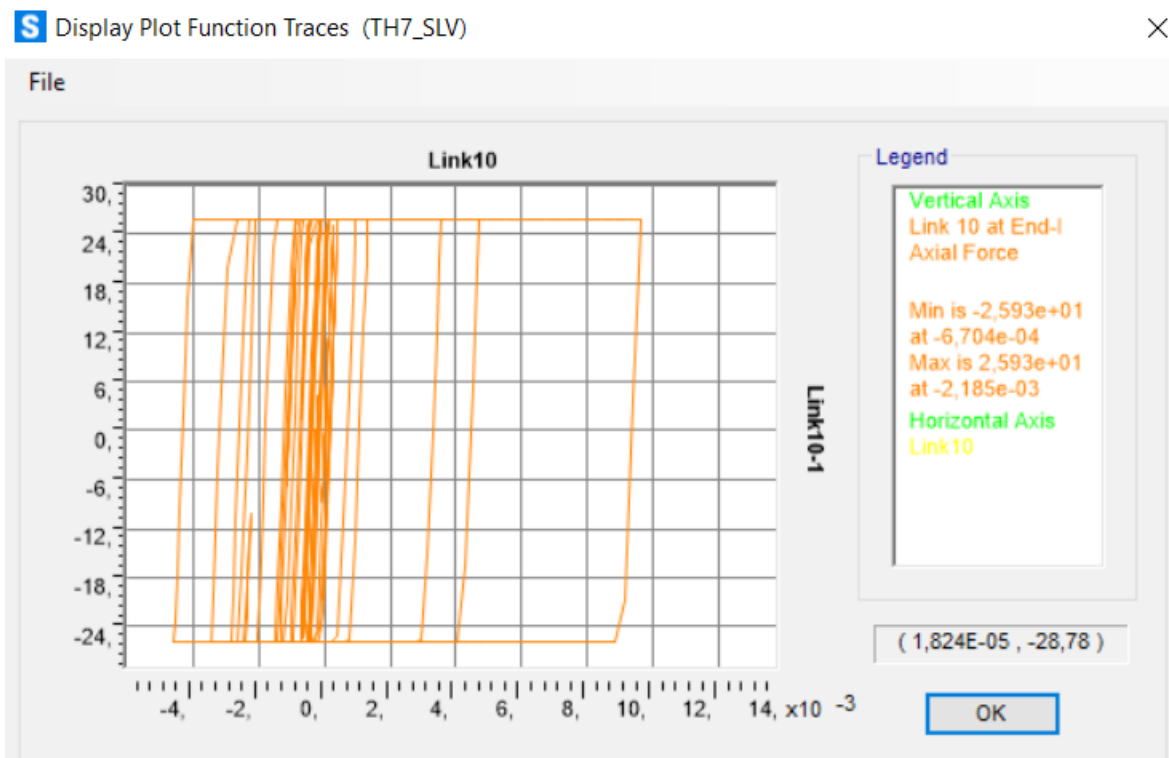


Figura 304. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

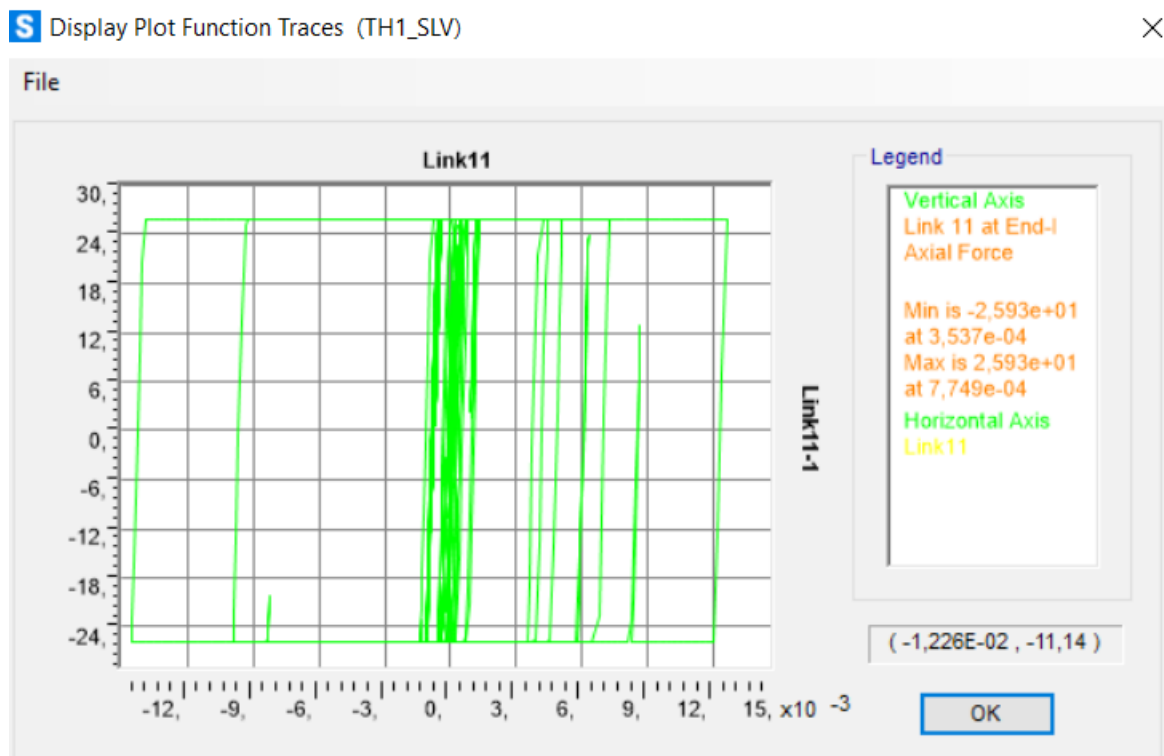


Figura 305. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

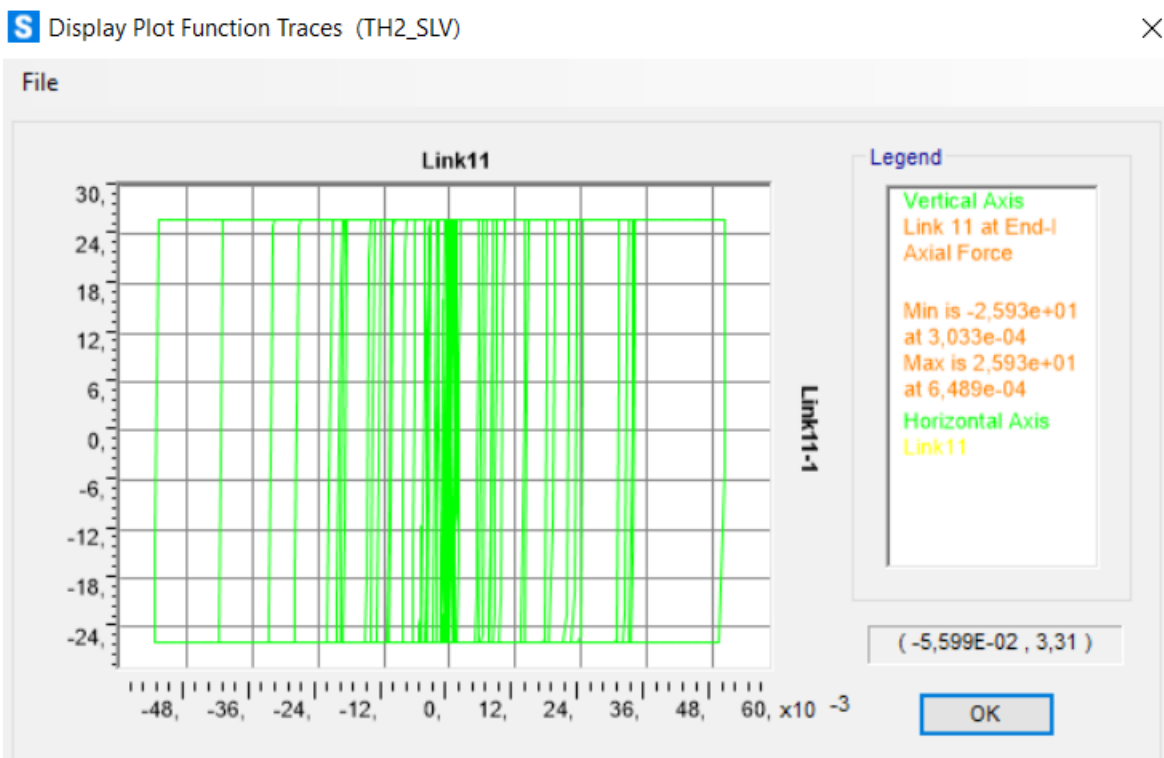


Figura 306. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

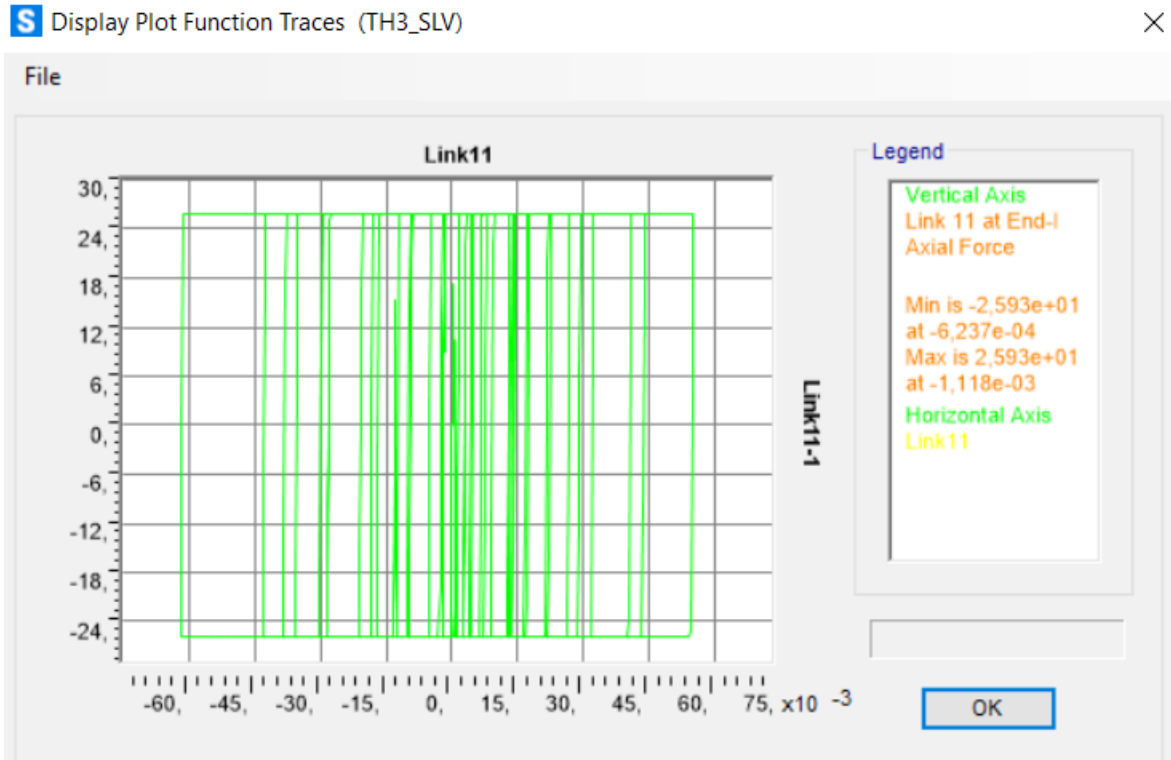


Figura 307. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

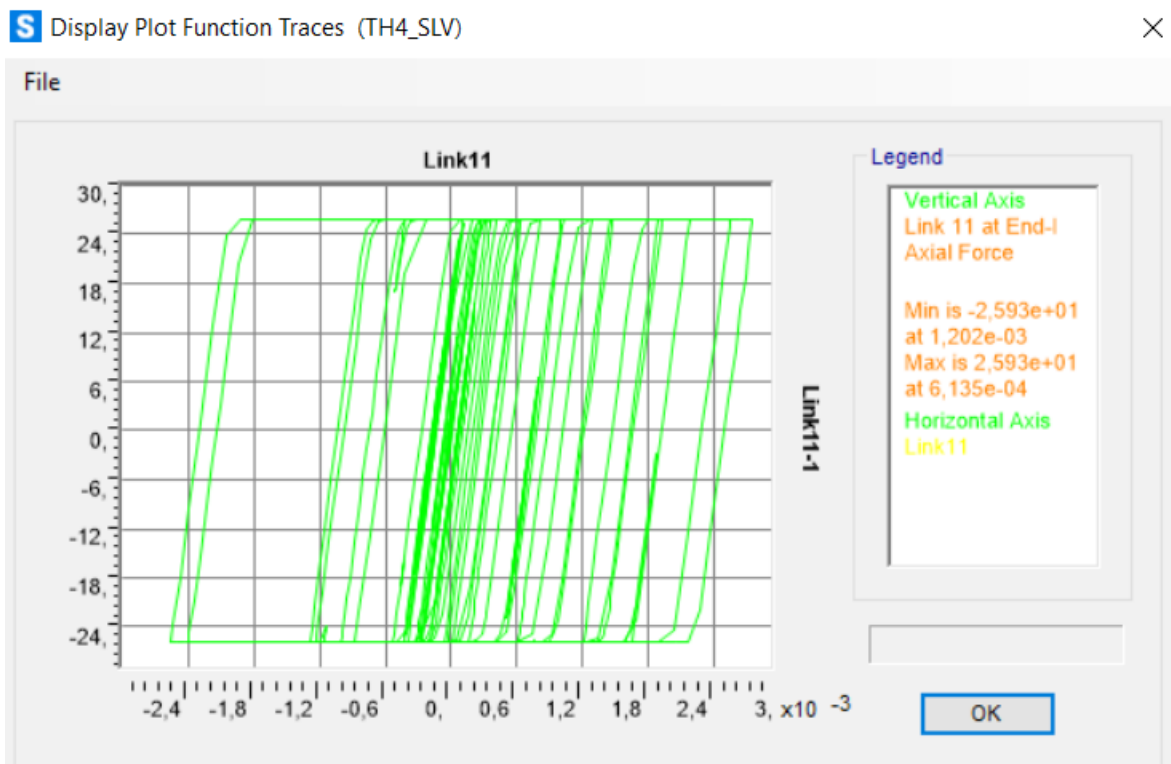


Figura 308. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

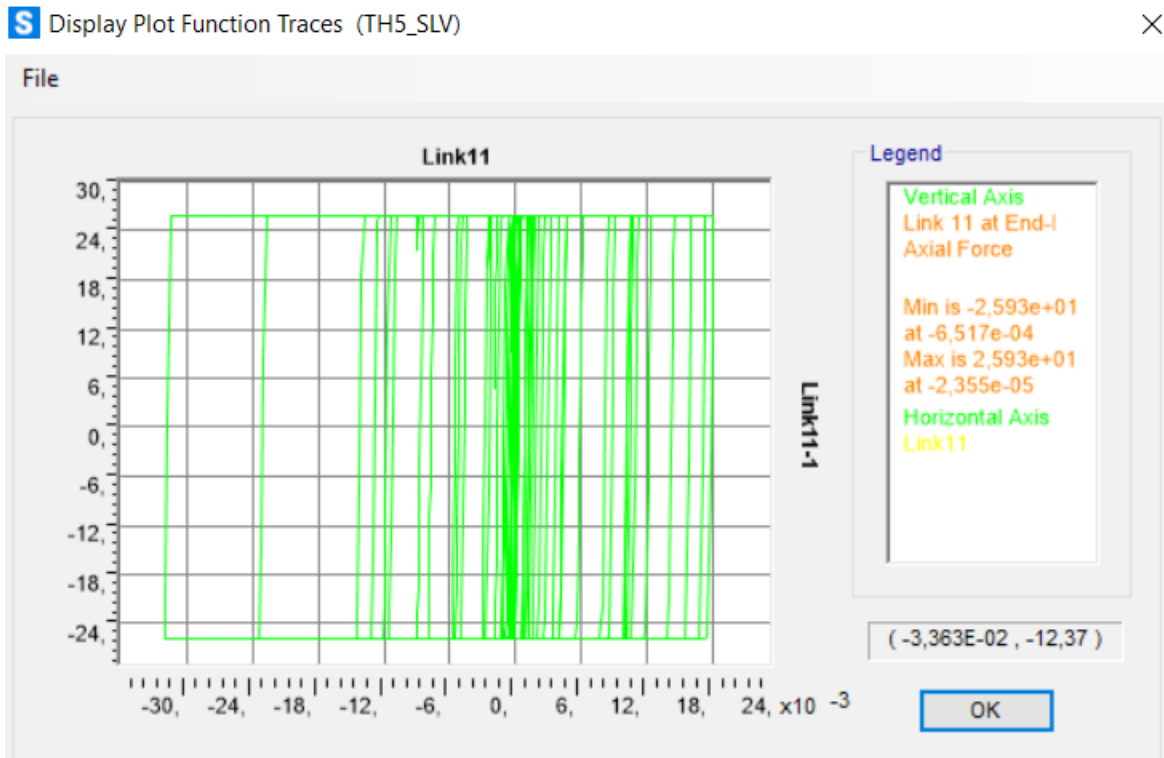


Figura 309. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

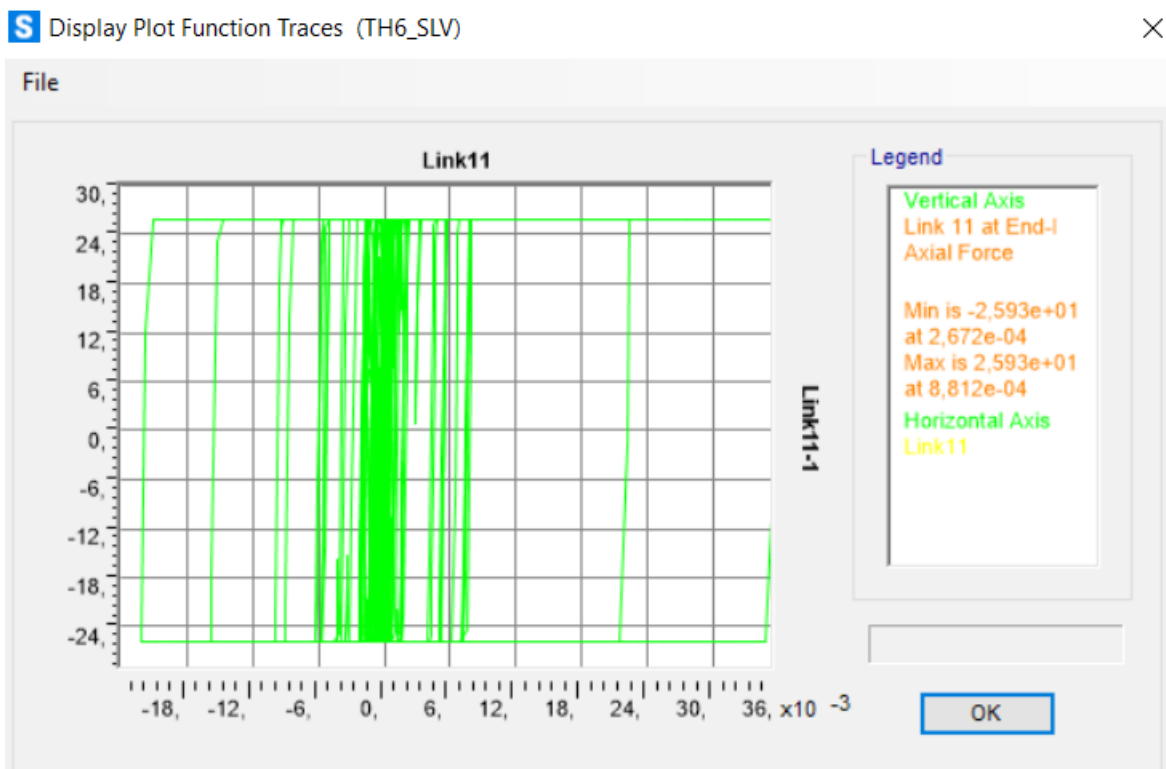


Figura 310. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

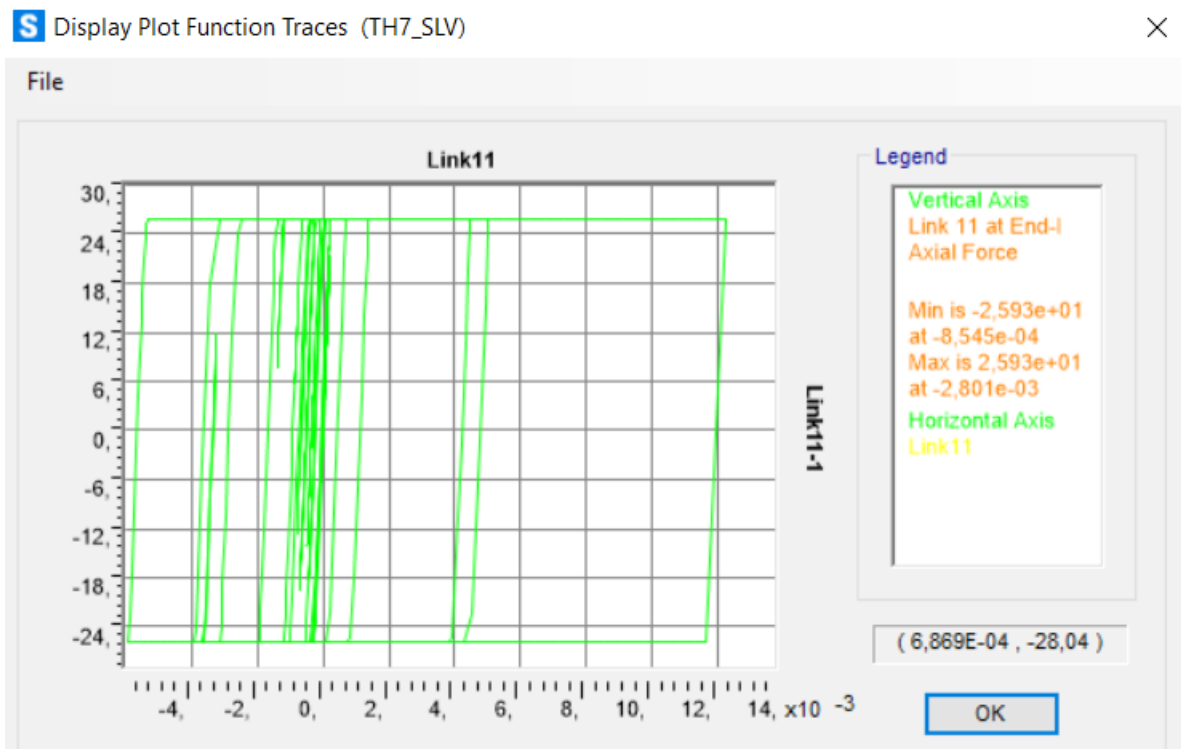


Figura 311. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

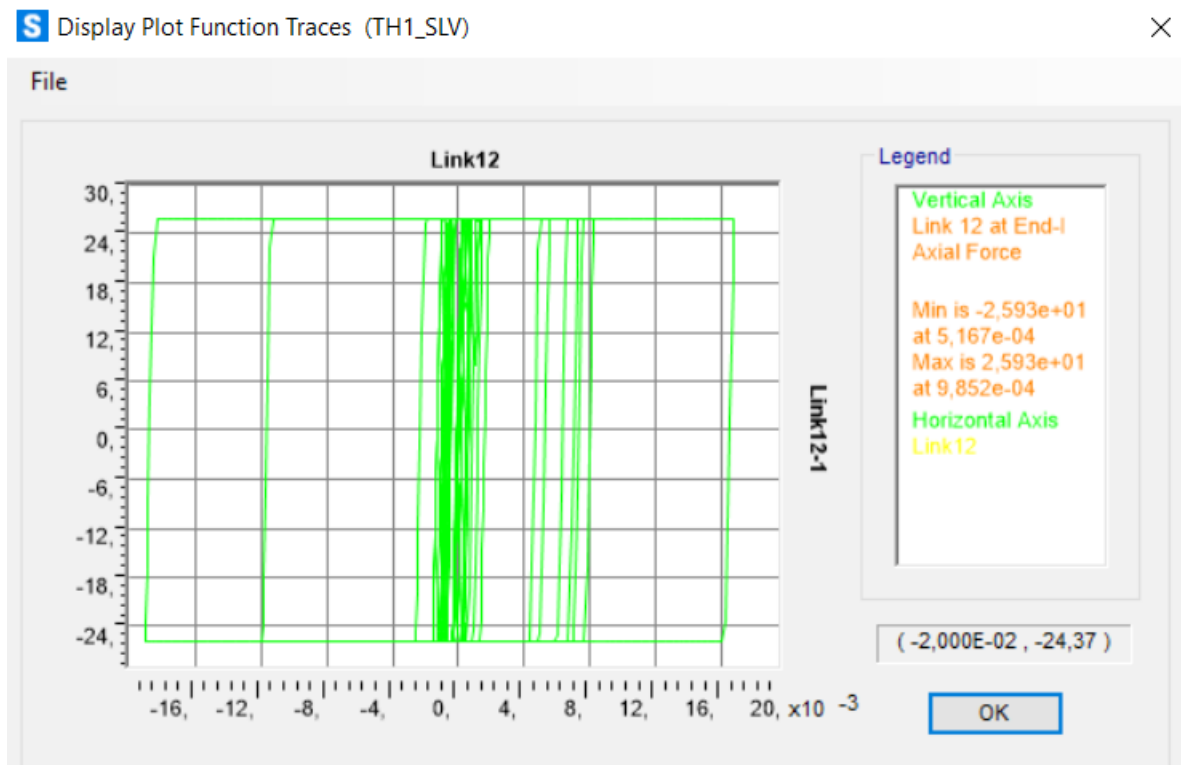


Figura 312. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

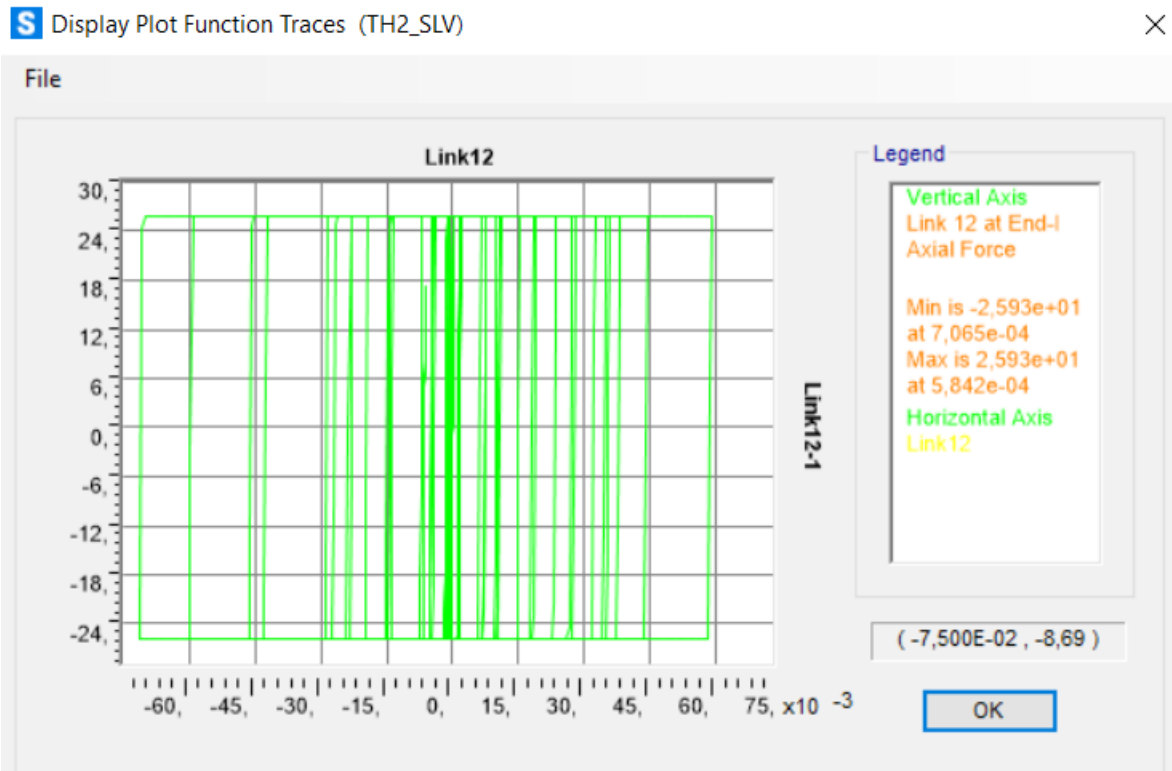


Figura 313. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

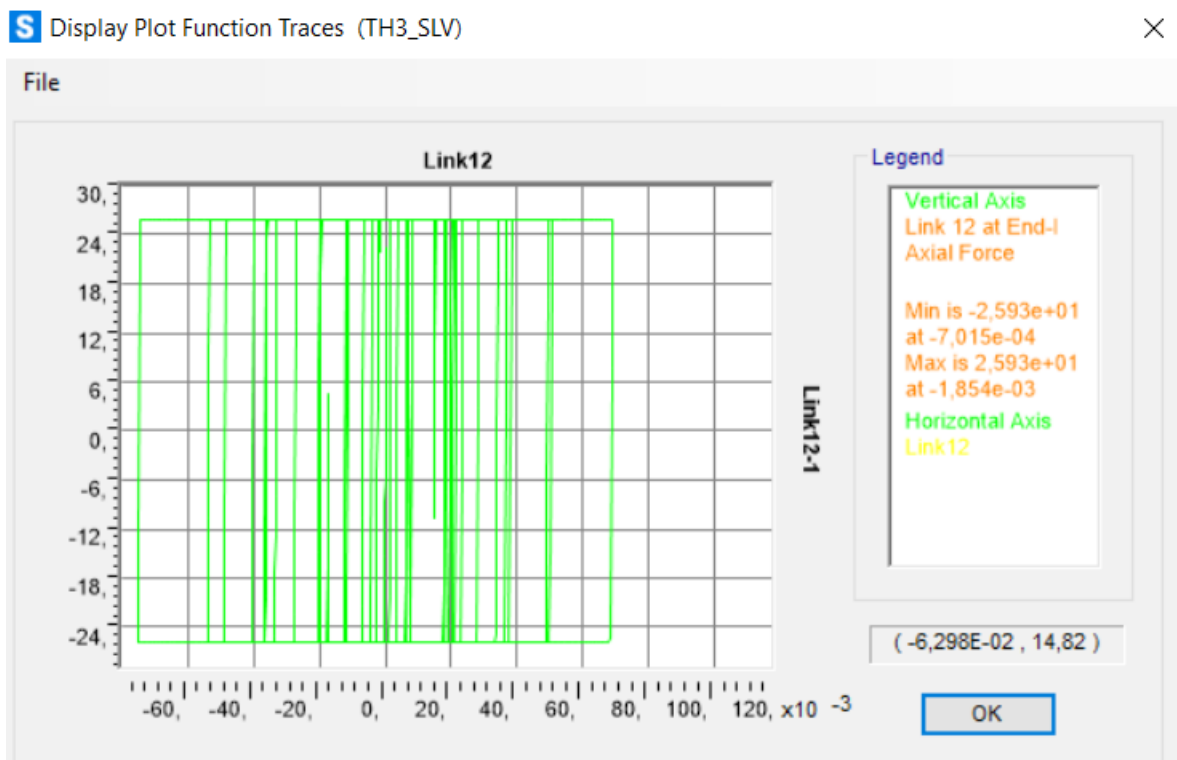


Figura 314. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

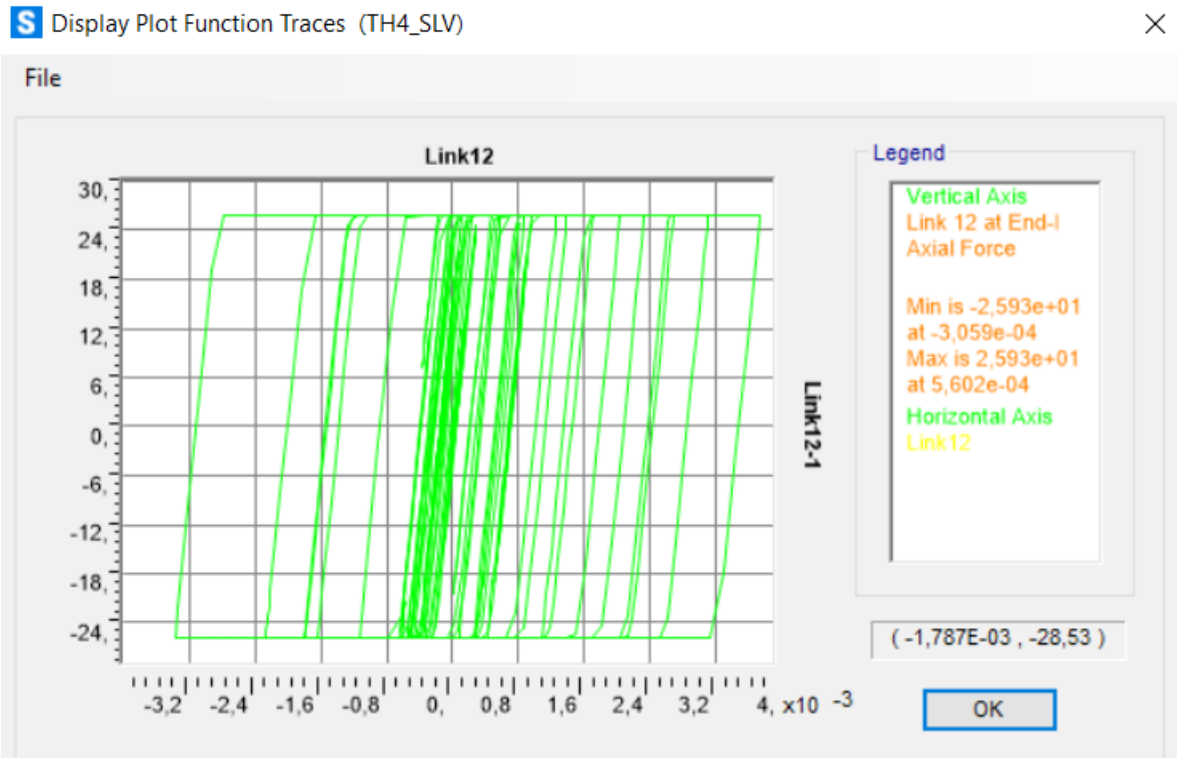


Figura 315. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

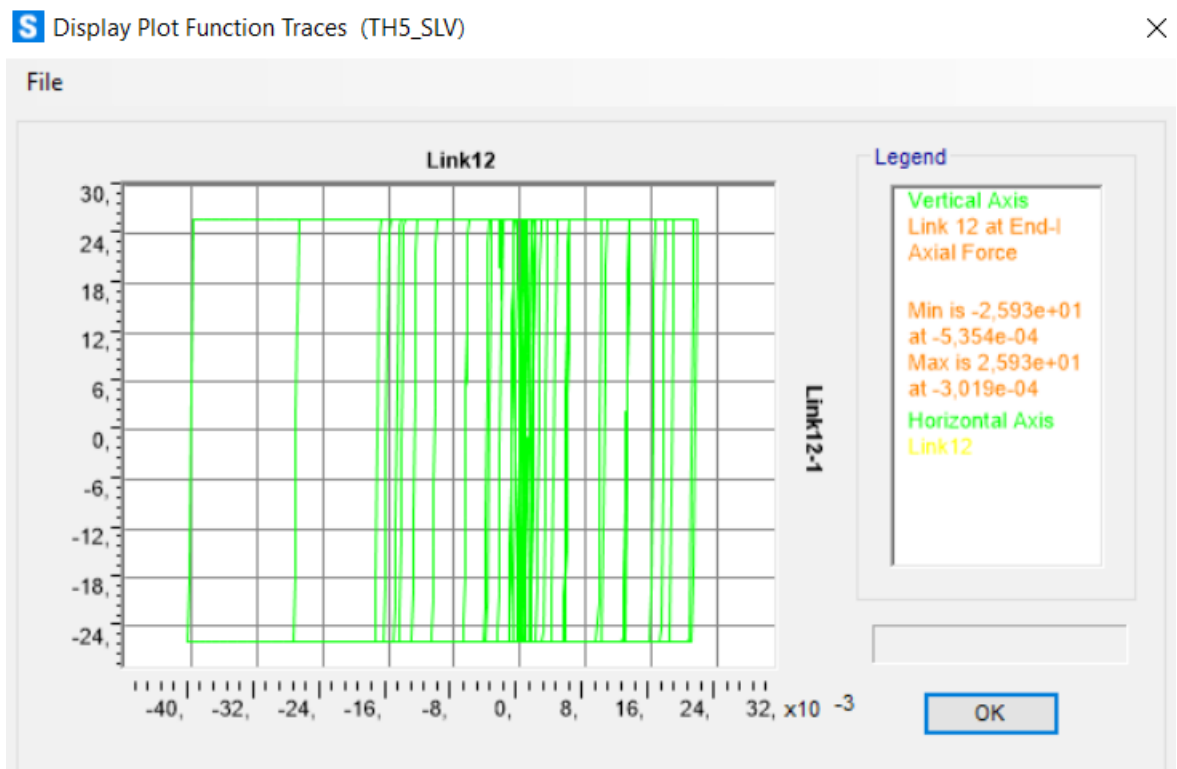


Figura 316. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

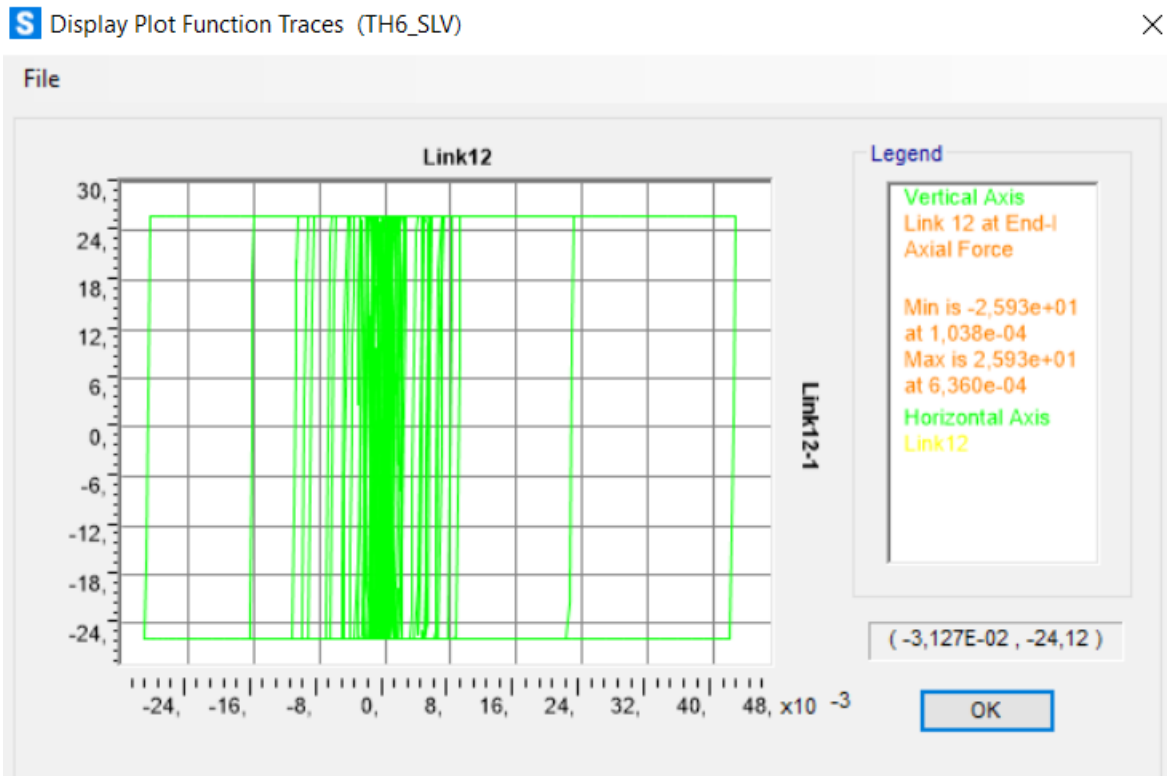


Figura 317. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

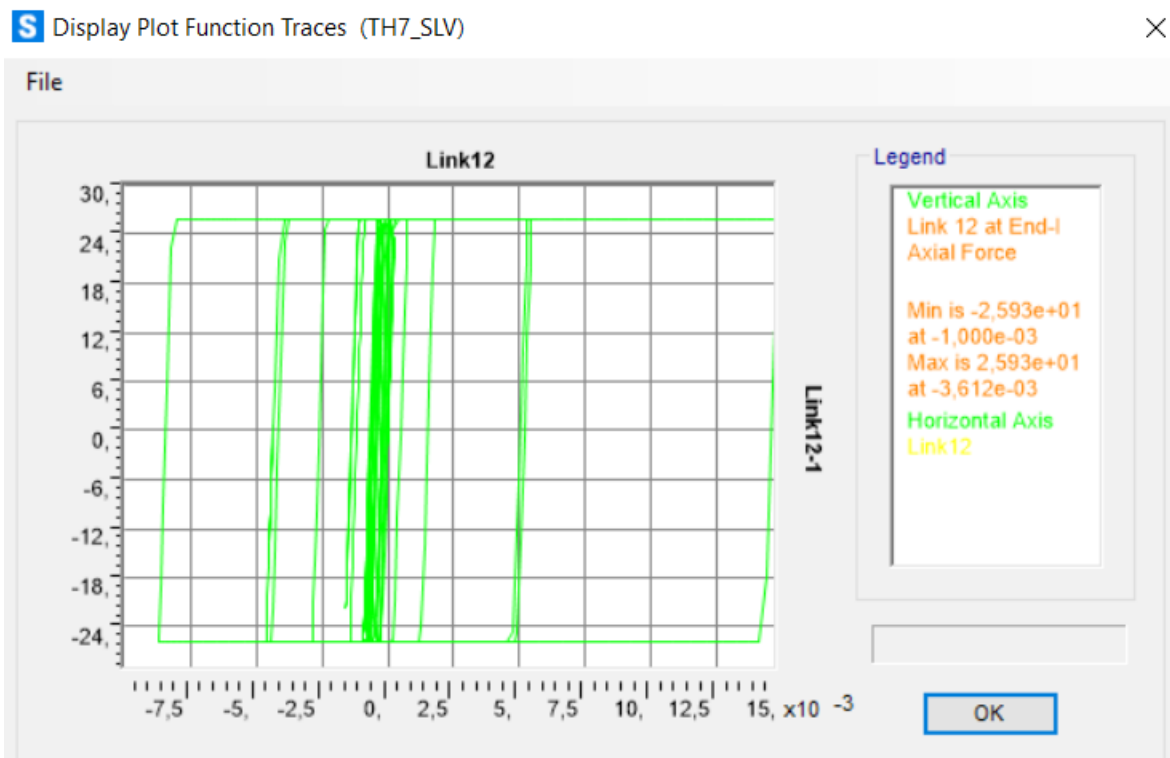


Figura 318. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori magnetoreologici alimentati del telaio 11-12-13-14-15-16 in direzione x:

Dissipatore viscoso:

Telaio 11-12-13-14-15-16 (direzione x)

N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	24	0,0237	0,0029
4	23	0,0308	0,0029
5	22	0,0388	0,0027

Telaio 11-12-13-14-15-16
(direzione x)

N° piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	24	25,49
4	23	29,76
5	22	36,43

Piano 3:

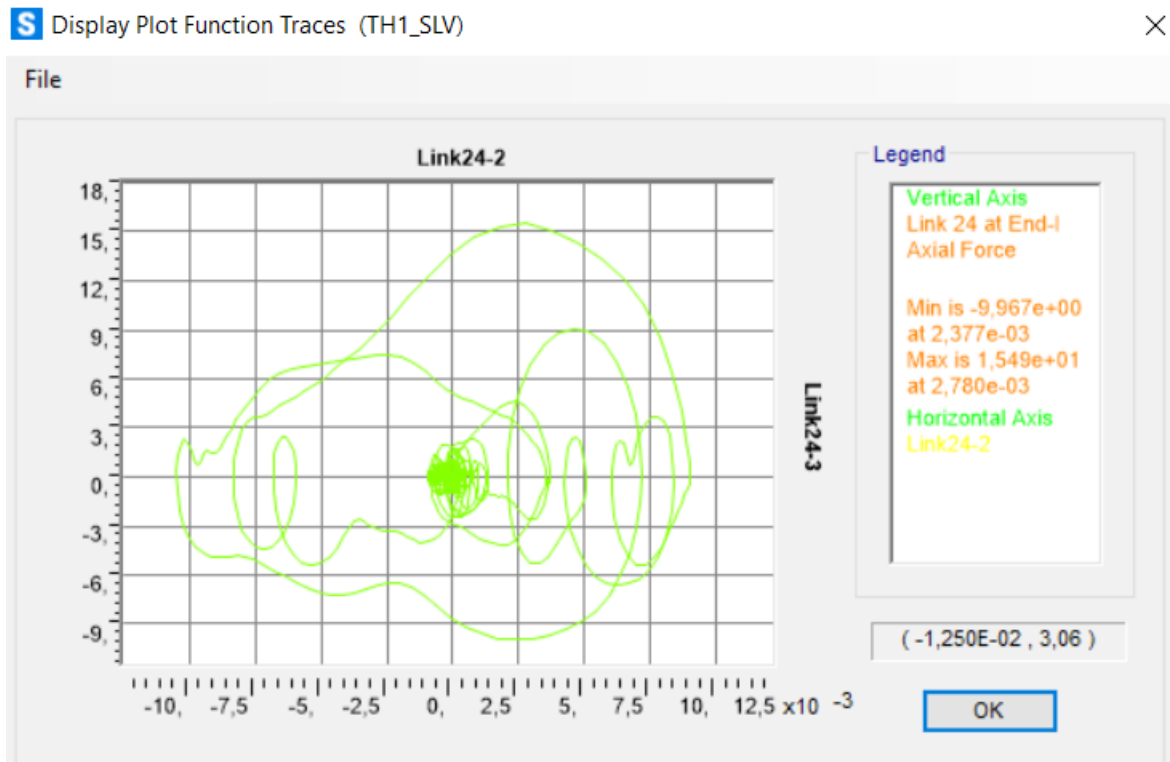


Figura 319. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

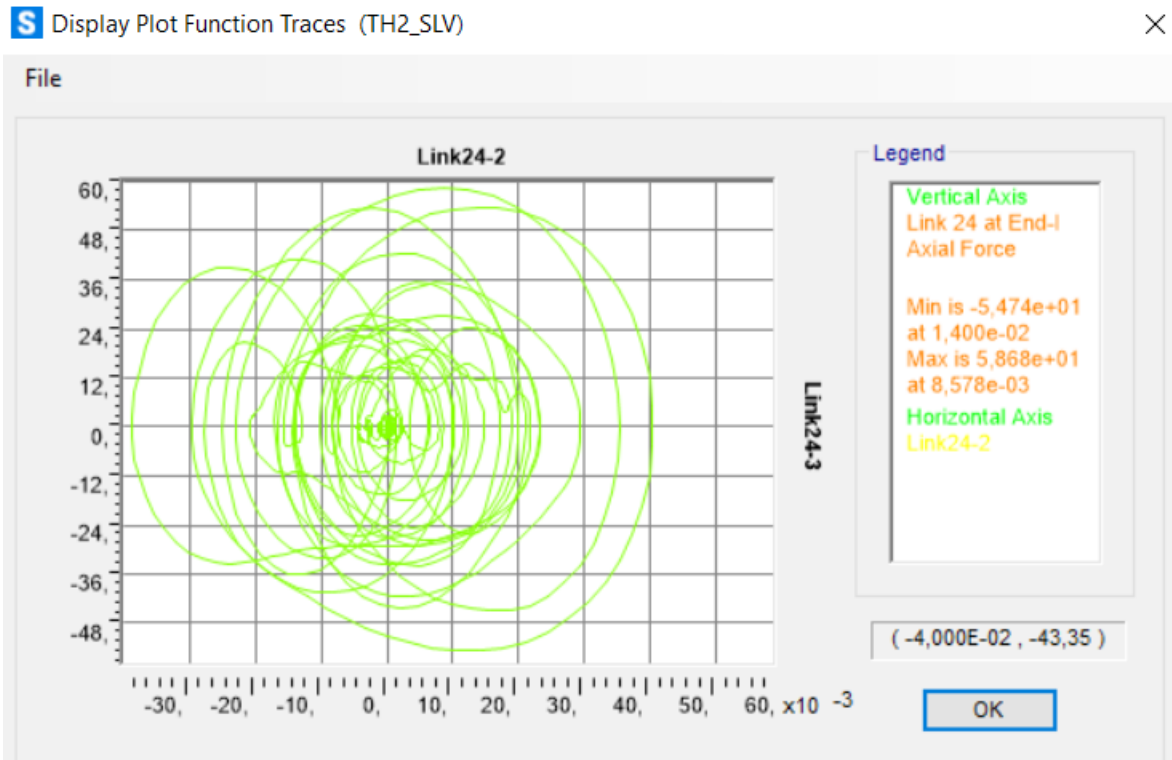


Figura 320. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

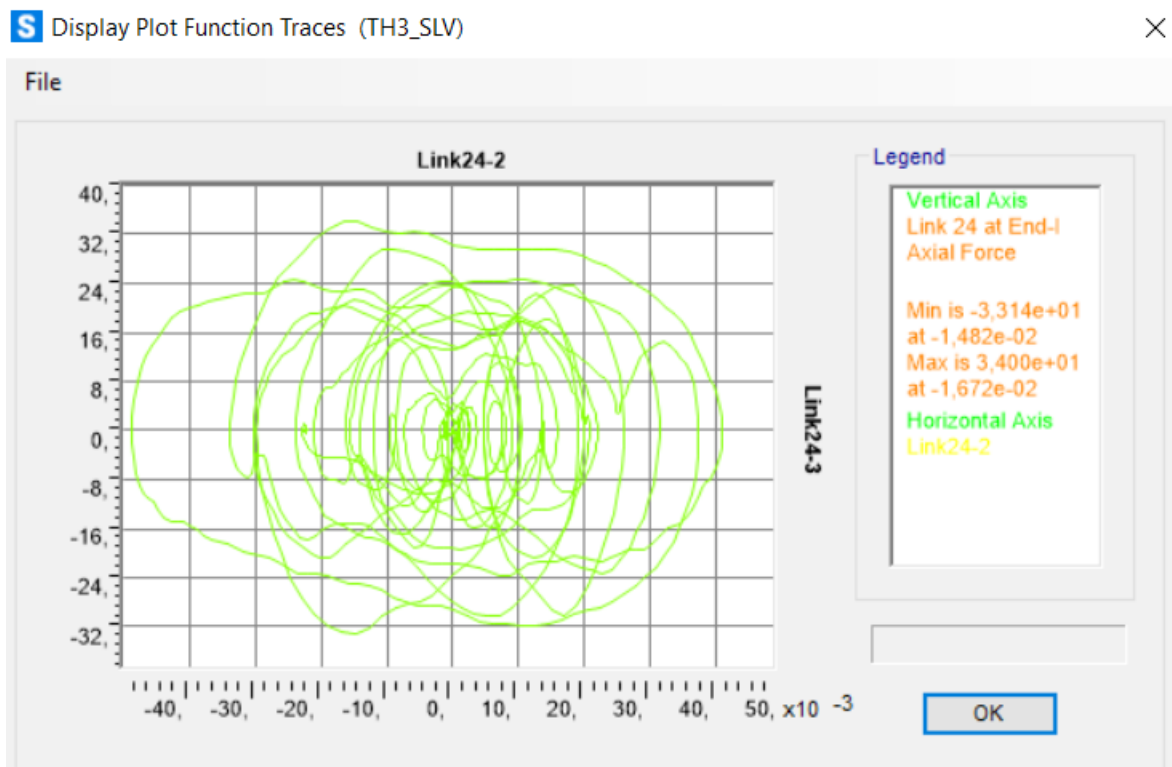


Figura 321. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

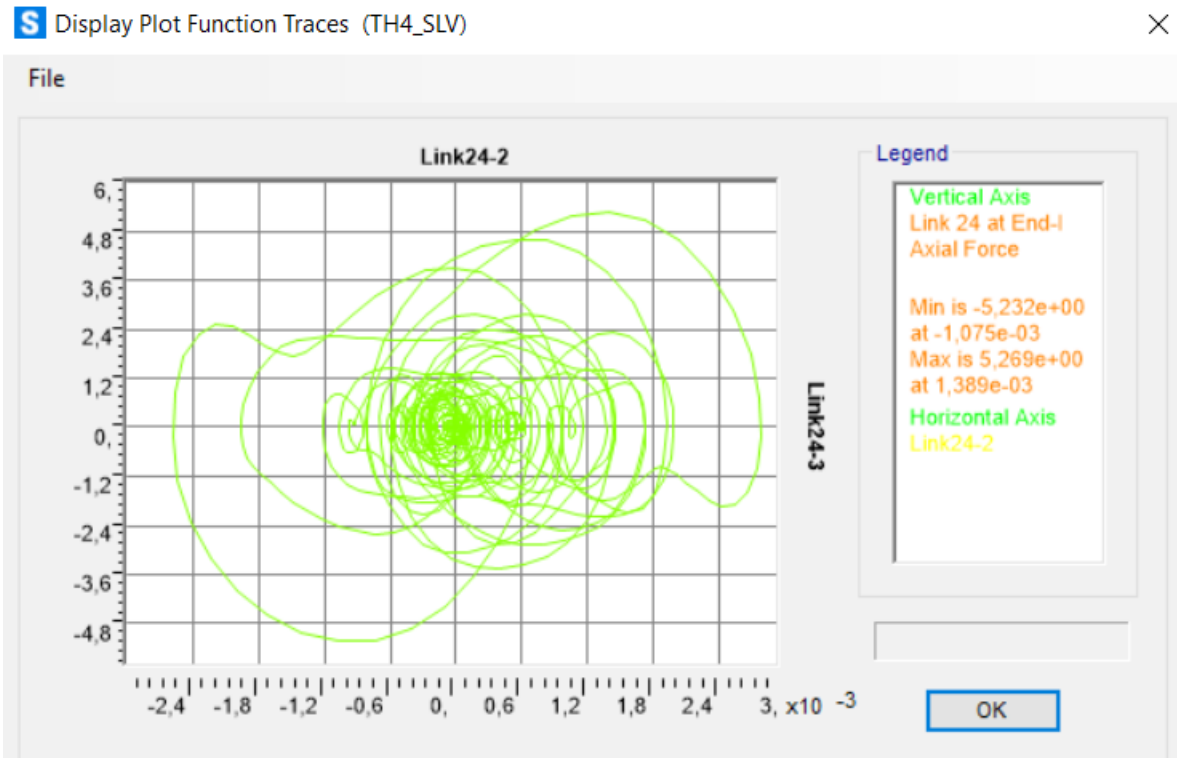


Figura 322. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

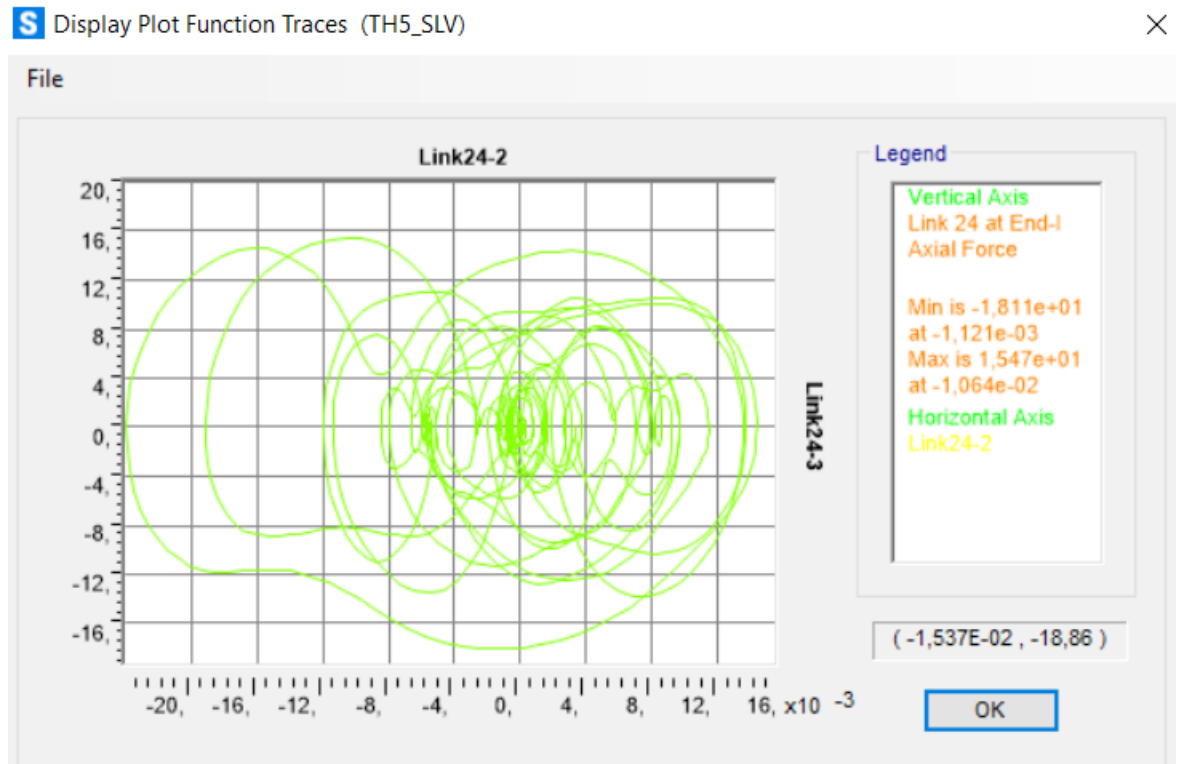


Figura 323. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

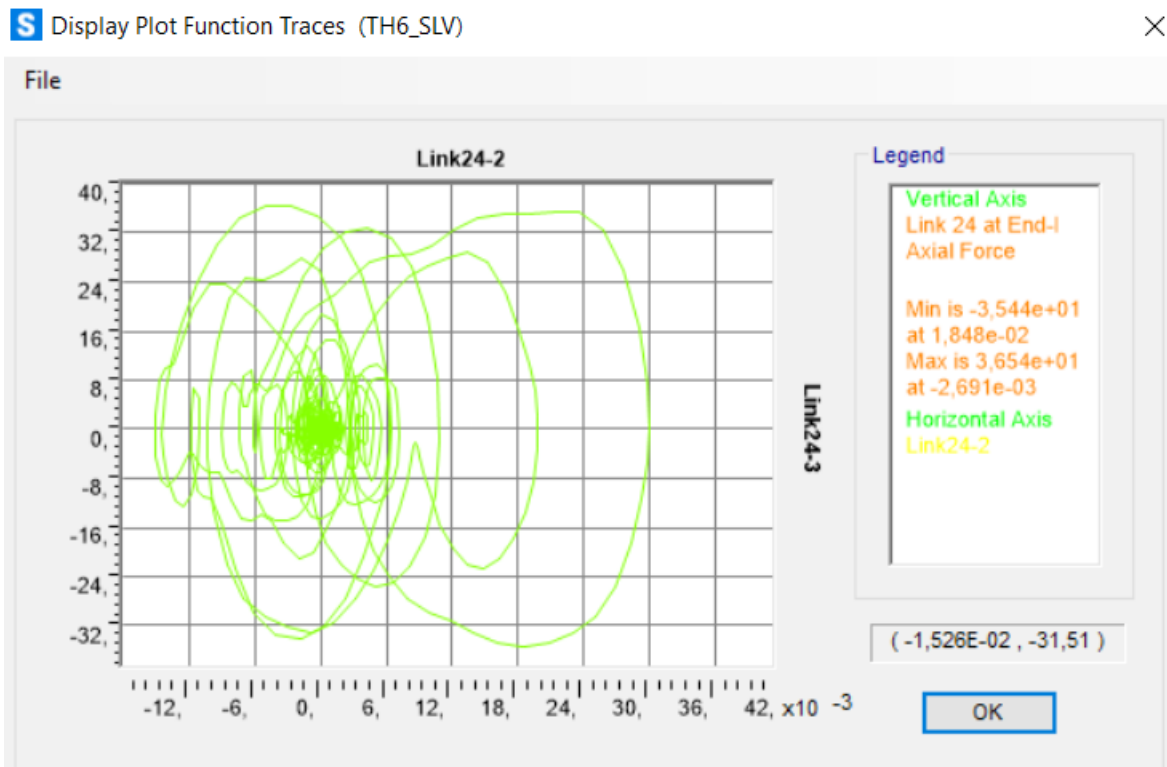


Figura 324. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

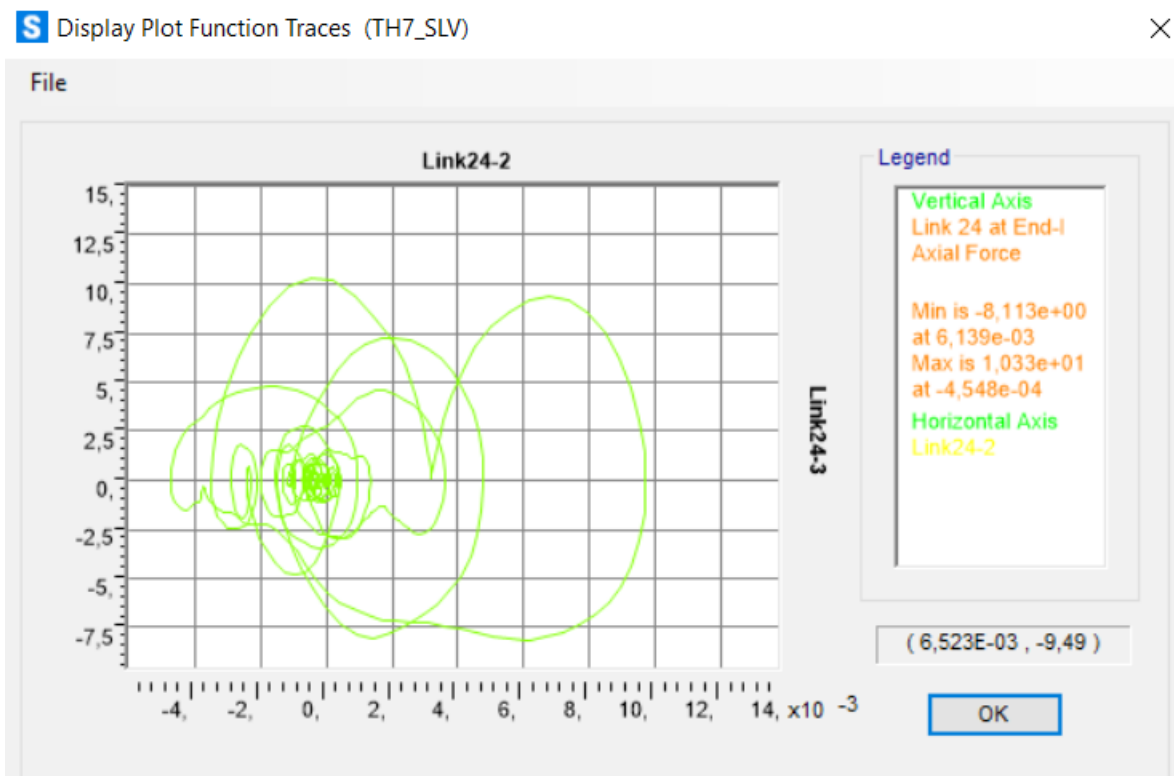


Figura 325. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

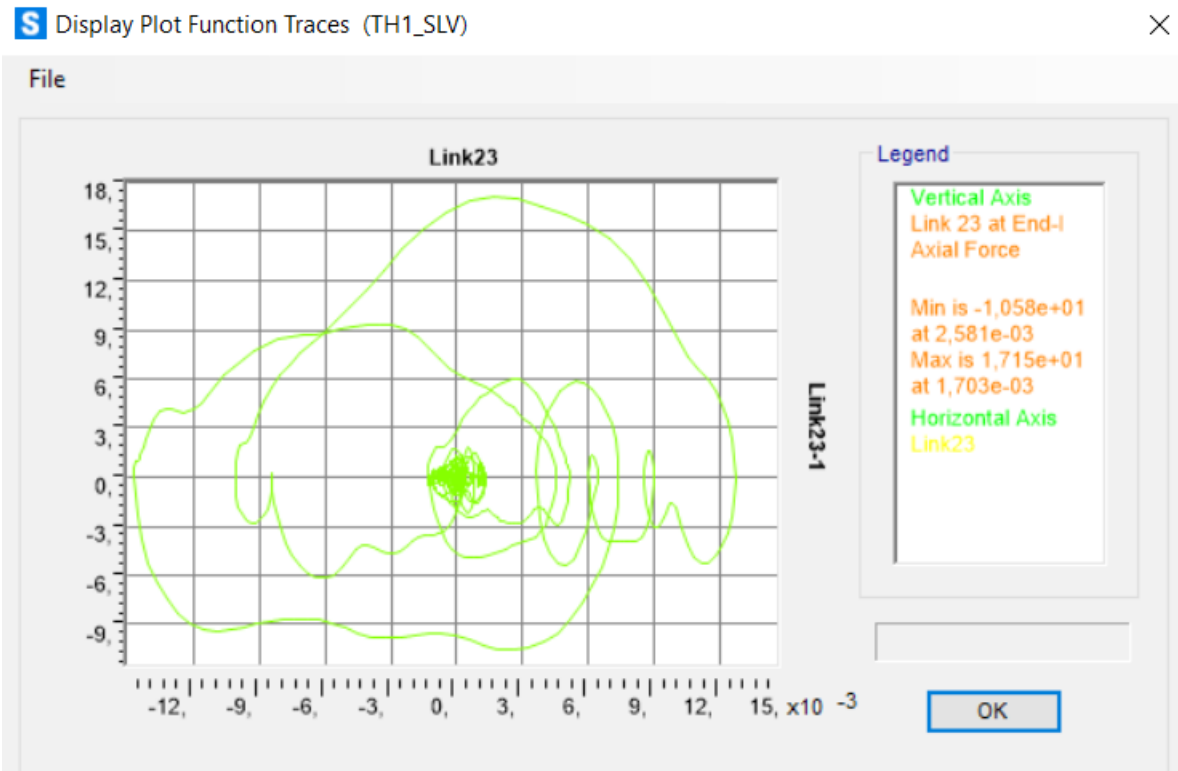


Figura 326. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

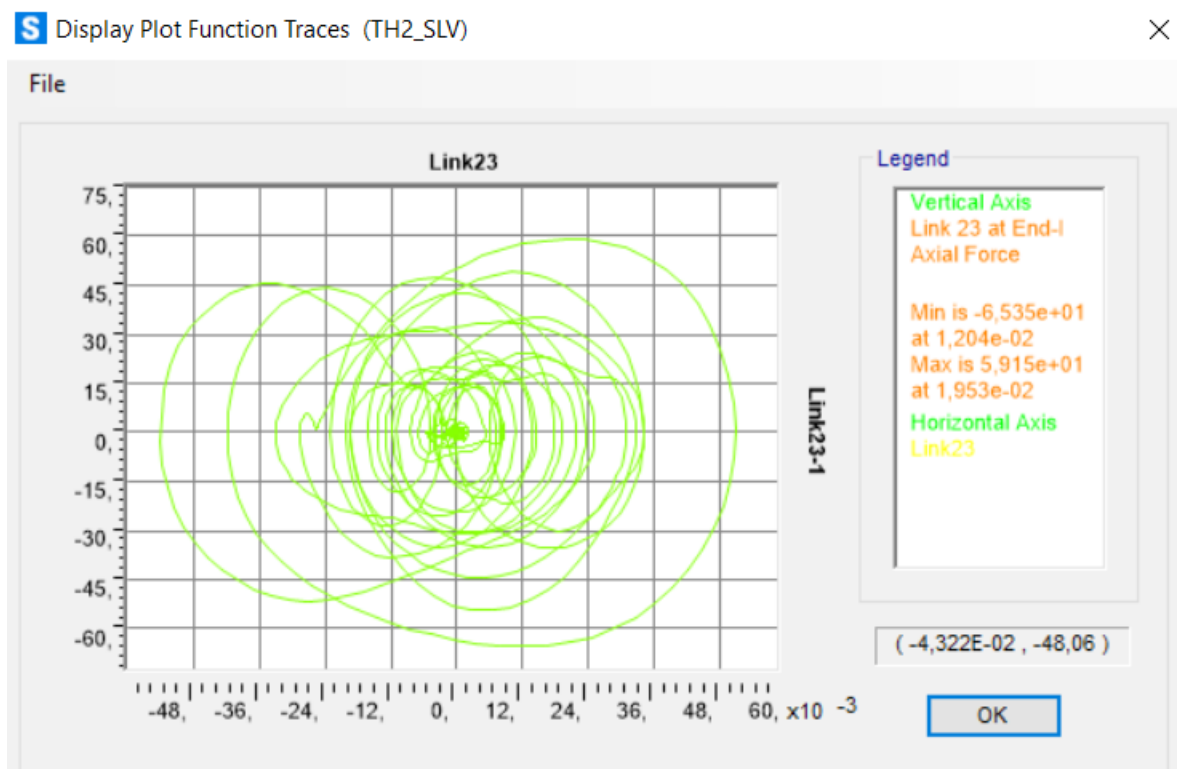


Figura 327. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

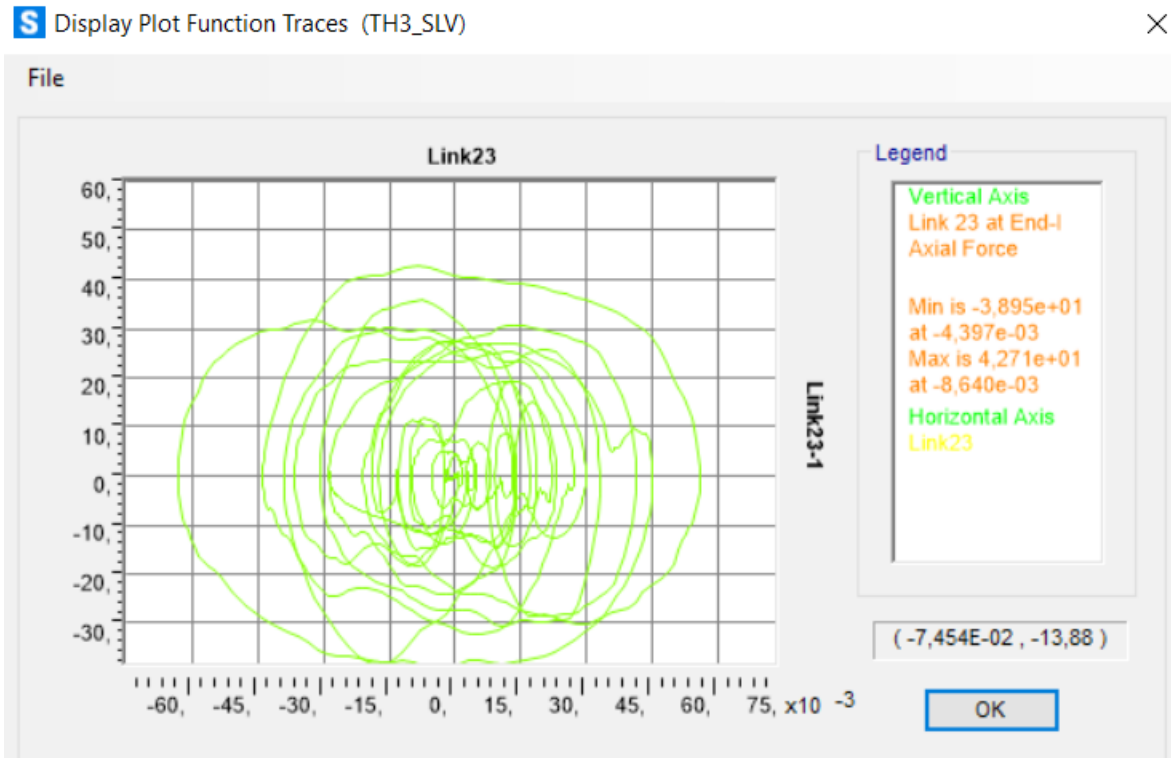


Figura 328. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

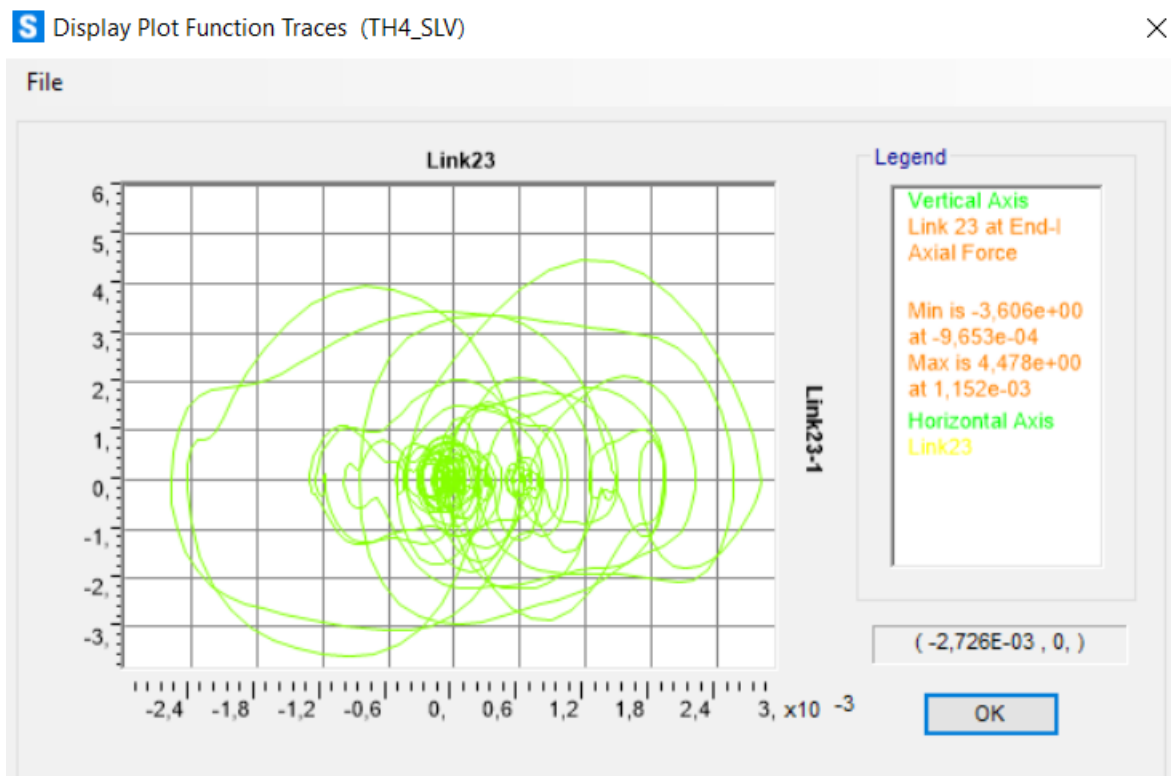


Figura 329. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

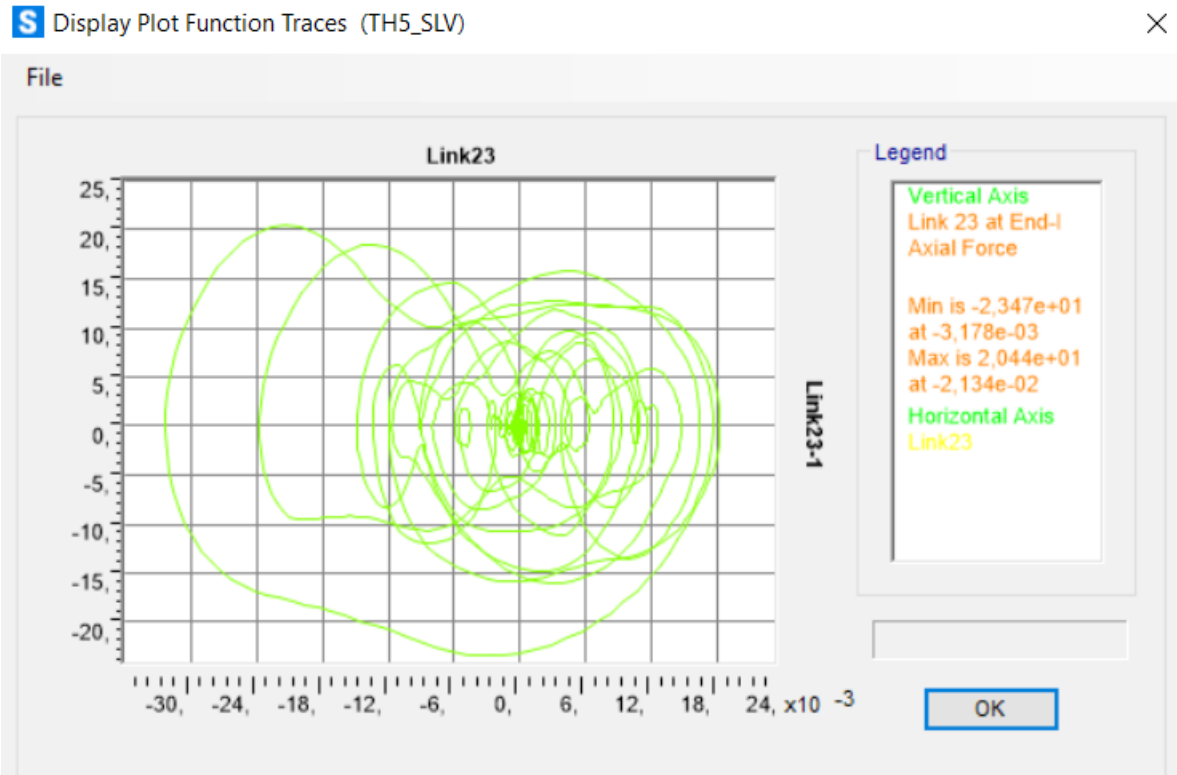


Figura 330. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

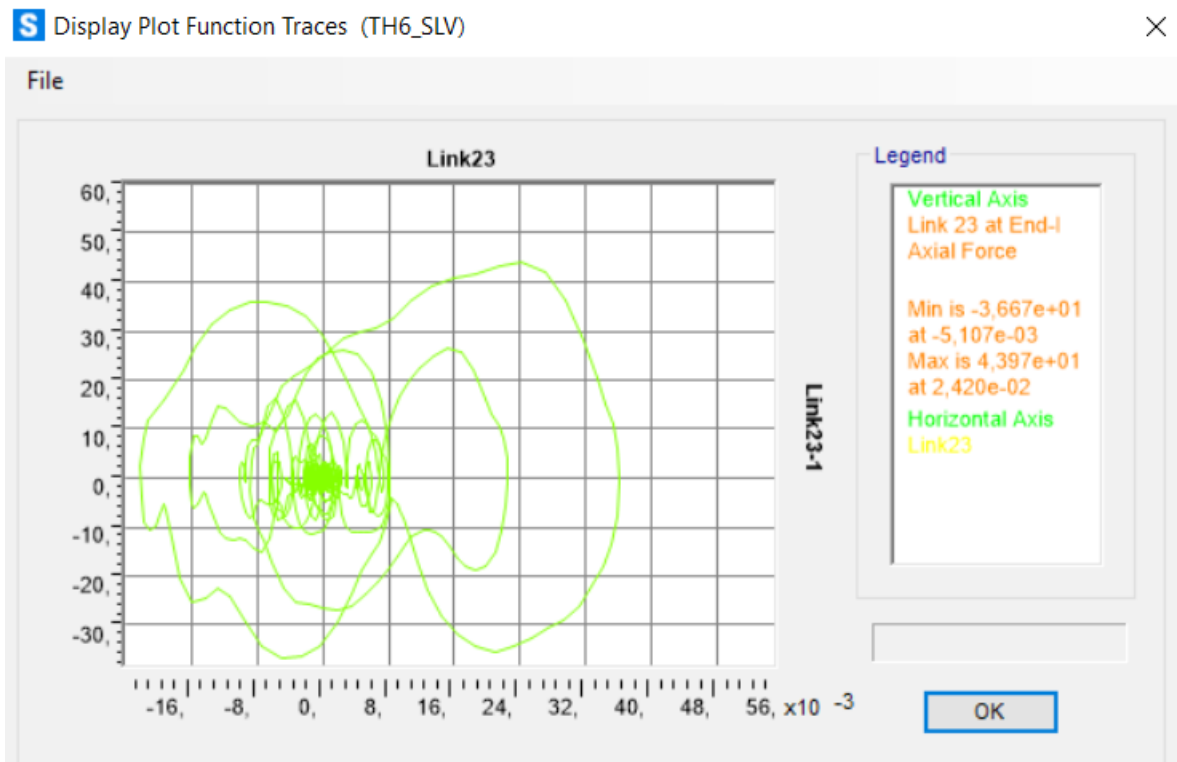


Figura 331. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

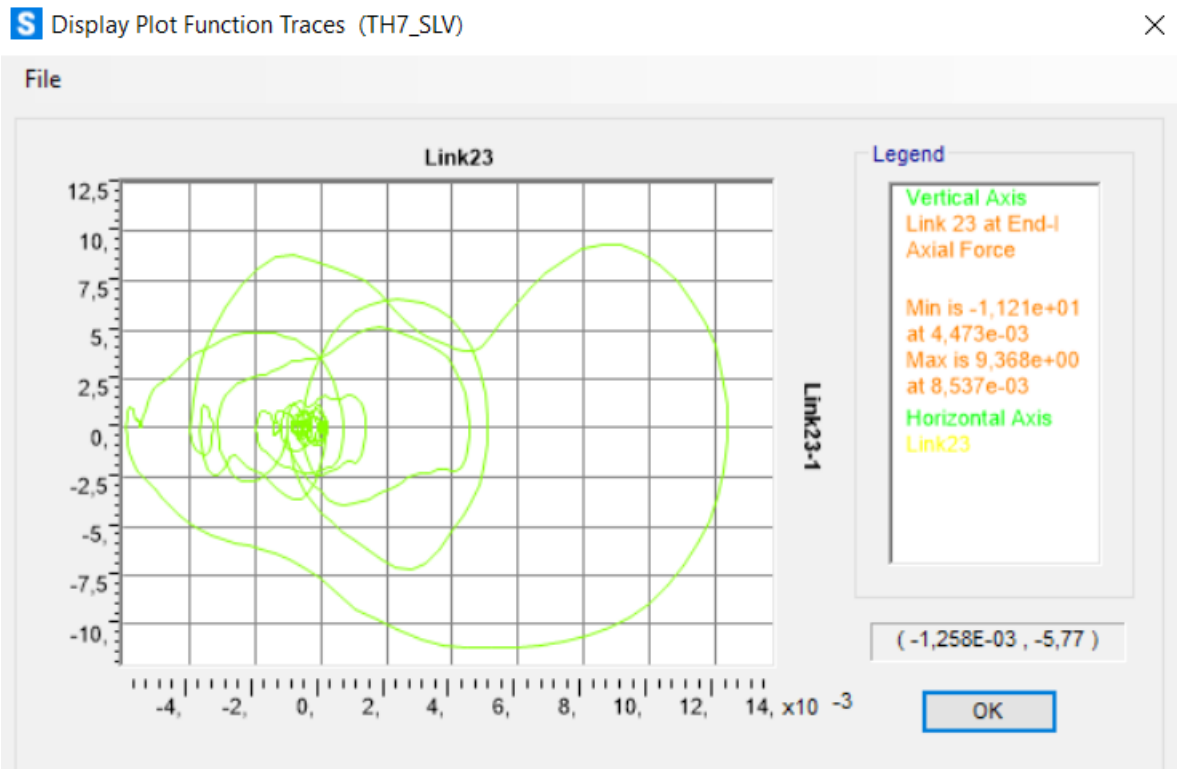


Figura 332. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

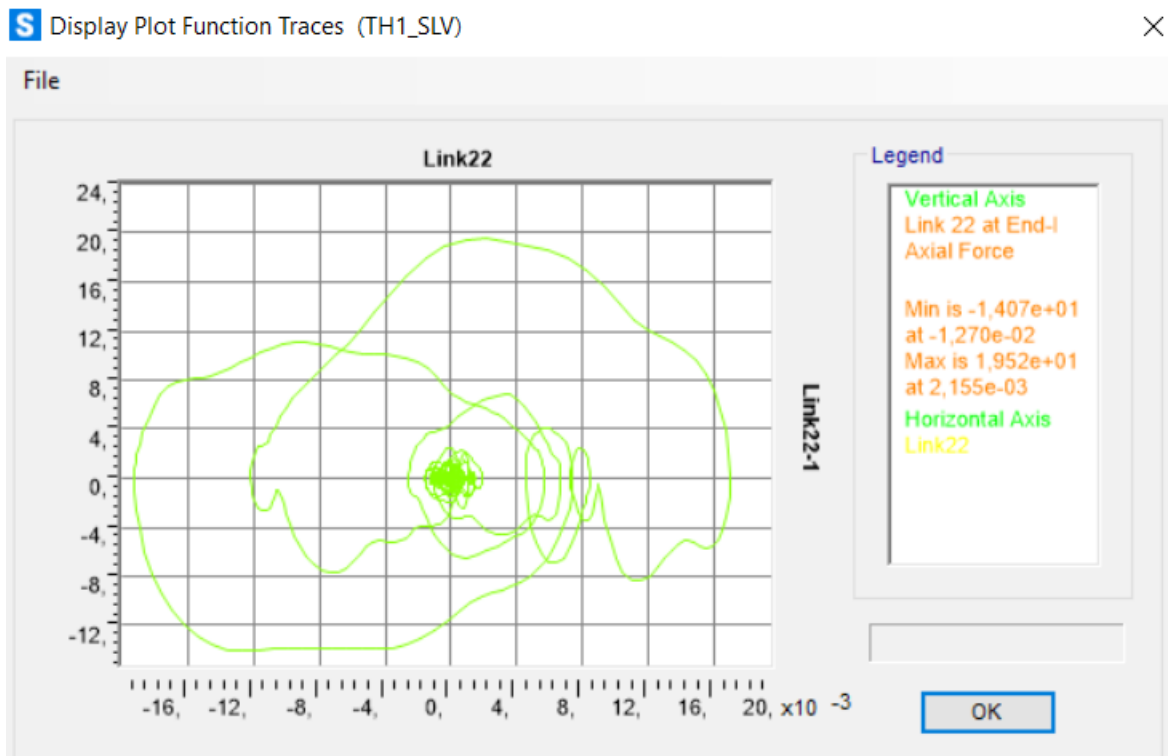


Figura 333. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

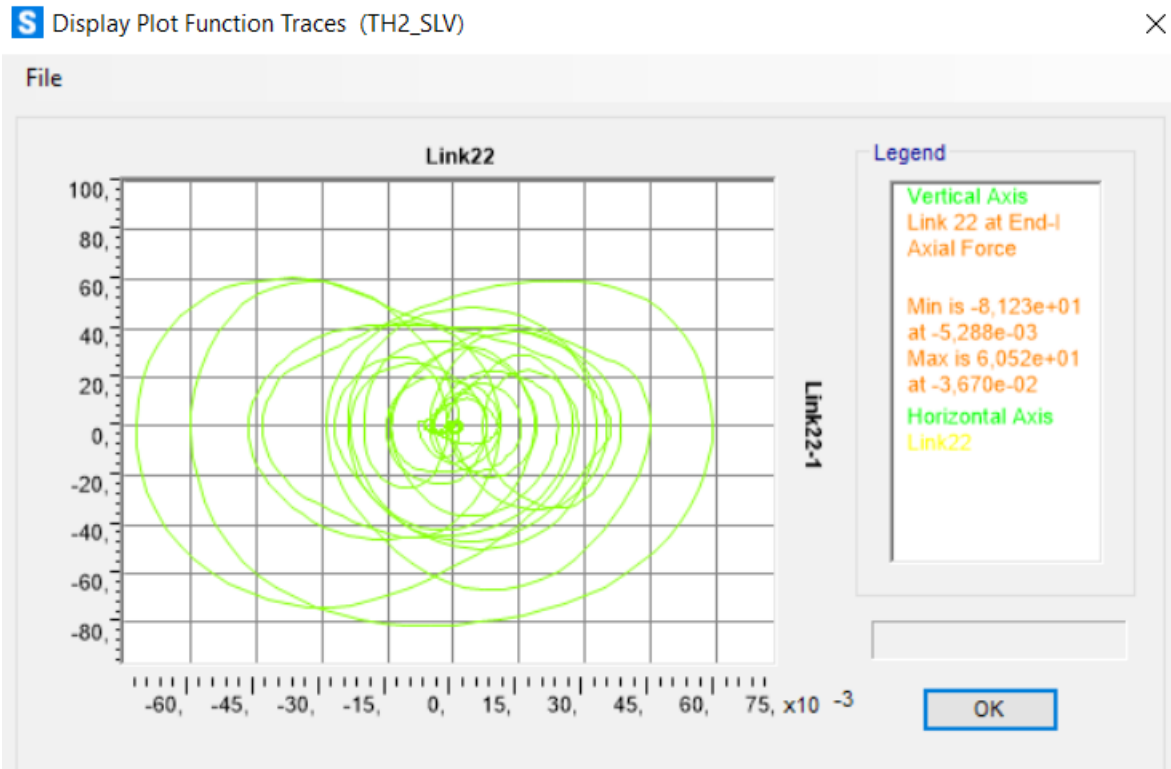


Figura 334. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

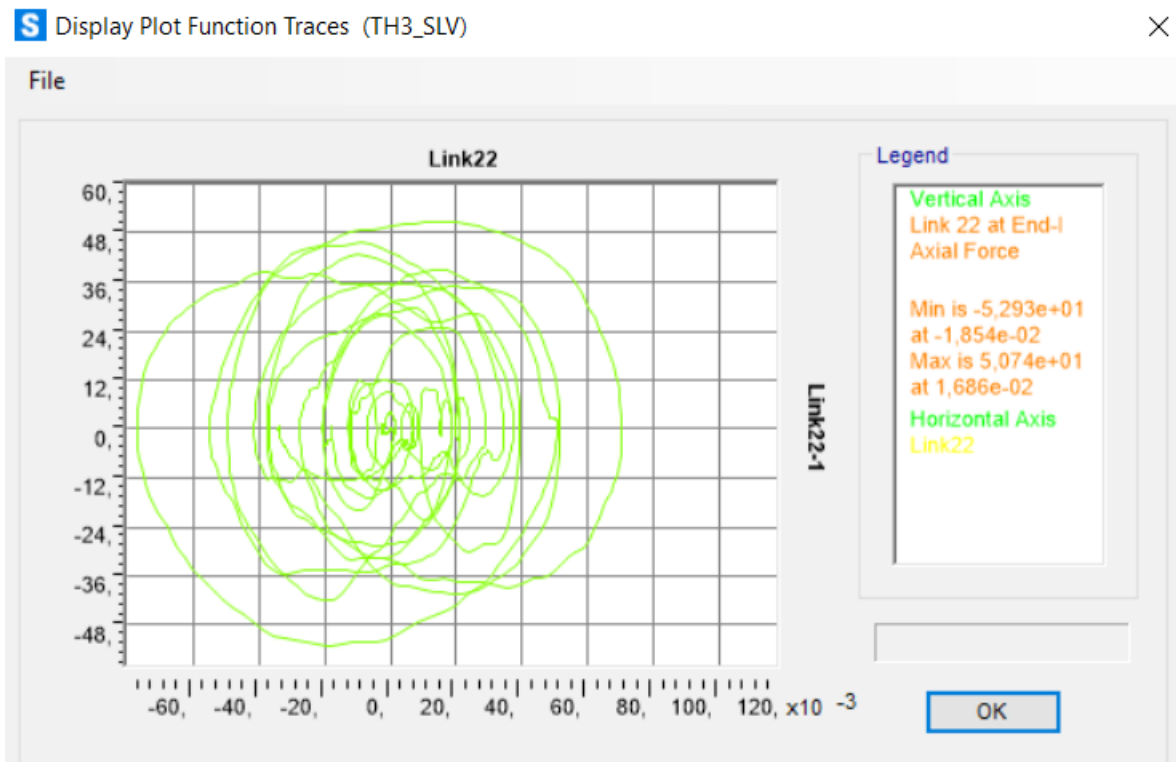


Figura 335. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

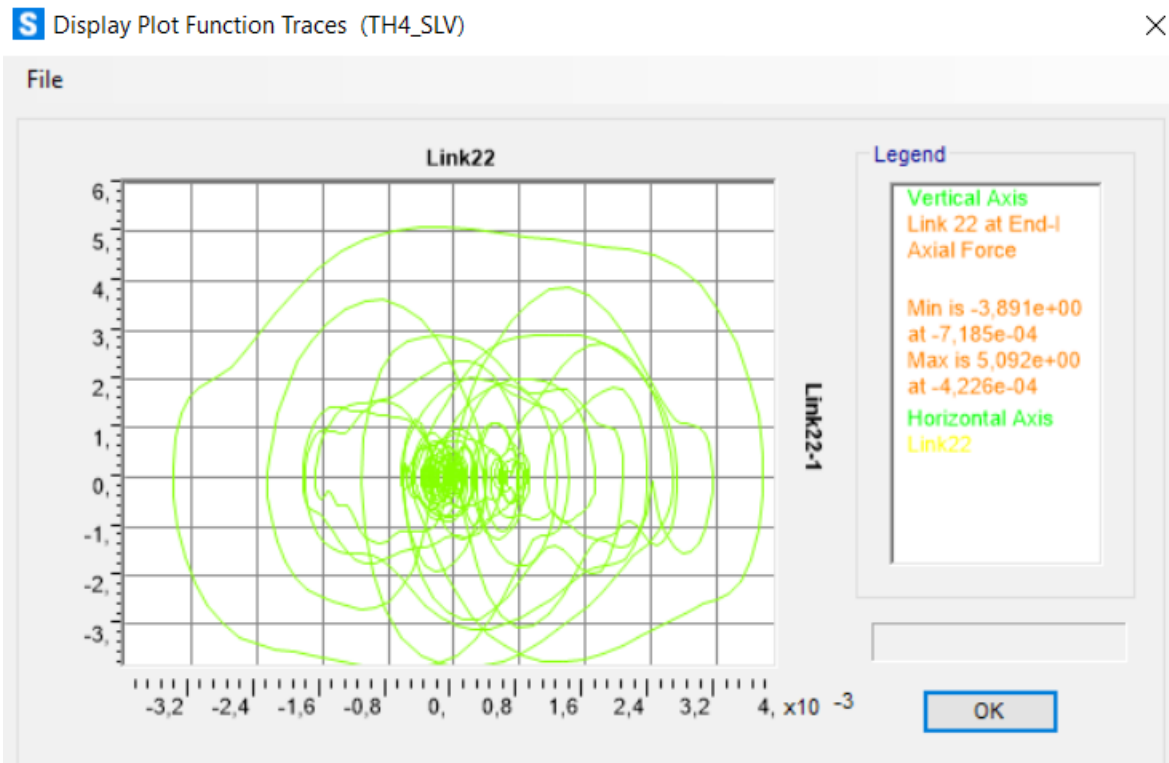


Figura 336. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

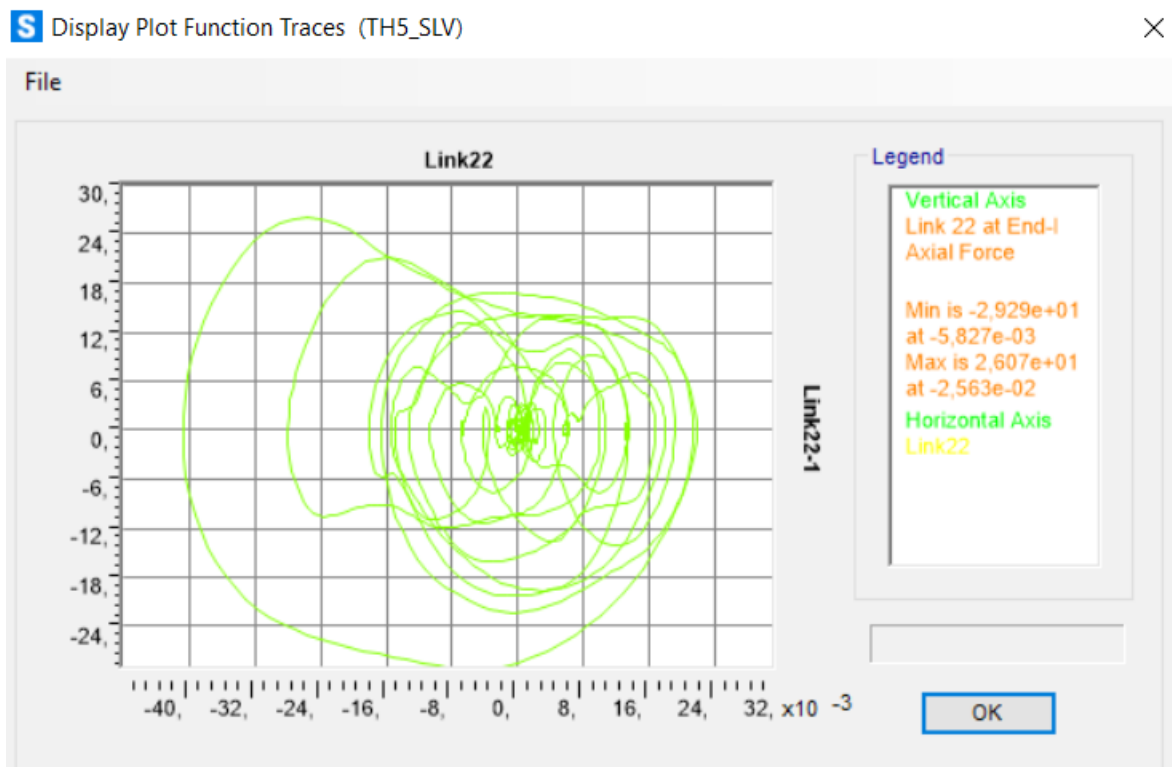


Figura 337. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

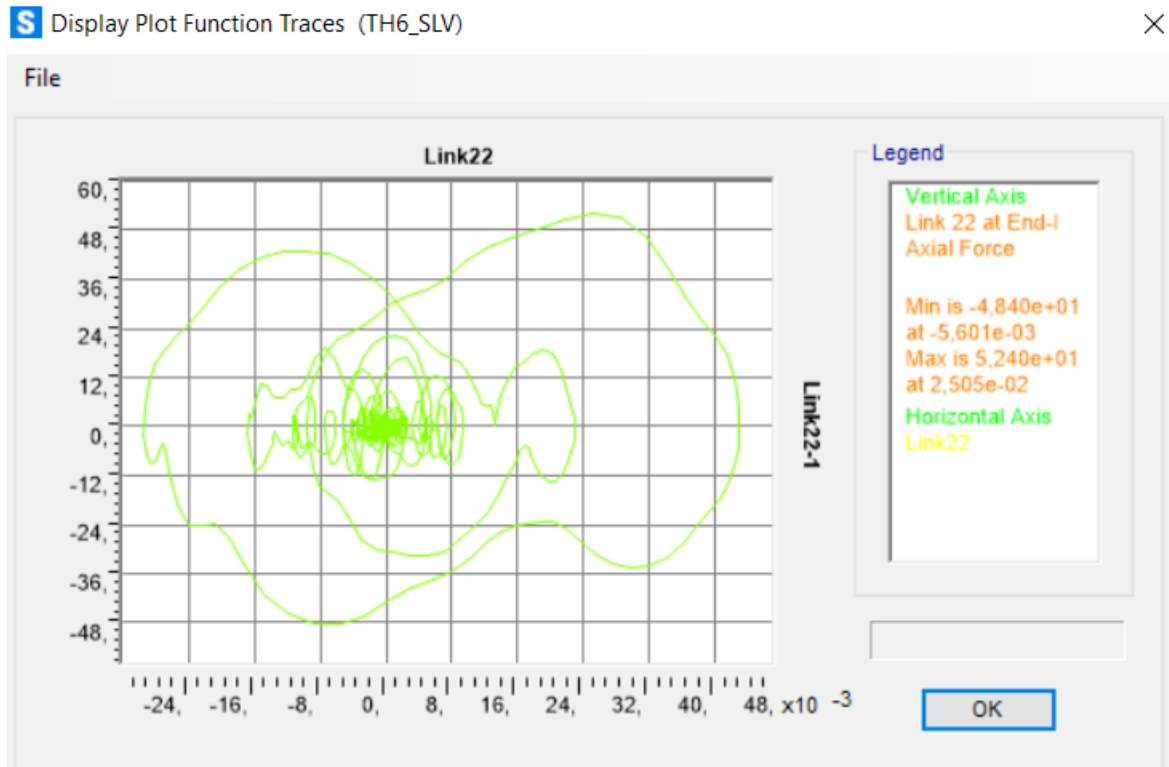


Figura 338. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

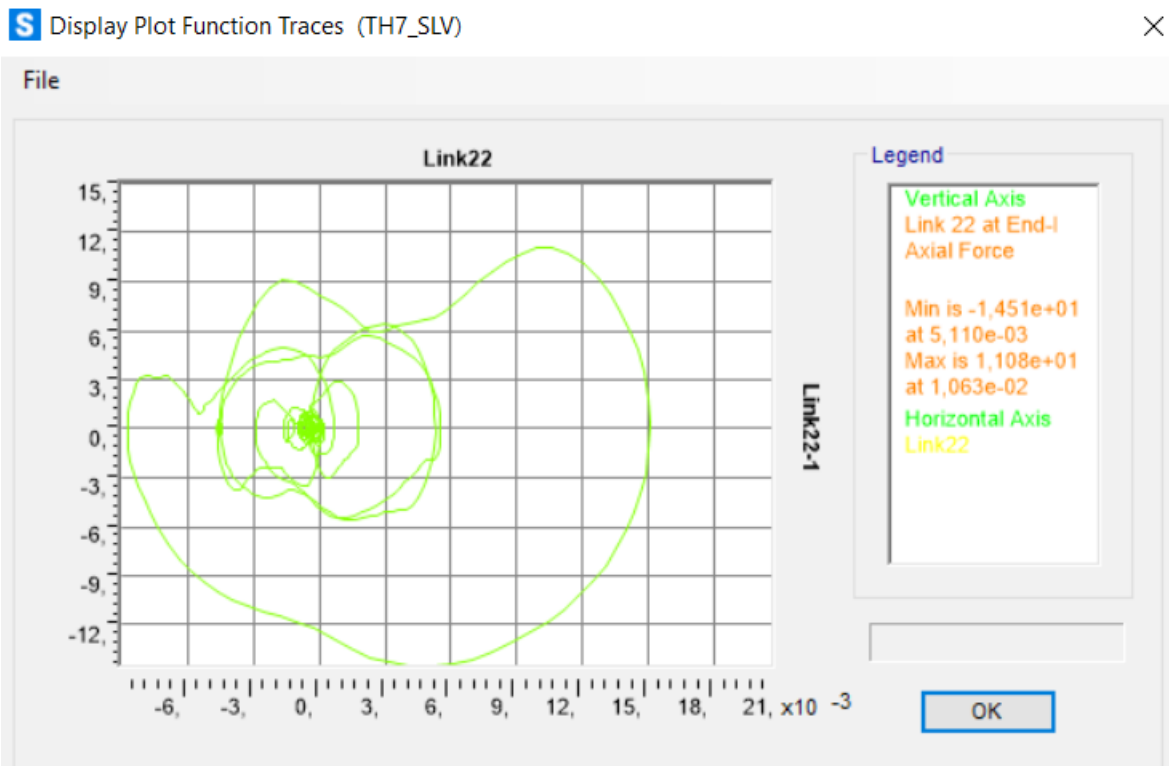


Figura 339. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Dissipatore elasto-plastico:

Telaio 11-12-13-14-15-16 (direzione x)

N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	7	0,0237	0,0029
4	8	0,0308	0,0029
5	9	0,0388	0,0027

Telaio 11-12-13-14-15-16
(direzione x)

N° piano	N° label	Fy
(-)	(-)	(kN)
3	7	25,93
4	8	25,93
5	9	25,93

Piano 3:

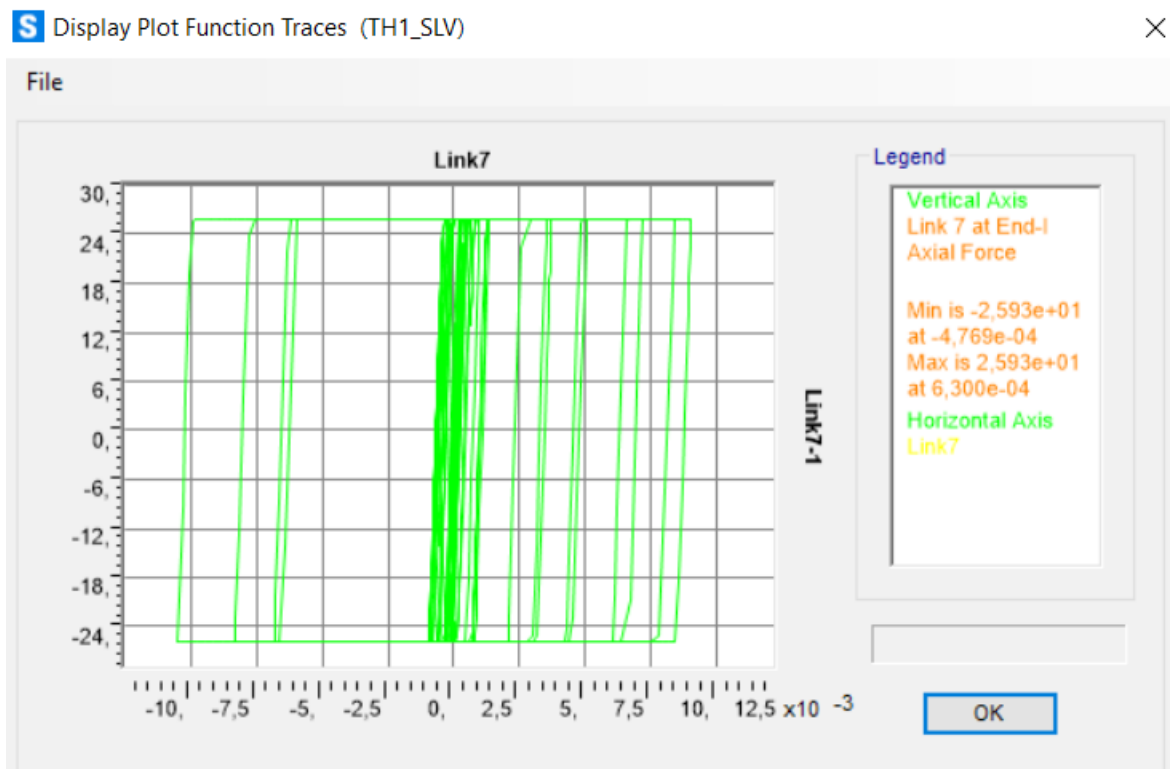


Figura 340. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

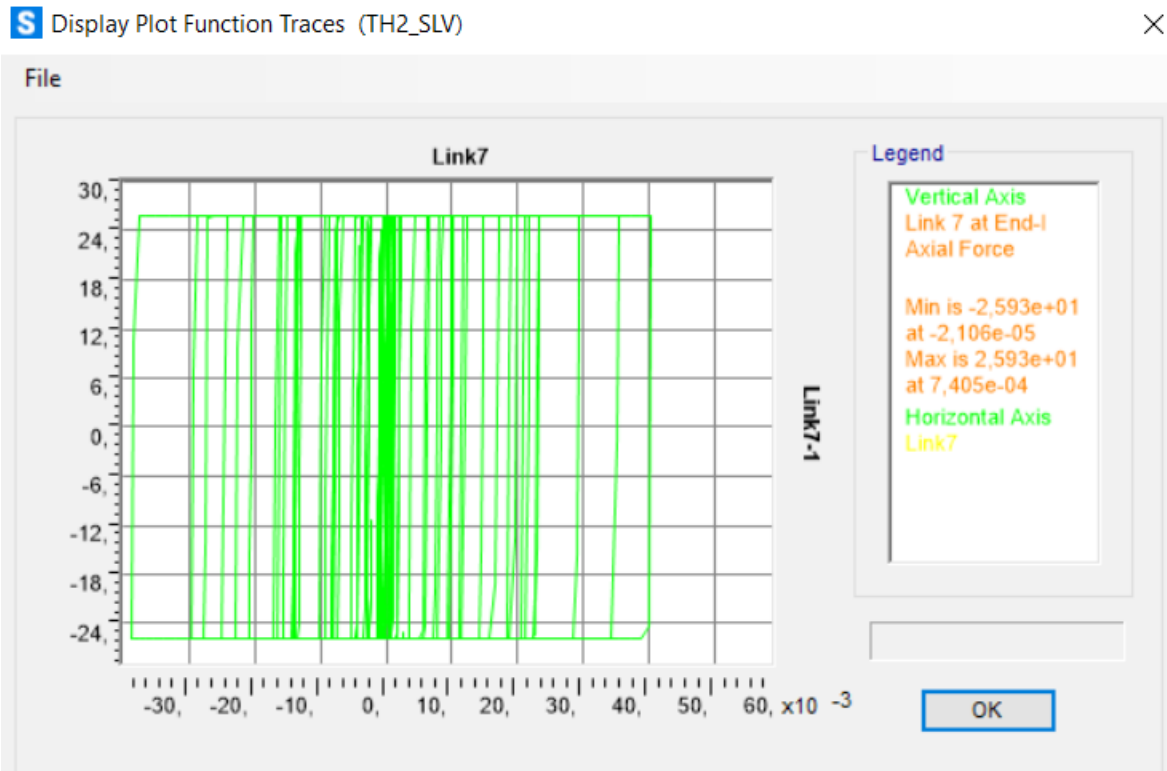


Figura 341. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

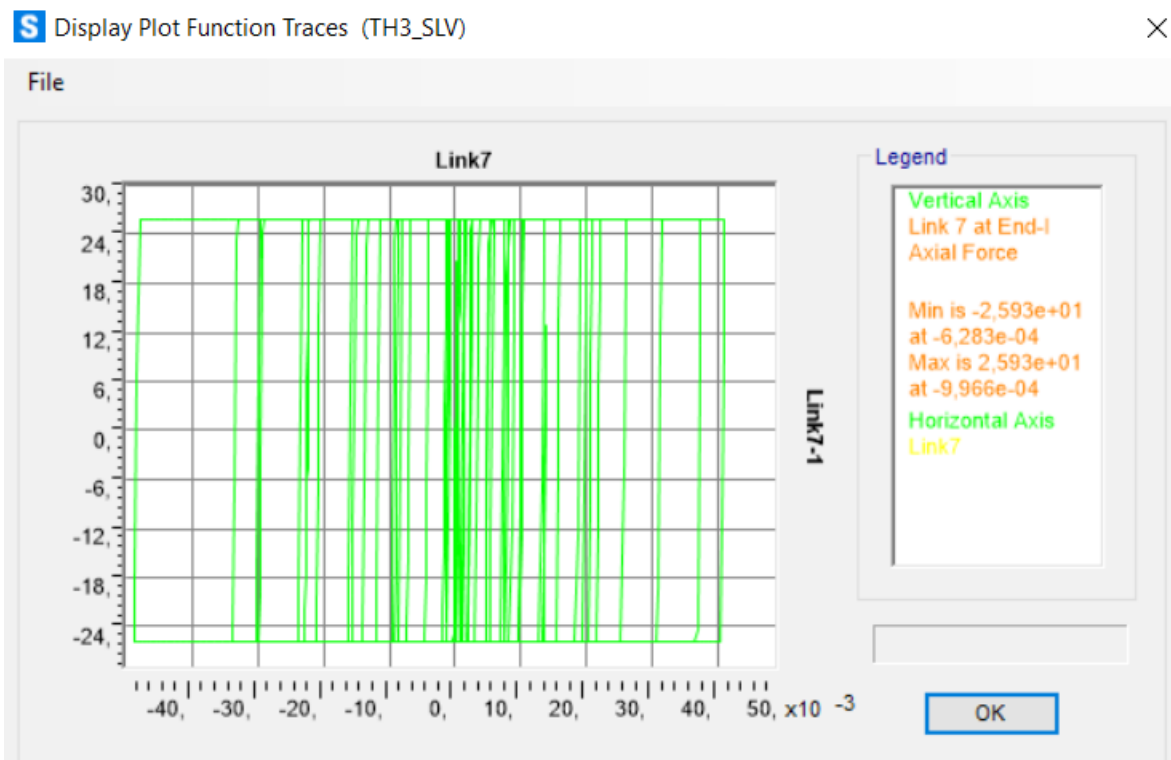


Figura 342. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

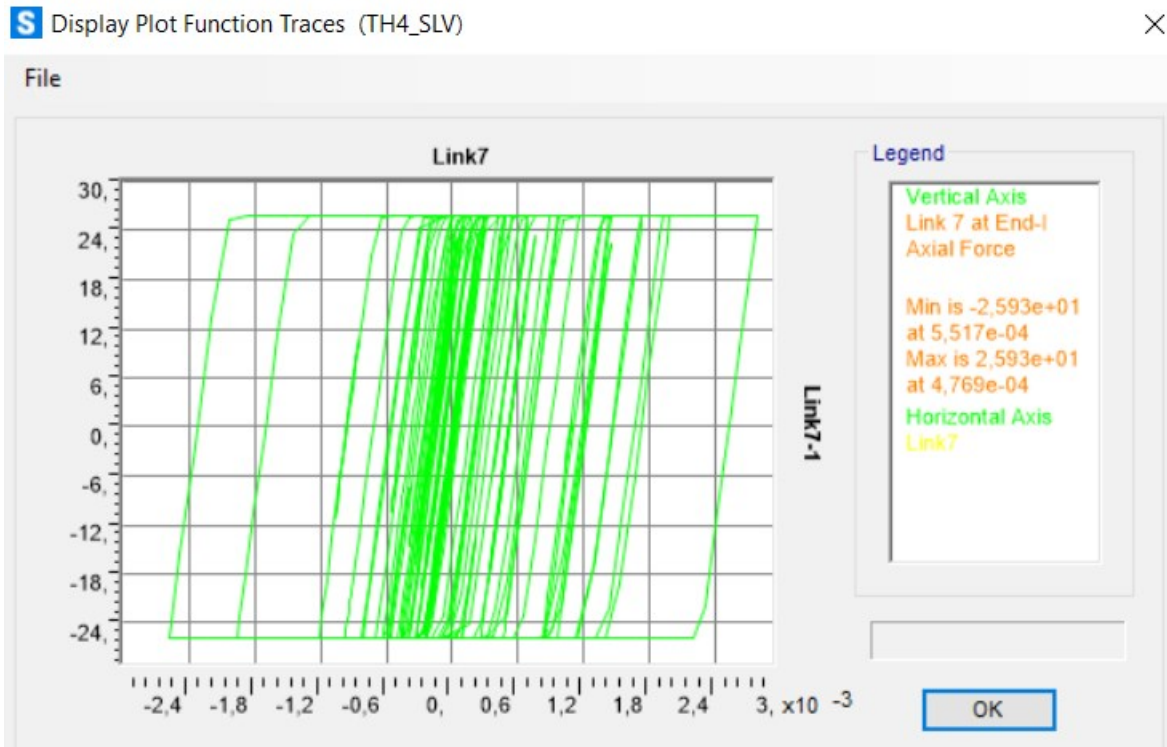


Figura 343. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

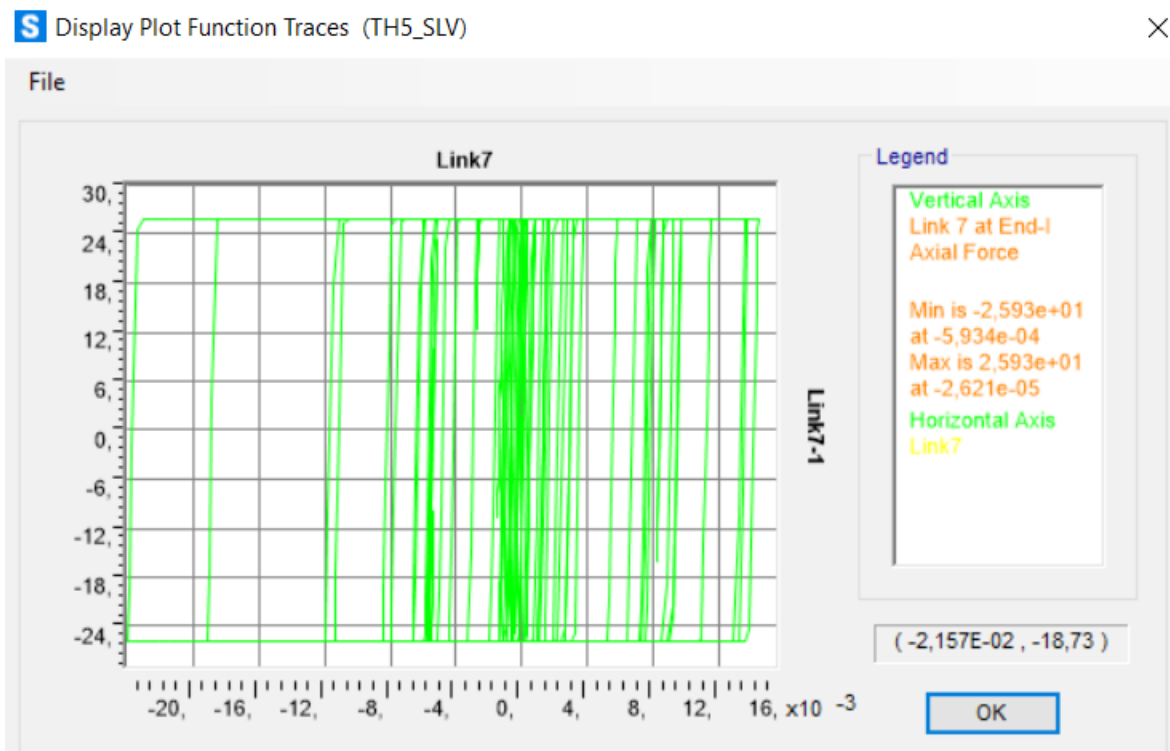


Figura 344. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

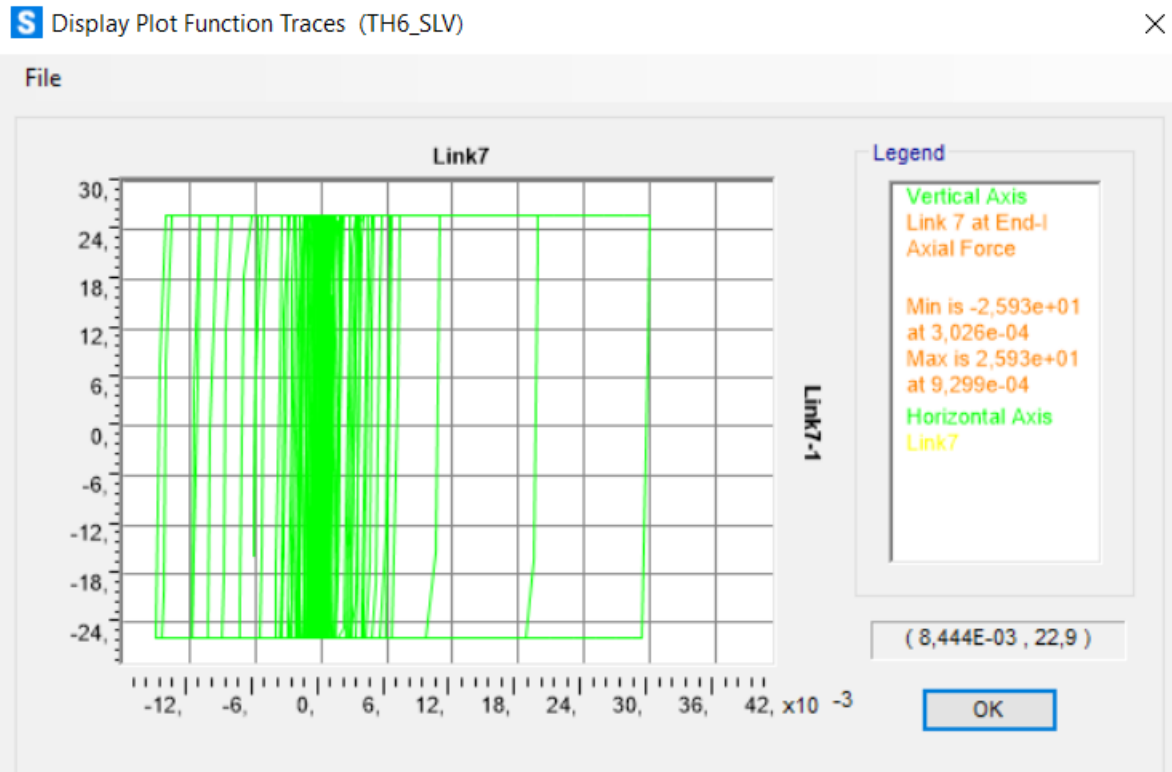


Figura 345. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

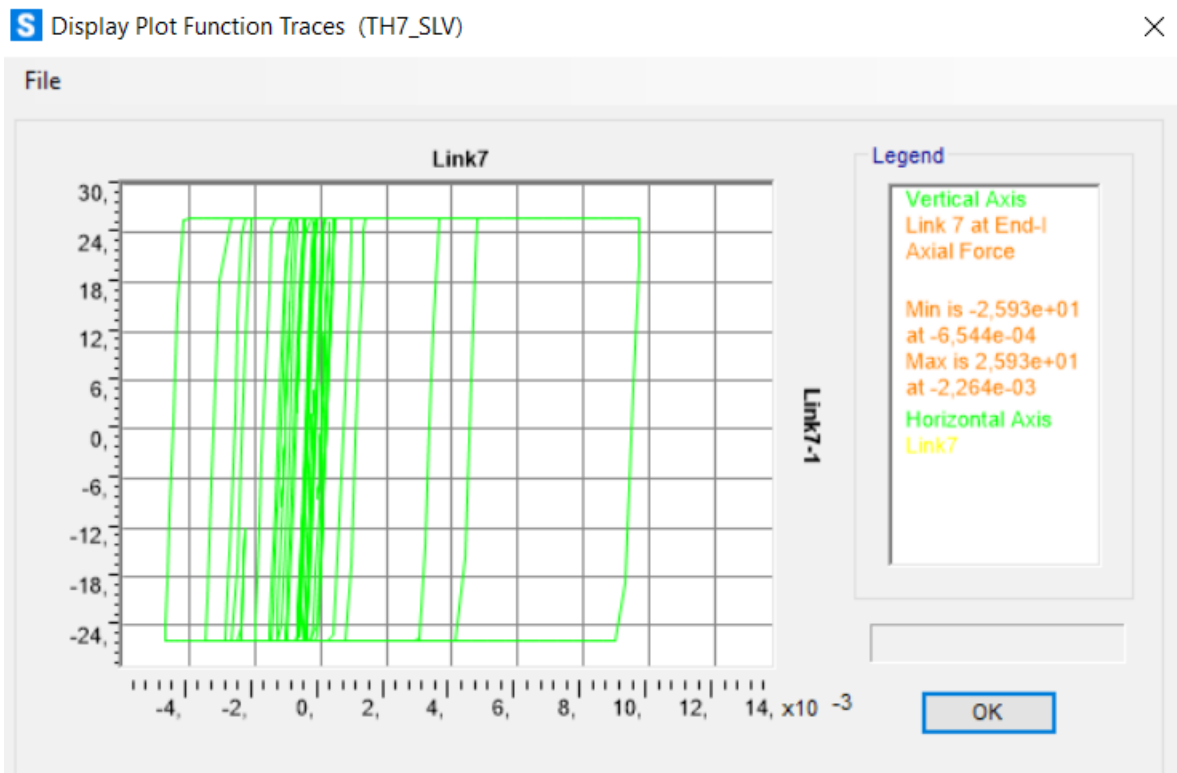


Figura 346. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

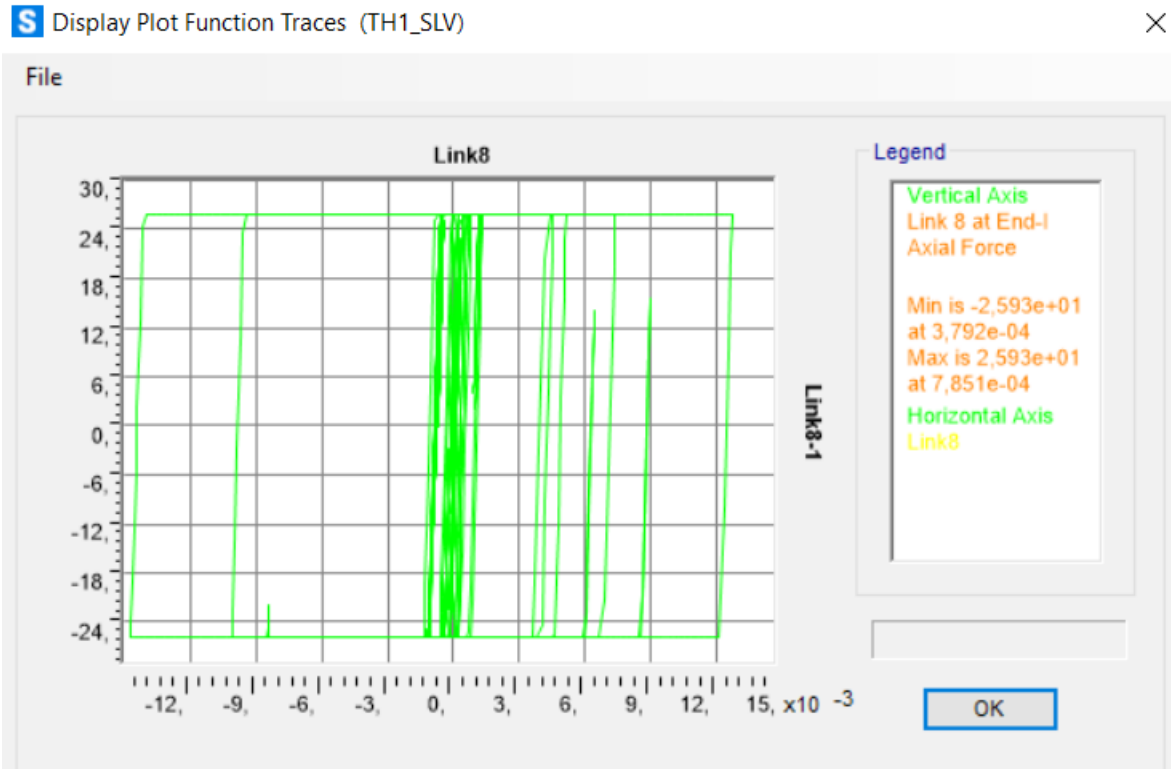


Figura 347. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

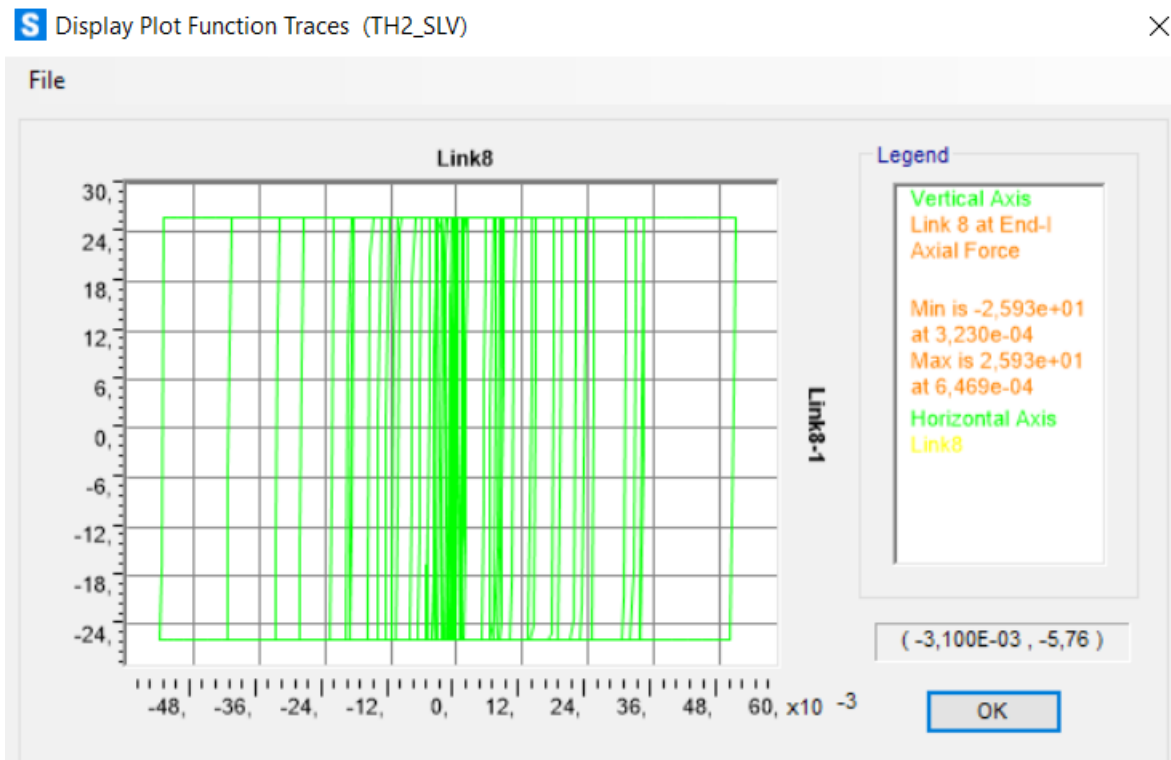


Figura 348. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

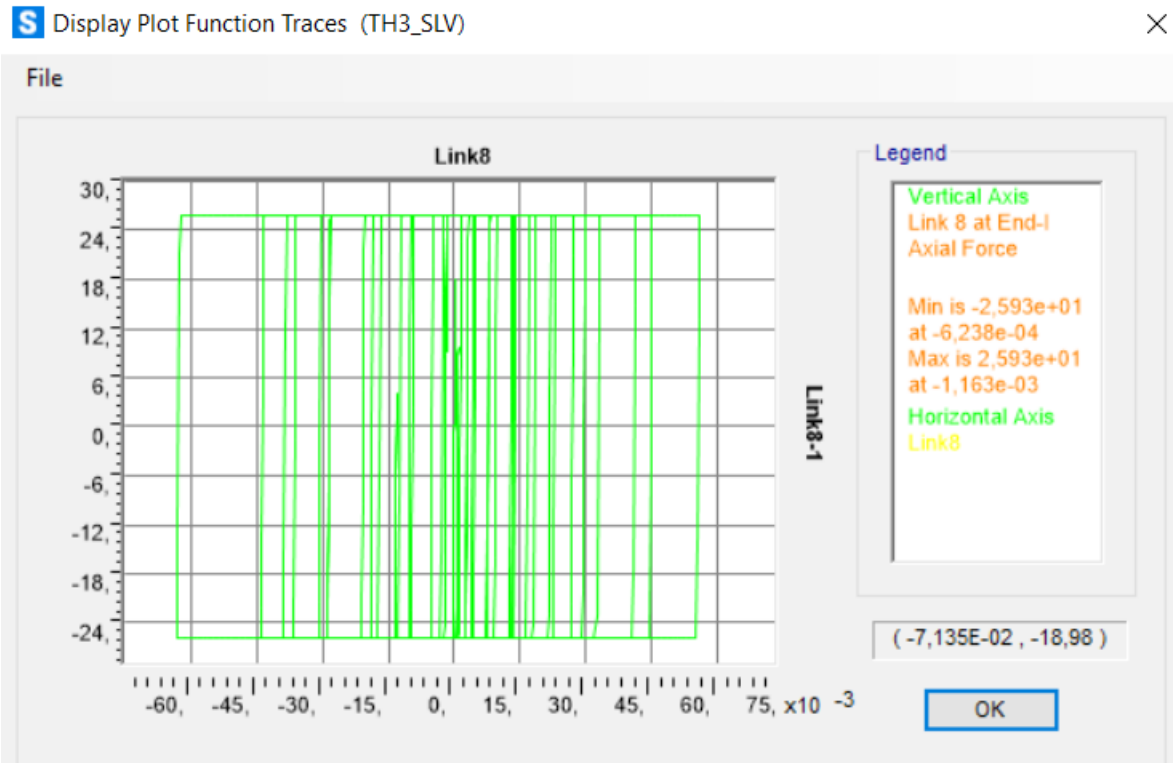


Figura 349. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

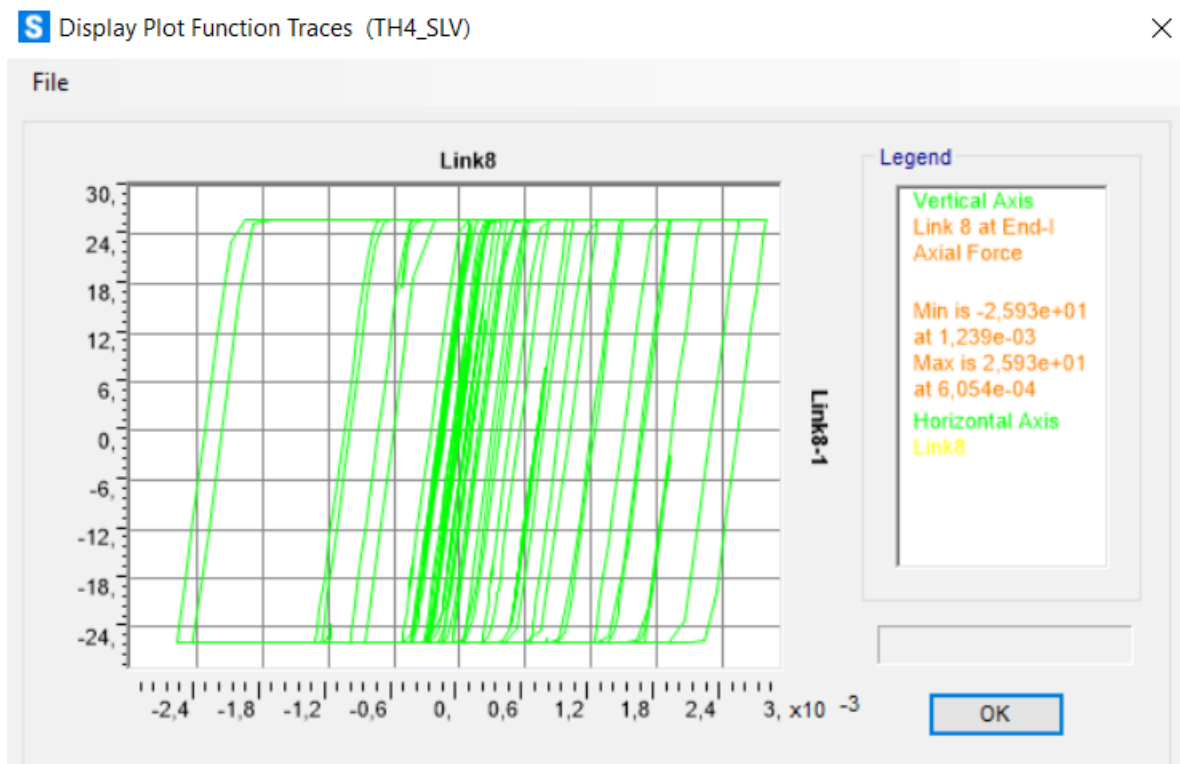


Figura 350. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

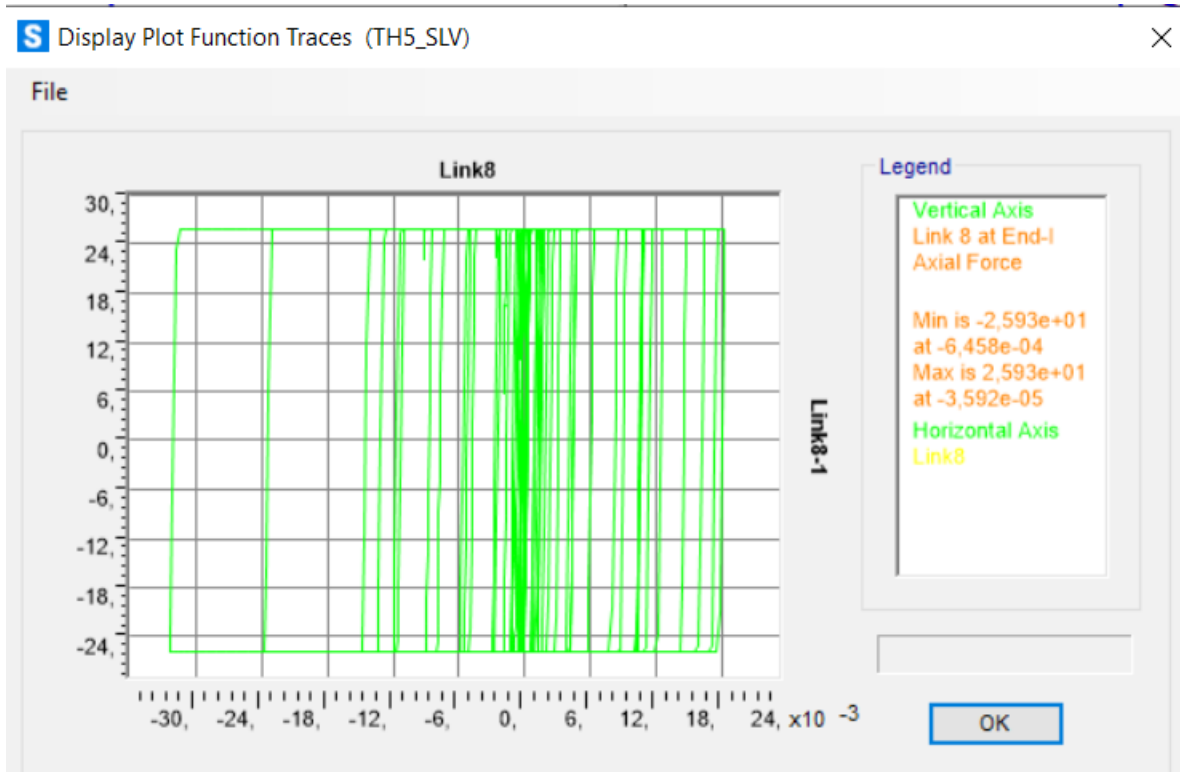


Figura 351. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

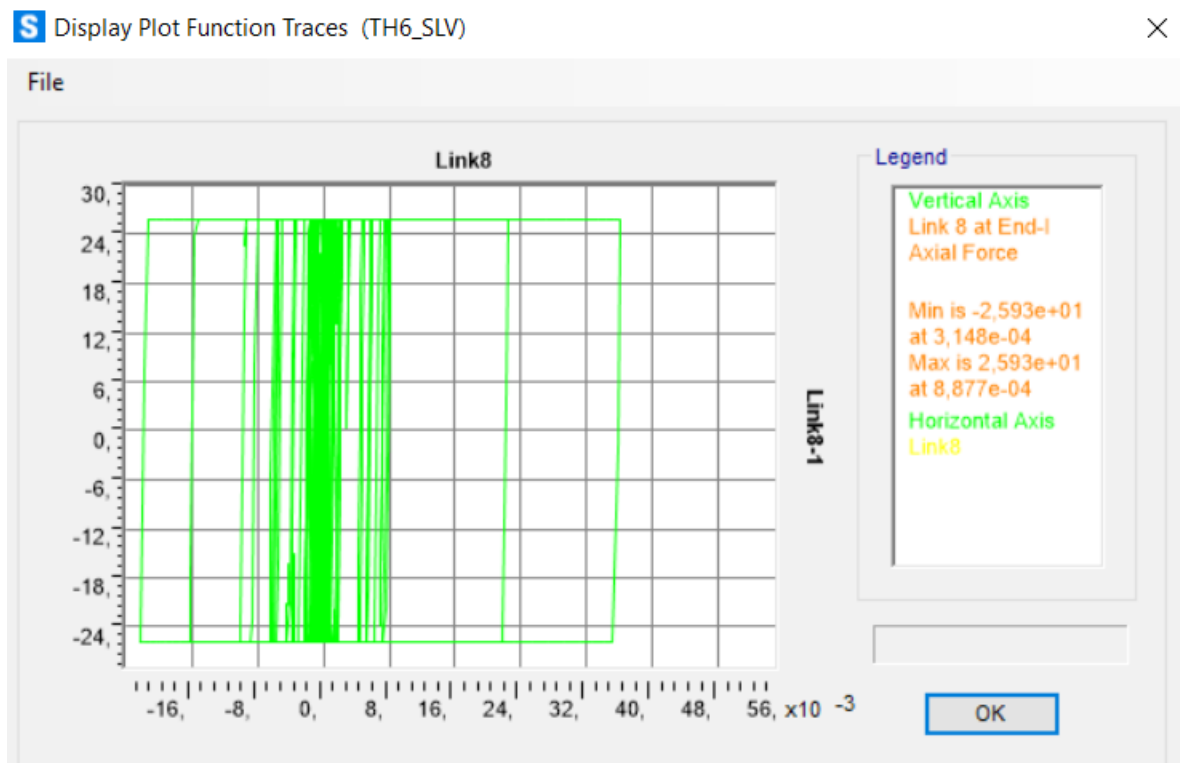


Figura 352. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

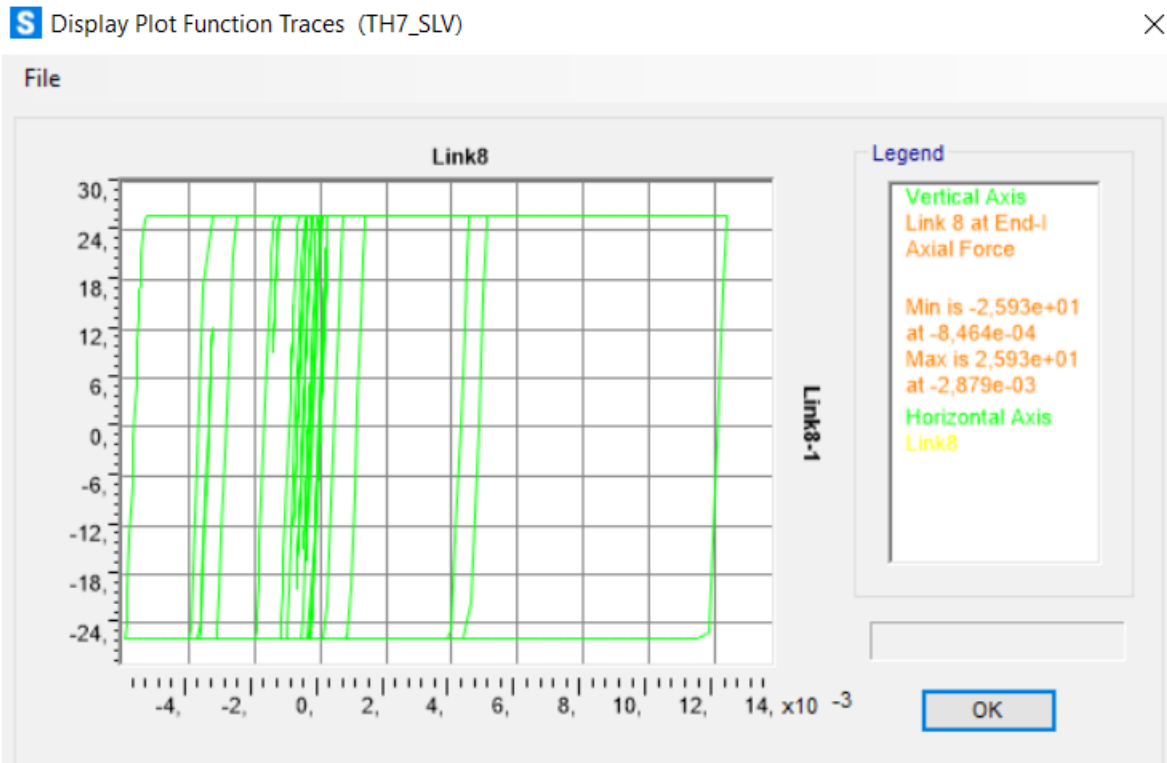


Figura 353. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

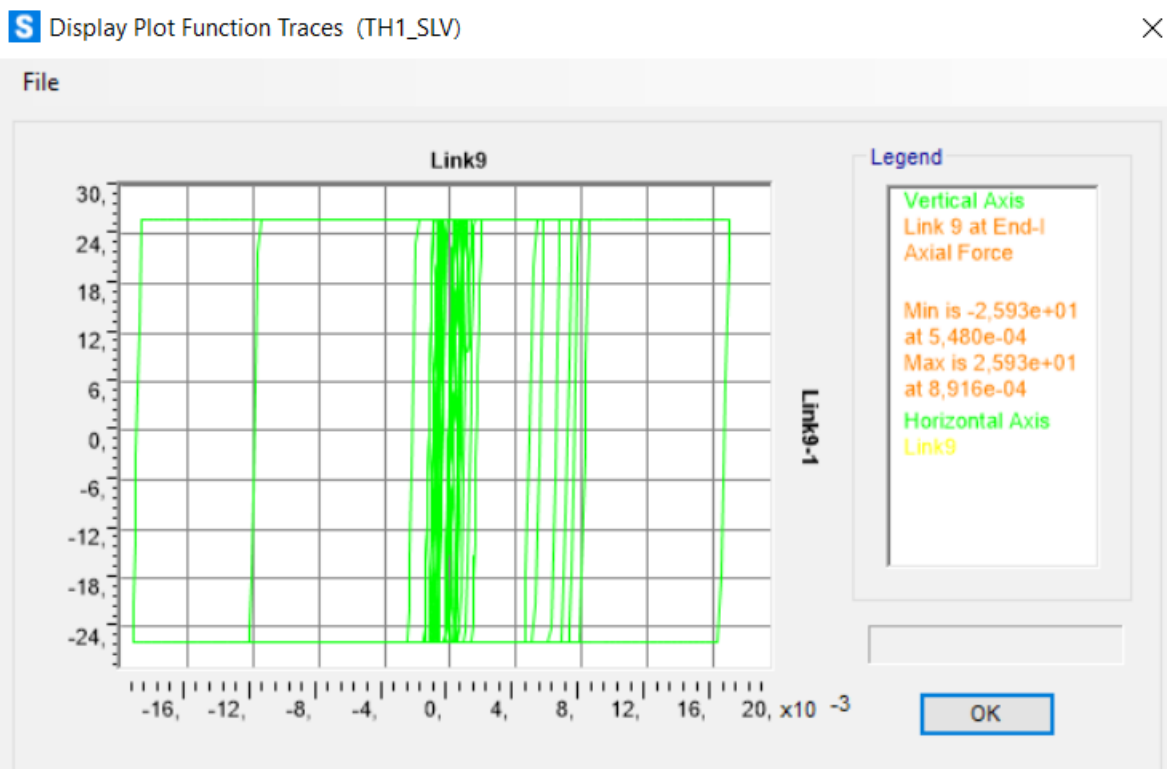


Figura 354. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

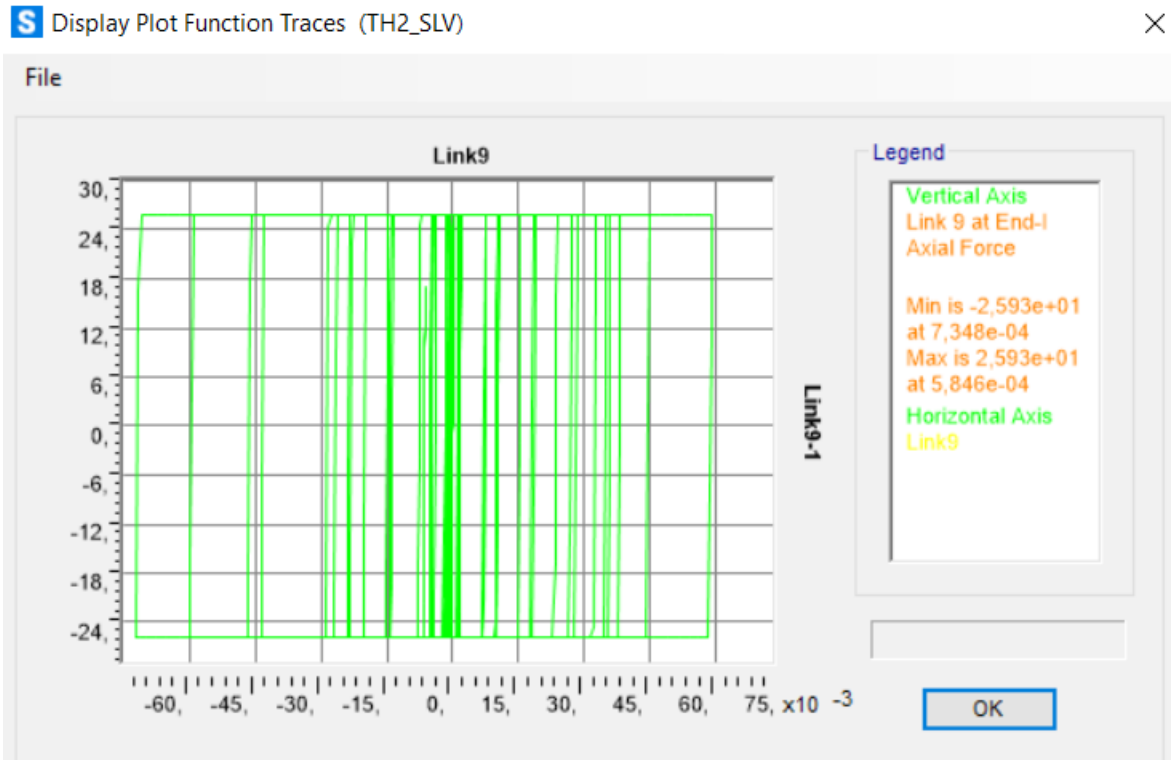


Figura 355. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

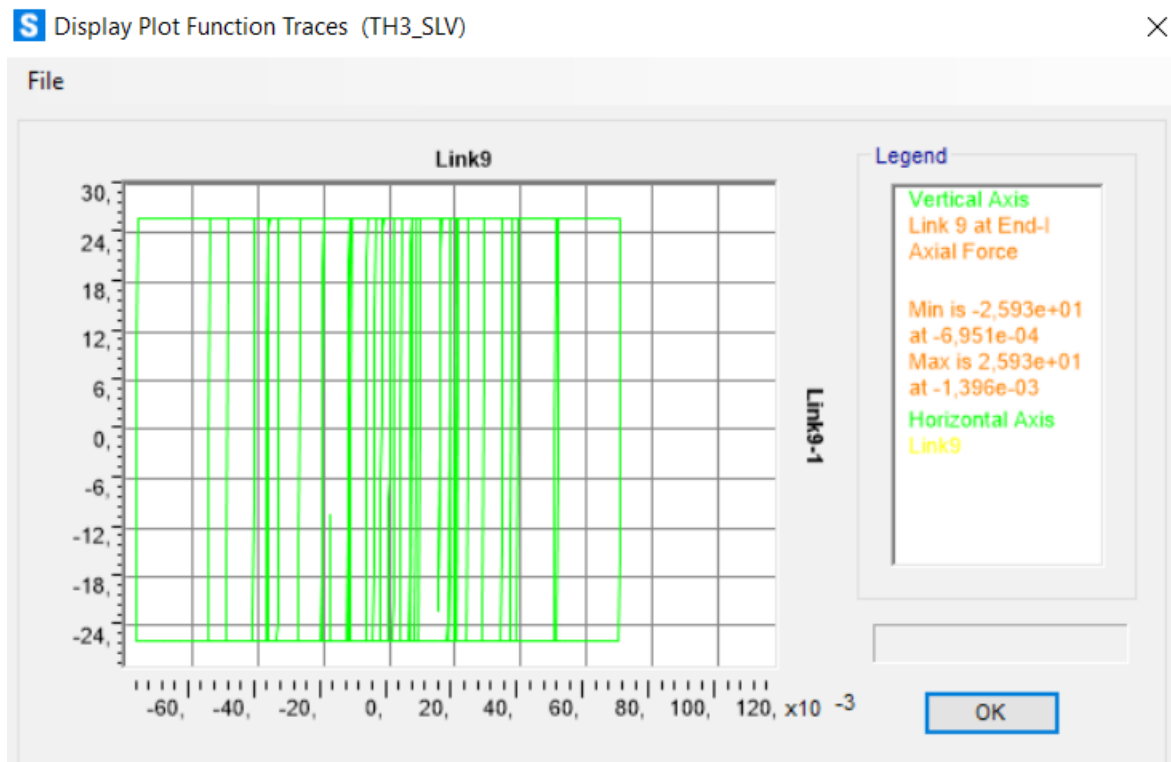


Figura 356. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

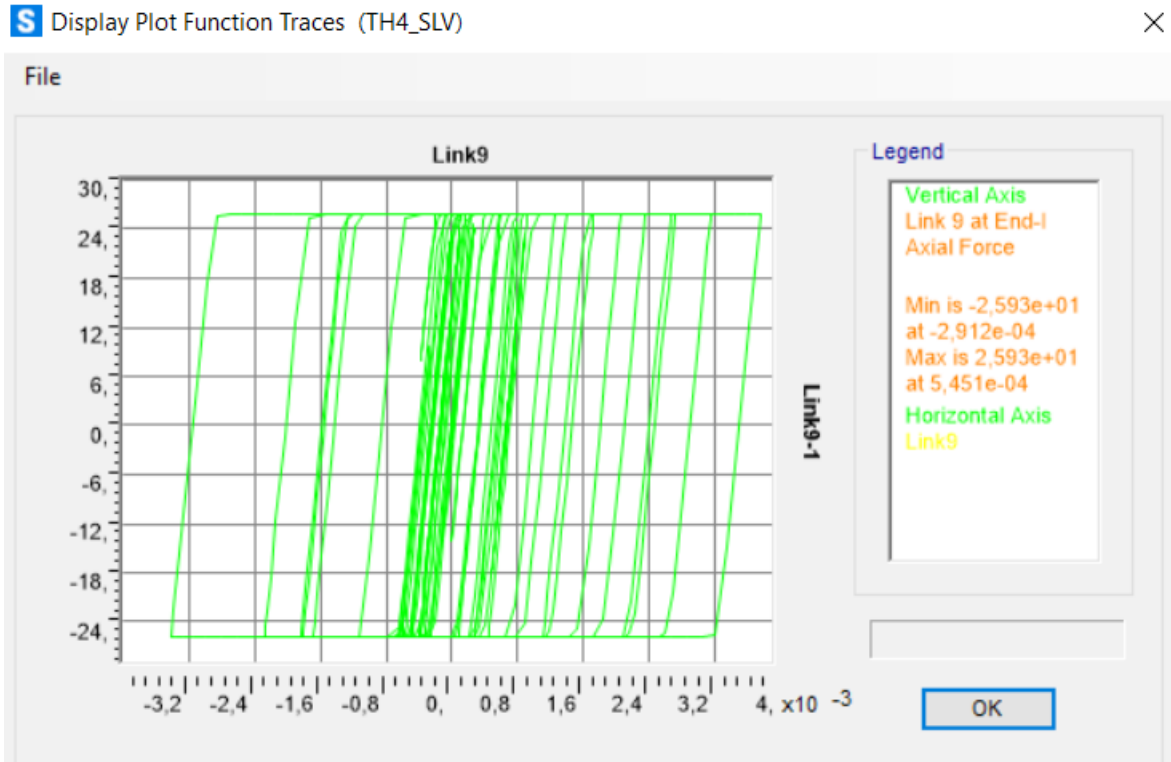


Figura 357. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

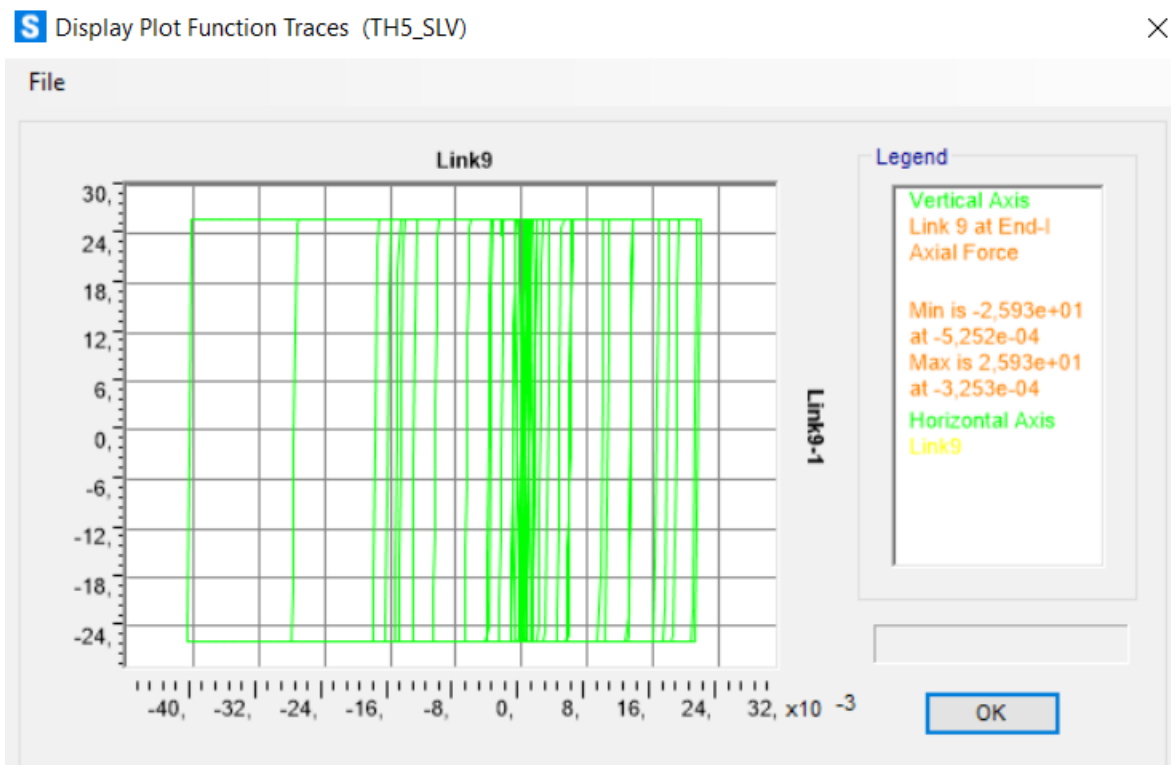


Figura 358. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

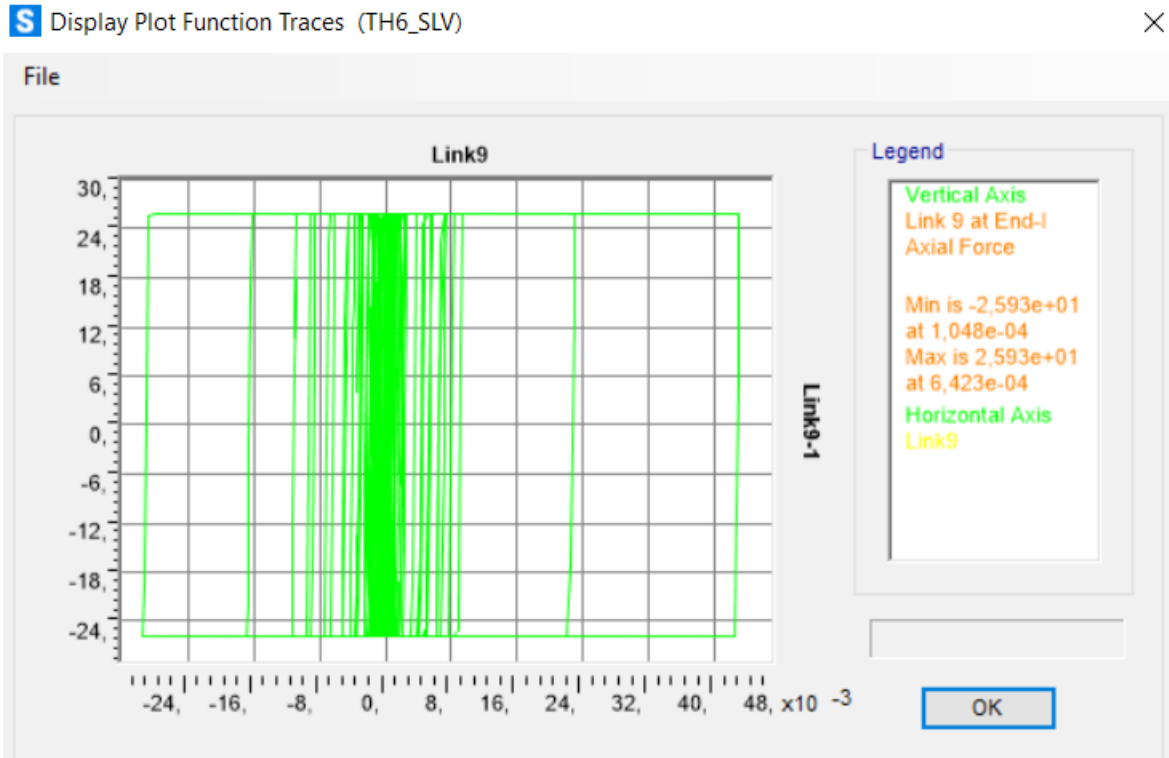


Figura 359. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

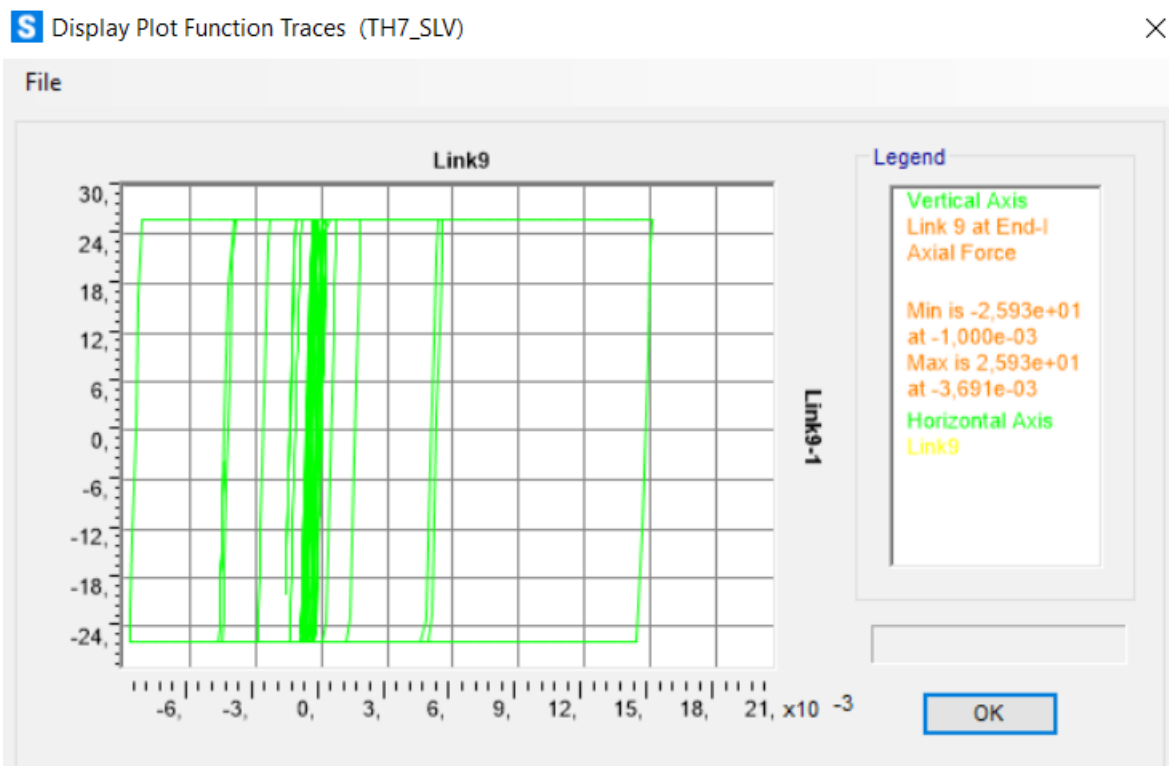


Figura 360. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori magnetoreologici alimentati del telaio 17-12-6-1 in direzione y:

Dissipatore viscoso:

Telaio 17-12-6-1 (direzione y)			
N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	15	0,0219	0,0025
4	14	0,0284	0,0026
5	13	0,0345	0,0028

Telaio 17-12-6-1 (direzione y)		
N° piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	15	28,01
4	14	31,38
5	13	37,71

Piano 3:

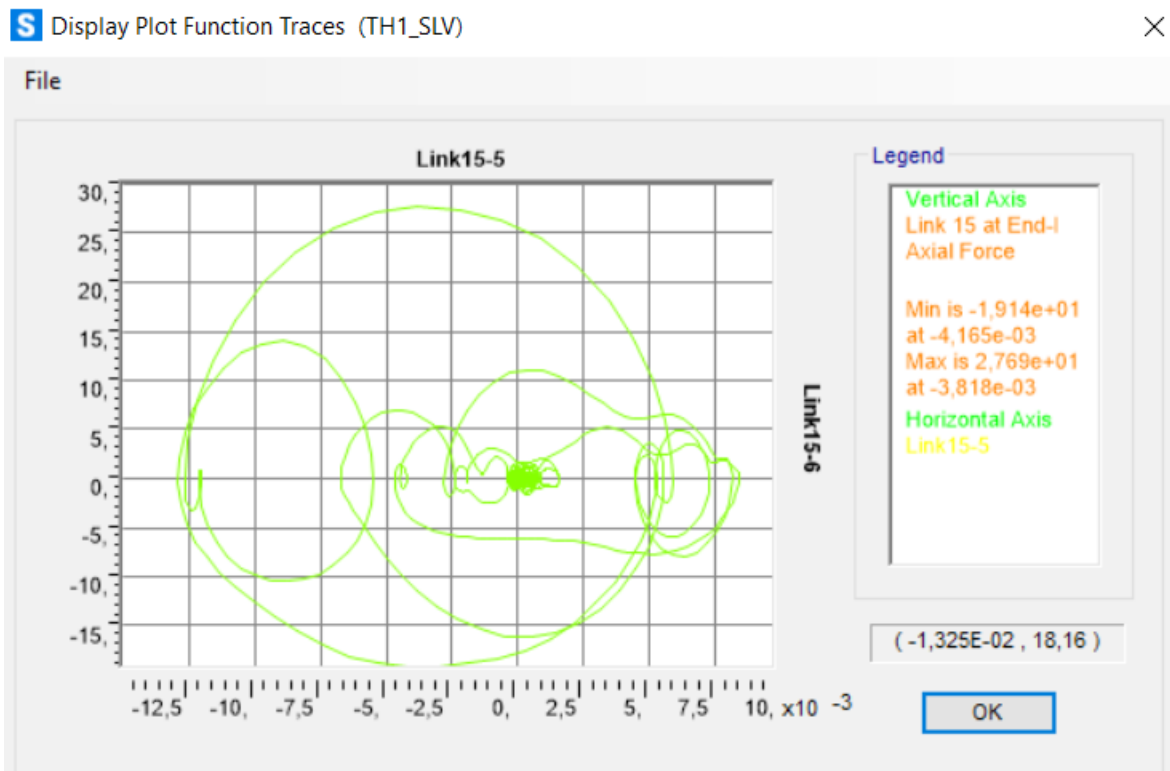


Figura 361. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

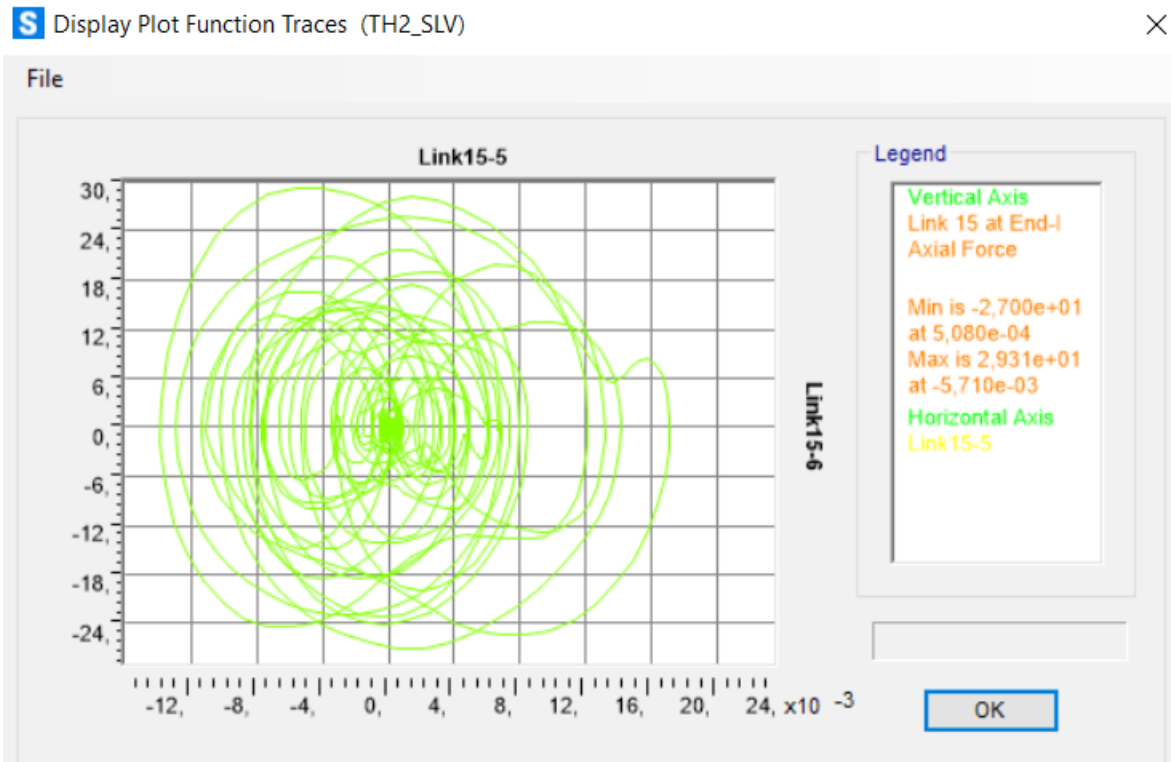


Figura 362. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

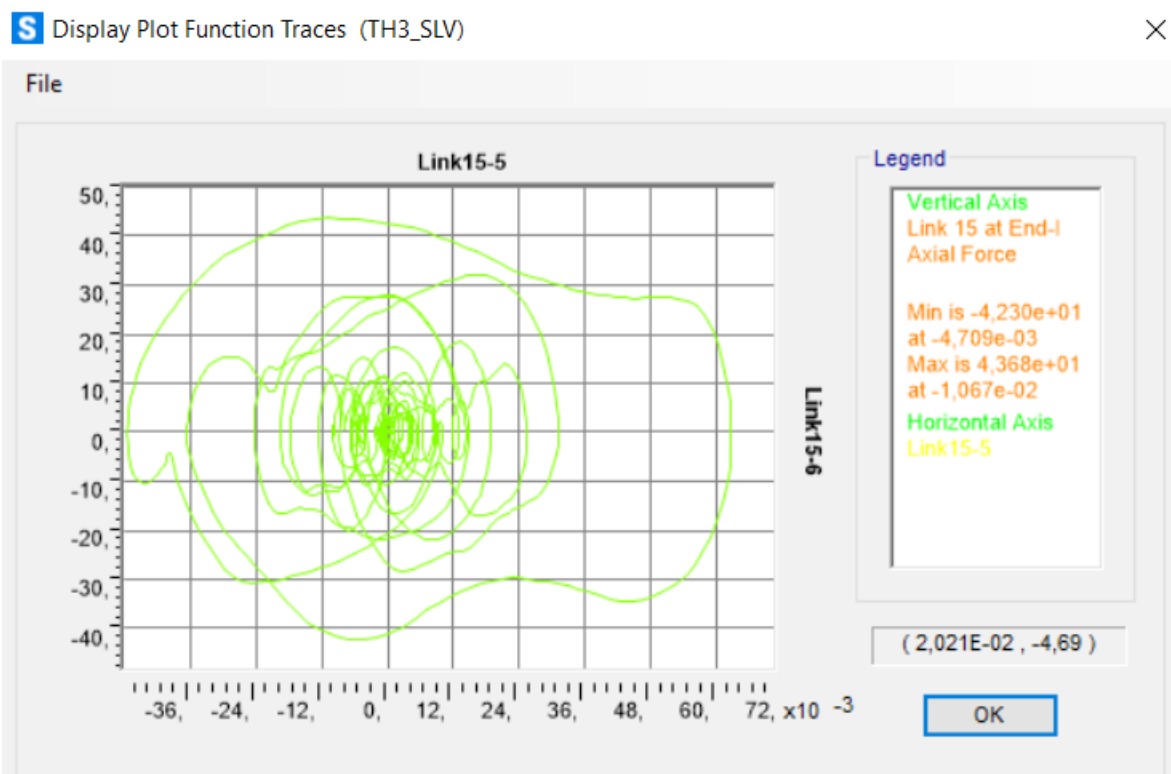


Figura 363. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

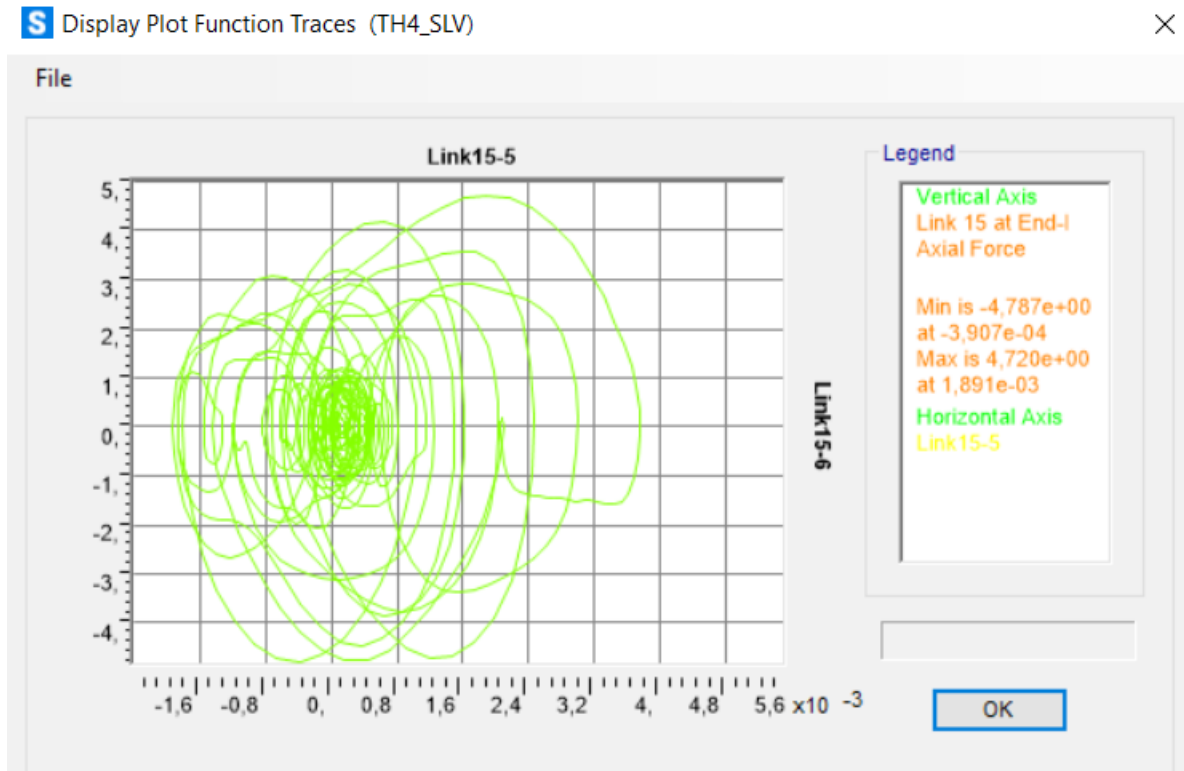


Figura 364. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

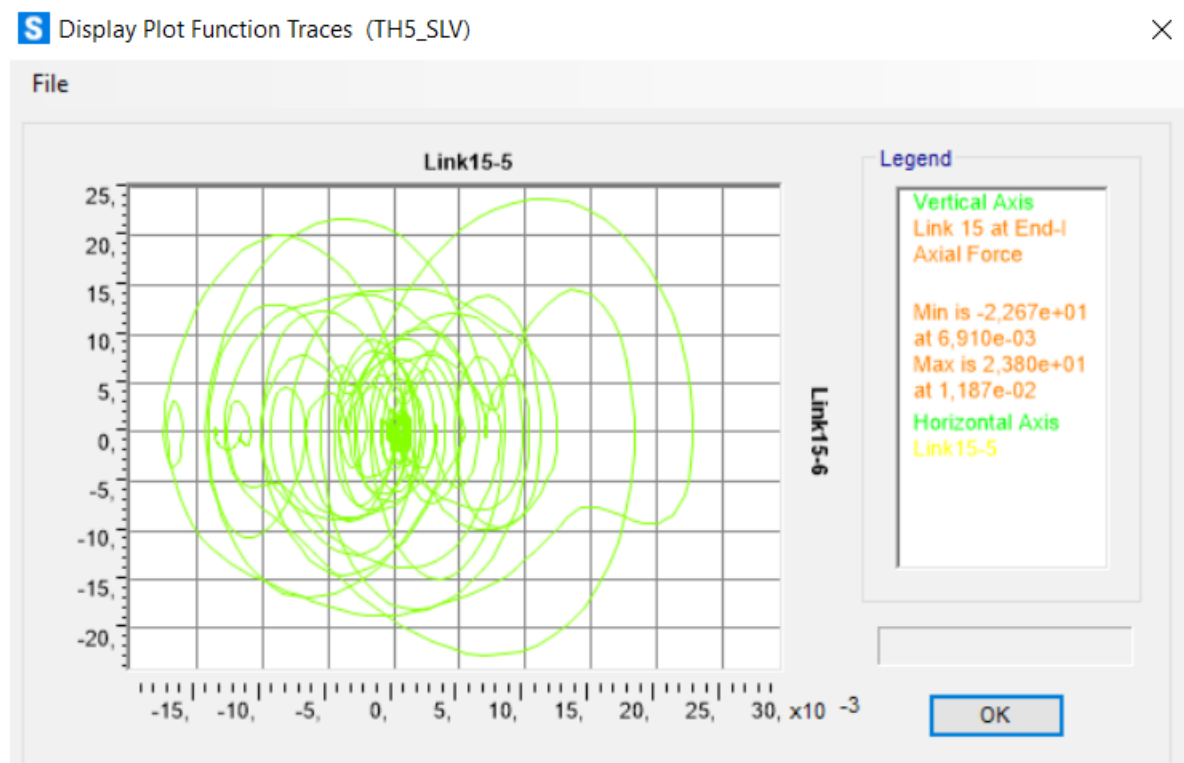


Figura 365. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

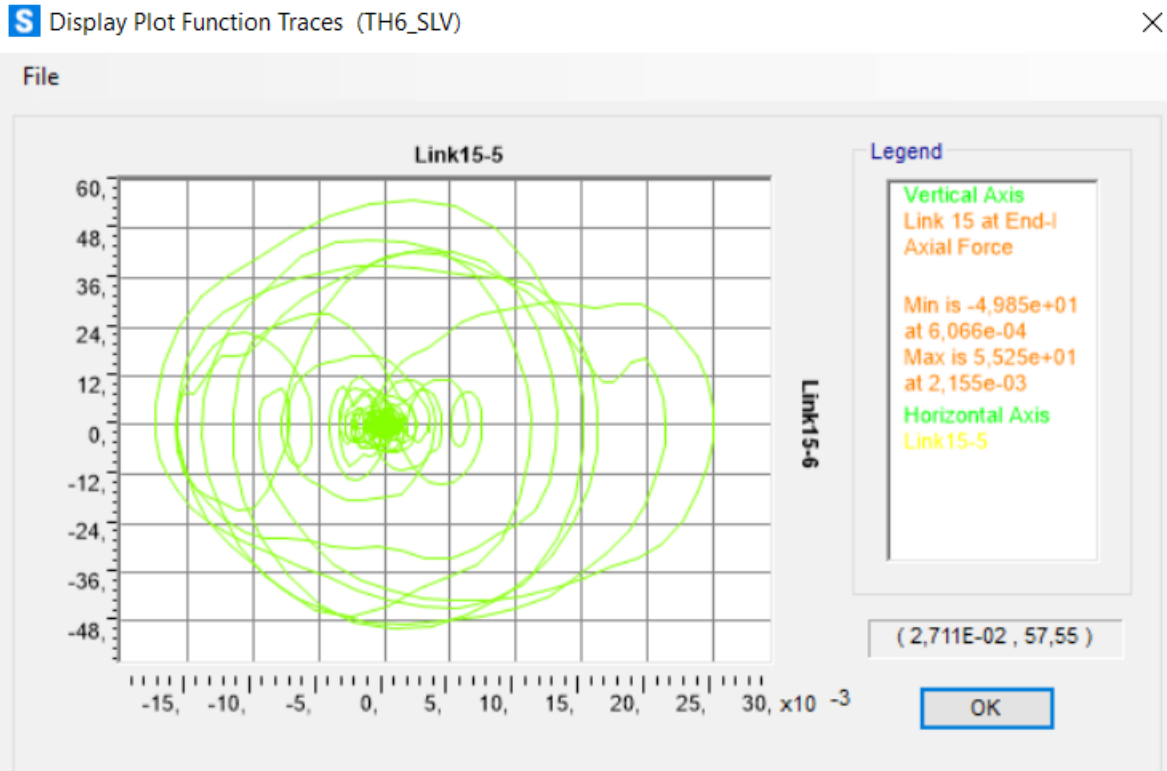


Figura 366. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

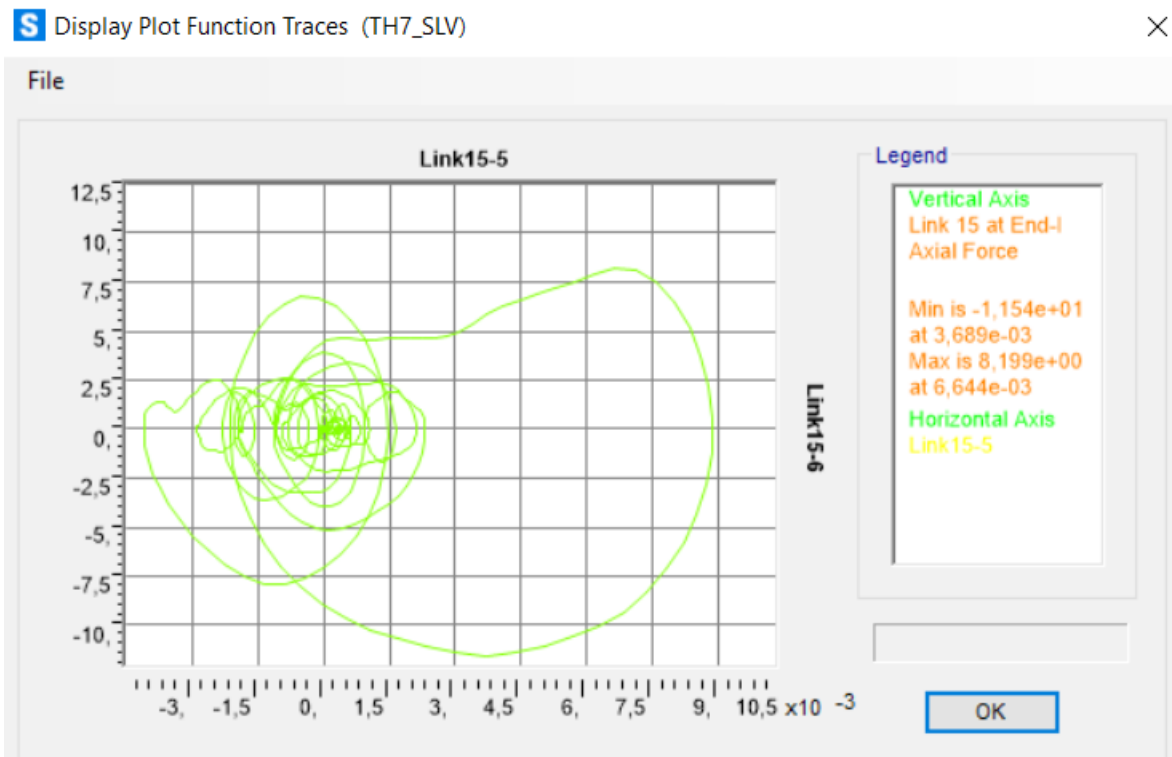


Figura 367. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

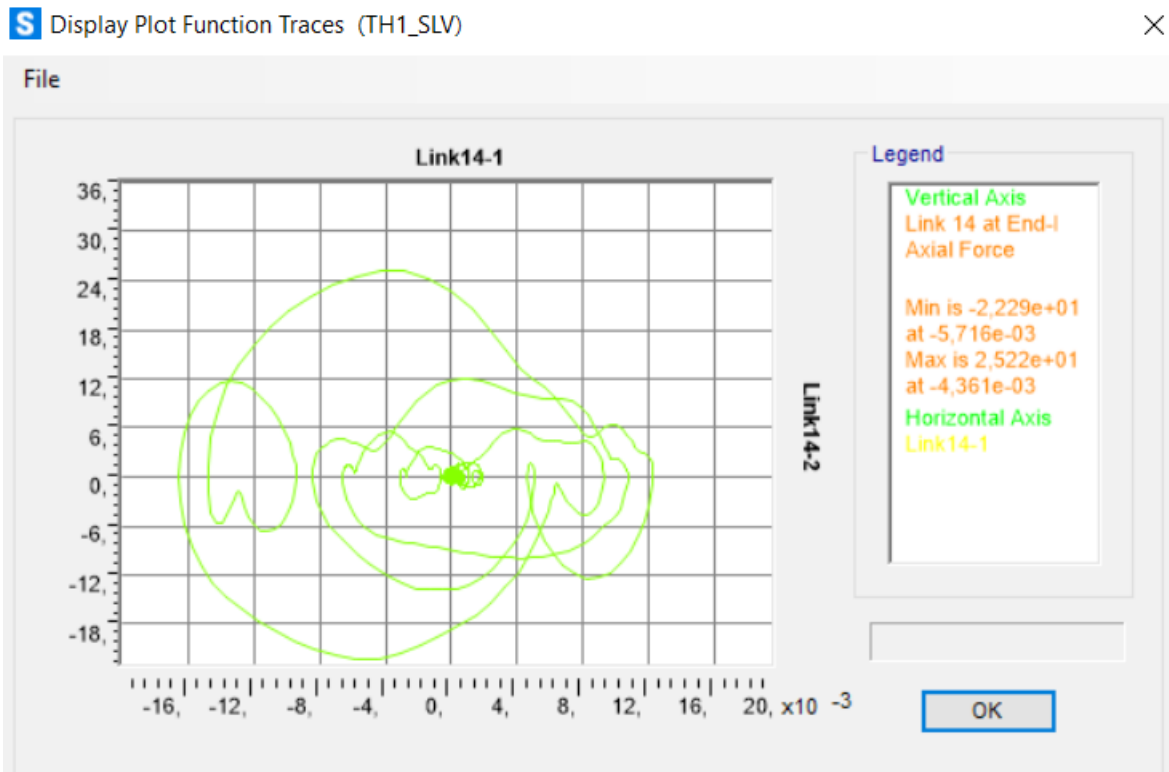


Figura 368. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

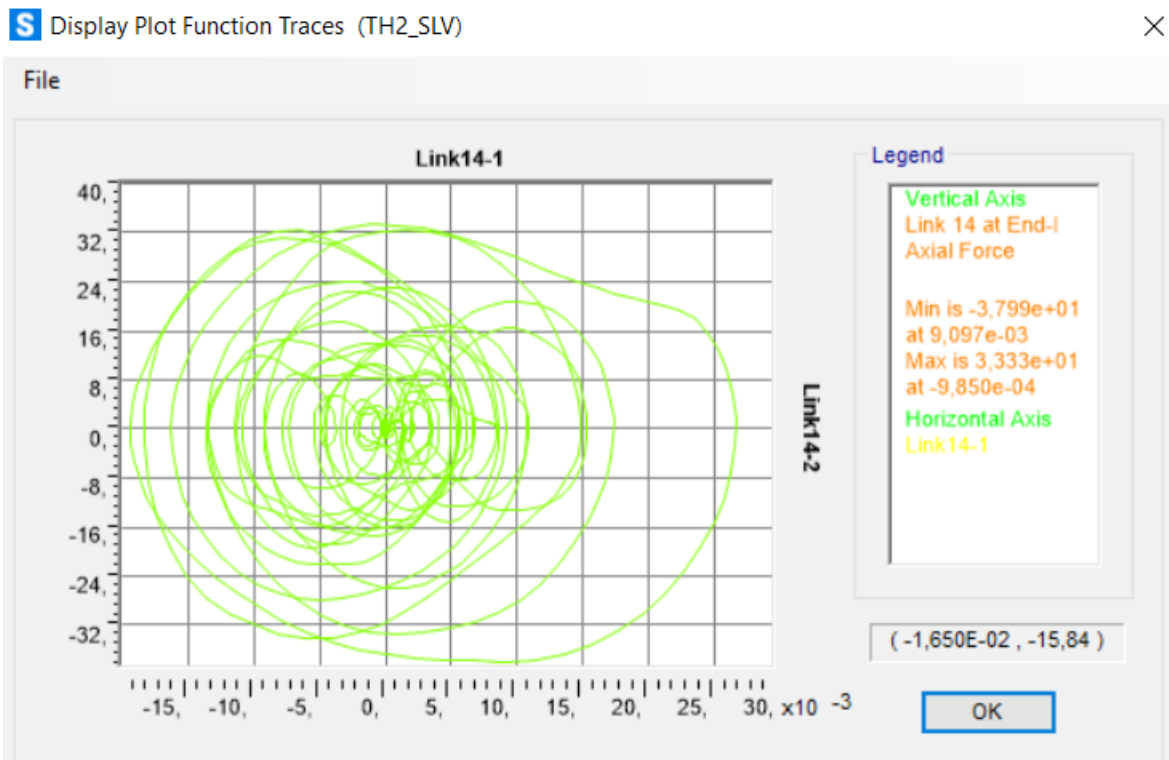


Figura 369. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

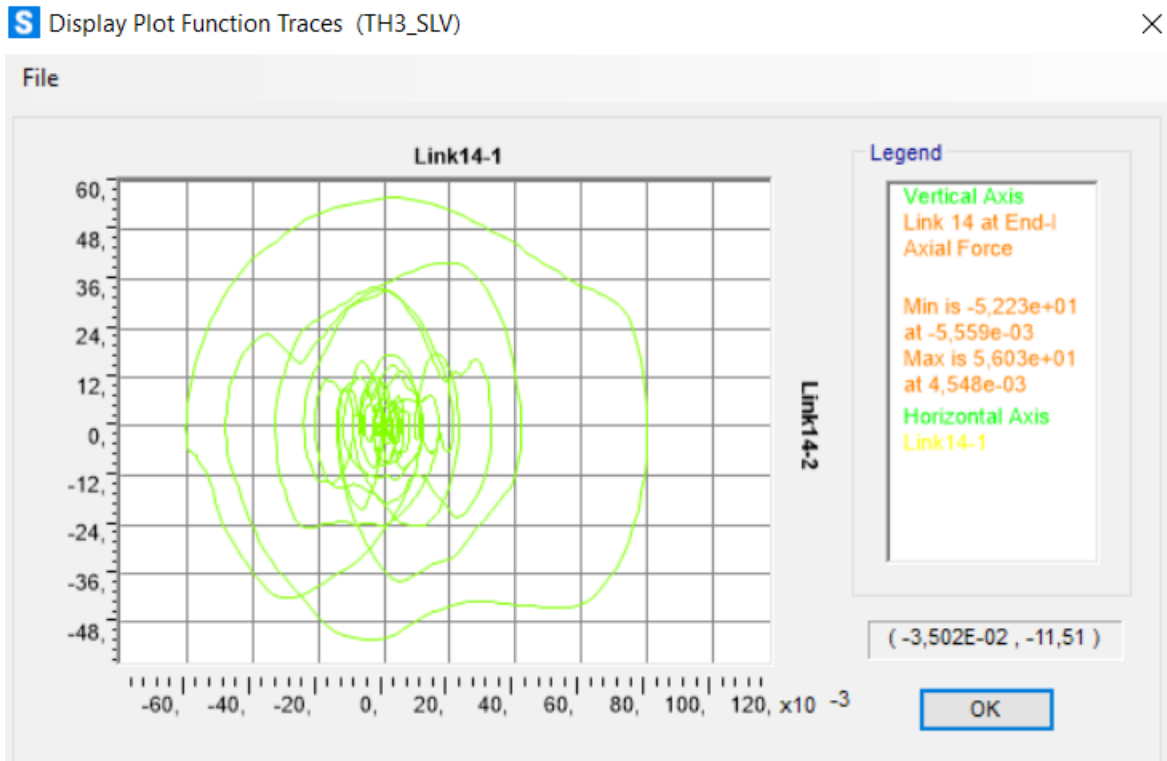


Figura 370. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

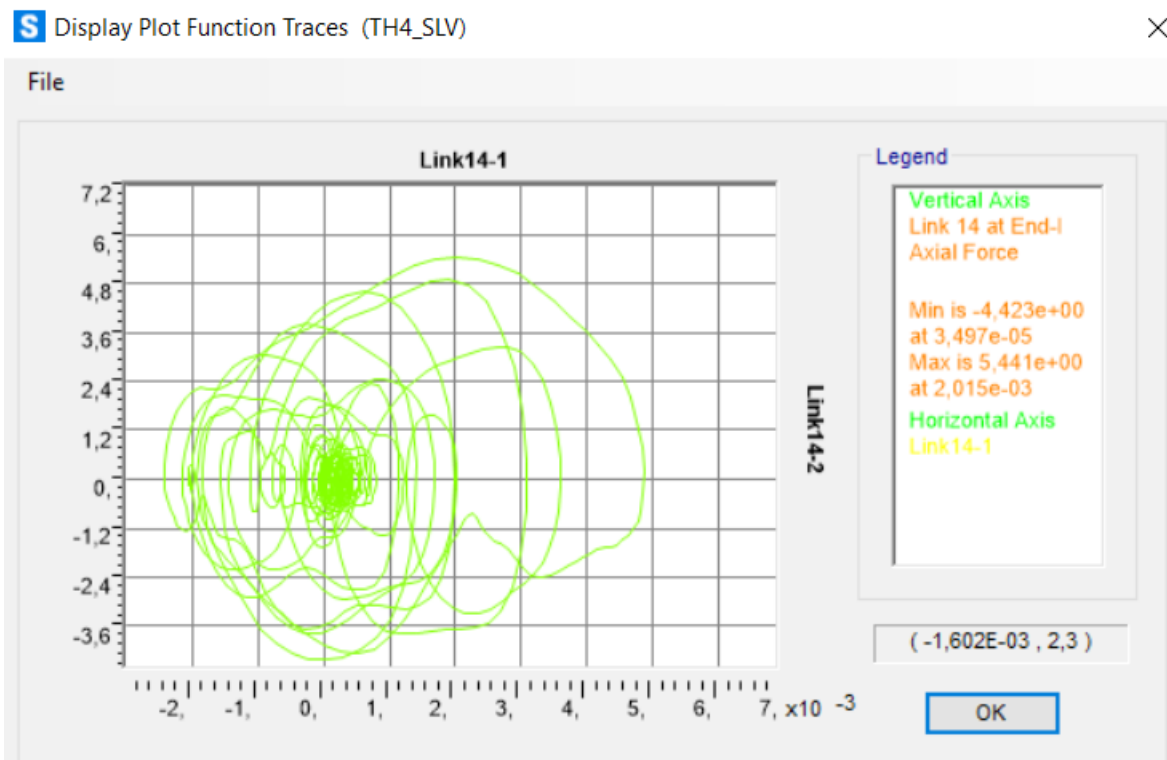


Figura 371. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

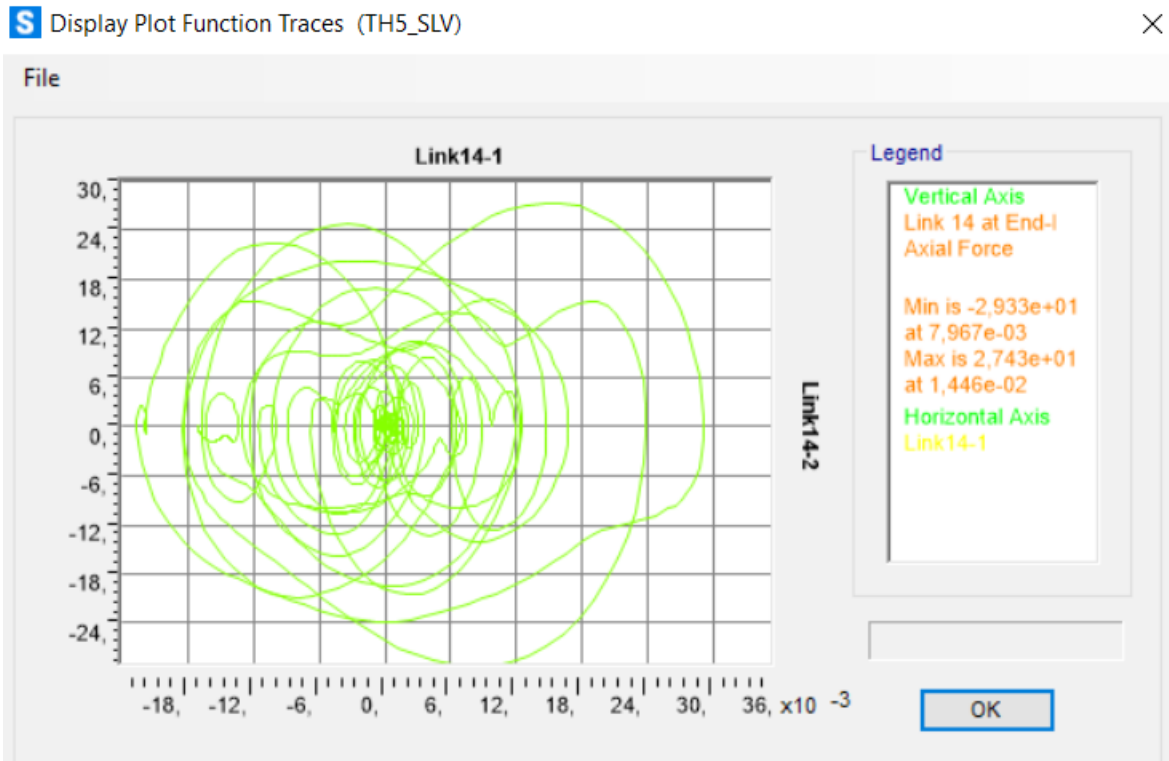


Figura 372. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

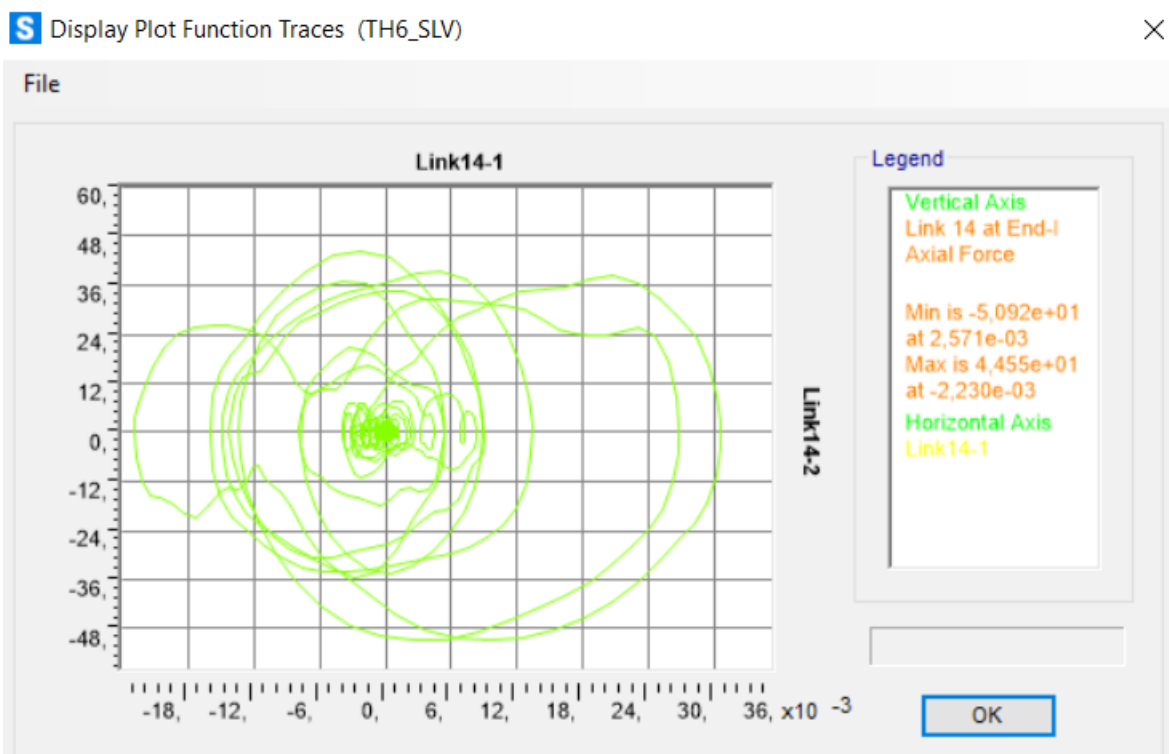


Figura 373. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

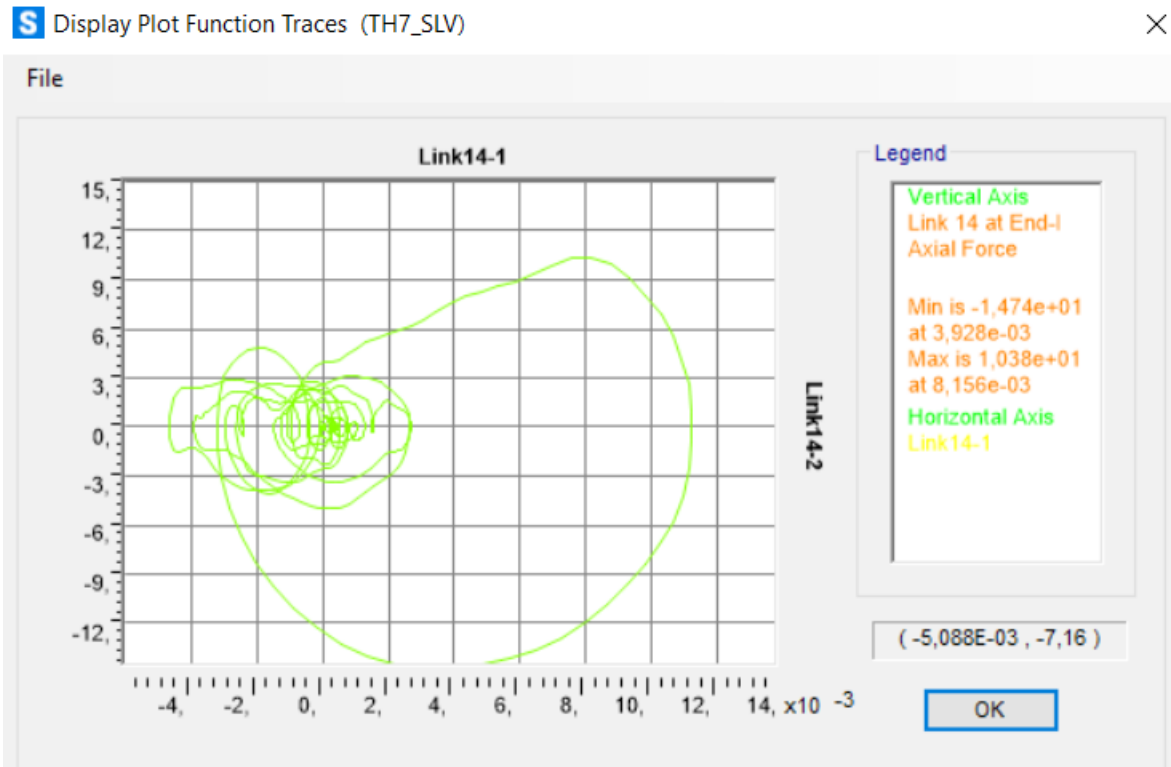


Figura 374. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

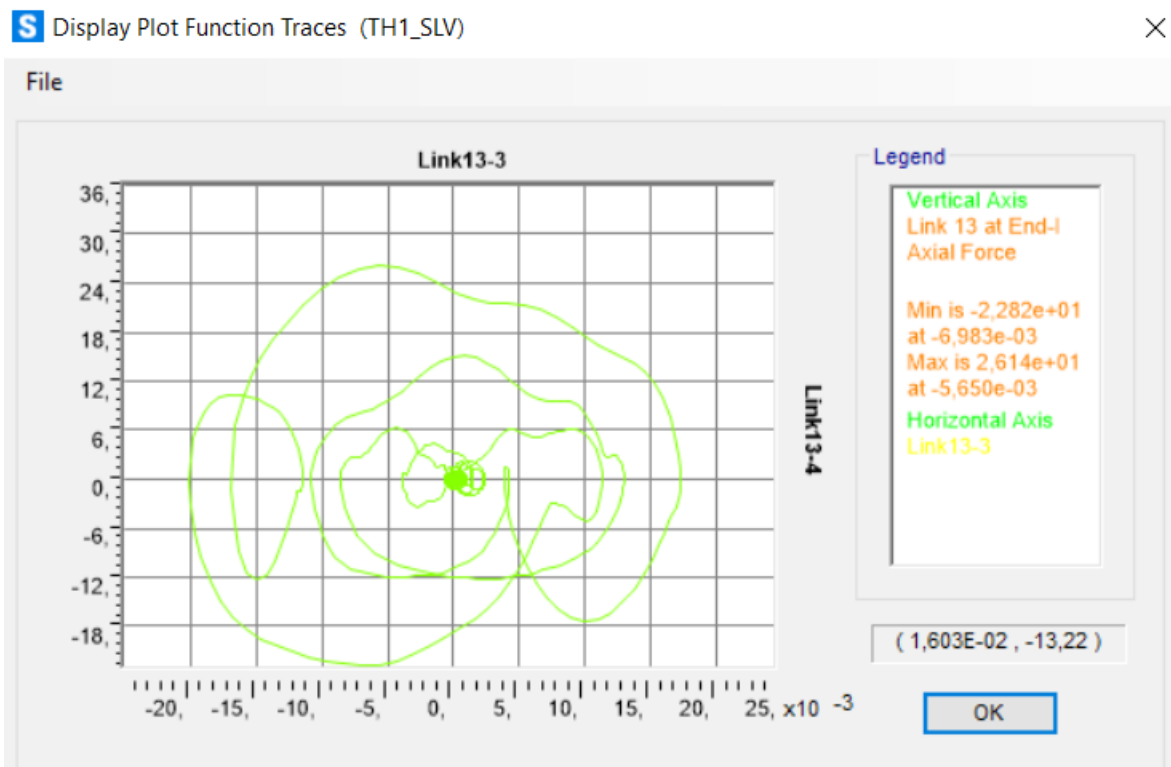


Figura 375. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

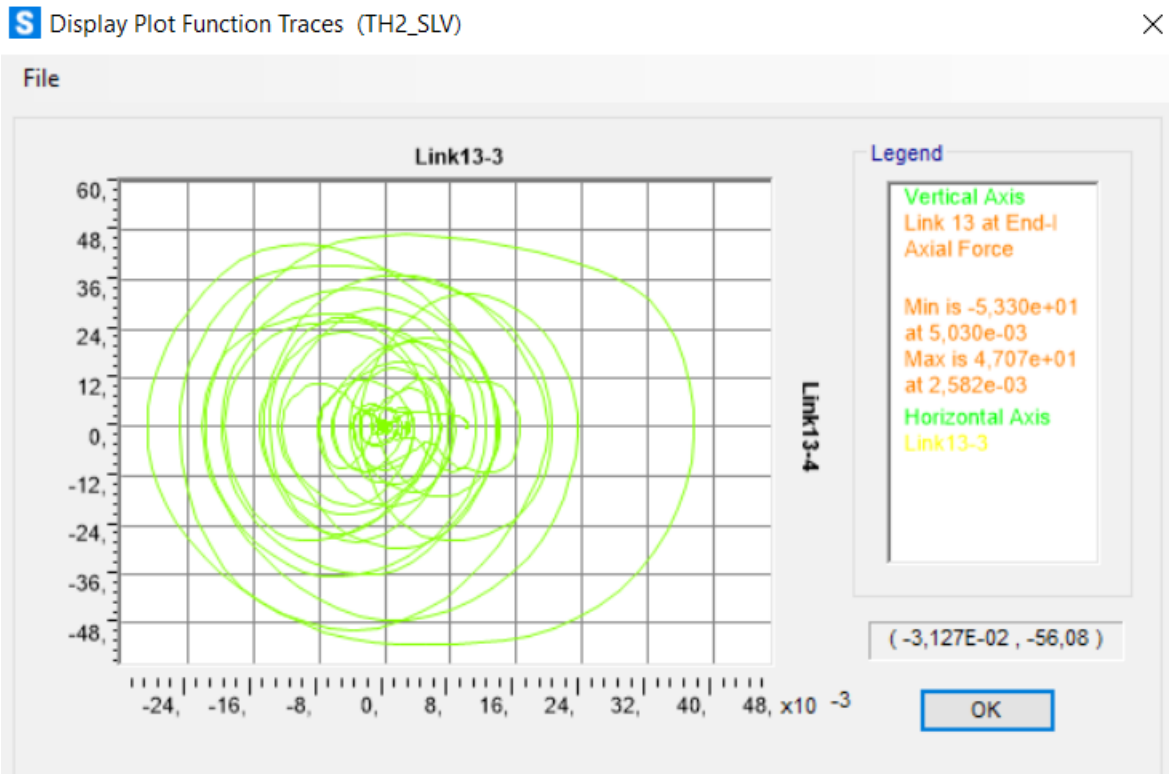


Figura 376. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

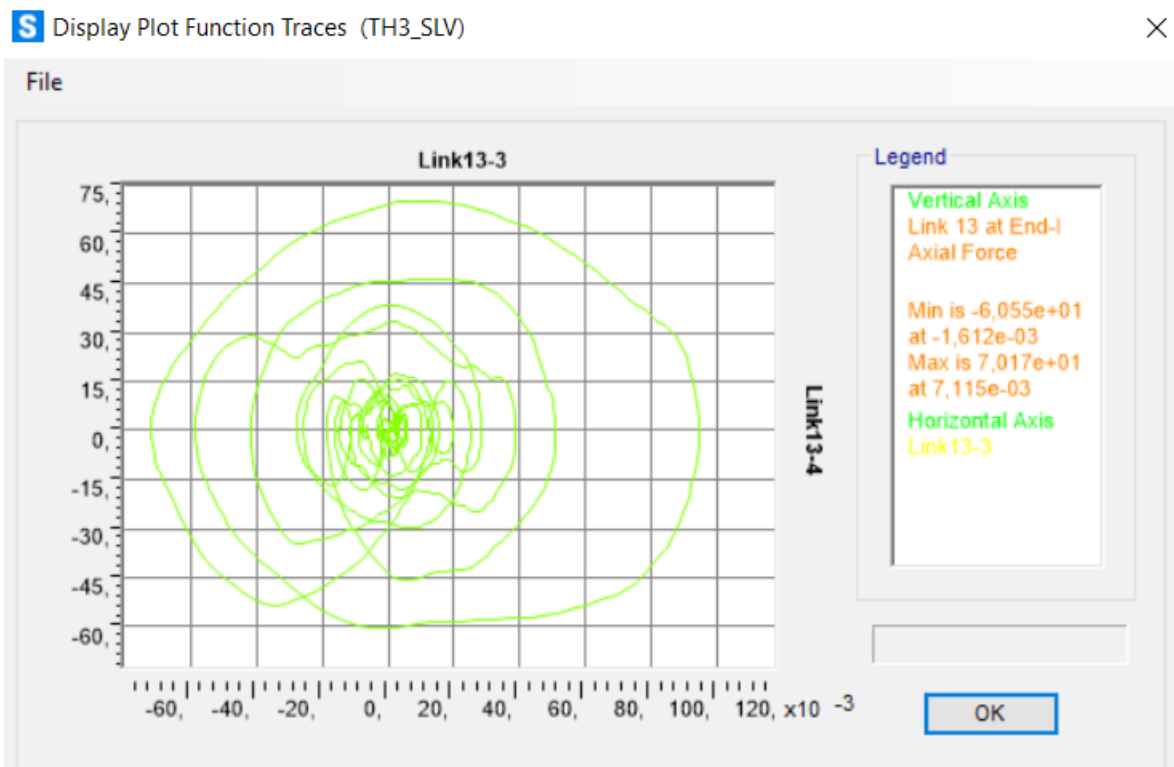


Figura 377. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

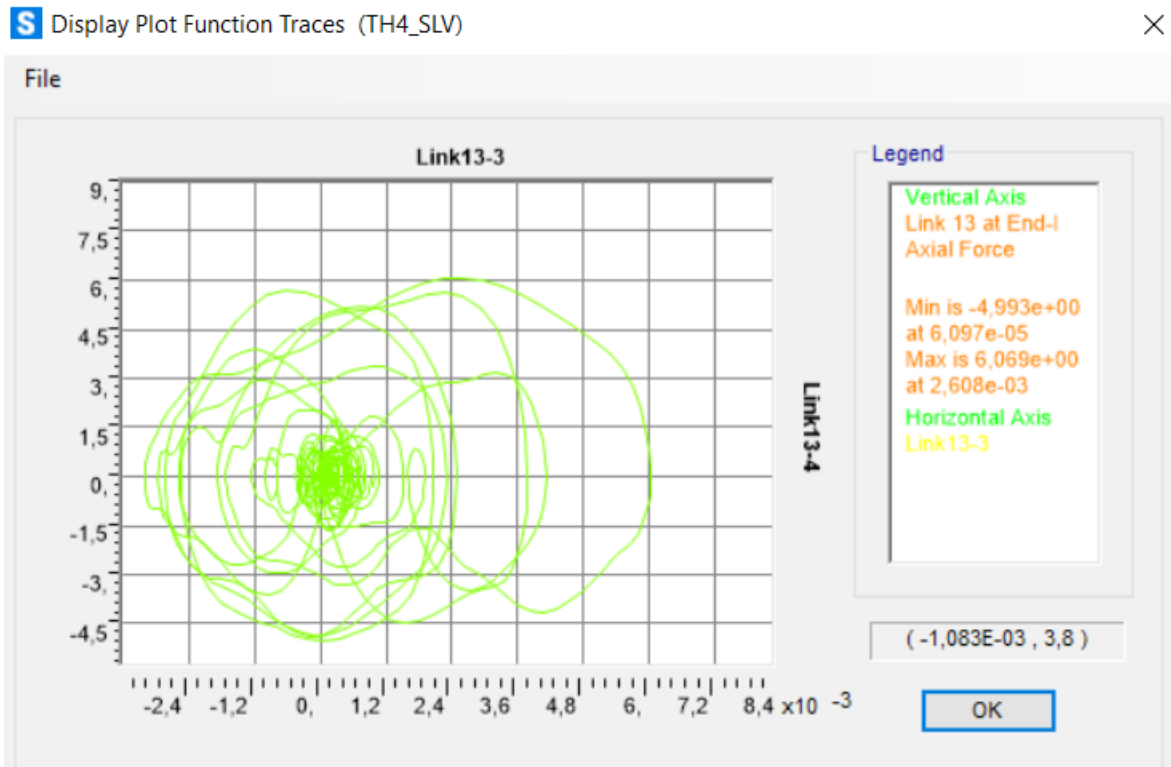


Figura 378. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

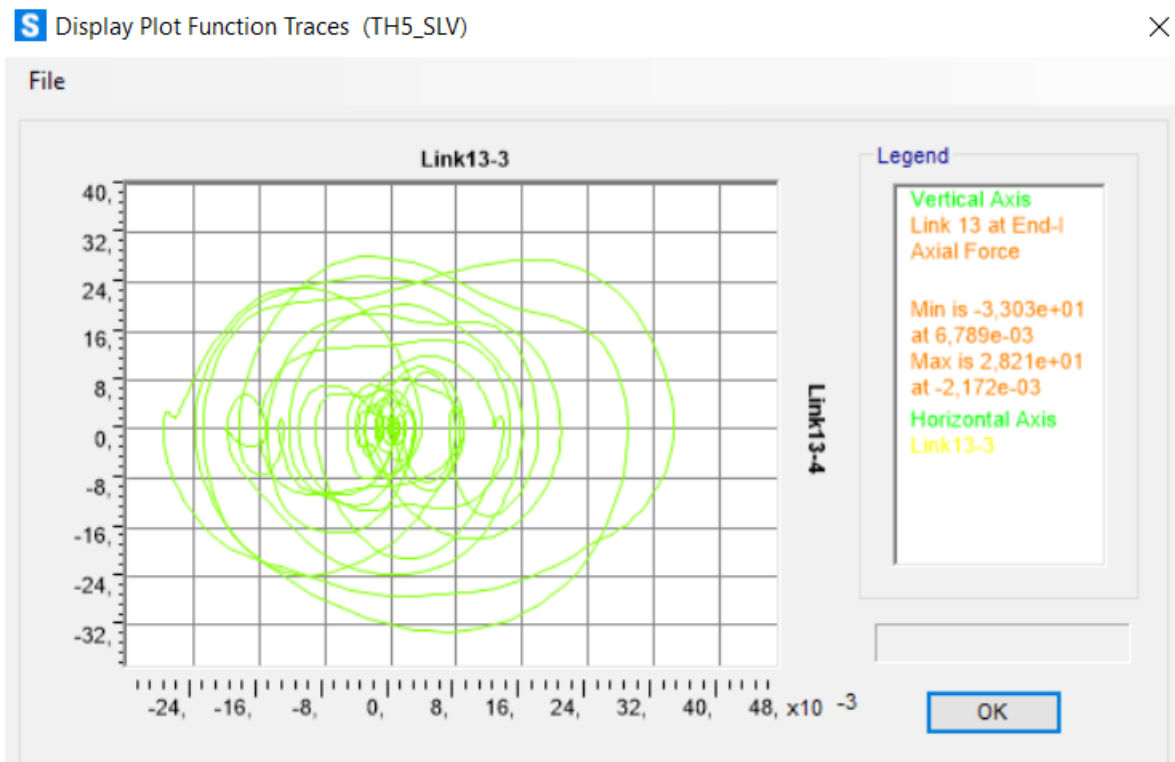


Figura 379. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

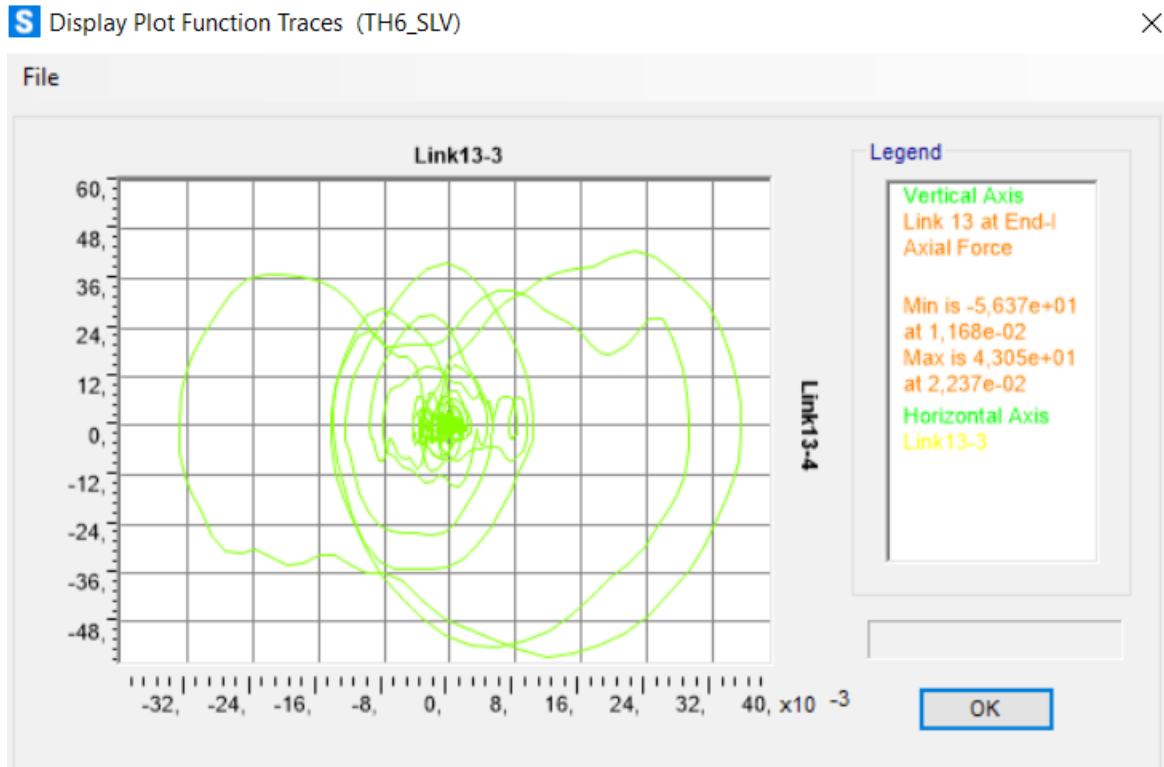


Figura 380. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

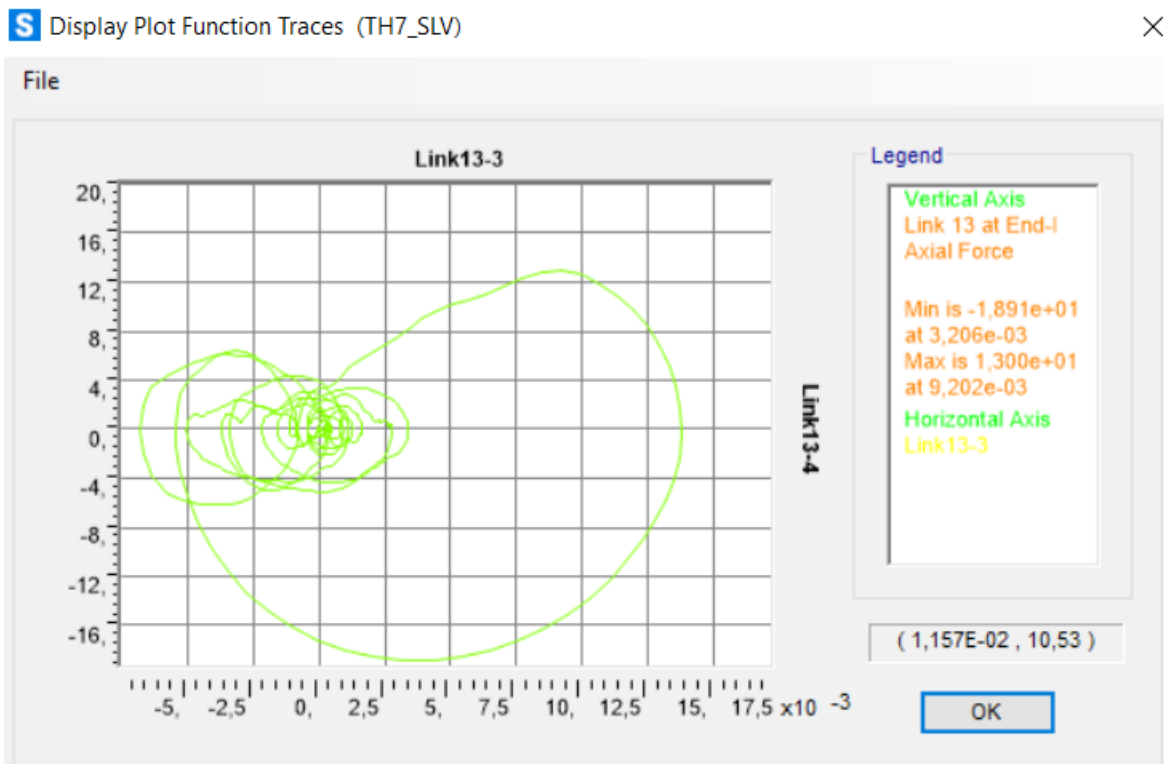


Figura 381. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Dissipatore elasto-plastico:

Telaio 17-12-6-1 (direzione y)

N°piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	1	0,0219	0,0025
4	2	0,0284	0,0026
5	3	0,0345	0,0028

Telaio 17-12-6-1 (direzione y)

N°piano	N° label	Fy
(-)	(-)	(kN)
3	1	25,95
4	2	25,95
5	3	25,95

Piano 3:

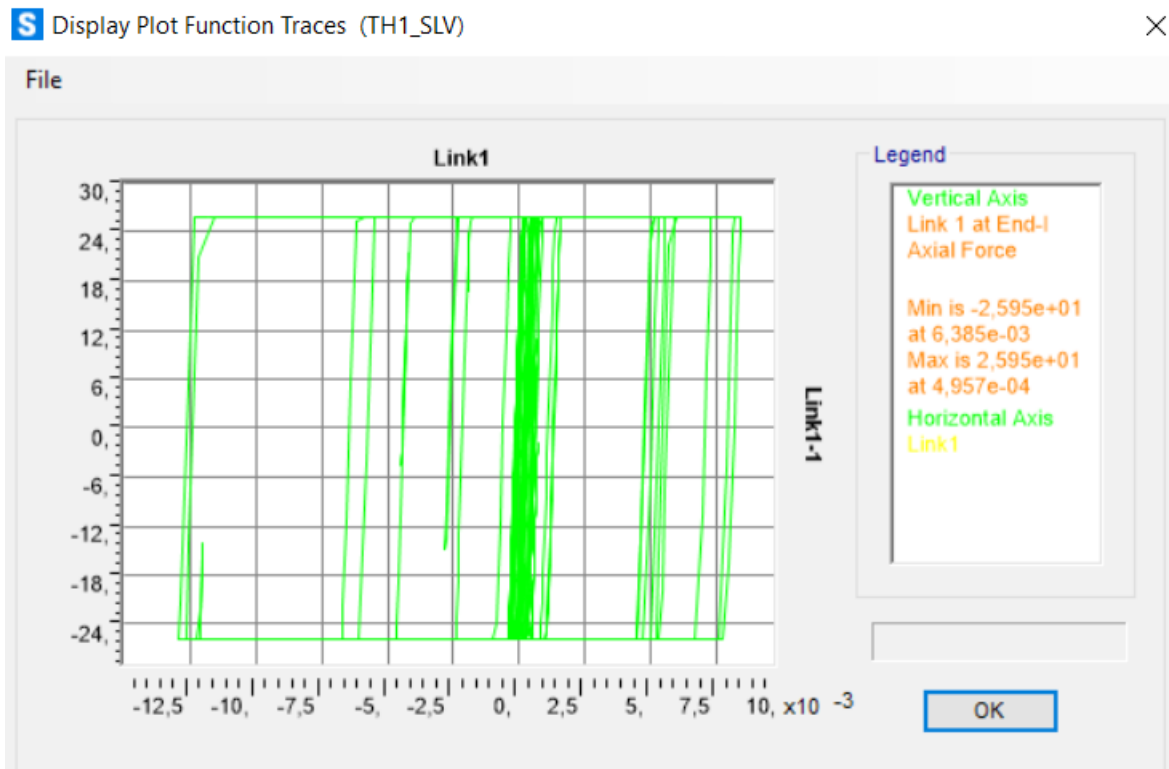


Figura 382. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

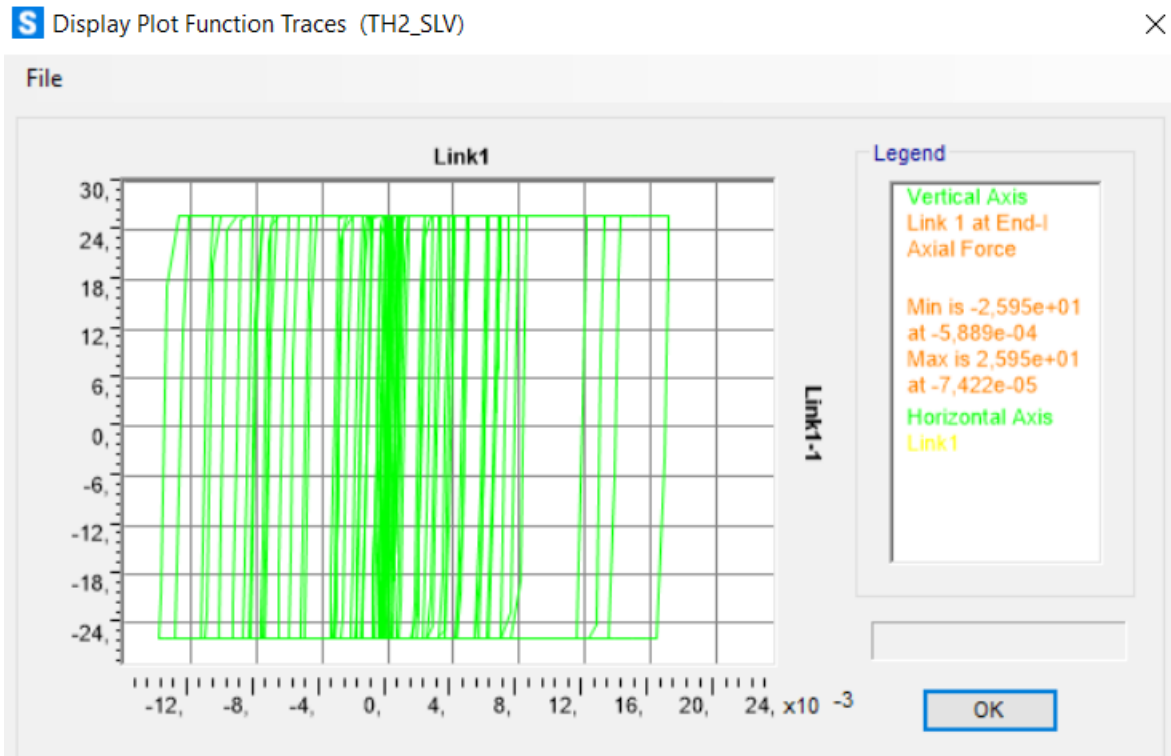


Figura 383. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

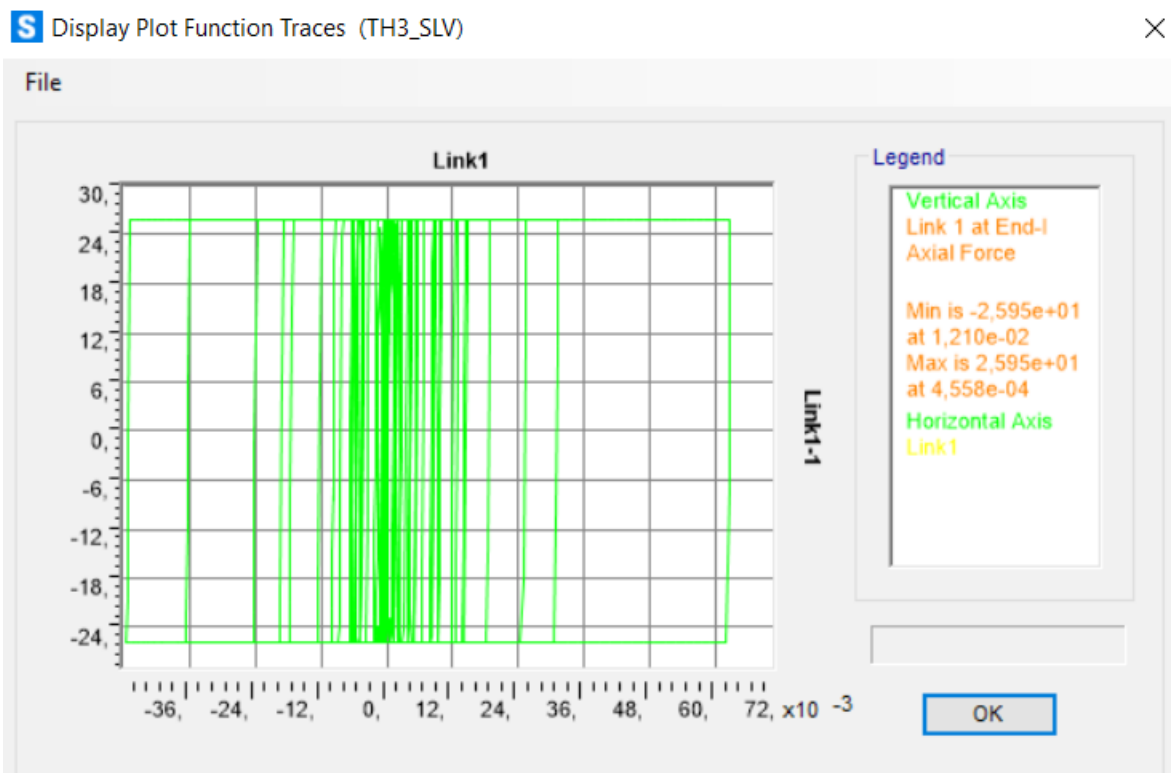


Figura 384. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

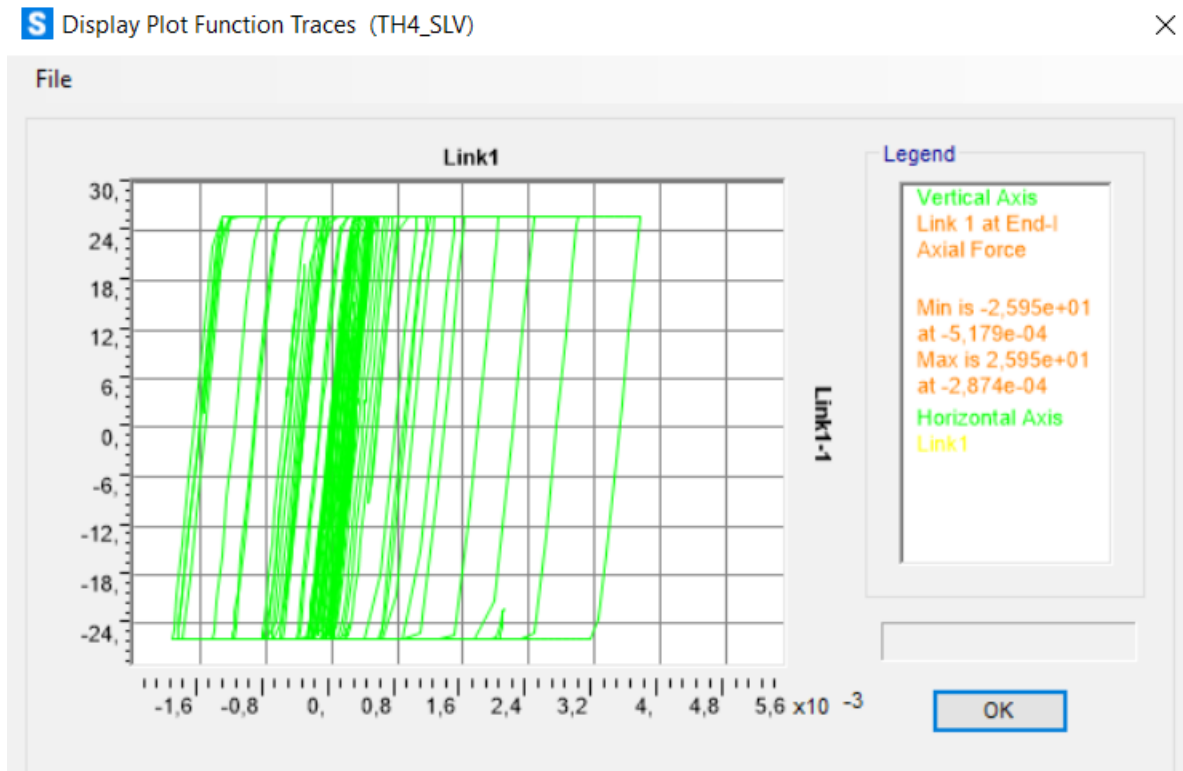


Figura 385. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

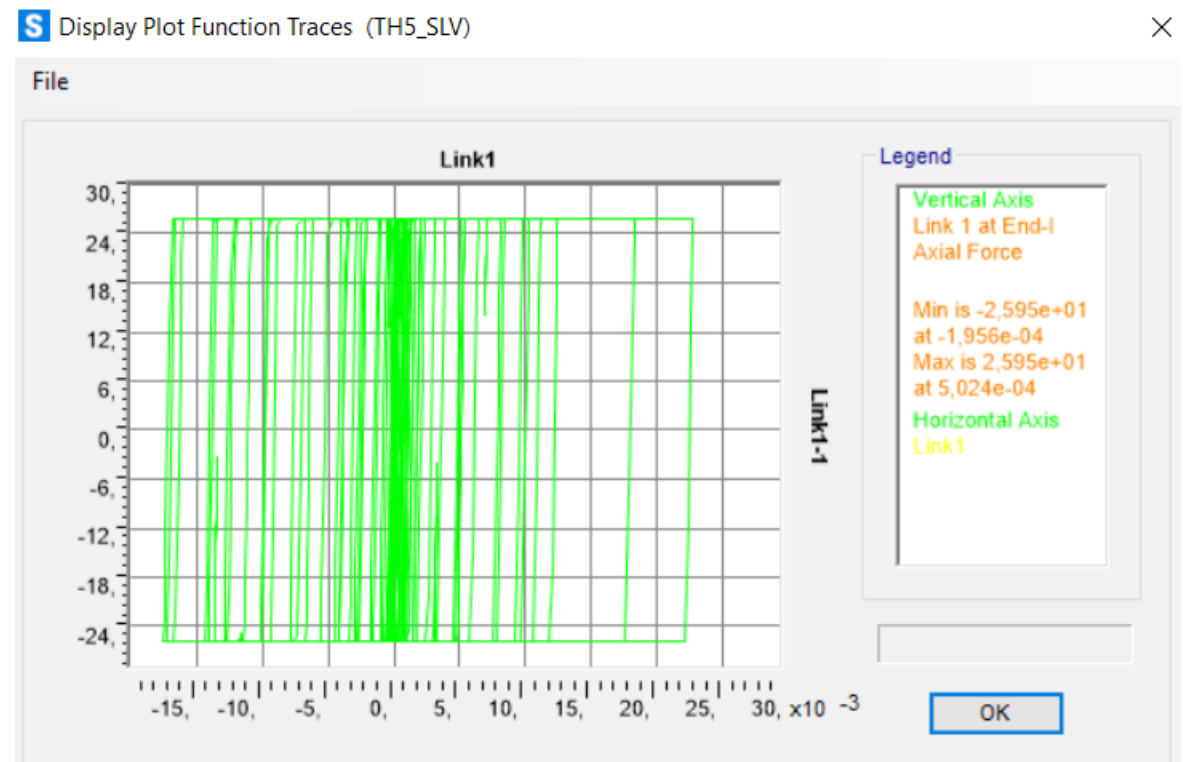


Figura 386. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Display Plot Function Traces (TH6_SLV)

×

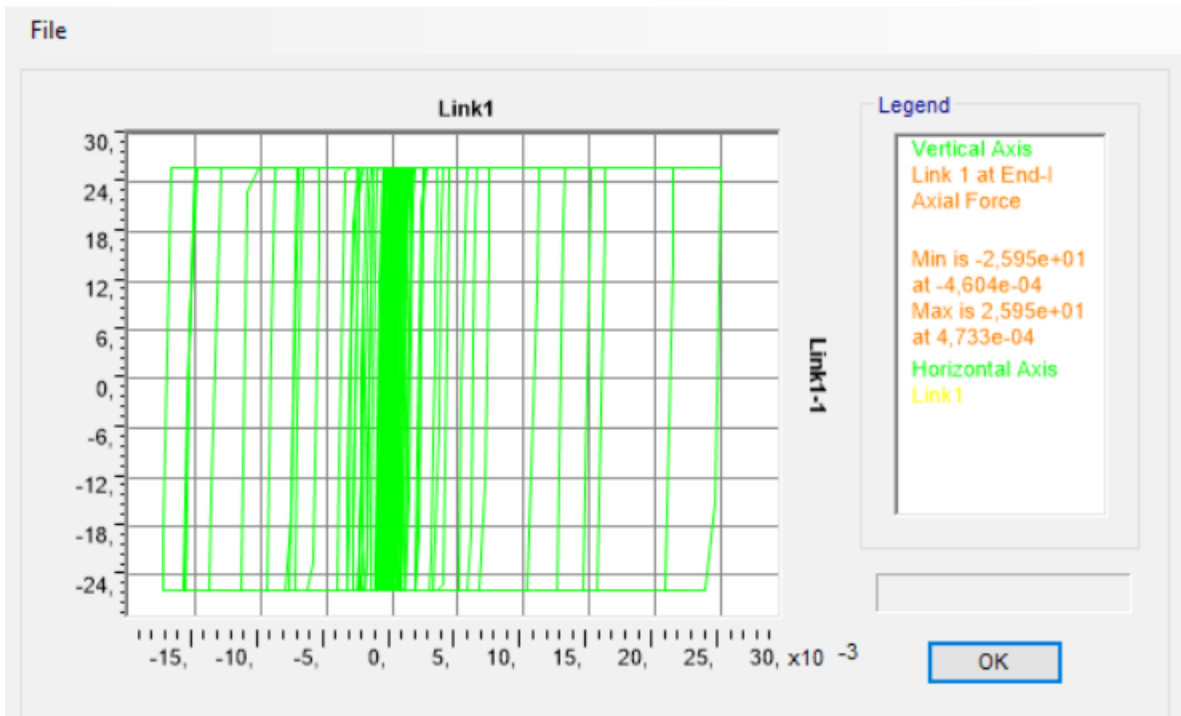


Figura 387. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

S Display Plot Function Traces (TH7_SLV)

×

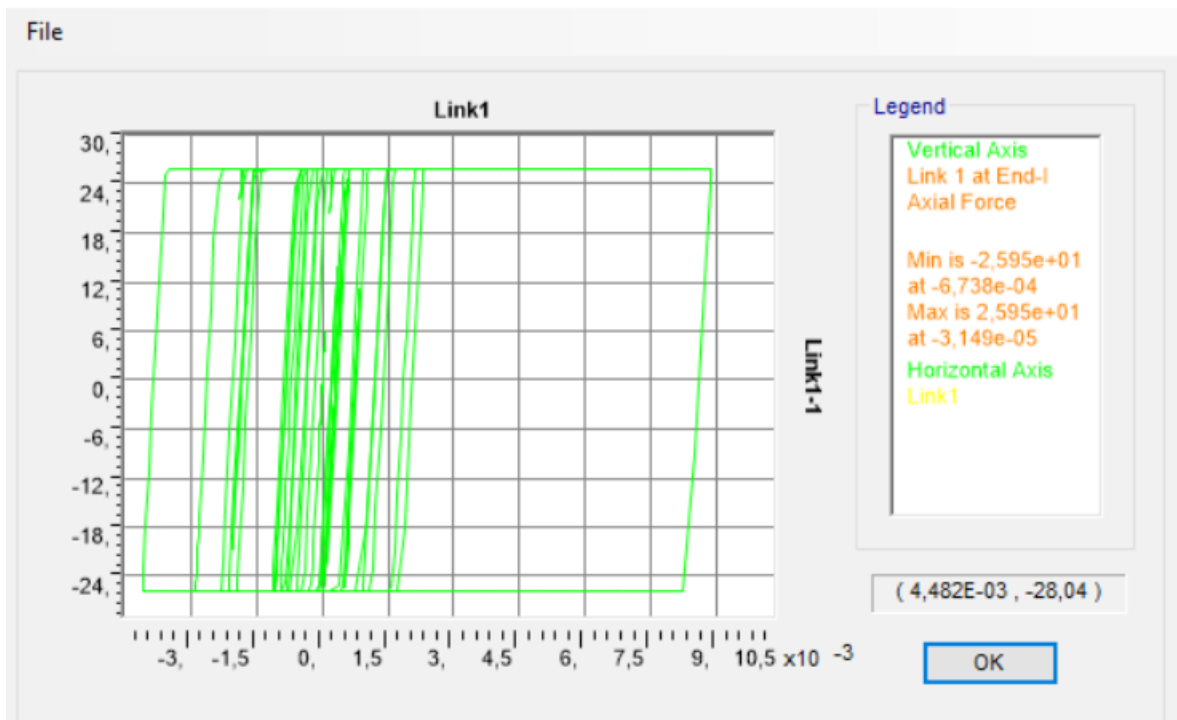


Figura 388. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

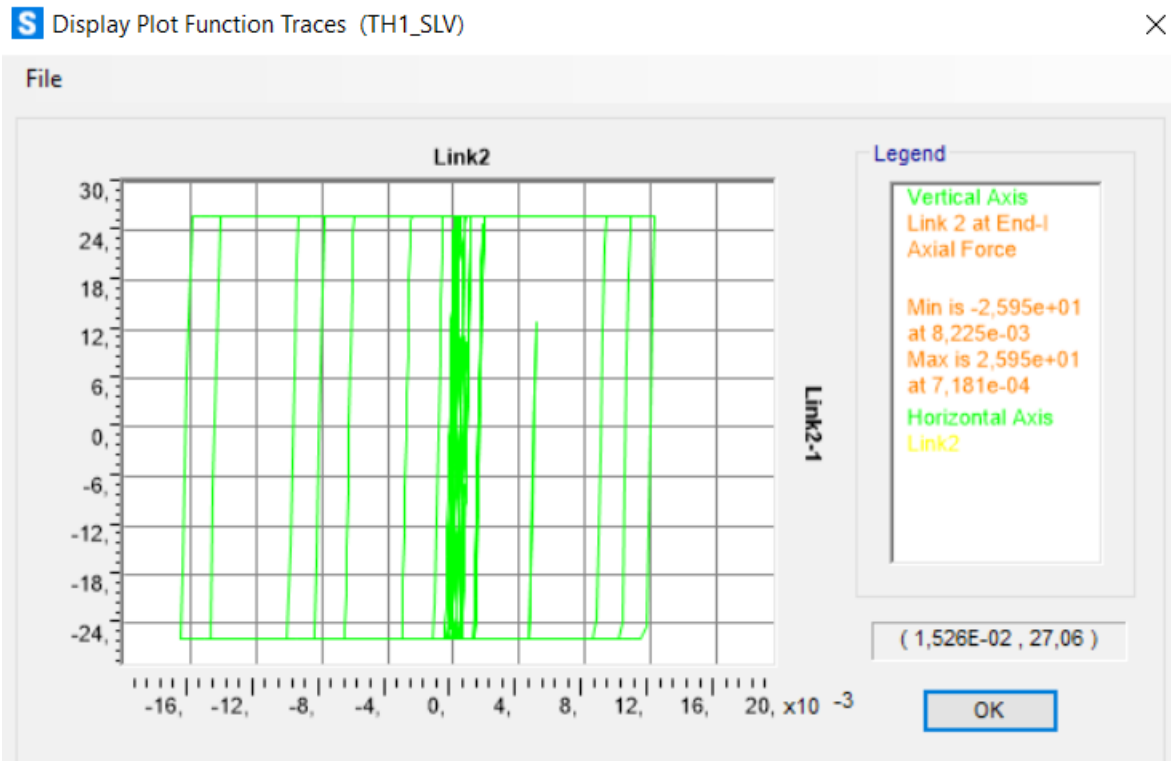


Figura 389. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

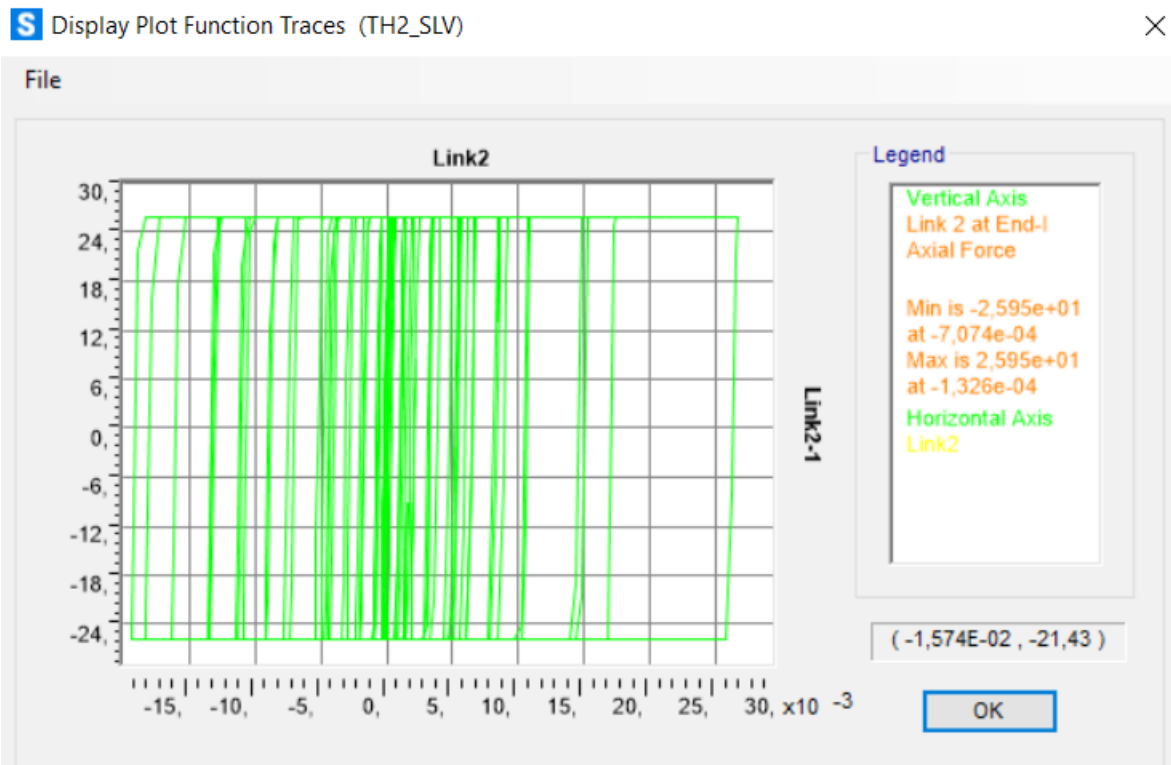


Figura 390. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

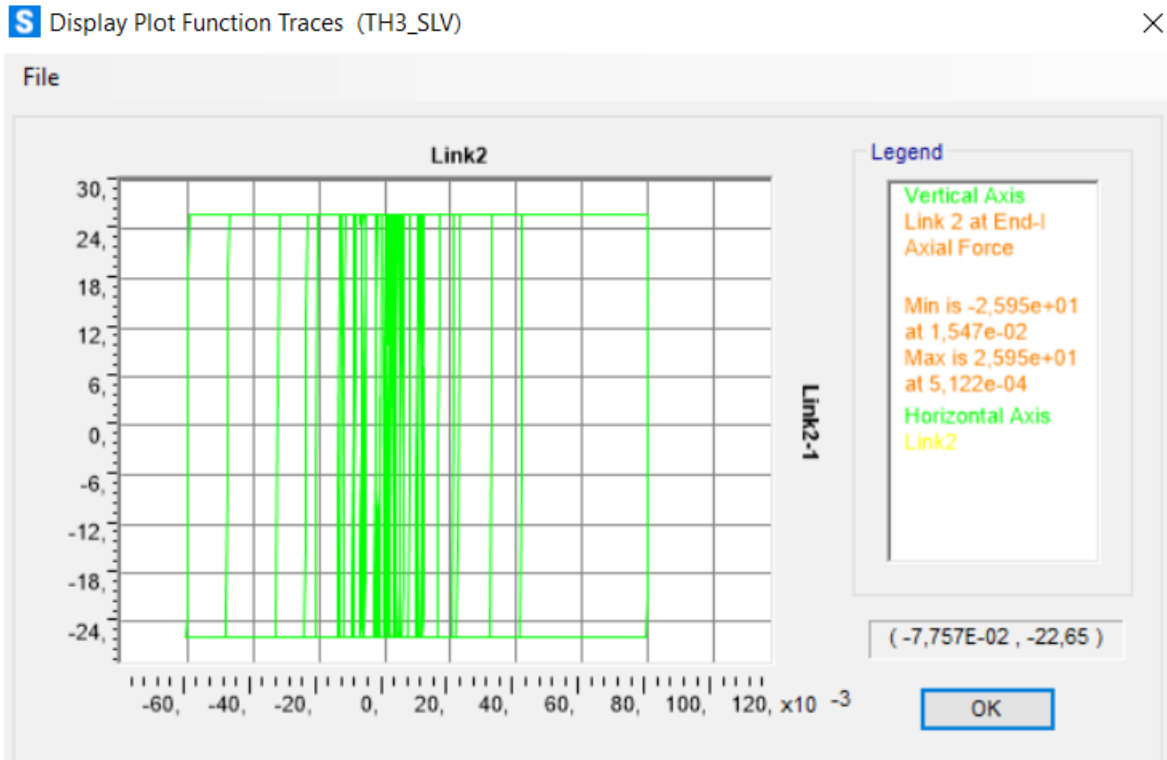


Figura 391. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

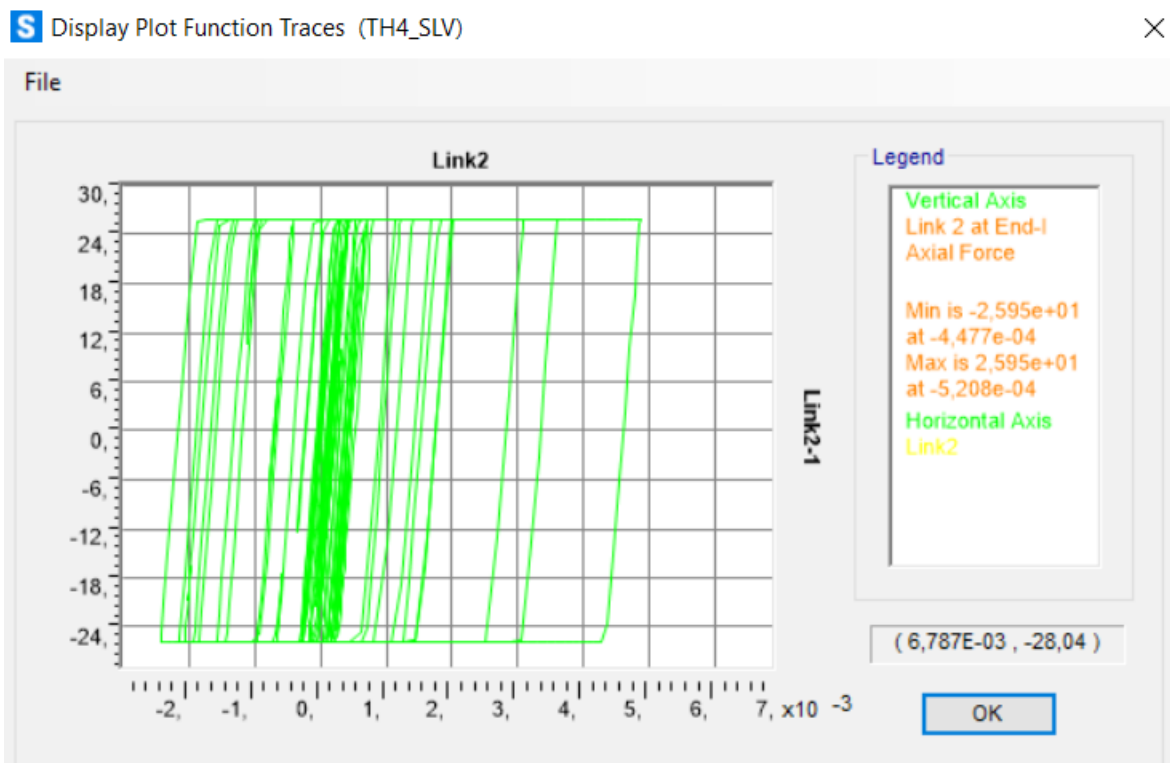


Figura 392. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

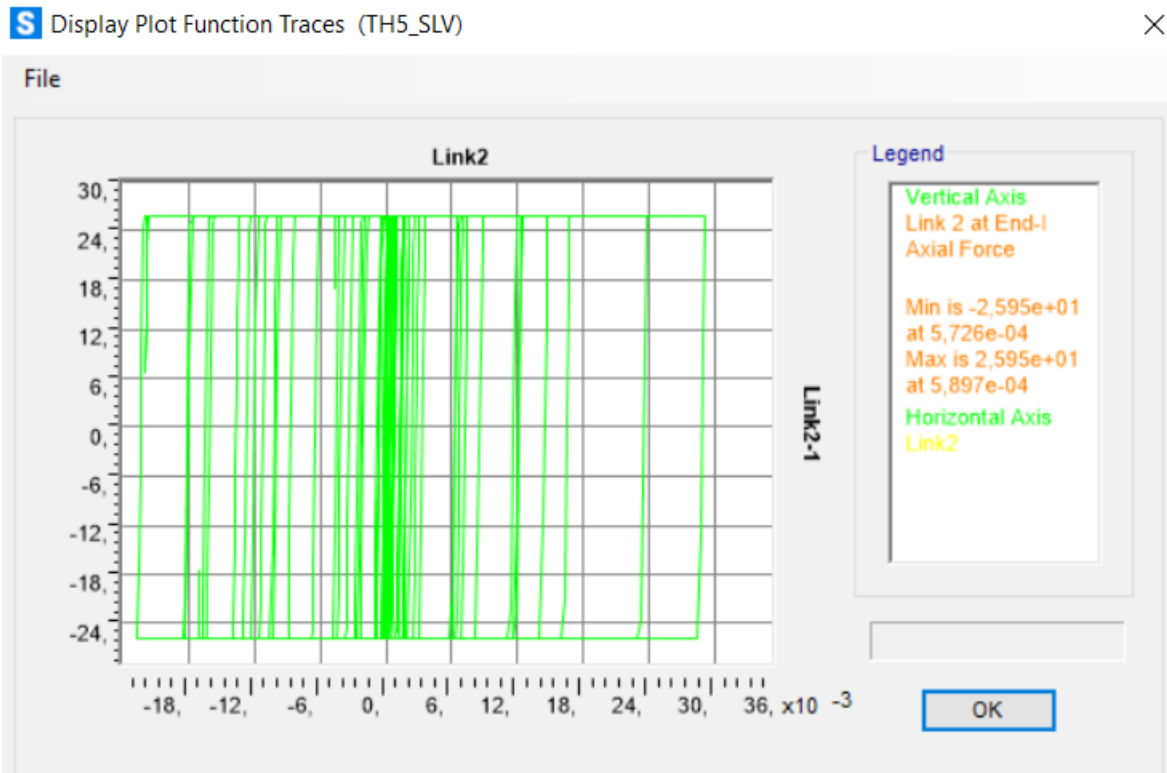


Figura 393. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

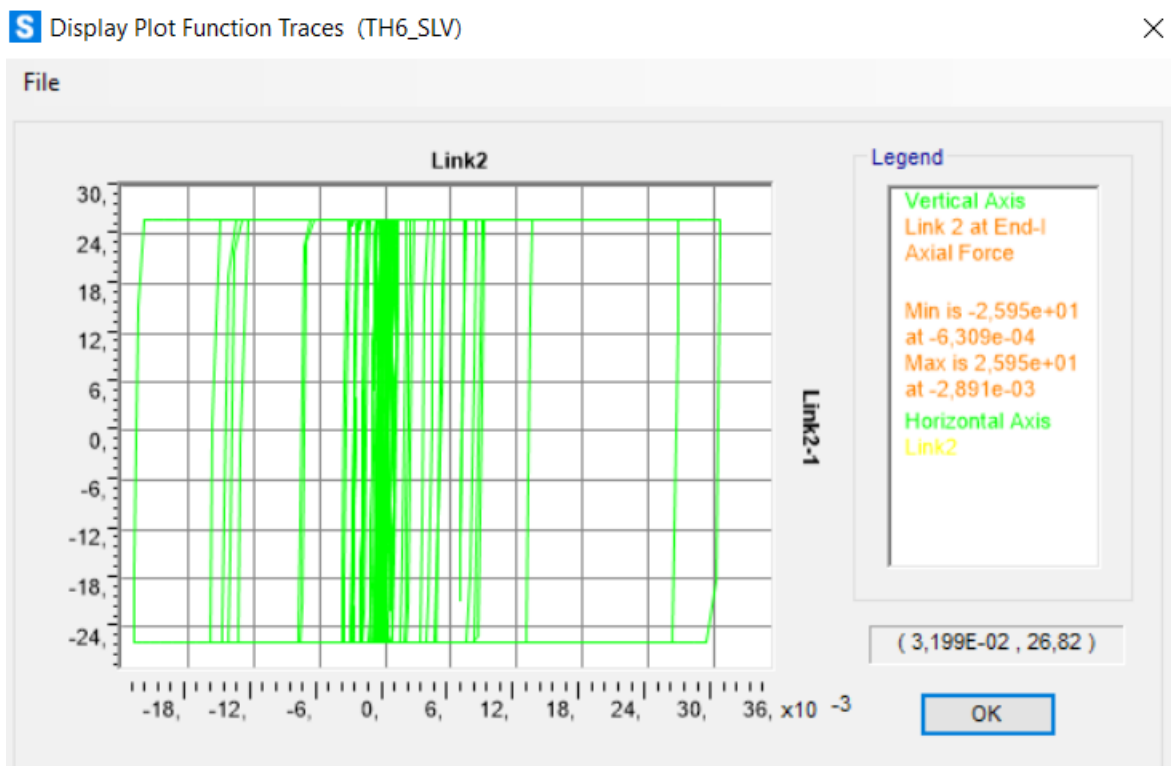


Figura 394. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

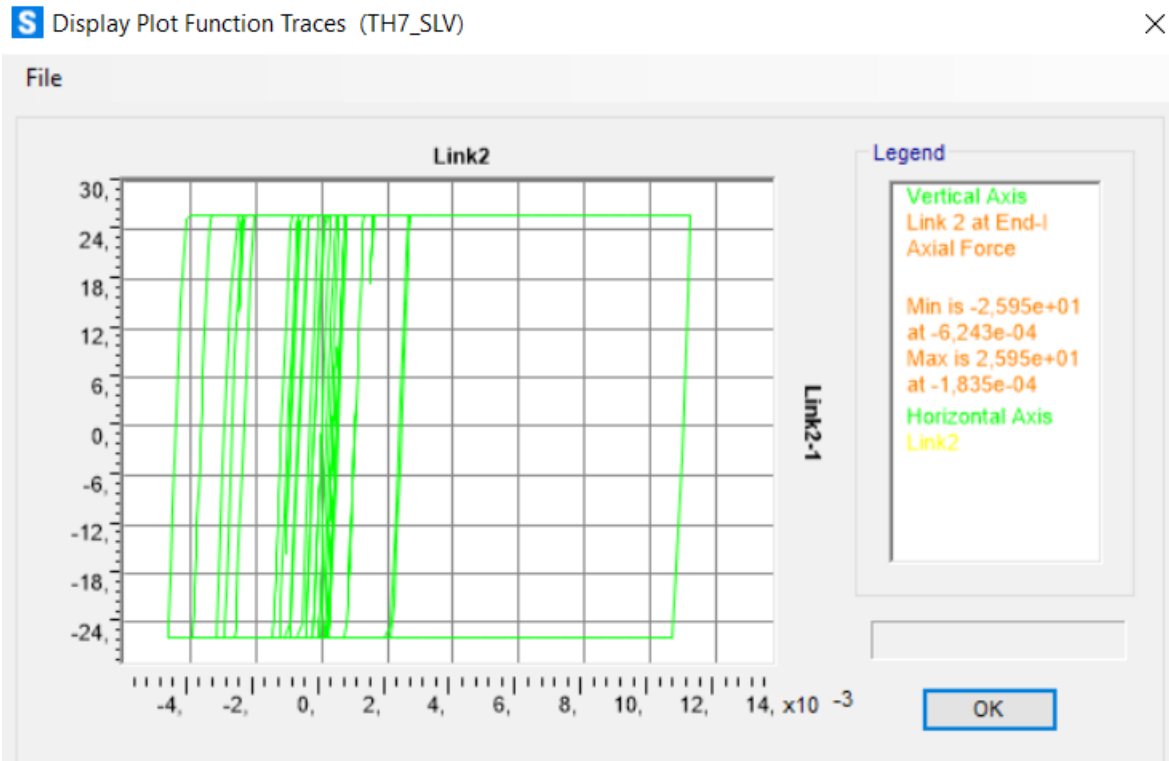


Figura 395. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

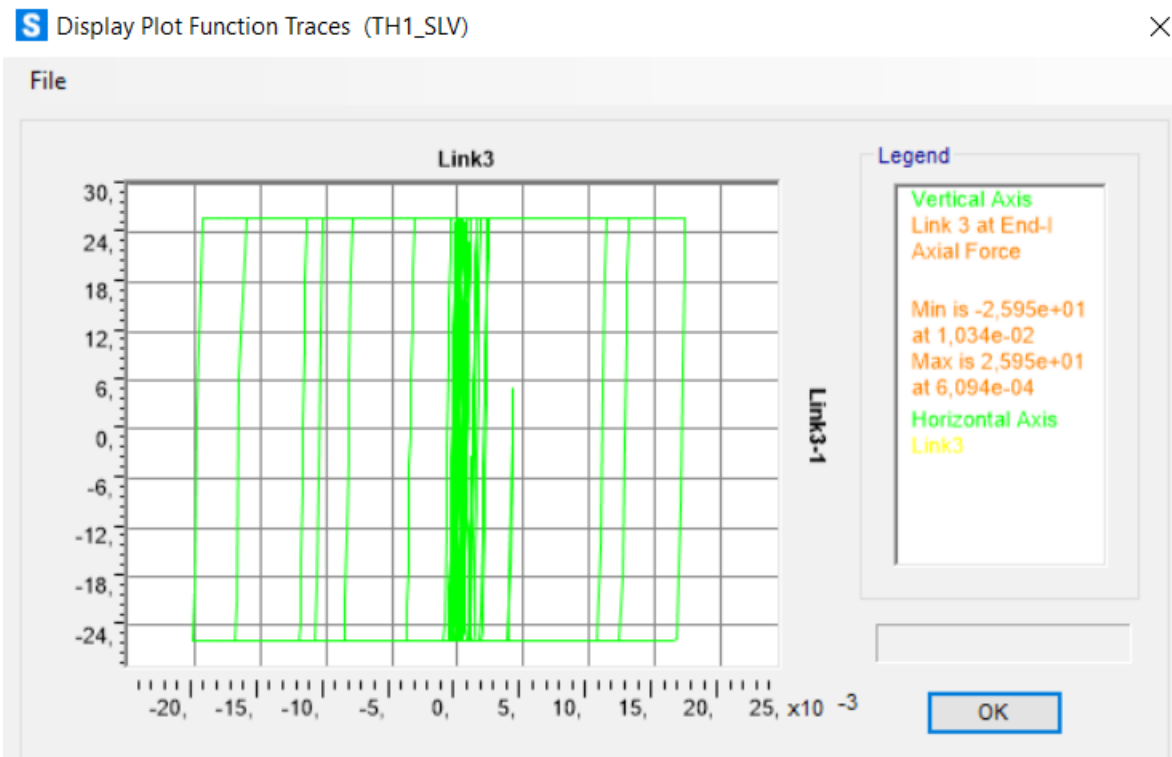


Figura 396. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

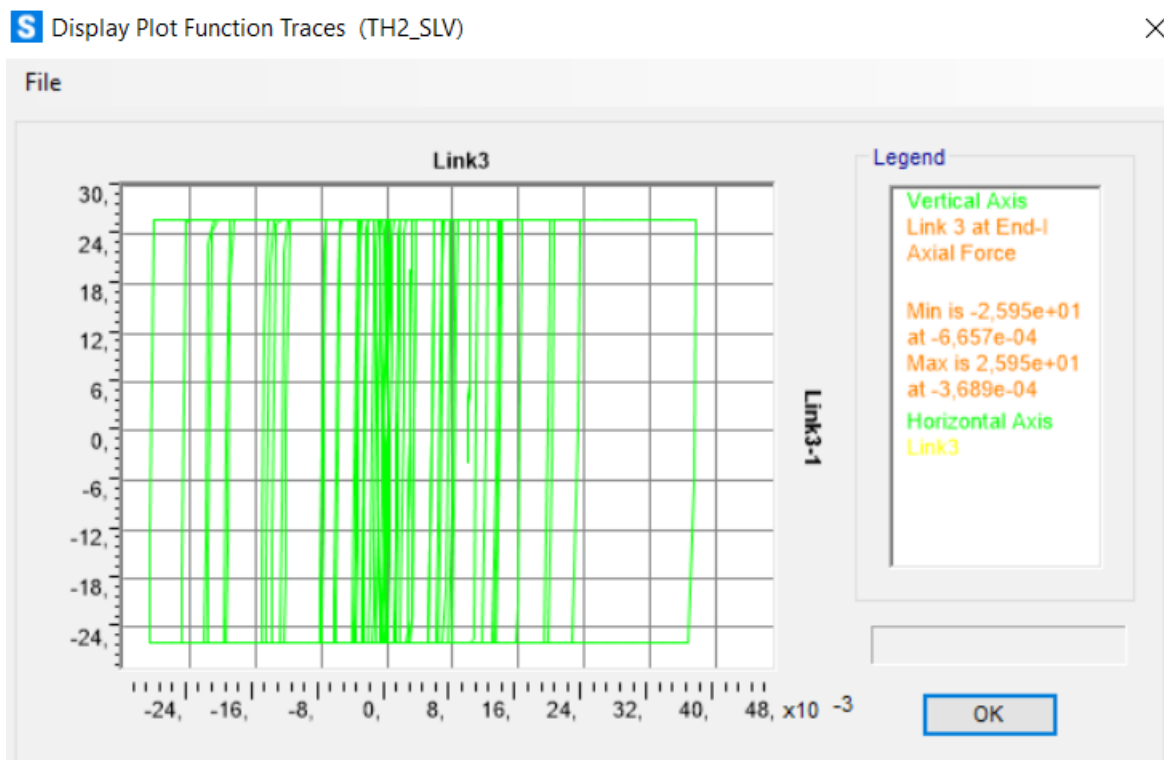


Figura 397. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

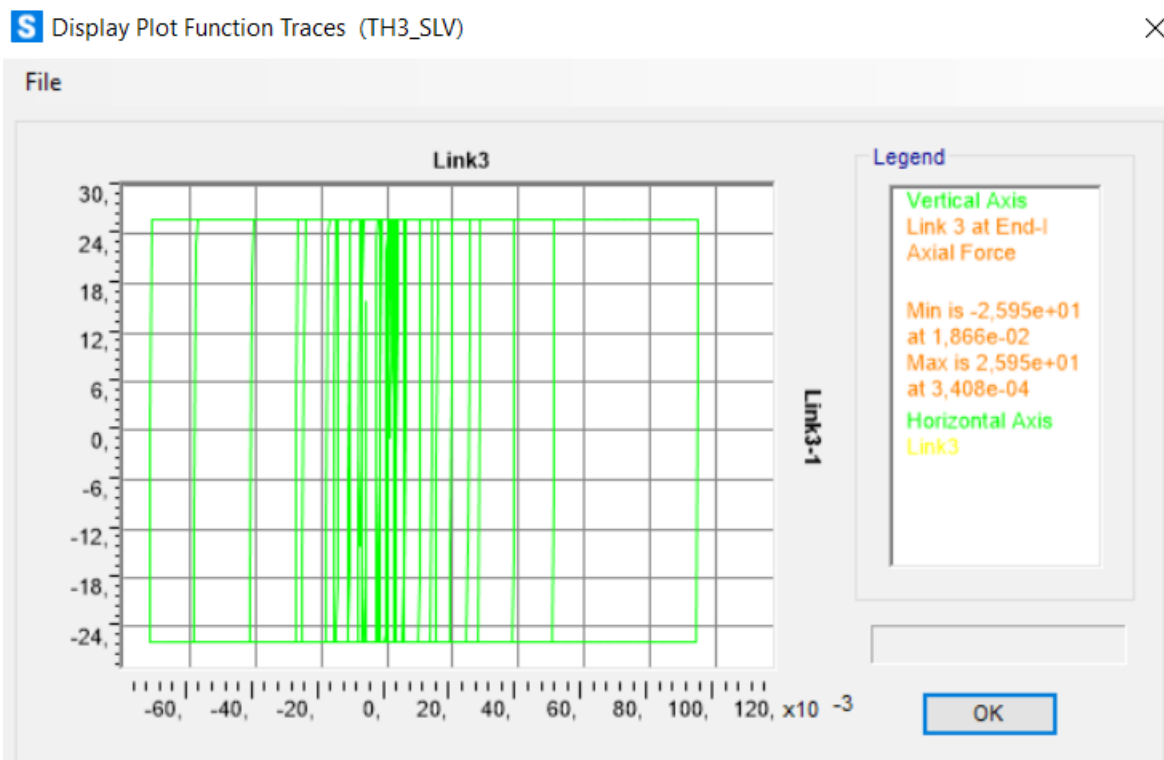


Figura 398. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

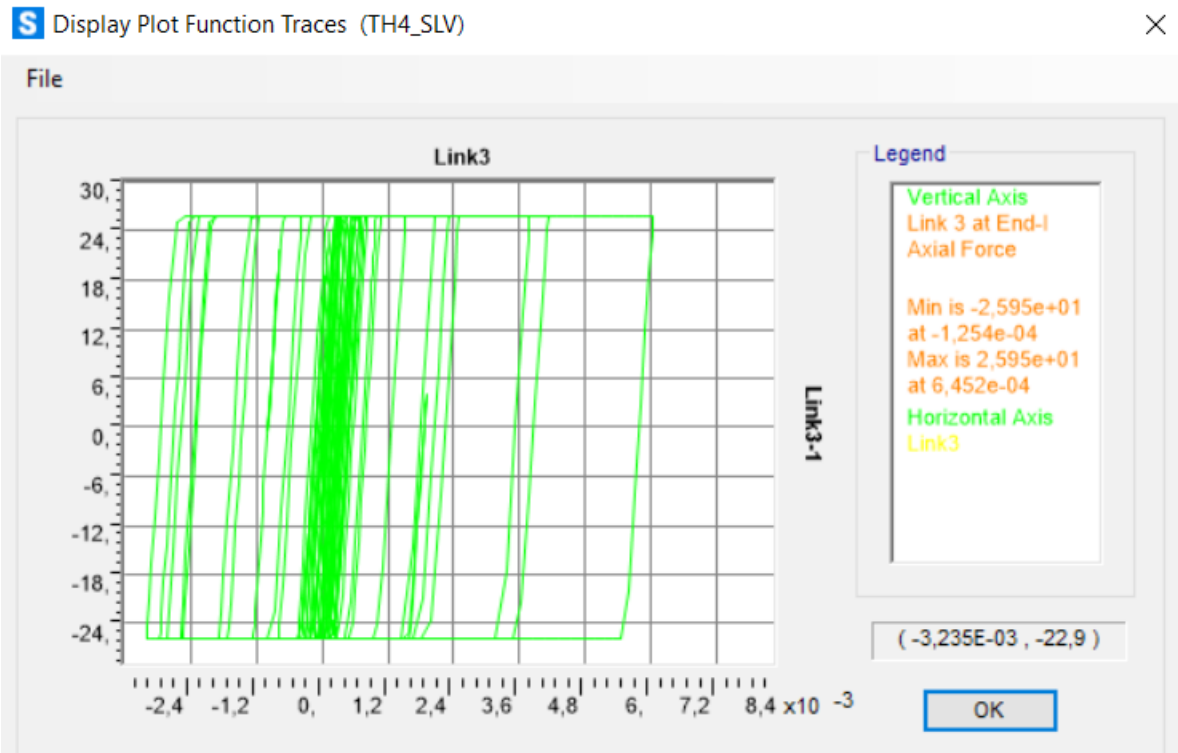


Figura 399. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

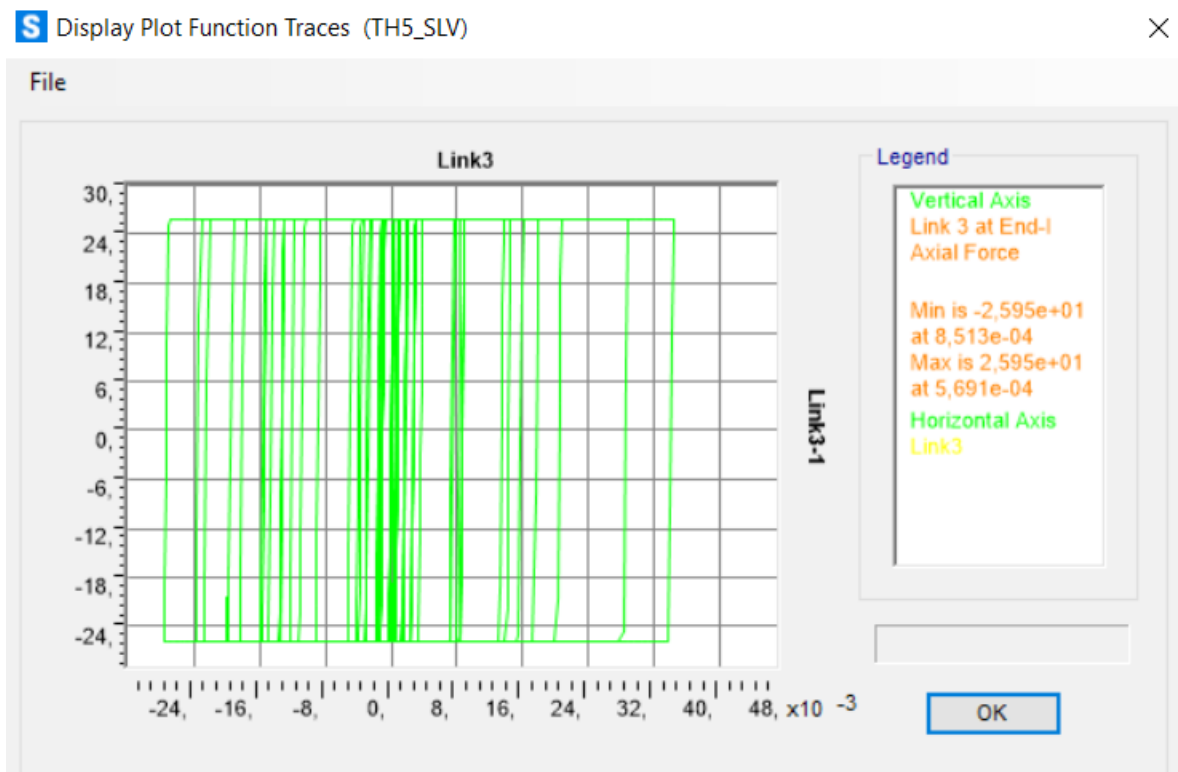


Figura 400. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

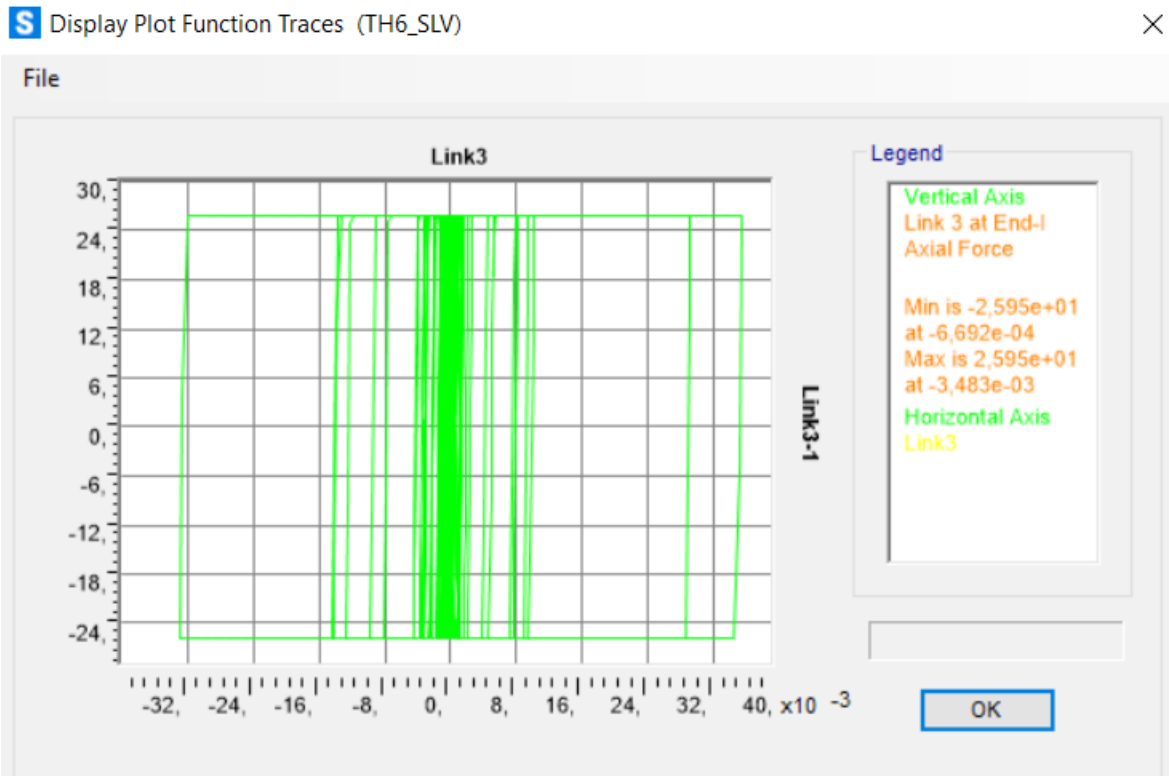


Figura 401. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

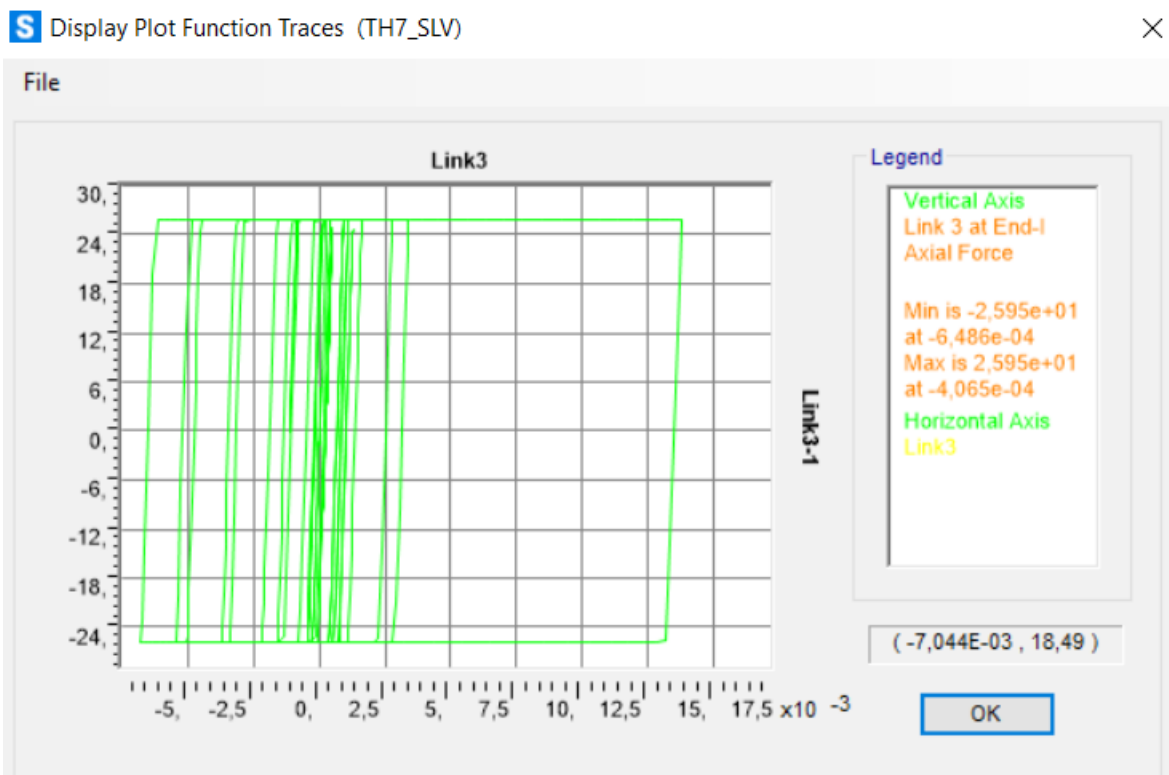


Figura 402. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori magnetoreologici alimentati del telaio 20-15-9-4 in direzione y:

Dissipatore viscoso:

Telaio 20-15-9-4 (direzione y)			
N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	16	0,0215	0,0029
4	20	0,0280	0,0029
5	21	0,0341	0,0034

Telaio 20-15-9-4 (direzione y)		
N° piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	16	27,46
4	20	31,07
5	21	37,43

Piano 3:

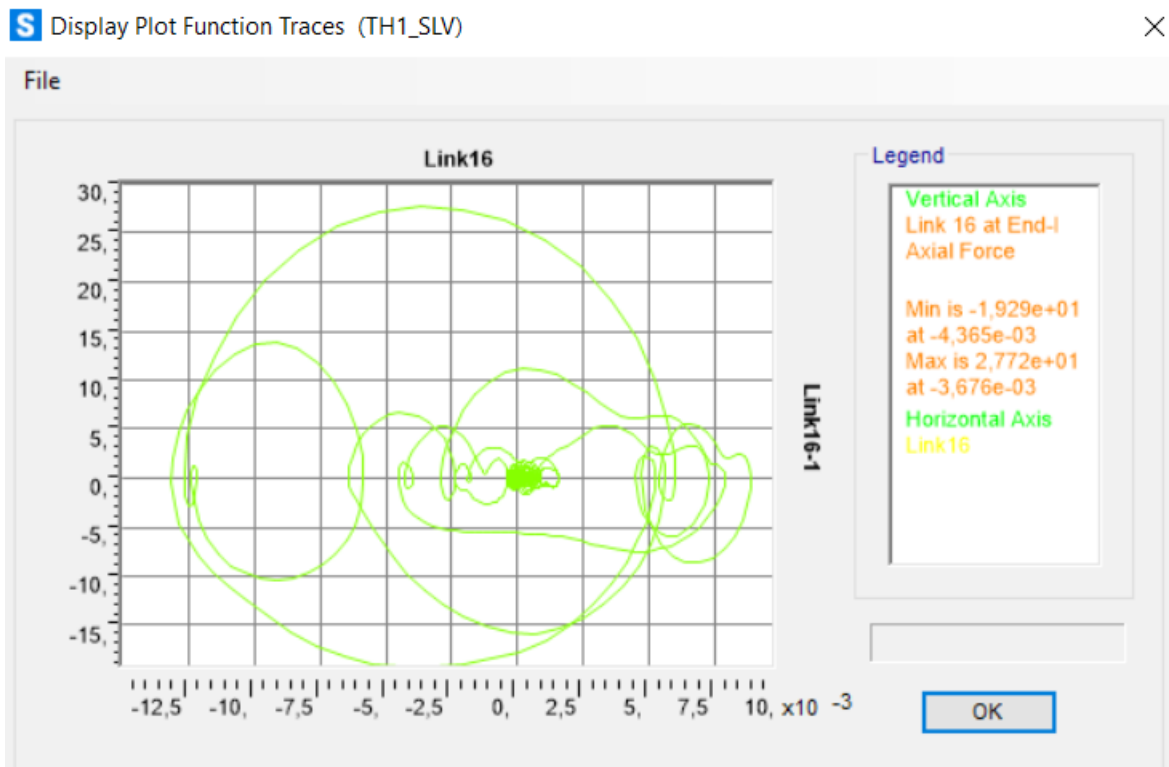


Figura 403. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

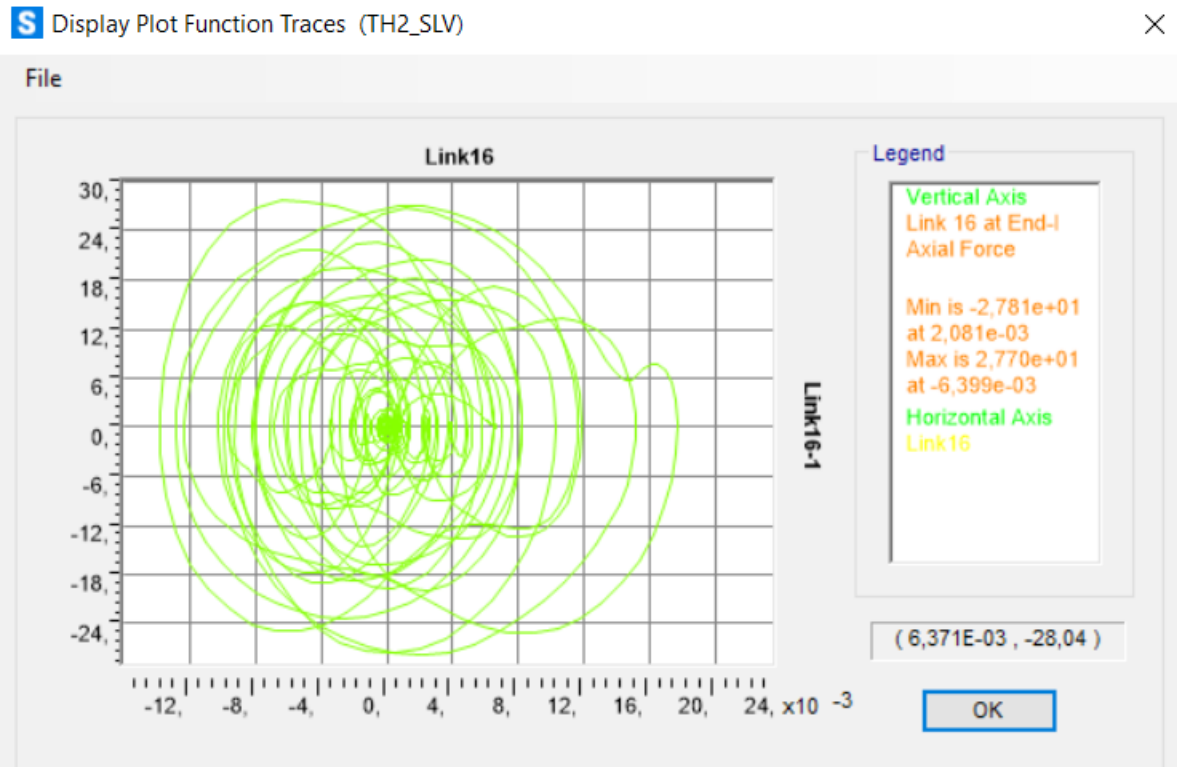


Figura 404. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

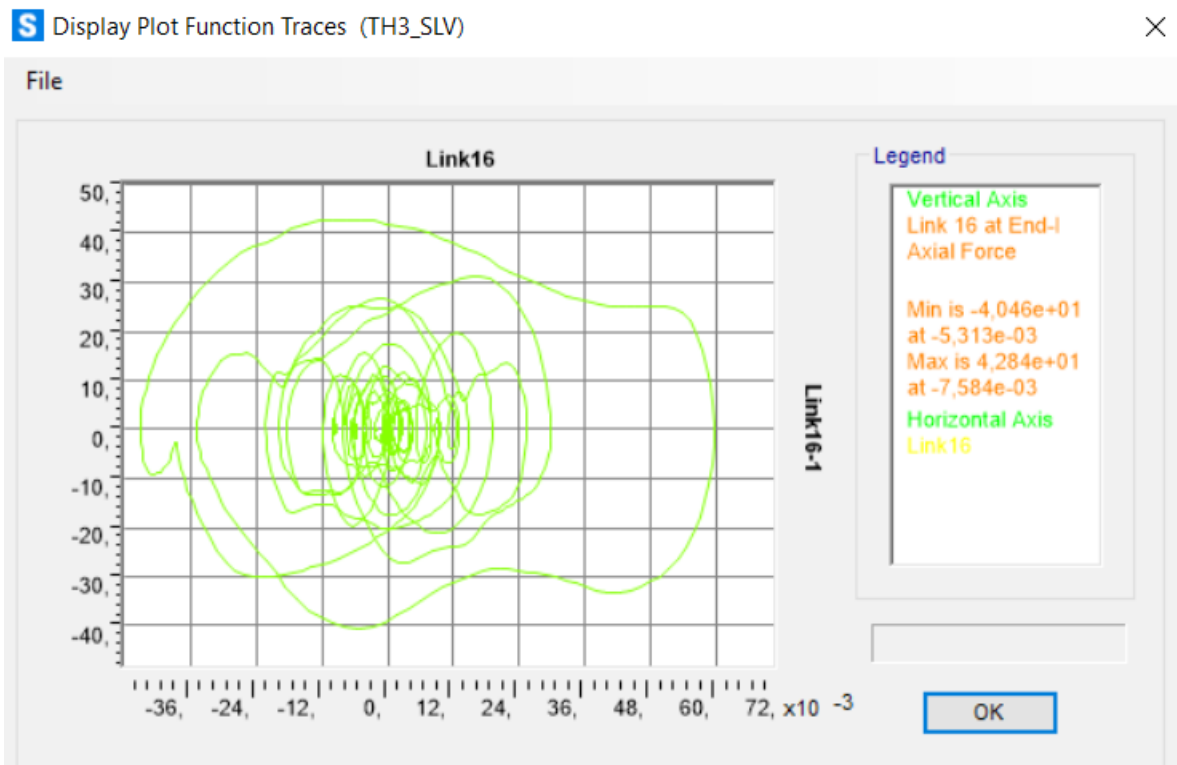


Figura 405. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

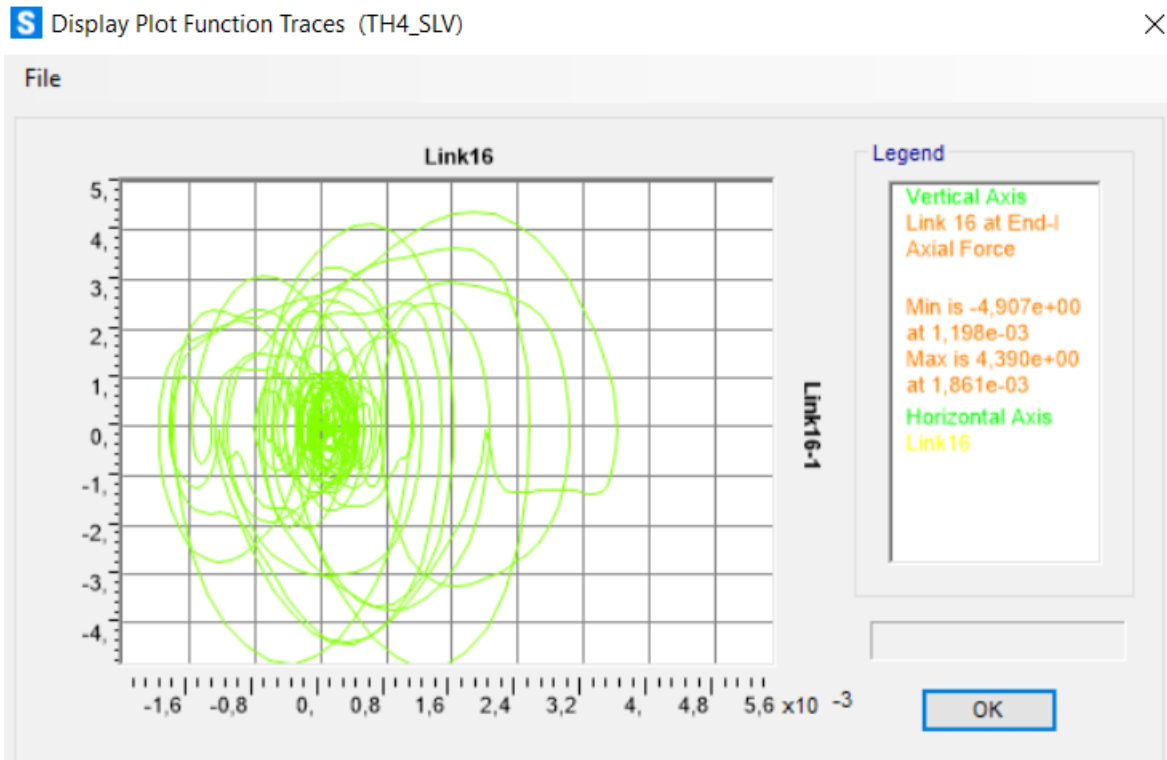


Figura 406. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

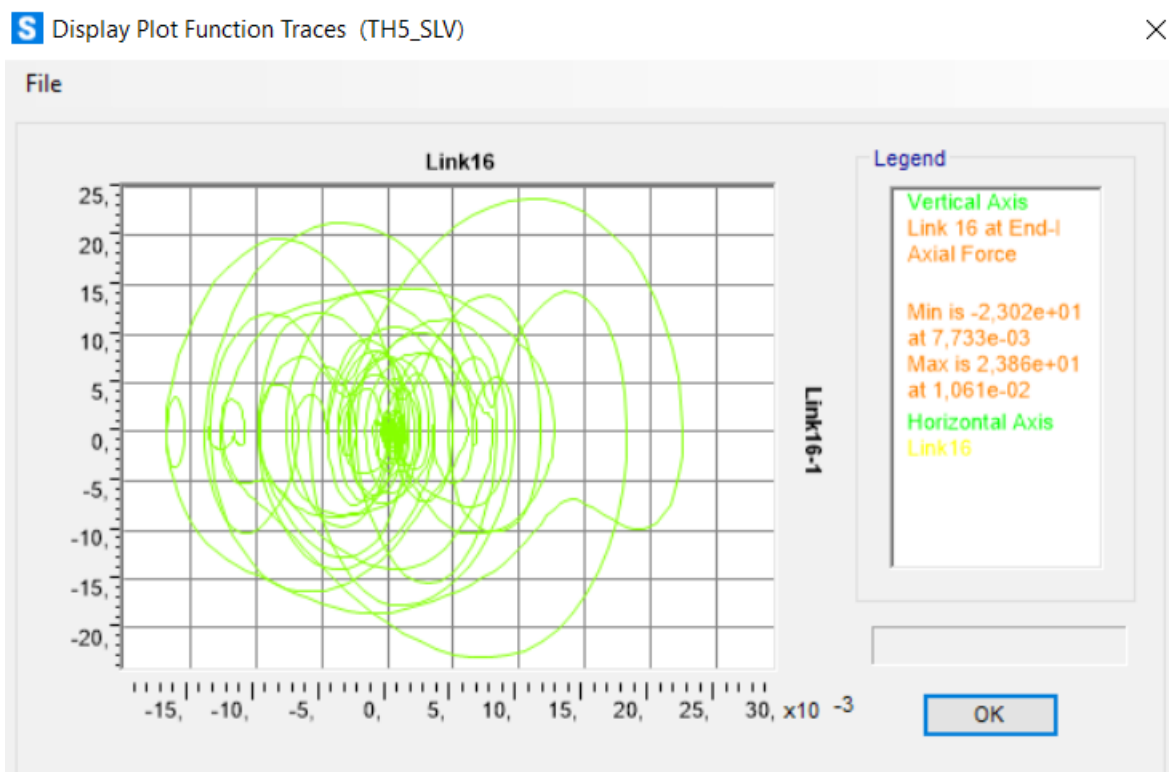


Figura 407. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

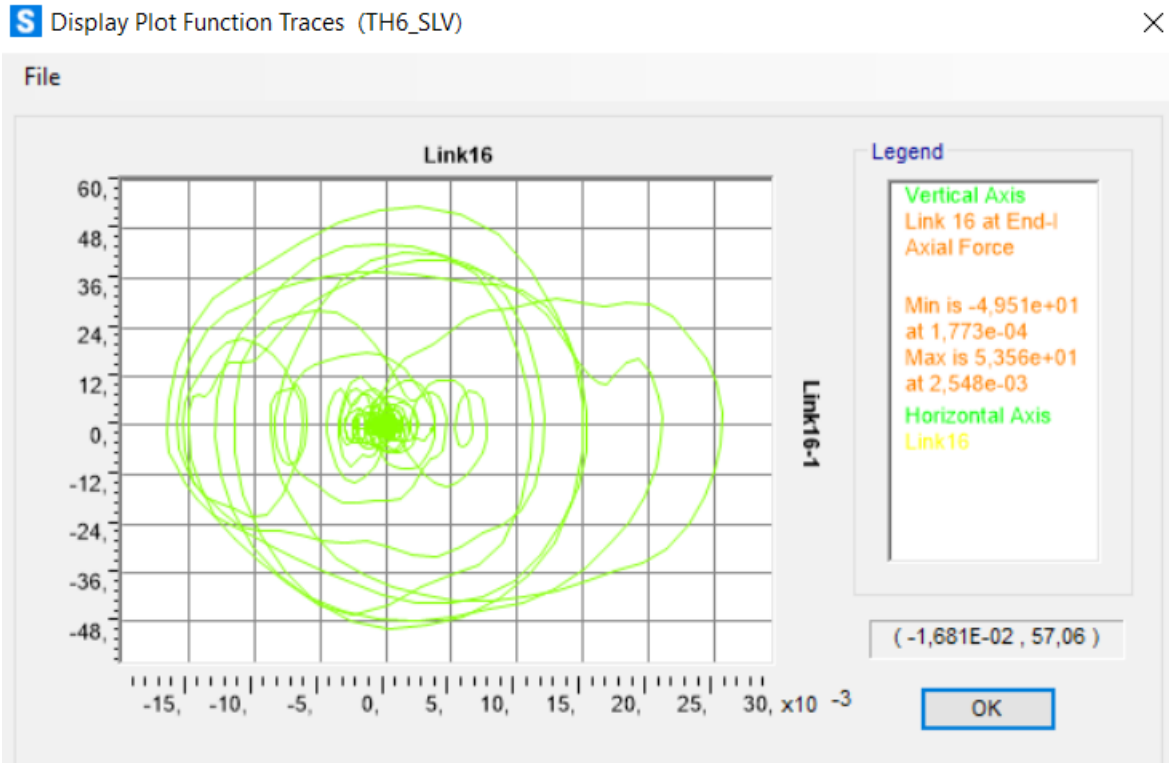


Figura 408. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

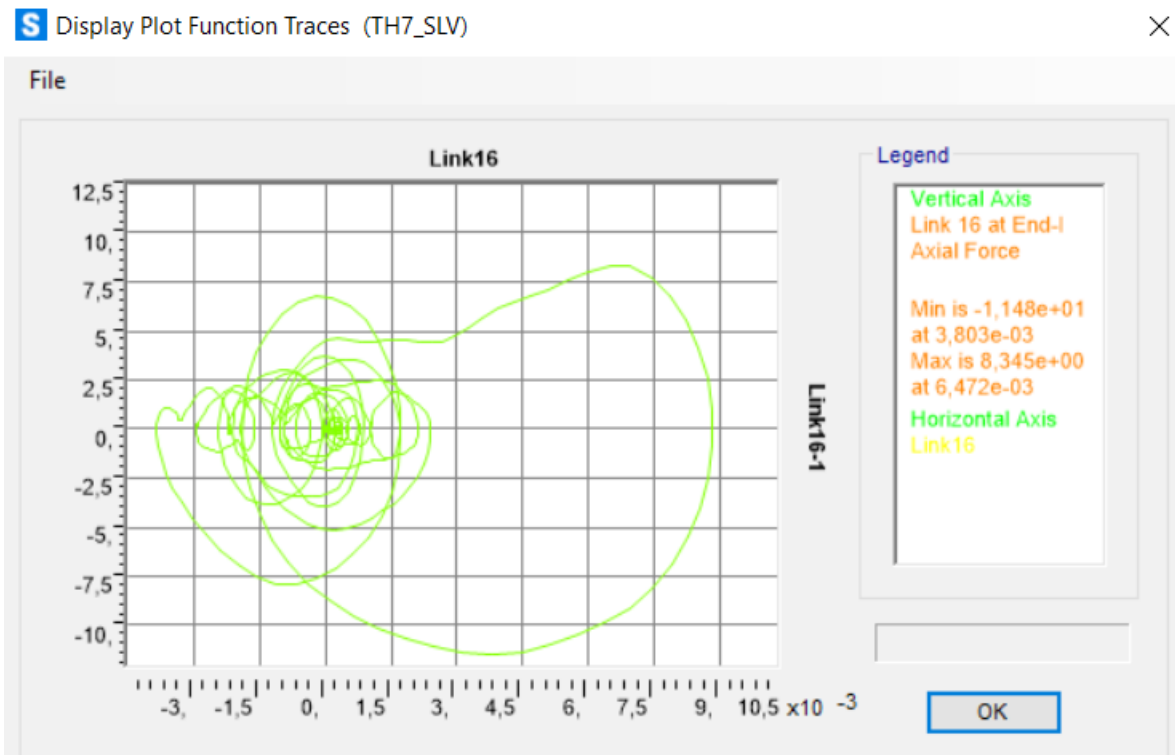


Figura 409. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

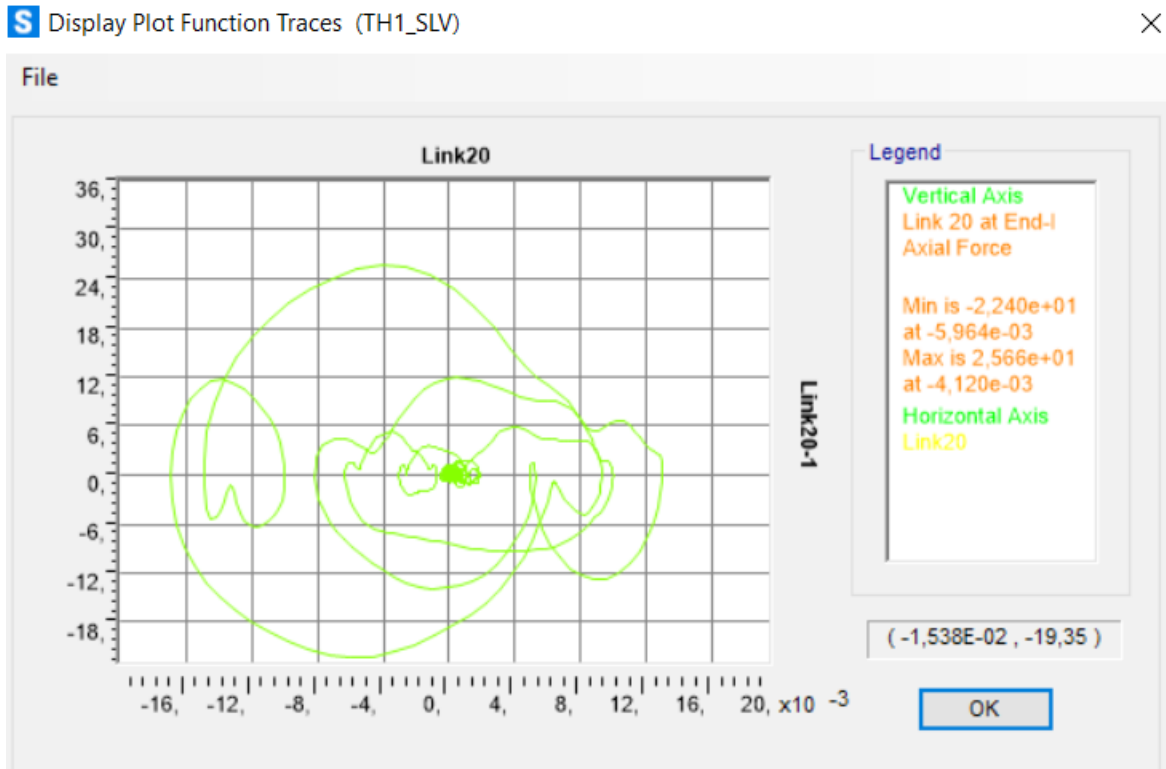


Figura 410. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

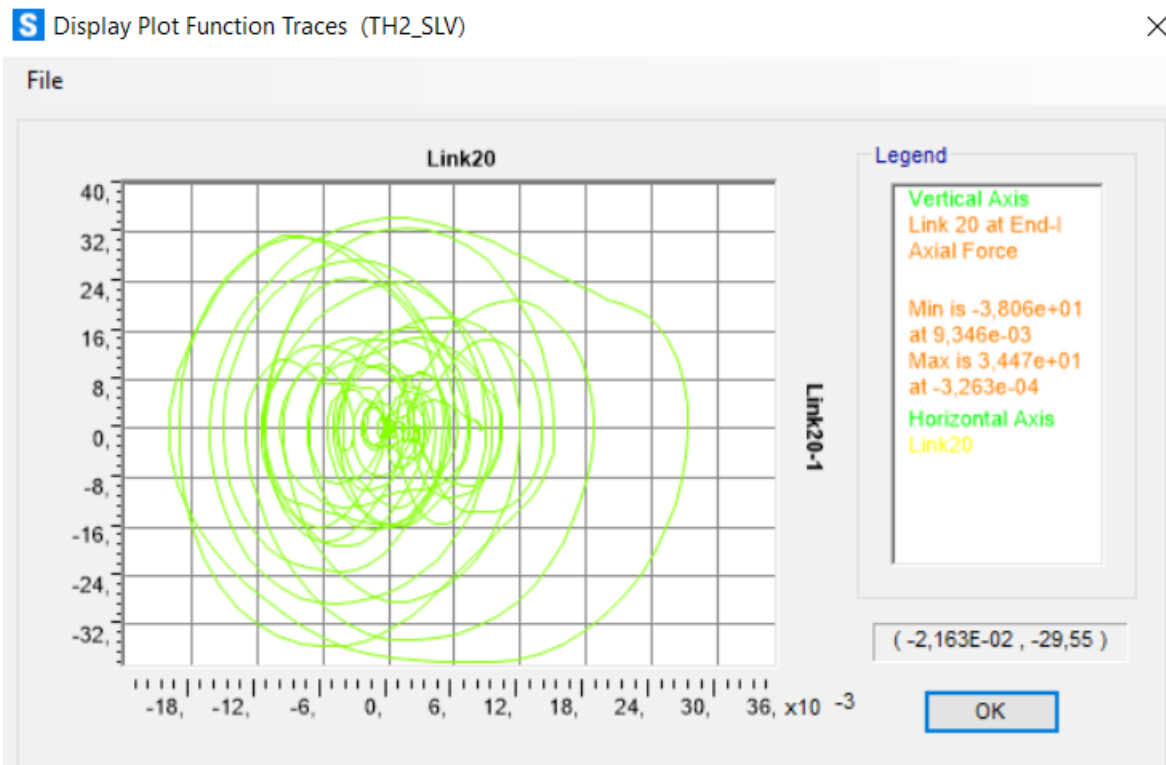


Figura 411. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

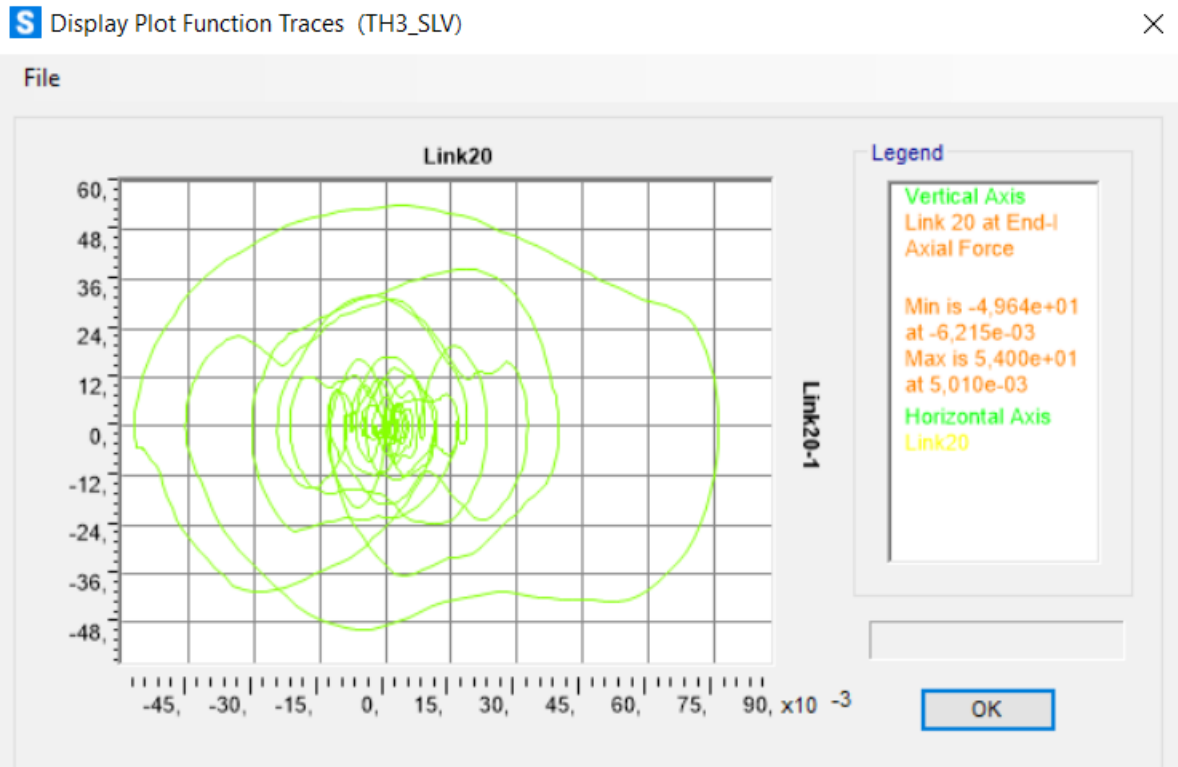


Figura 412. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

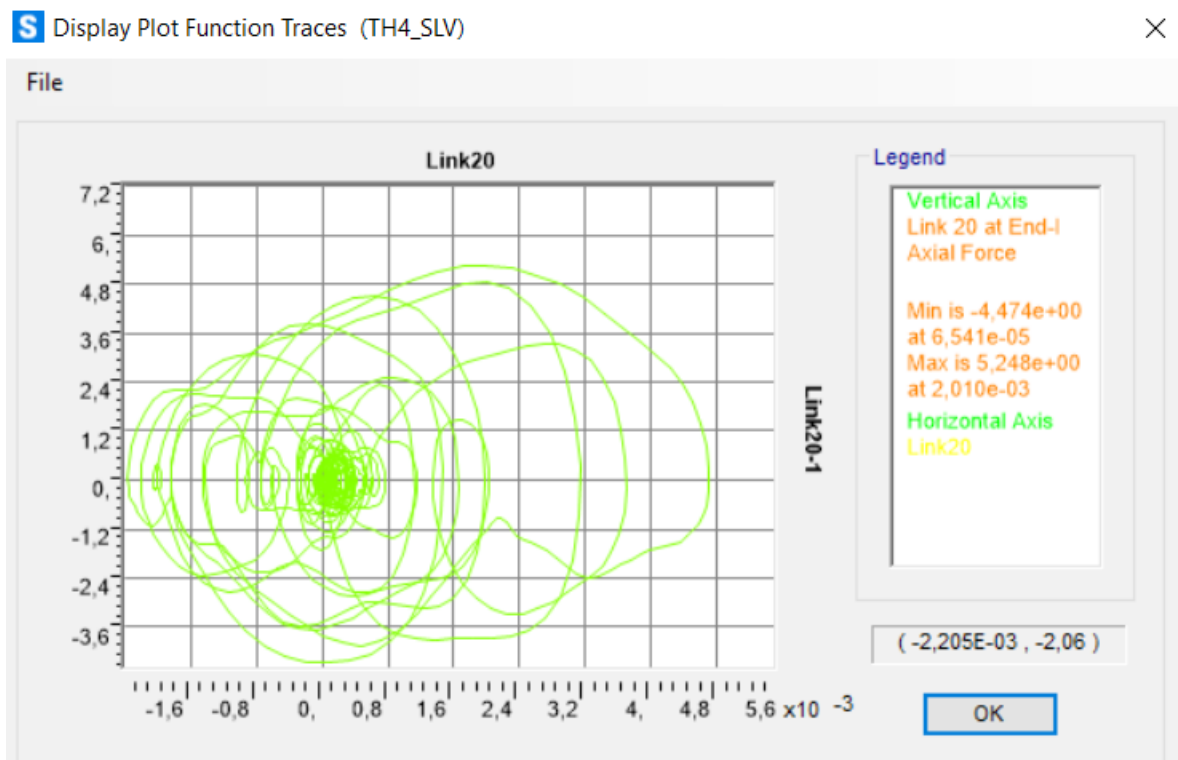


Figura 413. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

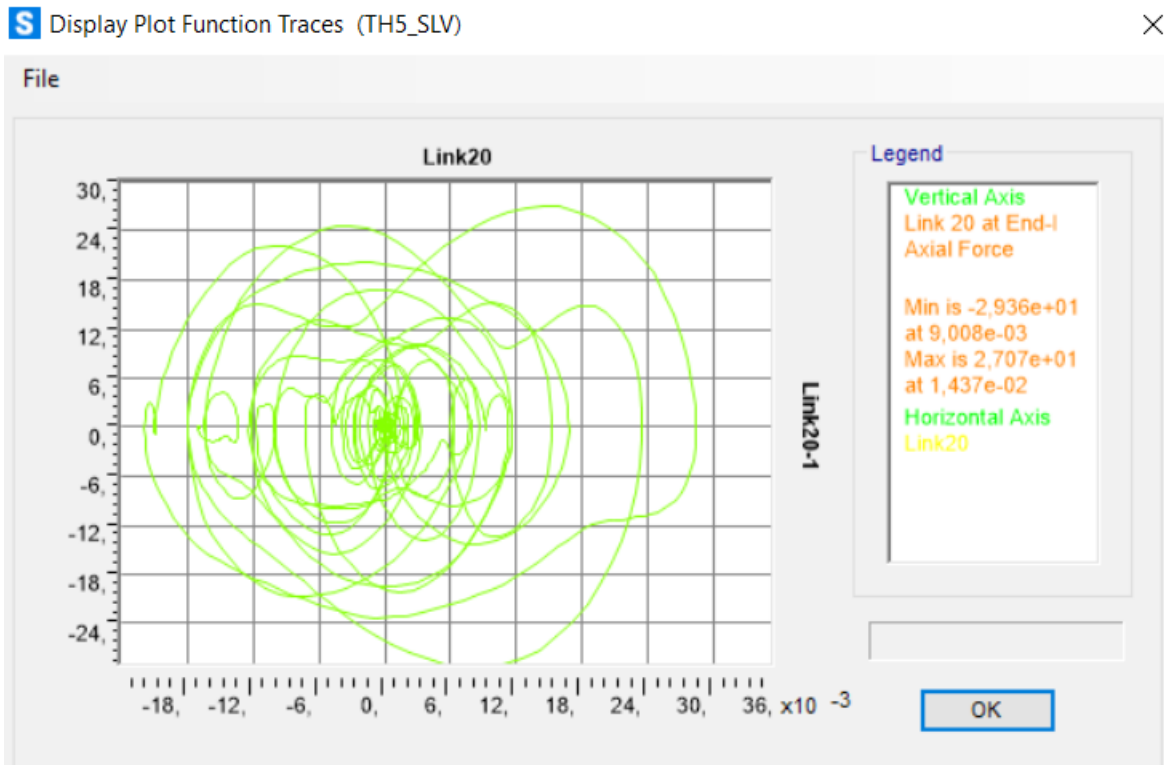


Figura 414. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

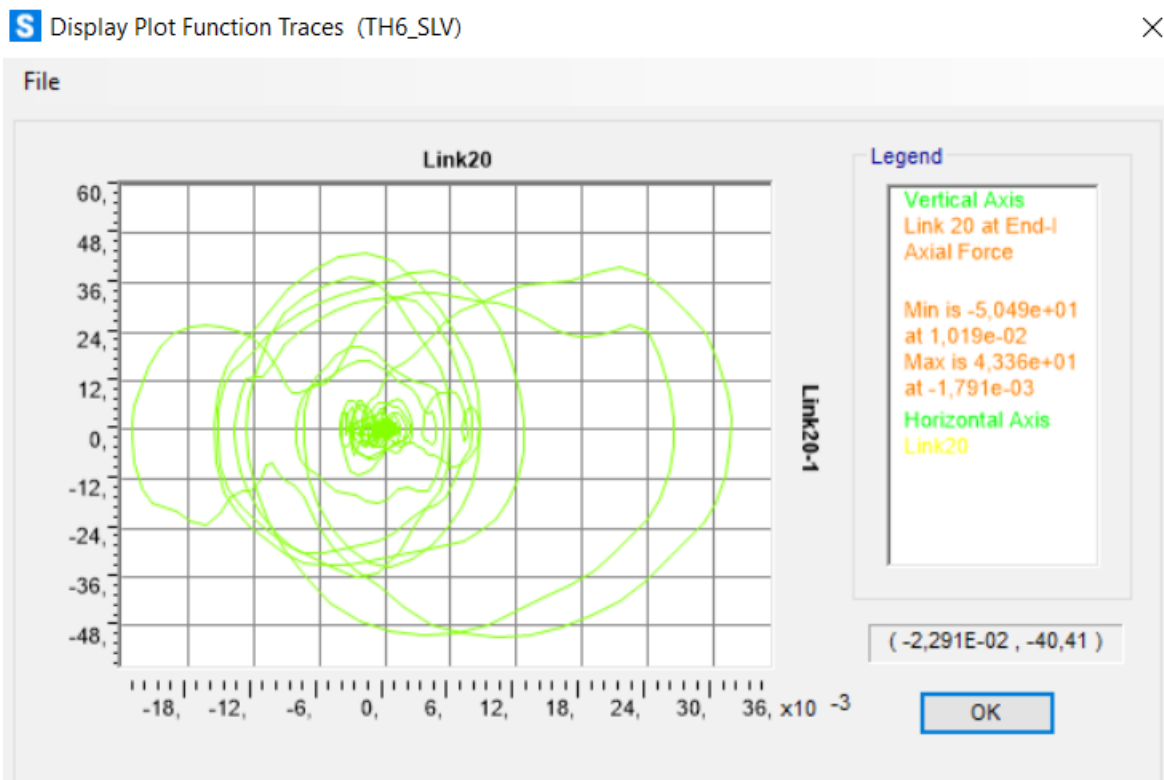


Figura 415. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

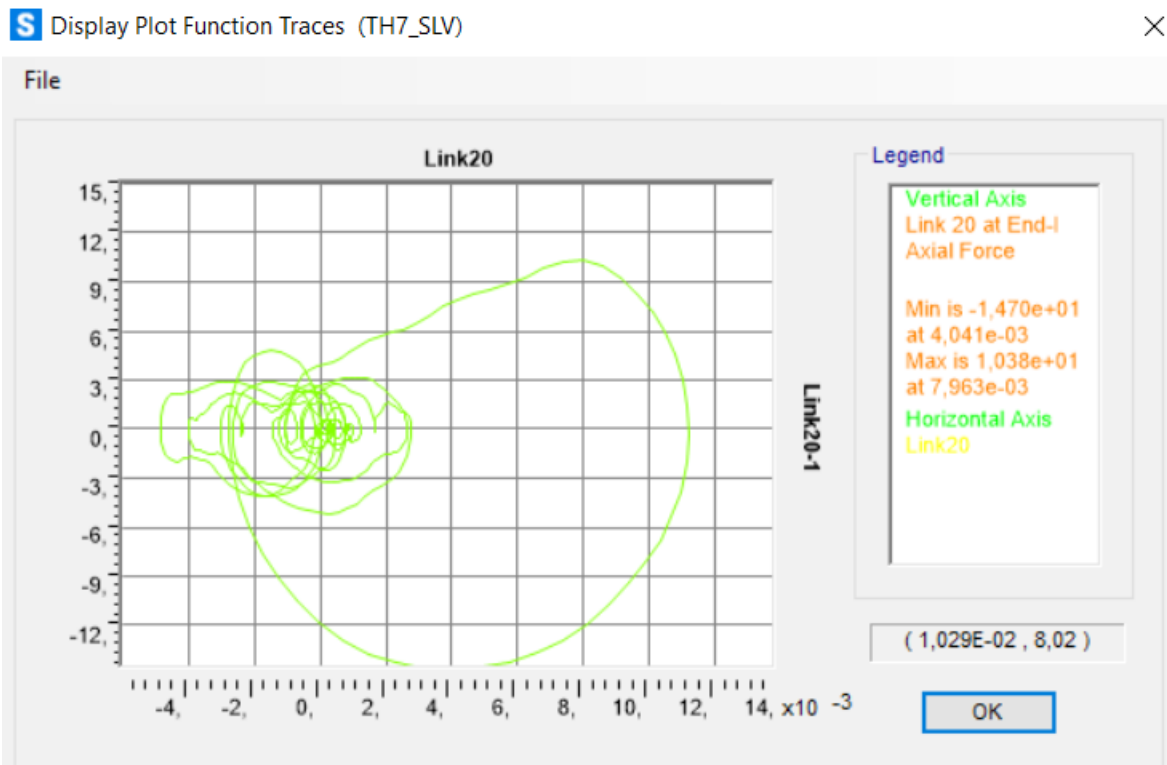


Figura 416. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

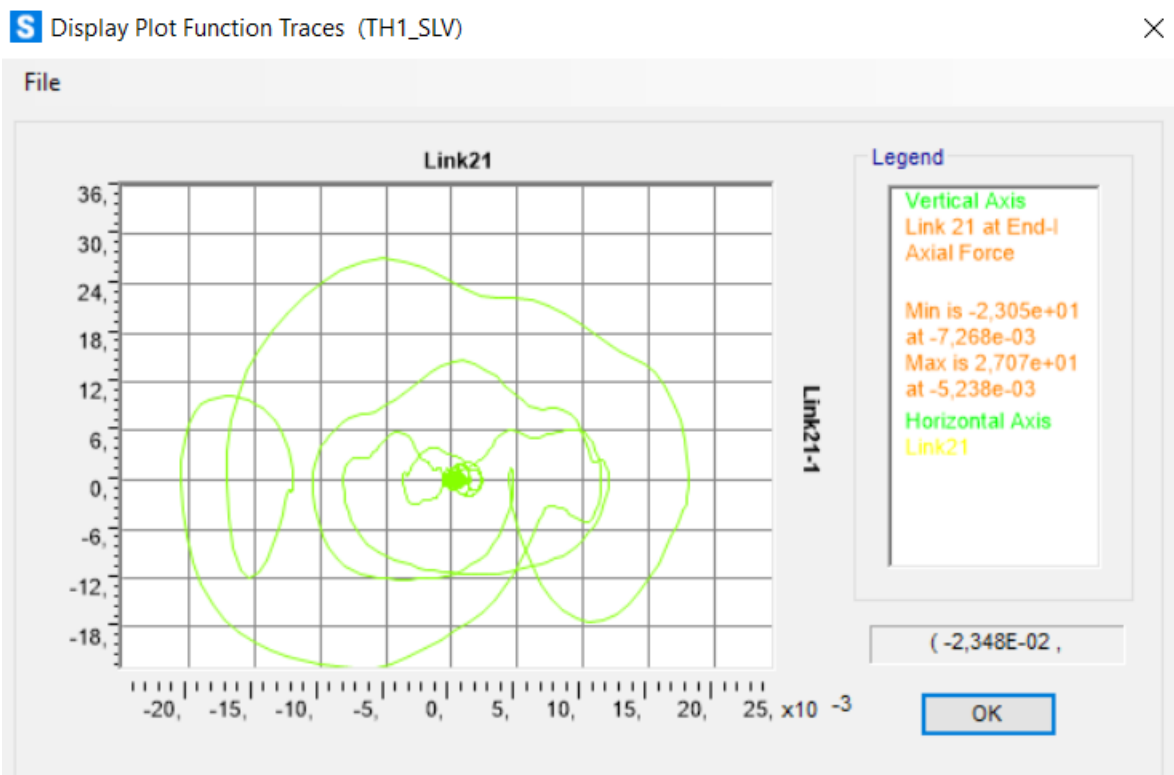


Figura 417. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

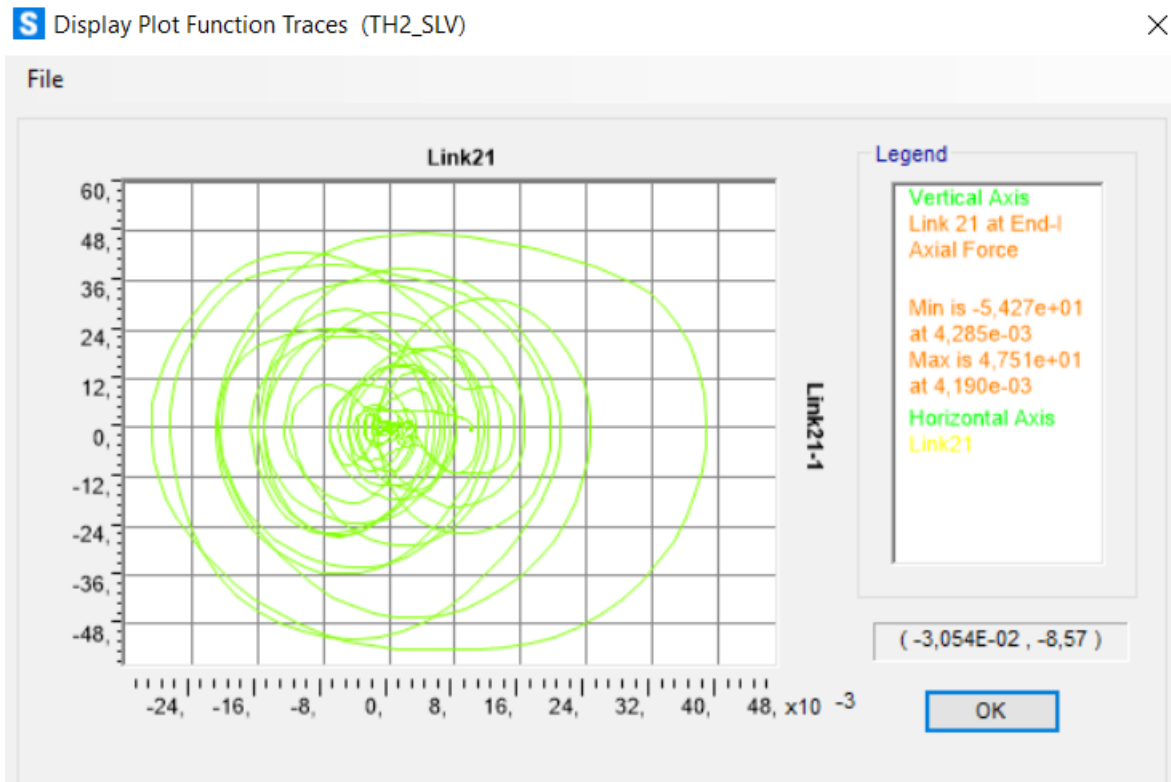


Figura 418. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

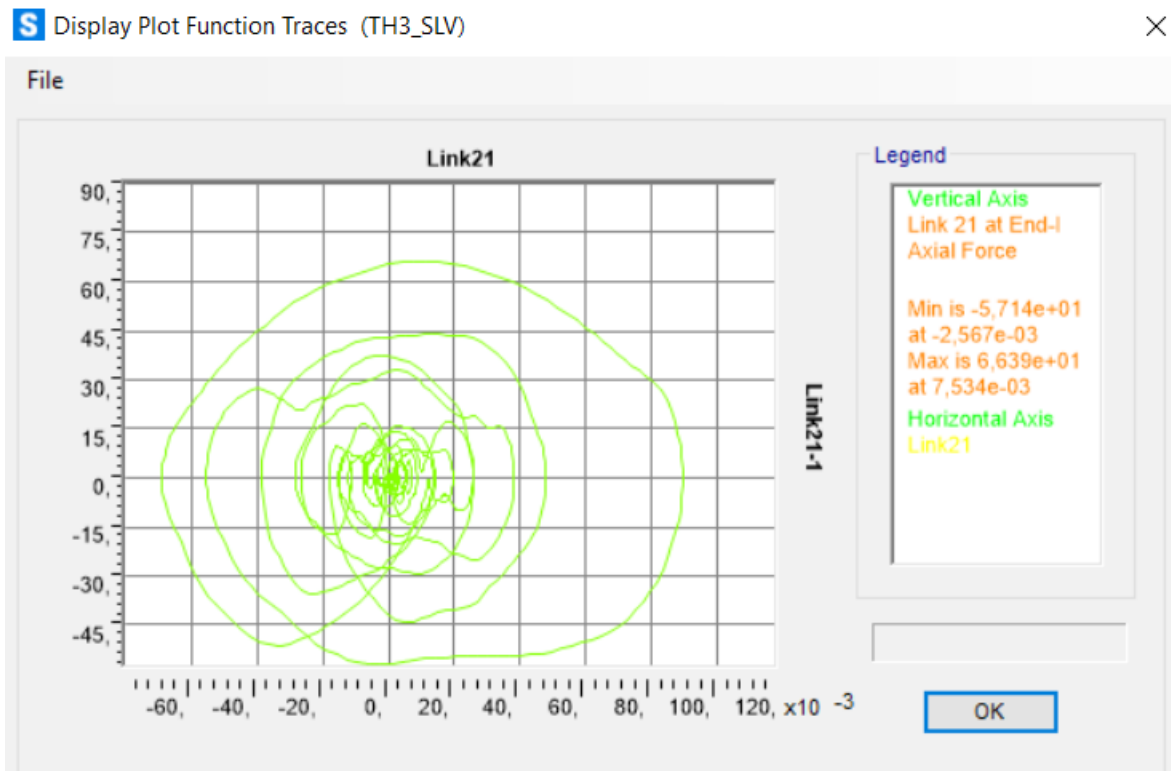


Figura 419. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

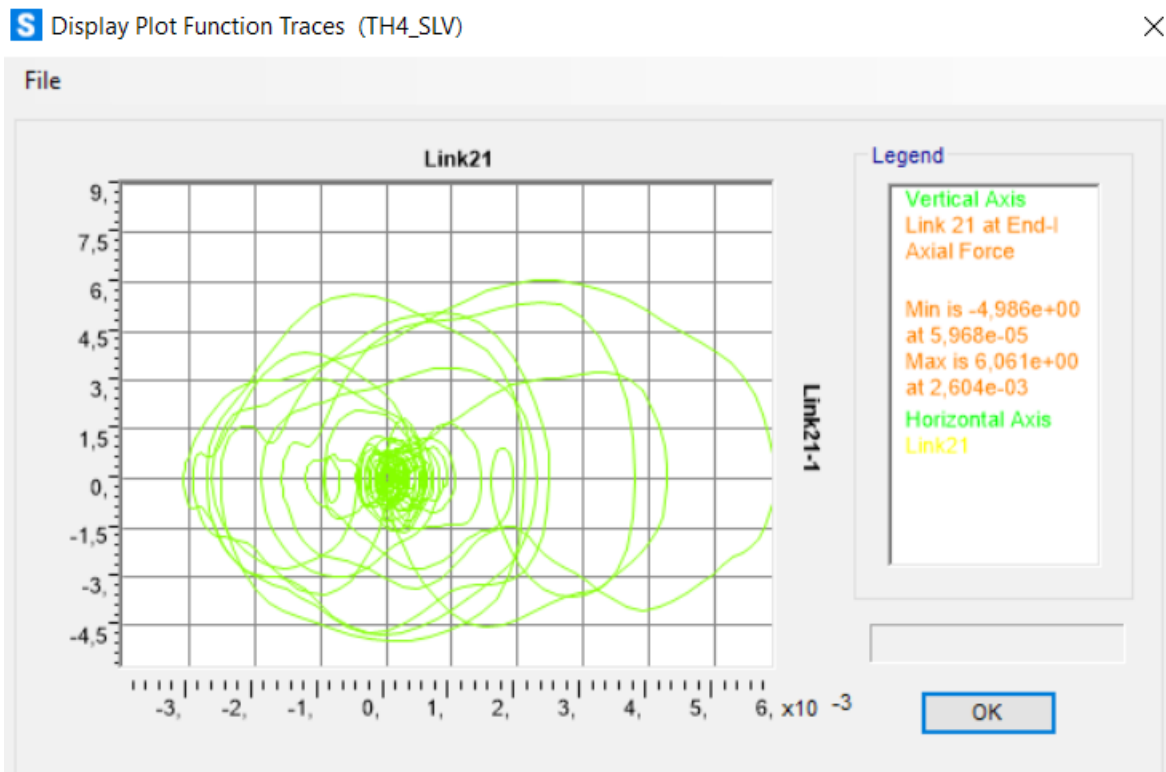


Figura 420. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

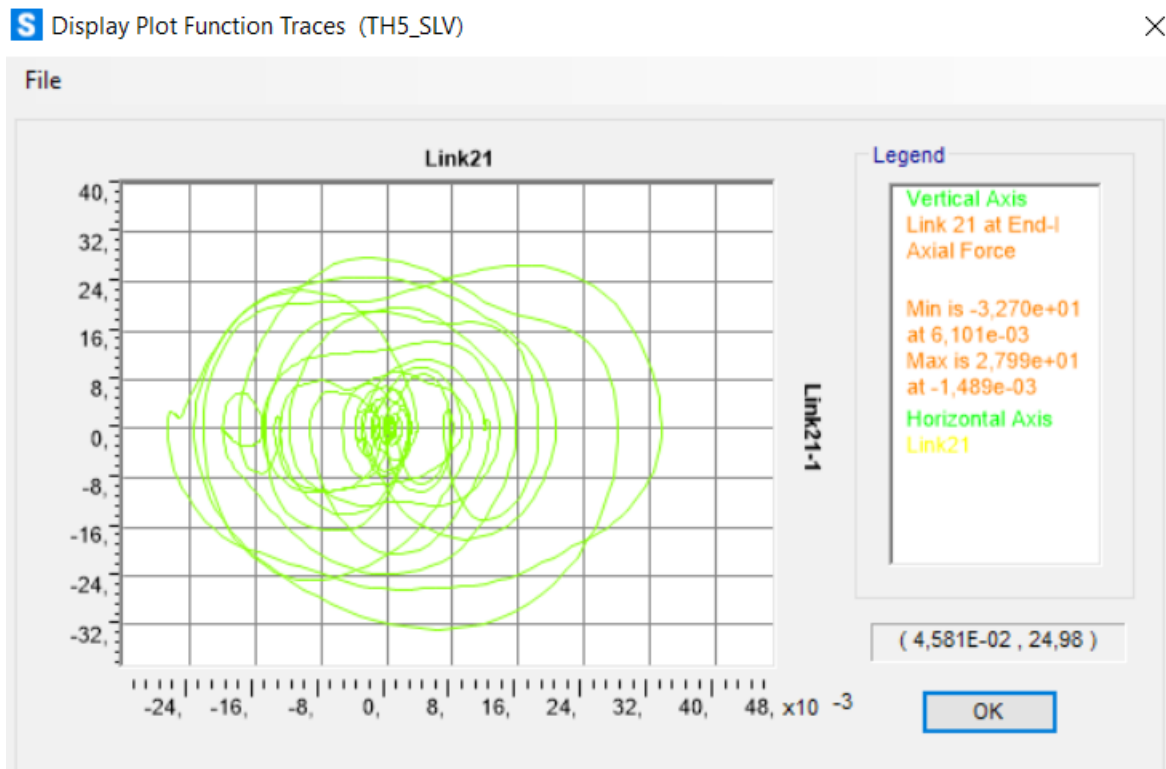


Figura 421. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

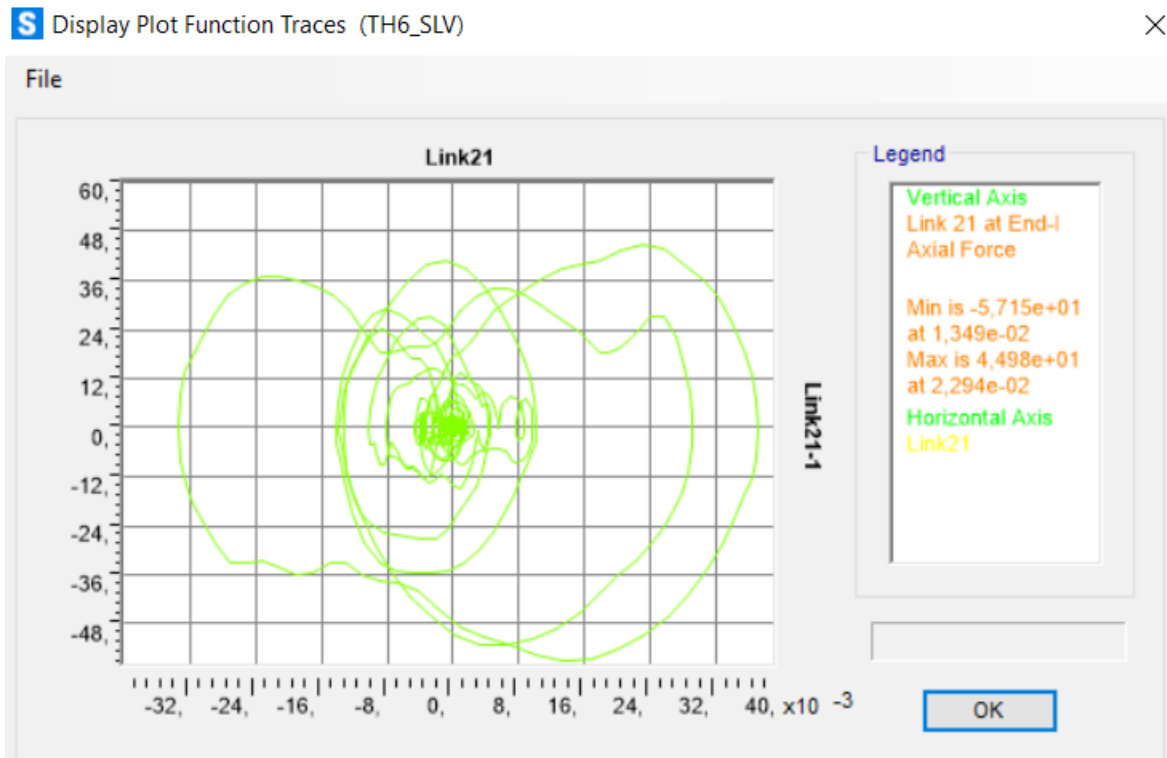


Figura 422. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

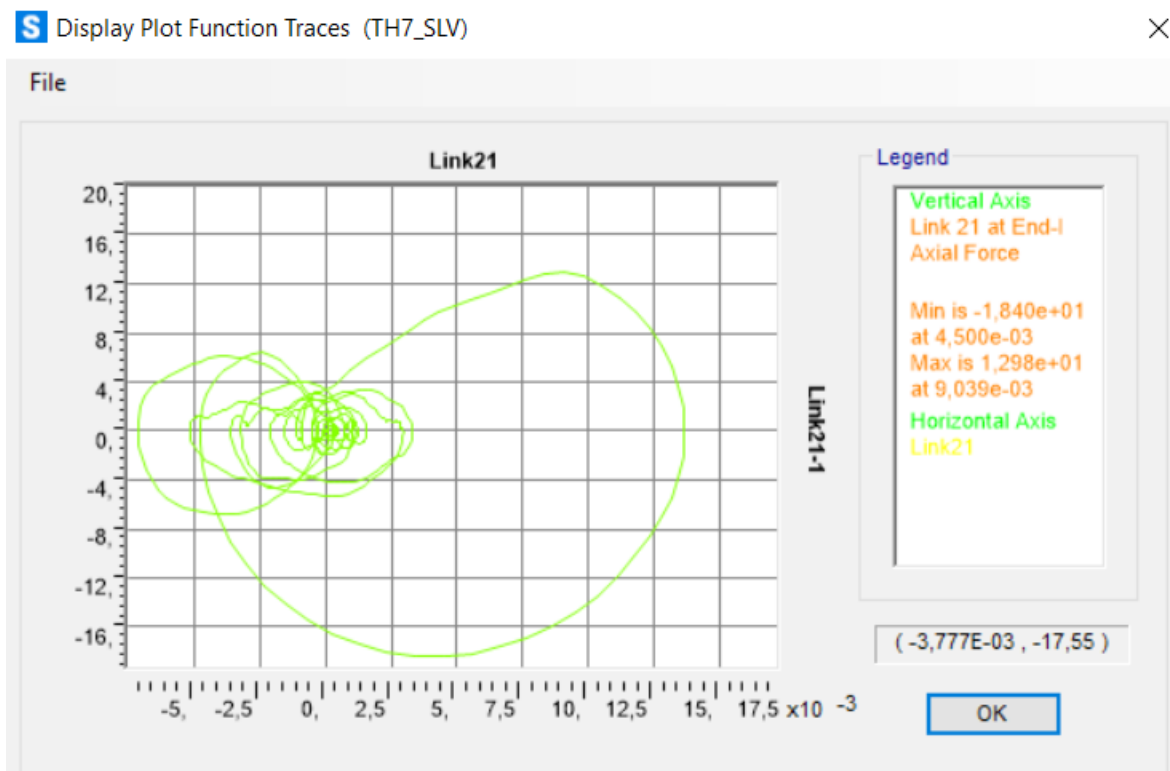


Figura 423. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Dissipatore elasto-plastico:

Telaio 20-15-9-4 (direzione y)			
N°piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	4	0,0215	0,0029
4	5	0,0280	0,0029
5	6	0,0341	0,0034

Telaio 20-15-9-4 (direzione y)		
N°piano	N° label	Fy
(-)	(-)	(kN)
3	4	25,95
4	5	25,95
5	6	25,95

Piano 3:

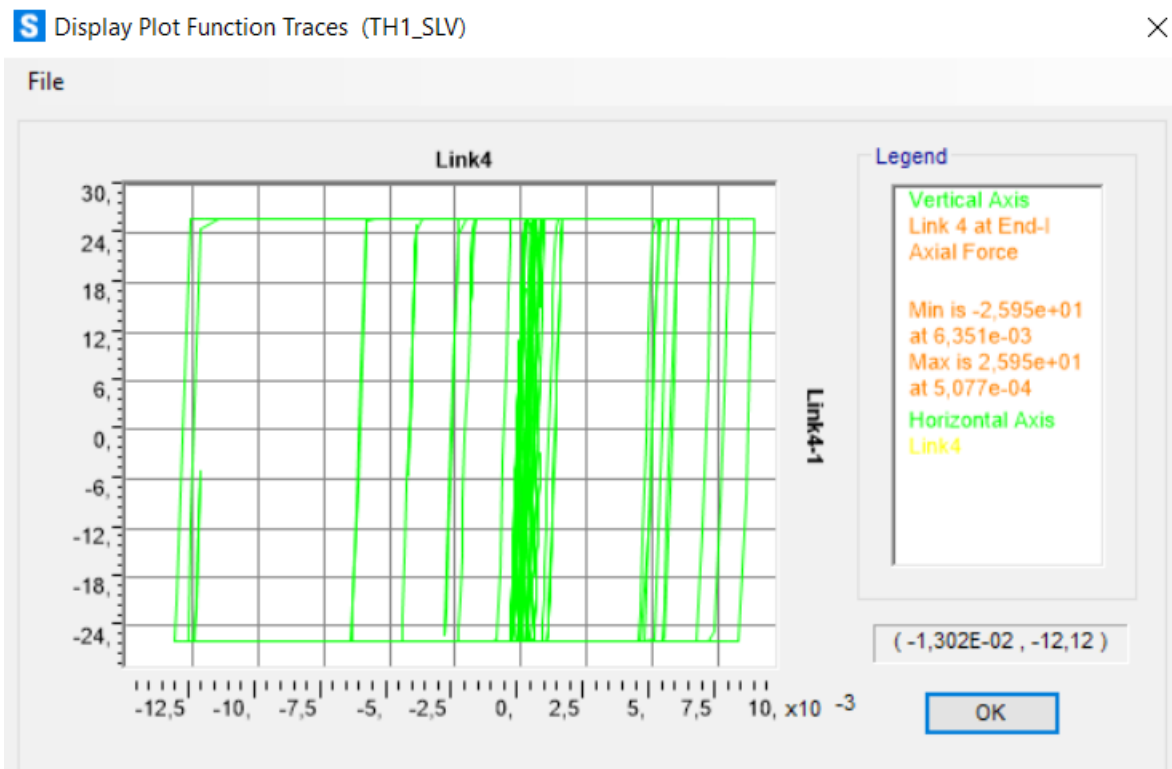


Figura 424. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

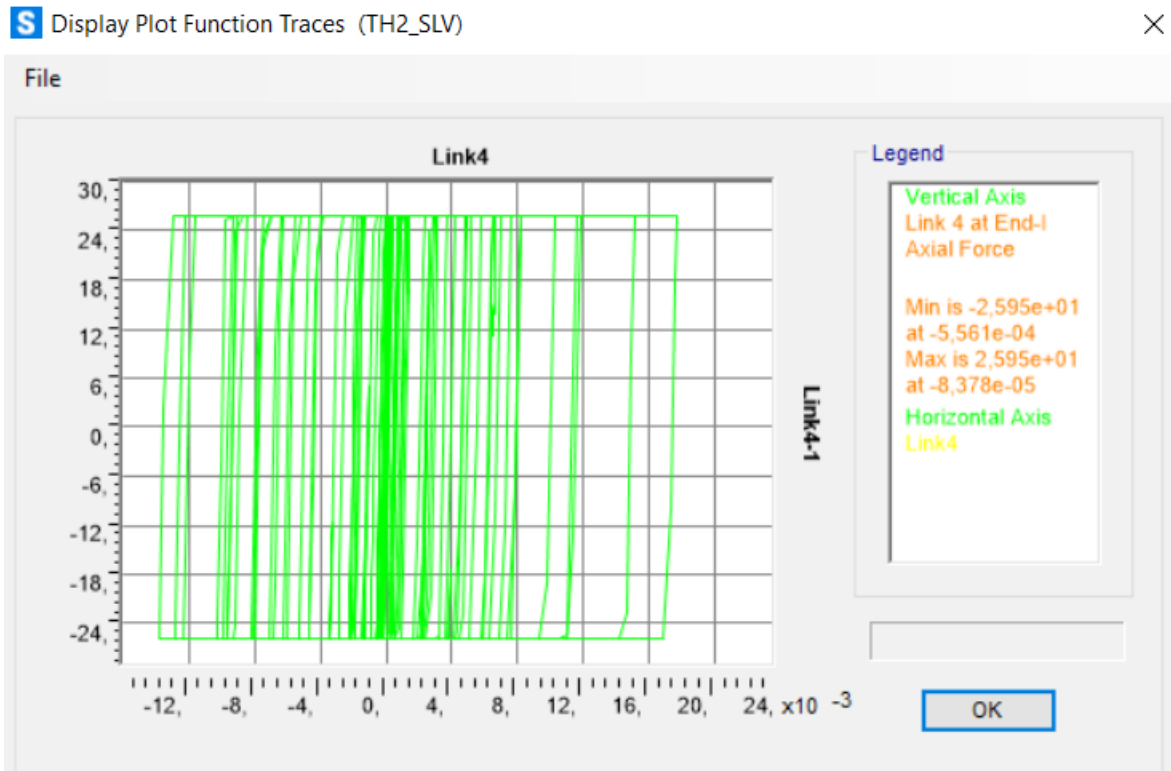


Figura 425. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

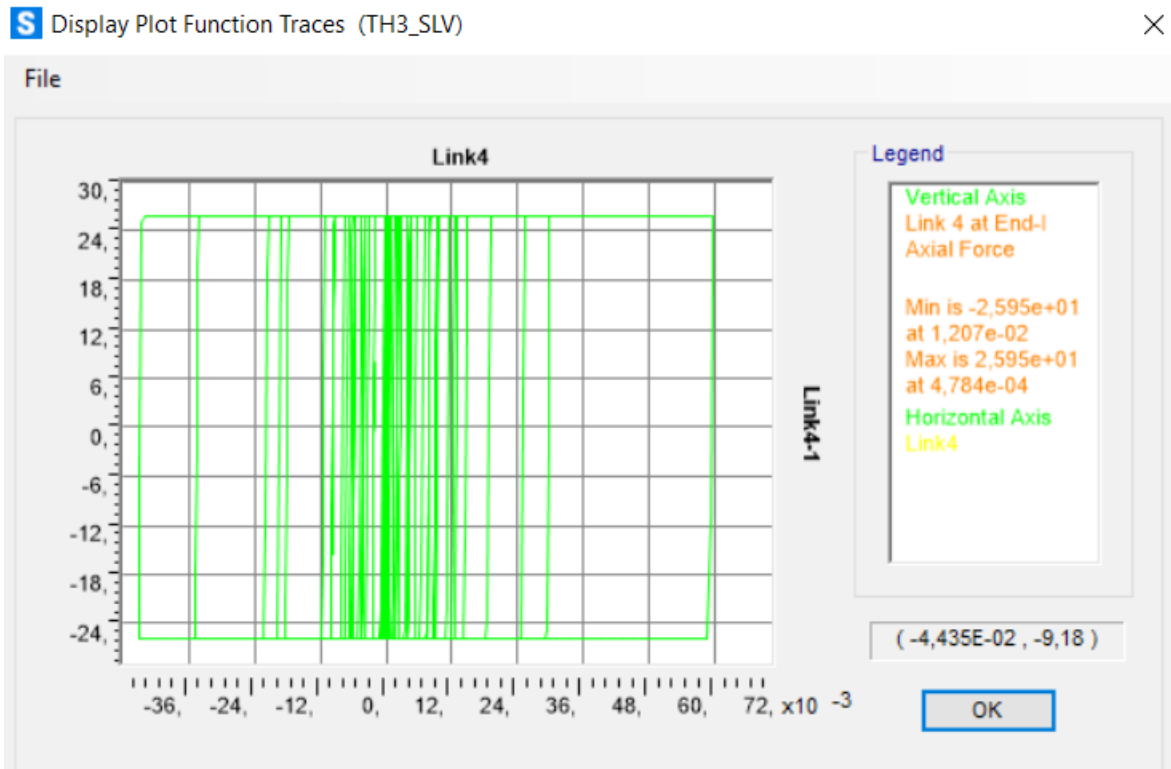


Figura 426. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

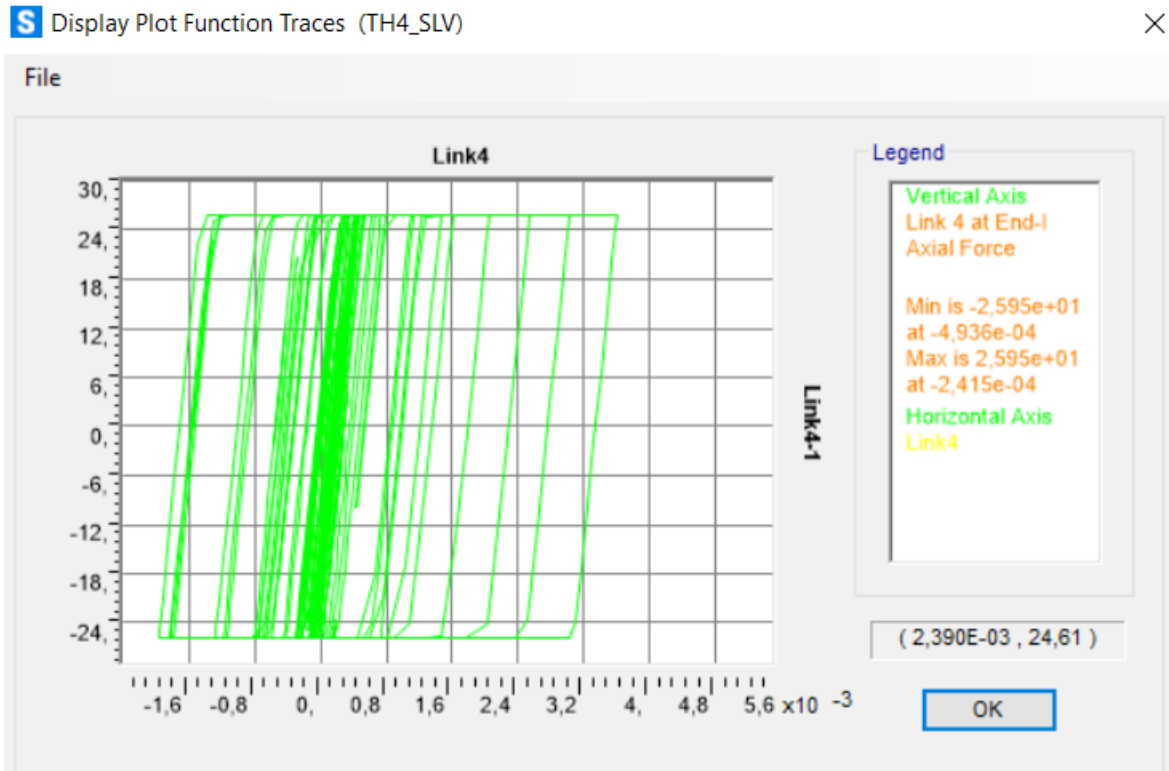


Figura 427. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

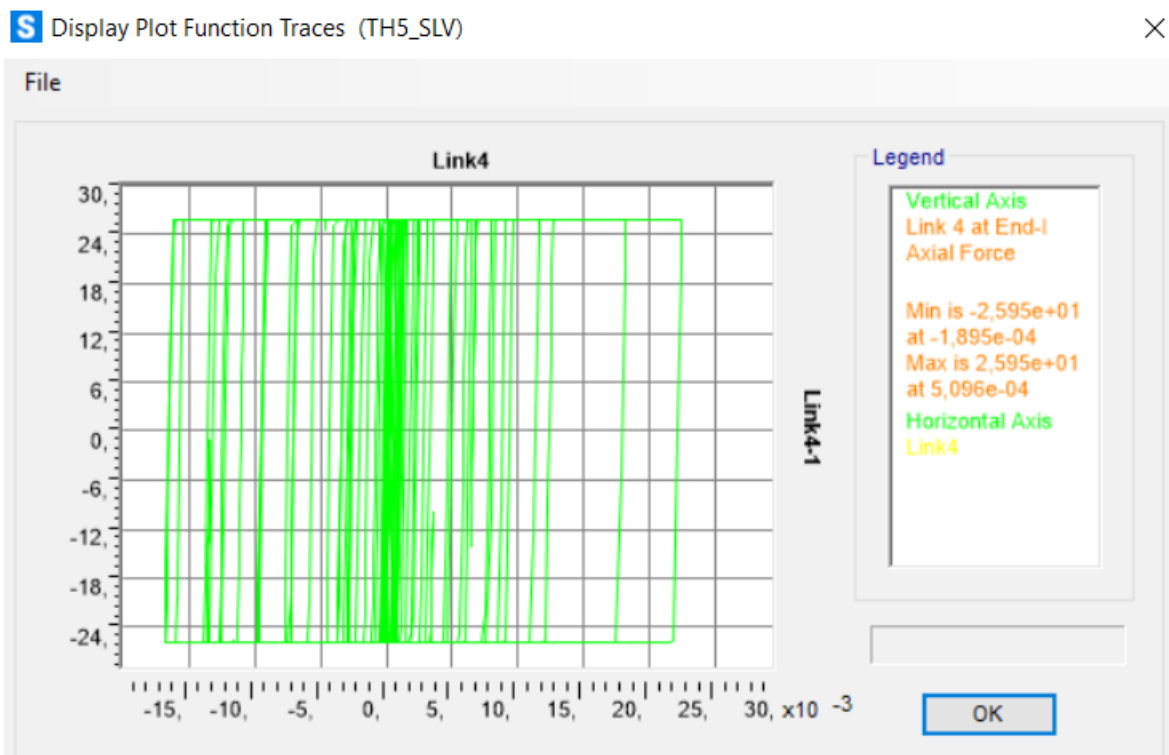


Figura 428. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

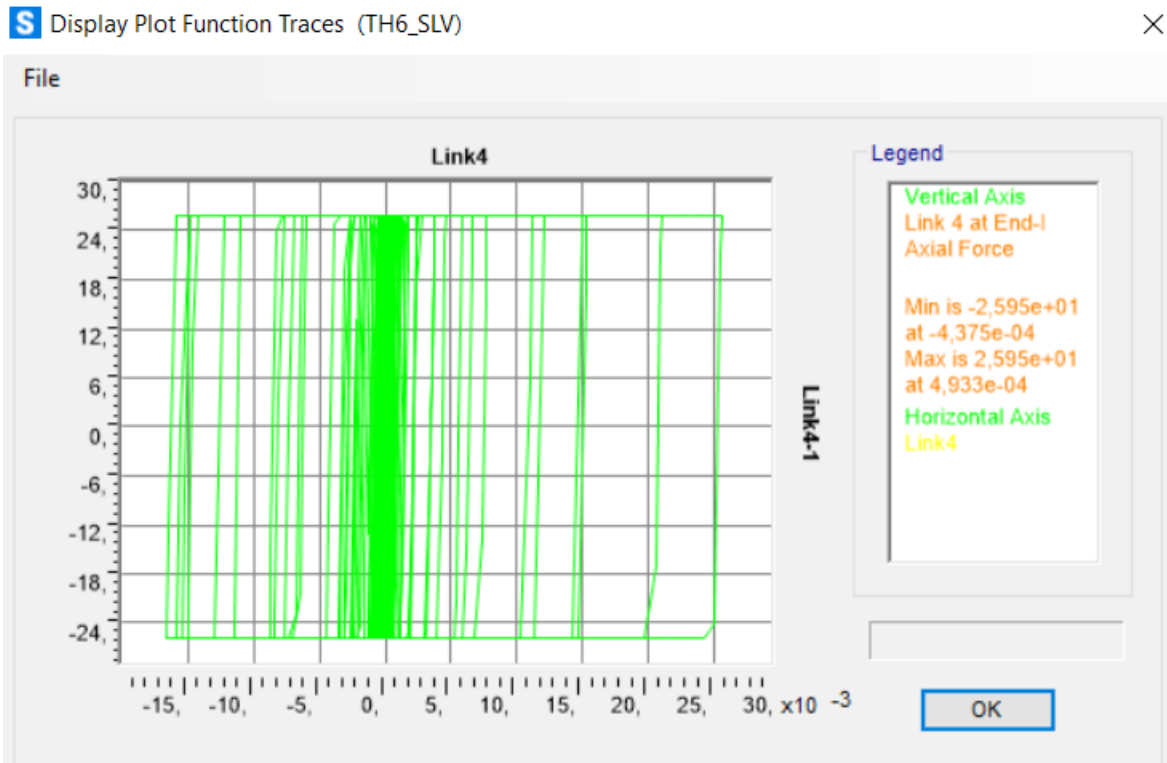


Figura 429. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

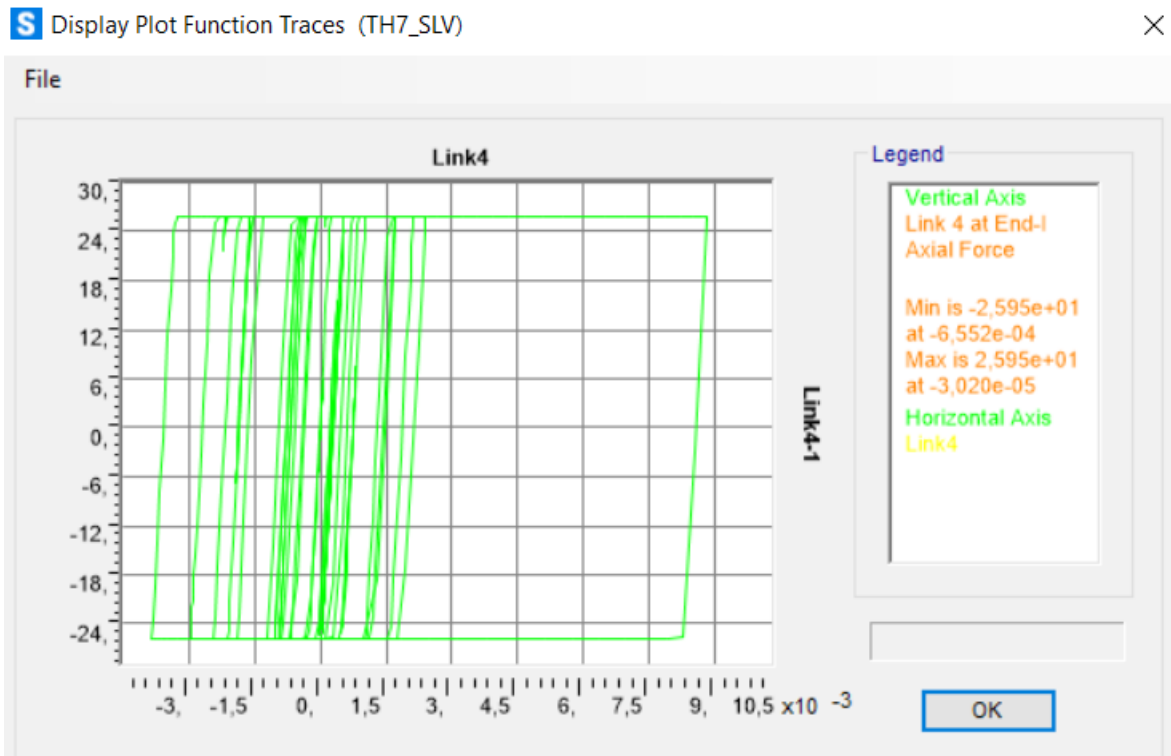


Figura 430. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

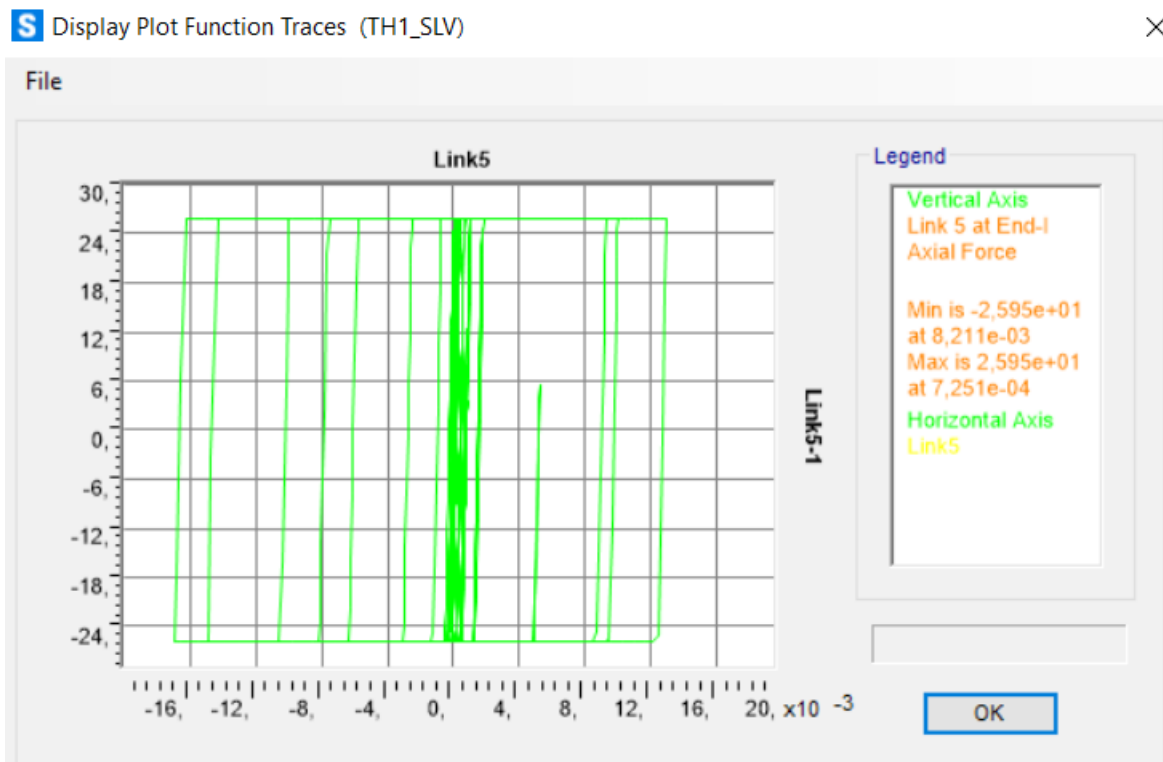


Figura 431. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

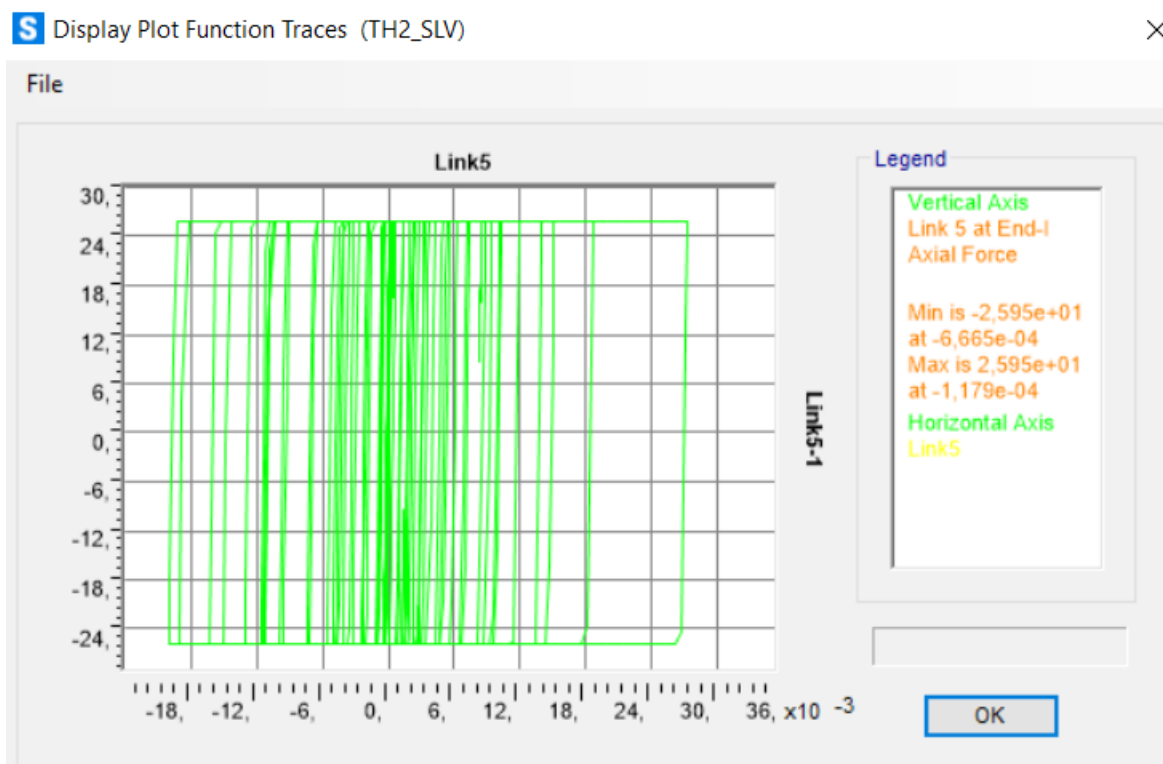


Figura 432. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

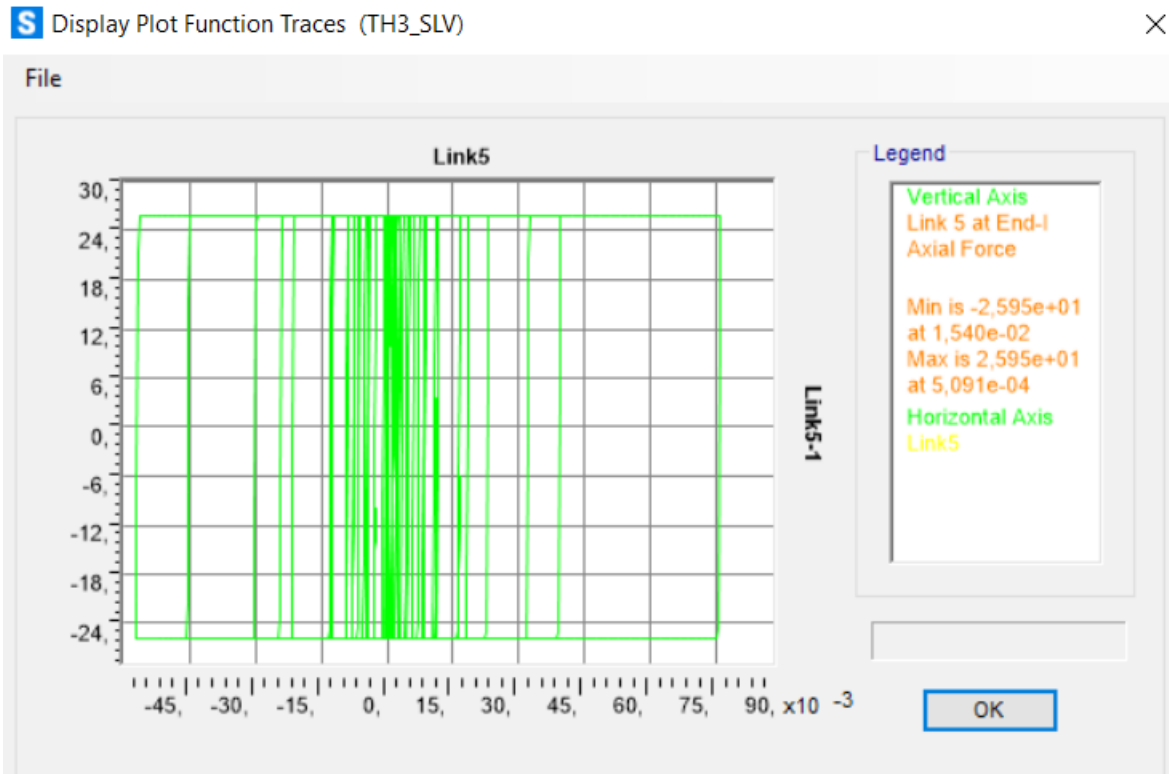


Figura 433. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

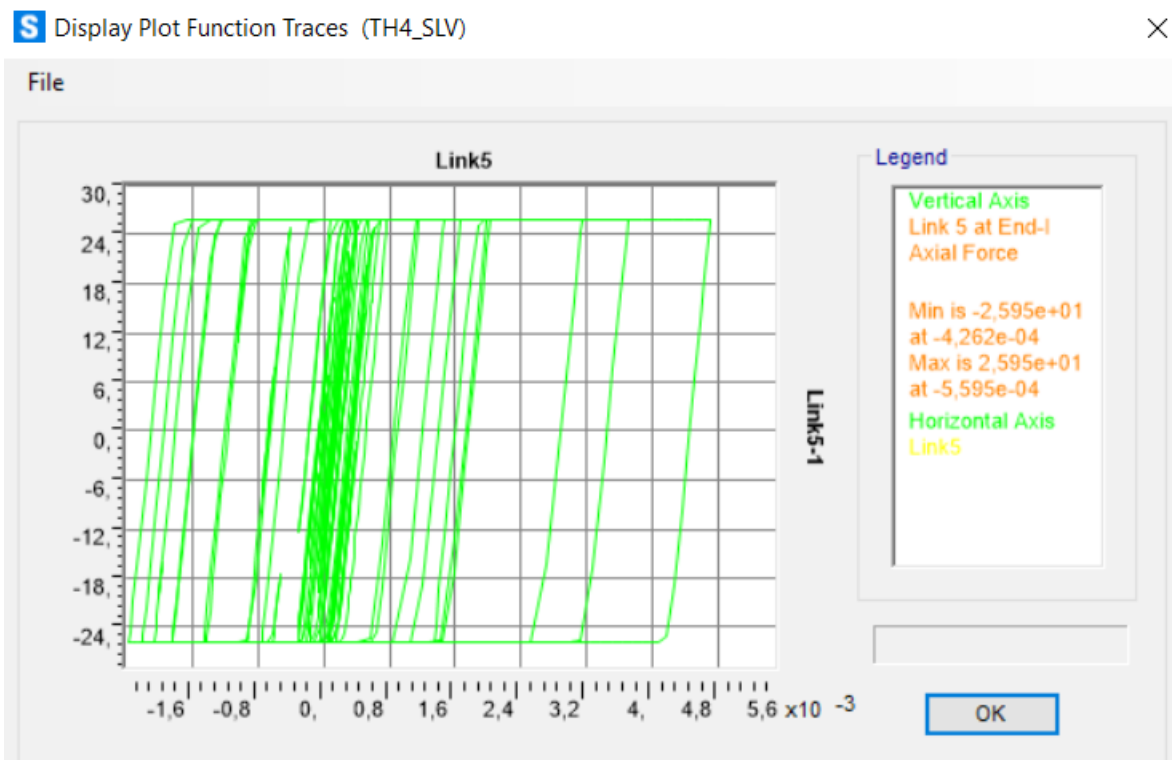


Figura 434. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

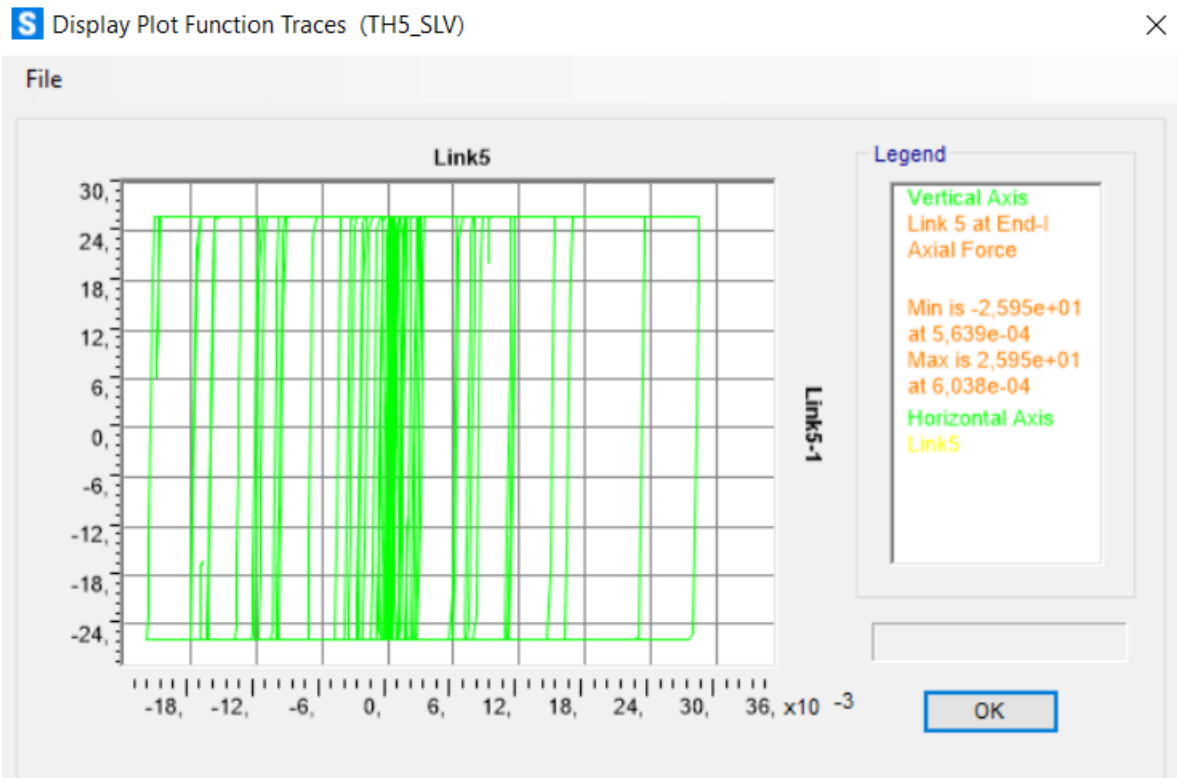


Figura 435. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

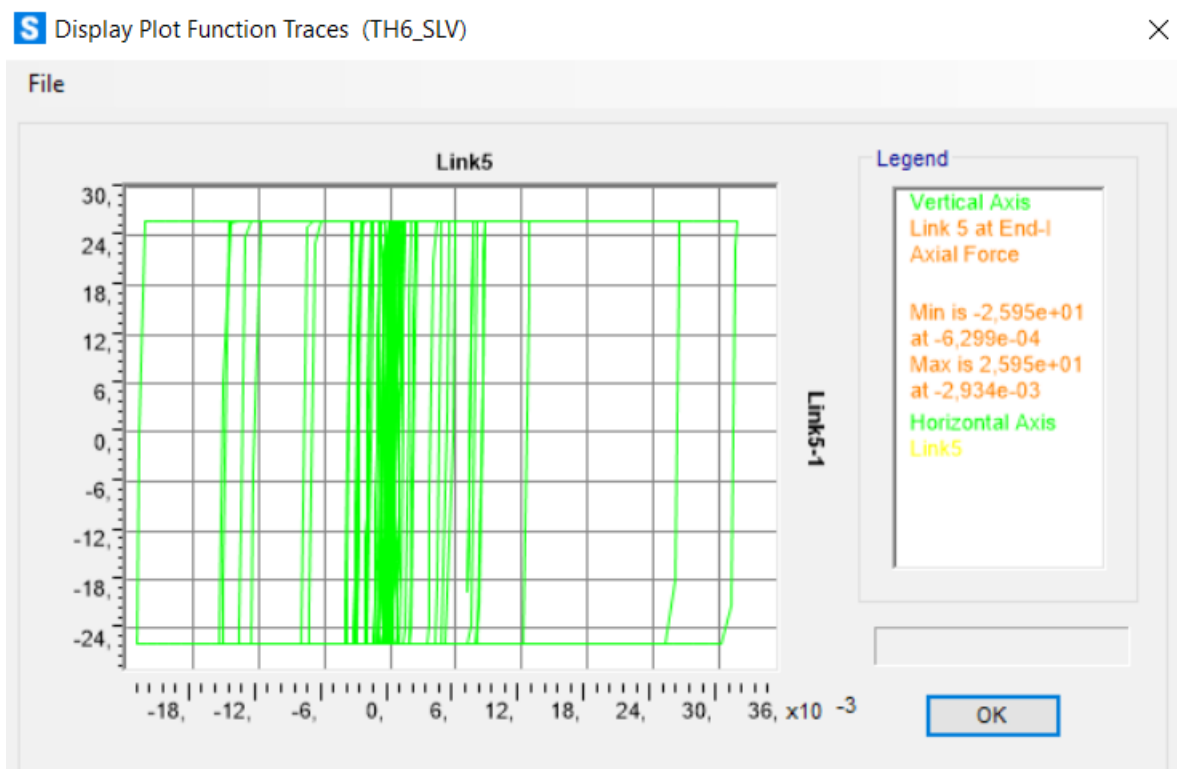


Figura 436. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

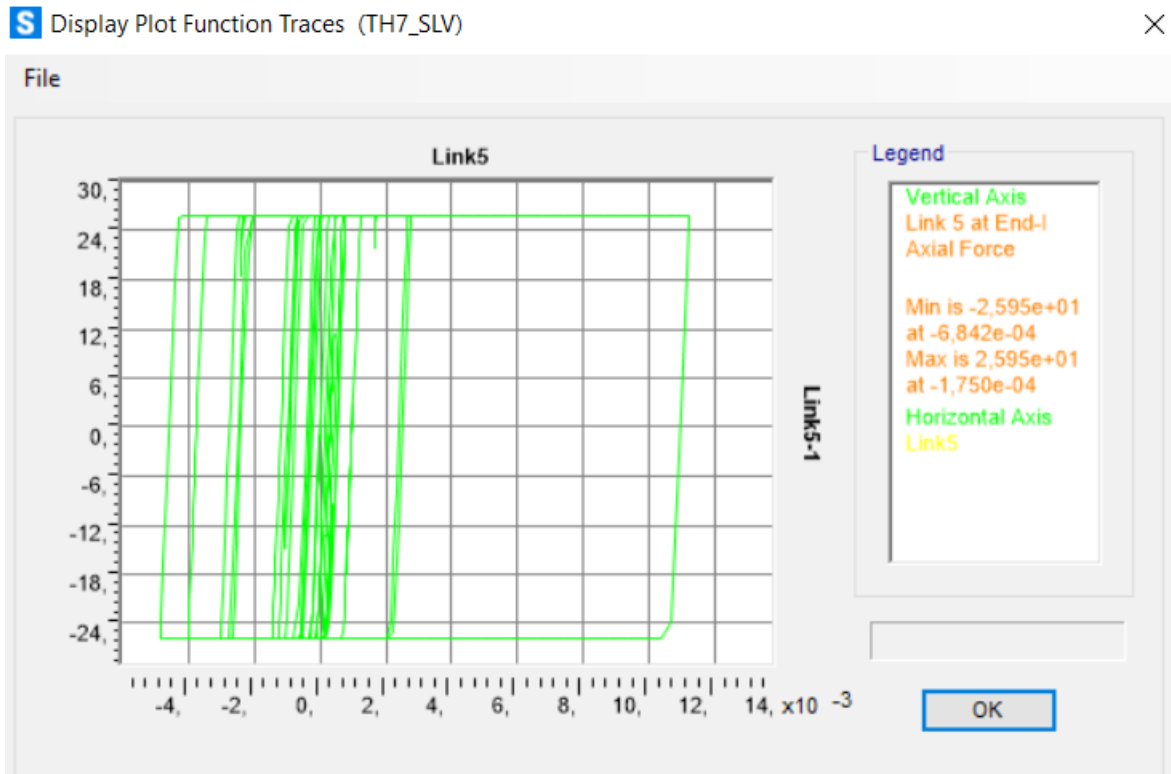


Figura 437. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

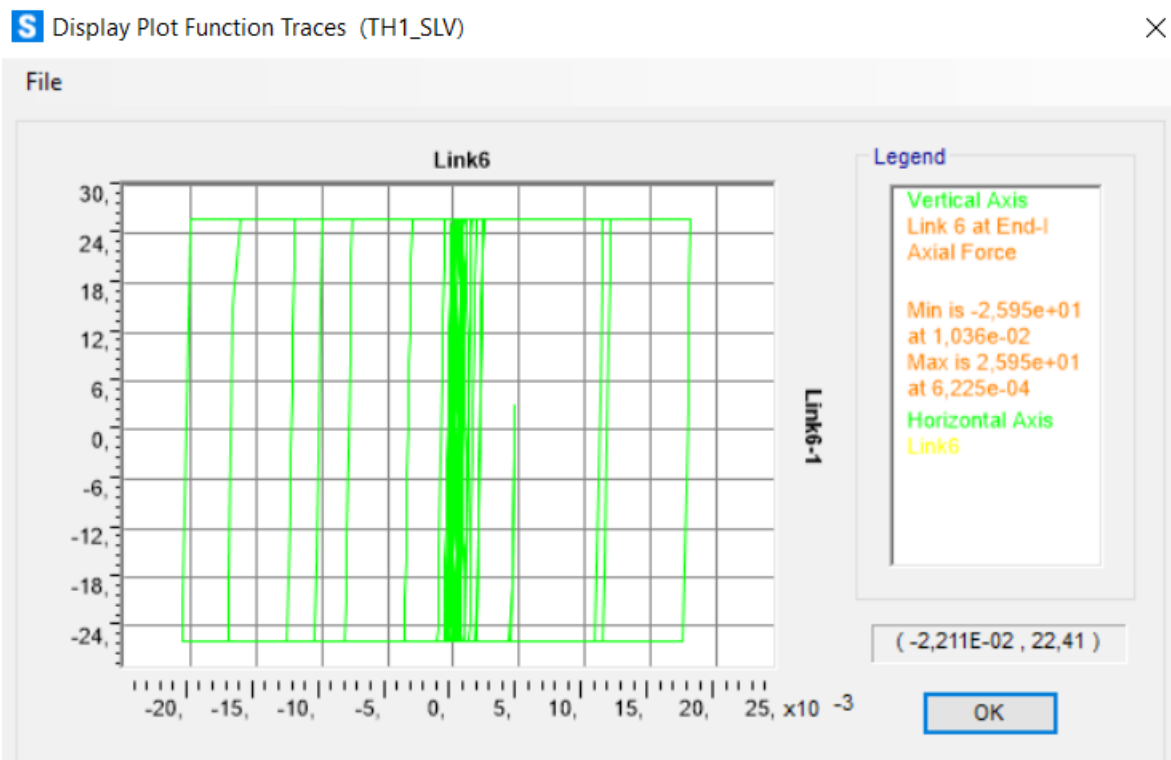


Figura 438. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

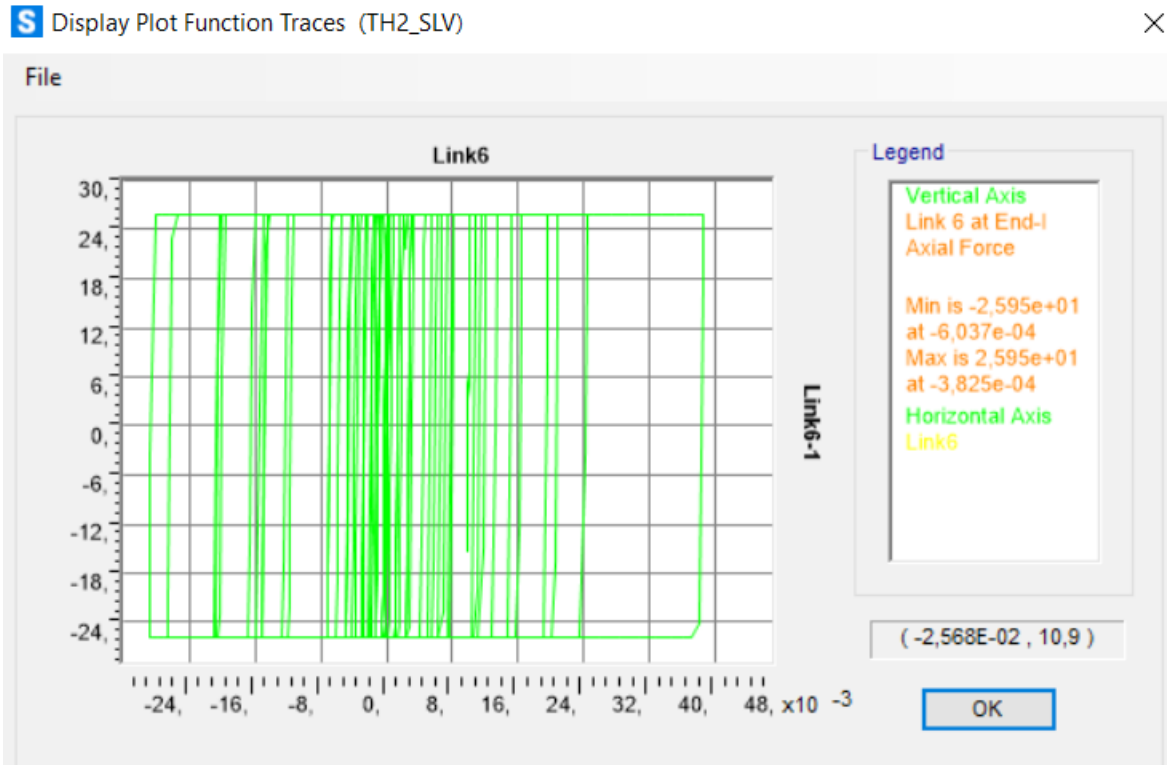


Figura 439. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

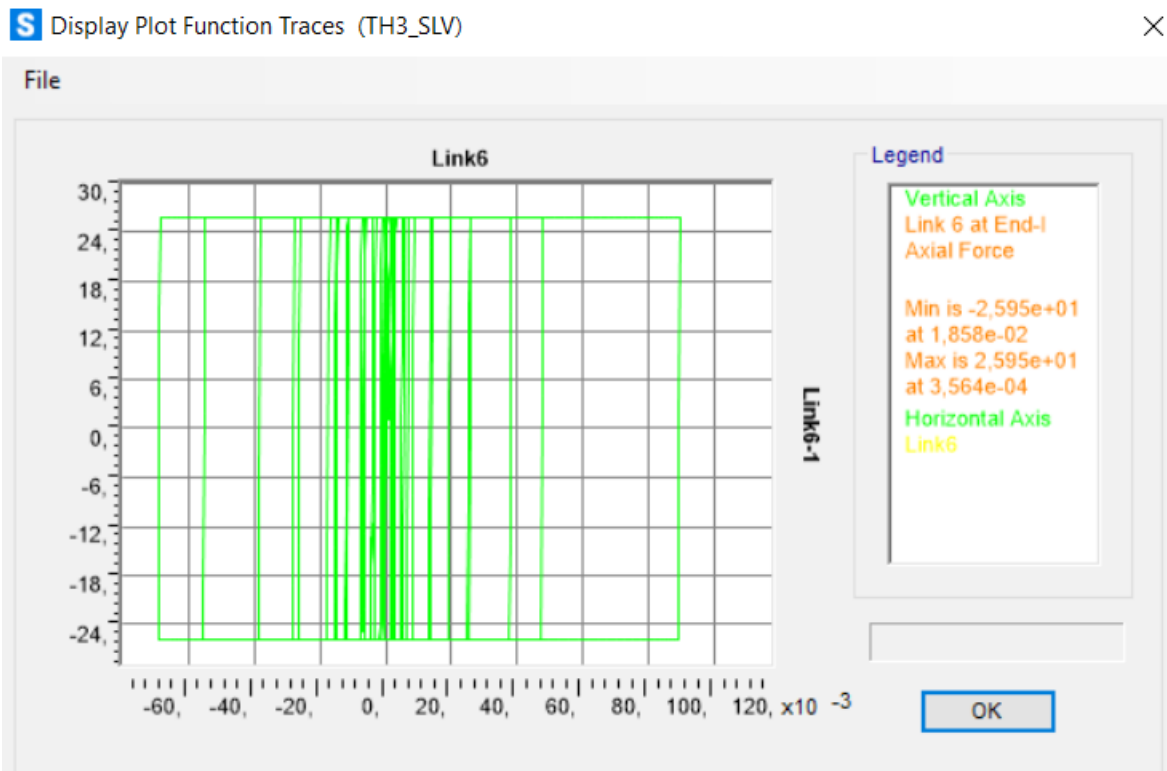


Figura 440. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

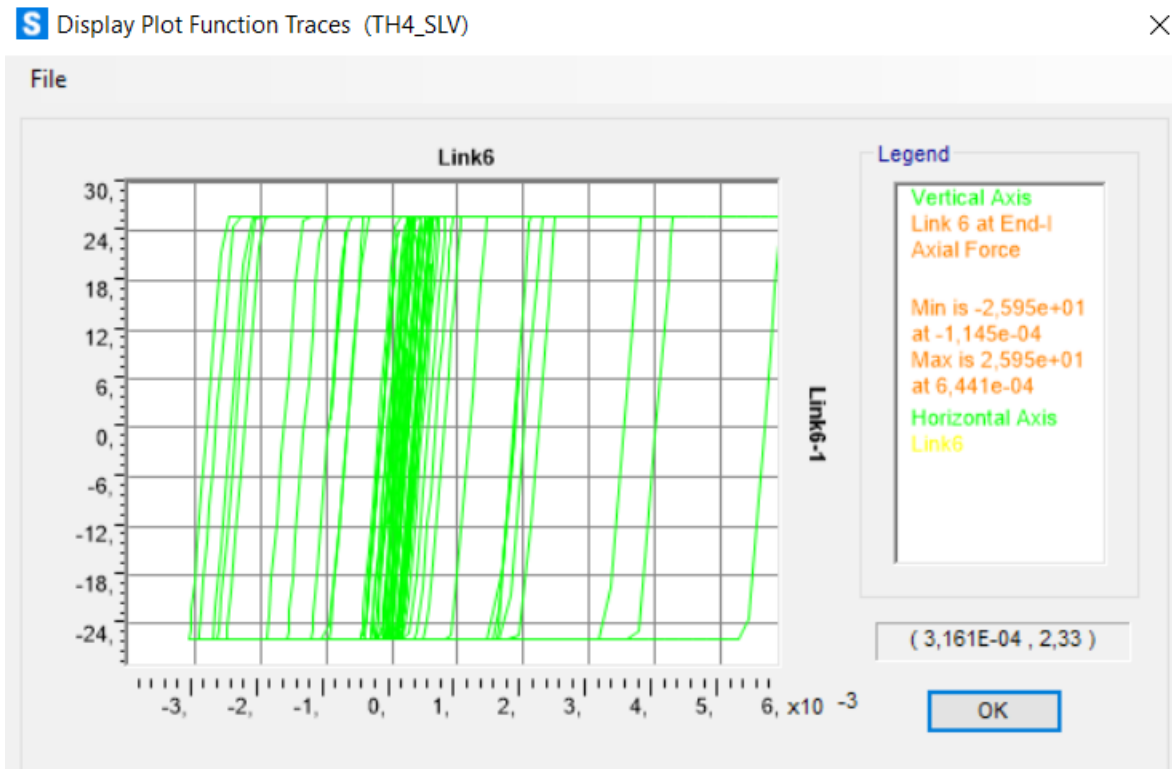


Figura 441. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

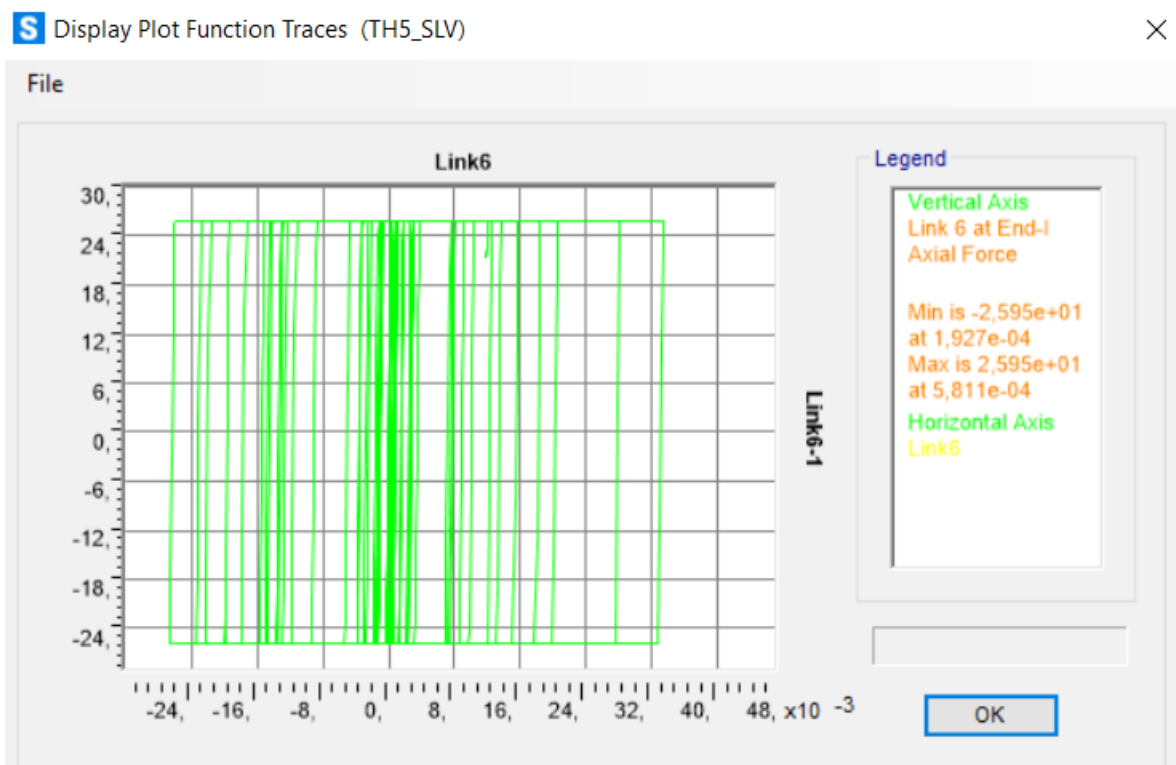


Figura 442. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

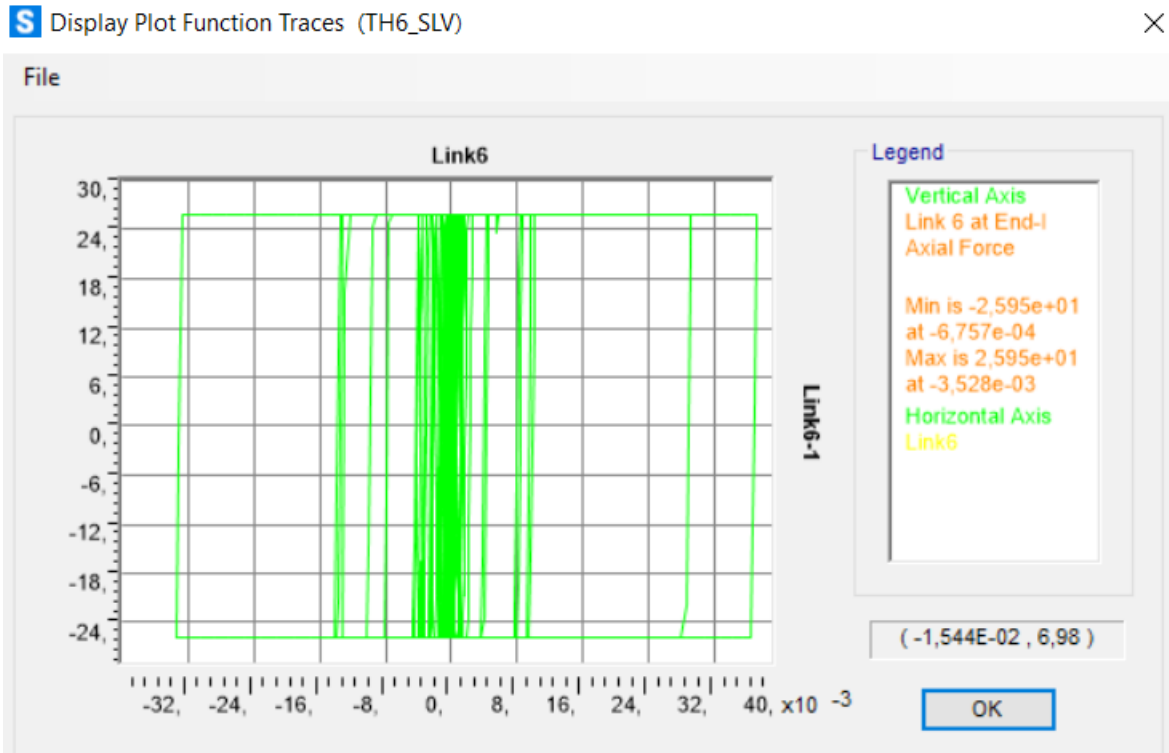


Figura 443. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

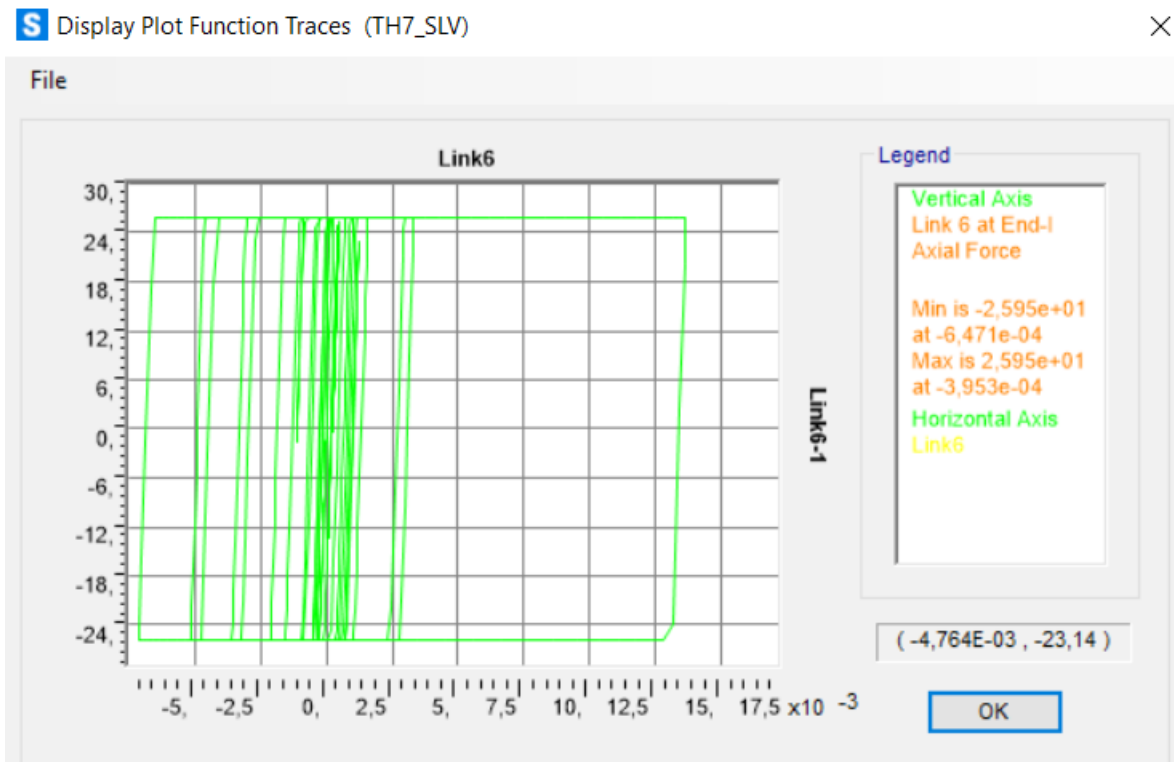


Figura 444. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Infine si procede con lo studio del quarto ed ultimo modello con i dissipatori viscosi equivalenti ai dissipatori magnetoreologici alimentati, per valutare gli effettivi benefici nell'utilizzare il sistema di controllo strutturale semi-attivo realizzato con i dissipatori magnetoreologici rispetto ai classici sistemi di controllo strutturale passivi realizzati con i dissipatori viscosi.

I dissipatori viscosi equivalenti verranno modellati al Sap 2000 analogamente al caso del modello con i dissipatori magnetoreologici non alimentati con l'unica differenza di inserire differenti costanti di dissipazione, rispettivamente calcolate in precedenza nella progettazione preliminare dei dissipatori sismici facendo in modo che la struttura rimanga in campo elastico ovvero il campo delle deformazioni reversibili.

Le tabelle finali inerenti alle costanti di dissipazione definitive (da inserire nel programma di calcolo agli elementi finiti) sono le seguenti:

Parametri di progetto					
Direzione x					
N° piano	T1	ξ tot	η	c/2	Fdj/2
(-)	(s)	(%)	(-)	(kN/m*s)	(kN)
3	1,355	28	0,5505	306,17	64,58
4	1,355	28	0,5505	306,17	84,19
5	1,355	28	0,5505	306,17	103,12
			$\geq 0,55$		

Parametri di progetto					
Direzione y					
N° piano	T2	ξ tot	η	c/2	Fdj/2
(-)	(s)	(%)	(-)	(kN/m*s)	(kN)
3	1,227	28	0,5505	338,39	70,27
4	1,227	28	0,5505	338,39	91,45
5	1,227	28	0,5505	338,39	110,26
			$\geq 0,55$		

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Si espongono le immagini relative alla modellazione dei dissipatori viscosi equivalenti per una maggior chiarezza:

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Linear

Property Name: Dissipatore viscoso equivalente in x

Property Notes: Modify/Show...

P-Delta Parameters

Shear Couple

Equal End Moments

Advanced

Modify/Show

Total Mass and Weight

Mass: 0,

Weight: 0,

Rotational Inertia 1: 0,

Rotational Inertia 2: 0,

Rotational Inertia 3: 0,

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1,

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1,

Directional Properties

Direction	Fixed	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for All...	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Fix All

Clear All

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases:

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping:

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor: 1,

OK

Cancel

Figura 445. Immagine 1 del dissipatore viscoso in direzione x nel modello con dissipatori viscosi equivalenti.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Linear Link/Support Directional Properties ×

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0,					

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
306,17					

Shear Distance from End J

U2

U3

Units

KN, m, C

Figura 446. Immagine 2 del dissipatore viscoso in direzione x nel modello con dissipatori viscosi equivalenti.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

S Link/Support Property Data ×

Link/Support Type:

Property Name:

Property Notes:

P-Delta Parameters

Shear Couple

Equal End Moments

Advanced

Total Mass and Weight

Mass	<input type="text" value="0,"/>	Rotational Inertia 1	<input type="text" value="0,"/>
Weight	<input type="text" value="0,"/>	Rotational Inertia 2	<input type="text" value="0,"/>
		Rotational Inertia 3	<input type="text" value="0,"/>

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs

Directional Properties

Direction	Fixed	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for All..."/>	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>		
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>		

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor

Figura 447. Immagine 1 del dissipatore viscoso in direzione y nel modello con dissipatori viscosi equivalenti.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Linear Link/Support Directional Properties

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1: 0. U2: U3: R1: R2: R3:

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1: 338,39 U2: U3: R1: R2: R3:

Shear Distance from End J

U2: U3:

Units: KN, m, C

OK Cancel

Figura 448. Immagine 2 del dissipatore viscoso in direzione y nel modello con dissipatori viscosi equivalenti.

Definiti i linear link, si disegnano i dissipatori viscosi ai piani 3, 4, 5 dei due telai in x (telaio 5-6-7-8-9-10 e telaio 11-12-13-14-15-16) e dei due telai in y (telaio 17-12-6-1 e telaio 20-15-9-4) con il comando draw 2 joint link impostando per tutti gli elementi una lunghezza pari ad 1m, un'inclinazione orizzontale ($\alpha=0$) e correlandoli ai rispetti linear link creati in precedenza per ogni direzione di analisi. Inoltre per rendere la modellazione più ottimale, viene simulato il collegamento di incastro, nel nodo esterno del dissipatore, con la struttura reticolare in acciaio realizzata con profili HEA260 ed incastrata a terra, mediante la seguente procedura: assign > joint > restraints > selezionare il vincolo d'incastro.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Si mostra ora una foto relativa allo schema del dissipatore viscoso equivalente al Sap 2000:

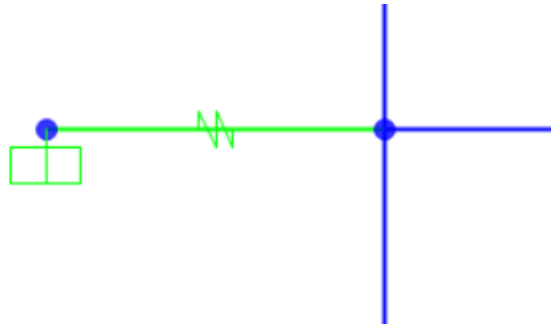


Figura 449. Schema del dissipatore viscoso equivalente al Sap 2000.

Dopo aver completato la modellazione si procede con l'analisi della struttura mediante il comando `analyze > run analysis > run now`.

Si espongono ora i risultati dell'analisi dinamica non lineare ottenuti come media dei massimi valori letti nei load cases definiti in precedenza (TH1_SLV, TH2_SLV, TH3_SLV, TH4_SLV, TH5_SLV, TH6_SLV, TH7_SLV) in termini di spostamenti di piano, accelerazioni relative e assolute di piano, velocità relative e assolute di piano, spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi forza-spostamento dei dissipatori viscosi equivalenti:

Spostamenti di piano:

N° piano	h piano	dx	dy	dr x	dr y	0,5% h piano
(-)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	3,35	0,0125	0,0109	0,0125	0,0109	0,0168
2	3,35	0,0277	0,0238	0,0153	0,0128	0,0168
3	3,35	0,0417	0,0371	0,0140	0,0133	0,0168
4	3,05	0,0558	0,0492	0,0141	0,0120	0,0153
5	3,05	0,0714	0,0607	0,0155	0,0115	0,0153
6	3,05	0,0837	0,0697	0,0123	0,0091	0,0153

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

N° piano (-)	dr x (m)	dr y (m)	0,5%	Verifica	Verifica	Rapporto	Rapporto
			h piano (m)	x (-)	y (-)	dr x (%)	dr y (%)
1	0,0125	0,0109	0,0168	Ok	Ok	0,37	0,33
2	0,0153	0,0128	0,0168	Ok	Ok	0,46	0,38
3	0,0140	0,0133	0,0168	Ok	Ok	0,42	0,40
4	0,0141	0,0120	0,0153	Ok	Ok	0,46	0,40
5	0,0155	0,0115	0,0153	Ok	Ok	0,50	0,38
6	0,0123	0,0091	0,0153	Ok	Ok	0,40	0,30

Dai risultati ottenuti si evidenzia che la verifica è soddisfatta in tutti i piani. Detto questo, si evidenzia inoltre che, rispetto al modello con i dissipatori magnetoreologici alimentati, i rapporti dr_x e dr_y , espressi in percentuale, sono circa il doppio più grandi, dimostrando che il modello con i dissipatori magnetoreologici alimentati inseriti nel sistema di controllo strutturale semi-attivo, garantisce un livello di dissipazione e di sicurezza strutturale più elevato.

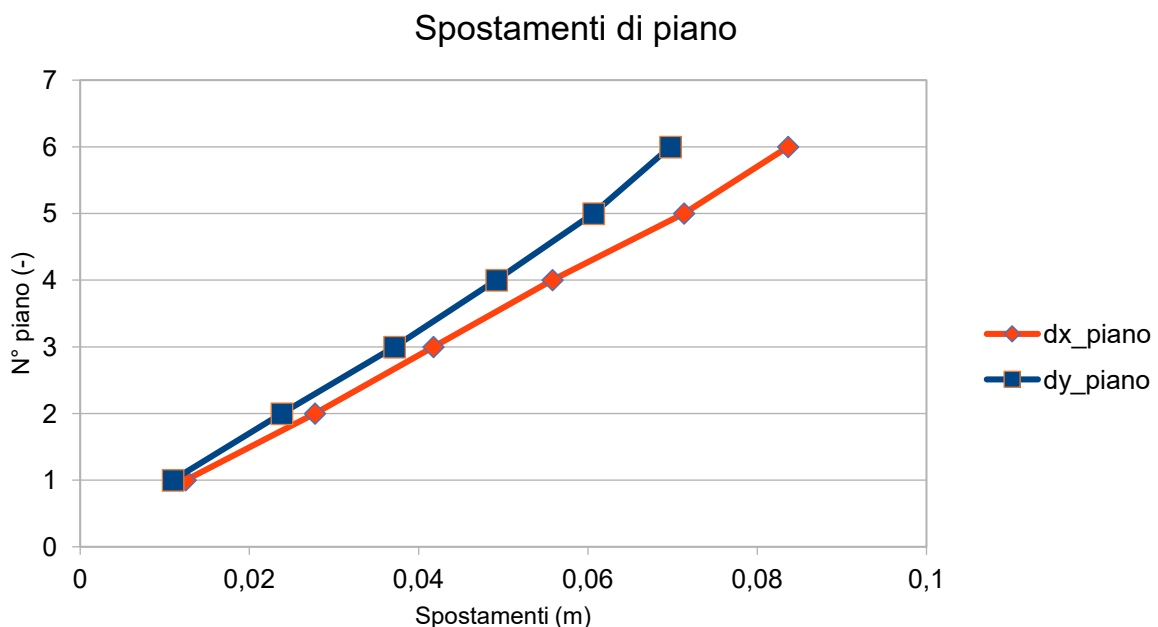


Figura 450. Spostamenti di piano del modello con dissipatori viscosi equivalenti.

Accelerazioni relative di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s ²)	U2y (m/s ²)
1	3,35	2,2121	1,8735
2	3,35	3,3935	3,0104
3	3,35	3,5869	3,3707
4	3,05	3,4974	3,2554
5	3,05	3,7112	3,1563
6	3,05	4,5157	4,0708

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

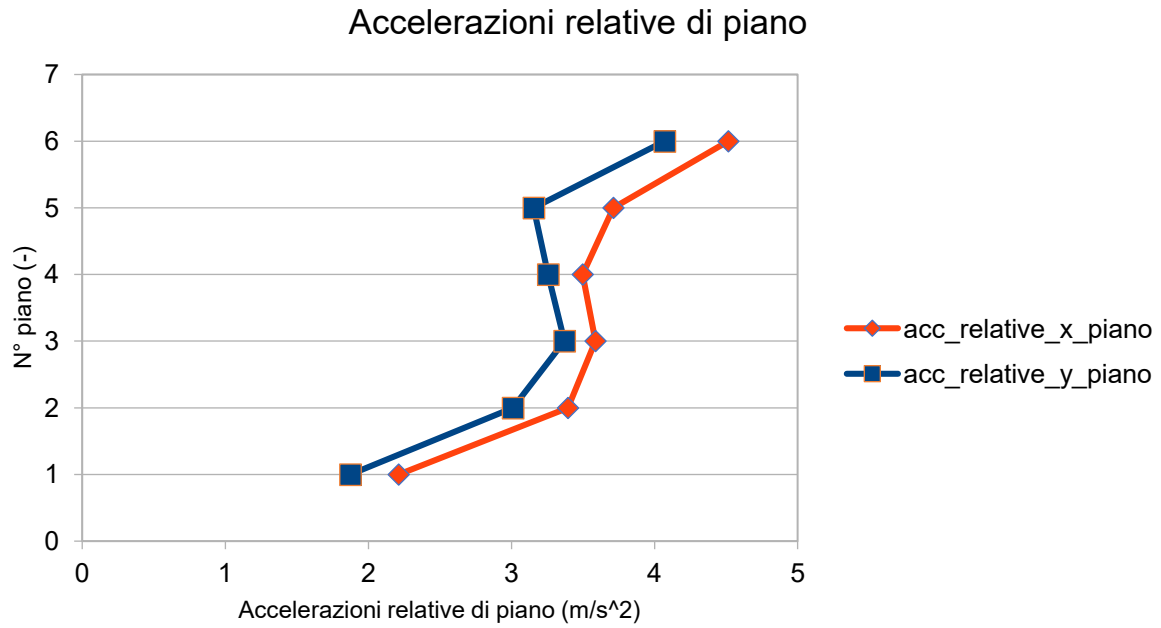


Figura 451. Accelerazioni relative di piano del modello con dissipatori viscosi equivalenti.

Accelerazioni assolute di piano:

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s ²)	(m/s ²)

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

1	3,35	2,0842	2,0314
2	3,35	2,4439	2,5581
3	3,35	2,2809	2,3915
4	3,05	1,9184	1,9965
5	3,05	2,1194	1,9341
6	3,05	3,3625	3,1259

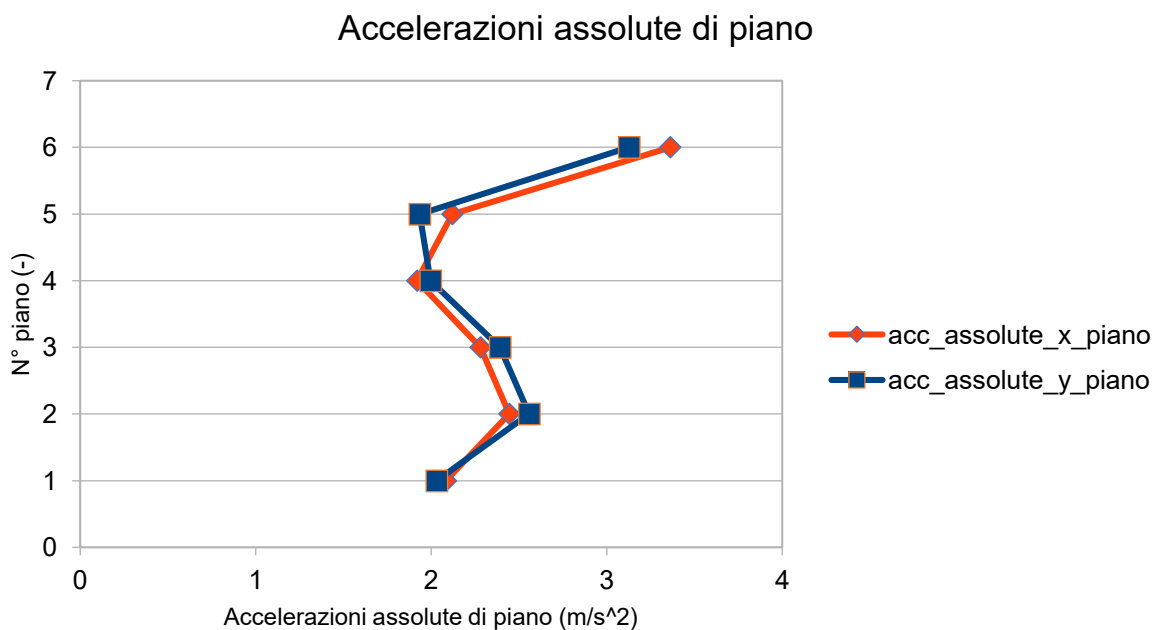


Figura 452. Accelerazioni assolute di piano del modello con dissipatori viscosi equivalenti.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Velocità relative di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s)	U2y (m/s)
1	3,35	0,1084	0,0972
2	3,35	0,2186	0,1904
3	3,35	0,2806	0,2497
4	3,05	0,3185	0,2921
5	3,05	0,3988	0,3544
6	3,05	0,5014	0,4274

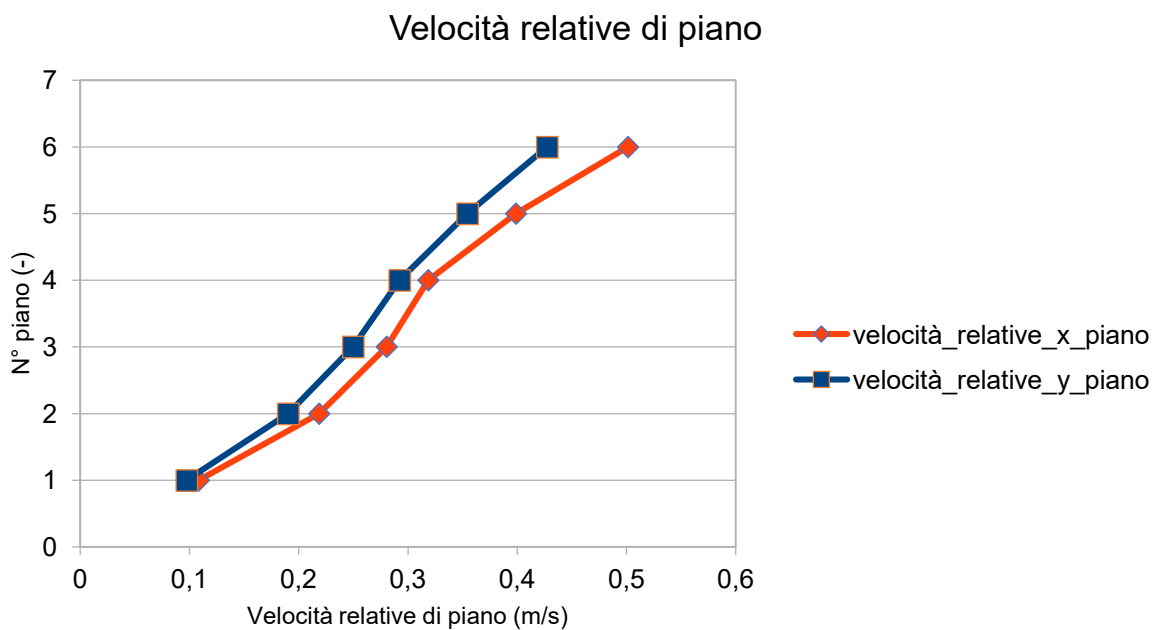


Figura 453. Velocità relative di piano del modello con dissipatori viscosi equivalenti.

Velocità assolute di piano:

N° piano (-)	h piano (m)	U1x (m/s)	U2y (m/s)
1	3,35	1,0921	1,2589
2	3,35	1,0979	1,2657
3	3,35	1,1033	1,2652
4	3,05	1,1124	1,2692
5	3,05	1,1252	1,2926
6	3,05	1,1445	1,3196

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

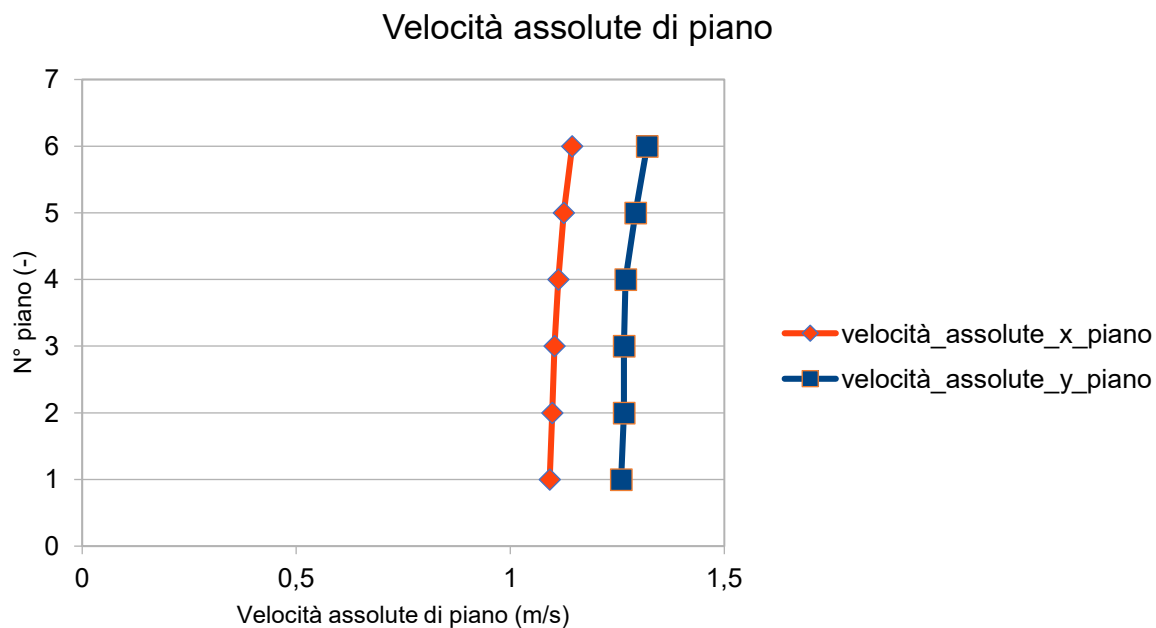


Figura 454. Velocità assolute di piano del modello con dissipatori viscosi equivalenti.

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori viscosi equivalenti del telaio 5-6-7-8-9-10 in direzione x:

Telaio 5-6-7-8-9-10 (direzione x)
 N°piano N° label U1x U2y

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

(-)	(-)	(m)	(m)
3	27	0,0407	0,0051
4	26	0,0546	0,0053
5	25	0,0695	0,0050

Telaio 5-6-7-8-9-10 (direzione x)

N° piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	27	81,94
4	26	94,94
5	25	120,38

Piano 3:

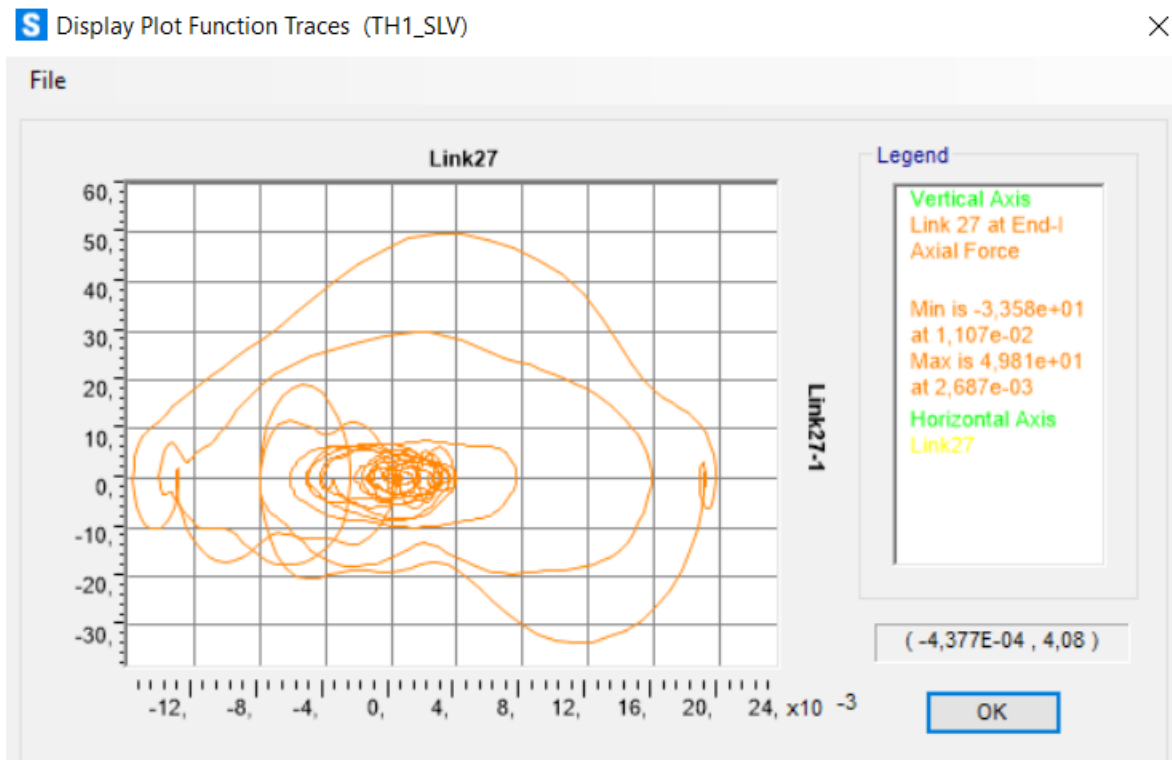


Figura 455. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

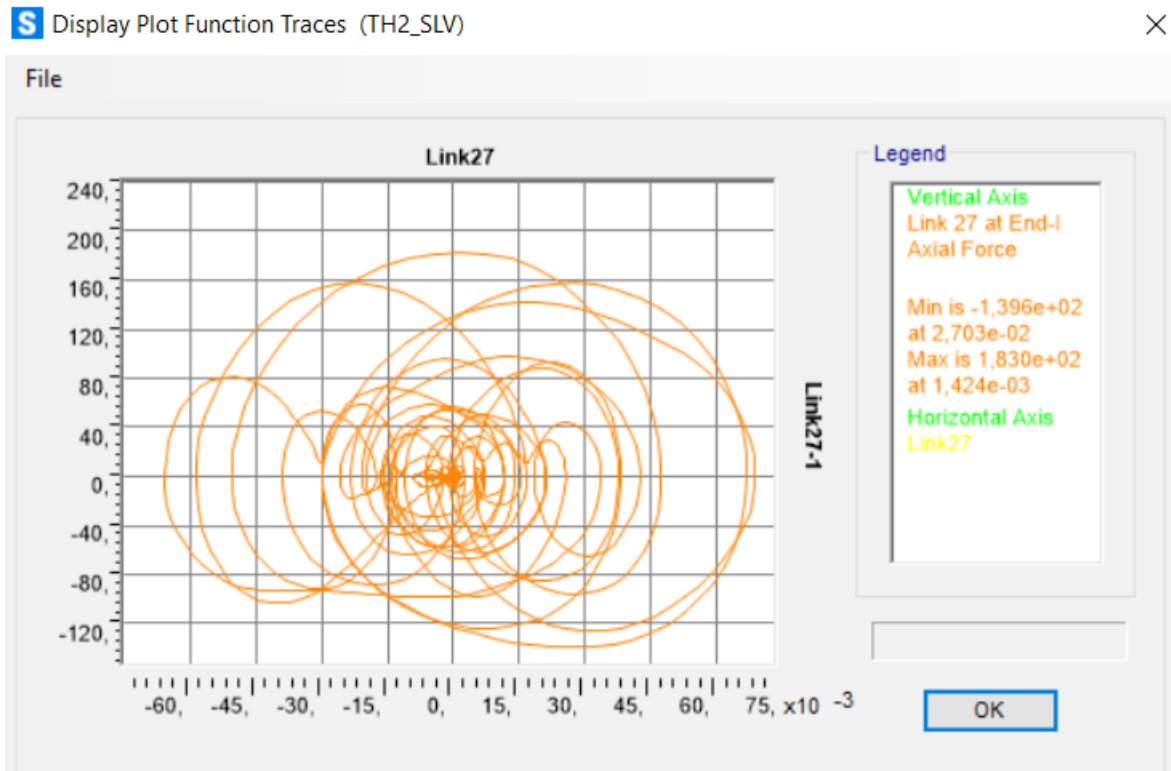


Figura 456. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

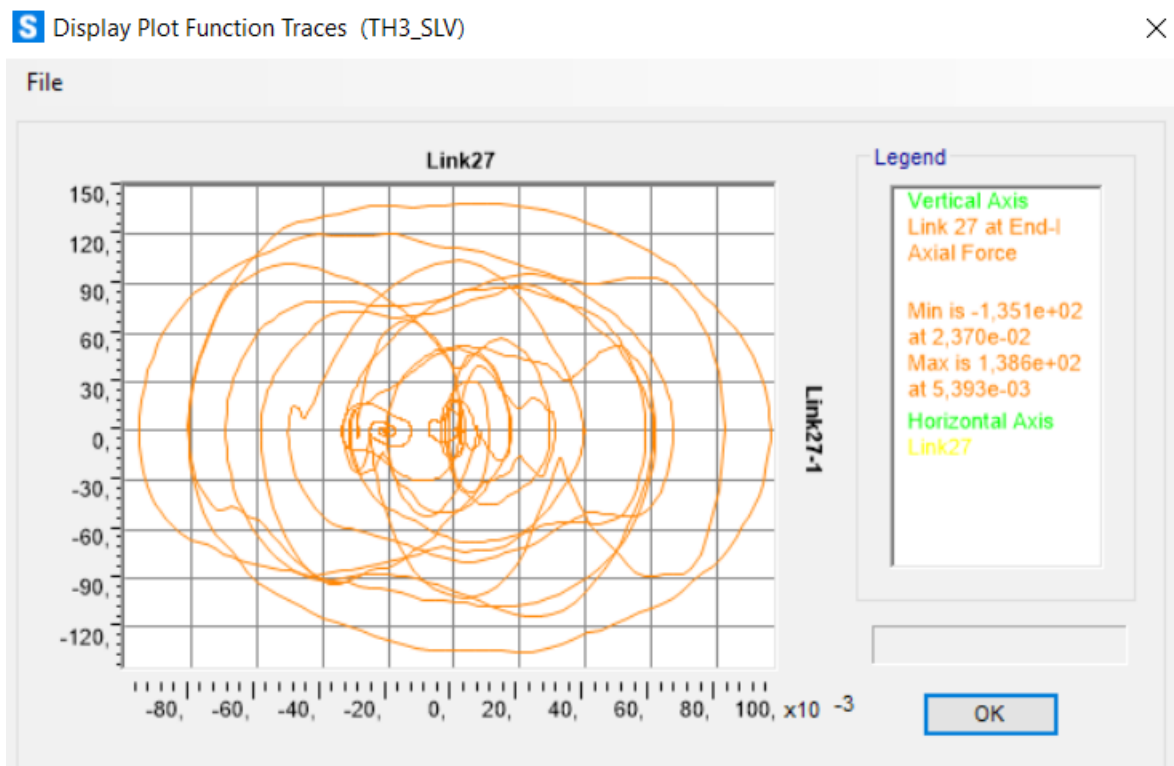


Figura 457. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

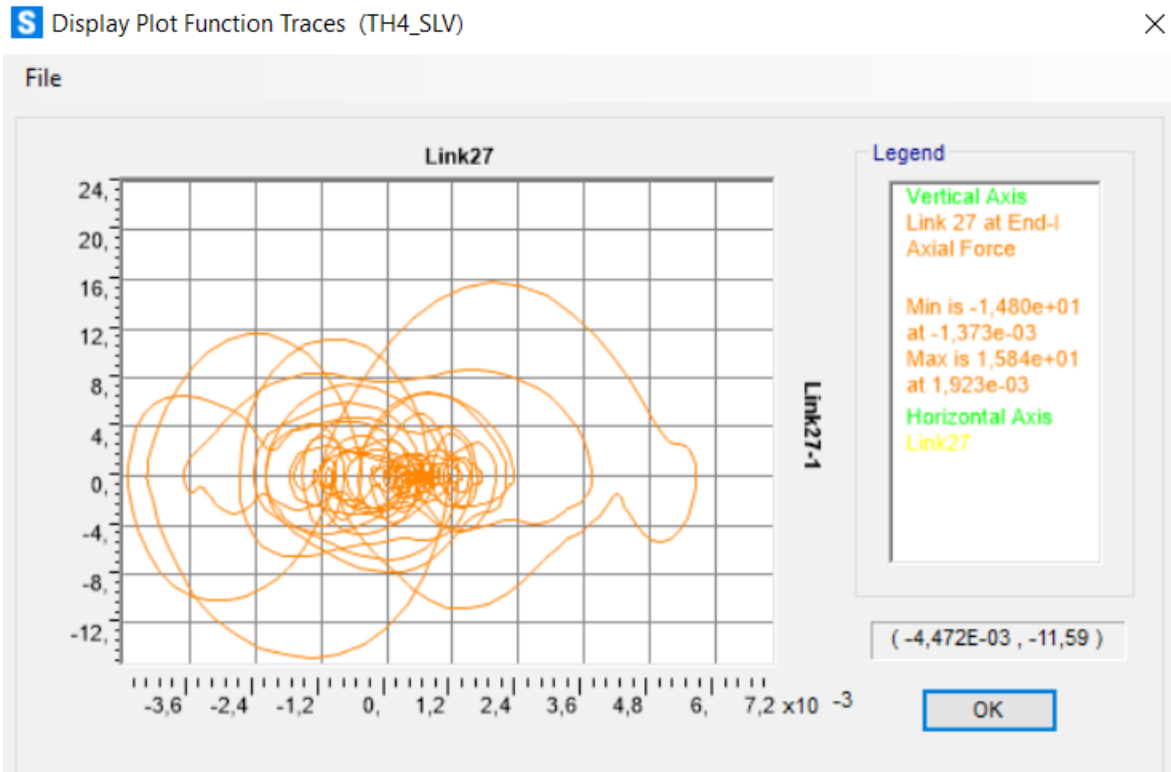


Figura 458. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

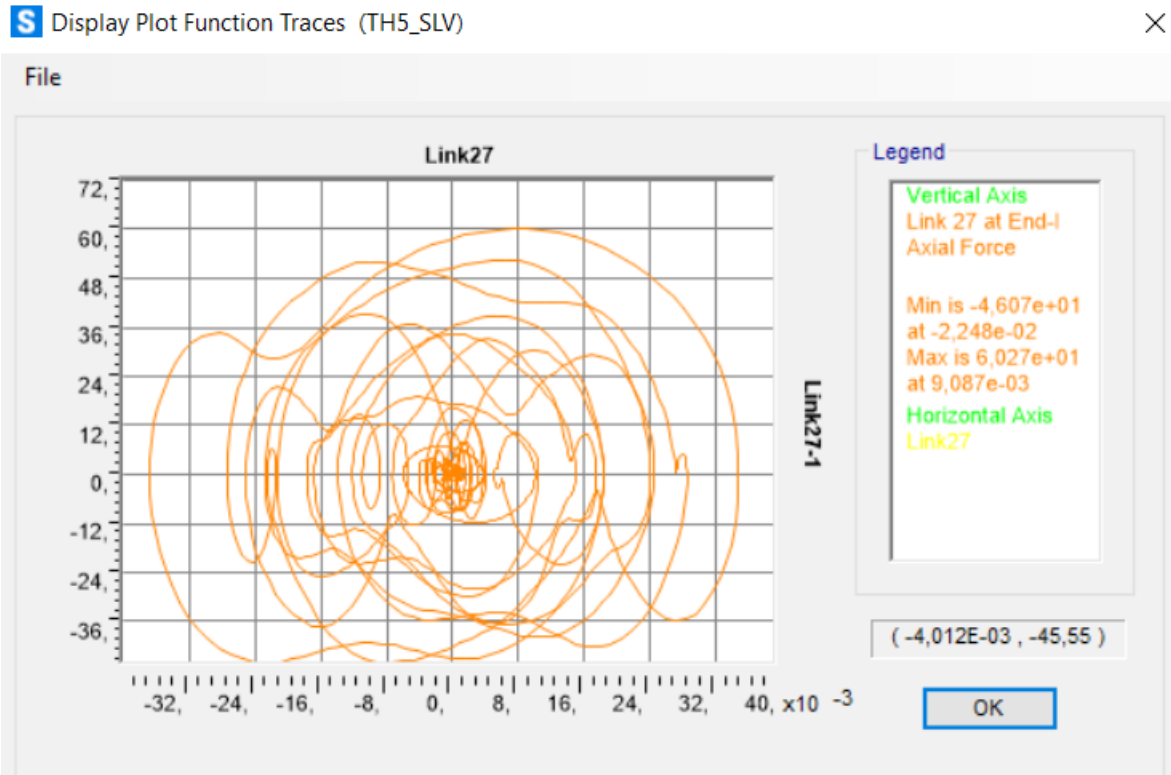


Figura 459. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

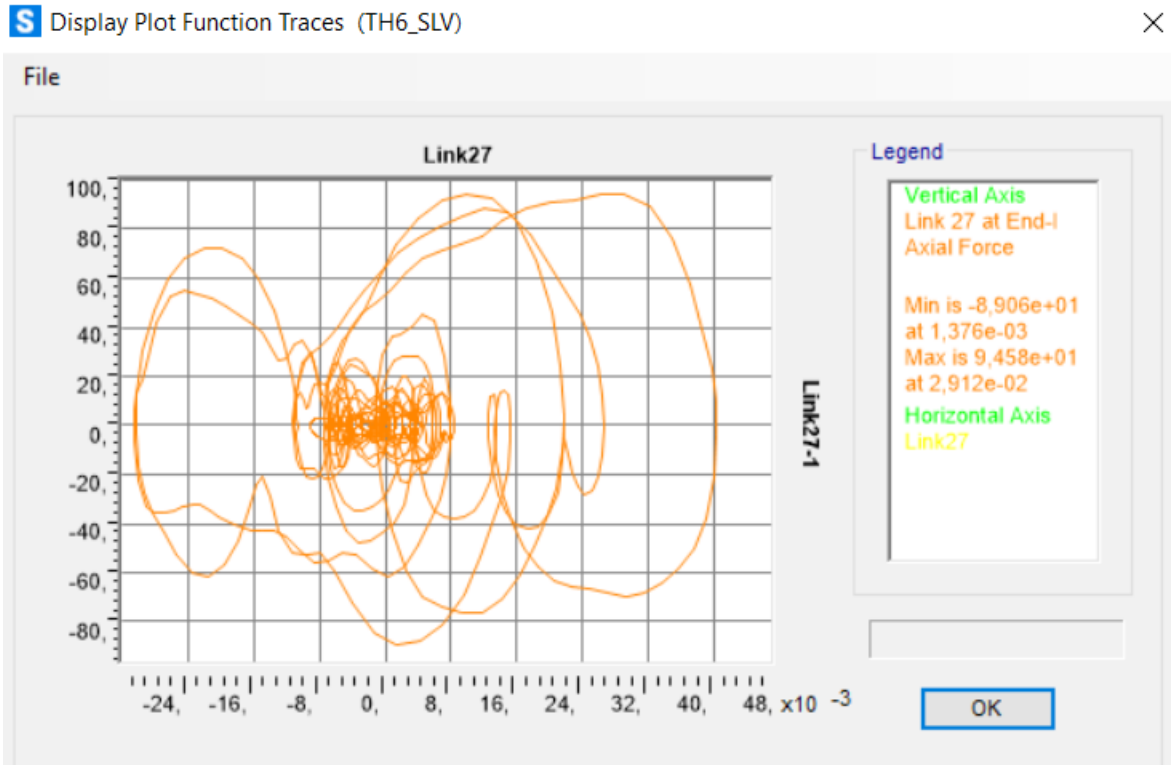


Figura 460. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

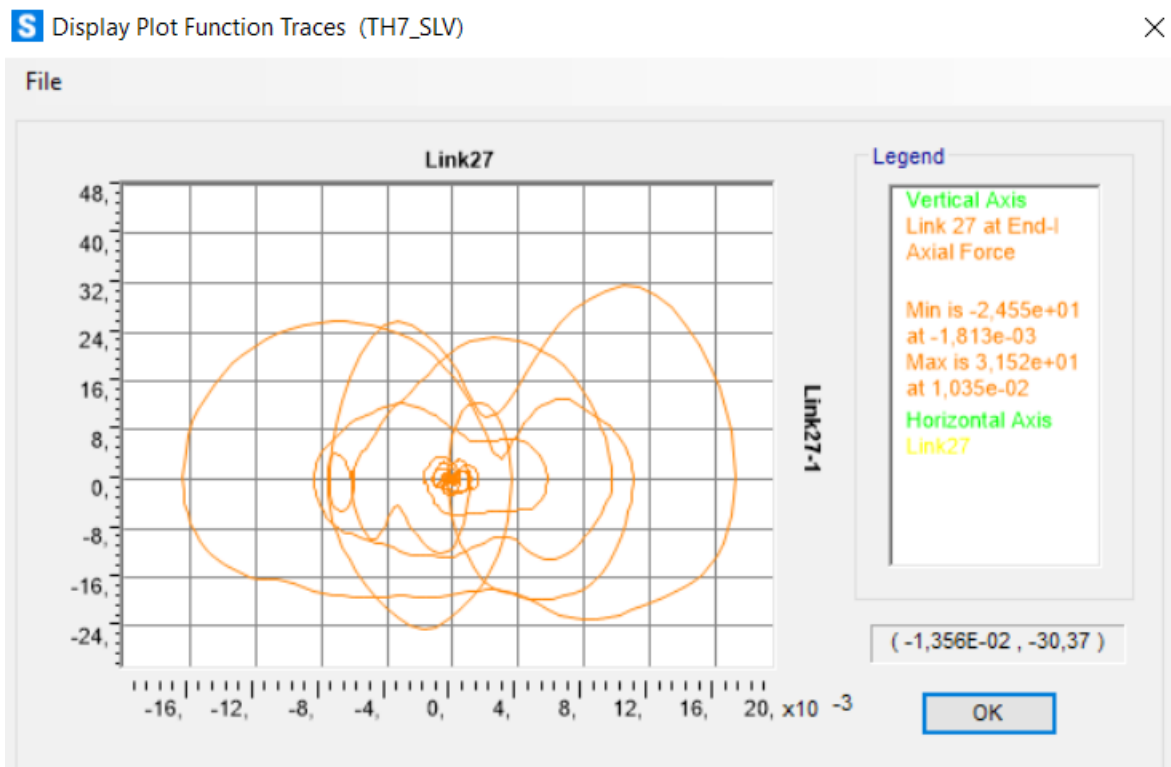


Figura 461. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

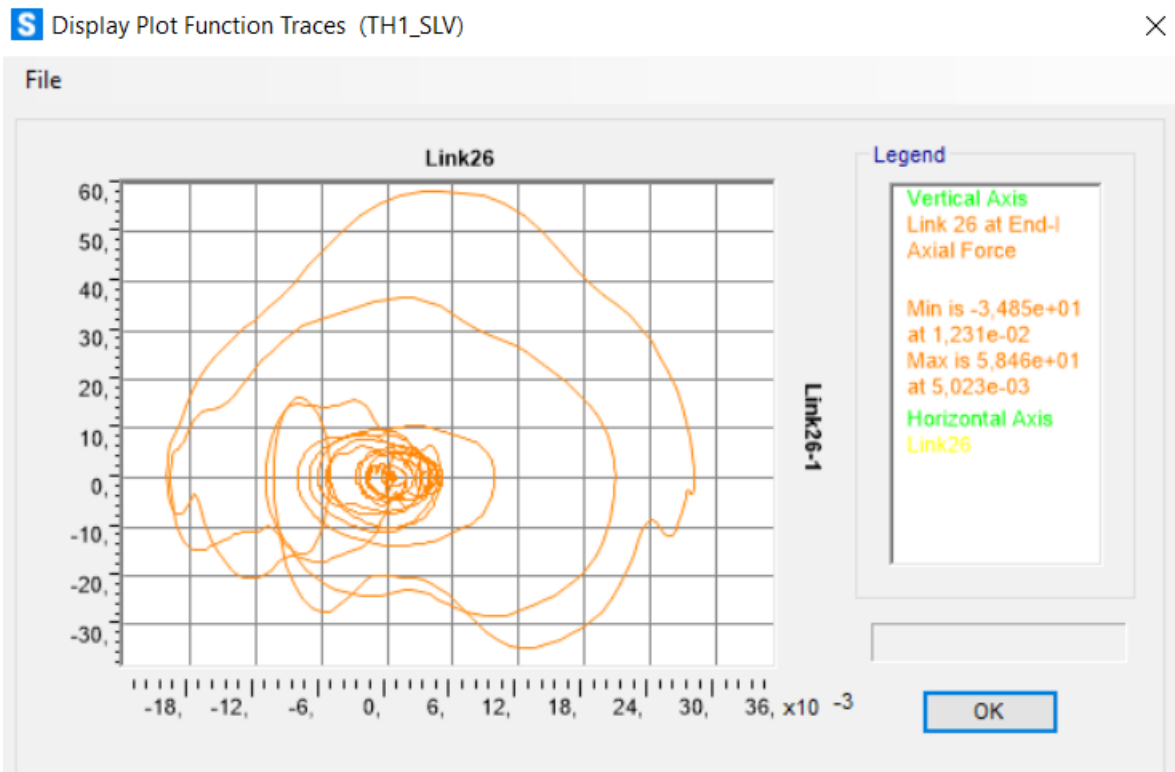


Figura 462. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

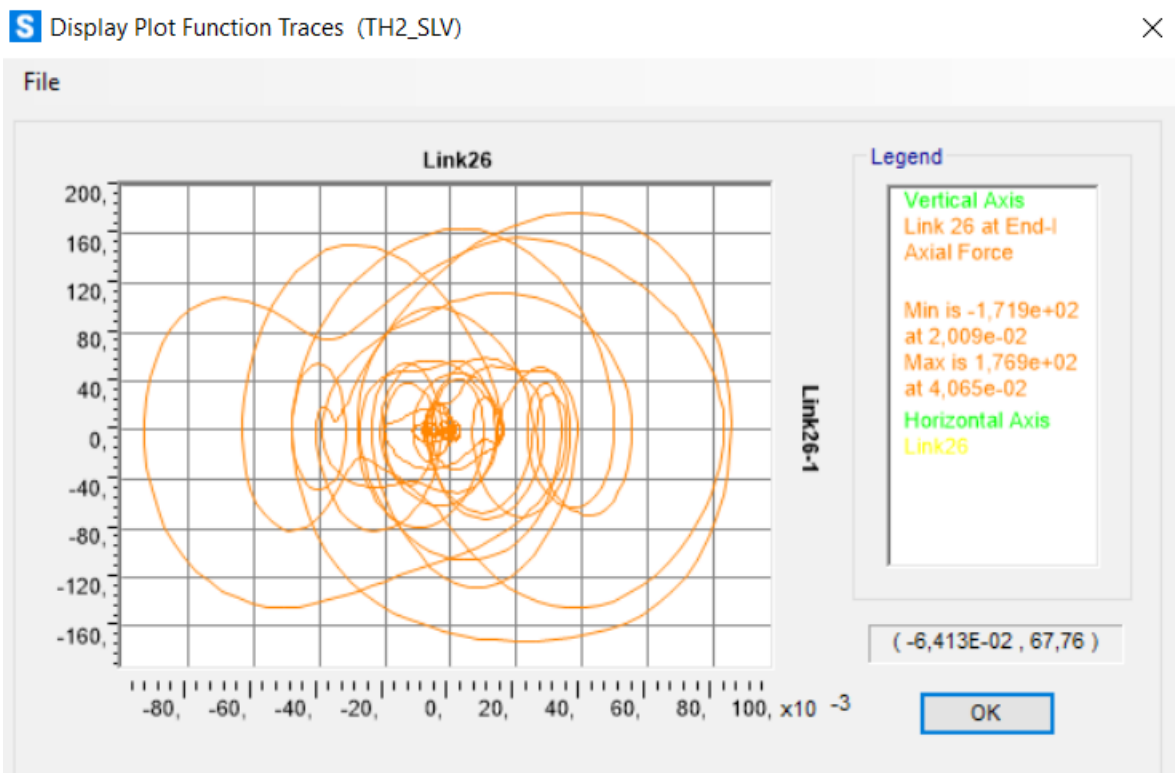


Figura 463. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

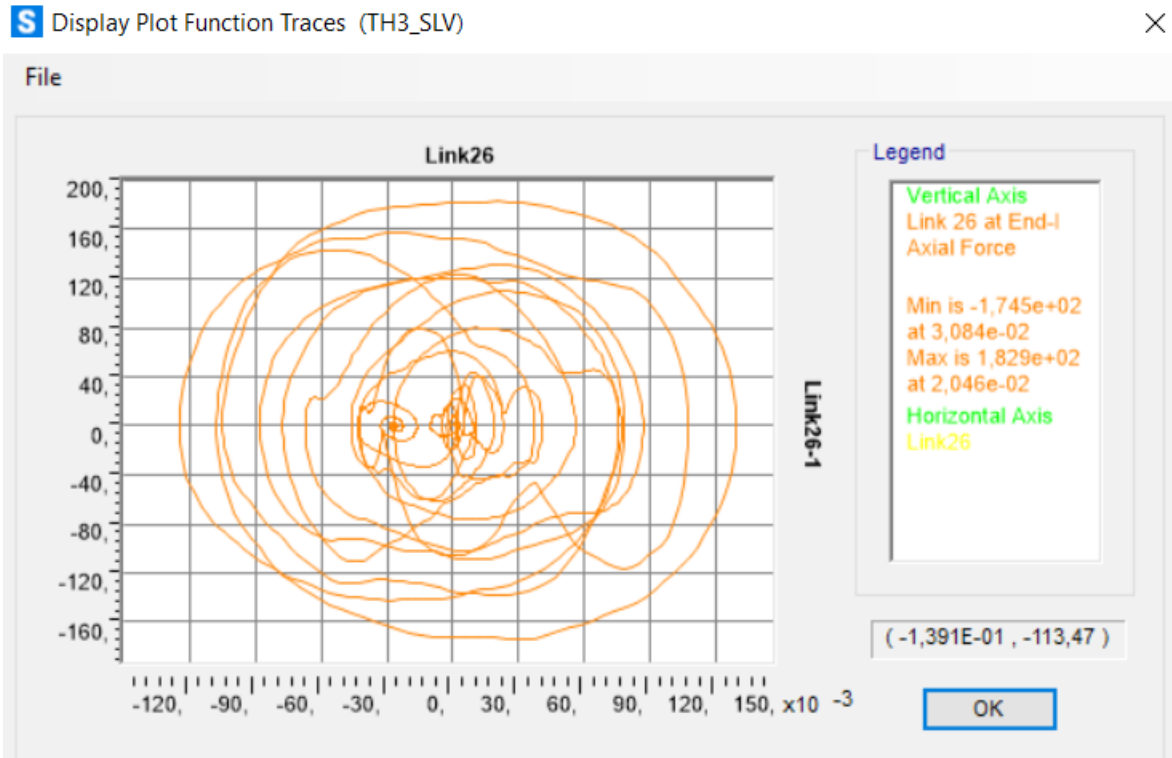


Figura 464. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

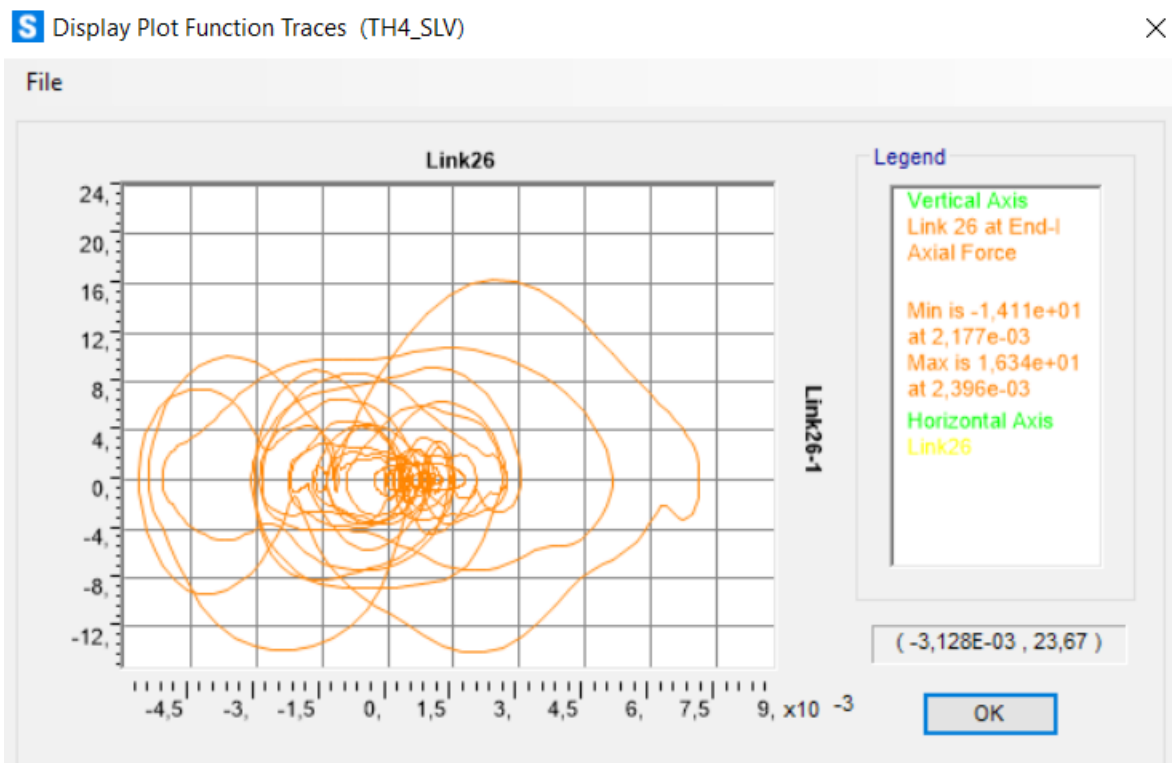


Figura 465. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

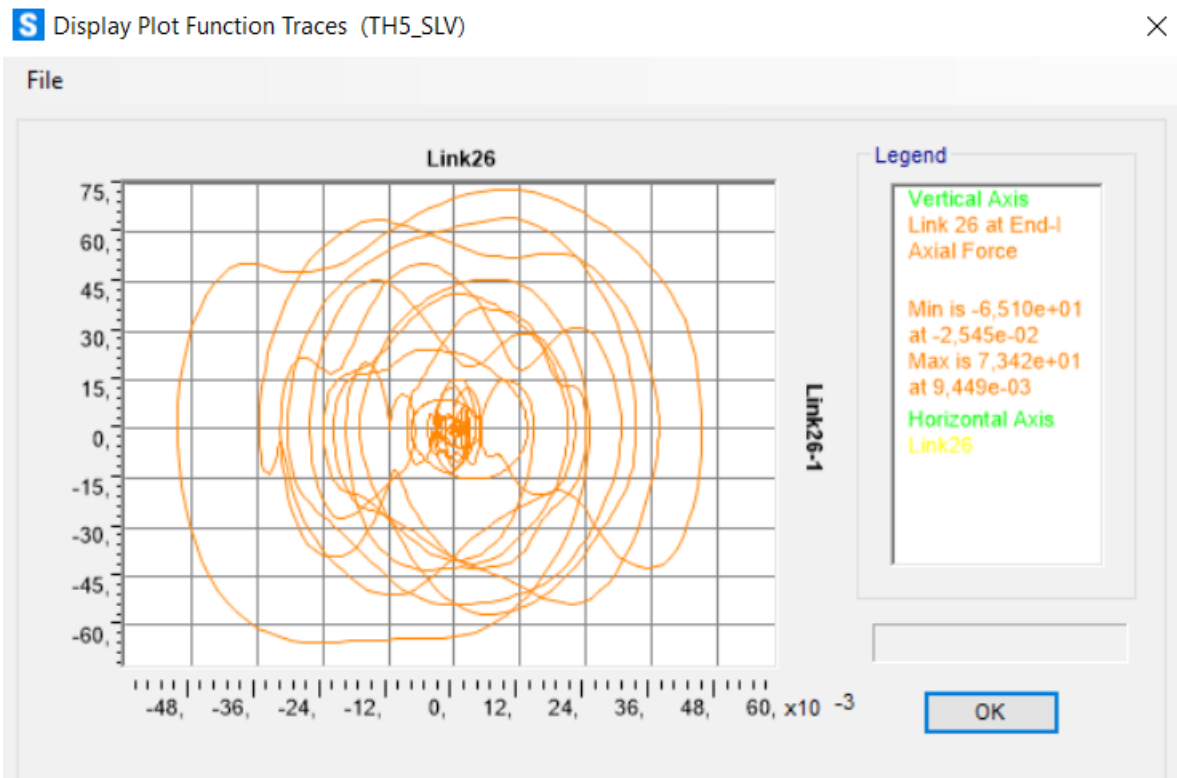


Figura 466. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

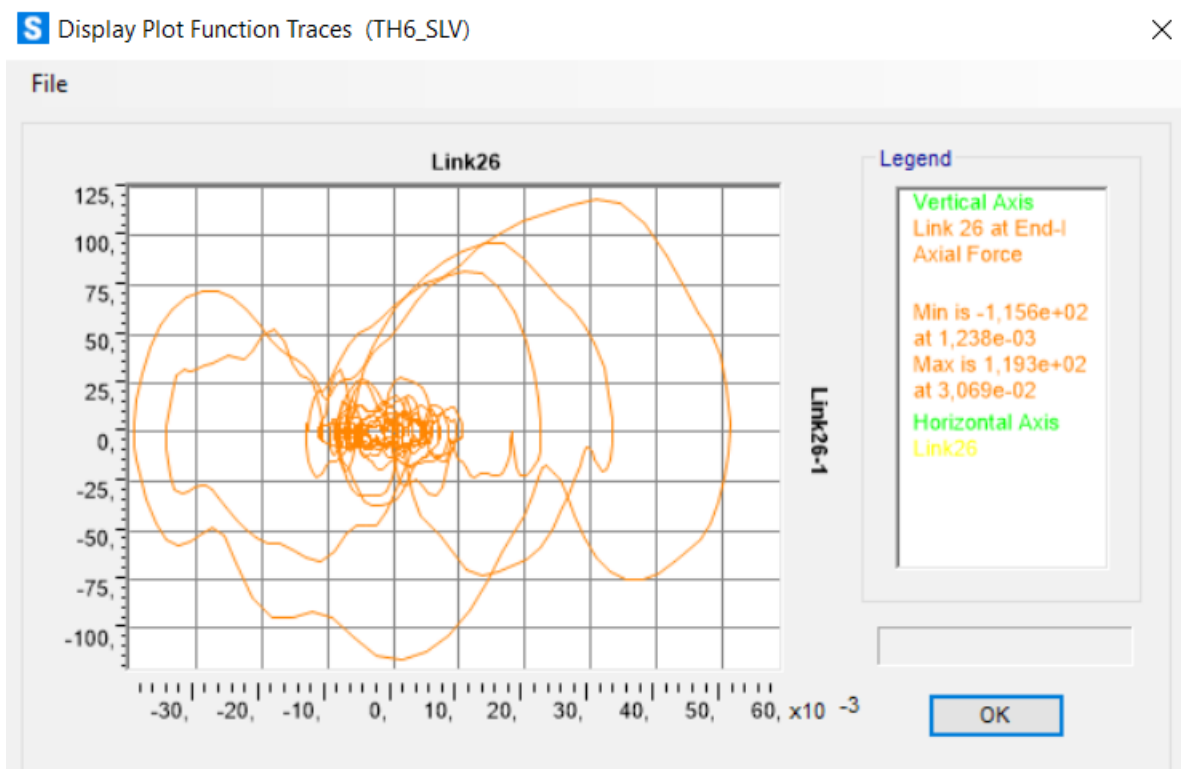


Figura 467. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

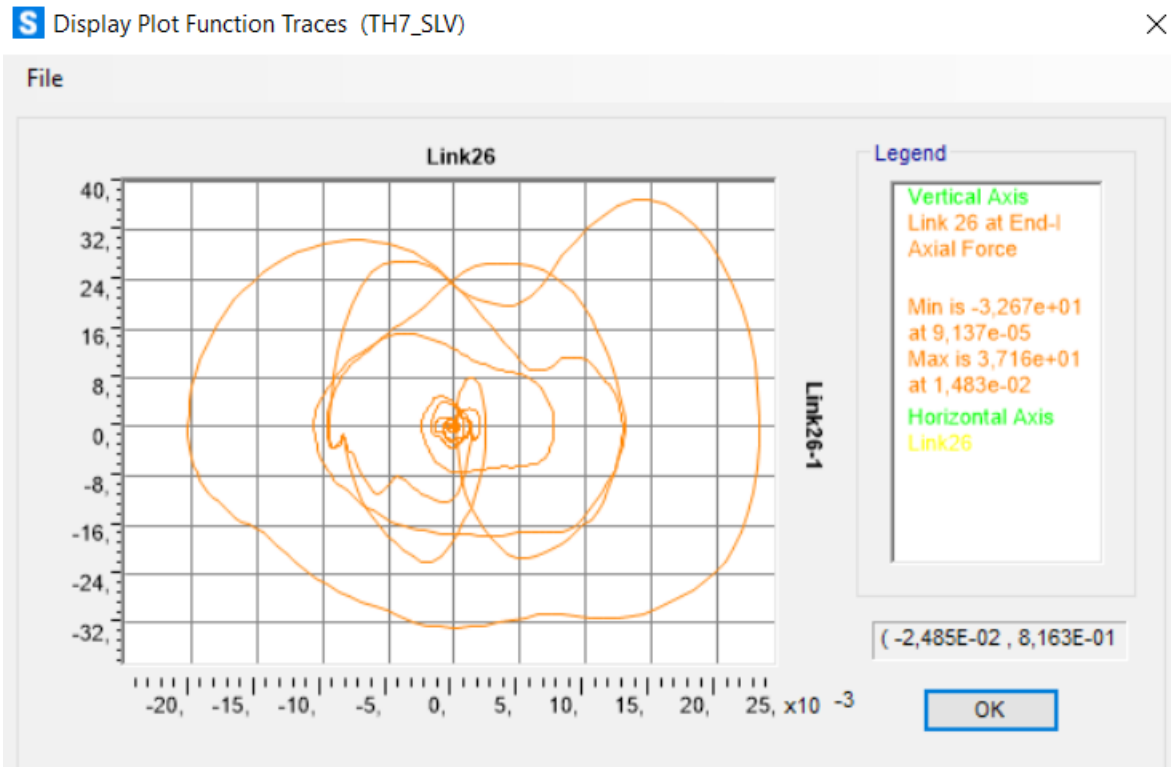


Figura 468. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

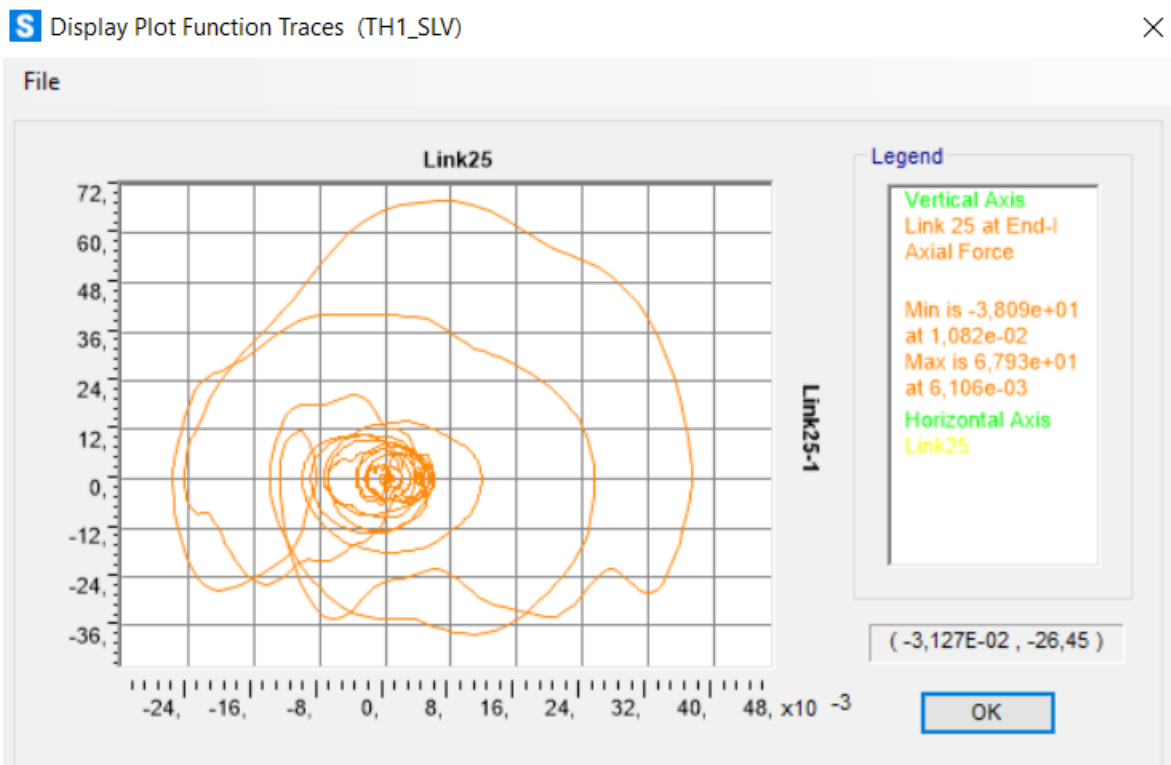


Figura 469. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

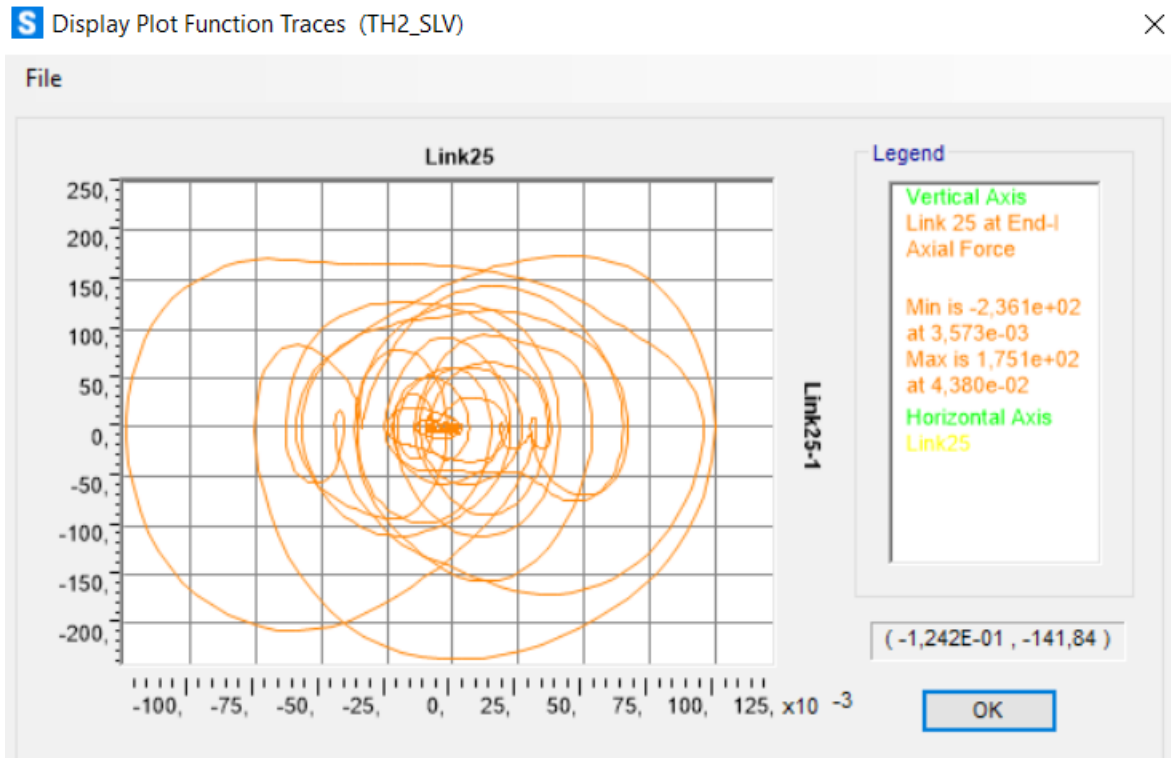


Figura 470. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

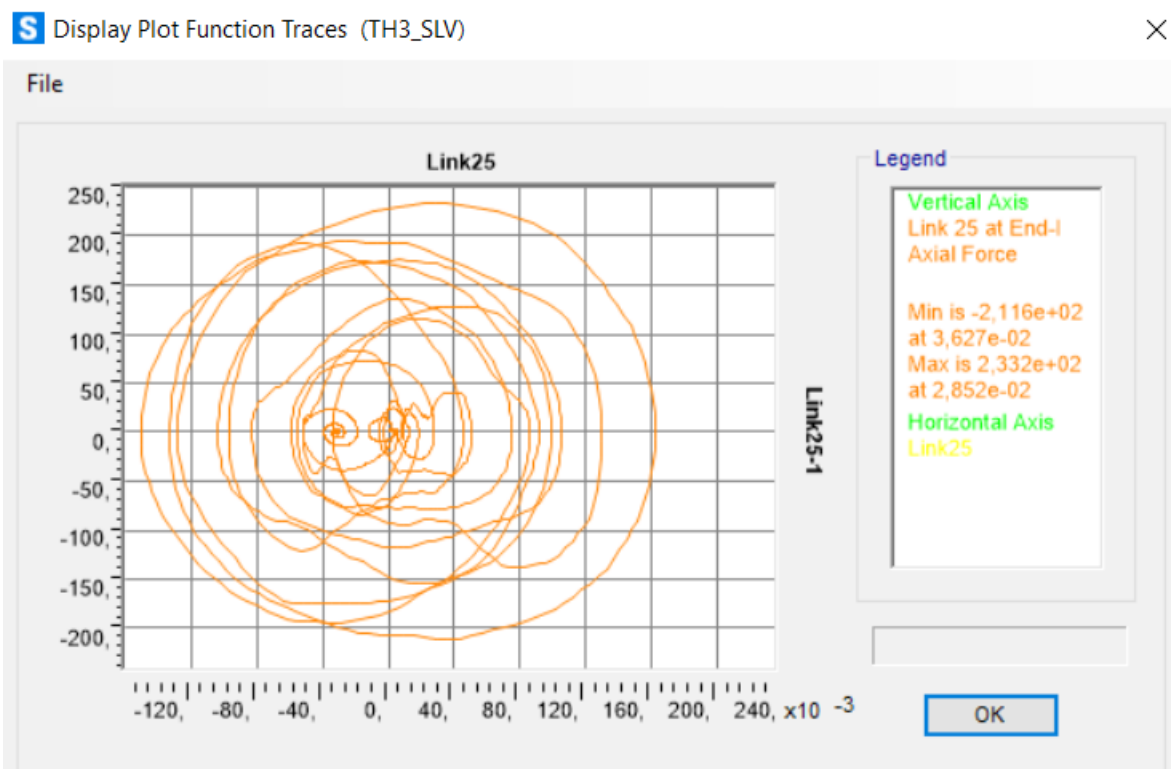


Figura 471. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

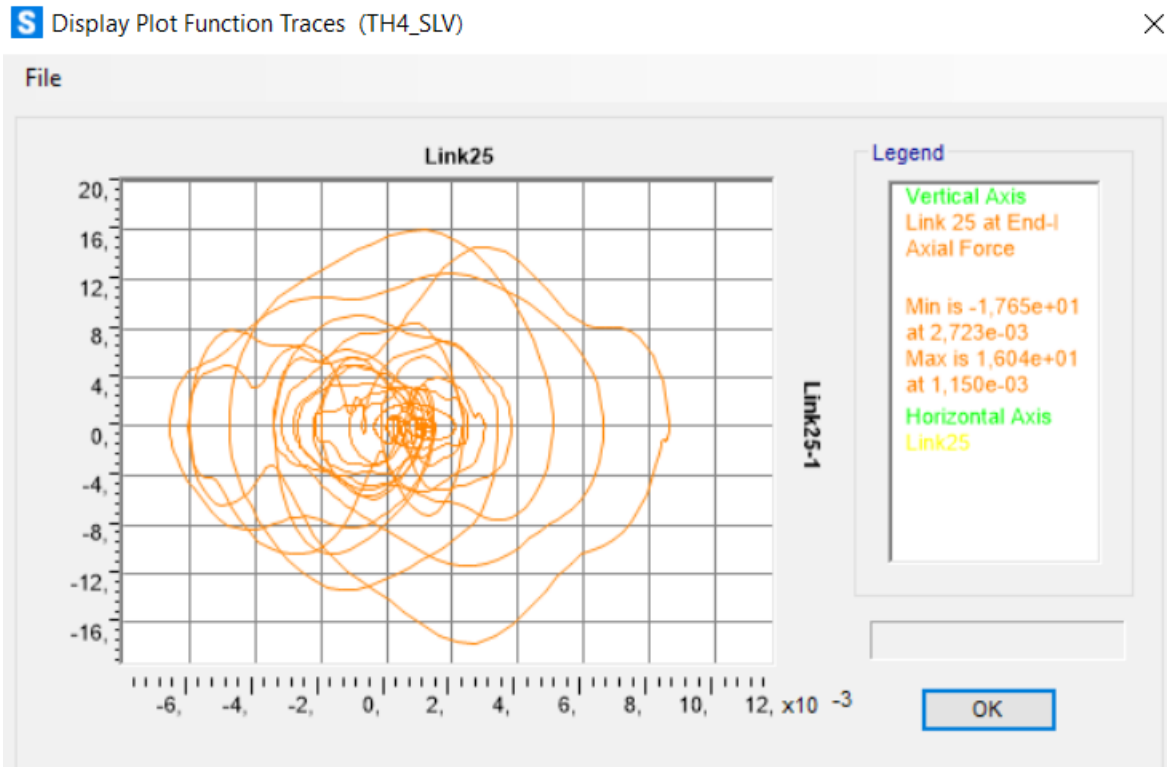


Figura 472. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

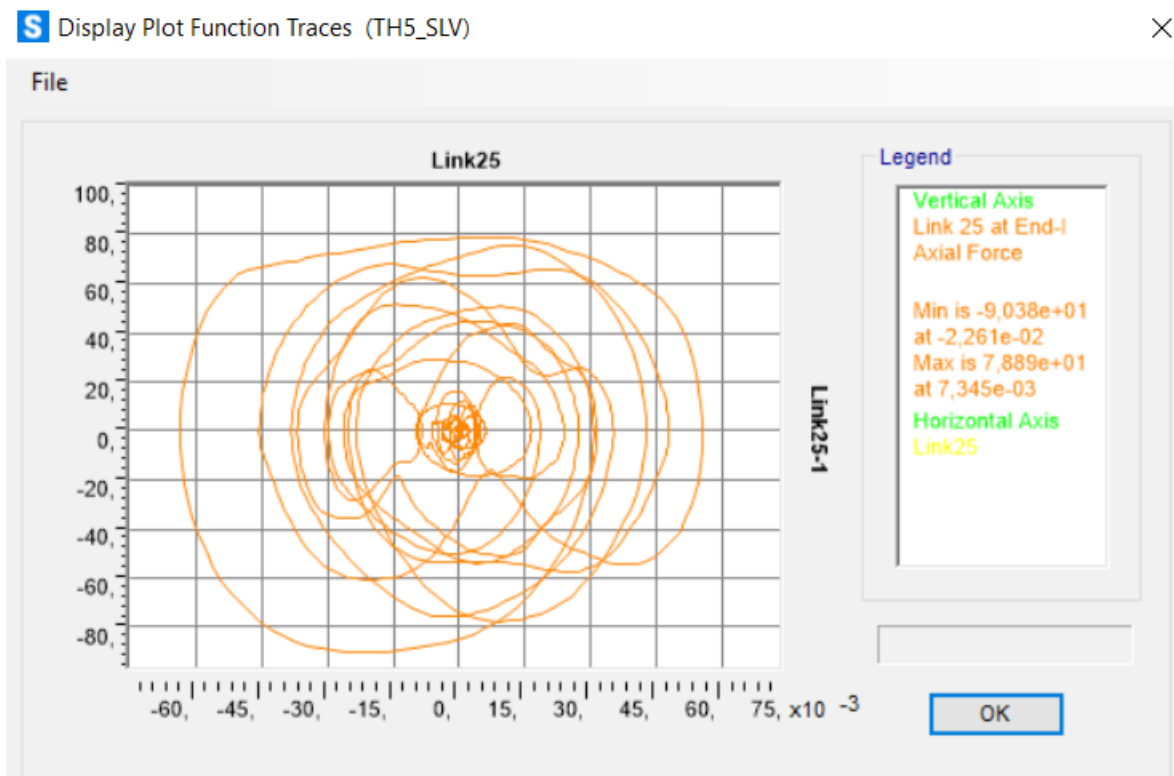


Figura 473. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

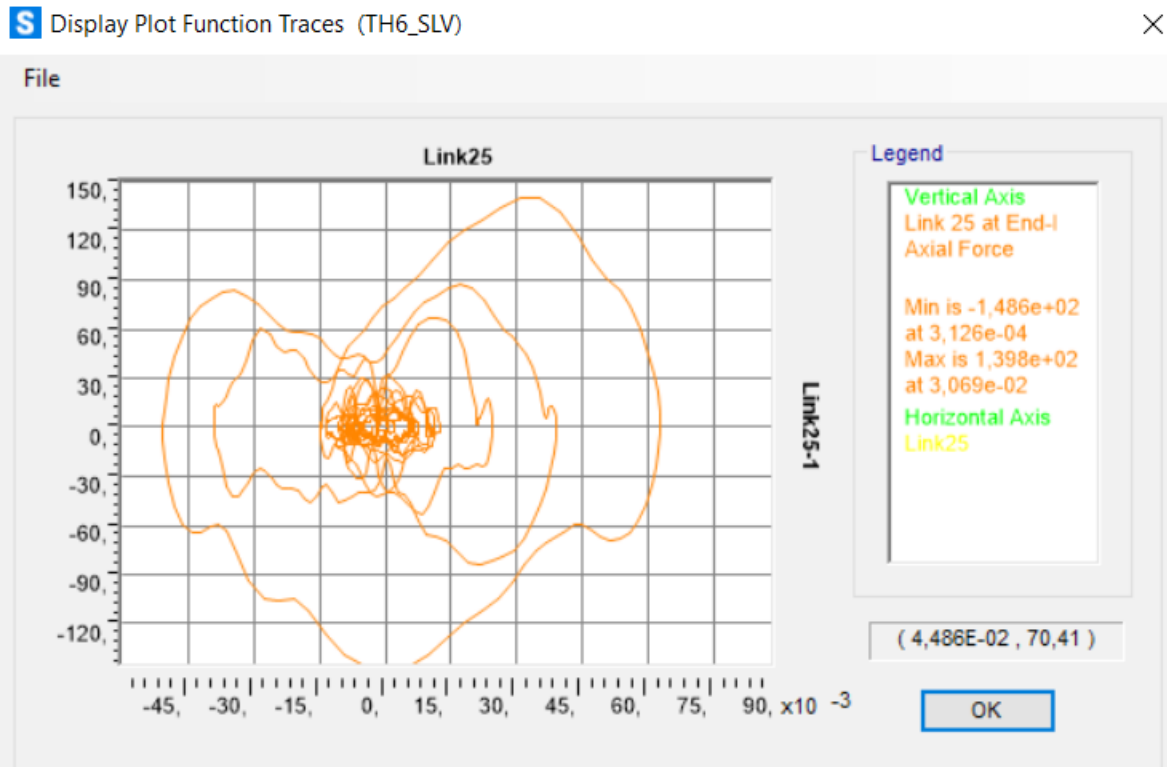


Figura 474. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

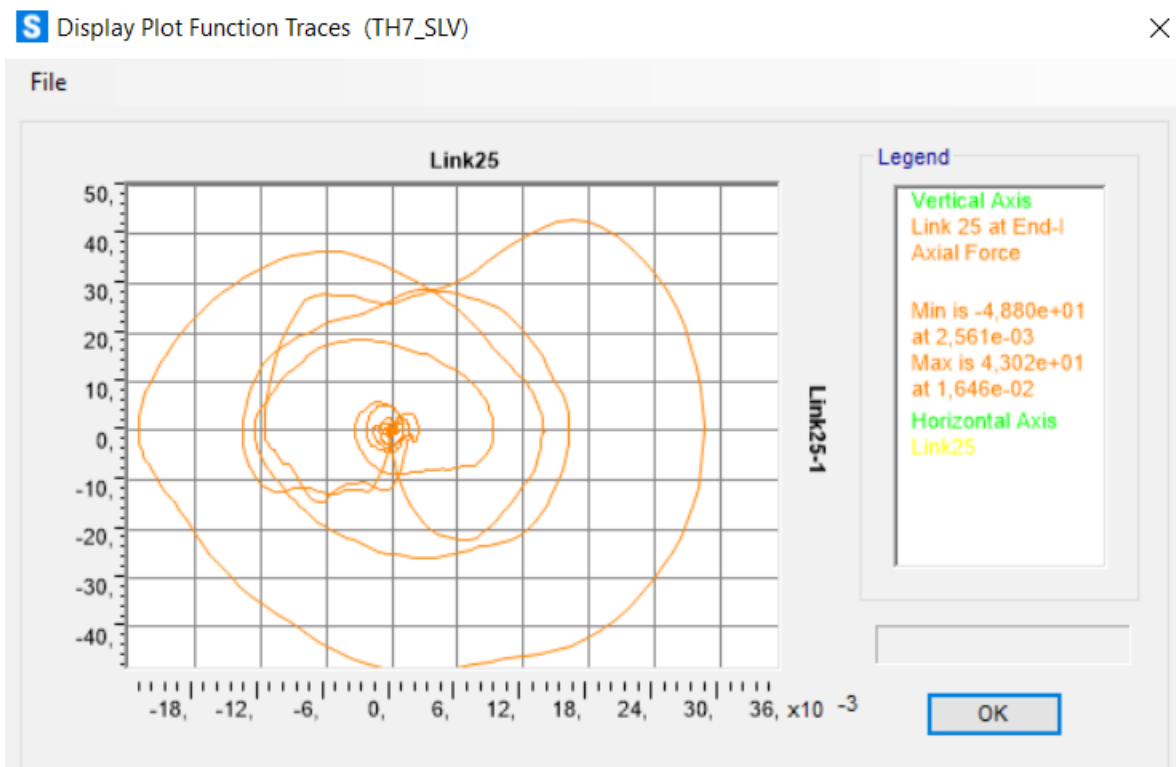


Figura 475. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori viscosi equivalenti del telaio 11-12-13-14-15-16 in direzione x:

Telaio 11-12-13-14-15-16 (direzione x)

N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	24	0,0412	0,0051
4	23	0,0553	0,0053
5	22	0,0705	0,0050

Telaio 11-12-13-14-15-16
(direzione x)

N° piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	24	84,13
4	23	96,37
5	22	121,26

Piano 3:

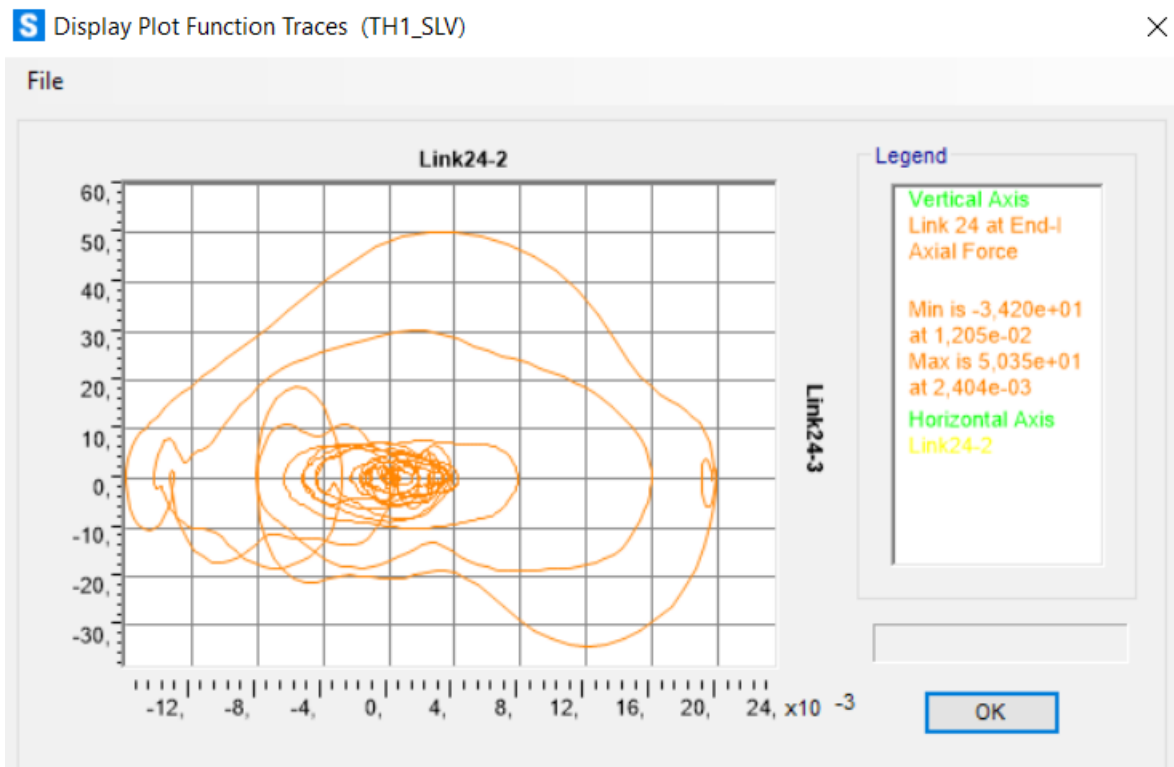


Figura 476. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

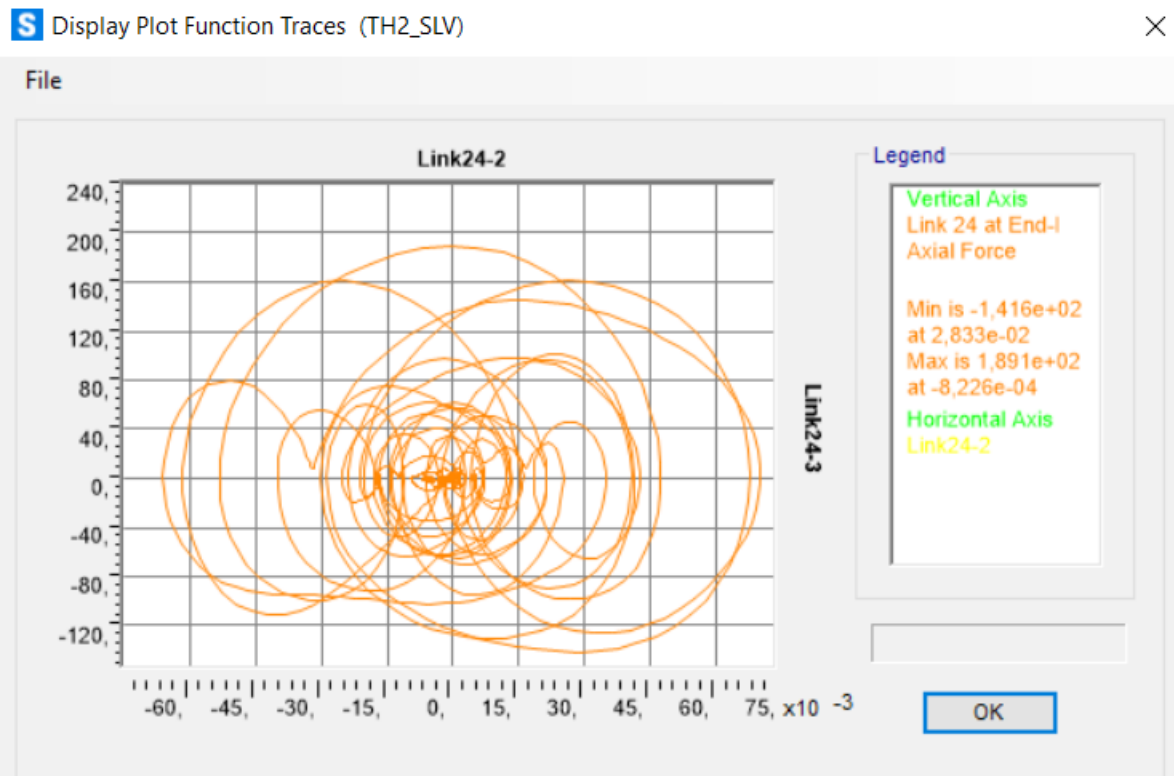


Figura 477. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

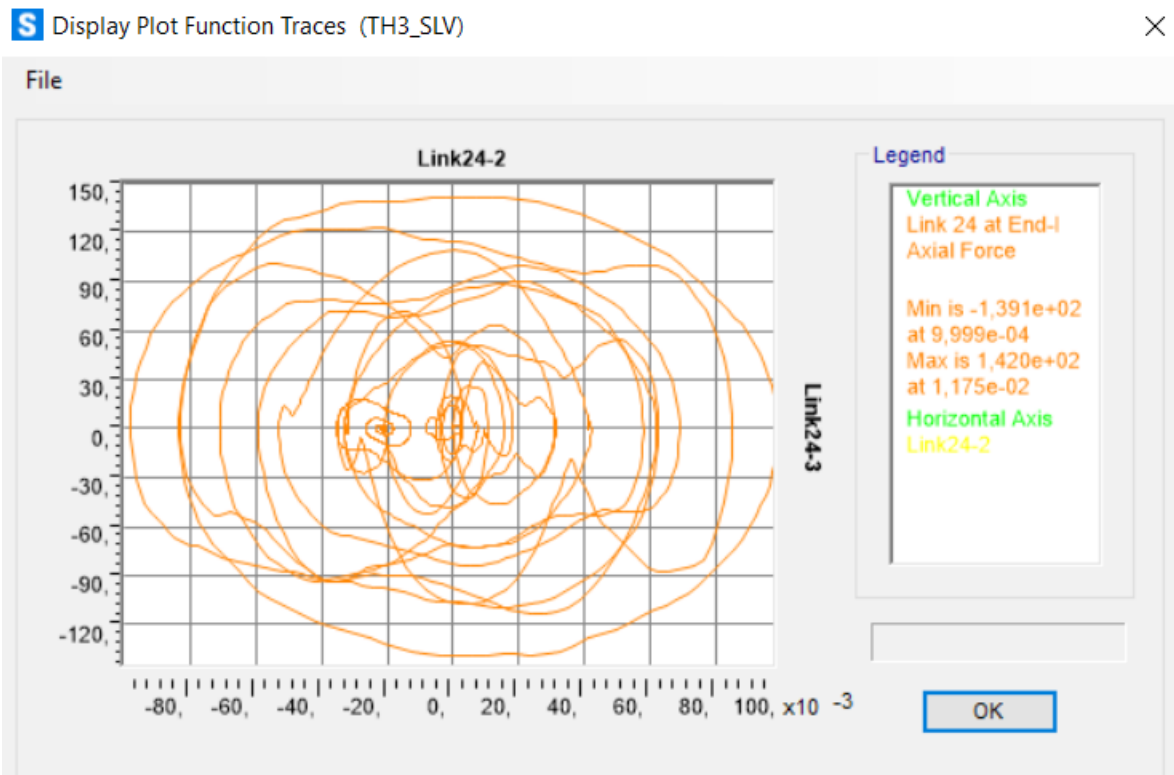


Figura 478. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

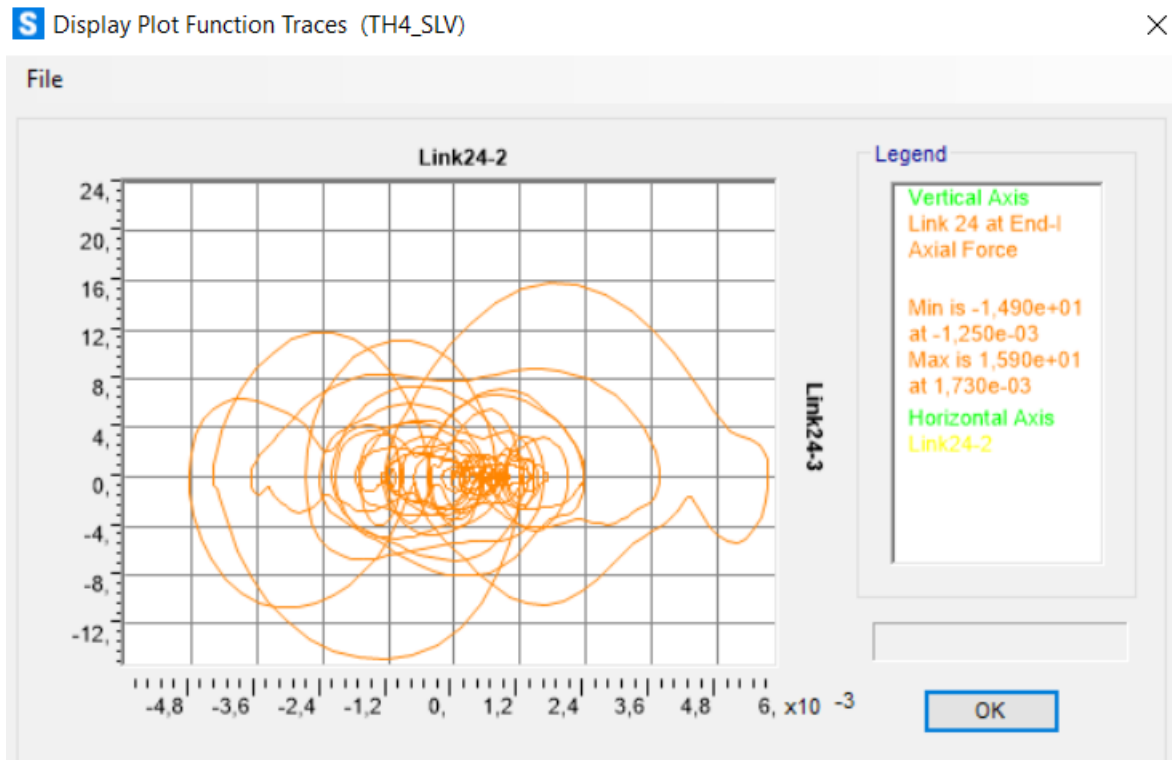


Figura 479. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

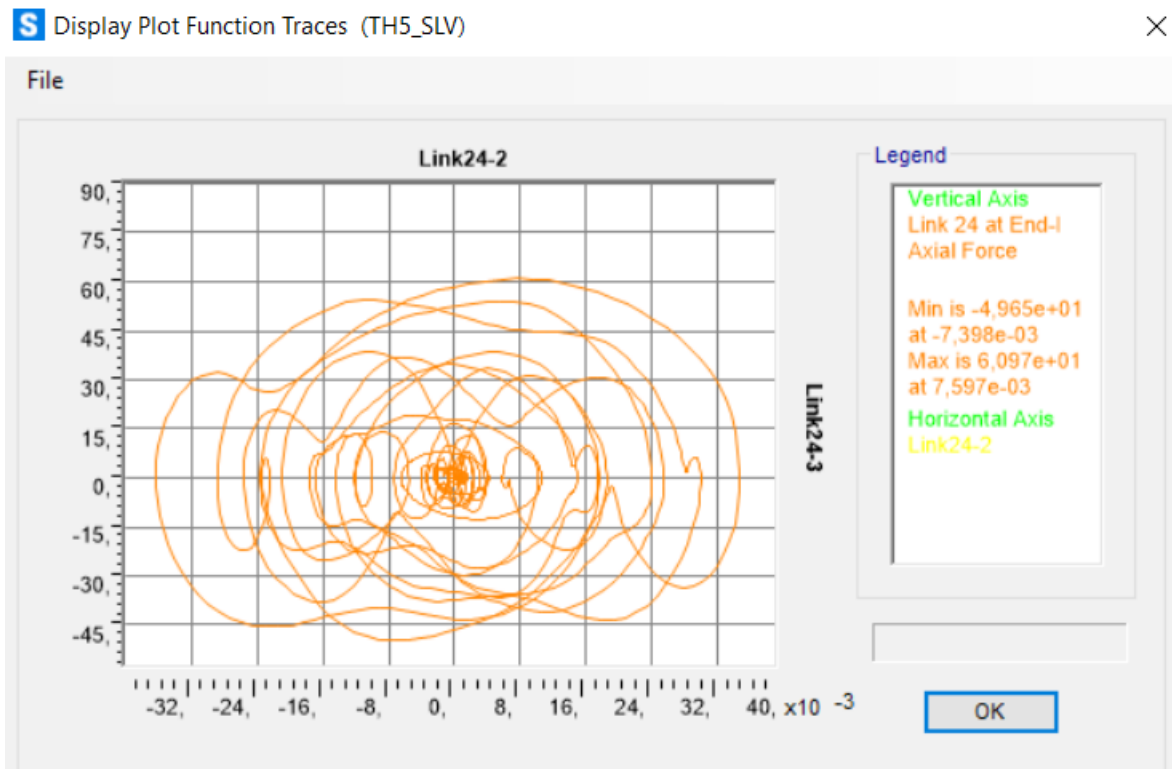


Figura 480. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

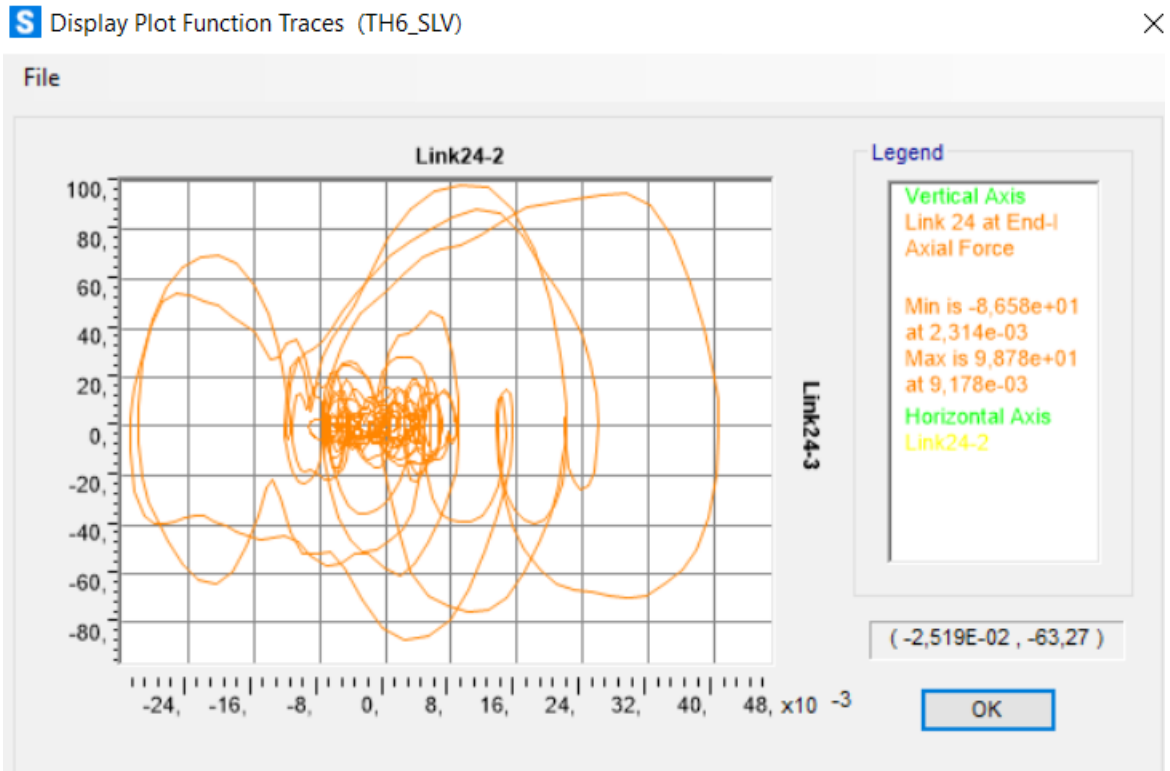


Figura 481. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

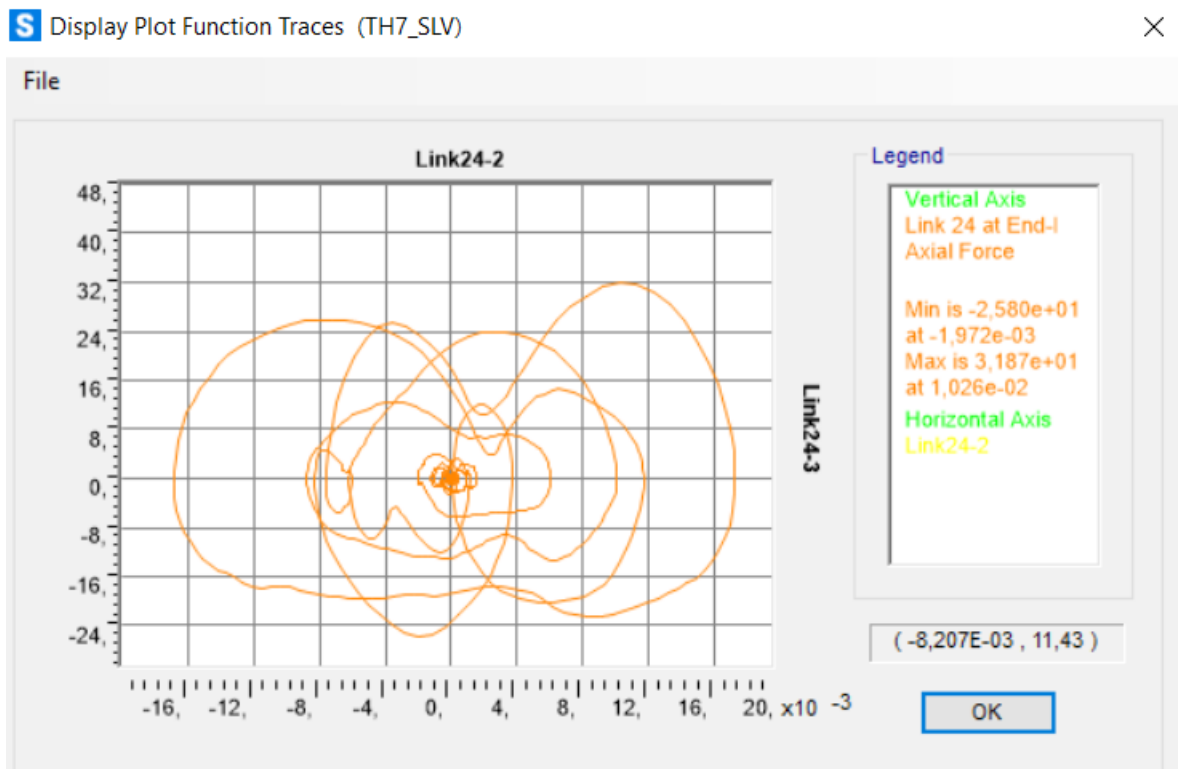


Figura 482. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

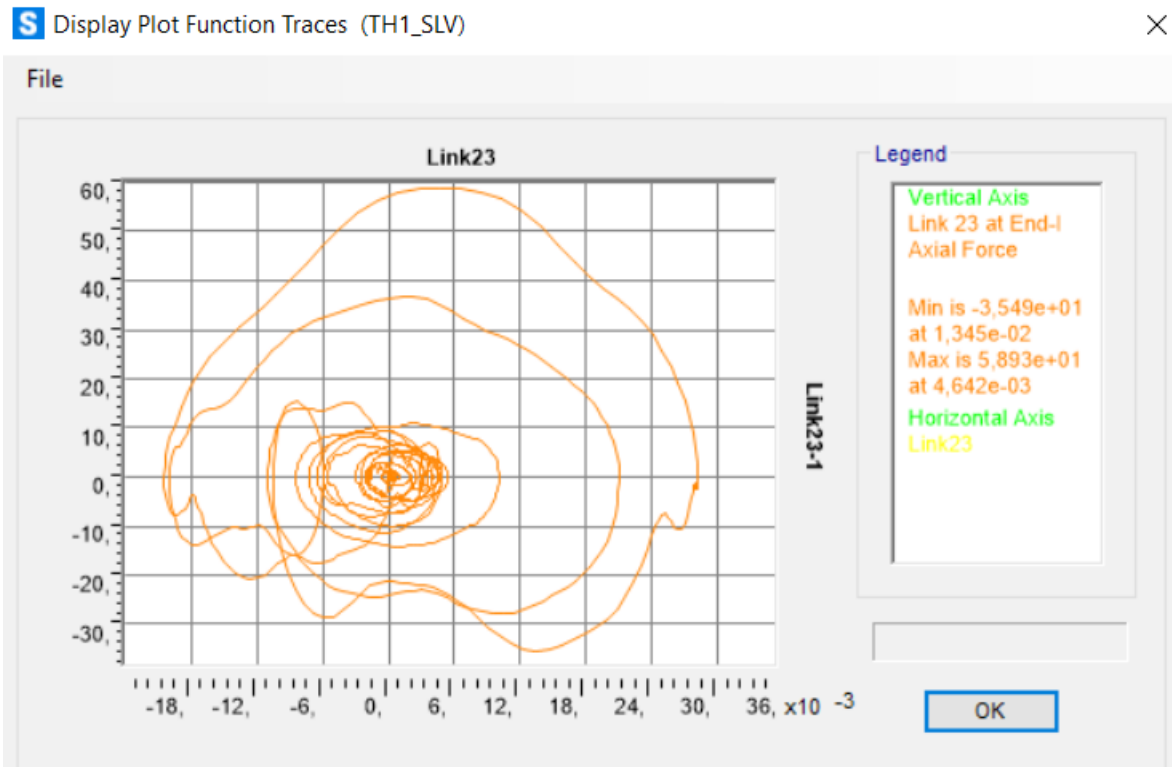


Figura 483. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

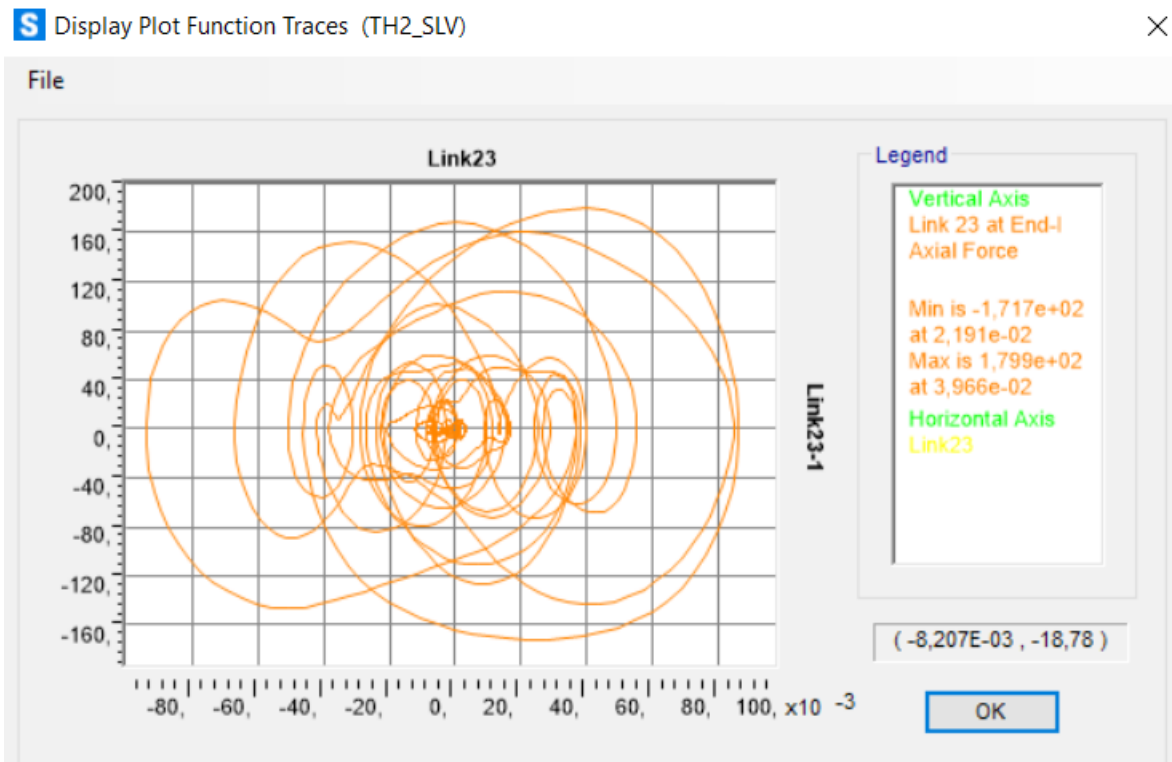


Figura 484. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

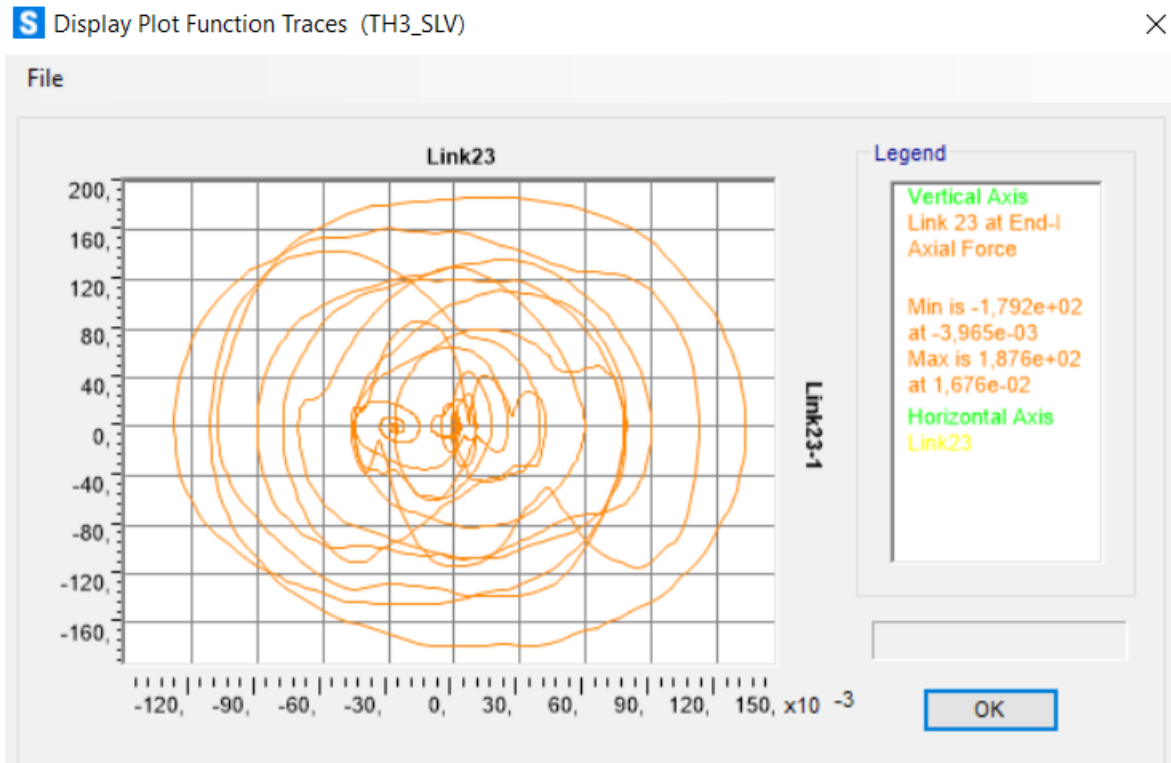


Figura 485. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

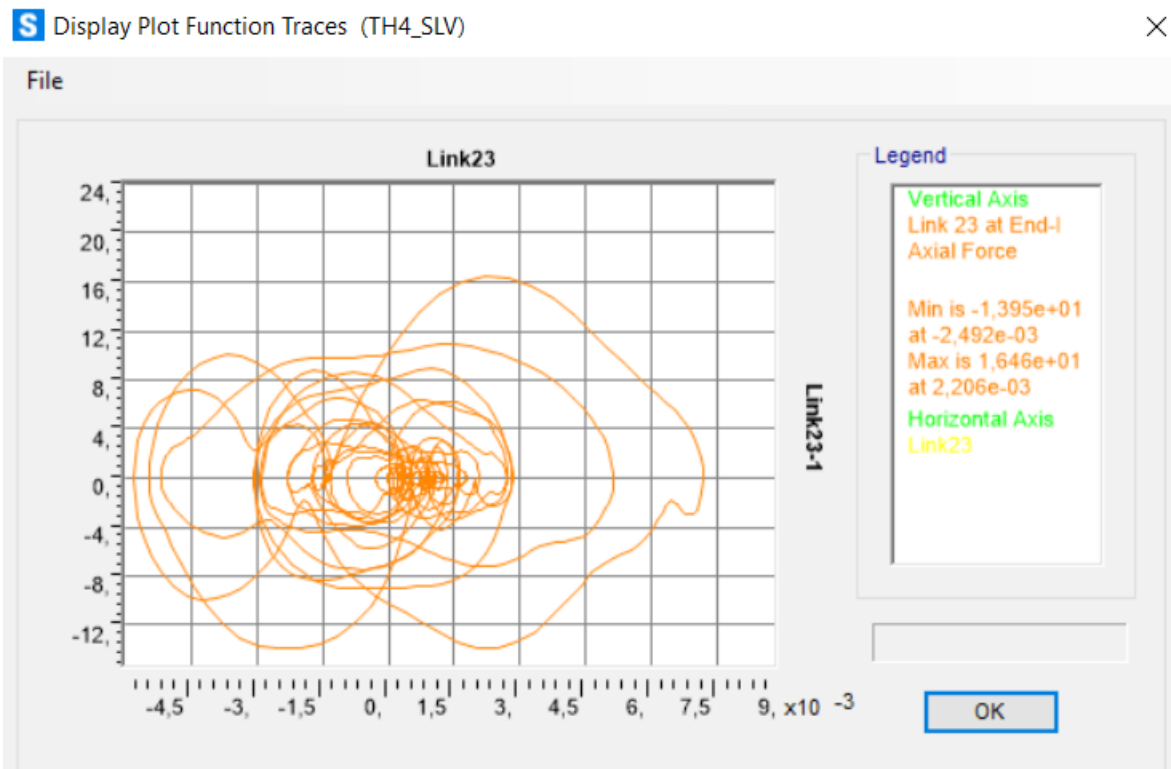


Figura 486. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

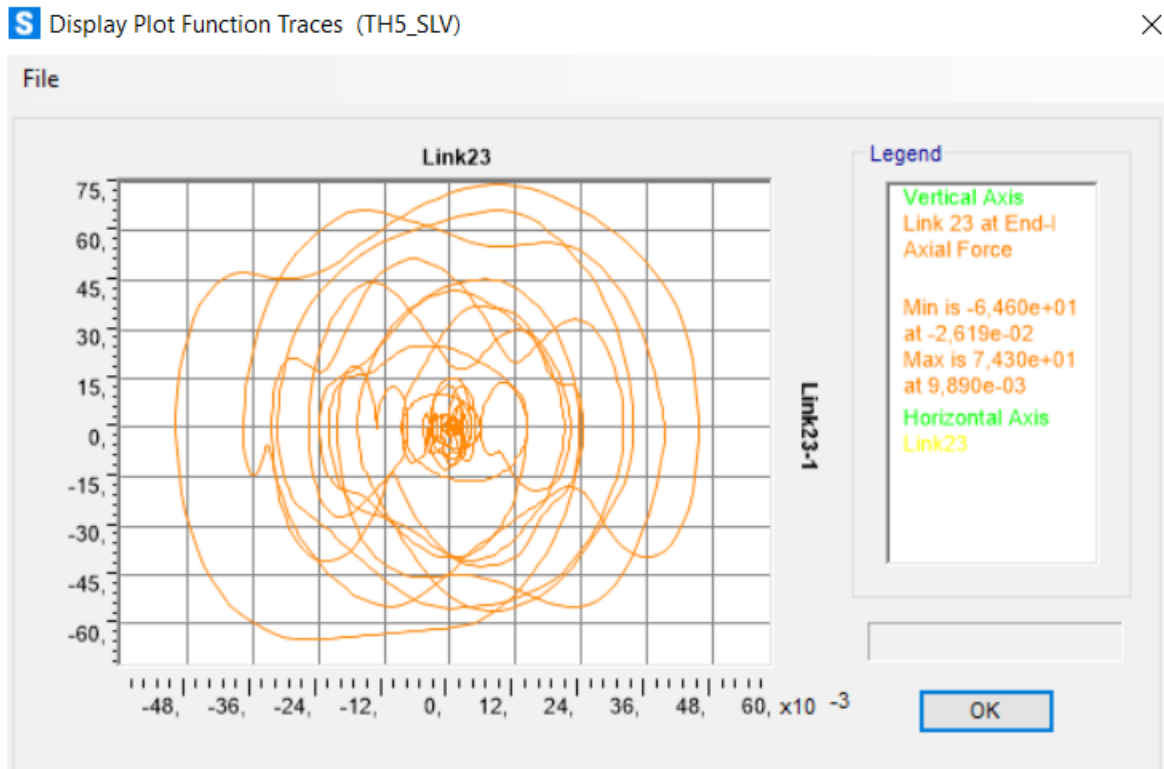


Figura 487. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

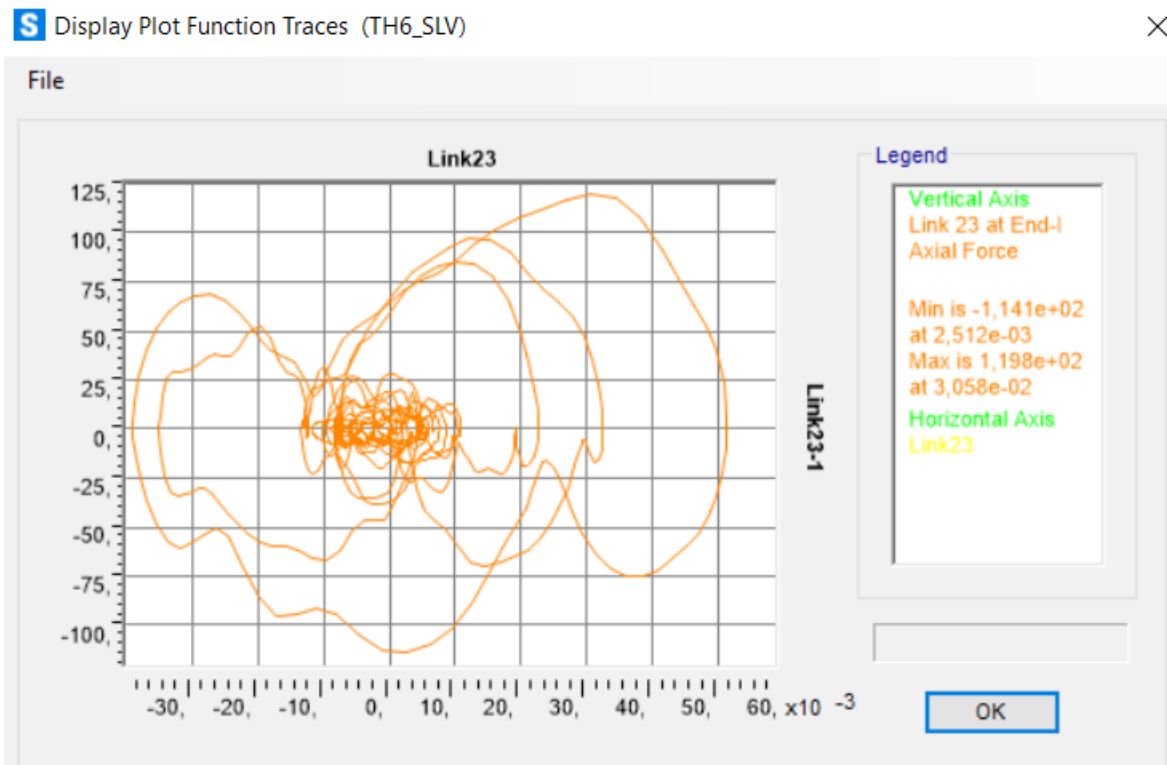


Figura 488. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

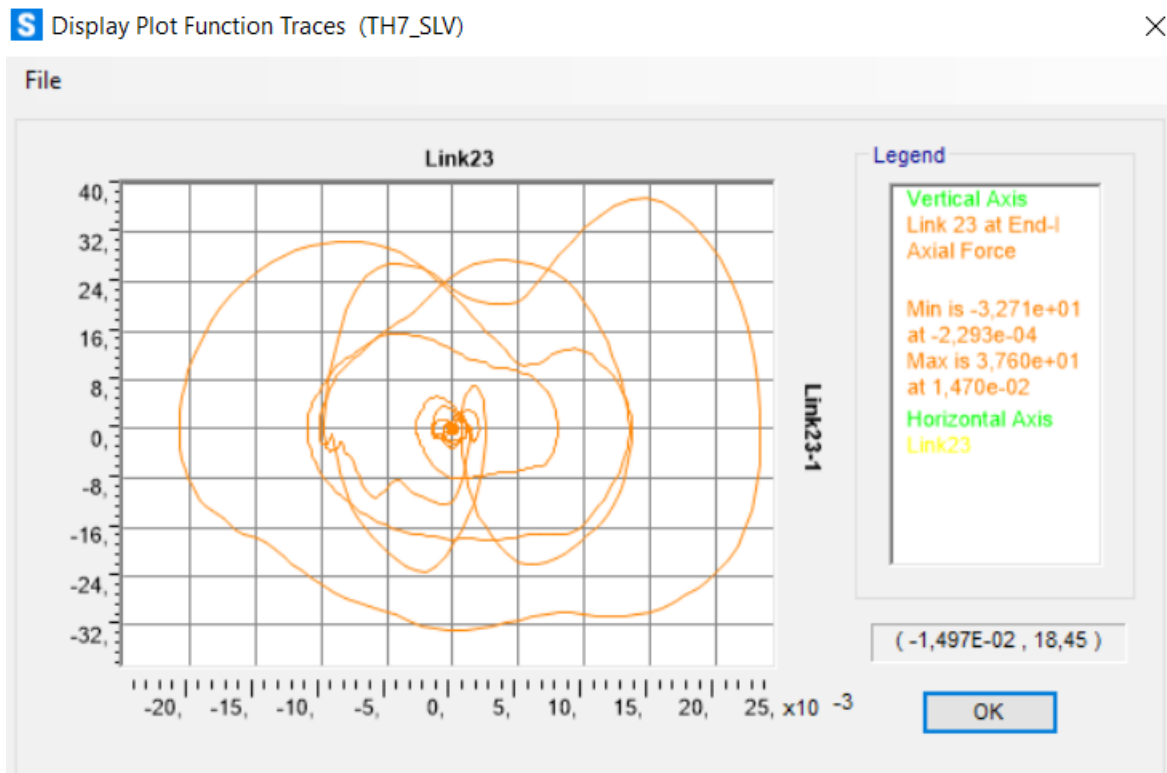


Figura 489. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

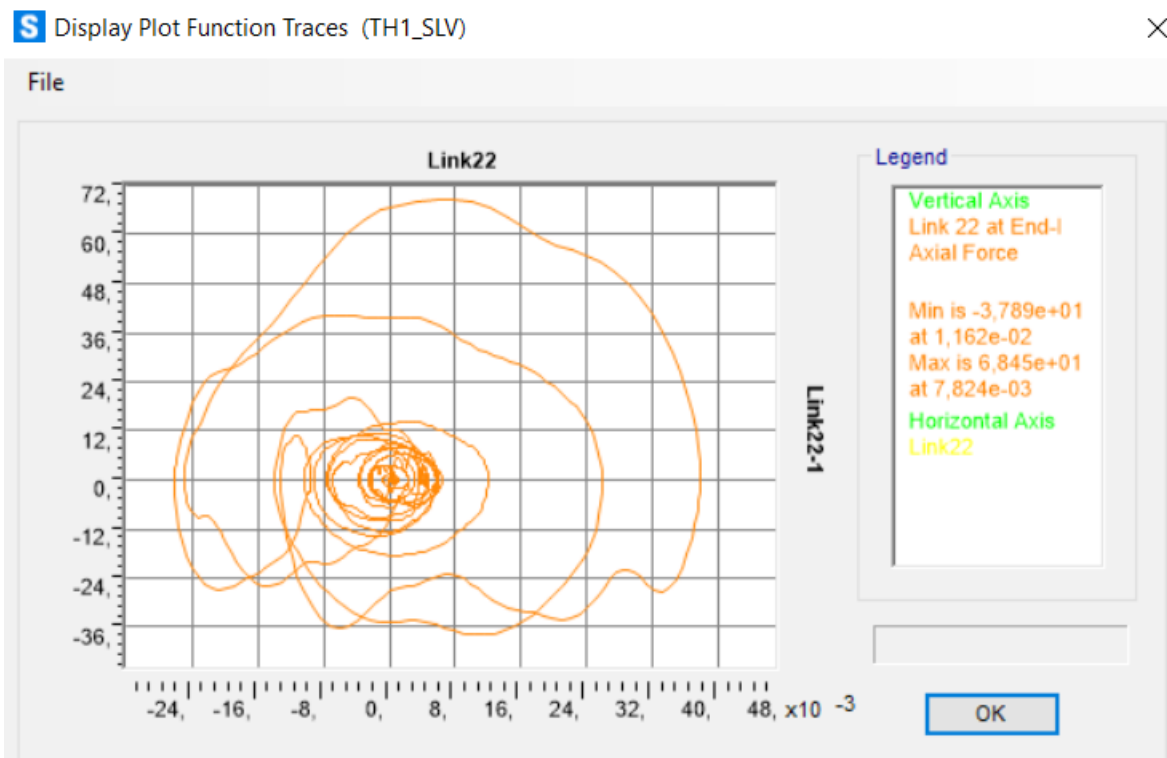


Figura 490. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

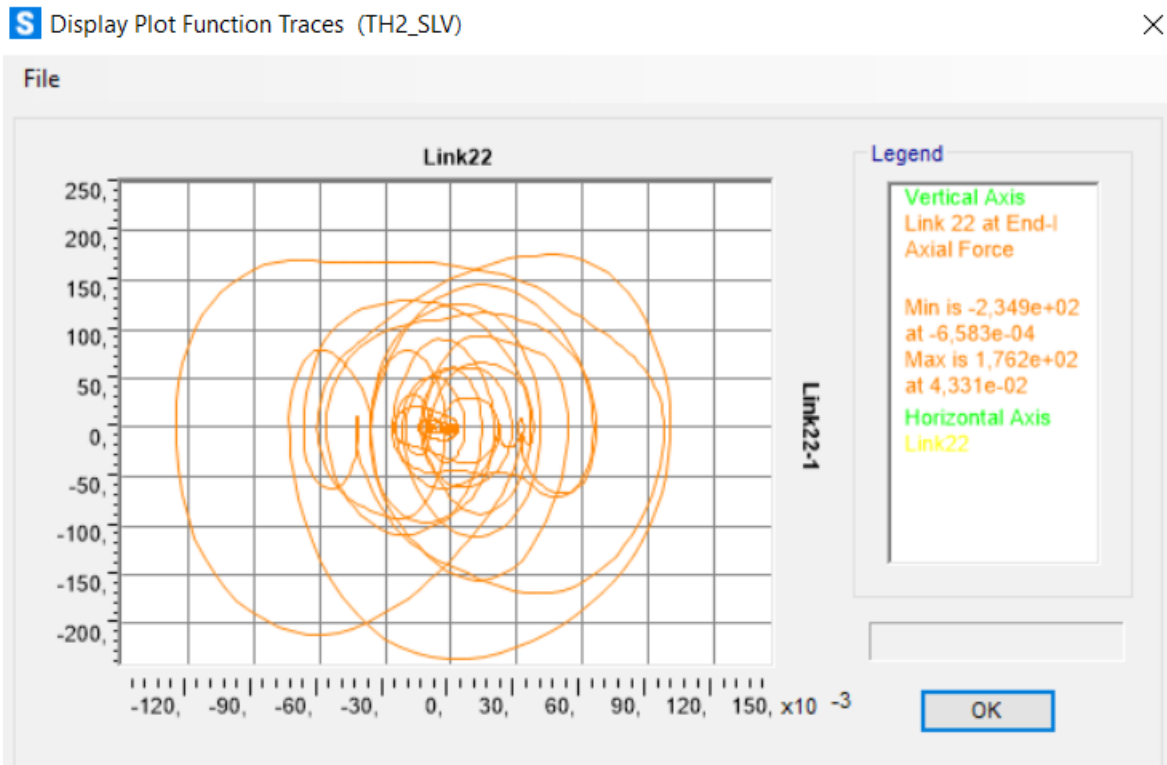


Figura 491. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

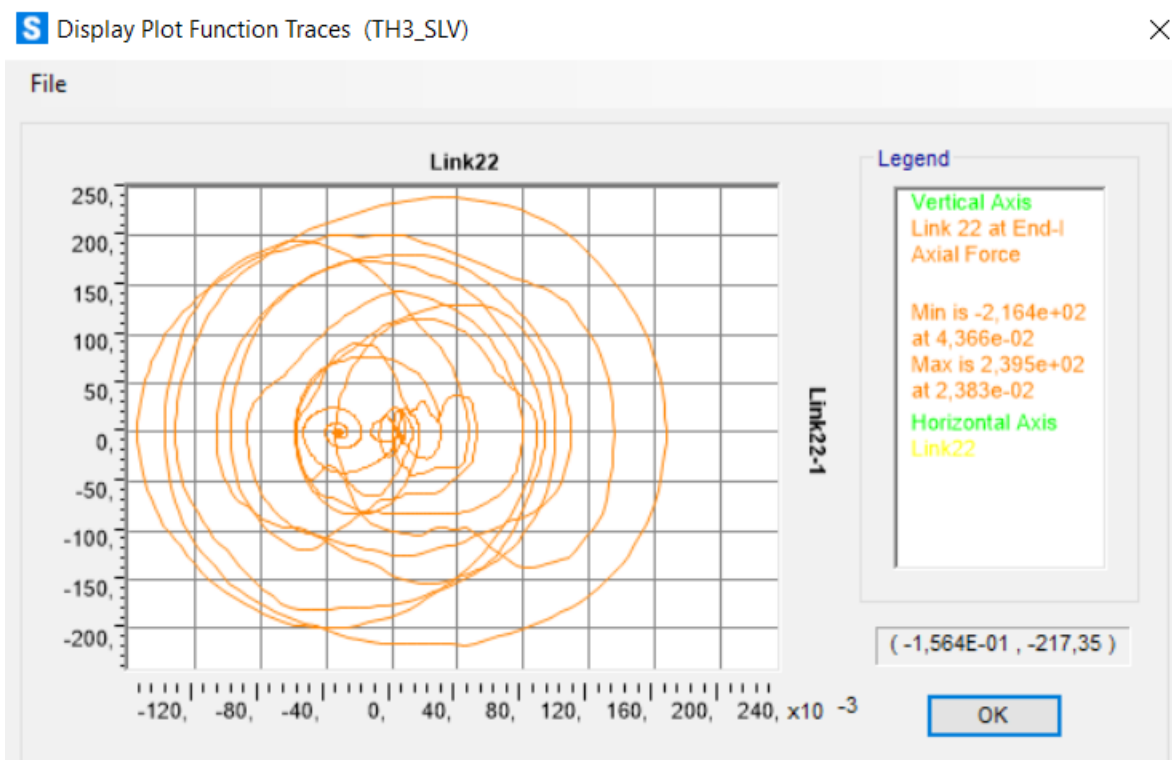


Figura 492. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

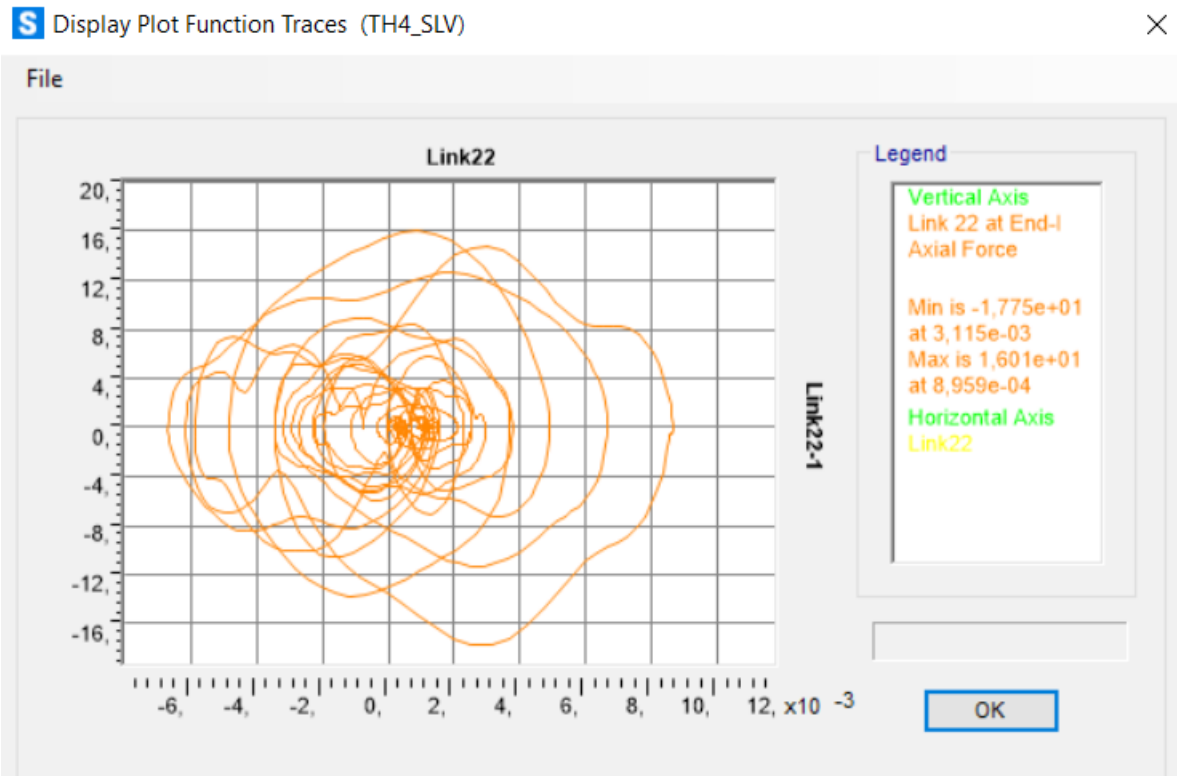


Figura 493. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

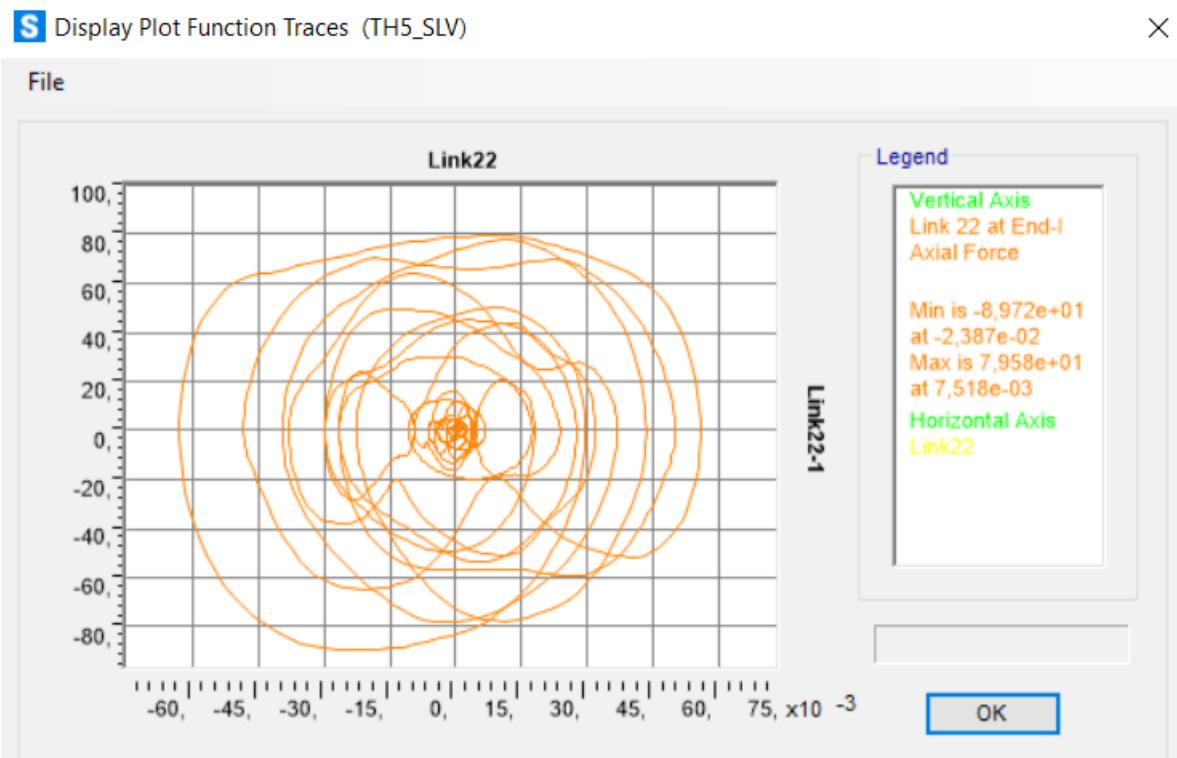


Figura 494. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

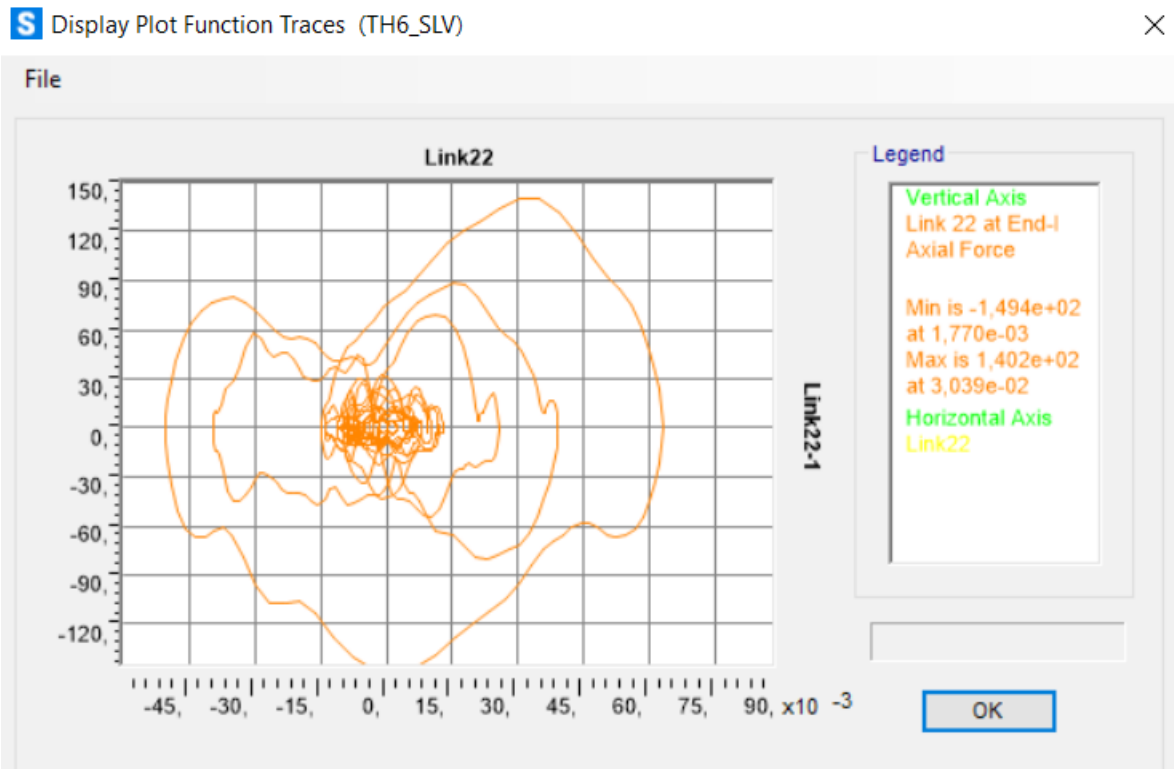


Figura 495. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

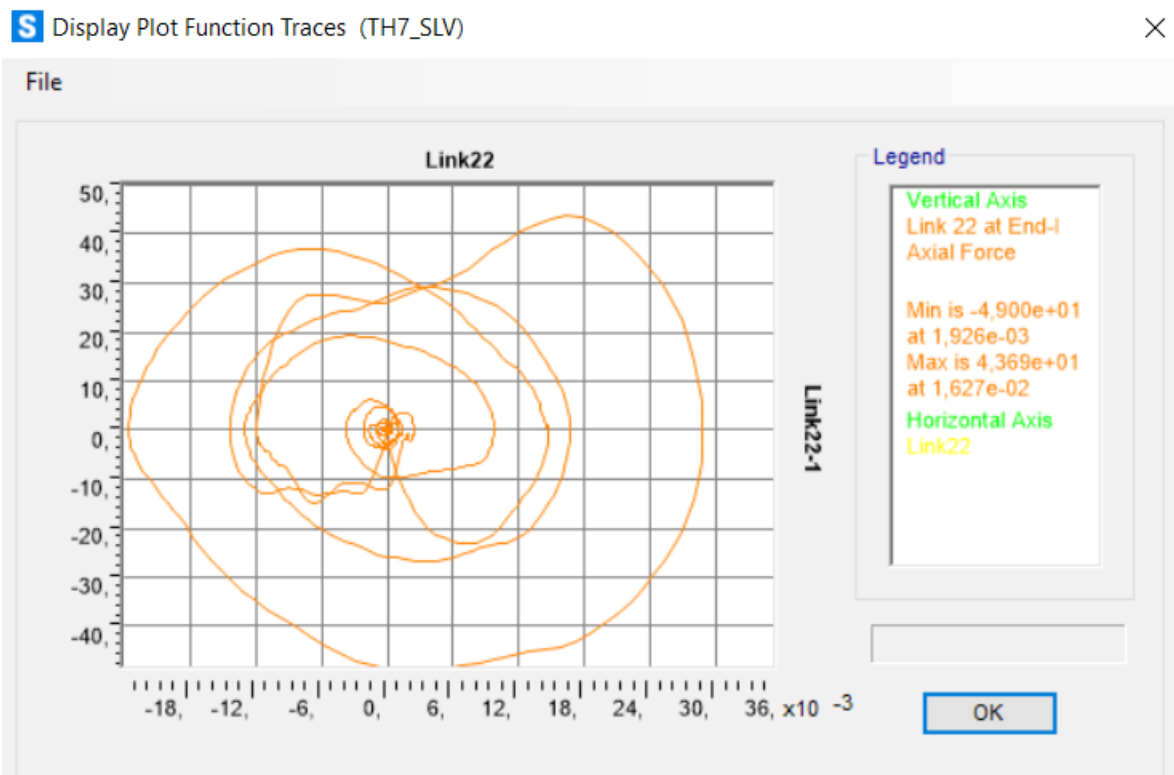


Figura 496. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori viscosi equivalenti del telaio 17-12-6-1 in direzione y:

Telaio 17-12-6-1 (direzione y)			
N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	15	0,0371	0,0043
4	14	0,0492	0,0045
5	13	0,0607	0,0049

Telaio 17-12-6-1 (direzione y)		
N° piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	15	84,49
4	14	98,87
5	13	119,92

Piano 3:

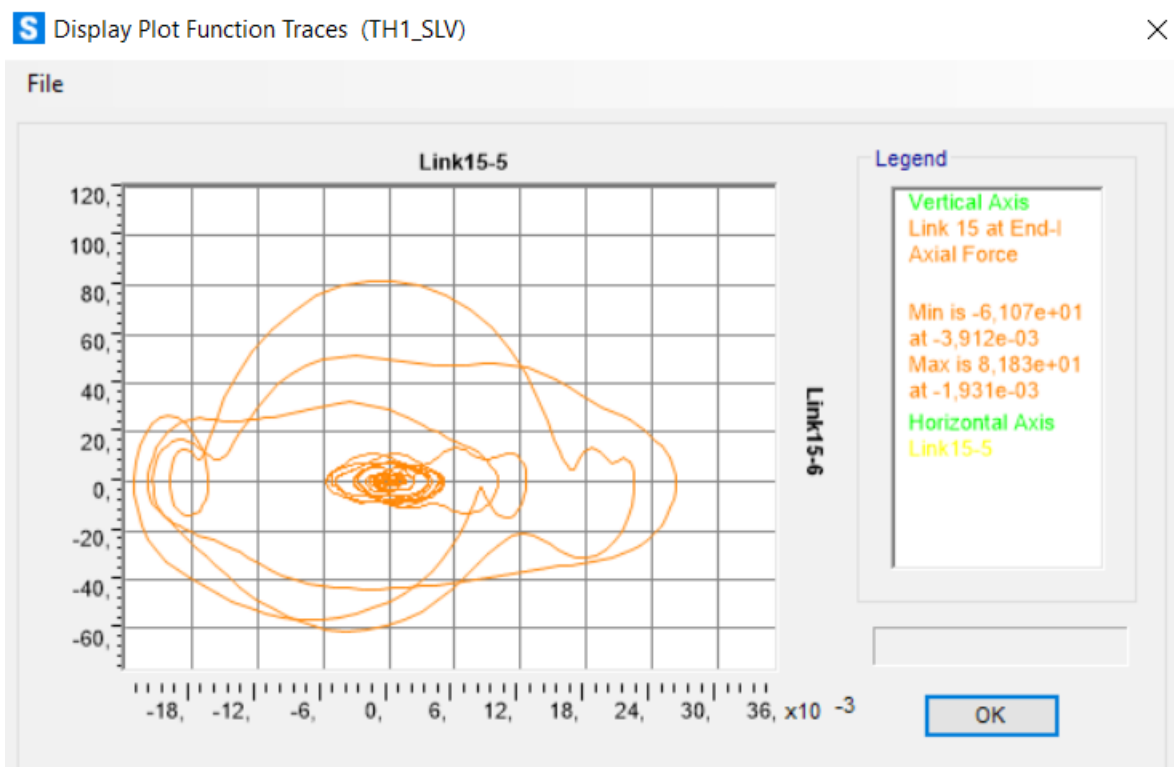


Figura 497. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

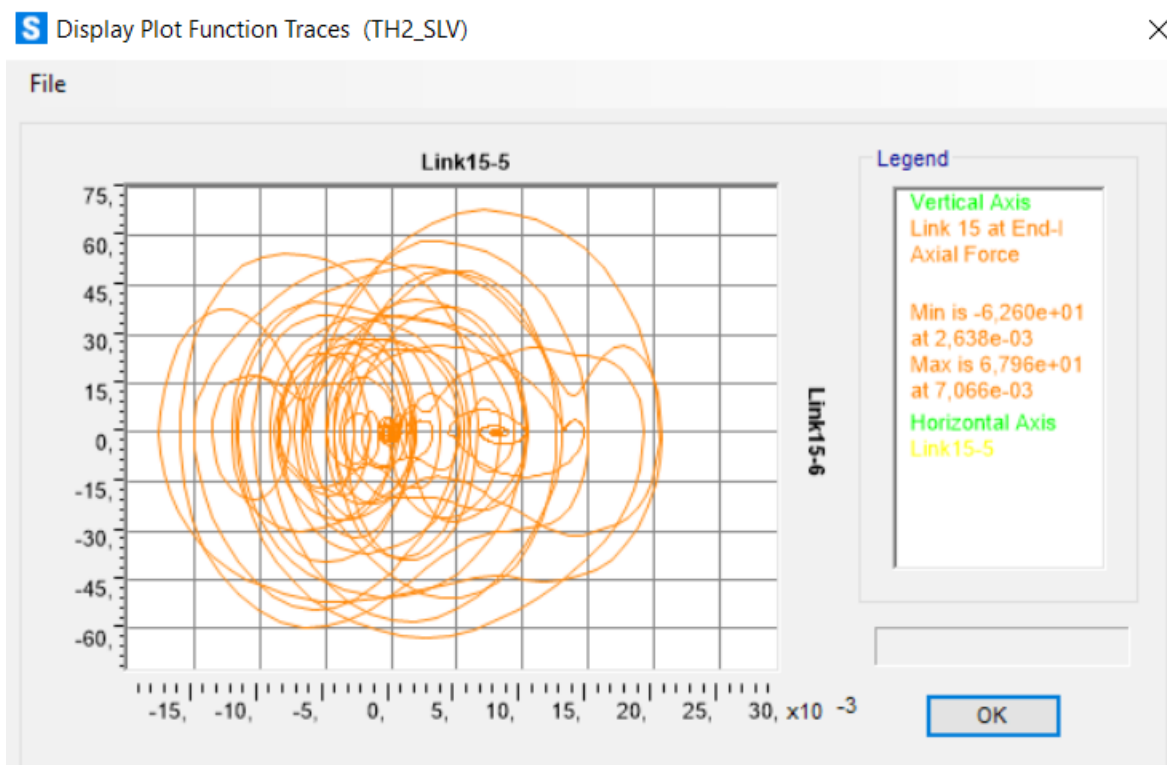


Figura 498. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

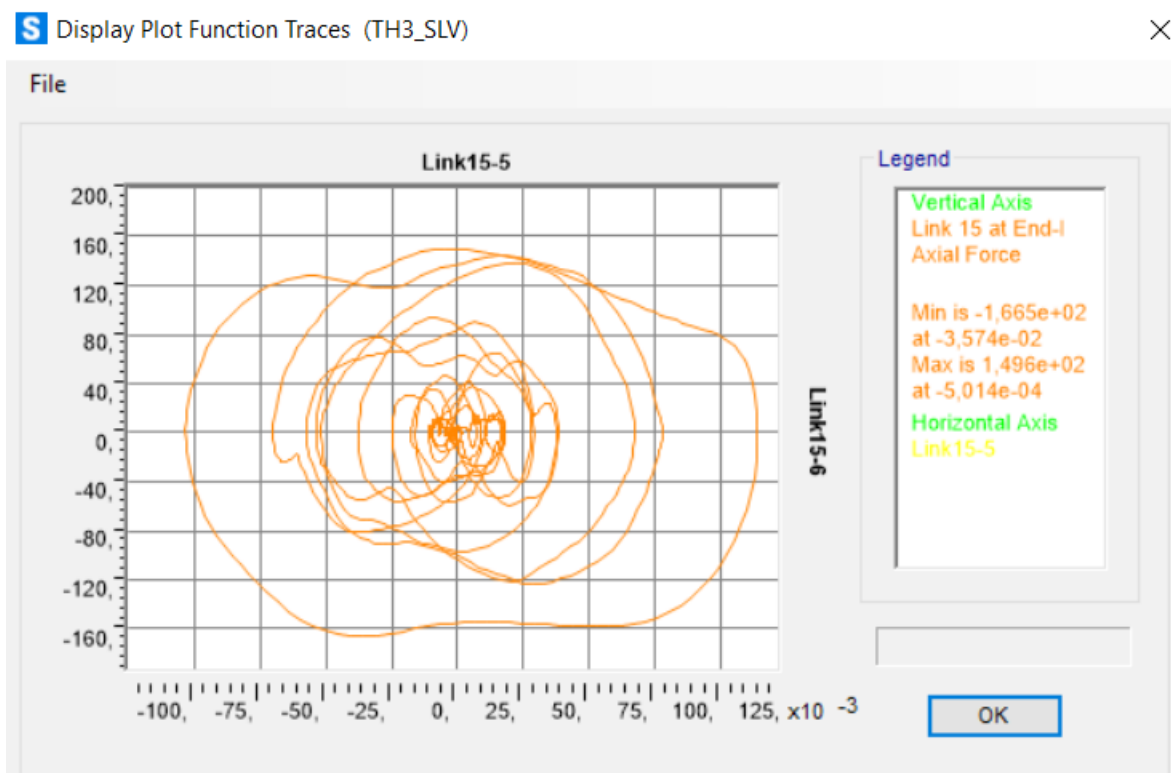


Figura 499. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

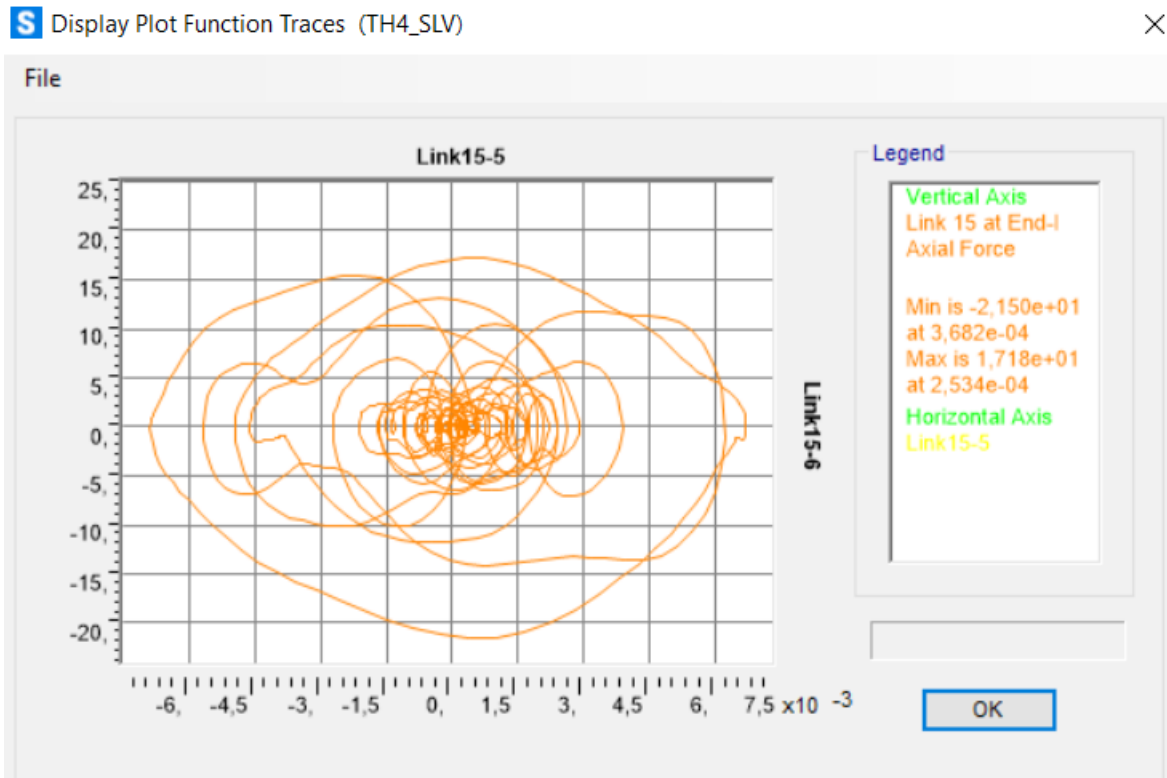


Figura 500. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

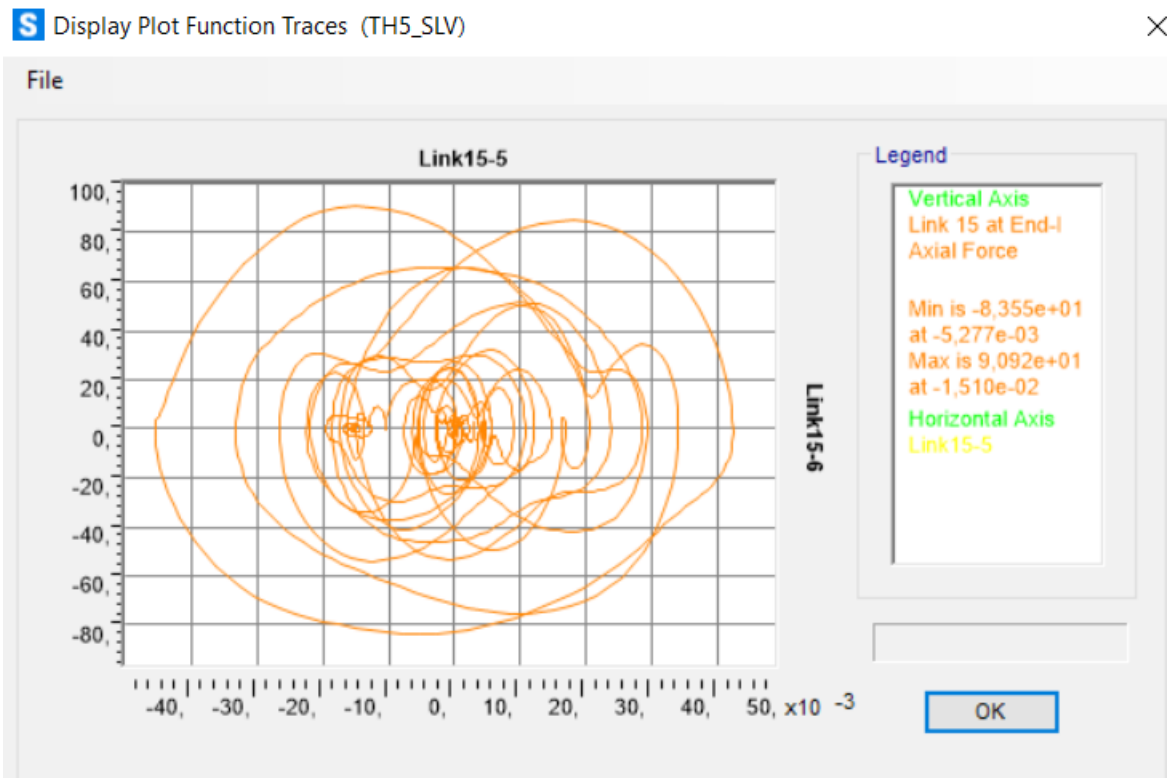


Figura 501. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

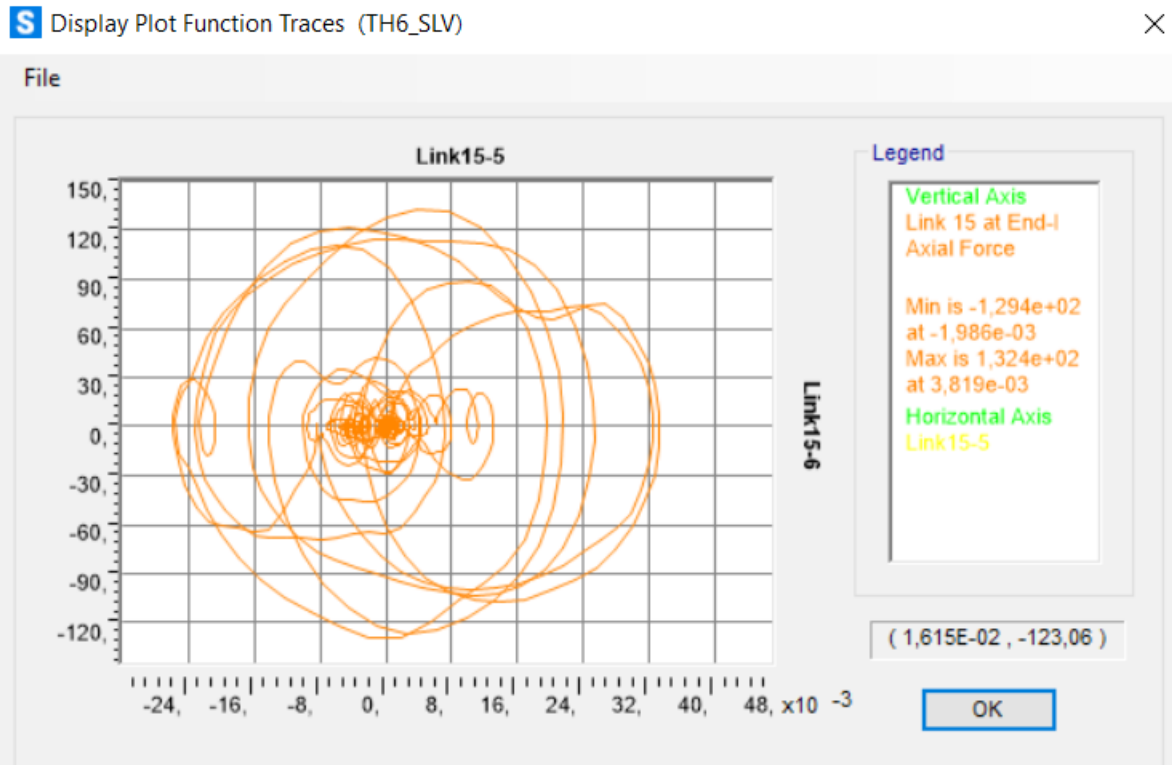


Figura 502. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

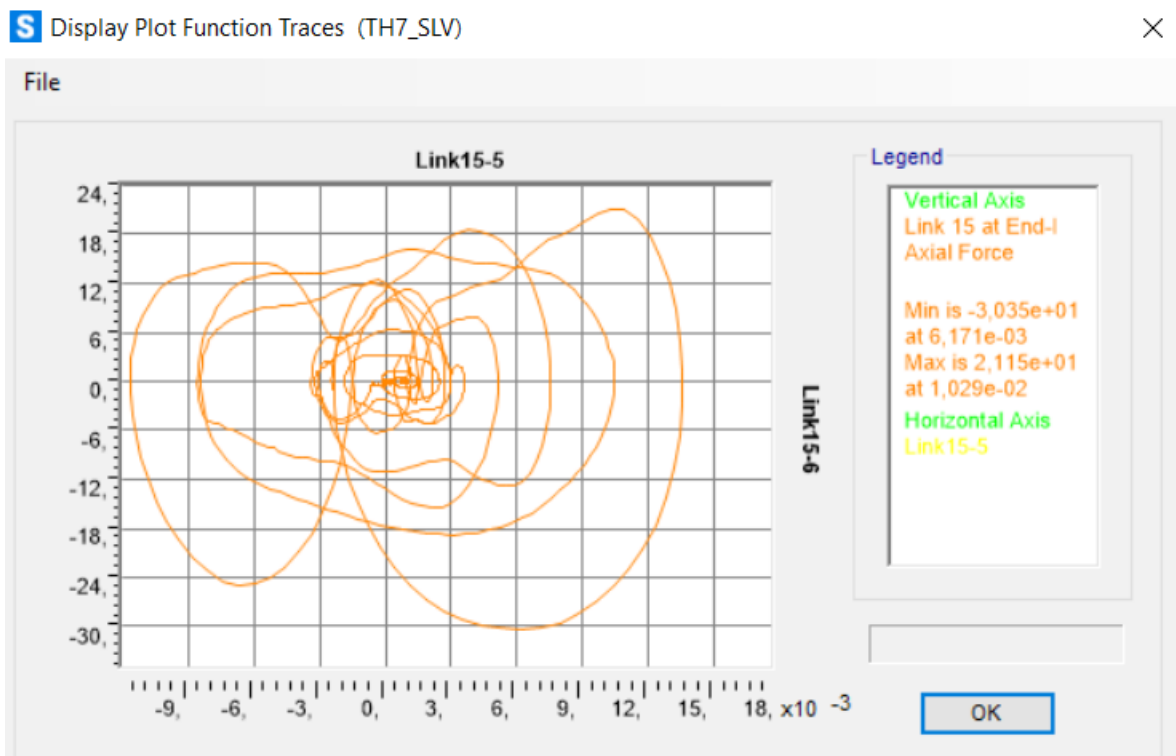


Figura 503. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

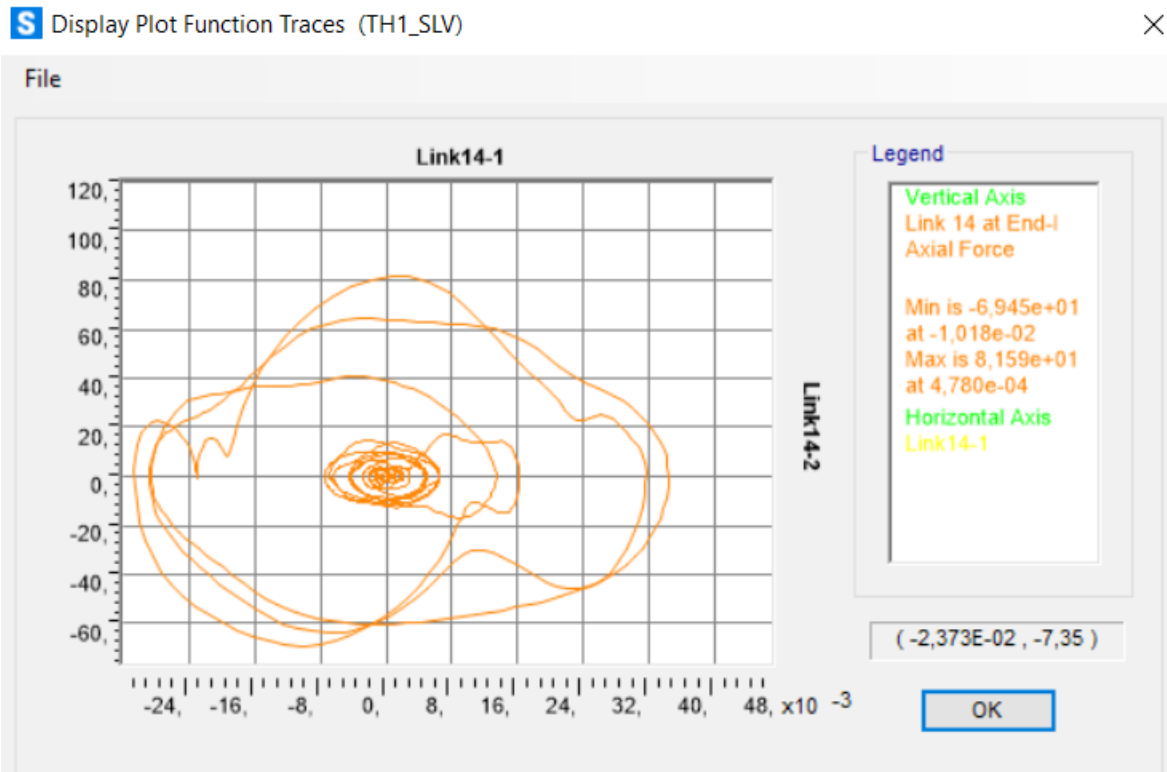


Figura 504. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

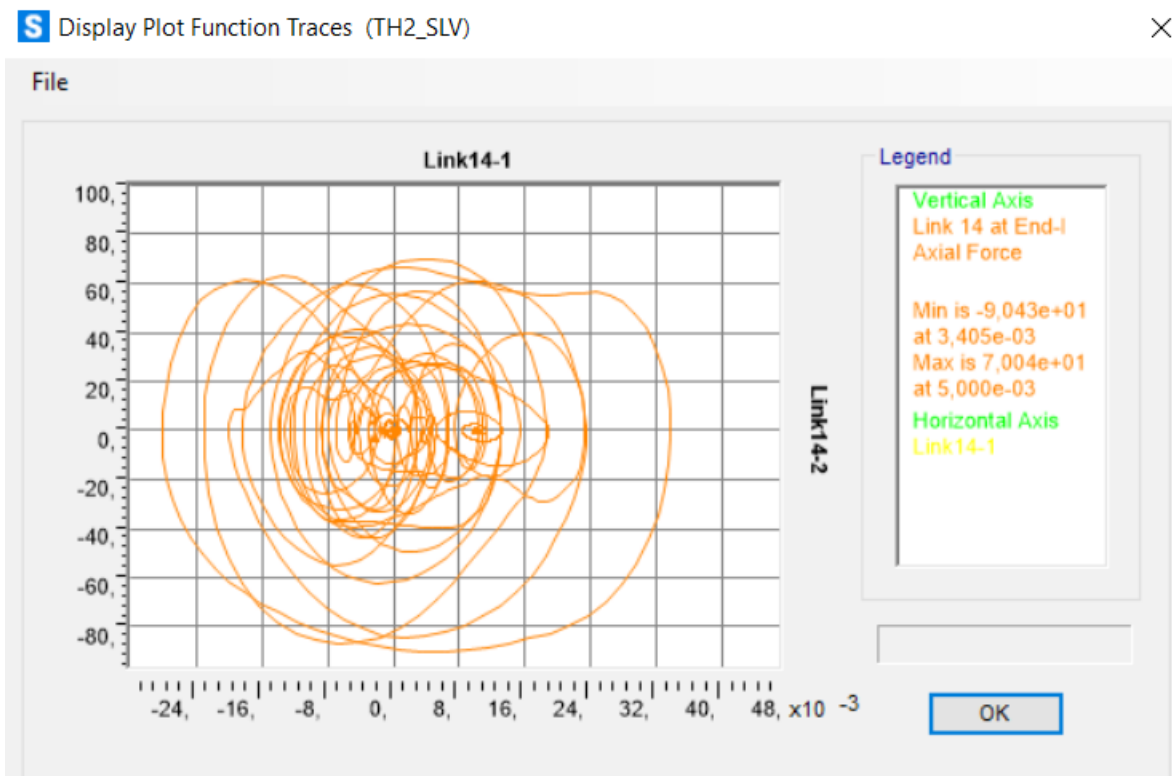


Figura 505. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

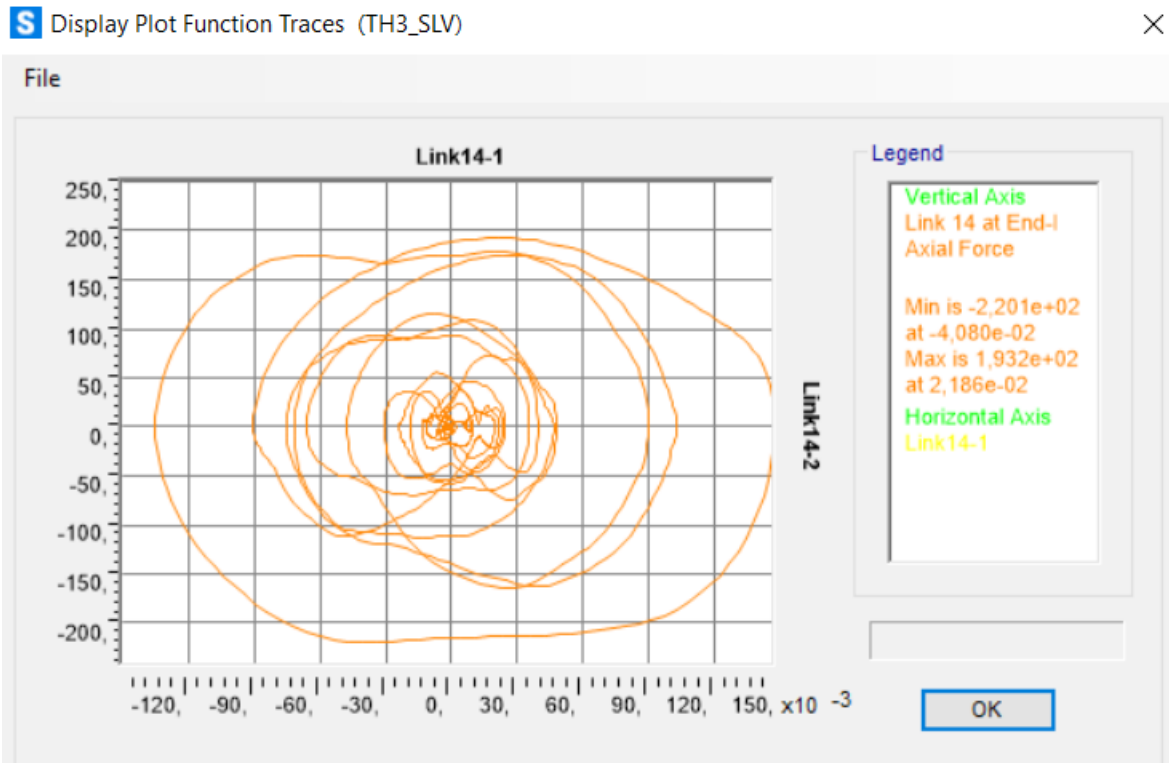


Figura 506. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

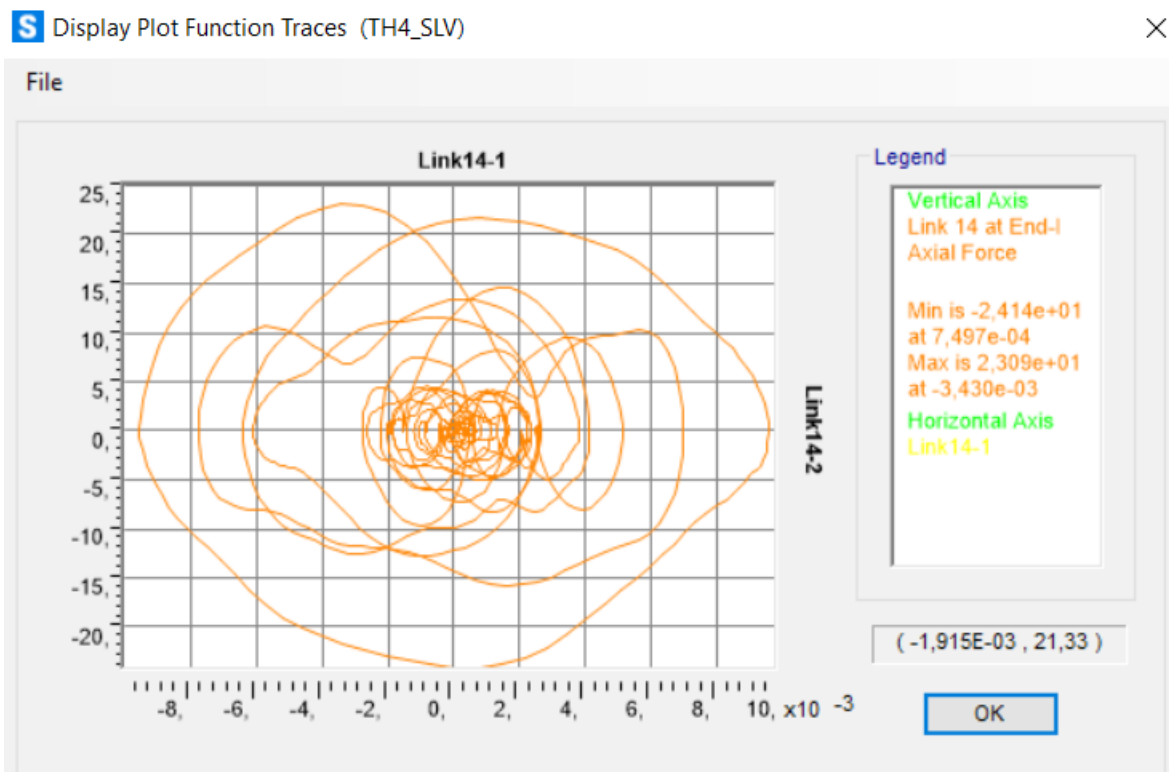


Figura 507. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

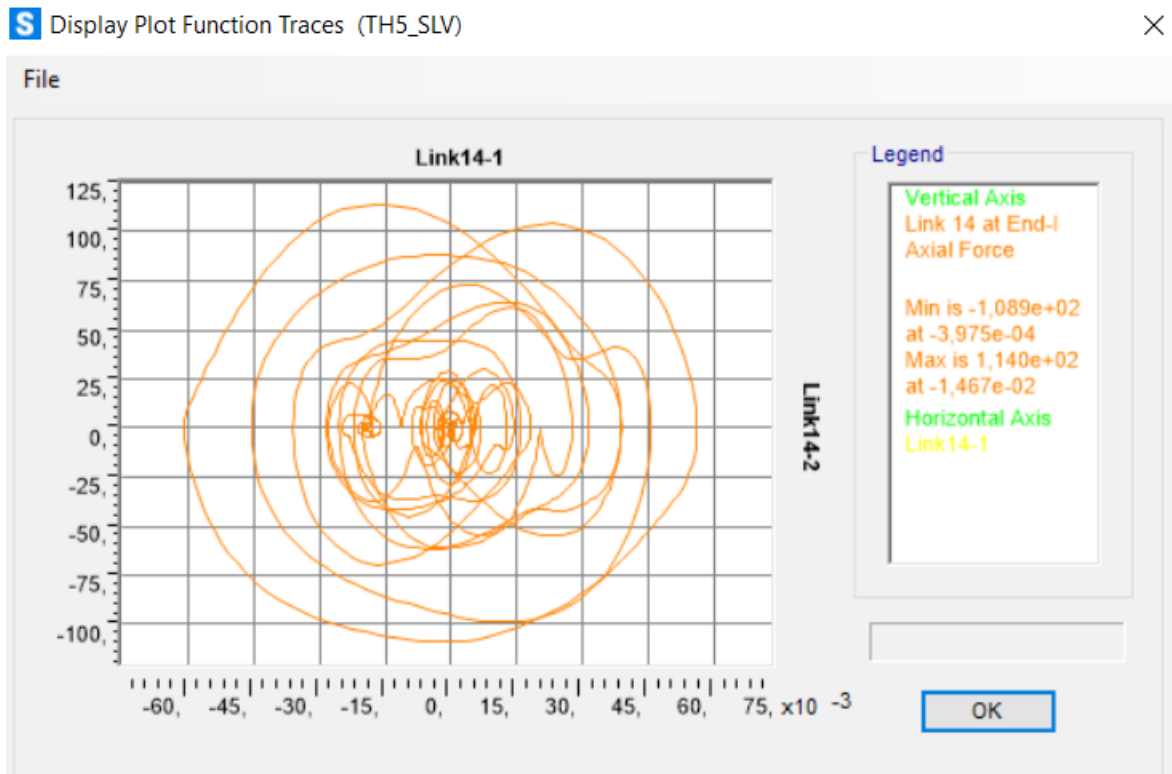


Figura 508. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

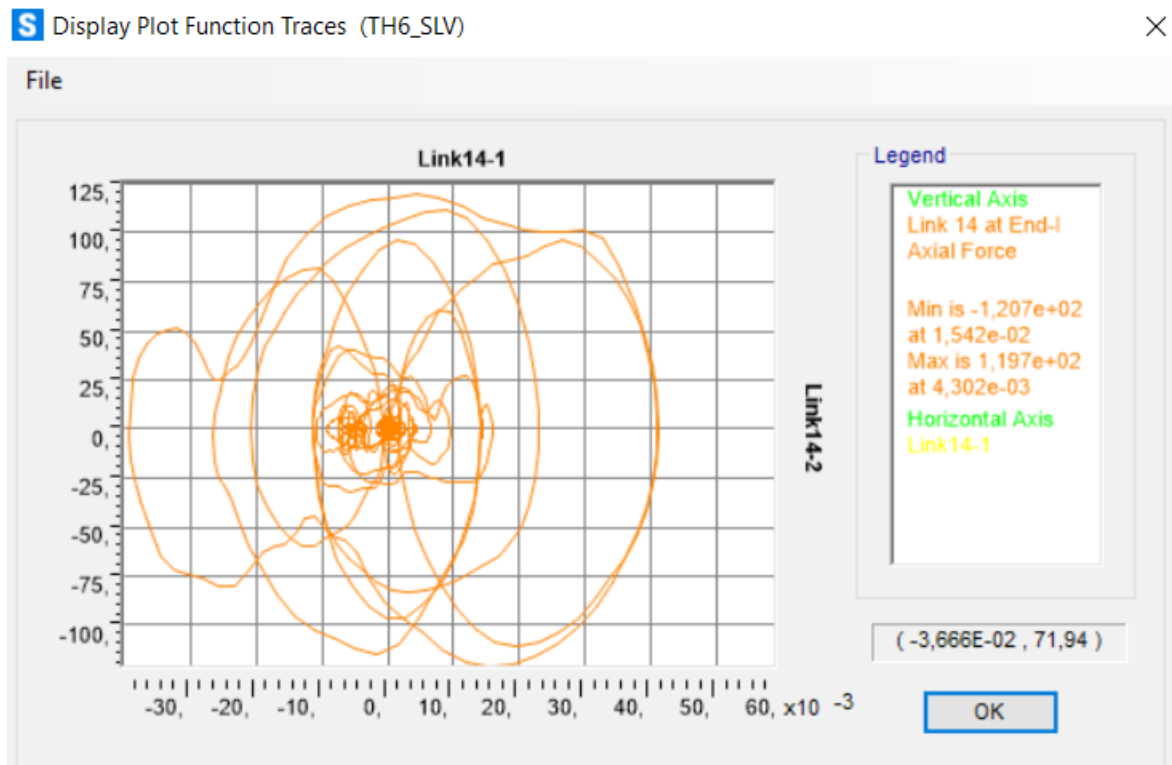


Figura 509. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

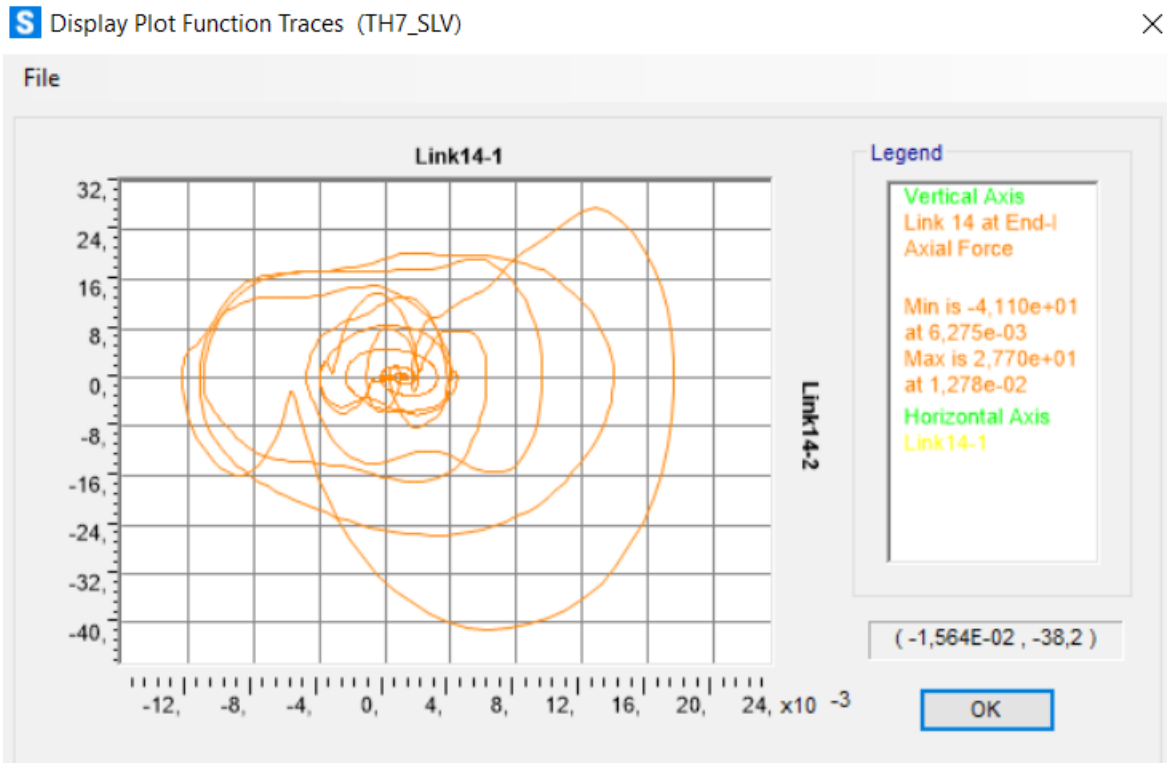


Figura 510. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

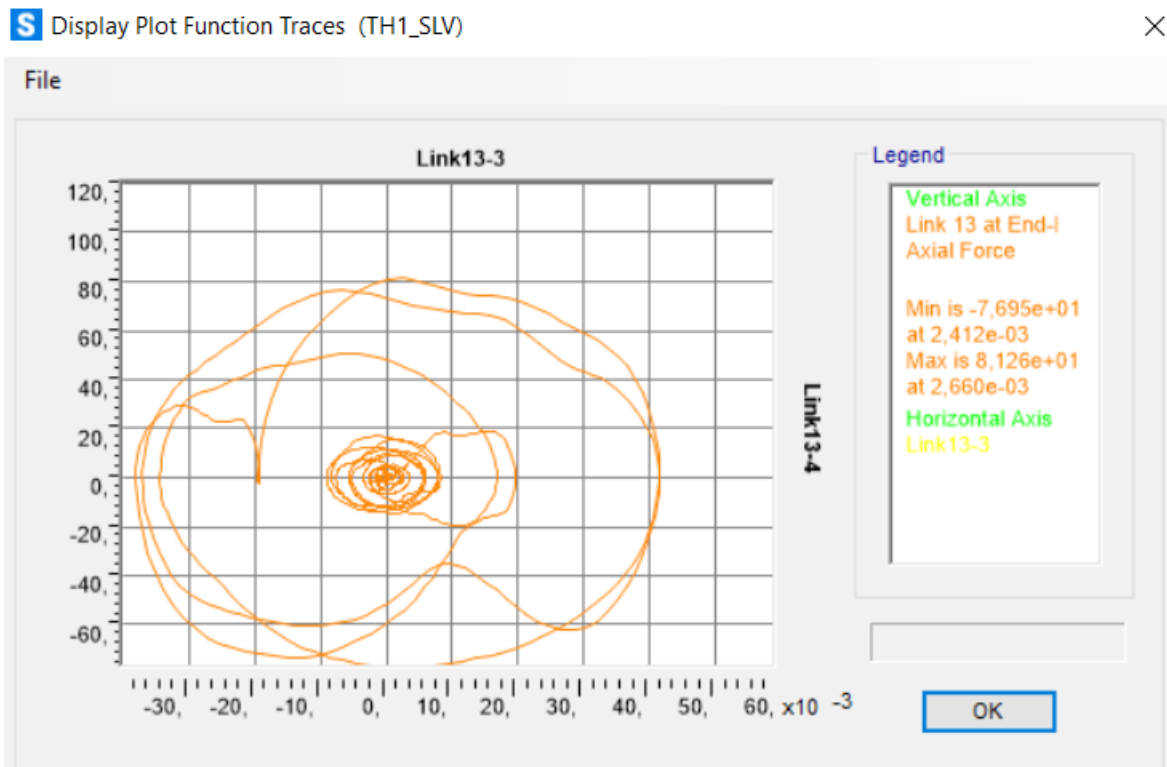


Figura 511. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

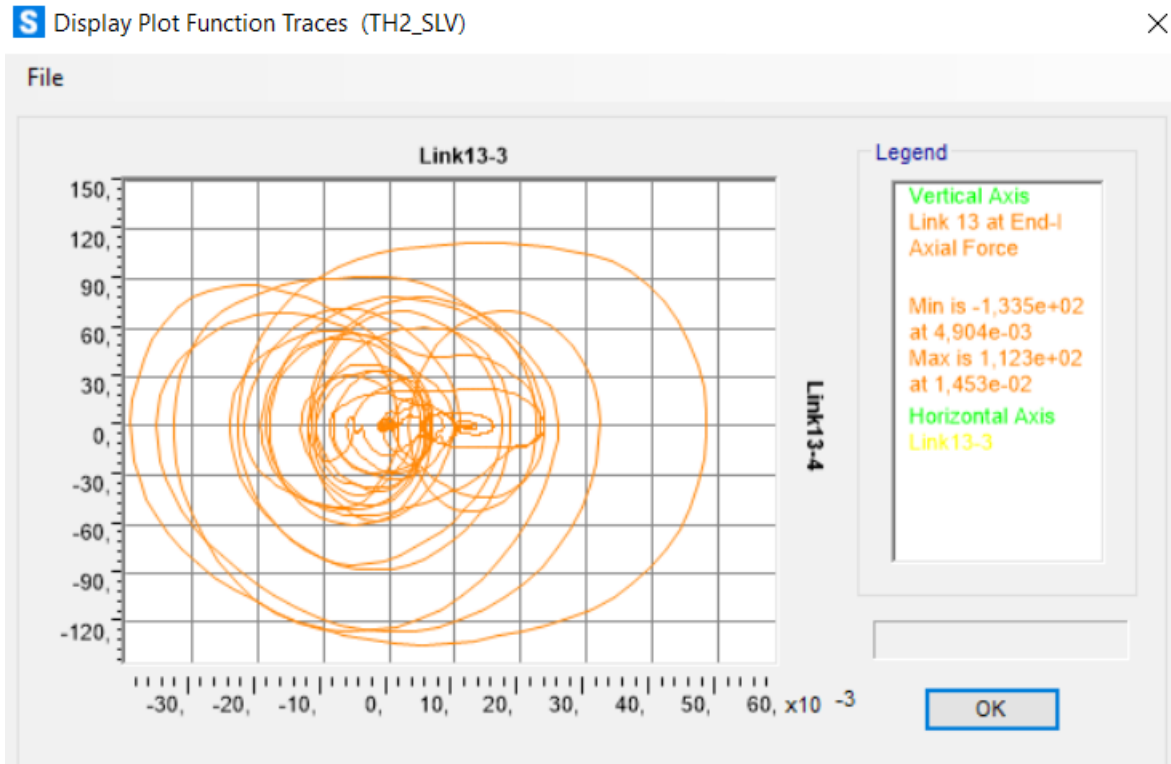


Figura 512. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

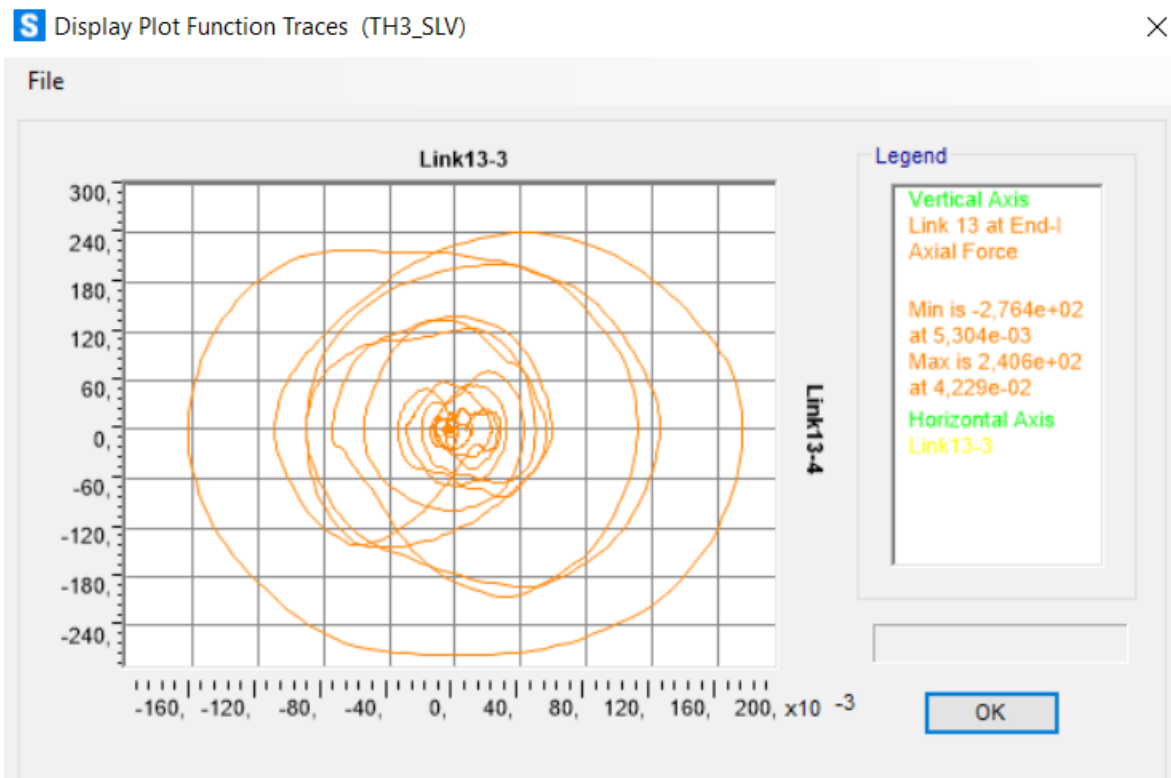


Figura 513. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

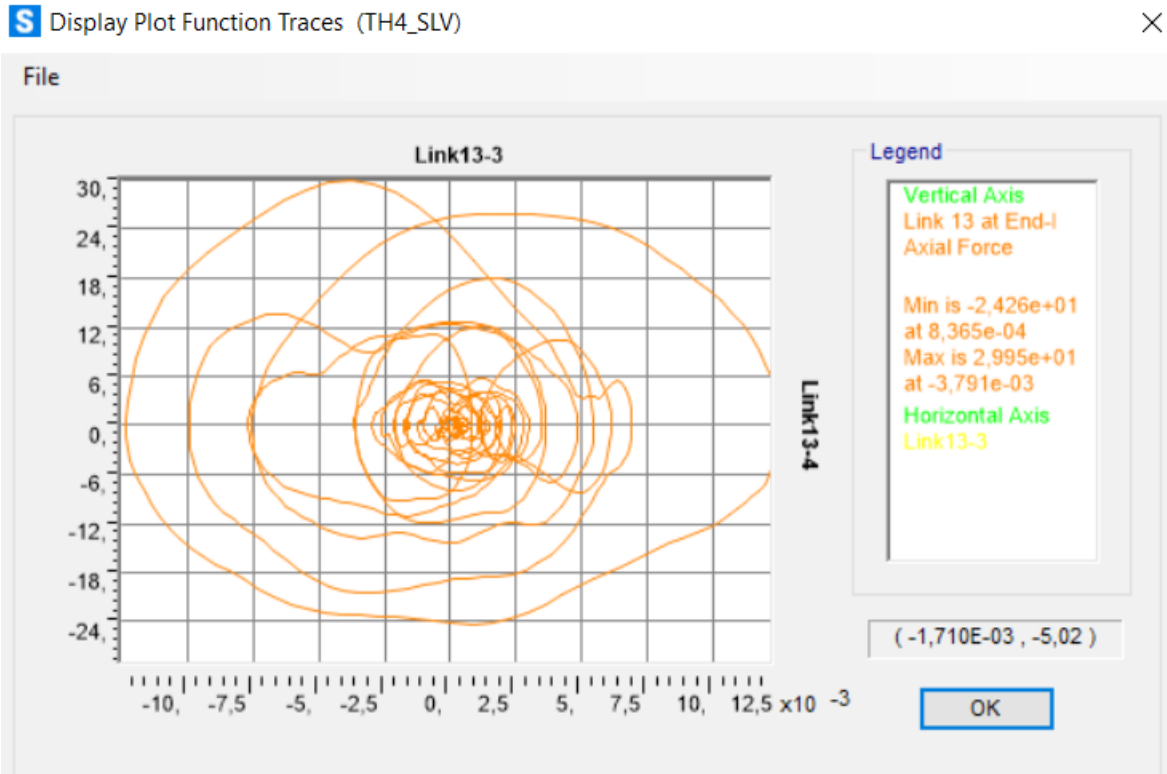


Figura 514. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

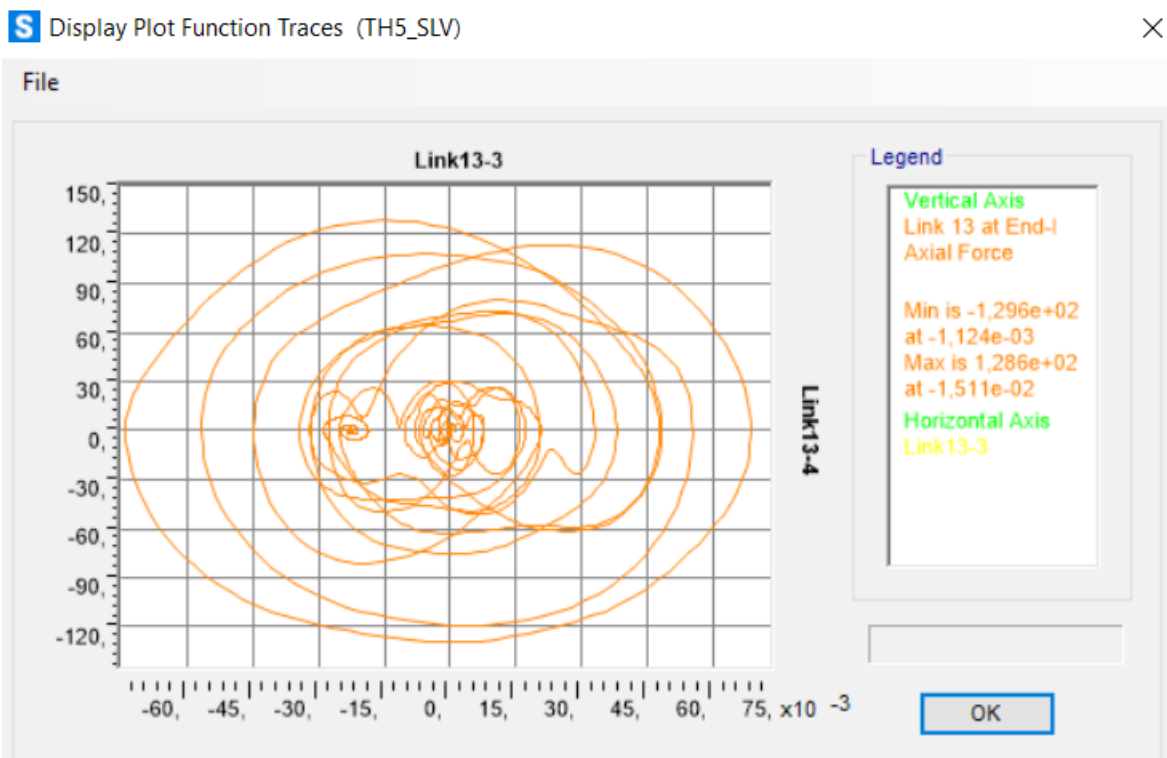


Figura 515. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

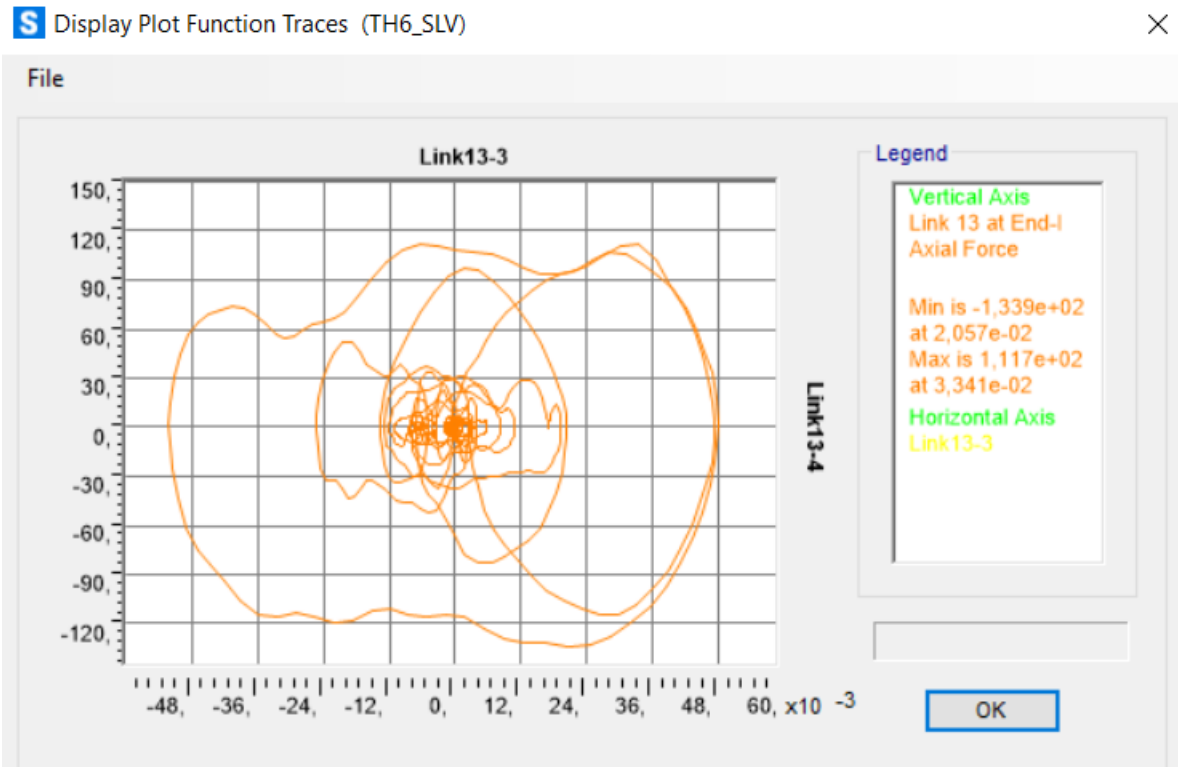


Figura 516. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

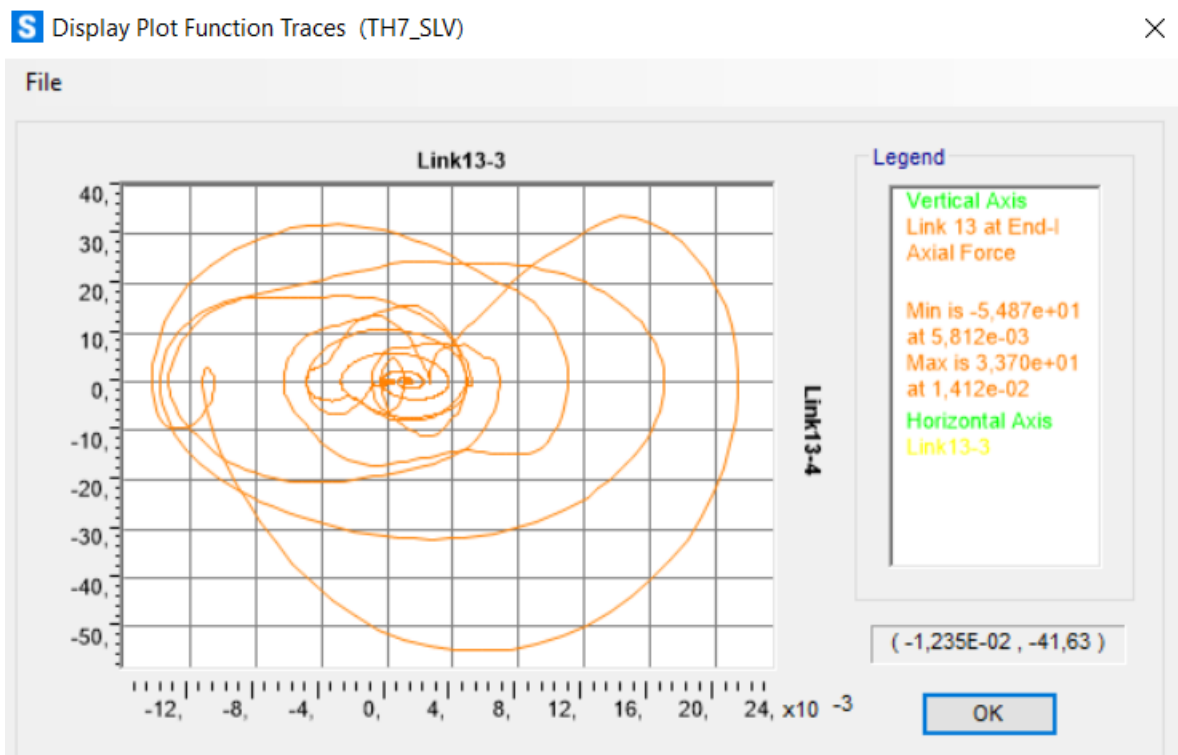


Figura 517. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Spostamenti, forze di dissipazione e cicli di isteresi dei dissipatori viscosi equivalenti del telaio 20-15-9-4 in direzione y:

Telaio 20-15-9-4 (direzione y)			
N° piano	N° label	U1x	U2y
(-)	(-)	(m)	(m)
3	16	0,0355	0,0050
4	20	0,0472	0,0052
5	21	0,0584	0,0060

Telaio 20-15-9-4 (direzione y)		
N° piano	N° label	Fd
(-)	(-)	(kN)
3	16	80,90
4	20	95,23
5	21	116,17

Piano 3:

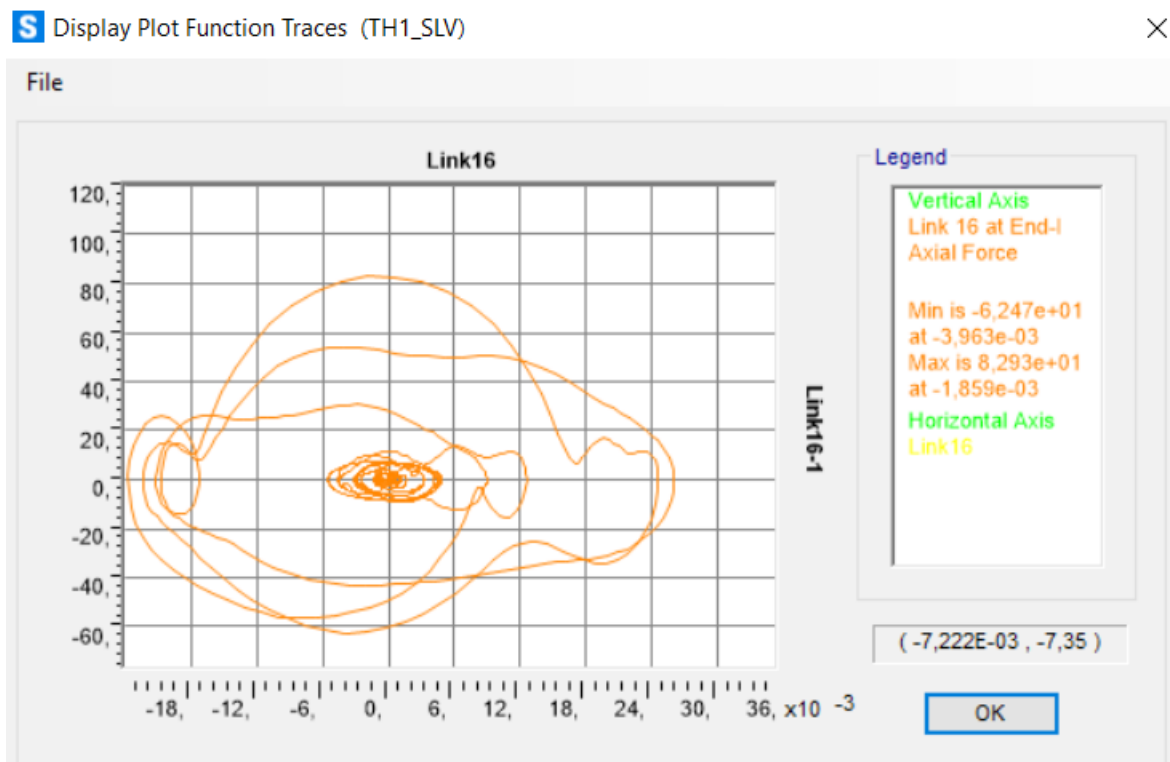


Figura 518. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

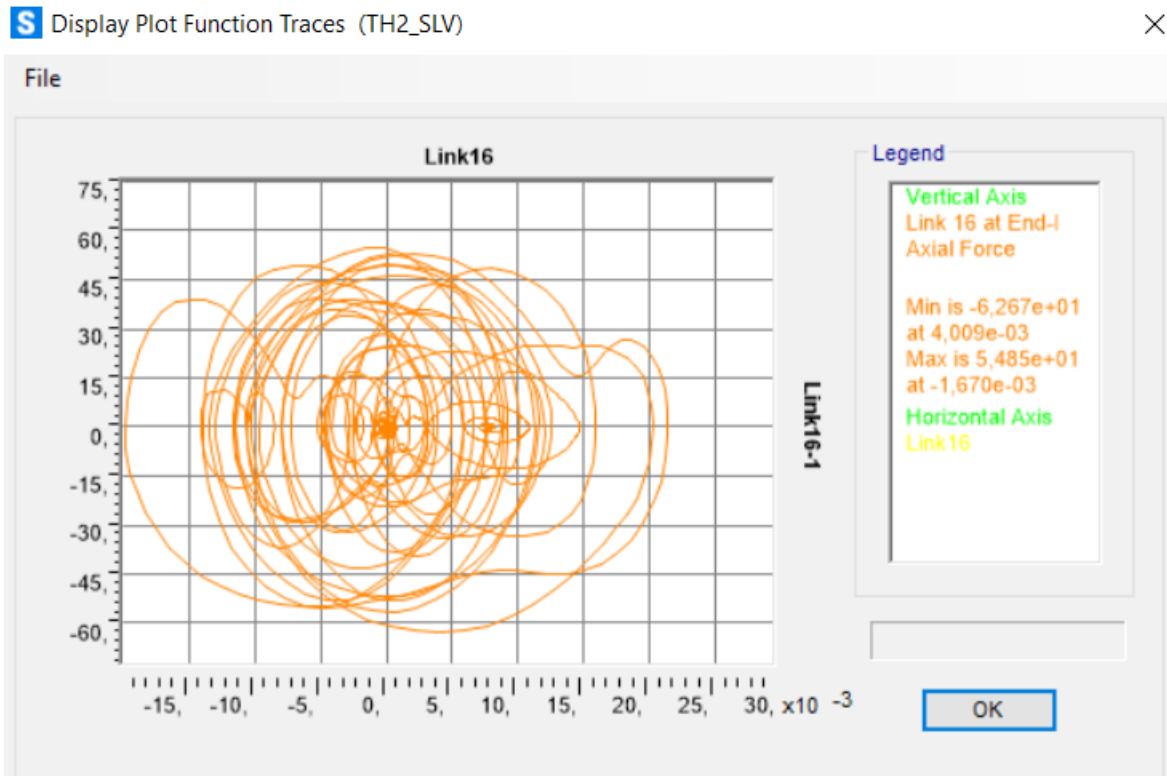


Figura 519. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

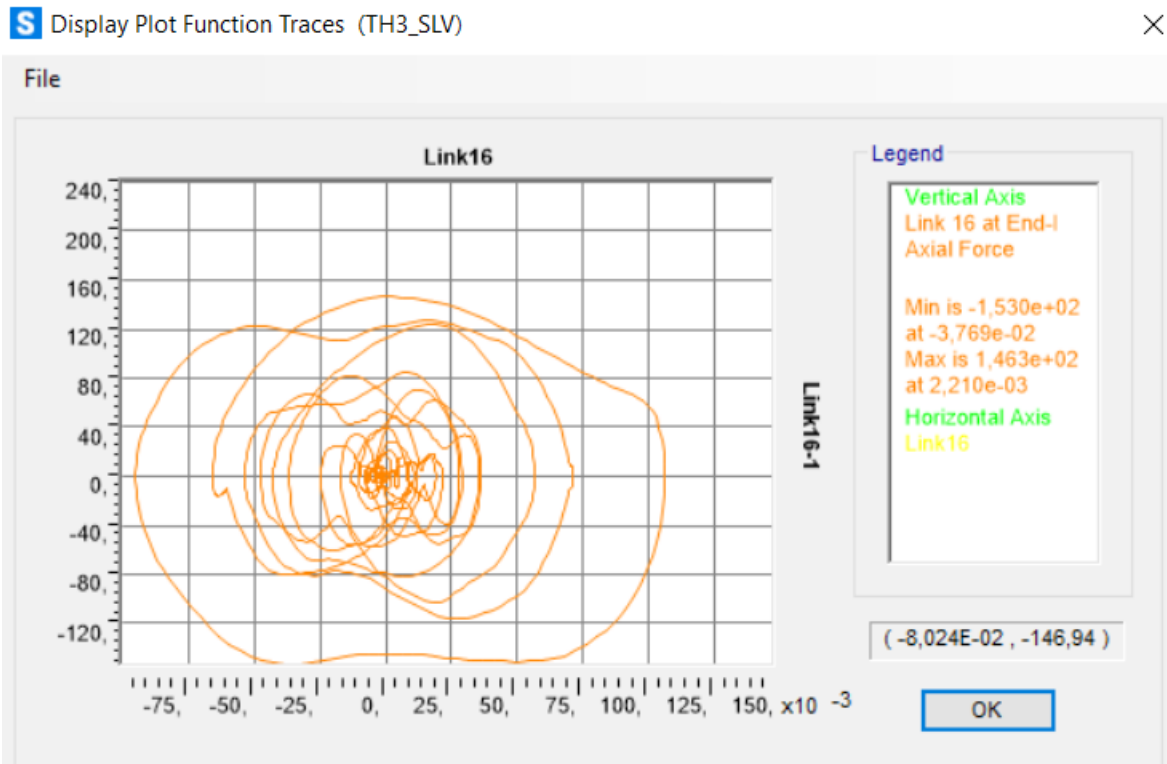


Figura 520. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

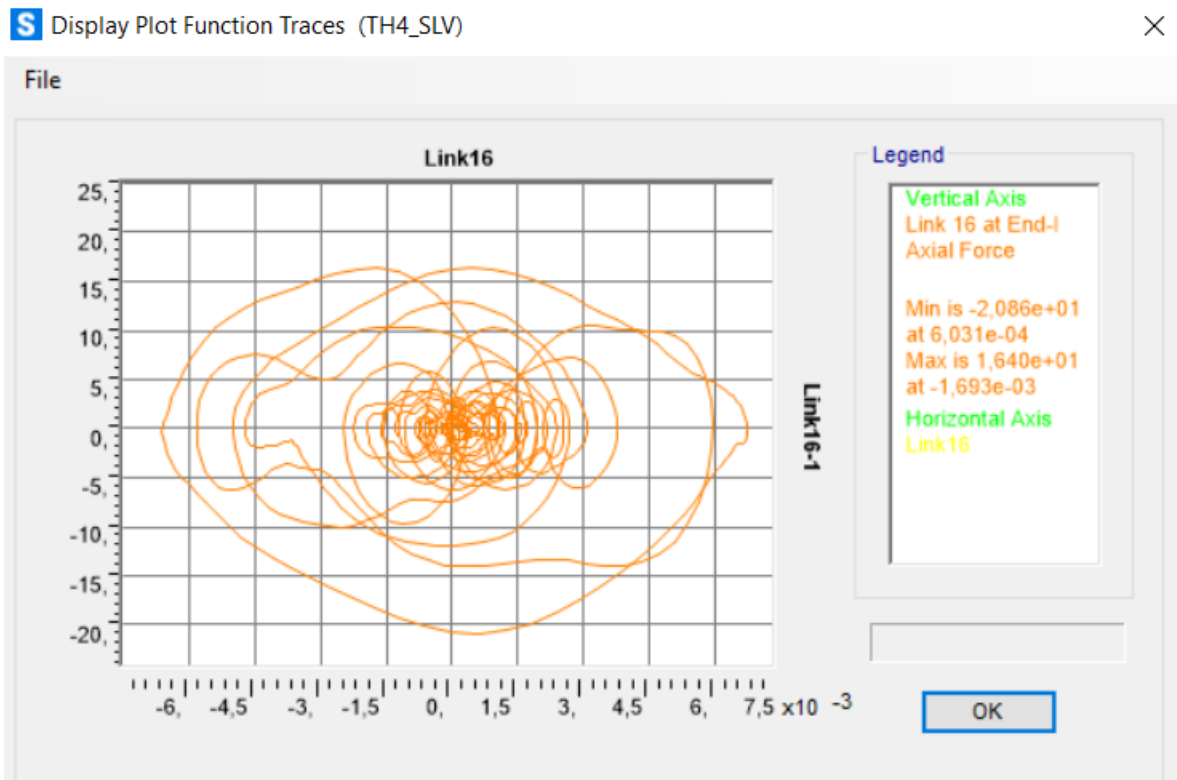


Figura 521. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

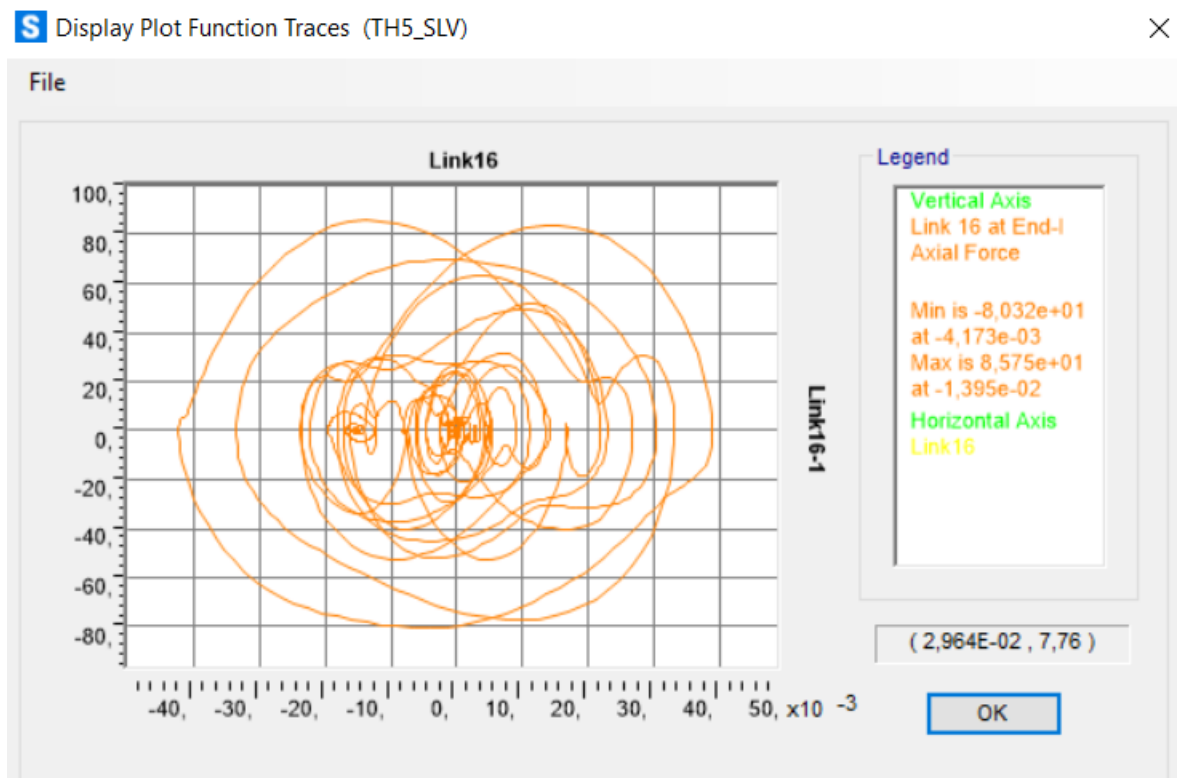


Figura 522. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

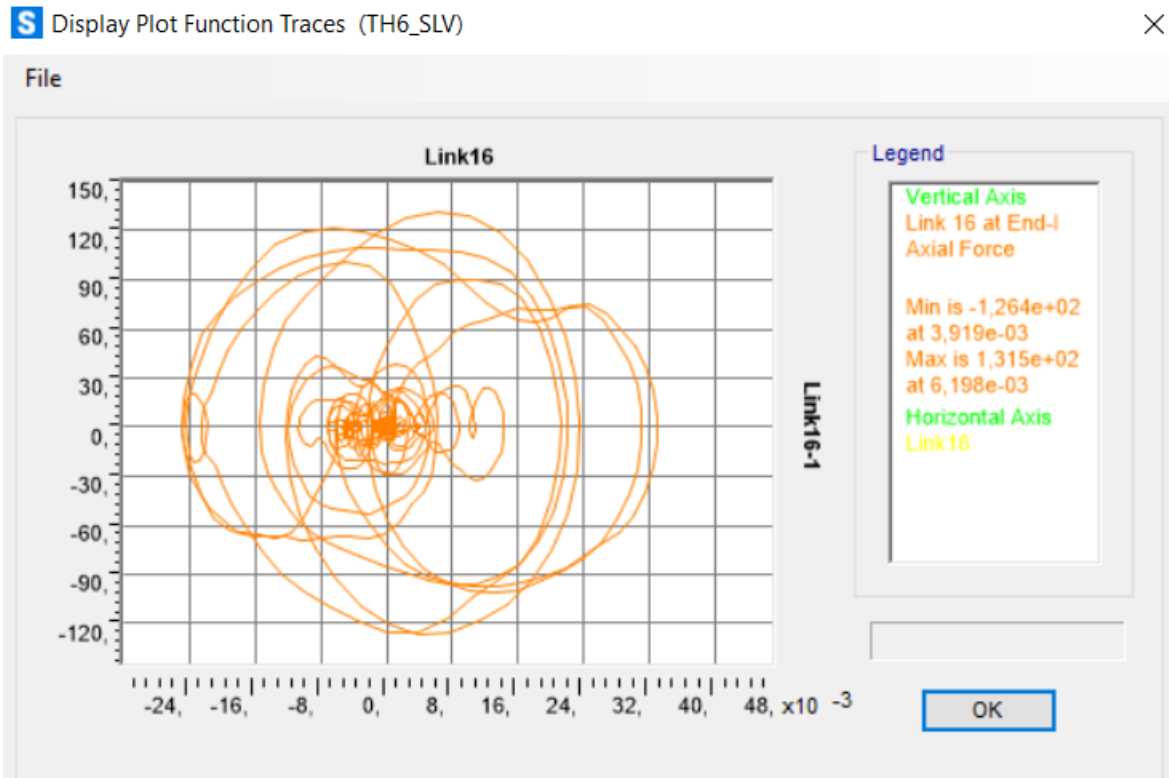


Figura 523. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

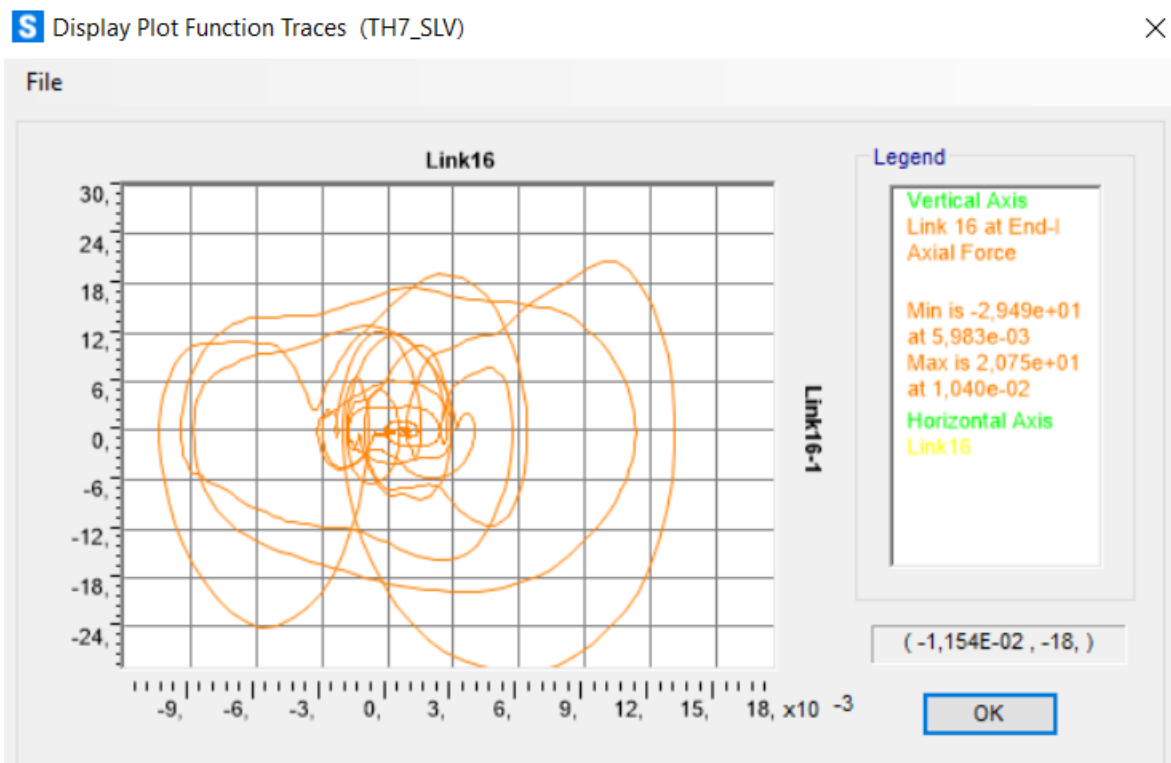


Figura 524. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Piano 4:

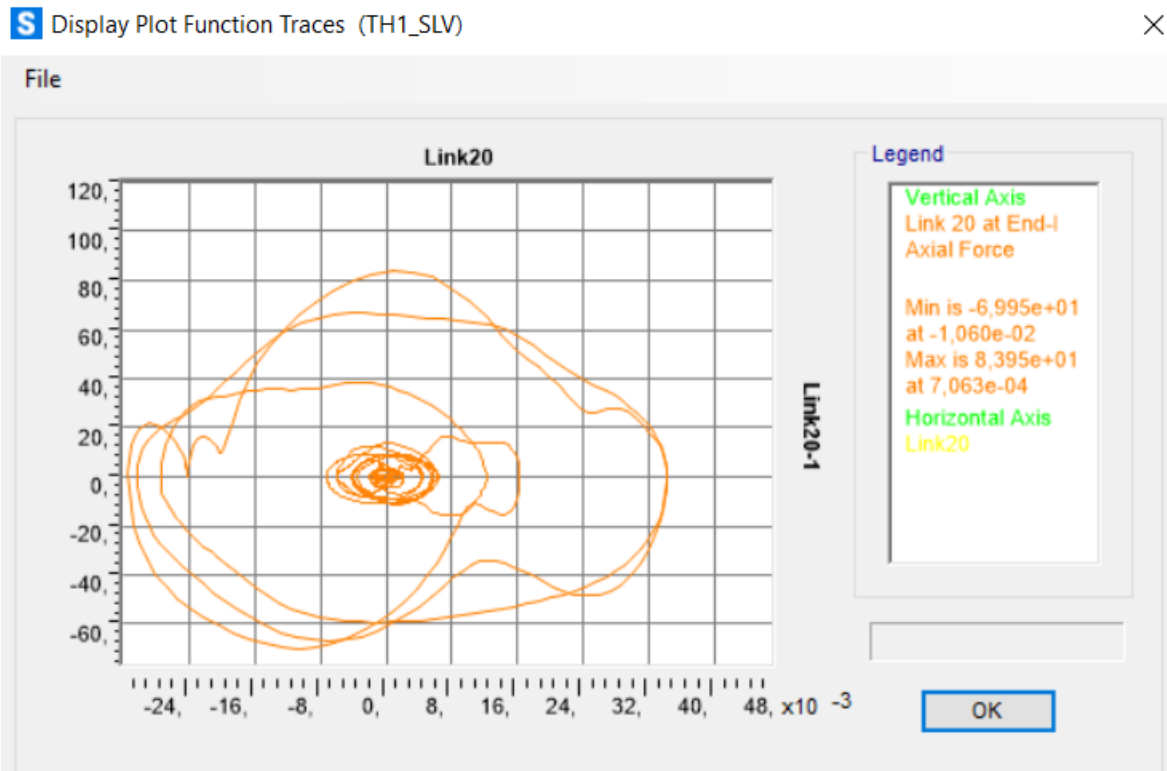


Figura 525. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

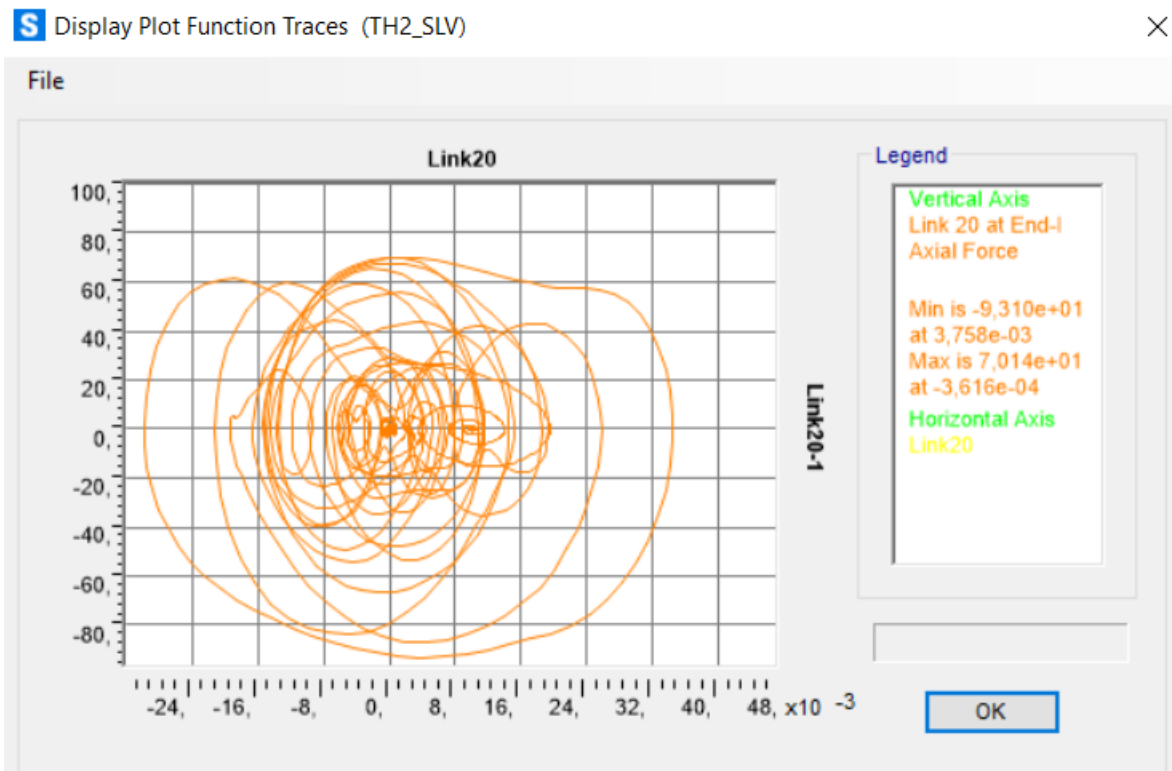


Figura 526. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

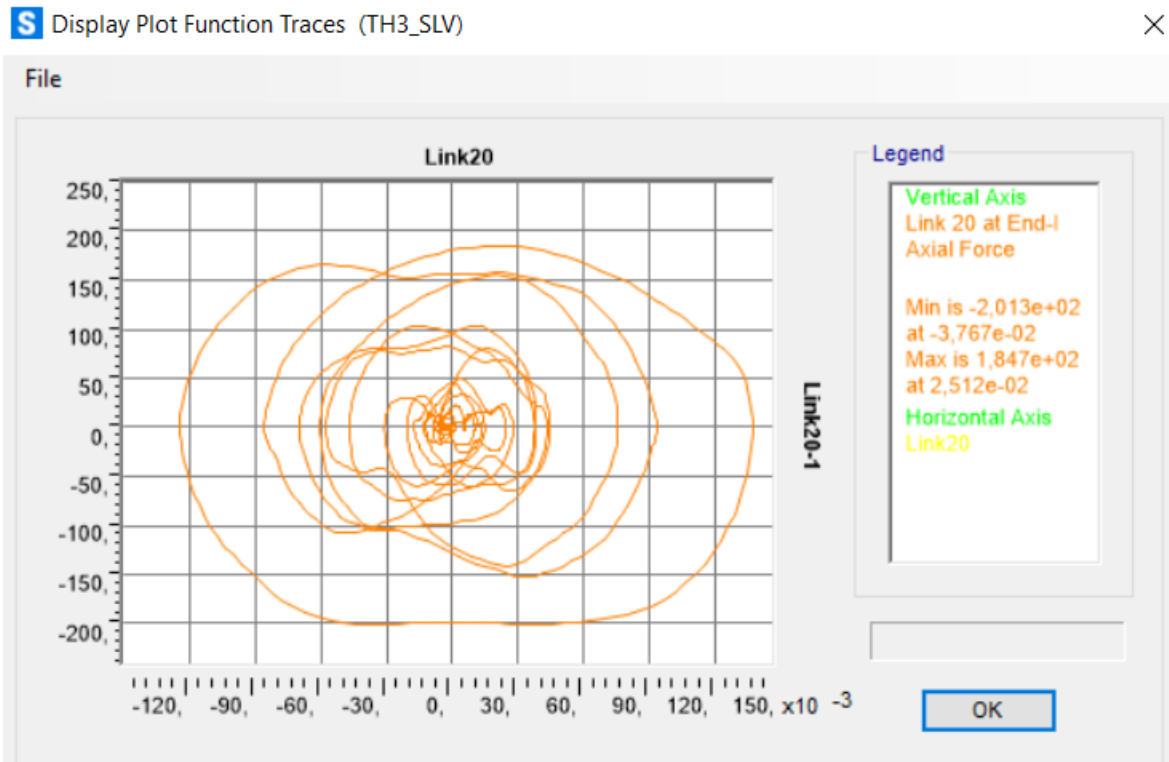


Figura 527. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

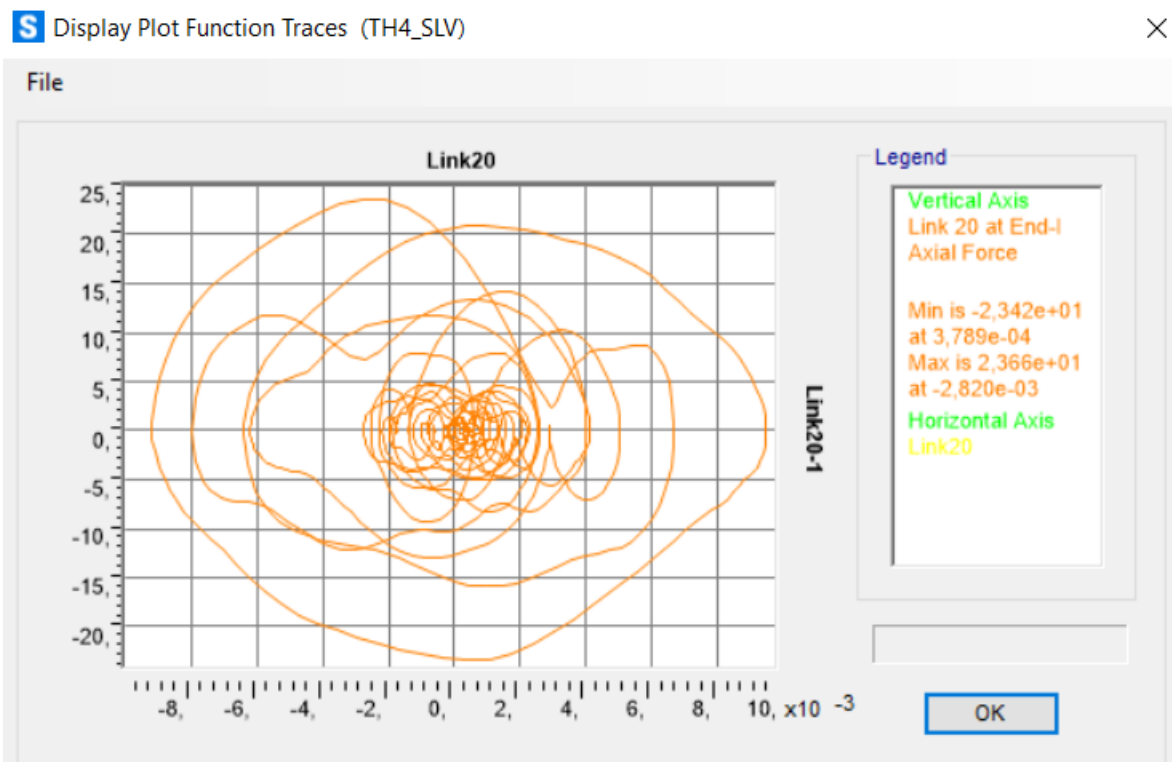


Figura 528. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

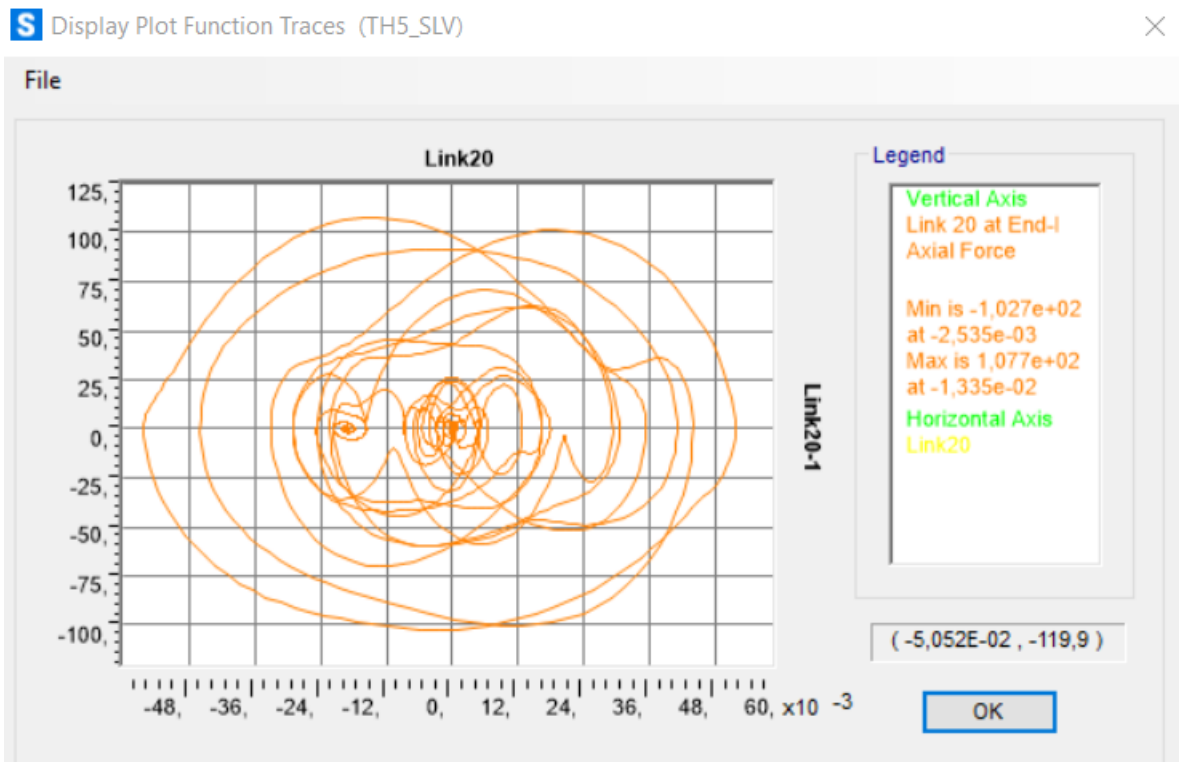


Figura 529. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

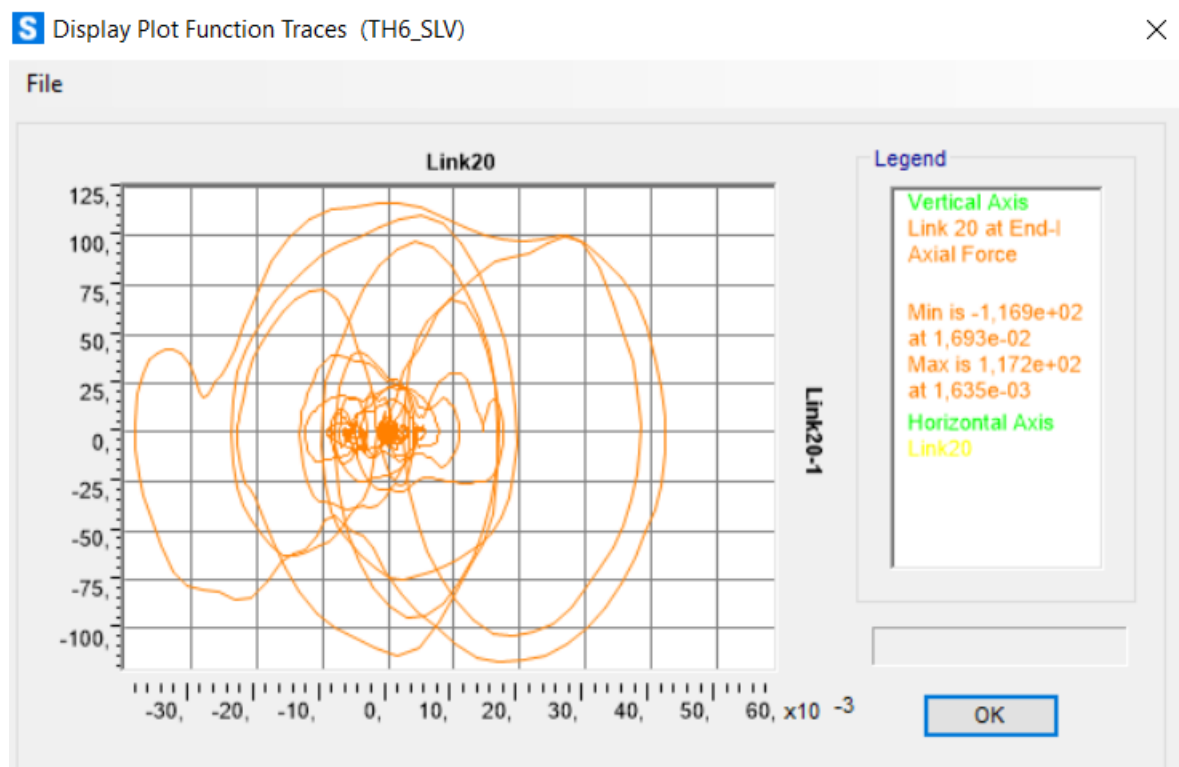


Figura 530. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

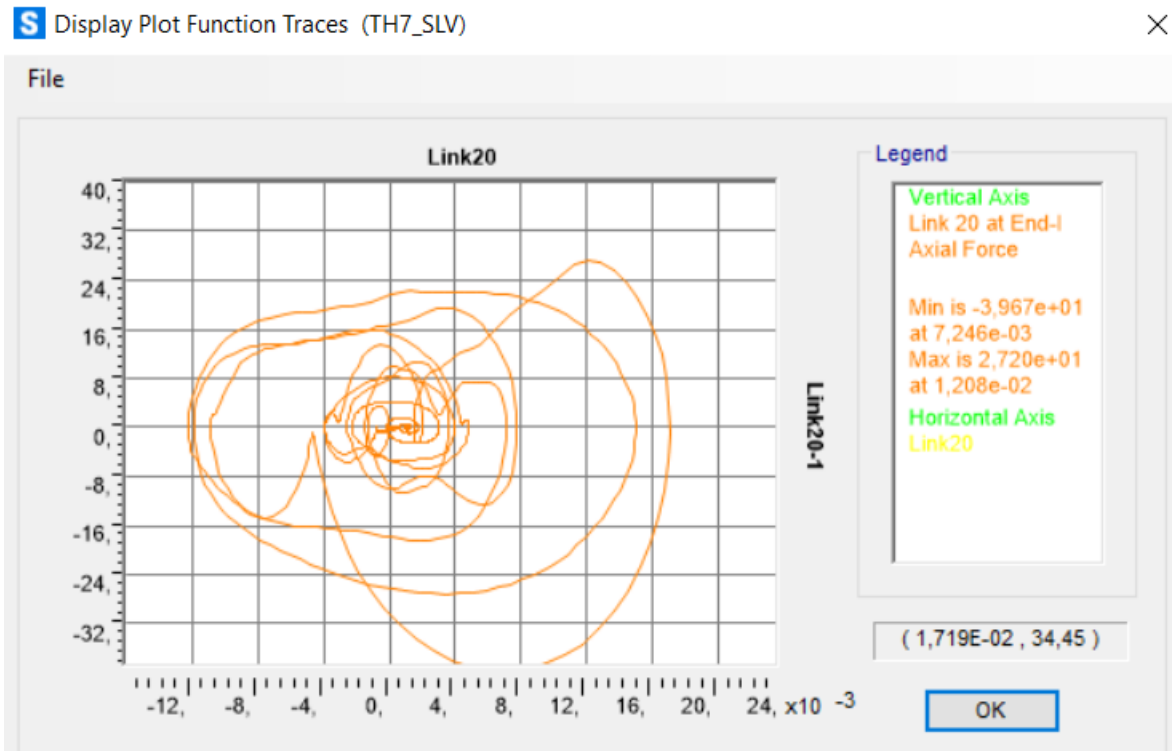


Figura 531. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Piano 5:

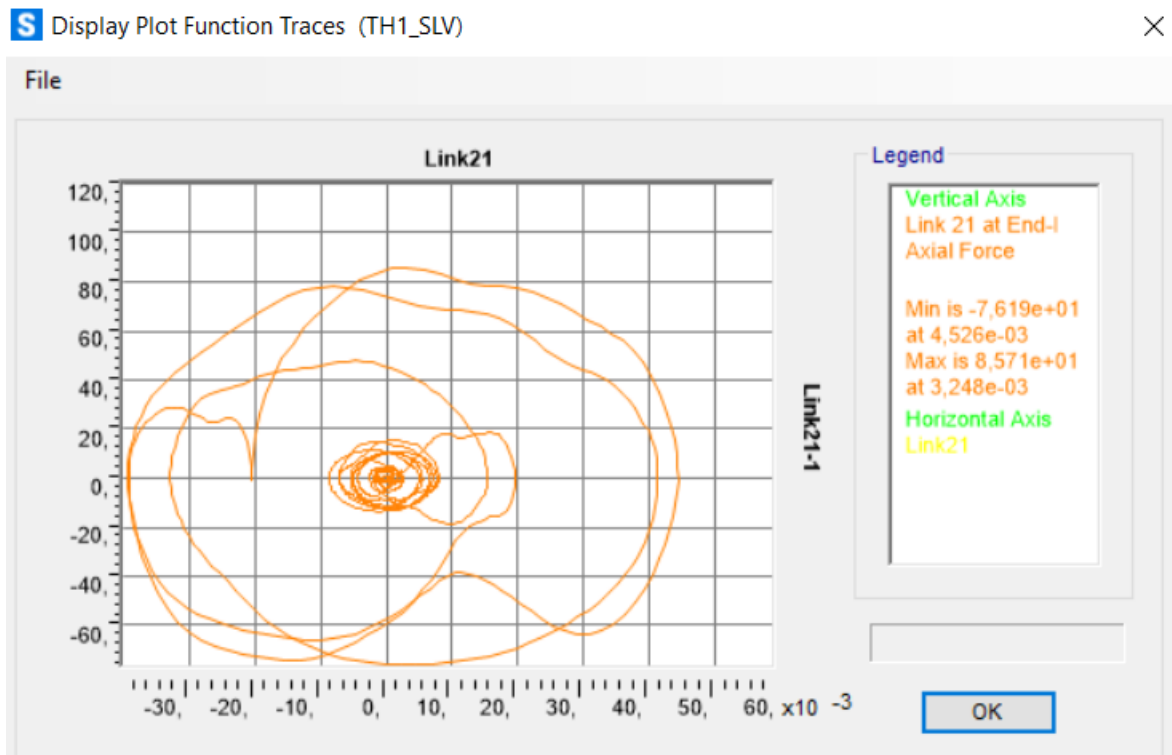


Figura 532. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

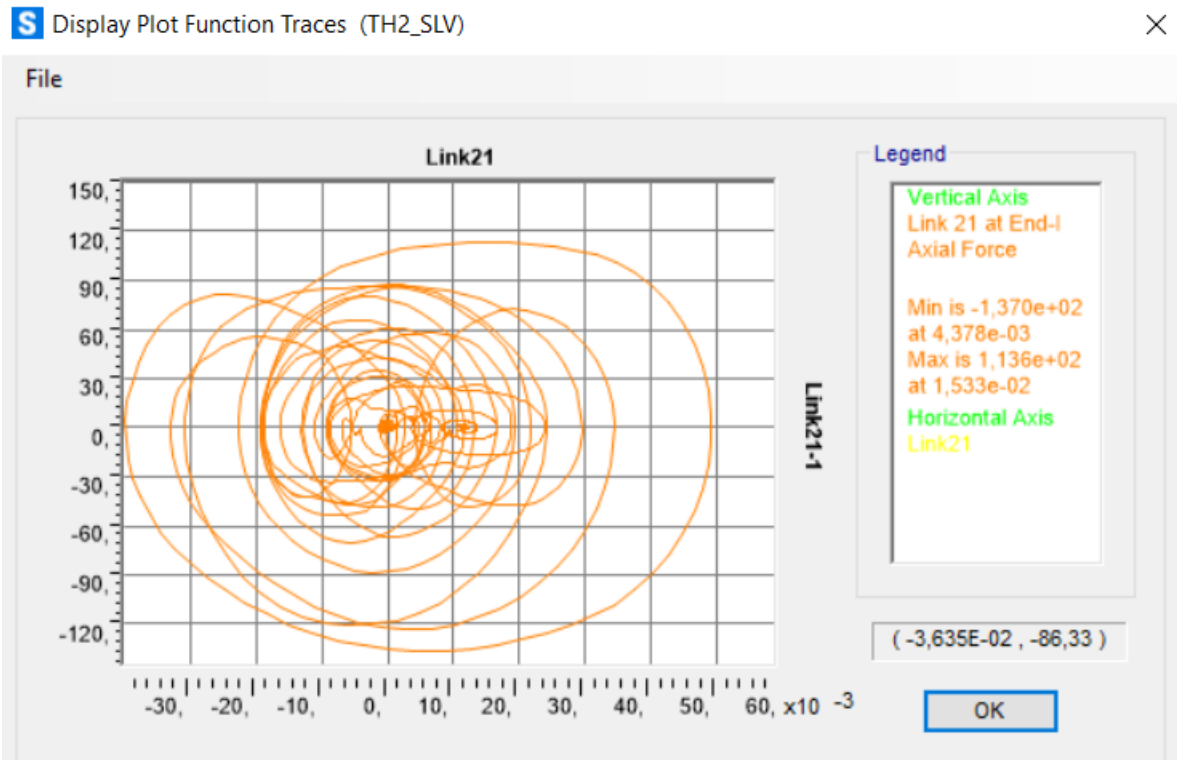


Figura 533. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 2.

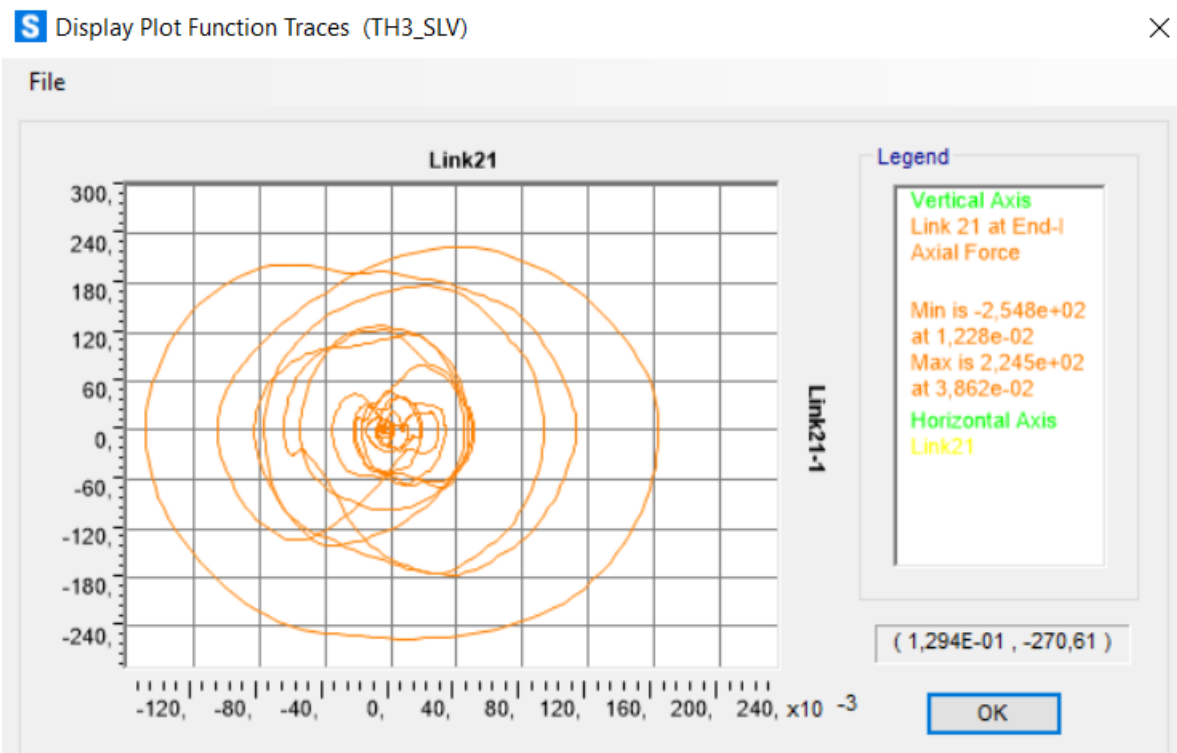


Figura 534. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 3.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

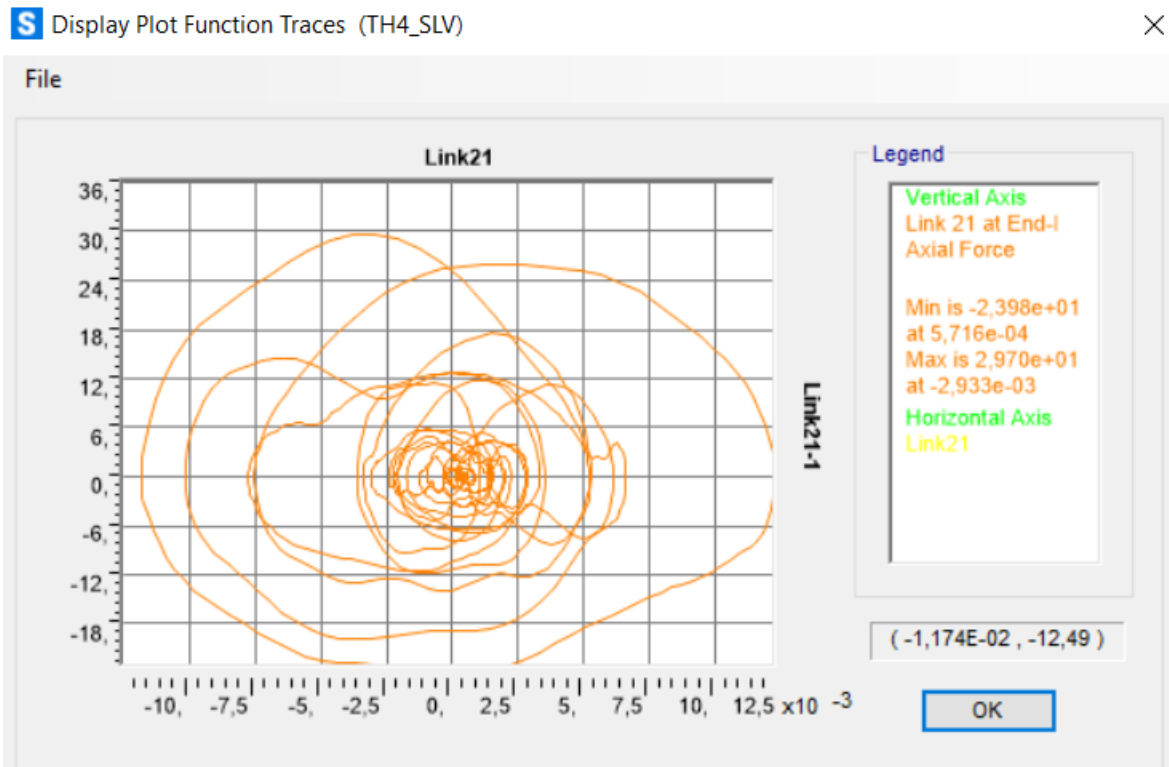


Figura 535. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 4.

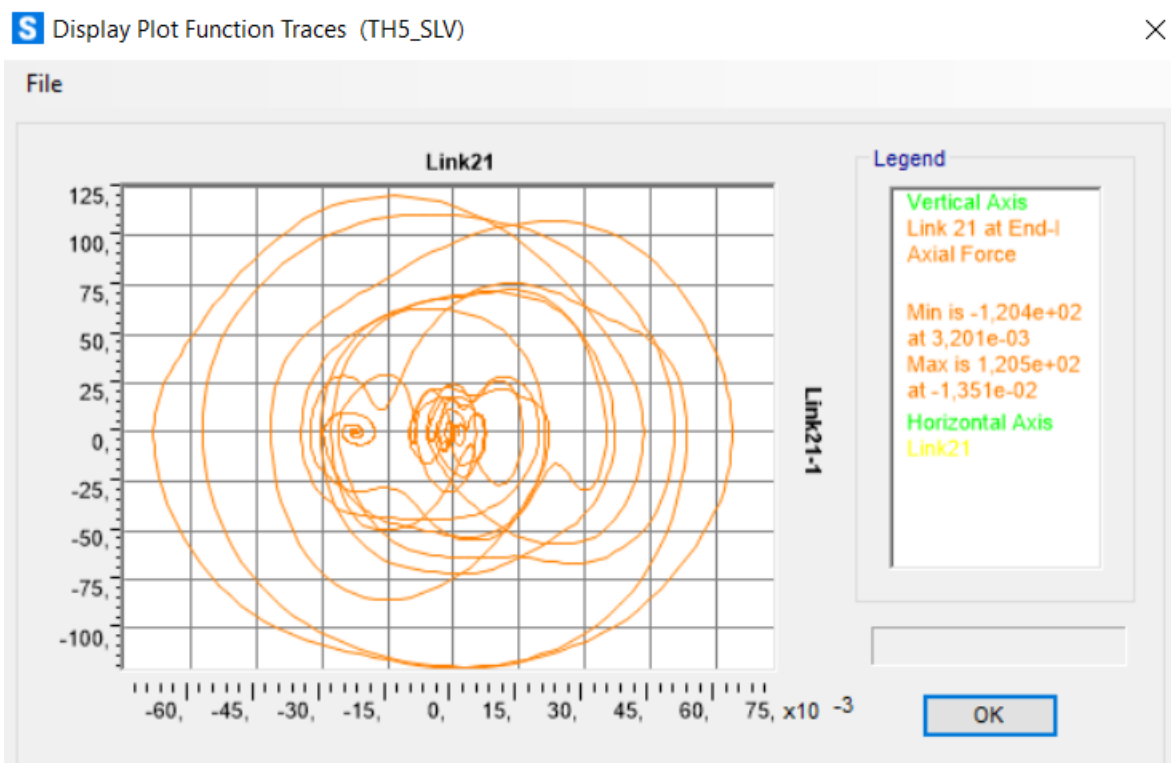


Figura 536. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 5.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

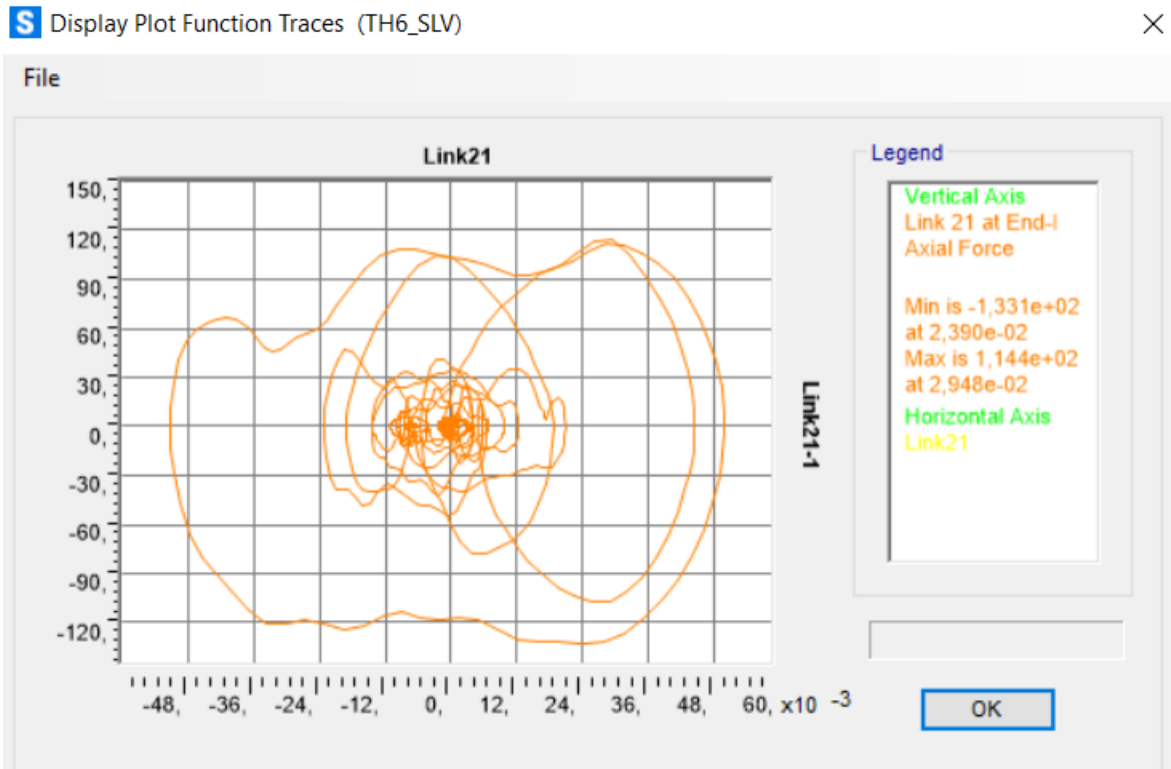


Figura 537. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 6.

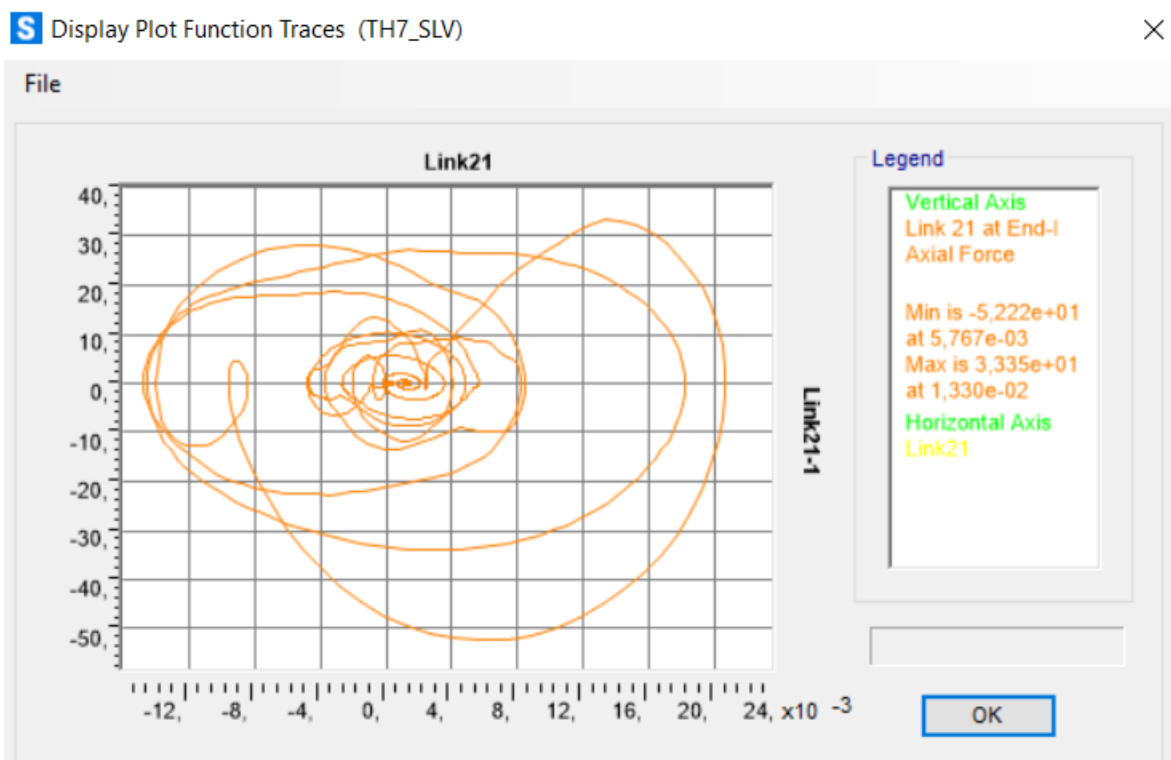


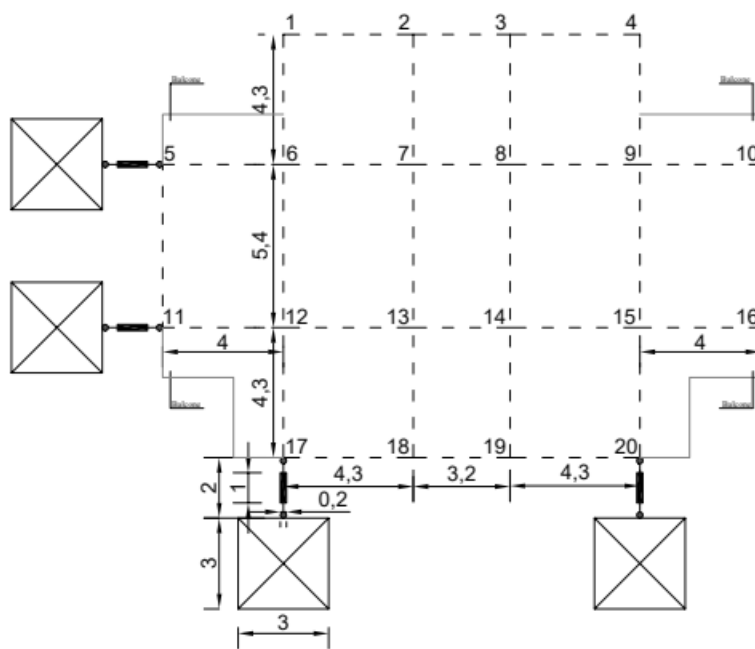
Figura 538. Ciclo di isteresi forza-spostamento relativo al load case 7.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Dopo aver completato lo studio dei quattro modelli di calcolo e dimostrato l'obiettivo di questa tesi di laurea magistrale in ingegneria civile, si espongono infine le tavole esecutive del modello finale scelto, ovvero quello con i dissipatori magnetoreologici alimentati in scala 1:200:

- Pianta dei fili fissi con i dissipatori sismici applicati (i 12 dissipatori sismici e le 4 strutture reticolari in acciaio, realizzate con profili HEA 260, presentano tutte le stesse dimensioni);
- Telaio strutturale 17-12-6-1 con i dissipatori sismici applicati;
- Telaio strutturale 20-15-9-4 con i dissipatori sismici applicati;
- Telaio strutturale 5-6-7-8-9-10 con i dissipatori sismici applicati;
- Telaio strutturale 11-12-13-14-15-16 con i dissipatori sismici applicati.

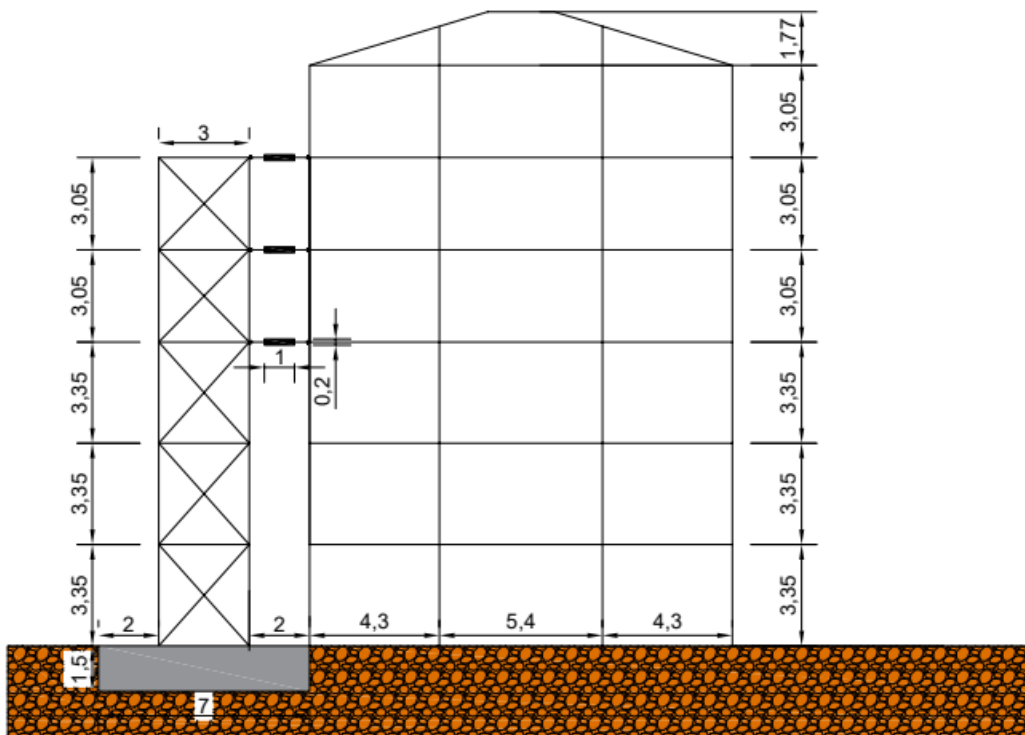
Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo



Pianta dei fili fissi

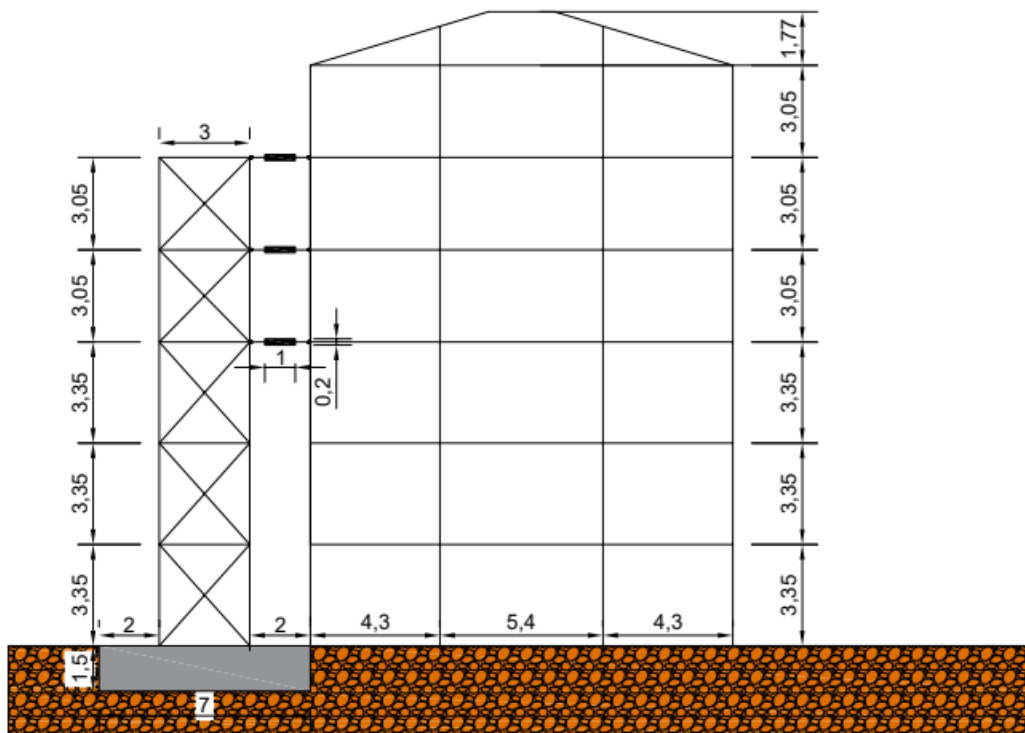
Scala 1:200

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo



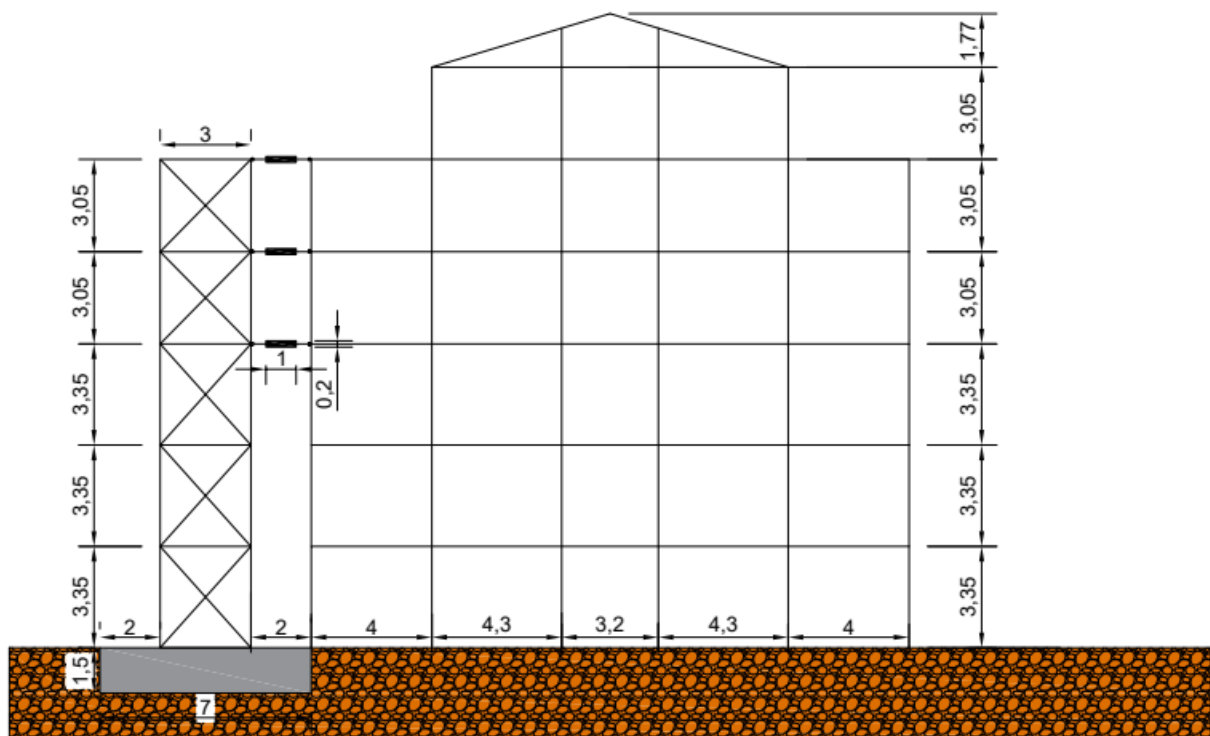
Telaio strutturale 17-12-6-1
Scala 1:200

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo



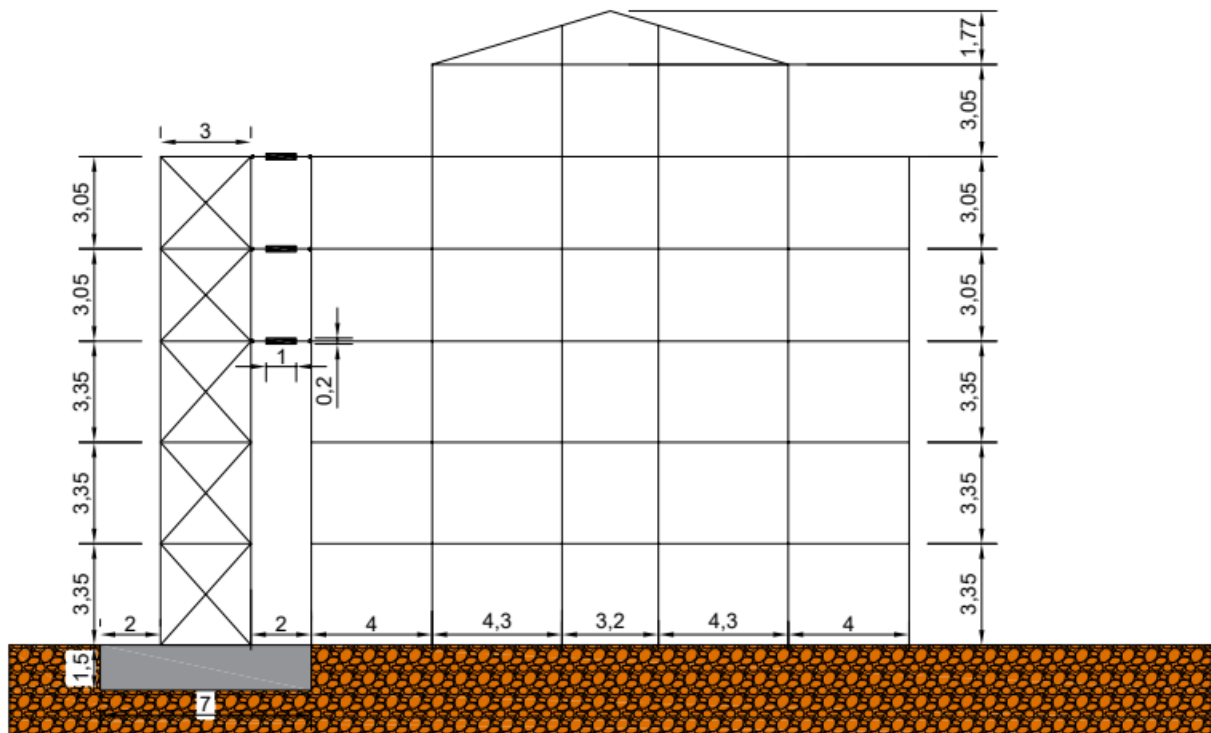
Telaio strutturale 20-15-9-4
Scala 1:200

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo



Telaio strutturale 5-6-7-8-9-10
Scala 1:200

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo



Telaio strutturale 11-12-13-14-15-16
Scala 1:200

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Inoltre si espongono anche le immagini non in scala derivanti dal programma di calcolo agli elementi finiti Sap 2000 per una maggior chiarezza:

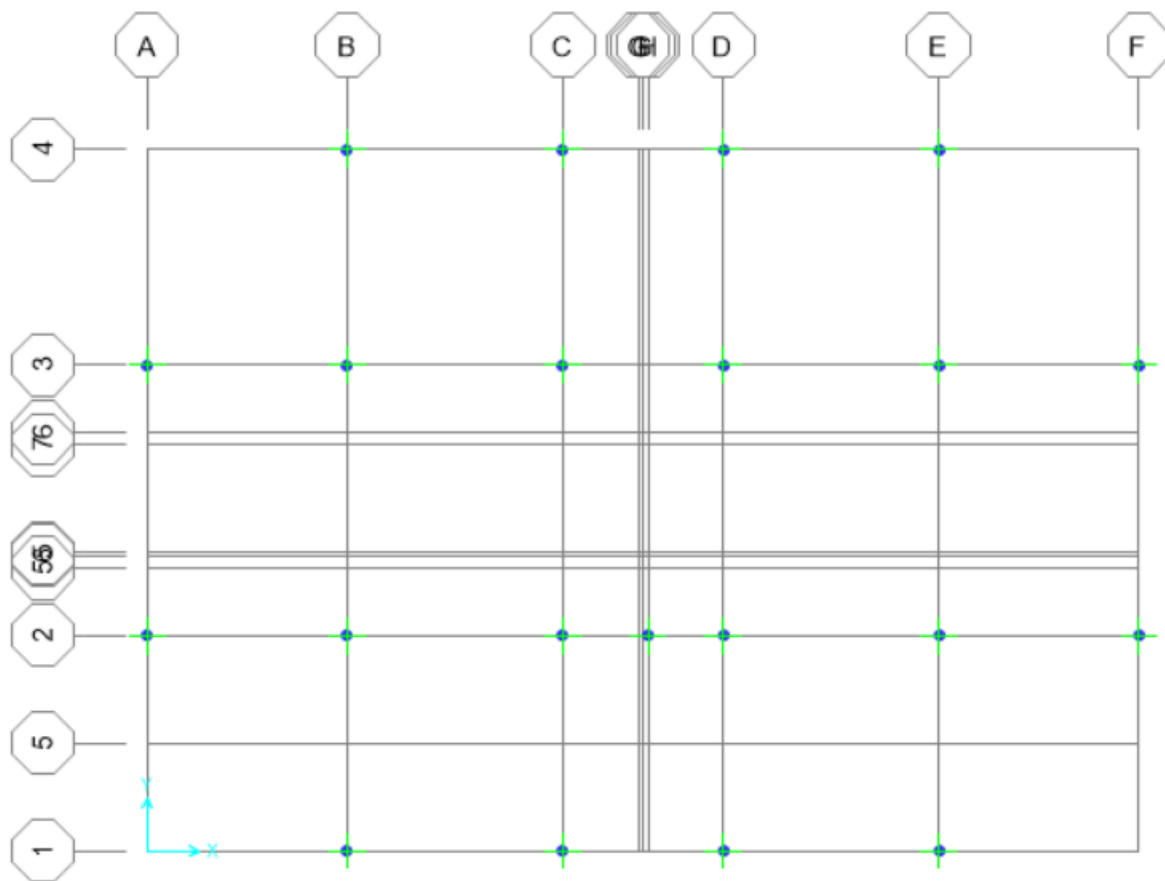


Figura 539. Modello in pianta delle fondazioni.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

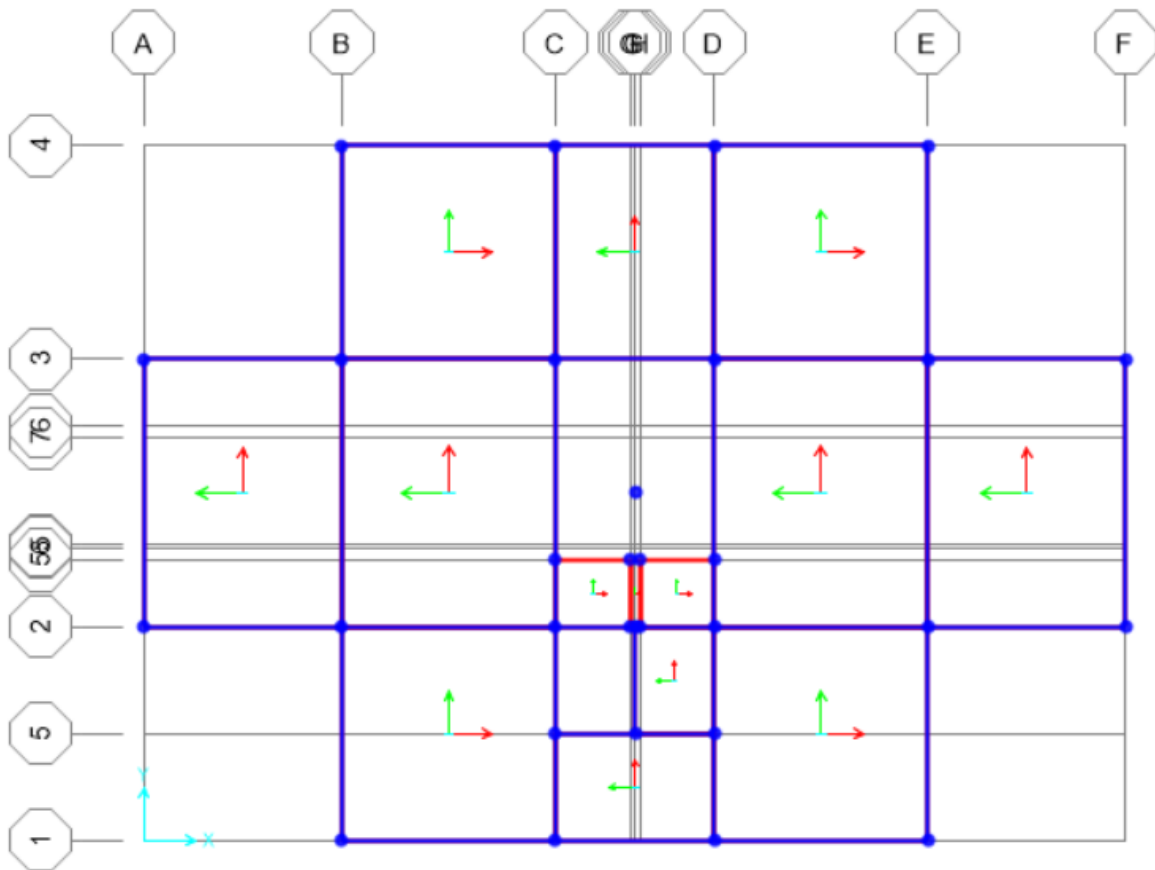


Figura 540. Modello in pianta del piano primo.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

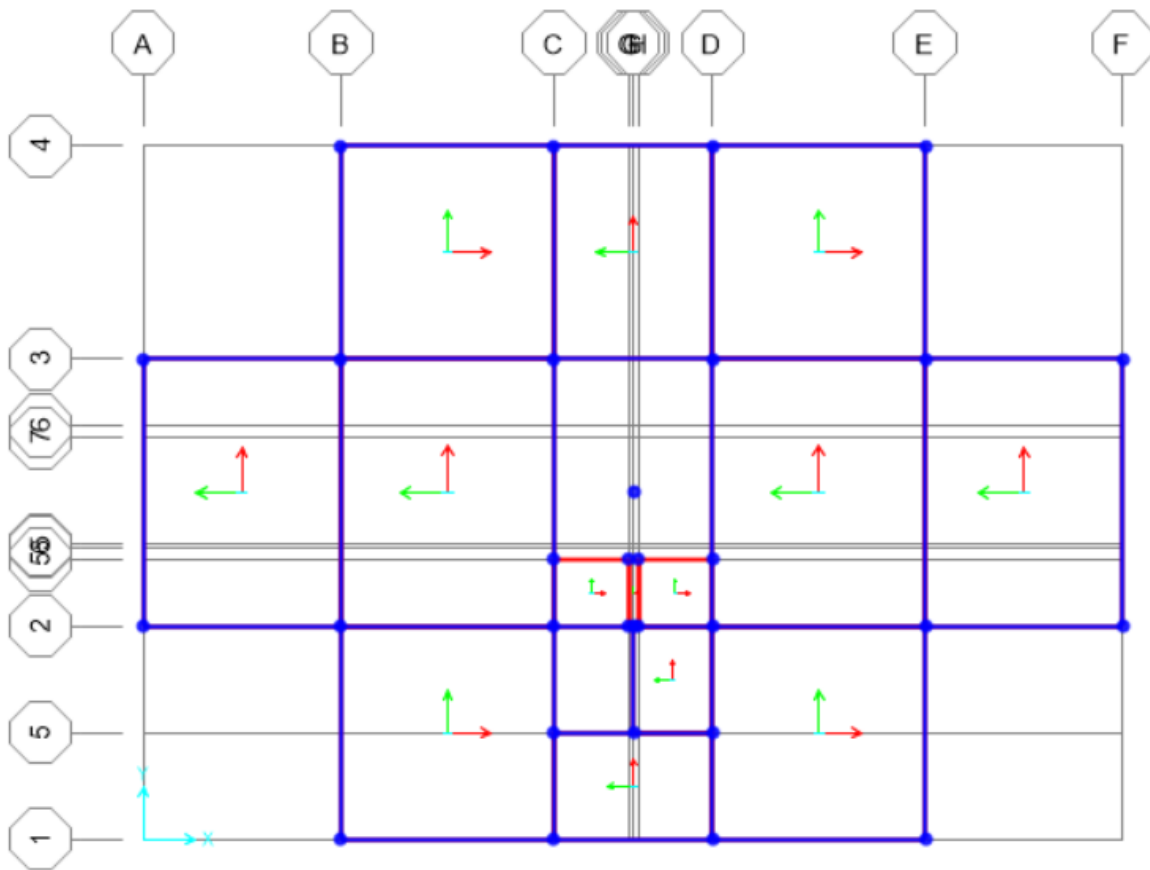


Figura 541. Modello in pianta del piano secondo.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

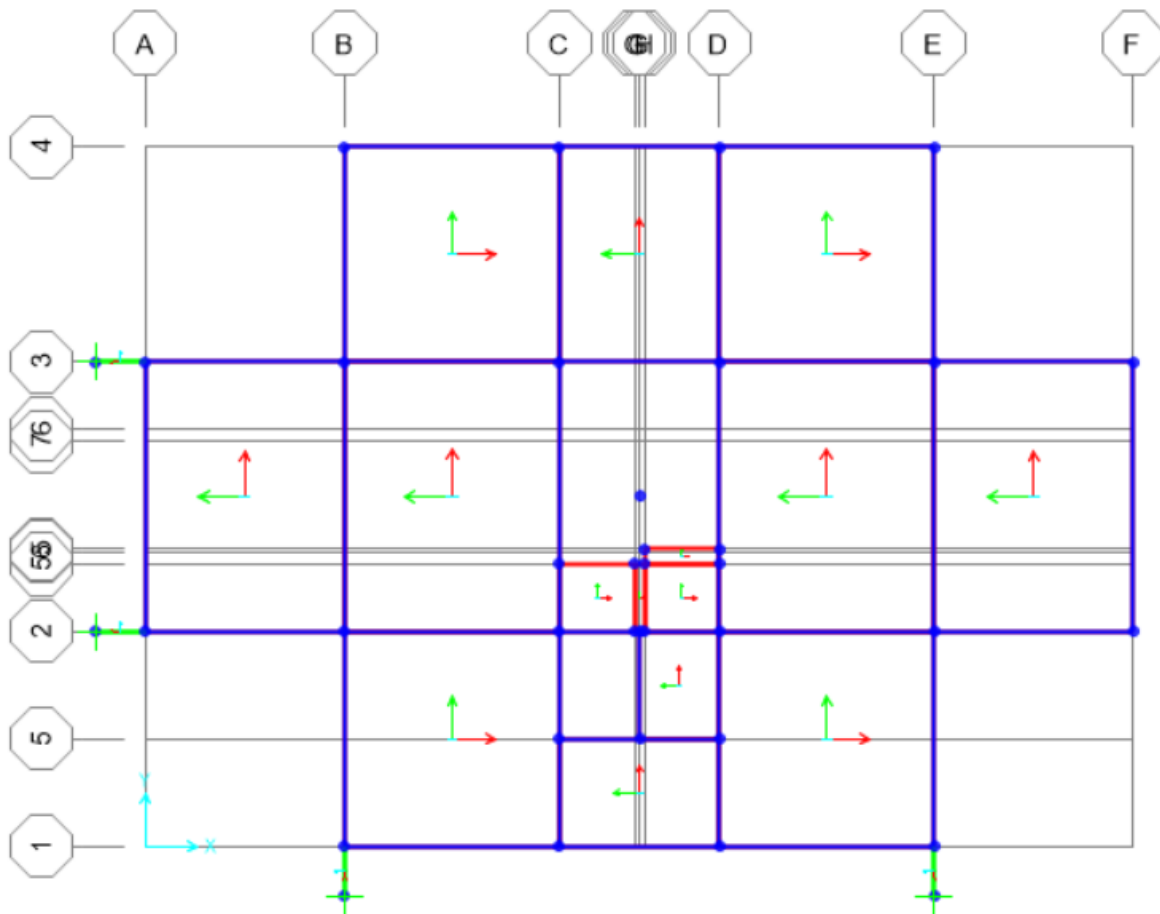


Figura 542. Modello in pianta del piano terzo.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

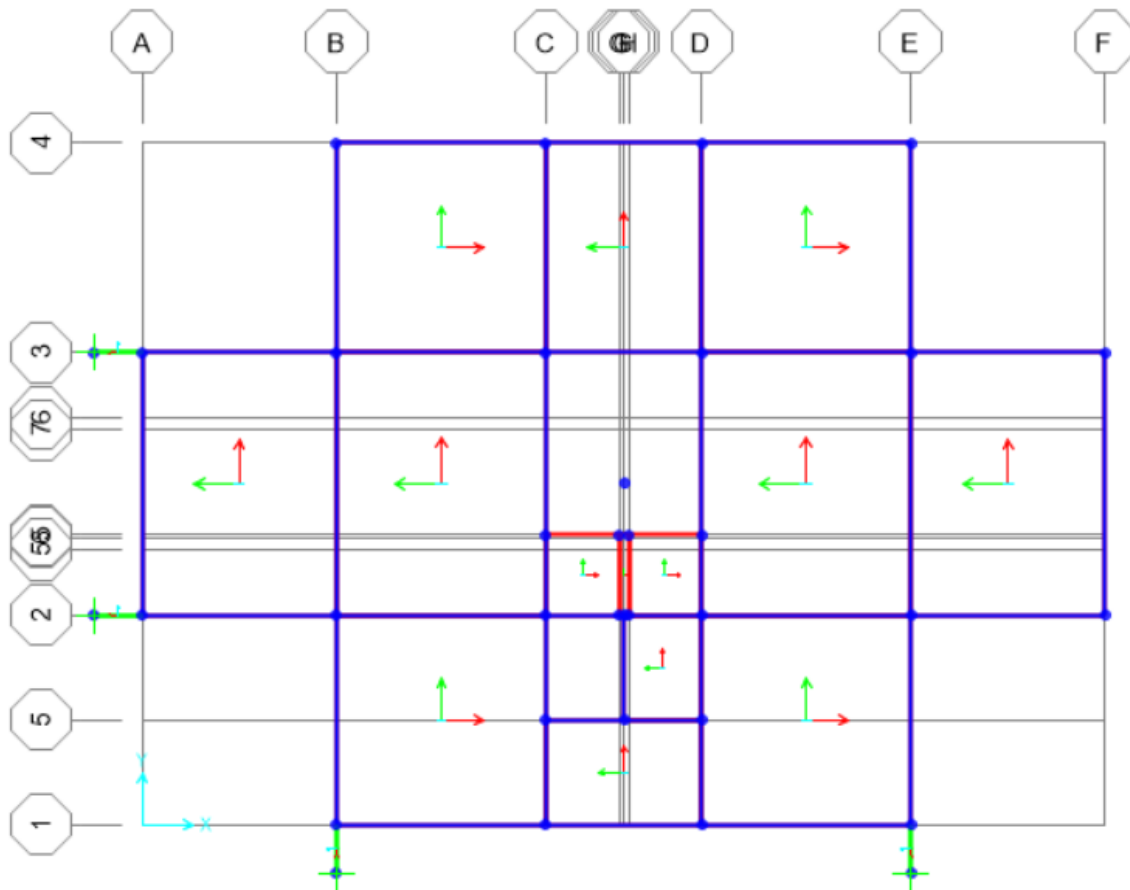


Figura 544. Modello in pianta del piano quinto.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

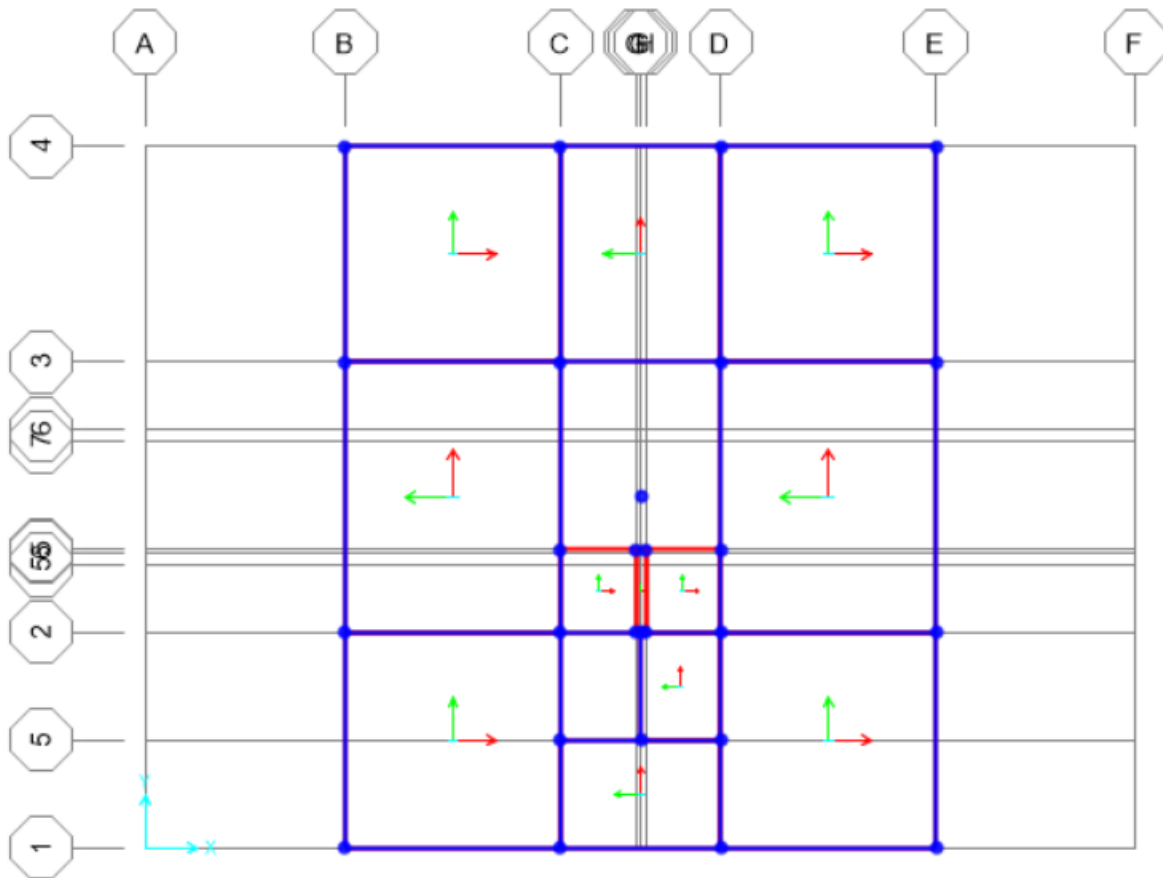


Figura 545. Modello in pianta del piano sesto.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

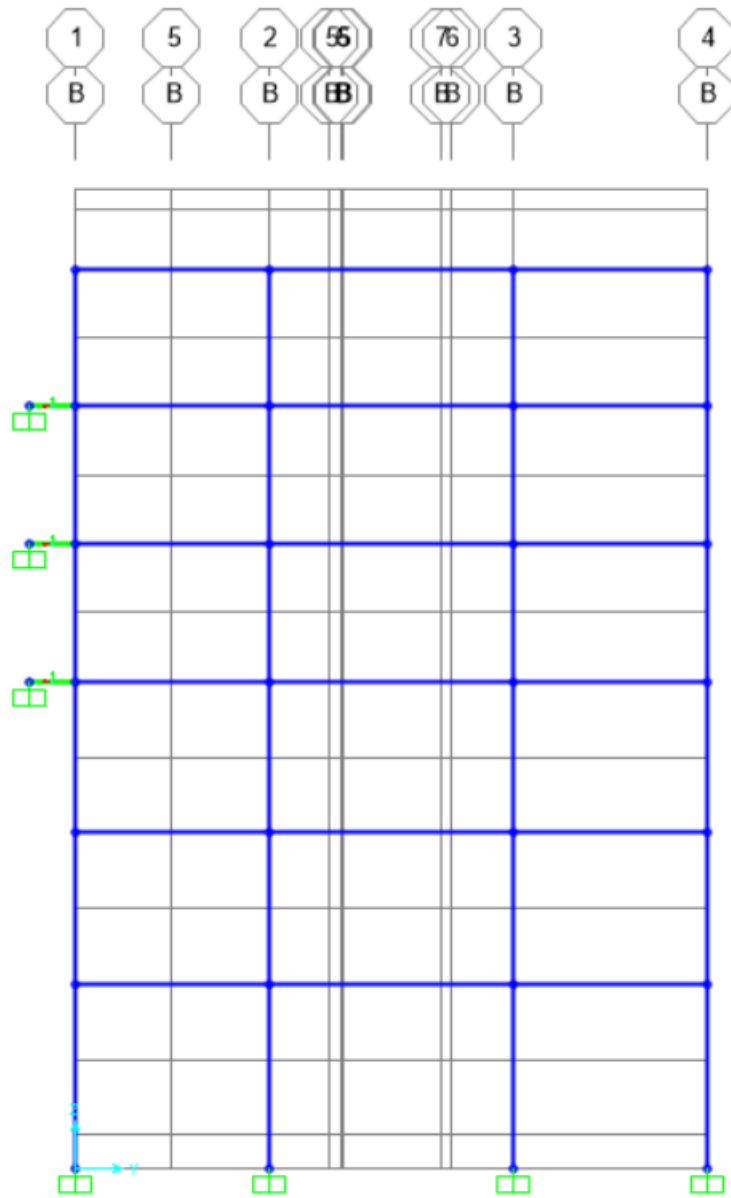


Figura 546. Modello del telaio 17-12-6-1.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

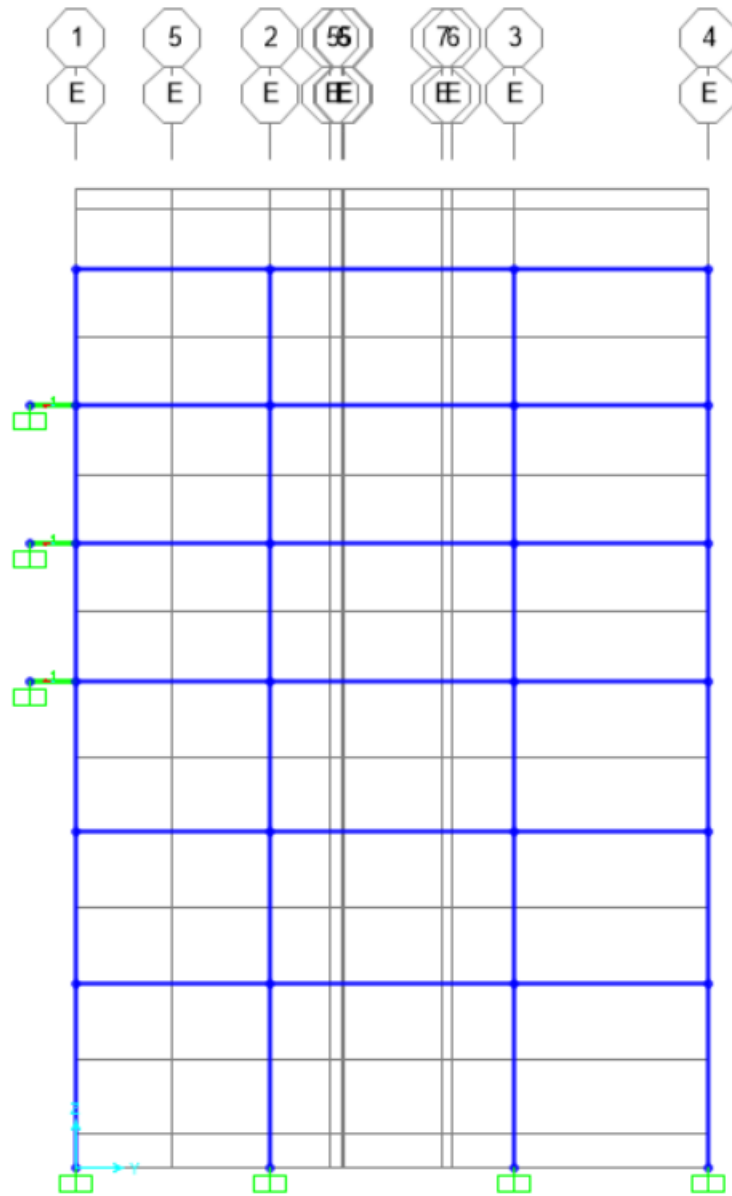


Figura 547. Modello del telaio 20-15-9-4.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

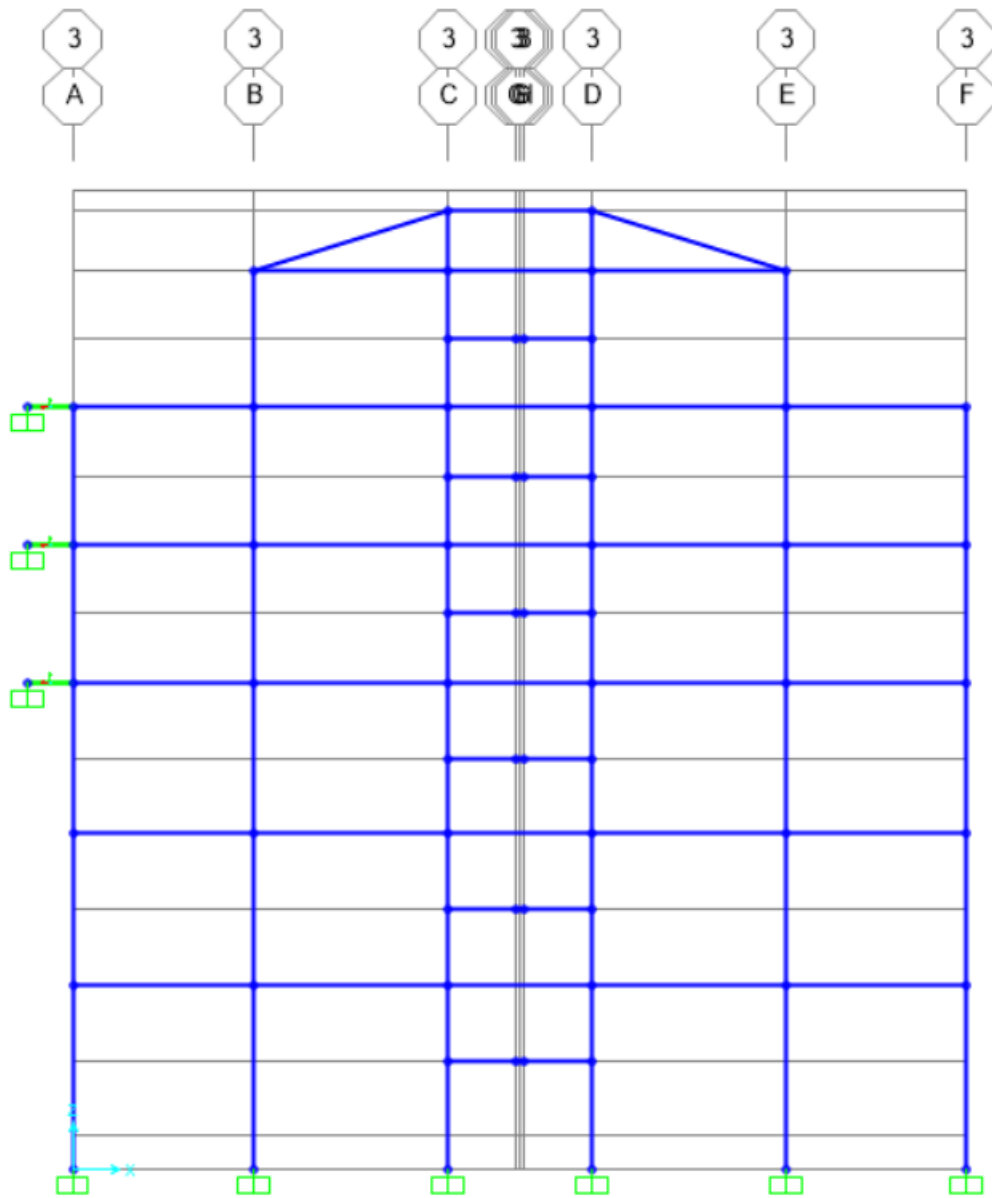


Figura 548. Modello del telaio 5-6-7-8-9-10.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

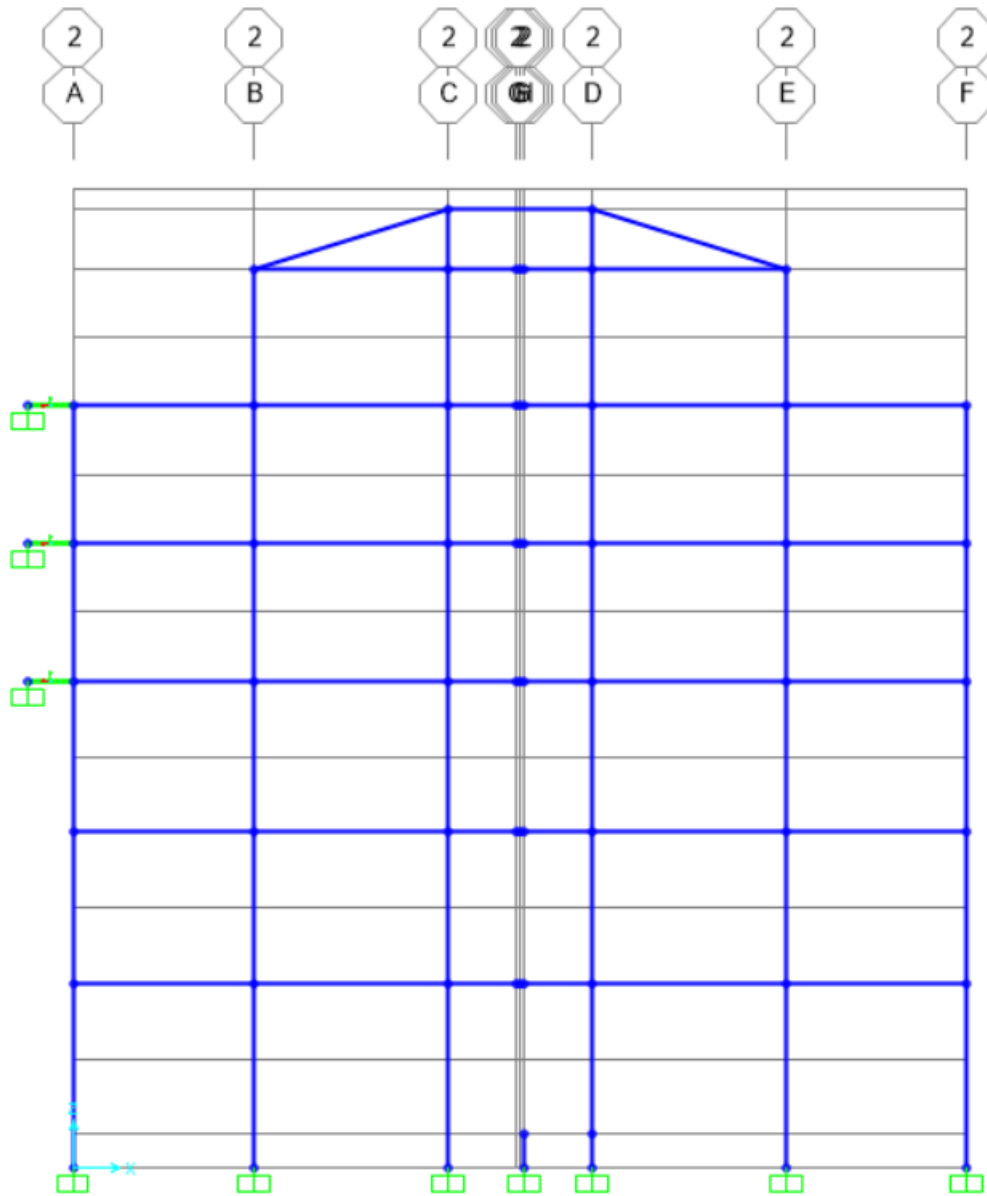


Figura 549. Modello del telaio 11-12-13-14-15-16.

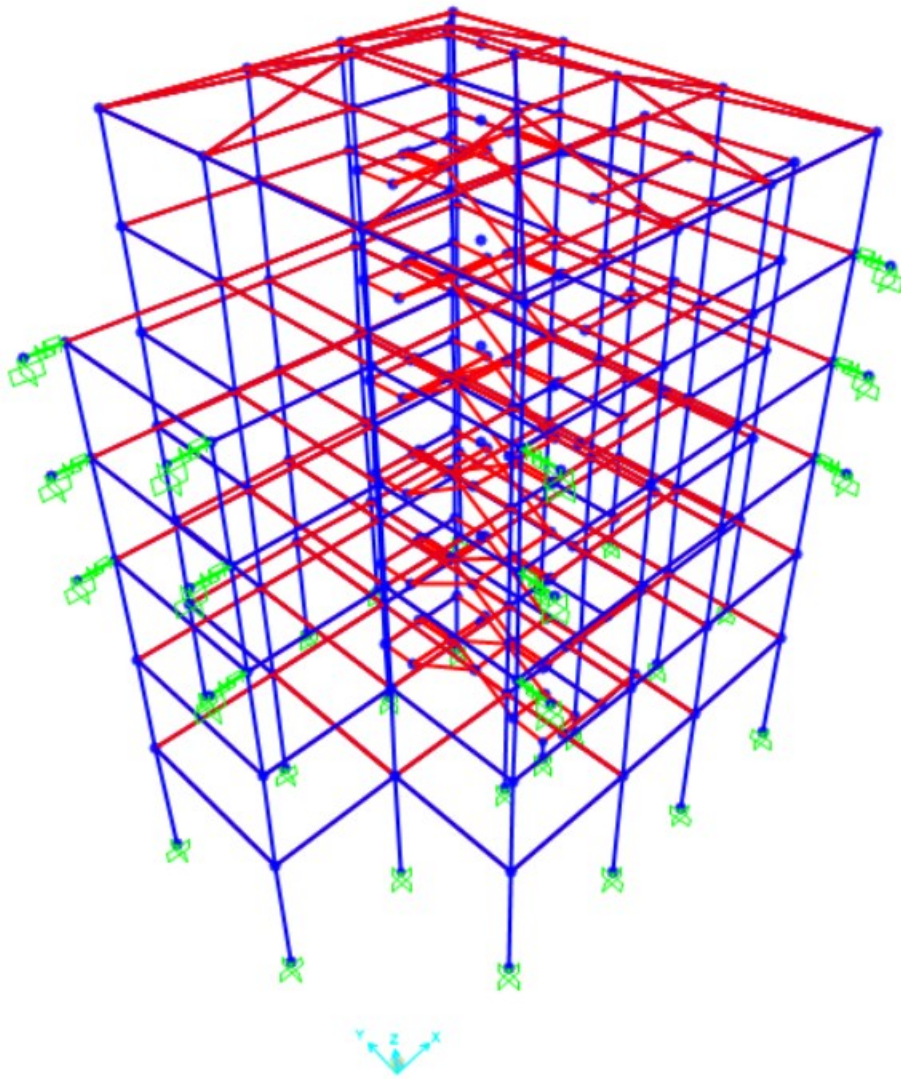


Figura 550. Modello tridimensionale.

8. CONCLUSIONI

Si confrontano ora i risultati finali dei quattro modelli analizzati in termini di spostamenti di piano e di interpiano, in termini di accelerazioni relative e assolute di piano e in termini di velocità relative e assolute di piano.

Modello di base:

Spostamenti di piano			
N° piano	h piano	dx	dy
(-)	(m)	(m)	(m)
1	3,35	0,0188	0,0161
2	3,35	0,0429	0,0360
3	3,35	0,0655	0,0563
4	3,05	0,0852	0,0741
5	3,05	0,1052	0,0912
6	3,05	0,1228	0,1034

Spostamenti di interpiano								
N° piano	dr x	dr y	0,5%		Rapporto		Rapporto	
			h piano	Verifica x	Verifica y	dr x	dr y	
(-)	(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(%)	(%)	
1	0,0188	0,0161	0,0168	NonOk	Ok	0,56	0,48	
2	0,0242	0,0199	0,0168	NonOk	NonOk	0,72	0,59	
3	0,0225	0,0203	0,0168	NonOk	NonOk	0,67	0,61	
4	0,0197	0,0178	0,0153	NonOk	NonOk	0,64	0,59	
5	0,0200	0,0171	0,0153	NonOk	NonOk	0,66	0,56	
6	0,0176	0,0121	0,0153	NonOk	Ok	0,58	0,40	

Accelerazioni relative di piano			
N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s ²)	(m/s ²)
1	3,35	2,3023	1,9110
2	3,35	3,6521	3,1862
3	3,35	4,0238	3,7804
4	3,05	4,2338	3,8093
5	3,05	4,4672	3,8074
6	3,05	5,5038	4,8852

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Accelerazioni assolute di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s ²)	(m/s ²)
1	3,35	2,0705	1,8095
2	3,35	2,5781	2,2074
3	3,35	2,4745	2,4362
4	3,05	2,5327	2,5522
5	3,05	2,8347	2,8607
6	3,05	3,6845	3,4232

Velocità relative di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s)	(m/s)
1	3,35	0,1393	0,1199
2	3,35	0,2951	0,2488
3	3,35	0,3992	0,3529
4	3,05	0,4555	0,4291
5	3,05	0,5533	0,5138
6	3,05	0,6715	0,6089

Velocità assolute di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s)	(m/s)
1	3,35	1,0930	1,2618
2	3,35	1,1131	1,2725
3	3,35	1,1367	1,2939
4	3,05	1,1537	1,3308
5	3,05	1,1713	1,3790
6	3,05	1,1955	1,4186

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Modello con dissipatori magnetoreologici non alimentati:

Spostamenti di piano			
N° piano	h piano	dx	dy
(-)	(m)	(m)	(m)
1	3,35	0,0147	0,0127
2	3,35	0,0331	0,0280
3	3,35	0,0503	0,0435
4	3,05	0,0655	0,0579
5	3,05	0,0836	0,0716
6	3,05	0,0980	0,0815

Spostamenti di interpiano							
N° piano	dr x	dr y	0,5%		Rapporto	Rapporto	
			Verifica	Verifica			
(-)	(m)	(m)	h piano	x	y	dr x	dr y
			(m)	(-)	(-)	(%)	(%)
1	0,0147	0,0127	0,0168	Ok	Ok	0,44	0,38
2	0,0184	0,0152	0,0168	NonOk	Ok	0,55	0,45
3	0,0171	0,0155	0,0168	NonOk	Ok	0,51	0,46
4	0,0152	0,0144	0,0153	Ok	Ok	0,50	0,47
5	0,0181	0,0137	0,0153	NonOk	Ok	0,59	0,45
6	0,0145	0,0099	0,0153	Ok	Ok	0,47	0,33

Accelerazioni relative di piano			
N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s ²)	(m/s ²)
1	3,35	2,2270	1,8880
2	3,35	3,4895	3,0563
3	3,35	3,7571	3,5335
4	3,05	3,7661	3,4505
5	3,05	3,9461	3,3414
6	3,05	4,8846	4,3274

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Accelerazioni assolute di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s ²)	(m/s ²)
1	3,35	2,0935	2,0166
2	3,35	2,4757	2,5916
3	3,35	2,4245	2,5704
4	3,05	2,1537	2,2162
5	3,05	2,3825	2,2525
6	3,05	3,8469	3,4850

Velocità relative di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s)	(m/s)
1	3,35	0,1208	0,1043
2	3,35	0,2477	0,2106
3	3,35	0,3245	0,2855
4	3,05	0,3634	0,3395
5	3,05	0,4533	0,4117
6	3,05	0,5629	0,4950

Velocità assolute di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s)	(m/s)
1	3,35	1,0914	1,2599
2	3,35	1,1015	1,2679
3	3,35	1,1127	1,2742
4	3,05	1,1228	1,2909
5	3,05	1,1366	1,3250
6	3,05	1,1526	1,3549

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Modello con dissipatori magnetoreologici alimentati:

Spostamenti di piano			
N° piano	h piano	dx	dy
(-)	(m)	(m)	(m)
1	3,35	0,0080	0,0071
2	3,35	0,0168	0,0147
3	3,35	0,0240	0,0219
4	3,05	0,0311	0,0284
5	3,05	0,0392	0,0345
6	3,05	0,0456	0,0397

Spostamenti di interpiano							
N° piano	dr x	dr y	0,5%	Verifica	Verifica	Rapporto	Rapporto
			h piano	x	y	dr x	dr y
(-)	(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(%)	(%)
1	0,0080	0,0071	0,0168	Ok	Ok	0,24	0,21
2	0,0088	0,0076	0,0168	Ok	Ok	0,26	0,23
3	0,0072	0,0072	0,0168	Ok	Ok	0,21	0,21
4	0,0071	0,0066	0,0153	Ok	Ok	0,23	0,22
5	0,0081	0,0061	0,0153	Ok	Ok	0,27	0,20
6	0,0064	0,0051	0,0153	Ok	Ok	0,21	0,17

Accelerazioni relative di piano			
N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s ²)	(m/s ²)
1	3,35	2,3320	1,8511
2	3,35	3,2100	2,8387
3	3,35	2,9833	2,8064
4	3,05	2,6761	2,6527
5	3,05	2,8564	2,6417
6	3,05	3,8227	3,3422

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Accelerazioni assolute di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s ²)	(m/s ²)
1	3,35	2,0757	2,1412
2	3,35	2,3451	2,5322
3	3,35	1,8461	1,9580
4	3,05	1,4531	1,5665
5	3,05	1,4609	1,4226
6	3,05	2,1429	2,2280

Velocità relative di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s)	(m/s)
1	3,35	0,0828	0,0807
2	3,35	0,1480	0,1452
3	3,35	0,1683	0,1655
4	3,05	0,1958	0,1855
5	3,05	0,2394	0,2229
6	3,05	0,3018	0,2534

Velocità assolute di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s)	(m/s)
1	3,35	1,0955	1,2562
2	3,35	1,1016	1,2592
3	3,35	1,0954	1,2553
4	3,05	1,0942	1,2522
5	3,05	1,0989	1,2496
6	3,05	1,1053	1,2518

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Modello con dissipatori viscosi equivalenti ai dissipatori magnetoreologici alimentati:

Spostamenti di piano			
N° piano	h piano	dx	dy
(-)	(m)	(m)	(m)
1	3,35	0,0125	0,0109
2	3,35	0,0277	0,0238
3	3,35	0,0417	0,0371
4	3,05	0,0558	0,0492
5	3,05	0,0714	0,0607
6	3,05	0,0837	0,0697

Spostamenti di interpiano							
N° piano	dr x	dr y	0,5% Verifica		Rapporto		
			h piano	x	y	dr x	dr y
(-)	(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(%)	(%)
1	0,0125	0,0109	0,0168	Ok	Ok	0,37	0,33
2	0,0153	0,0128	0,0168	Ok	Ok	0,46	0,38
3	0,0140	0,0133	0,0168	Ok	Ok	0,42	0,40
4	0,0141	0,0120	0,0153	Ok	Ok	0,46	0,40
5	0,0155	0,0115	0,0153	Ok	Ok	0,50	0,38
6	0,0123	0,0091	0,0153	Ok	Ok	0,40	0,30

Accelerazioni relative di piano			
N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s ²)	(m/s ²)
1	3,35	2,2121	1,8735
2	3,35	3,3935	3,0104
3	3,35	3,5869	3,3707
4	3,05	3,4974	3,2554
5	3,05	3,7112	3,1563
6	3,05	4,5157	4,0708

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Accelerazioni assolute di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s ²)	(m/s ²)
1	3,35	2,0842	2,0314
2	3,35	2,4439	2,5581
3	3,35	2,2809	2,3915
4	3,05	1,9184	1,9965
5	3,05	2,1194	1,9341
6	3,05	3,3625	3,1259

Velocità relative di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s)	(m/s)
1	3,35	0,1084	0,0972
2	3,35	0,2186	0,1904
3	3,35	0,2806	0,2497
4	3,05	0,3185	0,2921
5	3,05	0,3988	0,3544
6	3,05	0,5014	0,4274

Velocità assolute di piano

N° piano	h piano	U1x	U2y
(-)	(m)	(m/s)	(m/s)
1	3,35	1,0921	1,2589
2	3,35	1,0979	1,2657
3	3,35	1,1033	1,2652
4	3,05	1,1124	1,2692
5	3,05	1,1252	1,2926
6	3,05	1,1445	1,3196

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

Si espone anche il confronto grafico degli spostamenti di piano e di inter-piano, delle accelerazioni relative e assolute di piano e delle velocità relative e assolute di piano relativi ai quattro modelli analizzati:

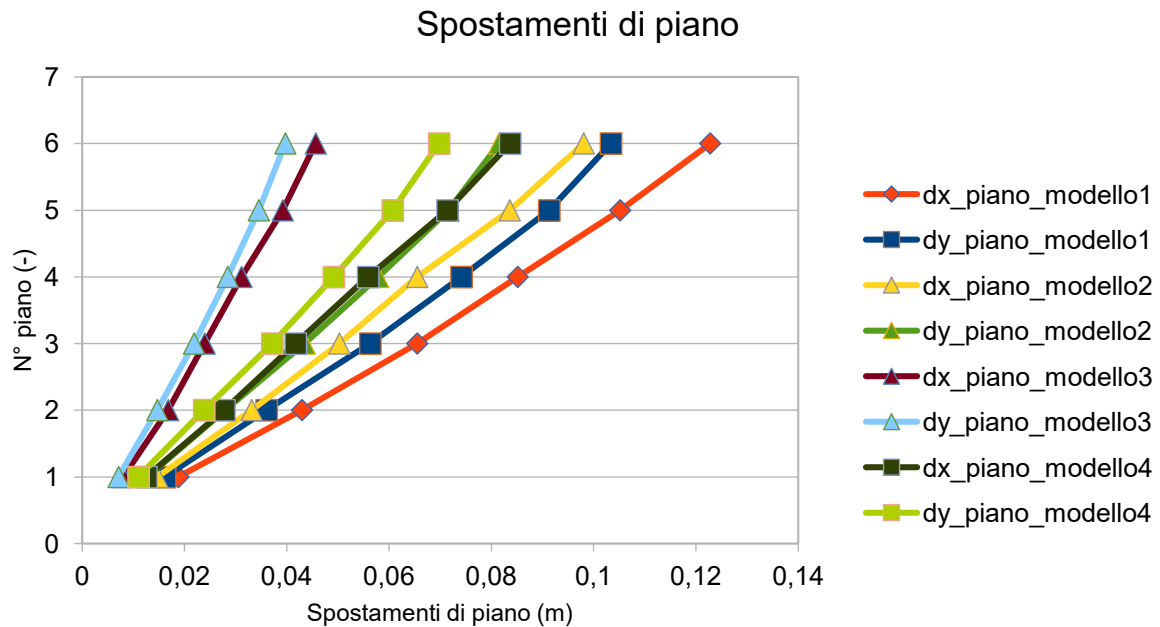


Figura 551. Confronto degli spostamenti di piano nei quattro modelli.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

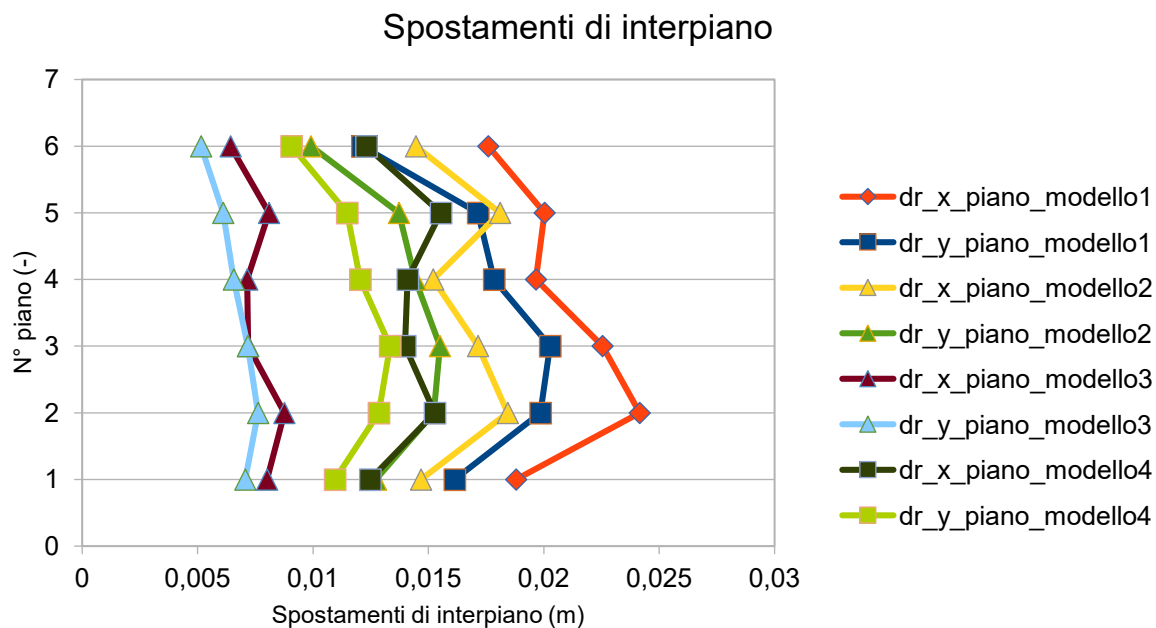


Figura 552. Confronto degli spostamenti di interpiano nei quattro modelli.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

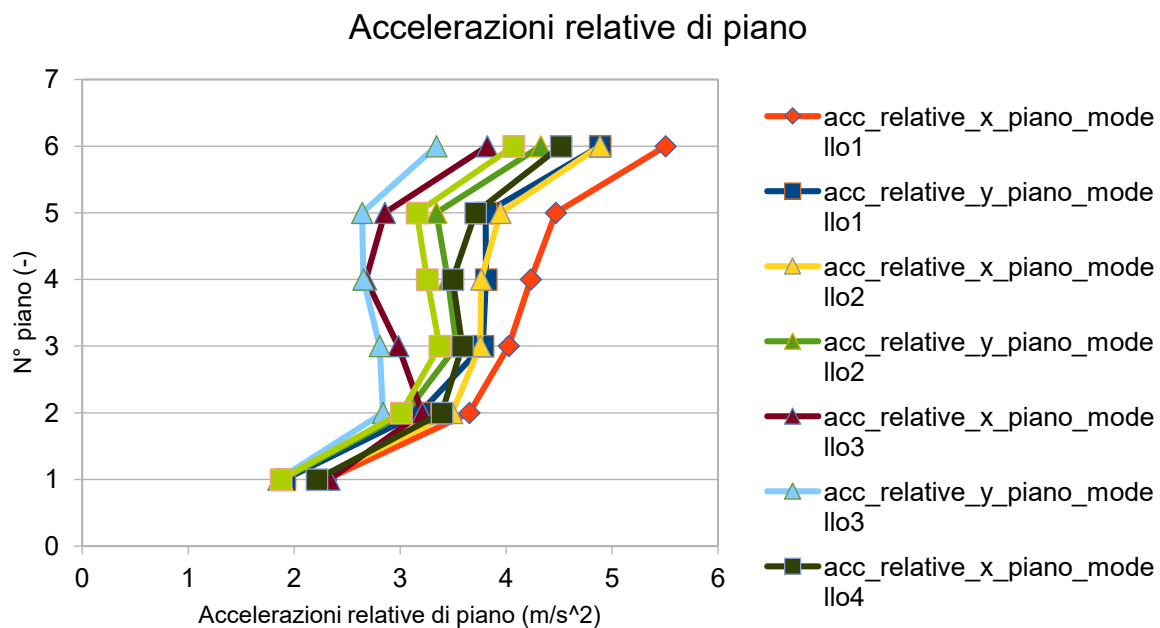


Figura 553. Confronto delle accelerazioni relative di piano nei quattro modelli.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

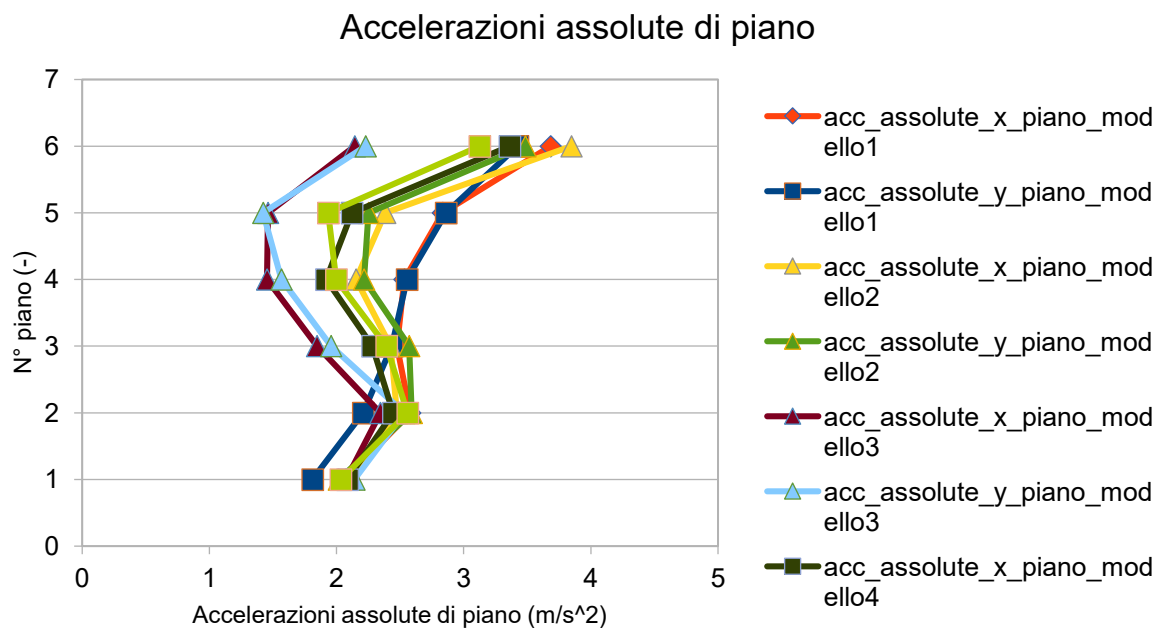


Figura 554. Confronto delle accelerazioni assolute di piano nei quattro modelli.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

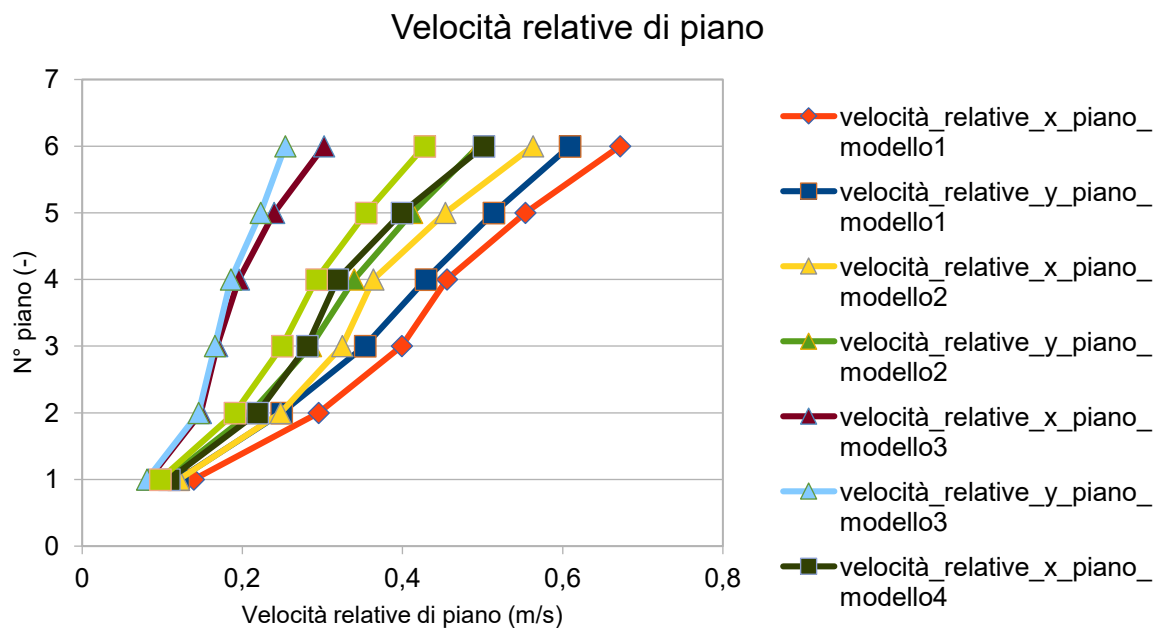


Figura 555. Confronto delle velocità relative di piano nei quattro modelli.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

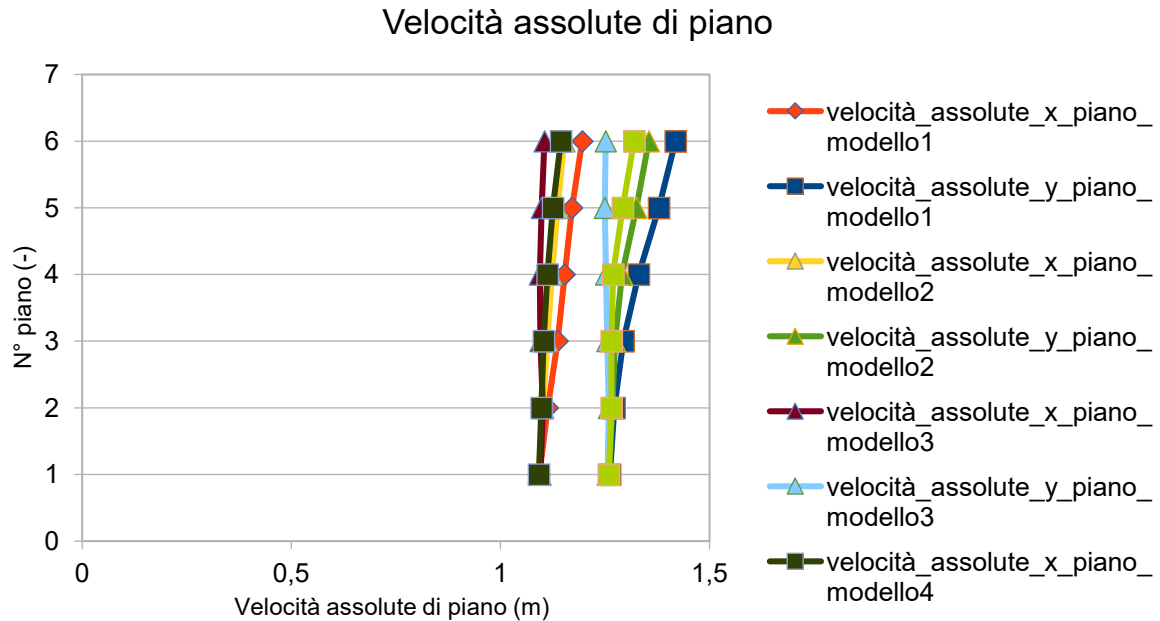


Figura 556. Confronto delle velocità assolute di piano nei quattro modelli.

Ricordando che:

- Modello 1: Modello di base.
- Modello 2: Modello con dissipatori magnetoreologici non alimentati.
- Modello 3: Modello con dissipatori magnetoreologici alimentati.
- Modello 4: Modello con dissipatori viscosi equivalenti ai dissipatori magnetoreologici alimentati.

Dai risultati ottenuti si evidenzia che il modello che presenta una performance superiore in termini di spostamenti di interpiano, spostamenti di piano, accelerazioni relative e assolute di piano e velocità relative e assolute di piano, è il terzo, ovvero quello con i dissipatori magnetoreologici

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

alimentati, segue il modello 4 (modello con i dissipatori viscosi equivalenti), il modello 3 (modello con dissipatori magnetoreologici non alimentati) e il modello 1 (modello di base).

Il livello di performance raggiunta con il sistema di controllo strutturale semi-attivo mediante l'utilizzo dei dissipatori magnetoreologici, necessità di un dispendio di energia elettrica di piccola entità, ovvero tra 0-2,25V, permettendoci un enorme risparmio dal punto di vista economico rispetto ai classici sistemi di controllo strutturale attivo che comportano costi di gestione molto più elevati. Inoltre per evitare che venga a mancare la continuità elettrica del sistema, durante un evento sismico di forte entità, saranno installate delle batterie di riserva capaci di superare questo problema.

Detto questo, si può affermare che l'obiettivo di questa tesi di laurea magistrale in ingegneria civile è stato perfettamente dimostrato, in quanto vi è la necessità di utilizzare tali dispositivi sismici per far rimanere la struttura in campo elastico, ovvero il campo delle deformazioni di piccola entità o reversibili.

9. BIBLIOGRAFIA

1. Atti della prima conferenza mondiale sul controllo strutturale semi-attivo da parte di Nagarajaiah, Los Angeles, California, 1994.
2. Atti della prima conferenza mondiale sul controllo strutturale semi-attivo da parte di Reinhorn e Riley, Los Angeles, California, 1994.
3. Controllo "intelligente" di strutture con sistemi semi-attivi ed ibridi da parte di Soong e Spencer, Los Angeles, California, 1997.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

4. Controllo strutturale: passato, presente e futuro. Numero speciale del Journal of Engineering Mechanics, Los Angeles, California, 1997.
5. Ruolo dell'interazione controllo-struttura nella progettazione del sistema di protezione da parte di Dyke, Spencer, Quast, Sain. Journal of Engineering Mechanics, Los Angeles, California, 1995.
6. Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering da parte di Soong e Costantinou, New York, Stati Uniti, 1994.
7. Linee guida e commenti per la riabilitazione sismica degli edifici, San Francisco, California, 1994.
8. Atti del seminario sull'isolamento sismico, la dissipazione passiva dell'energia e il controllo attivo, San Francisco, California, 1993.
9. Dissipazione passiva dell'energia da parte di Soong, Los Angeles, California, 1993.
10. Sistemi passivi di dissipazione di energia per la progettazione strutturale e le tecniche di retrofit da parte di Soong, Costantinou e Dargush, nel Centro Nazionale per la ricerca sismica, Buffalo, New York, Stati Uniti, 1996.
11. Risposta sismica degli edifici con smorzamento supplementare da parte di Costantinou e Symans. Journal of Structural Design of Tall Buildings, New York, Stati Uniti, 1993.
12. Kelly JM. Progettazione antisismica con la gomma da parte di Kelly, Londra, Inghilterra, 1993.
13. Un'introduzione all'isolamento sismico da parte di Skinner, Robinson e Mc Verry, Londra, Inghilterra, 1993.
14. Isolamento sismico da parte di Costantinou, Los Angeles, California, 1990.

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

15. Implementazione in scala reale del controllo attivo da parte di Soong, Reinhorn, Wang e Lin, San Francisco, California, 1991.
16. Sistemi di feedback e di feedforward nel controllo strutturale sismico da parte di Dyke, Spencer, Quast, Sain e Kaspari, Journal of Engineering Mechanics 1996.
17. Vantaggi e svantaggi di un sistema di controllo strutturale semi-attivo da parte di Soong e Costantinou, New York, Stati Uniti, 1990.
18. Una panoramica del controllo strutturale attivo sotto carico sismico da parte di Soong, Masri, Housner, New York, Stati Uniti, 1991.
19. Controllo strutturale attivo, passivo e semi-attivo: concetti di base e applicazioni strutturali da parte di Fujino, Soong e Spencer, Los Angeles, California, 2000,
20. Norme tecniche delle costruzioni NTC 2018.

10. RINGRAZIAMENTI

Beh eccomi qua a scrivere i ringraziamenti finali per la mia tesi di laurea magistrale in ingegneria civile. Chi l'avrebbe mai detto?

Se ripenso a quel lontano giorno in cui ho deciso di iscrivermi a tale facoltà, nonostante ero consapevole, seppur solo in parte, del grado di difficoltà e d'impegno a cui sarei andato incontro, posso solo affermare con certezza che non ho fatto scelta migliore!

La professionalità, la disponibilità e il grado di competenza dei professori, nonché la difficoltà degli esami scritti e orali a cui mi sono

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

sottoposto, ha contribuito, senza dubbio, ad arricchire la mia persona e le mie conoscenze in campo ingegneristico.

D'altro canto, se dovrei essere critico, c'è da dire che questa esperienza universitaria, nel bene e nel male, mi ha lasciato un certo perfezionismo nel fare le cose, quasi 'maniacale'!

Francamente, non sono ancora del tutto consapevole di essere arrivato veramente alla fine di questo percorso di laurea magistrale in Ingegneria Civile. Non riesco ancora a crederci, è incredibile!

Vorrei vivamente ringraziare il relatore Prof. Ing. Gara Fabrizio, la correlatrice Prof.ssa Ing. Ragni Laura e il correlatore Prof. Ing. Davì Fabrizio, per avermi dato la possibilità di sostenere il tirocinio e scrivere una tesi di laurea sperimentale su una tecnica innovativa per il controllo strutturale sismico, nonostante tale argomento non sia stato oggetto di didattica del corso di laurea magistrale in ingegneria civile.

Pertanto, se ad oggi ho delle conoscenze più approfondite e innovative in materia sismica lo devo soprattutto a loro.

Grazie veramente di cuore!

Inoltre, vorrei ringraziare la mia unica famiglia (papà Stefano, mamma Maria Pia, mio fratello Matteo, zia Simona, zio Guglielmo, zia Oxana, la mia cugina Maria e mio nonno Pacifico), la mia ragazza speciale Sofia (che ha sempre creduto nelle mie potenzialità fin dal primo giorno che ci siamo conosciuti, trasmettendomi positività e tranquillità), mio cugino Paolo, i miei amici di sempre (Francesco Miglietta, Valerio Cappellacci, Michele Torresi, Alberto Ripari, Giovanni Bottai, Alessandro Pergolesi e Lorenzo Cingolani) ed il mio grande amico universitario Nico Stortini (il quale, fin dal primo giorno che l'ho conosciuto, è stato sempre al mio fianco in ogni progetto, passando da un semplice collega universitario ad un vero amico a cui voglio molto bene), che mi hanno sempre sostenuto economicamente e soprattutto moralmente in questo lungo e travagliato, seppur molto soddisfacente, percorso di vita.

Infine, vorrei aggiungere un pensiero, a due persone molto speciali per me, che mi hanno sempre aiutato, passo dopo passo, nelle mie esperienze di vita, ovvero, i miei nonni paterni (nonna Lina e nonno Pio), saliti in cielo rispettivamente il 27-10-2015 e il 26-04-2017, ma che hanno contribuito, fino a quel momento, al realizzarsi di questo indimenticabile momento, che sognavo da tempo!

Grazie di cuore a tutti voi, vi voglio bene!

Calcolo di un sistema di controllo strutturale semi-attivo

THAT'S ALL FOLK!