



REGIONE LIGURIA
Dipartimento Salute
e Servizi Sociali
Settore Investimenti



OSPEDALE POLICLINICO SAN MARTINO
Sistema Sanitario Regione Liguria
Istituto di Ricovero e Cura a Carattere Scientifico

U.O. Attività Tecniche



PNRR - M6 C2

(Innovazione, Ricerca e Digitalizzazione del
Servizio Sanitario Nazionale)

Investimento 1.2

(verso un ospedale sicuro e sostenibile)

Attività:

PNRR - M6C2 ADEGUAMENTO ALLE NORMATIVE ANTISISMICHE
INTERVENTO DI MIGLIORAMENTO SISMICO DEL PAD. SPECIALITA'
IRCCS OSPEDALE POLICLINICO SAN MARTINO DI GENOVA

Cod.Az.978 - CUP C31B22001310001

RUP: Ing. Gabriele Guerzoni

Oggetto:

PROGETTO ESECUTIVO - INTERVENTO DI MIGLIORAMENTO SISMICO
PADIGLIONE SPECIALITA' – IRCCS OSPEDALE POLICLINICO SAN MARTINO DI GENOVA

Titolo:

RELAZIONE DI CALCOLO DI MIGLIORAMENTO
ANALISI LINEARE

Doc. n: 238-d-010-relazione di calcolo di miglioramento-lineare

Rev.	Data	Sez.	Pag.	Redatto	Controllato	Approvato	Note
0	06/03/2023		68	GV	GV	BB	

Timbro e firma:

I Progettisti
Dott. Ing. Gianfranco Visconti
Dott. Ing. Bruno Boldrin

Elaborato:

238
D-010-R0

I N D I C E

1. Descrizione dell'edificio	3
2. Conoscenza dell'edificio e caratterizzazione dei materiali	10
2.1. Geometria dell'edificio	10
2.2. Proprietà dei materiali.....	11
2.3. Parametri geotecnici.....	11
3. Livello di conoscenza e fattore di confidenza	13
4. Azione sismica	14
5. Analisi dei carichi gravitazionali	24
5.1. Solai 24	
5.2. Tamponature	24
5.3. Calcolo dei pesi sismici.....	25
6. Modellazione strutturale	27
6.1. Analisi agli autovalori.....	30
7. Il sistema di controllo attivo Electro-Pro 20x o similare.....	32
7.1. Caratteristiche del sistema	32
7.2. Modellazione del sistema e aspetti di progettazione	34
8. Simulazioni numeriche allo SLV	39
8.1. Analisi dinamiche lineari	39
8.2. Confronto tra struttura non controllata e struttura controllata	40
8.3. Caratteristiche del sistema di controllo attivo Electro-Pro 20x o similare	54
9. Verifiche di rigidezza	60
10. Conclusioni	67

1. DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO

L'edificio in esame è un fabbricato esistente con struttura in calcestruzzo armato ubicata a Genova all'interno del plesso ospedaliero San Martino. La struttura è stata costruita nel 1937 e ha subito alcune parziali ricostruzioni post-belliche rese necessarie a seguito dei bombardamenti.

Il complesso nella sua globalità ha uno sviluppo longitudinale di circa 136.00 m. Esso presenta tre corpi giuntati attraverso due corpi denominati "corpi cerniera" (Figura 1). In particolare, si ha:

- Corpo A, ubicato a Sud, che presenta cinque piani fuori terra con dimensioni di circa 44.00 m X 24.00 m;
- Corpo B, in posizione centrale, costituito da sei piani fuori terra e una dimensione in pianta di circa 29.00 m X 35.00 m;
- Corpo C, ubicato a Nord, che presente sei piani fuori terra e uno sviluppo planimetrico di circa 44.00 X 24.00 m.

Allo stato attuale, i tre edifici sono collegati tramite due corpi cerniera attraverso un giunto di spessore pari a circa 20 mm.



Figura 1 – Complesso globale Padiglione specialità

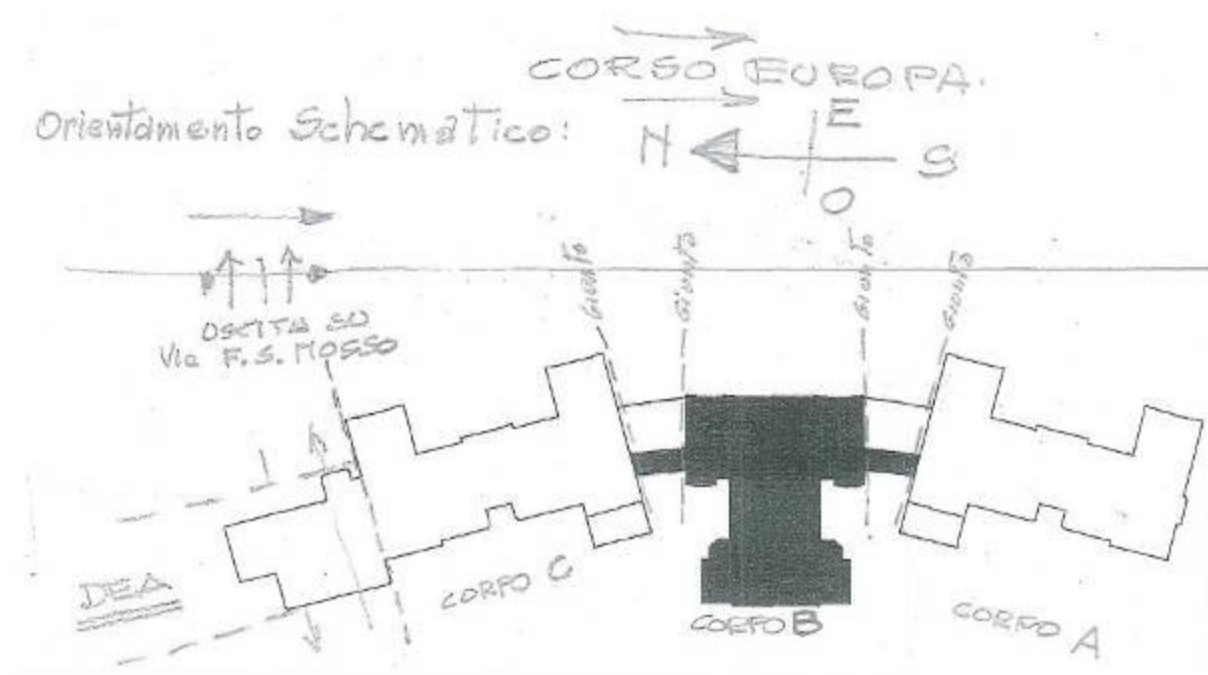


Figura 2 – Vista schematica del Padiglione specialità

L'edificio, oggetto del presente studio, è rappresentato dal Corpo B. Vi è, inoltre, l'annessione dei corpi cerniera che, a seguito di valutazioni mirate saranno uniti al corpo centrale. Pertanto, la situazione è quella rappresentata in Figura 3 e in Figura 4.



Figura 3 – Corpo B e corpi cerniera: vista planimetrica

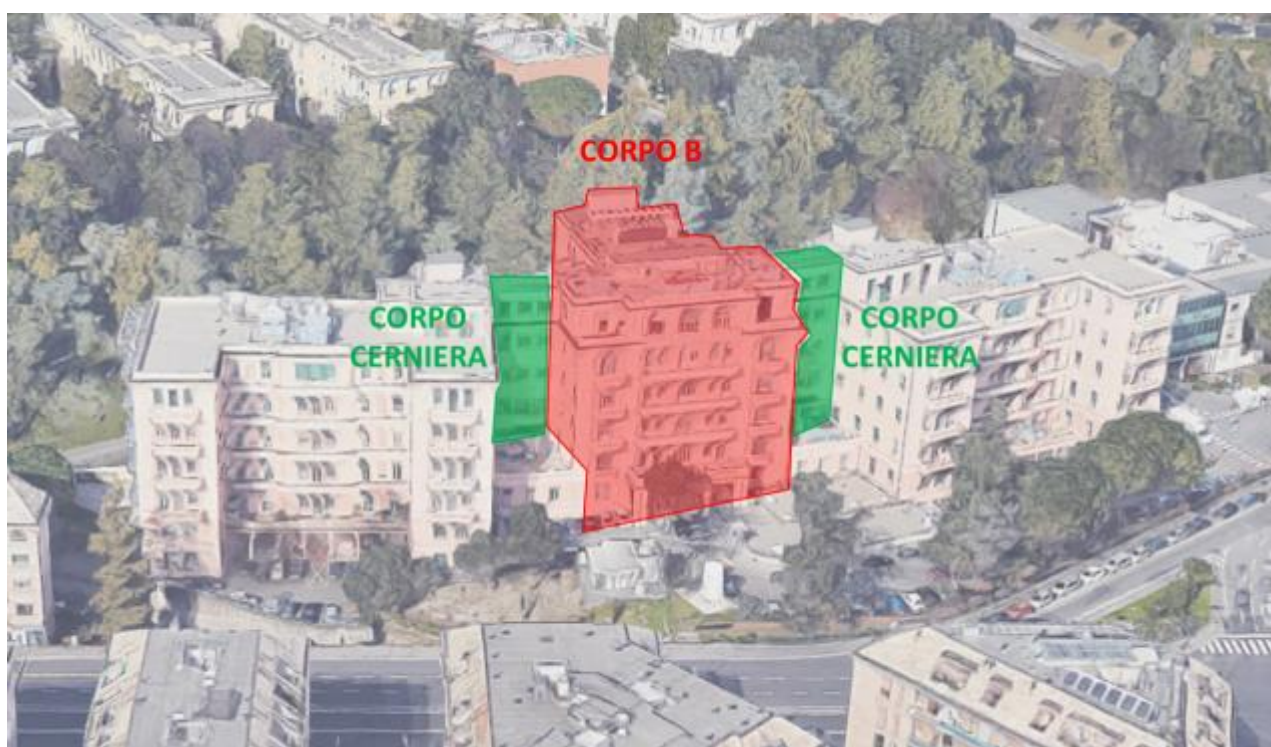


Figura 4 - Corpo B e corpi cerniera: vista prospettica

Di seguito alcune immagini del corpo B e dei corpi cerniera facenti parte del Padiglione specialità.



Figura 5 – Vista N-E padiglione



Figura 6 – Vista S-O padiglione

Il giunto strutturale, situato tra il corpo centrale del padiglione (Corpo B) ed il corpo cerniera, presenta uno spessore pari a circa 20 mm ed è raffigurato in Figura 7.



Figura 7 – Giunto di dilatazione situato tra il corpo centrale e il corpo cerniera

Si osserva che tale giunto è una disconnessione utile ai soli fini di espansione/contrazione termica, ma non è funzionale nei riguardi delle azioni sismiche. Pertanto, come preannunciato all'interno del capitolo introduttivo, vi è l'intenzione di unire i corpi suddetti per evitare i fenomeni di martellamento che le due strutture si scambierebbero in caso di sisma.

Infine, dato il tipo di intervento sismico previsto, Isaac Srl ha effettuato un sopralluogo in data 14/11/2022 per analizzare e verificare gli spazi e le condizioni del piano di copertura dell'edificio.

Di seguito, si riportano alcune immagini del piano suddetto.



Figura 8 – Lato N-O piano di copertura



Figura 9 - Lato S-E piano di copertura

Nonostante la presenza di un numero considerevole di impianti, tipico di una struttura con questa destinazione d'uso, il piano presenta uno spazio sufficiente per l'alloggio di un numero ragionevole di unità macchina.

Si osserva che, allo stato attuale, la superficie di calpestio è completamente ricoperta con una membrana di protezione impermeabilizzante.

2. CONOSCENZA DELL'EDIFICIO E CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

Il primo passo per valutare la sicurezza di un edificio esistente consiste nel determinare il livello di conoscenza della struttura. Su di essa è stata svolta una campagna di indagini di cui si riportano sinteticamente i punti salienti:

- la campagna sperimentale è stata svolta per il solo corpo B;
- la campagna di indagini è risultata difficoltosa in quanto è stata svolta con la struttura in attività;
- è stata svolta un'indagine visiva nei confronti degli elementi strutturali;
- le indagini si sono svolte ad esclusione del primo e del terzo piano;
- non sono state estratte barre di armatura per l'esecuzione di prove di trazione;
- sono state eseguite prove indirette di durezza tramite durometro Vickers per valutare la resistenza meccanica delle armature;
- sono state prelevate circa venti carote di calcestruzzo per eseguire le prove di schiacciamento in laboratorio;
- si sono effettuate prove indirette di tipo SonReb per stimare la resistenza meccanica del calcestruzzo.

A prescindere da ciò, visto il carattere strategico dell'intervento, la committenza ha espresso la volontà di raggiungere livelli di conoscenza più elevati. Pertanto, tali dati saranno integrati a seguito di ulteriori indagini materiche prese in carico dalla committenza stessa.

Nei prossimi paragrafi si entra nel merito dei risultati ottenuti dalle indagini in termini di geometria dell'edificio, di proprietà dei materiali e dei parametri geotecnici.

2.1. GEOMETRIA DELL'EDIFICIO

Il corpo di fabbrica oggetto di studio presenta uno sviluppo planimetrico di dimensioni 29.00 m x 35.00 m per un totale di circa 850 mq per ogni piano. Lo sviluppo altimetrico prevede, invece, sei piani fuori terra con copertura accessibile attraverso il torrino scale. La quota massima raggiunta è di circa 30.00 m.

Di seguito si riporta la pianta della copertura che permette di visualizzare lo sviluppo planimetrico dell'edificio e gli impianti presenti sul tetto.

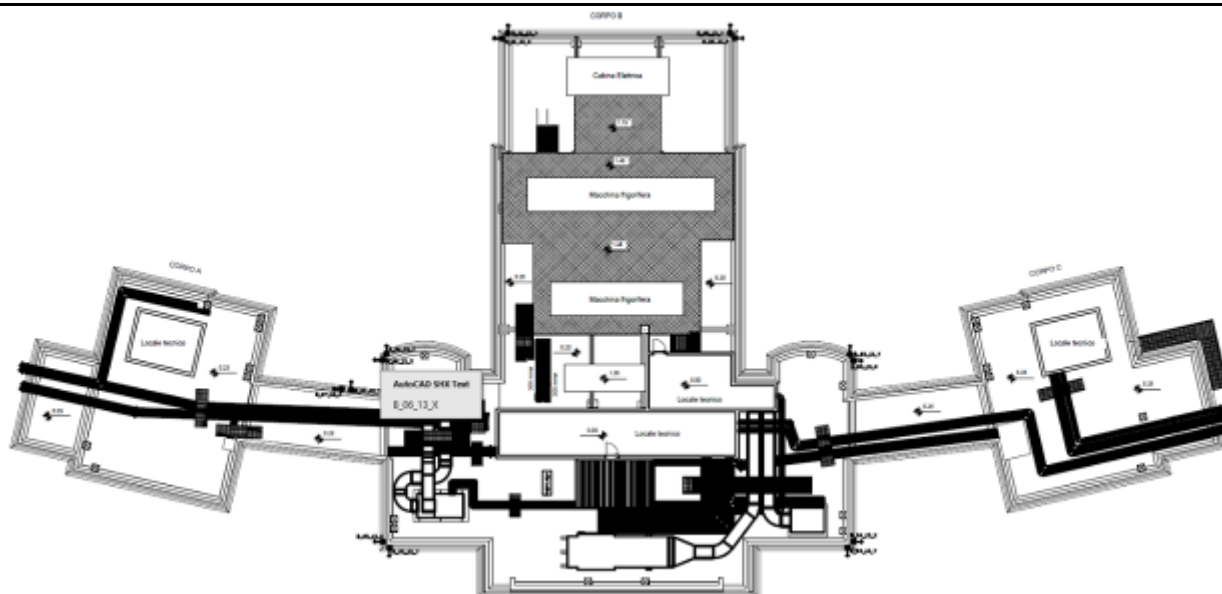


Figura 10 – Pianta piano copertura allo Stato di Fatto

I solai sono in latero-cemento e presentano diverse altezze:

- solai 18 + 5 cm con volterrane, in cui l'interasse travetti pari a 38 cm;
- solai 10 + 5 cm con volterrane, in cui l'interasse dei travetti è pari a 38 cm.

È presente anche qualche solaio in calcestruzzo pieno con spessore totale pari a 15 cm.

2.2. PROPRIETÀ DEI MATERIALI

La determinazione delle proprietà dei materiali è fondamentale per la successiva esecuzione delle analisi, laddove è indispensabile inserire valori prossimi alla realtà.

A partire dalle indagini eseguite è stato possibile stimare le caratteristiche meccaniche dei materiali.

Nello specifico, per quanto riguarda la resistenza a compressione del calcestruzzo si assume un valore di $f_{cm,PIL} = 12 \text{ MPa}$ per i pilastri e di $f_{cm,TRA} = 20 \text{ MPa}$ per le travi.

In merito alla resistenza a trazione a snervamento dell'acciaio, invece, si assume $f_{ym} = 240 \text{ MPa}$ sia per le armature longitudinali che per quelle trasversali. In merito alla resistenza ultima delle stesse si è assunto un valore di $f_{um} = 380 \text{ MPa}$.

2.3. PARAMETRI GEOTECNICI

In merito ai parametri geotecnici, la categoria di sottosuolo, come indicato in Tab. 3.2.II delle NTC 2018, è di tipo **B**.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>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.</i>
B	<i>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.</i>
C	<i>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.</i>
D	<i>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.</i>
E	<i>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.</i>

Figura 11 - Tab. 3.2.II, Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Per quanto riguarda la classificazione topografica si è utilizzata una categoria "T1": Pendii con inclinazione media $i \leq 15^\circ$ secondo la Tab. 3.2.III delle NTC 2018.

3. LIVELLO DI CONOSCENZA E FATTORE DI CONFIDENZA

Come enfatizzato dalle Norme, se si hanno a disposizione informazioni dettagliate riguardo ad una struttura esistente da valutare in termini di sicurezza, allora il Livello di conoscenza di tale struttura è più alto e, di conseguenza, si potranno svolgere analisi più dettagliate per definirne il comportamento.

Inoltre, il livello di conoscenza è strettamente correlato al Fattore di confidenza che, di fatto, è un coefficiente riduttivo che riflette l'incertezza relativa alla stima della resistenza dei materiali, dei dettagli costruttivi, della geometria, e che viene applicato alla sola resistenza dei materiali in fase di analisi e di verifica: un livello di conoscenza alto comporta un fattore di confidenza più basso e viceversa.

Questo approccio è molto sensato in quanto la Normativa “premia” chi indaga la struttura in maniera dettagliata (e quindi ottenendo dati più vicini alla realtà) e “penalizza” una campagna di indagine più “superficiale”.

Nella fattispecie, per il caso in esame, la committenza ha espresso la volontà di raggiungere livelli di conoscenza adeguati, attraverso l'integrazione delle varie indagini materiche necessarie.

Di conseguenza, per le analisi in essere, si è valutato un Livello di conoscenza adeguato LC2 che comporta un Fattore di confidenza pari a 1,20.

LIVELLO DI CONOSCENZA LC2: conoscenza adeguata

FATTORE DI CONFIDENZA (FC) = 1,20

Rientrando in questa categoria è possibile effettuare la valutazione della sicurezza dell'edificio mediante l'impiego di una qualsiasi metodologia di analisi numerica prescritta al Capitolo 7 delle NTC 2018.

4. AZIONE SISMICA

La valutazione dell'azione sismica tipica del sito parte dalla determinazione dei parametri spettrali per gli stati limite previsti dalle NTC 2018. Essi sono stati determinati sulla base delle caratteristiche del sottosuolo, considerando una vita nominale di 100 anni con coefficiente d'uso pari a 2,0. Il software utilizzato per la generazione di questi parametri è il foglio Excel del C.S.LL.PP. (Spettri-NTCver.1.0.3). Per effettuare le simulazioni oggetto del presente studio si farà riferimento allo SLD e allo SLV.

I parametri sismici per i due Stati Limite sono riportati sinteticamente nelle seguenti tabelle.

SL	SLD
a_g [g]	0.051
F_o [-]	2.526
T_C^* [s]	0.270
S_S [-]	1.200
S_T [-]	1.000
C_C [-]	1.429
S [-]	1.200
η [-]	1.000
T_B [s]	0.129
T_C [s]	0.386
T_D [s]	1.806

Tabella 1 – Parametri sismici - SLD

SL	SLV
a_g [g]	0.112
F_o [-]	2.521
T_C^* [s]	0.303
S_S [-]	1.200
S_T [-]	1.000
C_C [-]	1.397
S [-]	1.200
η [-]	1.000
T_B [s]	0.141
T_C [s]	0.423
T_D [s]	2.049

Tabella 2 - Parametri sismici – SLV

Questi parametri permettono di generare le forma spettrale riportata in Figura 12:

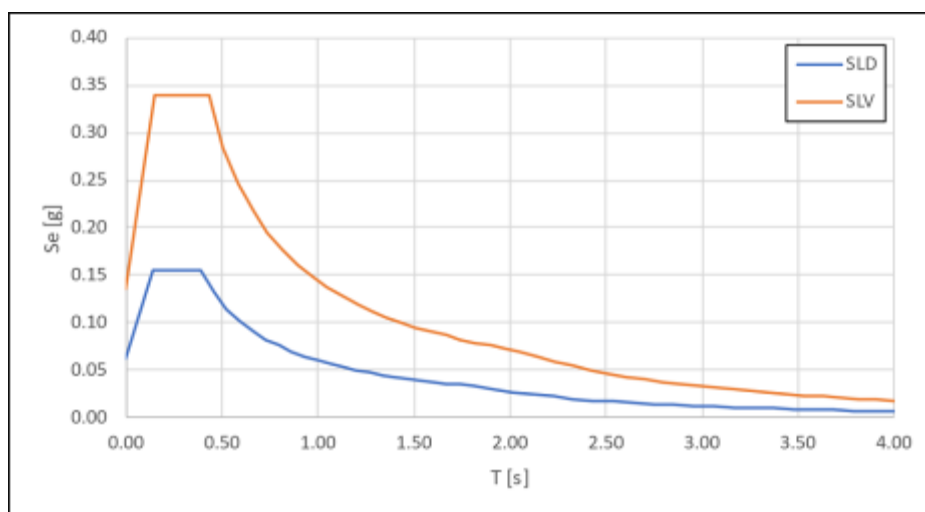


Figura 12 – Spettri di risposta elastici allo SLD e allo SLV

Per la definizione degli accelerogrammi da utilizzare nelle analisi sono stati considerati i soli Stati Limite definiti sopra. Per garantire una selezione di accelerogrammi che meglio rappresentino la sismicità del luogo, si è utilizzato il metodo della disaggregazione della pericolosità (Bazzurro e Cornell, 1999) tramite il sito dell'INGV, <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>.

Secondo il Modello di pericolosità sismica MPS04-S1, il sito in questione è caratterizzato di seguenti dati:

Zonazione sismogenetica	ZS9F
Zona sismogenetica	911
ID cella	16918

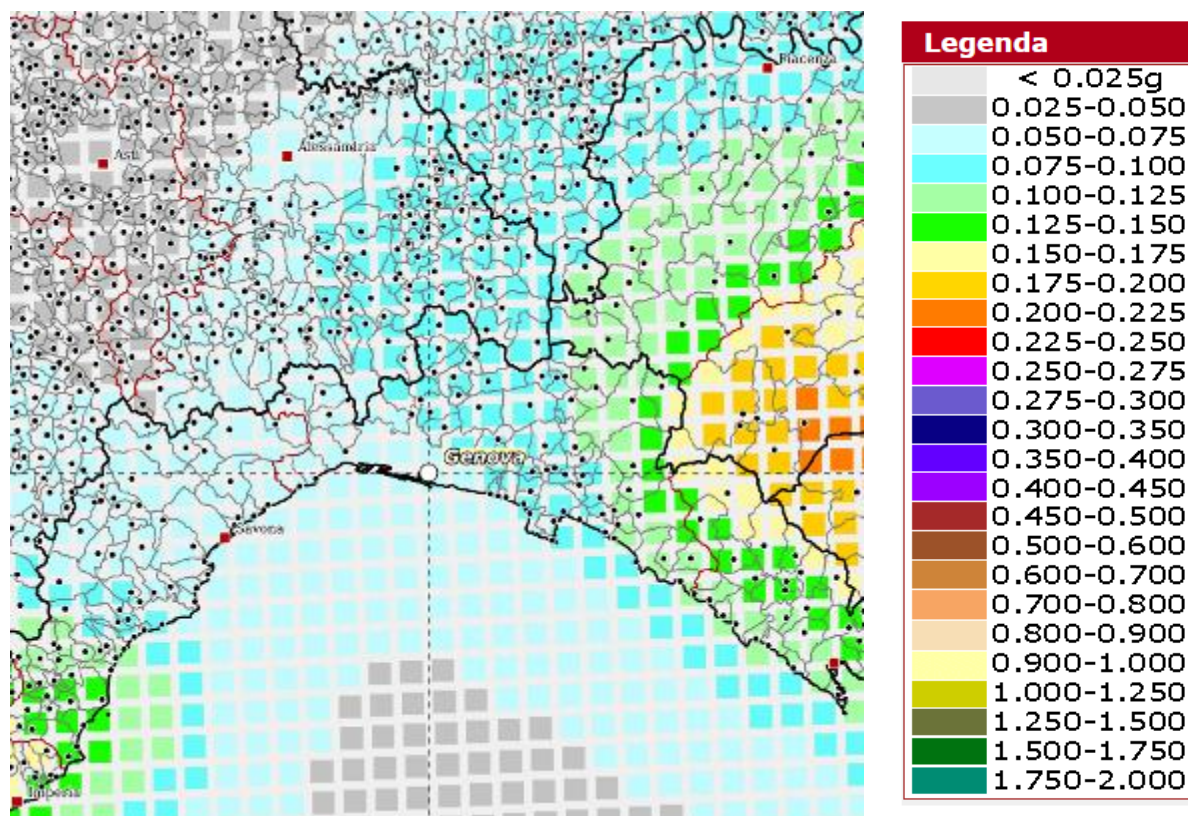


Figura 13 – Modello di pericolosità sismica MPS04-S1 per Genova (GE) relativo allo SLV

Le informazioni dedotte dalla disaggregazione di pericolosità permettono di stabilire per gli stati limite considerati quale sia la coppia di magnitudo-distanza dall'epicentro più pericolosa per il sito in questione.

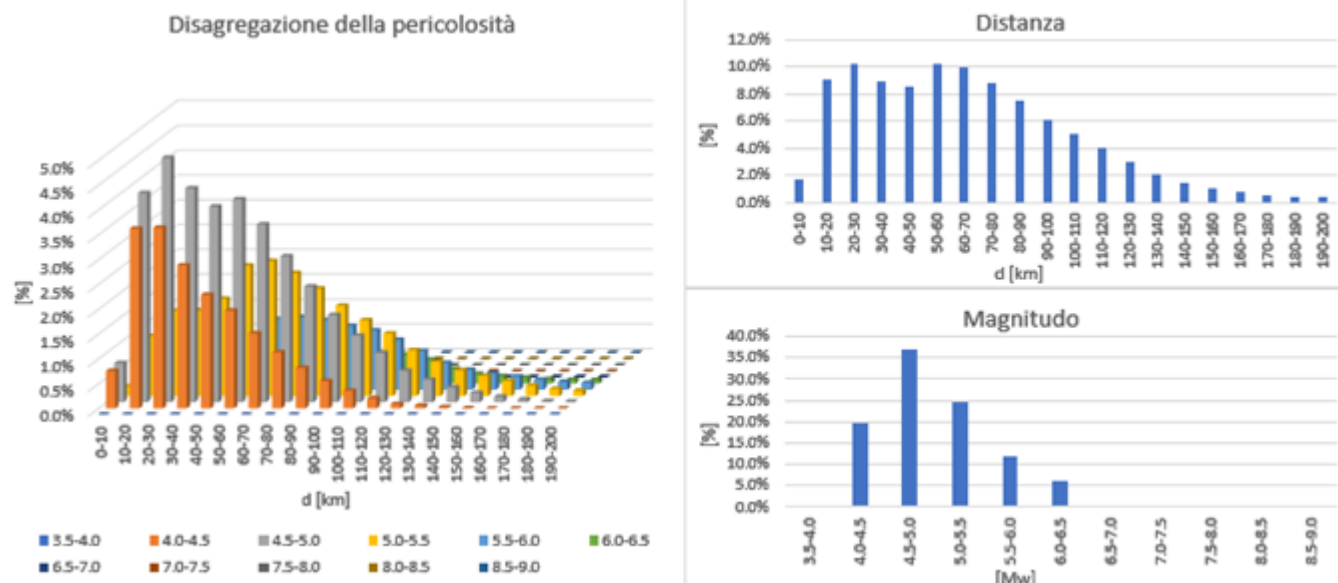


Figura 14 - Disaggregazione della pericolosità - SLD

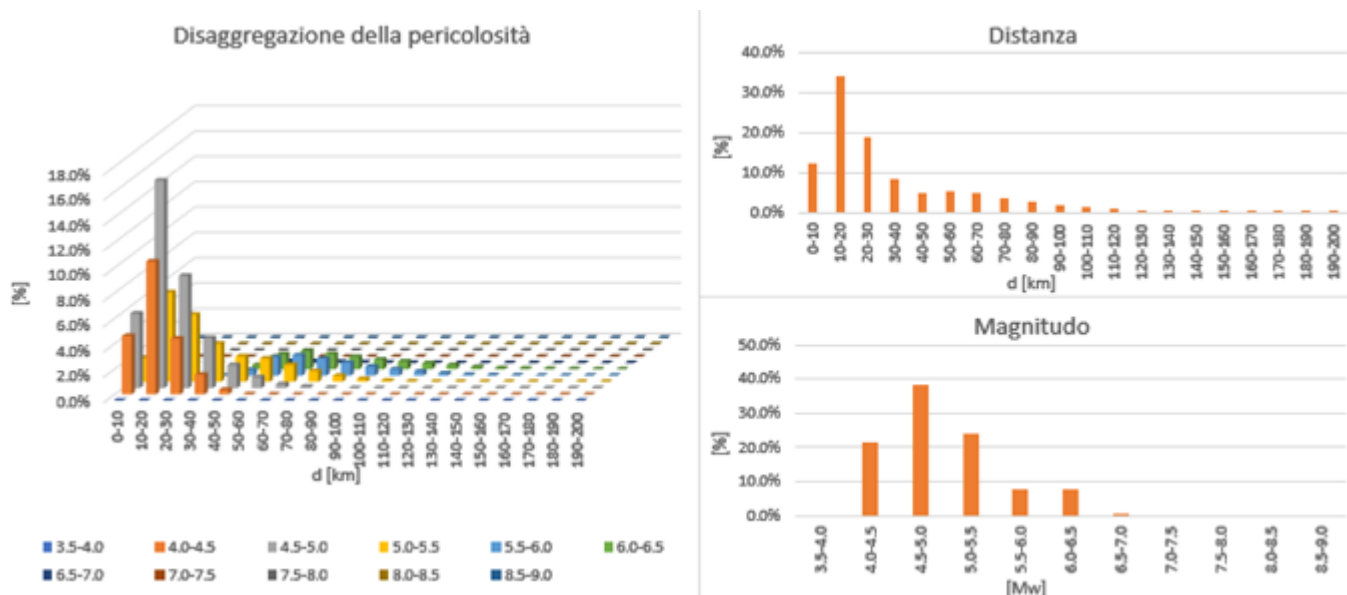


Figura 15 - Disaggregazione della pericolosità - SLV

Per l'input sismico sono state utilizzate tre coppie N-S, E-O di registrazioni naturali non scalate per lo stato limite considerato (SLV). La selezione è stata condotta sulla piattaforma REXELweb (https://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_32/#/rexel) dell'INGV imponendo la spettrocompatibilità rispetto agli spettri definiti in precedenza con uno scarto massimo del 30% in eccesso e del 10% in difetto, come prescritto da Normativa. L'intervallo di spettrocompatibilità va da 0,15 s a 2,0 s, mentre il metodo di selezione è quello relativo alla magnitudo-distanza che utilizza i valori derivanti dalla disaggregazione della pericolosità:

Stato Limite	Magnitudo min [Mw]	Magnitudo MAX [Mw]	Distanza min [km]	Distanza MAX [km]
SLD	4.0	6.5	10	120
SLV	4.0	6.5	0	40

Tabella 3 – Magnitudo e distanze epicentrali scelte per lo SLV

REXELweb utilizza l'archivio ITACA (Italian ACcelerometric Archive) che comprende più di 2200 registrazioni di accelerogrammi naturali provenienti da sismi con epicentro sul territorio italiano o in regioni vicine (Figura 16).



Figura 16 - Epicentri delle registrazioni dell'archivio ITACA

La spettrocompatibilità è assicurata dall'algoritmo del programma. Le registrazioni selezionate sono riportate nella tabella seguente:

SL	Nome evento	Data	Magnitudo [Mw]	Codice stazione	Numerazione accelerogramma
SLD	POTENZA	24/08/2016	6.0	AQG	2D
	CENTRAL_ITALY	30/10/2016	6.5	TER	4D
	UMBRIA-MARCHE:3RD SHOCK	24/08/2016	6.0	CADA	5D
SLV	CENTRAL ITALY	30/10/2016	6.5	CSC	3V
	CENTRAL ITALY	30/10/2016	5.9	MMO	6V
	CENTRAL ITALY	30/10/2016	6.5	MZ63	7V

Tabella 4 – Registrazioni sismiche selezionate

A seguire le storie temporali in accelerazione relative agli Stati Limite considerati.

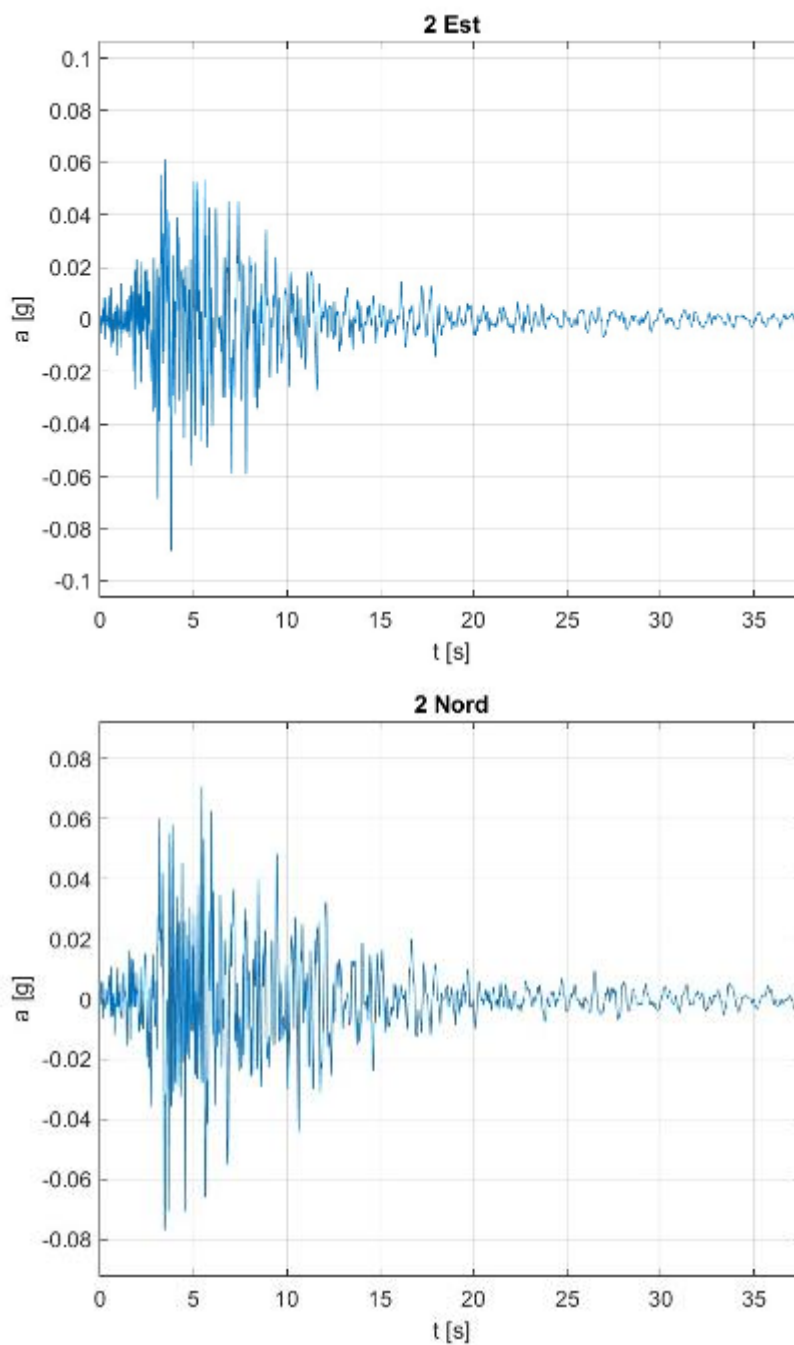


Figura 17 - SLV – Accelerogramma 1 – SLD (Numerazione: 2D)

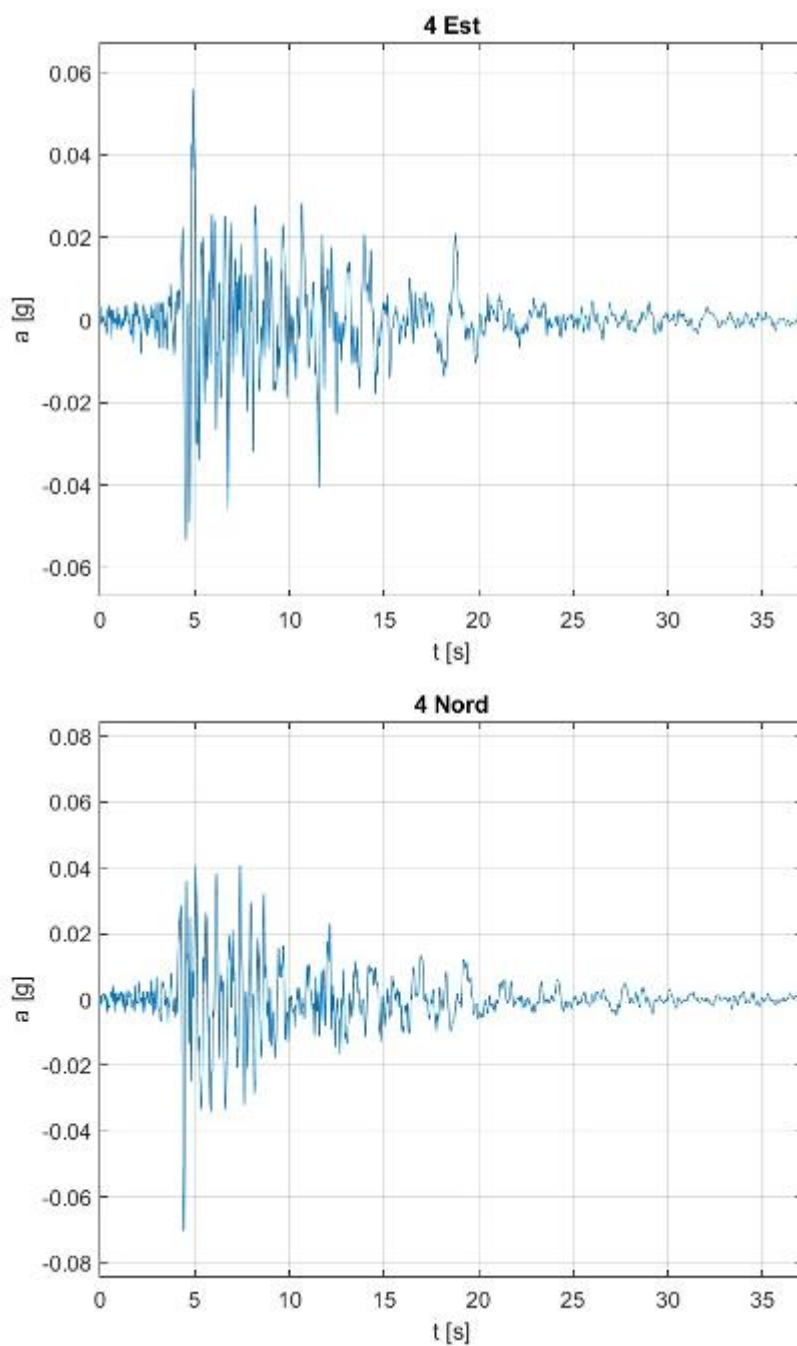


Figura 18 - Accelerogramma 2 – SLD (Numerazione: 4D)

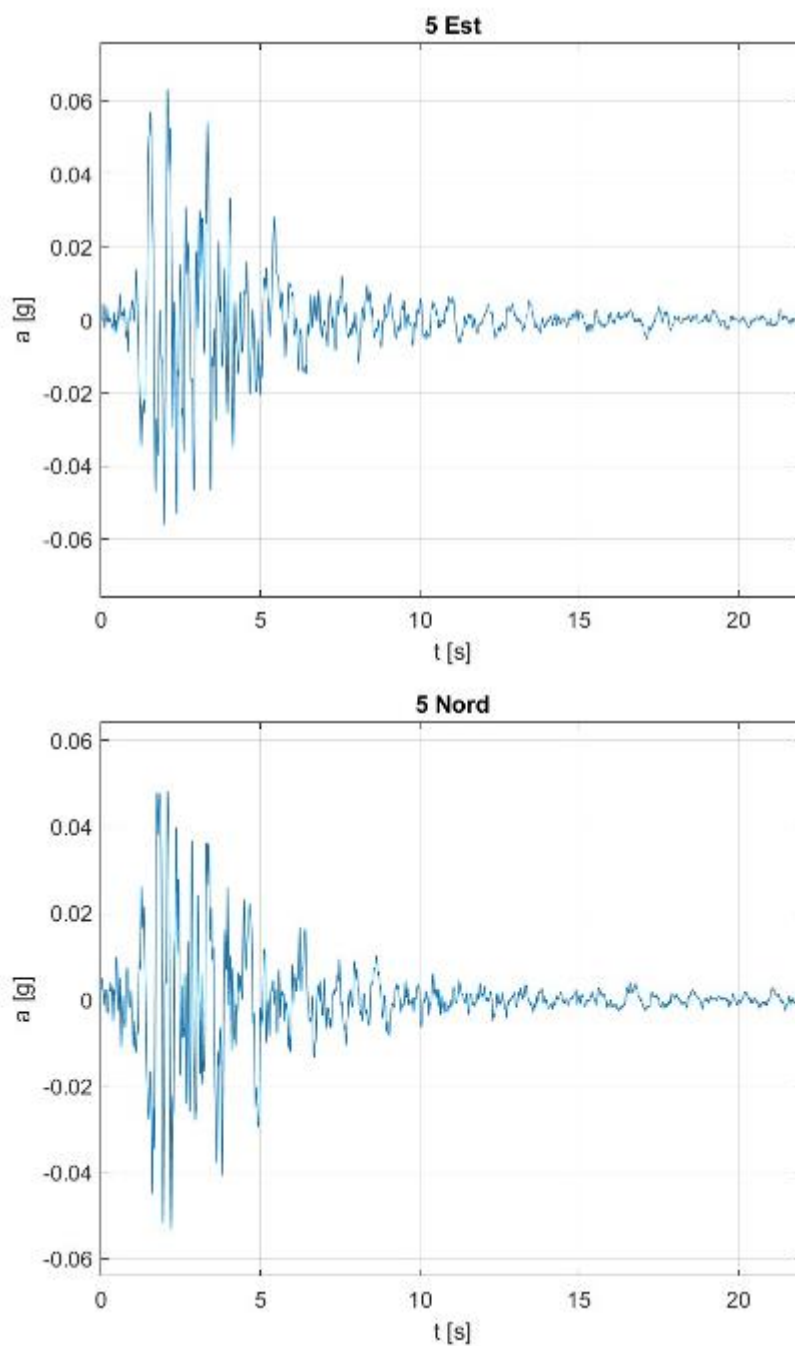


Figura 19 - Accelerogramma 3 – SLD (Numerazione: 5D)

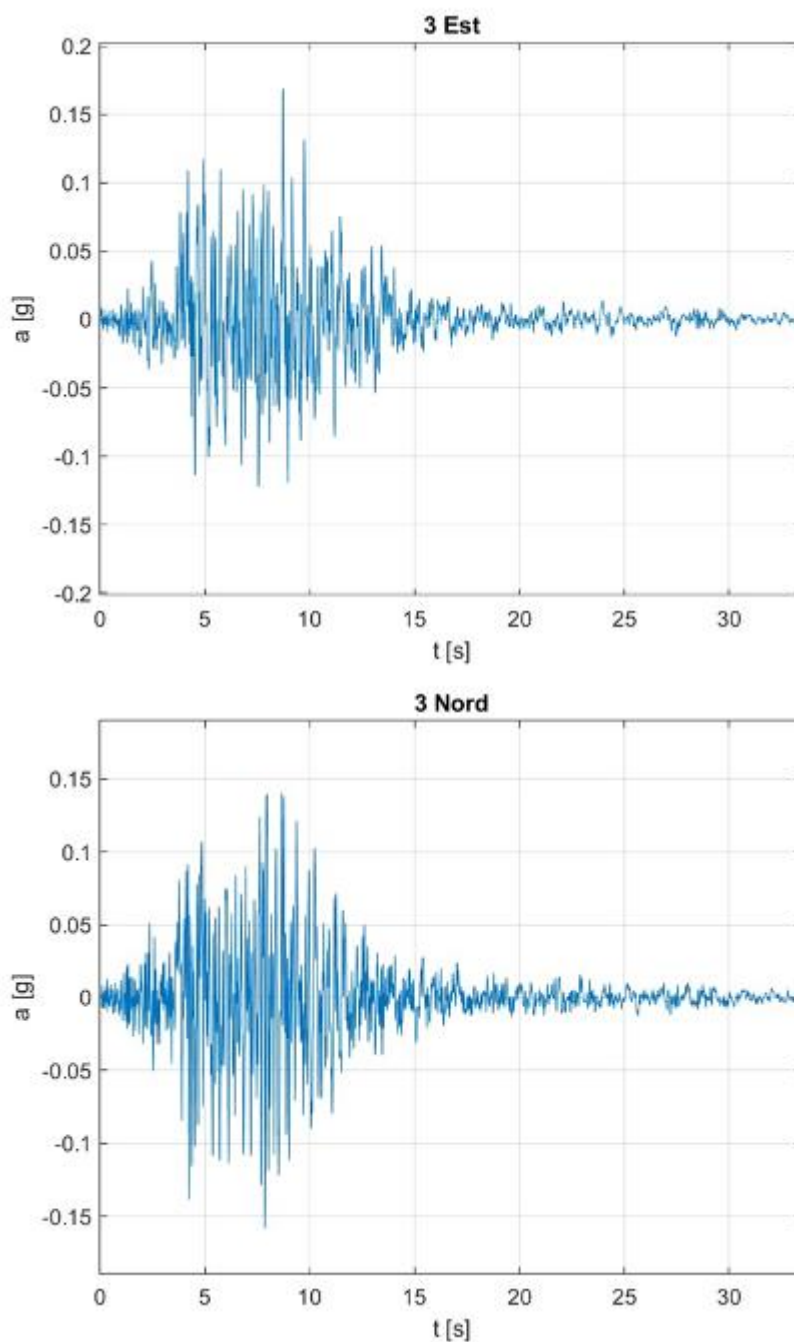


Figura 20 - SLV – Accelerogramma 1 – SLV (Numerazione: 3V)

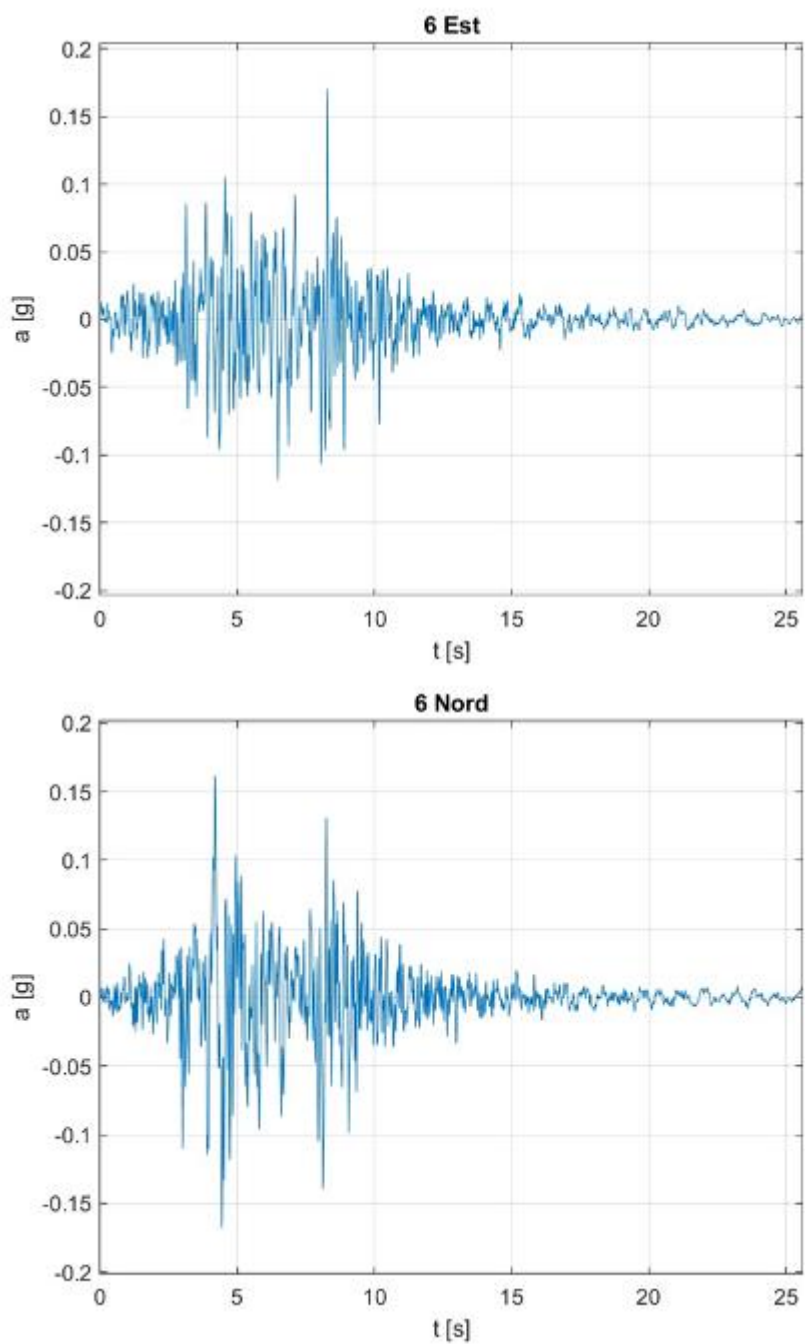


Figura 21 - Accelerogramma 2 – SLV (Numerazione: 6V)

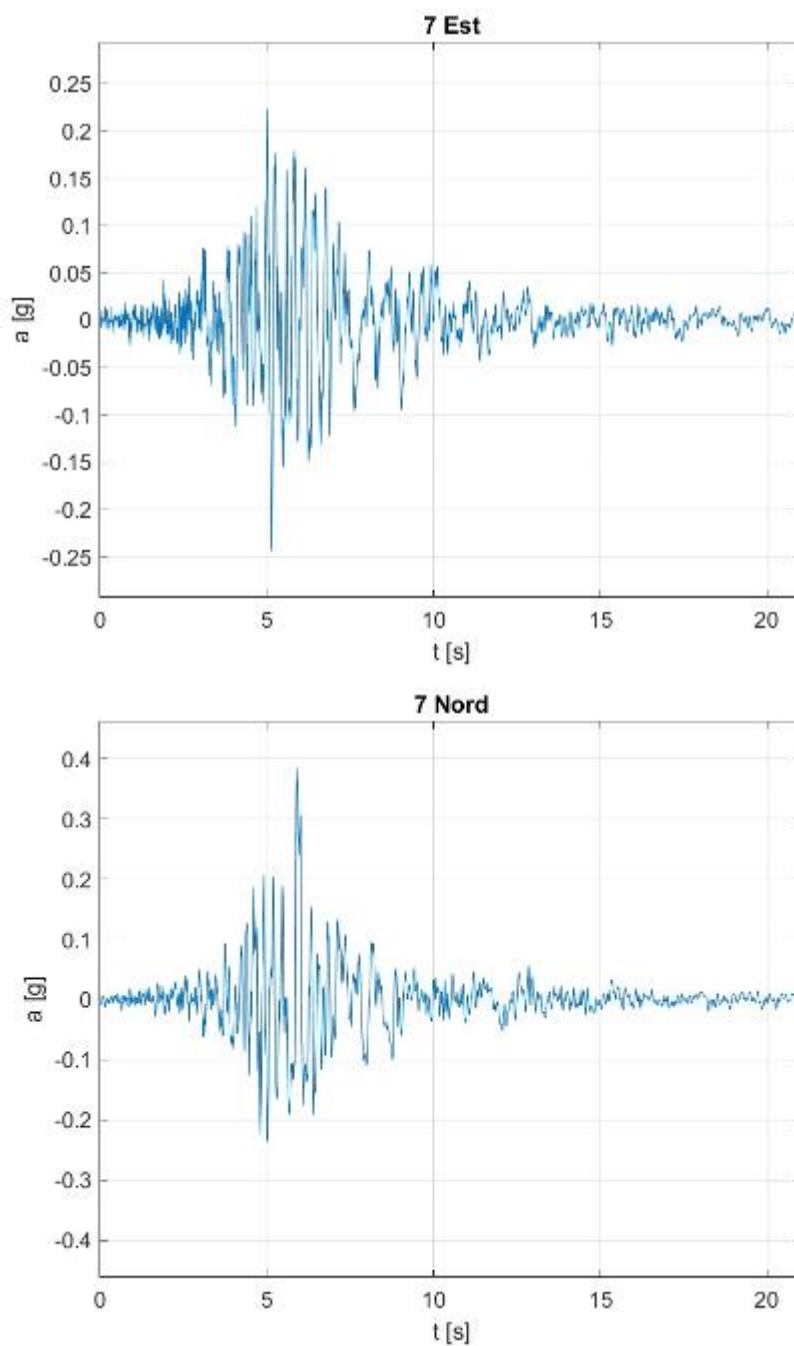


Figura 22 - Accelerogramma 3 – SLV (Numerazione: 7V)

5. ANALISI DEI CARICHI GRAVITAZIONALI

Una volta definita l'azione sismica di progetto, si valutano i carichi gravitazionali, nonché i sovraccarichi, agenti sulla struttura.

5.1. SOLAI

In merito al carico gravante sui solai, i dati vengono riepilogati in Tabella 5, in funzione del tipo di orizzontamento.

SOLAIO 18+5 cm			
PIANO	G_1 [kN/m ²]	G_2 [kN/m ²]	q [kN/m ²]
Tipo	3.00	1.40	2.00
Copertura	3.00	3.00	2.00
SOLAIO 10+5 cm			
PIANO	G_1 [kN/m ²]	G_2 [kN/m ²]	q [kN/m ²]
Tipo	2.35	1.40	2.00
Copertura	2.35	3.00	2.00
SOLAIO PIENO 15 cm			
PIANO	G_1 [kN/m ²]	G_2 [kN/m ²]	q [kN/m ²]
Tipo	3.75	1.40	2.00
Copertura	3.75	3.00	2.00

Tabella 5 – Analisi dei carichi solaio

5.2. TAMPONATURE

Il carico derivante dalle tamponature è stato calcolato e poi applicato come azione distribuita sulle travi così come esplicito in Figura 23.

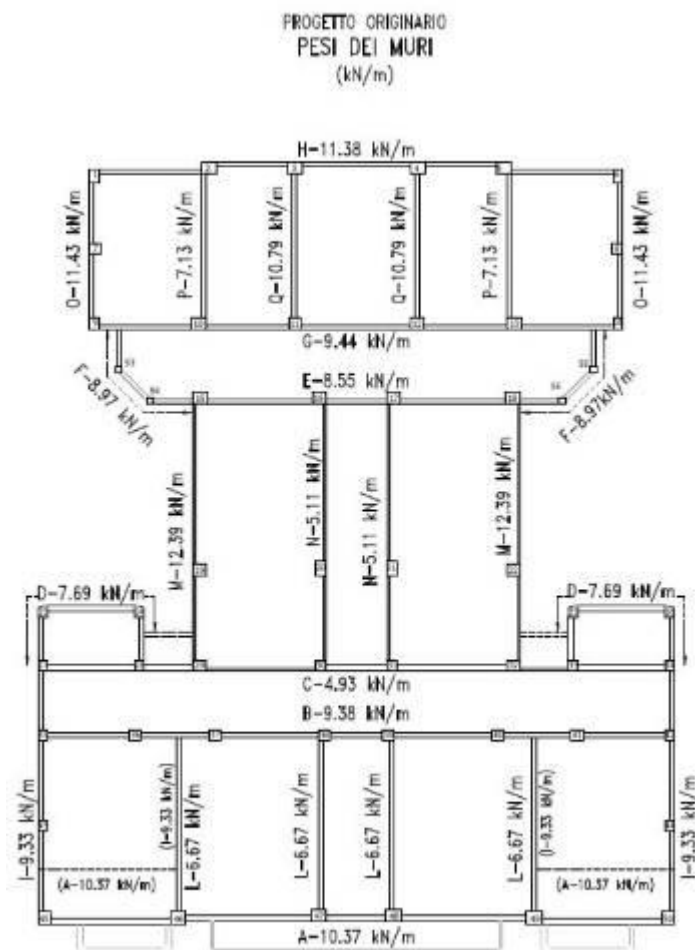


Figura 23 – Carichi distribuiti sulle travi relativi alle tamponature

5.3. CALCOLO DEI PESI SISMICI

I carichi forniti nei paragrafi precedenti sono i valori caratteristici delle azioni. Per ottenere i carichi di progetto si è utilizzata la combinazione di carico espressa dall'equazione 2.5.7 delle NTC 18 (combinazione sismica):

$$G_1 + G_2 + \sum_j \Psi_{2j} Q_{kj}$$

dove:

- G_1 rappresenta la somma dei carichi strutturali permanenti agenti sulla struttura;
- G_2 rappresenta la somma dei carichi strutturali non permanenti agenti sulla struttura;
- Q_{kj} sono i diversi carichi variabili agenti sulla struttura;
- Ψ_{2j} indicano i valori quasi permanenti dei coefficienti di combinazione come da Tab. 2.5.I delle NTC 18.

La massa totale della struttura è pari a circa 6600 ton.

La distribuzione del peso sismico ai vari orizzontamenti è indicata in Tabella 6.

Piano	Massa sismica [ton]	Peso sismico [kN]
1	1135	11134
2	1090	10693
3	1060	10399
4	1060	10399
5	1015	9957
Copertura	890	8731
TO TALE	6250	61313

Tabella 6 – Masse sismiche e pesi sismici di piano

6. MODELLAZIONE STRUTTURALE

Il modello strutturale dell'edificio è stato creato all'interno del software di calcolo agli elementi finiti *SAP2000* sviluppato da *CSI America*, programma di calcolo strutturale che permette l'esecuzione di analisi lineari e non lineari statiche e dinamiche.

Tale modello costituisce la base di partenza al fine di dimensionare il sistema attivo di protezione sismica Electro-Pro 20x o similare o similare o similare.

Nei riguardi dei parametri meccanici dei materiali, coerentemente con quanto visto nel Paragrafo 2.2, sono presenti i seguenti valori all'interno del modello ad elementi finiti:

- Calcestruzzo: $f_{cm,TRA} = 20 \text{ MPa}$ per le travi e $f_{cm,PIL} = 12 \text{ MPa}$ per i pilastri;
- Acciaio: $f_{ym} = 240 \text{ MPa}$; $f_{um} = 380 \text{ MPa}$.

Gli elementi strutturali che compongono la struttura in esame, quali travi e pilastri, sono stati modellati come elementi frame lineari, ognuno con la propria sezione reale.

A livello cautelativo, le colonne a contatto con il terreno sono state incastrate alla base con rilasci flessionali in entrambe le direzioni in prossimità del vincolo. A partire dalle caratteristiche geometriche e meccaniche delle sezioni si è stimata una rigidezza dell'elemento pari al 70% di EJ/L .

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche per le sezioni delle colonne interessate.

Sezione	t_3	t_2	Area	I_{33}	I_{22}	L	E	$K_2=EJ_2/L$	$K_3=EJ_3/L$	$0.7 K_2$	$0.7 K_3$
[-]	[m]	[m]	[m ²]	[m ⁴]	[m ⁴]	[m]	[kN/m ²]	[kN-m/rad]	[kN-m/rad]	[kN-m/rad]	[kN-m/rad]
P55x55	0.55	0.55	0.303	0.007626	0.007626	4.50	2.7E+07	45900	45900	32130	32130
P70x55	0.70	0.55	0.385	0.015721	0.009705	4.50	2.7E+07	58413	94623	40889	66236
P45x45	0.45	0.45	0.203	0.003417	0.003417	4.50	2.7E+07	20567	20567	14397	14397
P60x50	0.60	0.50	0.300	0.009000	0.006250	4.50	2.7E+07	37618	54170	26333	37919
P70x50	0.70	0.50	0.350	0.014292	0.007292	4.50	2.7E+07	43890	86022	30723	60215
P50x50	0.50	0.50	0.250	0.005208	0.005208	4.50	2.7E+07	31348	31348	21944	21944
P30x30	0.30	0.30	0.090	0.000675	0.000675	4.50	2.7E+07	4063	4063	2844	2844
P50x60	0.50	0.60	0.300	0.006250	0.009000	4.50	2.7E+07	54170	37618	37919	26333
P40x40	0.40	0.40	0.160	0.002133	0.002133	4.50	2.7E+07	12838	12838	8987	8987
P50x45	0.50	0.45	0.225	0.004688	0.003797	4.50	2.7E+07	22854	28217	15998	19752

Tabella 7 – Proprietà rigidezze flessionali sezioni

Di seguito gli elementi ai quali sono stati assegnati i rilasci flessionali.

A.T.P.

Dott. Ing. Gianfranco Visconti

Dott. Ing. Bruno Boldrin

Elemento	M 2	M 3
[-]	KN-m/rad	KN-m/rad
P45-1	32130	32130
P50-1	32130	32130
47-1	40889	66236
P2-1	40889	66236
P3-1	40889	66236
P4-1	40889	66236
P5-1	40889	66236
P46-1	40889	66236
P48-1	40889	66236
P49-1	40889	66236
P23-1	14397	14397
P24-1	14397	14397
P25-1	14397	14397
P26-1	14397	14397
P27-1	14397	14397
P28-1	14397	14397
P33-1	14397	14397
P34-1	14397	14397
P35-1	14397	14397
P42-1	14397	14397
P43-1	14397	14397
P44-1	14397	14397
P35-s-1	14397	14397
P42-d-1	14397	14397
P48-d-1	14397	14397
P49-d-1	14397	14397
P49-s-1	14397	14397
P27-s-1	14397	14397
P34-d-1	14397	14397
P48-s-1	14397	14397
18	26333	37919
P19-1	26333	37919
P22-1	26333	37919
P29-1	26333	37919
P32-1	26333	37919
P36-1	26333	37919
P37-1	26333	37919
P38-1	26333	37919
P39-1	26333	37919
P41-1	26333	37919
P10-1	30723	60215
P11-1	30723	60215
P12-1	30723	60215
P13-1	30723	60215
P15-1	30723	60215
P16-1	30723	60215
P17-1	30723	60215
P18-1	30723	60215
P1-1	21944	21944
P6-1	21944	21944
P7-1	21944	21944
P8-1	21944	21944
P9-1	21944	21944
P14-1	21944	21944
P53-1	2844	2844
P54-1	2844	2844
P55-1	2844	2844
P56-1	2844	2844
P20-1	37919	26333
P21-1	37919	26333
1	8987	8987
2	8987	8987
3	8987	8987
4	8987	8987
P30-1	15998	19752
P31-1	15998	19752

Tabella 8 – Elementi con i rilasci flessionali

I solai di piano, come citato al §7.2.6 delle NTC 2018, *possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano medio a condizione che siano realizzati in calcestruzzo armato, oppure in latero-cemento con soletta armata di almeno 40 mm di spessore.*

In questo caso specifico, tutti i solai presentano una soletta collaborante di spessore pari ad almeno 5 cm. Per questo motivo, vista anche la regolarità in pianta della struttura in esame, è stata effettuata una modellazione dei solai con un vincolo interno di diaframma rigido.

La modellazione della massa e dei carichi risulta di fondamentale importanza perché da essi dipendono le caratteristiche dinamiche del fabbricato. Il software ad elementi finiti *SAP2000* definisce in modo automatico le masse concentrate ai vari nodi a partire dal peso proprio degli elementi strutturali modellati come travi e pilastri. In aggiunta, in funzione di quanto visto nel Capitolo 5, vi sono implementati i carichi d'area distribuiti nelle varie zone (aree di tipo *None*). Il carico relativo alle tamponature e ai parapetti in copertura è applicato come carico lineare direttamente sulle travi di bordo della struttura. Il modello base di partenza è rappresentato nelle figure seguenti.

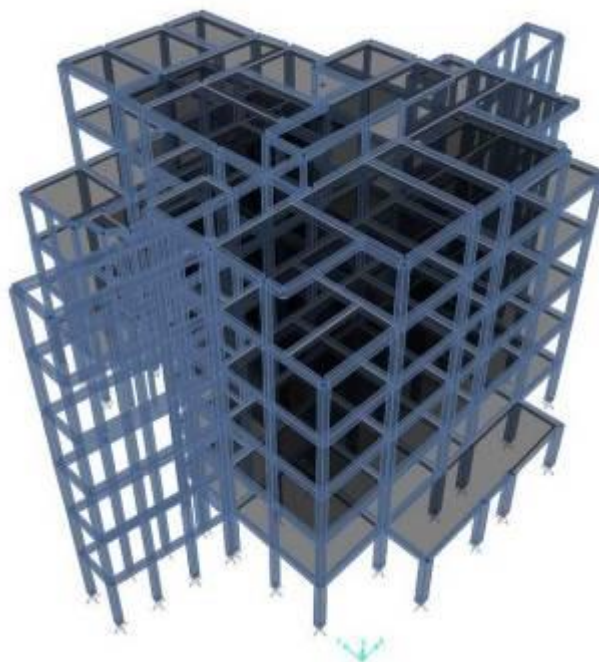


Figura 24 – Modello FEM estruso – Lato S-E

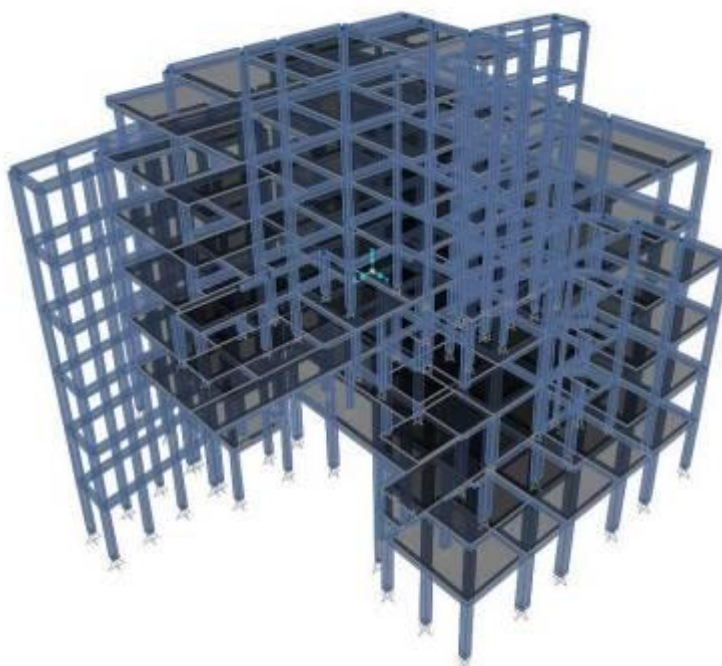


Figura 25 - Modello FEM estruso – Lato N-O

Esso costituisce il modello di riferimento per lo svolgimento delle simulazioni numeriche presentate nei capitoli successivi.

6.1. ANALISI AGLI AUTOVALORI

L'analisi dinamica modale è utile perché consente di studiare il comportamento dinamico del fabbricato.

Di seguito si riportano i dettagli dei primi dieci modi di vibrare ricavati dalla struttura nuda.

N° modo	Periodo	MASSE PARTECIPANTI						
		Frequenza	NDM/DUALI			CUMULATIVE		
			UX	UY	RZ	Sum UX	Sum UY	Sum RZ
[]	[s]	[Hz]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	1.29	0.78	0.00%	89.26%	0.04%	0.00%	89.26%	0.04%
2	1.23	0.82	10.07%	0.06%	49.71%	10.07%	89.32%	49.75%
3	0.99	1.01	70.06%	0.00%	29.42%	80.12%	89.32%	79.17%
4	0.68	1.47	0.00%	0.02%	0.00%	80.12%	89.33%	79.17%
5	0.67	1.50	2.07%	0.00%	0.11%	82.20%	89.33%	79.28%
6	0.45	2.20	0.18%	4.19%	1.51%	82.38%	93.53%	80.79%
7	0.45	2.21	0.40%	2.16%	2.86%	82.78%	95.68%	83.65%
8	0.33	2.99	10.48%	0.00%	8.62%	93.26%	95.68%	92.27%
9	0.30	3.34	0.00%	0.13%	0.00%	93.26%	95.82%	92.27%
10	0.30	3.38	1.07%	0.00%	0.00%	94.33%	95.82%	92.27%

Tabella 9 – Caratteristiche modi di vibrare

Le prime tre forme modali sono riportate nelle immagini seguenti.

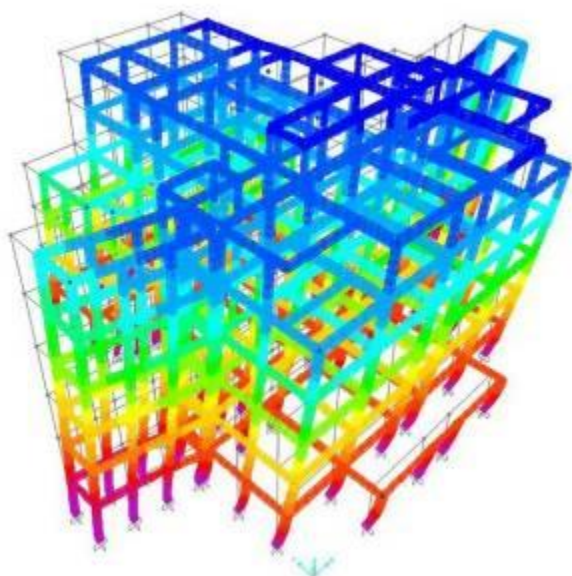


Figura 26 – Modo 1 – $T = 1.29$ s; $f = 0.78$ Hz

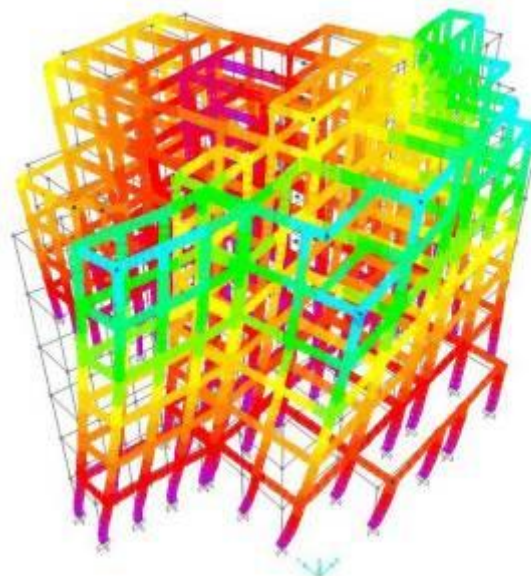


Figura 27 - Modo 2 – $T = 1.23$ s; $f = 0.82$ Hz

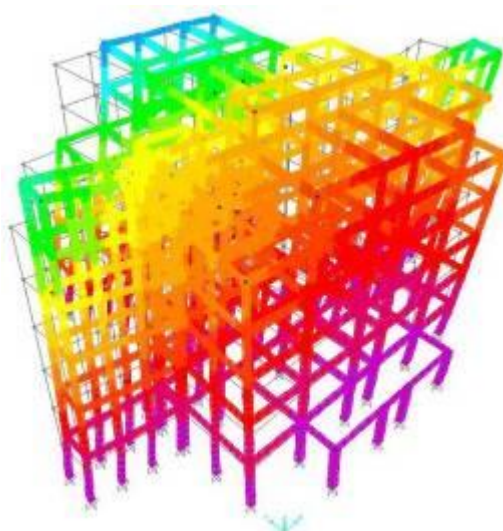


Figura 28 - Modo 3 – $T = 0.99$ s; $f = 1.01$ Hz

7. IL SISTEMA DI CONTROLLO ATTIVO ELECTRO-PRO 20X O SIMILARE

In questo capitolo si entra nel dettaglio nei riguardi della progettazione del sistema di controllo attivo Electro-Pro 20x o similare per la protezione sismica del fabbricato in esame.

7.1. CARATTERISTICHE DEL SISTEMA

Il sistema Electro Pro 20x è una macchina elettrica, attiva ed intelligente per il controllo della risposta sismica di edifici nuovi ed esistenti costituito da 4 componenti base, opportunamente assemblati in un “sistema di controllo attivo della risposta sismica”, secondo norma ISO3010:2017 che ne permette l'applicazione a livello nazionale ed internazionale.

A seguire il dettaglio delle componenti che costituiscono il sistema Electro Pro 20x o similare:

- Macchine EP-D20 sono le masse inerziali che generano le forze di controllo sul fabbricato, unitamente ai relativi componenti elettrici. Queste vengono ancorate all'edificio su cui viene effettuato l'intervento di miglioramento sismico, eventualmente grazie a delle carpenterie che permettono di distribuire il carico verticale ed orizzontale delle macchine.
- Sensori EP-S: sensori accelerometrici analogici a basso rumore elettrico, necessari al controllo della risposta sismica durante il terremoto.
- Computer centrale EP-UT: PLC Real-Time di acquisizione dei dati ed elaborazione tramite algoritmi di controllo ISAAC.
- Batterie tampone EP-A: sistema di alimentazione con gruppo di continuità.

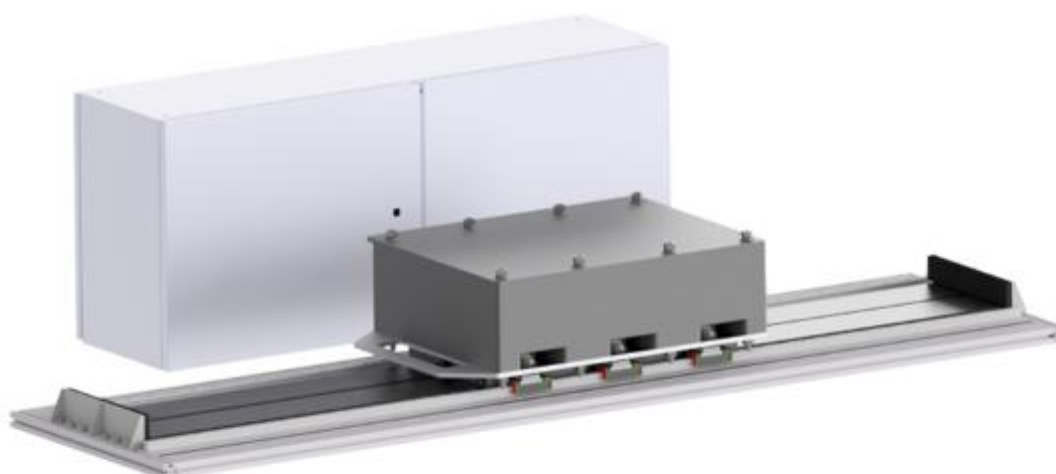


Figura 29 – Rendering della macchina EP-D20

Le macchine EP-D20 vengono installate, insieme ai sensori accelerometrici (codice EP-S) sulla struttura (vedi Figura 30 e Figura 31) e collegati all'unità di controllo centrale (codice EP-UT), che coordina e controlla l'intero sistema.



Figura 30 - Esempio di installazione del sistema Electro Pro 20x o similare su un edificio di 10 piani in cemento armato.



Figura 31 - Esempio di installazione dei sensori del sistema Electro Pro 20x o similare su edificio.

Lo scopo del sistema è quello di “contrastare” il movimento dell'edificio sul quale è installato durante l'evento sismico, riducendo le ampiezze di oscillazione della costruzione e di conseguenza gli sforzi applicati sugli elementi strutturali. Questo avviene grazie alla generazione di forze da parte di ogni macchina EP-D20 nella propria direzione di installazione e con ampiezze determinate dall'algoritmo di controllo implementato sul computer centrale EP-UT, che misura le accelerazioni dell'edificio nei punti di installazione dei sensori, e di conseguenza calcola le forze da generare nei diversi punti di installazione delle macchine. Il sistema richiede di essere collegato alla rete elettrica solo per il funzionamento dei mantenitori di carica che permettono a macchine e comandi di funzionare anche in mancanza di corrente elettrica.

Per il controllo della macchina reale si utilizza un controllore di tipo Sky-Hook. La forza di controllo di ciascuna macchina i -esima è definita, grazie all'algoritmo di controllo implementato, come:

$$F_{c,i} = -G_{SH,i}(v_{t,i} - v_{b,i}) = -G_{SH,i}v_{rel,i}$$

Dove:

- $v_{t,i}$ è la velocità del punto di misura posizionato in corrispondenza della macchina i -esima lungo la direzione di applicazione della forza;
- $v_{b,i}$ è la velocità del piano terra dell'edificio in corrispondenza di un punto verticalmente allineato con la macchina i -esima, sempre nella direzione di applicazione della forza della macchina stessa;
- $G_{SH,i}$ è il guadagno impostato sulla macchina i -esima. Il guadagno $G_{SH,i}$ definisce la costante di proporzionalità diretta tra la velocità relativa del tetto e la forza di controllo applicata. Il segno negativo garantisce che la macchina generi una forza che vada a

“contrastare” l’azione del sisma e che abbia sempre un comportamento dissipativo: infatti, la macchina agisce idealmente come un elemento viscoso posto tra la base e la sommità dell’edificio. L’unità di misura del guadagno è $(\text{kN s}) / \text{m}$.

Le macchine presentano una peculiarità legata alla massima tensione di corrente raggiungibile, che non può mai eccedere i 750 V (questo si traduce in una saturazione in velocità della massa mobile).

Ad ogni modo, a fronte della corretta progettazione del sistema e di verifiche in fase di post-processing, tale limite non comporta problematiche.

7.2. MODELLAZIONE DEL SISTEMA E ASPETTI DI PROGETTAZIONE

Grazie all’algoritmo di controllo implementato nella realtà, il sistema Electro-Pro 20x o similare può essere inserito, all’interno del modello numerico, attraverso l’introduzione di un dissipatore viscoso classico che presenta, per il grado di libertà di interesse, una legge comportamentale Forza-Velocità che permetta di rispettare la forza massima esprimibile dall’unità macchina pari a 20 kN.

L’elemento adatto a questi scopi, implementato nel software di calcolo *SAP2000* è denominato *Damper bilinear*. Si tratta di un elemento finito a due nodi, che può essere utilizzato per rappresentare un tipico dissipatore viscoso non lineare che dipende dalla velocità dello stesso in serie con una molla (modello alla Maxwell rappresentato in Figura 32).



Figura 32 – Modello alla Maxwell

Il coefficiente che rende la forza proporzionale alla velocità è assimilabile al guadagno $G_{SH,i}$ visto in precedenza

Per ottenere un comportamento simile a quello della macchina attiva è necessario:

- individuare un valore appropriato del parametro $G_{SH,i}$ che rappresenta il guadagno della singola macchina;

- assegnare un valore alla costante elastica della molla che sia almeno un paio di ordini di grandezza superiore rispetto al parametro $G_{SH,i}$.

L'inserimento all'interno del modello si effettua in pochi semplici passaggi:

- si individua la posizione di applicazione dell'unità macchina sul piano di copertura dell'edificio e, in base a questa, si sceglie il nodo di applicazione nel modello ad elementi finiti;
- si crea un nodo aggiuntivo alla stessa quota del nodo di applicazione, lungo la direzione di azione della macchina;
- si incastra il nodo aggiuntivo (tale nodo risulta così incastrato "in cielo");
- si inserisce l'elemento finito link di tipo *Damper bilinear* tra i due nodi.

Nell'ipotesi di svolgere un'analisi dinamica di tipo Time-History, il software sarà così in grado, ad ogni passo dell'analisi, di calcolare la velocità relativa tra il nodo appartenente al tetto e il nodo incastrato in cielo, il quale si comporterà in maniera analoga ad un nodo incastrato a terra.

Attraverso il parametro $G_{SH,i}$ impostato, l'elemento link è così in grado di sviluppare una forza proporzionale alla velocità, così come farebbe la macchina nella realtà comandata dal computer di controllo.

La metodologia presentata rappresenta una procedura semplificata attraverso la quale è possibile tenere in conto, all'interno di un modello ad elementi finiti, il comportamento del sistema attivo. Tuttavia, è necessario in fase di post-processing la verifica dei vincoli tecnologici legati alla macchina in termini di tensione. Grazie all'utilizzo di un tool specifico, al termine delle analisi è possibile verificare che le storie temporali delle forze di controllo siano effettivamente erogabili dagli attuatori andando a verificare il rispetto delle saturazioni in velocità e accelerazione.

Tale procedura è da svolgersi per ogni unità macchina presente sul piano di copertura del fabbricato.

A questo punto, risulta evidente l'importanza del parametro legato al guadagno, che costituisce uno degli aspetti progettuali rilevanti, insieme alla lunghezza della corsa e alla massa della parte mobile.

Il valore del guadagno $G_{SH,i}$, infatti, si determina in maniera tale da massimizzare le performance della struttura e da rispettare i limiti tecnologici in tensione di corrente di cui sopra.

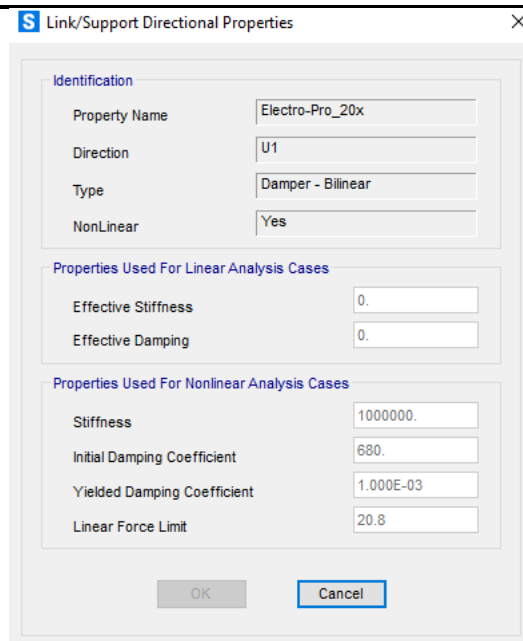


Figura 33 – Schermata del software SAP2000 con le proprietà del link

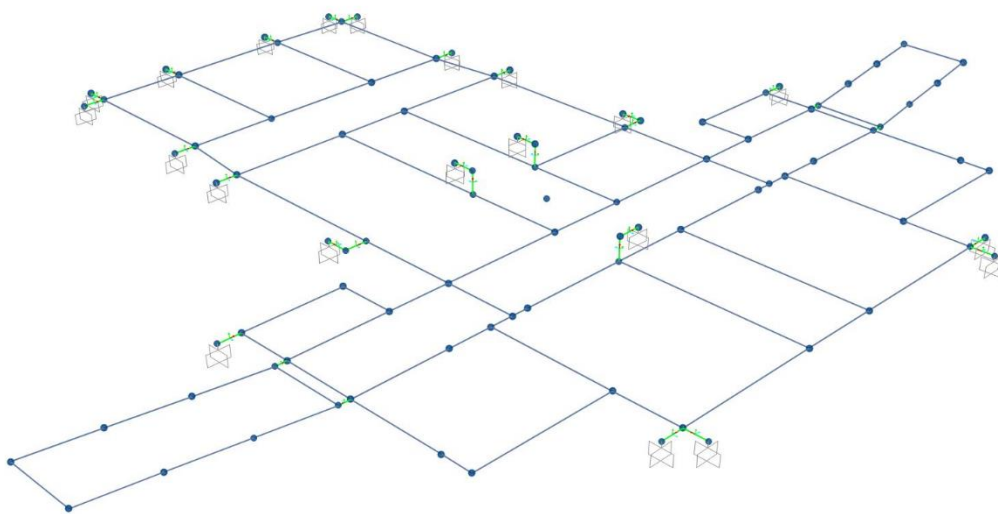


Figura 34 – Piano di copertura del modello FEM con l'inserimento degli elementi link

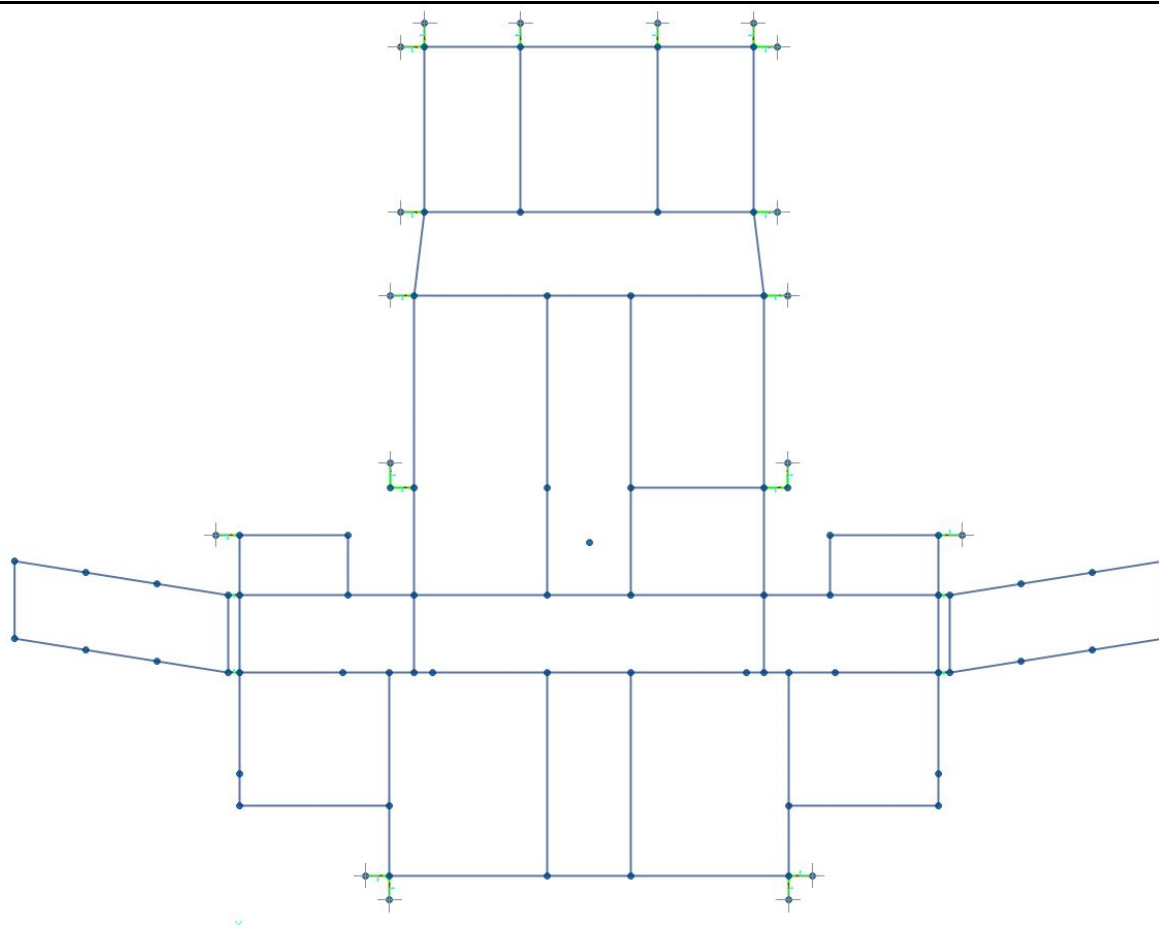


Figura 35 - Vista in pianta con in vista gli elementi link

Il numero delle unità macchina, pari a 24, è stato determinato al fine di garantire gli indici di performance presentati nel capitolo successivo.

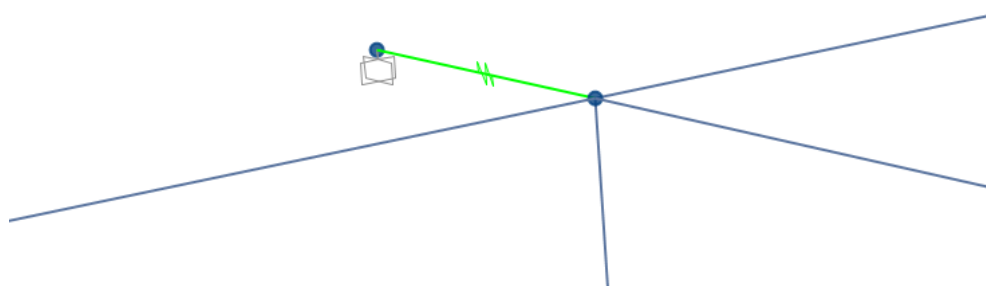


Figura 36 – Particolare della modellazione

La disposizione in pianta delle unità macchina è rappresentata nell'immagine seguente.

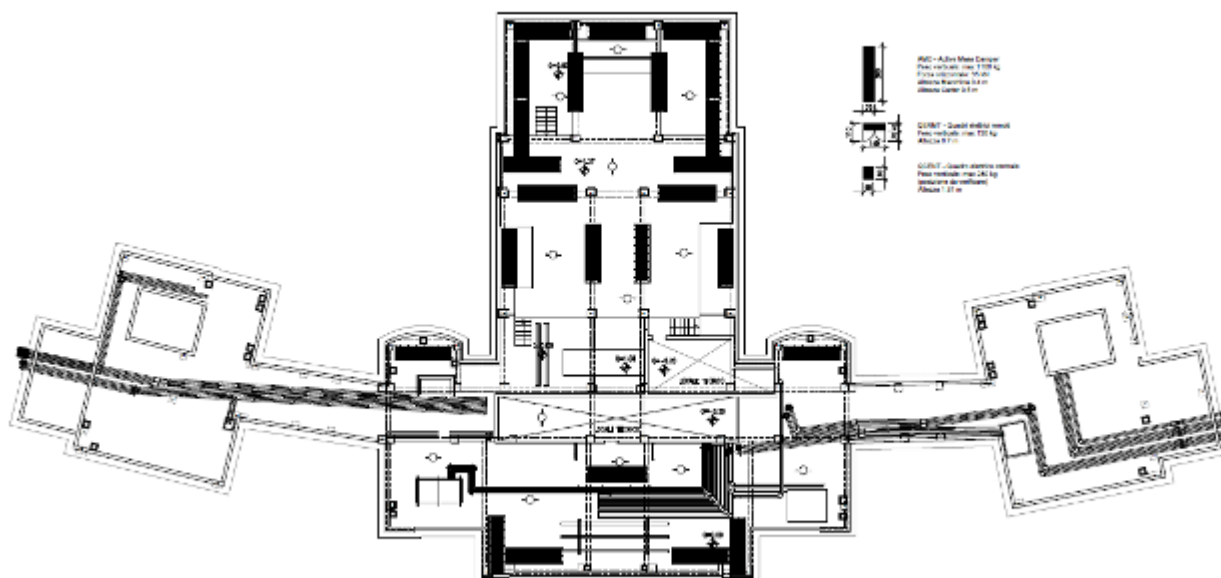


Figura 37 – Disposizione planimetrica delle 24 unità macchina del sistema attivo Electro-Pro 20x o similare

8. SIMULAZIONI NUMERICHE ALLO SLV

Il presente capitolo costituisce il fulcro del lavoro in quanto tratta delle simulazioni numeriche svolte per determinare i miglioramenti apportati dal sistema di controllo attivo Electro-Pro 20x o similare sulla struttura in esame. I confronti suddetti vengono effettuati attraverso analisi dinamiche di tipo time-history, all'interno delle quali si ha il comportamento elastico delle membrature principali ed il comportamento non lineare dei link che simulano le unità macchina sul piano di copertura del fabbricato.

Si effettua, quindi, un confronto tra la struttura non controllata (sprovvista del sistema di protezione) e la struttura controllata (equipaggiata del sistema) in termini di spostamenti, tagli di piano, bilanci energetici e di altri aspetti ritenuti significativi.

8.1. ANALISI DINAMICHE LINEARI

Con lo scopo di effettuare la comparazione tra struttura non controllata e struttura controllata si svolgono analisi dinamiche non lineari di tipo time-history (Fast Non Linear Analysis) sul modello numerico realizzato.

Si applicano le coppie di accelerogrammi naturali spettro-compatibili presentati all'interno del Capitolo 4, in merito allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita.

Per tenere in conto della tridimensionalità dell'azione sismica, per ogni coppia di accelerogrammi, ricavati, si procede come segue in fase di analisi:

- l'accelerogramma Est viene imposto in direzione X, mentre l'accelerogramma Nord viene implementato in direzione Y;
- l'accelerogramma Nord viene imposto in direzione X, mentre l'accelerogramma Est viene implementato in direzione Y.

In totale, quindi, sono state svolte 6 analisi dinamiche seguendo il criterio elencato sotto:

- SLV1a: applicazione accelerogramma 1, Est: direzione X, Nord: direzione Y;
- SLV1b: applicazione accelerogramma 1, Est: direzione Y, Nord: direzione X;
- SLV2a: applicazione accelerogramma 2, Est: direzione X, Nord: direzione Y;
- SLV2b: applicazione accelerogramma 2, Est: direzione Y, Nord: direzione X;
- SLV3a: applicazione accelerogramma 3, Est: direzione X, Nord: direzione Y;
- SLV3b: applicazione accelerogramma 3, Est: direzione Y, Nord: direzione X

I risultati hanno mostrato come, nella totalità dei casi, le analisi più sfavorevoli per la struttura sono quelle con l'accelerogramma Est in direzione X e l'accelerogramma Nord in direzione Y (SLV1a, SLV2a, SLV3a). Per questo motivo, nel seguito, si riportano solo i risultati relativi a tali simulazioni.

Vista la modellazione dell'edificio è stato impostato uno smorzamento strutturale di tipo viscoso equivalente pari all'1% di quello critico (smorzamento costante su tutti i modi).

8.2. CONFRONTO TRA STRUTTURA NON CONTROLLATA E STRUTTURA CONTROLLATA

In questo paragrafo si riportano i confronti tra la struttura non controllata (sprovvista del sistema di controllo attivo) e la struttura controllata (equipaggiata delle unità macchina) a parità di azione sismica agente, pari al 100% dell'azione totale.

Confronto in termini di spostamenti in copertura

Di seguito vengono riportate le comparazioni degli spostamenti misurati numericamente in prossimità di un nodo in copertura rispetto alla base del fabbricato per gli accelerogrammi considerati.

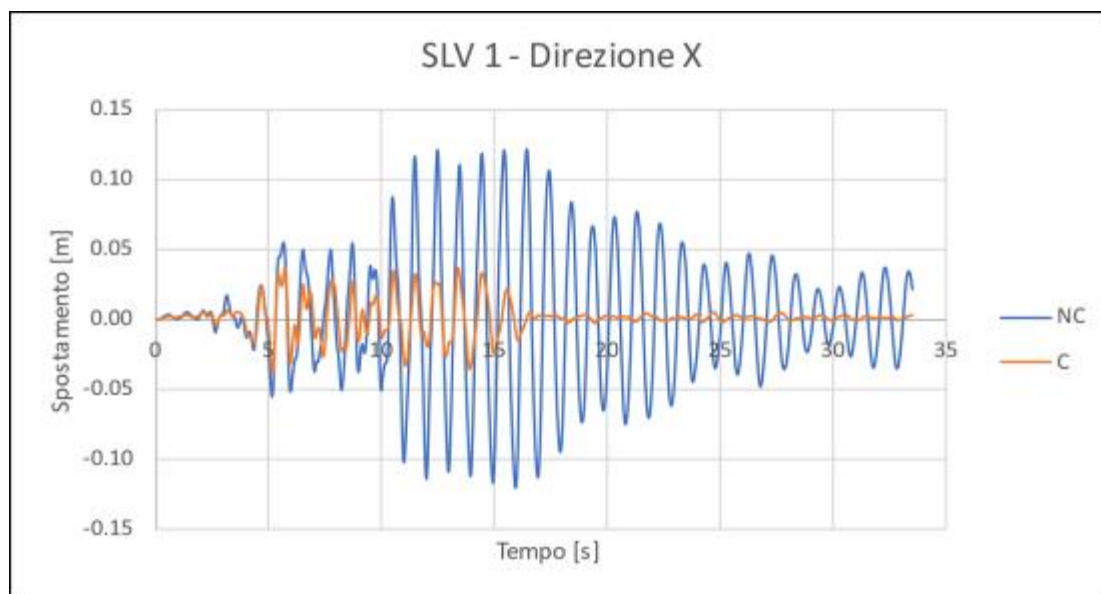


Figura 38 – Confronto tra struttura NC e C – Spostamento in copertura – SLV 1 – Direzione X

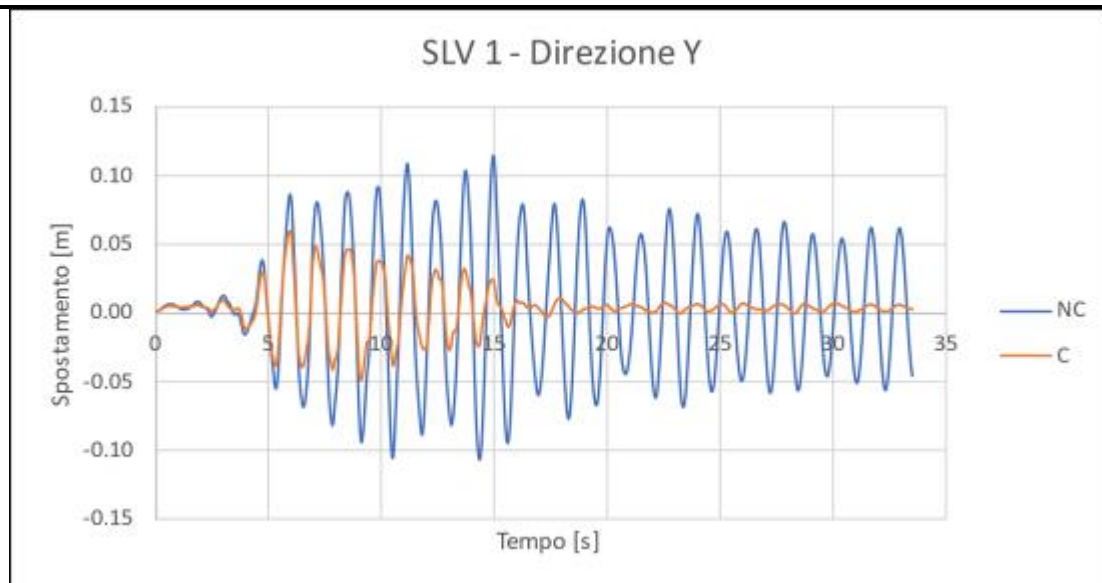


Figura 39 - Confronto tra struttura NC e C – Spostamento in copertura – SLV 1 – Direzione Y

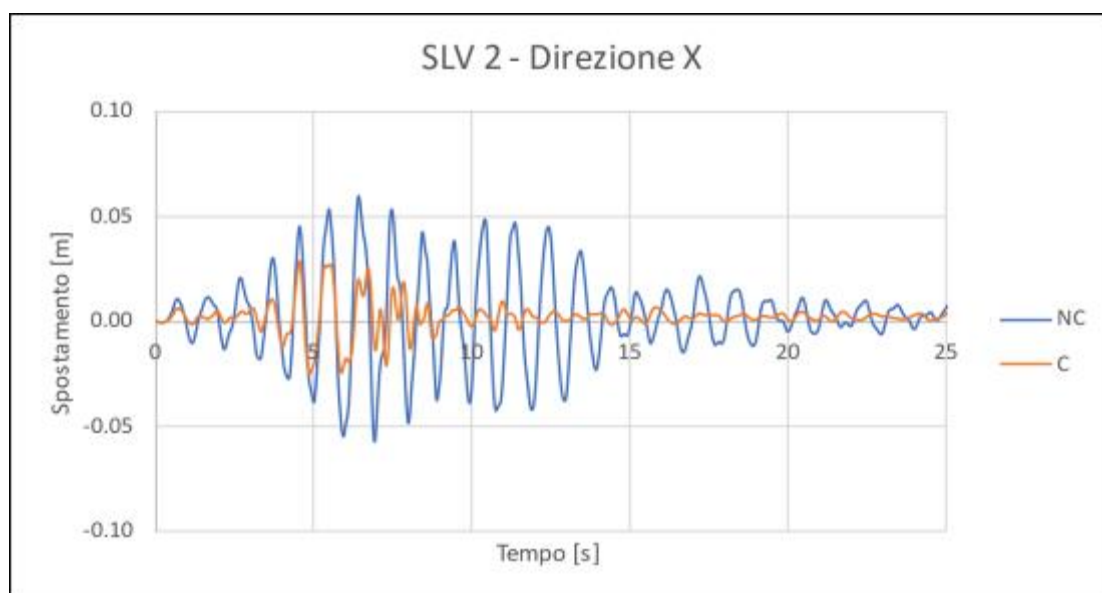


Figura 40 - Confronto tra struttura NC e C – Spostamento in copertura – SLV 2 – Direzione X

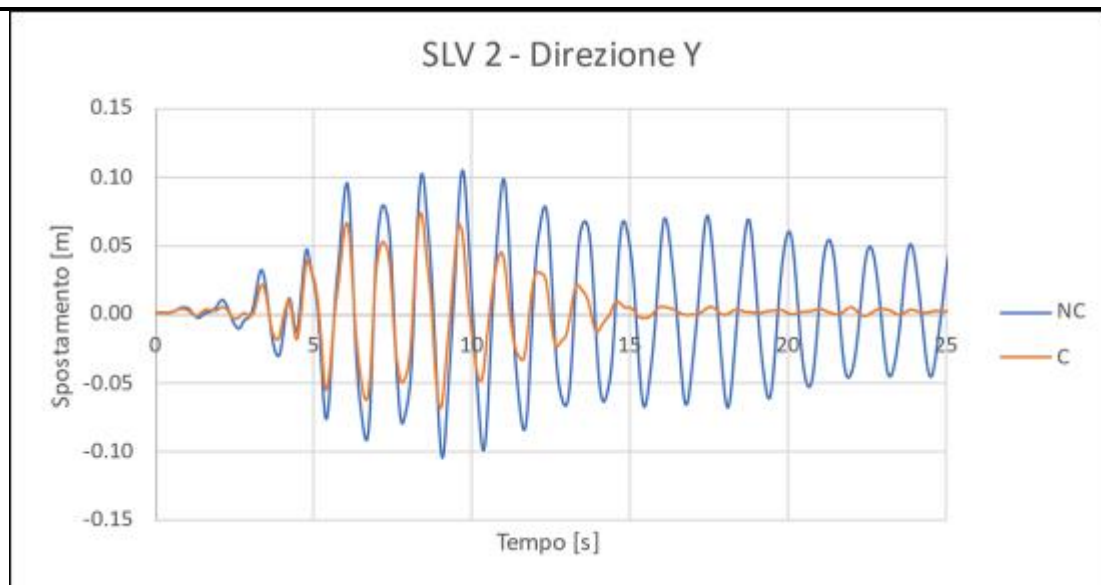


Figura 41 - Confronto tra struttura NC e C – Spostamento in copertura – SLV 2 – Direzione Y

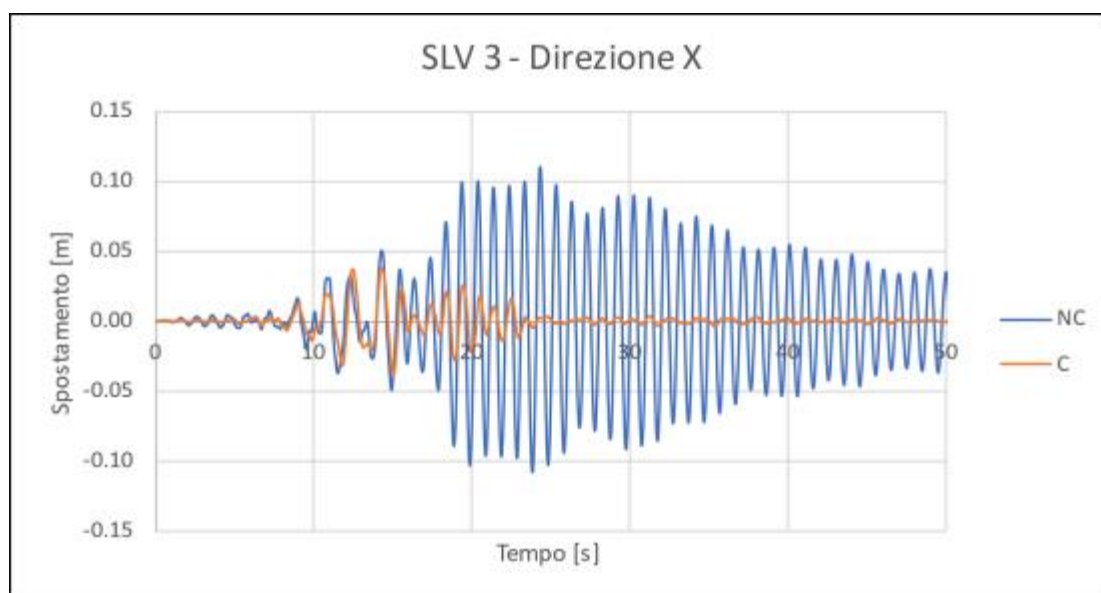


Figura 42 - Confronto tra struttura NC e C – Spostamento in copertura – SLV 3 – Direzione X

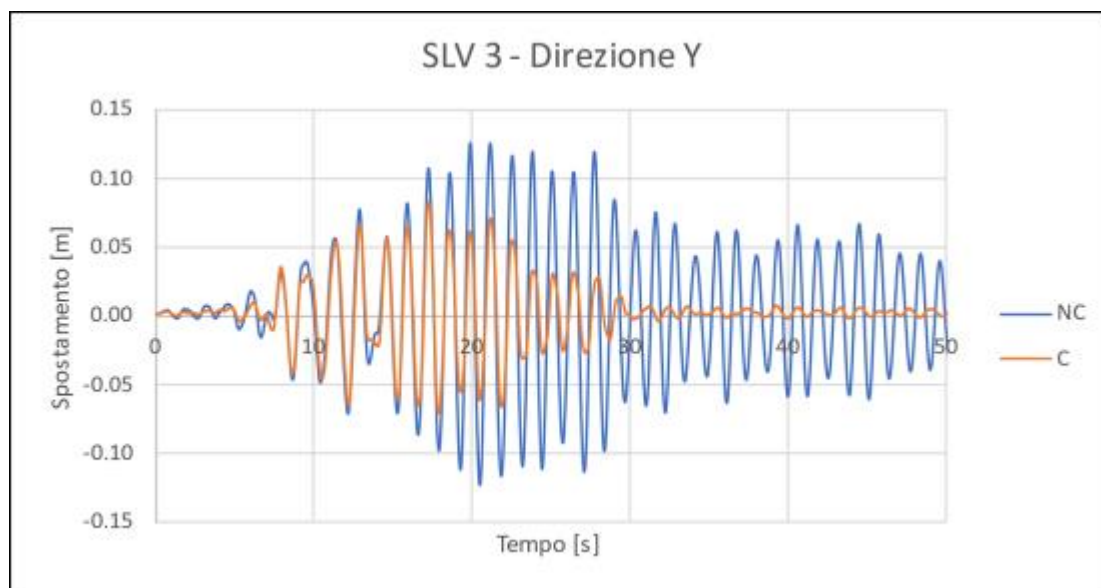


Figura 43 - Confronto tra struttura NC e C – Spostamento in copertura – SLV 3 – Direzione Y

A livello di valori massimi raggiunti in termini di spostamento si riporta una tabella di sintesi con i miglioramenti ottenuti.

LC	DIREZIONE X			DIREZIONE Y		
	Displ _{NC} [mm]	Displ _C [mm]	Δ [%]	Displ _{NC} [mm]	Displ _C [mm]	Δ [%]
SLV 1	121.82	38.35	68.52%	114.65	59.85	47.80%
SLV 2	59.83	28.81	51.85%	105.07	74.12	29.46%
SLV 3	110.55	38.86	64.84%	125.99	83.29	33.90%

Tabella 10 – Confronto spostamenti massimi raggiunti

Si osserva che il sistema di controllo attivo, grazie allo smorzamento aggiuntivo che introduce, permette di raggiungere riduzioni di spostamento medie pari a circa il 50 %.

Confronto in termini di tagli alla base

Si riportano i confronti in termini di tagli alla base raggiunti durante l'applicazione degli accelerogrammi in entrambe le direzioni.

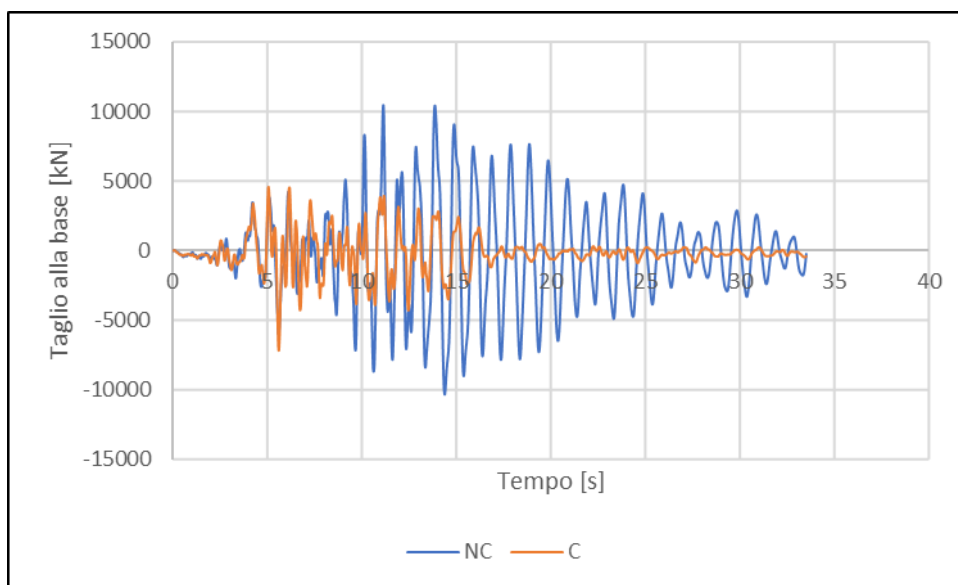


Figura 44 – Confronto dei tagli alla base tra struttura NC e struttura C – Direzione X – SLV 1

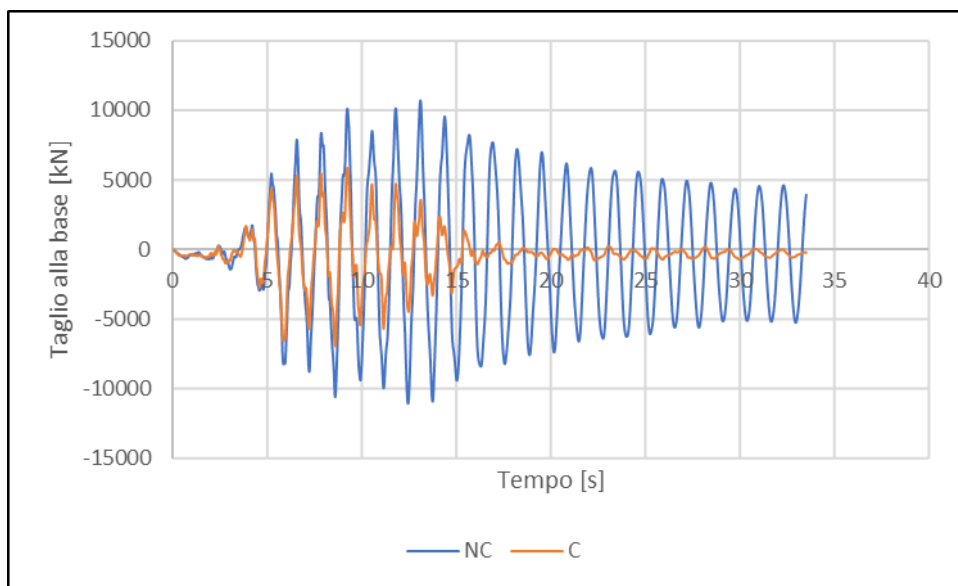


Figura 45 - Confronto dei tagli alla base tra struttura NC e struttura C – Direzione Y – SLV 1

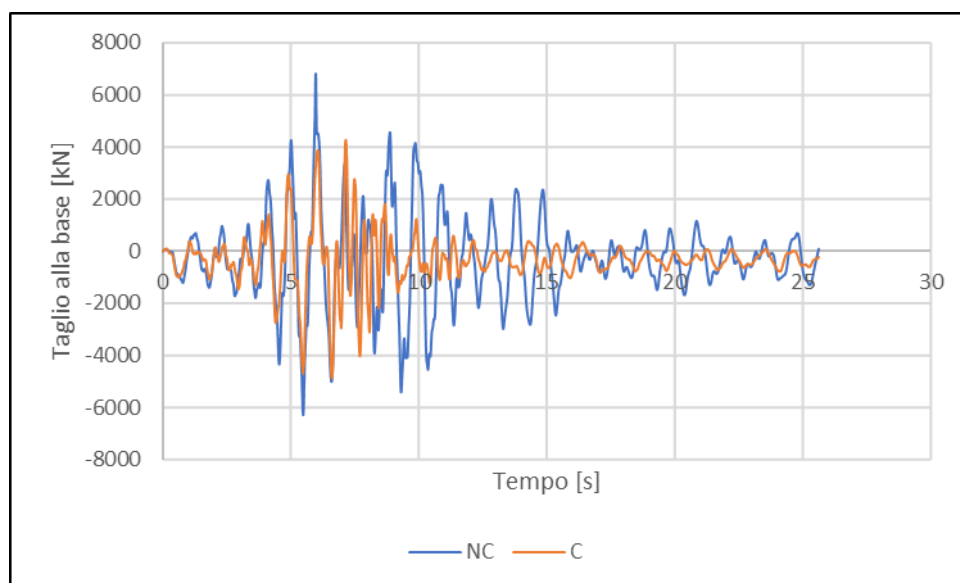


Figura 46 - Confronto dei tagli alla base tra struttura NC e struttura C – Direzione X – SLV 2

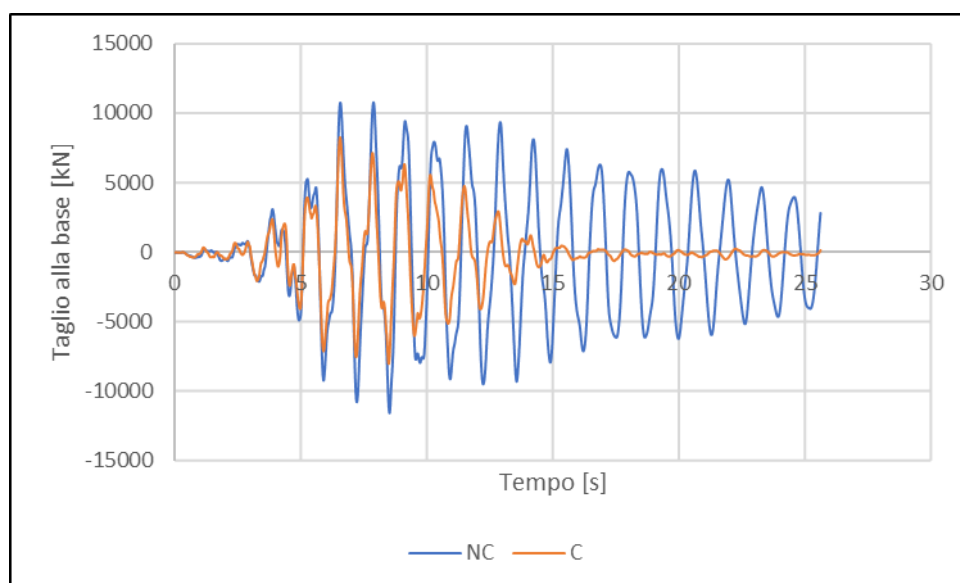


Figura 47 - Confronto dei tagli alla base tra struttura NC e struttura C – Direzione Y – SLV 2

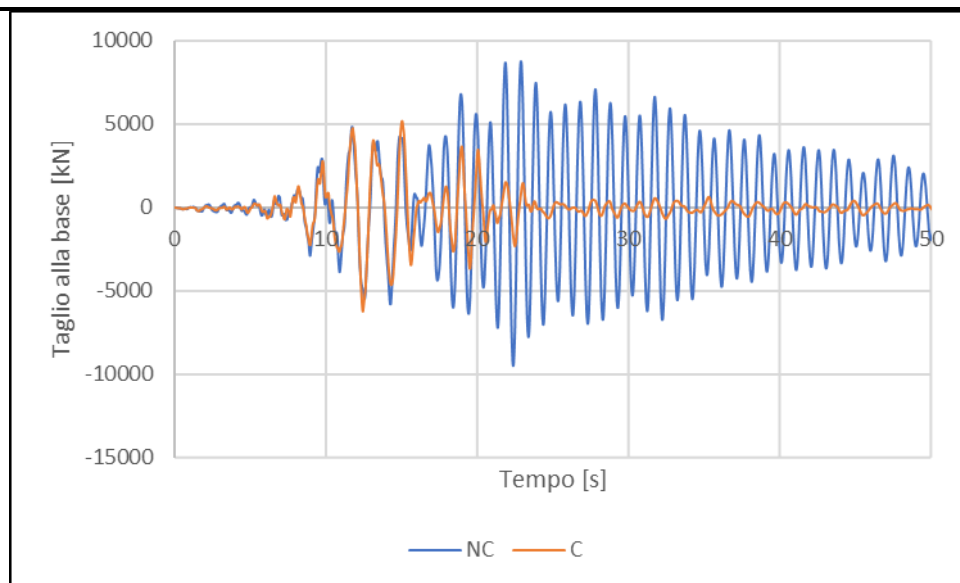


Figura 48 - Confronto dei tagli alla base tra struttura NC e struttura C – Direzione X – SLV 3

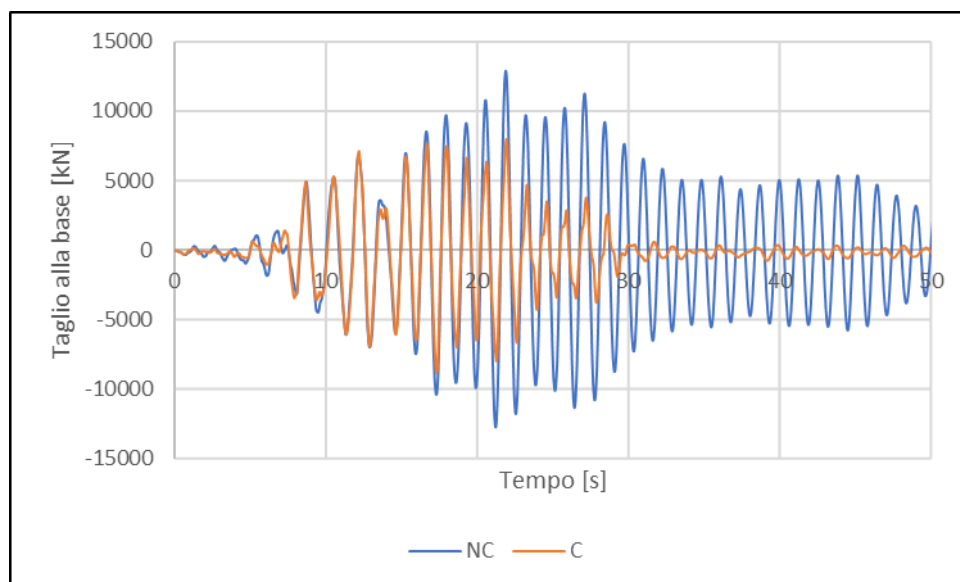


Figura 49 - Confronto dei tagli alla base tra struttura NC e struttura C – Direzione Y – SLV 3

Grazie all'introduzione delle 24 unità macchina Electro-Pro 20 x sul piano di copertura dell'edificio si ottiene una significativa diminuzione dei tagli alla base. Di seguito, si riportano sinteticamente i miglioramenti raggiunti relativi ai valori massimi ottenuti.

STATO LIMITE	DIREZIONE X			DIREZIONE Y		
	ANTE [kN]	POST [kN]	Δ [%]	ANTE [kN]	POST [kN]	Δ [%]
SLV1	10457	7175	31.39%	11062	6939	37.27%
SLV2	6814	4689	31.19%	11587	8261	28.71%
SLV3	9489	6227	34.38%	12902	8842	31.47%

Tabella 11 – Confronto dei valori massimi di taglio alla base tra struttura NC e struttura C

Confronto in termini di tagli di piano

Di seguito vengono riportate le comparazioni dei tagli di piano del fabbricato per gli accelerogrammi considerati.

Essi sono stati ricavati grazie allo strumento delle *Section Cut* integrato in *SAP2000*.

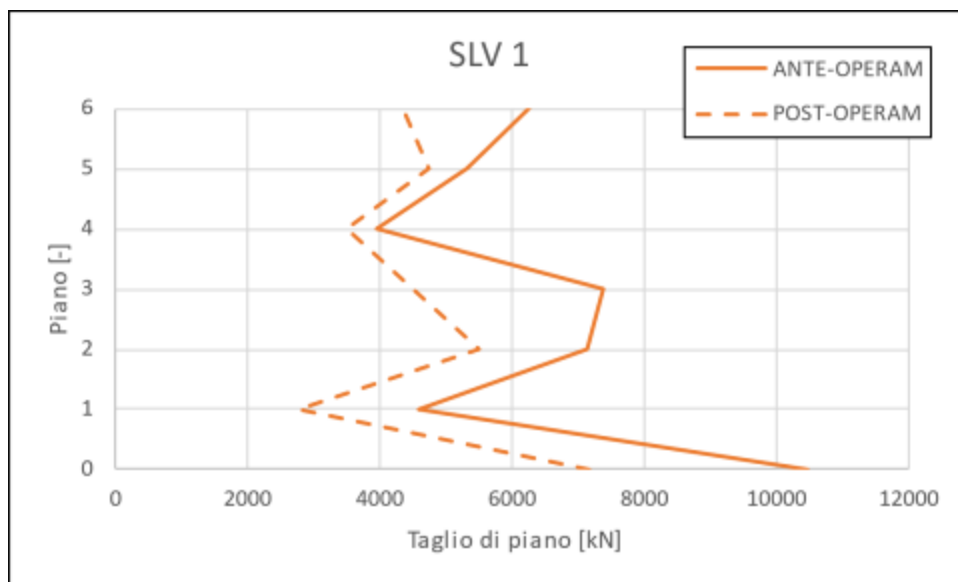


Figura 50 – Confronto dei tagli di piano tra struttura NC e struttura C – Direzione X – SLV 1

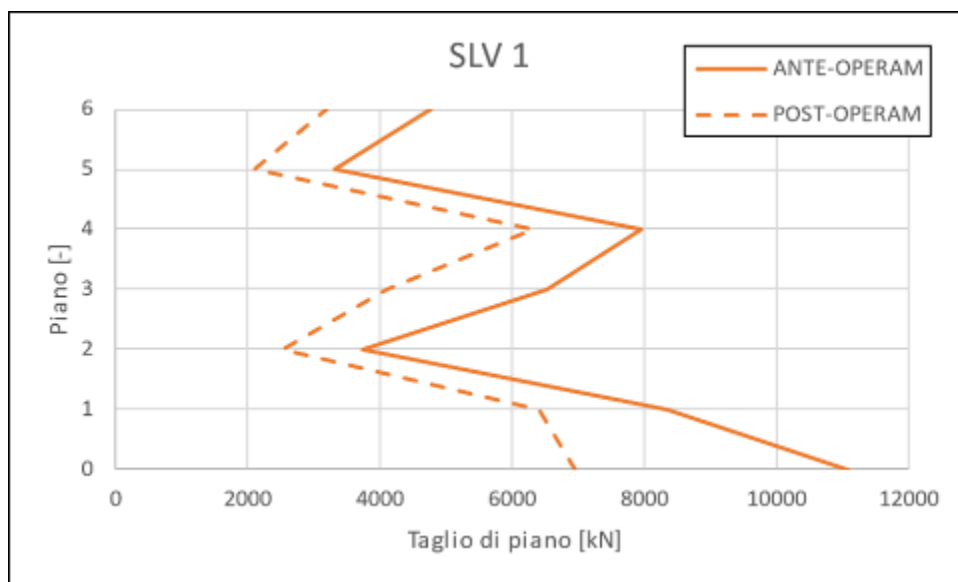


Figura 51 - Confronto dei tagli di piano tra struttura NC e struttura C – Direzione Y – SLV 1

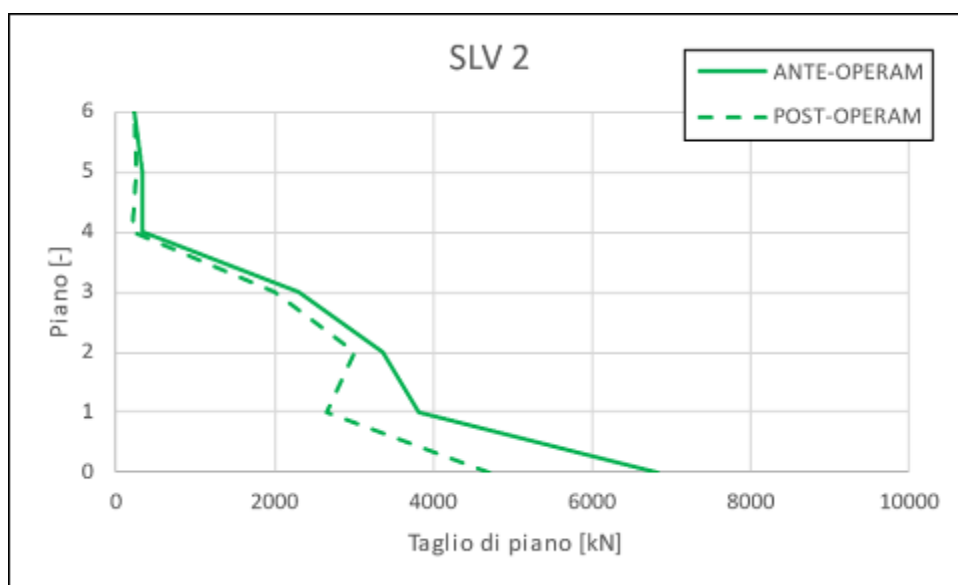


Figura 52 - Confronto dei tagli di piano tra struttura NC e struttura C – Direzione X - SLV 2

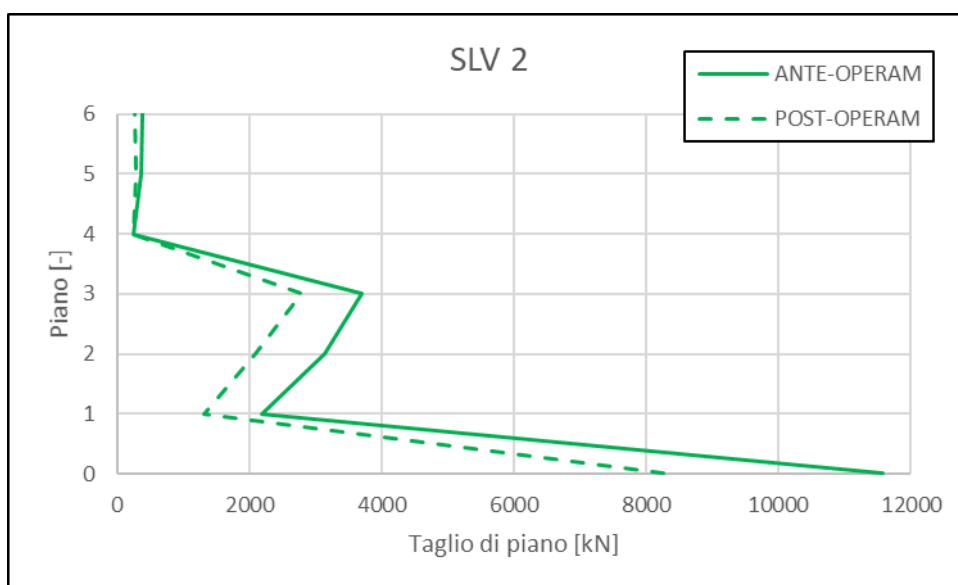


Figura 53 - Confronto dei tagli di piano tra struttura NC e struttura C – Direzione Y - SLV 2

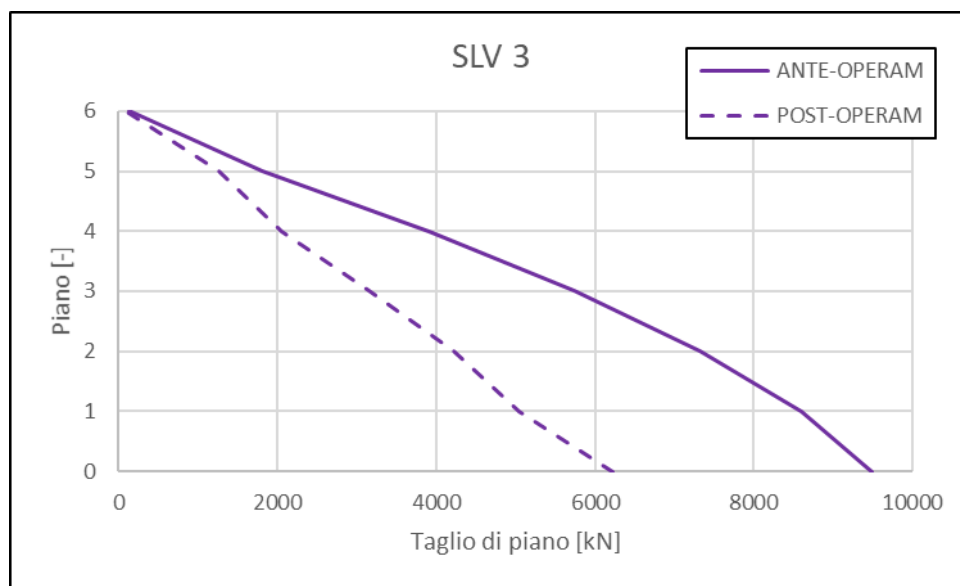


Figura 54 - Confronto dei tagli di piano tra struttura NC e struttura C – Direzione X - SLV 3

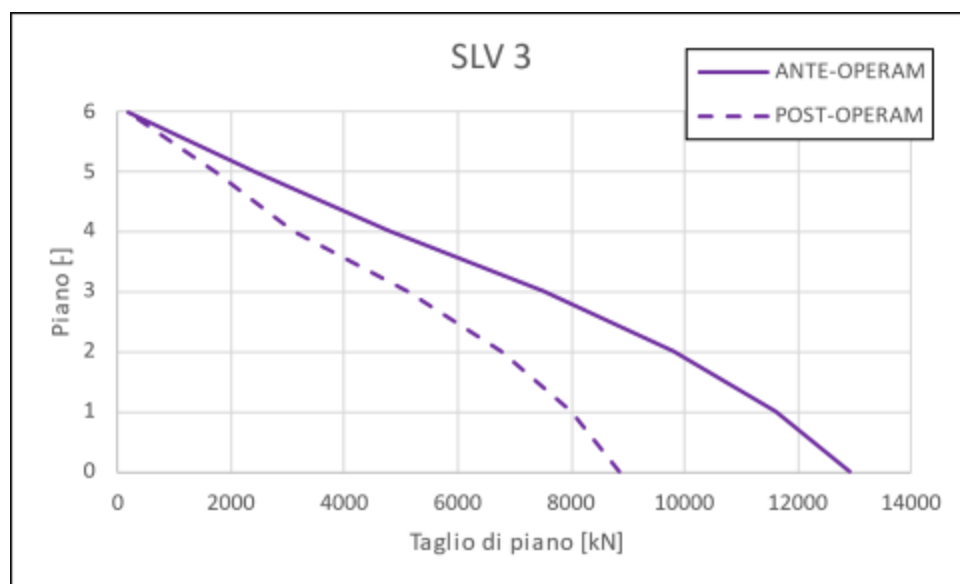


Figura 55 - Confronto dei tagli di piano tra struttura NC e struttura C – Direzione Y- SLV 3

Anche in relazione ai tagli di piano si ha che l'introduzione del sistema di controllo attivo riduce in maniera importante i valori raggiunti.

Il maggior beneficio si ha alla base del fabbricato in cui si hanno abbattimenti fino al 40 % del taglio sui pilastri. Si riporta un dettaglio più specifico dei valori di taglio ai primi due orizzontamenti per evidenziare l'effettivo miglioramento apportato (Tabella 12 e Tabella 13).

LC	PIANO 1			PIANO 2		
	ANTE [kN]	POST [kN]	Δ [%]	ANTE [kN]	POST [kN]	Δ [%]
SLV_1	10457	7175	31.39%	4589	2775	39.54%
SLV_2	6814	4689	31.19%	3807	2647	30.47%
SLV_3	9489	6227	34.38%	8608	5048	41.35%

Tabella 12 – Confronto tagli di piano relativo ai primi due orizzontamenti – Direzione X

LC	PIANO 1			PIANO 2		
	ANTE [kN]	POST [kN]	Δ [%]	ANTE [kN]	POST [kN]	Δ [%]
SLV_1	11062	6939	37.27%	8753	6209	29.06%
SLV_2	11587	8261	28.70%	2197	1310	40.34%
SLV_3	12902	8842	31.47%	11617	8008	31.07%

Tabella 13 - Confronto tagli di piano relativo ai primi due orizzontamenti – Direzione Y

Confronto in termini di bilancio energetico

Di seguito vengono riportate le comparazioni in termini di bilancio energetico relativi al padiglione in oggetto. Questo confronto è particolarmente importante perché permette di evidenziare il comportamento globale della struttura nei riguardi del danneggiamento strutturale e dell'energia dissipata dal sistema di controllo attivo.

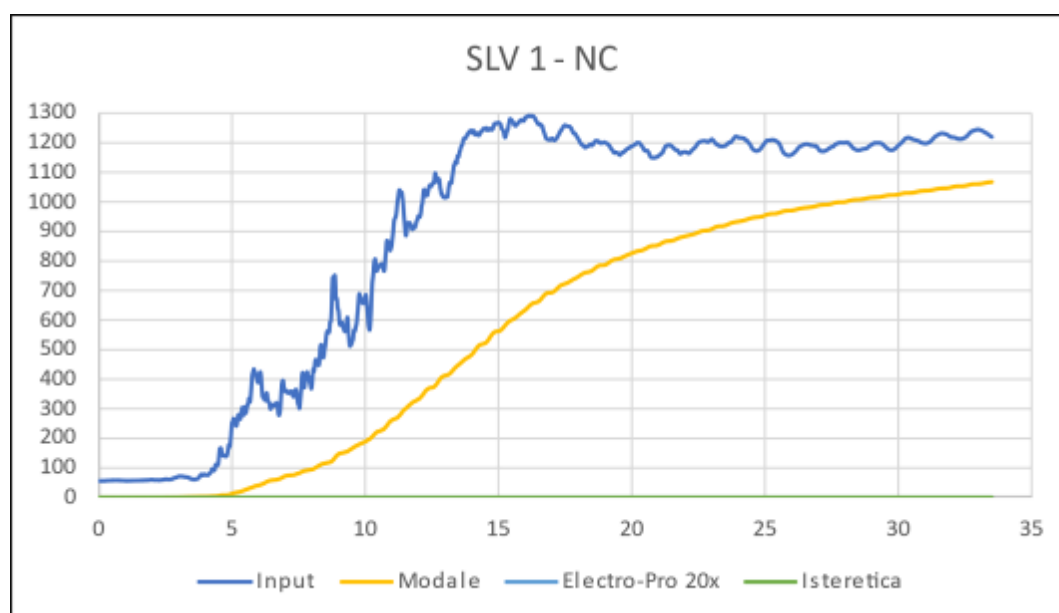


Figura 56 – Bilancio energetico della struttura NC – SLV 1

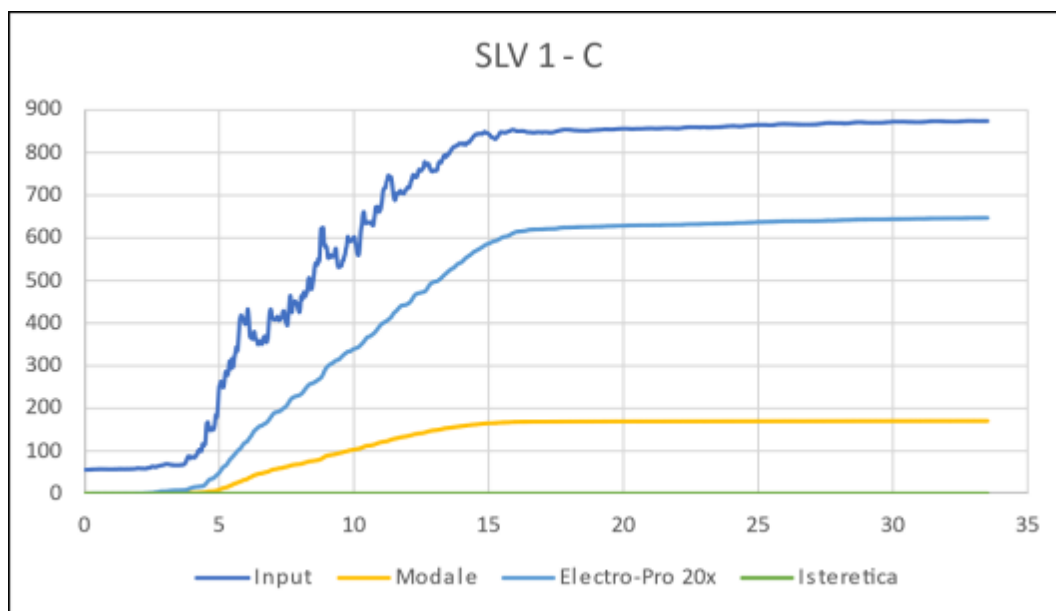


Figura 57 - Bilancio energetico della struttura C – SLV 1

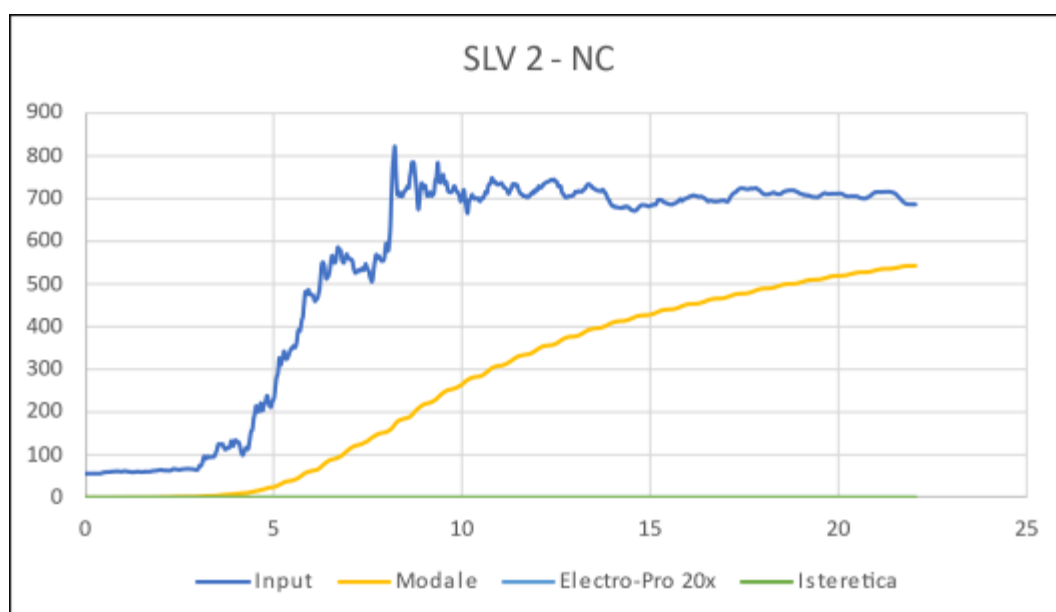


Figura 58 - Bilancio energetico della struttura NC – SLV 2

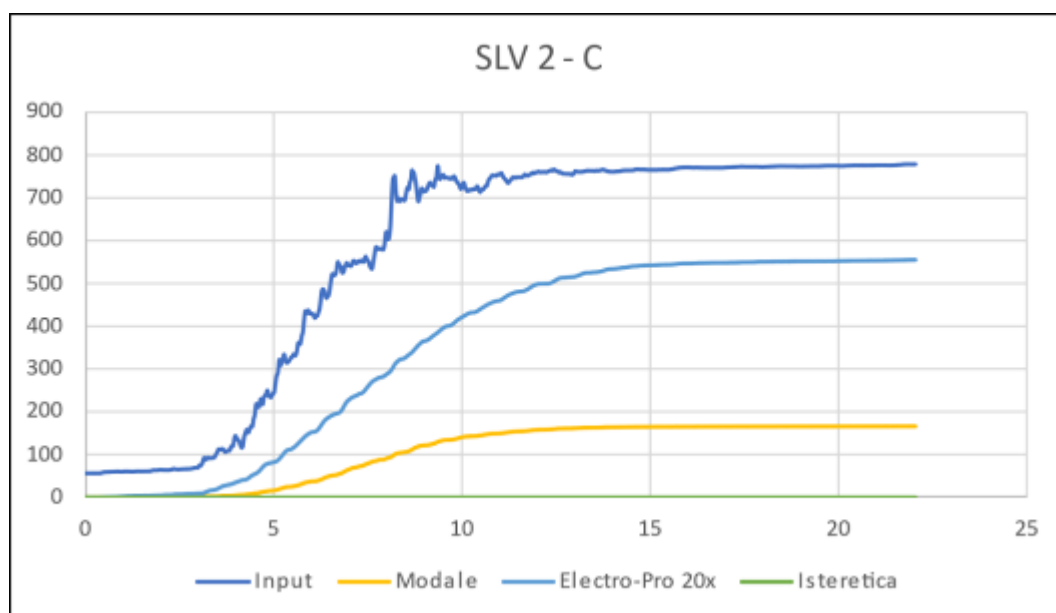


Figura 59 - Bilancio energetico della struttura C – SLV 2

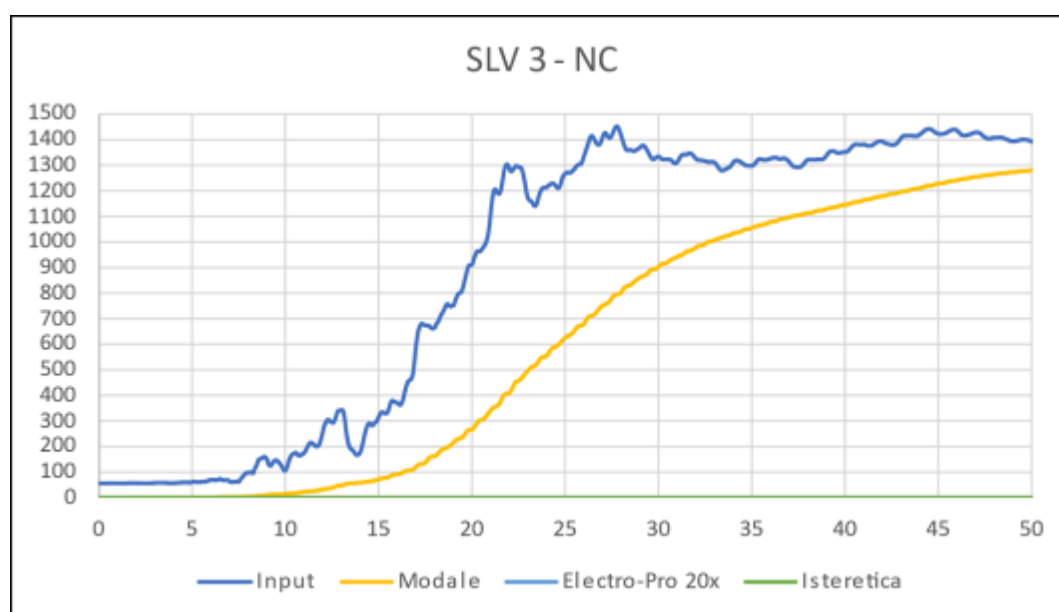


Figura 60 - Bilancio energetico della struttura NC – SLV 3

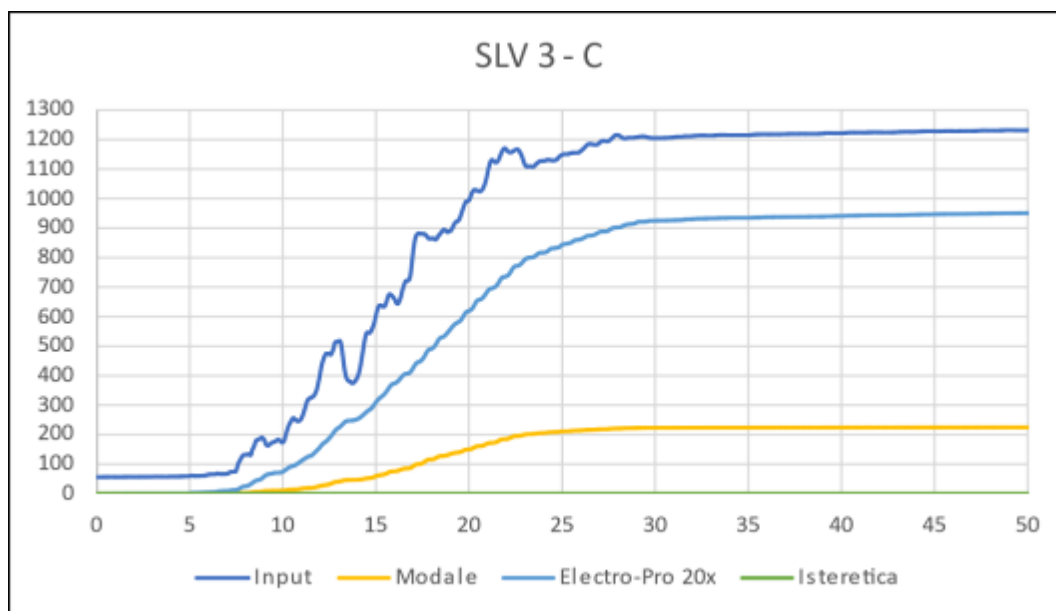


Figura 61 - Bilancio energetico della struttura C – SLV 3

Nei grafici riportati sopra, le curve rappresentano i seguenti contributi energetici:

- la linea blu indica l'energia di input che il sisma introduce all'interno della struttura;
- la linea gialla indica l'energia relativa allo smorzamento modale;
- la linea verde indica il contributo isteretico legato al danneggiamento strutturale;
- la linea azzurra indica il contributo energetico dissipato dal sistema di controllo attivo.

In questo caso specifico, avendo modellato gli elementi strutturali in campo elastico, si ha che l'energia correlata ai fenomeni isteretici è nulla.

In tutti gli scenari studiati si osserva che l'introduzione del sistema attivo di protezione sismica produce:

- una riduzione significativa dell'energia di smorzamento modale. Questa tipologia di energia è legata, seppur in maniera indiretta, al danneggiamento degli elementi. Di conseguenza, un valore inferiore di tale aliquota è benefico per l'edificio.
- un contemporaneo aumento dell'energia di dissipazione introdotta dal sistema di controllo attivo che sgrava gli elementi strutturali di una percentuale importante di energia entrante.

Di fatto, il sistema attivo è in grado di ridurre la domanda sismica entrante. Questo è dimostrato anche dal fatto che l'energia di input all'interno dei grafici si abbassa per la struttura controllata.

Di seguito si riporta una tabella di sintesi che racchiude quanto detto sopra.

Tipo di Energia	SLV 1			SLV 2			SLV 3		
	% E _{INPUT}			% E _{INPUT}			% E _{INPUT}		
	NC	C	Δ [%]	NC	C	Δ [%]	NC	C	Δ [%]
Modale	87.51%	19.52%	-77.70%	81.35%	21.26%	-73.86%	92.22%	18.23%	-80.23%
Electro-Pro	0.00%	73.99%	73.99%	0.00%	71.47%	71.47%	0.00%	77.22%	77.22%

Tabella 14 – Confronto del bilancio energetico tra struttura NC e C

8.3. CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO ATTIVO ELECTRO-PRO 20X O SIMILARE

Come riportato all'interno del Paragrafo 7.2, il numero totale di unità macchina per raggiungere le performance mostrate nei paragrafi precedenti è pari a 24, disposte in pianta secondo quanto raffigurato in Figura 37. All'interno di questa sezione si riportano le caratteristiche delle macchine e si mostra la verifica in post-processing dell'unità più sfruttata.

Le caratteristiche delle unità sono riportate sinteticamente all'interno della tabella seguente. In Figura 62 sono mostrate le storie temporali delle forze di controllo esercitate dalle macchine.

UNITÀ MACCHINA	DIREZIONE DI AZIONE	LARGHEZZA [mm]	ALTEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	PESO [kg]	GAIN [kNs/m]
1	X	680	500	3000	1000	680
2	X	680	500	3000	1000	
3	X	680	500	3000	1000	
4	X	680	500	3000	1000	
5	X	680	500	3000	1000	
6	X	680	500	3000	1000	
7	X	680	500	3000	1000	
8	X	680	500	3000	1000	
9	X	680	500	3000	1000	
10	X	680	500	3000	1000	
11	X	680	500	3000	1000	
12	X	680	500	3000	1000	
13	Y	680	500	3000	1000	
14	Y	680	500	3000	1000	
15	Y	680	500	3000	1000	
16	Y	680	500	3000	1000	
17	Y	680	500	3000	1000	
18	Y	680	500	3000	1000	
19	Y	680	500	3000	1000	
20	Y	680	500	3000	1000	
21	Y	680	500	3000	1000	
22	Y	680	500	3000	1000	
23	Y	680	500	3000	1000	
24	Y	680	500	3000	1000	

Tabella 15 – Caratteristiche unità macchina

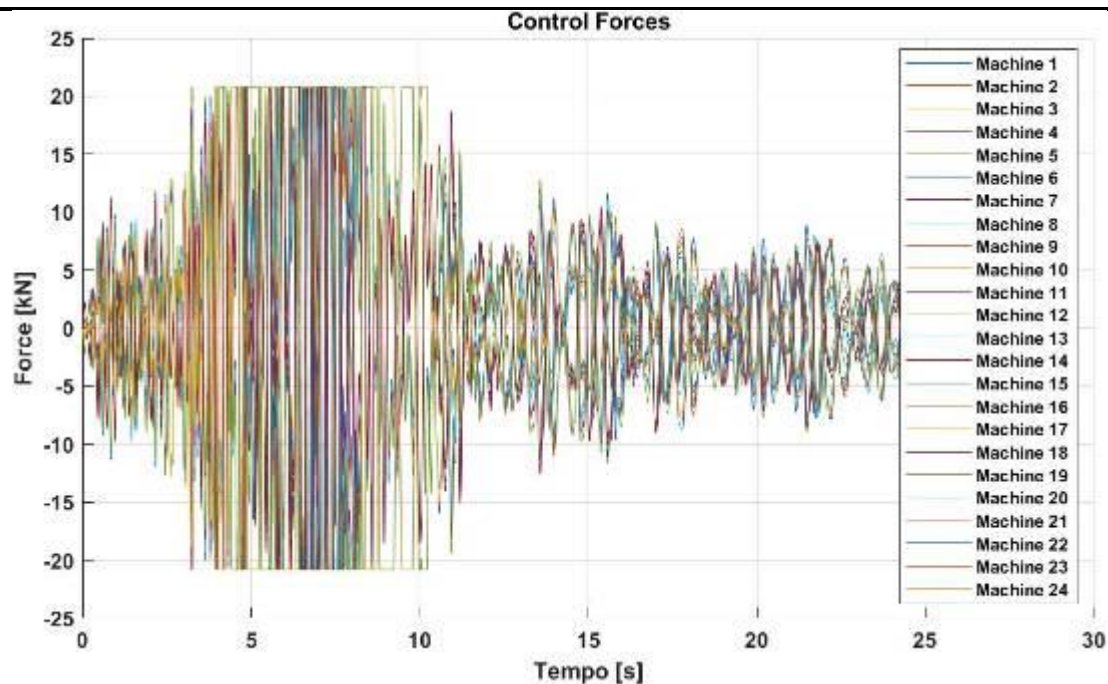


Figura 62 – Storia temporale delle forze di controllo delle macchine

Il parametro gain di progetto, uguale per tutte le macchine e pari a 680 kN s/m, è stato determinato per ottenere livelli di performance massimi nel rispetto dei limiti in tensione di corrente delle unità macchina. Nel caso specifico, la macchina che risulta essere più sfruttata durante le simulazioni numeriche è la n°2.

Nelle immagini seguenti, si riporta nell'ordine:

- storia temporale della forza di controllo della macchina n°2 (Figura 63);
- legge comportamentale forza-velocità della macchina n°2 (Figura 64);
- storia temporale della velocità della massa mobile della macchina n°2 (Figura 65);
- storia temporale dello spostamento della massa mobile della macchina n°2 (Figura 66);
- storia temporale della tensione di corrente della macchina n°2 (Figura 67);

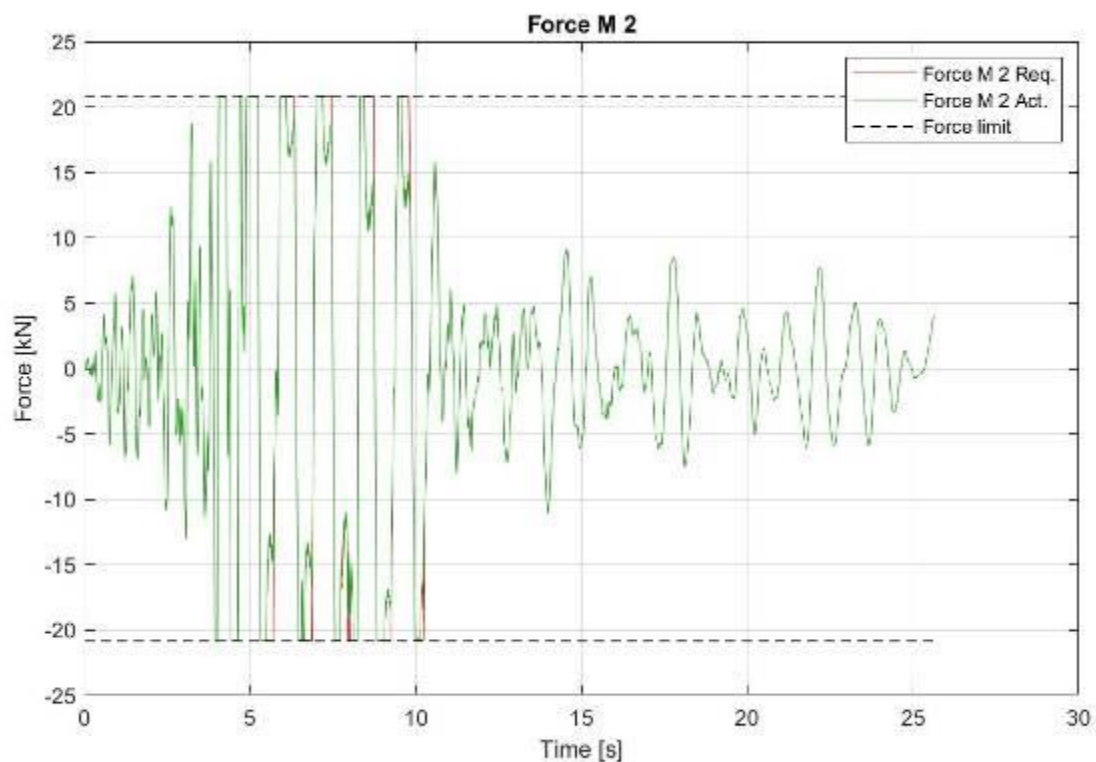


Figura 63 – Storia temporale della forza di controllo della macchina n°2 (simulata VS reale)

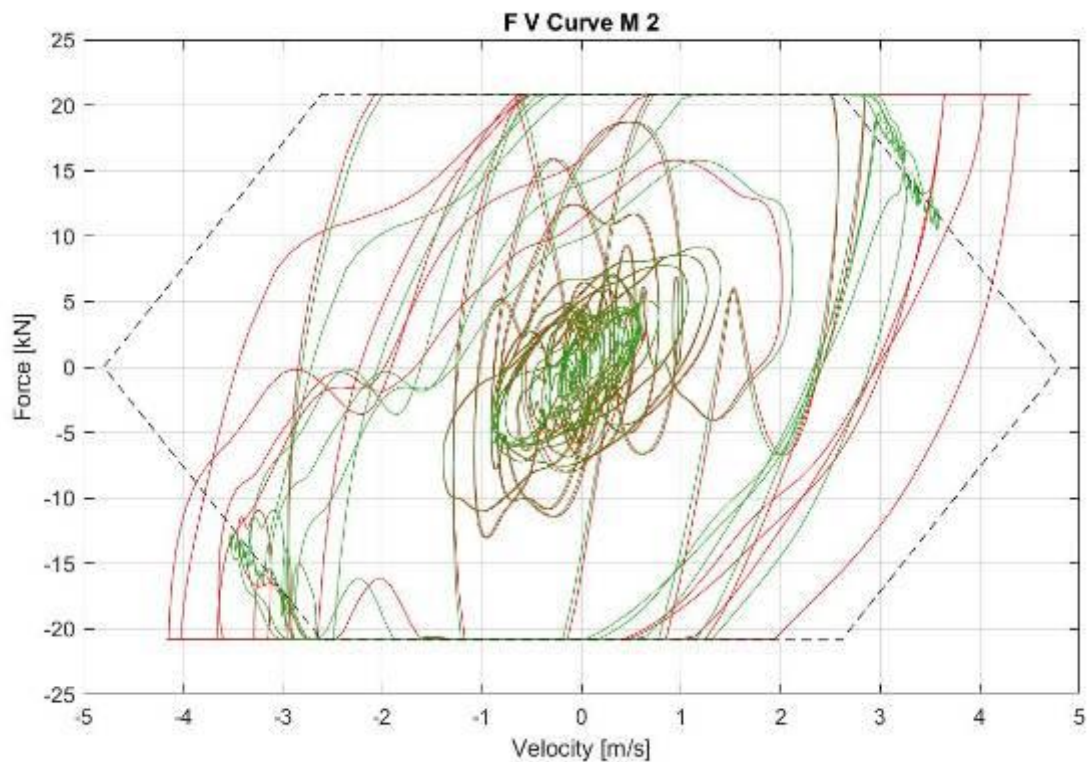


Figura 64 - Legge comportamentale macchina n°2

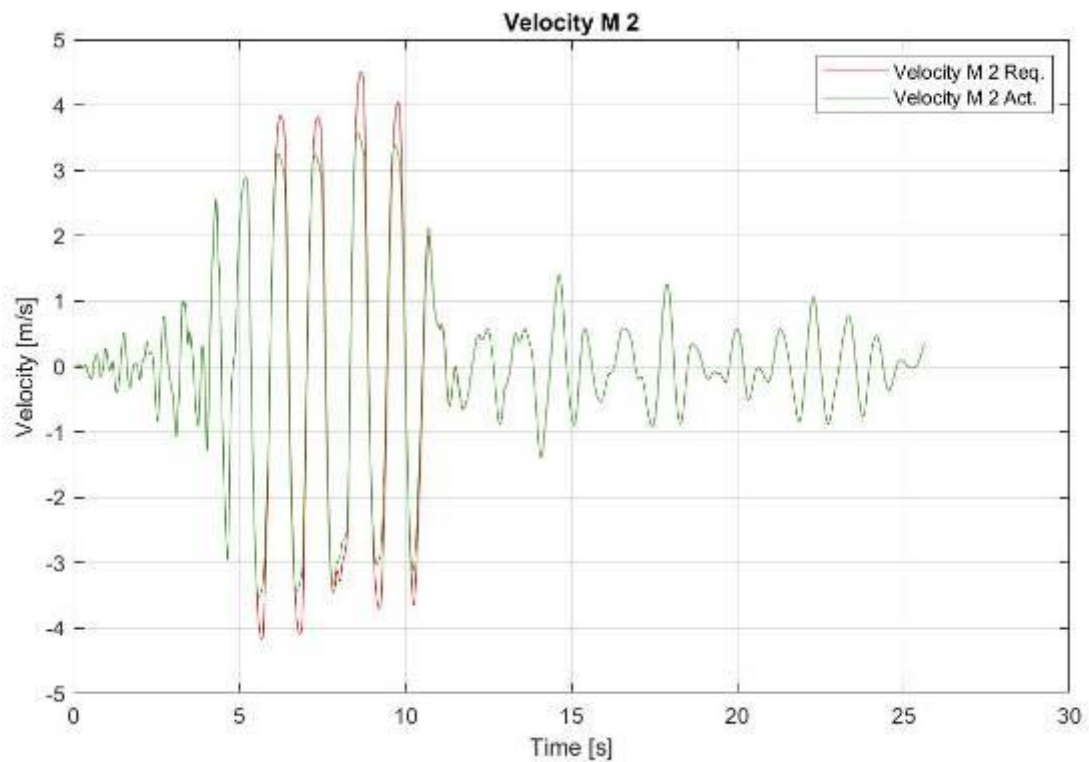


Figura 65 - Storia temporale della velocità della massa mobile della macchina n°2 (simulata VS reale)

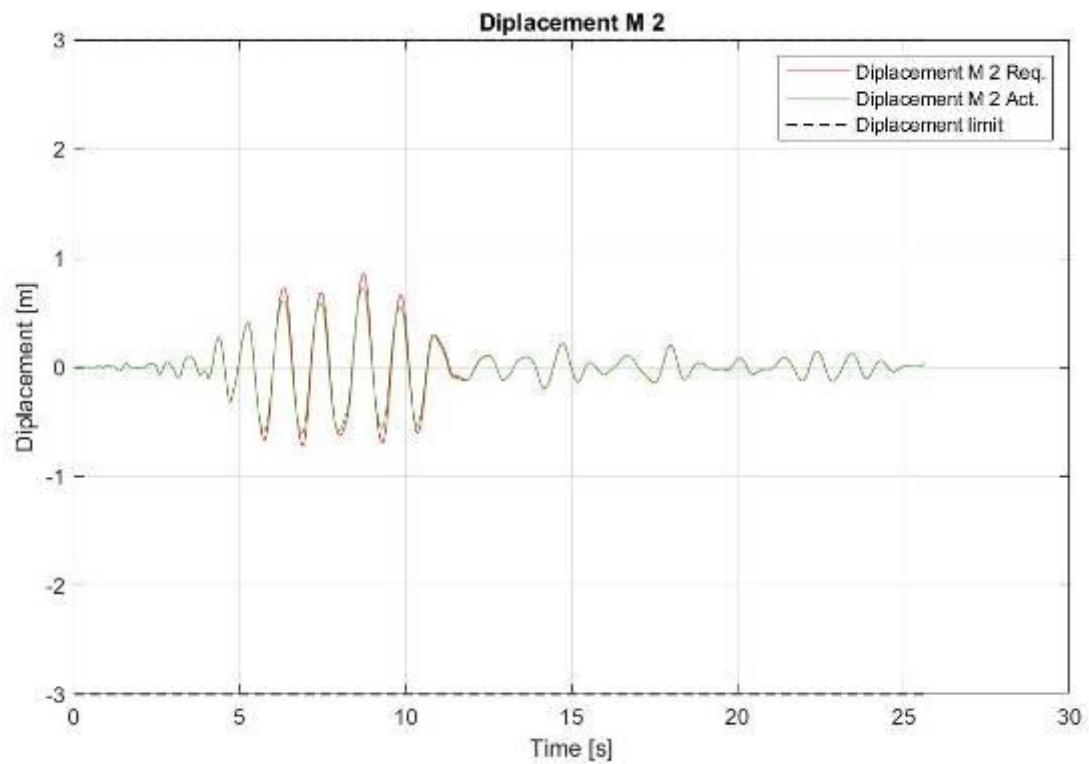


Figura 66 - Storia temporale dello spostamento della massa mobile della macchina n°2 (simulata VS reale)

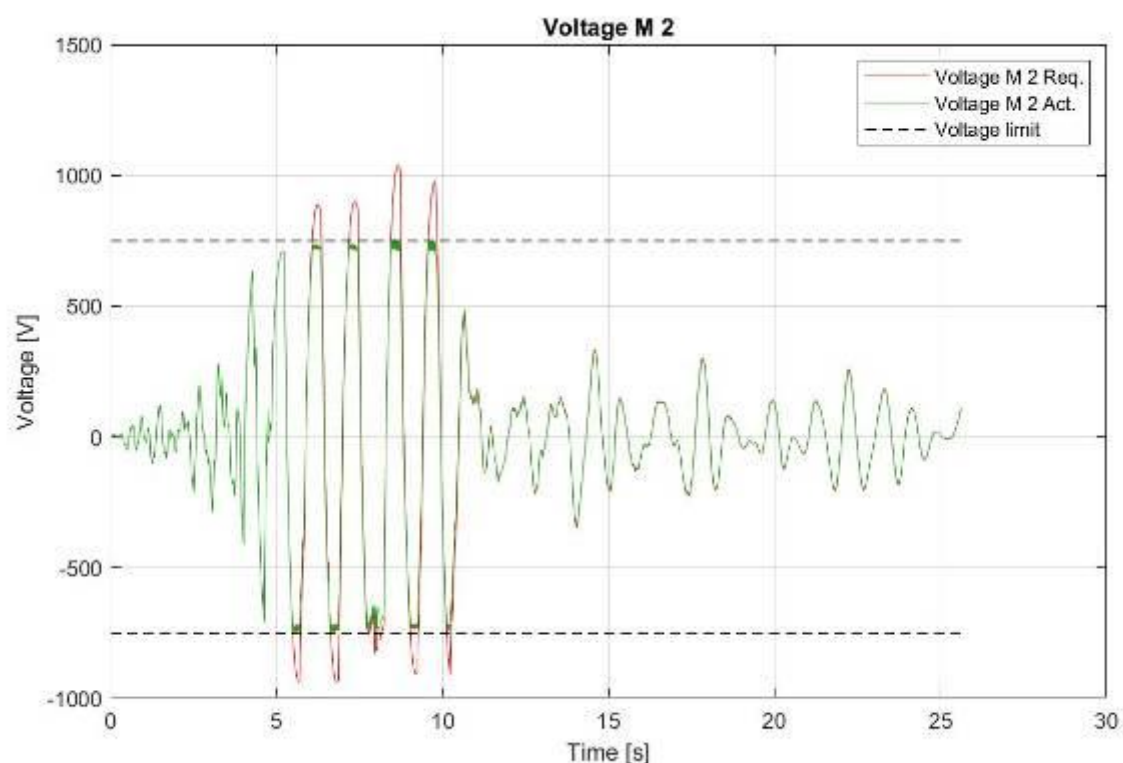


Figura 67 - Storia temporale della tensione della macchina n°2 (simulata VS reale)

Nei grafici sovrastanti si osserva che:

- la linea rossa indica la grandezza in questione richiesta durante la simulazione numerica;
- la linea verde indica la grandezza in questione effettivamente erogabile dalla macchina.

Maggiore è la sovrapposizione tra le linee e migliore è la stima che si ottiene nei riguardi del comportamento della macchina tra simulazione e realtà.

Si nota che tra la tensione di corrente simulata e quella reale vi è una leggera discrepanza. In questo caso specifico, tuttavia, si superano i limiti in prossimità di brevi istanti temporali. Quindi, ciò non costituisce un problema.

Si osserva, inoltre, che le curve riguardanti la storia temporale della forza di controllo, riportate in Figura 62, sono praticamente coincidenti. Questo significa che quanto simulato è prossimo al comportamento reale. Pertanto, i risultati ottenuti dalle analisi numeriche si ritengono affidabili nella descrizione del comportamento della macchina.

Tali verifiche sono state svolte per tutte le unità macchina inserite.

I dettagli del processo di ottimizzazione del parametro gain e della valutazione dei vincoli tecnologici delle macchine sono esplicitati attraverso la figura sottostante, che mostra il flusso di progettazione seguito.

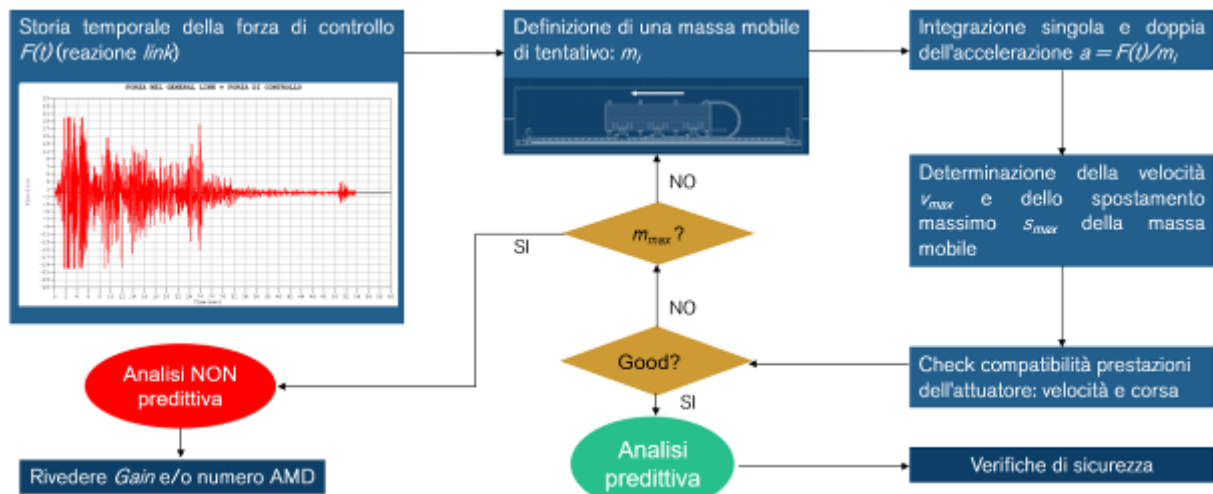


Figura 68 – Flusso di progettazione seguito per il sistema di controllo attivo

9. VERIFICHE DI RIGIDEZZA

In aggiunta all'analisi sismica trattata al capitolo precedente, si conducono le verifiche di sicurezza in termini di rigidità allo Stato Limite di Danno, andando a valutare gli spostamenti interpiano attraverso analisi dinamiche con integrazione diretta dell'equazione del moto.

A favore di sicurezza si esegue la verifica come indicato al § 7.3.6.1 delle Norme Tecniche per tamponature fragili collegate rigidamente alla struttura, secondo la formula:

$$q \cdot d_r \leq 0,005 \cdot h$$

Dove:

- q è il fattore di comportamento, assunto pari ad 1,0;
- d_r è lo spostamento di interpiano, ovvero la differenza tra gli spostamenti del solaio superiore e del solaio inferiore;
- h è l'altezza di interpiano.

Per tali verifiche, a favore di sicurezza, si utilizza un modello nudo.

È stata scelta una pilastrata di riferimento (Figura 69), ritenuta significativa, per il calcolo dei drift di interpiano nelle due direzioni principali.

Tale calcolo è stato svolto sia per la struttura non controllata che per quella controllata.

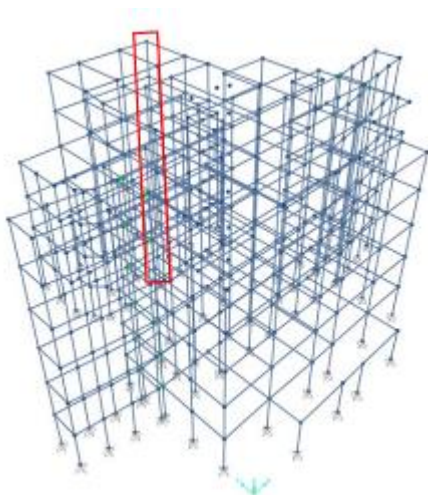


Figura 69 – Pilastrata di riferimento per il calcolo dei drift di interpiano

Di seguito si riportano i risultati in forma tabellare dei massimi valori ottenuti (in valore assoluto) dei drift ad ogni piano.

STRUTTURA NON CONTROLLATA					
DIREZIONE X					
Livello	SLD 1 [mm]	SLD 2 [mm]	SLD 3 [mm]	Limite [mm]	Verifica
0	0.0	0.0	0.0	15	VERIFICATO
1	20.0	20.2	13.2	15	NO
2	15.1	14.6	9.3	15	NO
3	13.7	13.6	7.2	15	VERIFICATO
4	12.5	13.0	6.3	15	VERIFICATO
5	12.6	12.3	6.7	15	VERIFICATO
6	8.3	7.7	4.5	15	VERIFICATO

Tabella 16 – Verifiche di rigidezza – Struttura NC – Direzione X

STRUTTURA NON CONTROLLATA					
DIREZIONE Y					
Livello	SLD 1 [mm]	SLD 2 [mm]	SLD 3 [mm]	Limite [mm]	Verifica
0	0.0	0.0	0.0	15	VERIFICATO
1	10.1	11.0	11.0	15	VERIFICATO
2	6.7	7.1	8.1	15	VERIFICATO
3	6.7	6.2	7.7	15	VERIFICATO
4	6.1	7.2	6.3	15	VERIFICATO
5	5.9	8.0	5.2	15	VERIFICATO
6	4.1	6.0	3.8	15	VERIFICATO

Tabella 17 - Verifiche di rigidezza – Struttura NC – Direzione Y

STRUTTURA CONTROLLATA					
DIREZIONE X					
Livello	SLD 1 [mm]	SLD 2 [mm]	SLD 3 [mm]	Limite [mm]	Verifica
0	0.0	0.0	0.0	15	VERIFICATO
1	6.1	4.5	4.6	15	VERIFICATO
2	4.6	3.2	3.6	15	VERIFICATO
3	5.2	3.7	3.2	15	VERIFICATO
4	5.8	4.6	4.7	15	VERIFICATO
5	6.7	5.5	6.5	15	VERIFICATO
6	5.1	4.6	5.0	15	VERIFICATO

Tabella 18 - Verifiche di rigidezza – Struttura C – Direzione X

STRUTTURA CONTROLLATA					
DIREZIONE Y					
Livello	SLD 1 [mm]	SLD 2 [mm]	SLD 3 [mm]	Limite [mm]	Verifica
0	0.0	0.0	0.0	15	VERIFICATO
1	5.5	4.6	4.6	15	VERIFICATO
2	3.3	3.1	3.3	15	VERIFICATO
3	4.2	2.4	3.1	15	VERIFICATO
4	4.8	2.8	3.1	15	VERIFICATO
5	3.9	2.9	2.9	15	VERIFICATO
6	2.6	2.5	2.4	15	VERIFICATO

Tabella 19 - Verifiche di rigidezza – Struttura C – Direzione Y

Dalla Tabella 16 e dalla Tabella 17 si osserva che le verifiche di rigidezza non sono soddisfatte per la struttura non controllata. Le Tabella 18 e Tabella 19 dimostrano, invece, che per la struttura controllata le verifiche risultano ampiamente soddisfatte grazie all'introduzione del sistema di controllo attivo Electro-Pro 20x o similare.

Nelle tabelle seguenti sono esplicitati più in dettaglio i confronti nelle due direzioni.

DIREZIONE X			
Livello	Drift _{nc} [mm]	Drift _c [mm]	Δ [%]
0	0.0	0.0	/
1	20.2	6.1	70%
2	15.1	4.6	70%
3	13.7	5.2	62%
4	13.0	5.8	56%
5	12.6	6.7	47%
6	8.3	5.1	38%

Tabella 20 – Confronto drift interpiano – Direzione X

DIREZIONE Y			
Livello	Drift _{nc} [mm]	Drift _c [mm]	Δ [%]
0	0.0	0.0	/
1	11.0	5.5	50%
2	8.1	3.3	59%
3	7.7	4.2	46%
4	7.2	4.8	34%
5	8.0	3.9	51%
6	6.0	2.6	57%

Tabella 21 - Confronto drift interpiano – Direzione Y

Le stesse informazioni sono riportate in formato grafico nelle immagini seguenti.

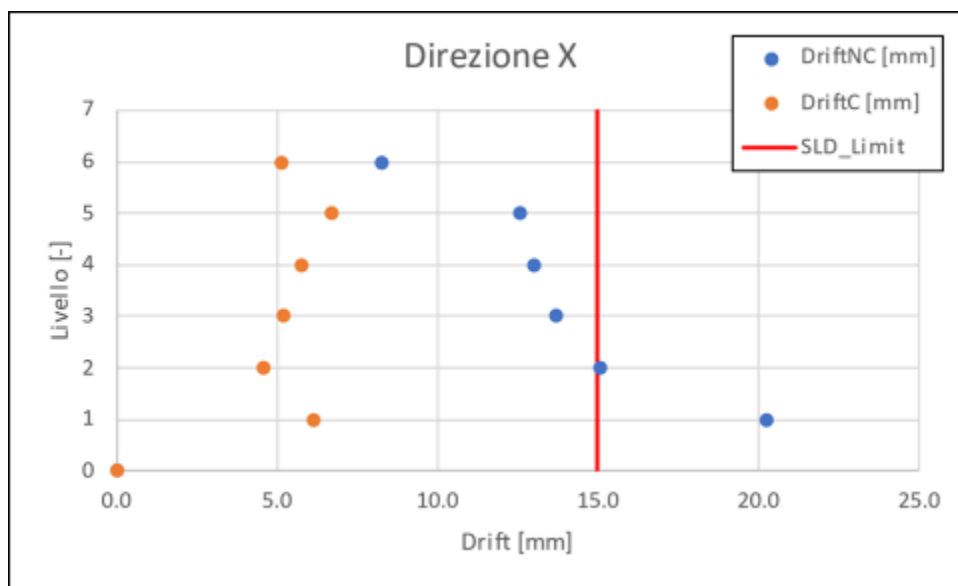


Figura 70 - Confronto drift interpiano – Direzione X

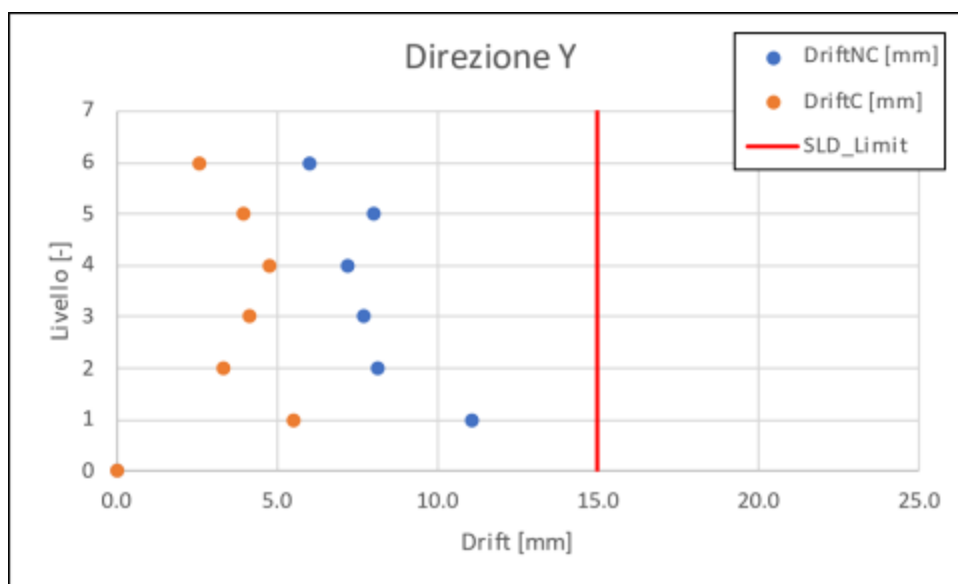


Figura 71 - Confronto drift interpiano – Direzione Y

I risultati ottenuti confermano la reale efficacia del sistema di controllo attivo che riduce i drift di interpiano in maniera significativa. Questo si traduce nel minor danneggiamento agli elementi strutturali, agli elementi non strutturali (come per esempio, i pannelli di tamponamento) ed al contenuto dell'edificio (occupanti, macchinari, ecc.) per sismi meno intensi ma più frequenti. Tale aspetto è fondamentale per una struttura ospedaliera come quella in oggetto.

Tali aspetti sono messi in evidenza attraverso i confronti dei bilanci energetici riferiti allo SLD.

Le immagini che seguono mettono in luce il suddetto aspetto.

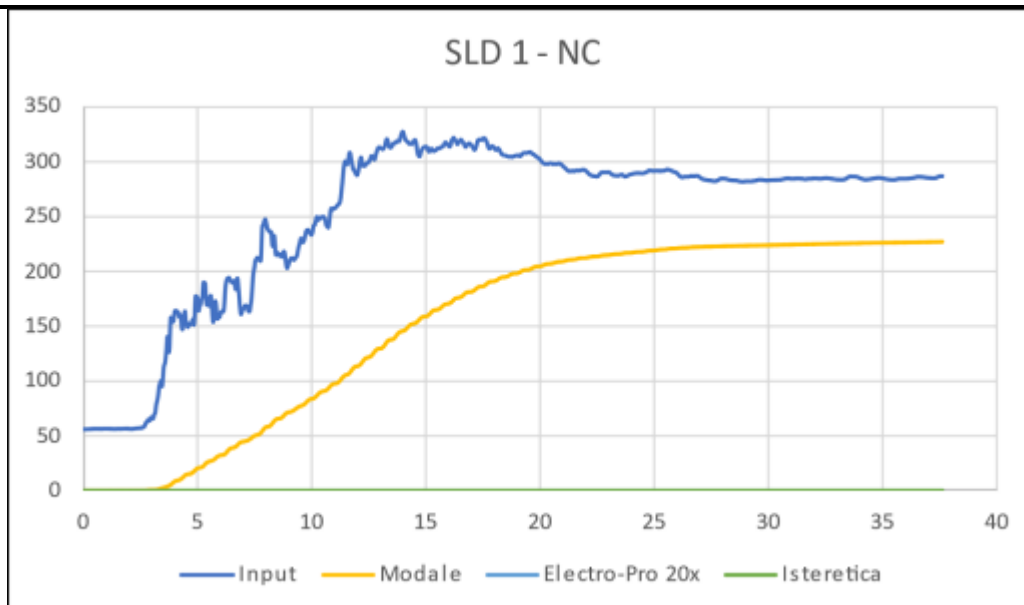


Figura 72 – Bilancio energetico della struttura NC – SLD 1

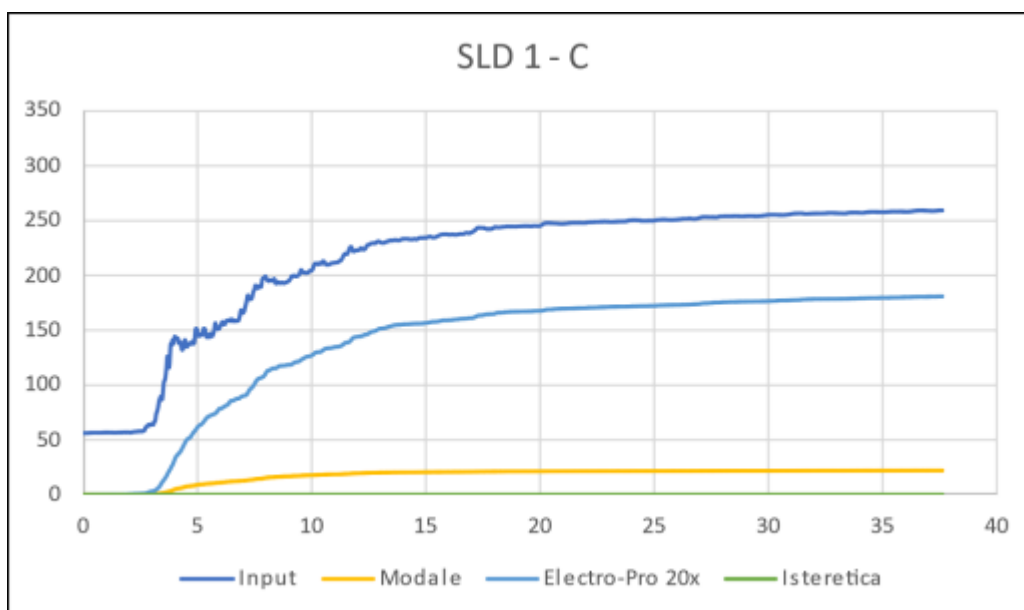


Figura 73 - Bilancio energetico della struttura C – SLD 1

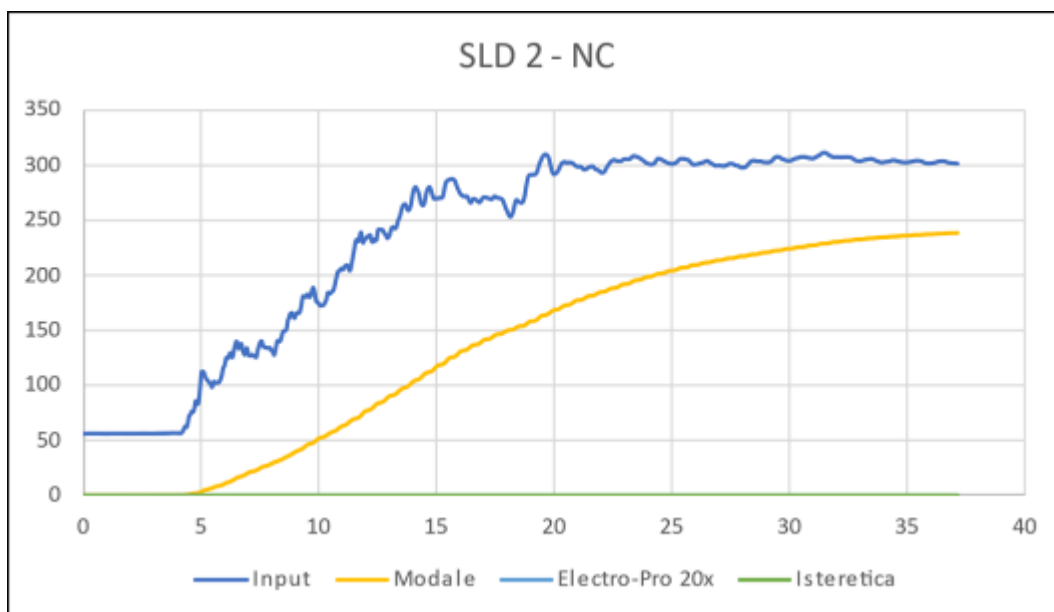


Figura 74 - Bilancio energetico della struttura NC – SLD 2

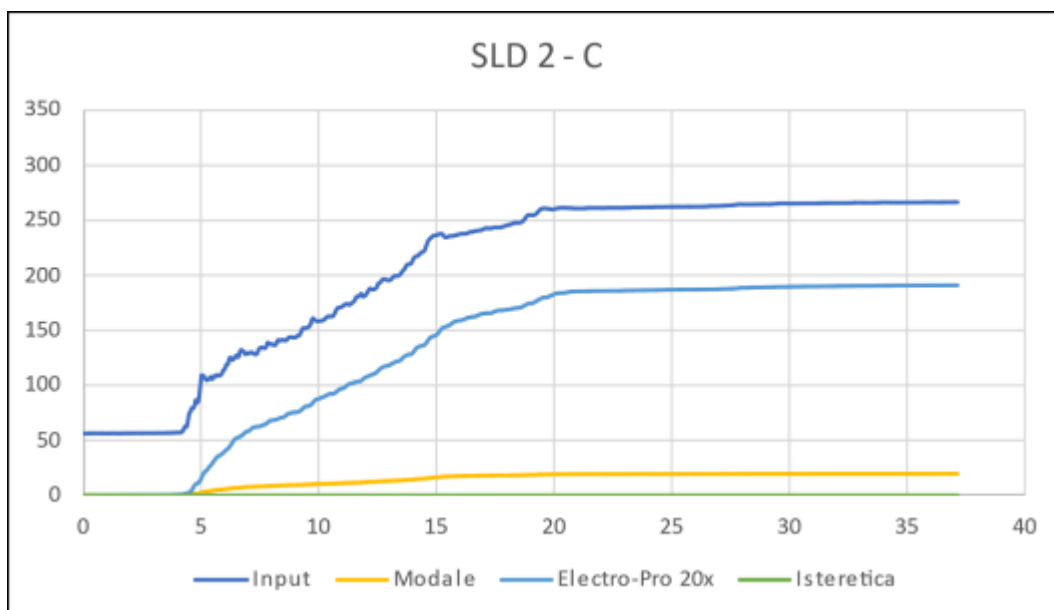


Figura 75 - Bilancio energetico della struttura C – SLD 2

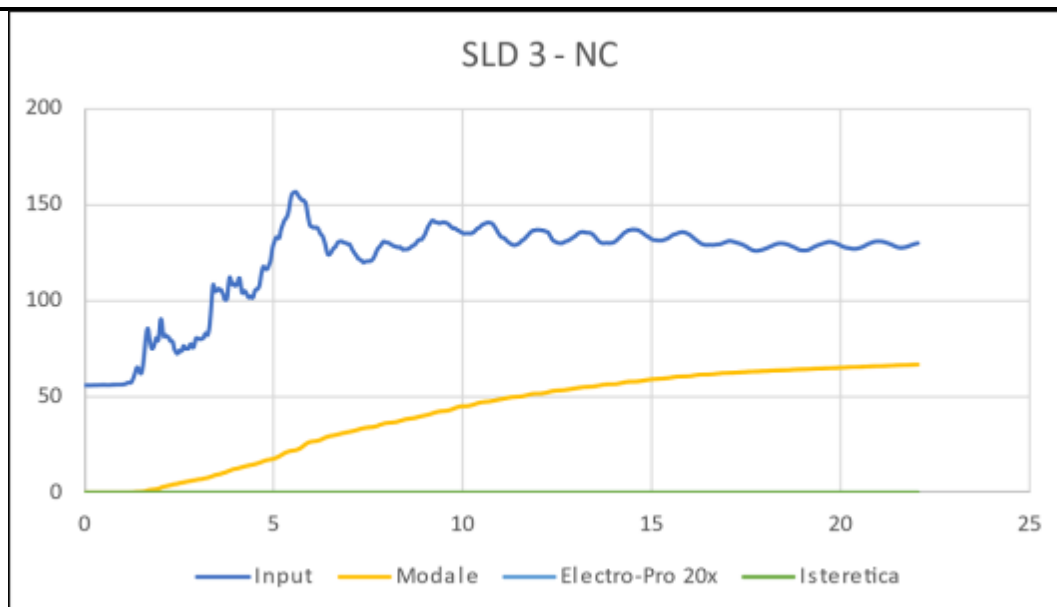


Figura 76 - Bilancio energetico della struttura NC – SLD 3

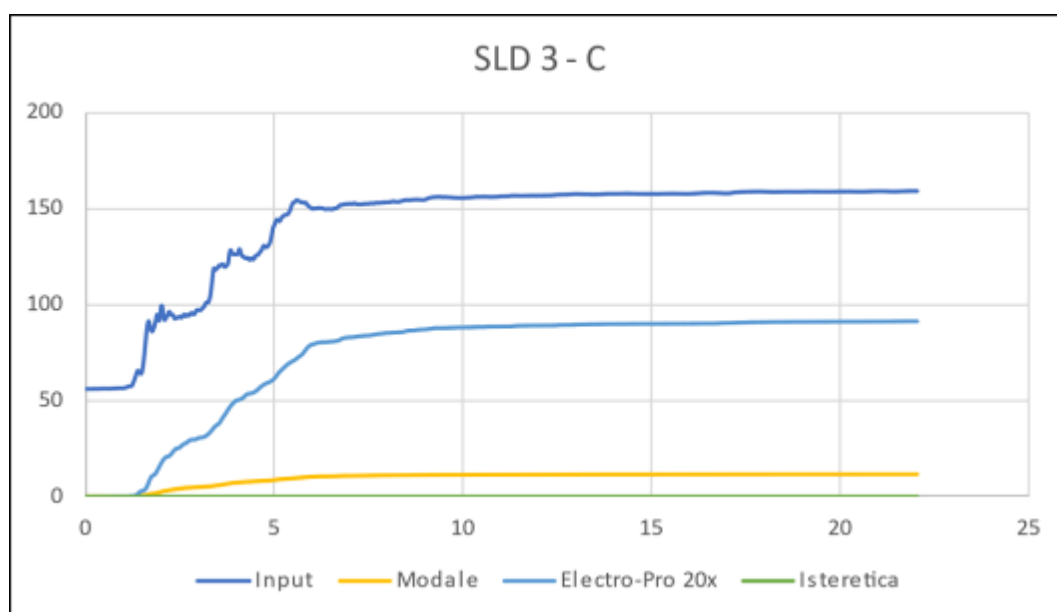


Figura 77 - Bilancio energetico della struttura C – SLD 3

Anche attraverso l'osservazione dei confronti energetici allo SLD, si osserva un miglioramento sismico importante grazie all'introduzione del sistema di controllo attivo Electro-Pro 20x o similare.

Le riduzioni di smorzamento modale, e quindi di danni agli elementi strutturali e non strutturali per sismi frequenti come quelli legati allo SLD, raggiungono fino al 90 %.

La tabella seguente riporta in sintesi i risultati osservati nei grafici sovrastanti.

Tipo di Energia	SLD 1			SLD 2			SLD 3		
	% E_{NPUT}			% E_{NPUT}			% E_{NPUT}		
	NC	C	Δ [%]	NC	C	Δ [%]	NC	C	Δ [%]
Modale	18.96%	6.53%	-65.53%	79.13%	7.33%	-90.73%	51.35%	7.34%	-85.71%
Electro-Pro	0.00%	58.62%	58.62%	0.00%	71.65%	71.65%	0.00%	57.39%	57.39%

Tabella 22 - Confronto del bilancio energetico tra struttura NC e C

10. CONCLUSIONI

La relazione di calcolo in oggetto ha come obiettivo quello di dimostrare il miglioramento sismico del *Padiglione specialità* del complesso ospedaliero San Martino di Genova attraverso l'inserimento del sistema attivo innovativo Electro-Pro 20x o similare.

La configurazione proposta per ottenere un comportamento sismico in linea con le performance richieste prevede l'installazione di 24 unità macchina distribuite planimetricamente sul piano di copertura dell'edificio come mostrato in Figura 78.

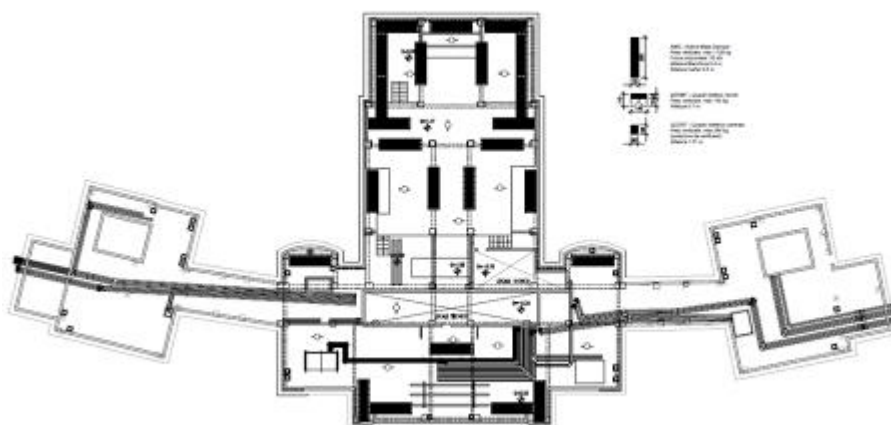


Figura 78 - Disposizione planimetrica delle 24 unità macchina del sistema attivo Electro-Pro 20x o similare

Le macchine presentano le seguenti caratteristiche geometrico-meccaniche:

A.T.P.

Dott. Ing. Gianfranco Visconti

Dott. Ing. Bruno Boldrin

UNITÀ MACCHINA	DIREZIONE DI AZIONE	LARGHEZZA [mm]	ALTEZZA [mm]	LUNGHEZZA [mm]	PESO [kg]	GAIN [kNs/m]
1	X	680	500	3000	1000	680
2	X	680	500	3000	1000	
3	X	680	500	3000	1000	
4	X	680	500	3000	1000	
5	X	680	500	3000	1000	
6	X	680	500	3000	1000	
7	X	680	500	3000	1000	
8	X	680	500	3000	1000	
9	X	680	500	3000	1000	
10	X	680	500	3000	1000	
11	X	680	500	3000	1000	
12	X	680	500	3000	1000	
13	Y	680	500	3000	1000	
14	Y	680	500	3000	1000	
15	Y	680	500	3000	1000	
16	Y	680	500	3000	1000	
17	Y	680	500	3000	1000	
18	Y	680	500	3000	1000	
19	Y	680	500	3000	1000	
20	Y	680	500	3000	1000	
21	Y	680	500	3000	1000	
22	Y	680	500	3000	1000	
23	Y	680	500	3000	1000	
24	Y	680	500	3000	1000	

Tabella 23 - Caratteristiche unità macchina

L'introduzione del sistema di controllo attivo Electro-Pro 20x o similare per la protezione sismica del fabbricato in esame permette di ottenere:

- una diminuzione in termini di spostamenti nodali e una riduzione significativa dei drift di interpiano;
- un incremento dissipativo in termini energetici che permette un innalzamento dello smorzamento apportato dal sistema;
- una riduzione di smorzamento modale, che si traduce in un minor danno agli elementi strutturali e non strutturali;
- un abbattimento dei tagli di piano, con riduzioni maggiori ai piani bassi;
- un soddisfacimento delle verifiche di rigidezza allo SLD.

In sintesi, quindi, si asserisce che il sistema Electro-Pro 20x o similare permette di ottenere miglioramenti sismici significativi con valori fino al 50%. Inoltre, permette di ridurre le eccitazioni dinamiche in ingresso salvaguardando sia gli elementi strutturali che gli elementi secondari ed il contenuto. Quest'ultimo punto è di fondamentale importanza, in quanto il valore economico delle attrezzature all'interno del padiglione è estremamente elevato e proteggerle durante un evento sismico costituisce la priorità assoluta. Questo aspetto è garantito grazie all'introduzione del sistema di controllo antisismico attivo installato nel fabbricato.

Genova, 6 Marzo 2023

Dott. Ing. Gianfranco Visconti

Dott. Ing. Bruno Boldrin