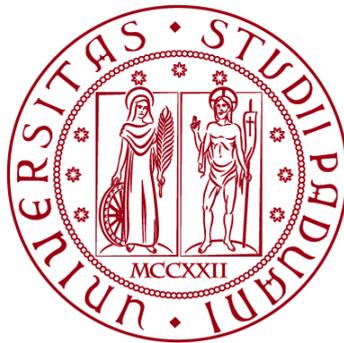


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**RISPOSTA SISMICA DI OSPEDALI ISOLATI ALLA BASE
SOGGETTI AL TERREMOTO DI TURCHIA 2023**

Relatore:
Chiar.mo PROF. ROBERTO SCOTTA
Correlatrice:
ING. GABRIELLA CASTELLANO

Laureando: GIANLUCA BOTTARO
Matricola: 2036530

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Al relatore Prof. Roberto Scotta per la disponibilità e l'opportunità concessa.
All'Ing. Gabriella Castellano di FIP MEC S.r.l. per la disponibilità e per i consigli dati.
A CSI Italia per aver gentilmente fornito la licenza dei software SAP2000 ed ETABS.
Allo studio RS Ingegneria per la collaborazione.

INDICE

1	Introduzione	1
2	Terremoto Turchia 2023	3
3	Analisi dinamica non lineare.....	7
3.1	Analisi al passo con integrazione diretta	7
3.1.1	Equazioni del moto	7
3.1.2	Soluzione dell'equazione del moto per sistema SDOF	7
3.1.3	Soluzione dell'equazione del moto per sistema MDOF.....	10
3.2	FNA (<i>Fast Nonlinear Analysis</i>).....	11
4	Isolamento sismico	15
4.1	Basi teoriche dell'isolamento sismico.....	16
4.2	Dispositivi di isolamento.....	21
4.2.1	Isolatori a scorrimento: pendolo scorrevole	22
4.2.2	Dissipatori viscosi.....	25
5	Caso studio: ospedale statale "5 gennaio" di Adana.....	27
5.1	Introduzione.....	27
5.2	Confronto spettri in accelerazione e in spostamento.....	29
5.2.1	Stazione 0118: magnitudo 7.8.....	29
5.2.2	Stazione 0118: magnitudo 7.5.....	32
5.2.3	Stazione 0118: magnitudo 6.6.....	34
5.3	Modello semplificato a 1 gdl.....	37
5.3.1	Descrizione del modello	37
5.3.1.1	Modellazione degli isolatori	38
5.3.1.2	Inserimento accelerogrammi	41

5.3.1.3	Definizione delle analisi	41
5.3.2	Risultati ottenuti	43
5.3.2.1	Magnitudo 7.8.....	43
5.3.2.2	Magnitudo 7.5.....	46
5.3.2.3	Magnitudo 6.6.....	48
5.3.2.4	DBE	50
5.3.2.5	MCE	52
5.3.2.6	Ordine temporale.....	54
5.4	Modello completo	57
5.4.1	Descrizione del modello	57
5.4.2	Risultati.....	59
5.4.2.1	Magnitudo 7.8.....	61
5.4.2.2	DBE	66
5.4.2.3	MCE	71
5.5	Confronto risultati modello semplificato e completo	76
6	Caso studio: ospedale statale di Elbistan	79
6.1	Introduzione	79
6.2	Confronto spettri in accelerazione e in spostamento	81
6.2.1	Stazione 4628: magnitudo 7.8.....	81
6.2.2	Stazione 4631: magnitudo 7.5.....	84
6.2.3	Stazione 4611: magnitudo 6.6.....	87
6.3	Modello semplificato a 1 gdl	91
6.3.1	Descrizione del modello	91
6.3.1.1	Modellazione degli isolatori.....	92
6.3.1.2	Inserimento accelerogrammi	92
6.3.1.3	Definizione delle analisi	93
6.3.2	Risultati ottenuti	94

6.3.2.1	Magnitudo 7.8.....	95
6.3.2.2	Magnitudo 7.5.....	97
6.3.2.3	Magnitudo 6.6.....	99
6.3.2.4	DBE.....	101
6.3.2.5	MCE.....	104
6.3.2.6	Ordine temporale.....	106
7	Caso studio: analisi parametrica isolatori e dissipatori accoppiati.....	109
7.1	Introduzione.....	109
7.2	Stazione 4615: magnitudo 7.8.....	110
7.3	Modello semplificato 1 gdl: scelta dei parametri.....	112
7.3.1	Risultati.....	114
7.3.1.1	Soluzione base: attrito 8%, C=0.....	115
7.3.1.2	Attrito 6%, C=10000.....	116
7.3.1.3	Attrito 5%, C=15700.....	117
7.3.1.4	Attrito 4%, C=21900.....	118
7.3.1.5	Attrito 3%, C=28400.....	119
7.3.2	Confronto risultati.....	120
7.4	Modello completo.....	121
7.4.1	Risultati nel caso a MCE.....	122
7.4.1.1	Soluzione base: attrito 8%, C=0.....	122
7.4.1.2	Attrito 6%, C=10000.....	123
7.4.1.3	Attrito 5%, C=15700.....	125
7.4.1.4	Attrito 4%, C=21900.....	127
7.4.1.5	Attrito 3%, C=28400.....	129
7.4.2	Confronto risultati a MCE.....	131
7.4.3	Risultati nel caso a DBE.....	132
7.4.3.1	Soluzione base: attrito 8%, C=0.....	132
7.4.3.2	Attrito 6%, C=10000.....	133

7.4.3.3	Attrito 5%, C=15700	134
7.4.3.4	Attrito 4%, C=21900	135
7.4.3.5	Attrito 3%, C=28400	136
7.4.4	Confronto risultati a DBE	137
8	Conclusioni	139
	Appendice A	141
	Appendice B	145
	Appendice C.....	149

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1: mappa isosismica. [Erdik, M.,2023].....	3
Figura 2-2: scala di intensità Mercalli modificata. [4].....	4
Figura 4-1: strategie di riduzione della domanda. [Ingenio]	15
Figura 4-2: sistema a due gradi di libertà isolato. [Kelly James M., 1999]	16
Figura 4-3: rappresentazione dei modi di vibrare del sistema. [Kelly James M., 1999]	18
Figura 4-4: diagramma di forza-spostamento degli isolatori elastomerici (a) e a scorrimento (b).....	21
Figura 4-5: dall'alto al basso: singolo e doppio FPS. [Barrera-Vargas C., 2020]	22
Figura 4-6: ciclo isteretico del pendolo a scorrimento. [FIP MEC]	23
Figura 4-7: esempio di dissipatore viscoso. [FIP MEC]	25
Figura 4-8: relazione forza-velocità dei dissipatori viscosi.	26
Figura 4-9: ciclo di isteresi dei dissipatori viscosi: puramente viscoso e visco-elastico.	26
Figura 5-1: due foto dall'alto dell'ospedale e foto del montaggio di un isolatore.	28
Figura 5-2: inquadramento geografico stazione 0118.....	30
Figura 5-3: modello 1 gdl.....	37
Figura 5-4: proprietà del link friction isolator, in kN e mm.....	39
Figura 5-5: accelerogramma stazione 0118 magnitudo 7.8, direzione Est-Ovest.	41
Figura 5-6: esempio di analisi al passo, caso stazione 0118, magnitudo 7.8.	42
Figura 5-7: modello completo.	57
Figura 5-8: rappresentazione del centro di massa e centro di rigidità del piano degli isolatori.	59
Figura 5-9: esempio deformata primo modo di vibrare.	60
Figura 6-1: foto dall'alto dell'ospedale e pianta della suddivisione in blocchi.....	80
Figura 6-2: inquadramento geografico stazione 4628.....	82
Figura 6-3: inquadramento geografico stazione 4631.....	85
Figura 6-4: inquadramento geografico stazione 4611.....	88
Figura 6-5: modello 1 gdl.....	91
Figura 6-6: proprietà del link friction isolator, in kN e mm.....	92
Figura 6-7: accelerogramma stazione 4631 magnitudo 7.5, direzione Est-Ovest.	93

Figura 6-8: esempio di analisi al passo, caso stazione 4631, magnitudo 7.5.	94
Figura 7-1: inquadramento geografico stazione 4615.	110
Figura 7-2: modello 1 gdl con dissipatori.	112
Figura 7-3:esempio di inserimento dei valori del dissipatore in ETABS.	113
Figura 7-4: valori di C al variare dell'attrito e spostamenti massimi associati.	114
Figura 7-5: andamento dell'energia dissipata al variare dell'attrito.	120
Figura 7-6: valori di C al variare dell'attrito e spostamenti massimi associati.	121
Figura 7-7: andamento dell'energia dissipata al variare dell'attrito.	131
Figura 7-8: andamento delle accelerazioni di piano al variare dell'attrito.....	138

1 INTRODUZIONE

La presente tesi ha lo scopo di condurre un'analisi al passo, con solutore numerico, di due ospedali isolati alla base con dispositivi antisismici, nello specifico della tipologia a superficie scorrevole curva, soggetti al terremoto di Turchia 2023. Concludendo, viene svolta un'analisi parametrica, partendo da una situazione fittizia ma verosimile, di uno dei due ospedali accoppiando gli isolatori con dei dissipatori viscosi.

Nei capitoli iniziali si dà una panoramica di quello che è stato il terremoto in Turchia, andando a riportare informazioni che interessano edifici e strutture e tralasciando gli altri aspetti di diversa competenza, e si illustrano i concetti base delle analisi non lineari. Nei capitoli successivi si dà una base dei concetti di isolamento sismico e dei dispositivi di isolamento: come funzionano, come sono composti e quali sono le leggi che li descrivono.

Questa tesi, parzialmente collaborativa, vede una parte di lavoro in cooperazione, con un collega, che interessa i due capitoli centrali riguardanti gli ospedali veri e propri, ovvero il capitolo 5 e 6. Essi illustrano le caratteristiche degli ospedali in esame e spiegano come sono avvenute le analisi, spingendosi nello specifico nella creazione del modello e con qualche accenno sulla spiegazione delle tecniche di calcolo implementate nel software utilizzato. Ciò porta a dei risultati per entrambi gli ospedali analizzati in questi capitoli.

Infine, si è svolta l'analisi parametrica ipotizzando il primo dei due ospedali come fosse posizionato nei pressi dell'epicentro del terremoto e inserendo un sistema di dissipatori viscosi accoppiati ai dispositivi di isolamento a superficie curva. L'analisi parametrica è stata fatta partendo da una soluzione base e successivamente facendo variare il valore di attrito negli isolatori e il termine costante nei dissipatori, analizzando infine le differenze ottenute.

2 TERREMOTO TURCHIA 2023

Alle 04:17 del 6 febbraio 2023 un terremoto di magnitudo 7.8 ha colpito la Turchia centro-meridionale vicino alla città di Gaziantep, seguito da un secondo evento di magnitudo 7.5 alle ore 13:24 poco più a nord del precedente, con epicentro nella città di Elbistan [3]. La seguente immagine rappresenta i due epicentri, appena descritti, dai due simboli rossi; mentre, il contorno in giallo circonda l'area all'interno della quale è stato percepito uno scuotimento pari a MMI VII di intensità Mercalli modificata che si prevede che provocherà danni trascurabili a edifici ben progettati e costruiti e danni da lievi a moderati in edifici ordinari ben costruiti. All'interno di quest'area, però, si sono raggiunti anche livelli MMI X che sono le intensità più elevate [1].



Figura 2-1: mappa isosismica. [Erdik, M.,2023]

All'interno dell'area gialla quindi sono stati percepiti livelli della scala Mercalli modificata che va dal VII al X, nella seguente immagine si riporta a parole ciò che questi livelli significano [4].

Intensity	Shaking	Description/Damage
I	Not felt	Not felt except by a very few under especially favorable conditions.
II	Weak	Felt only by a few persons at rest, especially on upper floors of buildings.
III	Weak	Felt quite noticeably by persons indoors, especially on upper floors of buildings. Many people do not recognize it as an earthquake. Standing motor cars may rock slightly. Vibrations similar to the passing of a truck. Duration estimated.
IV	Light	Felt indoors by many, outdoors by few during the day. At night, some awakened. Dishes, windows, doors disturbed; walls make cracking sound. Sensation like heavy truck striking building. Standing motor cars rocked noticeably.
V	Moderate	Felt by nearly everyone; many awakened. Some dishes, windows broken. Unstable objects overturned. Pendulum clocks may stop.
VI	Strong	Felt by all, many frightened. Some heavy furniture moved; a few instances of fallen plaster. Damage slight.
VII	Very strong	Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; considerable damage in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken.
VIII	Severe	Damage slight in specially designed structures; considerable damage in ordinary substantial buildings with partial collapse. Damage great in poorly built structures. Fall of chimneys, factory stacks, columns, monuments, walls. Heavy furniture overturned.
IX	Violent	Damage considerable in specially designed structures; well-designed frame structures thrown out of plumb. Damage great in substantial buildings, with partial collapse. Buildings shifted off foundations.
X	Extreme	Some well-built wooden structures destroyed; most masonry and frame structures destroyed with foundations. Rails bent.

Figura 2-2: scala di intensità Mercalli modificata. [4]

Questi livelli registrati si possono osservare nei danni provocati, infatti, hanno portato ad un bilancio di ben 214'000 edifici crollati o gravemente danneggiati, mentre quelli che hanno subito danni medi e lievi ammontano a circa 43'000. Nelle sole province più duramente colpite di Hatay, Kahramanmaraş, Gaziantep e Adiyaman, gli edifici gravemente danneggiati sono rispettivamente 10'911, 10'777, 11'922 e 6'108 e costituiscono tra il 10% e il 20% del patrimonio edilizio totale colpito dal sisma. Stando ai dati raccolti, una percentuale sostanziale degli edifici crollati è stata costruita prima del 2000, quando furono istituiti nuove norme di progettazione antisismica e controlli di progettazione e costruzione. Numerosi di questi edifici sono costruiti con una struttura a telaio in calcestruzzo armato e tamponature in mattoni che aderiscono alle moderne norme di progettazione e costruzione, ma ce ne sono anche molti altri, generalmente più vecchi, che presentano una struttura senza caratteristiche di duttilità e quindi più vulnerabili a forti scosse sismiche [1]. D'altro canto, i danni alle principali infrastrutture sono molto limitati, ciò indica pratiche di progettazione e costruzione molto migliori associate alle infrastrutture rispetto agli edifici.

Ciononostante, alcuni ospedali della regione colpita, tra cui l'ospedale statale di Iskenderun, un ospedale privato a Hatay, due ospedali privati a Malatya e un altro ospedale privato a Adiyaman, non sono più funzionanti o funzionano solo parzialmente a causa dei danni del terremoto. Contrariamente, 9 ospedali isolati alla base sono funzionanti, incluso il secondo più grande ospedale cittadino di Adana con 2000 posti letto con base isolata più grande al mondo, confermando la maggior sicurezza che questa tecnologia offre nel settore delle costruzioni. Con la presente tesi si vuole validare quelli che sono i risultati numerici in fase di progettazione con quella che è la realtà dei fatti, proprio appoggiandosi ai dati rilevati da uno di questi ospedali isolati alla base [2].

-
1. Erdik, M., Tümsa, MBD, Pınar, A., Altunel, E. e Zülfikar, AC, 2023, A preliminary report on the February 6, 2023 earthquakes in Türkiye, <http://doi.org/10.32858/temblor.297>.
 2. Qu, Z., Wang, F., Chen, X., Wang, X., Zhou, Z., Rapid report of seismic damage to hospitals in the 2023 Turkey earthquake sequences, *Earthquake Research Advances* (2023), doi: <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2023.100234>.
 3. <http://terremoti.ingv.it>.
 4. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/modified-mercalli-intensity-scale>.

3 ANALISI DINAMICA NON LINEARE

In condizioni di non linearità del sistema, per geometria o materiale, è necessario l'impiego di analisi non lineari che riescono a tener conto dell'inelasticità del sistema. In questo caso studio risulta presente una forte non linearità data dalla presenza degli isolatori. Successivamente verranno spiegate in breve due diverse analisi utilizzate in questo caso studio: l'analisi al passo ad integrazione diretta che utilizza il metodo di Newmark e l'analisi modale non lineare, detta anche FNA (*Fast Nonlinear Analysis*).

3.1 Analisi al passo con integrazione diretta

3.1.1 Equazioni del moto

Le equazioni del moto per un sistema a più gradi di libertà MDOF sono rappresentate da un sistema di equazioni differenziali non lineari, difficili da risolvere analiticamente. Pertanto, ci sono alcuni metodi per risolvere tali equazioni, i quali si basano sulla soluzione di equazioni incrementali del moto. Tali procedure consentono di approssimare il sistema non lineare in un sistema lineare all'interno di un determinato intervallo di tempo Δt . Per far ciò si usano metodi iterativi di integrazione numerica per determinare la soluzione in ogni intervallo temporale. L'equazione del moto da risolvere si può riscrivere nel seguente modo:

$$M\Delta\ddot{u} + C\Delta\dot{u} + K\Delta u = -M\Delta\ddot{u}_g \quad (3.1)$$

dove i valori di Δu , $\Delta\dot{u}$, $\Delta\ddot{u}$ e $\Delta\ddot{u}_g$ sono rispettivamente i valori vettoriali incrementali di spostamento, velocità, accelerazione e accelerazione al suolo calcolati nell'intervallo di tempo Δt . Mentre M , C e K sono rispettivamente la matrice delle masse, di smorzamento e di rigidità.

3.1.2 Soluzione dell'equazione del moto per sistema SDOF

Per semplicità si considera prima un sistema SDOF e poi la soluzione si potrà estendere per sistemi MDOF. L'equazione incrementale del moto risulta quindi la seguente:

$$m\Delta\ddot{u}_i + c_t\Delta\dot{u}_i + k_t\Delta u_i = \Delta p \quad (3.2)$$

dove c_t e k_t sono rispettivamente i valori iniziali tangenziali medi di smorzamento e rigidità del sistema all'inizio dell'istante temporale e Δp è l'incremento di carico generico applicato al sistema.

La soluzione della (3.2) consiste nel ricavare i valori di spostamento e velocità al termine del passo di integrazione, la generica soluzione è descritta nel seguente modo:

$$\begin{cases} \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \int_0^{\Delta t} \ddot{u}(t) dt \\ u_{i+1} = u_i + \int_0^{\Delta t} \dot{u}(t) dt \end{cases} \quad (3.3)$$

A tal scopo si fa riferimento ai metodi di integrazione numerica. Il più utilizzato, e quello che viene descritto di seguito, è il metodo di Newmark. Tale metodo è detto implicito, in quanto la soluzione al passo temporale $i + 1$ è ottenuta tramite la conoscenza della soluzione al passo n e delle condizioni imposte al passo $i + 1$ ed è incondizionatamente stabile. Nella formulazione di Newmark le relazioni assumono la seguente forma:

$$\begin{cases} \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + (1 + \gamma)\Delta t \ddot{u}_i + (\gamma\Delta t) \ddot{u}_{i+1} \\ u_{i+1} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t^2 \ddot{u}_i + \beta\Delta t^2 \ddot{u}_{i+1} \end{cases} \quad (3.4)$$

dove i coefficienti β e γ definiscono la variazione dell'accelerazione all'interno del passo e controllano le caratteristiche di stabilità del metodo.

Se si ipotizza che l'accelerazione sia costante all'interno del passo e pari alla media tra il valore iniziale e finale si ottiene:

$$\begin{cases} \ddot{u}(t) = \frac{1}{2}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \\ \dot{u}(t) = \dot{u}_i + \frac{\tau}{2}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \\ u(t) = u_i + \tau\dot{u}_i + \frac{\tau^2}{4}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \end{cases} \quad (3.5)$$

da cui si ottengono i valori finali – al tempo $i + 1$ – della velocità e spostamento.

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \frac{\Delta t}{2}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \quad (3.6)$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + \frac{\Delta t^2}{4}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}) \quad (3.7)$$

Dal confronto di queste relazioni con quelle di Newmark, si può osservare che assumere una accelerazione costante all'interno del passo corrisponde a porre i seguenti valori ai due coefficienti: $\beta = 1/4$ e $\gamma = 1/2$.

Così impostato il problema risulta iterativo a partire da un valore iniziale di tentativo in quanto formato da un metodo implicito come precedentemente detto. Pertanto, è

preferibile, dal punto di vista computazionale, trasformare le relazioni di Newmark in modo da rendere esplicito il metodo. In primo luogo, si riscrive l'equazione incrementale del moto ovvero la (3.2), in cui:

$$\Delta \ddot{u}_i = \ddot{u}_{i+1} - \ddot{u}_i, \quad \Delta \dot{u}_i = \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i, \quad \Delta u_i = u_{i+1} - u_i, \quad \Delta p_i = p_{i+1} - p_i,$$

successivamente anche le (3.4) si possono riscrivere in forma incrementale come segue:

$$\Delta \dot{u}_i = \Delta t \ddot{u}_i + \gamma \Delta t \Delta \ddot{u}_i \quad (3.8)$$

$$\Delta u_i = \Delta t \dot{u}_i + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_i + \beta \Delta t^2 \Delta \ddot{u}_i \quad (3.9)$$

Dalla (3.9) si ricava l'incremento di accelerazione $\Delta \ddot{u}_i$ che vale:

$$\Delta \ddot{u}_i = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta u_i - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i \quad (3.10)$$

Sostituendo la (3.10) nella (3.8) si ottiene:

$$\Delta \dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i - \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \ddot{u}_i \quad (3.11)$$

Ottenute le due relazioni incrementali di accelerazione e velocità si possono sostituire la (3.10) e (3.11) nell'equazione del moto in forma incrementale (3.2) e ottenendo dopo alcuni passaggi l'equazione seguente:

$$\left(\frac{1}{\beta \Delta t^2} m + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + k \right) \Delta u_i = \Delta p_i + \left(\frac{m}{\beta \Delta t} + \frac{\gamma}{\beta} c \right) \dot{u}_i + \left[\frac{m}{2\beta} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \right] \ddot{u}_i \quad (3.12)$$

Ponendo

$$\bar{k} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} m + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + k \quad (3.13)$$

e

$$\Delta \bar{p}_i = \Delta p_i + \left(\frac{m}{\beta \Delta t} + \frac{\gamma}{\beta} c \right) \dot{u}_i + \left[\frac{m}{2\beta} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \right] \ddot{u}_i \quad (3.14)$$

si ottiene

$$\bar{k} \Delta u_i = \Delta \bar{p}_i \quad (3.15)$$

da cui si ricava l'incremento di spostamento nel passo di integrazione

$$\Delta u_i = \bar{k}^{-1} \Delta \bar{p}_i \quad (3.16)$$

Nota Δu_i , gli incrementi di velocità e di accelerazione nel passo possono essere calcolati mediante le equazioni (3.10) e (3.11). La risposta al tempo t_{i+1} può essere ricavata attraverso le seguenti relazioni:

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i, \quad \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i, \quad \ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \Delta \ddot{u}_i$$

3.1.3 Soluzione dell'equazione del moto per sistema MDOF

La procedura appena mostrata può essere estesa per sistemi MDOF riscrivendo le equazioni in termini matriciali e vettoriali:

$$\bar{K}\Delta u_i = \Delta \bar{P}_i \quad (3.17)$$

dove:

$$\bar{K} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}M + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}C + K \quad (3.18)$$

$$\Delta \bar{P}_i = \Delta P_i + \left(\frac{M}{\beta\Delta t} + \frac{\gamma}{\beta}C\right)\dot{u}_i + \left[\frac{M}{2\beta} + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)C\right]\ddot{u}_i \quad (3.19)$$

Questa tipologia di analisi detta anche analisi dinamica non lineare permette di avere più accuratezza nella determinazione della risposta strutturale rispetto ad una analisi lineare, in quanto, tiene conto dell'intera storia temporale dell'evento sismico e non solo.

Questo tipo di analisi viene eseguita applicando direttamente gli accelerogrammi alla struttura, così facendo è possibile distinguere la risposta tra sismi di tipo impulsivo, in cui è presente una forte escursione in campo plastico e con elevata dissipazione di energia senza inversione di segno, e di tipo sinusoidale, in cui l'energia viene dissipata in maggior tempo e con numerose inversioni di segno.

3.2 FNA (*Fast Nonlinear Analysis*)

La Fast Nonlinear Analysis è un metodo di analisi modale utile per la valutazione statica o dinamica di sistemi strutturali lineari o non lineari. Grazie alla sua formulazione efficiente dal punto di vista computazionale, la FNA è particolarmente adatta per le analisi al passo. Di contro, si richiede che i modelli abbiano alcune caratteristiche: essere principalmente elastico-lineare, avere un numero limitato di elementi non lineari, limitare il comportamento non lineare ai soli elementi link.

L'efficienza della formulazione FNA è in gran parte dovuta alla separazione del vettore forza della parte non lineare ($R_{NL}(t)$), dalla matrice di rigidezza elastica e dalle equazioni del moto smorzate, come visto nell'equazione di equilibrio fondamentale della FNA, espressa come:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + K_L u(t) + R_{NL}(t) = R(t) \quad (3.20)$$

dove: M è la matrice diagonale delle masse, C matrice proporzionale degli smorzamenti, K_L matrice delle rigidezze degli elementi elastici lineari (tutti gli elementi esclusi i link non lineari), R_{NL} vettore delle forze derivante dai gradi di libertà non lineari degli elementi link, R vettore delle forze applicate [5].

I vettori di Ritz, dipendenti da rigidezza e massa, rappresentano le relazioni di equilibrio all'interno del sistema strutturale elastico. Ad ogni incremento temporale, le equazioni modali disaccoppiate vengono risolte esattamente, mentre le forze all'interno del grado di libertà non lineare predefinito, indicizzato all'interno di $R_{NL}(t)$, vengono risolte attraverso un processo iterativo che converge per soddisfare l'equilibrio. Seguendo questa procedura, la FNA è un'applicazione dinamico-non lineare efficiente e accurata che soddisfa le relazioni di equilibrio, forza-deformazione e compatibilità.

Nel dettaglio, il primo step consiste nel creare una matrice di rigidezza effettiva lineare per ogni grado di libertà non lineare. Essa può essere creata arbitrariamente o imposta, solitamente varia tra un valore compreso tra zero e la massima rigidezza non lineare di un dato grado di libertà. Riscrivendo la (3.20) si ha:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + (K_L + K_e)u(t) = R(t) - R_{NL}(t) + K_e u(t) \quad (3.21)$$

con K_e matrice delle rigidezze effettive. Raggruppando:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + \bar{K}u(t) = \bar{R}(t) \quad (3.22)$$

dove $\bar{K} = K_L + K_e$ ed è conosciuta, mentre $\bar{R}(t) = R(t) - R_{NL}(t) + K_e u(t)$ la quale verrà calcolata iterativamente. Più la rigidità effettiva elastica è stimata correttamente e più la convergenza è rapida [5].

A questo punto si esegue un'analisi modale con il Metodo Ritz. Come primo step, per risolvere l'equazione del moto (3.22), si calcolano un set di N vettori ortogonali (Φ forme modali) i quali soddisfano le seguenti equazioni:

$$\Phi^T M \Phi = \mathbb{I} \quad (3.23)$$

$$\Phi^T C \Phi = \Lambda \quad (3.24)$$

e

$$\Phi^T \bar{K} \Phi = \Omega^2 \quad (3.25)$$

dove \mathbb{I} è la matrice identità e Ω^2 è la matrice diagonale con i termini definiti come ω_n^2 .

La risposta del sistema può ora essere espressa in termini di questi vettori introducendo le seguenti trasformazioni matriciali:

$$u(t) = \Phi Y(t) \quad \dot{u}(t) = \Phi \dot{Y}(t) \quad \ddot{u}(t) = \Phi \ddot{Y}(t) \quad (3.26)$$

Sostituendo queste equazioni nella (3.20) e moltiplicando entrambi i lati dell'equazione per Φ^T produce un set di N equazioni disaccoppiate, espresse dalla seguente equazione matriciale:

$$\mathbb{I} \ddot{Y}(t) + \Lambda \dot{Y}(t) + \Omega^2 Y(t) = F(t) \quad (3.27)$$

in cui le forze modali lineari e non lineari sono date da:

$$F(t) = \Phi^T \bar{R}(t) = \Phi^T R(t) - \Phi^T R_{NL}(t) + \Phi^T K_e u(t) \quad (3.28)$$

L'ipotesi che la matrice di smorzamento sia diagonalizzabile si ritrova nel classico metodo definito "*Mode Superposition*", nel quale i valori di smorzamento sono assegnati in termini di percentuale dello smorzamento critico. I termini diagonali della matrice Λ sono $2\xi_n \omega_n$ in cui ξ_n è il rapporto di smorzamento per il modo n . Va notato che le forze associate agli smorzatori concentrati in qualsiasi punto della struttura possono essere incluse come parte del vettore delle forze non lineari. Inoltre, se il numero di vettori calcolati con il metodo di Ritz è uguale al numero totale di gradi di libertà della struttura, l'equazione (3.27) è esatta al tempo t . Perciò, se viene utilizzato un intervallo temporale sufficientemente piccolo e viene usata l'iterazione in ognuno di esso il metodo converge alla soluzione esatta [5].

Siccome $u(t) = \Phi Y(t)$, le deformazioni negli elementi non lineari può essere espressa direttamente in coordinate modali:

$$d(t) = BY(t) \quad (3.29)$$

dove la matrice di trasformazione da coordinate modali a deformazione degli elementi è definita da:

$$B = b\Phi \quad (3.30)$$

Si nota che la matrice B di dimensioni $L \times N$ non è funzione del tempo ed è relativamente piccola, inoltre è necessario calcolarla solamente una volta prima dell'integrazione delle equazioni modali. Ciò porta ad un onere computazionale notevolmente minore.

Riassumendo si può schematizzare l'analisi in alcuni passi [5]:

- 1 Calcoli iniziali, prima della soluzione passo-passo:
 - a. calcolare N vettori di Ritz dipendenti dal carico (Φ) per la struttura senza gli elementi non lineari;
 - b. calcolare la matrice $L \times N$ B . Dove L è il numero di gradi di libertà all'interno degli elementi non lineari;
 - c. calcolare le costanti di integrazione per l'integrazione esatta a tratti delle equazioni modali, per ciascun modo;
- 2 Soluzione non lineare per ogni passo temporale
 - a. usare serie di Taylor per stimare la soluzione al tempo t :

$$Y(t) = Y(t - \Delta t) + \Delta t \dot{Y}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} \ddot{Y}(t - \Delta t)$$

$$\dot{Y}(t) = \dot{Y}(t - \Delta t) + \Delta t \ddot{Y}(t - \Delta t)$$
 - b. per l' i -esima iterazione, calcolare L deformazioni non lineari e velocità:

$$d(t)^i = BY(t)^i \quad \text{e} \quad \dot{d}(t)^i = B\dot{Y}(t)^i$$
 - c. calcolare L forze non lineari $f(t)^i$ a partire dalle deformazioni e velocità degli elementi non lineari;
 - d. calcolare il nuovo vettore delle forze modali: $\bar{F}(t)^i = F(t) - B^T [f(t)^i - K_e d(t)^i]$
 - e. usare il metodo esatto a tratti per risolvere le equazioni modali del passo successivo; $Y(t)^i, \dot{Y}(t)^i, \ddot{Y}(t)^i$;

f. calcolare l'errore:

$$Err = \frac{\sum_{n=1}^N |\bar{f}(t)_n^i| - \sum_{n=1}^N |\bar{f}(t)_n^{i-1}|}{\sum_{n=1}^N |\bar{f}(t)_n^i|}$$

g. controllare la convergenza, dove la tolleranza Tol è specificata.

Se $Err > Tol$ andare allo step b con $i = i + 1$

Se $Err < Tol$ andare allo step a con $t = t + \Delta t$

4 ISOLAMENTO SISMICO

L'isolamento sismico è una tecnica molto efficace che permette di ridurre gli effetti del terremoto alle strutture. I dispositivi adottati per questa tecnica sono in grado anche di controllare vibrazioni indotte da vento o altre eccitazioni dinamiche. L'impiego di questi dispositivi risulta molto efficace in edifici di rilevante importanza quali ospedali, scuole, ponti e altre opere particolari, in quanto permettono la normale funzione dell'opera anche durante un evento estremo come il terremoto. Questi elementi di isolamento comportano una variazione notevole della struttura in termini di rigidità e/o smorzamento; quindi, riducono la domanda in maniera globale abbattendo notevolmente l'energia trasmessa dal suolo al sistema.

L'isolamento si traduce nel disaccoppiare il moto del terreno da quello della struttura inserendo una sconnessione lungo l'altezza - ovvero i dispositivi di isolamento - così da creare la suddivisione in due parti della struttura: sottostruttura e sovrastruttura. La prima coincide con la parte rigidamente connessa al terreno, la seconda, coincide con la parte posta al di sopra dei dispositivi di isolamento.

Tali dispositivi, riducendo notevolmente la rigidità orizzontale, aumentano la deformabilità e quindi spostano il periodo fondamentale della struttura in zone dello spettro con accelerazioni minori, a discapito di spostamenti maggiori, i quali però saranno concentrati maggiormente al livello del sistema di isolamento.

L'isolamento sismico può avvenire secondo due casi principali: incrementando il periodo con o senza dissipazione di energia e limitando la forza, con o senza dissipazione di energia.

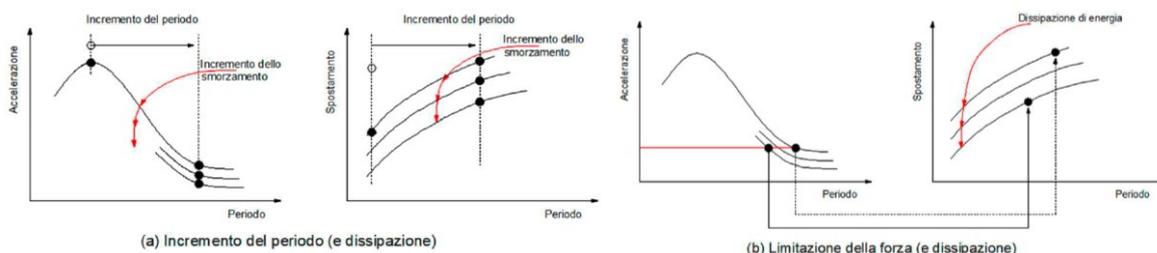


Figura 4-1: strategie di riduzione della domanda. [Ingenio]

Nel primo caso si impiegano dispositivi a comportamento quasi elastico per ridurre notevolmente le accelerazioni alla struttura e la dissipazione dell'energia avviene attraverso i dispositivi.

Nel secondo caso si impiegano dispositivi a comportamento non lineare andando a ridurre le forze e quindi gli effetti sulla struttura attraverso i dispositivi. La dissipazione di energia viene sfruttata solamente per limitare gli spostamenti alla base.

Infine, tali dispositivi di isolamento sono dei dispositivi di appoggio che garantiscono la continuità strutturale. Essi sono caratterizzati da un'alta deformabilità nel piano orizzontale, ma una notevole rigidità in direzione verticale. Ne esistono di varie tipologie come gli elastomerici ad alto e basso smorzamento, composti da strati di gomma e lastre in acciaio alternate tra loro, e quelli a scorrimento come il pendolo scorrevole, composto da due o più calotte in acciaio che permettono lo scorrimento tra loro. Nei successivi paragrafi si tratteranno in maniera approfondita i dispositivi di scorrimento e altri dispositivi detti "viscosi" con funzione di dissipazione dell'energia, in quanto i primi presenti nell'ospedale oggetto di studio, mentre i secondi utilizzati nell'analisi parametrica al §7.

4.1 Basi teoriche dell'isolamento sismico

Si riportano ora alcuni concetti della teoria lineare dell'isolamento sismico. Si considera un sistema a due gradi di libertà, dove m è la massa della sovrastruttura, m_b la massa della base del piano terra sopra il sistema di isolamento. La rigidità e smorzamento della struttura sono rappresentati da k_s e c_s , mentre la rigidità e lo smorzamento degli isolatori con k_b e c_b . Gli spostamenti assoluti delle due masse e del terreno sono indicati con u_s , u_b , e u_g .

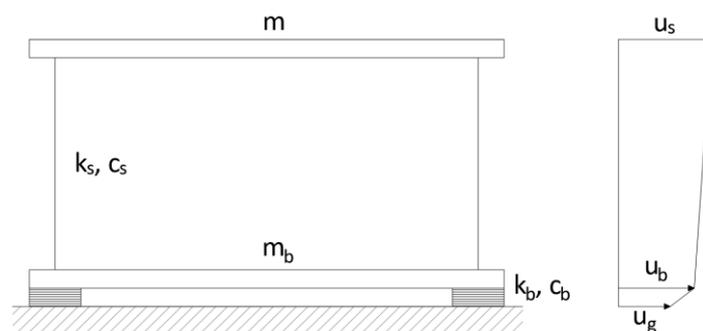


Figura 4-2: sistema a due gradi di libertà isolato. [Kelly James M., 1999]

È più conveniente utilizzare gli spostamenti relativi che sono così definiti

$$v_s = u_s - u_b$$

$$v_b = u_b - u_g$$

Secondo queste quantità le equazioni del moto a due gradi di libertà diventano

$$(m + m_b)\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (4.1)$$

$$m\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = -m\ddot{u}_g \quad (4.2)$$

che può essere riscritto in termini matriciali come

$$\begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (4.3)$$

dove $M = m + m_b$, in notazione compatta diventa

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + Kv = Mr\ddot{u}_g \quad (4.4)$$

Definendo il rapporto di massa γ come

$$\gamma = \frac{m}{m+m_b} = \frac{m}{M} \quad (4.5)$$

e le frequenze nominali ω_b e ω_s date da

$$\begin{aligned} \omega_b^2 &= \frac{k_b}{m+m_b} \\ \omega_s^2 &= \frac{k_s}{m} \end{aligned} \quad (4.6)$$

e i fattori di smorzamento ξ_b e ξ_s dati da

$$\begin{aligned} 2\omega_b\xi_b &= \frac{c_b}{m+m_b} \\ 2\omega_s\xi_s &= \frac{c_s}{m} \end{aligned} \quad (4.7)$$

ed il rapporto delle frequenze

$$\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} = \frac{k_b m}{(m+m_b)k_s} = \left(\frac{T_s}{T_b}\right)^2 \quad (4.8)$$

dove T_s e T_b sono i periodi dei due oscillatori elementari, uno costituito da una massa vincolata al sistema di isolamento e l'altro dalla sovrastruttura molto più rigida del sistema isolato. È quindi possibile scrivere le equazioni del moto come segue

$$\ddot{v}_b + \gamma\ddot{v}_s + 2\omega_b\xi_b\dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g \quad (4.9)$$

$$\ddot{v}_b + \ddot{v}_s + 2\omega_s\xi_s\dot{v}_s + \omega_s^2 v_s = -\ddot{u}_g \quad (4.10)$$

Nella (4.8) si è introdotto il rapporto di isolamento, espresso da $T_s/T_b = 1/\sqrt{\varepsilon}$.

Risolvendo il problema agli autovalori si ottengono due modi di vibrare della struttura. Assumendo $\varepsilon \ll 1$, ovvero che la sovrastruttura è molto più rigida del sistema isolato, è possibile semplificare il problema e ottenere i due valori di frequenze

$$\omega_1^2 = \omega_b^2(1 - \gamma\varepsilon) \quad (4.11)$$

$$\omega_2^2 = \frac{\omega_s^2}{(1-\gamma)}(1 + \gamma\varepsilon) \quad (4.12)$$

Dalle equazioni appena descritte si può notare come la frequenza del primo modo di vibrare non dipenda dalla rigidità del sistema (k_s). La frequenza del secondo modo di vibrare invece aumenta quando γ tende ad 1 causa della massa vicina alla base.

Le forme modali risultano

$$\phi_1^T = \{1; \varepsilon\} \quad (4.13)$$

$$\phi_2^T = \left\{1; -\frac{1}{\gamma}[1 - (1 - \gamma)\varepsilon]\right\} \quad (4.14)$$

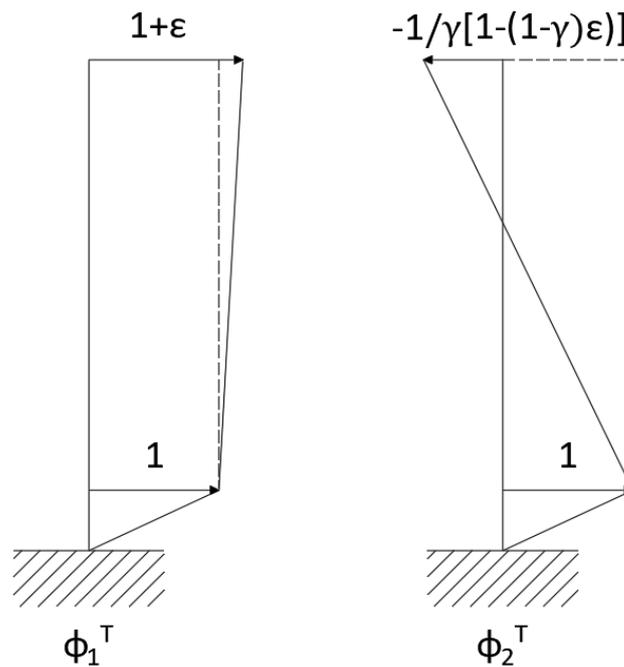


Figura 4-3: rappresentazione dei modi di vibrare del sistema. [Kelly James M., 1999]

Arrivati a questo punto, la risposta del sistema si esprime come combinazione lineare delle forme modali ϕ_1^T e ϕ_2^T attraverso i coefficienti modali dipendenti dal tempo q_1 e q_2

$$v_b = q_1\phi_{11} + q_2\phi_{12} \quad (4.15)$$

$$v_s = q_1\phi_{21} + q_2\phi_{22} \quad (4.16)$$

Attraverso i modi di vibrare è possibile riscrivere le equazioni del moto (4.1 e 4.2) in maniera disaccoppiata

$$\ddot{q}_1 + 2\omega_1\xi_1\dot{q}_1 + \lambda_1\dot{q}_2 + \omega_1^2q_1 = -L_1\ddot{u}_g \quad (4.17)$$

$$\ddot{q}_2 + \lambda_2\dot{q}_1 + 2\omega_2\xi_2\dot{q}_2 + \omega_2^2q_2 = -L_2\ddot{u}_g \quad (4.18)$$

con i coefficienti di partecipazione modale pari a

$$M_i = \phi_i^T M \phi_i \quad (4.19)$$

$$M_i L_i = \phi_i^T M r \quad (4.20)$$

si ottiene dunque

$$M_1 = M(1 - 2\gamma\varepsilon) \quad (4.21)$$

$$M_2 = M \frac{(1-\gamma)[1-2(1-\gamma)\varepsilon]}{\gamma} \quad (4.22)$$

e

$$L_1 = 1 - \gamma\varepsilon \quad (4.23)$$

$$L_2 = \gamma\varepsilon \quad (4.24)$$

I termini $2\omega_1\xi_1$ e $2\omega_2\xi_2$ sono calcolati da

$$M_i 2\omega_i \xi_i = \phi_i^T \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \phi_i \quad (4.25)$$

da cui si ottiene

$$2\omega_1\xi_1 = 2\omega_b\xi_b(1 - 2\gamma\varepsilon) \quad (4.26)$$

e

$$2\omega_2\xi_2 = \frac{1}{1-\gamma} (2\omega_s\xi_s + 2\gamma\omega_b\xi_b) \quad (4.27)$$

portando a

$$\xi_1 = \xi_b \left(1 - \frac{3}{2}\gamma\varepsilon\right) \quad (4.28)$$

$$\xi_2 = \frac{\xi_s + \gamma\xi_b\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{1-\gamma}} \left(1 - \frac{\gamma\varepsilon}{2}\right) \quad (4.29)$$

La coppia di coefficienti λ_1 e λ_2 è calcolata da

$$\lambda_1 M_1 = \phi_1^T \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \phi_1 \quad (4.30)$$

e

$$\lambda_2 M_2 = \phi_2^T \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \phi_1 = \lambda_1 M_1 \quad (4.31)$$

ricavando

$$\lambda_1 M_1 = (1, \varepsilon) \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -a \end{pmatrix} = c_b - \varepsilon a c_s \quad (4.32)$$

con $a = \frac{1}{\gamma} [1 - (1 - \gamma)\varepsilon]$

Infine, utilizzando M_1 e M_2 dalle equazioni (4.21 e 4.22) si può ricavare

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{2\omega_b \xi_b M - \varepsilon \{1/\gamma [1 - (1 - \gamma)\varepsilon]\} 2\omega_s \xi_s m}{M(1 - 2\gamma\varepsilon)} = \\ &= 2\omega_b \xi_b (1 - 2\gamma\varepsilon) - 2\omega_s \xi_s (1 - 2\gamma\varepsilon)\varepsilon = \\ &= 2\omega_b [\xi_b (1 - 2\gamma\varepsilon) - \sqrt{\varepsilon} \xi_s] \end{aligned} \quad (4.33)$$

e

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \frac{2\omega_b \xi_b M - \varepsilon \{1/\gamma [1 - (1 - \gamma)\varepsilon]\} 2\omega_s \xi_s m}{[M(1 - \gamma)]/\gamma [1 - 2(1 - \gamma)\varepsilon]} = \\ &= (2\omega_b \xi_b - \varepsilon 2\omega_s \xi_s) [1 + 2(1 - \gamma)\varepsilon] \frac{\gamma}{1 - \gamma} = \\ &= 2\omega_b \{ \xi_b [1 + 2(1 - \gamma)\varepsilon] - \sqrt{\varepsilon} \xi_s \} \frac{\gamma}{1 - \gamma} \end{aligned} \quad (4.34)$$

In conclusione, si può notare che dalla trattazione appena descritta, il primo modo di vibrare presenta le seguenti caratteristiche:

- il sistema tende ad oscillare con periodo $T_1 \cong T_b$ ovvero il periodo che si ottiene considerando tutta la massa del sistema isolato ($m + m_b$);
- la massa partecipante del primo modo di vibrare corrisponde circa alla massa totale $L_1 \cong 1$;
- la deformazione modale è proporzionale ad ε , il drift interpiano corrisponde ad ε .

Il secondo modo di vibrare invece:

- il sistema tende ad oscillare con periodo $T_2 \cong \sqrt{\frac{1-\gamma}{1+\gamma\varepsilon}}$ minore del periodo del sistema se fosse a base fissa;
- la deformazione è più significativa con un drift interpiano $\delta_1 = -\frac{1}{\gamma} [1 - (1 - \gamma)\varepsilon]$;
- massa partecipante trascurabile e quindi effetti non risultano significativi.

6. James M. Kelly, Earthquake engineering and structural dynamics, University of California, Berkeley, 1999, pp. 3-20.

4.2 Dispositivi di isolamento

I dispositivi di isolamento sono dei dispositivi di appoggio che garantiscono la continuità strutturale tra sottostruttura e sovrastruttura. Essi sono caratterizzati da un'alta deformabilità nel piano orizzontale, ma una notevole rigidezza in direzione verticale e devono garantire una buona capacità dissipativa. Inoltre, devono consentire la possibilità di ricentraggio dell'opera così da ottenere spostamenti nulli a fine sisma. Ne esistono di varie tipologie come gli elastomerici ad alto e basso smorzamento, a scorrimento. Nella seguente figura viene rappresentato quello che è il comportamento meccanico ideale degli isolatori elastomerici e a scorrimento. Il ciclo rappresenta la relazione che c'è tra forza e spostamento in questi dispositivi.

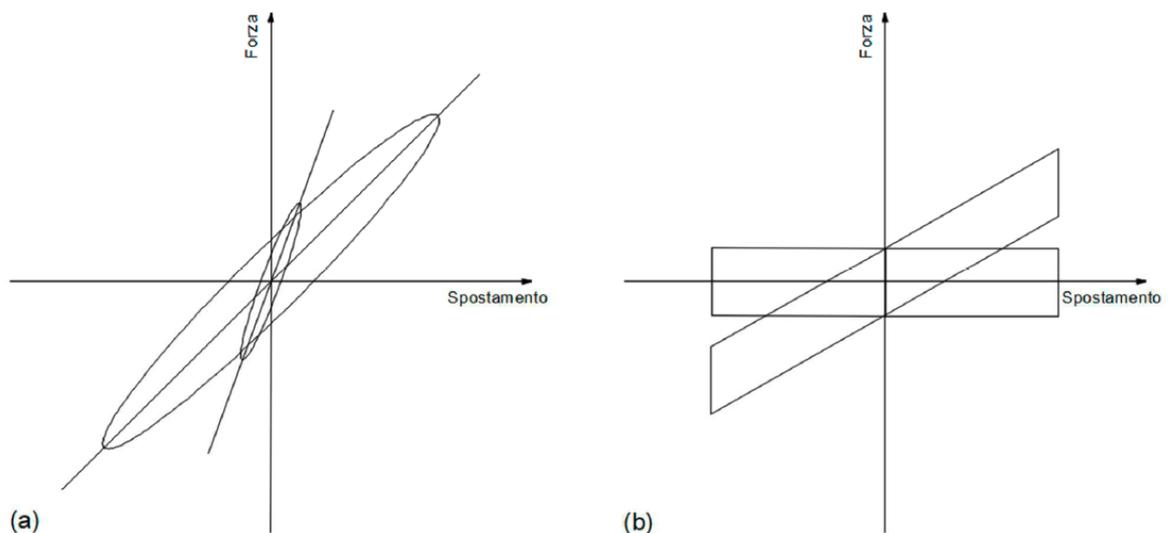


Figura 4-4: diagramma di forza-spostamento degli isolatori elastomerici (a) e a scorrimento (b).

Se questi dispositivi non permettono una sufficiente dissipazione di energia, si installano parallelamente ad altri dispositivi detti ausiliari, i quali sono dei dispositivi di tipo viscoso che permettono una dissipazione maggiore di energia.

Un sistema isolato può essere costituito da soli isolatori elastomerici oppure solo isolatori a scorrimento, che hanno funzioni dissipative e/o ricentranti. In aggiunta, è possibile impiegare simultaneamente isolatori e dispositivi ausiliari per permettere una maggiore funzione di dissipazione, di ricentraggio e di vincolo. Nei successivi due paragrafi si andrà ad approfondire alcuni aspetti riguardanti questi dispositivi.

4.2.1 Isolatori a scorrimento: pendolo scorrevole

In generale, i dispositivi a scorrimento sono multidirezionali. Negli edifici, e quindi in questo caso di studio, sono utilizzati quelli tali da permettere lo stesso comportamento in qualsiasi direzione orizzontale.

Gli isolatori a pendolo scorrevole sono un particolare tipo di isolatori a scorrimento, si differenziano perché presentano superfici scorrevoli sferiche. In base al numero di superfici di scorrimento sono suddivisi in due categorie: singolo e doppio.

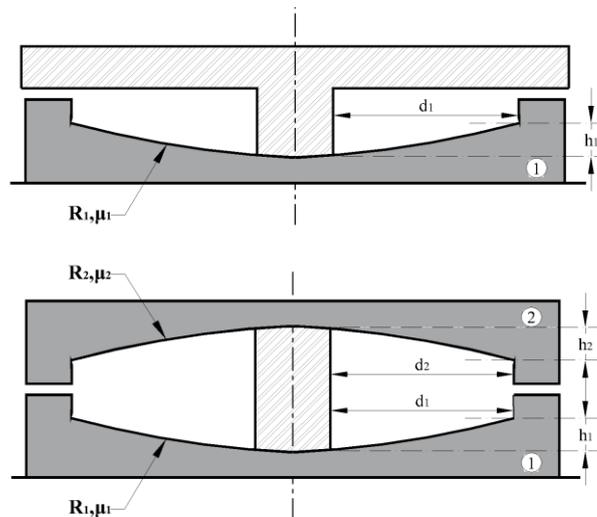


Figura 4-5: dall'alto al basso: singolo e doppio FPS. [Barrera-Vargas C., 2020]

Sono basati sul principio di funzionamento del pendolo, ovvero portano il periodo della struttura a dipendere principalmente dal loro raggio di curvatura. In altre parole, il periodo non dipende più dalla massa del sistema. La dissipazione di energia è fornita dall'attrito incontrato durante il movimento delle superfici di scorrimento e la capacità di ricentraggio è data proprio grazie alla curvatura che queste superfici hanno.

La selezione del materiale è fondamentale per fornire agli isolatori a pendolo un ottimo comportamento in termini di: capacità portante, coefficiente d'attrito con conseguente capacità di dissipazione, stabilità del ciclo isteretico forza-deformazione sia ad un numero elevato di cicli che al variare della temperatura, durabilità e resistenza all'usura. Il materiale utilizzato da FIP MEC nella superficie di scorrimento è il FFM (FIP Friction Material), un Ultra-High Molecular Weight Poly-Ethylene caratterizzato da proprietà eccezionali.

Il coefficiente di attrito dinamico è il più importante parametro che i professionisti usano per progettare questi dispositivi. Esso dipende dalla velocità e dalla pressione esercitata sull'isolatore.

Il modello matematico che meglio rappresenta la funzione dell'isolatore a pendolo scorrevole consiste in una curva bilineare forza-spostamento mostrata in figura.

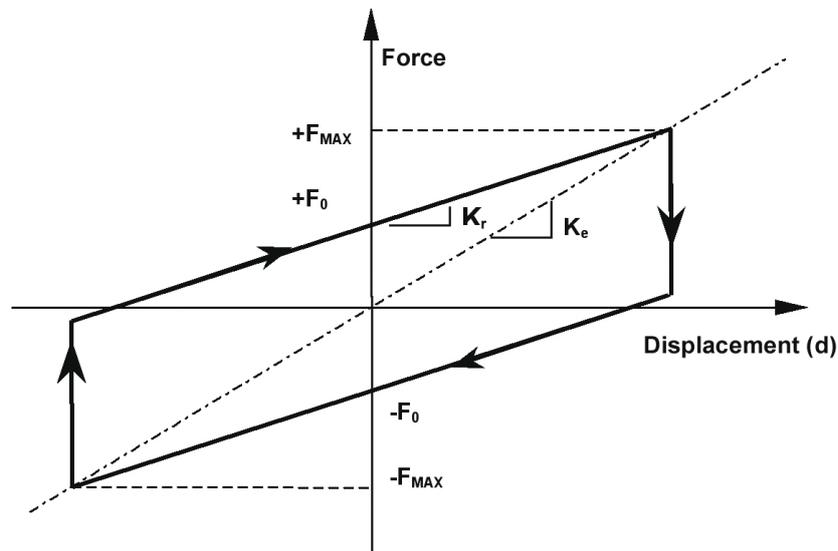


Figura 4-6: ciclo isteretico del pendolo a scorrimento. [FIP MEC]

La forza d'attrito sviluppata dall'isolatore

$$F_0 = \mu \cdot N_{Sd} \quad (4.35)$$

e la massima forza orizzontale

$$F_{max} = F_0 + K_r \cdot d = \mu \cdot N_{Sd} + \frac{N_{Sd}}{R} \cdot d \quad (4.36)$$

con la rigidezza di scivolamento pari a $K_r = \frac{N_{Sd}}{R}$, μ il coefficiente d'attrito dinamico, N_{Sd} il carico verticale applicato al dispositivo, R il raggio di curvatura equivalente e d lo spostamento orizzontale.

Nella fase iniziale di pre-scivolamento la forza di attrito vale

$$F_0 = K_h \cdot d \quad (4.37)$$

dove K_h è una rigidezza iniziale di avvio elevata, tipicamente anche 50/100 volte superiore a K_r .

Come precedentemente anticipato il periodo fondamentale non dipende più dalla massa dell'edificio ma assume il valore equivalente a quello del pendolo semplice,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (4.38)$$

se associato alla rigidezza K_r . Diversamente, il periodo fondamentale associato alla K_e può essere stimato come

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g\left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d}\right)}} \quad (4.39)$$

4.2.2 Dissipatori viscosi

I dispositivi ausiliari viscosi sono dei dispositivi che hanno la funzione di dissipazione dell'energia, di ricentraggio o di vincolo in una struttura, oppure simultaneamente tutte tre le caratteristiche. Sono formati da un cilindro/pistone in cui la laminazione di un fluido siliconico attraverso un idoneo circuito idraulico permette la dissipazione di energia. Il tipico legame forza-velocità che ne deriva è non lineare

$$F = Cv^\alpha \quad (4.40)$$

dove F è la forza, C è la costante di smorzamento, v è la velocità e α è un coefficiente che può variare tra 0 e 1. Per $\alpha = 1$ si dice che lo smorzamento viscoso è lineare, ovvero la forza di smorzamento è proporzionale alla velocità, per $\alpha < 1$ lo smorzamento viscoso è non lineare e si ha una minimizzazione degli spostamenti con alte velocità. Tipicamente il valore di α è attorno a 0,15.

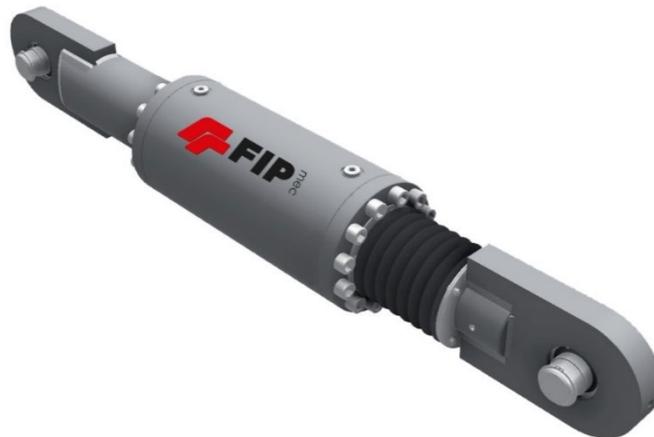


Figura 4-7: esempio di dissipatore viscoso. [FIP MEC]

Diversamente, i dissipatori viscosi ricentranti sono sempre dispositivi cilindro/pistone, ma caratterizzati da un legame costitutivo in cui la forza di reazione F dipende sia dalla velocità v che dallo spostamento d , secondo la legge

$$F = F_0 + Kd + Cv^\alpha \quad (4.41)$$

dove F_0 è l'eventuale forza di precarico, K è la rigidità, C è la costante di smorzamento e α un coefficiente come visto in precedenza. La forza di precarico può essere utile per evitare spostamenti per azioni verticali di servizio.

Nel seguente grafico è rappresentata la relazione forza-velocità per tre tipologie di smorzatori viscosi. Si può notare come gli smorzatori non lineari siano più efficaci nel minimizzare gli scuotimenti ad alte velocità. Per velocità relative piccole, gli smorzatori con $\alpha < 1$ possono generare una grande forza di smorzamento rispetto agli altri modelli.

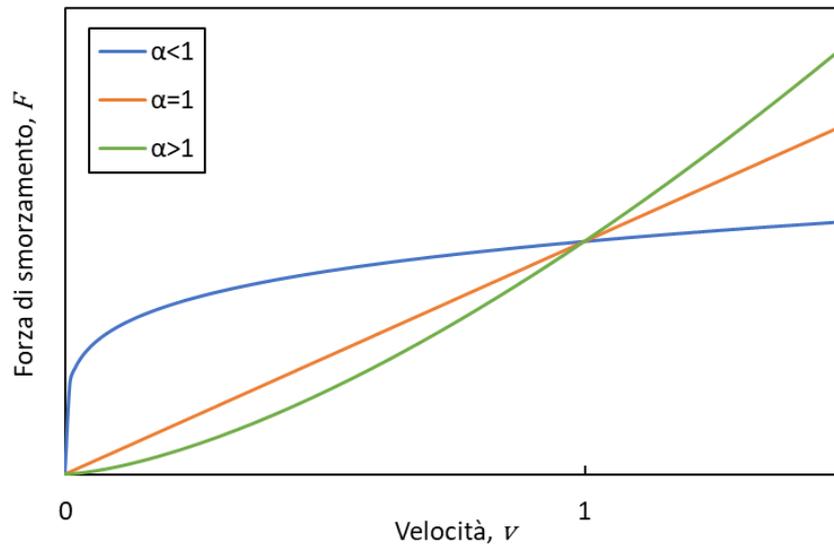


Figura 4-8: relazione forza-velocità dei dissipatori viscosi.

Per quanto riguarda il ciclo di isteresi a comportamento viscoso, la sua rappresentazione grafica corrisponde ad un'ellisse. Per i dissipatori viscosi ricentranti invece, la sua rappresentazione diventa un'ellisse ruotata e il suo comportamento è visco-elastico.



Figura 4-9: ciclo di isteresi dei dissipatori viscosi: puramente viscoso e visco-elastico.

5 CASO STUDIO: OSPEDALE STATALE “5 GENNAIO” DI ADANA

5.1 Introduzione

Nel presente caso studio si andrà ad eseguire un’analisi via via più approfondita del comportamento avuto dall’ospedale 5 January State Hospital della città di Adana soggetto ai terremoti avventi in Turchia il 06/02/2023. Successivamente si andrà a progettare un miglioramento del sistema di isolamento accoppiando dei dissipatori viscosi ipotizzando di applicare all’ospedale la più forte scossa vicino l’epicentro registrata di questi sismi.

Il presente edificio è formato da un telaio in calcestruzzo armato come struttura portante, si eleva da terra per un totale di 22.5 metri suddivisi in 5 piani, la superficie di piano è di circa 6500 mq, per un totale di circa 39000 mq calpestabili. Al di sotto di esso sono presenti 251 isolatori sismici a doppia superficie curva. Le caratteristiche di questi isolatori sono fondamentali per il comportamento dell’intera opera sotto azioni orizzontali elevate come il sisma. Gli isolatori prevedono uno spostamento massimo di ± 235 mm, un raggio di curvatura equivalente pari a 5 m e il coefficiente di attrito medio del 4,2% in corrispondenza del carico quasi permanente, situazione considerata da normativa quando si applica il sisma alla struttura. Nell’ospedale sono state installate tre tipologie di isolatori che si differenziano solamente per la capacità di carico verticale.





Figura 5-1: due foto dall'alto dell'ospedale e foto del montaggio di un isolatore.

Il primo passo è quello di confrontare i diversi spettri, in accelerazione e in spostamento, dei vari sismi avvenuti nel sito, con quello di progetto utilizzato in passato al momento della progettazione. Così facendo si può già avere un'idea di quelli che possono essere gli spostamenti e le accelerazioni attesi se si ricade in campo lineare.

Successivamente, si è partiti da un modello semplificato a 1 grado di libertà nel quale viene modellato un elemento link, che rappresenta il sistema di isolamento, e una massa totale in cima ad esso che schematizza la sovrastruttura. Con questo semplice modello si può già avere una stima del primo modo di vibrare dell'edificio, degli spostamenti massimi e del comportamento non lineare del sistema di isolamento totale.

L'ultimo step consiste nel passare dal modello semplificato ad 1 gdl al modello completo dell'intero edificio. Così facendo si riescono a raffinare i risultati e poter tener conto di effetti che il modello semplificato non può considerare, come ad esempio l'eccentricità in altezza.

5.2 Confronto spettri in accelerazione e in spostamento

Il presente capitolo si propone di condurre un confronto tra gli spettri di risposta in accelerazione e spostamento previsti da progetto e quelli effettivamente registrati presso diverse stazioni di monitoraggio nei pressi dell'ospedale in esame. Quest'analisi costituirà un passo fondamentale nel valutare l'intensità del sisma del febbraio 2023 in confronto a quello atteso.

Le tre registrazioni provengono dalla stazione numero 0118 situata nei pressi dell'ospedale statale "5 gennaio" di Adana e fanno riferimento a tre diversi sismi registrati con magnitudo differenti.

Per tutti i casi si riportano in un grafico lo spettro in accelerazione di progetto, lo spettro in direzione Est-Ovest registrato e in direzione Nord-Sud registrato, con smorzamento al 5%. Per quanto riguarda lo spettro di progetto si distingue in DBE (*Design Basis Earthquake*) e MCE (*Maximun Credible Earthquake*), ovvero con tempi di ritorno rispettivamente di 475 anni e 2475 anni. Allo stesso modo si procede anche per gli spettri in spostamento.

5.2.1 Stazione 0118: magnitudo 7.8

La stazione 0118 è la stazione che ha registrato le 3 maggiori scosse sismiche ed è la seconda geograficamente più vicina, come visibile nella seguente figura.

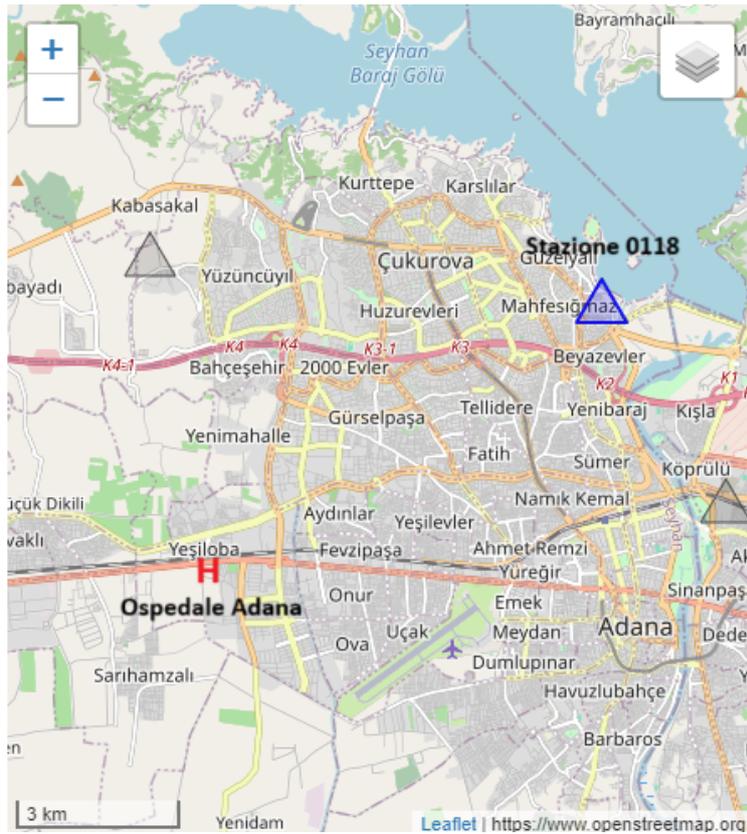
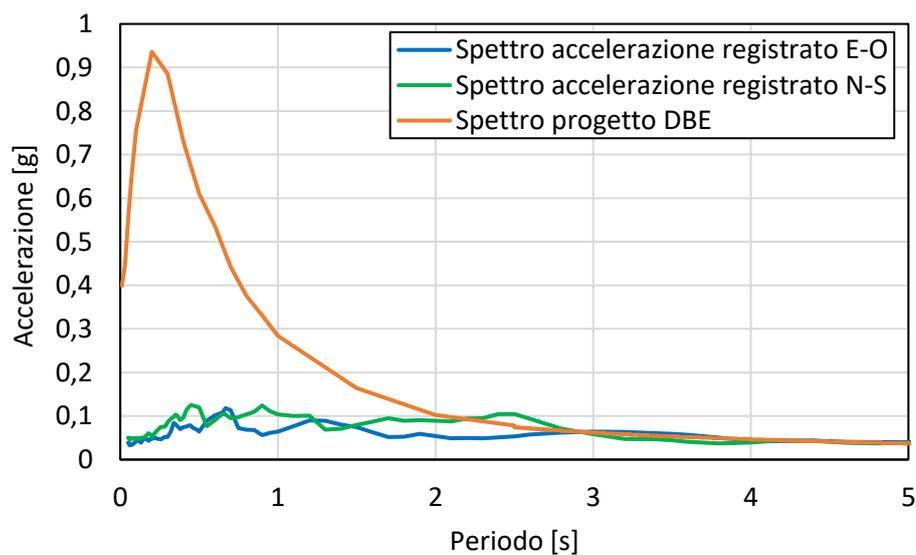
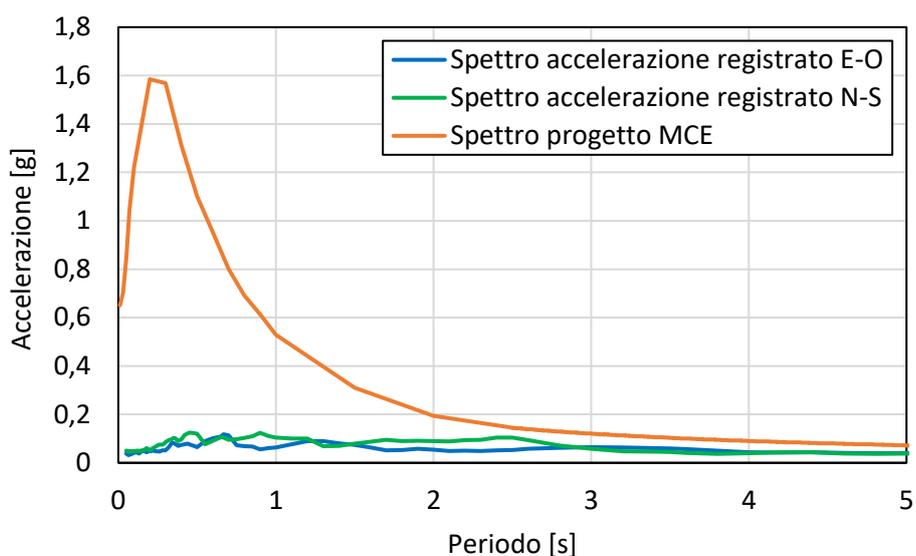


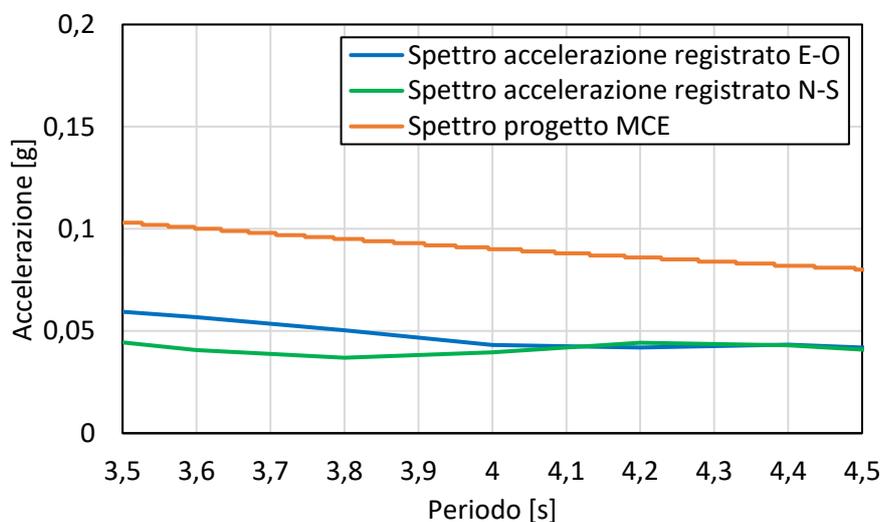
Figura 5-2: inquadramento geografico stazione 0118.

Questa prima registrazione fa riferimento alla scossa più forte, più precisamente il giorno 06/02/2023 alle ore 04:17. Di seguito vengono riportati i confronti degli spettri in accelerazione e in spostamento:

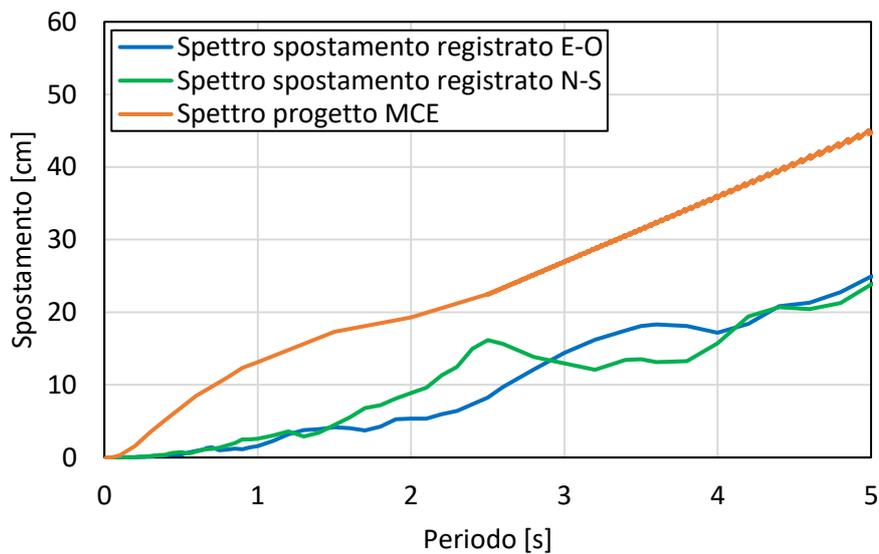
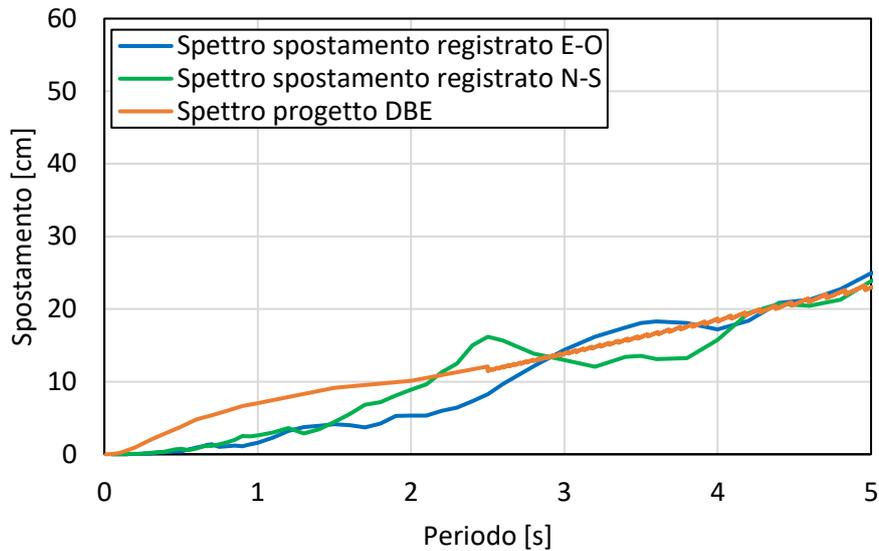




Dai due grafici risalta immediatamente la differenza di picco tra gli spettri di progetto e gli spettri dei sismi registrati in corrispondenza di bassi periodi, da 0 a 2 secondi circa. Questo si può spiegare in quanto la stazione 0118 è posta vicino all'ospedale ma, ben distante dall'epicentro del sisma, circa 200 km in linea d'aria. D'altro canto, la struttura in esame è caratterizzata da un periodo fondamentale di oscillazione più elevato grazie al sistema di isolamento sismico, così da portare l'attenzione alle accelerazioni attorno a quel periodo. Per quanto riguarda il primo grafico in DBE si può considerare che le accelerazioni attese e misurate siano sostanzialmente le stesse. Diversamente, nel caso in MCE si può notare come le accelerazioni di progetto siano notevolmente superiori rispetto a quelle registrate. Di seguito uno "zoom" nell'intorno dei 4 secondi mostra come la differenza tra le accelerazioni registrate e di progetto sia di circa il doppio:



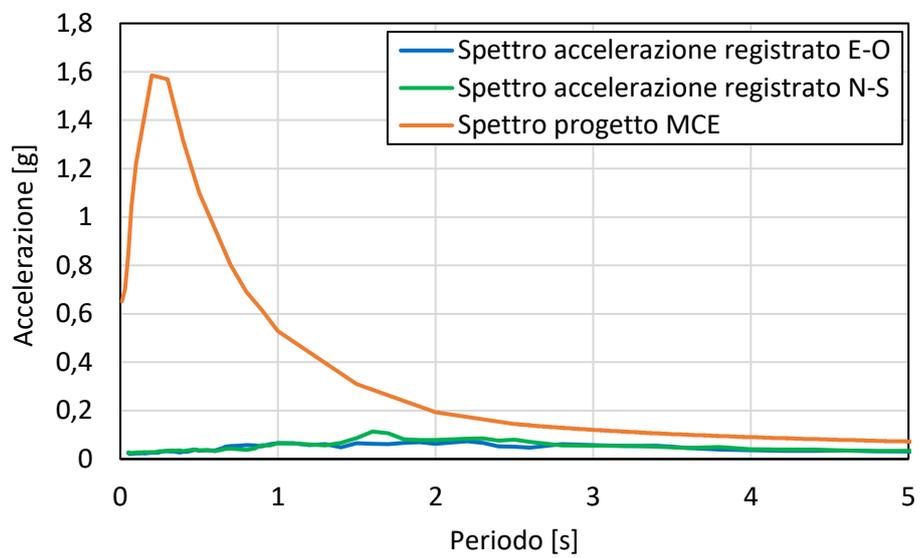
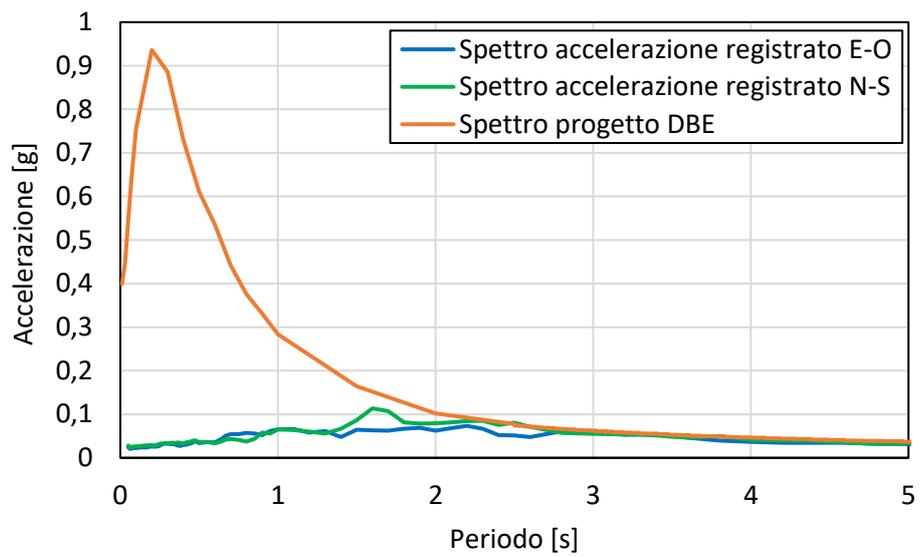
Di seguito vengono riportati i confronti degli spettri in spostamento:



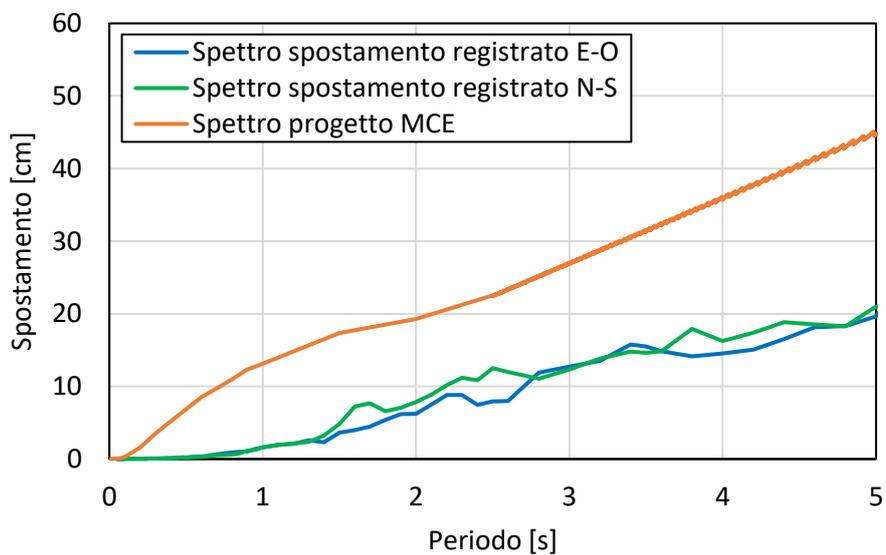
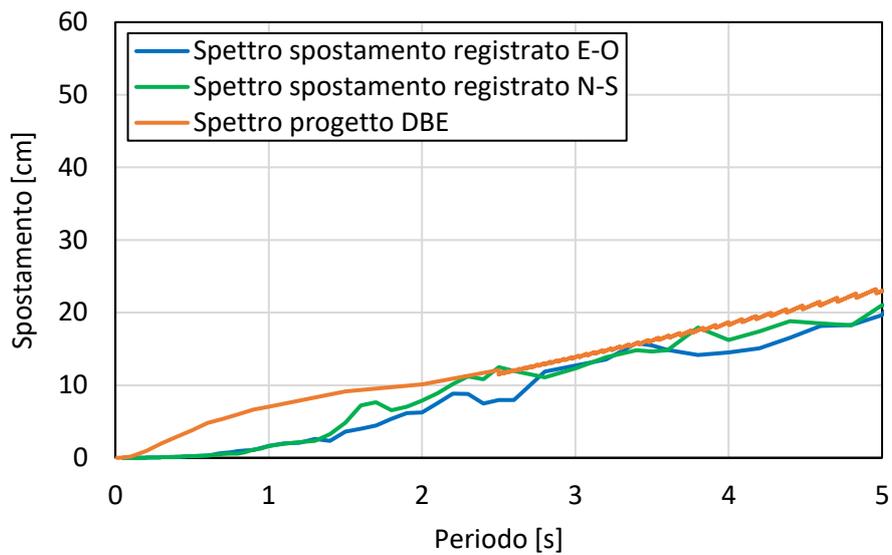
Dai due grafici si può notare che il sisma registrato prevede una domanda di spostamento, attorno ai 4 secondi, che si aggira tra i 17 e 22 cm e simile allo spettro in spostamento DBE. Mentre, lo spettro in MCE risulta sensibilmente maggiore.

5.2.2 Stazione 0118: magnitudo 7.5

La seconda registrazione, invece, fa riferimento al secondo sisma avvenuto qualche ora successiva al primo, più precisamente il giorno 06/02/2023 alle ore 13:24. Di seguito vengono riportati i confronti degli spettri in accelerazione e in spostamento:



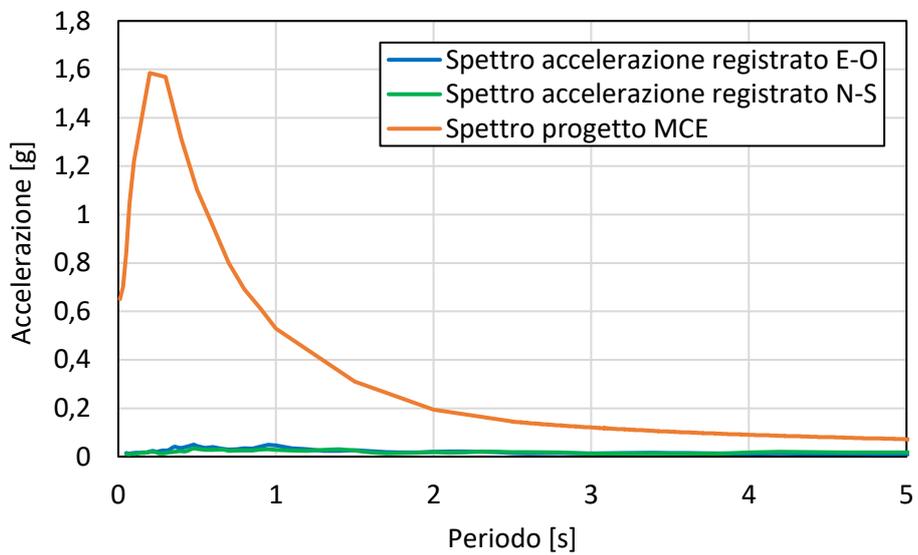
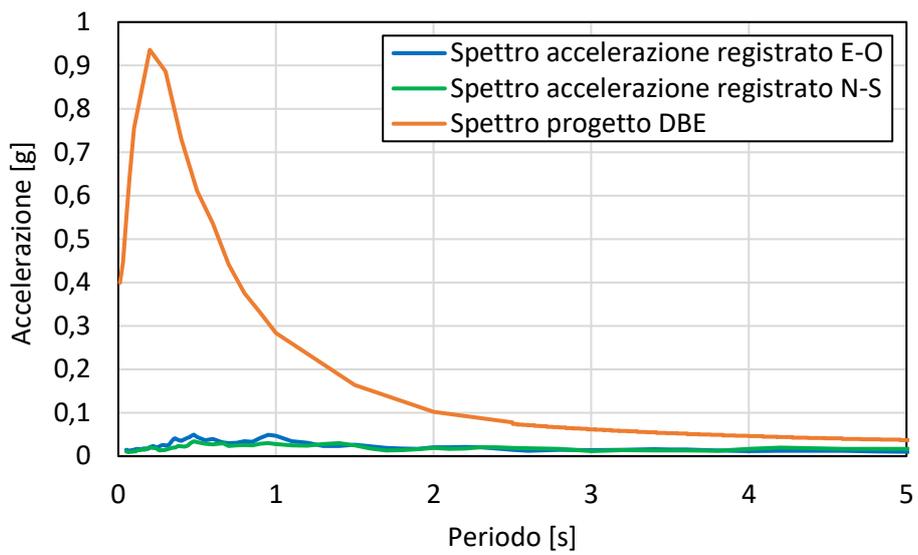
Come nel caso precedente, si possono notare enormi differenze in corrispondenza di periodi bassi, mentre una quasi perfetta sovrapposizione per il caso DBE attorno ai 4 secondi. Diverso, invece, il caso MCE dove si nota dei valori maggiori di progetto rispetto a quelli direttamente registrati.



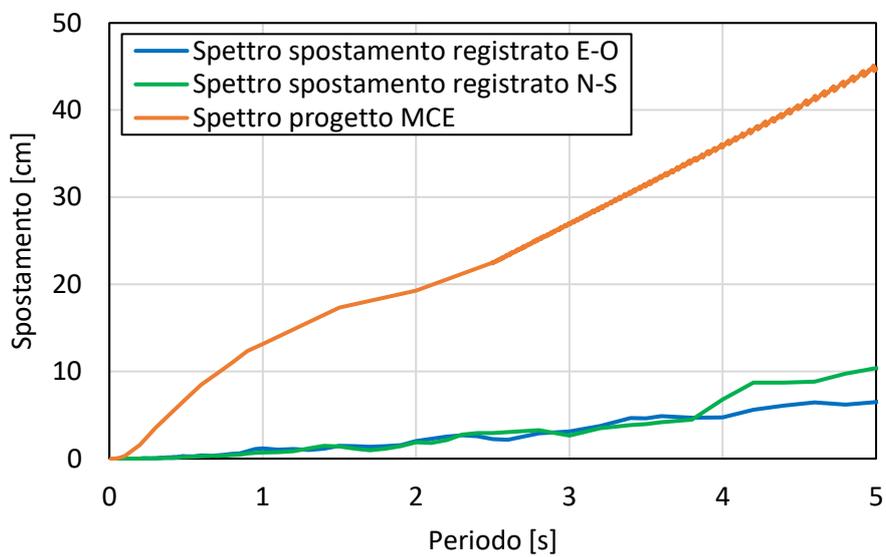
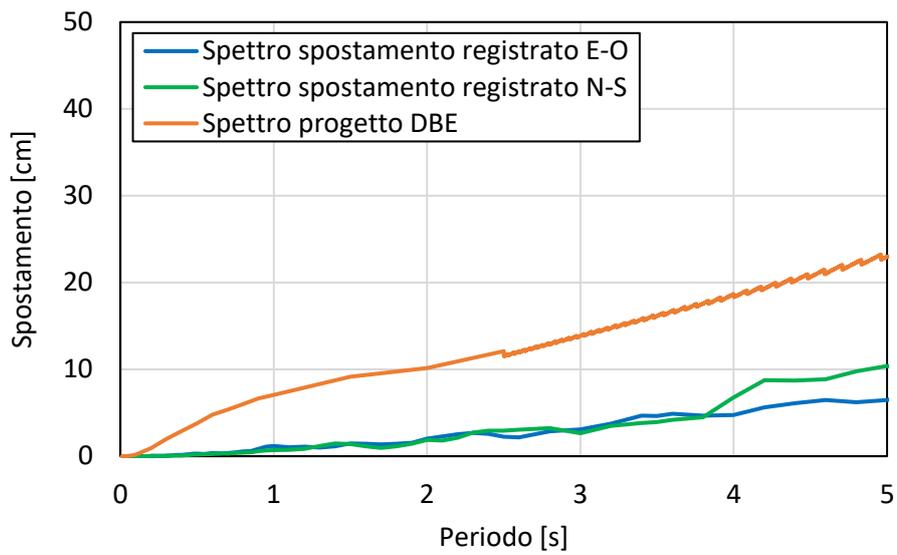
Analogo discorso anche per gli spettri in spostamento che presentano valori confrontabili nel caso in DBE e con notevole differenza invece in MCE.

5.2.3 Stazione 0118: magnitudo 6.6

La terza registrazione fa riferimento ad una scossa di assestamento del primo sisma avvenuta qualche minuto dopo, alle ore 04:28 del 06/02/2023, con però una magnitudo inferiore. Di seguito vengono riportati i confronti degli spettri in accelerazione e in spostamento:



In questo caso non si può fare un discorso analogo ai due casi precedenti. Il sisma, presentando una magnitudo inferiore, risulta, sia nel caso DBE che in quello MCE, minore di quello di progetto.



Di conseguenza, si conferma quanto detto per gli spettri in accelerazione anche per gli spettri in spostamento.

5.3 Modello semplificato a 1 gdl

In via semplificativa, è stato creato un modello ad un grado di libertà in direzione X e in direzione Y per andare a stimare in maniera qualitativa quale può essere stata la risposta dell'edificio ai vari sismi applicati. Quest'analisi è stata svolta con il software di calcolo SAP2000, nel quale è implementato un elemento apposito per la modellazione degli isolatori a doppia superficie curva.

5.3.1 Descrizione del modello

Il modello, molto semplice e semplificato, è composto da due nodi collegati da un link. Il nodo di base (1) è incastrato e rappresenta la fondazione sotto gli isolatori, il nodo superiore (2) a cui è stata applicata la massa dell'intero edificio e, infine, il link che schematizza il sistema di isolamento completo. La massa dell'edificio è: $\frac{698877 \text{ kN}}{9.81 \text{ m/s}^2} = 71270 \text{ Ton}$.

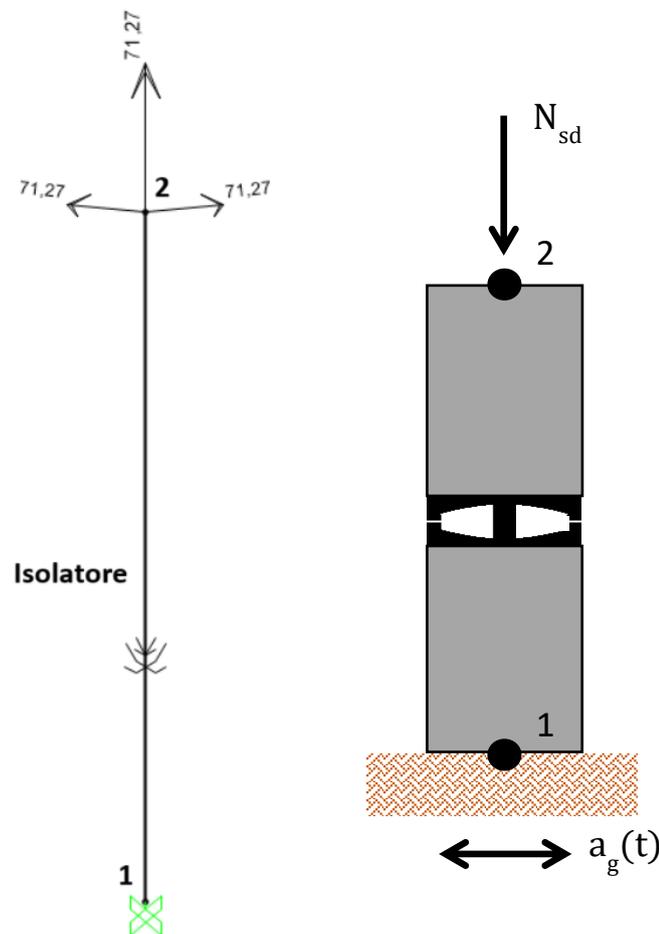


Figura 5-3: modello 1 gdl.

5.3.1.1 Modellazione degli isolatori

Per rappresentare gli isolatori a scorrimento a superficie curva, in SAP2000, è implementato un link denominato “*Friction Isolator*”, il quale descrive la curva forza-spostamento tipica di questi isolatori. Questo elemento divide il comportamento assiale, quindi verticale, da quello di taglio, orizzontale nel piano. Per quanto riguarda il comportamento assiale è sempre non lineare e la forza viene descritta dalla seguente formula [7]:

$$N = \begin{cases} k_c(u_v + a_c) & \text{se } (u_v + a_c) < 0 \\ k_t(u_v - a_t) & \text{se } (u_v - a_t) > 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (5.1)$$

dove k_c è la rigidità a compressione, k_t la rigidità a trazione, a_c l’apertura del gap in compressione e a_t l’apertura del gap in trazione. Ciascuno dei quattro valori può essere zero o positivo. Nel caso in esame è stato trascurato l’apertura del gap e gli elementi sono tutti sempre compressi, quindi, la formulazione utilizzata è riportata al caso lineare così descritta:

$$N = k_c u_v \quad (5.2)$$

con u_v lo spostamento verticale [8].

Diverso è invece il comportamento a taglio. I dispositivi a doppia superficie curva, ovvero i doppi pendoli, presentano un comportamento analogo in tutte le direzioni, quindi, le formulazioni si semplificano in un’unica direzione, quella radiale. La forza di taglio è data da:

$$F(u, \dot{u}) = F_f + F_p \quad (5.3)$$

dove il primo termine vale:

$$F_p = \frac{N}{R} u \quad (5.4)$$

N è il carico verticale visto precedentemente, R del doppio pendolo e u lo spostamento orizzontale. Il secondo termine è così definito:

$$F_f = N\mu(\dot{u})z(u) \quad (5.5)$$

$\mu(\dot{u})$ è il coefficiente di attrito e $z(u)$ una variabile isteretica adimensionale, che si calcolano come di seguito [8].

$$\mu(\dot{u}) = \mu_{fast} - (\mu_{fast} - \mu_{slow})e^{-r|\dot{u}|} \quad (5.6)$$

dove μ_{slow} è il coefficiente di attrito statico, μ_{fast} il coefficiente di attrito dinamico e r è una velocità inversa effettiva, assegnata 50 s/m in questo caso. z si ricava dalla seguente equazione differenziale:

$$\dot{z} = A\dot{u} - z^2(\gamma \text{sgn}(\dot{u}z) + \beta)\dot{u} \quad (5.7)$$

con A, β, γ sono le quantità adimensionali che controllano la forma del ciclo isteretico [7]. Considerando $A = 1$ e $\beta = \gamma = 0.5$ la formula si riduce a

$$\dot{z} = \frac{k}{N\mu} \begin{cases} \dot{u}(1 - z^2) & \text{se } \dot{u}z > 0 \\ \dot{u} & \text{se } \dot{u}z < 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

dove k rigidità elastica del dispositivo in assenza di scorrimento e $\max\{|z(u)|\} = 1$ [8].

Per poter risolvere le relazioni precedentemente illustrate, sono stati inseriti nel programma i valori necessari, caratteristici dell'ospedale in esame. Si conosce il carico totale dell'edificio $N_{sd} = 698877 \text{ kN}$, il raggio equivalente degli isolatori installati $R = 5 \text{ m}$, il coefficiente di attrito medio in corrispondenza del carico quasi permanente $\mu_{fast} = 4,2 \%$, e lo spostamento massimo consentito dagli isolatori $s_{max} = \pm 235 \text{ mm}$. Quest'ultimo parametro non viene inserito ma è utile per capire se l'edificio durante il sisma è rimasto all'interno degli spostamenti consentiti e quindi verificarne la corretta progettazione o meno. La seguente figura illustra come inserire i valori sopra citati.

Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	139,7754
Effective Damping	0,
Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0,
Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	29352,834
Friction Coefficient, Slow	0,0294
Friction Coefficient, Fast	0,042
Rate Parameter	0,05
Net Pendulum Radius	5000,

Figura 5-4: proprietà del link friction isolator, in kN e mm.

Come valore per l'effective stiffness è stato inserito l'equivalente della rigidezza del secondo ramo della bilineare, quindi $N_{sd}/R = 137,7 \text{ kN/mm}$. Questo è stato fatto come semplificazione, in quanto, la rigidezza effettiva sarebbe la rigidezza del segmento che collega i due estremi del ciclo isteretico. La semplificazione è dovuta dal fatto che, per ricercare la rigidezza corretta, sarebbe necessario fare diverse analisi e iterativamente cambiare la rigidezza fino all'ottenimento del risultato corretto. Ciò non è stato fatto per due motivi: il primo è perché ciò che governa il comportamento del sistema isolato è la parte non lineare, il secondo perché comunque i valori non differiscono di molto quindi si commette un errore considerato piccolo ed influente ai fini dell'obiettivo cercato. Questo errore si traduce nel ritrovare il periodo del primo modo maggiore rispetto a quello reale. Per quanto riguarda, invece, la rigidezza usata nel caso non lineare si inserisce il valore di rigidezza del primo ramo, ovvero $N_{sd}\mu_{fast} = 29353 \text{ kN/mm}$. I restanti valori sono già noti ed è sufficiente inserire il corrispondente numero nelle corrette unità di misura. Così facendo, il programma attribuisce la bilineare forza-spostamento all'elemento link associato il quale, ora, ha il comportamento del sistema di isolamento come visto nel capitolo §4.2.1.

-
7. Baolun Wang et al 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 560 012097;
 8. N. Vaiana, S. Sessa, M. Paradiso and L. Rosati, Accurate and efficient modeling of the hysteretic behavior of sliding bearings, Department of Structure for Engineering and Architecture, University of Naples Federico II, pp. 5294-5296.

5.3.1.2 Inserimento accelerogrammi

Una volta definito il modello, si passa all'inserimento degli accelerogrammi. Di seguito un esempio.

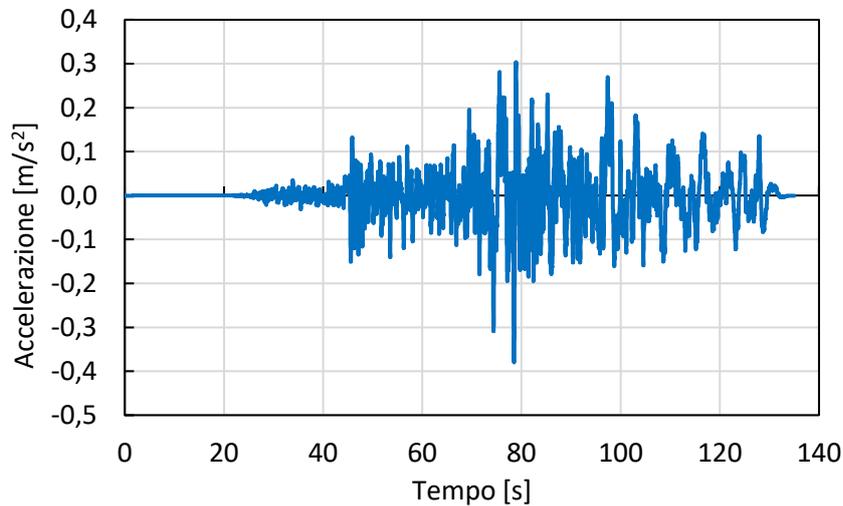


Figura 5-5: accelerogramma stazione 0118 magnitudo 7.8, direzione Est-Ovest.

Tutti gli accelerogrammi sono stati ricavati dalle varie stazioni citate, per ogni sisma sono presenti l'accelerogramma in direzione Est-Ovest e quello Nord-Sud. Sono stati inseriti nel programma per poi essere applicati nelle varie analisi dinamiche.

5.3.1.3 Definizione delle analisi

L'ultimo passo per la realizzazione del modello è quello di definire il tipo di analisi da svolgere.

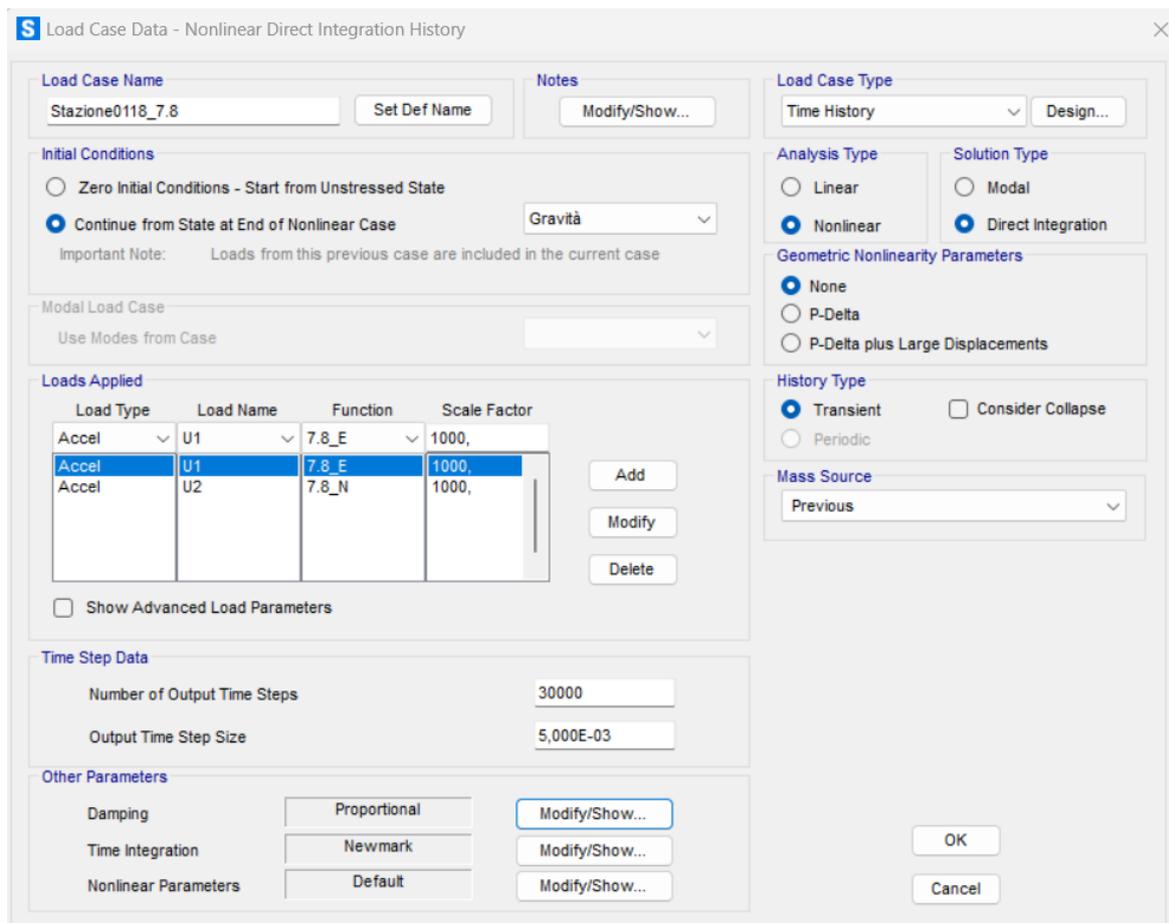


Figura 5-6: esempio di analisi al passo, caso stazione 0118, magnitudo 7.8.

In questa finestra si va a selezionare l'analisi time history, quindi al passo, la non linearità del materiale, data dal sistema di isolamento, e il carico dinamico sotto forma di accelerogramma, in entrambe le direzioni. In Sap2000 c'è la possibilità di poter scegliere se condurre un'analisi ad integrazione diretta, la formulazione vista al capitolo §3.1, oppure l'analisi FNA vista al §3.2. Per questo semplice caso si è scelta l'analisi ad integrazione diretta in quanto l'onere computazionale non è così elevato da dover richiedere la FNA. L'intervallo temporale con cui condurre l'analisi è stato scelto come la metà dell'intervallo dell'accelerogramma, ovvero 0,005 secondi per un numero di step tali da arrivare a fine sisma. Il punto di partenza da cui condurre l'analisi deve essere uno stato in cui vi sia già applicata la forza di gravità all'elemento. Per far ciò è necessario svolgere precedentemente un'analisi statica non lineare in cui viene applicato il solo peso proprio dell'edificio. Il metodo utilizzato per risolvere le equazioni del moto è quello di Newmark e la matrice di smorzamento viene inserita come proporzionale alle matrici di massa e rigidità (metodo

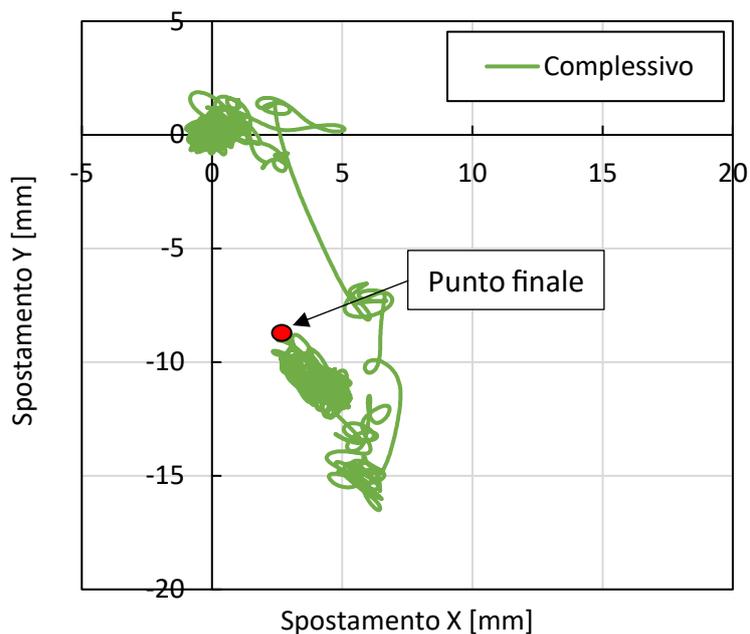
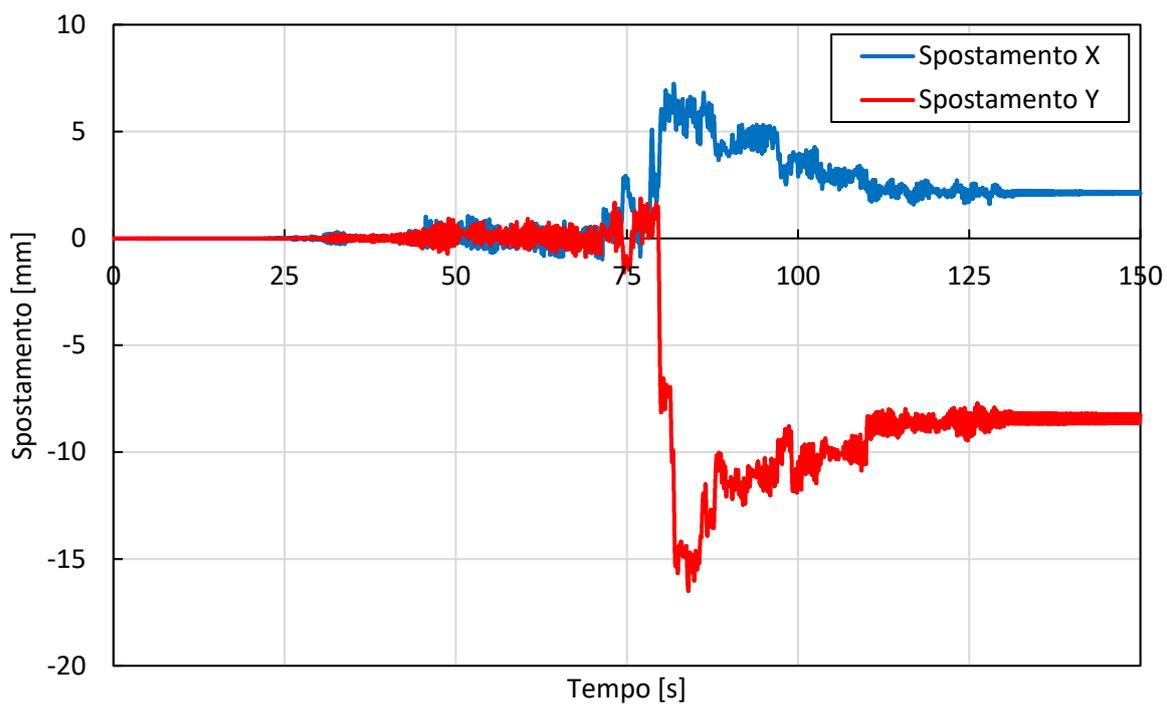
di Rayleigh). È stato inserito un valore tale che lo smorzamento sia attorno all'1%, valore considerato dallo smorzamento della sovrastruttura.

5.3.2 Risultati ottenuti

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dal modello semplificato in termini di spostamenti e grafici forza-spostamento dell'intero sistema di isolamento schematizzato in un solo elemento link.

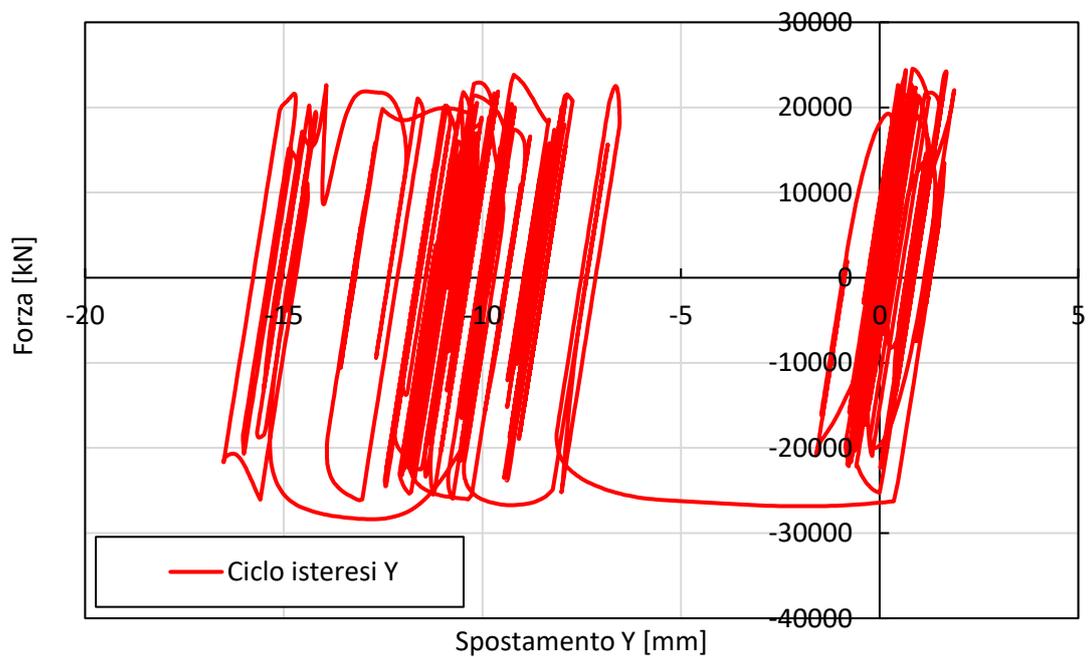
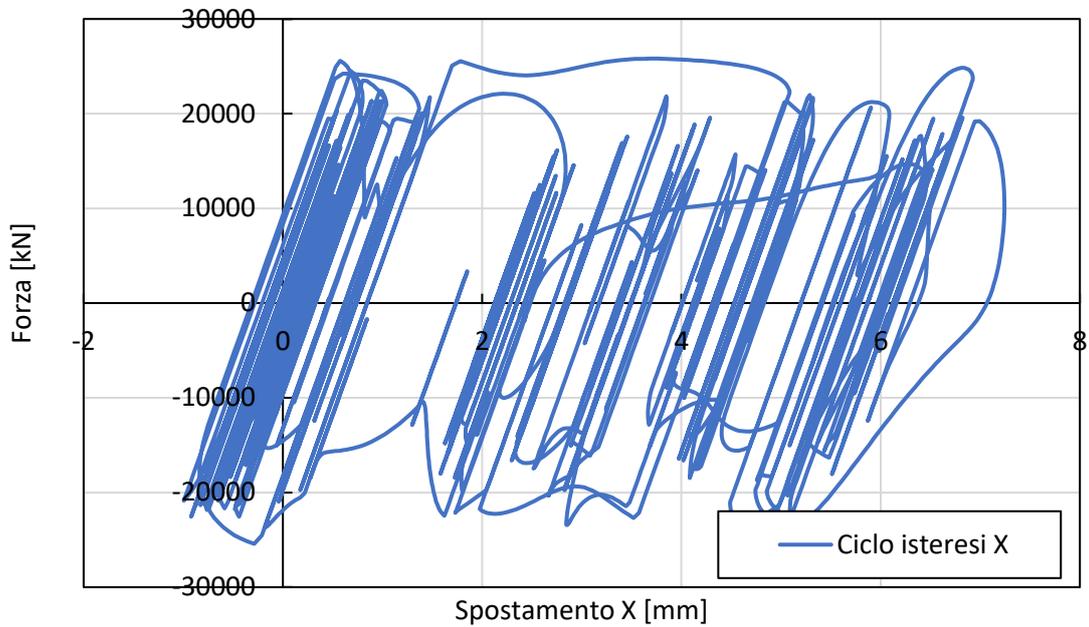
5.3.2.1 Magnitudo 7.8

Nel seguente grafico si riportano gli spostamenti nelle direzioni X e Y del nodo in sommità dell'isolatore. Si può notare come, per la poca intensità del sisma ricevuto, il sistema completo presenta un picco massimo di spostamento pari a 16 mm in direzione Y e 7 mm in direzione X, ovvero uno spostamento praticamente nullo. Questo lo si può spiegare dal fatto che la distanza dell'ospedale rispetto all'epicentro del sisma è molta, circa 200 km. Un secondo fattore che fa sì che gli spostamenti siano inferiori a quelli attesi dallo spettro in spostamento è che la non linearità del sistema di isolamento porta a spostamenti minori in quanto quota parte di energia viene dissipata dal ciclo isteretico. Nel caso di rigidità lineare equivalente del sistema di isolamento si avrebbero spostamenti maggiori confrontabili con gli spostamenti visti nello spettro al §5.2.1. infine, si può notare che alla fine del sisma rimane uno spostamento residuo contenuto, attorno ai 2 mm in X e ai 8 mm lungo Y. Nel secondo grafico è rappresentato lo spostamento complessivo nello spazio come fosse visto dall'alto dello stesso punto precedentemente descritto.



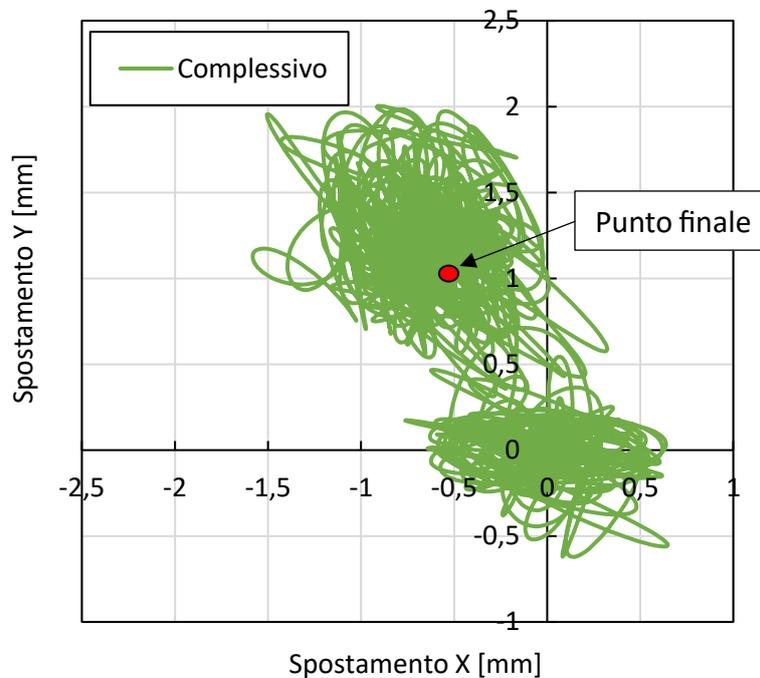
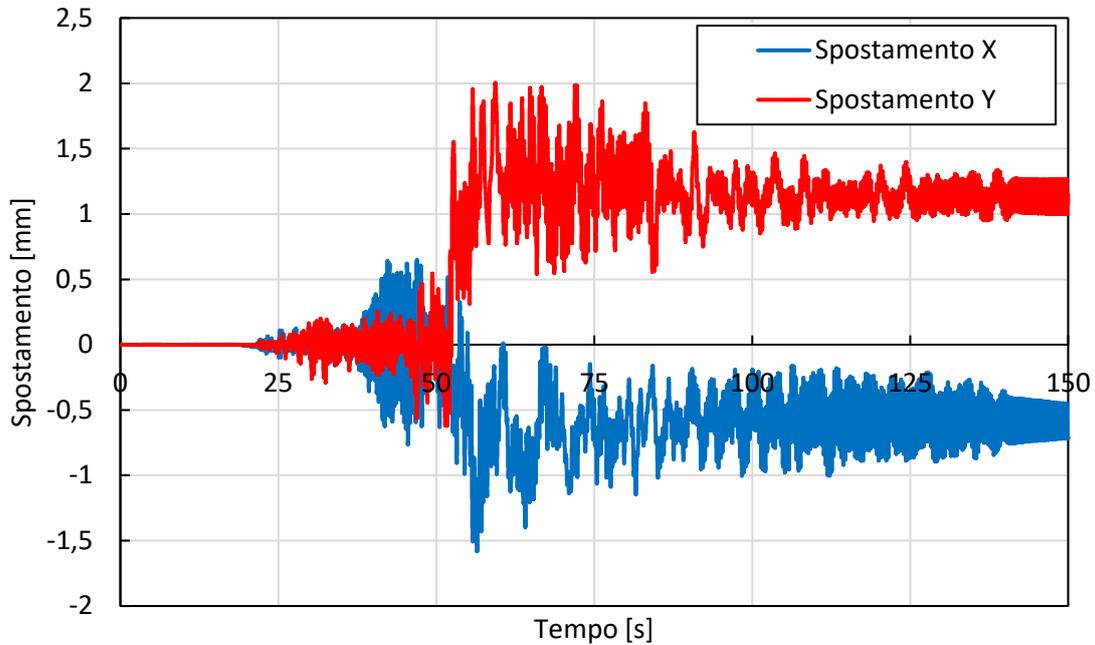
I due grafici successivi, invece, rappresentano il ciclo di isteresi compiuto dal sistema di isolamento, rispettivamente nella direzione X e Y. Il grafico cosiddetto forza-spostamento mostra per ogni istante temporale lo spostamento del sistema di isolamento e il taglio alla base che il sistema porta in fondazione. La forma di questo grafico dipende da diversi fattori,

ovvero lo sforzo normale agente sull'elemento, il coefficiente di attrito e il raggio di curvatura dell'isolatore, come descritto nelle formule al capitolo §4.2.1. L'area di questo grafico rappresenta l'energia dissipata dal sistema di isolamento.

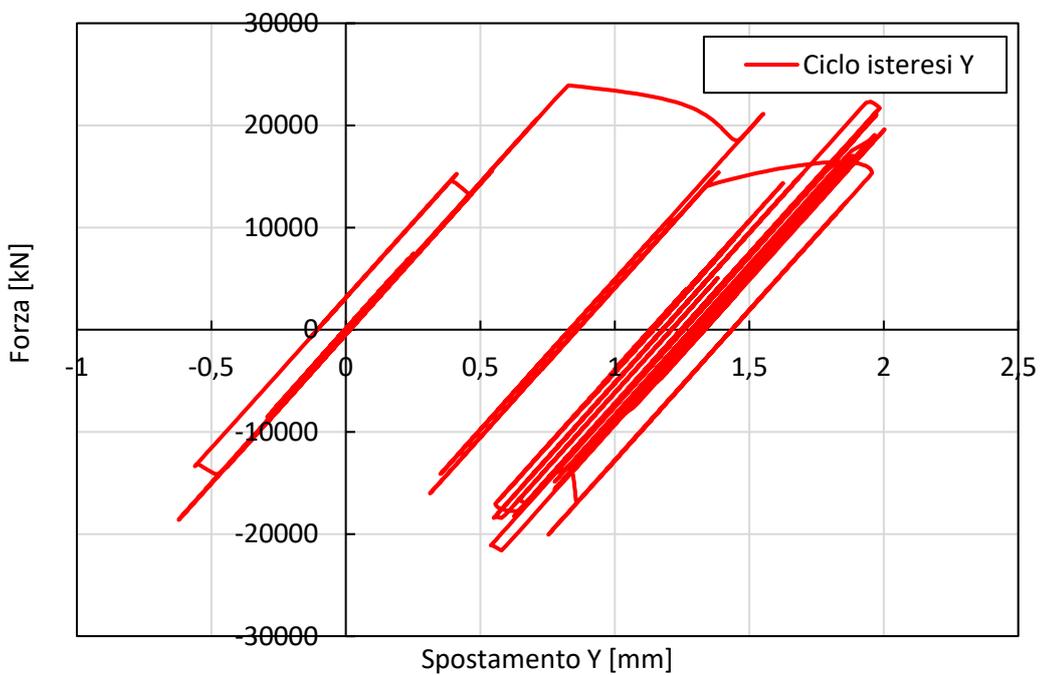
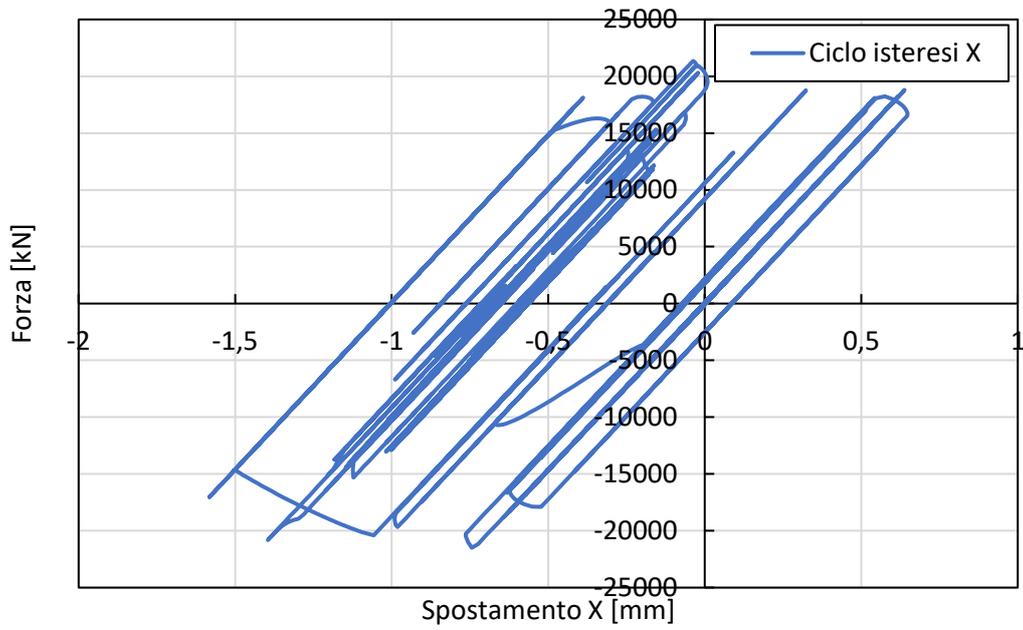


5.3.2.2 Magnitudo 7.5

Per il secondo sisma il discorso è molto simile al caso precedente, ma ancora più ridotto perché l'epicentro è a distanza maggiore dall'ospedale rispetto a prima e l'intensità del sisma è minore. Gli spostamenti massimi qui sono sul 1,5 mm lungo X e 2 mm lungo Y.

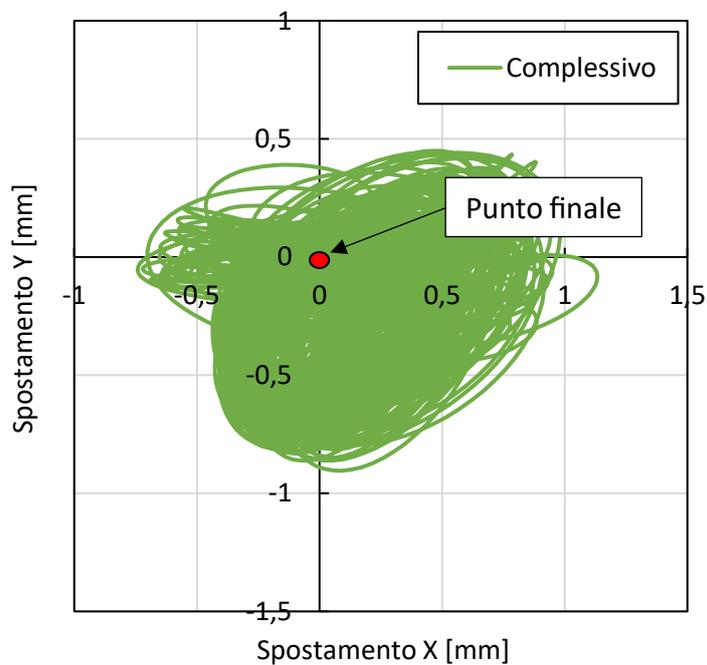
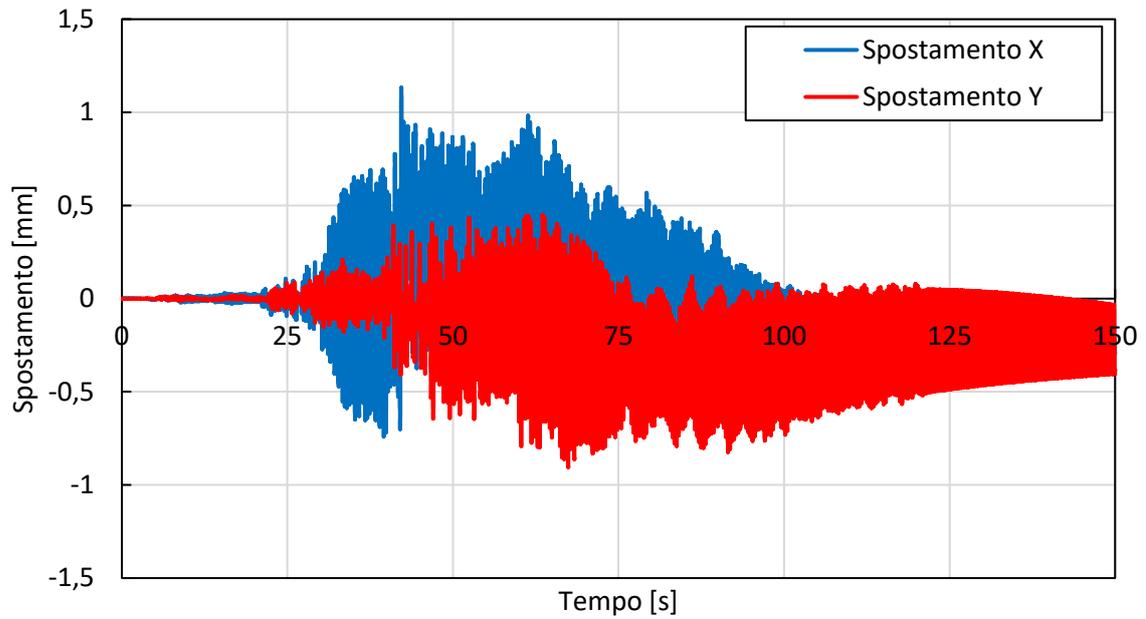


Anche i due grafici dei cicli isteretici mostrano come sia stato raggiunto poche volte il punto di cambio di pendenza del grafico e quindi il passaggio da lineare a non lineare. Ciò significa che la forza di taglio agente sul sistema di isolamento non è stata sufficientemente alta da attivarlo.

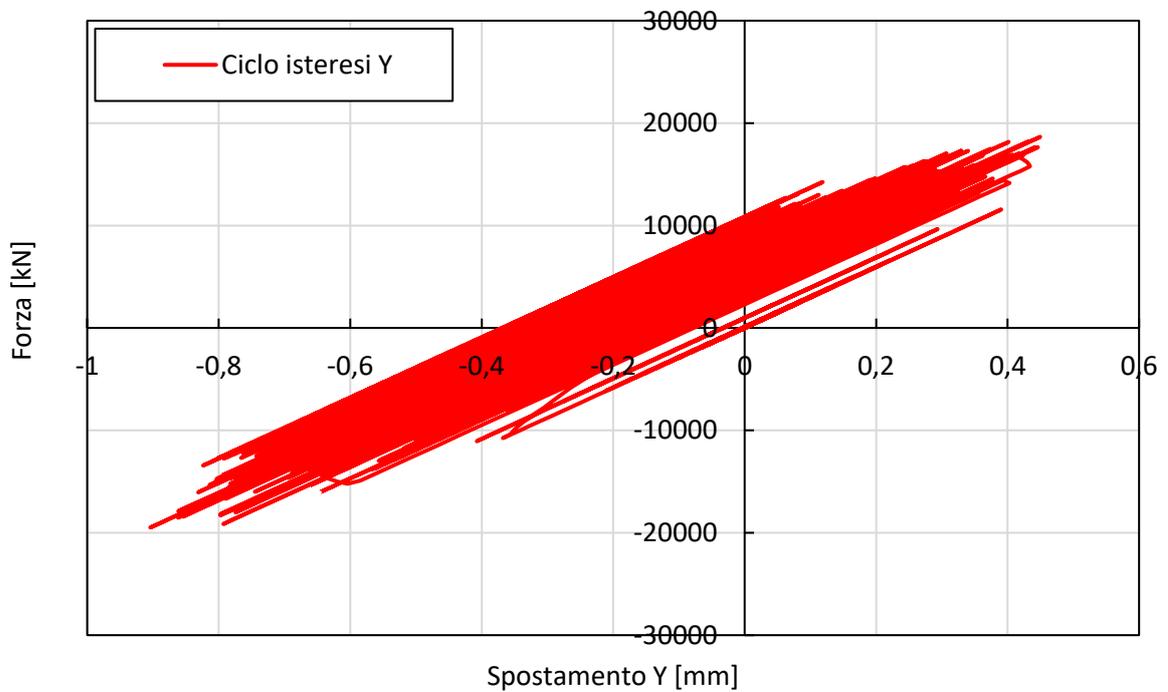
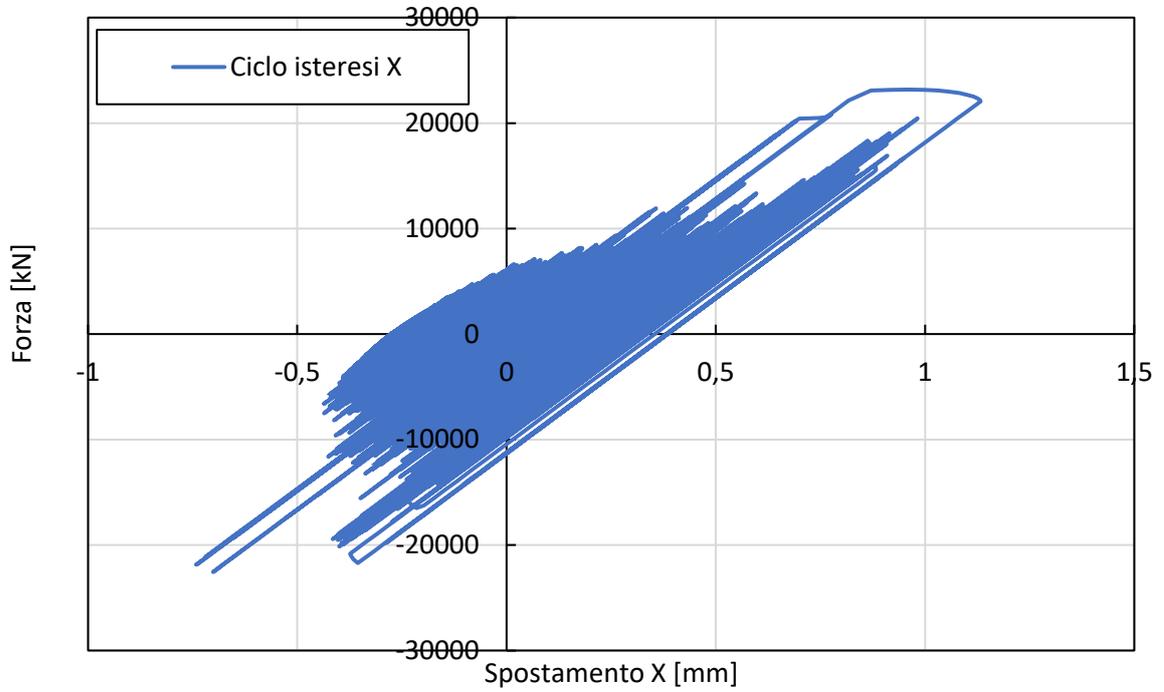


5.3.2.3 Magnitudo 6.6

In questo ultimo caso registrato l'intensità del sisma è ancora minore rispetto ai primi due perché consiste nella scossa d'assestamento del rimo sisma. Ciò comporta spostamenti massimi dell'ordine del millimetro quindi sostanzialmente la struttura rimane ferma.

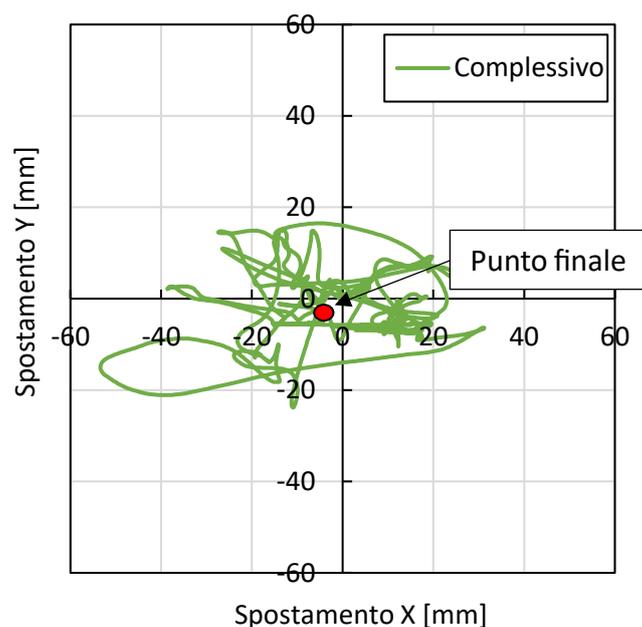
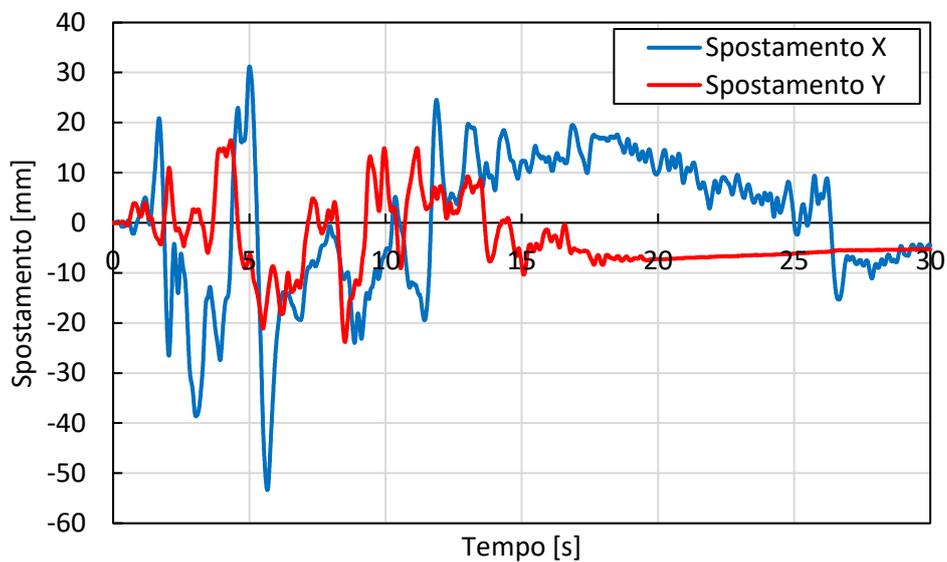


A dimostrazione di quanto detto, anche i cicli di isteresi risultano sostanzialmente lineari, quindi, non è presente una forza tale da passare al ramo con rigidità minore e spostamenti maggiori.

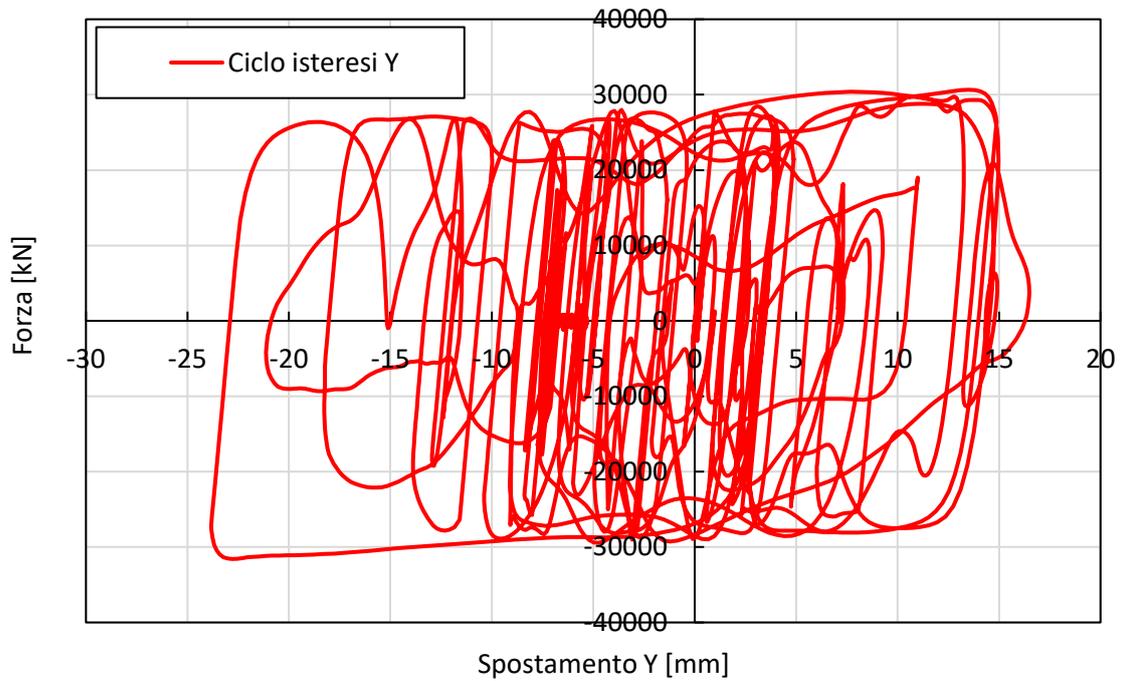
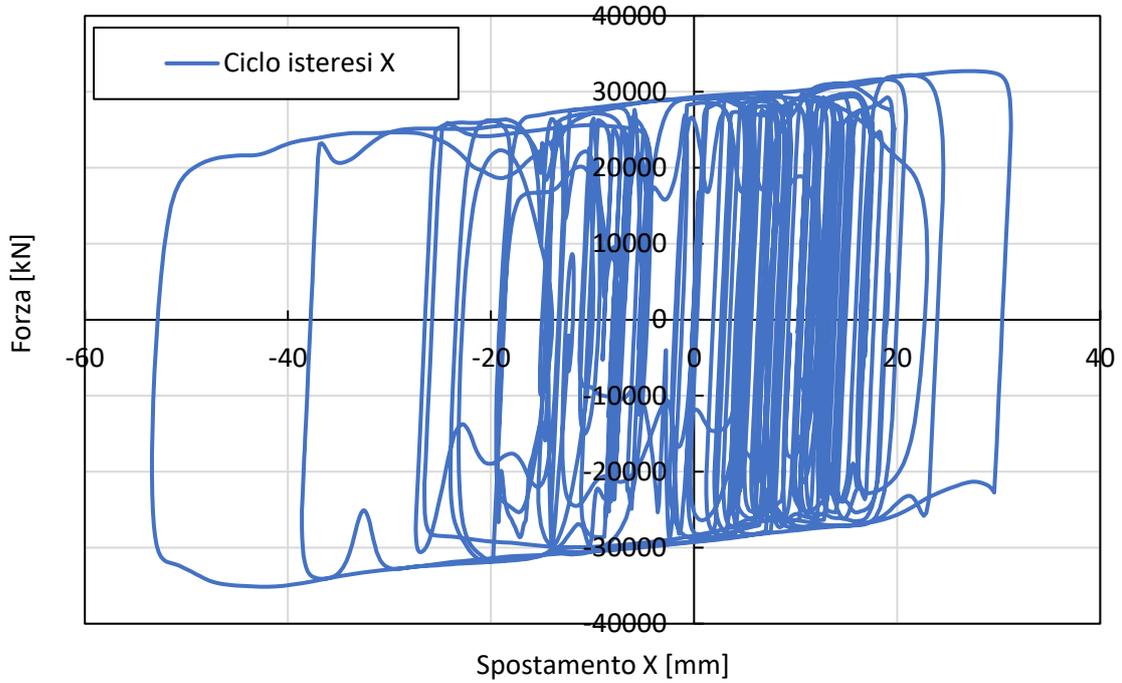


5.3.2.4 DBE

Nel caso a DBE (*Design Basis Earthquake*), ovvero il corrispondente SLV delle NTC2018, gli spostamenti ottenuti sono maggiori rispetto ai sismi registrati. Ciò significa che l'intensità del sisma è minore di quella considerata in fase di progetto. Sono stati generati due accelerogrammi spettro compatibili con lo spettro a DBE, uno direttamente dal programma SAP2000 ed uno con l'ausilio del programma SIMQKE, e applicati nelle due direzioni. Ne risultano i seguenti grafici, dove si può notare uno spostamento massimo in X di circa 53 mm e in Y di 23 mm.

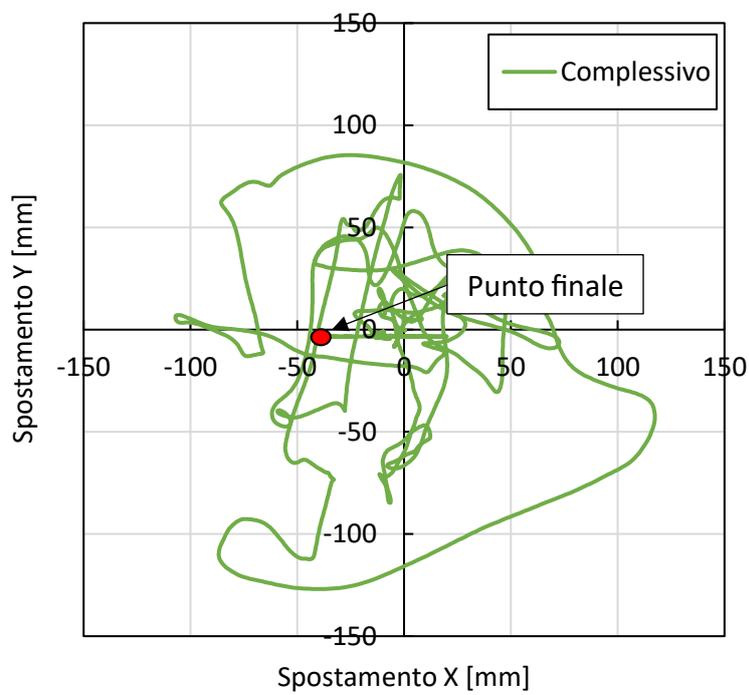
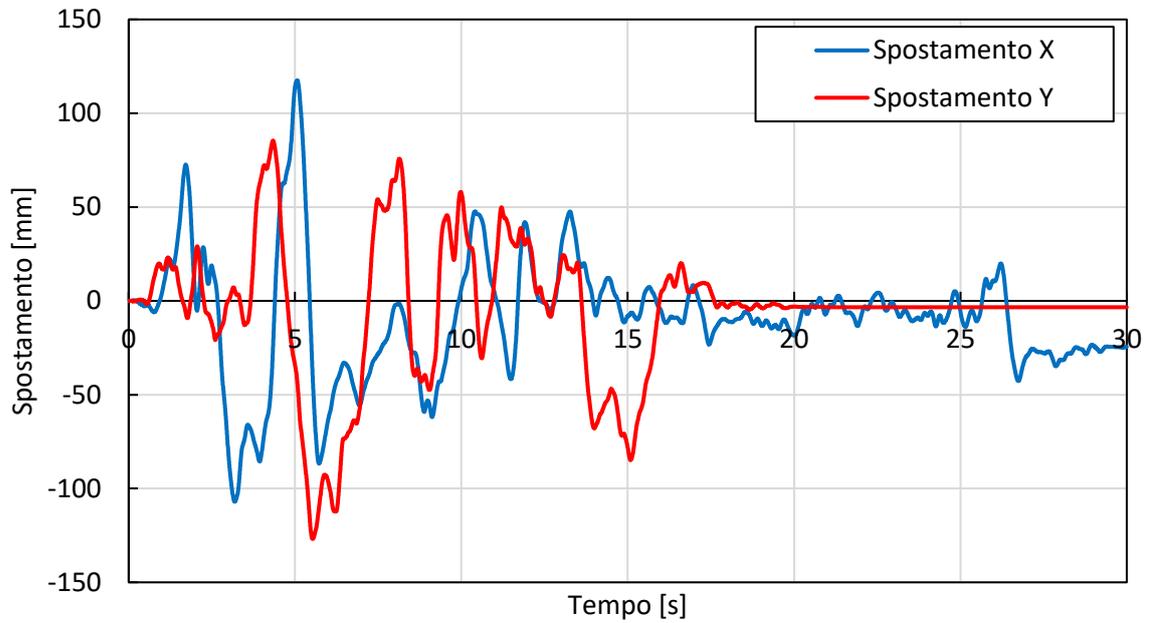


Questi maggiori spostamenti portano, quindi, il sistema di isolamento a raggiungere il punto di cambio pendenza nel grafico forza-spostamento e ad avere la forma tipica. Anche questo a dimostrazione del fatto che i casi precedenti non generassero abbastanza forza di taglio e spostamento per attivare gli isolatori.

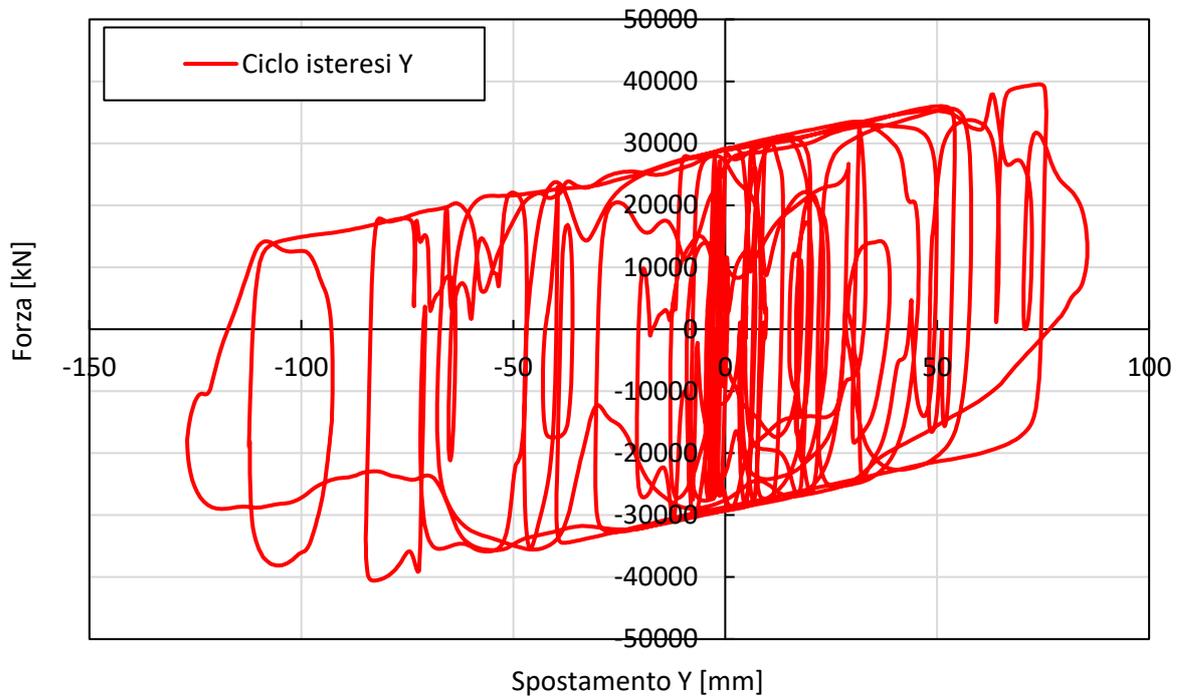
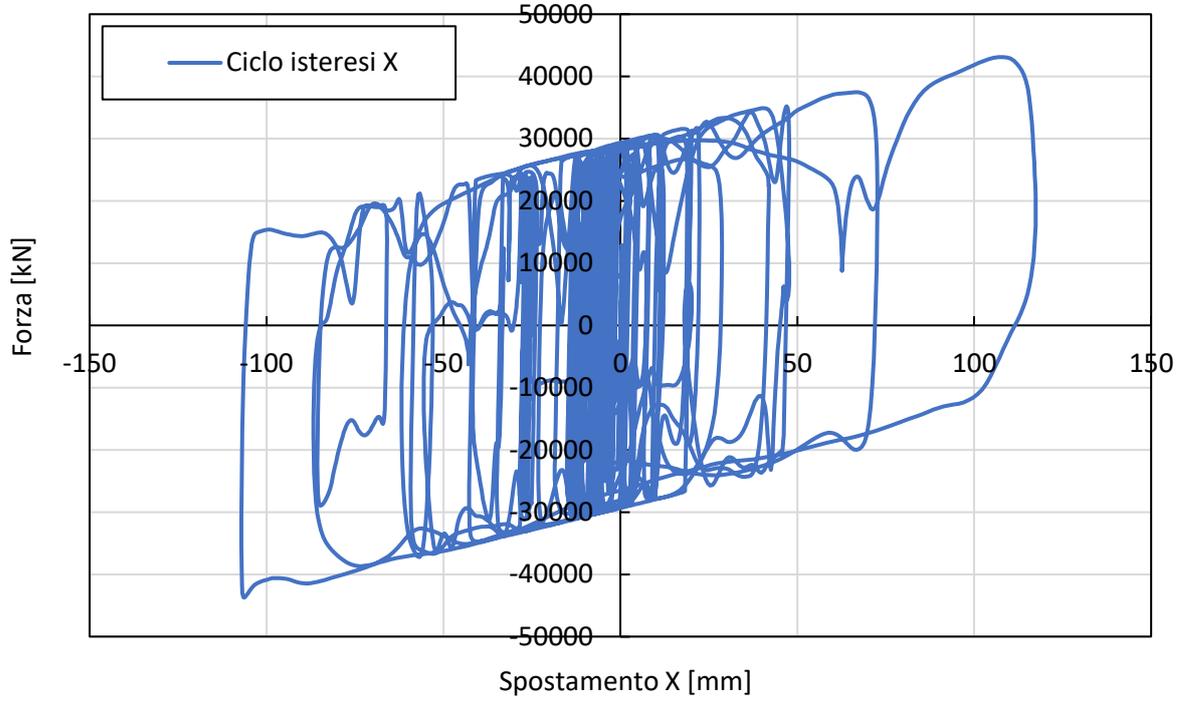


5.3.2.5 MCE

Nel caso a MCE (*Maximun Credible Earthquake*), ovvero il corrispondente SLC delle NTC2018, gli spostamenti ottenuti sono quelli di progetto per la capienza degli isolatori. Lo spostamento massimo in X è di circa 113 mm, mentre in Y di circa 126 mm.

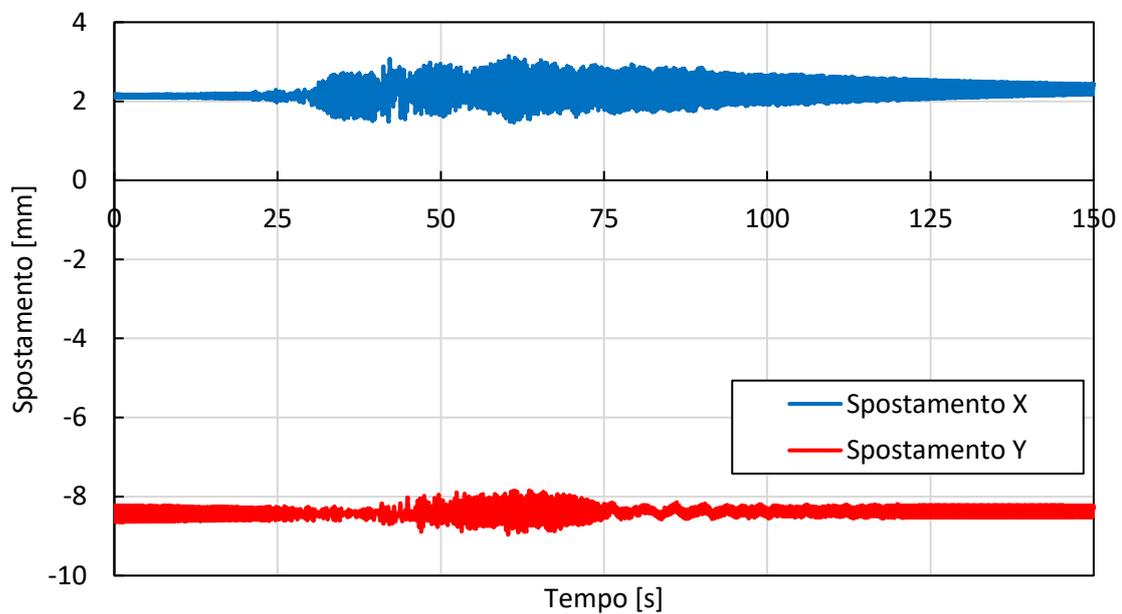


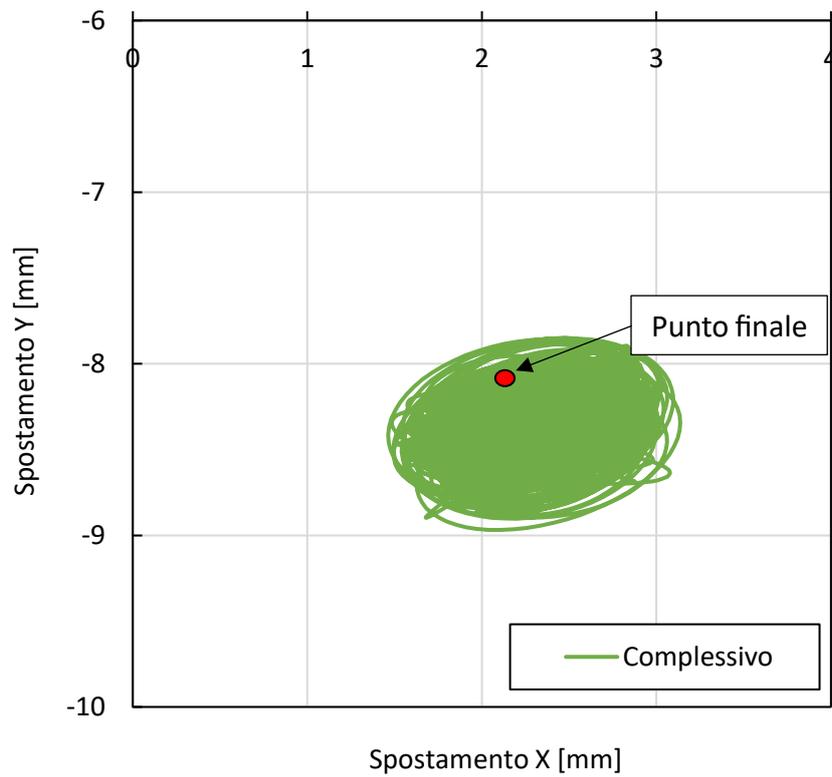
I diagrammi del ciclo di isteresi come nel caso precedente sono ampiamente oltre il punto di cambio di pendenza.



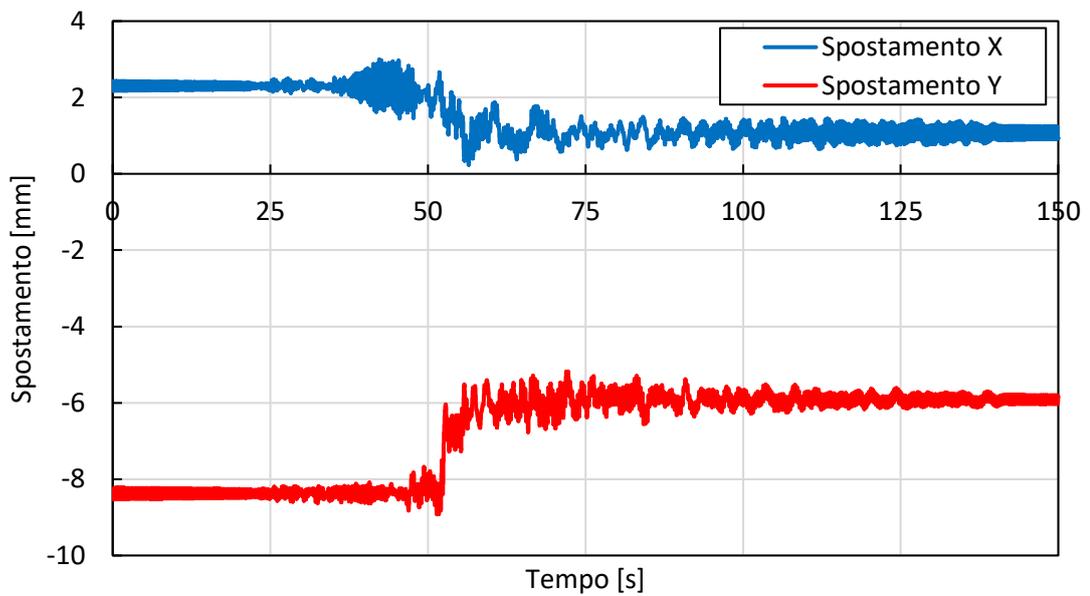
5.3.2.6 Ordine temporale

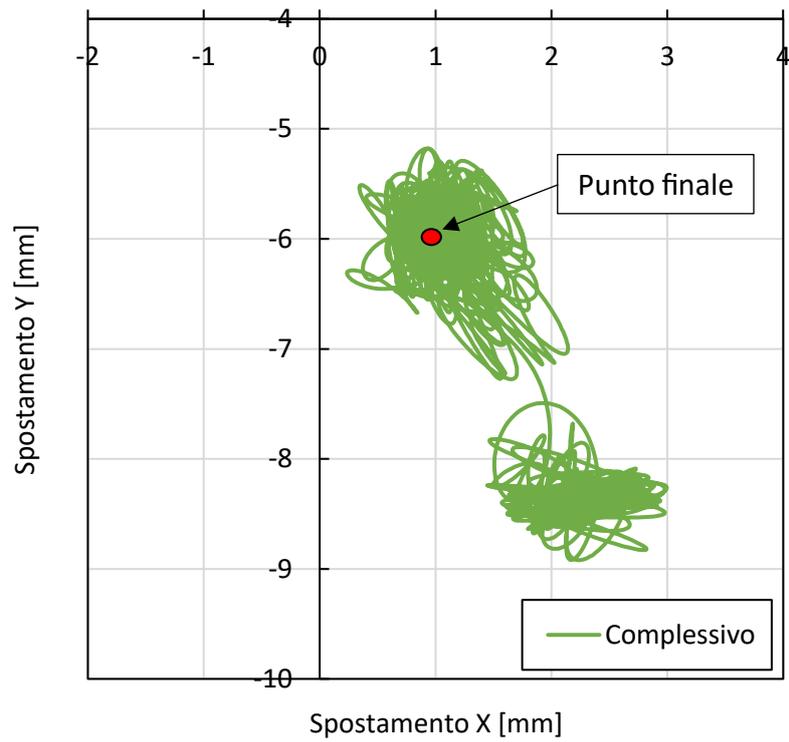
In questo paragrafo si vanno a valutare gli spostamenti dati dall'analisi del modello con applicati i tre sismi registrati in ordine temporale per come sono avvenuti realmente. Così facendo è possibile stimare lo spostamento residuo finale e valutare se c'è un fenomeno di ricentraggio. L'ordine temporale in cui sono avvenuti i sismi è: quello con magnitudo 7.8 per primo, a seguire il 6.6 ed infine il 7.5. Perciò, il risultato del primo step temporale coincide con i risultati visti nel paragrafo §5.3.2.1, nonché la scossa più forte che ha portato a maggiori spostamenti. Successivamente viene applicato il 6.6 partendo come condizioni iniziali la fine del caso 7.8. I risultati ottenuti sono i seguenti.





Infine, partendo dalla fine di questa analisi e applicando il sisma 7.5, si ottengono i seguenti spostamenti.





Dall'ultimo grafico si può notare che è avvenuto parzialmente il ricentraggio della struttura e che sono rimasti residui in X 1 mm e Y 6 mm di spostamento, comunque considerabile praticamente nullo.

5.4 Modello completo

5.4.1 Descrizione del modello

Una volta effettuate le analisi nel modello ad 1 gdl, si sono ripetute anche nel modello di tutto l'edificio. Questo modello ci è stato fornito da un'azienda che ne era in possesso. Esso presenta i pilastri, i solai, le scale e gli isolatori.

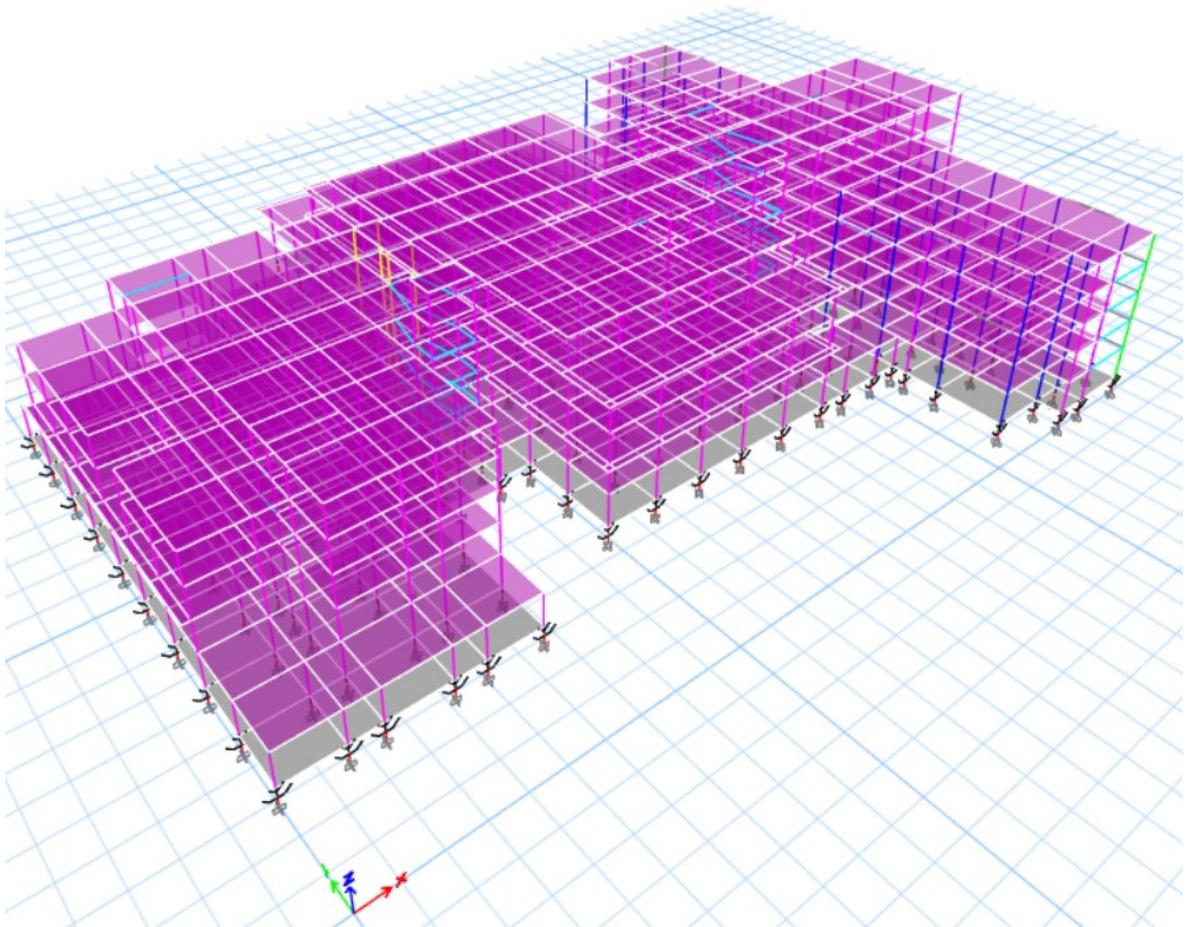


Figura 5-7: modello completo.

Da esso si è potuto risalire al numero totale di isolatori a doppia superficie curva, che risulta essere di 251. Per poter andare ad inserire i corretti valori a questi isolatori è stato necessario fare un'analisi statica con in carichi verticali agenti nella combinazione quasi permanente. Ciò è servito per andare a valutare il carico verticale agente in ogni singolo isolatore in condizioni di quiete. A questo punto si sono suddivisi gli elementi in 3 diversi gruppi per fasce di carico. È stata fatta la media per ogni gruppo in modo da avere

solamente 3 tipologie diverse di isolatore. Questa naturalmente è una semplificazione che però non porta a variazioni significative del risultato. Nella seguente tabella vengono rappresentati i tre gruppi di isolatori con il rispettivo valore di carico verticale e dal numero di isolatori che compone il gruppo.

c	Media [kN]	n° isolatori
Gruppo A	1187	62
Gruppo B	2830	124
Gruppo C	4222	65

Come si può subito notare, gli isolatori con carico verticale in media minimo o massimo sono in numero inferiore rispetto a quelli con un carico a metà, questo perché rappresentano rispettivamente gli isolatori di bordo dell'edificio e quelli interni, che subiscono più carico verticale. Inoltre, la somma delle forze verticali riscontrata è pari a 698862 kN che è coincidente al carico utilizzato nel modello ad 1 gdl.

Fatto ciò, è possibile andare ad inserire i parametri degli isolatori nel software conoscendo lo sforzo normale, l'attrito e il raggio di curvatura di questi dispositivi, come visto al capitolo §5.3.1.1. Il resto del modello non è stato modificato.

Infine, sono stati inseriti gli accelerogrammi di interesse e sono state impostate le varie analisi di interesse per questo caso studio, sempre come già definito al capitolo §5.3.1.3.

5.4.2 Risultati

Un primo risultato che si può facilmente ottenere dal modello è quello delle coordinate del centro di massa e centro di rigidità dell'edificio per ogni piano. I valori, nella seguente tabella, mostrano come non ci sia un'eccentricità eccessiva, quindi, non ci aspetta momenti torcenti molto elevati proprio per questo motivo.

Piano	X_{CM} [m]	Y_{CM} [m]	X_{CR} [m]	Y_{CR} [m]
ISO -5	65,61	52,98	69,86	52,82
0	67,94	53,20	69,89	52,81
4,5	70,99	53,50	69,95	52,82
9	71,18	51,26	70,04	52,80
13,5	72,06	50,76	70,14	52,76
18	77,39	50,41	70,32	52,71

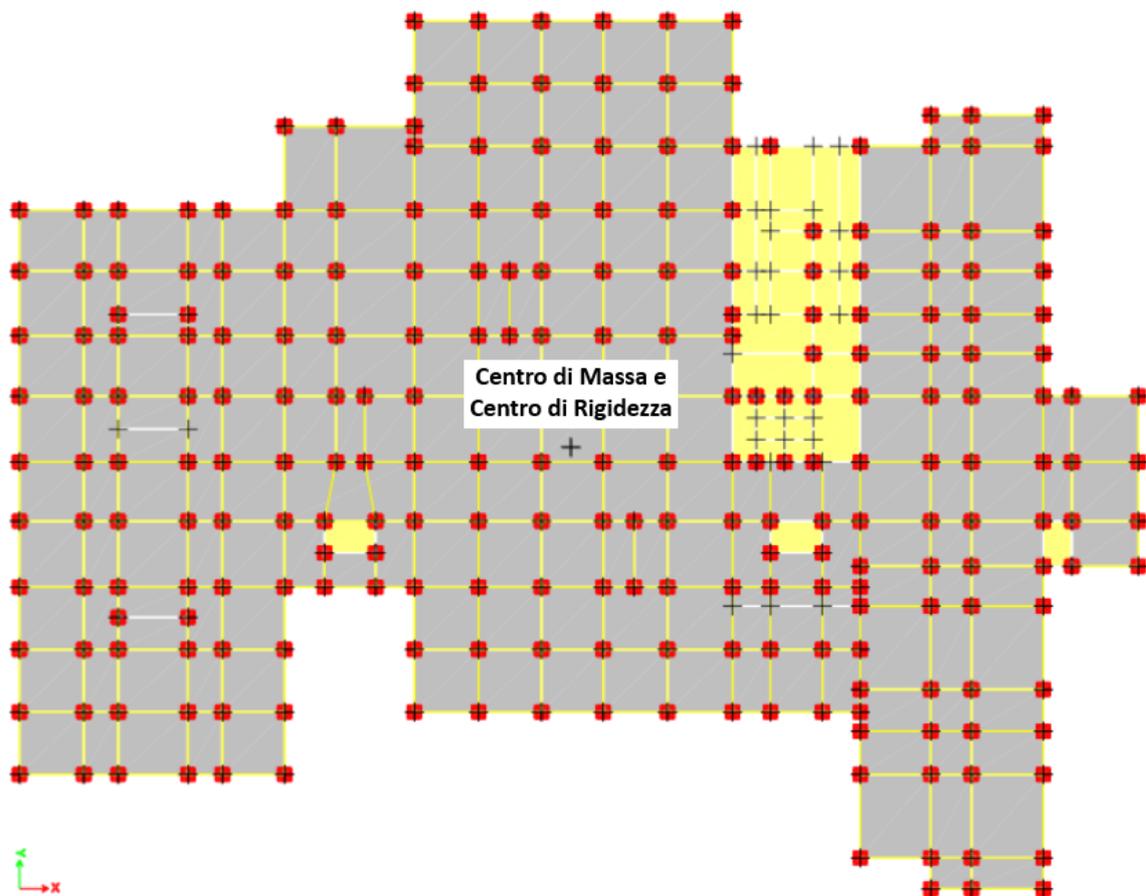


Figura 5-8: rappresentazione del centro di massa e centro di rigidità del piano degli isolatori.

Un secondo risultato immediato sono i periodi e modi di vibrare della struttura che vengono riportati nella seguente tabella.

Modo	Periodo [s]
1	4,58
2	4,56
3	4,49

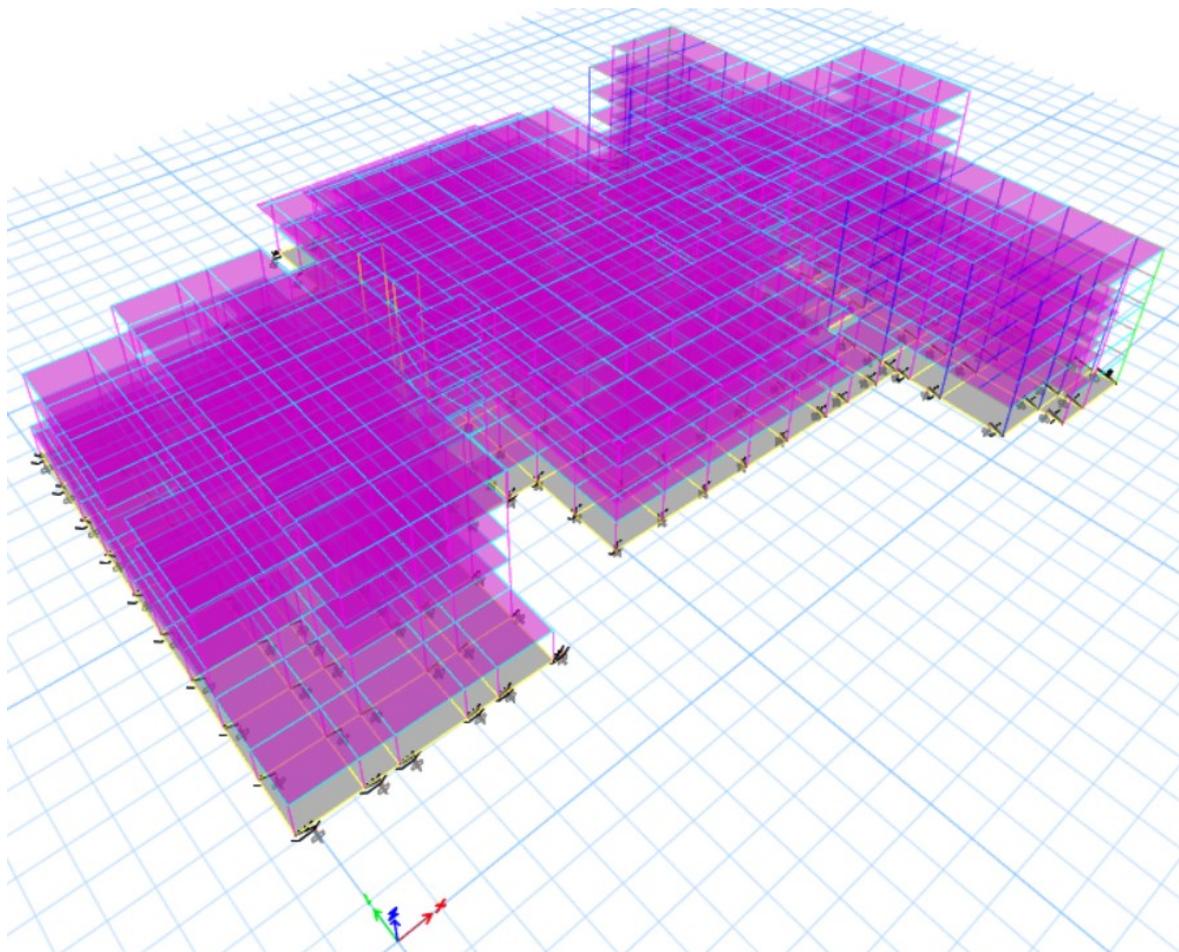


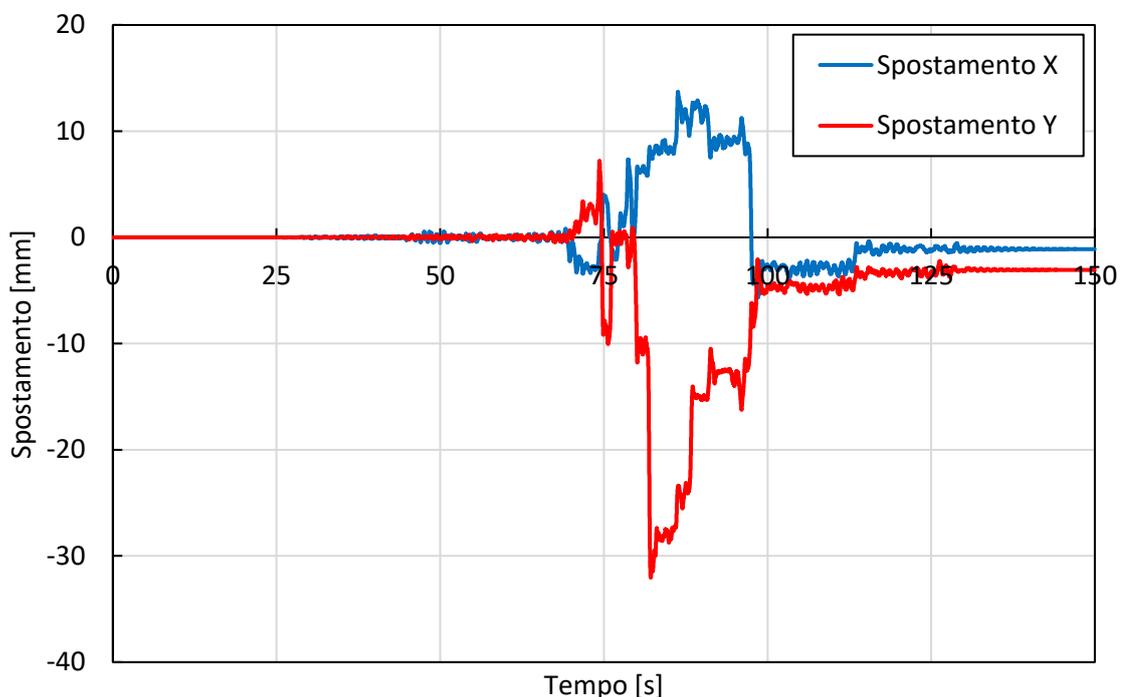
Figura 5-9: esempio deformata primo modo di vibrare.

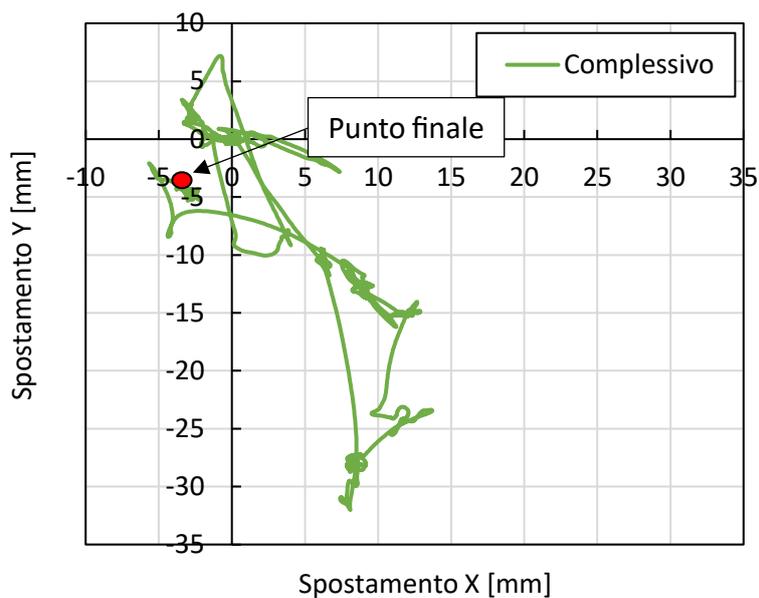
Nei successivi paragrafi, invece, verranno rappresentati i risultati in termini di spostamento del piano degli isolatori, un esempio di ciclo isteretico nelle due direzioni di un isolatore, gli spostamenti massimi di ogni piano, il drift interpiano e le accelerazioni dei piani; questi per il sisma 7.8 e i due casi di progetto a DBE ed MCE. Viene considerato solamente il caso registrato del sisma 7.8 in quanto, dal modello ad 1 gdl, è l'unico caso che riesce ad attivare

leggermente gli isolatori. Oltre agli spostamenti nel piano degli isolatori, verranno rappresentati gli spostamenti di ogni singolo piano nell'appendice a fine elaborato.

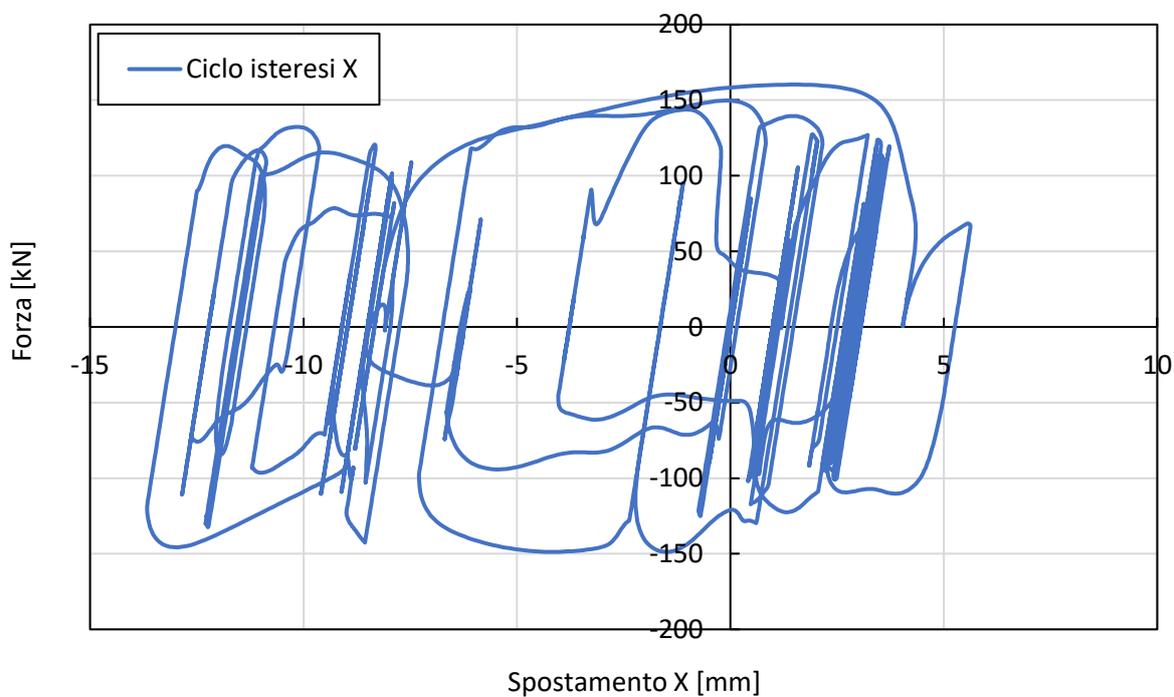
5.4.2.1 Magnitudo 7.8

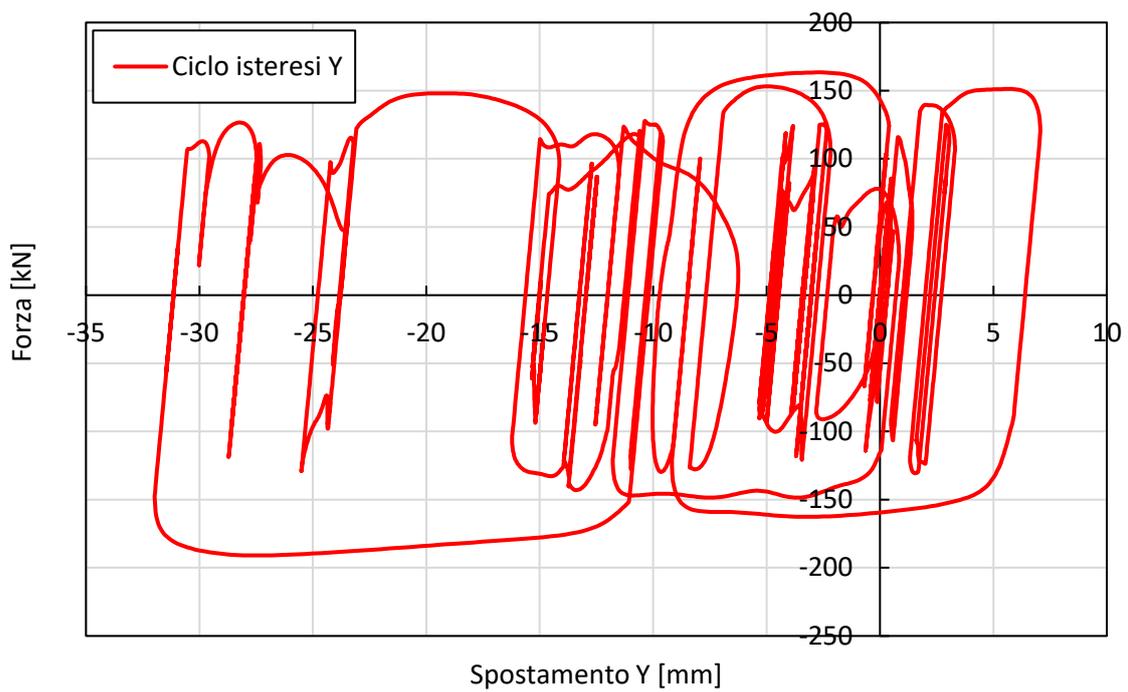
- Come primo risultato del caso in esame si hanno gli spostamenti nel tempo di un punto considerabile coincidente al centro di rigidità del sistema nel piano degli isolatori. Questo risultato dovrebbe coincidere con quanto rappresentato nel modello ad 1 gdl perché rappresenta le stesse condizioni. Ciò non è propriamente così, perché, nel modello semplice non vengono considerate le eccentricità in altezza delle masse, risultando quindi un'approssimazione a sfavore di sicurezza. Per questo risulta necessario la creazione del modello completo per cogliere più effetti possibili. È stato preso questo punto, in quanto la differenza di spostamenti tra esso ed altri punti alle estremità dell'edificio non presentano differenze sostanziali. Questo indica che gli effetti torsionali sulla struttura non siano di particolare rilievo.





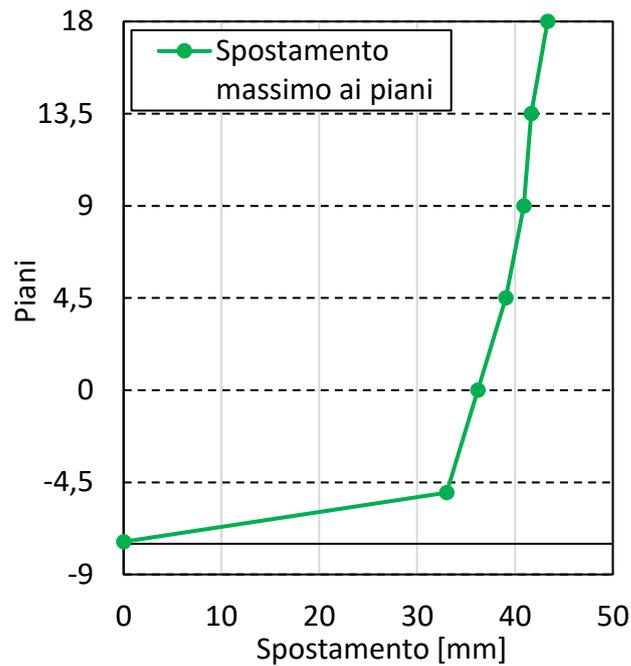
- Un secondo risultato interessante sono i cicli isteretici lungo la direzione X e Y di un singolo isolatore, sempre coincidente al centro di rigidità. Questi grafici sono utili per capire che comportamento hanno avuto i dispositivi e per controllare la loro corretta rappresentazione.





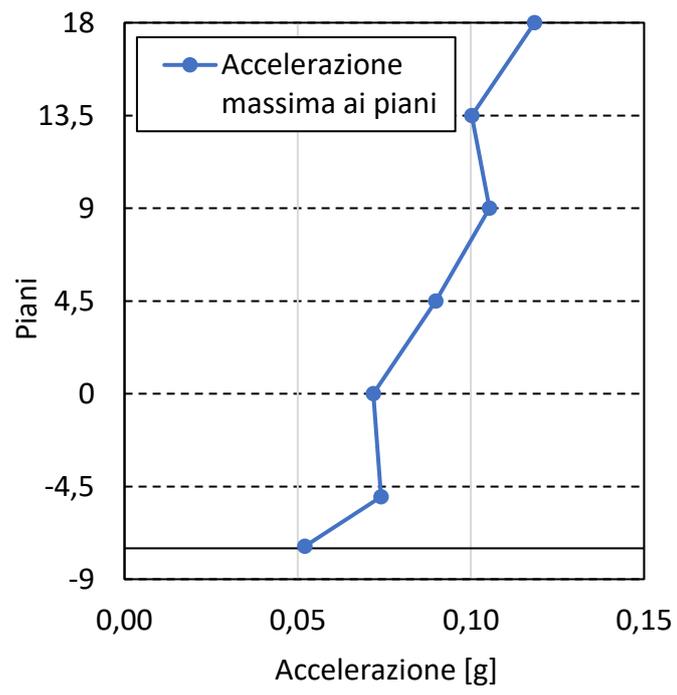
- Successivamente si rappresentano gli spostamenti di ogni singolo piano. Essendo molti grafici e ripetitivi vengono rappresentati all'appendice A dell'elaborato. Come riassunto, sono stati presi i valori massimi per ogni piano e rappresentati nella seguente tabella.

Piano	Spostamento massimo ai piani [mm]
ISO -5	33
0	36
4,5	39
9	41
13,5	42
18	43



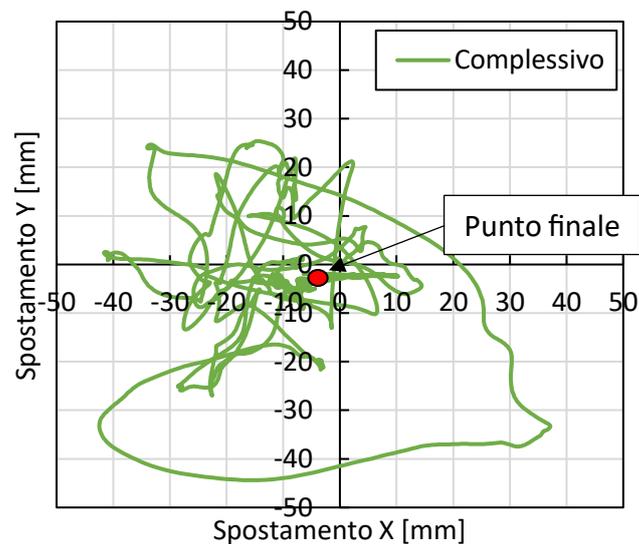
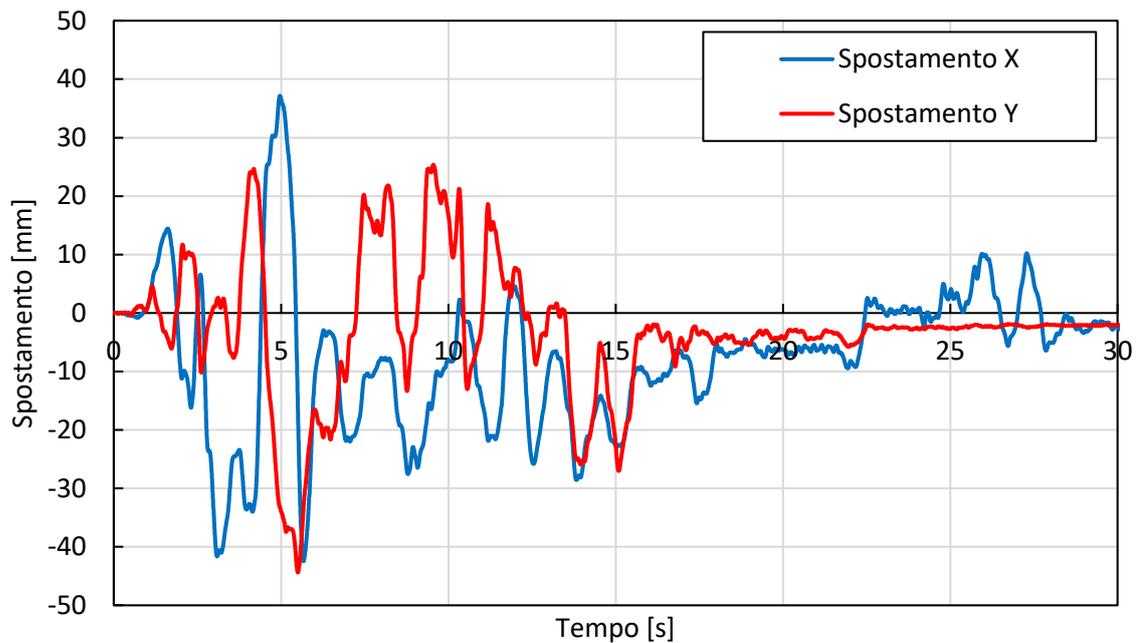
- Un ulteriore dato interessante è quello dei drift interpiano, per questo caso non vengono rappresentati in quanto, la scossa è stata talmente debole nella struttura, che si sono registrati valori di drift decisamente piccoli tendenti allo zero.
- Un ultimo dato interessante è quello delle accelerazioni di piano. L'utilità nel rappresentare questi dati sta nel "confort" che una persona può percepire in caso di terremoto, ovvero l'accelerazione che subisce il suo corpo. Una seconda utilità, invece, è per i macchinari e scaffali presenti in ospedale, per capire a quale accelerazione massima possono essere sottoposti.

Piano	Accelerazione massima [g]
Base	0,05
-5 ISO	0,07
0	0,07
4,5	0,09
9	0,11
13,5	0,10
18	0,12



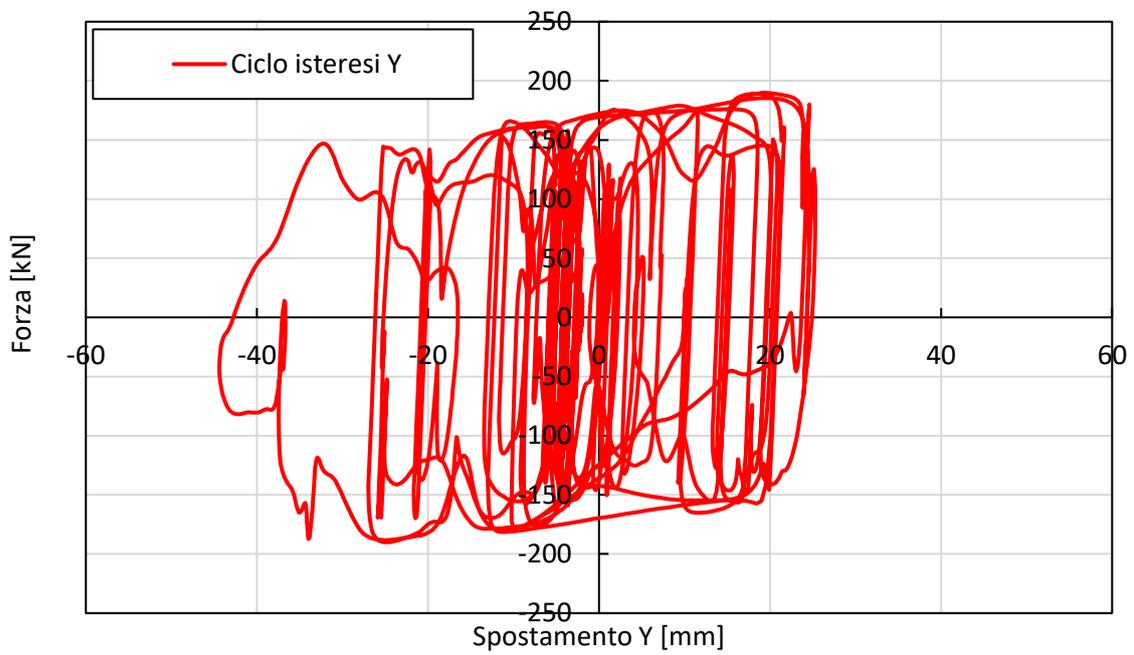
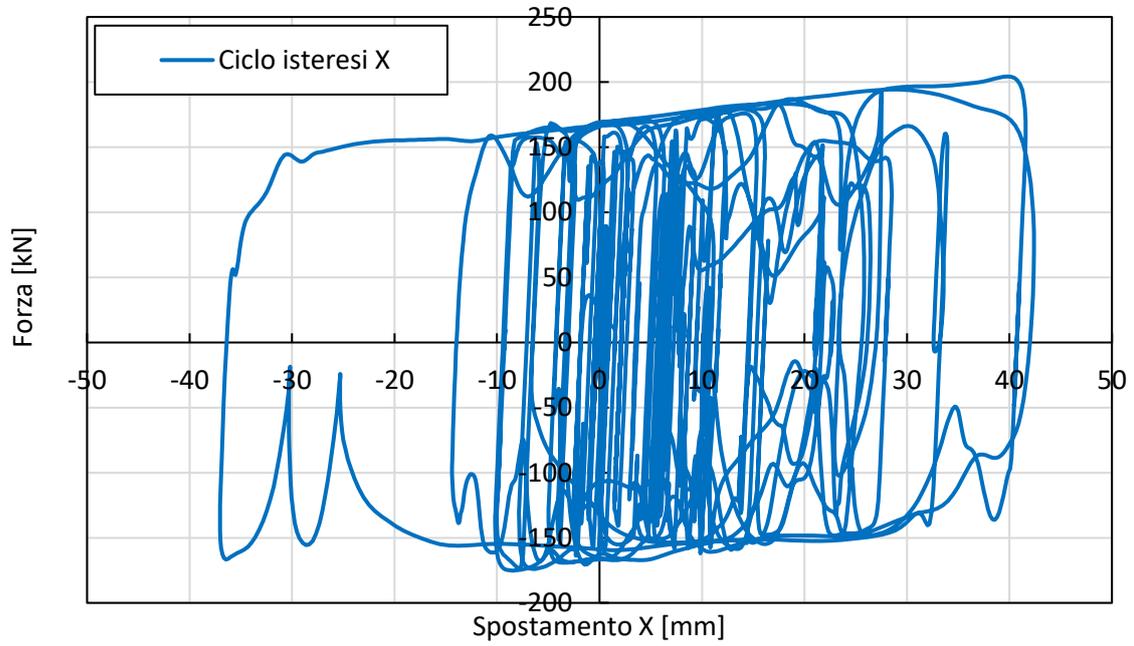
5.4.2.2 DBE

- Come già visto nel paragrafo precedente nel caso di sisma di magnitudo 7.8, anche per la struttura soggetta al sisma di progetto DBE si riporta gli spostamenti nel tempo del punto coincidente con il centro di rigidezza dell'edificio al piano degli isolatori.



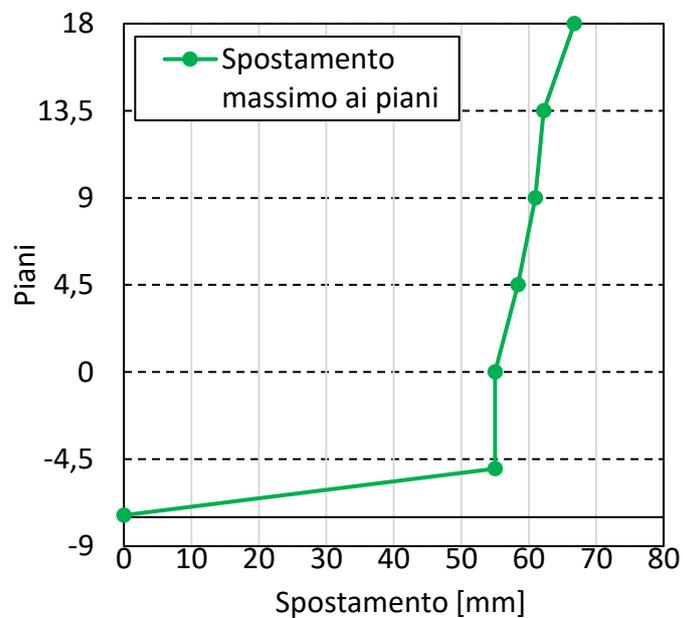
In questo caso, per i primi 10 secondi l'andamento è abbastanza simile a quello registrato nel caso di modello a 1 grado di libertà, anche se il valore dei picchi delle curve è un po' diverso.

- Di seguito si riportano i cicli di isteresi nelle due direzioni per l'isolatore posizionato nel centro di rigidezza dell'edificio.

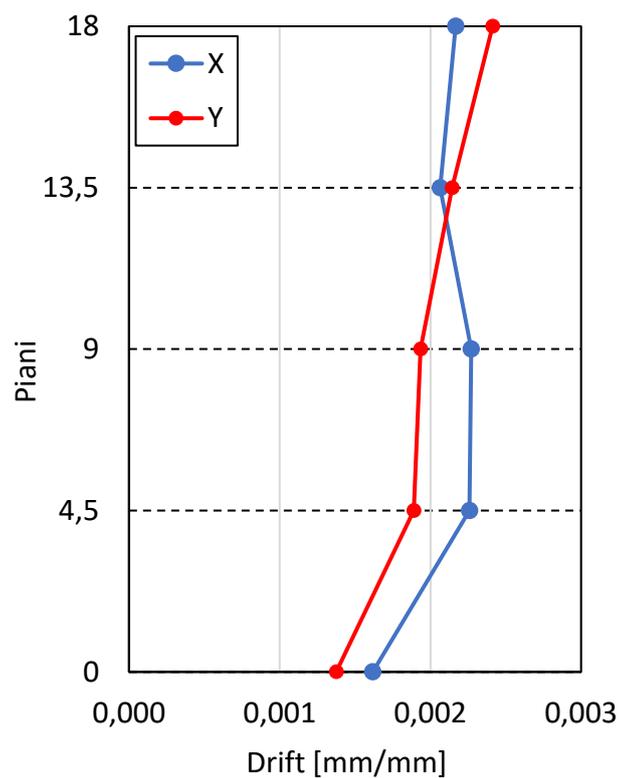


- Come già detto nel caso con sisma di magnitudo 7.8, dal momento che inserire i grafici tempo-spostamento per ogni piano sarebbe ripetitivo, vengono mostrati i valori massimi dello spostamento per ogni piano. Per quanto riguarda i grafici, essi sono presenti all'appendice B dell'elaborato.

Piano	Spostamento massimo ai piani [mm]
ISO -5	55
0	55
4,5	58
9	61
13,5	62
18	67

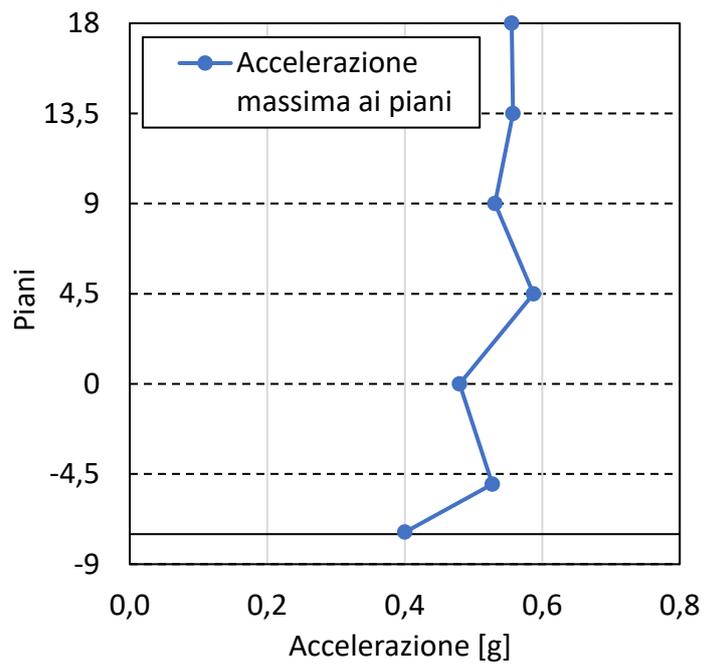


- Per quanto riguarda il drift interpiano, nonostante i valori risultano abbastanza contenuti, è interessante riportarne l'andamento al crescere dell'altezza.



- Ed infine viene riportato il valore dell'accelerazione massima di piano con il suo andamento lungo l'altezza dell'edificio.

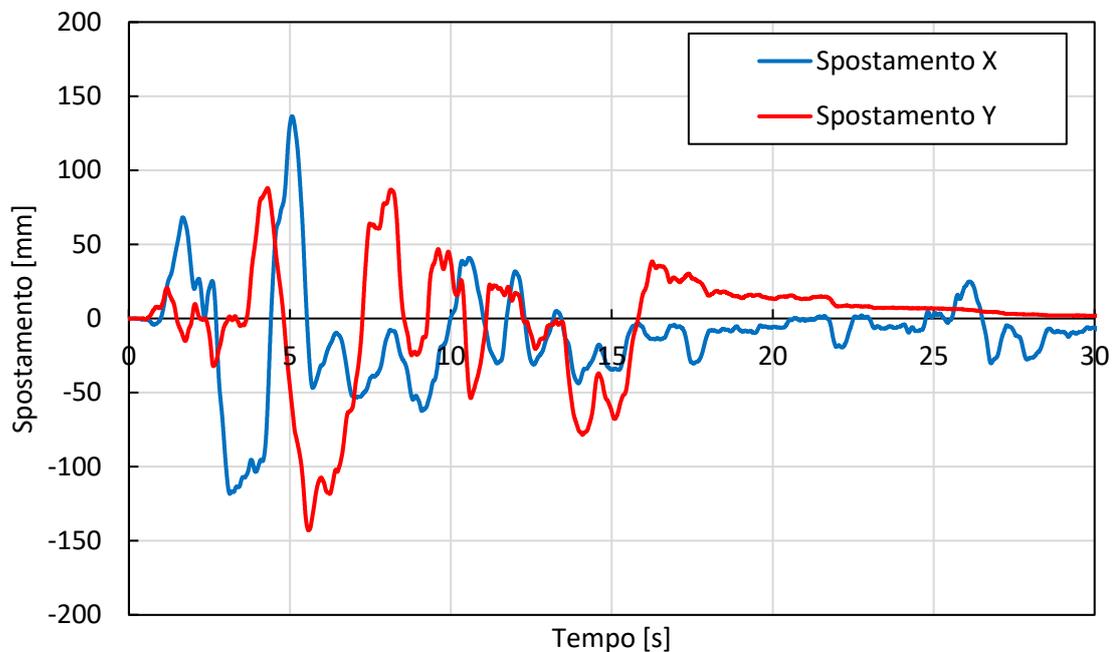
Piano	Accelerazione massima [g]
Base	0,40
-5 ISO	0,53
0	0,48
4,5	0,59
9	0,53
13,5	0,56
18	0,56

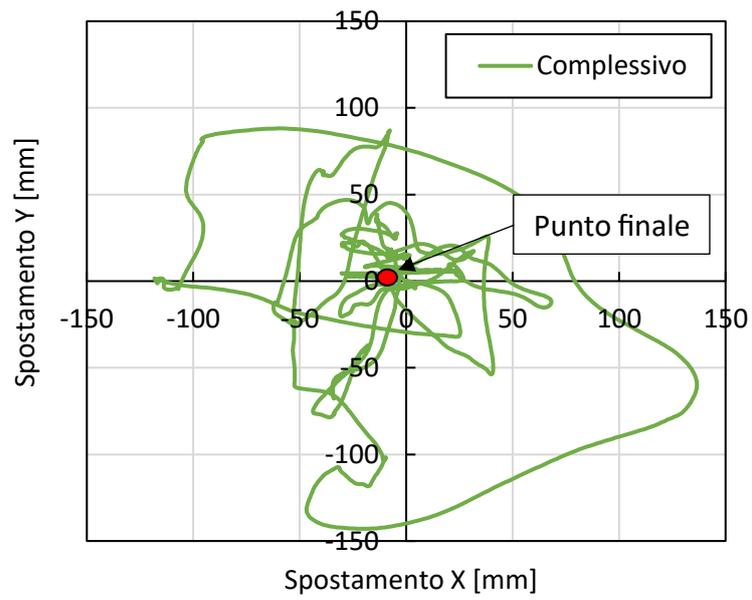


5.4.2.3 MCE

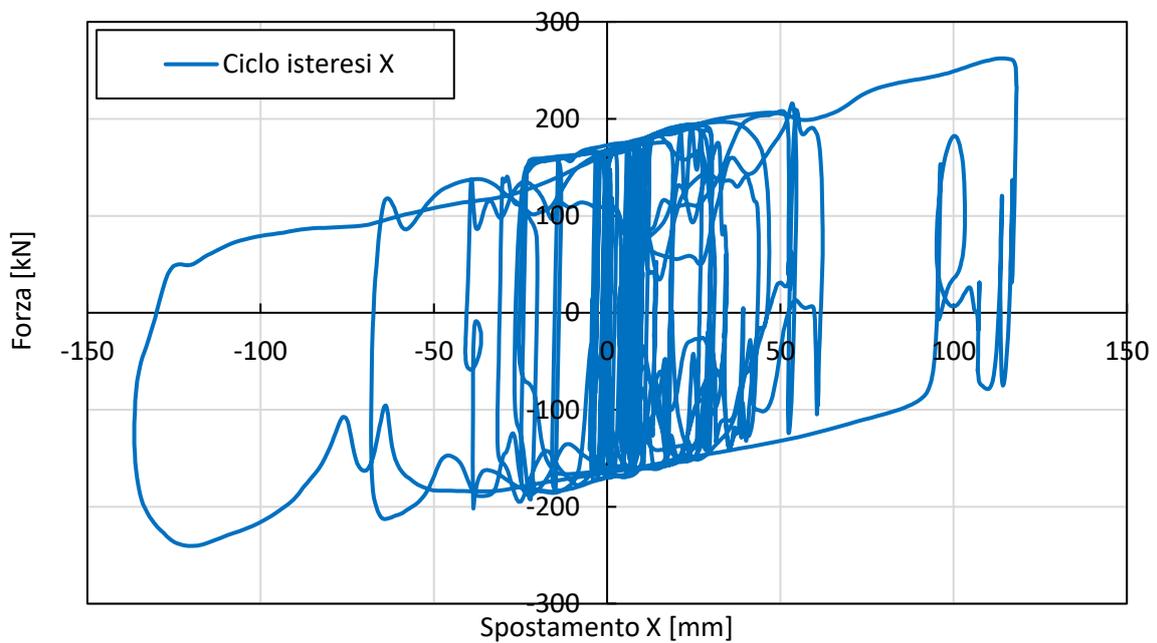
- Quanto fatto per i casi precedenti lo si ripete anche per l'edificio sottoposto al sisma di progetto MCE. In questo caso gli spostamenti massimi registrati nelle curve tempo-spostamento sono di un ordine di grandezza più grandi rispetto a quelli nel caso di sisma con magnitudo 7.8 e DBE.

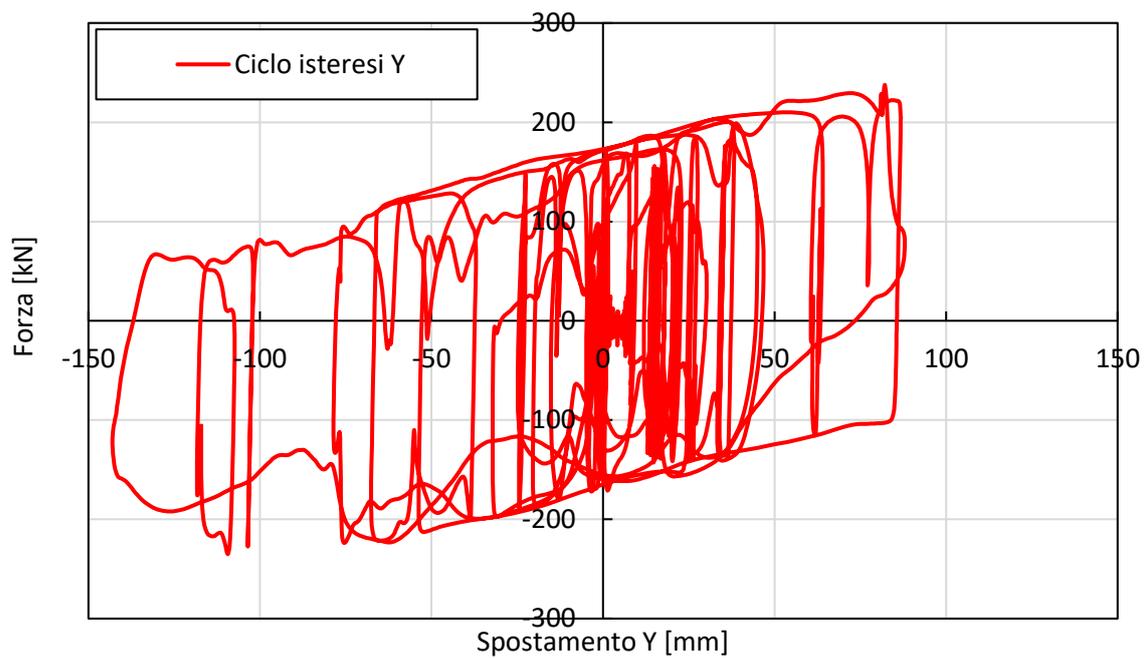
L'andamento riportato nel seguente diagramma, che riguarda l'isolatore posizionato nei pressi del centro di rigidità, è molto simile a quello del modello ad 1 grado di libertà, anche se l'intensità dei picchi è lievemente diversa. Di seguito è riportato l'andamento degli spostamenti al piano degli isolatori, mentre per quanto riguarda quello dei piani superiori si rimanda ai grafici presenti nell'appendice C.





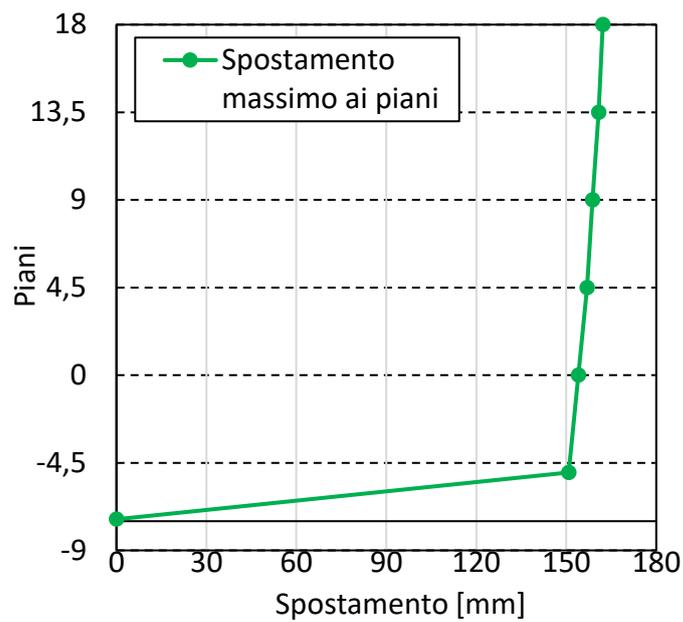
- Essendo che i dispositivi di isolamento raggiungono valori di spostamento più grandi rispetto al caso DBE, il ciclo di isteresi dell'isolatore posto nel centro di rigidezza risulta più ampio. Di seguito sono riportati i cicli isteretici nelle due direzioni X e Y.



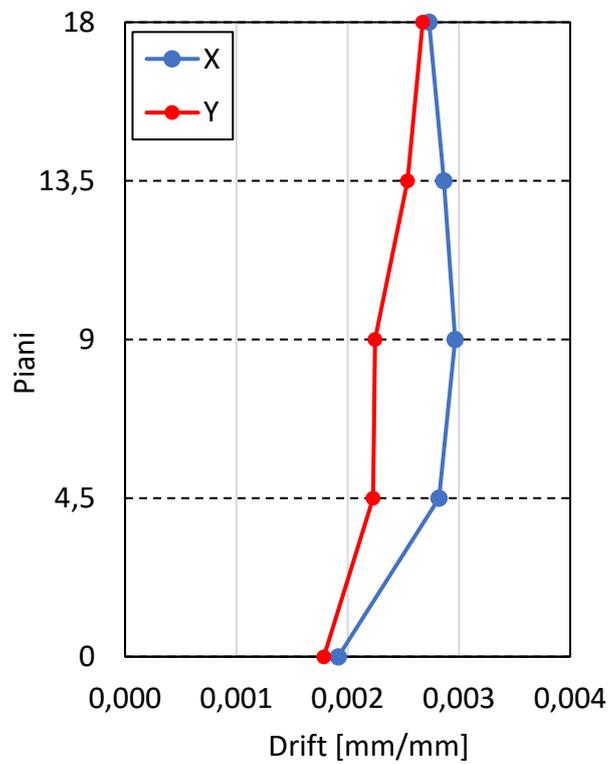


- Per quanto riguarda la risultante degli spostamenti nelle due direzioni, si ha che per il piano dell'isolatore lo spostamento massimo risulta essere di 151 mm. Poi man mano che si sale di piano lo spostamento massimo aumenta fino ad arrivare a misurare 162 mm all'ultimo solaio.

Piano	Spostamento massimo ai piani [mm]
ISO -5	151
0	154
4,5	157
9	159
13,5	161
18	162

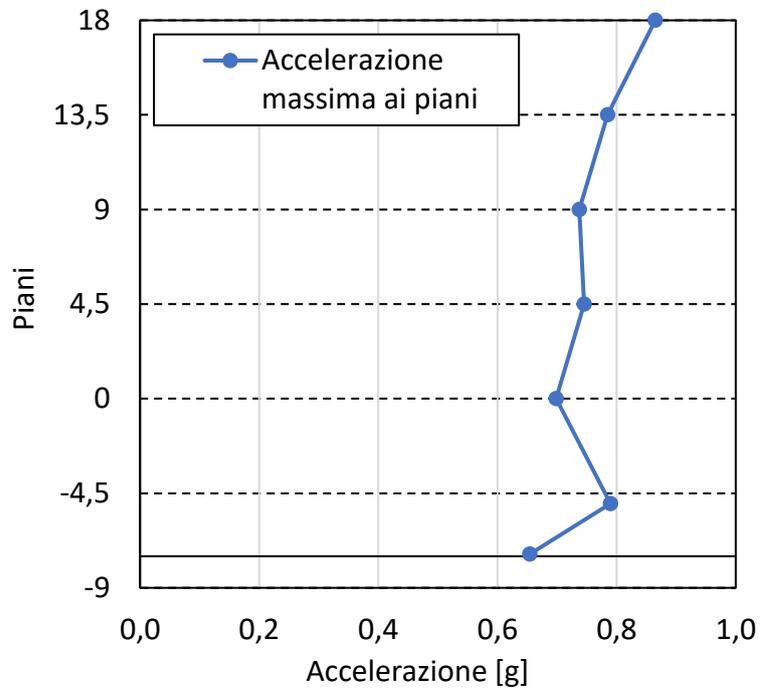


- Anche i valori del drift interpiano sono aumentati rispetto ai casi precedenti, infatti si registra un valore massimo pari allo 2,9 ‰ in direzione X ed al solaio a quota 9 m. di seguito viene riportato l'andamento del drift al variare dell'altezza dell'edificio.



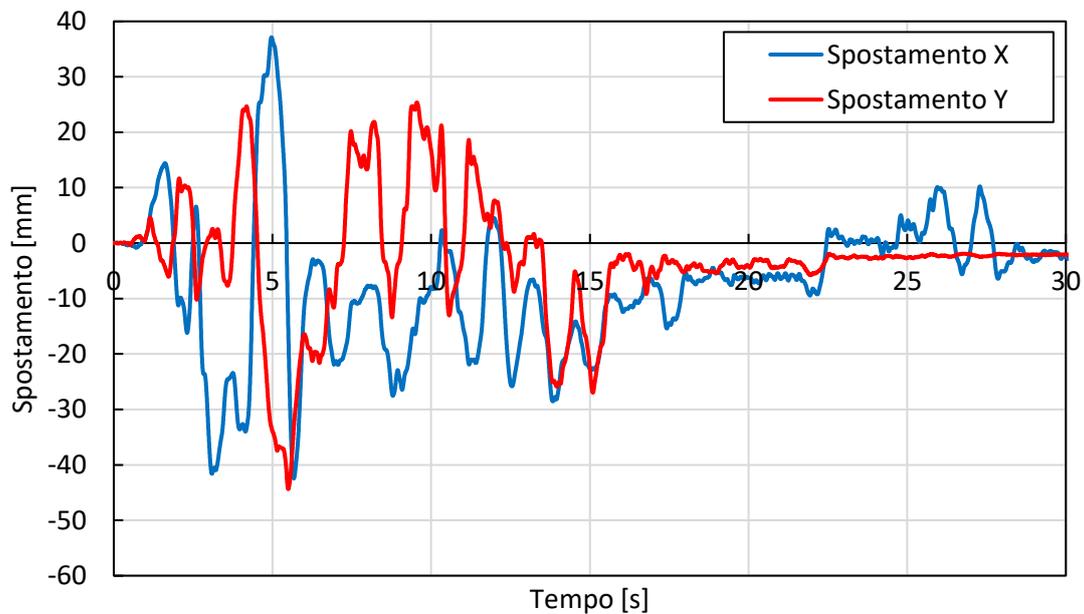
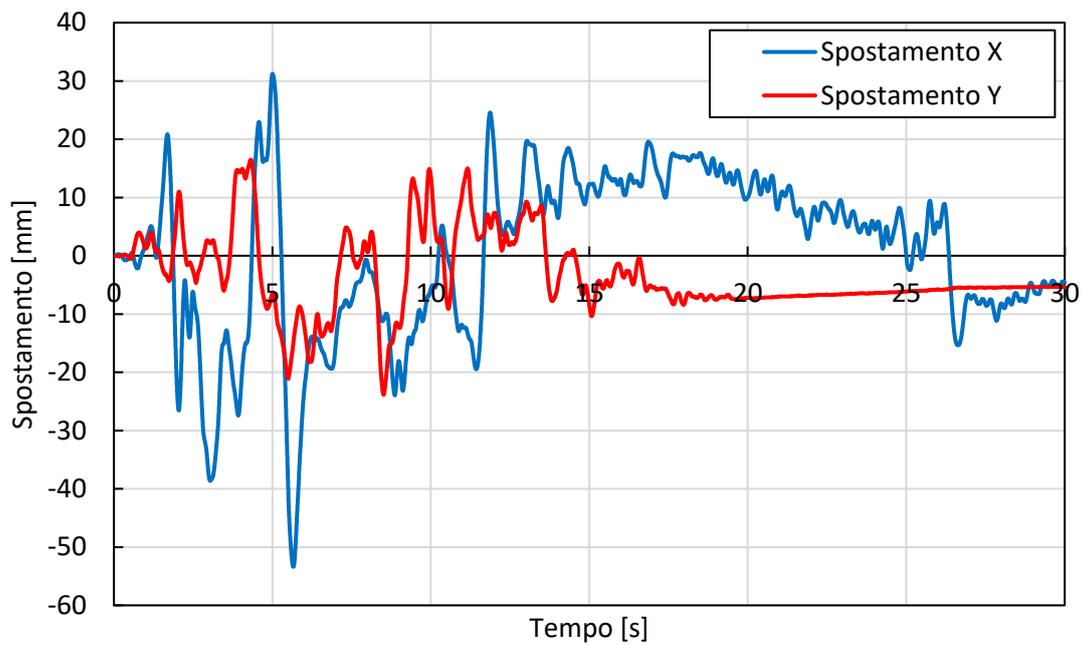
- Infine, si riporta il valore massimo delle accelerazioni dei vari piani.

Piano	Acc max [g]
Base	0,65
-5 ISO	0,79
0	0,70
4,5	0,75
9	0,74
13,5	0,78
18	0,86

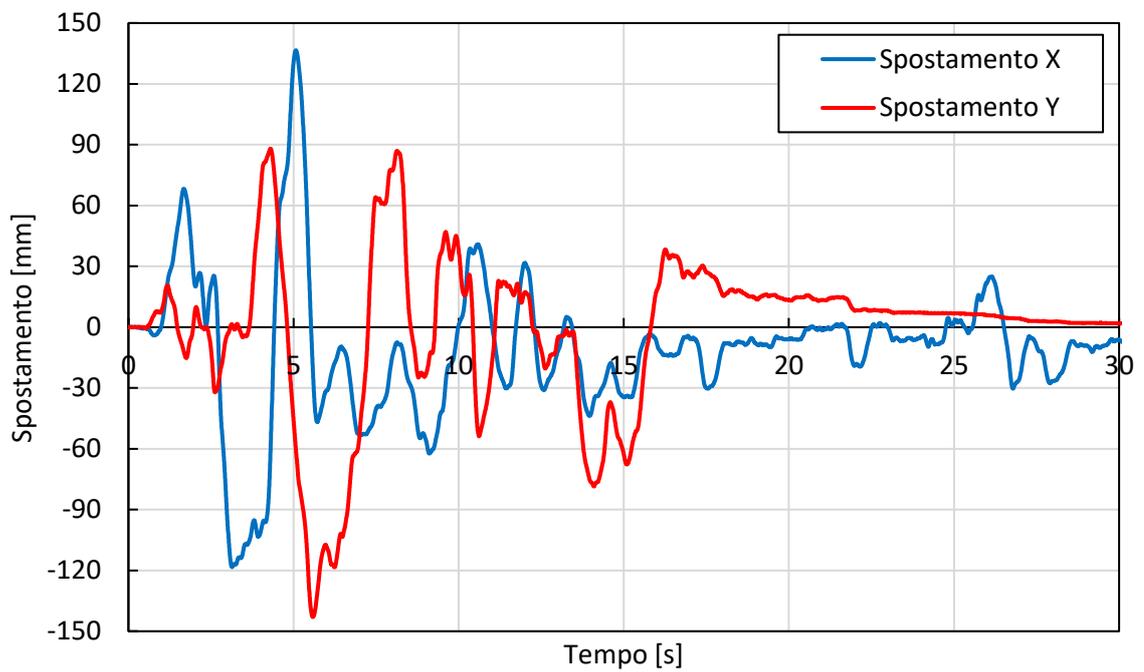
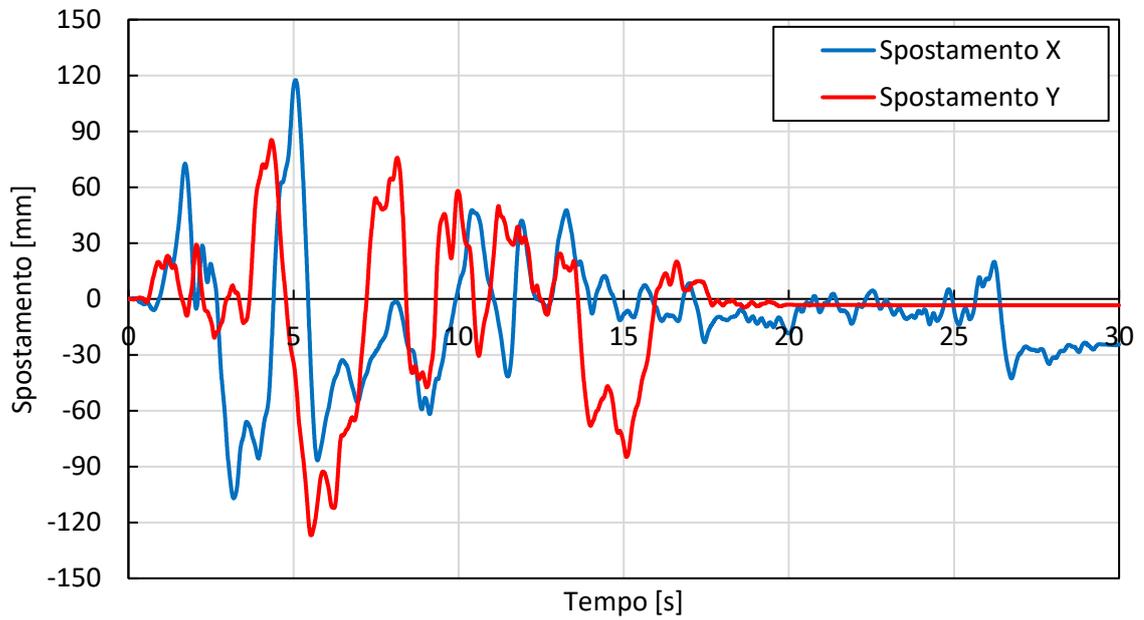


5.5 Confronto risultati modello semplificato e completo

Per il caso a DBE si possono notare delle differenze negli spostamenti durante l'arco del sisma, mentre per quanto riguarda i picchi massimi di spostamento nelle due direzioni si notano delle somiglianze.



Per il caso a MCE, invece, gli andamenti sono più simili tra loro rispetto al caso precedente e mantengono delle somiglianze in termini di valori dei picchi massimi.



6 CASO STUDIO: OSPEDALE STATALE DI ELBISTAN

6.1 Introduzione

Questo secondo caso studio prevede un'analisi del comportamento dell'ospedale statale di Elbistan soggetto ai terremoti avvenuti in Turchia il 06/02/2023. A differenza del primo caso, in questo si andrà a stimare il comportamento dell'edificio solamente dal modello semplificato a 1gdl, tralasciando il modello completo dell'opera.

Dell'edificio non si conoscono le caratteristiche geometriche, ma sono state fornite le masse dei 7 blocchi in cui è suddiviso, ognuno dei quali è separato dagli altri da dei giunti per garantirne gli spostamenti.

Alla base di ogni blocco sono stati installati degli isolatori sismici a doppia superficie curva, per un totale di 370 dispositivi. Questi isolatori hanno uno spostamento massimo di ± 300 mm, un raggio di curvatura equivalente pari a 3,1 m ed un coefficiente di attrito medio del 3,8% in corrispondenza del carico quasi permanente.



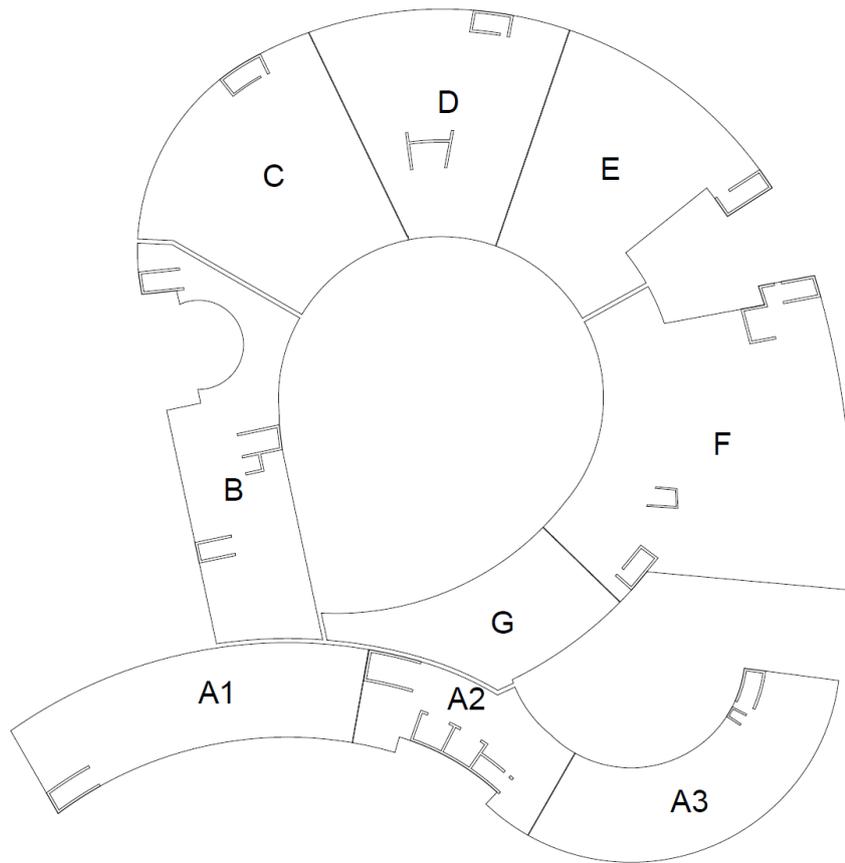


Figura 6-1: foto dall'alto dell'ospedale e pianta della suddivisione in blocchi.

Come è stato fatto per l'ospedale di Adana, per prima cosa si va a confrontare i diversi spettri, sia in accelerazione che in spostamento, dei vari sismi registrati con quello di progetto. In seguito, attraverso l'utilizzo di un modello semplificato a 1 grado di libertà che rappresenta il sistema di isolamento sottoposto ai carichi dell'edificio, si valuta il comportamento della struttura.

6.2 Confronto spettri in accelerazione e in spostamento

Il presente capitolo si propone di condurre un confronto tra gli spettri di risposta in accelerazione e spostamento previsti da progetto e quelli effettivamente registrati presso diverse stazioni di monitoraggio nei pressi dell'ospedale in esame. Quest'analisi costituirà un passo fondamentale nel valutare l'intensità del sisma del febbraio 2023 in confronto a quello atteso.

Le tre registrazioni provengono dalle stazioni numero 4611, 4628 e 4631 situate nei pressi dell'ospedale statale di Elbistan e fanno riferimento a tre diversi sismi registrati con magnitudo differenti.

Per tutti i casi si riportano in un grafico lo spettro in accelerazione di progetto, lo spettro in direzione Est-Ovest registrato e in direzione Nord-Sud registrato, con smorzamento al 5%. Per quanto riguarda lo spettro di progetto si distingue in DBE (*Design Basis Earthquake*) e MCE (*Maximun Credible Earthquake*), ovvero con tempi di ritorno rispettivamente di 475 anni e 2475 anni. Allo stesso modo si procede anche per gli spettri in spostamento.

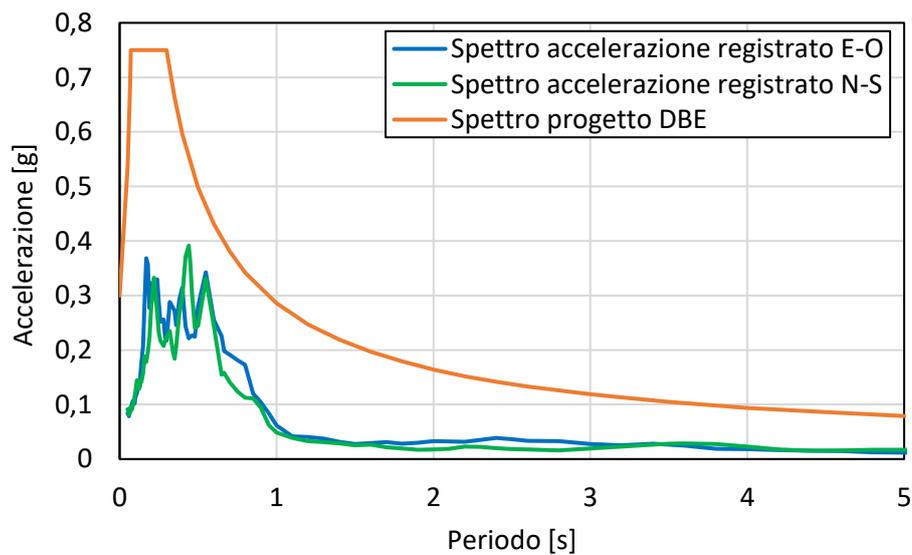
6.2.1 Stazione 4628: magnitudo 7.8

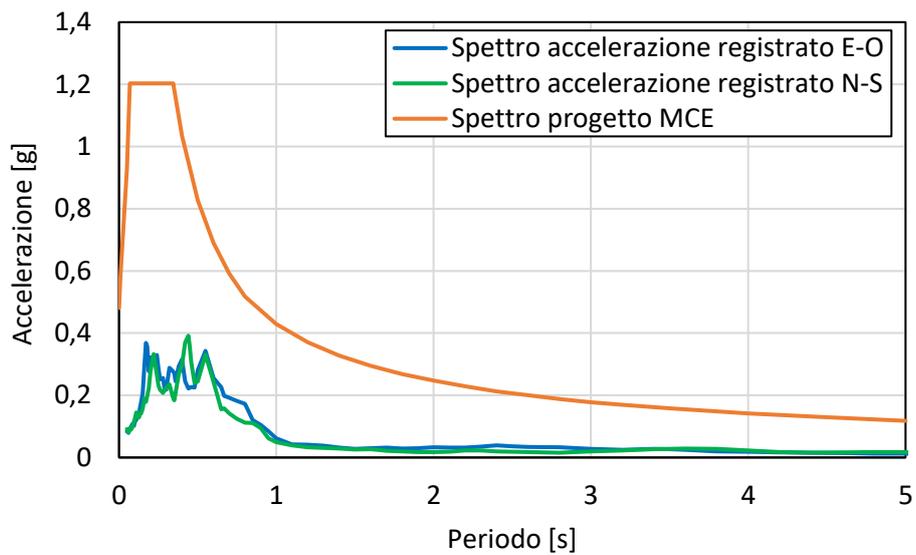
La stazione 4628 è tra le stazioni più vicine all'ospedale in esame, da essa si è registrata la scossa più forte, ovvero il sisma delle 4:17 del 06/02/2023.



Figura 6-2: inquadramento geografico stazione 4628.

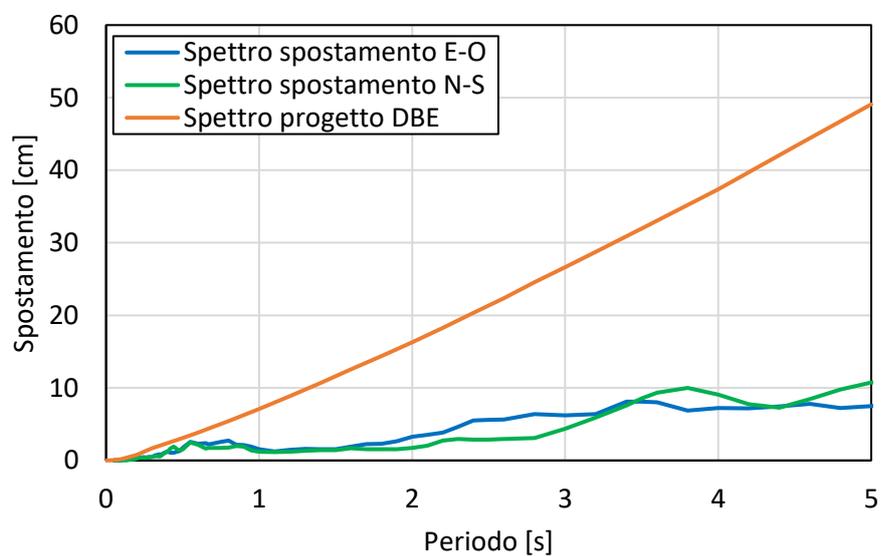
Di seguito vengono riportati gli spettri in accelerazione nelle direzioni Est-Ovest e Nord-Sud confrontati con i due spettri di accelerazione di progetto per quest'opera.

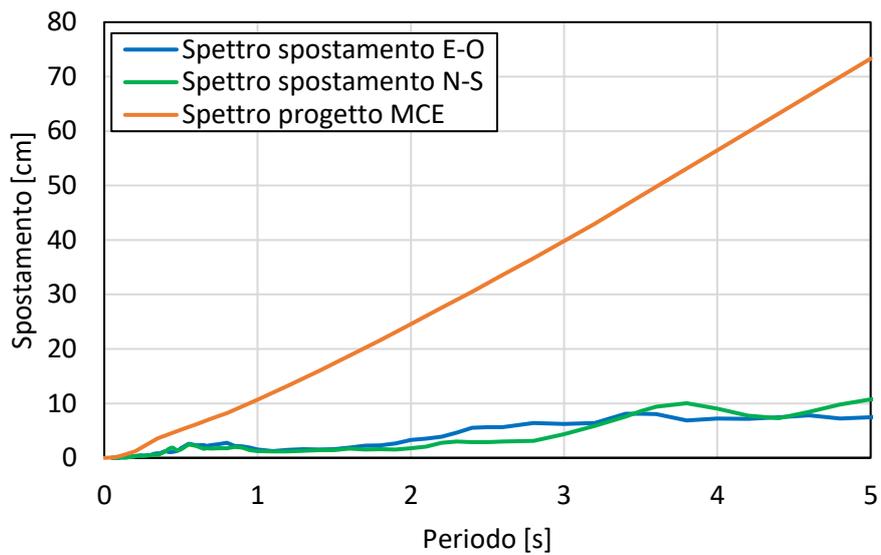




Come chiaramente visibile, gli spettri registrati di questo sisma sono nettamente inferiori sia allo spettro di progetto in DBE che MCE, nonostante sia la scossa più forte. Questo si spiega perché la stazione in oggetto si trova ad una discreta distanza dall'epicentro.

Di seguito vengono riportati i confronti degli spettri in spostamento:





Come ci si aspettava già dagli spettri precedenti la differenza tra gli spettri registrati e quelli di progetto è notevole, ciò fa presupporre che gli spostamenti ottenuti dall'analisi risulteranno molto piccoli e di poco significato.

6.2.2 Stazione 4631: magnitudo 7.5

Questa seconda stazione è sempre una delle più vicine all'ospedale di Elbistan, questa volta però il terremoto registrato è quello delle 13:24 con epicentro proprio vicino all'ospedale. La seguente immagine illustra l'inquadramento geografico di quanto appena descritto.

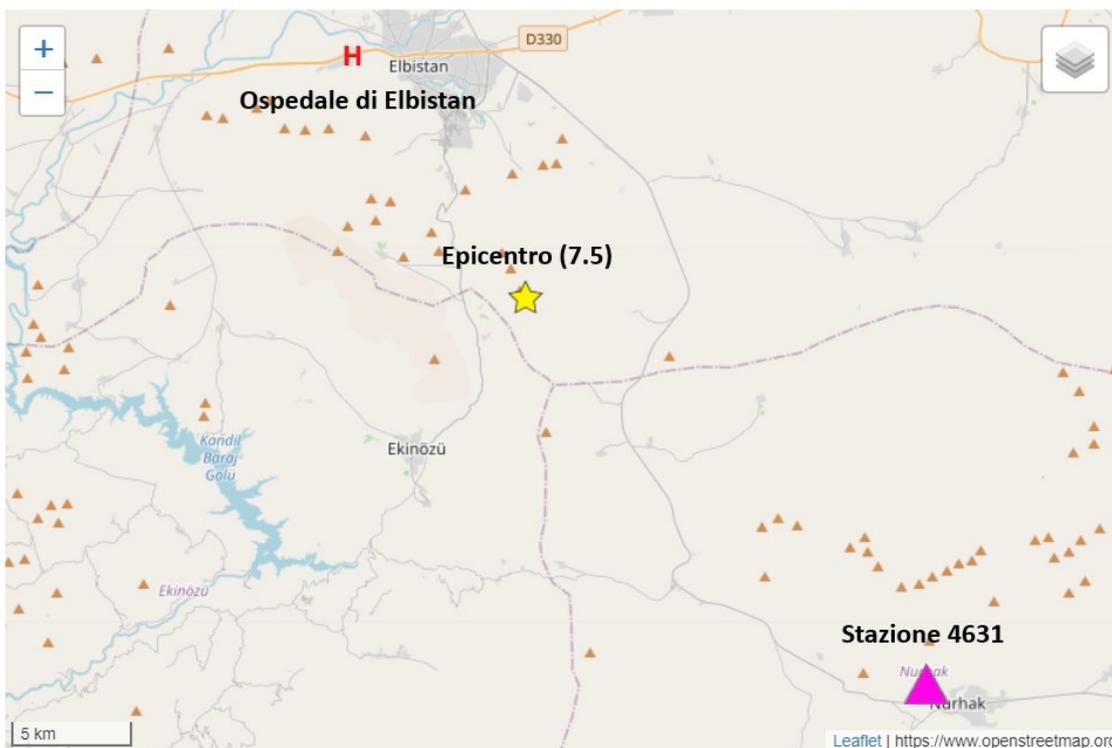
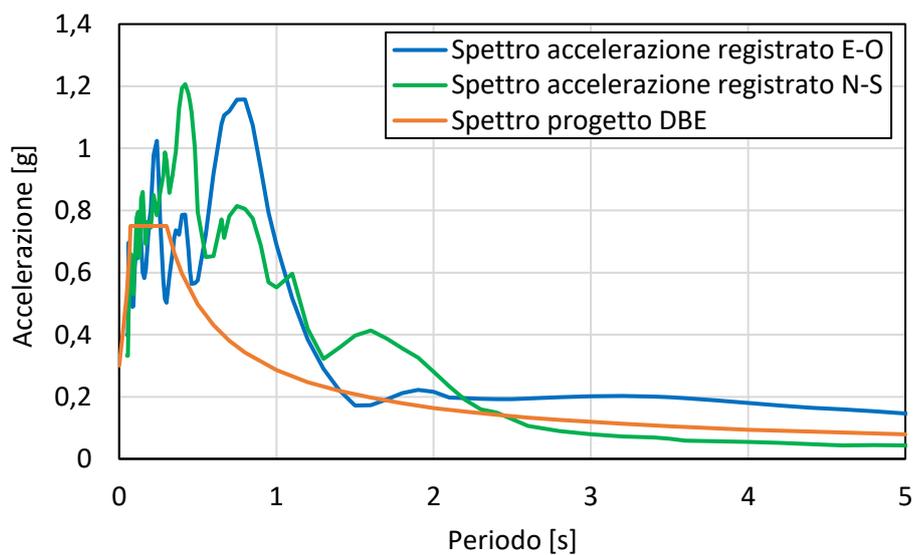
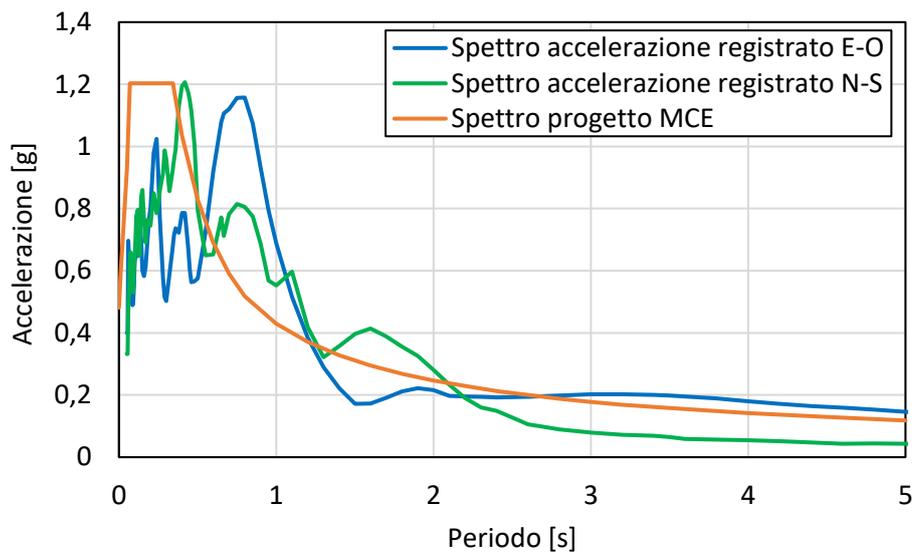


Figura 6-3: inquadramento geografico stazione 4631.

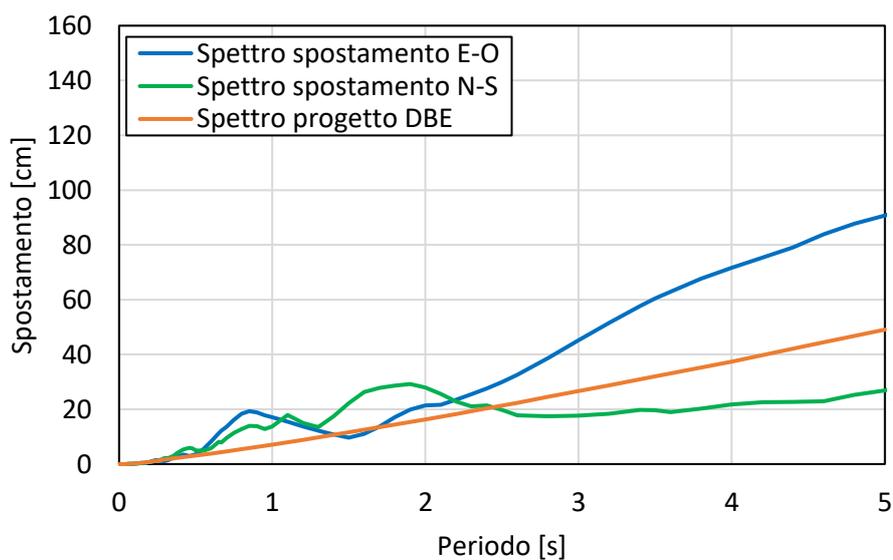
Di seguito vengono riportati gli spettri in accelerazione nelle direzioni Est-Ovest e Nord-Sud confrontati con i due spettri di accelerazione di progetto per quest'opera.

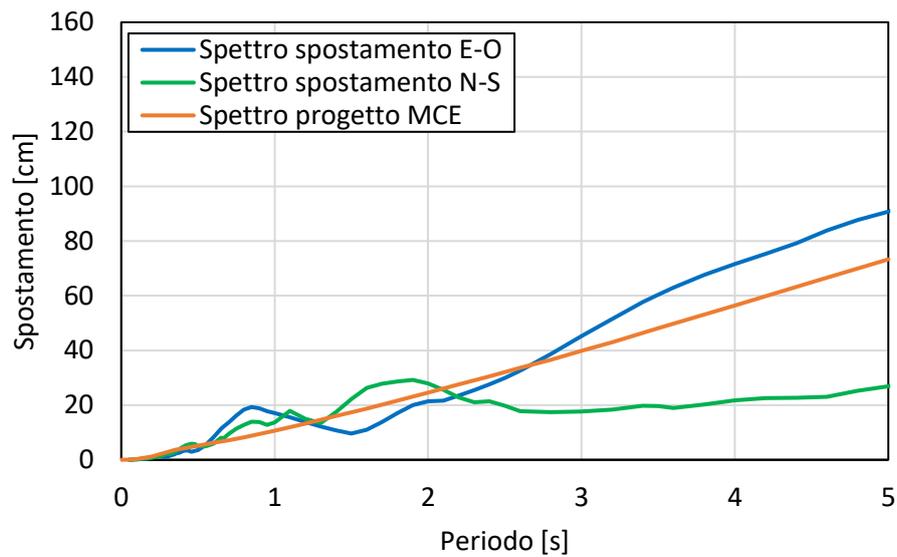




In questo secondo caso le registrazioni sono maggiori rispetto al primo, proprio perché la distanza dell'epicentro alla stazione è poca. Considerando il periodo dai 2,5 ai 4 secondi, si può notare che sia lo spettro DBE che MCE è contenuto all'interno dei valori della registrazione Est-Ovest e Nord-Sud. Questo mostra come ci sia una notevole differenza tra i valori di una direzione rispetto all'altra. I valori sono compresi tra un massimo di circa 0,25 g e un minimo di 0,5 g.

Di seguito vengono riportati i confronti degli spettri in spostamento:





Naturalmente lo stesso andamento lo si riscontra anche negli spettri in spostamento, dove si apprezza maggiormente la differenza nelle due registrazioni. I valori di spostamento sono compresi tra i 20 e 70 cm.

6.2.3 Stazione 4611: magnitudo 6.6

L'ultima stazione è la più lontana dall'ospedale delle 3 viste finora, ma è stata l'unica ad ottenere le registrazioni della scossa d'assestamento del primo sisma, più precisamente alle ore 04:28 del 06/02/2023.

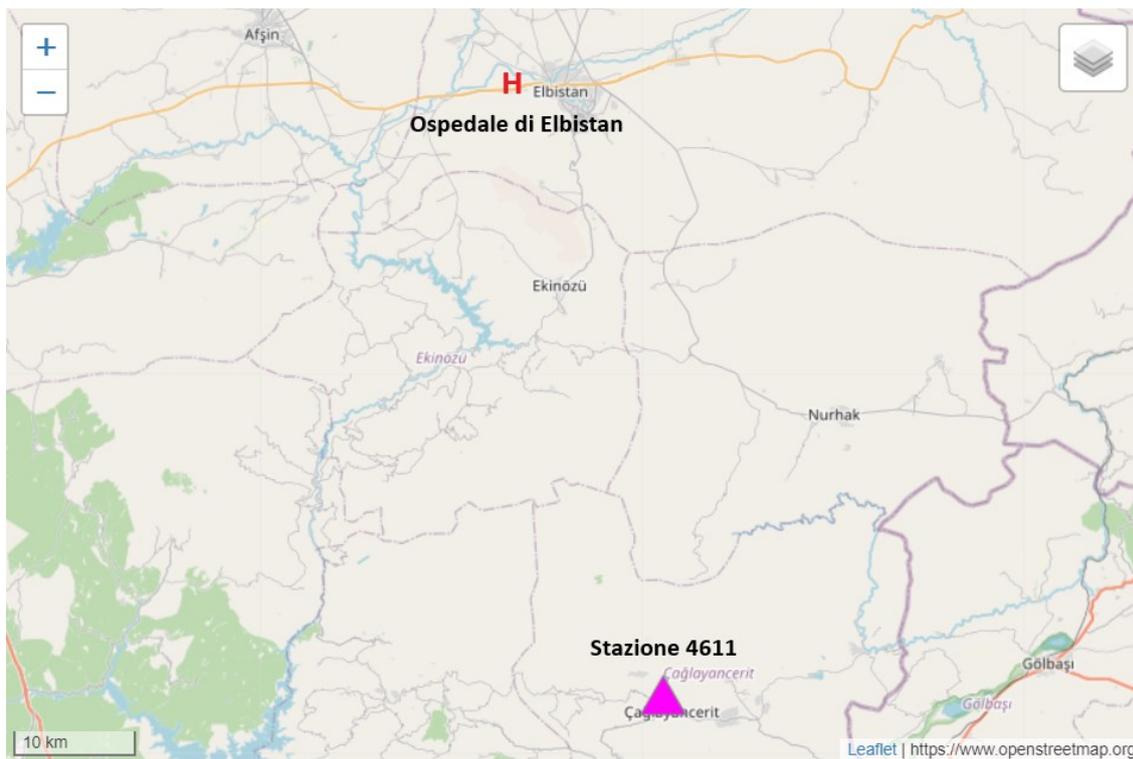
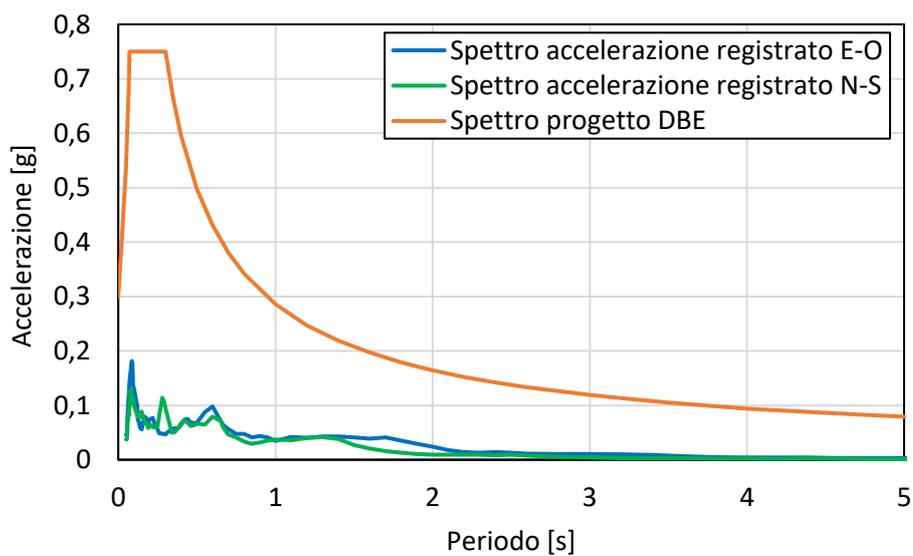
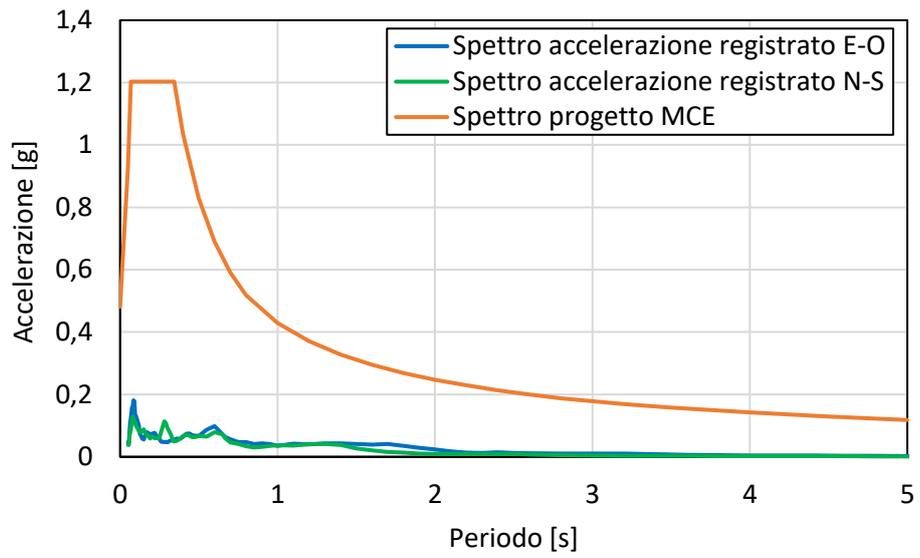


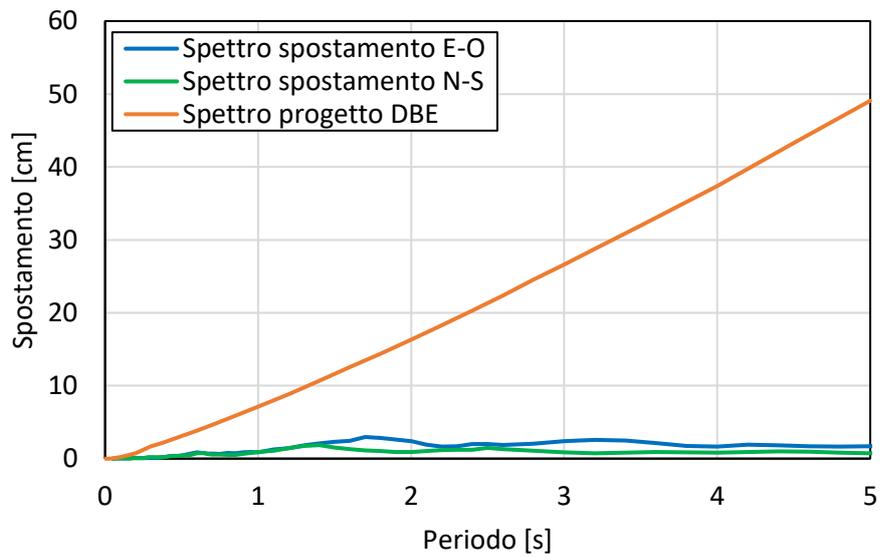
Figura 6-4: inquadramento geografico stazione 4611.

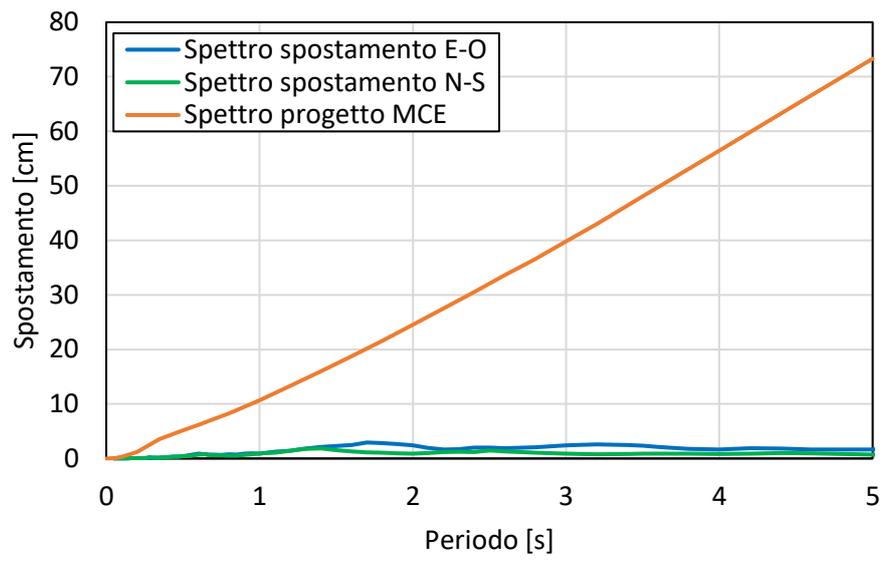
Questa registrazione assomiglia molto a quella registrata dalla stazione 4628 ma con valori abbastanza inferiori.





È chiaro come gli spettri di progetto siano nettamente maggiori rispetto a quelli forniti dalle registrazioni.





In ugual modo anche per gli spettri in spostamento.

6.3 Modello semplificato a 1 gdl

Come fatto in precedenza per il caso dell'ospedale di Adana, viene creato un modello con il software di calcolo SAP2000 ad un grado di libertà in direzione X e in direzione Y per andare a stimare in maniera qualitativa la risposta dell'edificio ai vari sismi applicati.

6.3.1 Descrizione del modello

Per costruire il modello si segue lo stesso procedimento usato per il modello ad un grado di libertà dell'ospedale di Adana, andando a creare due nodi collegati da un link che rappresenta il sistema di isolamento completo. Il nodo base (1) è incastrato e al nodo (2) viene applicata la massa dell'intero edificio. Dal momento che l'ospedale è composto da vari blocchi, si è scelto di concentrare l'analisi sul blocco A, il quale ha una massa che è:

$$\frac{301174 \text{ kN}}{9.81 \text{ m/s}^2} = 30701 \text{ ton.}$$

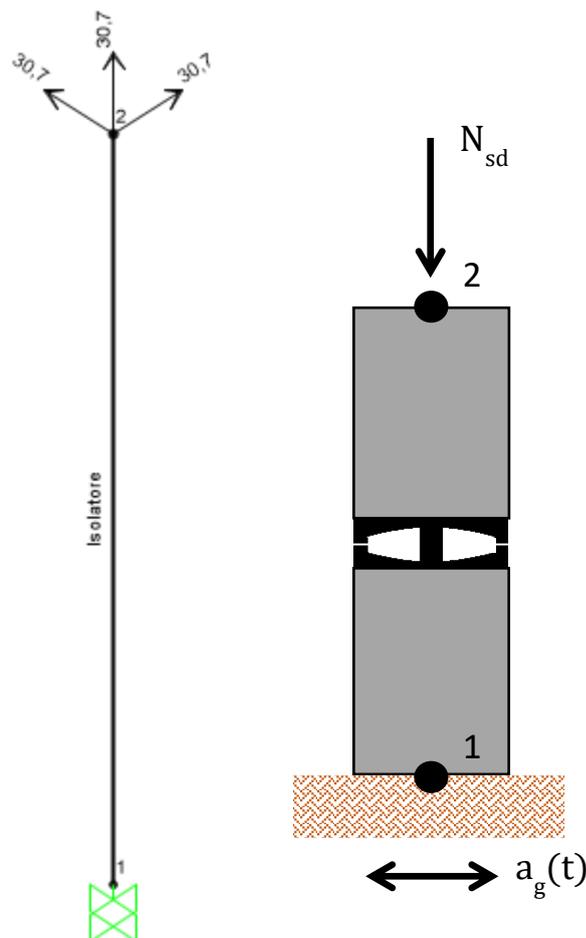
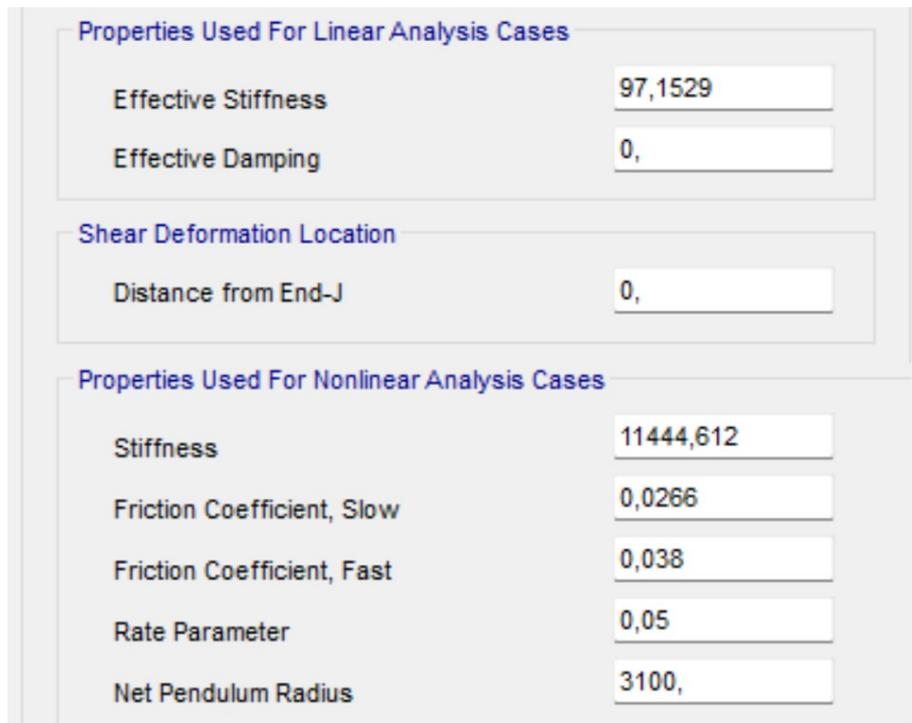


Figura 6-5: modello 1 gdl.

6.3.1.1 Modellazione degli isolatori

Per la rappresentazione degli isolatori a scorrimento a superficie curva, in SAP2000, si utilizza il link "Friction Isolator", tenendo conto degli accorgimenti detti al §5.3.1.1.

Quello che cambia rispetto al caso precedente sono i parametri che vanno a definire il comportamento dell'isolatore. Nel caso in esame si ha un carico pari a $N_{sd} = 301174 \text{ kN}$, il raggio di curvatura equivalente $R = 3,1 \text{ m}$, il coefficiente di attrito medio in corrispondenza del carico quasi permanente $\mu_{fast} = 3,8 \%$.



Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	97,1529
Effective Damping	0,

Shear Deformation Location	
Distance from End-J	0,

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	11444,612
Friction Coefficient, Slow	0,0266
Friction Coefficient, Fast	0,038
Rate Parameter	0,05
Net Pendulum Radius	3100,

Figura 6-6: proprietà del link friction isolator, in kN e mm.

Come valore per l'effective stiffness è stato inserito l'equivalente della rigidità del secondo ramo della bilineare, per i motivi spiegati al §5.3.1.1, quindi $N_{sd}/R = 97,1 \text{ kN/mm}$.

Per quanto riguarda, invece, la rigidità usata nel caso non lineare si inserisce il valore di rigidità del primo ramo, ovvero $N_{sd}\mu_{fast} = 11444 \text{ kN/mm}$.

6.3.1.2 Inserimento accelerogrammi

A questo punto si procede con l'inserimento degli accelerogrammi e di seguito viene riportato un esempio.

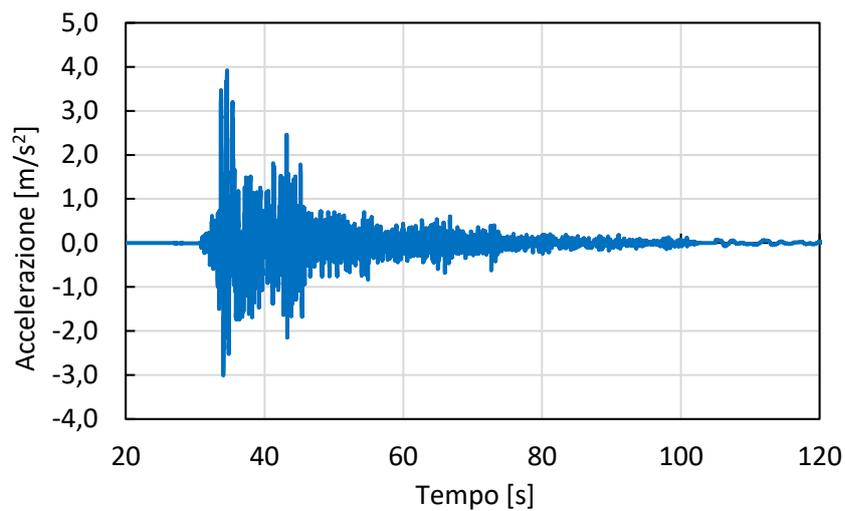


Figura 6-7: accelerogramma stazione 4631 magnitudo 7.5, direzione Est-Ovest.

Ogni accelerogramma, sia in direzione Est-Ovest che Nord-Sud, registrato nelle stazioni precedentemente indicate viene inserito all'interno del programma in modo da poterli utilizzare per le analisi dinamiche.

6.3.1.3 Definizione delle analisi

Anche per l'ospedale di Elbistan si va ad effettuare un'analisi time history ad integrazione diretta utilizzando un intervallo temporale tra step successivi pari a 0,005 secondi.

Per fare in modo che l'analisi inizi da uno stato in cui la gravità agisce già sull'elemento, si va a fare un'analisi statica non lineare in cui viene applicato il solo peso proprio dell'edificio.

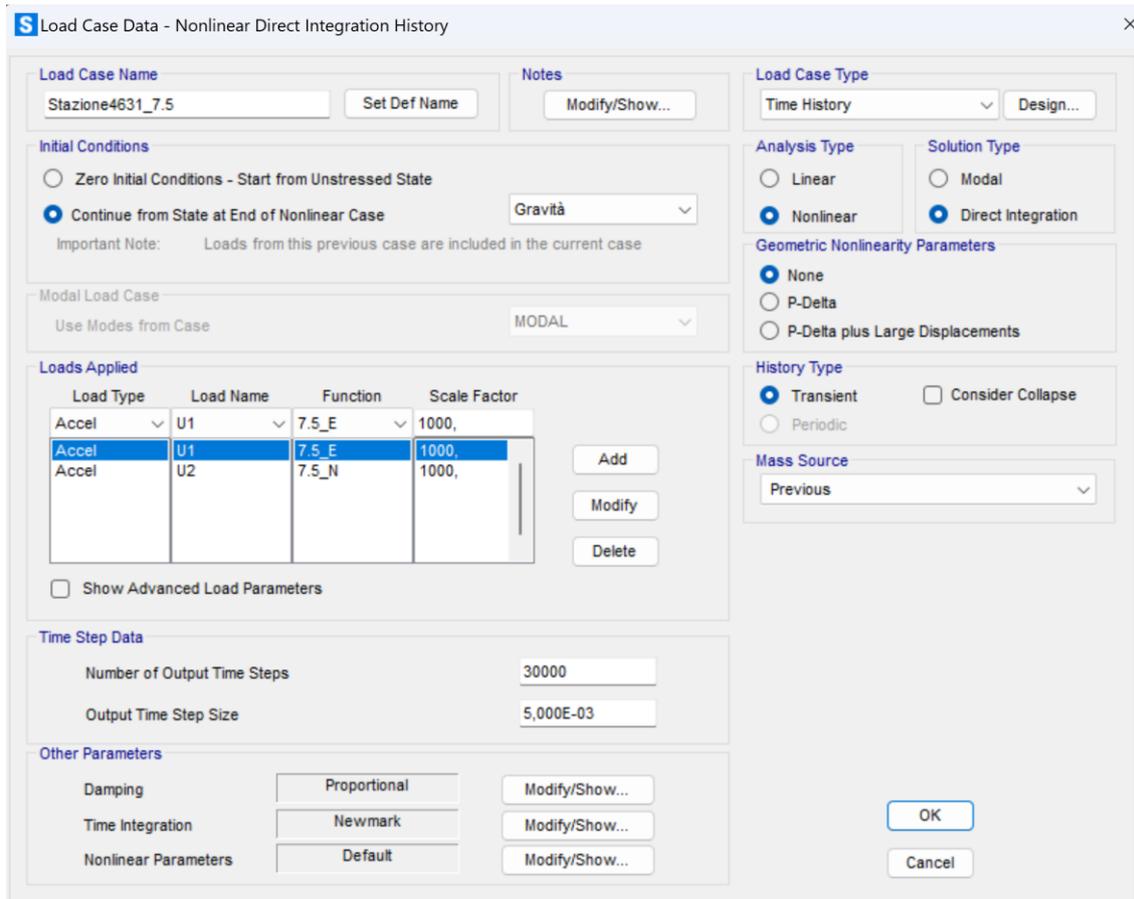


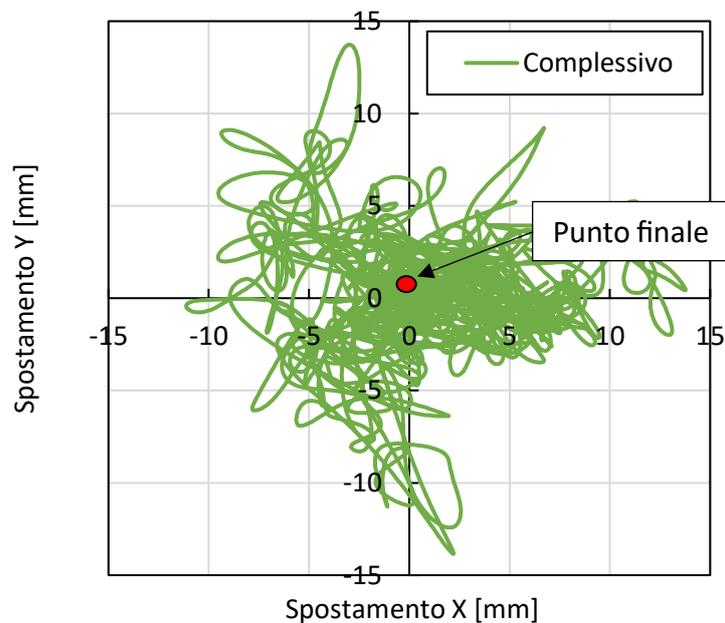
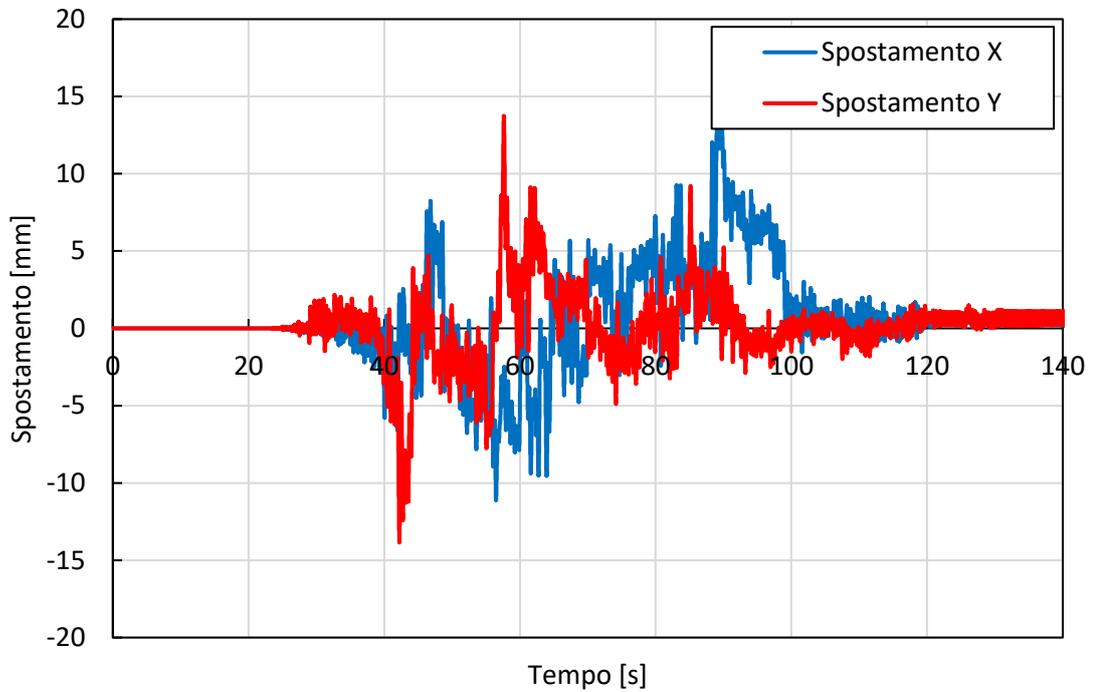
Figura 6-8: esempio di analisi al passo, caso stazione 4631, magnitudo 7.5.

6.3.2 Risultati ottenuti

Di seguito si riportano i risultati ottenuti dal modello semplificato in termini di spostamenti e grafici forza-spostamento dell'intero sistema di isolamento schematizzato in un solo elemento link.

6.3.2.1 Magnitudo 7.8

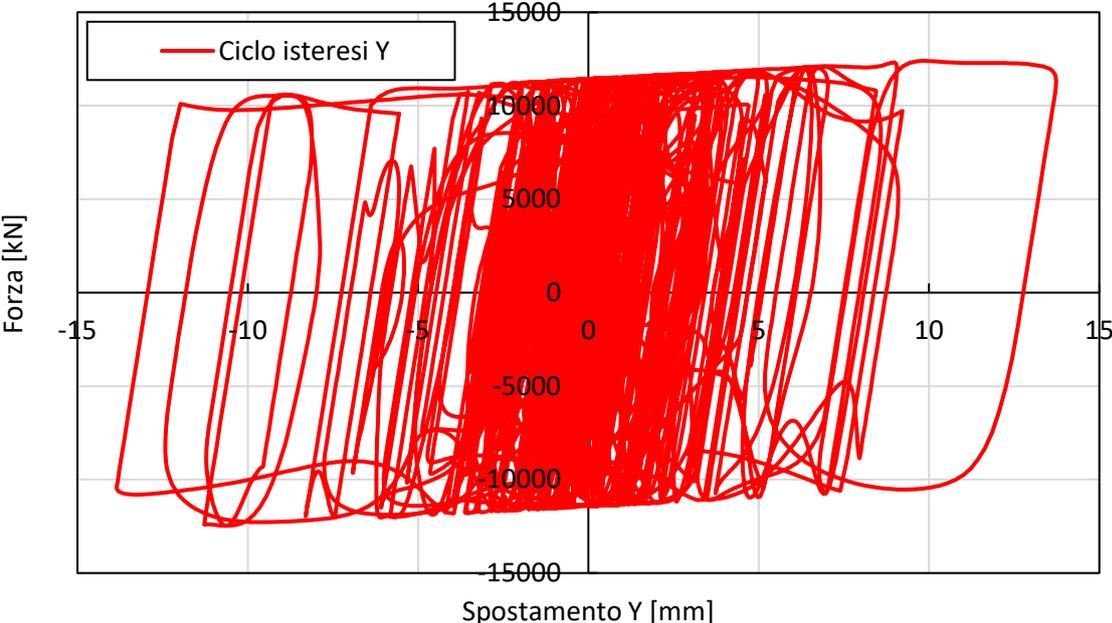
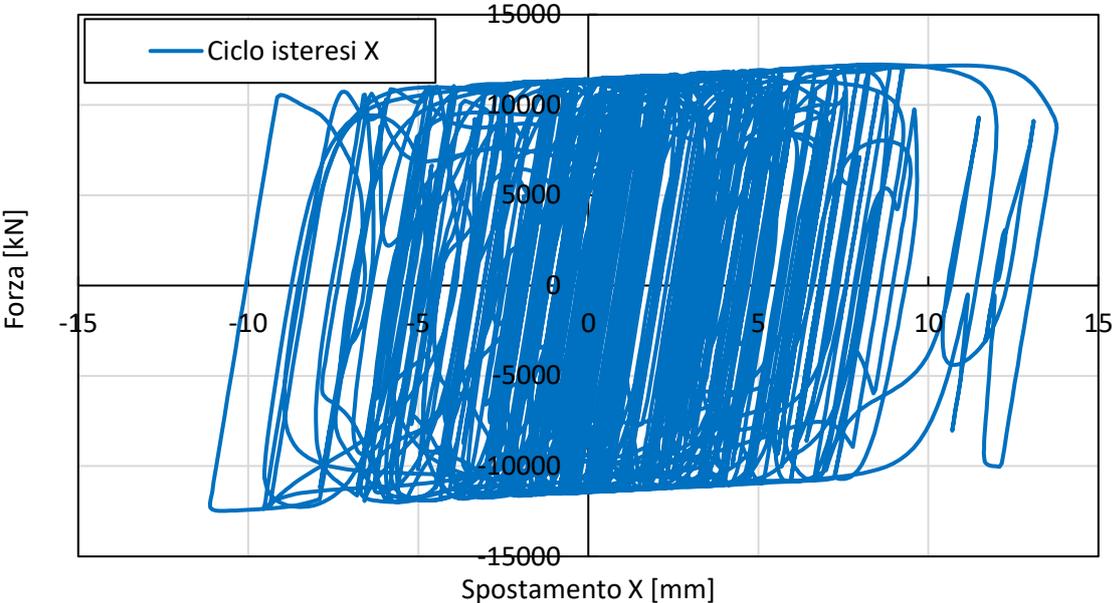
Di seguito viene riportato il grafico degli spostamenti nelle direzioni X e Y del nodo in testa all'isolatore.



Si nota immediatamente che gli spostamenti sono molto piccoli, in particolare si ha uno spostamento massimo di 13,8 mm in direzione X e di 13,9 mm in direzione Y e uno

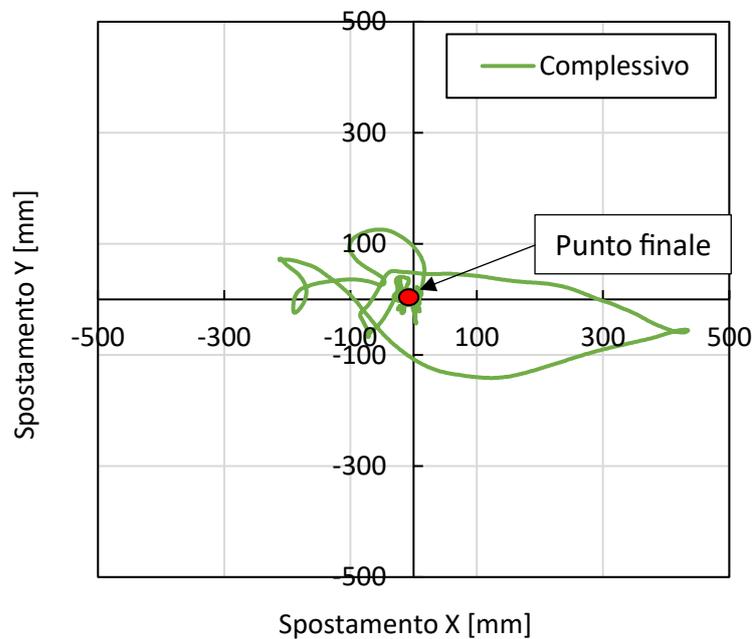
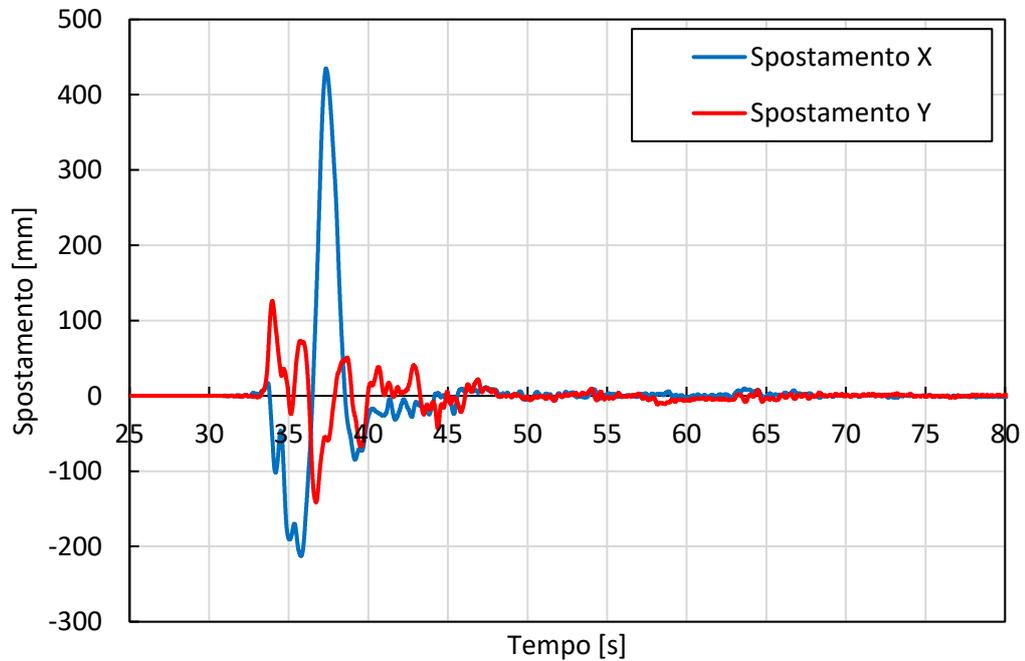
spostamento residuo praticamente nullo. Tale risultato si può spiegare col fatto che l'ospedale in esame è piuttosto distante dall'epicentro del sisma.

Di seguito si riporta invece il ciclo di isteresi per il sistema di isolamento nelle due direzioni.



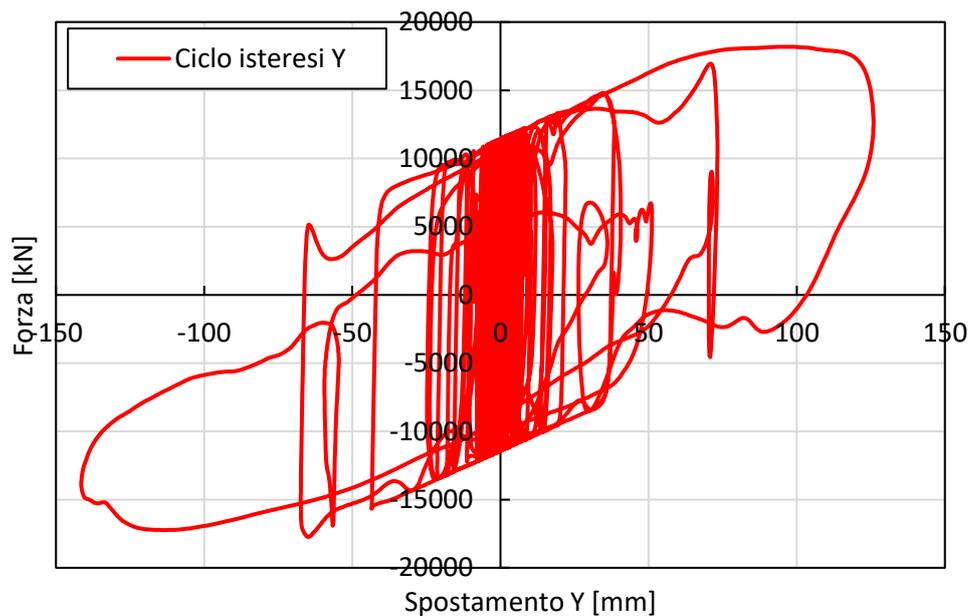
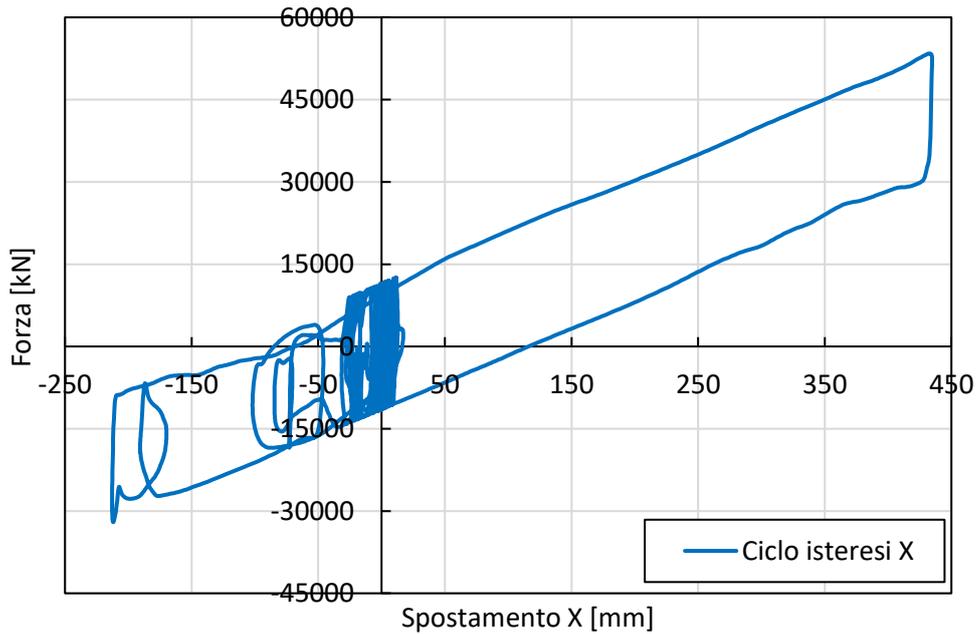
6.3.2.2 Magnitudo 7.5

Per il sisma 7.5, essendo che l'epicentro del terremoto si trova vicino all'ospedale di Elbistan, si hanno degli spostamenti elevati, come si indicato nei seguenti grafici.



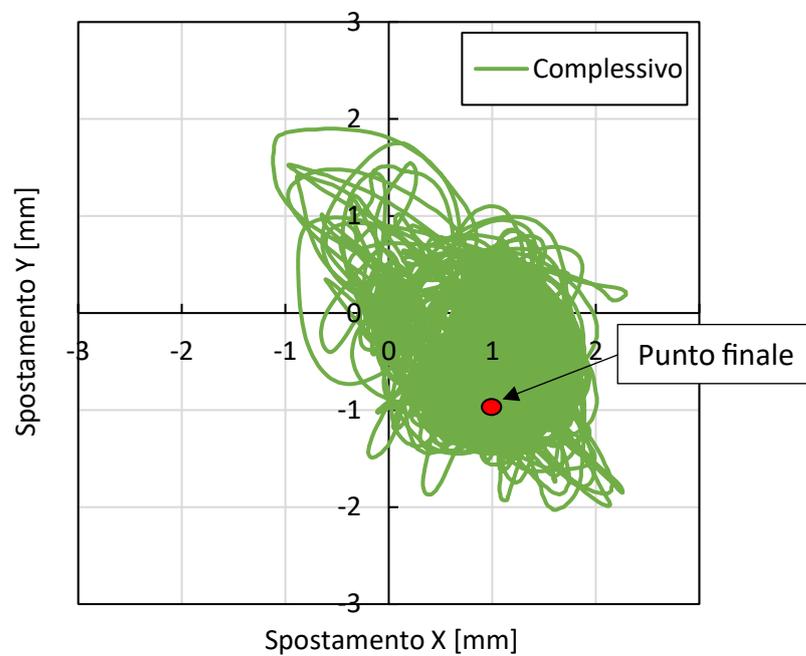
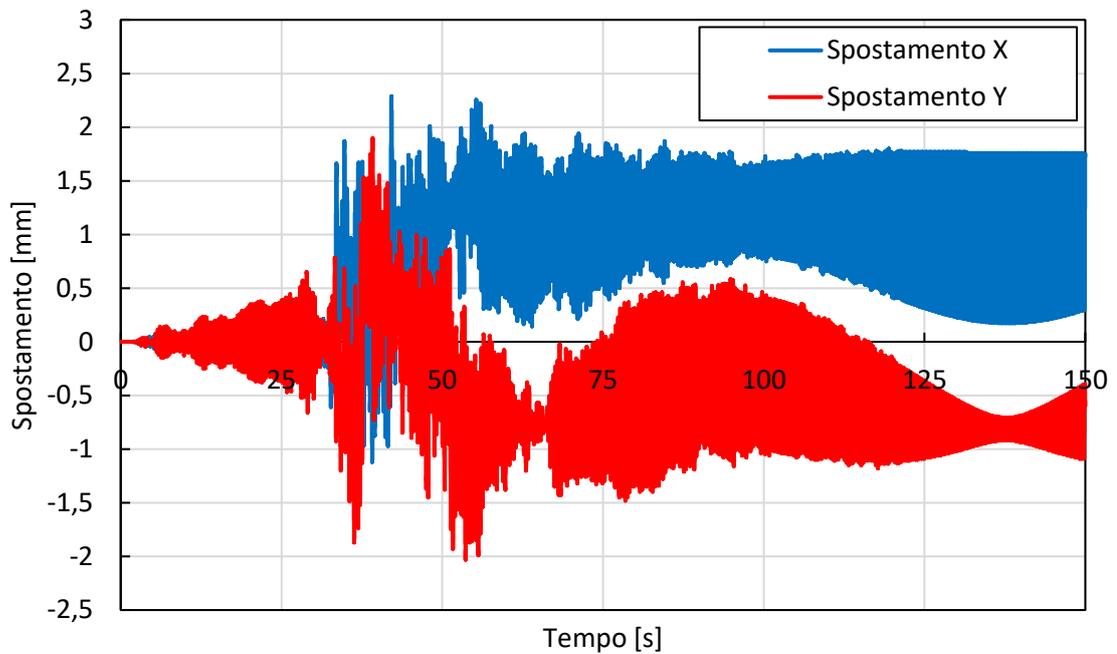
Dal grafico che mostra gli spostamenti nelle due direzioni in funzione del tempo si nota che a 37 secondi si ha un picco molto grande nella direzione X al quale corrisponde uno

spostamento di 43 cm; mentre per quanto riguarda la direzione Y si ha uno spostamento massimo di 14 cm. Ricordando che le caratteristiche degli isolatori installati nell'ospedale di Elbistan hanno una capacità di spostamento massimo pari a ± 300 mm, è chiaro che tale capacità non è stata rispettata. Quindi è possibile affermare che il sistema di isolamento progettato per l'ospedale in esame non è sufficiente per eventi sismici di questa entità. Di seguito si riportano i cicli di isteresi nelle due direzioni per il sisma 7.5, ed anche qui si nota nella direzione X il picco nel quale lo spostamento risulta pari a 43 cm.

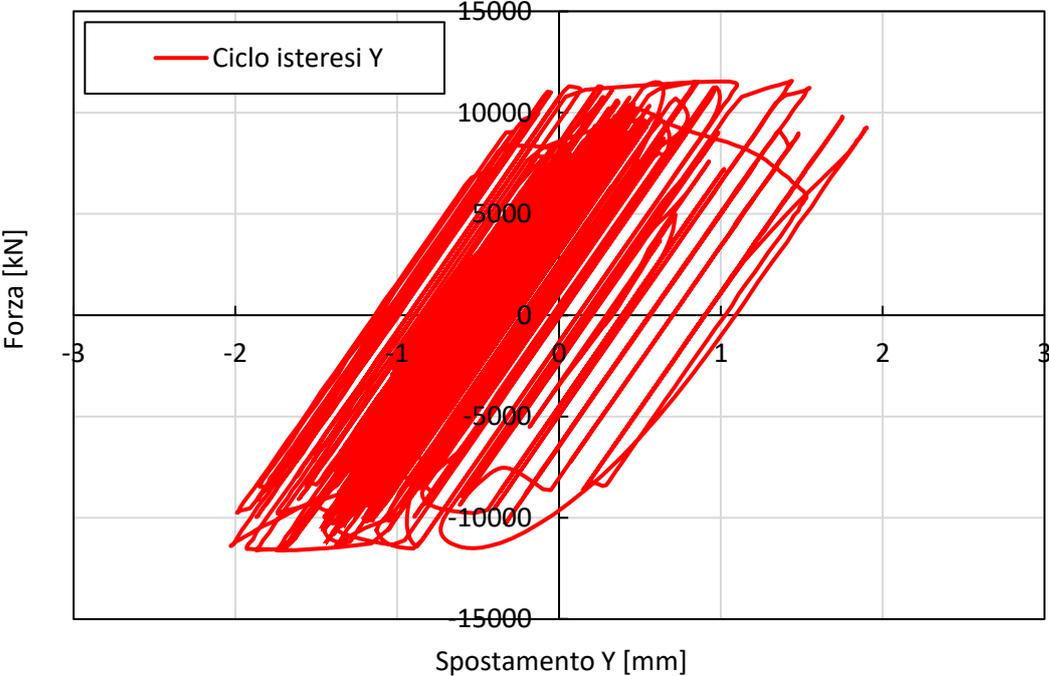
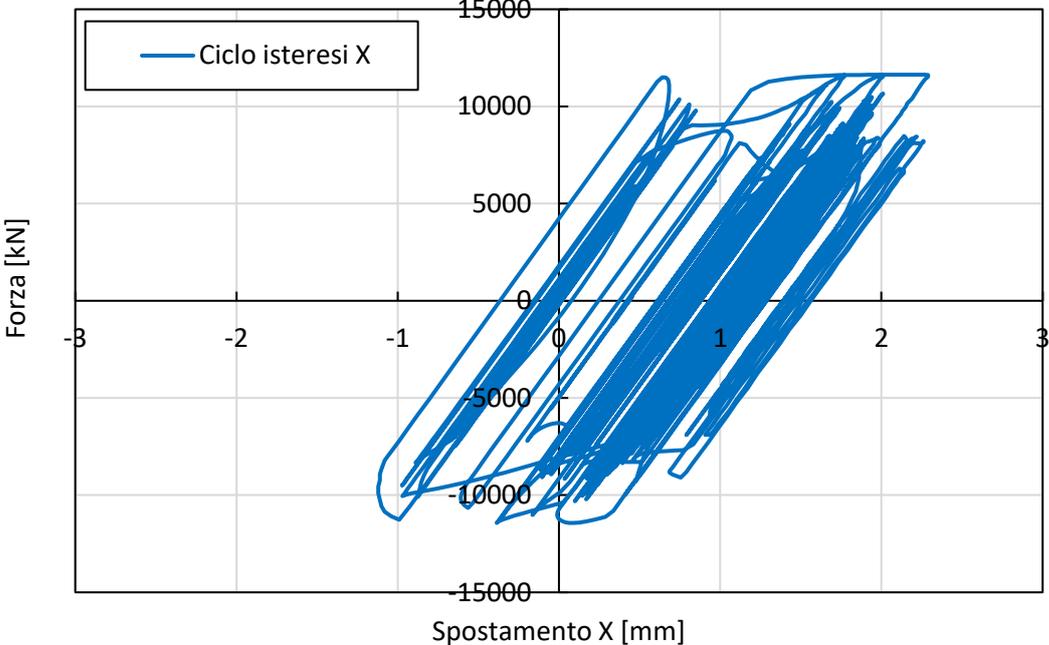


6.3.2.3 Magnitudo 6.6

Questo sisma risulta di poco interesse in quanto, essendo la scossa di assestamento del sisma 7.8, è di poca intensità. Esso, infatti, come mostrato nei seguenti grafici, provoca spostamenti di pochi millimetri.



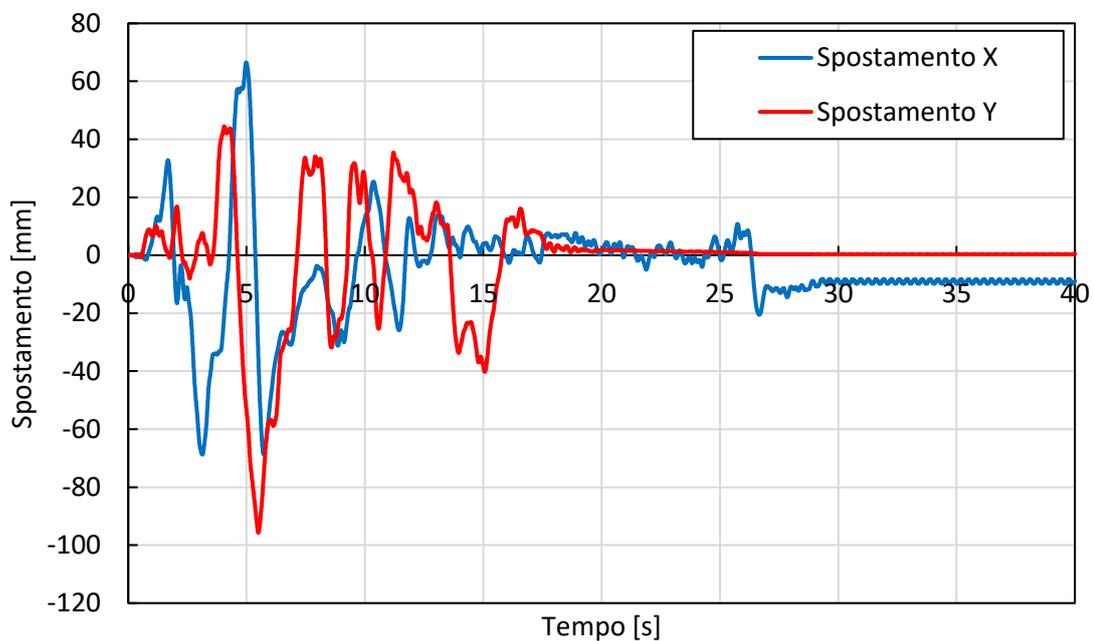
Anche dai cicli di isteresi si nota che il sistema di isolamento è stato poco sollecitato, infatti essi risultano pressoché lineari, a dimostrazione del fatto che la forza sollecitante non è stata sufficiente a passare al ramo con rigidità minore e spostamenti maggiori.

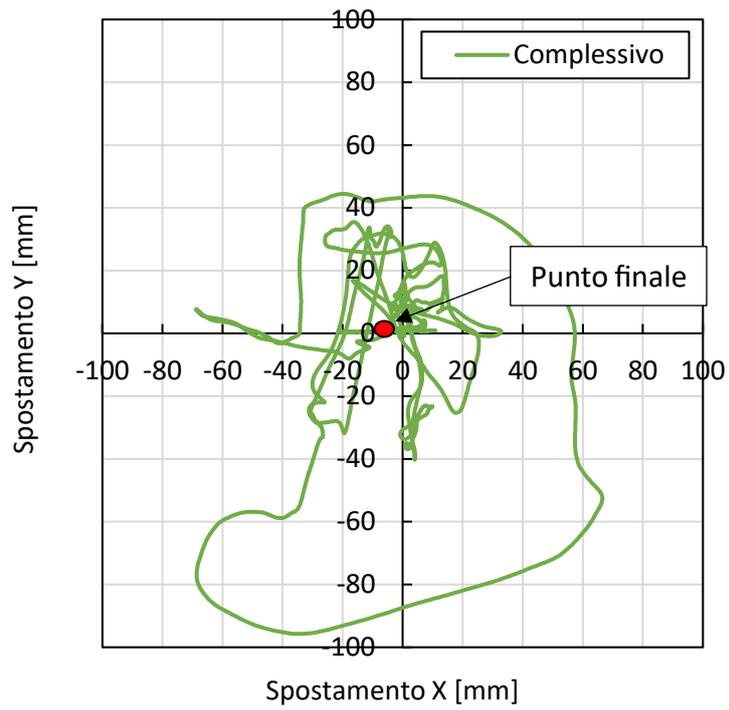


6.3.2.4 DBE

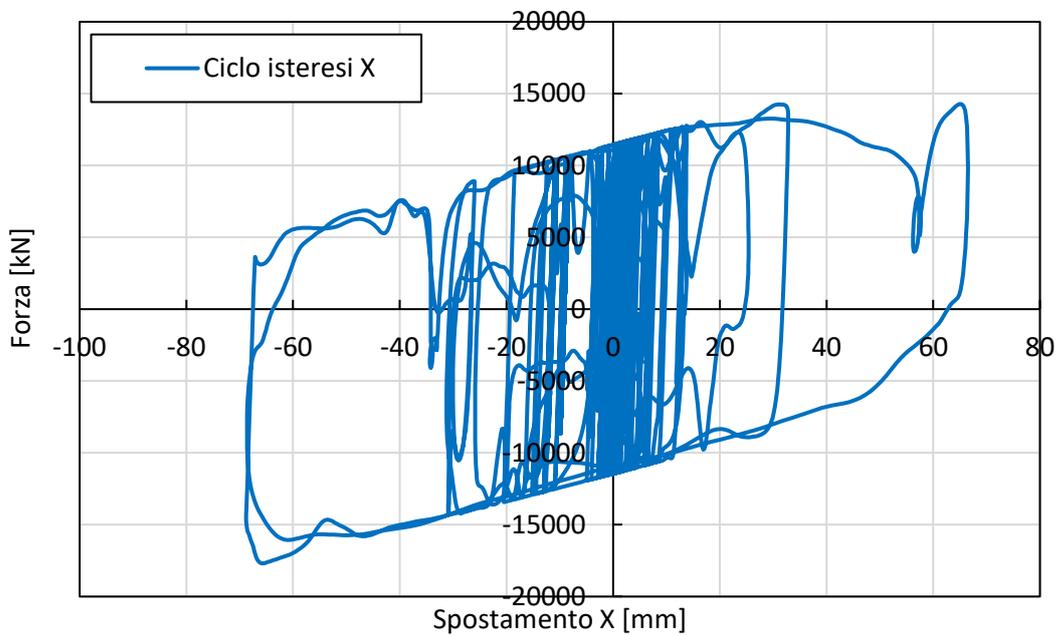
Per ottenere gli accelerogrammi da applicare alla struttura nel caso DBE, come fatto anche per l'ospedale di Adana, sono stati generati due accelerogrammi spettro compatibili dallo spettro DBE. Uno è stato creato direttamente con SAP2000 ed uno con il programma SIMQKE, e sono stati applicati nelle due direzioni.

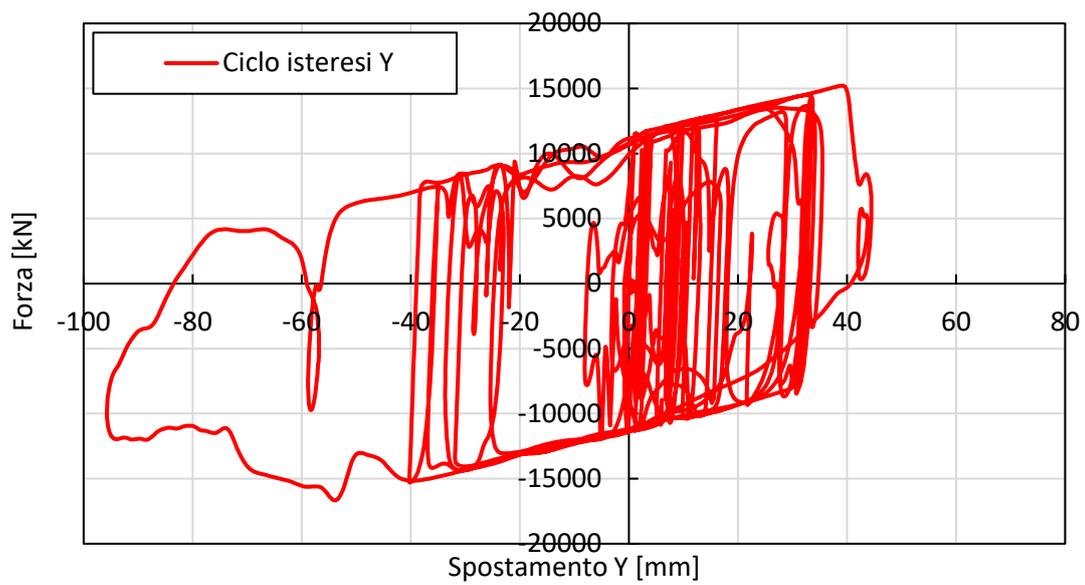
Gli spostamenti che si ottengono da questa combinazione sono inferiori solo al caso con sisma 7.5, negli altri due casi sopra descritti infatti si hanno spostamenti massimi inferiori di quelli ottenuti applicando l'accelerogramma di progetto DBE.





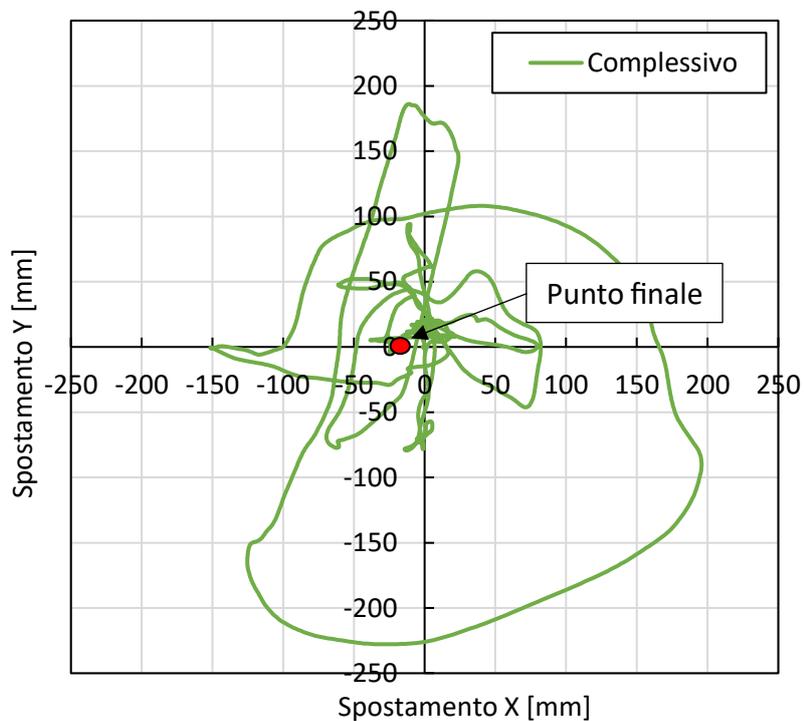
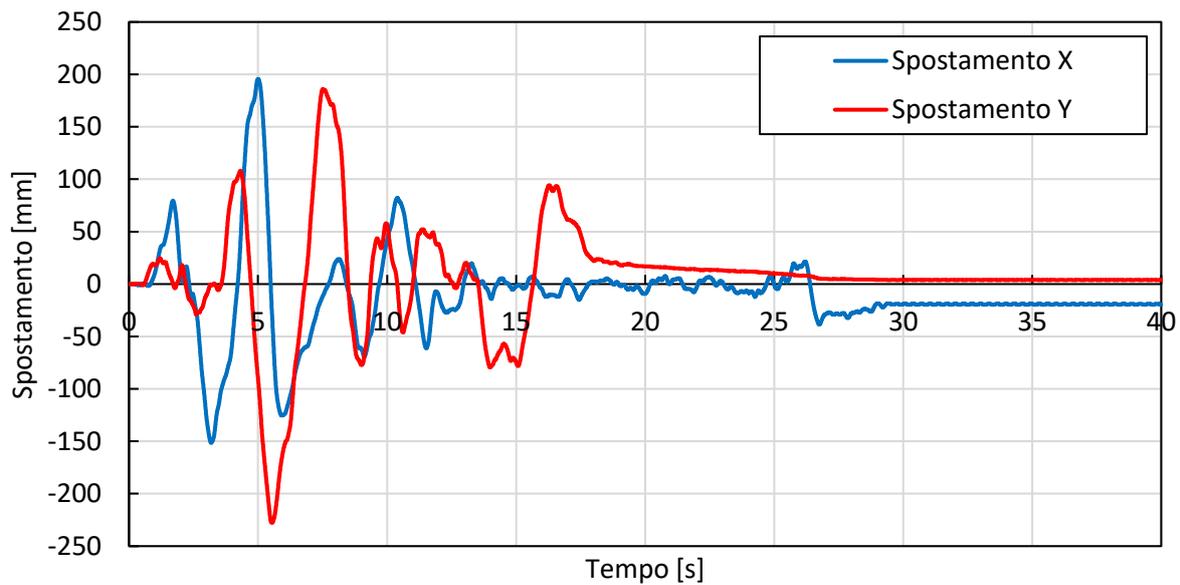
I cicli di isteresi che si ottengono per questo caso mostrano che comunque il punto di cambio pendenza nel grafico forza-spostamento è stato raggiunto.



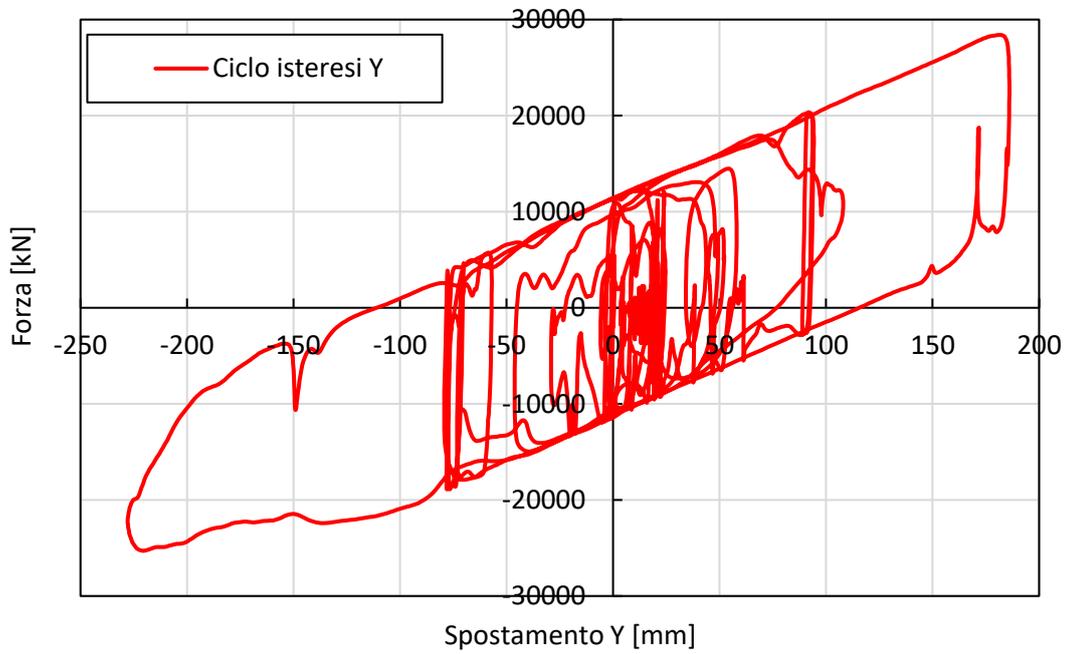
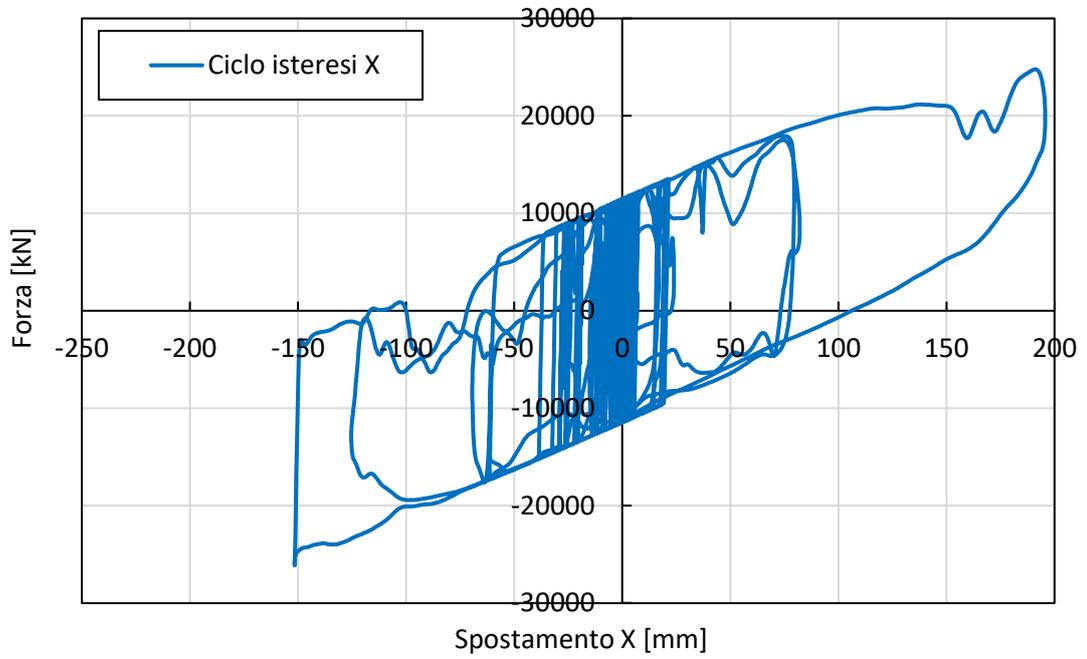


6.3.2.5 MCE

Il caso MCE è quello utilizzato per la determinazione della capacità massima degli isolatori, infatti, in questo caso si hanno degli spostamenti massimi di 196 mm in direzione X e di 228 mm in direzione Y. Come abbiamo però visto in precedenza questi valori risultano comunque minori del caso del sisma 7.5, il quale eccedeva la capacità di spostamento dell'isolatore.



Di seguito si riportano anche i cicli di isteresi nelle due direzioni X e Y per il caso di sisma di progetto MCE.

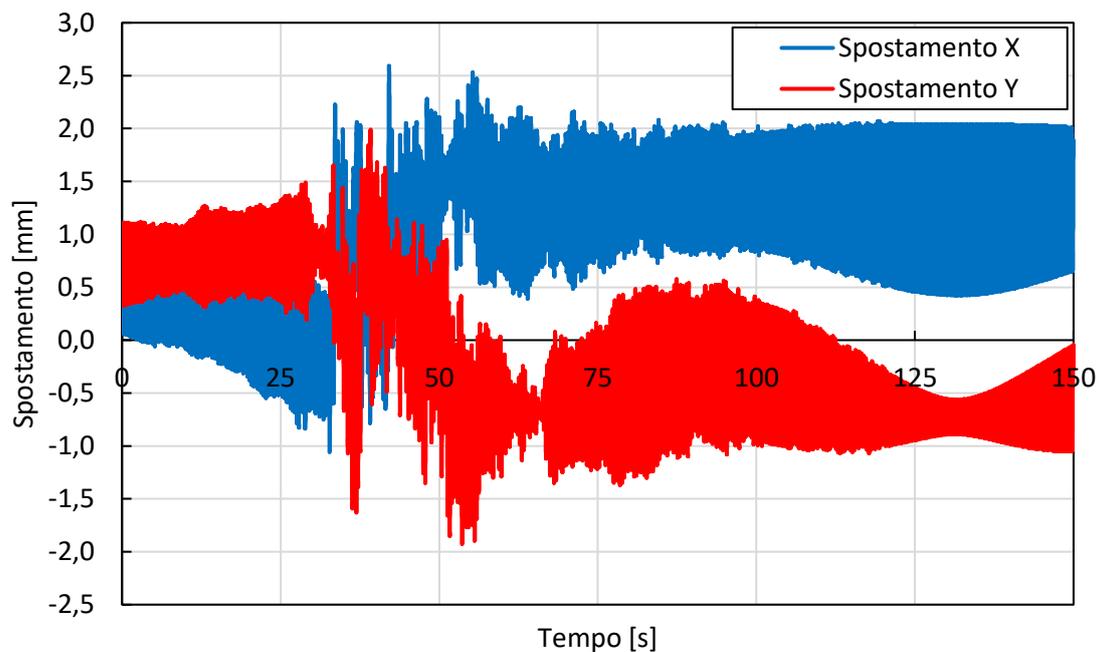


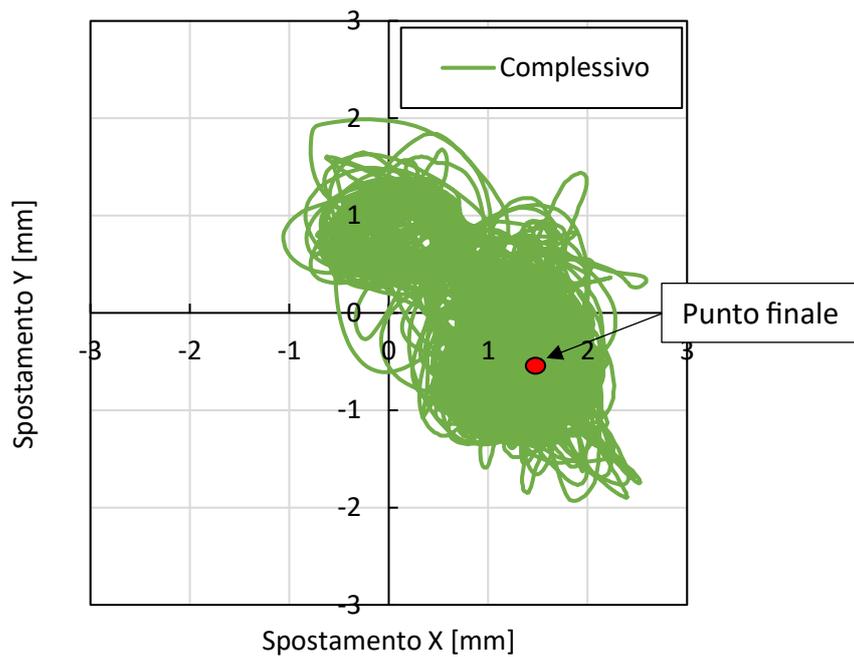
6.3.2.6 Ordine temporale

Si valuta ora gli spostamenti ottenuti andando ad applicare al modello i tre sismi registrati in ordine cronologico, in modo da valutare lo spostamento residuo del sistema dopo che è stato sottoposto a tutti gli eventi sismici.

Come già detto al capitolo §5.3.2.6 per l'ospedale di Adana, l'ordine temporale in cui si sono susseguiti i vari sismi è: per primo quello con magnitudo 7.8, poi il 6.6 e per ultimo il 7.5.

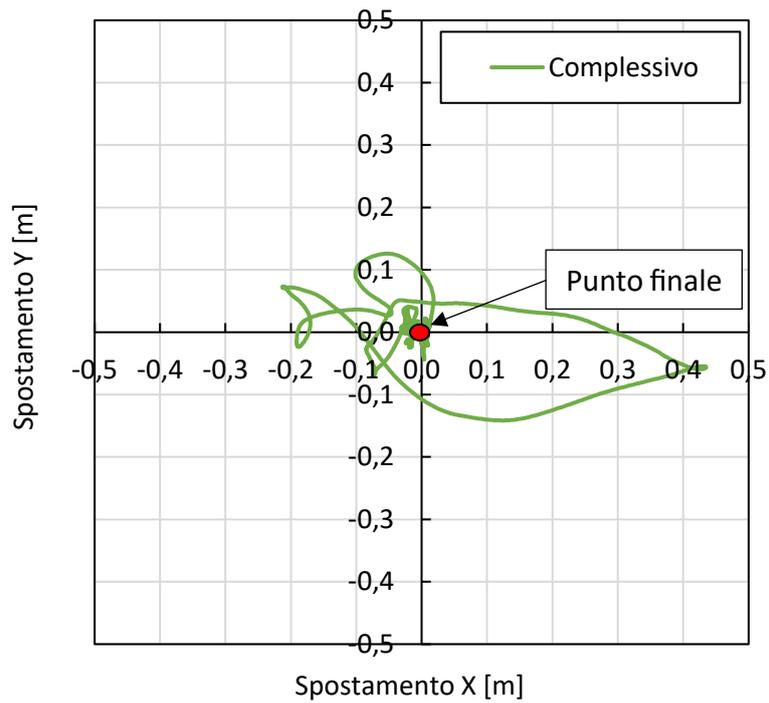
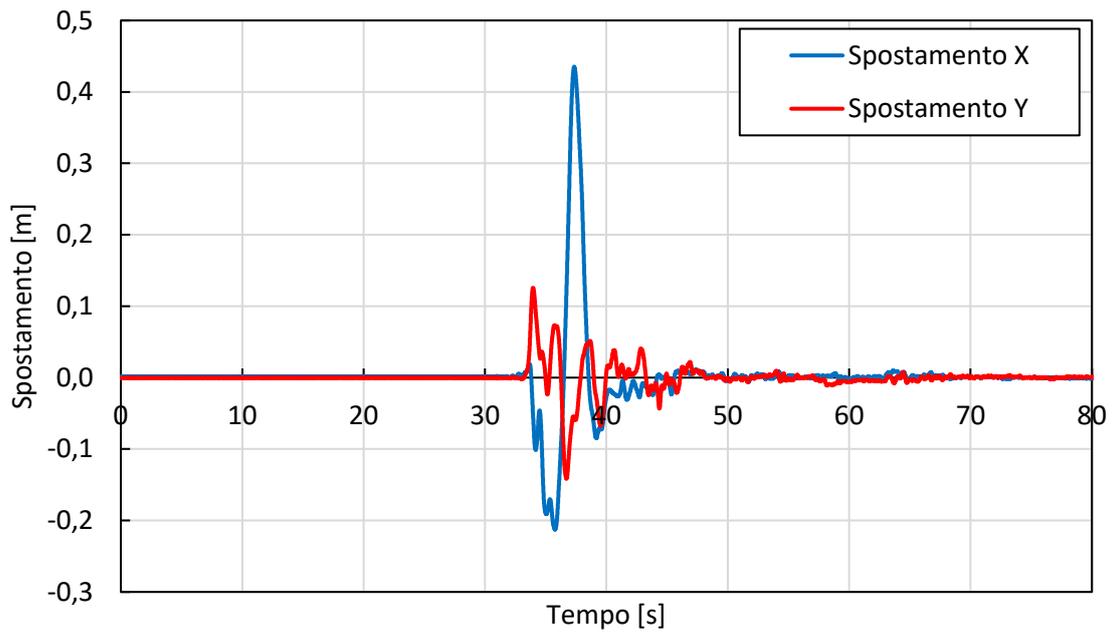
Per quanto riguarda il primo si fa riferimento a quanto detto al capitolo §6.3.2.1, dal momento che la condizione iniziale è appunto quella di isolatori che partono da uno spostamento nullo. Ora, prendendo come condizione di partenza l'isolatore con spostamento residuo pari allo spostamento finale del caso 7.8, si applica il sisma 6.6 e si ottengono i seguenti risultati.





Dai grafici sopra riportati si nota che l'andamento nel tempo dello spostamento nelle due direzioni è molto simile a prima, differenza fatta per i primi 50 secondi, nei quali si nota il fatto di aver cambiato le condizioni iniziali del sisma. Gli spostamenti sono comunque molto piccoli.

Usando come condizione iniziale il risultato dell'analisi fatta per il sisma 6.6 si applica ora il sisma 7.5.



Le differenze rispetto al caso in cui si partiva dalle condizioni iniziali sono pressoché nulle. Infatti, dal momento che gli spostamenti provocati dal sisma 7.5 arrivano a valori superiori ai 40 cm, gli spostamenti residui del sisma precedente che erano dell'ordine del millimetro non influenzano significativamente l'analisi.

7 CASO STUDIO: ANALISI PARAMETRICA ISOLATORI E DISSIPATORI ACCOPPIATI

7.1 Introduzione

L'obiettivo di questo caso studio è quello di eseguire un'analisi parametrica, utilizzando il modello ad 1 gdl e quello completo dell'ospedale di Adana, accoppiando dispositivi di isolamento a doppia superficie curva con dissipatori viscosi. Per far ciò si è considerata una soluzione detta "base", in cui sono presenti solamente i dispositivi a doppia superficie curva con raggio 5 metri e attrito al 8%, da cui si è ricavato uno spostamento massimo dell'edificio. Successivamente sono stati inseriti i dissipatori viscosi, per questi elementi si è considerato l'esponente $\alpha = 0,15$ fissato, mentre il coefficiente C è stato fatto variare. A questo punto sono state trovate diverse soluzioni, al variare del coefficiente di attrito dei doppi pendoli e del coefficiente C dei dissipatori, tali che portassero ad avere lo stesso spostamento massimo della soluzione base. Tutto ciò viene valutato nel modello semplice ad 1 grado di libertà e considerando gli accelerogrammi registrati del sisma 7.8, del 06/02/2023 con epicentro vicino alla città di Gaziantep, come di progetto a MCE. In seguito, viene fatta l'analisi anche nel modello completo, sia con accelerogrammi in MCE, che in DBE, ovvero ridotti di un fattore di 1,5 come descritto nelle normative europee. I due risultati ottenuti nei due casi vengono confrontati con la soluzione base: il primo vede un confronto sugli spostamenti massimi dei dispositivi e sull'energia dissipata; il secondo, invece, fa riferimento alla sovrastruttura e vengono quindi confrontati il taglio alla base, il drift interpiano e le accelerazioni di piano.

7.2 Stazione 4615: magnitudo 7.8

Questa stazione è una delle più vicine all'epicentro del terremoto di Gaziantep. È stata scelta la registrazione di questa stazione in quanto, nonostante la PGA non sia la massima rilevata, presenta un'alta domanda in spostamento per alti periodi, quindi, risulta più gravosa per il caso in esame.

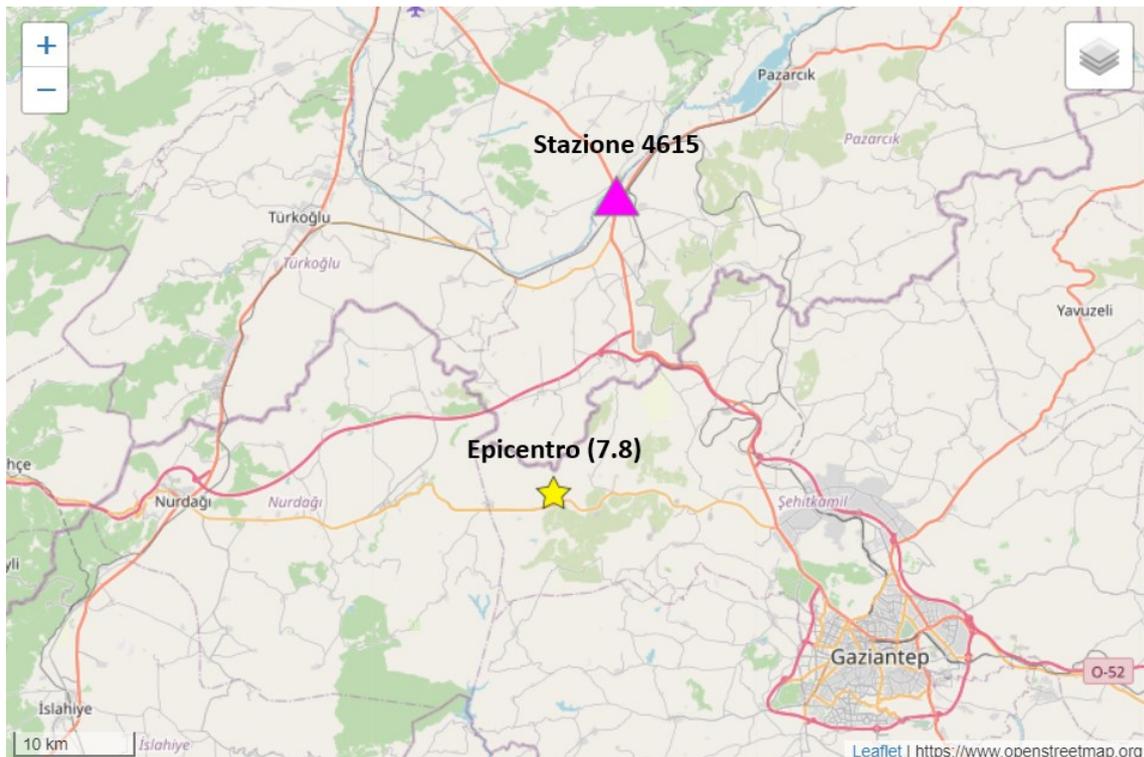
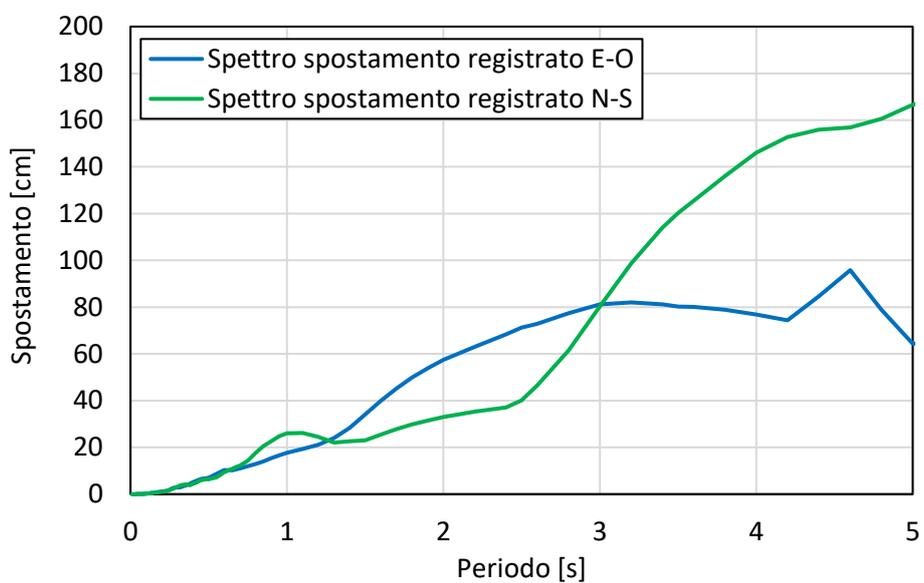
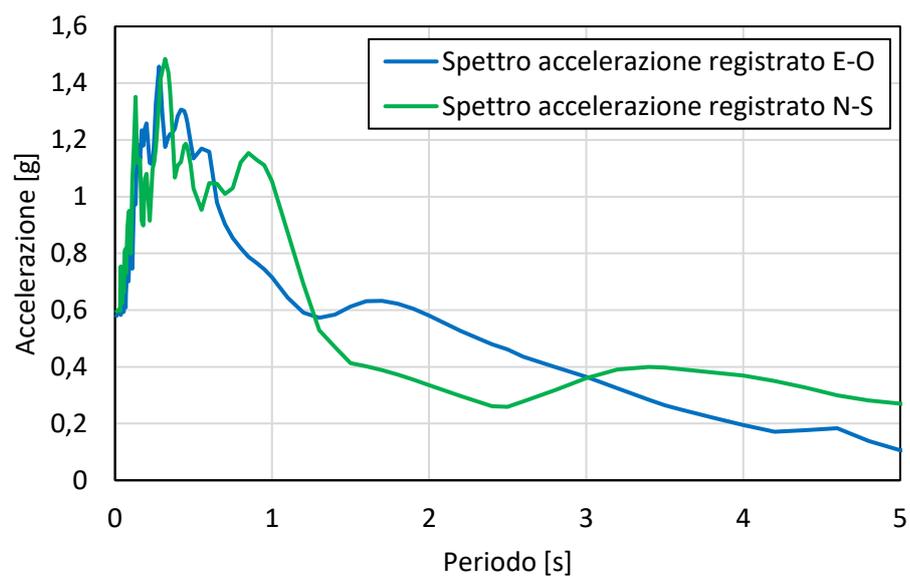


Figura 7-1: inquadramento geografico stazione 4615.

I dati relativi a questo sisma sono stati ricercati nel sito ESM Database (<https://esm-db.eu/>), il quale ha come fornitore di dati molti istituti internazionali, tra i quali l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e Turkish National Strong Motion Network (TNSMN). Il sisma registrato da questa stazione è il più forte registrato, più precisamente il 06/02/2023 alle ore 4:17 con epicentro vicino alla città di Gaziantep. Di seguito vengono riportati i grafici degli spettri in accelerazione e in spostamento.



Questi grafici rappresentano il sisma percepito in una stazione vicino l'epicentro, perciò, verranno utilizzati come ipotesi per un analogo ospedale soggetto a questo sisma per un possibile progetto di miglioramento del sistema di isolamento sismico. Come si può facilmente notare dal secondo grafico, la domanda in spostamento attorno tra i 2,5 e 4 secondi è molto maggiore di quelle viste in precedenza, con picchi fino a 150 cm di spostamento nella direzione Nord-Sud.

7.3 Modello semplificato 1 gdl: scelta dei parametri

Il modello semplificato ad 1 gdl è lo stesso visto nei casi in precedenza, quindi formato da un elemento link, che descrive il sistema di dispositivi a superficie curva, incastrato alla base e con la massa dell'intero edificio in sommità. Ad esso, sono stati aggiunti altri due link, uno per ciascuna direzione di spostamento nel piano, che descrivono il funzionamento dei dissipatori viscosi. A questi elementi è stata fornita la legge costitutiva tipica dei dissipatori viscosi ($F = C v^\alpha$) nella sola direzione assiale dell'elemento, mentre nei restanti 5 gradi di libertà è libero.

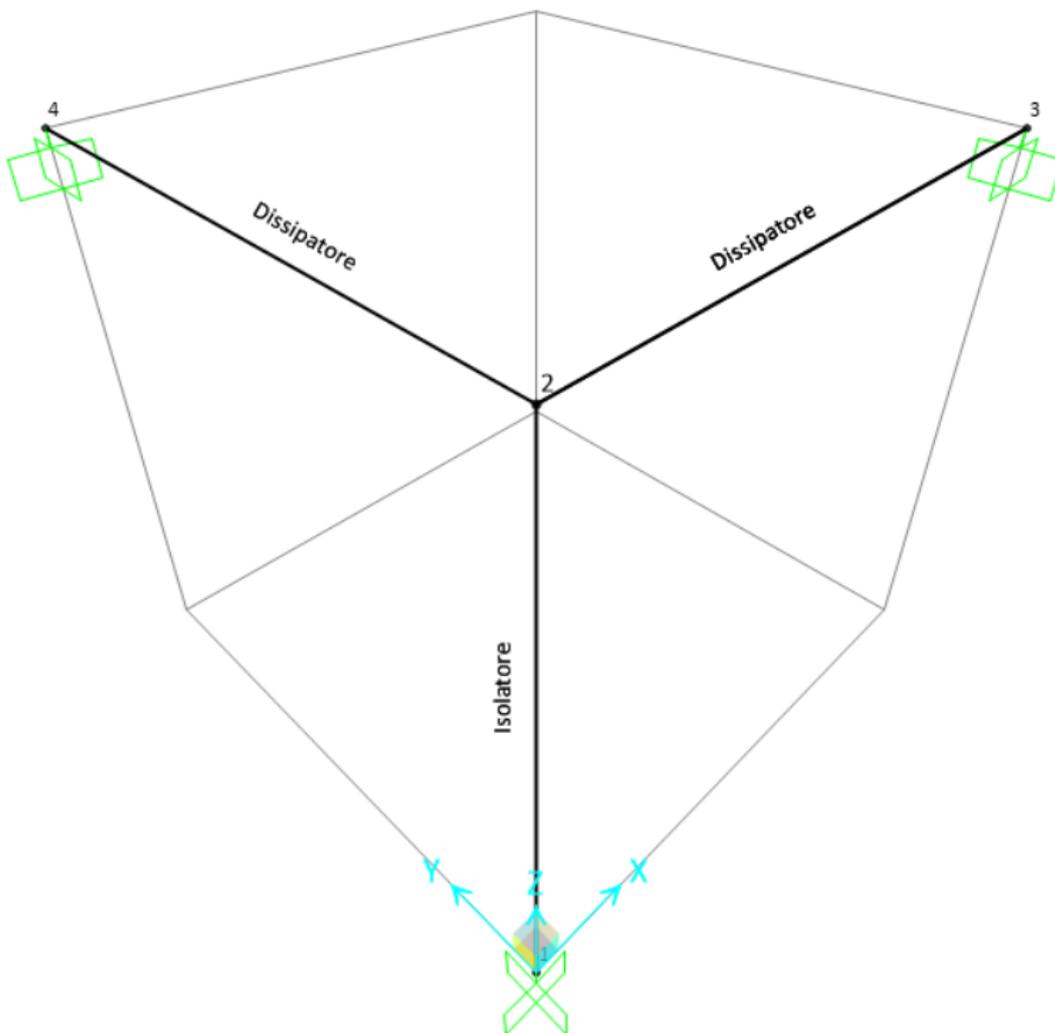


Figura 7-2: modello 1 gdl con dissipatori.

All'interno del programma SAP2000/ETABS è implementato un elemento denominato "damper-exponential", il quale descrive la funzione forza-spostamento di un dissipatore viscoso attribuendogli la costante C e l'esponente α , la velocità v , invece, è calcolata passo-passo nell'analisi time history. Questo elemento dà anche la possibilità di inserire una rigidezza che il dispositivo nella realtà ha, in campo lineare e non lineare. Ai fini di questo caso studio è sufficiente porre la rigidezza elevata così da considerare l'elemento puramente viscoso. Eventualmente, una volta individuati la tipologia di dissipatori e progettati dalla casa produttrice è possibile inserire un valore di rigidezza più realistico.

Identification	
Property Name	Dissipatore
Direction	U1
Type	Damper - Exponential
NonLinear	Yes

Linear Properties	
Effective Stiffness	0 kN/m
Effective Damping	0 kN-s/m

Nonlinear Properties	
Stiffness	3000000 kN/m
Damping	10000 kN*(s/m) ^{Cexp}
Damping Exponent	0.15
<input type="checkbox"/> Fixed Length Damper	
Damper Length	
Extender Properties	
Modulus of Elasticity	
Cross Sectional Area	

Figura 7-3: esempio di inserimento dei valori del dissipatore in ETABS.

Fatto ciò, si è svolta dapprima l'analisi della soluzione base, ovvero con attrito all'8% e C nulla, e successivamente al variare dell'attrito si è andati a ricavare iterativamente il valore di C tale che portasse lo stesso spostamento massimo della soluzione base. Di seguito viene riportata una tabella e un grafico riassuntivo dei valori di attrito, C e degli spostamenti massimi ricavati.

Attrito	C [kNs/m]	Spostamento massimo [mm]
8%	0	837,8
6%	10000	838,0
5%	15700	837,8
4%	21900	837,5
3%	28400	837,5

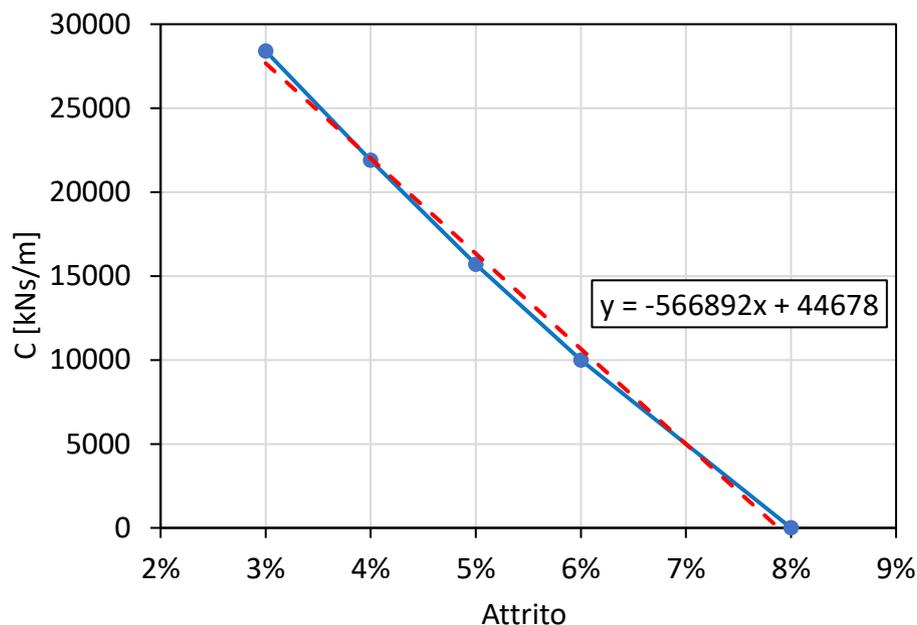


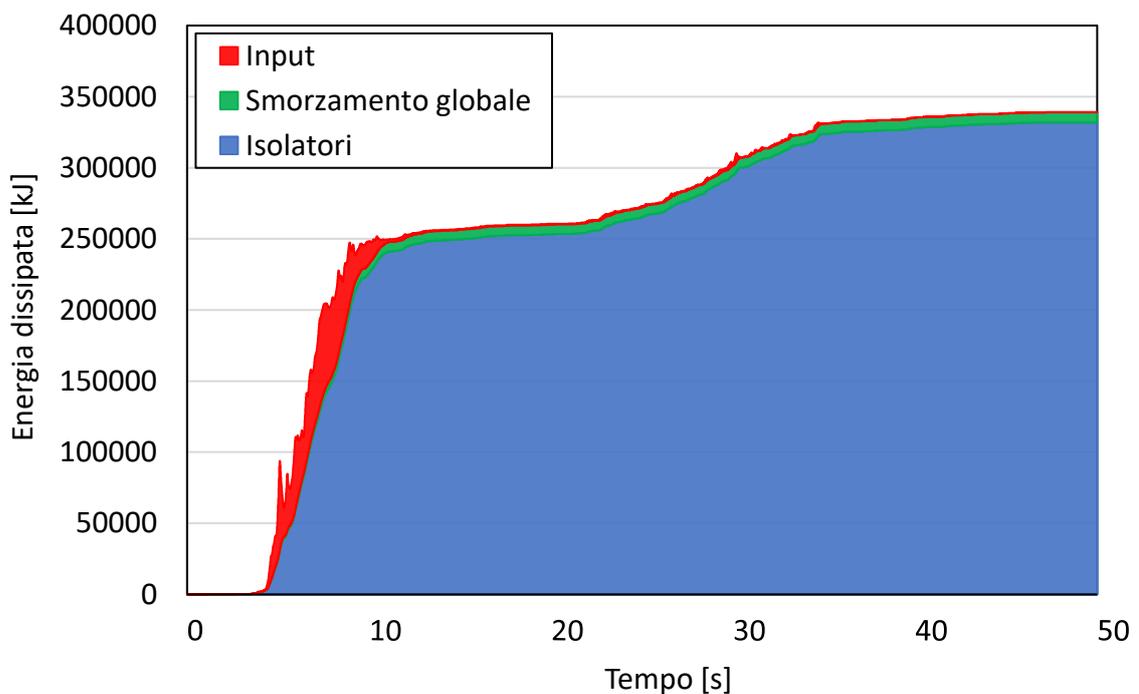
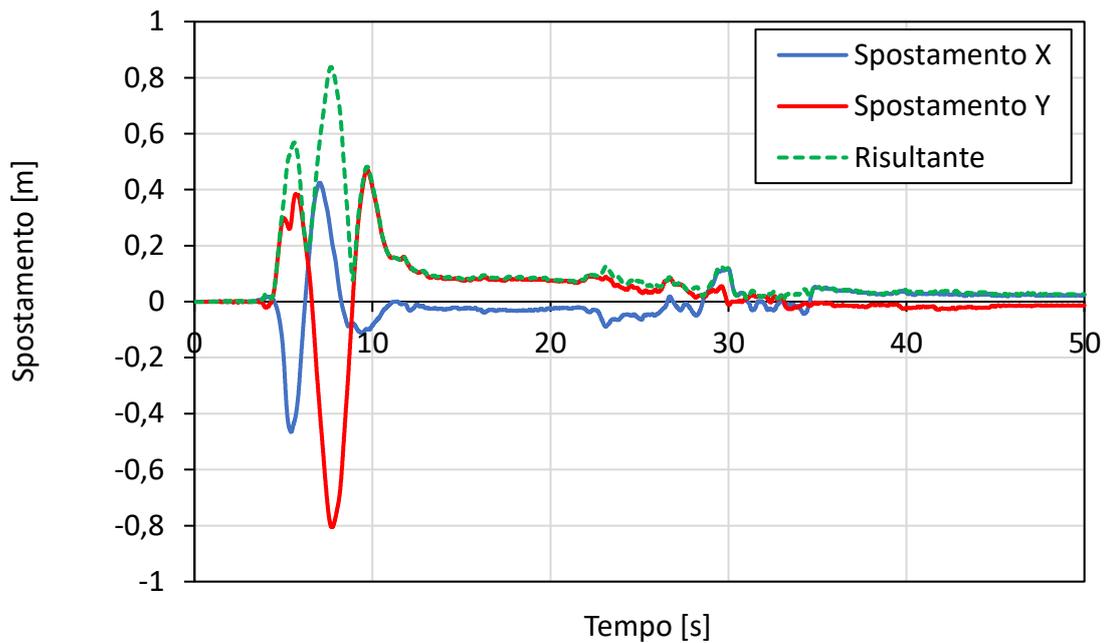
Figura 7-4: valori di C al variare dell'attrito e spostamenti massimi associati.

7.3.1 Risultati

Per ogni caso verranno rappresentati i risultati ottenuti in termini di spostamento ed energia dissipata. Quest'ultima è suddivisa nell'energia dissipata dagli isolatori a superficie curva, dai dissipatori e dallo smorzamento globale imposto inserito con il metodo Rayleigh come nei casi precedenti.

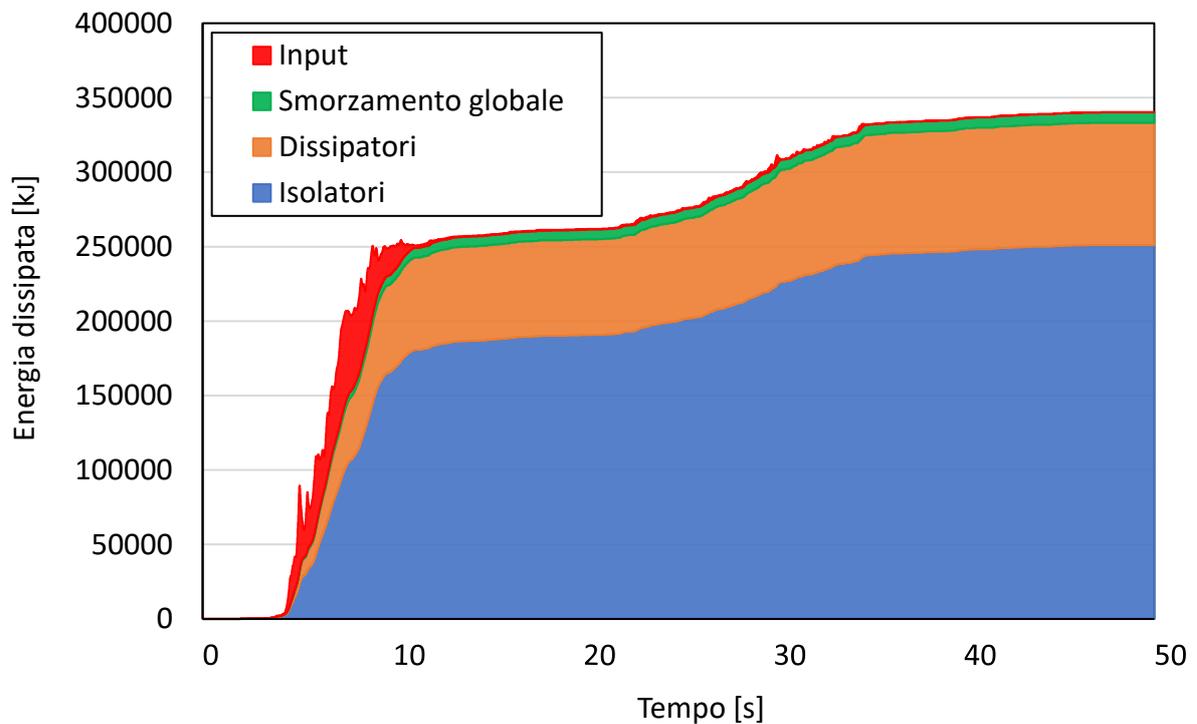
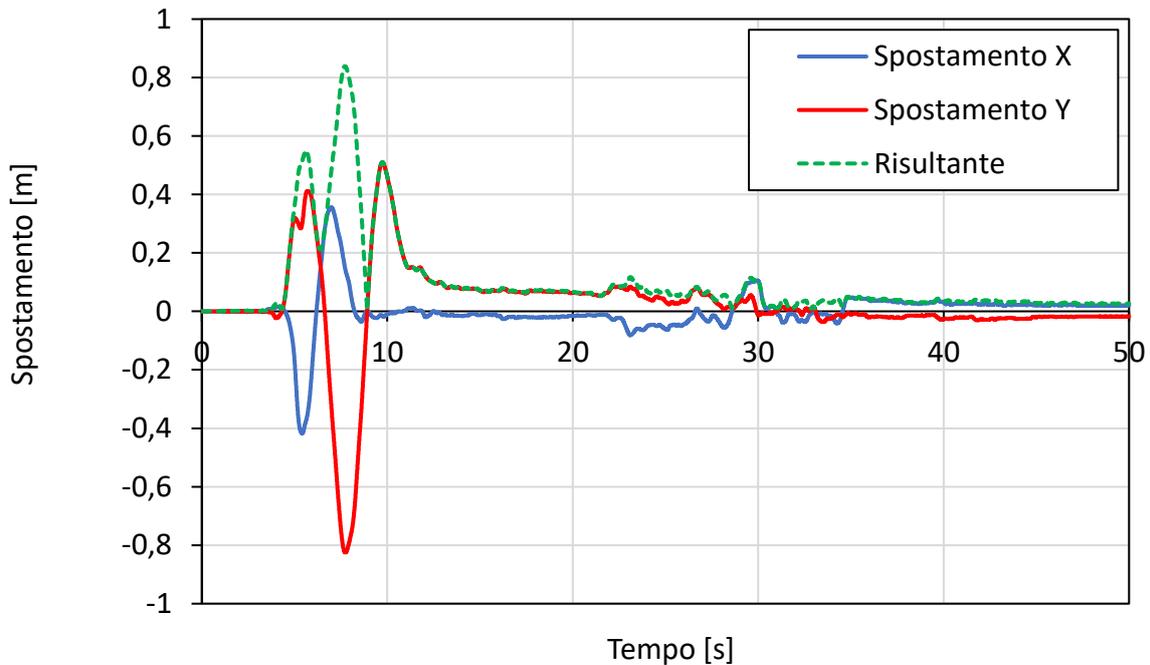
7.3.1.1 Soluzione base: attrito 8%, $C=0$

Nella soluzione base si può notare l'andamento degli spostamenti con valore massimo attorno agli 8 secondi. Nel secondo grafico, invece, si può notare l'energia dissipata durante l'applicazione del sisma. In questo primo caso chiaramente l'energia sarà dissipata totalmente dagli isolatori più lo smorzamento globale stimato della struttura.



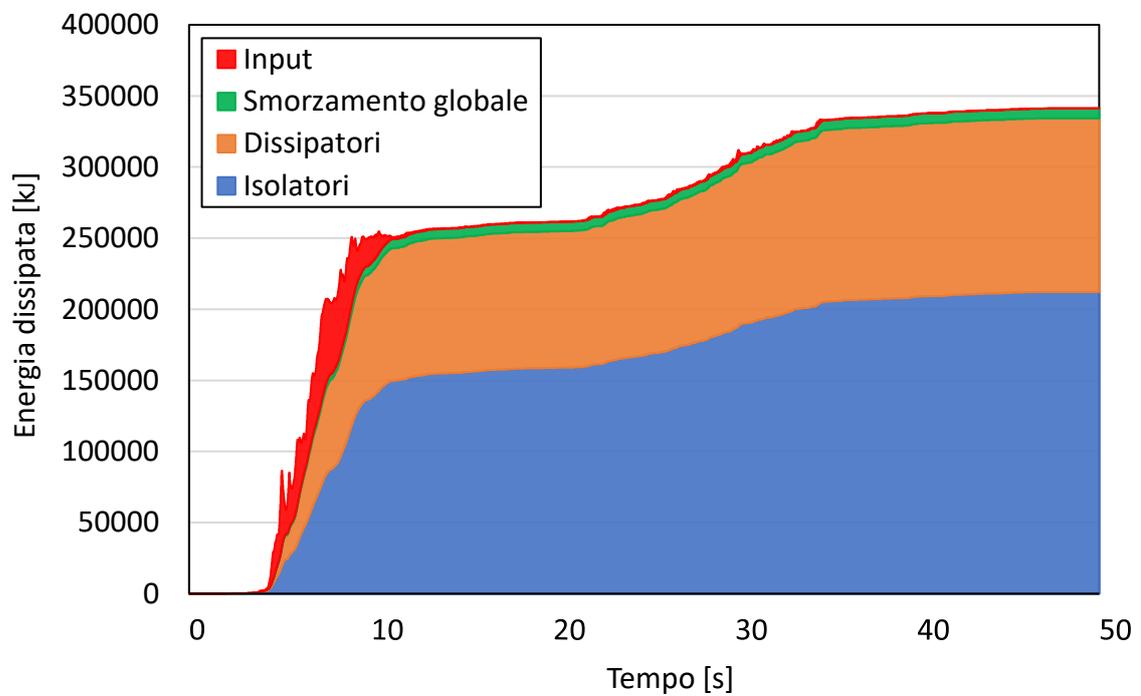
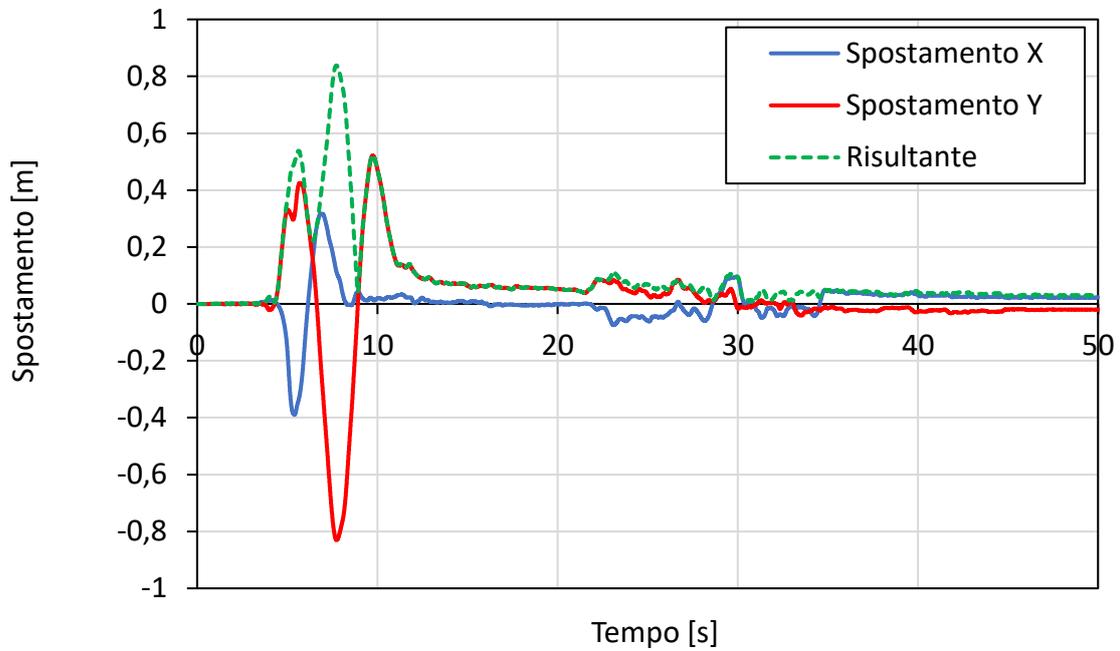
7.3.1.2 Attrito 6%, C=10000

Nel secondo caso gli spostamenti rimangono pressoché coincidenti, perché requisito di questo caso studio. Per quanto riguarda l'energia dissipata, si nota una quota parte assorbita dai dissipatori, mantenendo comunque il livello di energia totale uguale.



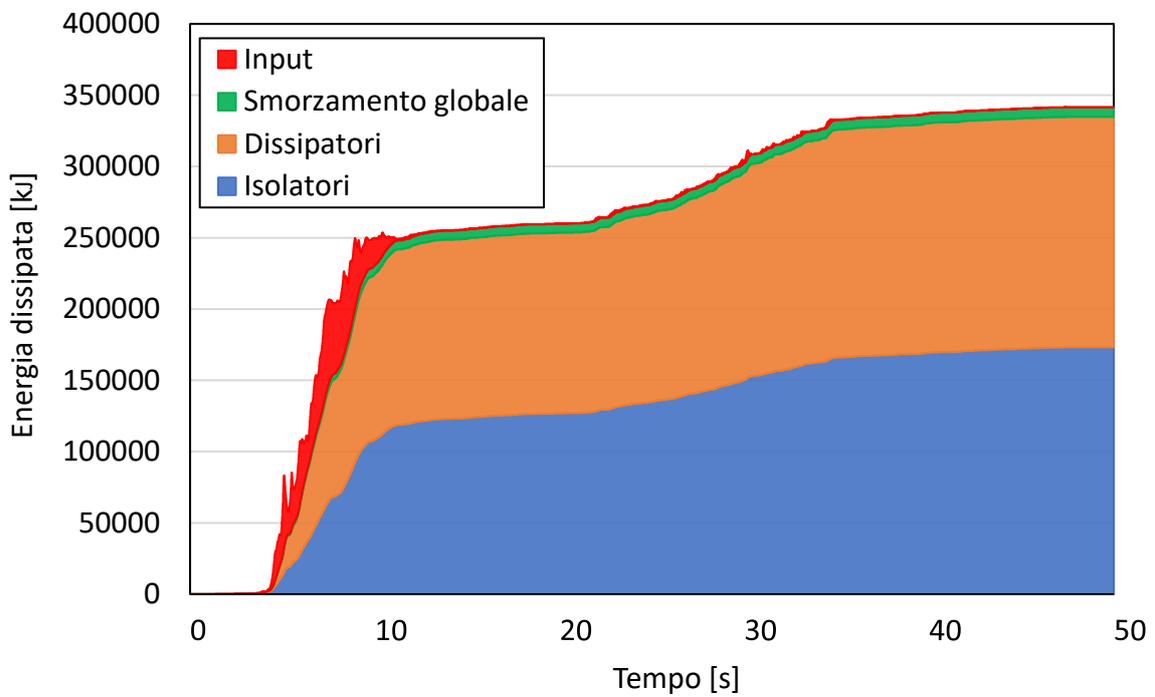
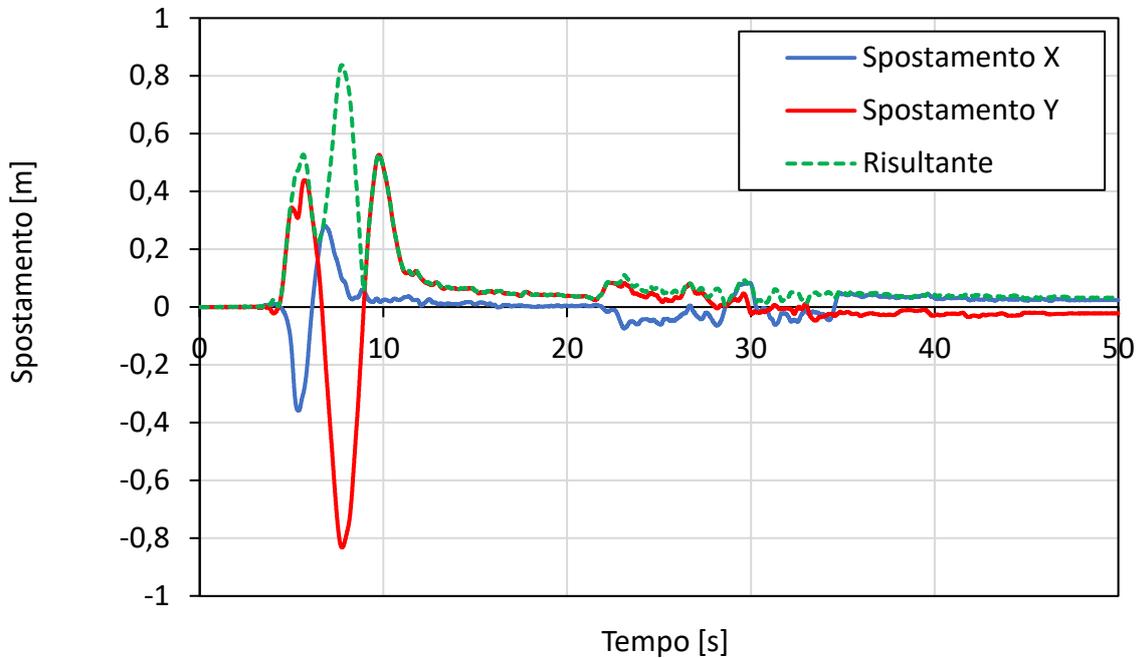
7.3.1.3 Attrito 5%, $C=15700$

Anche questo caso è simile al precedente, con un ulteriore aumento dell'energia dissipata dai dissipatori viscosi e una diminuzione dagli isolatori.



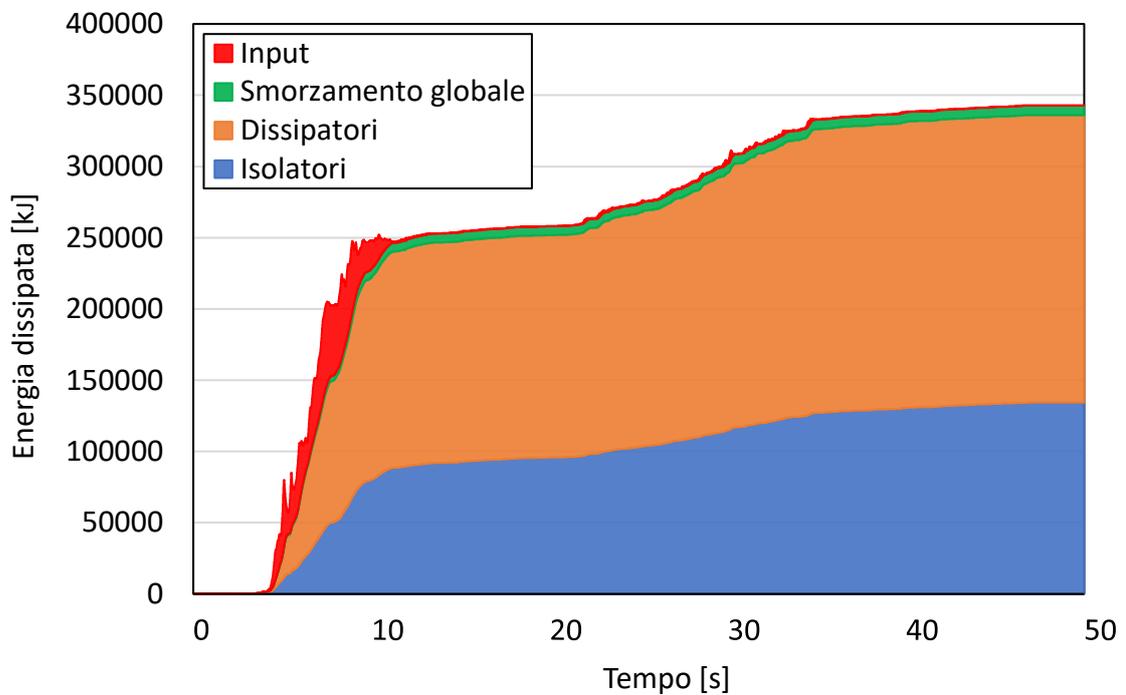
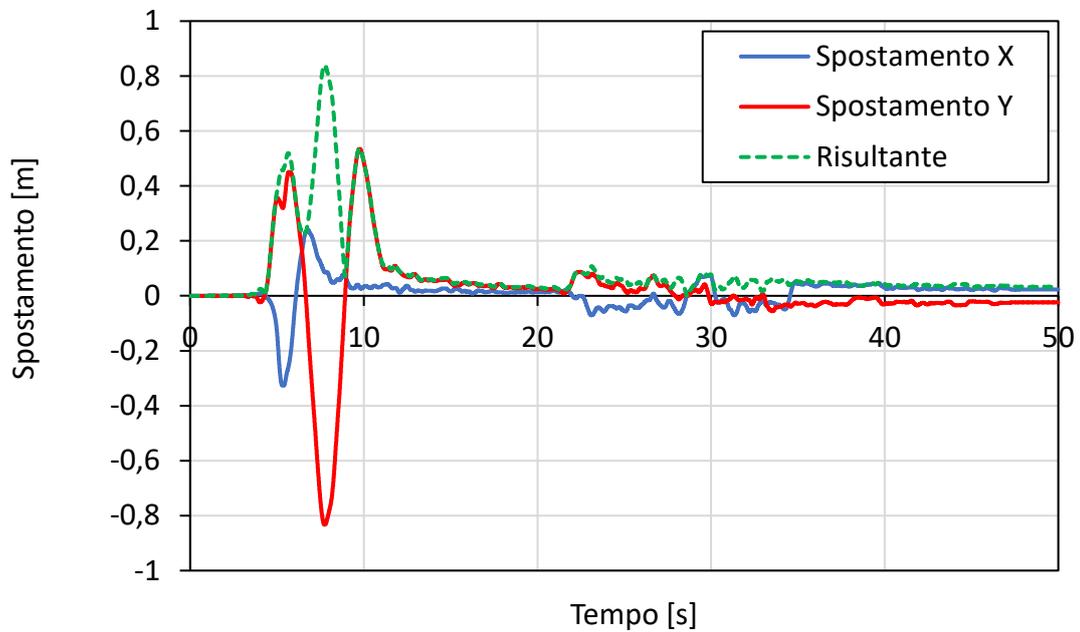
7.3.1.4 Attrito 4%, $C=21900$

Analogo discorso ai casi precedenti per gli spostamenti. Per questi valori di attrito e C si ottiene quasi un punto in cui l'energia dissipata dagli isolatori e dissipatori quasi coincide.



7.3.1.5 Attrito 3%, $C=28400$

Infine, in questo ultimo caso, gli spostamenti sono analoghi mentre per l'energia dissipata si ha un'inversione tra i dissipatori ed isolatori, con i primi che dissipano più energia.



7.3.2 Confronto risultati

Come ci si aspettava, gli spostamenti in tutti i casi sono sostanzialmente coincidenti, in quanto si è cercato di ottenere spostamenti massimi coincidenti in ogni caso.

Diversamente, invece, accade per l'energia. Diminuendo l'attrito l'energia dissipata dagli isolatori cala, e viceversa quella dissipata dai dissipatori aumenta con una legge pressoché lineare. L'energia di input, ovvero quella immessa dal sisma rimane costante, così come lo smorzamento globale.

Attrito [%]	Input [kJ]	Isolatori [kJ]	Dissipatori [kJ]	Smorzamento globale [kJ]	Totale [kJ]
8	339180	331868	0	7143	339011
6	340295	251058	82096	6981	340134
5	341328	212176	122097	6884	341157
4	341609	173039	161647	6754	341441
3	342950	134352	201717	6701	342770

% isolatori	%dissipatori	Errore [kJ]	Errore %
98%	0%	169	0,05%
74%	24%	161	0,05%
62%	36%	171	0,05%
51%	47%	169	0,05%
39%	59%	180	0,05%

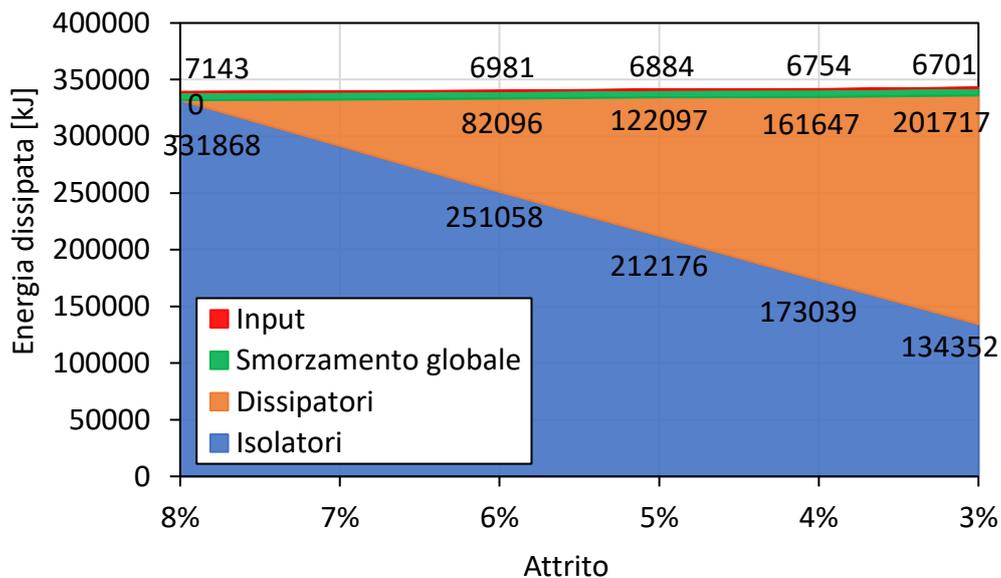


Figura 7-5: andamento dell'energia dissipata al variare dell'attrito.

7.4 Modello completo

Per quanto riguarda l'analisi con il modello completo, è stato oggetto di studio il modello dell'ospedale di Adana visto precedentemente. Ad esso sono stati aggiunti 10 dissipatori viscosi lungo la direzione X ed altrettanti nella direzione Y, in modo da far corrispondere il baricentro delle forze coincidente con il centro di massa della struttura per evitare effetti torsionali. Nei vari casi, quindi, sono stati modificati i valori di attrito dei dispositivi a superficie curva e la costante dei dissipatori come ricavato dal modello semplice. Essendo dieci dispositivi per direzione, il valore della costante C assegnata ad ogni singolo dispositivo è un decimo rispetto al valore ricavato dal modello ad 1 gdl. Un'ulteriore differenza sta nel fatto che si sono svolte due analisi per ogni caso, una con gli accelerogrammi registrati considerata a MCE (*Maximum Credible Earthquake*), mentre la seconda considera gli stessi accelerogrammi ridotti di un fattore 1,5 per il caso a DBE (*Design Basis Earthquake*). Da queste analisi ne risultano i seguenti spostamenti massimi.

Attrito	C [kNs/m]	Spostamento massimo [mm]
8%	0	898
6%	10000	922
5%	15700	922
4%	21900	914
3%	28400	901

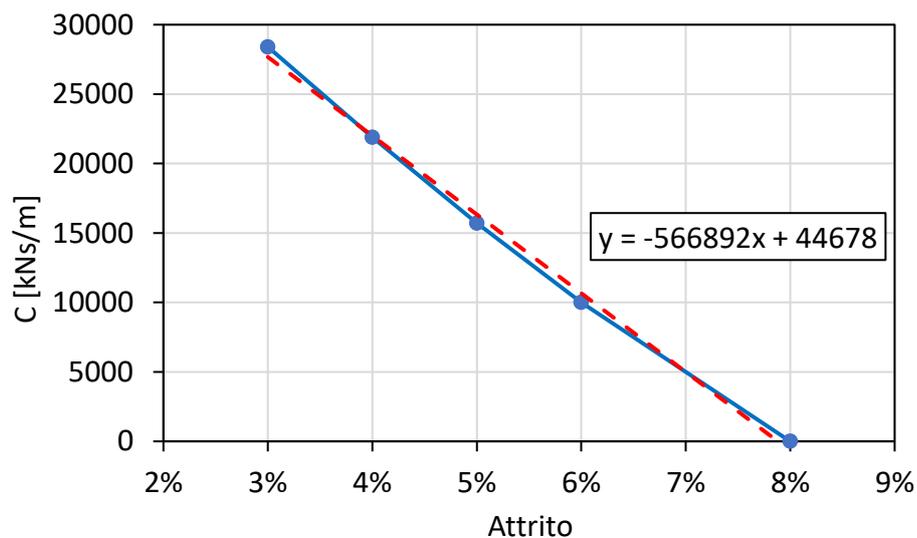
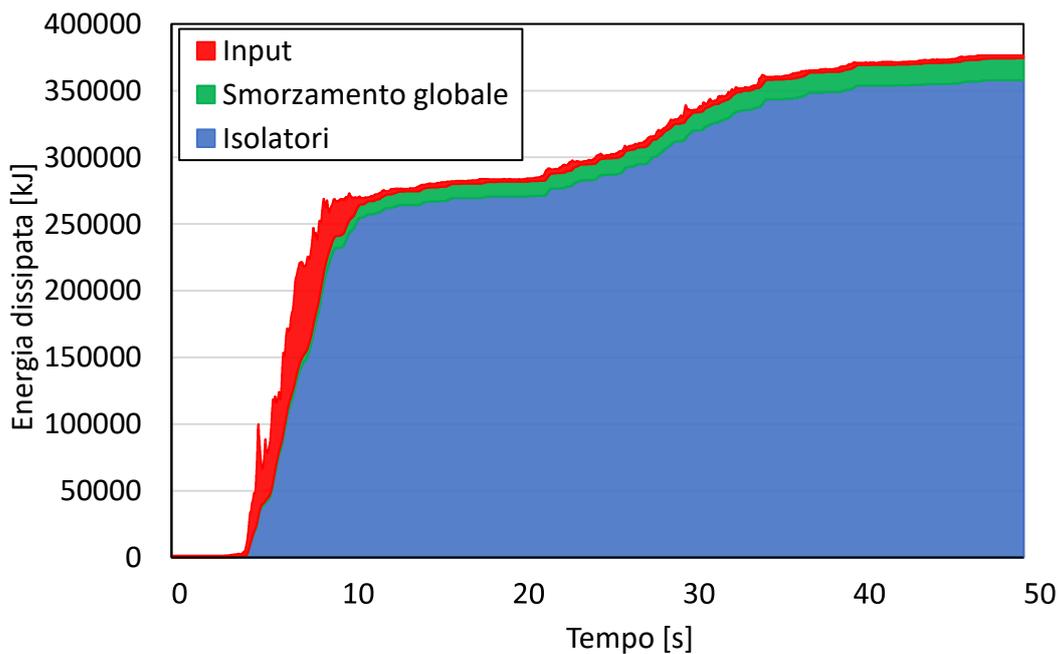
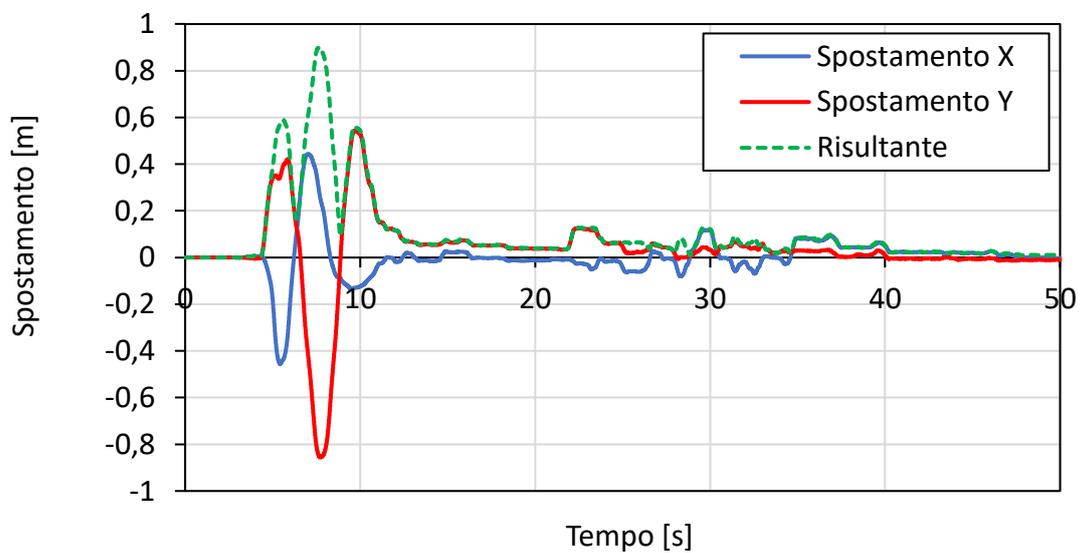


Figura 7-6: valori di C al variare dell'attrito e spostamenti massimi associati.

7.4.1 Risultati nel caso a MCE

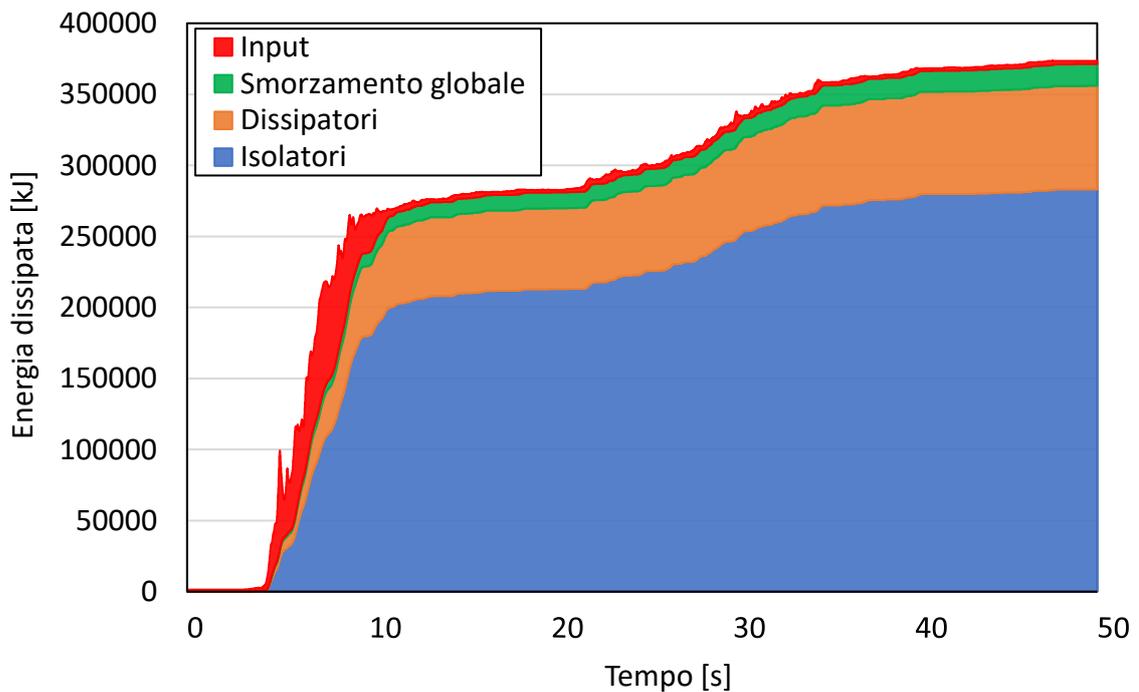
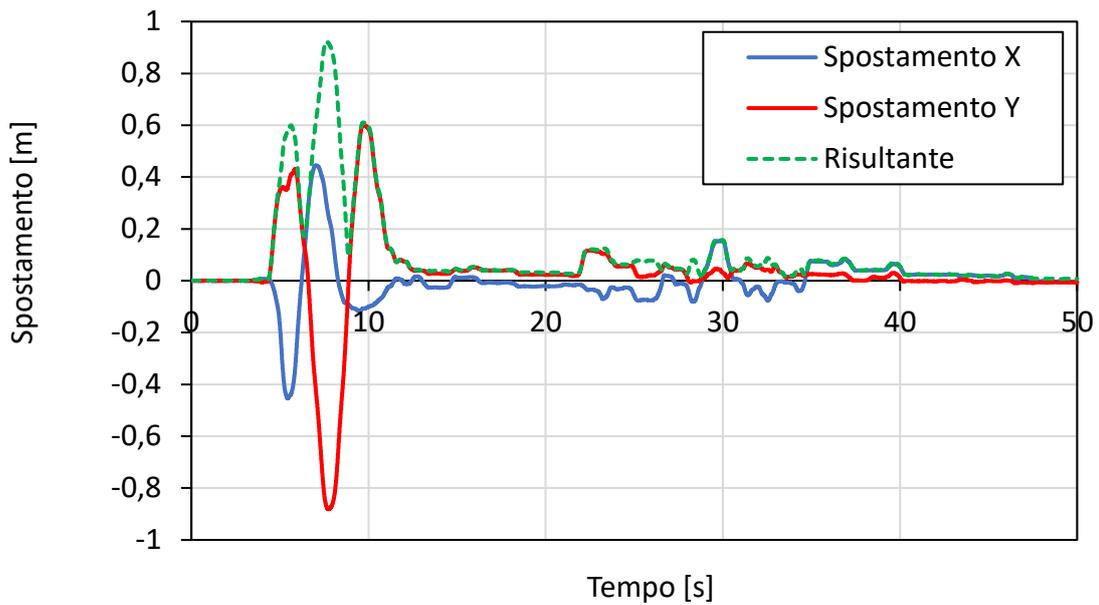
Per ogni caso verranno rappresentati i risultati ottenuti in termini di spostamento ed energia dissipata. Quest'ultima è suddivisa nell'energia dissipata dagli isolatori a superficie curva, dai dissipatori e dallo smorzamento globale imposto inserito con il metodo Rayleigh come nei casi precedenti. Infine, un esempio di ciclo isteretico di un dissipatore vicino al baricentro del modello nelle due direzioni.

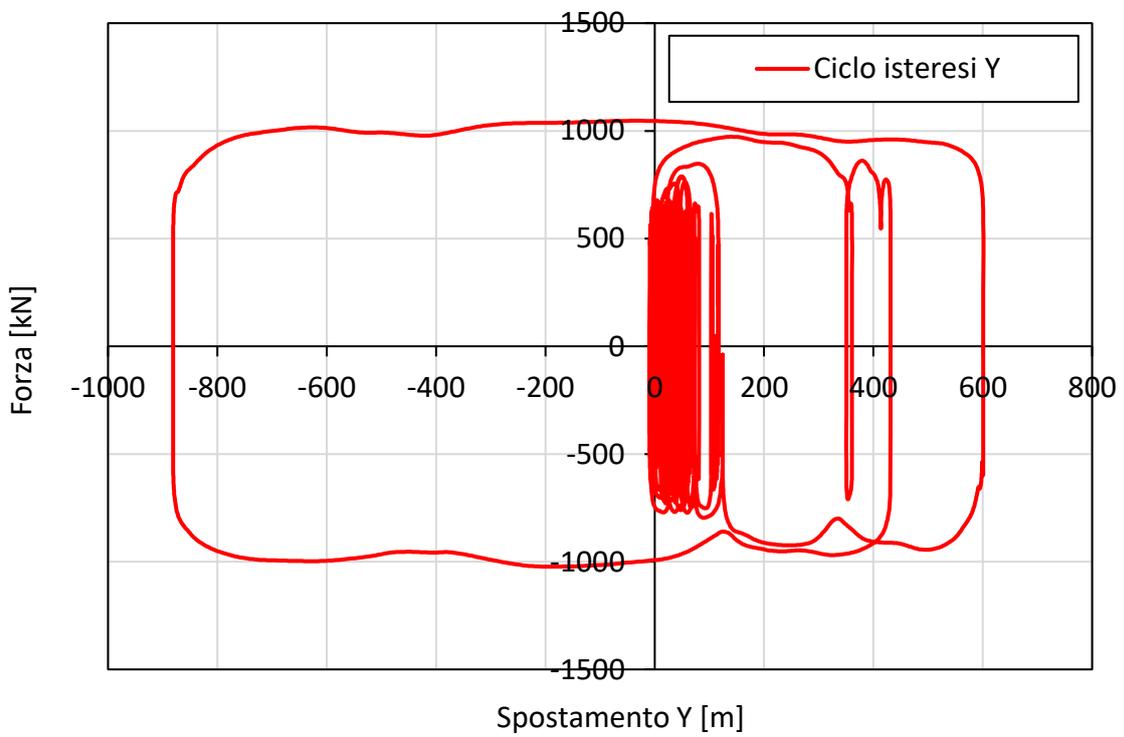
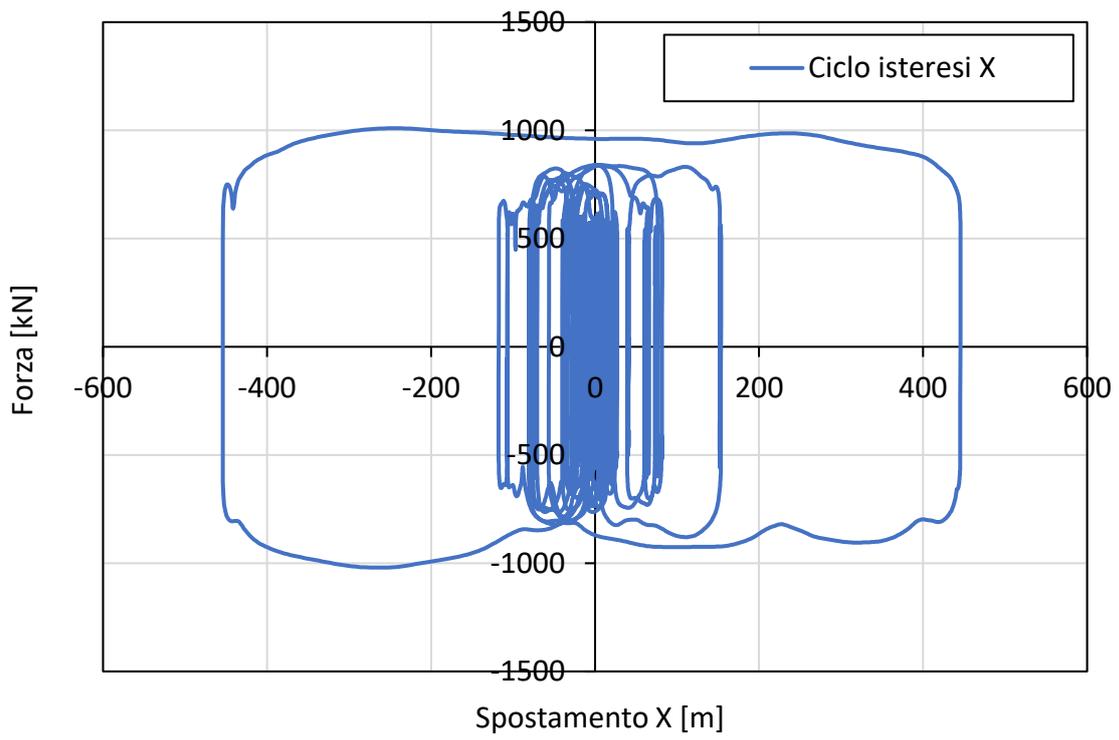
7.4.1.1 Soluzione base: attrito 8%, $C=0$



7.4.1.2 Attrito 6%, $C=10000$

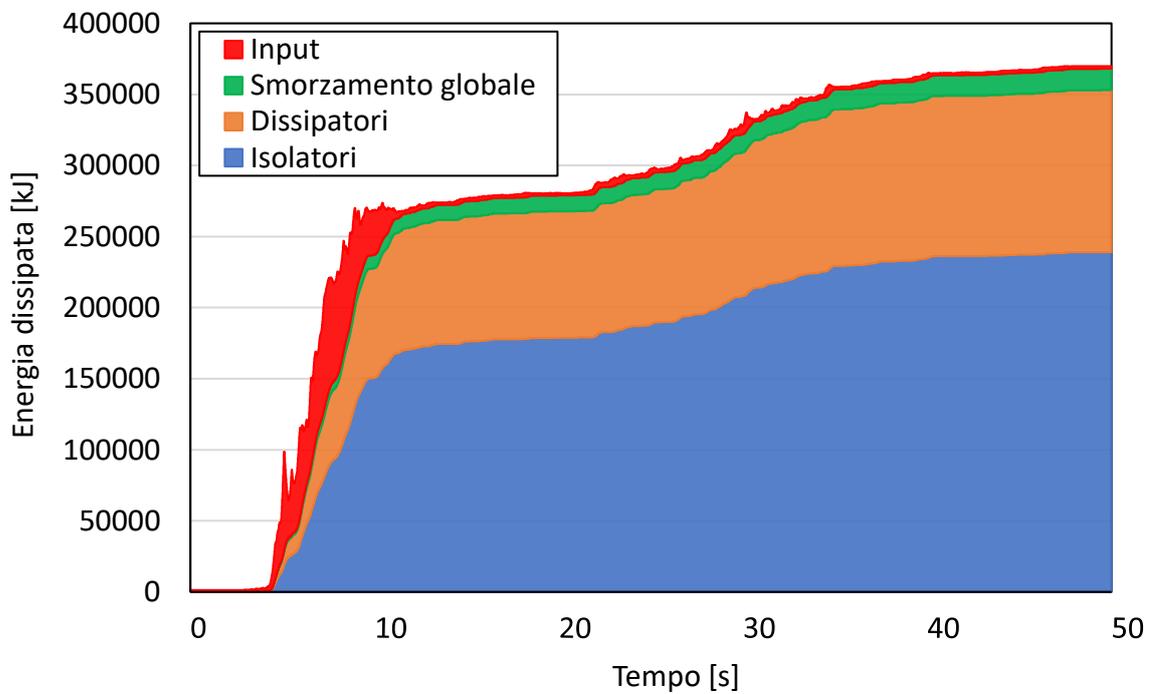
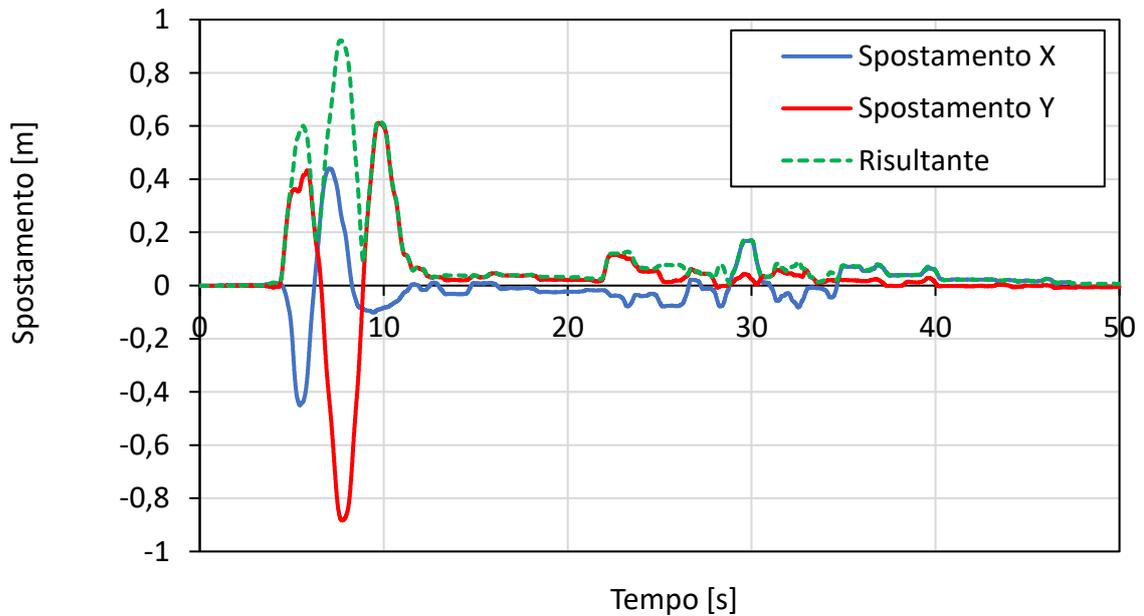
Nel secondo caso gli spostamenti rimangono pressoché coincidenti, perché requisito di questo caso studio. Per quanto riguarda l'energia dissipata, si nota una quota parte assorbita dai dissipatori, mantenendo comunque il livello di energia totale uguale. Gli ultimi grafici rappresentano il ciclo isteretico, e quindi la dissipazione dell'energia di un dissipatore posto vicino al baricentro lungo le due direzioni.

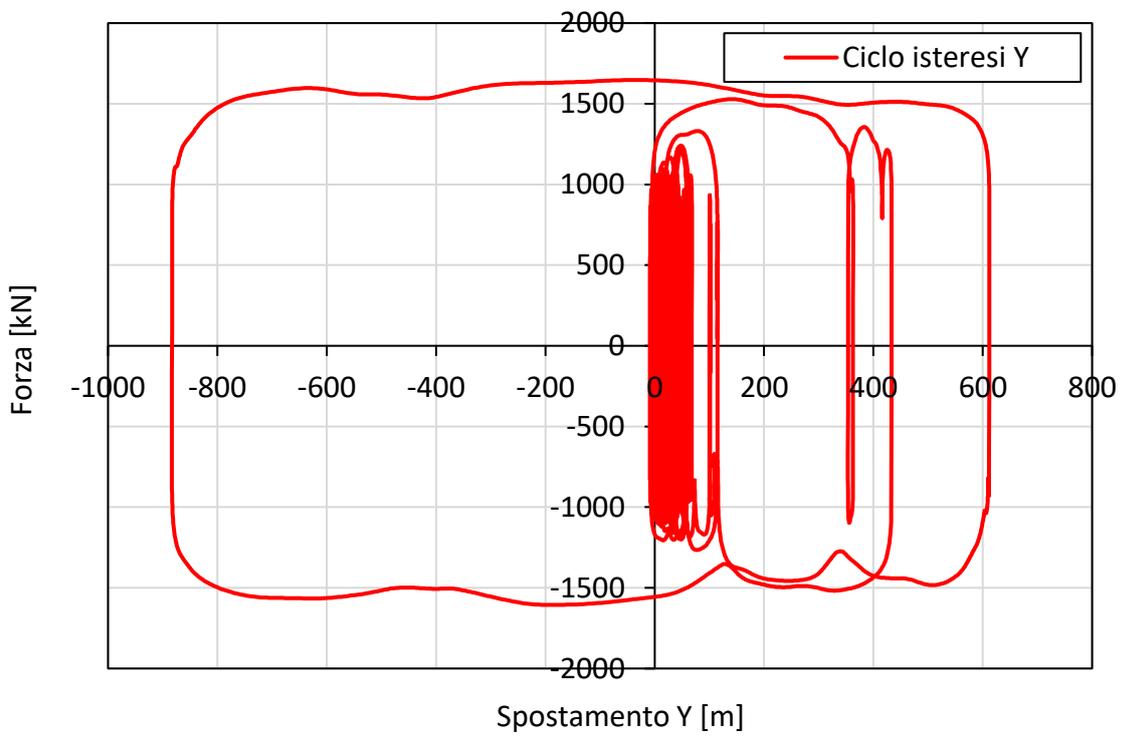
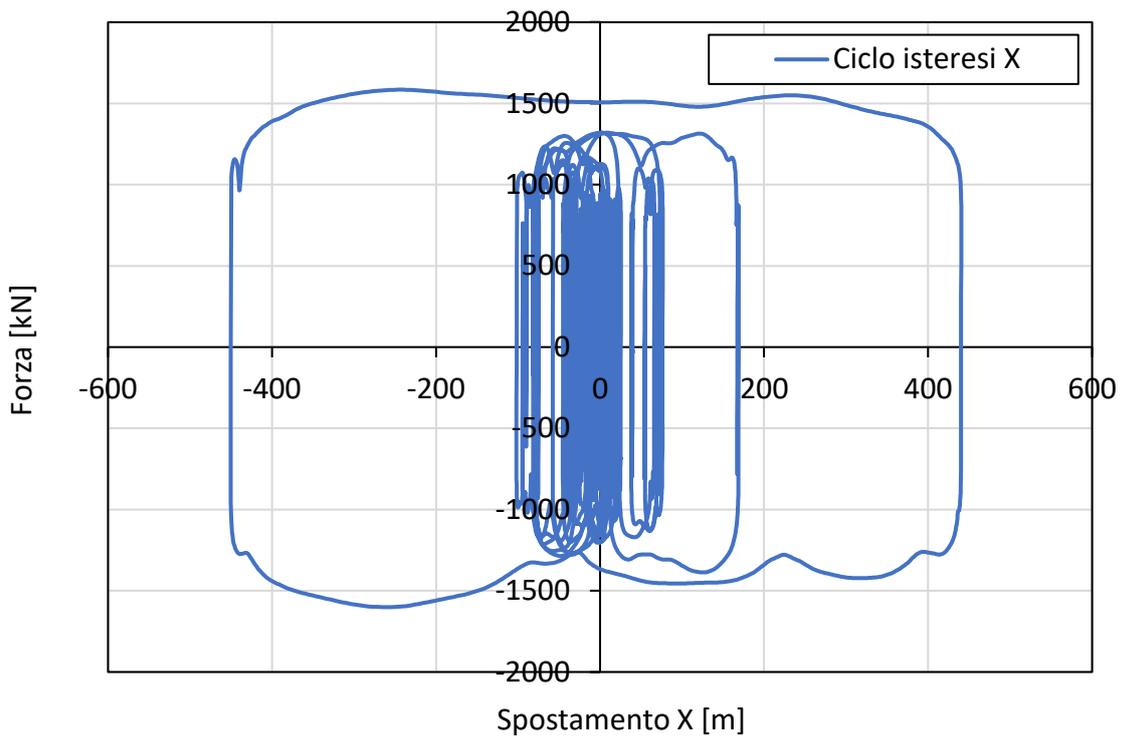




7.4.1.3 Attrito 5%, $C=15700$

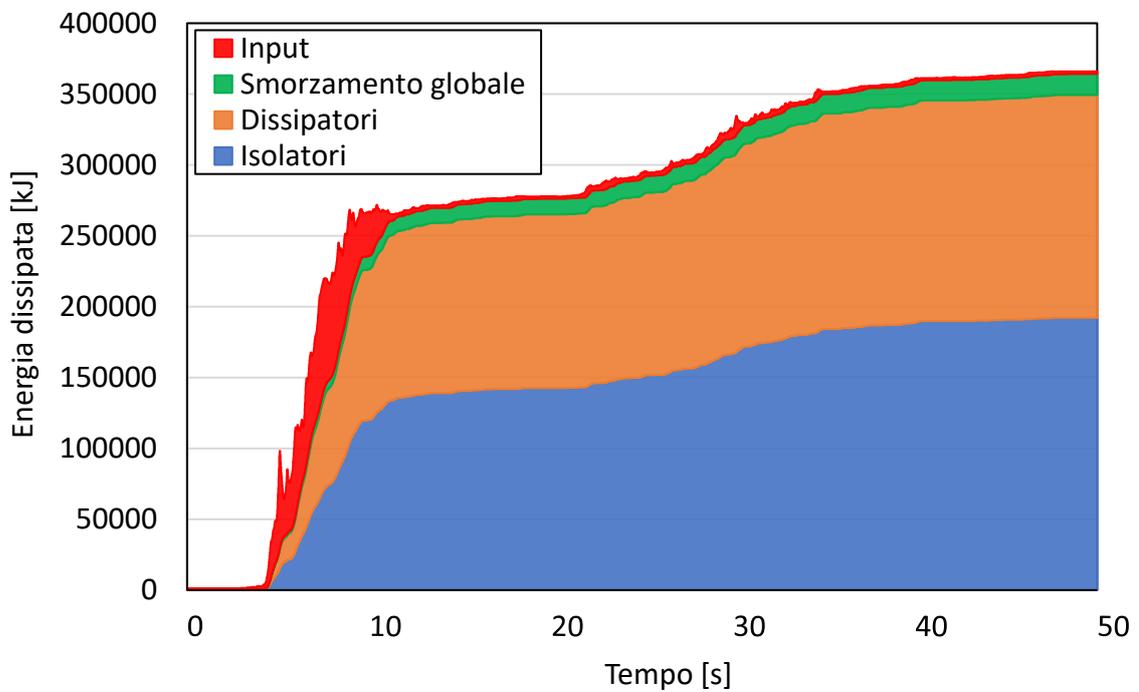
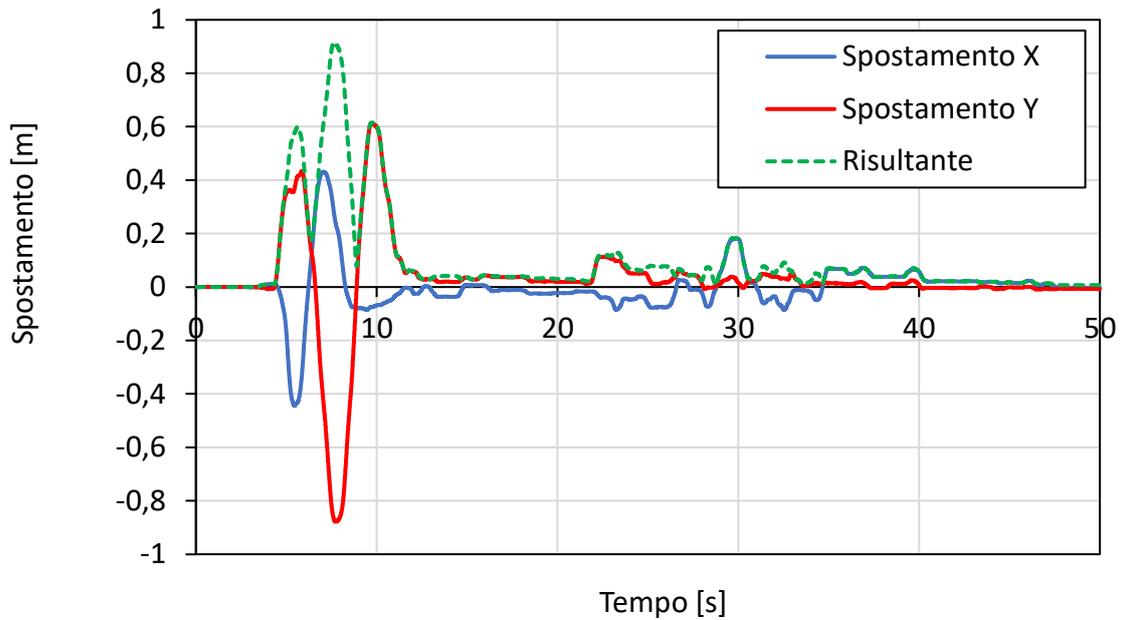
Anche questo caso è simile al precedente, con un ulteriore aumento dell'energia dissipata dai dissipatori viscosi e una diminuzione dagli isolatori. Ciò si può riscontrare anche negli ultimi grafici di esempio del ciclo isteretico in quanto presenta un'area sempre maggiore.

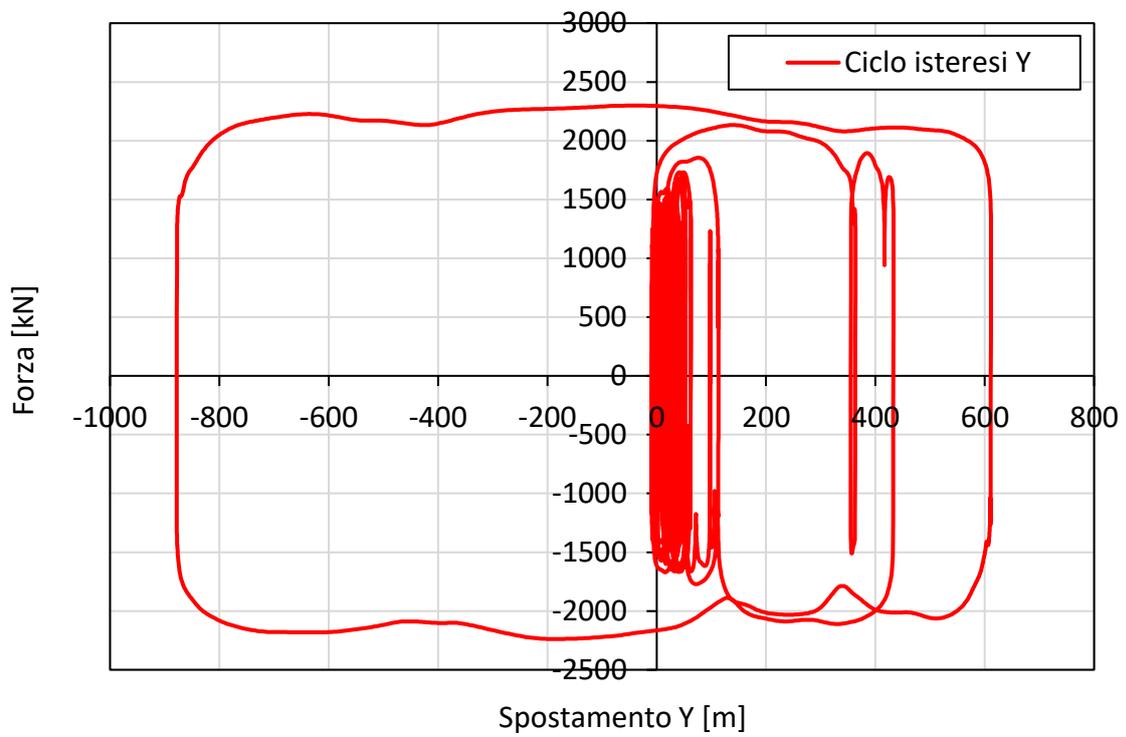
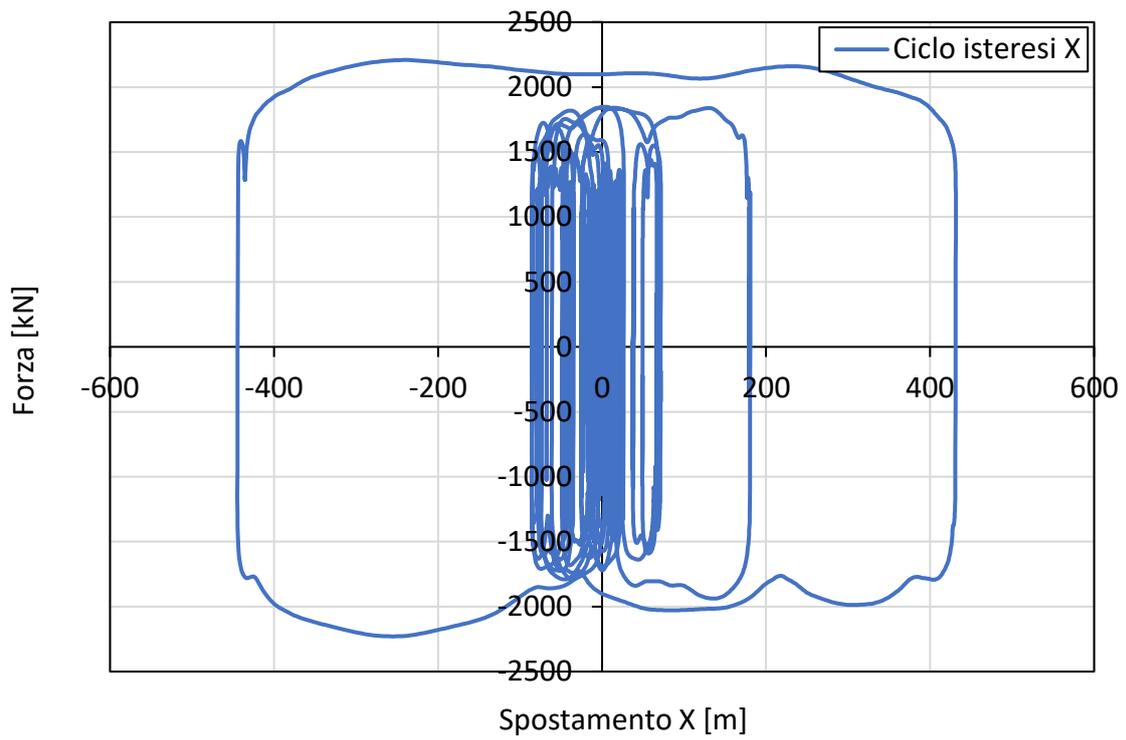




7.4.1.4 Attrito 4%, $C=21900$

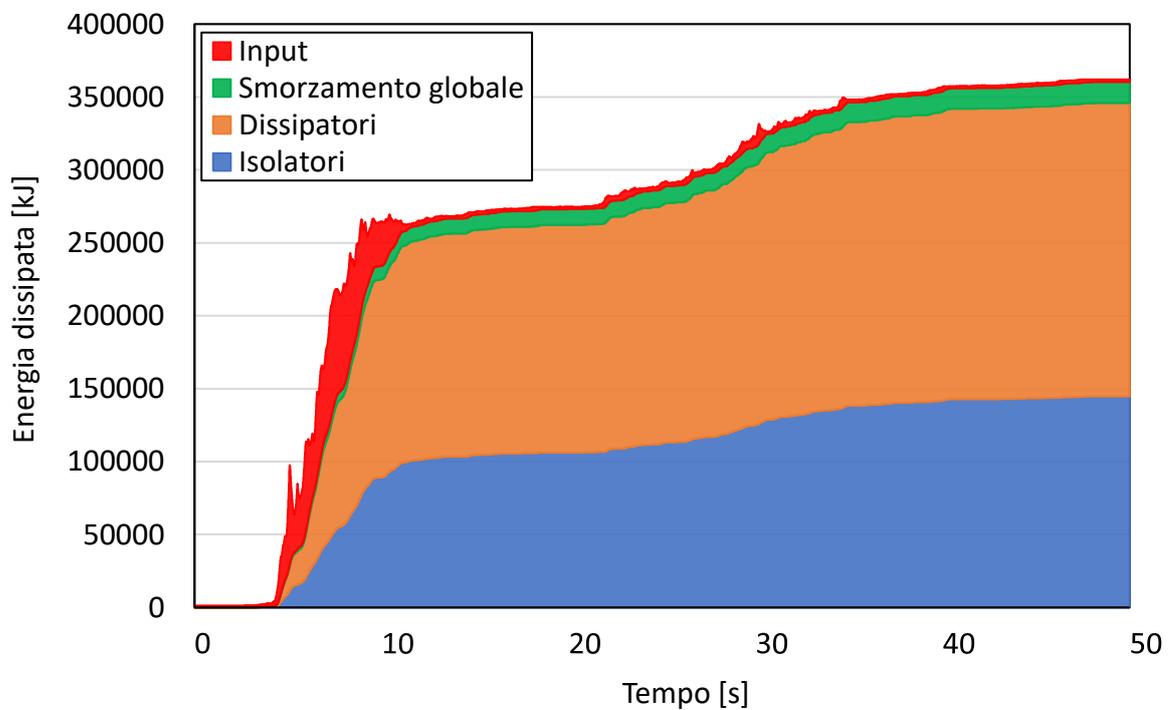
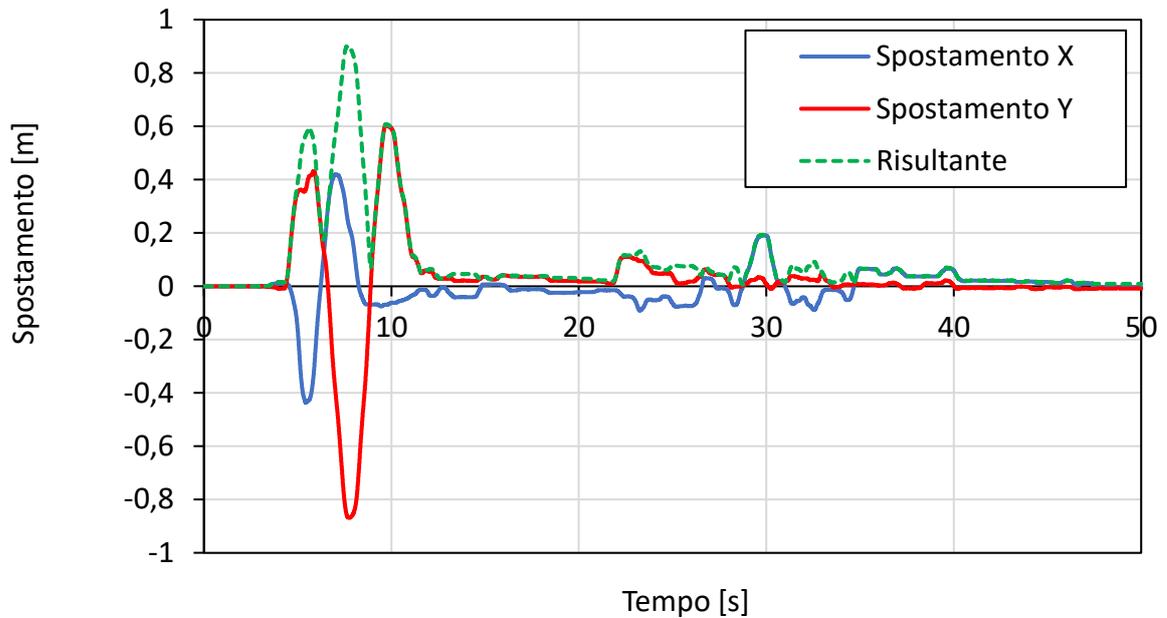
Analogo discorso ai casi precedenti per gli spostamenti. Per questi valori di attrito e C si ottiene quasi un punto in cui l'energia dissipata dagli isolatori e dissipatori quasi coincide.

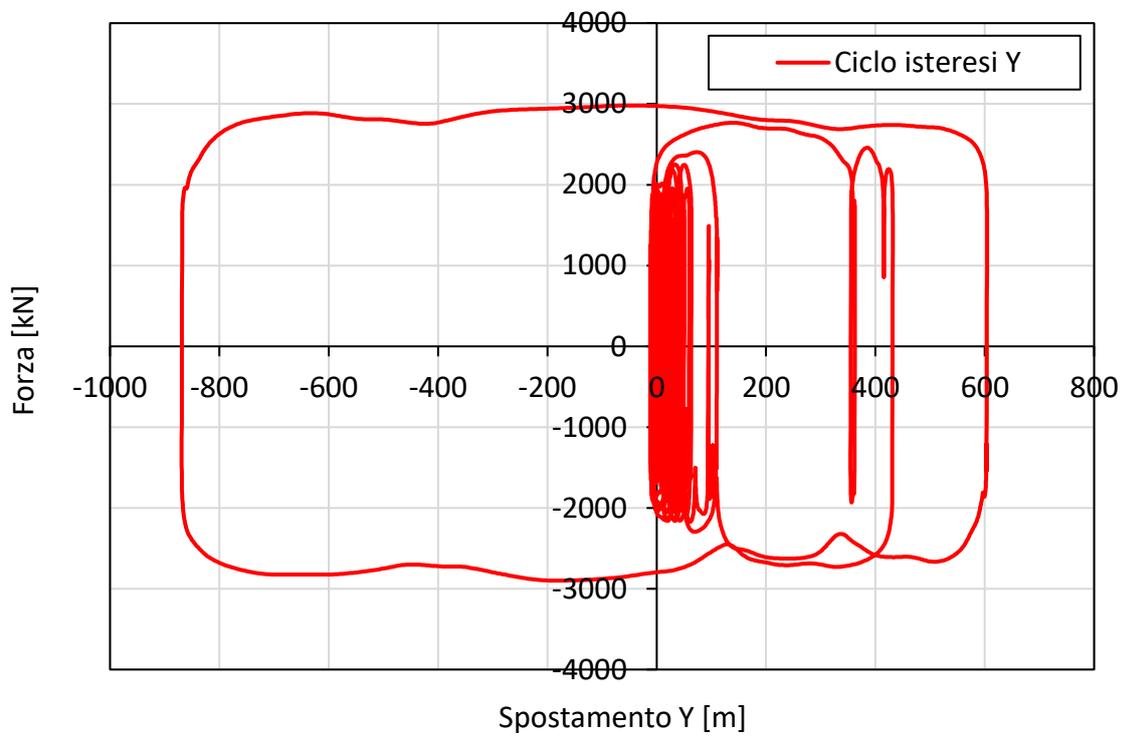
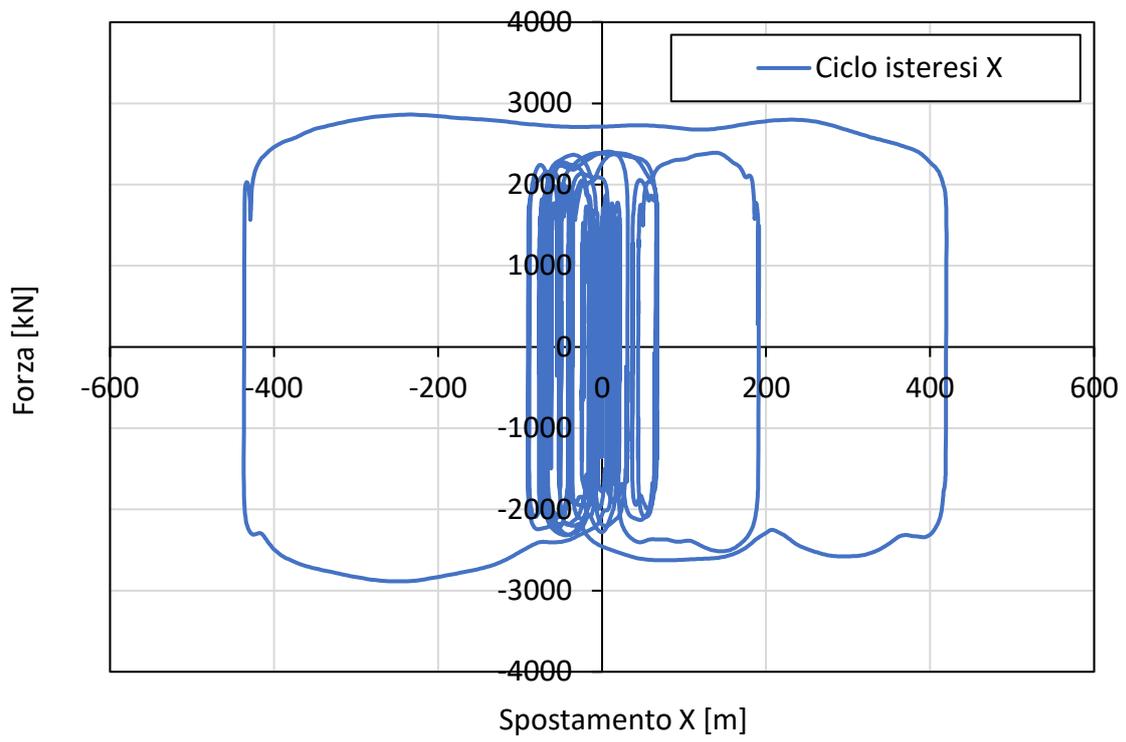




7.4.1.5 Attrito 3%, $C=28400$

Infine, in questo ultimo caso, gli spostamenti sono analoghi mentre per l'energia dissipata si ha un'inversione tra i dissipatori ed isolatori, con i primi che dissipano più energia.





7.4.2 Confronto risultati a MCE

Sul confronto dei risultati ottenuti si può affermare ciò detto in precedenza nel caso a 1 gdl, ovvero che gli spostamenti in tutti i casi sono sostanzialmente coincidenti e che l'energia dissipata dagli isolatori cala al diminuire dell'attrito, e viceversa quella dissipata dai dissipatori aumenta con una legge pressoché lineare. L'energia di input, ovvero quella immessa dal sisma rimane costante, così come lo smorzamento globale.

Attrito [%]	Input [kJ]	Isolatori [kJ]	Dissipatori [kJ]	Smorzamento globale [kJ]	Totale [kJ]
8	376442	357796	0	16426	374221
6	373181	282931	72984	15379	371294
5	369833	238901	114069	15078	368048
4	365940	192177	157246	14803	364227
3	361954	144593	201174	14530	360297

% isolatori	%dissipatori	Errore	Errore %
96%	0%	2220	0,6%
76%	20%	1887	0,5%
65%	31%	1784	0,5%
53%	43%	1713	0,5%
40%	56%	1657	0,5%

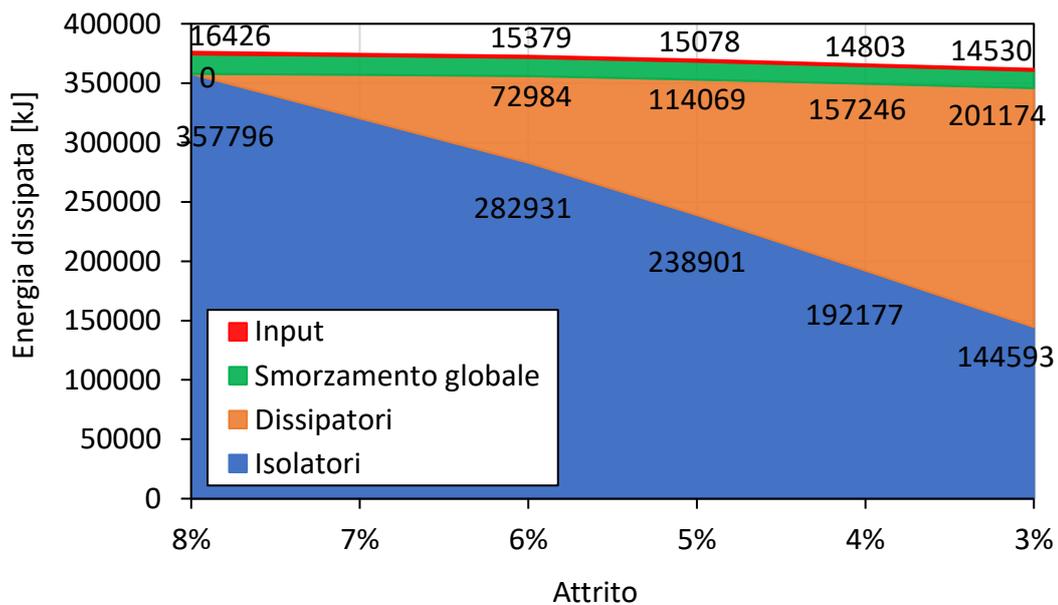


Figura 7-7: andamento dell'energia dissipata al variare dell'attrito.

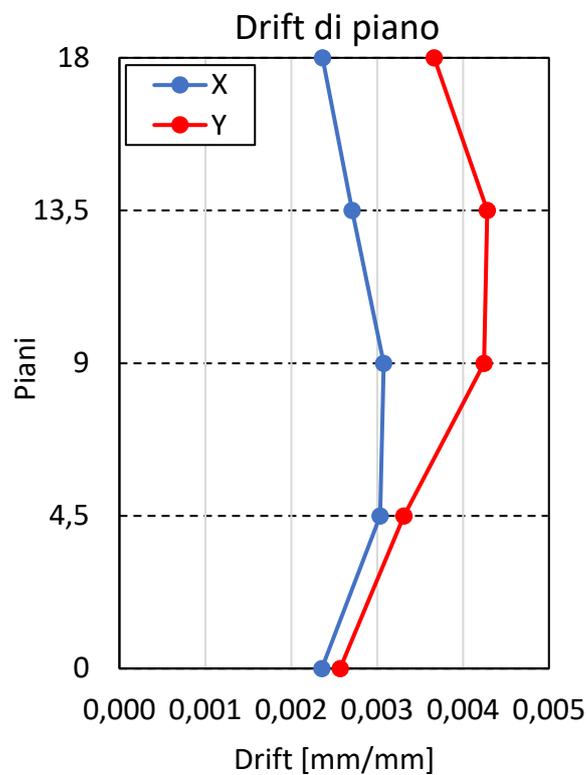
7.4.3 Risultati nel caso a DBE

Per semplicità verranno rappresentati i risultati ottenuti in termini di drift interpiano per ogni caso. I restanti risultati, ovvero il taglio massimo alla base e l'accelerazione massima di piano verranno direttamente rappresentati e confrontati in tabelle nel seguente paragrafo di confronto in quanto sono riassunti in dei singoli valori numerici.

7.4.3.1 Soluzione base: attrito 8%, C=0

Per questo caso il massimo drift di piano è inferiore al 5‰, limite massimo di norma.

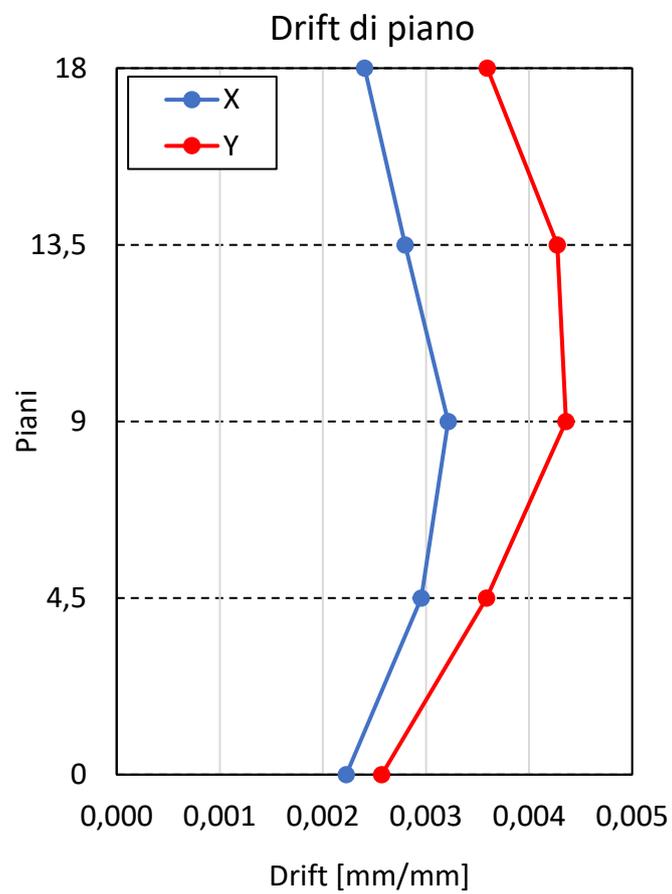
Drift		
Piano	X [‰]	Y [‰]
0	2,4	2,6
4,5	3,0	3,3
9	3,1	4,2
13,5	2,7	4,3
18	2,4	3,7



7.4.3.2 Attrito 6%, C=10000

Per questo caso il massimo drift di piano è inferiore al 5‰, limite massimo di norma.

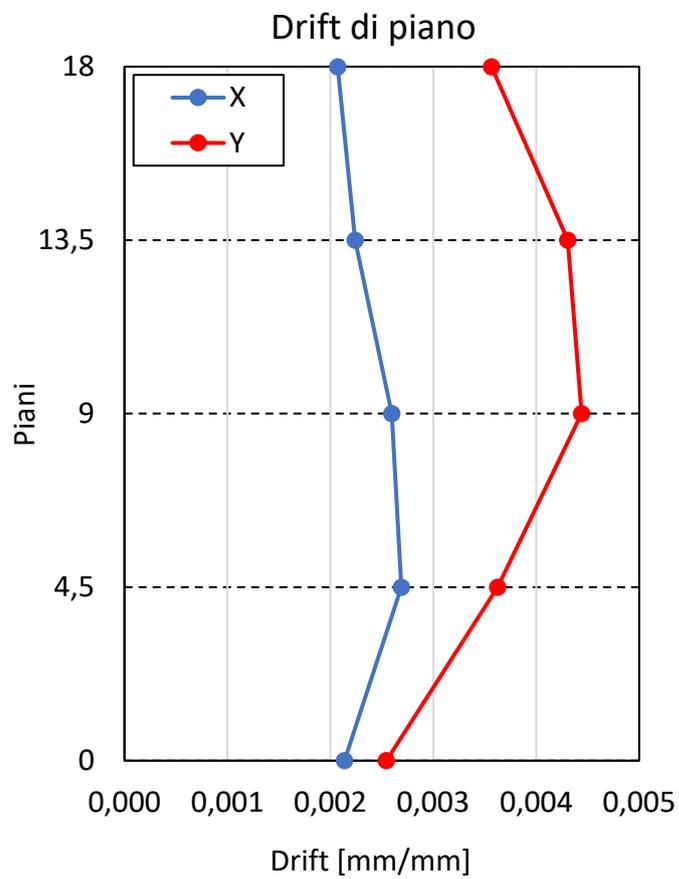
Drift		
Piano	X [‰]	Y [‰]
0	2,2	2,6
4,5	3,0	3,6
9	3,2	4,4
13,5	2,8	4,3
18	2,4	3,6



7.4.3.3 Attrito 5%, C=15700

Per questo caso il massimo drift di piano è inferiore al 5‰, limite massimo di norma.

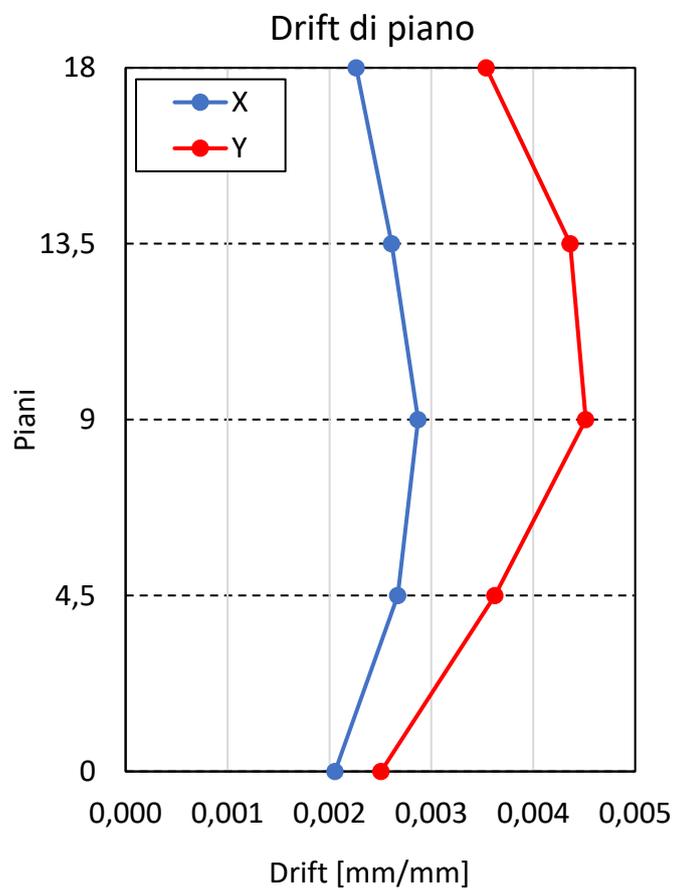
Drift		
Piano	X [‰]	Y [‰]
0	2,1	2,5
4,5	2,7	3,6
9	2,6	4,4
13,5	2,2	4,3
18	2,1	3,6



7.4.3.4 Attrito 4%, C=21900

Per questo caso il massimo drift di piano è inferiore al 5‰, limite massimo di norma.

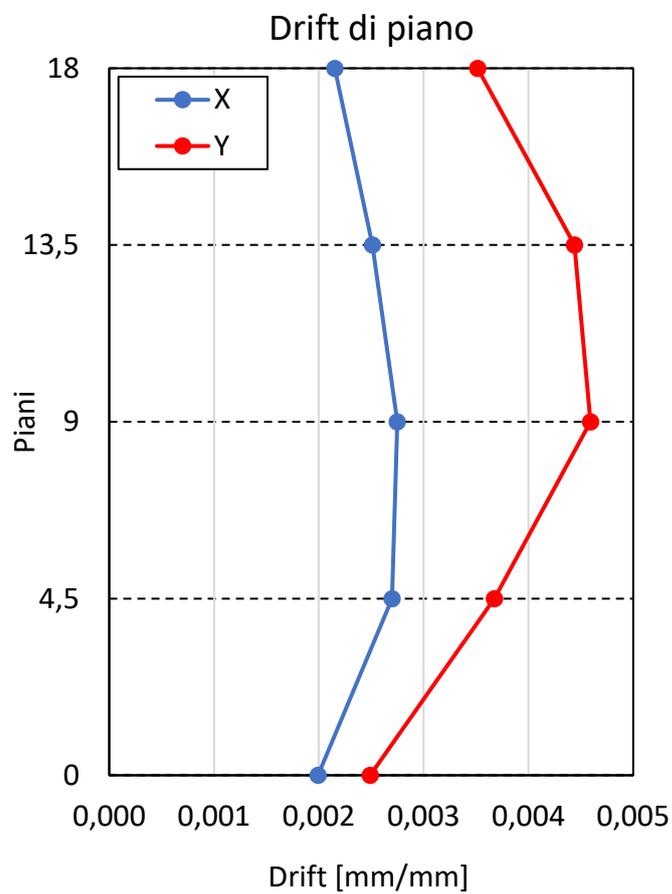
Drift		
Piano	X [‰]	Y [‰]
0	2,1	2,5
4,5	2,7	3,6
9	2,9	4,5
13,5	2,6	4,4
18	2,3	3,5



7.4.3.5 Attrito 3%, C=28400

Per questo caso il massimo drift di piano è inferiore al 5‰, limite massimo di norma.

Drift		
Piano	X [‰]	Y [‰]
0	2,0	2,5
4,5	2,7	3,7
9	2,7	4,6
13,5	2,5	4,4
18	2,2	3,5



7.4.4 Confronto risultati a DBE

Dal confronto delle soluzioni a DBE, per la sovrastruttura si può affermare che il taglio massimo alla base rimane pressoché invariato.

Attrito	Taglio alla base massimo [kN]
8%	114948
6%	116144
5%	117805
4%	119868
3%	122201

Non si notano differenze per quanto riguarda il drift interpiano, in tutti i casi si è all'interno del valore limite posto al 5‰ e la differenza di drift in un singolo piano è di massimo 0,5‰ considerato sostanzialmente uguale da caso a caso.

Infine, per quanto riguarda le accelerazioni di piano, si nota un leggero abbassamento delle accelerazioni massime per i piani intermedi al calare dell'attrito degli isolatori ed all'aumentare della costante C dei dissipatori.

Accelerazioni di piano									
Attrito 8%		Attrito 6%		Attrito 5%		Attrito 4%		Attrito 3%	
Piano	Acc [g]	Piano	Acc [g]	Piano	Acc [g]	Piano	Acc [g]	Piano	Acc [g]
Base	0,44	Base	0,44	Base	0,44	Base	0,44	Base	0,44
-5 ISO	0,41	-5 ISO	0,39	-5 ISO	0,40	-5 ISO	0,40	-5 ISO	0,41
0	0,36	0	0,32	0	0,31	0	0,31	0	0,29
4,5	0,44	4,5	0,36	4,5	0,34	4,5	0,33	4,5	0,31
9	0,44	9	0,35	9	0,33	9	0,31	9	0,31
13,5	0,51	13,5	0,41	13,5	0,39	13,5	0,40	13,5	0,38
18	0,49	18	0,49	18	0,49	18	0,50	18	0,51

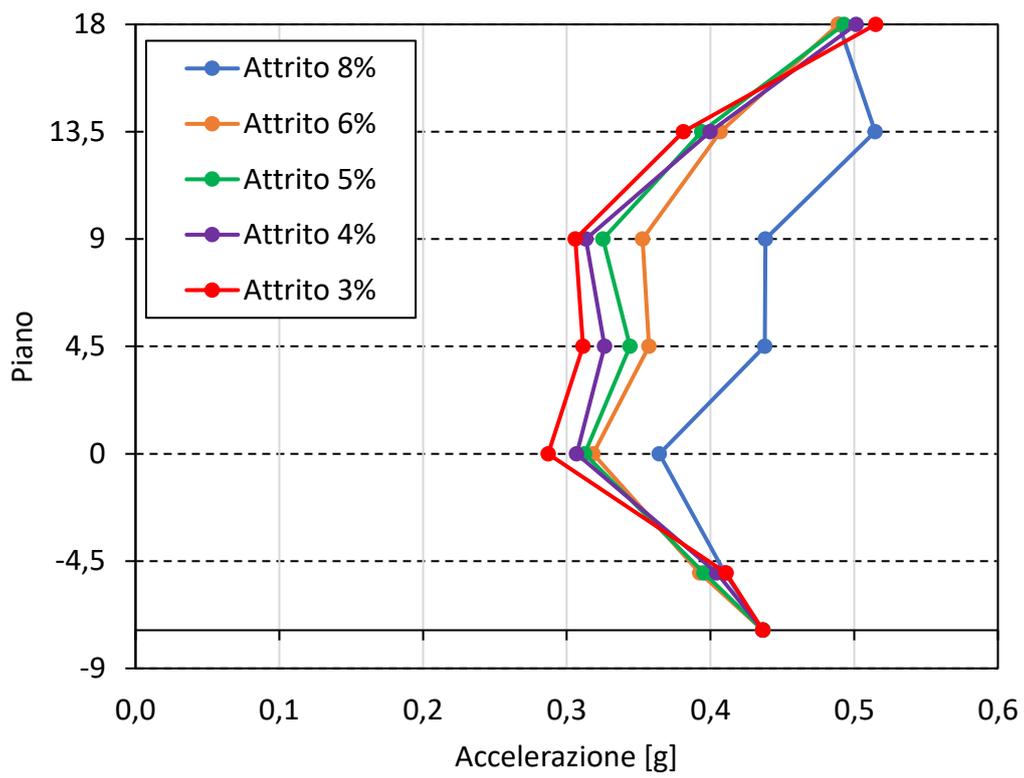


Figura 7-8: andamento delle accelerazioni di piano al variare dell'attrito.

8 CONCLUSIONI

In conclusione, si possono fare diverse considerazioni per i tre casi studio.

Per il caso studio dell'ospedale di Adana, sia da modello semplificato che completo non si sono notati problemi strutturali e di capacità degli isolatori. In questo caso le registrazioni dei diversi sismi erano prive di errori e ricavate da una stazione relativamente vicina all'ospedale, in più si aveva anche un modello completo dell'edificio. Tuttavia, non si sono riscontrati spostamenti elevati per tutti i sismi registrati, anzi molto all'interno dei limiti massimi degli isolatori, tantomeno i risultati ricavati della sovrastruttura, come drift, taglio alla base e accelerazioni di piano. Questo perché l'ospedale in oggetto è situato relativamente distante dai due epicentri dei sismi. Nei diversi sismi applicati si sono ricavati dei valori di spostamento più o meno simili tra modello ad 1 gdl e completo. Per esempio, applicando il sisma 7.8 si è notato una differenza di quasi il doppio tra i due modelli, mentre con i sismi di progetto a DBE ed MCE la differenza scende al 10%. Ovvero per piccoli spostamenti la soluzione non coincide ma, per spostamenti ampi è più vicina. Ciò si può spiegare dal momento che la massa del modello completo è distribuita in altezza, quindi, la forza dovuta dal sisma ha un'eccentricità in altezza che va a caricare una parte di isolatori e scaricarne degli altri, creando diversi punti di cambio pendenza della bilineare della legge costitutiva di essi, portando il punto di distacco degli isolatori a valori diversi di forza. Ciò non avviene per sismi più forti perché si raggiunge più facilmente il punto di distacco appena descritto e perciò il sistema si muove similmente nei due modelli.

Il secondo caso studio, ovvero l'ospedale di Elbistan, non presenta il modello completo dell'edificio, quindi, i risultati ottenuti dal modello semplificato si possono considerare come ordine di grandezza. Questo perché, come visto dal caso precedente, i risultati ottenuti dal modello semplificato e completo differiscono di circa il 10%, per esempio sui picchi massimi di spostamento. In questo caso gli spostamenti sono inferiori ai limiti degli isolatori in tutti i sismi considerati tranne uno. La registrazione di questo sisma però, è avvenuta in una stazione posta all'incirca alla stessa distanza tra l'epicentro e l'ospedale, ma dal lato opposto. Questo potrebbe portare a diverse tipologie di terreno e quindi ad una

registrazione della scossa non perfettamente veritiera. Anche qui per la sovrastruttura nulla fuori dai limiti di normativa.

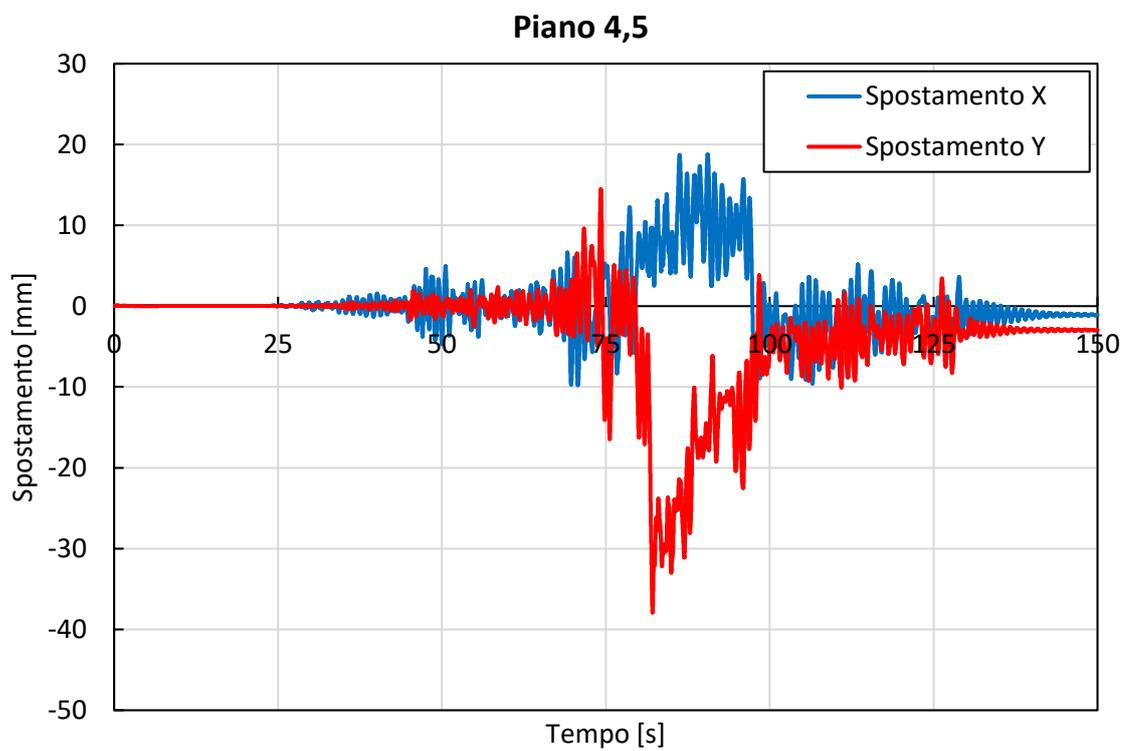
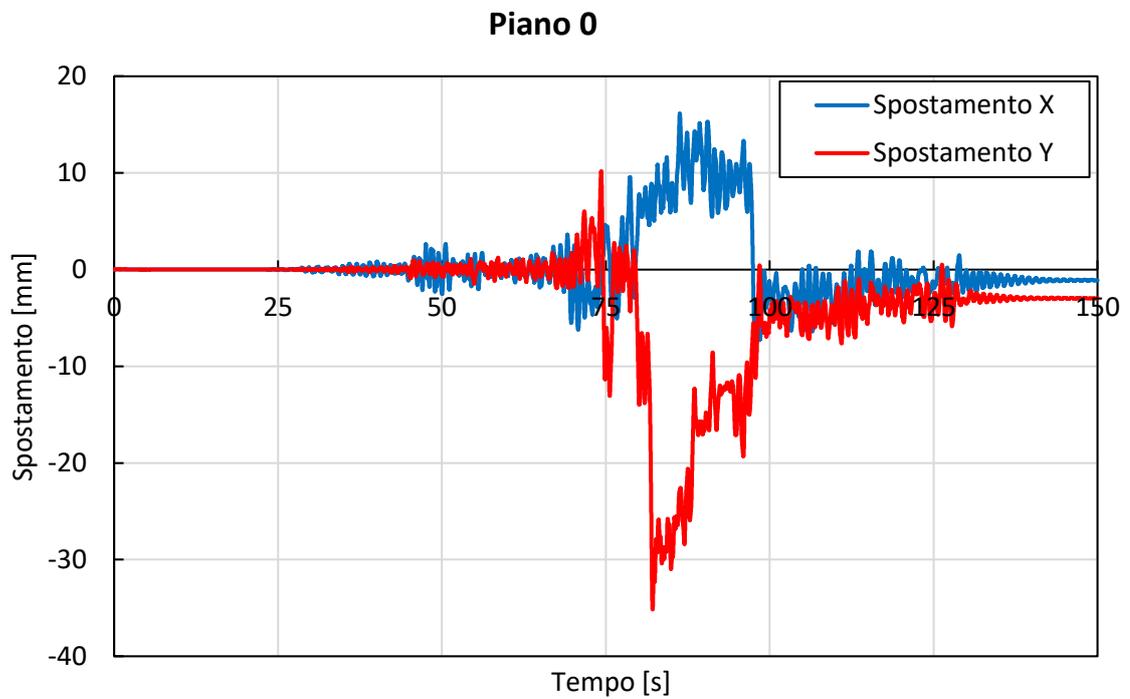
In sintesi, si può affermare che entrambi gli ospedali possono essere considerati sicuri perché rientrano nei limiti di progetto. Inoltre, non hanno subito danni reali tali da dover chiudere l'edificio o interromperne la sua funzione. Questo è molto positivo per una struttura strategica come quella dell'ospedale.

Per l'ultimo caso, invece, l'analisi è stata svolta a fini teorici quindi porta con sé dei risultati in termini di spostamento poco significativi. Quello che si è riscontrato di interessante, invece, è la suddivisione dell'energia dissipata tra isolatori e dissipatori, ovvero che avviene linearmente. Ciò porta a dire che, a parità di spostamento richiesto, è economicamente più conveniente utilizzare una soluzione che presenti solamente isolatori a doppia superficie curva, compatibilmente con la produzione e realizzazione di essi. Contrariamente, se si cerca di ridurre lo spostamento, potrebbe essere più conveniente ed efficace utilizzare una soluzione mista con isolatori e dissipatori accoppiati.

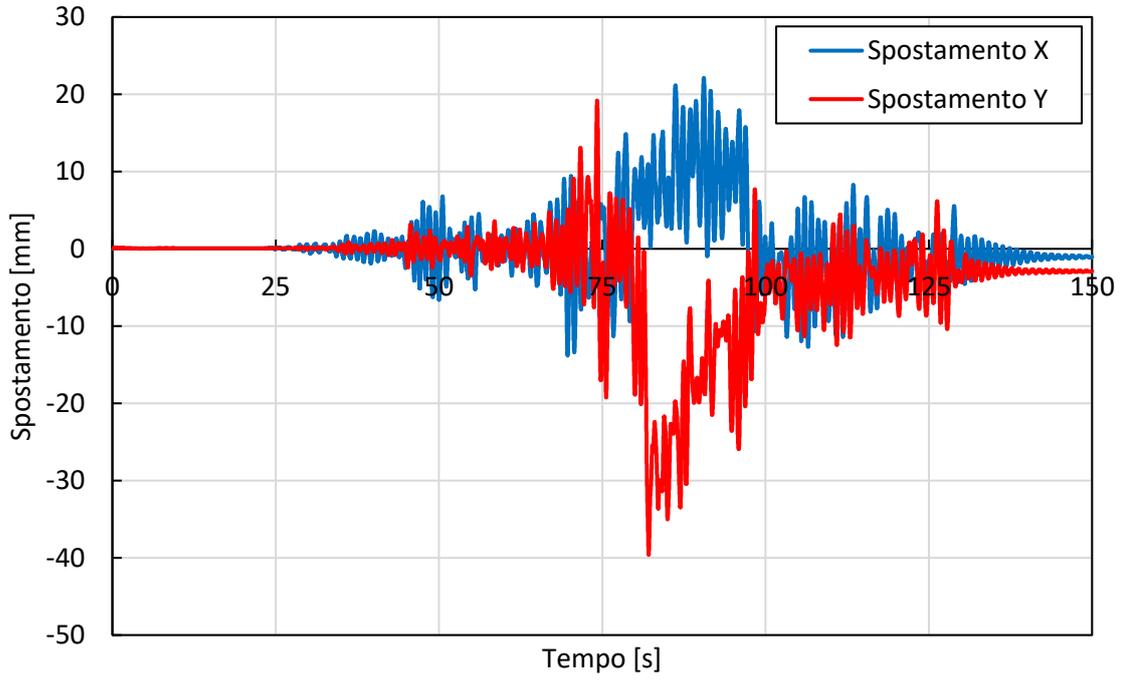
Concludendo, si può affermare che la differenza tra modelli semplificati e completi c'è, ma è comunque abbastanza ridotta, come detto, attorno al 10% a sfavore di sicurezza. Perciò, per avere un primo ordine di grandezza e sgrezzare i risultati ha senso appoggiarsi anche ad un modello semplificato. Un ulteriore vantaggio è sicuramente anche quello del tempo dell'analisi, dal momento che, per il modello semplificato ci si impiega pochi secondi, mentre per quello completo si tratta anche di decine di minuti, se si svolge l'analisi al passo ad integrazione diretta. Dipende chiaramente dalla grandezza dell'edificio e dal numero di elementi. Diversamente però, se si svolge l'analisi FNA, che è implementata nei software SAP2000 e ETABS ma, non è detto che sia presente in tutti gli altri software, i tempi di analisi si abbattano notevolmente, diventando confrontabili con quelli del modello semplificato. Motivo per cui, per i diversi casi studio, è stata usata questo tipo di analisi per il modello completo, risparmiando notevole quantità di tempo.

APPENDICE A

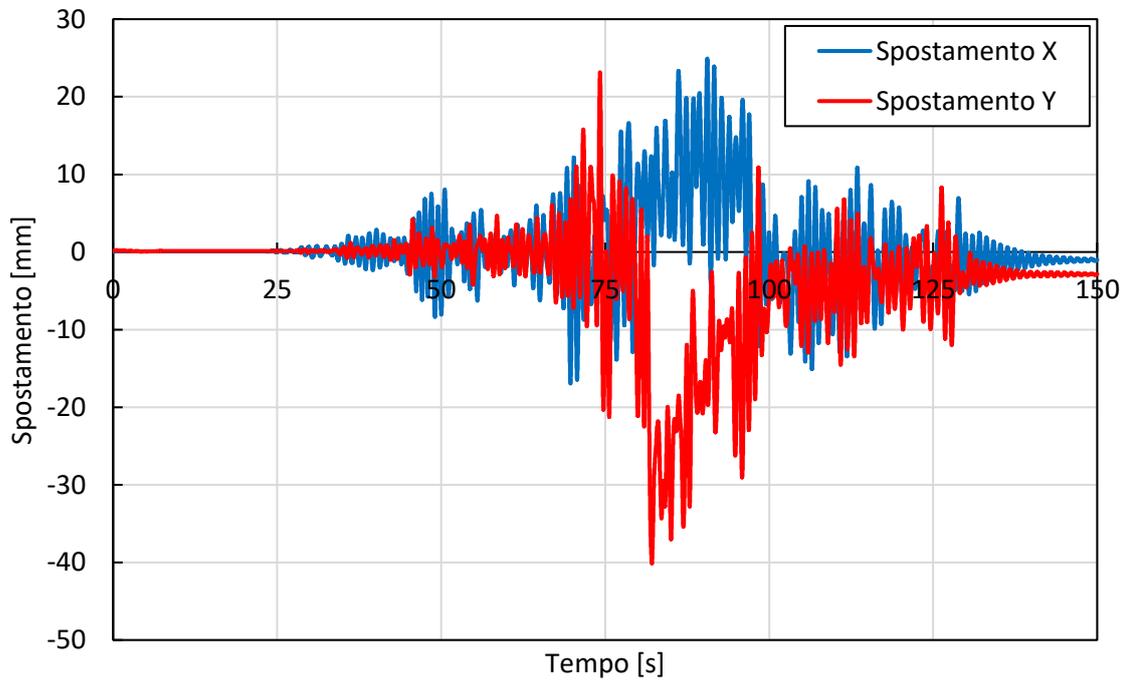
In questa appendice vengono riportati i grafici degli spostamenti di ogni piano dell'ospedale nel tempo.



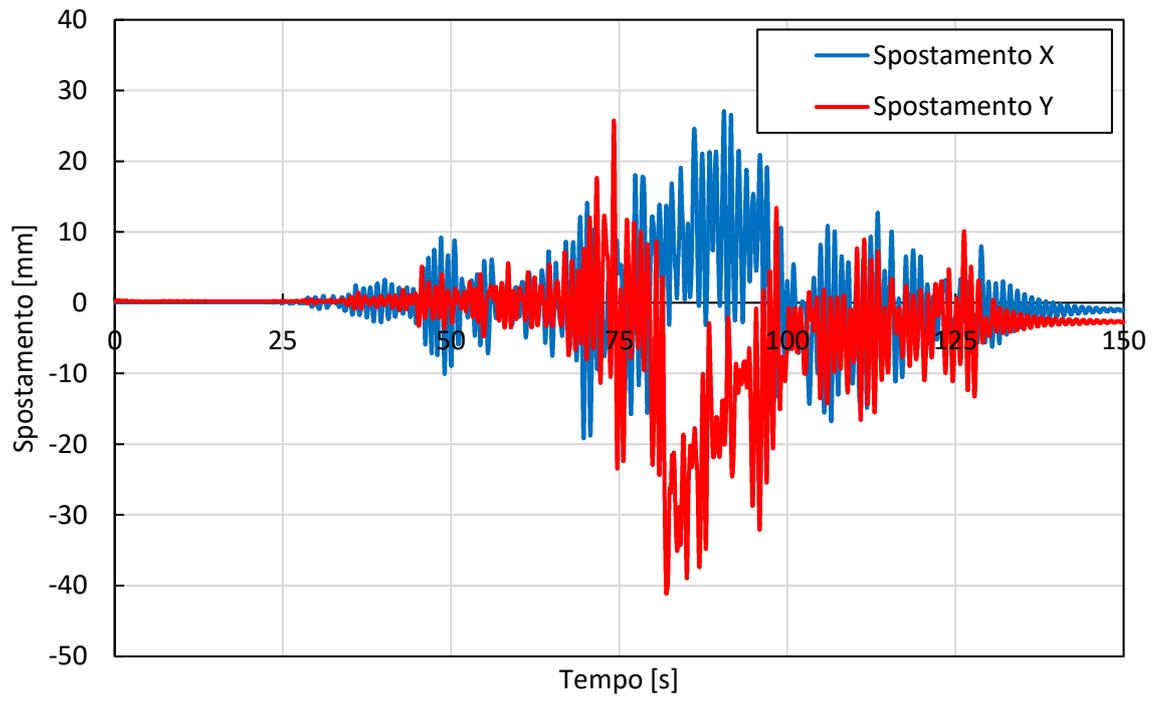
Piano 9



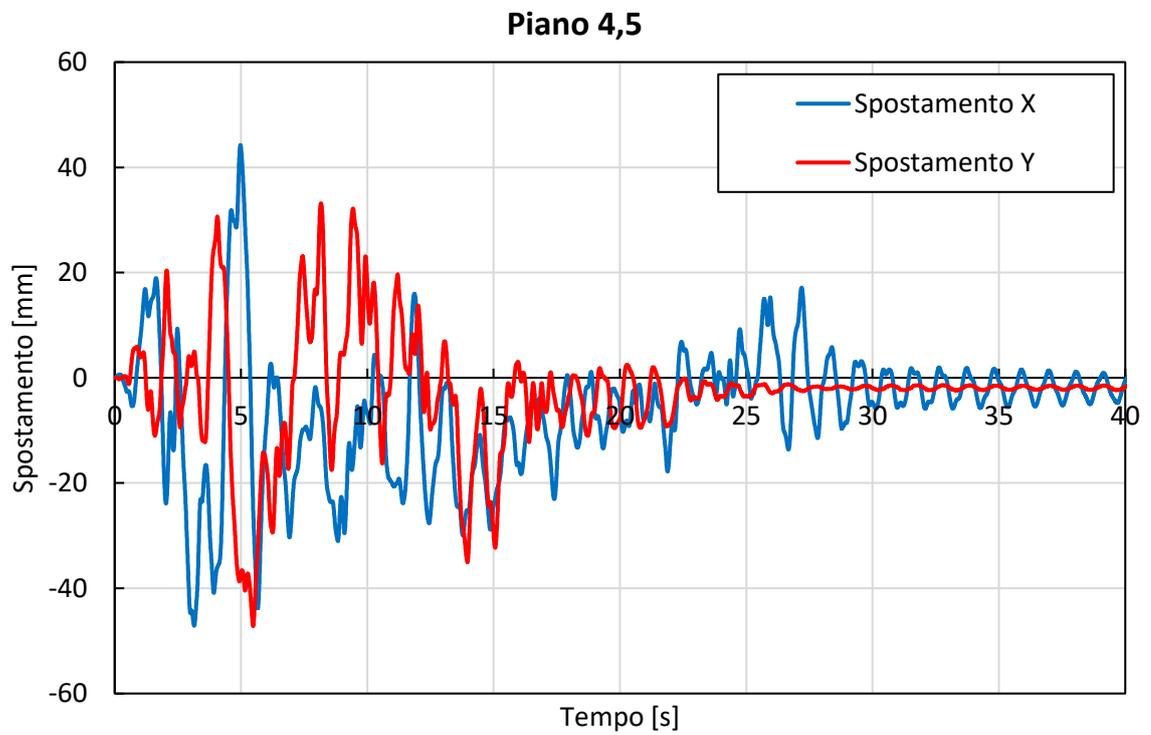
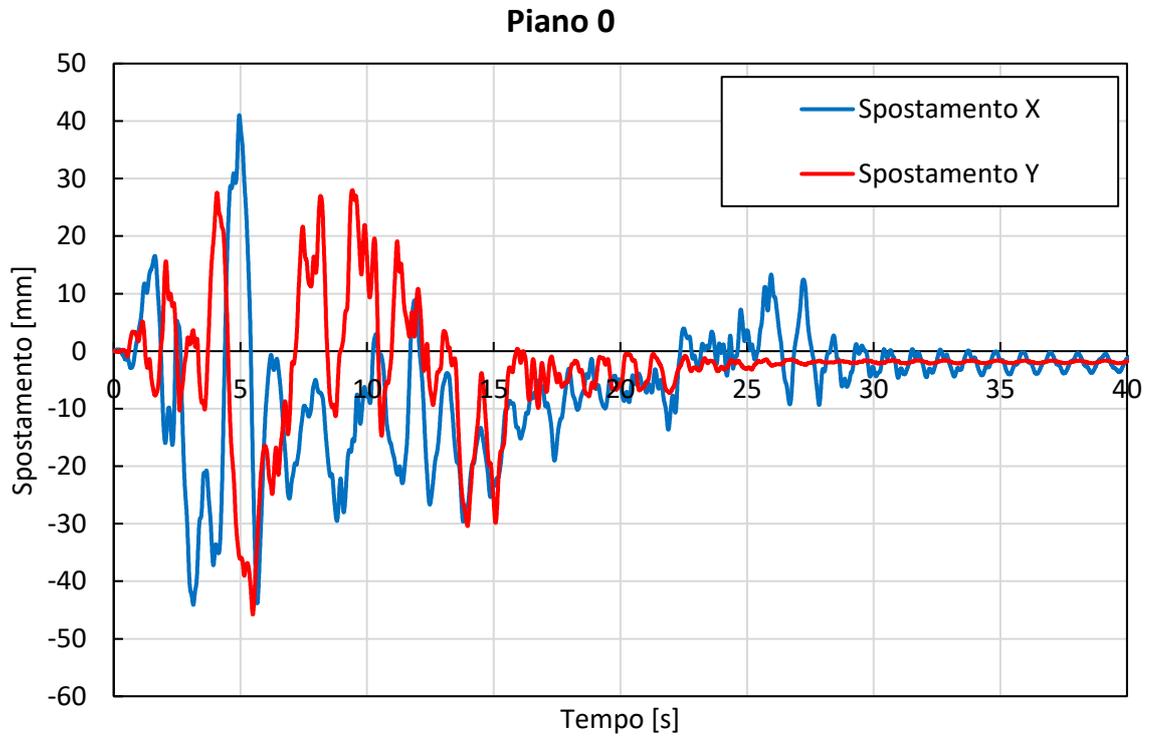
Piano 13,5

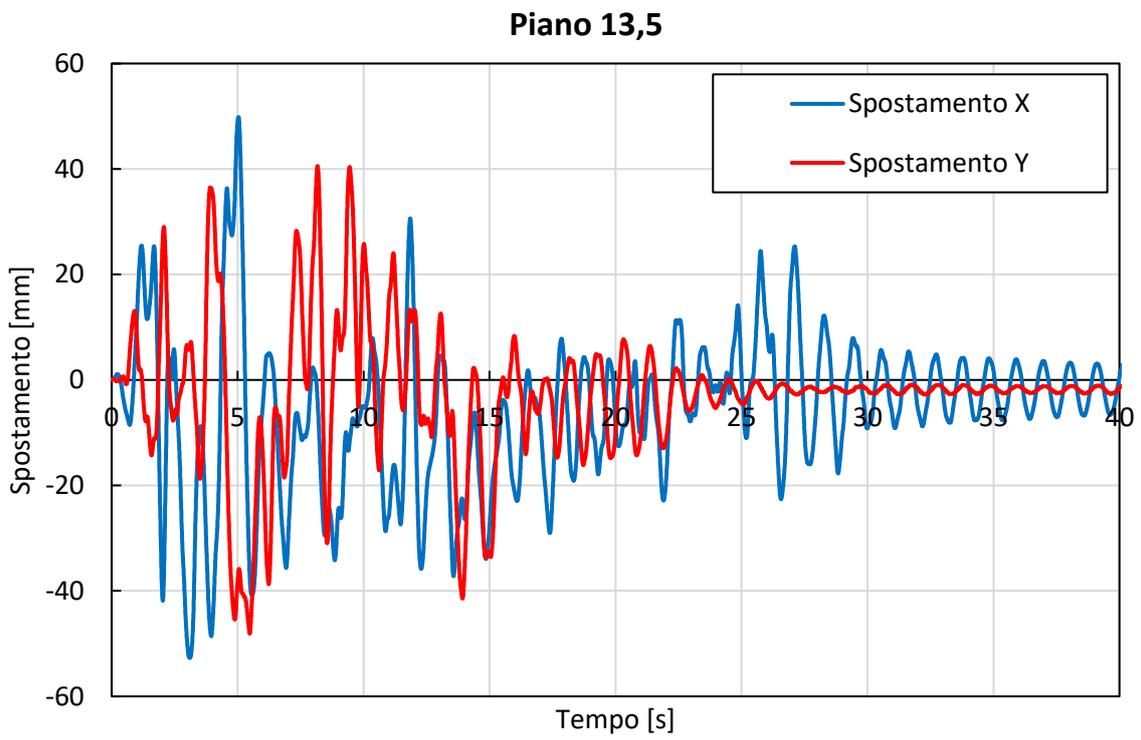
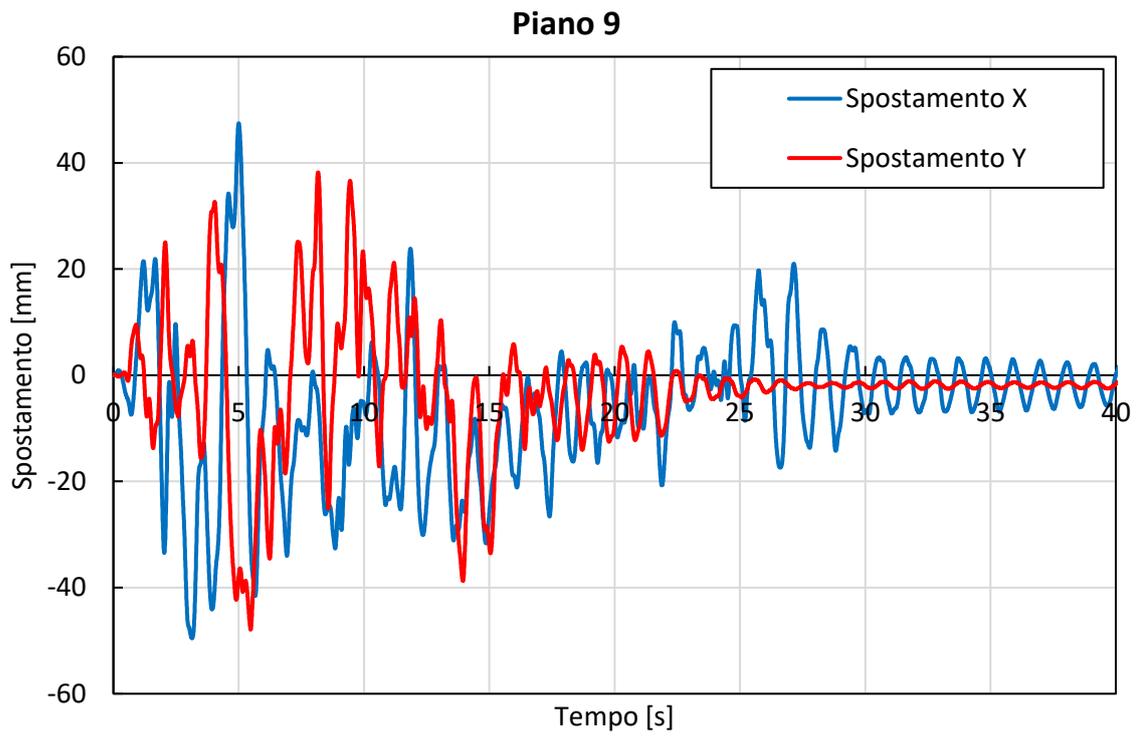


Piano 18

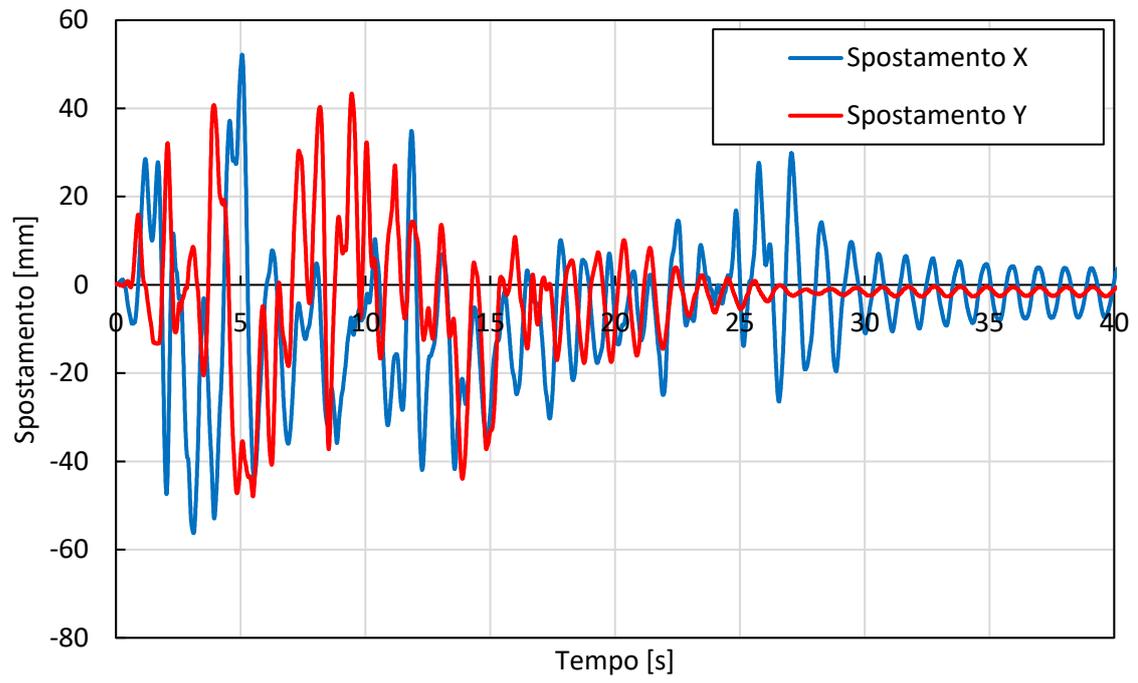


APPENDICE B



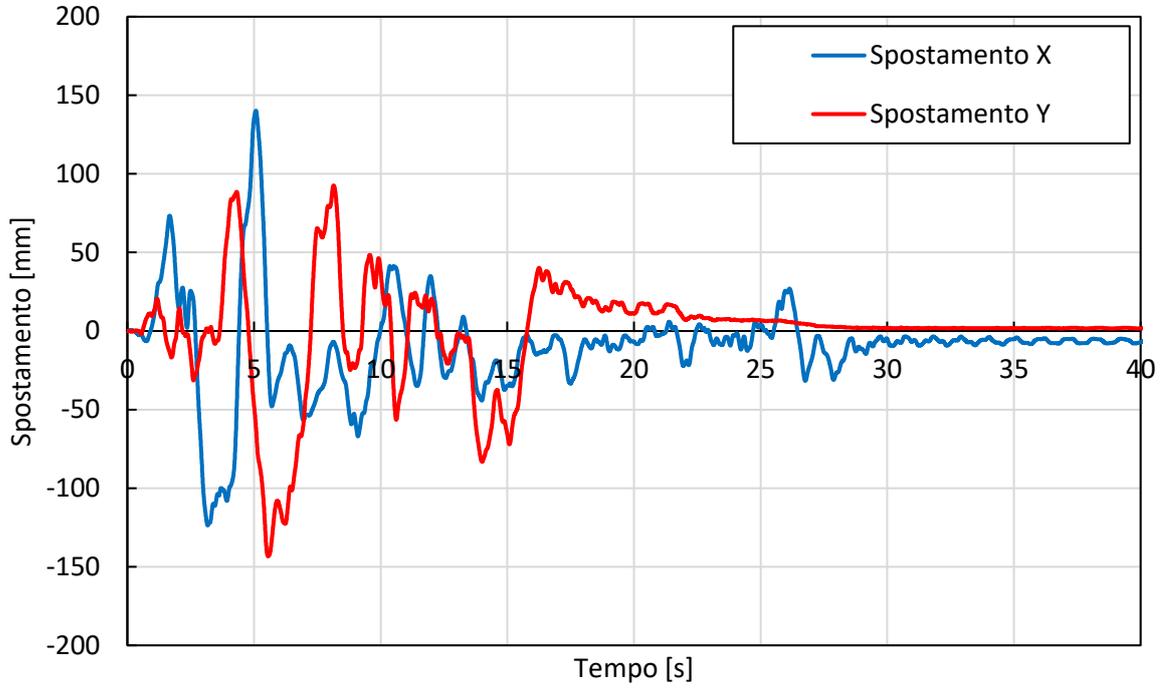


Piano 18

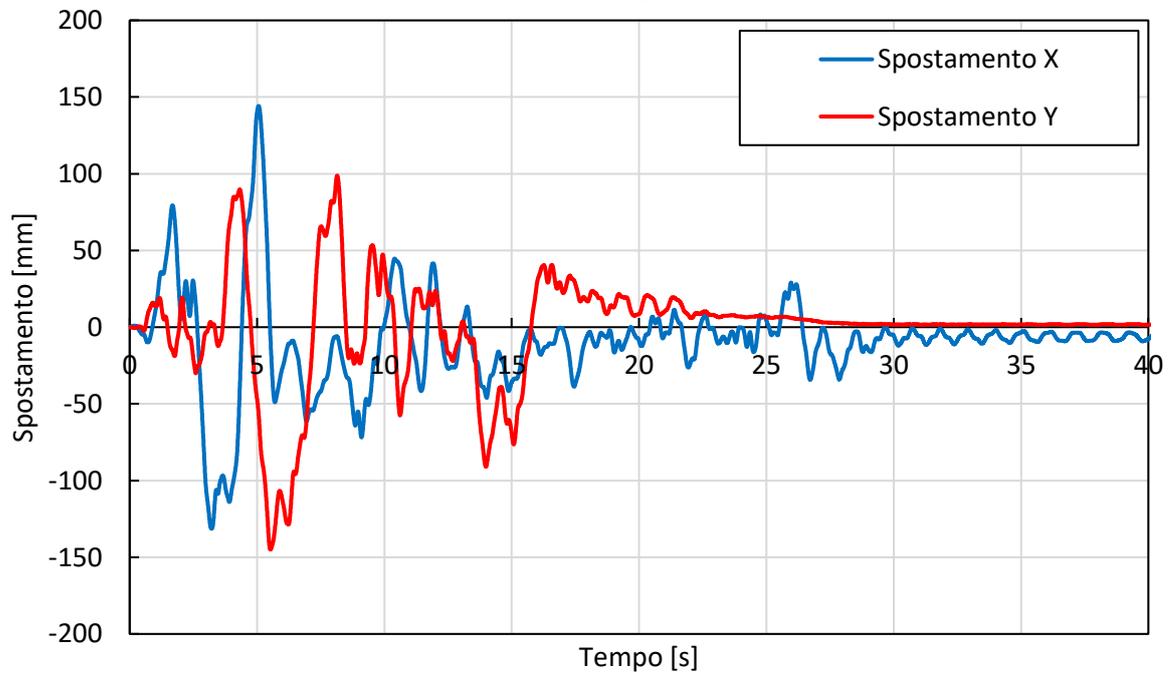


APPENDICE C

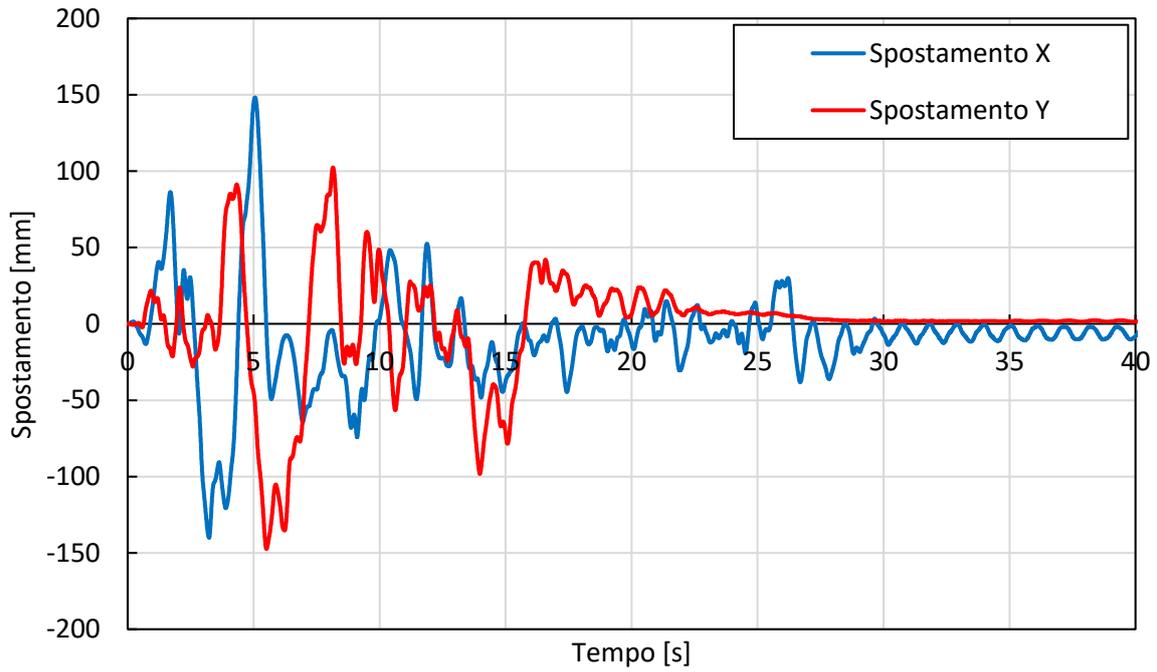
Piano 0



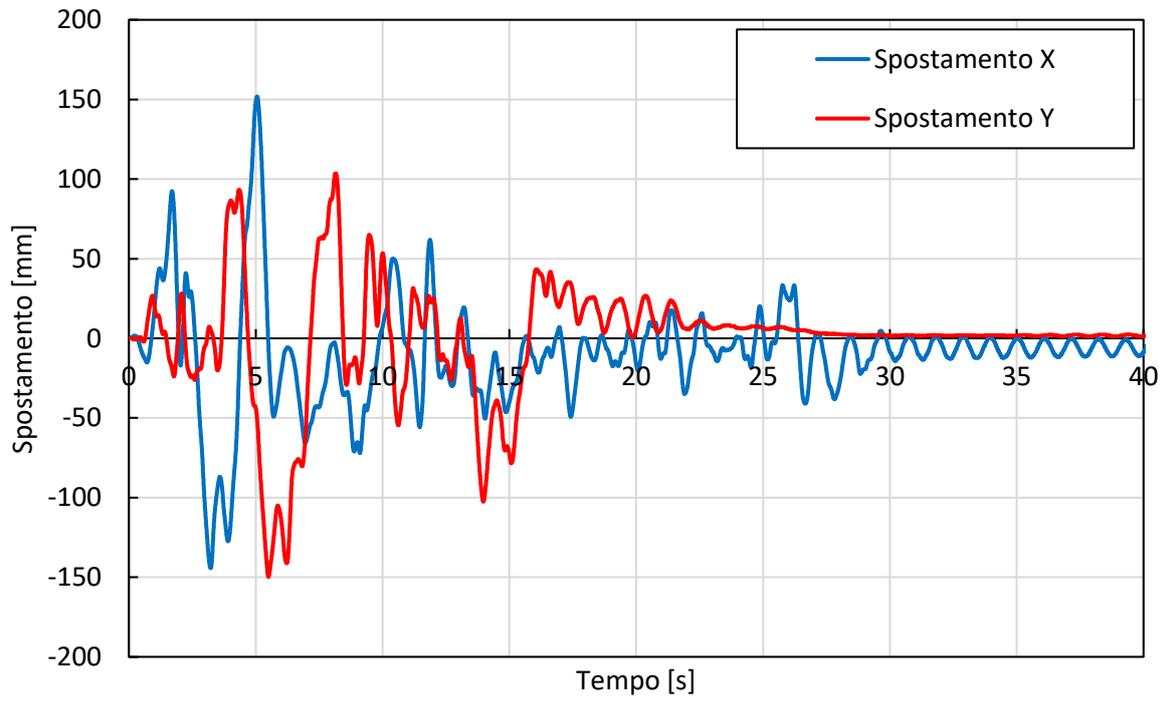
Piano 4,5



Piano 9



Piano 13,5



Piano 18

