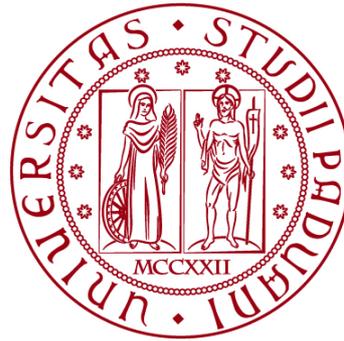


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**PRESTAZIONE SISMICA DI UN OSPEDALE ISOLATO
ALLA BASE ESPOSTO AL TERREMOTO TURCHIA 2023**

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

Laureando: Marco Moscardo
1239111

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	Pendolo a doppia superficie curva con comportamento adattivo	24
5	Caso studio: ospedale statale 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.....	33
5.2.3	Stazione 0118: magnitudo 6.6.....	35
5.3	Modello semplificato a 1 gdl	38
5.3.1	Descrizione del modello	38
5.3.1.1	Modellazione degli isolatori	39
5.3.1.2	Inserimento accelerogrammi.....	42

5.3.1.3	Definizione delle analisi.....	42
5.3.2	Risultati ottenuti.....	44
5.3.2.1	Magnitudo 7.8.....	44
5.3.2.2	Magnitudo 7.5.....	47
5.3.2.3	Magnitudo 6.6.....	49
5.3.2.4	DBE.....	51
5.3.2.5	MCE.....	53
5.3.2.6	Ordine temporale.....	55
5.4	Modello completo.....	58
5.4.1	Descrizione del modello.....	58
5.4.2	Risultati.....	60
5.4.2.1	Magnitudo 7.8.....	62
5.4.2.2	DBE.....	66
5.4.2.3	MCE.....	71
5.5	Confronto risultati modello semplificato e completo.....	77
6	Caso studio: ospedale statale di Elbistan.....	79
6.1	Introduzione.....	79
6.2	Confronto spettri in accelerazione e in spostamento.....	82
6.2.1	Stazione 4628: magnitudo 7.8.....	82
6.2.2	Stazione 4631: magnitudo 7.5.....	85
6.2.3	Stazione 4611: magnitudo 6.6.....	88
6.3	Modello semplificato a 1 gdl.....	92
6.3.1	Descrizione del modello.....	92
6.3.1.1	Modellazione degli isolatori.....	93
6.3.1.2	Inserimento accelerogrammi.....	93
6.3.1.3	Definizione delle analisi.....	94
6.3.2	Risultati ottenuti.....	95

6.3.2.1	Magnitudo 7.8	95
6.3.2.2	Magnitudo 7.5	97
6.3.2.3	Magnitudo 6.6	100
6.3.2.4	DBE.....	102
6.3.2.5	MCE.....	104
6.3.2.6	Ordine temporale	106
7	CASO STUDIO: ANALISI PARAMETRICA CON DOPPIO PENDOLO ADATTIVO	111
7.1	Introduzione	111
7.2	Stazione 4615: magnitudo 7.8.....	112
7.3	Modello semplificato a 1 gdl	114
7.3.1	Modellazione degli isolatori	114
7.3.2	Risultati ottenuti	116
7.3.2.1	Caso base: $\mu=8\%$ e $R=5$ m.....	116
7.3.2.2	Doppio pendolo adattivo: $R_1=4$ m, $R_2=2,2$ m e $d_1=0,24$ m costanti.....	119
7.3.2.3	Doppio pendolo adattivo: $\mu_1=5\%$, $\mu_2=8\%$, $d_1=0,24$ m costanti	124
7.3.2.4	Doppio pendolo adattivo: $\mu_1=7,2\%$, $\mu_2=9,4\%$, $d_1=0,35$ m costanti.....	129
7.3.3	Confronto risultati.....	133
7.4	Modello completo	139
7.4.1	Risultati	139
7.4.1.1	Caso base: $\mu=8\%$, $R=5$ m.....	139
7.4.1.2	Doppio pendolo adattivo: $R_1=4$ m, $R_2=2,2$ m, $d_1=0,24$ m costanti.....	142
7.4.1.3	Doppio pendolo adattivo: $\mu_1=5\%$, $\mu_2=8\%$, $d_1=0,24$ m costanti	147
7.4.1.4	Doppio pendolo adattivo: $\mu_1=7,2\%$, $\mu_2=9,4\%$, $d_1=0,35$ m costanti.....	151
7.4.2	Confronto risultati.....	156
8	Conclusioni	161
	Appendice A.....	163
	Appendice B.....	166
	Appendice C.....	169

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1: mappa isosismica. [1]	3
Figura 2-2: scala di intensità Mercalli modificata. [3]	4
Figura 4-1: strategie di riduzione della domanda.	15
Figura 4-2: sistema a due gradi di libertà isolato. [6]	16
Figura 4-3: rappresentazione dei modi di vibrare del sistema. [6].....	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, 2020]	22
Figura 4-6: ciclo isteretico del pendolo a scorrimento. [FIPMEC]	23
<i>Figura 4-7: doppio pendolo adattivo. [7].....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4-8: diagramma forza spostamento doppio pendolo adattivo. [7].....</i>	<i>25</i>
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.....	38
Figura 5-4: proprietà del link friction isolator, in kN e mm.	40
Figura 5-5: accelerogramma stazione 0118 magnitudo 7.8, direzione Est-Ovest.....	42
Figura 5-6: esempio di analisi al passo, caso stazione 0118, magnitudo 7.8.	43
Figura 5-7: modello completo.	58
Figura 5-8: rappresentazione del centro di massa e centro di rigidità del piano degli isolatori.....	60
Figura 5-8: Deformata primo modo di vibrare.	61
Figura 6-1: foto dall'alto dell'ospedale e pianta della suddivisione in blocchi.....	80
Figura 6-2: inquadramento geografico stazione 4628.	83
Figura 6-3: inquadramento geografico stazione 4631.	86
Figura 6-4: inquadramento geografico stazione 4611.	89
<i>Figura 6-5: modello 1 gdl</i>	<i>92</i>
<i>Figura 6-6: proprietà del link friction isolator, in kN e mm</i>	<i>93</i>
<i>Figura 6-7: accelerogramma stazione 4631 magnitudo 7.5, direzione Est-Ovest.....</i>	<i>94</i>

<i>Figura 6-8: esempio di analisi al passo, caso stazione 4631, magnitudo 7.5.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 7-1: inquadramento geografico stazione 4615.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 7-2: elemento "Triple Pendulum"</i>	<i>114</i>
<i>Figura 7-3: valori dei parametri delle due superfici interne del link triple pendulum.</i>	<i>115</i>

1 INTRODUZIONE

La notizia degli eventi sismici che il 6 Febbraio hanno colpito le regioni centro-sud della Turchia e nord-ovest della Siria ha avuto risonanza in tutto il mondo a causa dei danni che hanno provocato. La presente tesi ha lo scopo di condurre un'analisi con solutore numerico di due ospedali isolati alla base con dispositivi antisismici, nello specifico della tipologia a doppio pendolo, situati uno nella provincia di Kahramanmaraş ed uno ad Adana. Per entrambi gli ospedali sarà implementato un modello semplificato a un grado di libertà con il programma di calcolo agli elementi finiti SAP2000, in grado di descrivere in modo approssimato il comportamento dei due edifici. Dell'ospedale di Adana sarà fatta un'analisi più approfondita dal momento che è stato possibile recuperare il modello completo agli elementi finiti della struttura. Questa parte di tesi, descritta ai capitoli 5 e 6 del presente elaborato, è stata frutto del lavoro svolto in cooperazione con un collega.

Una volta che è stato analizzato il comportamento dei due ospedali sottoposti ai sismi registrati dalle stazioni a loro più vicine, si va ad effettuare delle analisi su un nuovo edificio che ha le stesse caratteristiche strutturali dell'ospedale di Adana, ma che lo si ipotizza collocato nei pressi della stazione più vicina all'epicentro del sisma più forte. Si crea quindi un caso base nel quale all'edificio si applicano degli isolatori sismici a doppia superficie scorrevole e la si va a confrontare con dei casi nei quali si vanno a sostituire al tipo di dispositivo di isolamento appena citato dei doppi pendoli con comportamento adattivo, ossia aventi raggi di curvatura e attrito differenti per le due superfici curve.

Nei capitoli iniziali di questo elaborato, invece, si dà una panoramica degli eventi sismici avvenuti in Turchia e che utilizzeremo per le analisi, andando a riportare informazioni interessanti edifici e strutture e tralasciando gli altri aspetti di diversa competenza. Successivamente si illustrano i concetti base delle analisi non lineari, per poi passare alla teoria che sta alla base dell'isolamento sismico e dei dispositivi di isolamento utilizzati in questa tesi: come funzionano, come sono composti e quali sono le leggi che li descrivono. Prima di passare all'illustrazione dei risultati ottenuti dalle analisi viene anche fatta una descrizione generale degli ospedali in questione e sull'utilizzo dei programmi di calcolo utilizzati.

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 [2]. La *figura 2-1* rappresenta gli epicentri dei due eventi sismici sopra descritti, rappresentati 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. [1]

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 [3].

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. [3]

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 [4].

-
1. Erdik, M., Tümsa, MBD, Pınar, A., Altunel, E. e Zülfikar, AC, 2023, A preliminary report on the 6th February 2023 earthquakes in Türkiye, <http://doi.org/10.32858/temblor.297>.
 2. <http://terremoti.ingv.it>.
 3. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/modified-mercalli-intensity-scale>.
 4. 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 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

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

Noto 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 :

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

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

5. Ed Wilson, Fast nonlinear analysis, pp 18.4-18.8;

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.

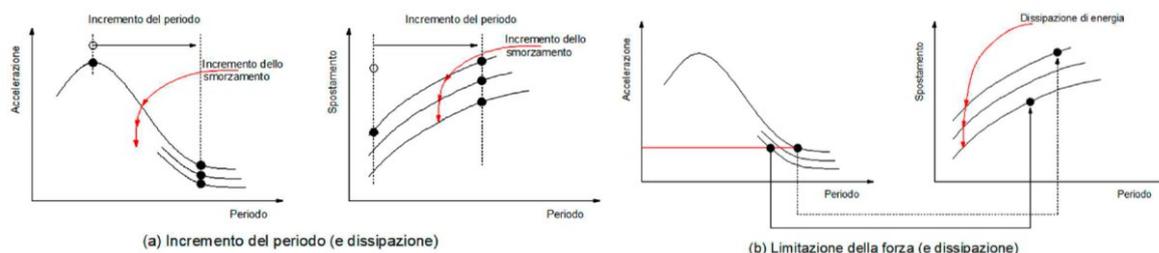


Figura 4-1: strategie di riduzione della domanda. [Ingenio]

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 più approfondita i dispositivi di scorrimento in quanto presenti negli ospedali oggetti di studio.

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 .

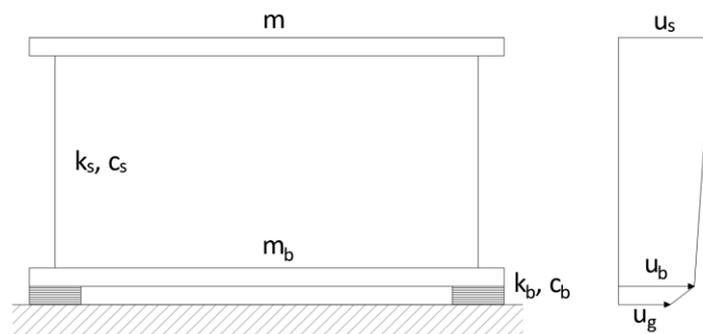


Figura 4-2: sistema a due gradi di libertà isolato. [6]

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

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

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

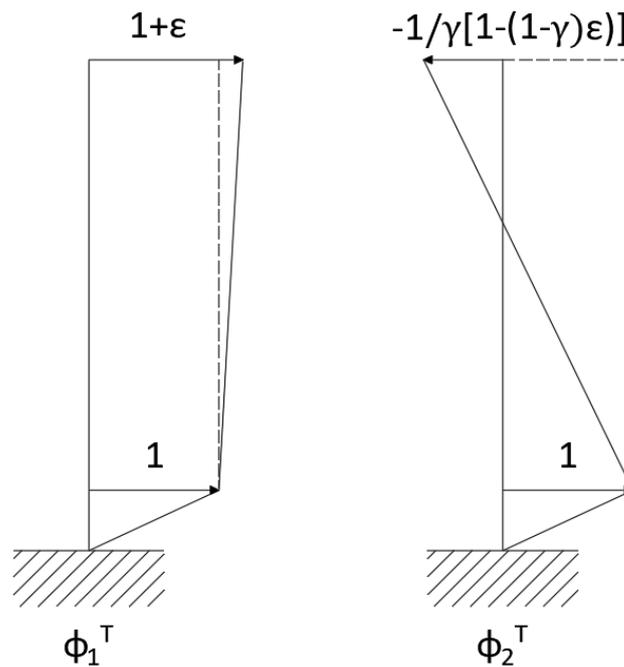


Figura 4-3: rappresentazione dei modi di vibrare del sistema. [6]

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]

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 rigidità 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 e quelli 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.

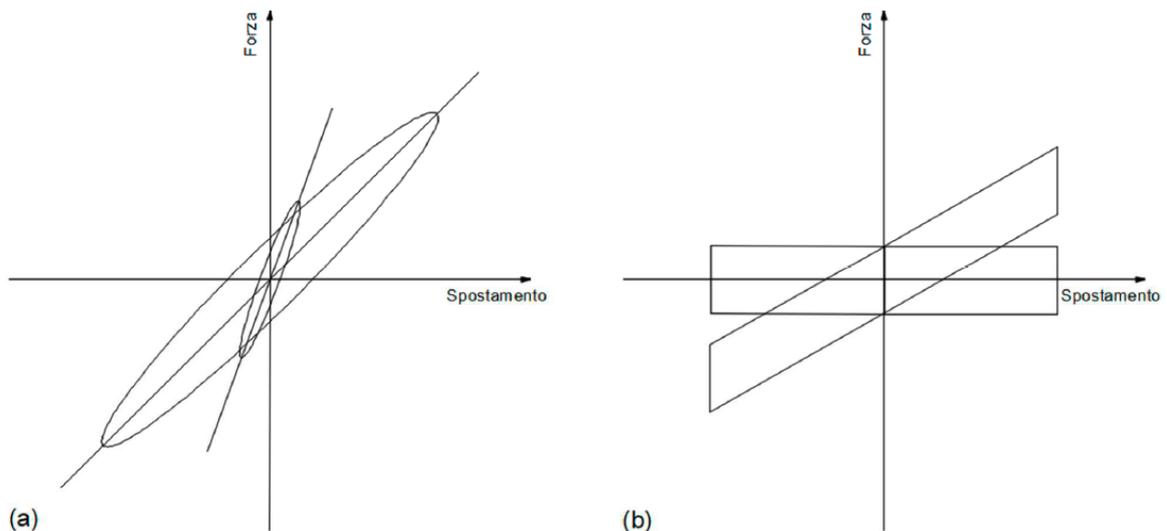


Figura 4-4: diagramma di forza-spostamento degli isolatori elastomerici (a) e a scorrimento (b).

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.

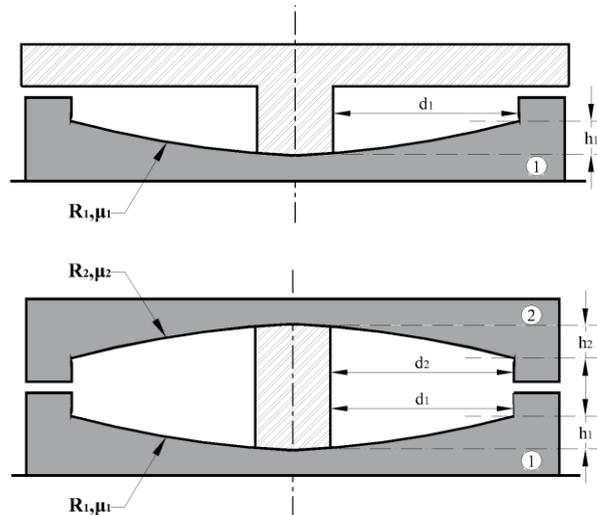


Figura 4-5: dall'alto al basso: singolo e doppio FPS. [Barrera-Vargas, 2020]

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.

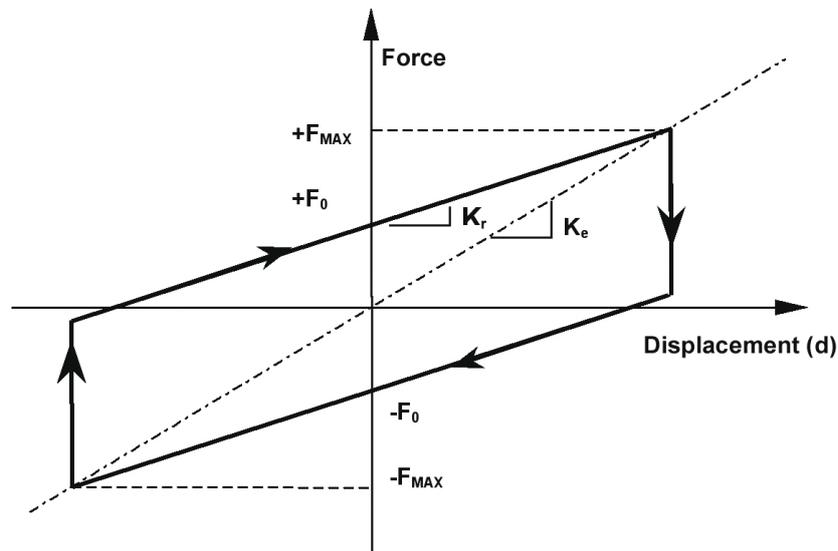


Figura 4-6: ciclo isteretico del pendolo a scorrimento. [FIPMEC]

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 Pendolo a doppia superficie curva con comportamento adattivo

Questo tipo di dispositivo di isolamento consiste in un pendolo scorrevole a due superfici curve che hanno diversi valori in termini di raggio di curvatura R_i , coefficiente di attrito μ_i e capacità di spostamento d_i . Da questa caratteristica ne deriva il comportamento adattivo, infatti, l'entità del sisma al quale viene sottoposto il sistema di isolamento determina se verrà attivata solo una delle due superfici o entrambe.

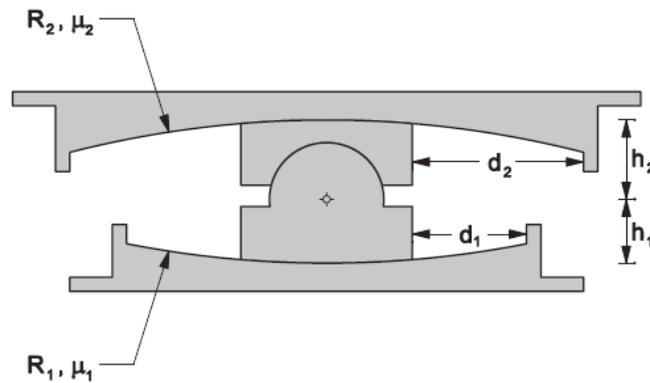


Figura 4-7: doppio pendolo adattivo. [7]

Supponiamo che $\mu_1 < \mu_2$. Quando la forza orizzontale supera la forza di attivazione della superficie 1, pari a $F_{f1} = \mu_1 N_{sd}$, inizia lo scorrimento su tale superficie. La superficie 2 non viene attivata fino a che la forza orizzontale non raggiunge il valore $F_{f2} = \mu_2 N_{sd}$. Da quel momento si ha lo scorrimento accoppiato delle due superfici e la relazione forza-spostamento totale risulta essere la seguente [7]:

$$F = \frac{N_{sd}}{R_1 + R_2} u + \frac{F_{f1} R_1 + F_{f2} R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.40)$$

Rispetto alla fase precedente, in cui si aveva solo la superficie 1 attiva, si ha una riduzione della rigidezza del sistema e un aumento dell'attrito efficace.

Il comportamento accoppiato delle due superfici lo si ha fino a quando la superficie 1 non raggiunge il suo limite di spostamento d_1 . A questo istante lo spostamento totale risulta essere [7]:

$$u_{dr1} = d_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - (\mu_2 - \mu_1)R_2 \quad (4.41)$$

Raggiunto lo spostamento u_{dr1} lo slittamento continua solo sulla superficie 2 e la relazione che lega forza e spostamento totale diventa [7]:

$$F = \frac{N_{sd}}{R_2} (u - d_1) + F_{f2} \quad (4.42)$$

Lo slittamento sulla superficie 1 riparte quando il sistema di isolamento viene scaricato della forza pari a $F_{dr1} - 2F_1$ e lo slittamento sulla superficie 2 quando si scarica il sistema di $2F_2$. Nel caso in cui risulta:

$$u_{max} > u_{dr1} + 2R_2(\mu_2 - \mu_1) \quad (4.43)$$

Lo slittamento sulla superficie 2 viene riattivato prima di quello sulla superficie 1.

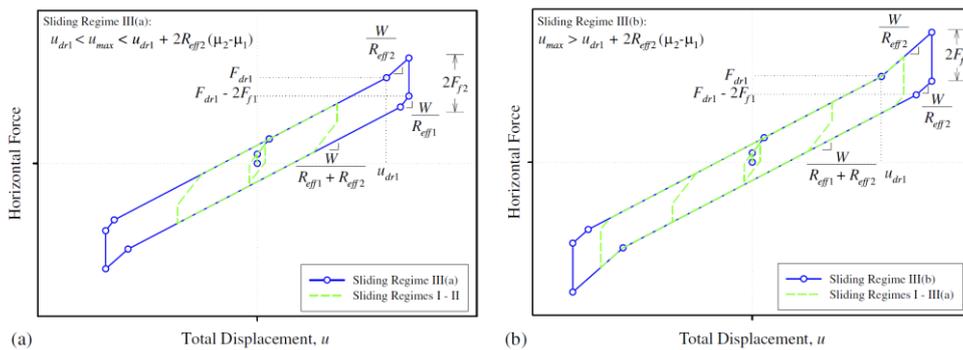


Figura 4-8: diagramma forza spostamento doppio pendolo adattivo. [7]

7. Daniel M. Fenz, Michael C. Constantinou, Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory, Wiley InterScience, 2007

5 CASO STUDIO: OSPEDALE STATALE 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 avvenuti in Turchia il 06/02/2023.

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.

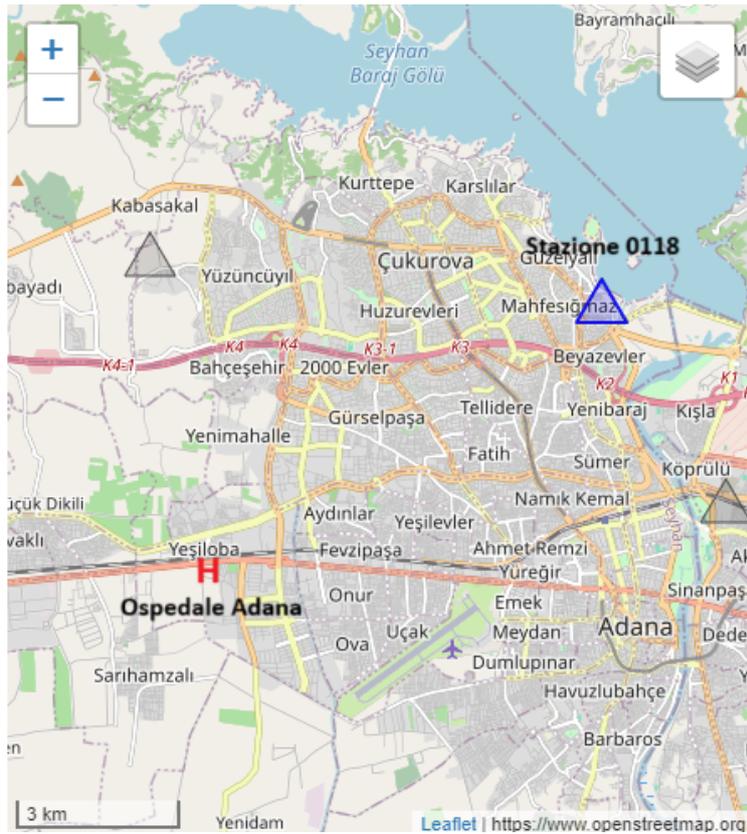
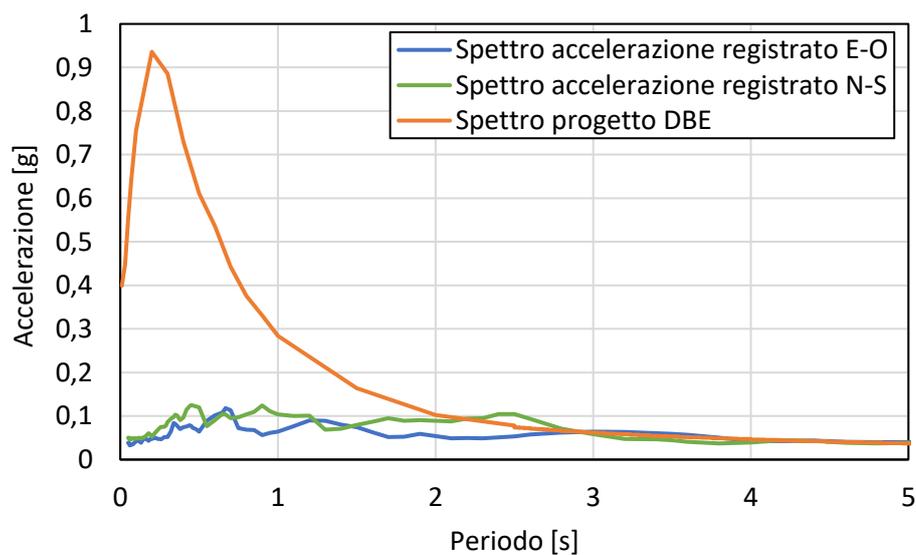
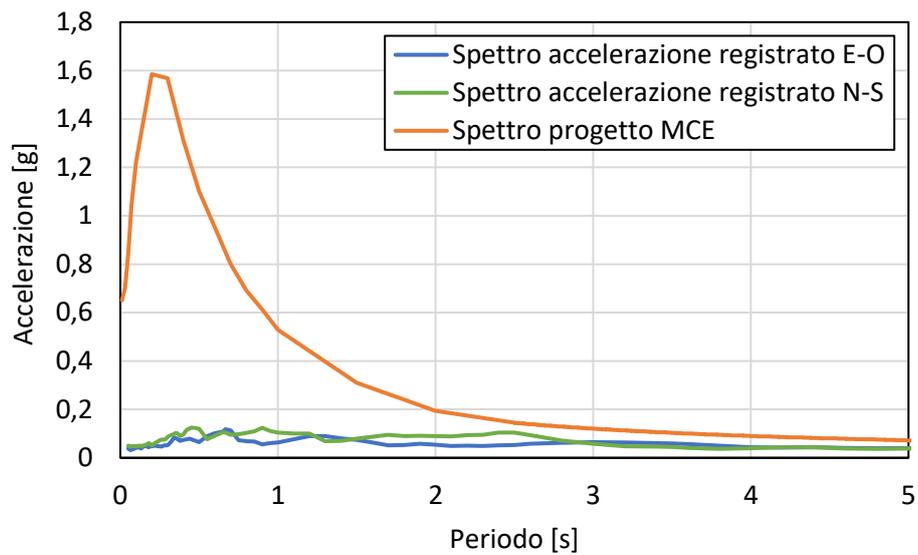


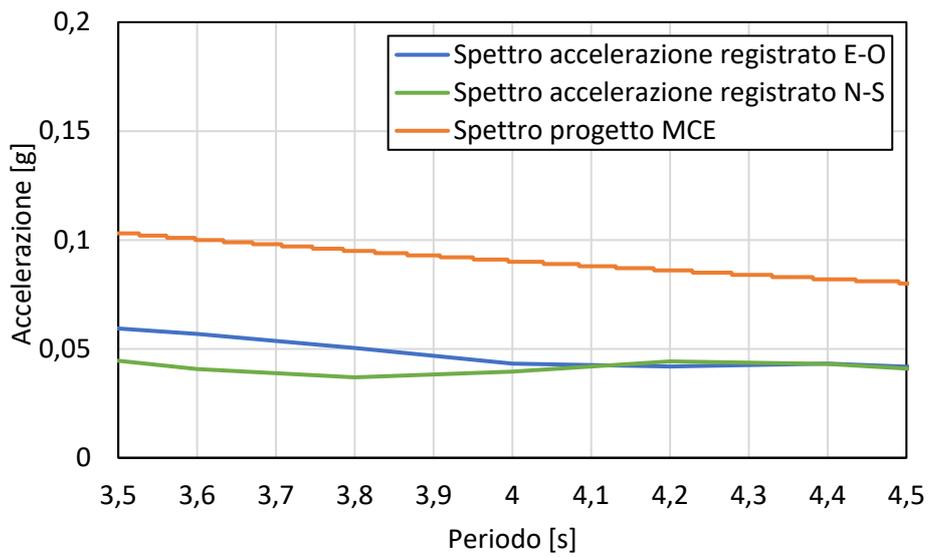
Figura 5-2: inquadramento geografico stazione 0118.

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:

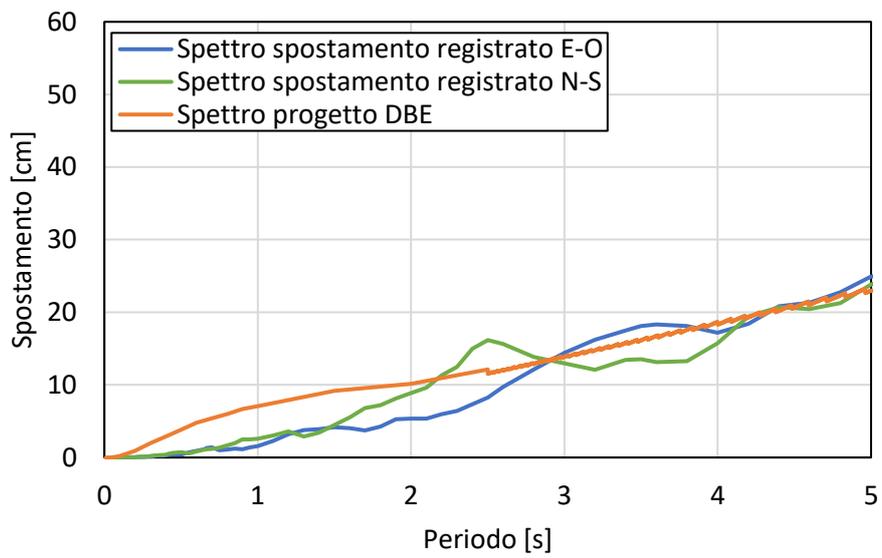


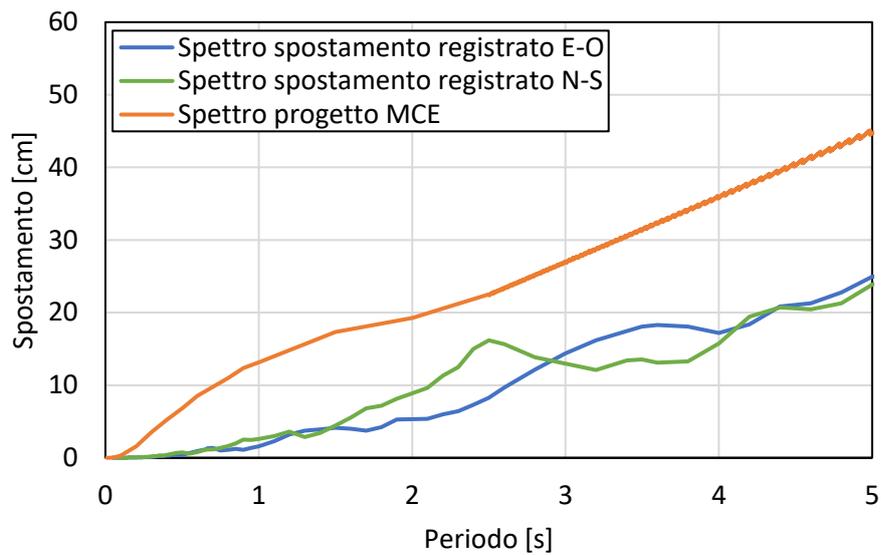


Dai due grafici risalta immediatamente la differenza di picco tra gli spettri di progetto e gli spettri dei sismi registrati in corrispondenza di bassi periodi, da 0 a 2 secondi circa. Questo si può spiegare in quanto la stazione 0118 è posta vicino all'ospedale ma ben distante dall'epicentro del sisma, circa 200 km in linea d'aria. D'altro canto, la struttura in esame è caratterizzata da un periodo fondamentale di oscillazione più elevato (attorno ai 4 secondi) 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:

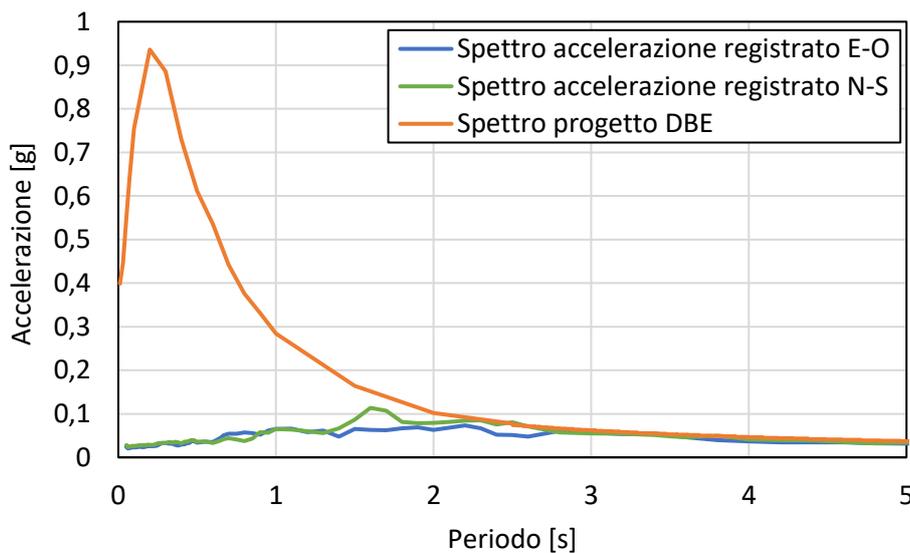


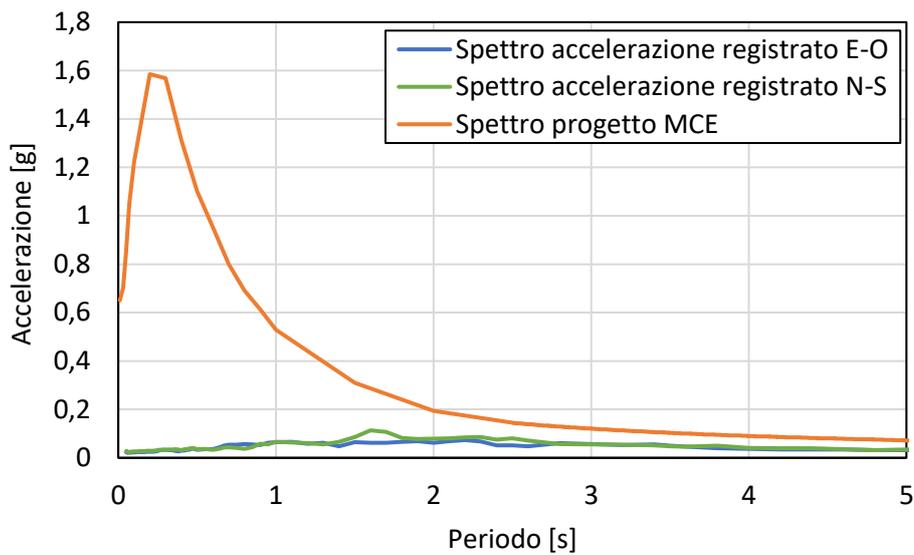


Dai due grafici si può notare che il sisma registrato prevede una domanda di spostamento, attorno ai 4 secondi, che si aggira tra i 17 e 22 cm e simile allo spettro in spostamento DBE. Mentre, lo spettro in MCE risulta sensibilmente maggiore.

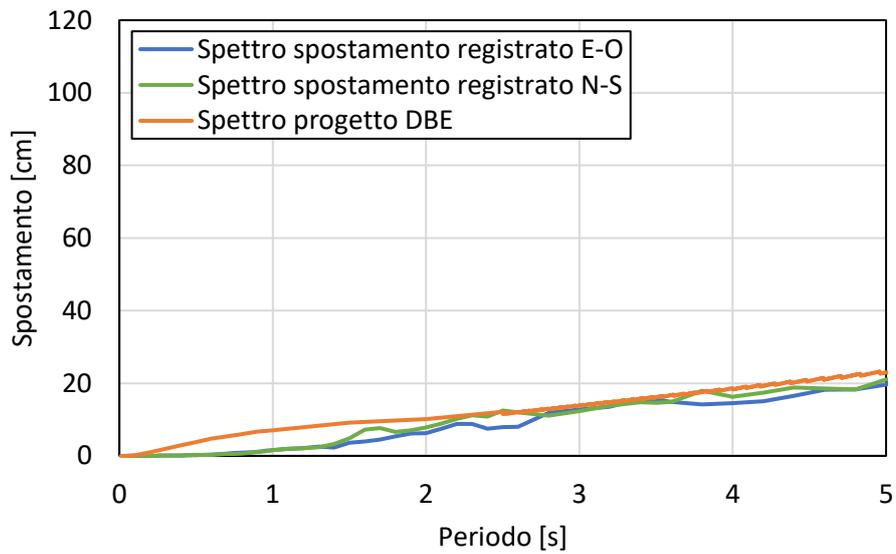
5.2.2 Stazione 0118: magnitudo 7.5

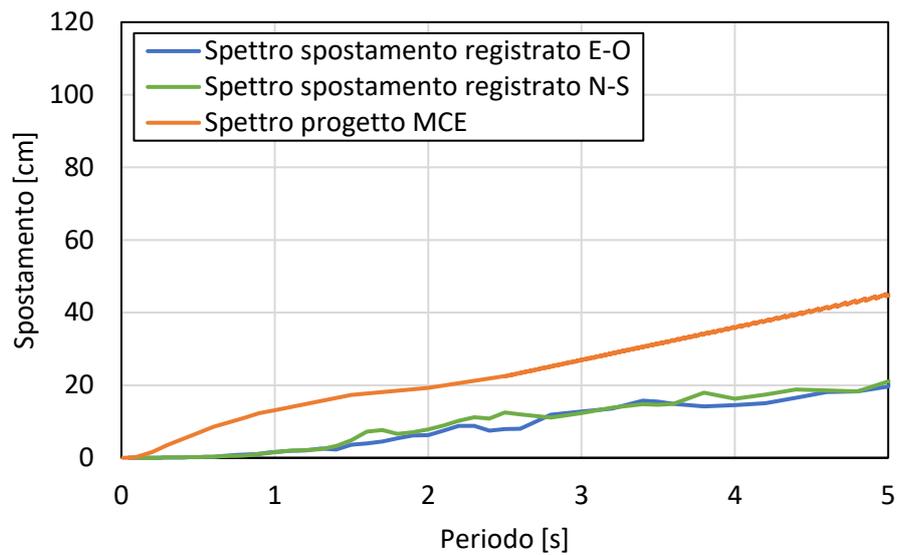
La seconda registrazione, invece, fa riferimento al secondo sisma avvenuto qualche ora successiva al primo, più precisamente il giorno 06/02/2023 alle ore 13:24. Di seguito vengono riportati i confronti degli spettri in accelerazione e in spostamento:





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.

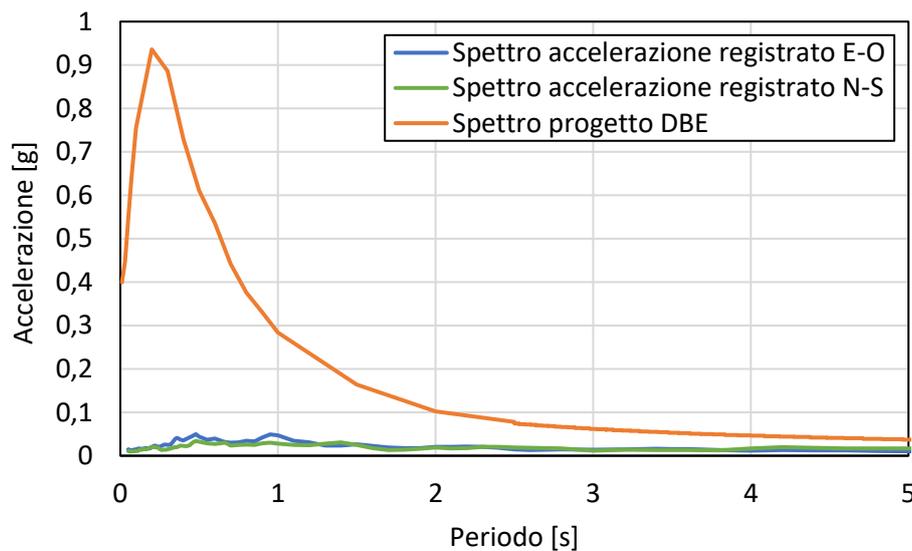


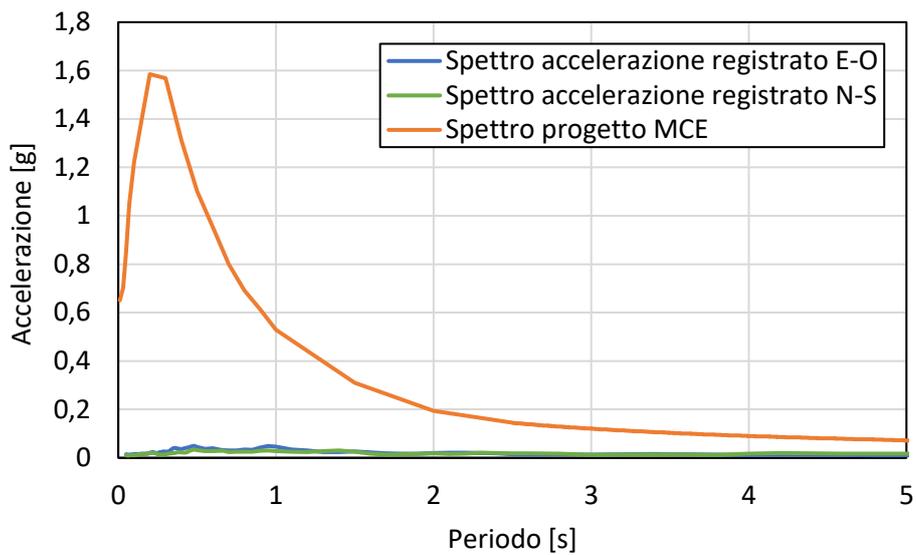


Analogo discorso anche per gli spettri in spostamento che presentano valori confrontabili nel caso in DBE e con notevole differenza invece in MCE.

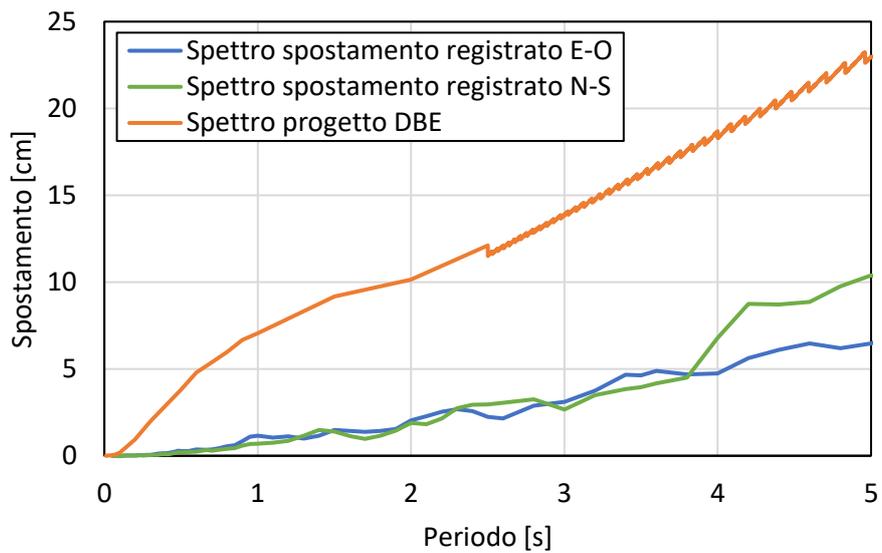
5.2.3 Stazione 0118: magnitudo 6.6

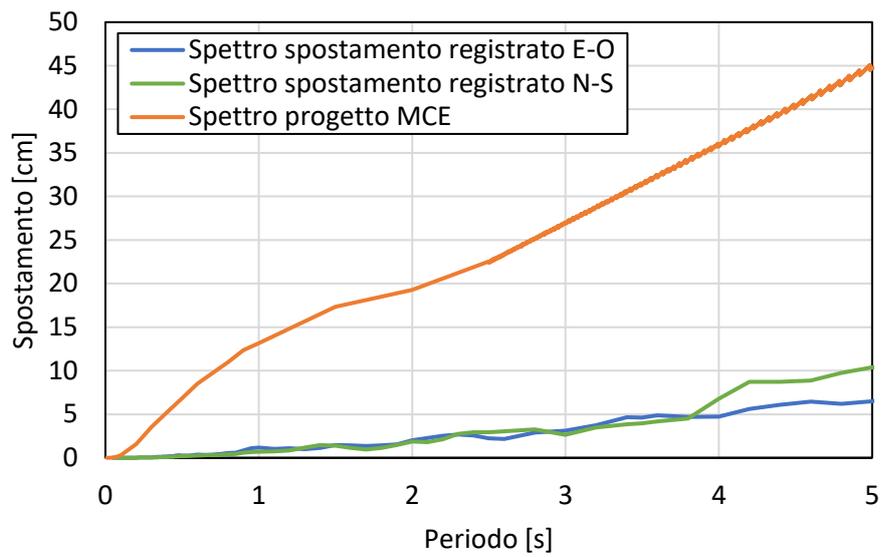
La terza registrazione fa riferimento ad una scossa di assestamento del primo sisma avvenuta qualche minuto dopo, alle ore 04:28 del 06/02/2023, con però una magnitudo inferiore. Di seguito vengono riportati i confronti degli spettri in accelerazione e in spostamento:





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: $\frac{698877 \text{ kN}}{9.81 \text{ m/s}^2} = 71270 \text{ Ton}$.

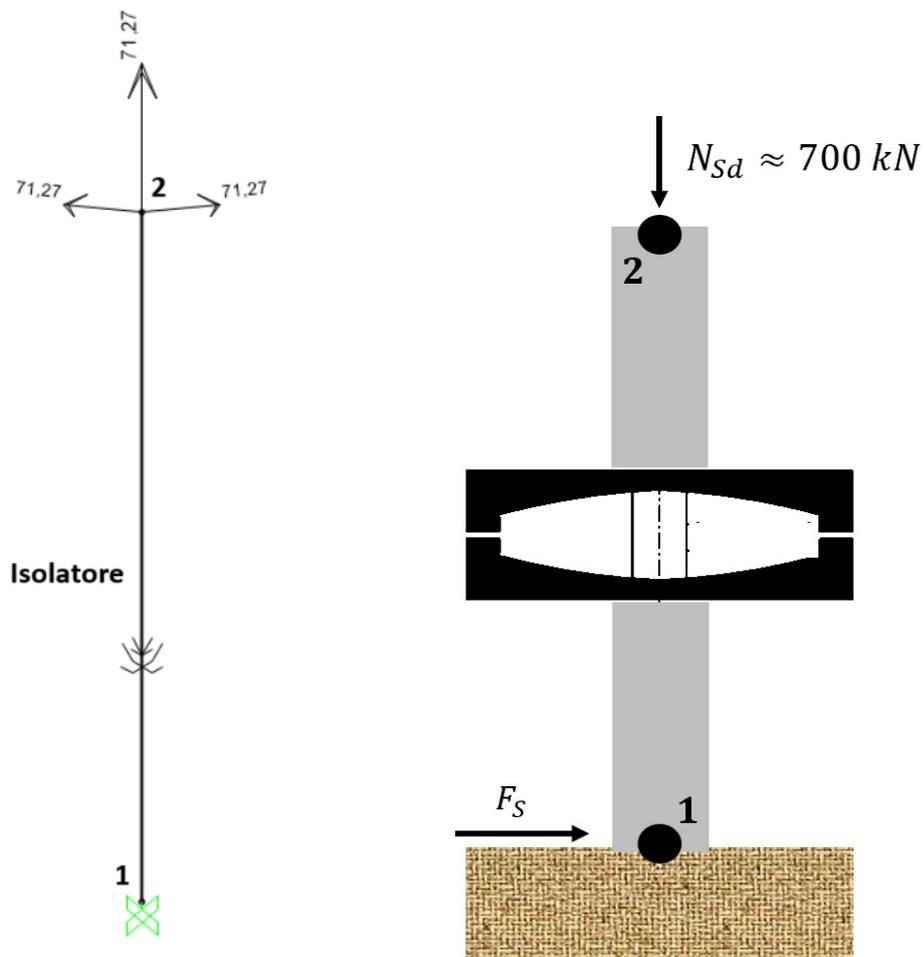


Figura 5-3: modello 1 gdl.

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 [8]:

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

dove k_c è la rigidezza a compressione, k_t la rigidezza 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 [9].

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 [9].

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

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 rigidezza elastica del dispositivo in assenza di scorrimento e $\max\{|z(u)|\} = 1$. [9]

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.

-
8. Baolun Wang et al 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 560 012097;
 9. 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.

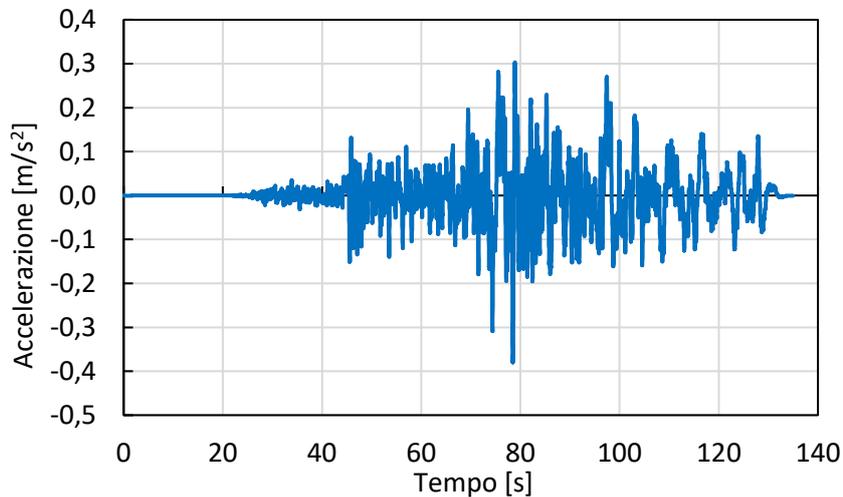


Figura 5-5: accelerogramma stazione 0118 magnitudo 7.8, direzione Est-Ovest.

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.

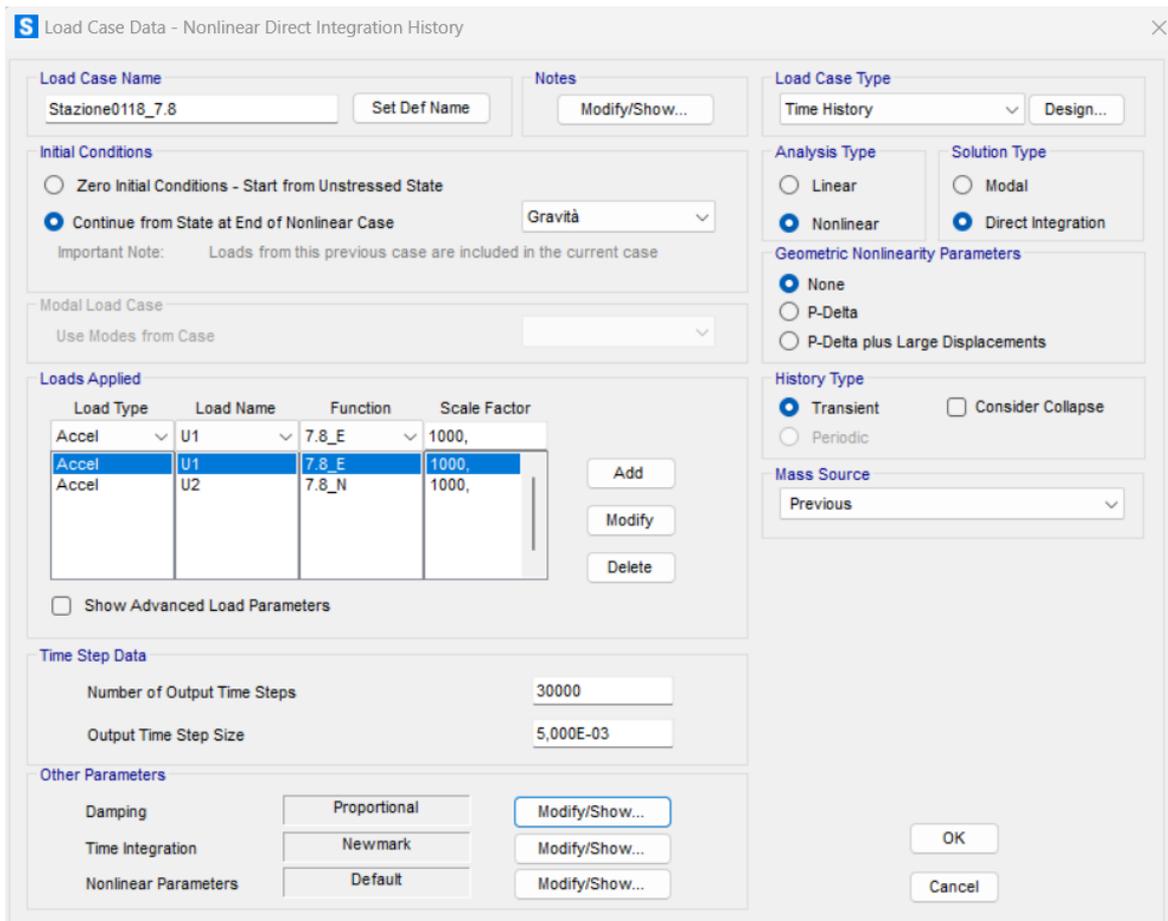


Figura 5-6: esempio di analisi al passo, caso stazione 0118, magnitudo 7.8.

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 rigidezza (metodo

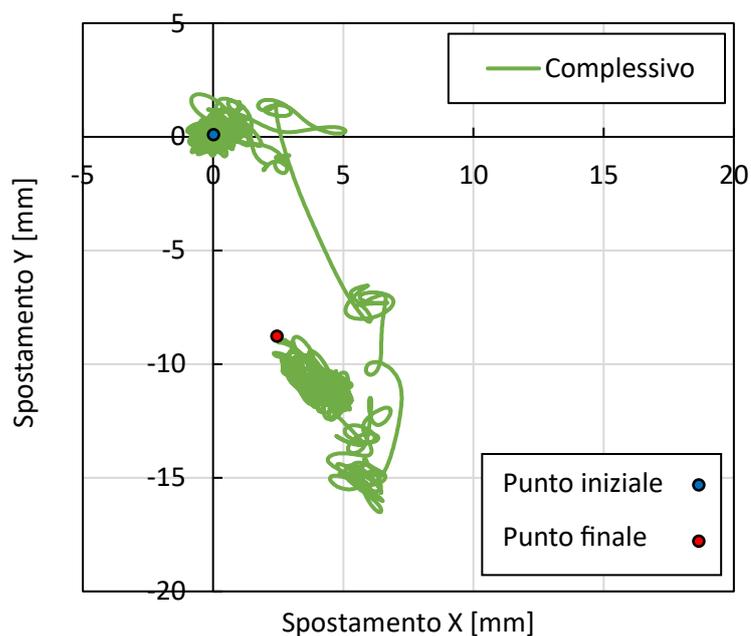
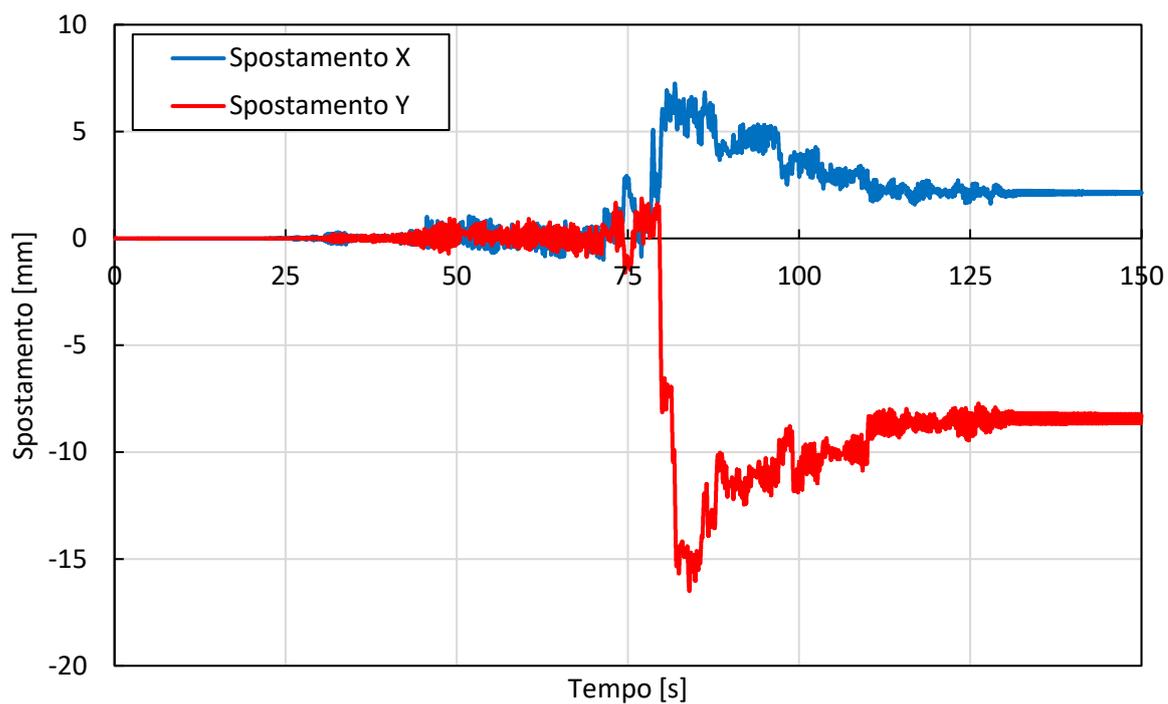
di Rayleigh). È stato inserito un valore tale che lo smorzamento sia attorno all'1%, valore considerato dallo smorzamento della sovrastruttura.

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.

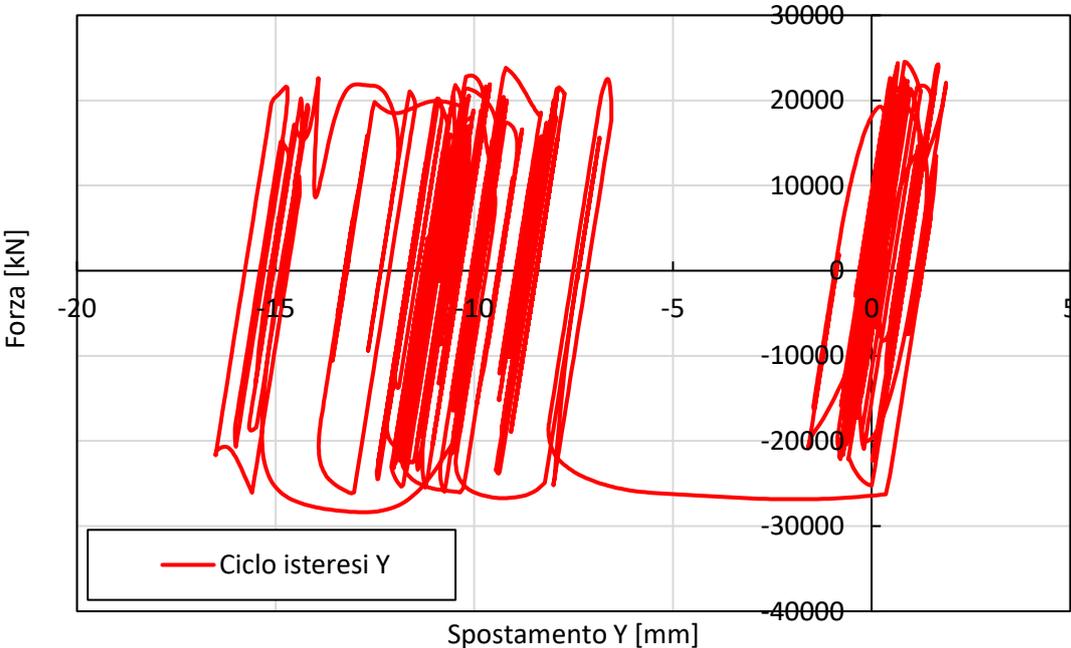
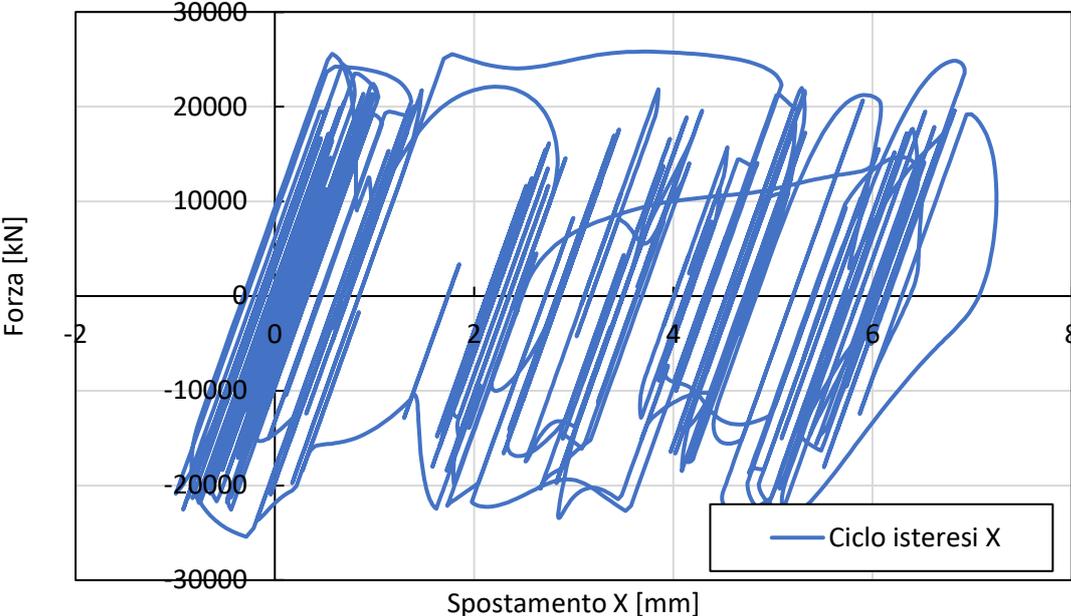
5.3.2.1 Magnitudo 7.8

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 ricevuta, 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.



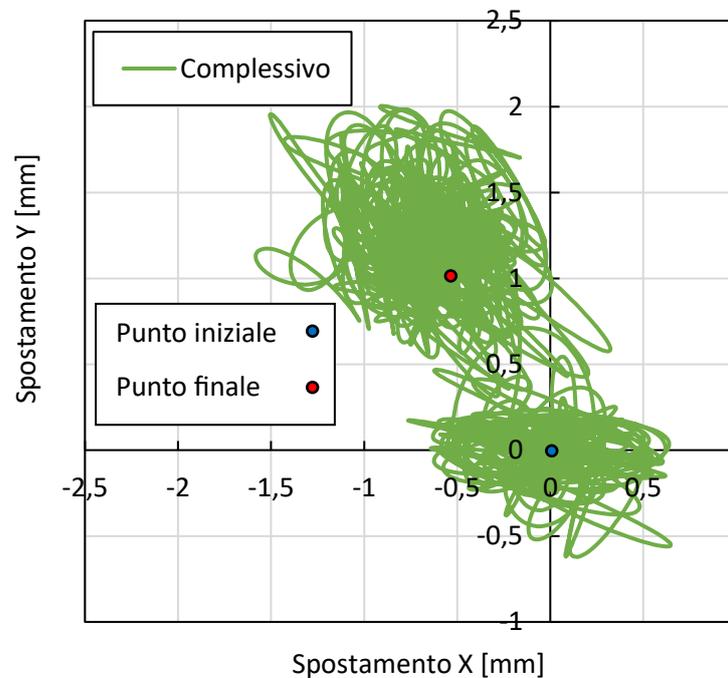
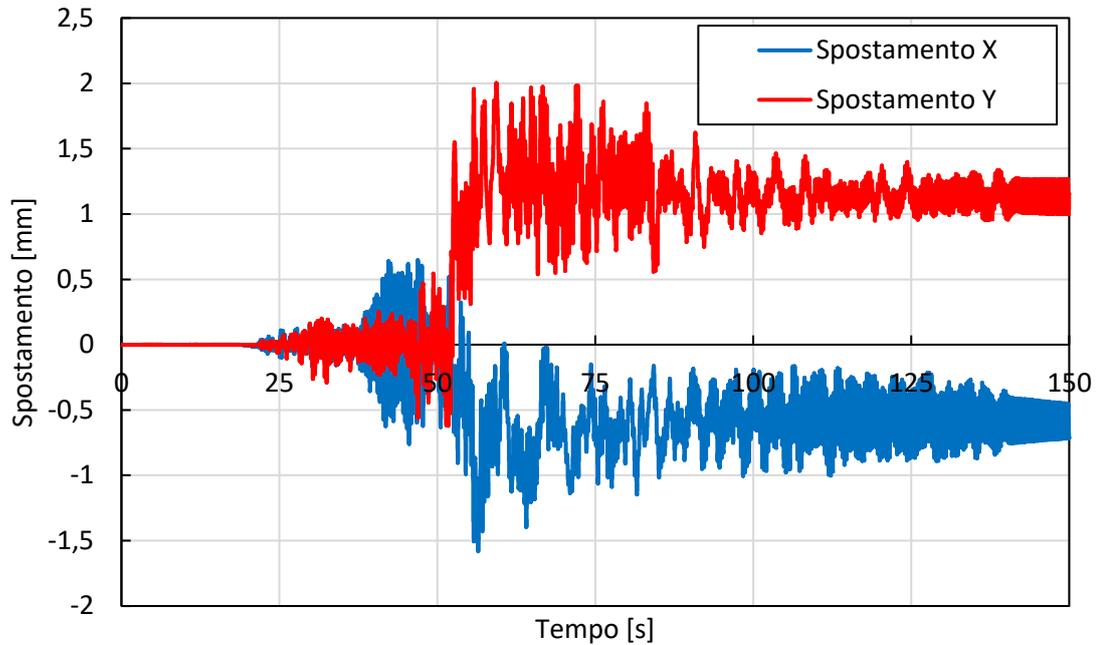
I due grafici successivi, invece, rappresentano il ciclo di isteresi compiuto dal sistema di isolamento, rispettivamente nella direzione X e Y. Il grafico cosiddetto forza-spostamento mostra per ogni istante temporale lo spostamento del sistema di isolamento e il taglio alla base che il sistema porta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

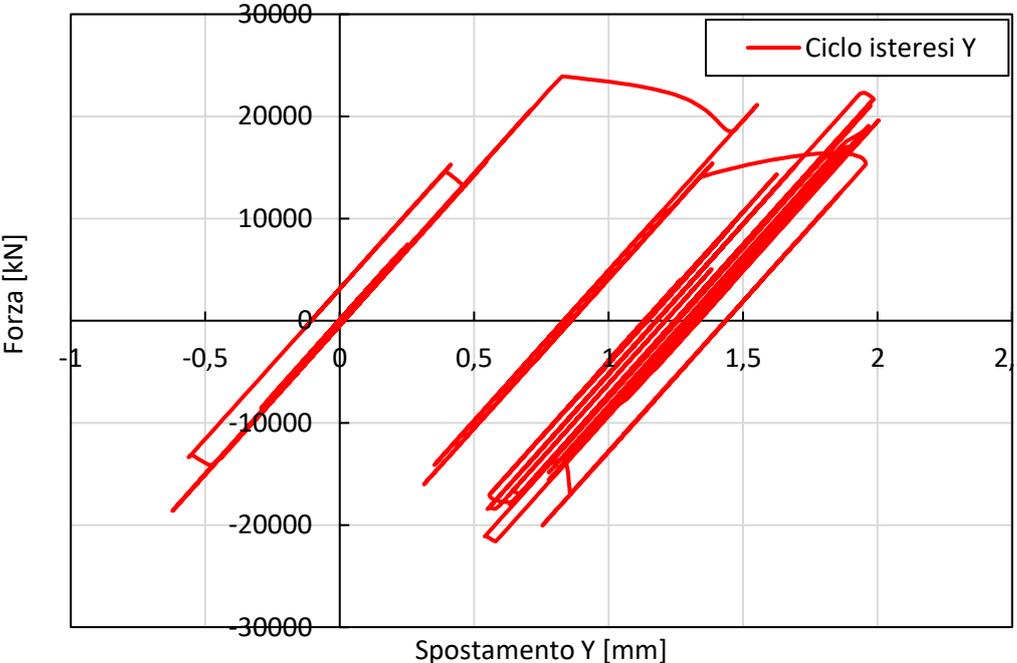
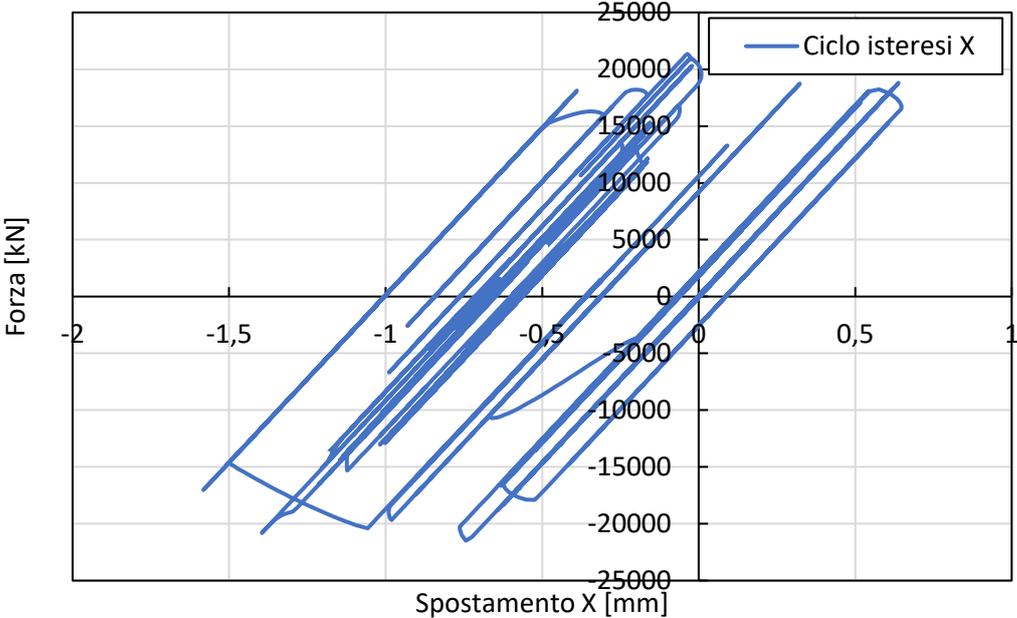


5.3.2.2 Magnitudo 7.5

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.

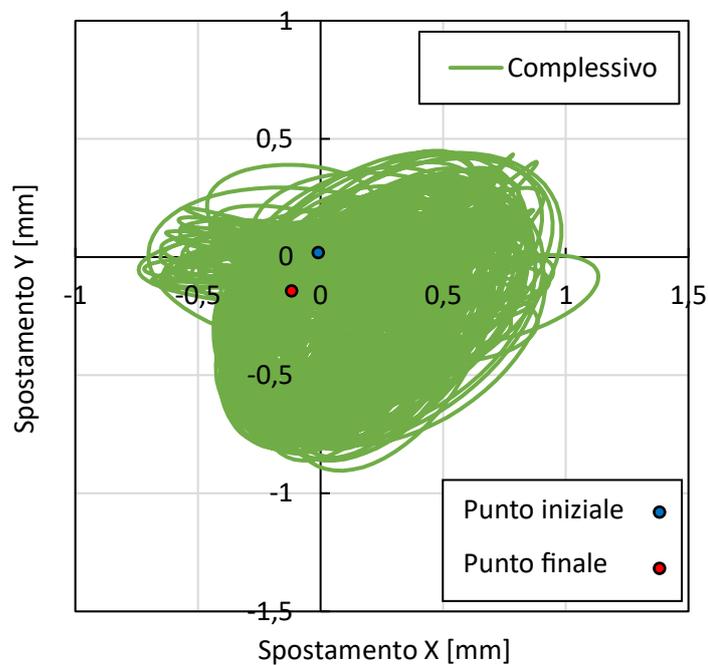
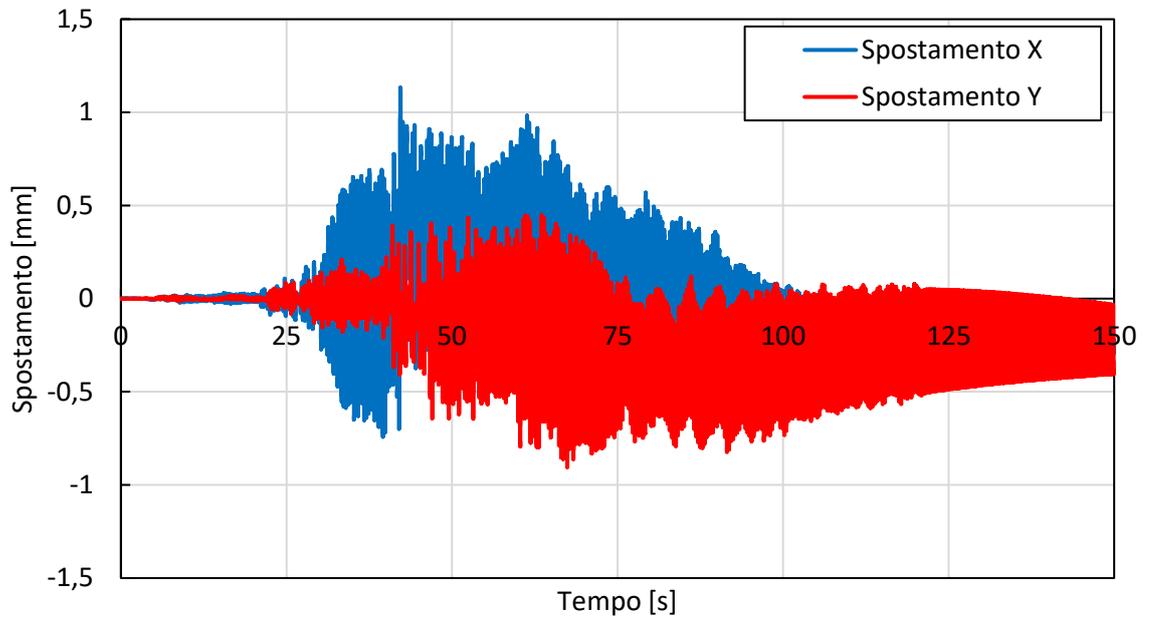


Anche i due grafici dei cicli isteretici mostrano come sia stato raggiunto poche volte il punto di cambio di pendenza del grafico e quindi il passaggio da lineare a non lineare. Ciò significa che la forza di taglio agente sul sistema di isolamento non è stata sufficientemente alta da attivarlo.

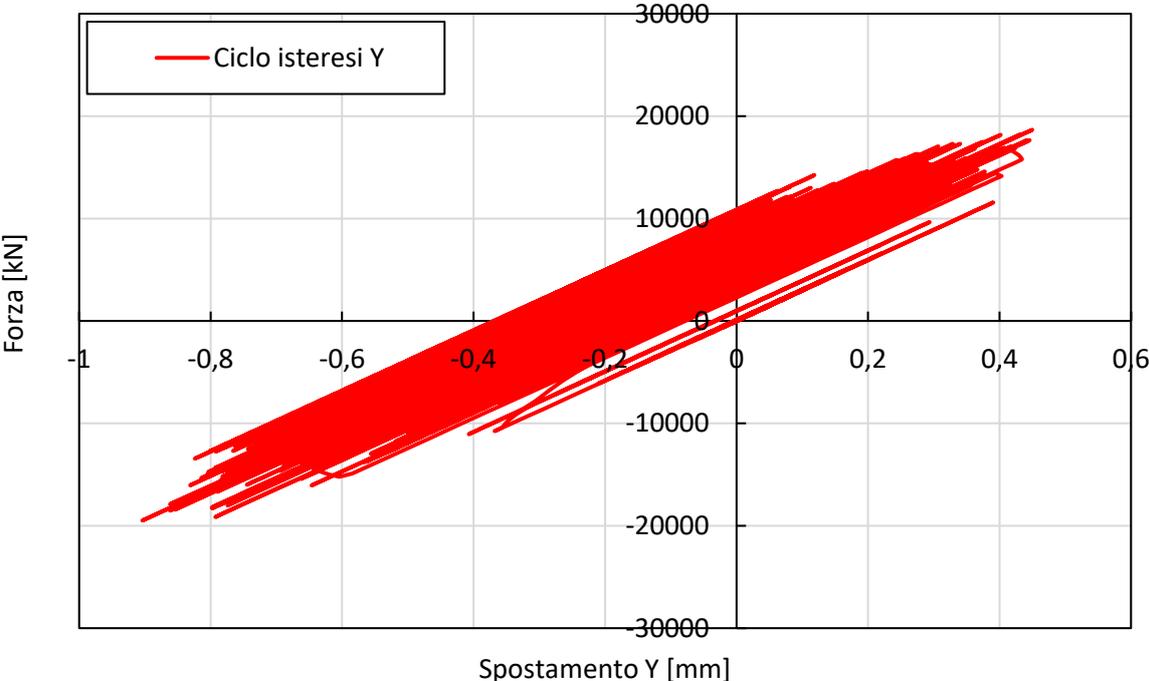
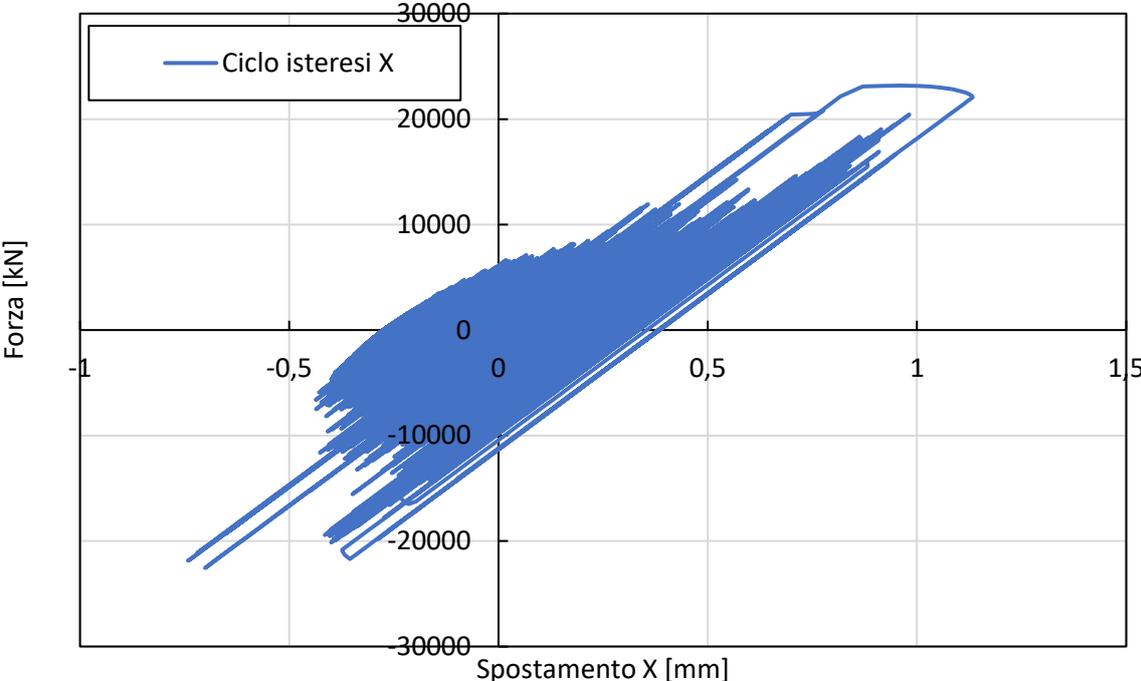


5.3.2.3 Magnitudo 6.6

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.

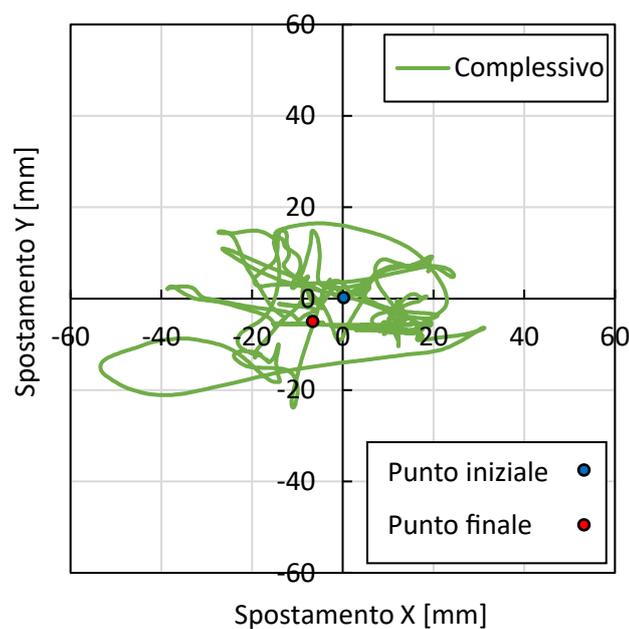
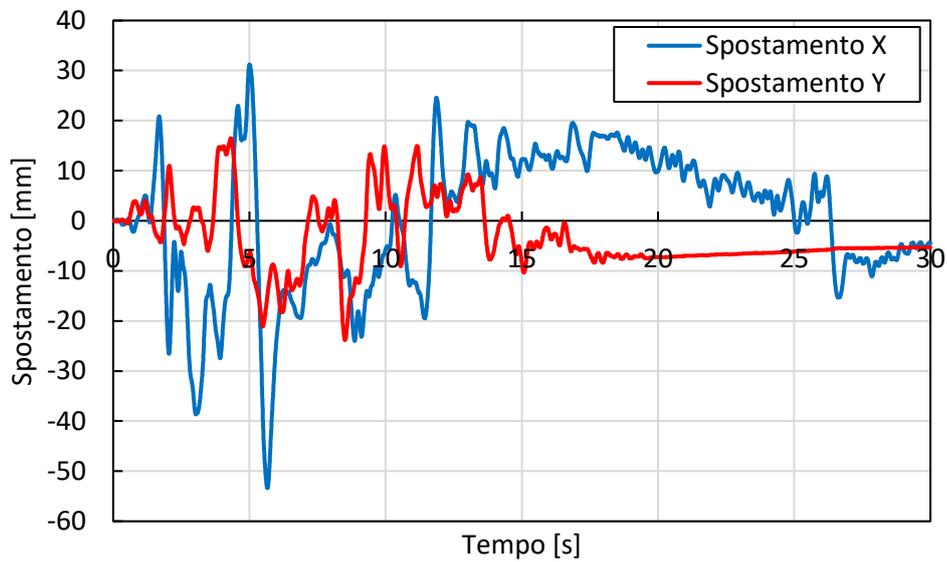


A dimostrazione di quanto detto, anche i cicli di isteresi risultano sostanzialmente lineari, quindi, non è presente una forza tale da passare al ramo con rigidità minore e spostamenti maggiori.

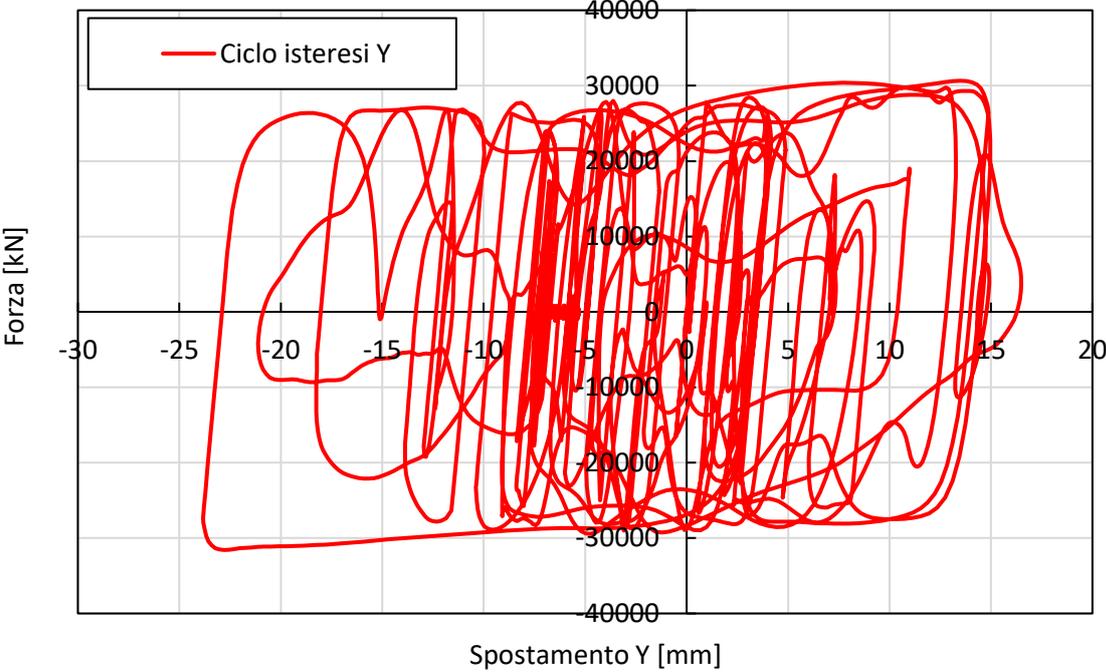
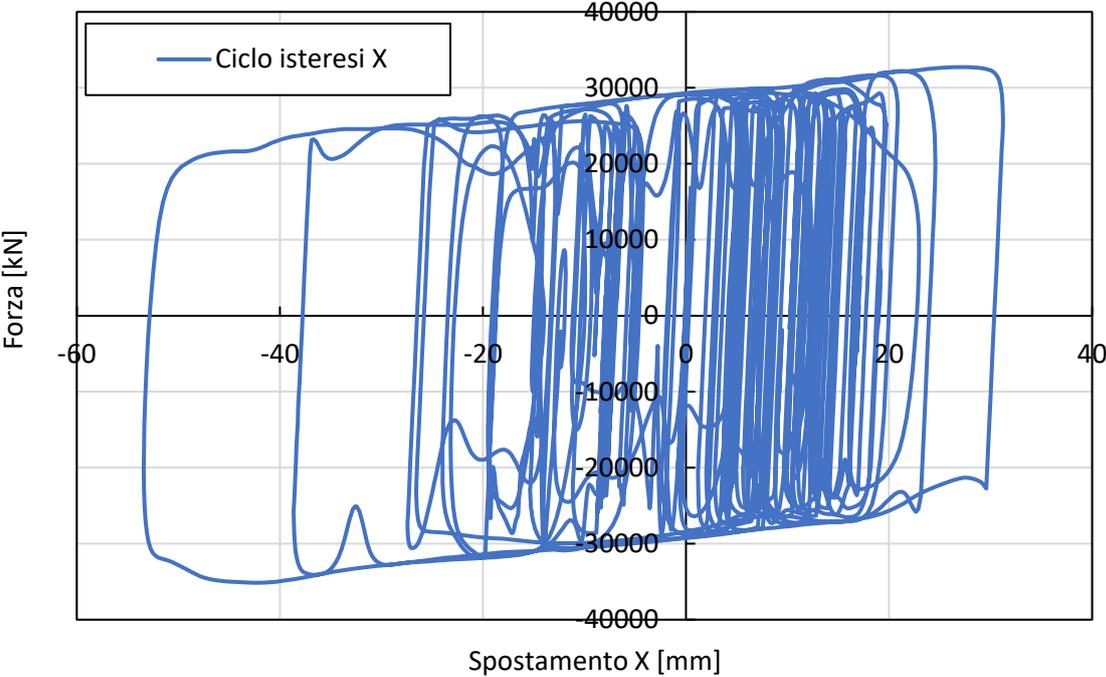


5.3.2.4 DBE

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.

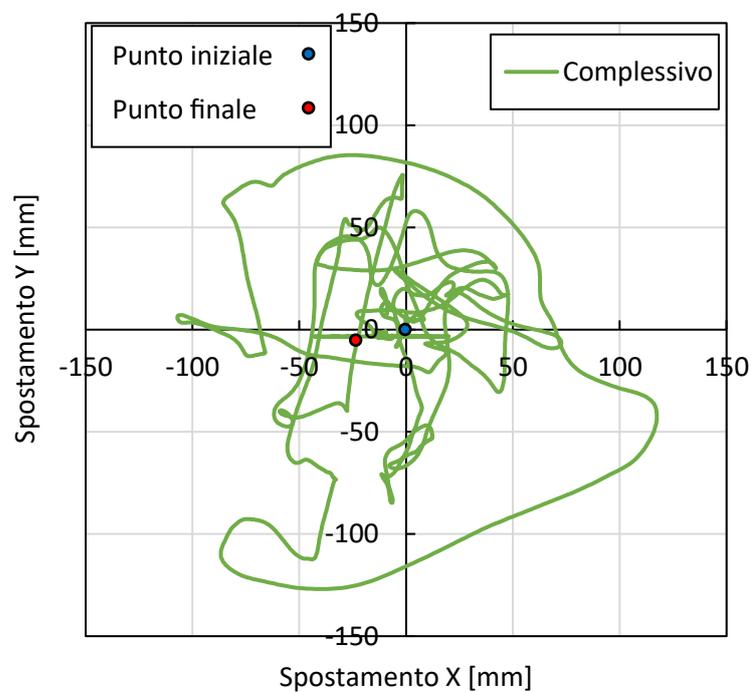
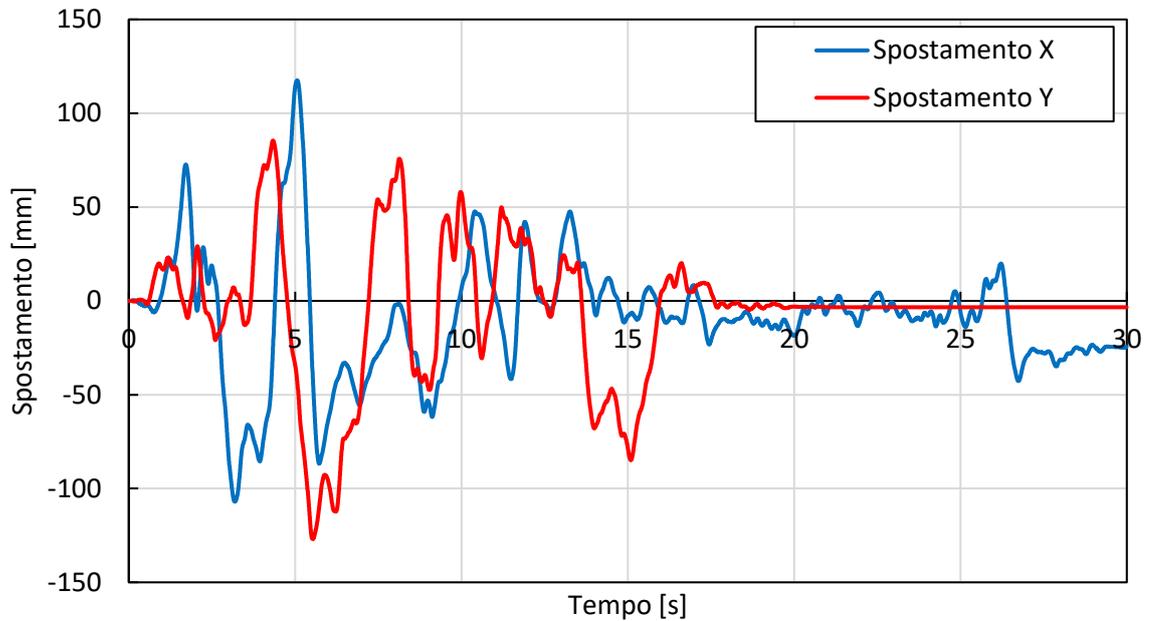


Questi maggiori spostamenti portano, quindi, il sistema di isolamento a raggiungere il punto di cambio pendenza nel grafico forza-spostamento e ad avere la forma tipica. Anche questo a dimostrazione del fatto che i casi precedenti non generassero abbastanza forza di taglio e spostamento per attivare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

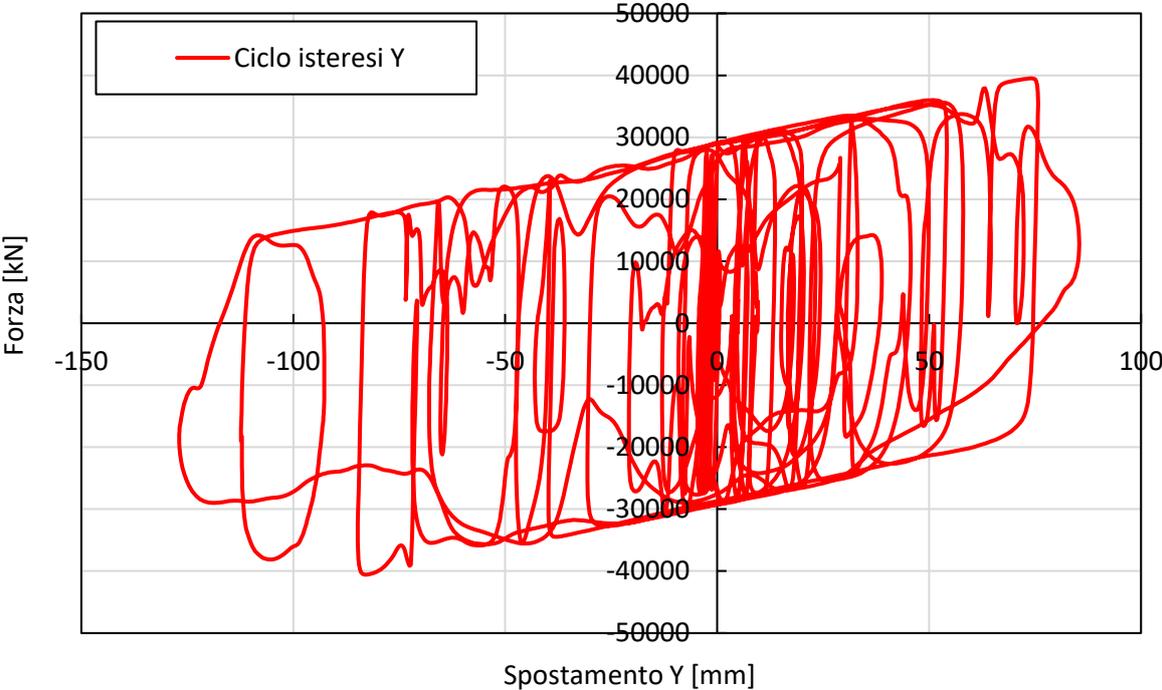
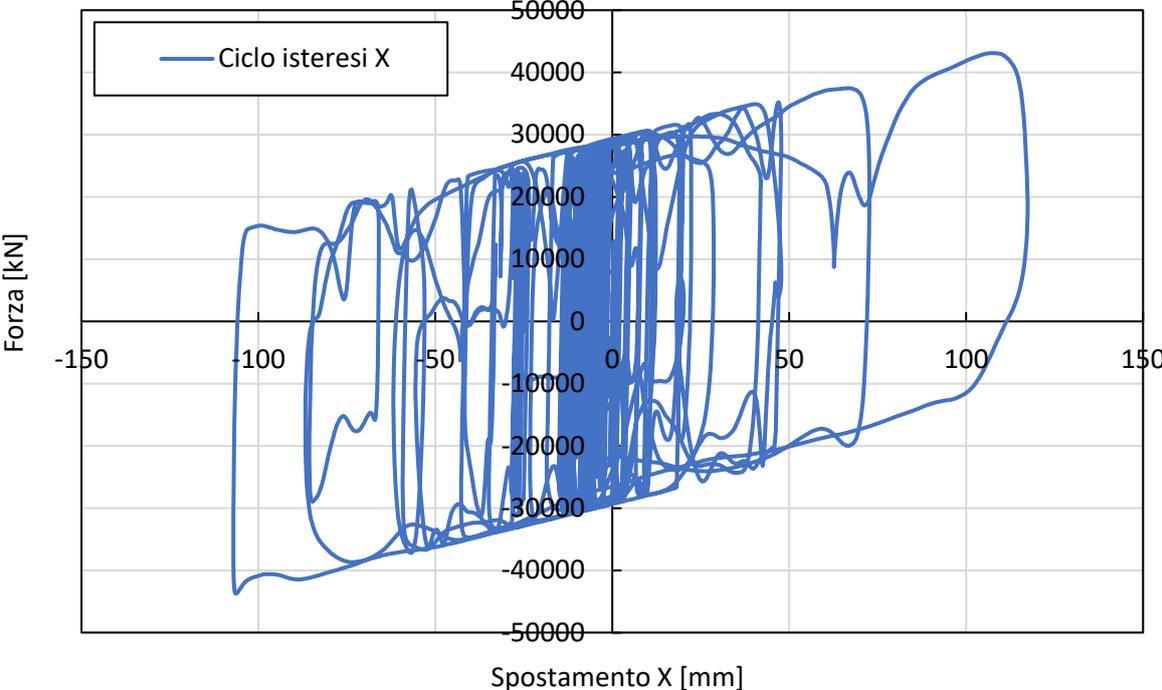


5.3.2.5 MCE

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.

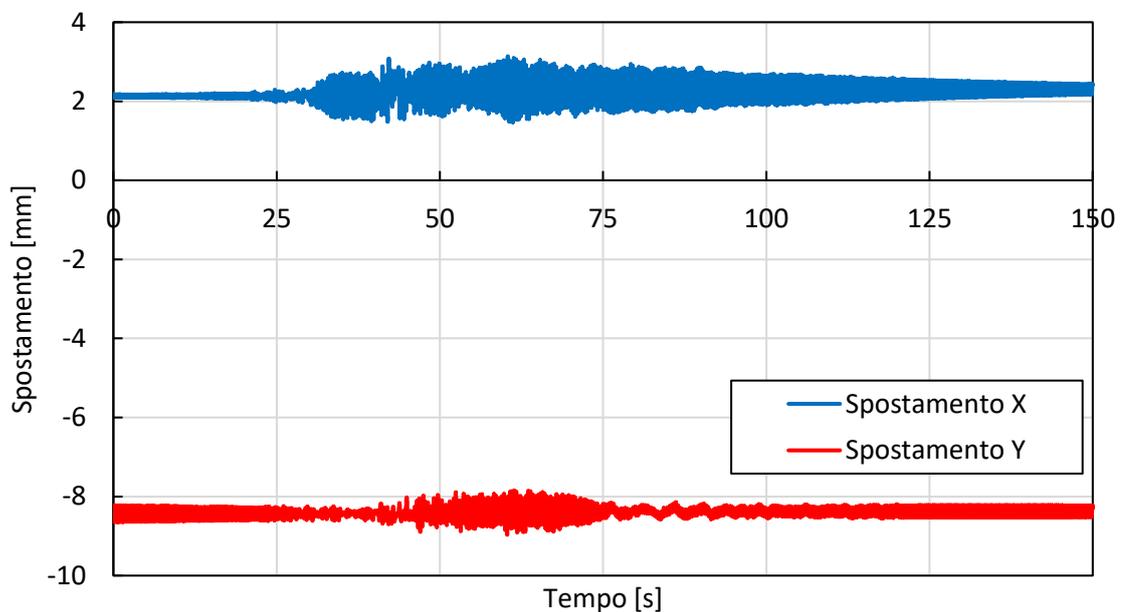


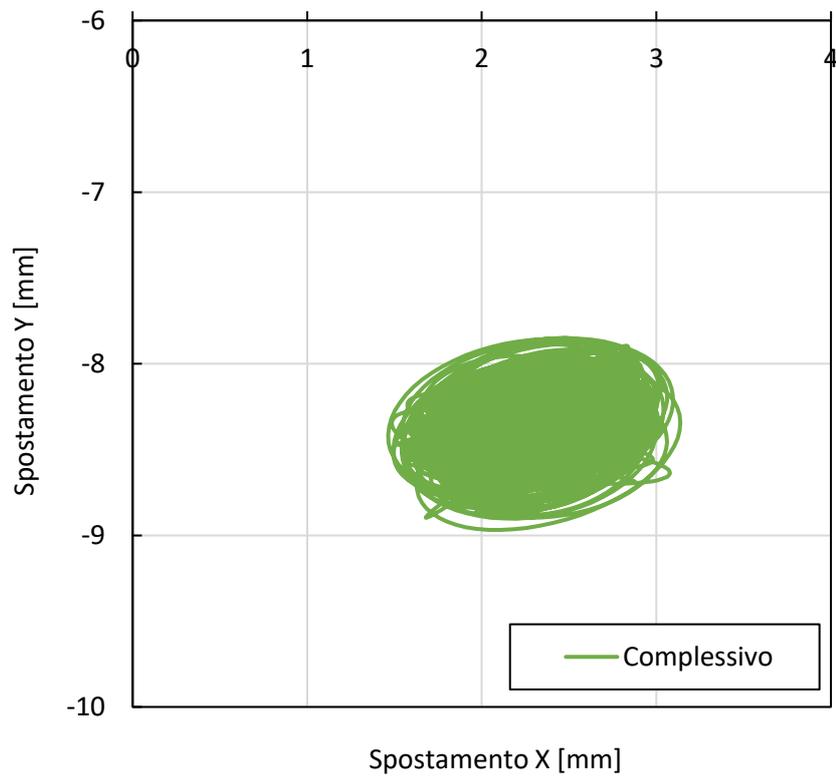
I diagrammi del ciclo di isteresi come nel caso precedente sono ampiamente oltre il punto di cambio di pendenza.



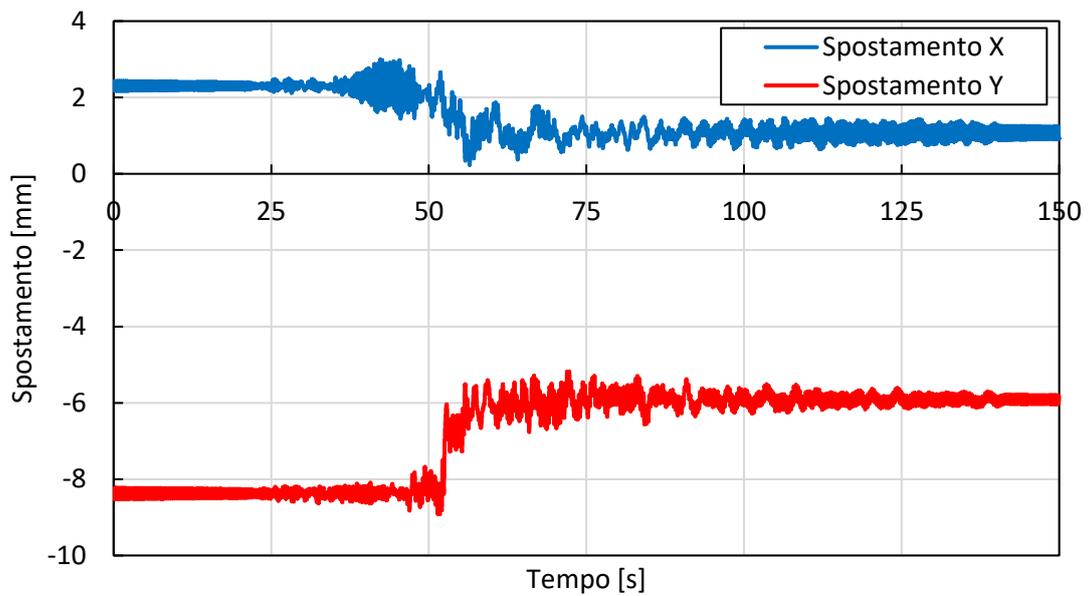
5.3.2.6 Ordine temporale

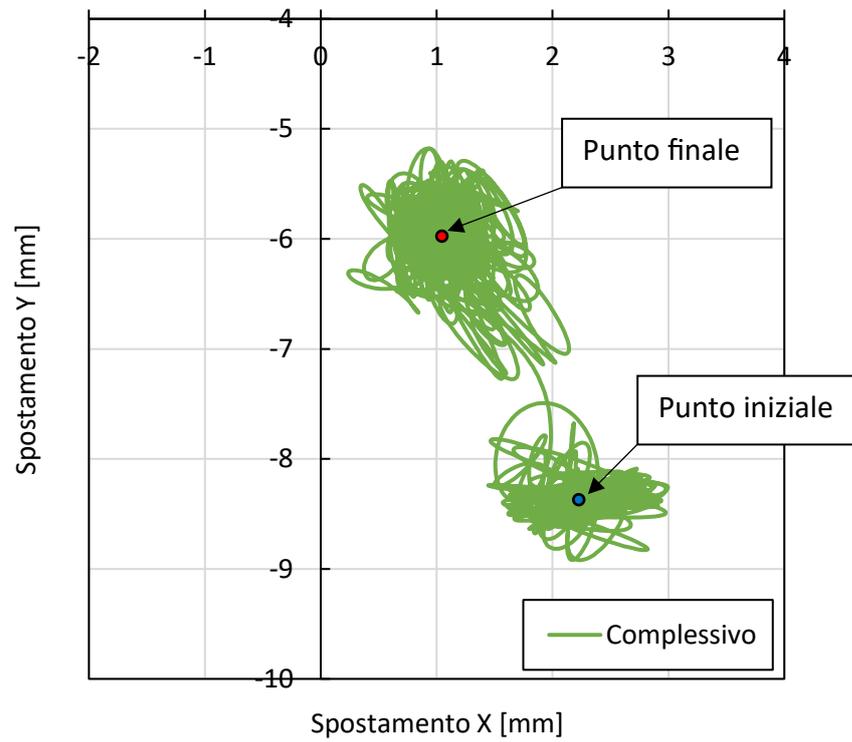
In questo paragrafo si vanno a valutare gli spostamenti dati dall'analisi del modello con applicati i tre sismi registrati in ordine temporale per come sono avvenuti realmente. Così facendo è possibile stimare lo spostamento residuo finale e valutare se c'è un fenomeno di ricentraggio. L'ordine temporale 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.

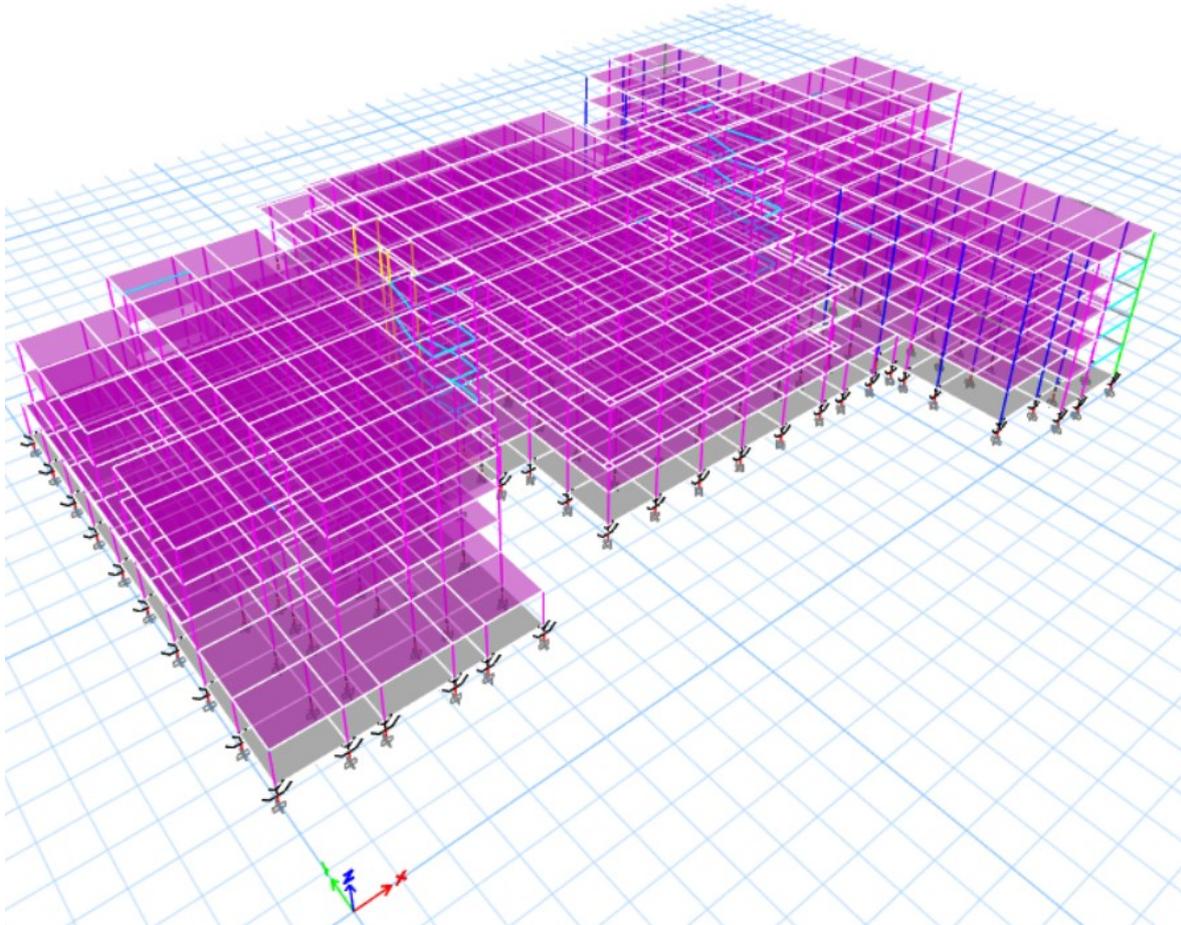


Figura 5-7: modello completo.

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 i 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.

	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 rigidezza 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

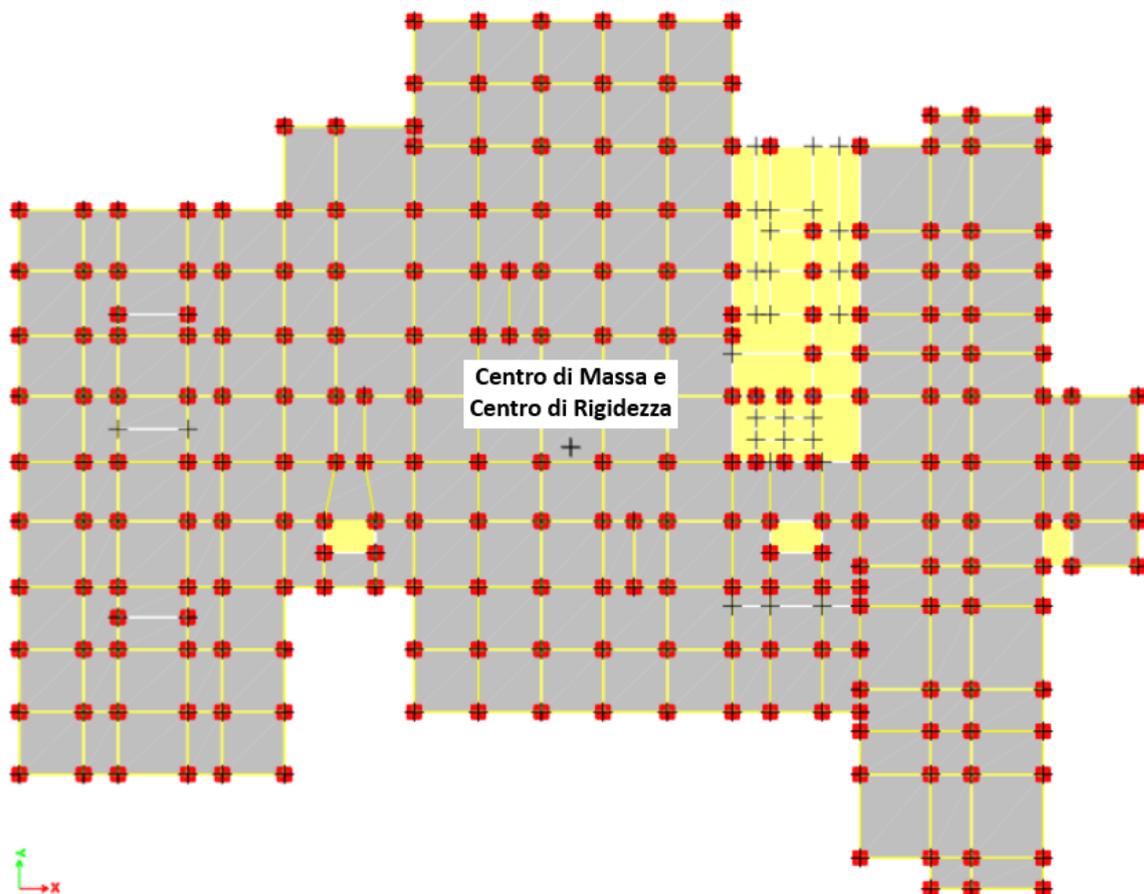


Figura 5-8: rappresentazione del centro di massa e centro di rigidezza del piano degli isolatori.

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

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

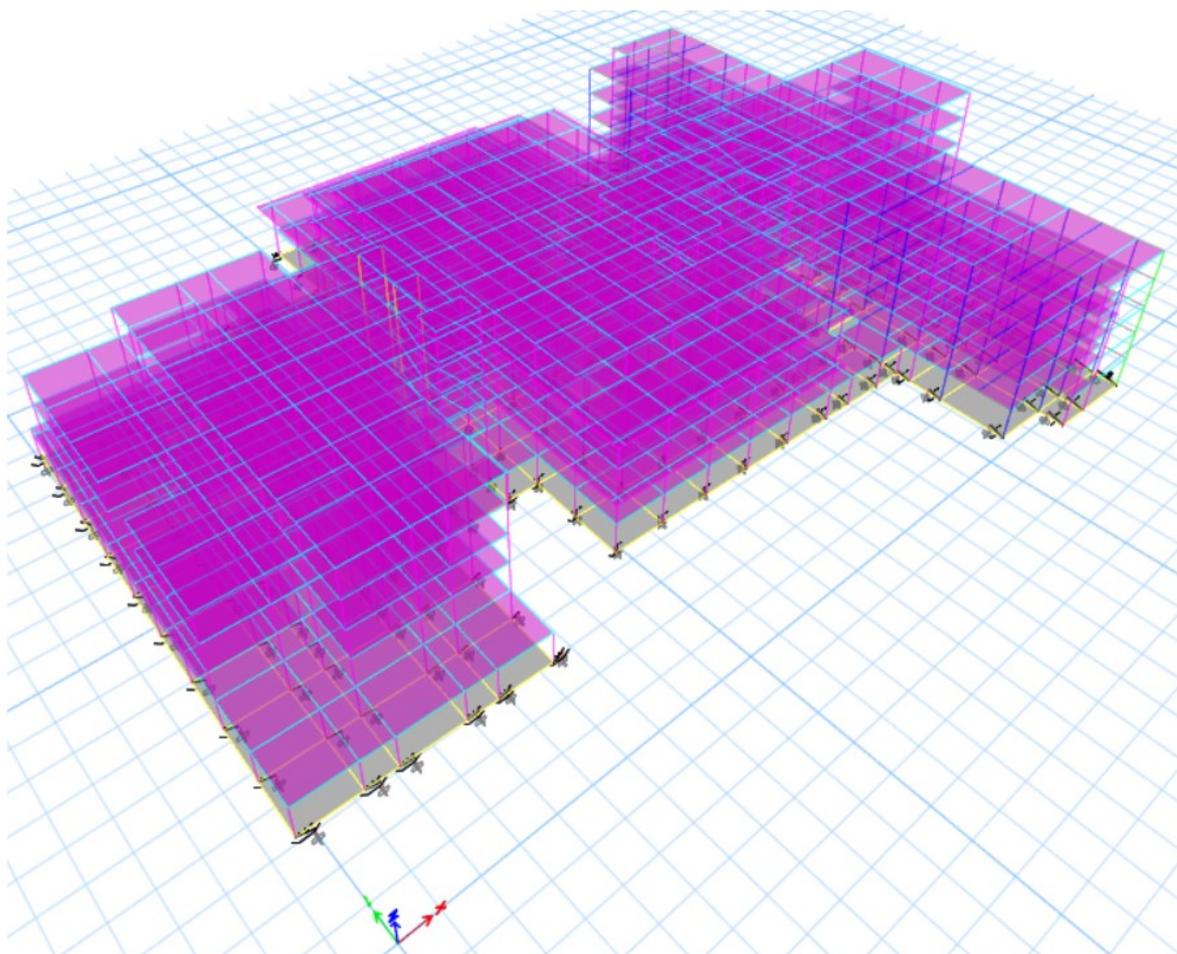


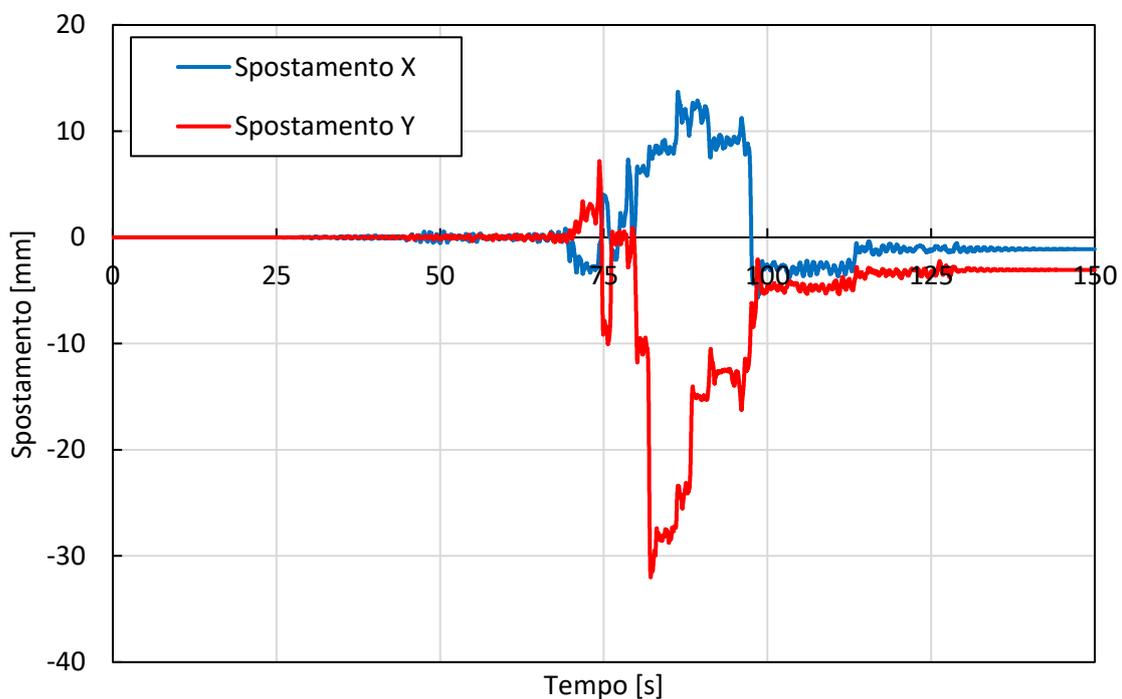
Figura 5-9: Deformata primo modo di vibrare.

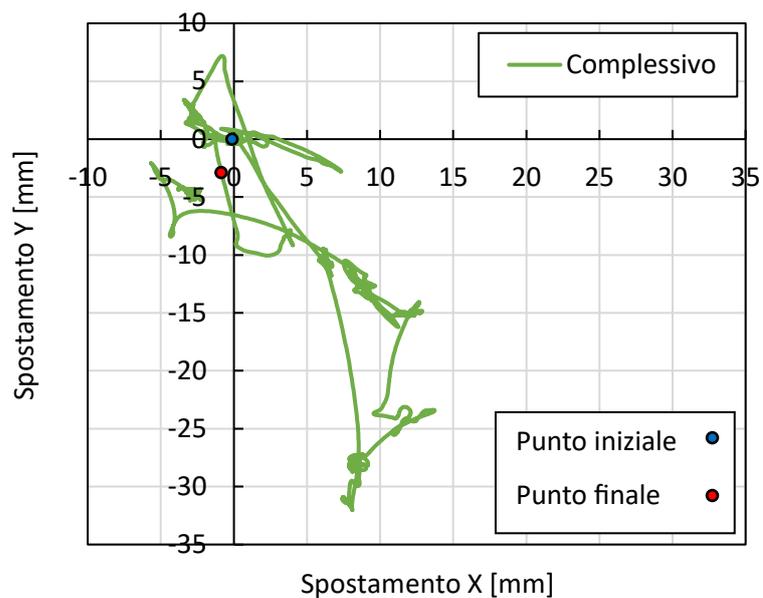
Nei successivi paragrafi, invece, verranno rappresentati i risultati in termini di spostamento del piano degli isolatori, un esempio di ciclo isteretico nelle due direzioni di un isolatore, gli spostamenti massimi di ogni piano, il drift interpiano e le accelerazioni dei piani; questi per il sisma 7.8 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.

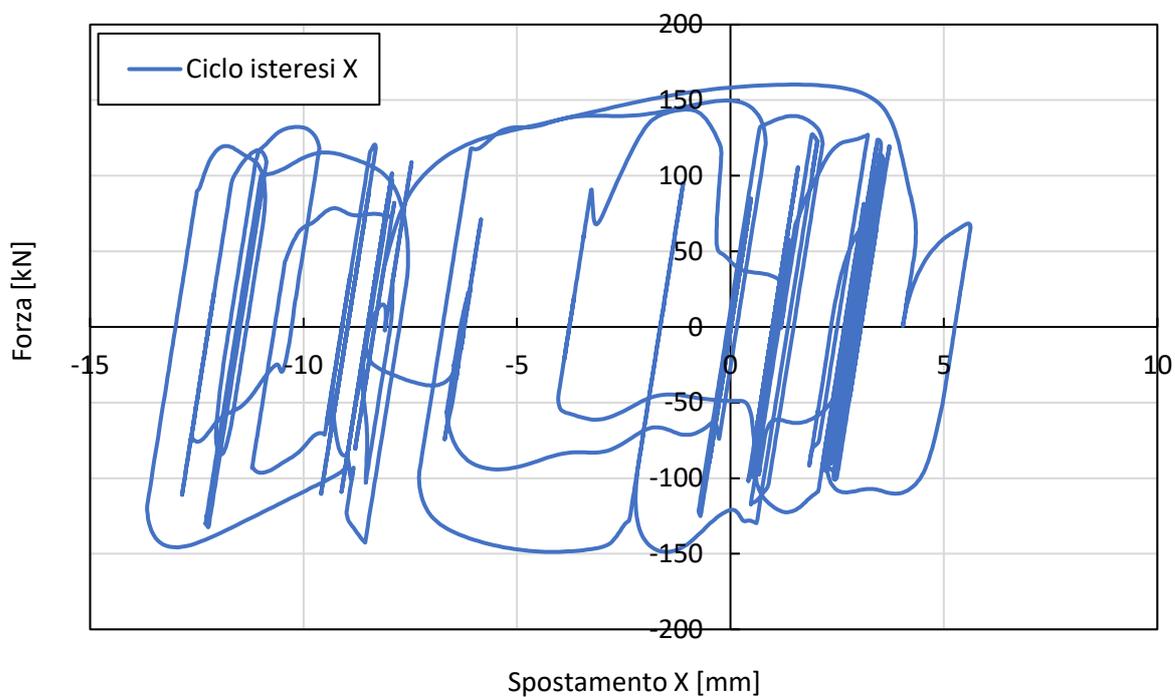
5.4.2.1 Magnitudo 7.8

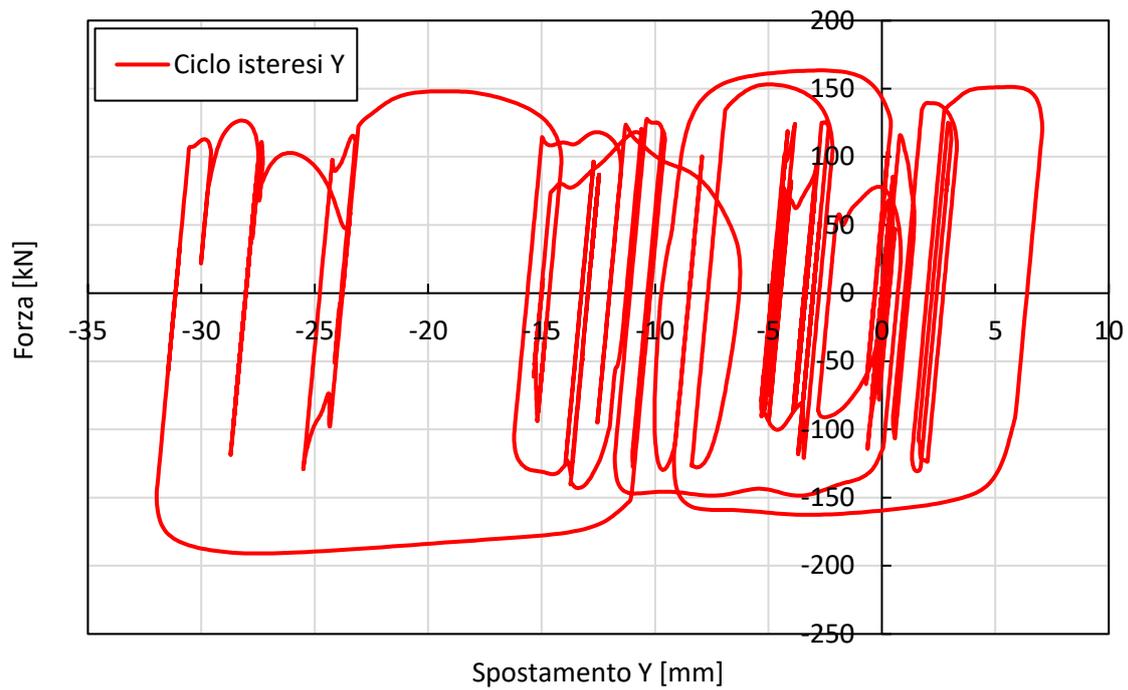
- Come primo risultato del caso in esame si hanno gli spostamenti nel tempo di un punto considerabile coincidente al centro di rigidità del sistema nel piano degli isolatori. Questo risultato dovrebbe coincidere con quanto rappresentato nel modello ad 1 gdl perché rappresenta le stesse condizioni. Ciò 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 in considerazione questo punto in quanto la differenza di spostamenti tra esso ed altri punti dell'edificio non presentano differenza sostanziali. Questo indica che gli effetti torsionali sulla struttura non sono di grande rilievo.





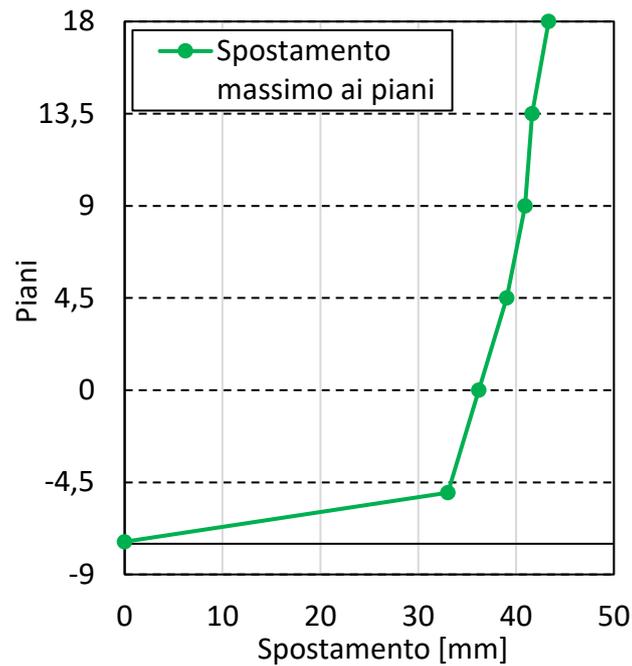
- Un secondo risultato interessante sono i cicli isteretici lungo la direzione X e Y di un singolo isolatore, sempre coincidente al centro di rigidità. Questi grafici sono utili per capire che comportamento hanno avuto i dispositivi e per controllare la loro corretta rappresentazione.





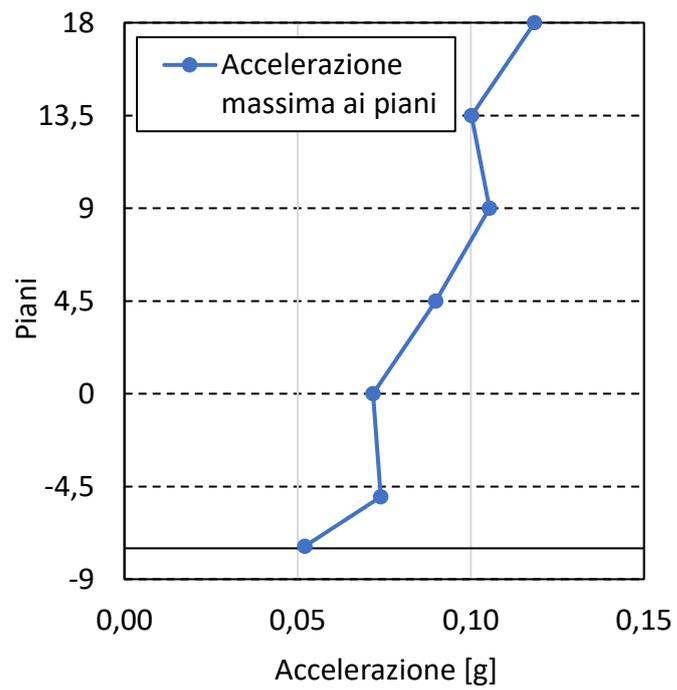
- Successivamente si rappresentano gli spostamenti di ogni singolo piano. Essendo molti grafici e ripetitivi vengono rappresentati all'appendice A dell'elaborato. Come riassunto, sono stati presi i valori massimi per ogni piano e rappresentati nella seguente tabella.

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



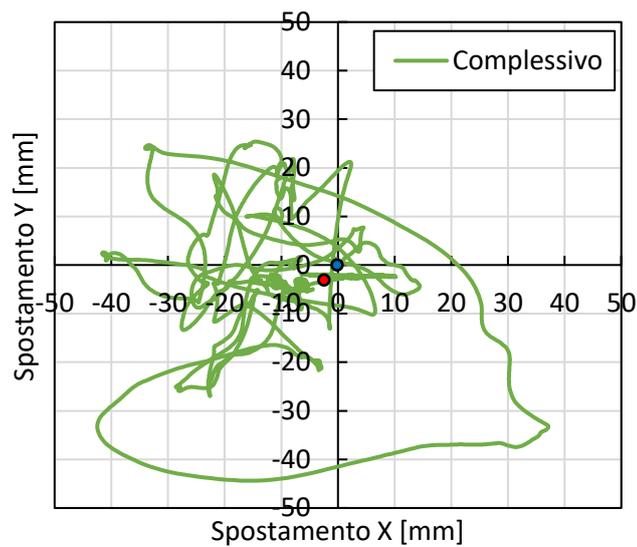
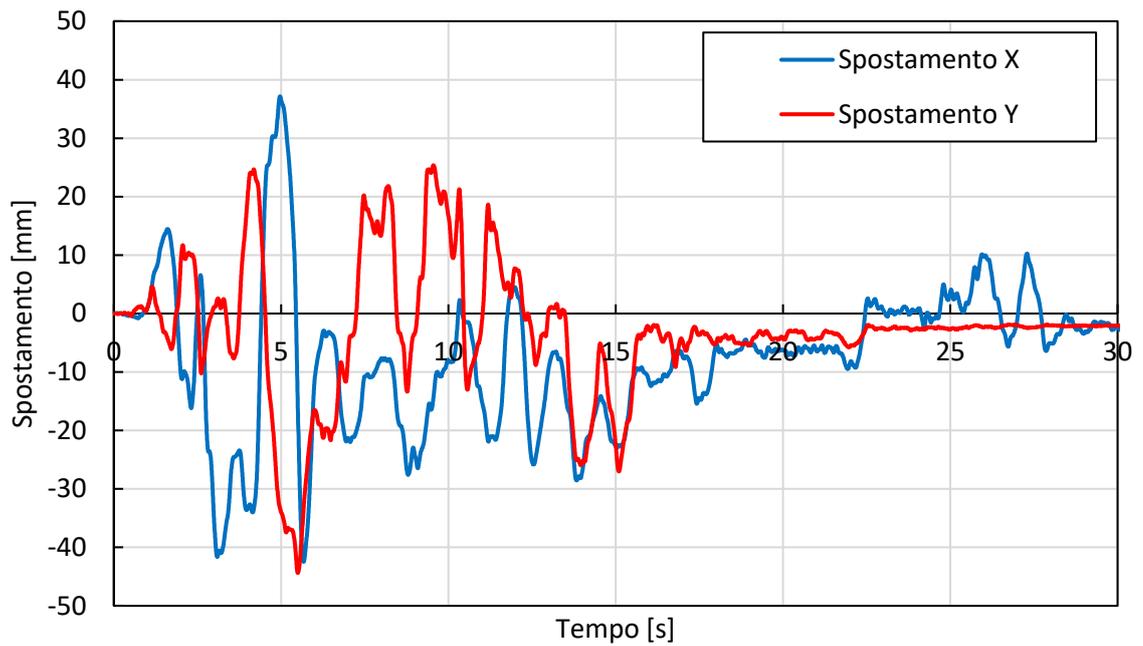
- Un ulteriore dato interessante è quello dei drift interpiano, i quali però per questo caso non vengono rappresentati in quanto la scossa è stata talmente debole nella struttura, che si sono registrati valori di drift decisamente piccoli tendenti allo zero.
- Un ultimo dato interessante è quello delle 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



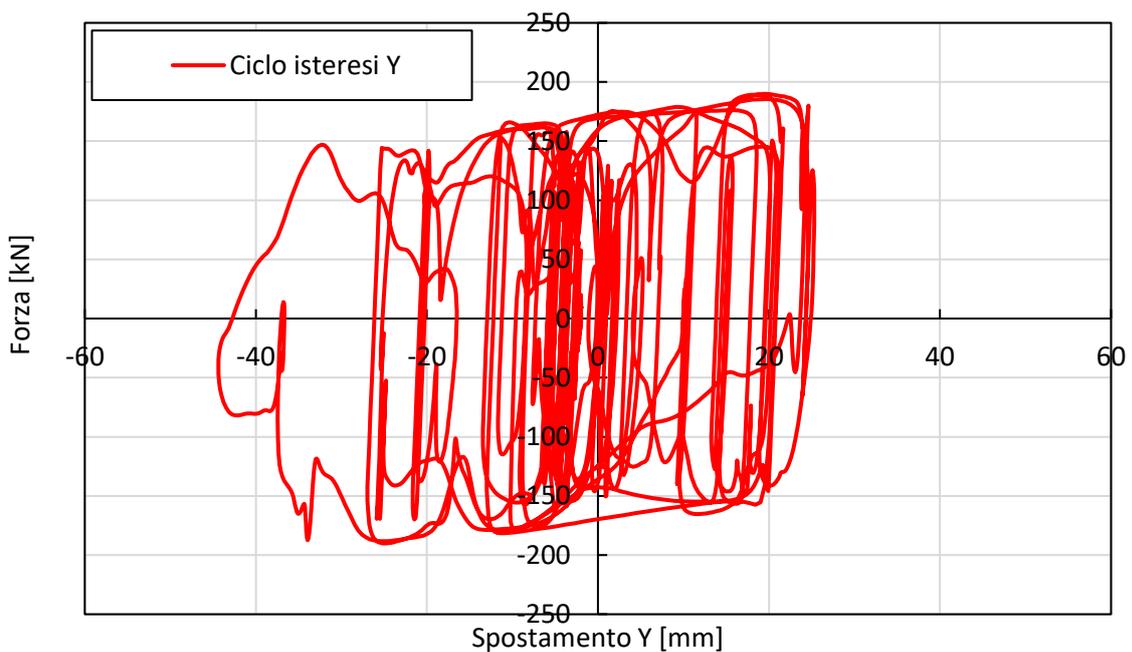
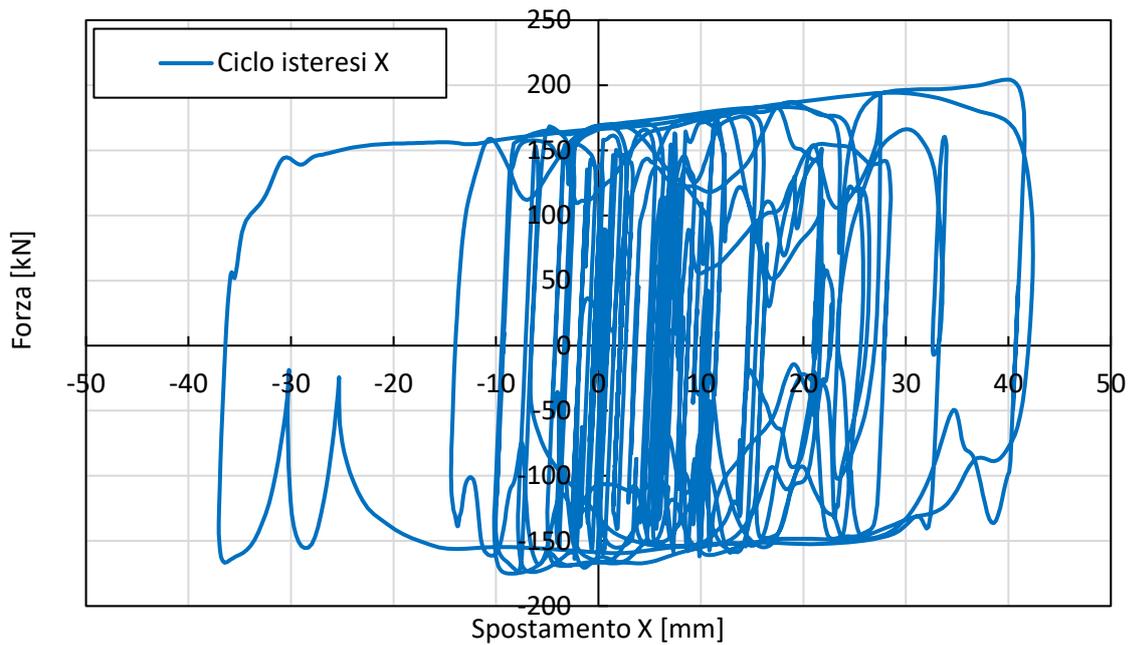
5.4.2.2 DBE

- 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 rigidità dell'edificio al piano degli isolatori.



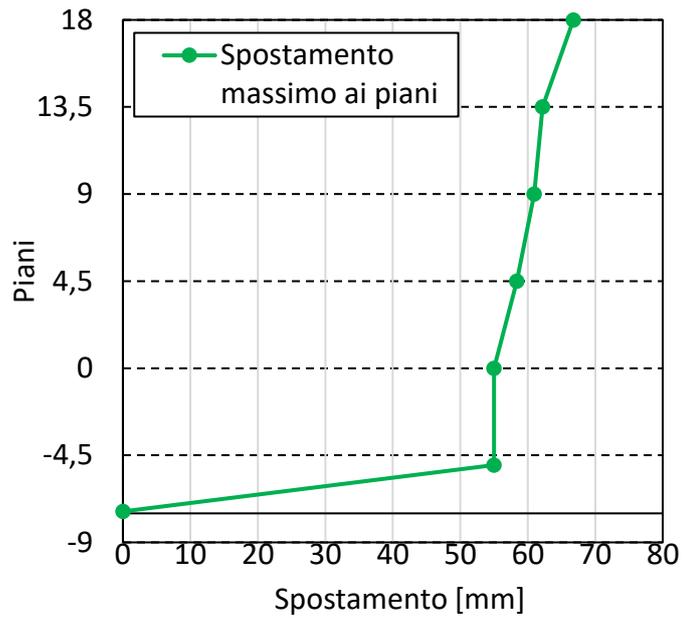
In questo caso, per i primi 10 secondi l'andamento è abbastanza simile a quello registrato nel caso di modello a 1 grado di libertà, anche se il valore dei picchi delle curve è un po' diverso.

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

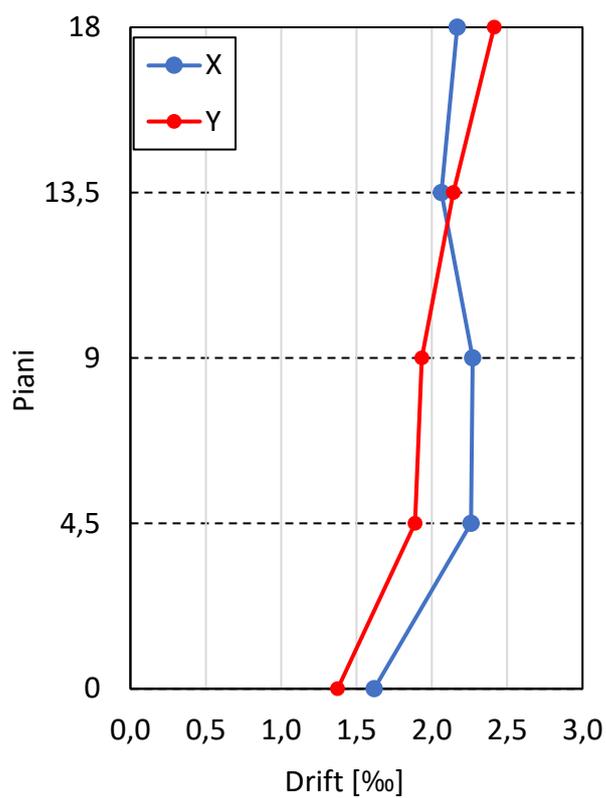


- Come già detto nel caso con sisma di magnitudo 7.8, dal momento che inserire i grafici tempo-spostamento per ogni piano sarebbe ripetitivo, vengono mostrati i valori massimi dello spostamento per ogni piano. Per quanto riguarda i grafici, essi sono presenti all'appendice B dell'elaborato.

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

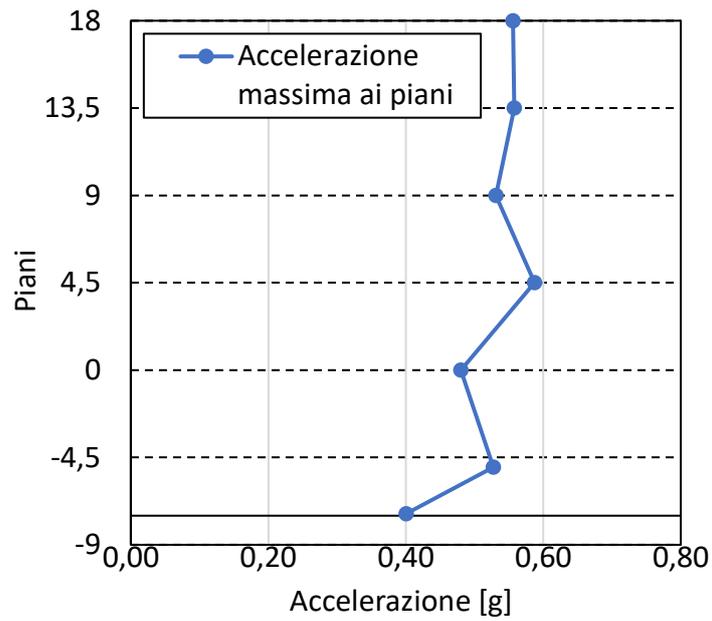


- Per quanto riguarda il drift interpiano, nonostante i valori risultano abbastanza contenuti, è interessante riportarne l'andamento al crescere dell'altezza.



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

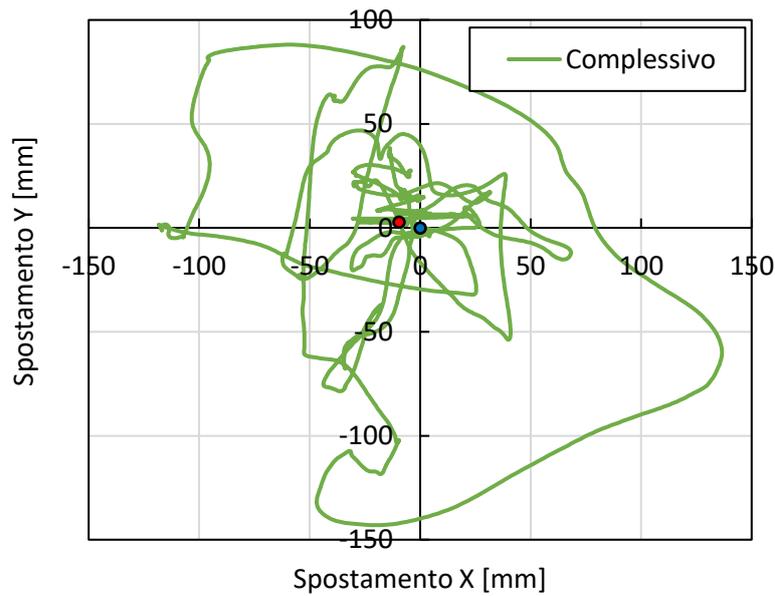
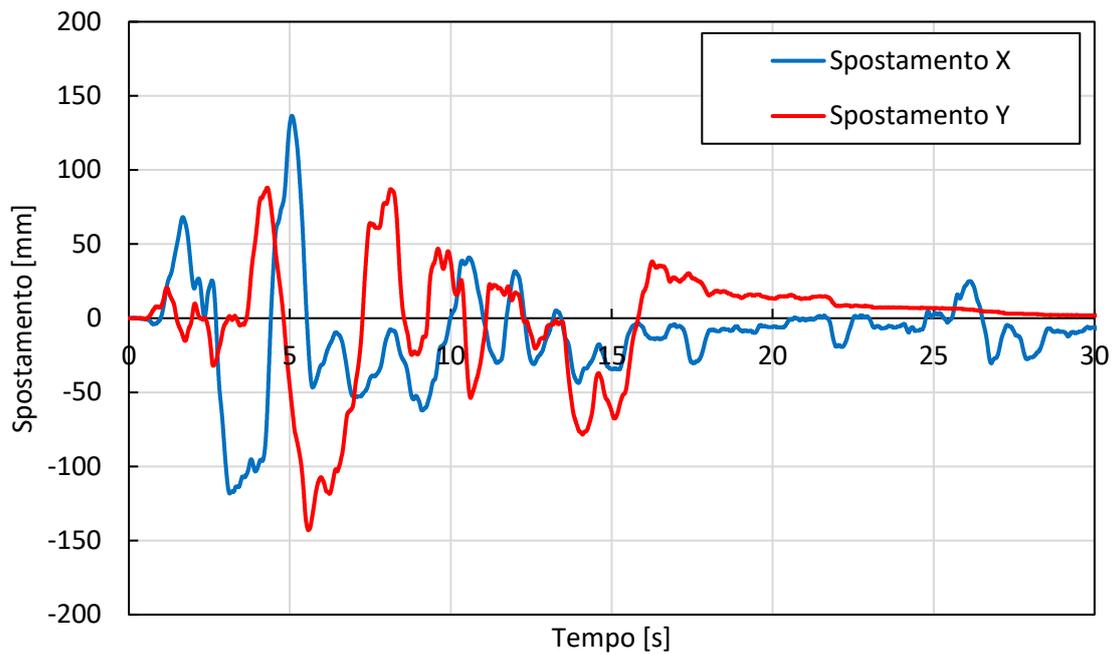
Piano	Accelerazione massima [g]
Base	0,40
-5 ISO	0,53
0	0,48
4,5	0,59
9	0,53
13,5	0,56
18	0,56



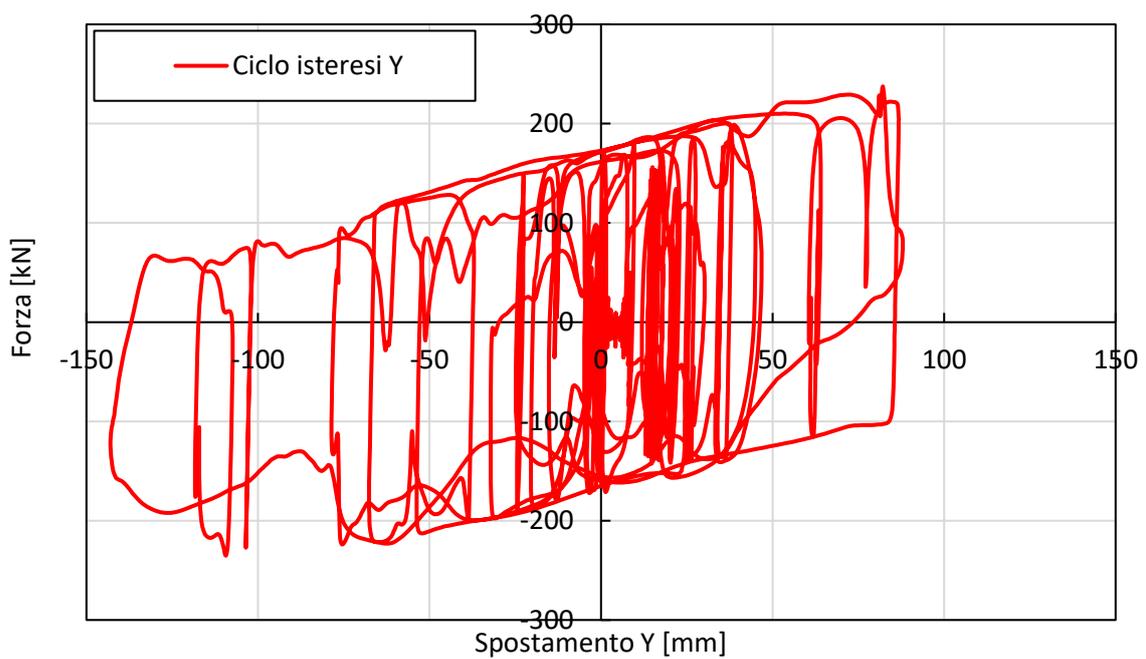
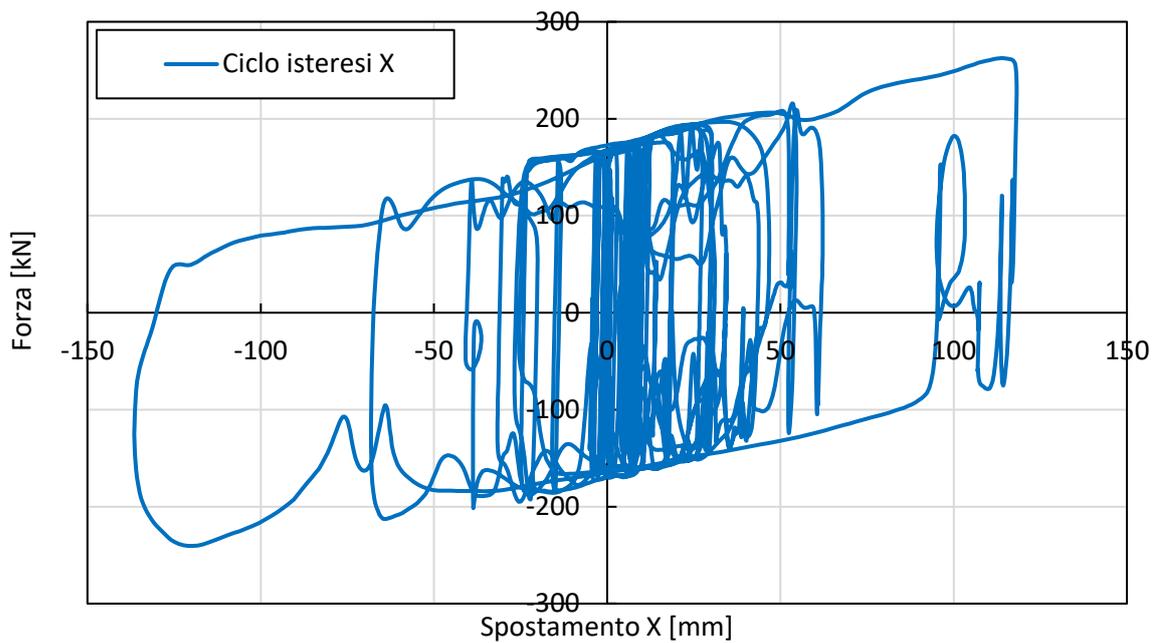
5.4.2.3 MCE

- 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.

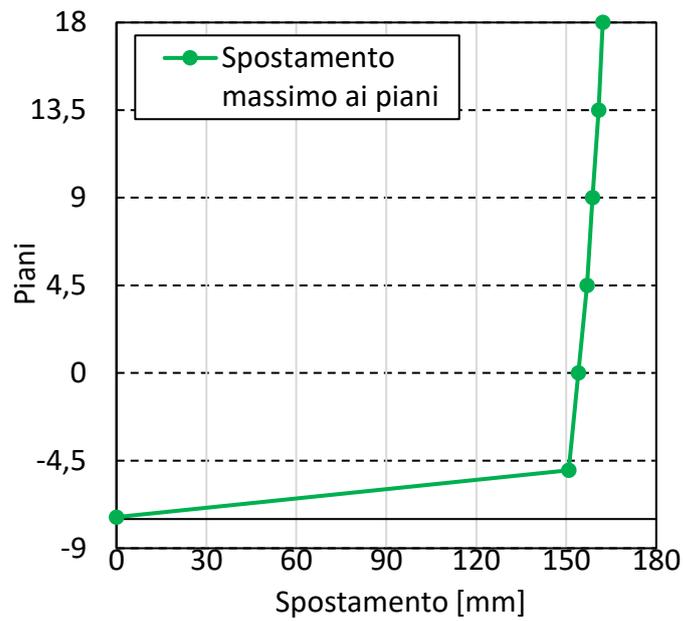


- Essendo che i dispositivi di isolamento raggiungono valori di spostamento più grandi rispetto al caso DBE, il ciclo di isteresi dell'isolatore posto nel centro di rigidità risulta più ampio. Di seguito sono riportati i cicli isteretici nelle due direzioni X e Y.

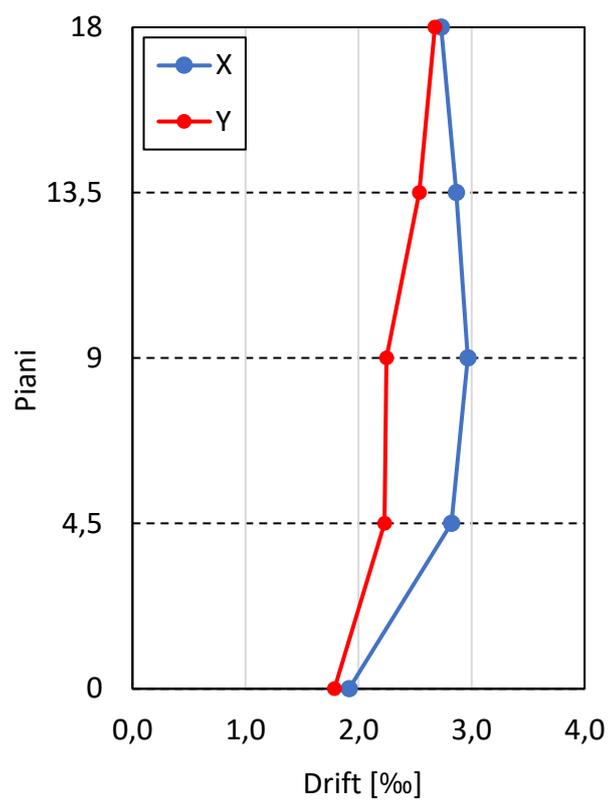


- Per quanto riguarda la risultante degli spostamenti nelle due direzioni, si ha che per il piano dell'isolatore lo spostamento massimo risulta essere di 151 mm. Poi man mano che si sale di piano lo spostamento massimo aumenta fino ad arrivare a misurare 162 mm all'ultimo solaio.

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

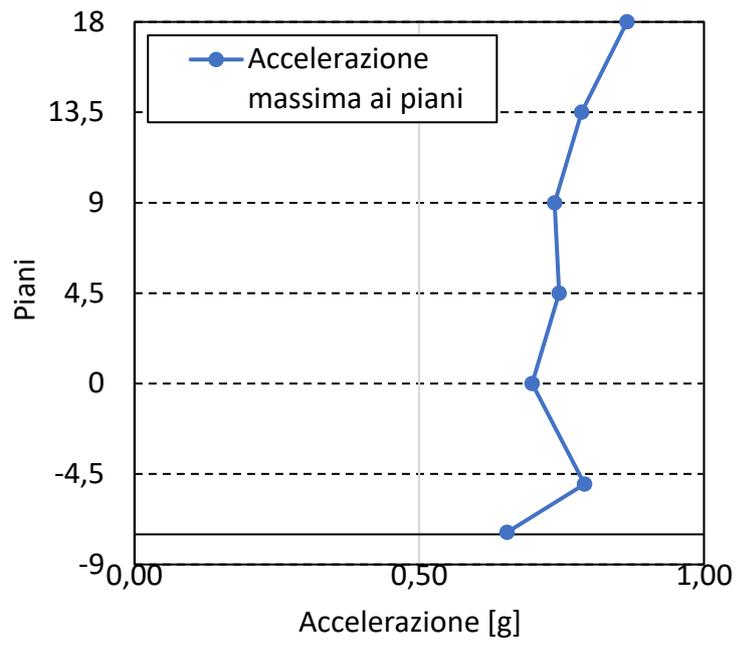


- Anche i valori del drift interpiano sono aumentati rispetto ai casi precedenti, infatti si registra un valore massimo pari allo 2,9 ‰ in direzione X ed al solaio a quota 9 m. di seguito viene riportato l'andamento del drift al variare dell'altezza dell'edificio.



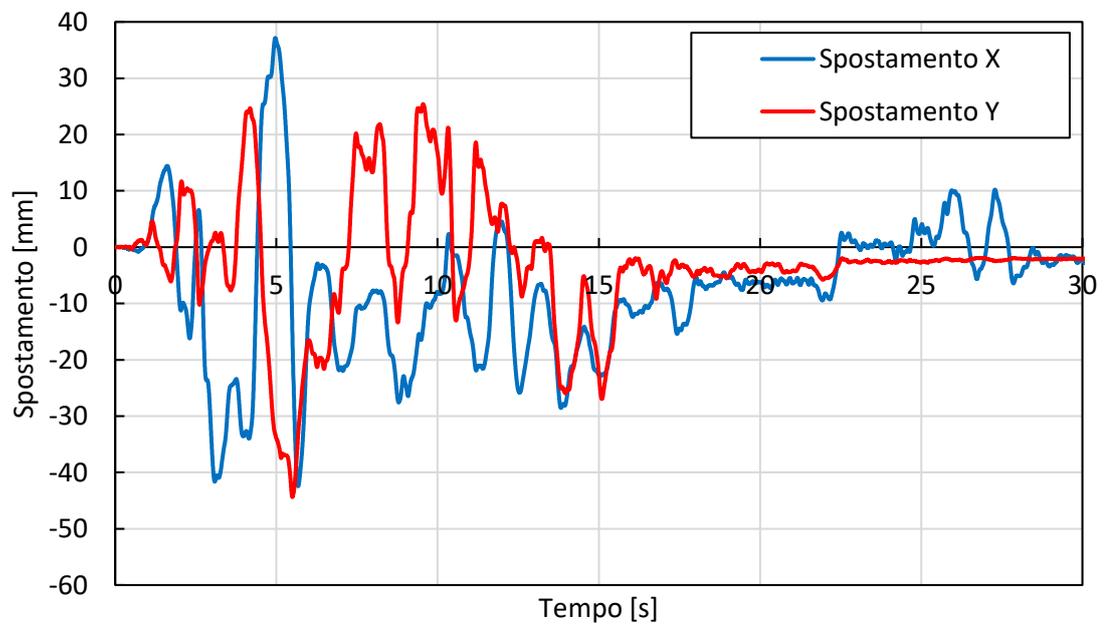
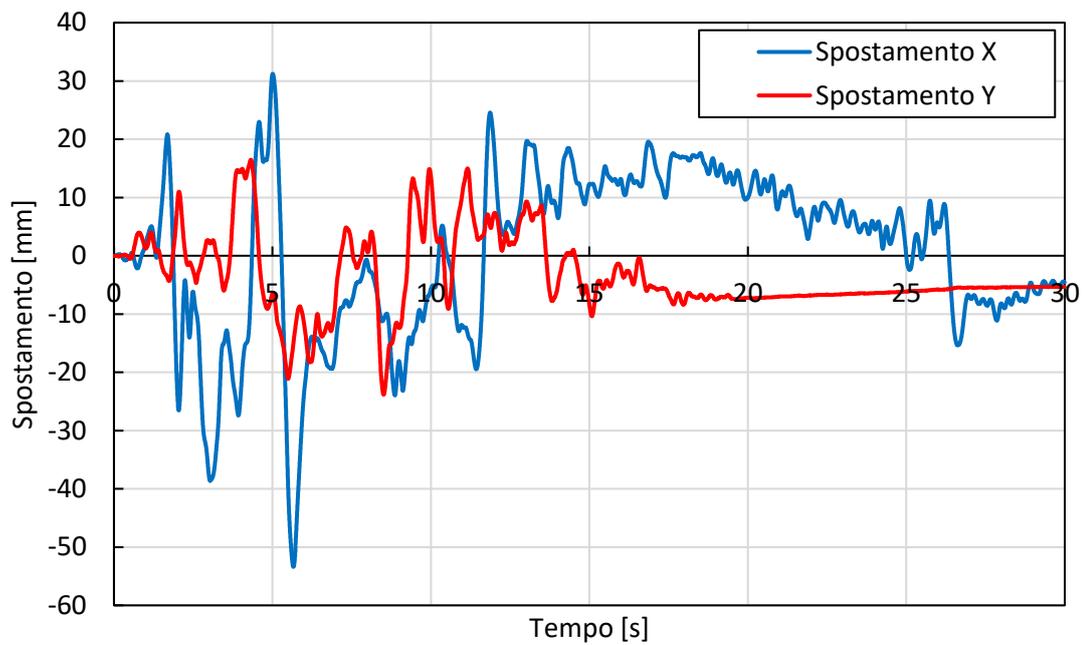
- Infine, si riporta il valore massimo delle accelerazioni dei vari piani.

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

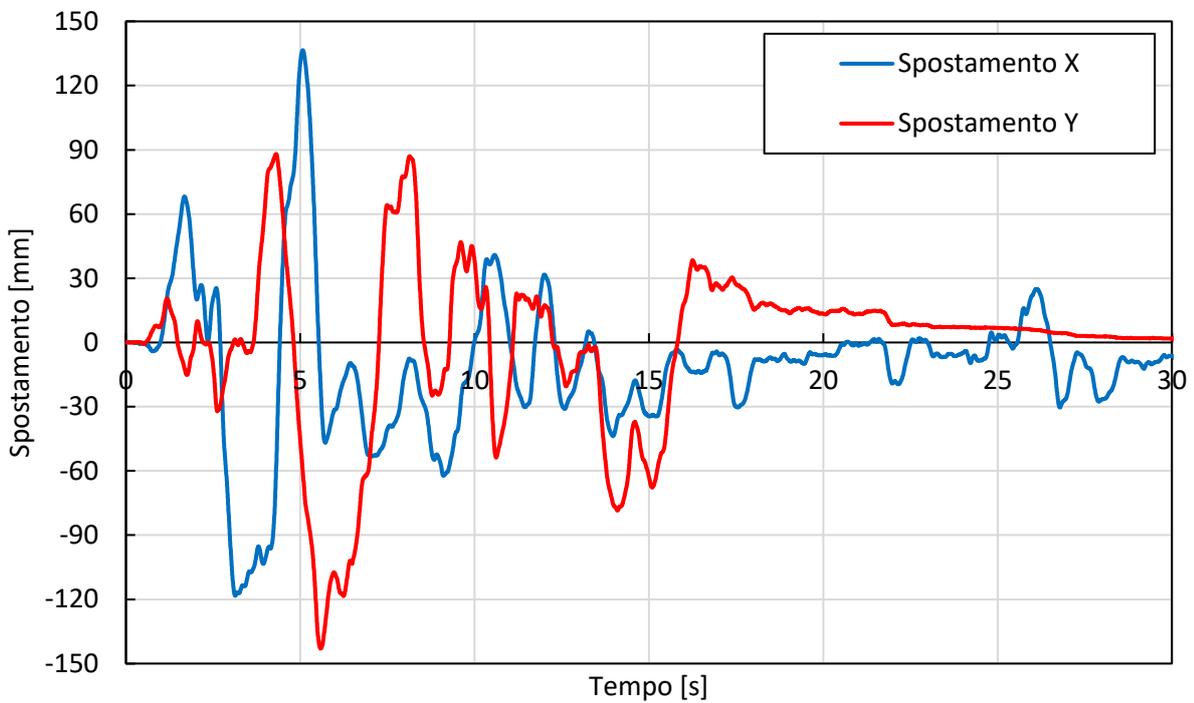
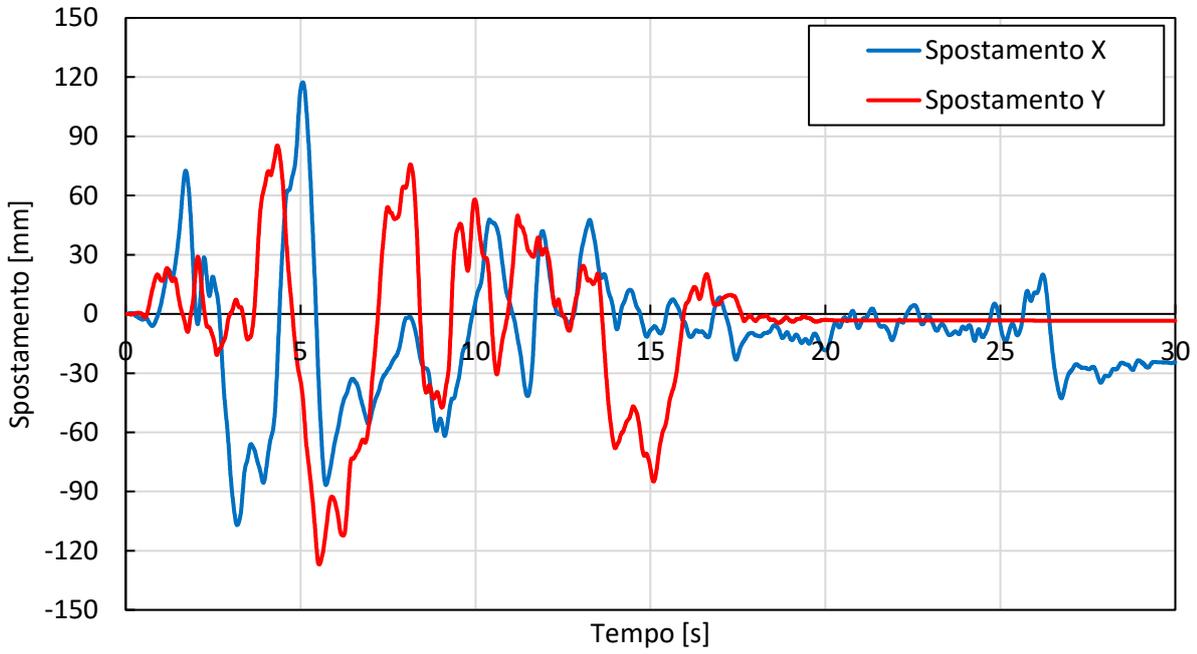


5.5 Confronto risultati modello semplificato e completo

Peri 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.

Blocco	Peso [kN]
A	301174
B	56681
C-D-E	159406
F-G	126895

Alla base di ogni blocco sono stati installati degli isolatori sismici a doppia superficie curva, per un totale di 455 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.

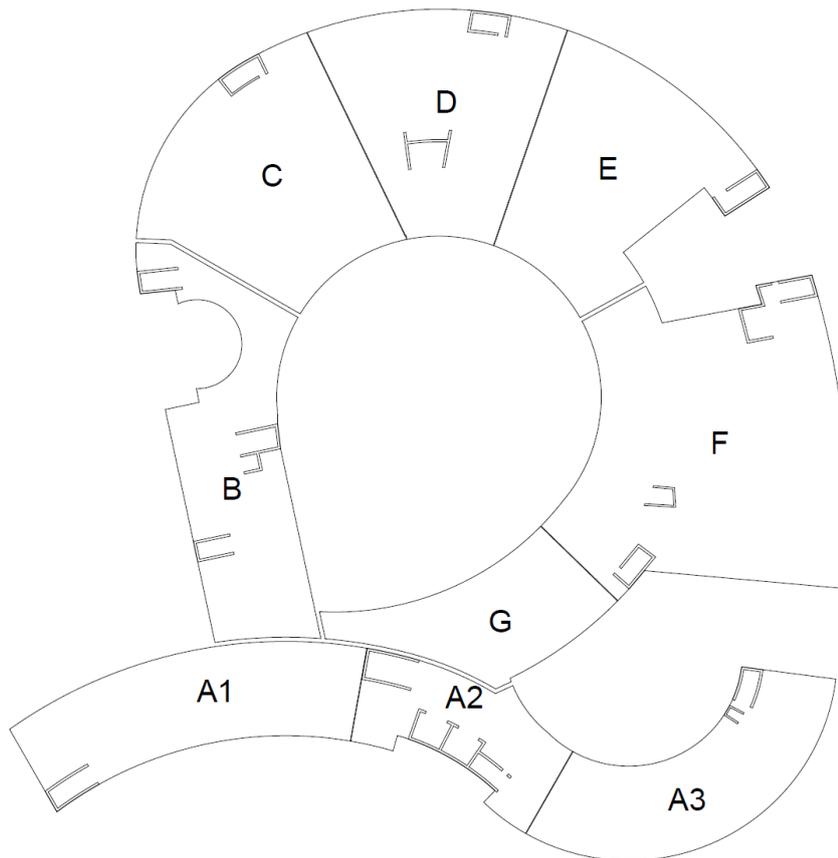


Figura 6-1: foto dall'alto dell'ospedale e pianta della suddivisione in blocchi.

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.

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.

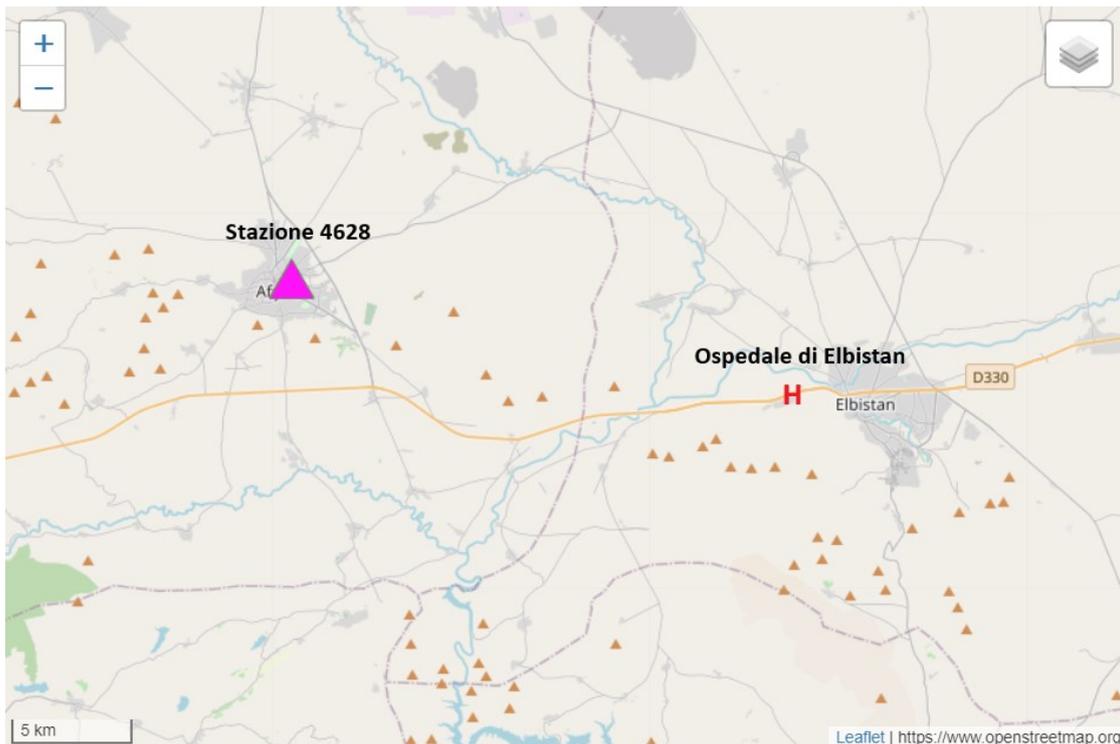
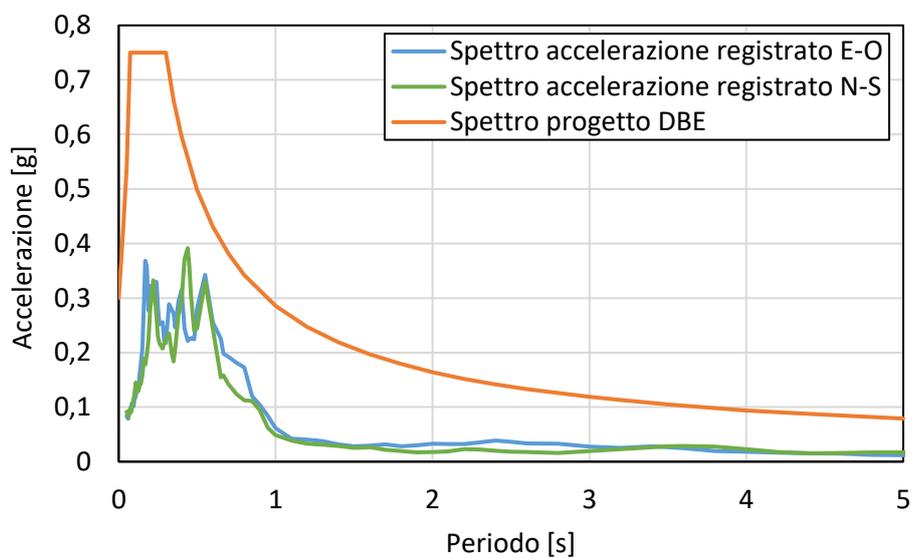
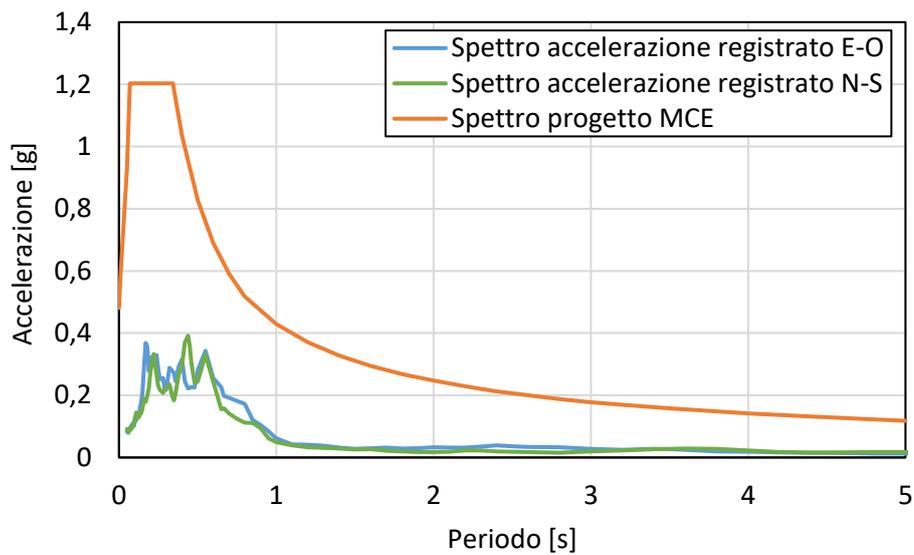


Figura 6-2: inquadramento geografico stazione 4628.

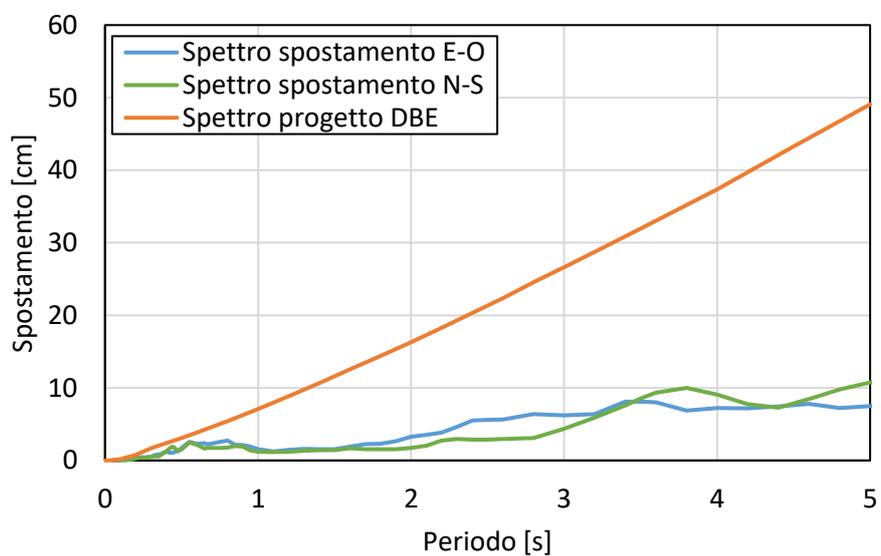
Di seguito vengono riportati gli spettri in accelerazione nelle direzioni Est-Ovest e Nord-Sud confrontati con i due spettri di accelerazione di progetto per quest'opera.

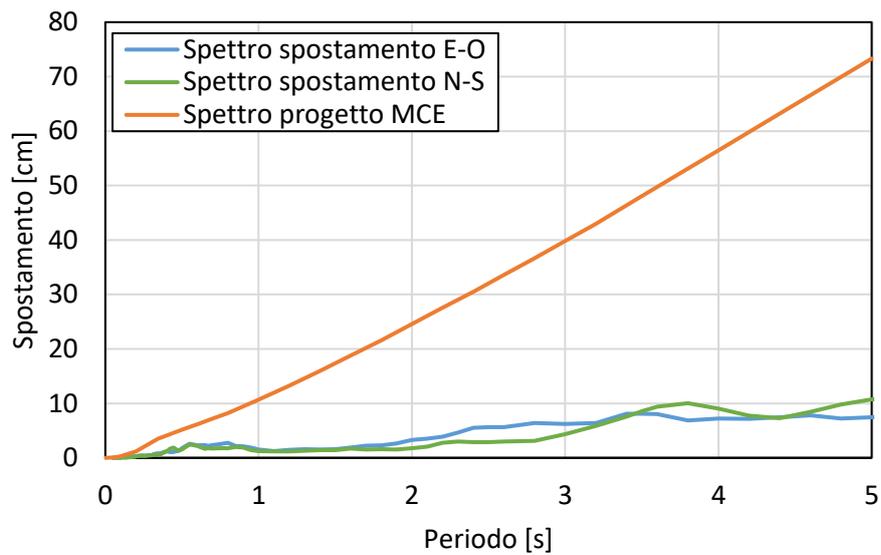




Come chiaramente visibile, gli spettri registrati di questo sisma sono nettamente inferiori sia allo spettro di progetto in DBE che MCE, nonostante sia la scossa più forte. Questo si spiega perché la stazione in oggetto si trova ad una discreta distanza dall'epicentro.

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 che ha epicentro proprio vicino all'ospedale. La seguente immagine illustra l'inquadramento geografico di quanto appena descritto.

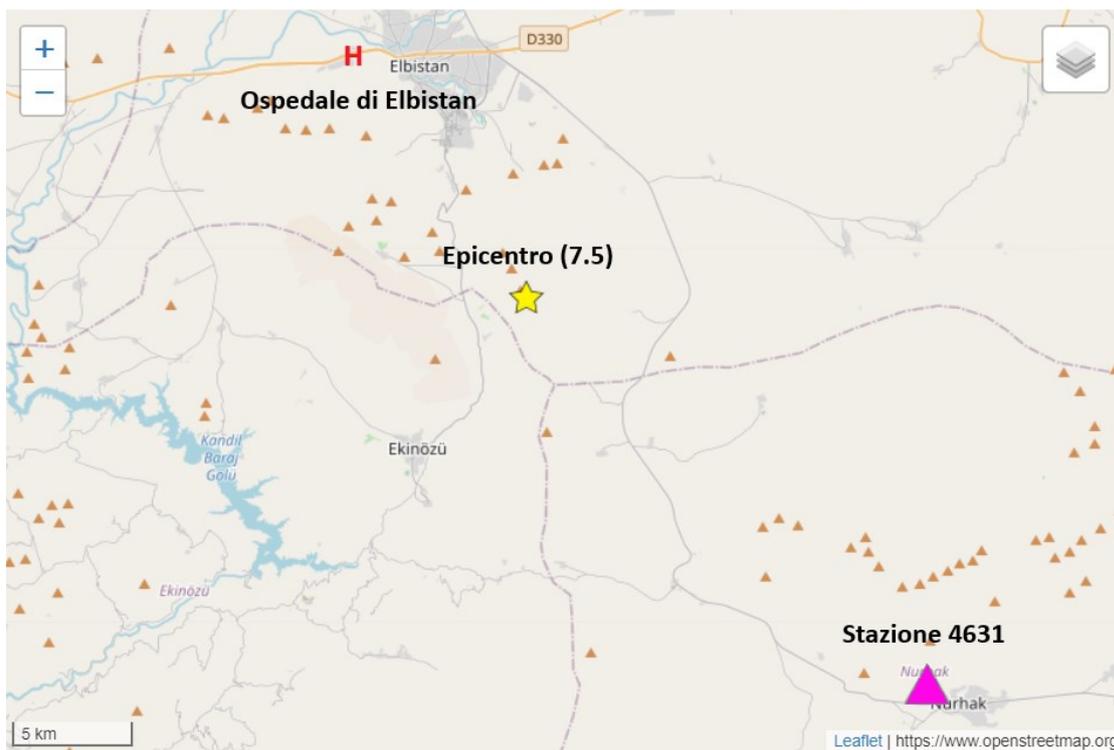
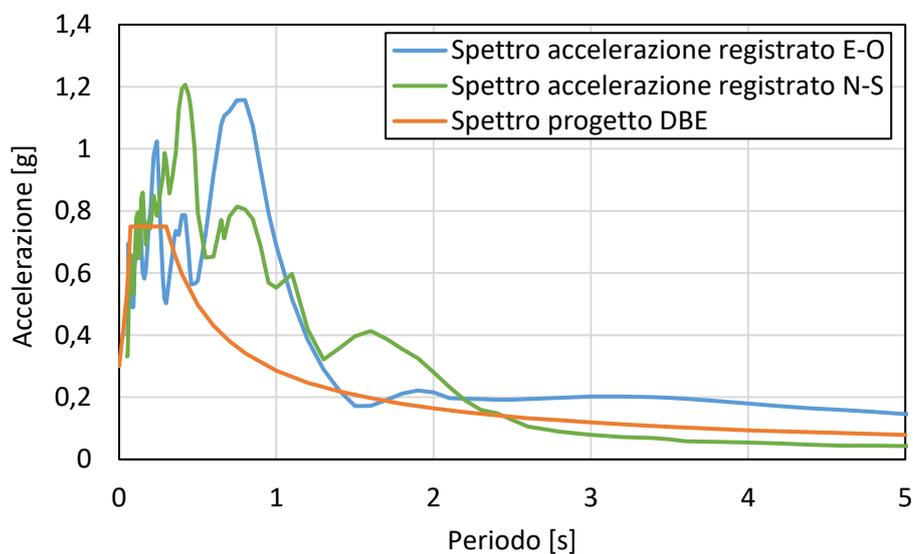
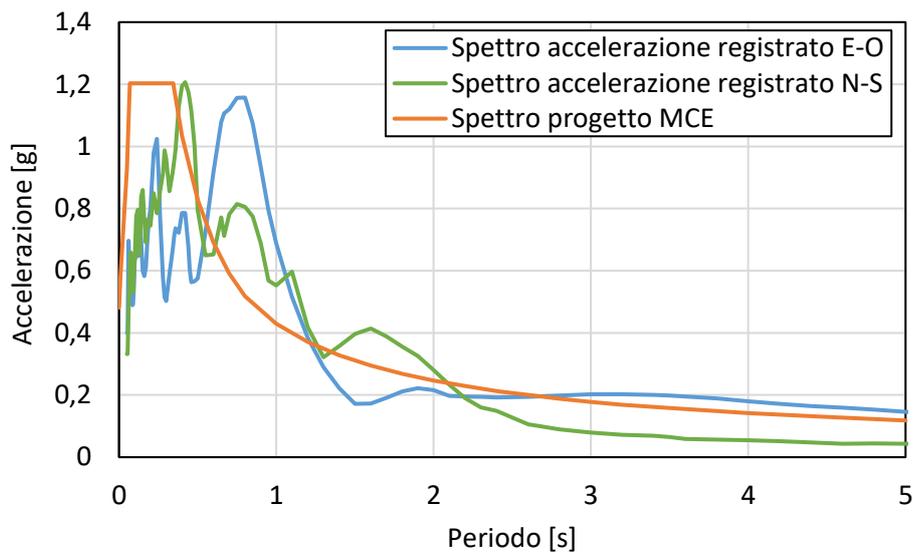


Figura 6-3: inquadramento geografico stazione 4631.

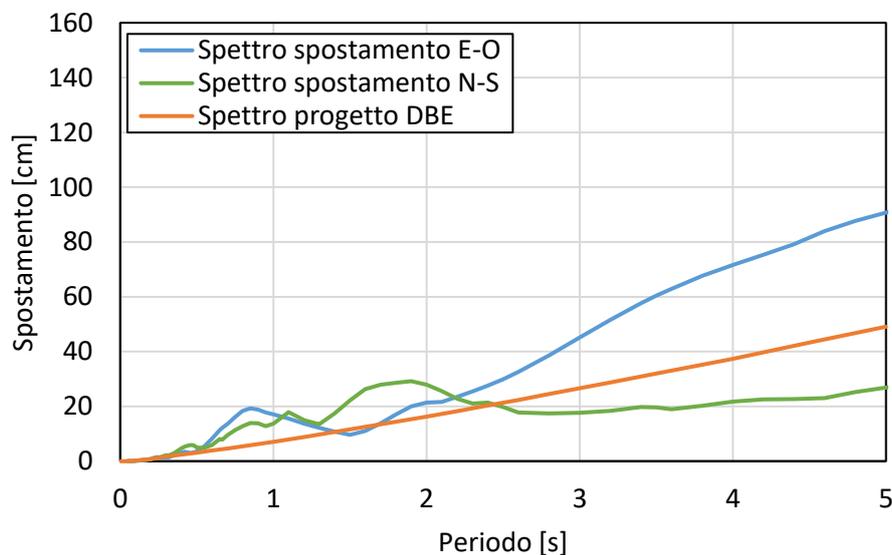
Di seguito vengono riportati gli spettri in accelerazione nelle direzioni Est-Ovest e Nord-Sud confrontati con i due spettri di accelerazione di progetto per quest'opera.

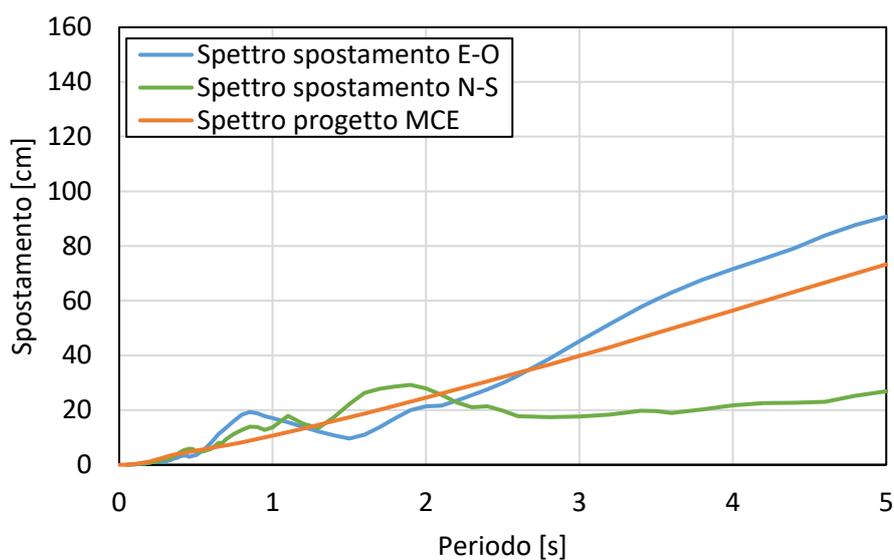




In questo secondo caso le registrazioni sono maggiori rispetto al primo, proprio perché la distanza dell'epicentro alla stazione è poca. Si nota dai due grafici che dal periodo di 2,5 secondi in poi, sia lo spettro DBE che MCE sono inferiori allo spettro del sisma registrato nella direzione Est-Ovest. Per quanto riguarda lo spettro derivante dalla registrazione nella direzione Nord-Sud, esso risulta inferiore ad entrambi gli spettri di progetto. Questo mostra come ci sia una notevole differenza tra i valori di una direzione rispetto all'altra.

Di seguito vengono invece 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 per il periodo di interesse 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.

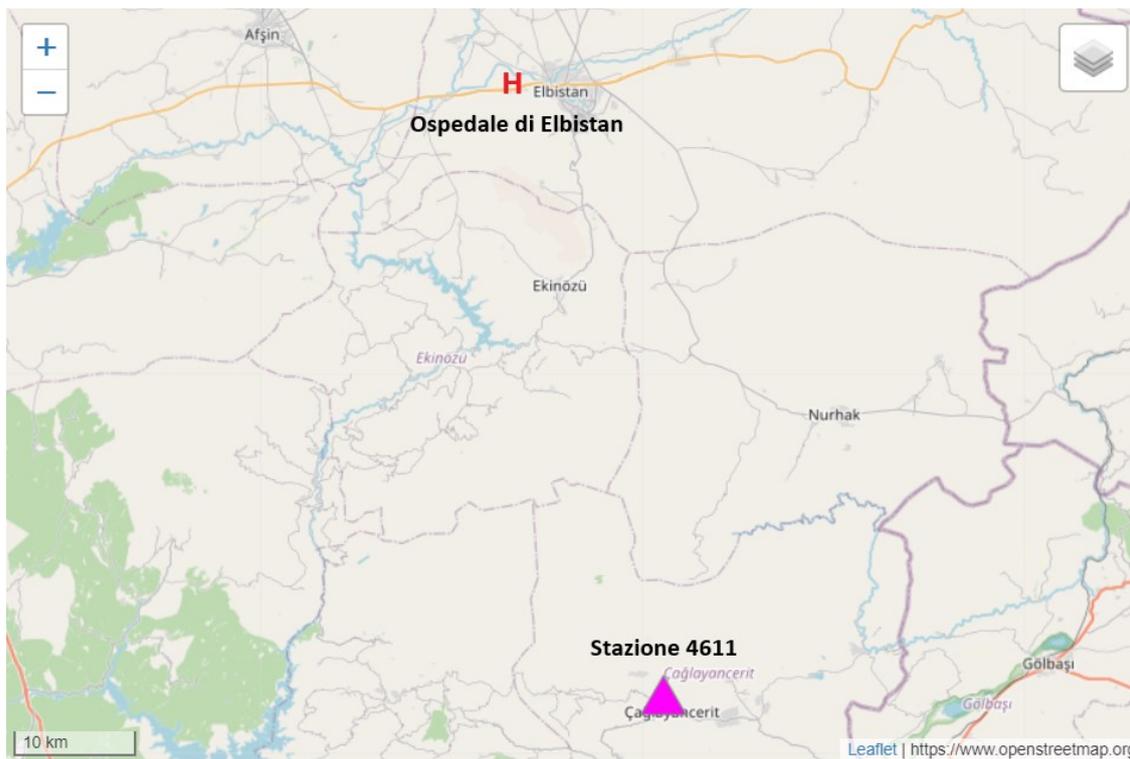
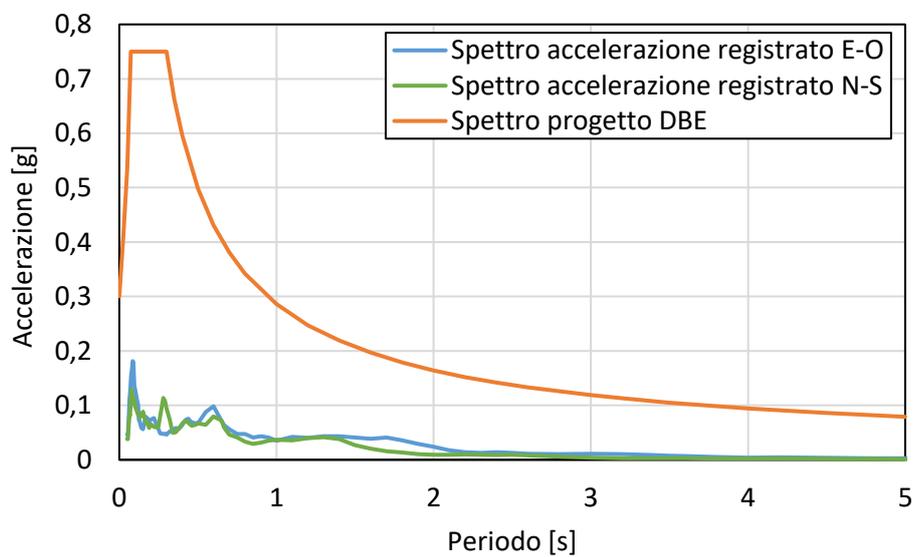
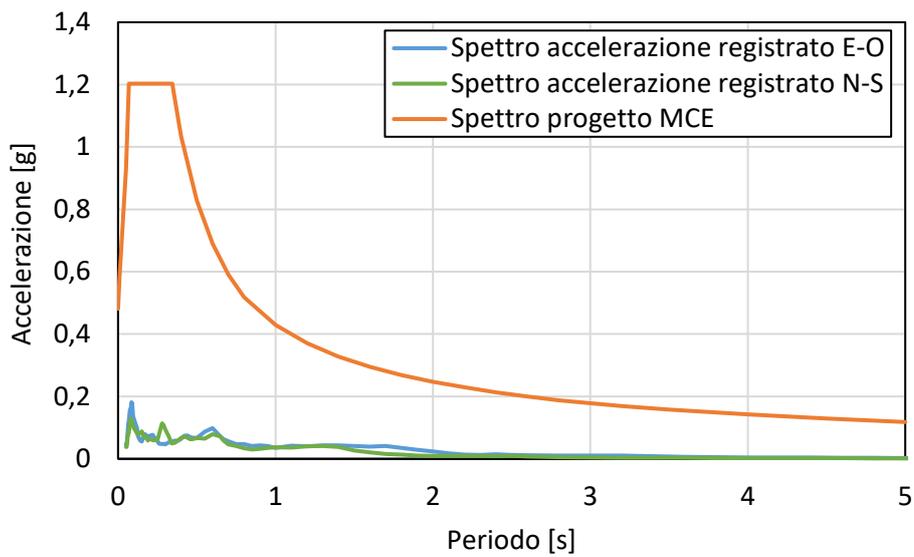


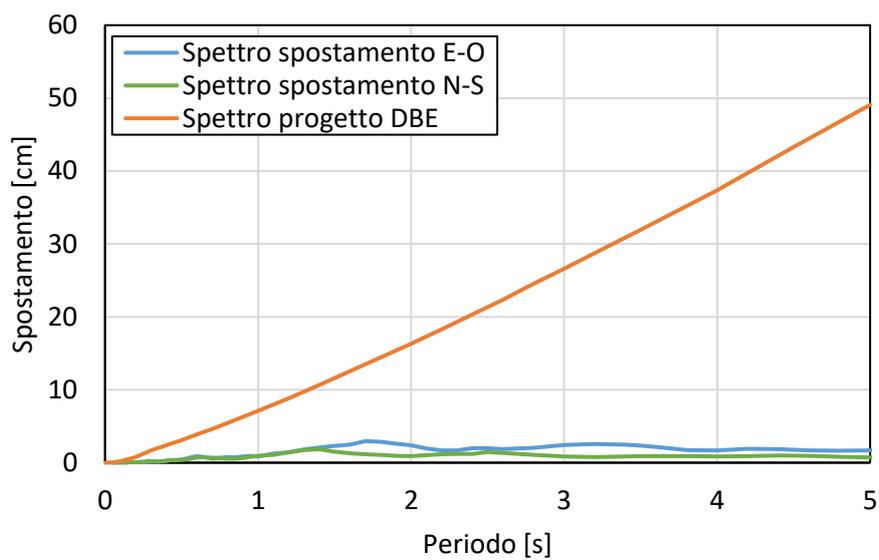
Figura 6-4: inquadramento geografico stazione 4611.

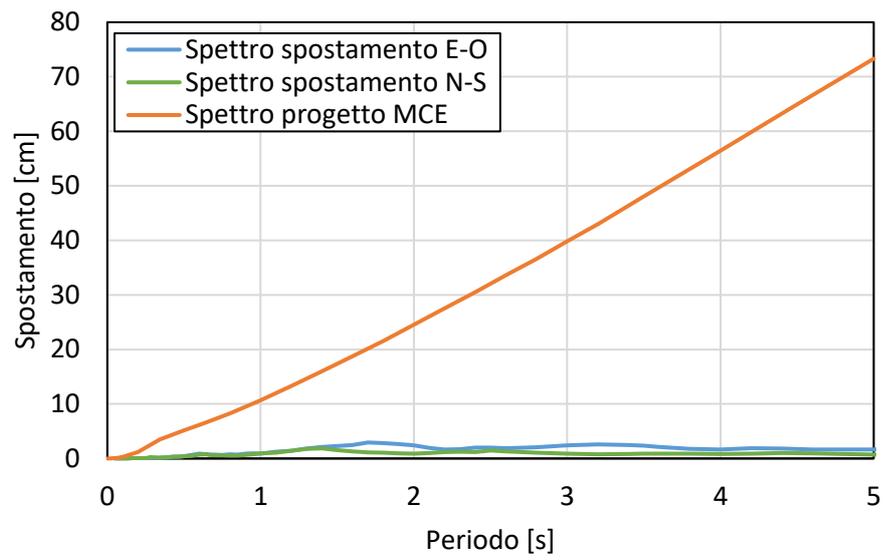
Questa registrazione assomiglia molto a quella registrata dalla stazione 4628 ma con valori abbastanza inferiori.





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:

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

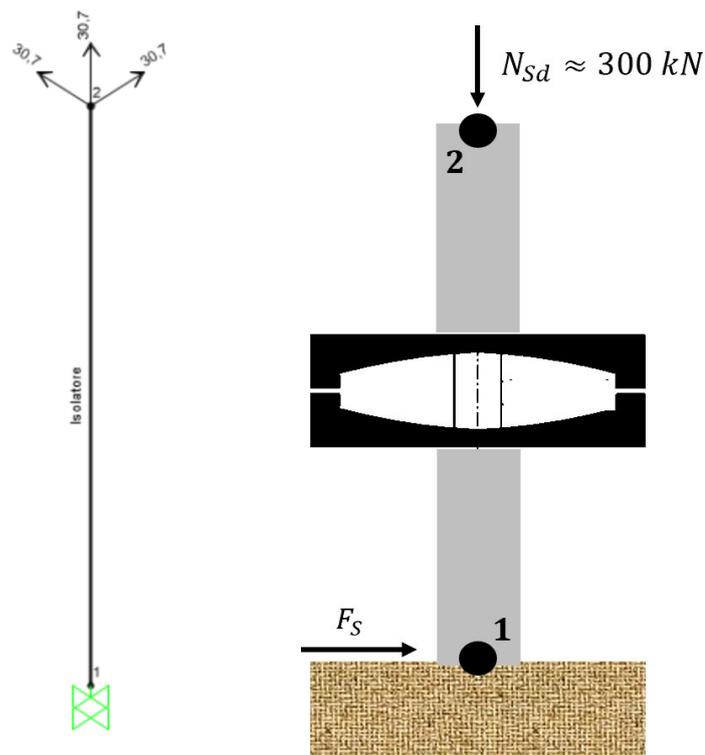
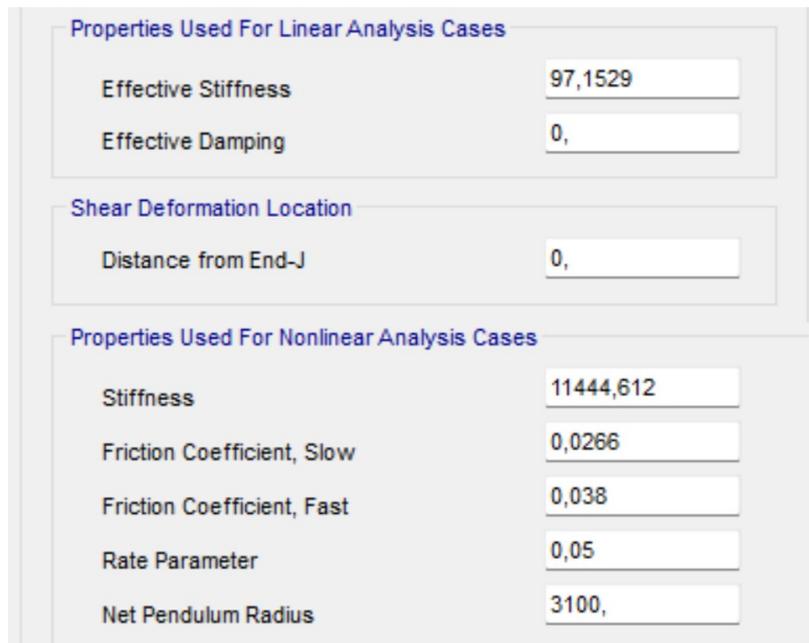


Figura 6-5: modello 1 gdl

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 rigidezza 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 rigidezza usata nel caso non lineare si inserisce il valore di rigidezza 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.

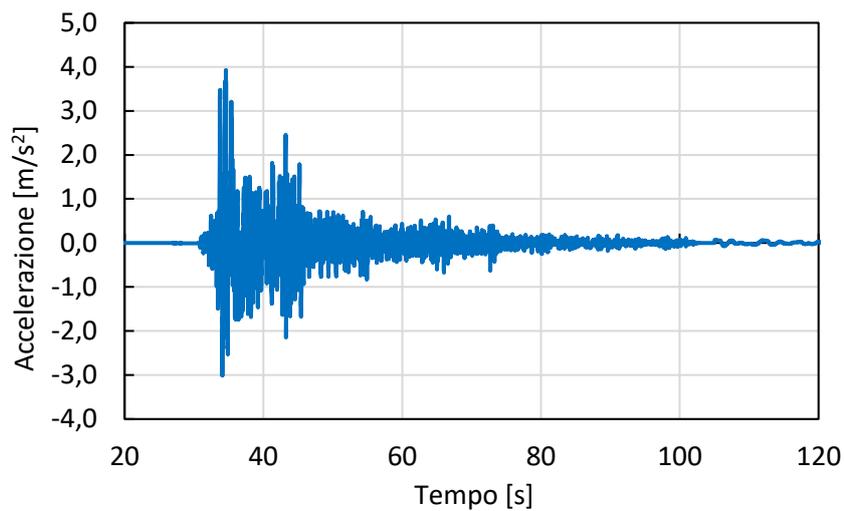


Figura 6-7: accelerogramma stazione 4631 magnitudo 7.5, direzione Est-Ovest.

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.

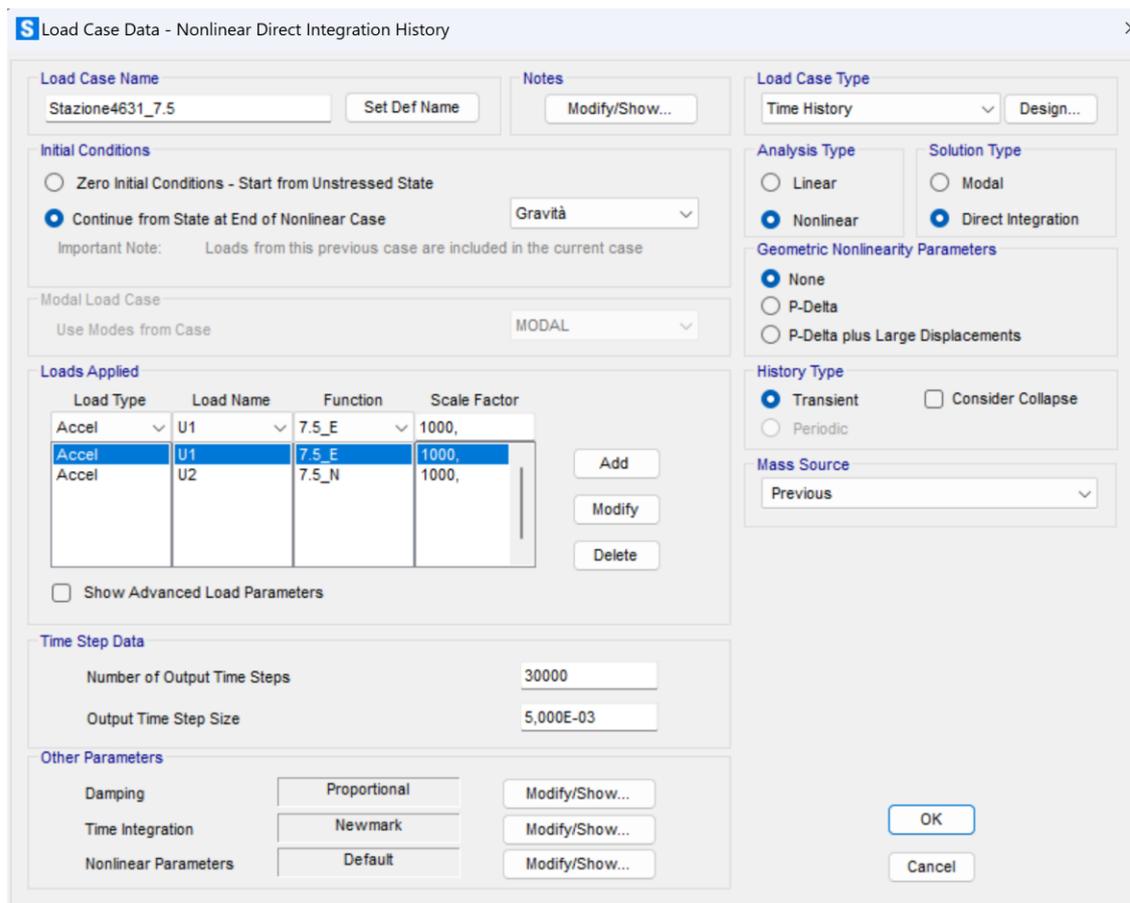


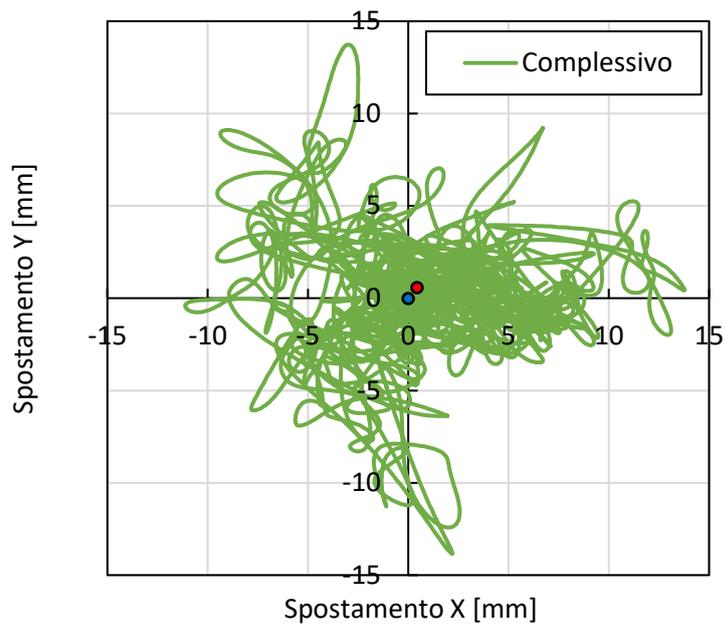
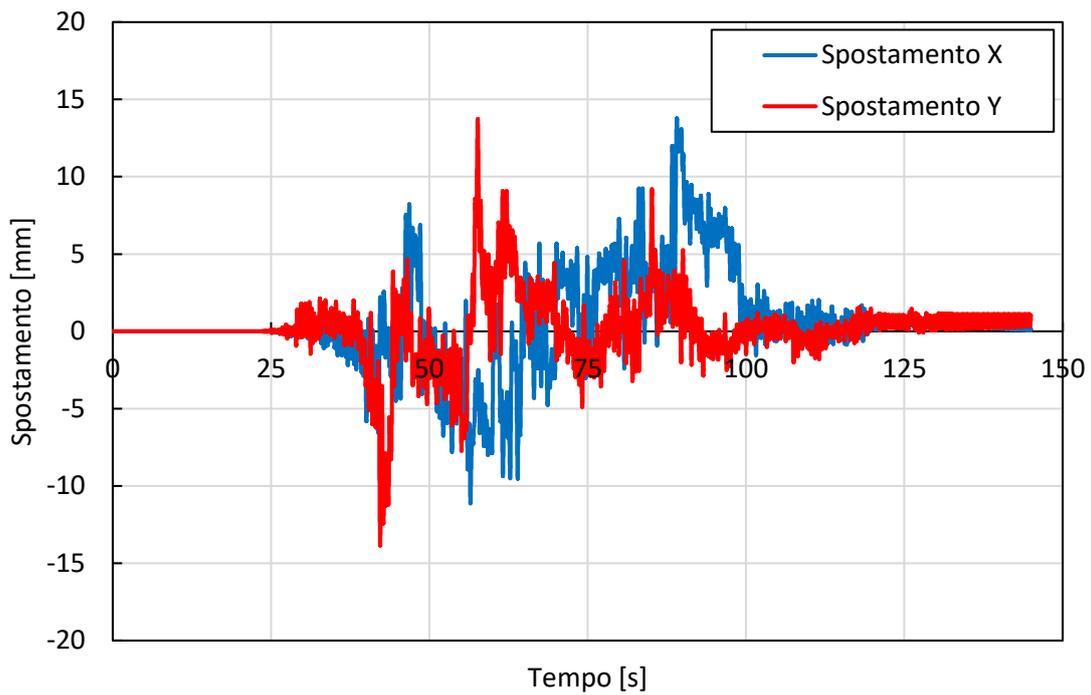
Figura 6-8: esempio di analisi al passo, caso stazione 4631, magnitudo 7.5.

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.

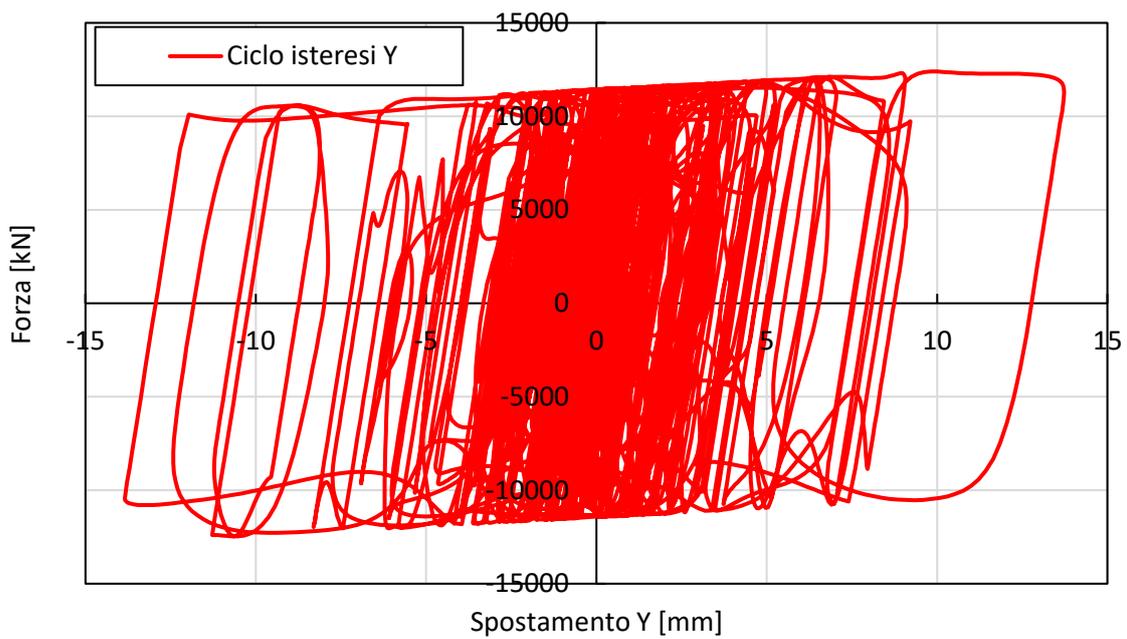
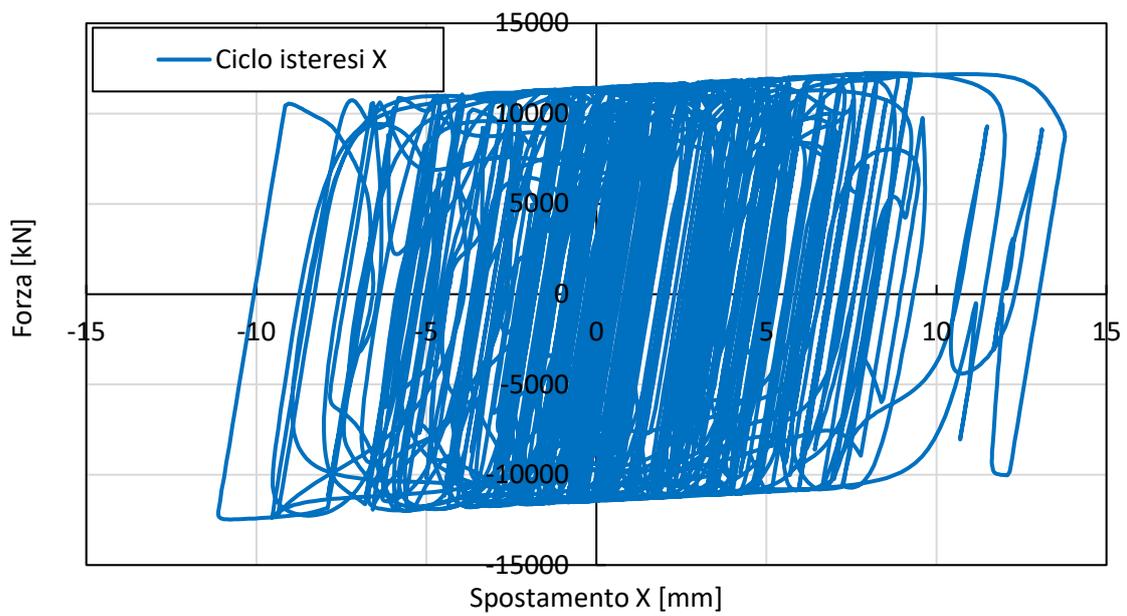
6.3.2.1 Magnitudo 7.8

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



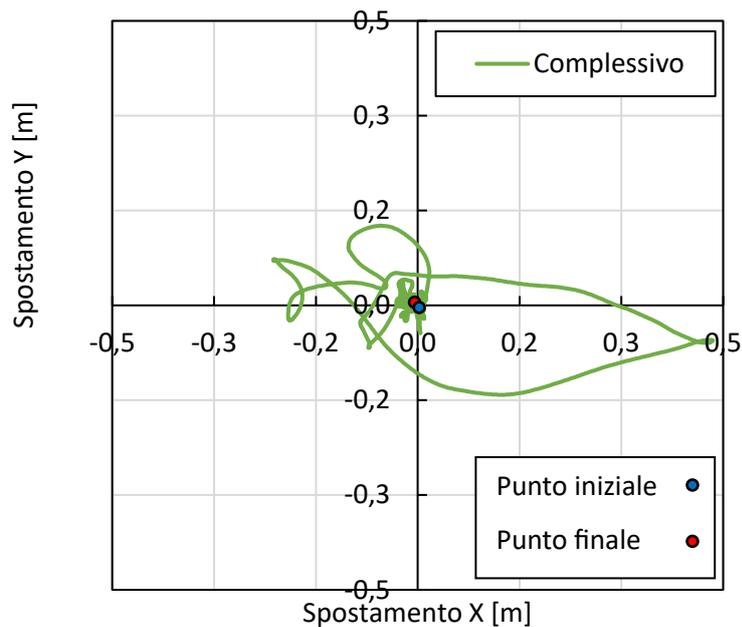
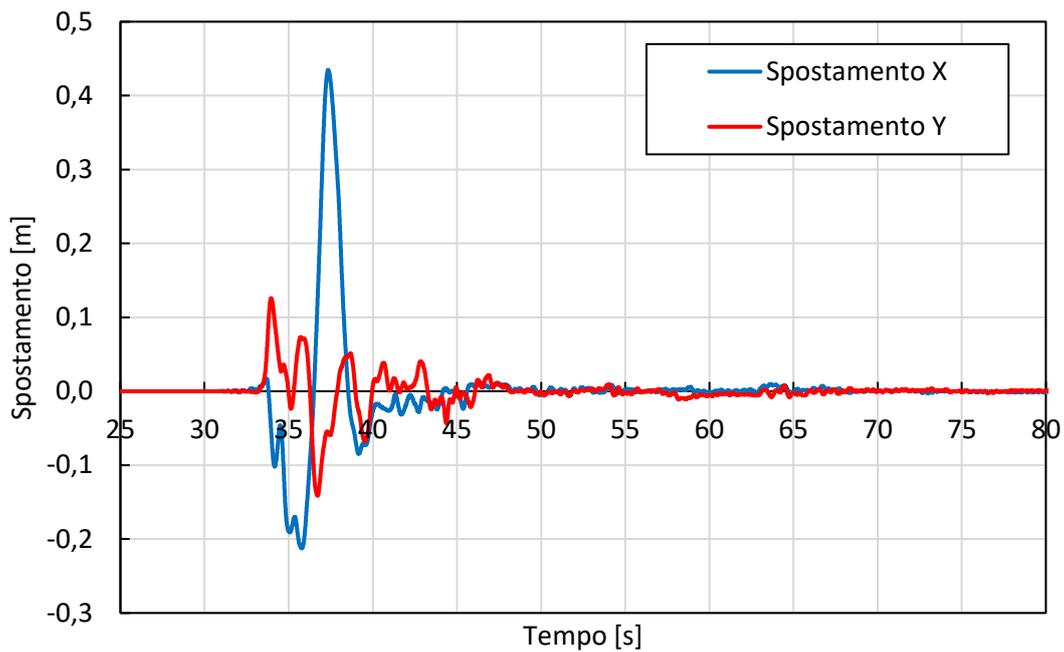
Si nota immediatamente che gli spostamenti sono molto piccoli, in particolare si ha uno spostamento massimo di 13,8 mm in direzione X e di 13,9 mm in direzione Y e uno spostamento residuo praticamente nullo. Tale risultato si può spiegare col fatto che l'ospedale in esame è piuttosto distante dall'epicentro 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

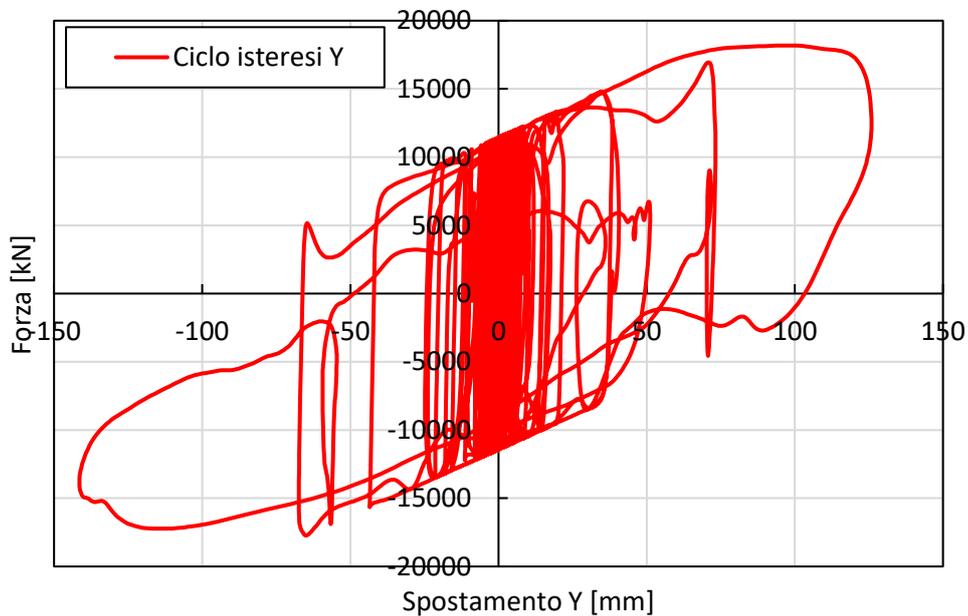
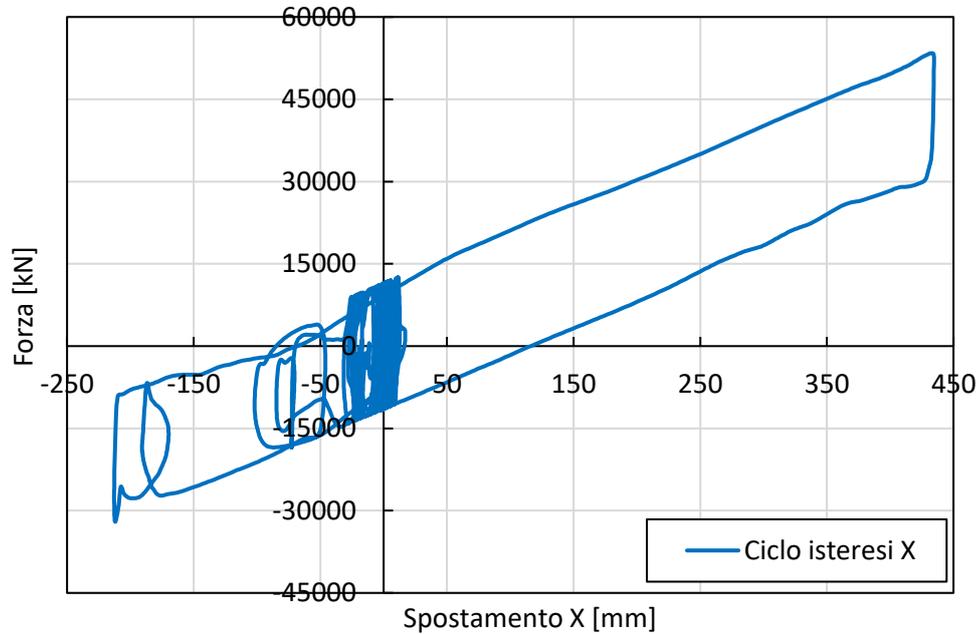
Per il sisma 7.5, essendo che l'epicentro del terremoto si trova vicino all'ospedale di Elbistan, si hanno degli spostamenti elevati, come indicato nei seguenti grafici.



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

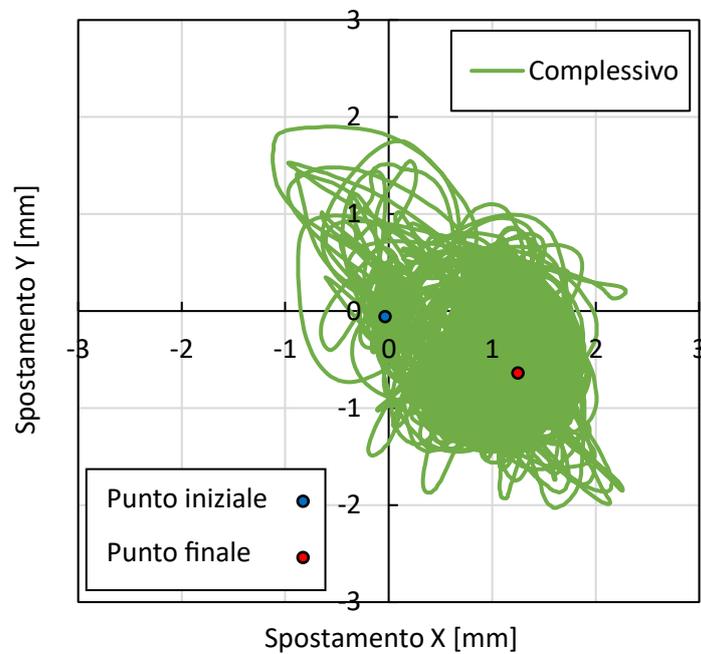
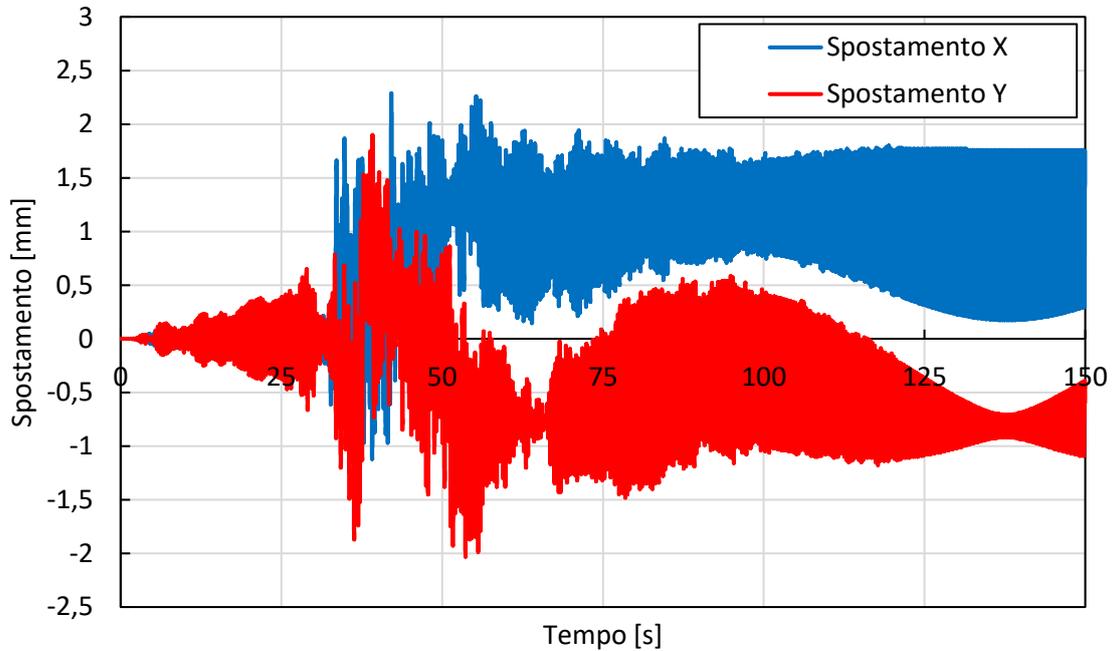
capacità non è stata rispettata. Quindi è possibile affermare che il sistema di isolamento progettato per l'ospedale in esame non è sufficiente per eventi sismici di questa entità.

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.

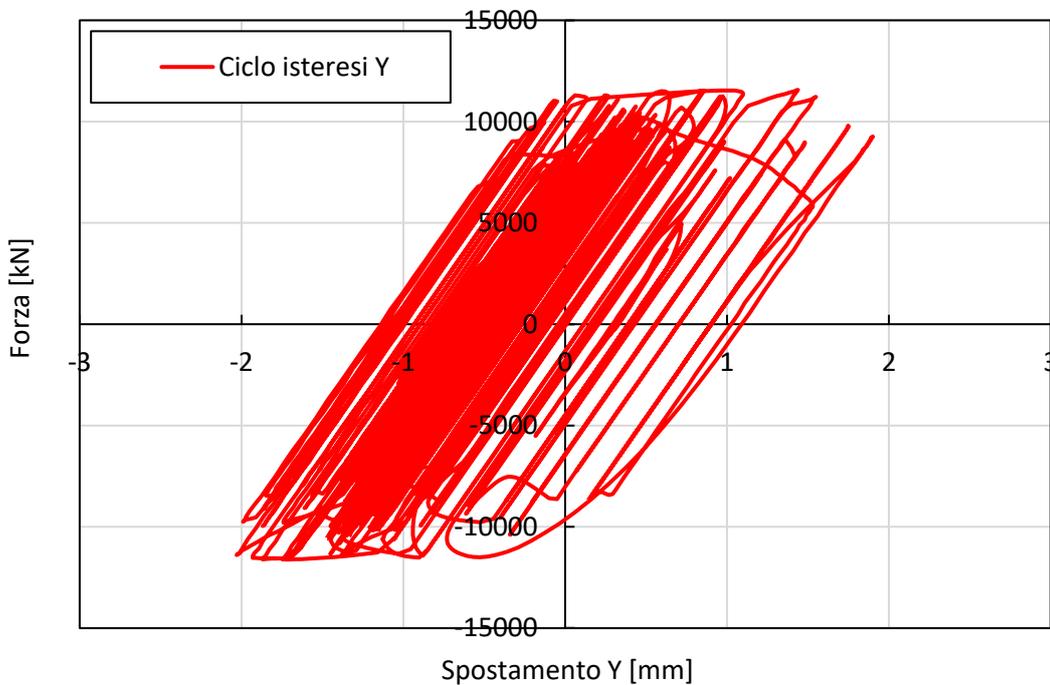
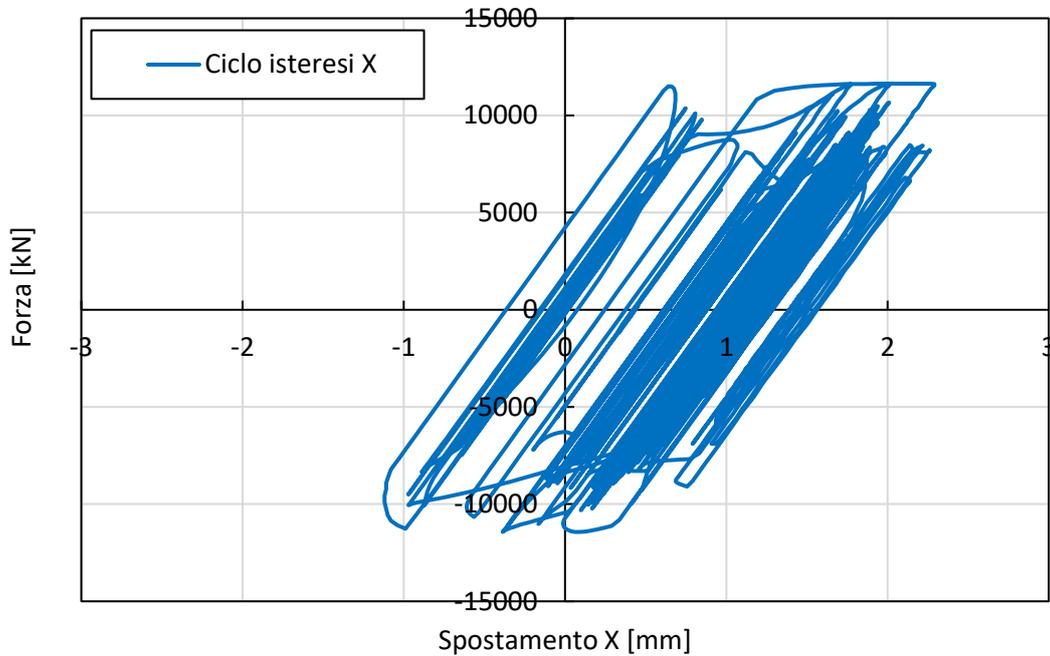


6.3.2.3 Magnitudo 6.6

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.



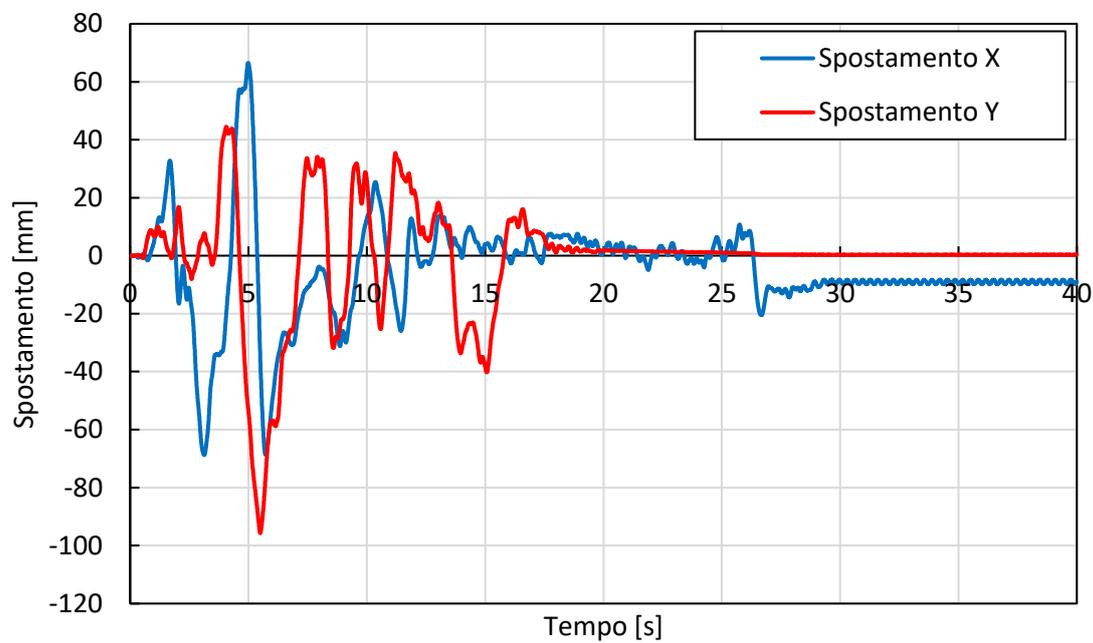
Anche dai cicli di isteresi si nota che il sistema di isolamento è stato poco sollecitato, infatti essi risultano pressoché lineari, a dimostrazione del fatto che la forza sollecitante non è stata sufficiente a passare al ramo con rigidità minore e spostamenti maggiori.

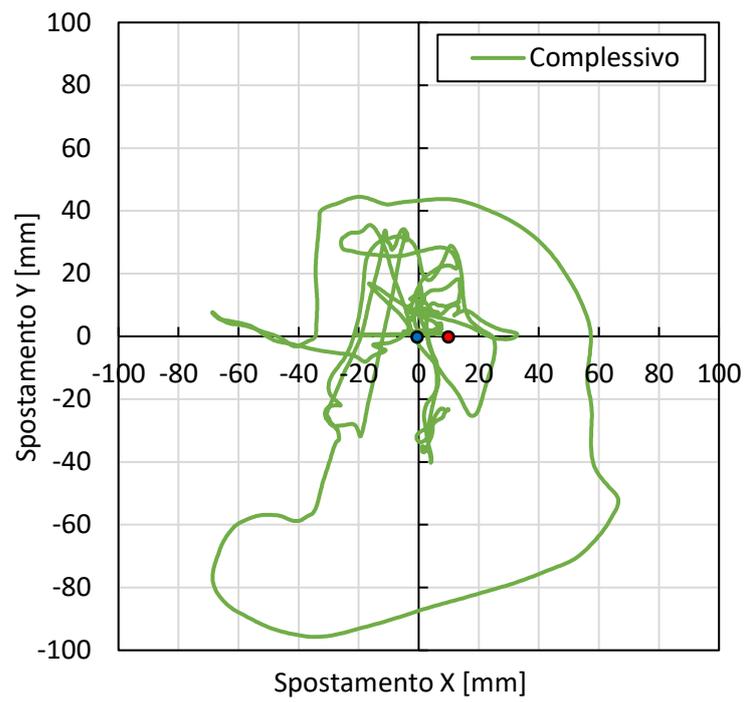


6.3.2.4 DBE

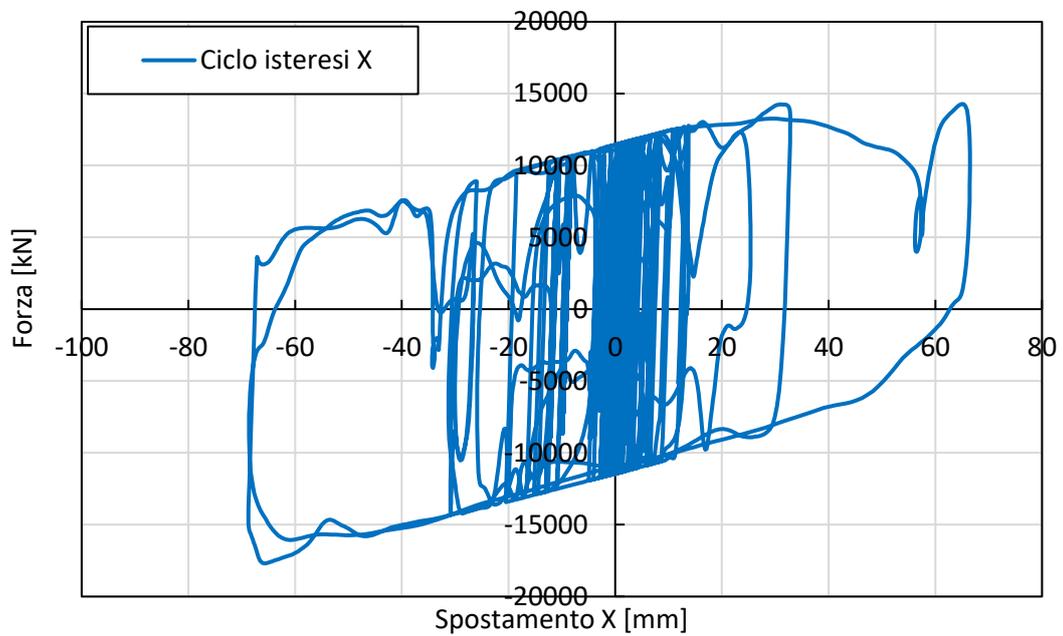
Per ottenere gli accelerogrammi da applicare alla struttura nel caso DBE, come fatto anche per l'ospedale di Adana, sono stati generati due accelerogrammi spettro compatibili dallo spettro DBE. Uno è stato creato direttamente con SAP2000 ed uno con il programma SIMQKE, e sono stati applicati nelle due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

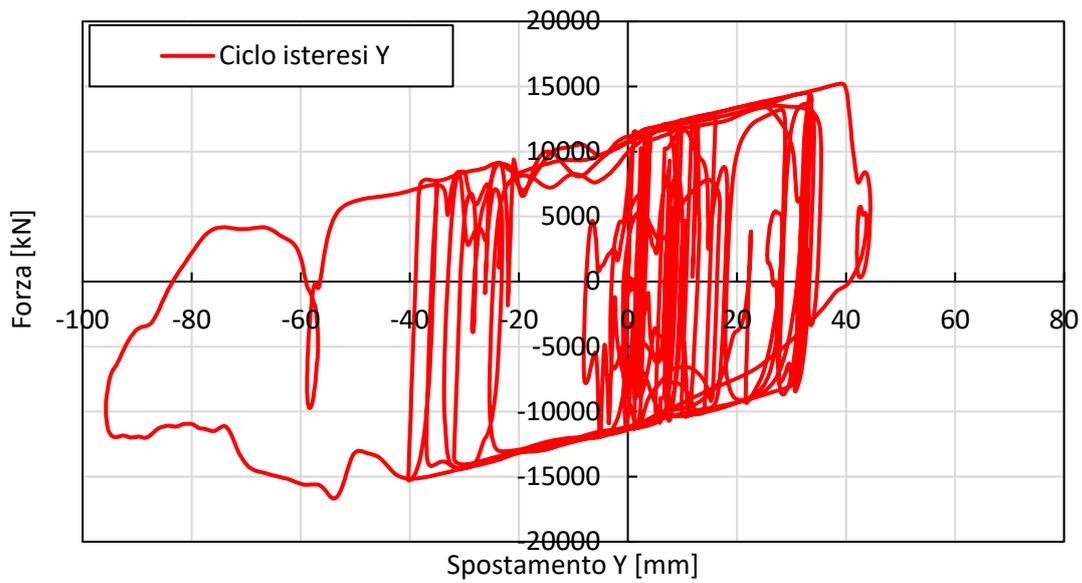
Gli spostamenti che si ottengono da questa combinazione sono inferiori solo al caso con sisma 7.5, negli altri due casi sopra descritti infatti si hanno spostamenti massimi inferiori di quelli ottenuti applicando l'accelerogramma di progetto DBE.





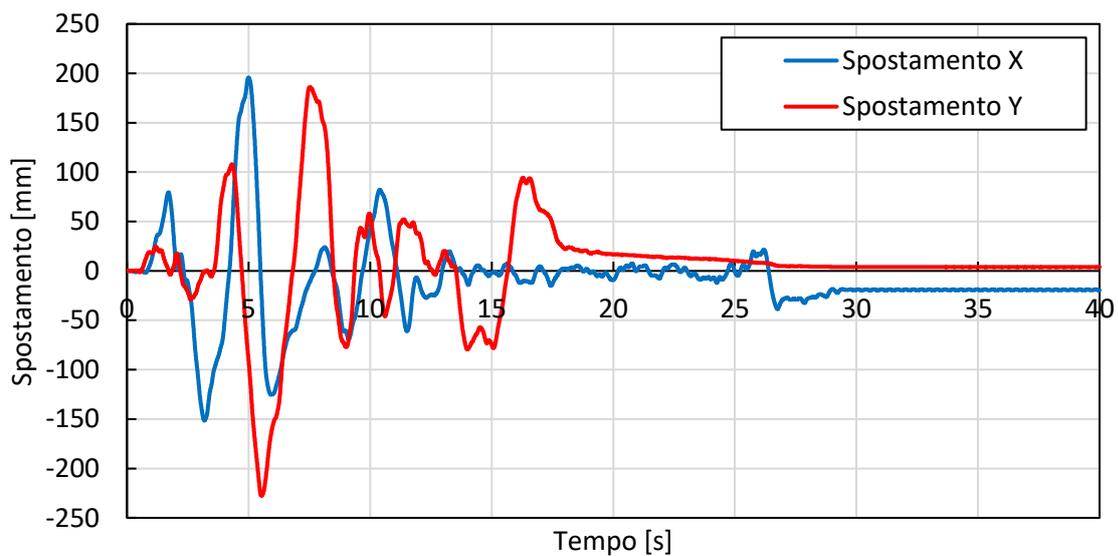
I cicli di isteresi che si ottengono per questo caso mostrano che comunque il punto di cambio pendenza nel grafico forza-spostamento è stato raggiunto.

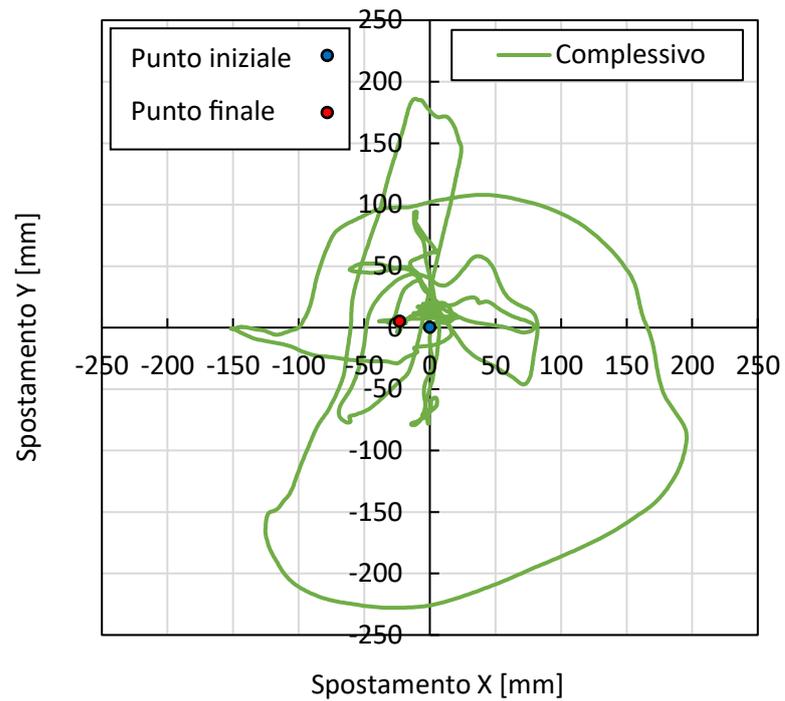




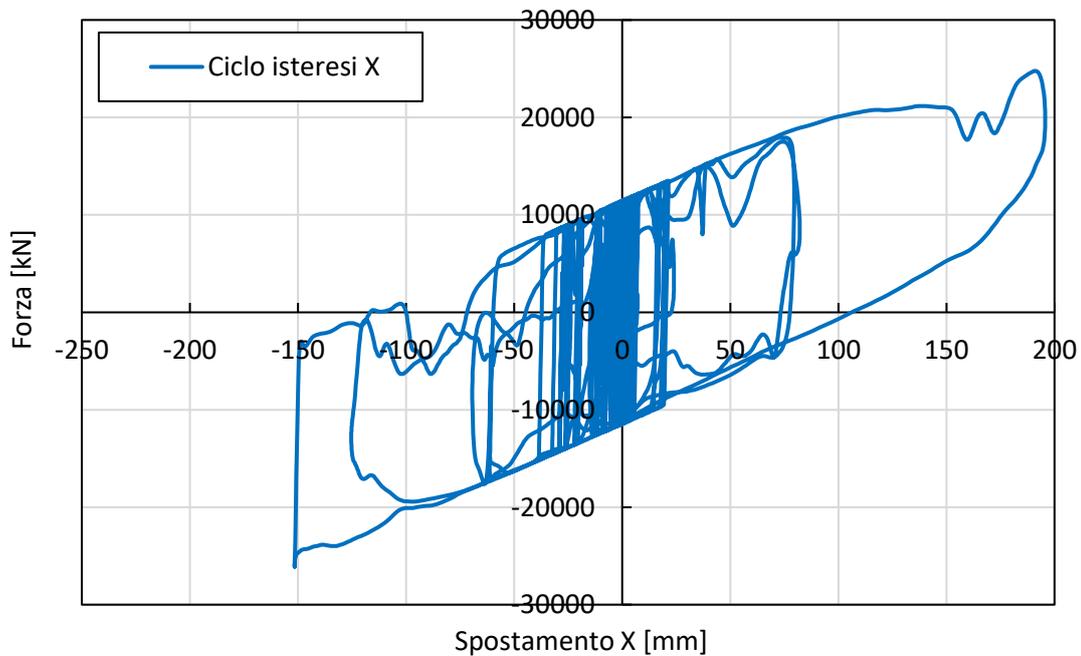
6.3.2.5 MCE

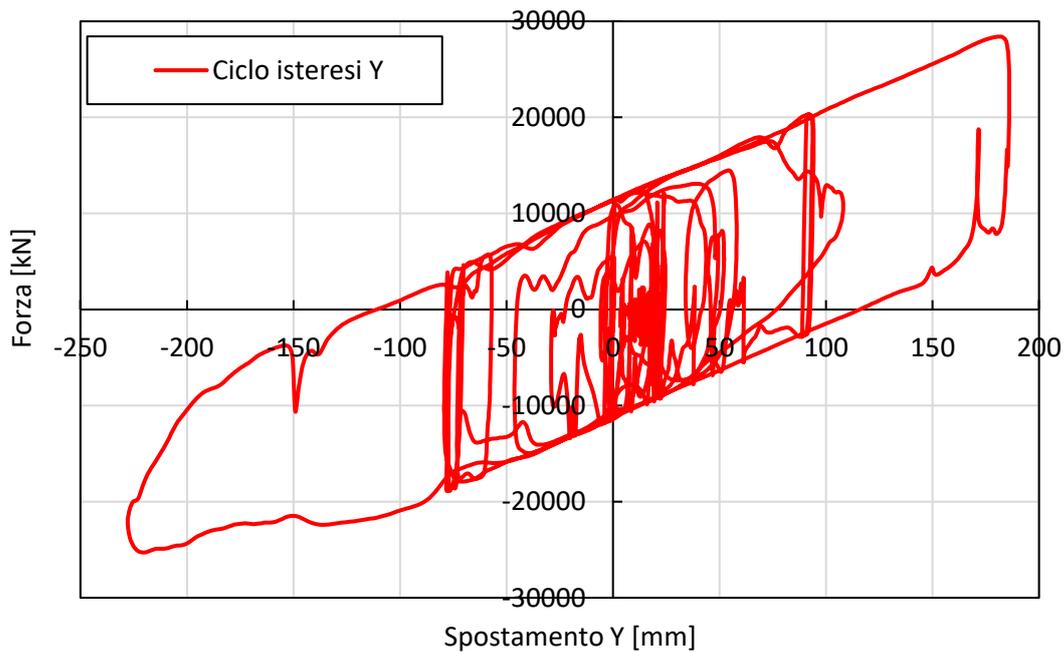
Il caso MCE è quello utilizzato per la determinazione della capacità massima degli isolatori, infatti, in questo caso si hanno degli spostamenti massimi di 196 mm in direzione X e di 228 mm in direzione Y. Come abbiamo però visto in precedenza questi valori risultano comunque minori del caso del sisma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



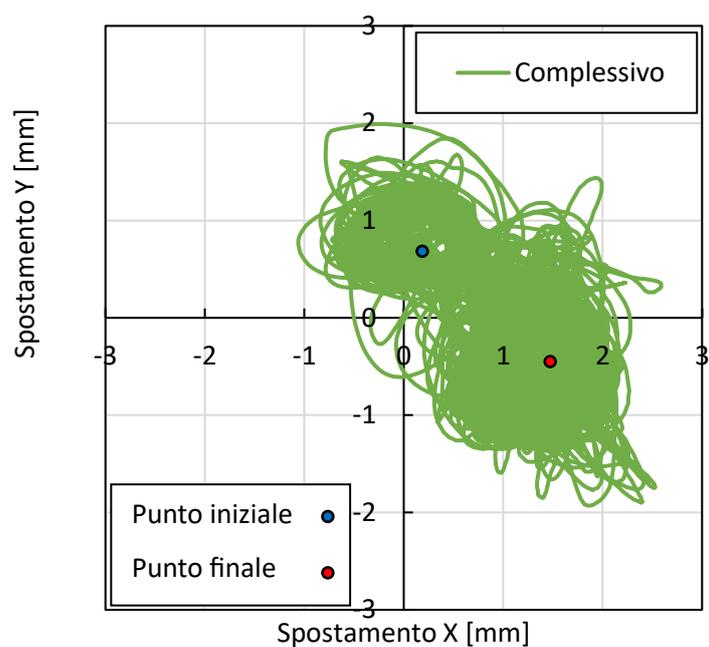
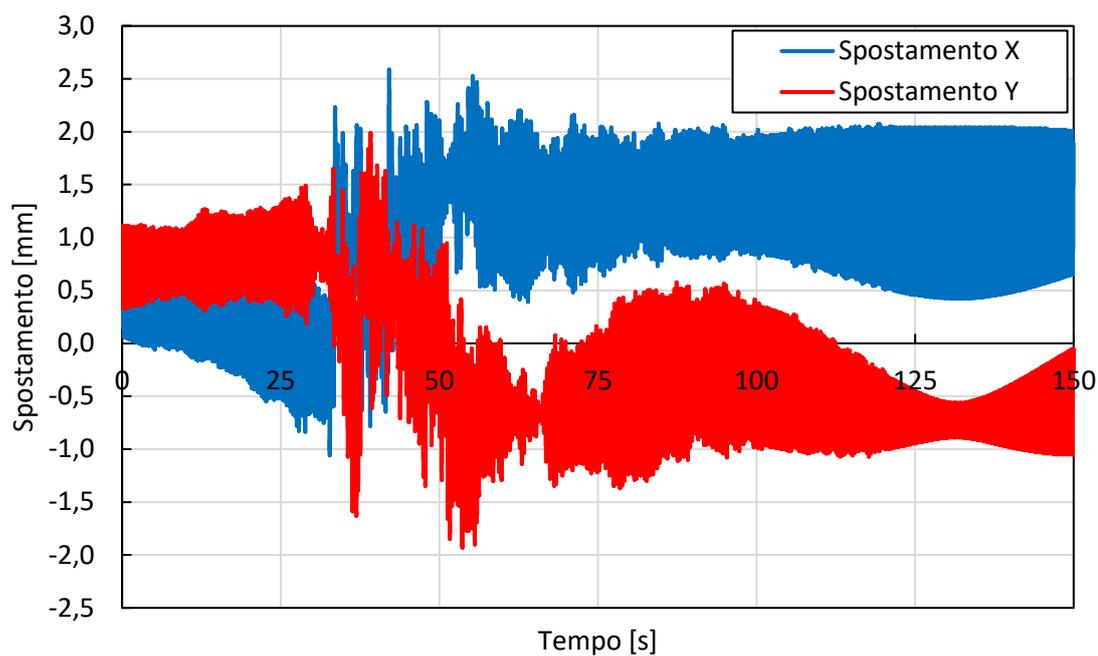


6.3.2.6 Ordine temporale

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.

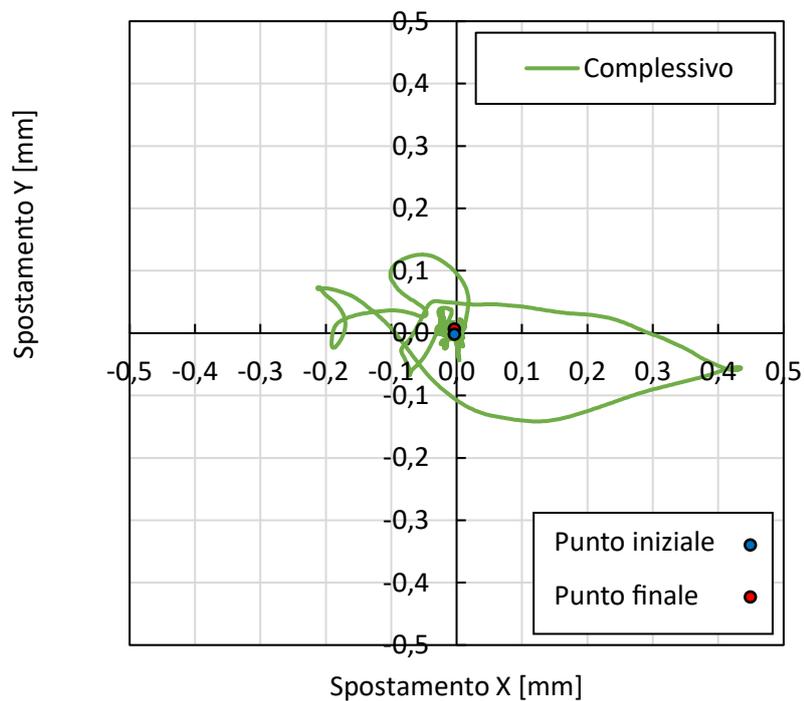
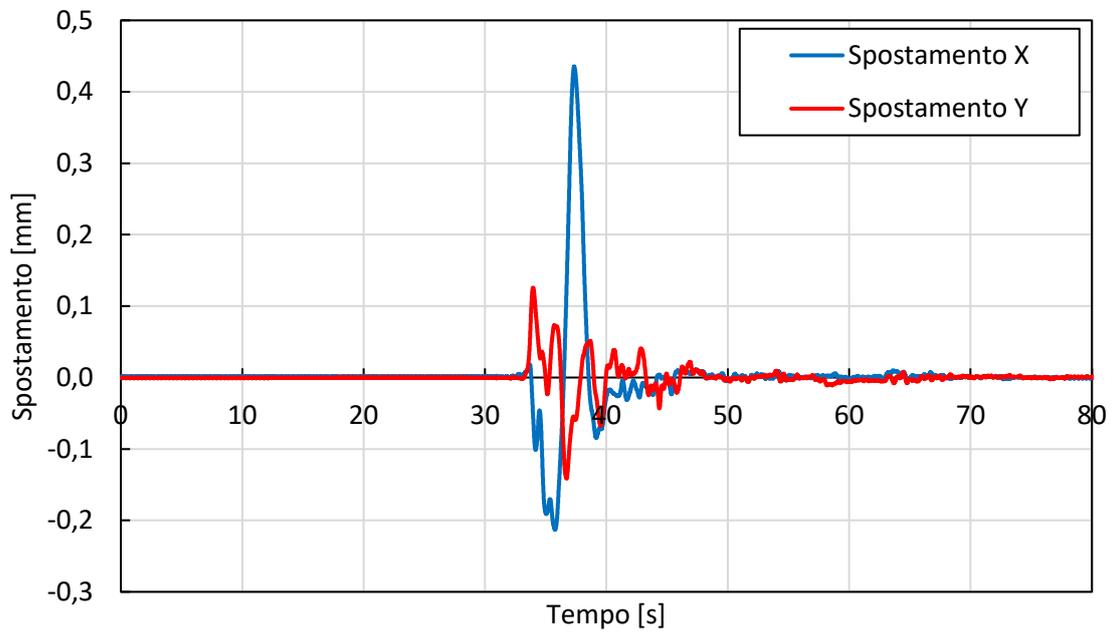
Come già detto al capitolo §5.3.2.6 per l'ospedale di Adana, l'ordine temporale in cui si sono susseguiti i vari sismi è: per primo quello con magnitudo 7.8, poi il 6.6 e per ultimo il 7.5.

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 CON DOPPIO PENDOLO ADATTIVO

7.1 Introduzione

In questo capitolo si vanno ad analizzare diverse soluzioni per l'isolamento sismico per un edificio la cui struttura è la stessa dell'ospedale di Adana descritto in precedenza al capitolo §5. Si va a supporre che il sisma di progetto per il caso in esame sia il sisma di magnitudo 7.8 registrato dalla stazione 4615. Questa scelta è stata fatta andando a verificare, tramite un confronto tra spettri, quale tra i sismi registrati nelle stazioni più vicine all'epicentro fosse più forte per range di periodo alti, ossia quelli che interessano le strutture con isolamento sismico.

Il sisma scelto sarà quindi il sisma di progetto MCE, mentre per ricavare il corrispondente DBE si va a dividere per il valore 1,5.

Per quanto riguarda il sistema di isolamento, risulta chiaro in partenza che gli isolatori installati per l'ospedale di Adana non abbiano una capacità sufficiente a sostenere un evento di questa entità. Si adotta quindi una soluzione di partenza con isolatori scorrevoli a doppio pendolo con coefficiente di attrito dell'8% e raggio di curvatura di 5 metri. Una volta calcolati gli spostamenti della struttura sottoposta al sisma di progetto MCE, si cercano delle soluzioni alternative che restituiscano gli stessi valori in termini di risultante massima per le due direzioni X e Y di spostamento. In particolare si andranno ad utilizzare degli isolatori a doppio pendolo adattivo, ossia con superfici scorrevoli aventi diversi valori di attrito e raggio di curvatura, e si valuterà come variano questi parametri in funzione dello spostamento massimo che è stato precedentemente fissato. Inizialmente viene fatta un'analisi con un modello semplificato a 1 grado di libertà in modo da facilitare la scelta dei parametri. Una volta fatto ciò si può passare al modello completo, dove, dopo aver controllato che i risultati ottenuti con il modello semplificato siano coerenti con quelli del modello completo, avendo anche uno sviluppo in altezza della sovrastruttura si possono valutare drift e 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 questa registrazione 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.

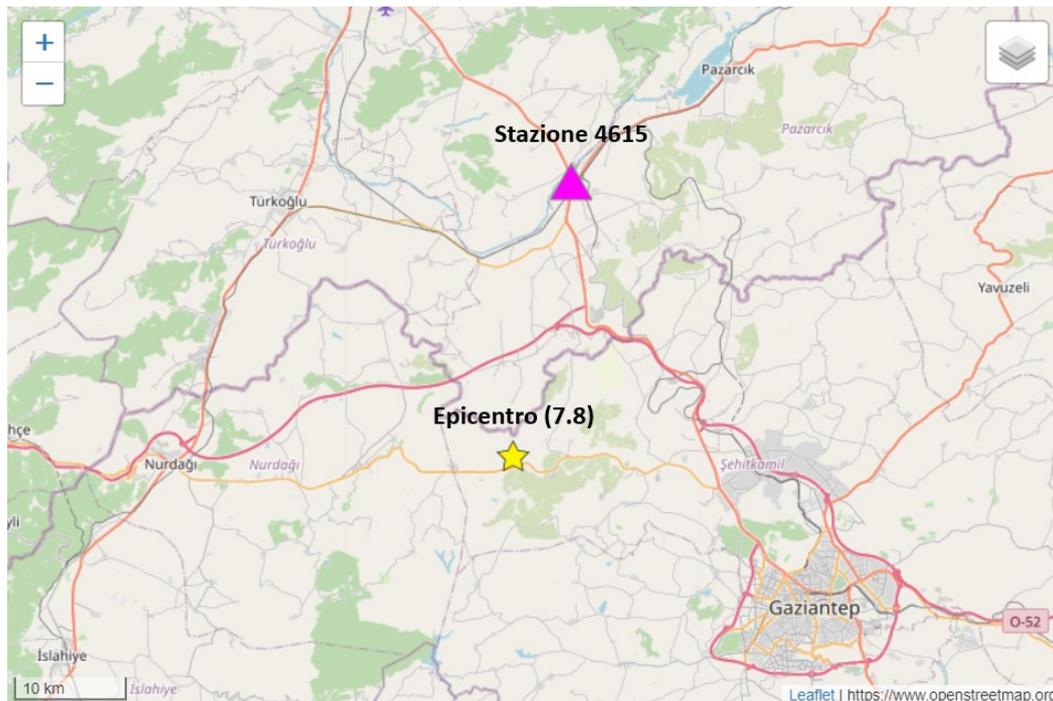
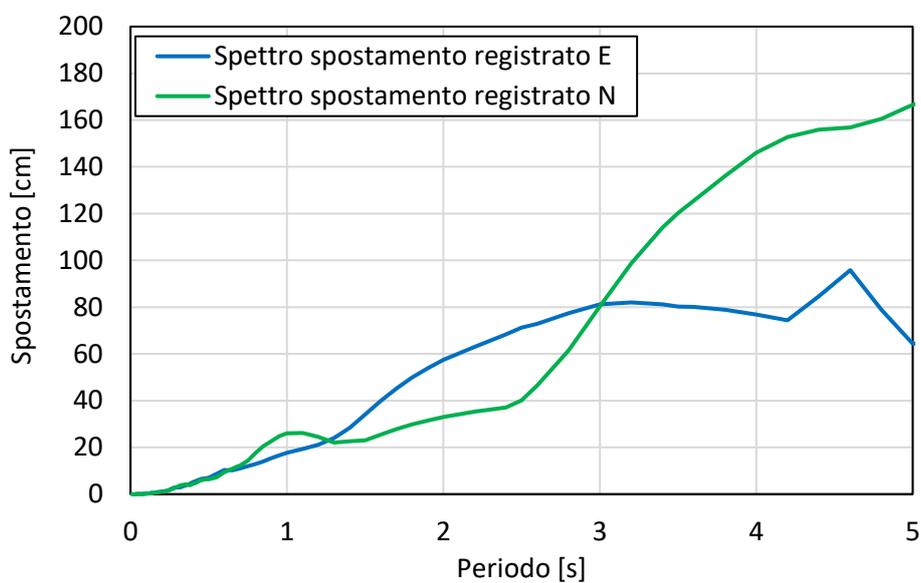
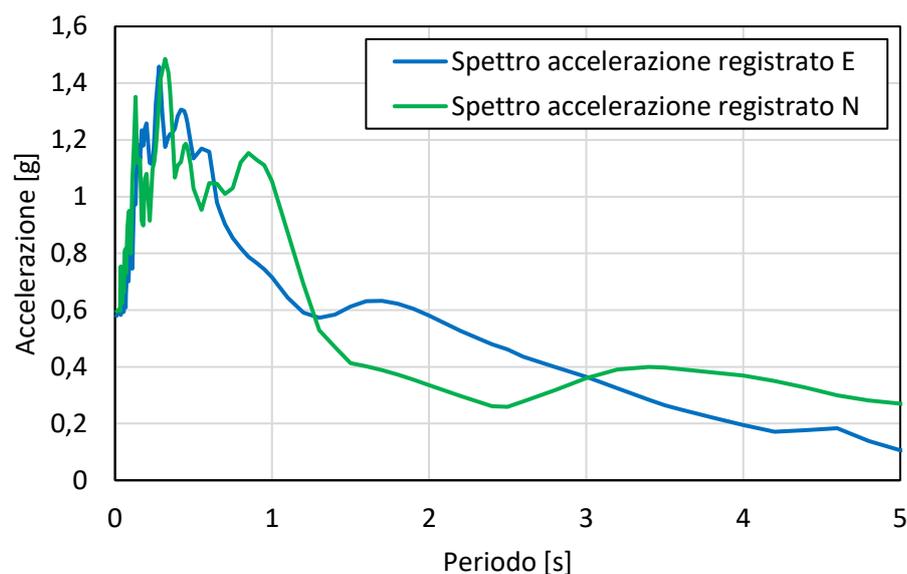


Figura 7-1: inquadramento geografico stazione 4615.

I dati relativi a questo sisma sono stati ricavati dal 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 il Turkish National Strong Motion Network (TNSMN). Il sisma registrato da questa stazione è il più forte registrato il giorno 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 gli spettri del sisma percepito nella stazione 4615 situata a circa 25 chilometri dall'epicentro. Come spiegato nell'introduzione, gli spettri di questo sisma saranno utilizzati per valutare diverse opzioni di miglioramento del sistema di isolamento sismico. Come si può notare dai grafici, la domanda in accelerazione ed in spostamento per periodi alti è maggiore a tutti i casi visti in precedenza, dove gli spettri erano quelli dei sismi registrati nelle stazioni più vicine agli ospedali analizzati.

7.3 Modello semplificato a 1 gdl

Anche in questo caso viene creato un modello semplificato con il software di calcolo SAP2000 per facilitare la scelta dei parametri del doppio pendolo adattivo e avere una stima della risposta dell'edificio. Questa cosa la si può fare dato che è già stata verificata l'affidabilità del modello semplificato per l'ospedale di Adana.

Dal momento che le caratteristiche della struttura sono identiche a quelle dell'ospedale di Adana, il modello semplificato a 1 gdl risulta avere le stesse caratteristiche descritte al capitolo §5.3.1. Ciò che però adesso cambia è il tipo di elemento utilizzato per rappresentare il sistema di isolamento, il quale è sempre un elemento link ma di tipo "Triple Pendulum" e non più "Friction Isolator".

7.3.1 Modellazione degli isolatori

Per la modellazione del doppio pendolo con comportamento adattivo avente le due superfici curve con diversi valori di coefficiente di attrito e raggio di curvatura, essendo che su SAP2000 non è implementato questo tipo di elemento, si utilizza il link di tipo "Triple Pendulum". Questo tipo di link rappresenta il comportamento di un'altra categoria di pendoli scorrevoli, ossia i tripli pendoli. Questo tipo di dispositivo è formato da quattro superfici curve, due interne e due esterne, che, come avviene per il doppio pendolo adattivo, si attivano in sequenza a seconda dell'entità della sollecitazione sul sistema di isolamento.

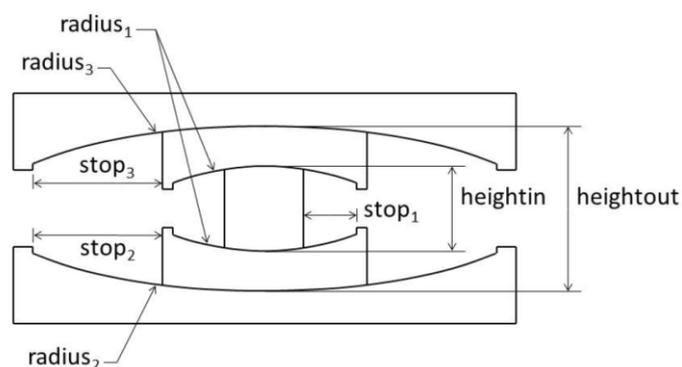


Figura 7-2: elemento "Triple Pendulum"

Il funzionamento di questo tipo di elemento è molto simile a quello descritto al capitolo §4.2.2 per il doppio pendolo adattivo. La differenza, come si nota anche dalla figura 7-2, è

che appunto le superfici di scorrimento non sono più 2, ma 4. Dunque lo scorrimento di ogni superficie si attiva quando la forza sollecitante raggiunge il valore $F_{fi} = \mu_i N_{sd}$, ossia la forza di attivazione della superficie i-esima.

Nel nostro caso, essendo che si vuole utilizzare questo tipo di elemento per rappresentare un doppio pendolo adattivo, si assegnano nel campo dei parametri delle due superfici interne dei valori molto alti al coefficiente di attrito ($\mu = 1000\%$) e dei valori molto bassi al raggio di curvatura e alla distanza di arresto ($R = 0,001m, d_1 = 0,001m$). In questo modo si va a bloccare lo scorrimento sulle due superfici interne e l'elemento risulta avere un comportamento di un doppio pendolo adattivo.

Link/Support Directional Properties					
Identification					
Property Name	isolatore		Type	Triple Pendulum	
Direction	U2; U3		NonLinear	Yes	
Linear Properties					
Effective Stiffness - U2	0,		Effective Stiffness - U3	0,	
Effective Damping - U2	0,		Effective Damping - U3	0,	
Shear Deformation Location					
Distance from End-J - U2	0,		Distance from End-J - U3	0,	
Height and Symmetry of Sliding Surfaces					
Height for Outer Surface	0,		<input type="checkbox"/> Outer Bottom Surface is Symmetric to Outer Top Surface		
Height for Inner Surface	0,		<input checked="" type="checkbox"/> Inner Bottom Surface is Symmetric to Inner Top Surface		
Nonlinear Properties for Directions U2 and U3					
	Outer Top	Outer Bottom	Inner Top	Inner Bottom	
Stiffness	0,	0,	0,	0,	
Friction Coefficient, Slow	0,	0,	10,	10,	
Friction Coefficient, Fast	0,	0,	10,	10,	
Rate Parameter	0,	0,	0,	0,	
Radius of Sliding Surface	0,	0,	1,000E-03	1,000E-03	
Stop Distance	0,	0,	1,000E-03	1,000E-03	

Figura 7-3: valori dei parametri delle due superfici interne del link triple pendulum.

Per quanto riguarda l'effective stiffness e il valore della rigidezza per la parte non lineare, sono ricavati nello stesso modo del *friction isolator*, ossia rispettivamente N_{sd}/R e $N_{sd}\mu_{fast}$. Ciò che condiziona l'analisi parametrica che si va ad effettuare in questo caso studio sono dunque i coefficienti di attrito ed i raggi di curvatura delle due superfici e la *stop distance* della superficie inferiore. Per quanto riguarda la *stop distance* della superficie

superiore sia assume pari a 2 metri, ossia equivale a supporre che non abbia una distanza di arresto.

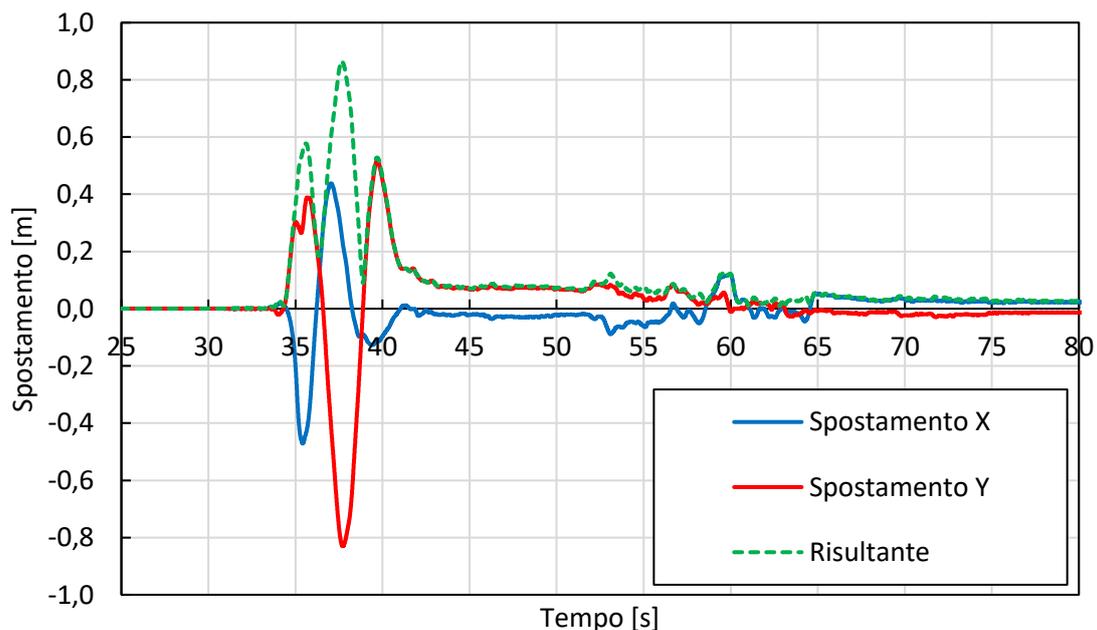
7.3.2 Risultati ottenuti

Si riportano di seguito i risultati dell'analisi parametrica effettuata sul modello semplificato ad un grado di libertà, ottenuti andando a fissare lo spostamento risultante nelle due direzioni X ed Y pari a quello del caso con isolatore a doppio pendolo con coefficiente di attrito dell'8% e raggio di curvatura equivalente di 5 metri.

L'analisi parametrica viene fatta prima fissando i valori dei raggi di curvatura e andando a variare i coefficienti di attrito delle due superfici, e poi, viceversa, tenendo fissi i coefficienti di attrito si variano i valori dei raggi di curvatura. Questo secondo tipo di analisi lo si fa prima per una distanza di arresto della superficie 1 (quella inferiore) pari a $d_1=0,24$ m e poi per $d_1=0,35$ m.

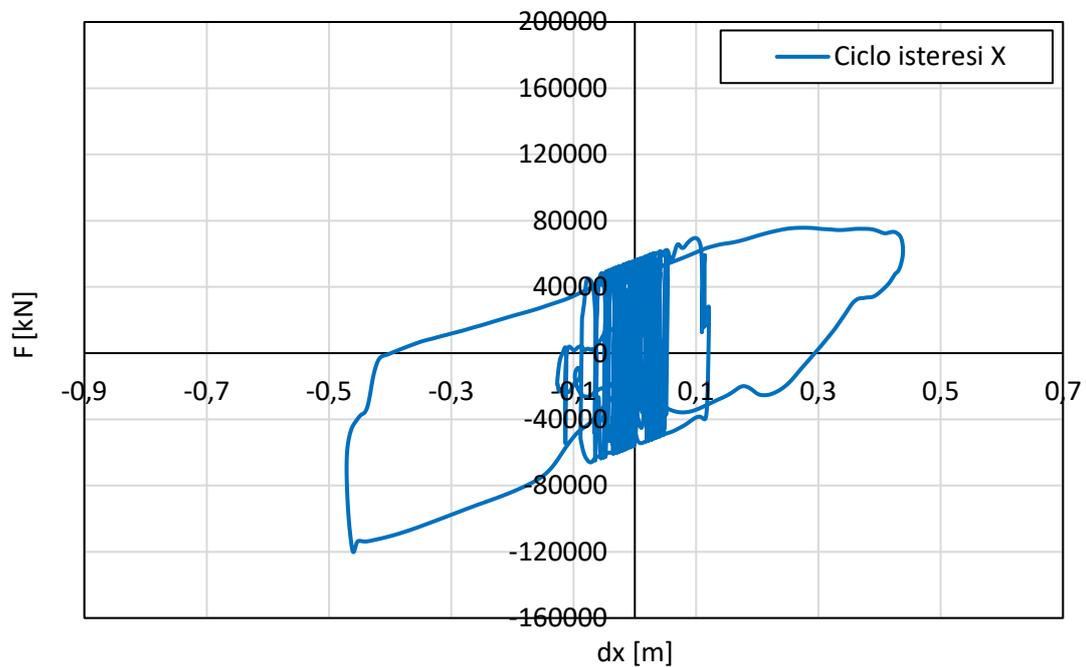
7.3.2.1 Caso base: $\mu=8\%$ e $R=5$ m

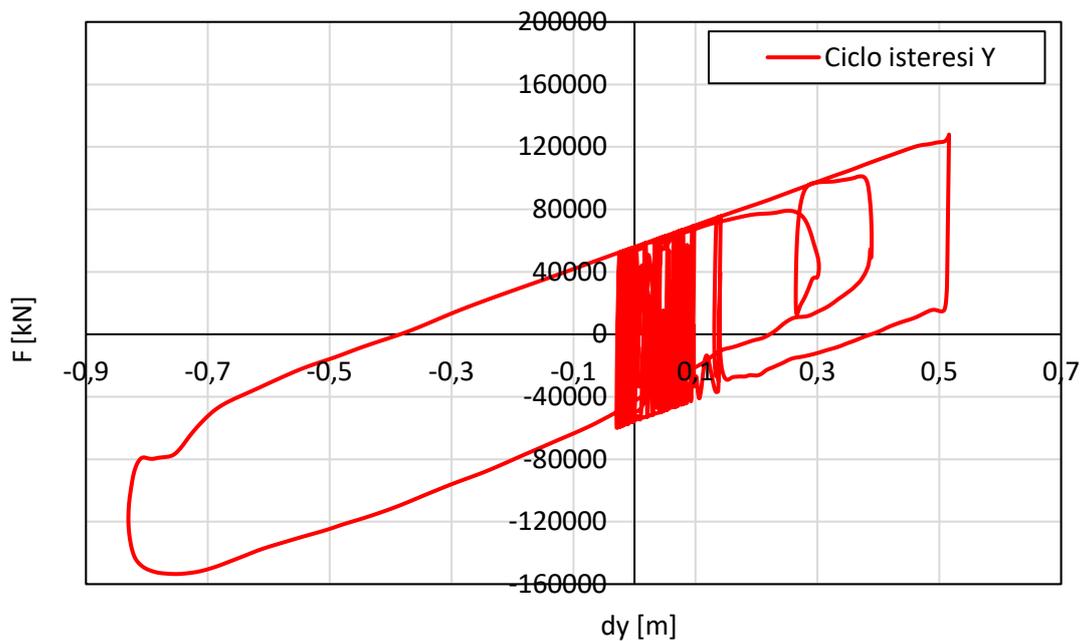
Per questo caso viene utilizzato ancora l'elemento link di tipo friction isolator e quindi il campo di parametri da inserire è lo stesso visto per i casi dell'ospedale di Adana ed Elbistan. Andando ad effettuare un'analisi time history con gli accelerogrammi del sisma di magnitudo 7.8 registrato nella stazione 4615, si registrano i seguenti spostamenti.



Andando a combinare vettorialmente gli spostamenti nelle due direzioni X e Y si ottiene quella che nel grafico è definita come “risultante”. Il valore di spostamento massimo della risultante risulta essere pari a 0,864 metri. Questo valore sarà usato come riferimento per andare ad effettuare l’analisi parametrica per trovare delle soluzioni con lo stesso spostamento massimo utilizzando però il doppio pendolo adattivo come dispositivo di isolamento.

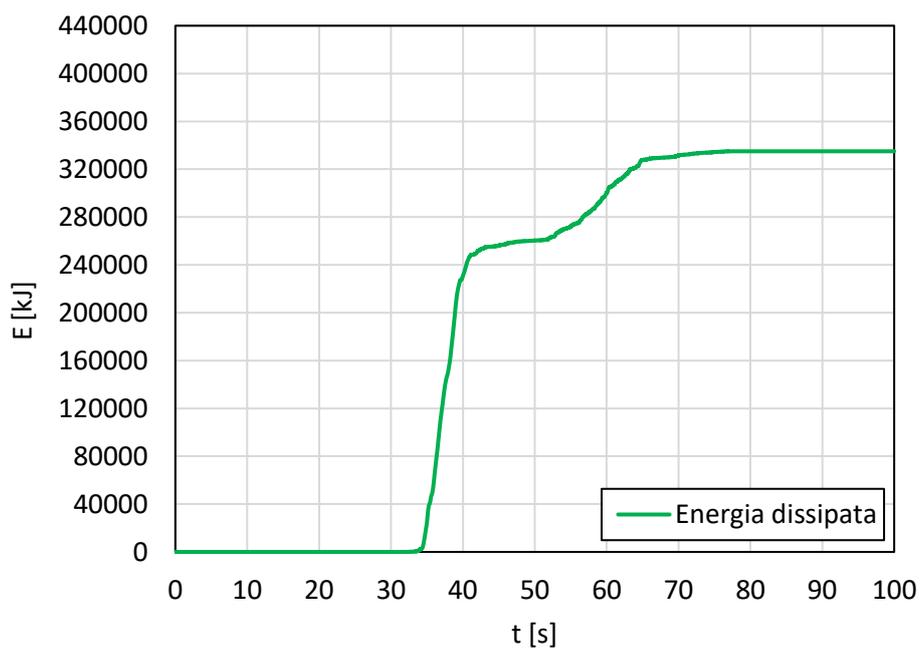
I cicli isteretici ottenuti per questo caso sono di seguito riportati per entrambe le direzioni X e Y.





Si fa notare come in questo, e anche in tutti i casi visti fino ad ora, la pendenza del ciclo è costante e pari a $\frac{N_{sd}}{R}$, mentre vedremo successivamente che per il doppio pendolo adattivo non sarà più così. Inoltre è evidente come il picco che si nota nel grafico tempo-postamento a circa 38 secondi nella direzione Y vada anche ad influenzare il ciclo di isteresi per quella direzione.

Viene anche riportato il grafico dell'energia dissipata nel tempo.

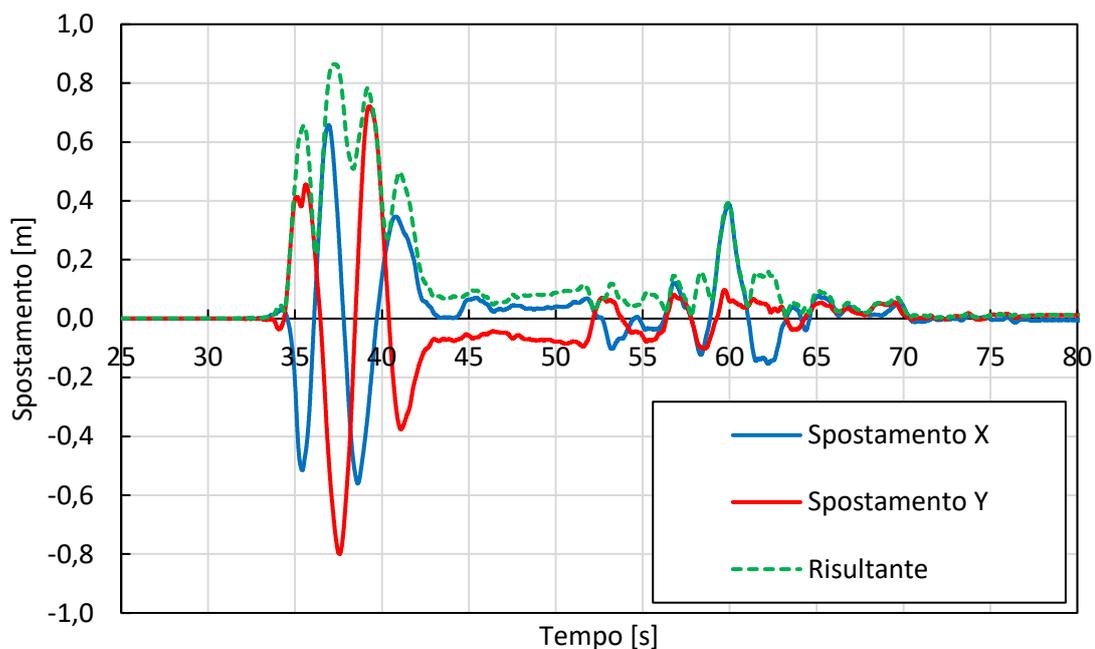


7.3.2.2 Doppio pendolo adattivo: $R_1=4\text{ m}$, $R_2=2,2\text{ m}$ e $d_1=0,24\text{ m}$ costanti

7.3.2.2.1 Parametri variabili: $\mu_1=3,65\%$ e $\mu_2=8\%$

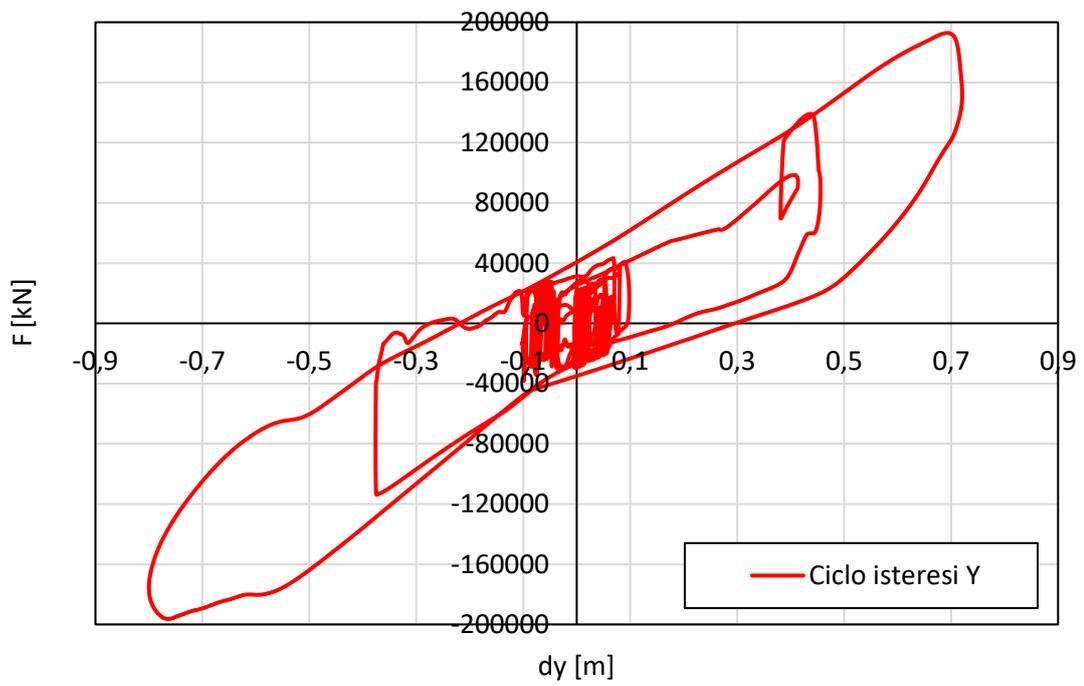
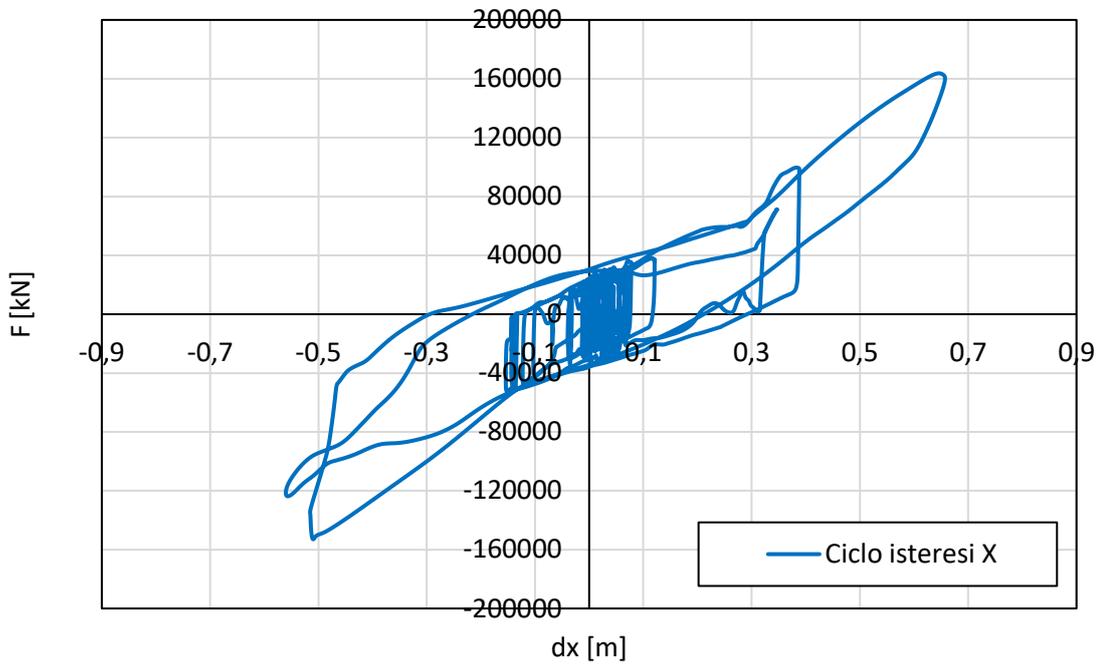
Si va ora ad analizzare i risultati del caso con isolatore a doppio pendolo adattivo avente la superficie di scorrimento 1, ossia quella alla base, avente coefficiente di attrito 3,65%, raggio di curvatura 4 metri e distanza di arresto 0,24 m; la superficie di scorrimento 2, quella alla testa dell'isolatore, ha invece un coefficiente di attrito dell'8% e un raggio di curvatura di 2,2 m. Come detto al paragrafo §7.3.1, la distanza di arresto della superficie 2 è pari a 2 m per tutti i casi che verranno descritti in seguito.

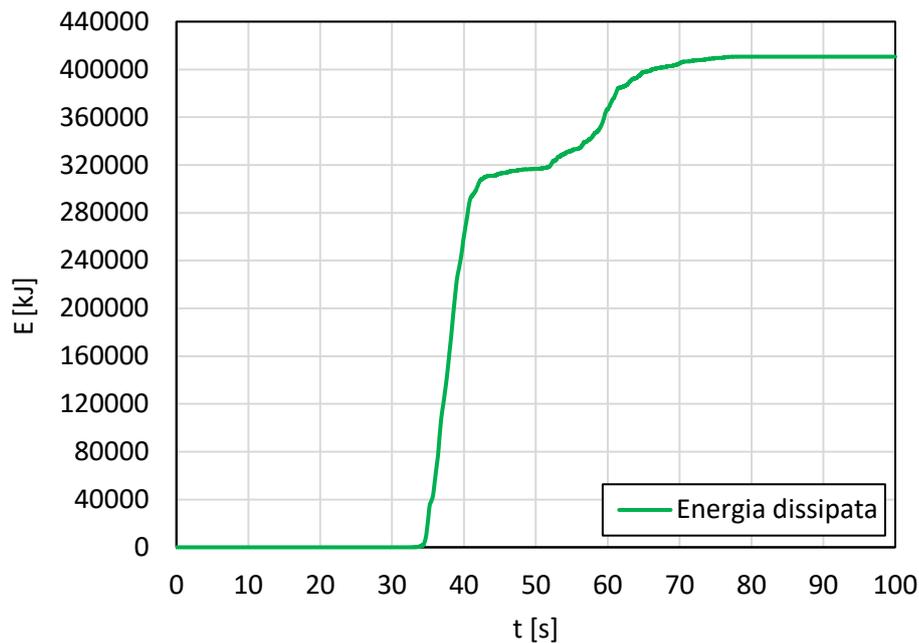
Con queste caratteristiche del dispositivo di isolamento si ottiene il seguente diagramma di spostamento in funzione del tempo.



Come nel caso precedente si nota che a circa 38 secondi nella direzione Y si ha lo spostamento massimo registrato. Si osserva inoltre che per questo caso gli spostamenti nelle due direzioni raggiungono picchi un po' più grandi di quelli del caso precedente.

Si riportano anche i cicli di isteresi nelle due direzioni e l'energia dissipata.



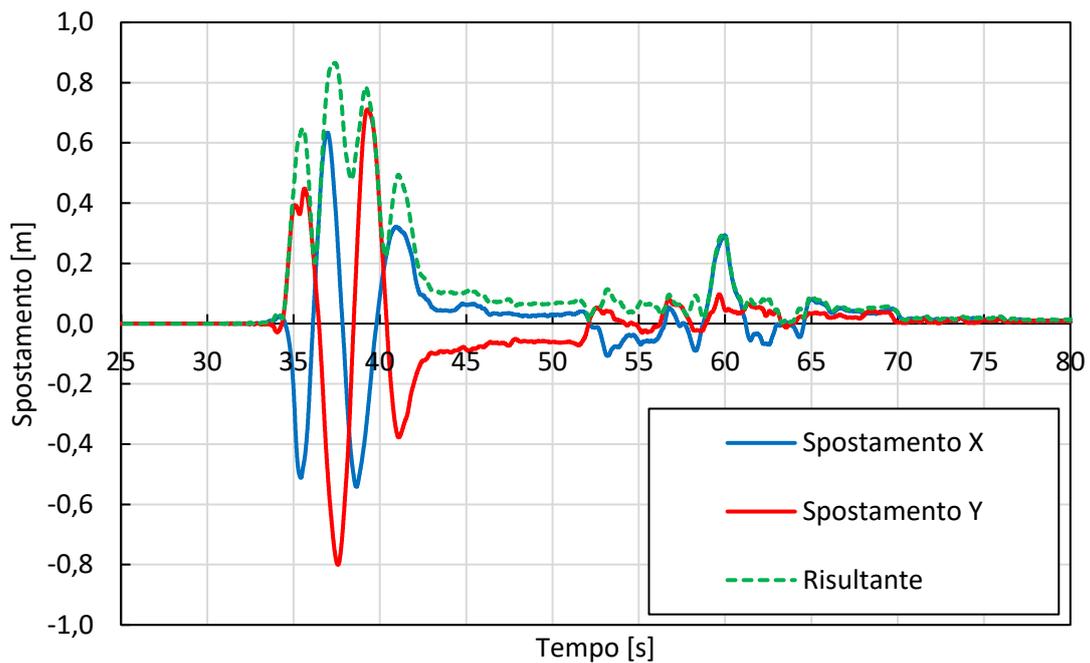


Si vede subito che i cicli di isteresi sono più estesi rispetto al caso base, in particolare quello in direzione X. Infatti essendo che gli spostamenti oscillano tra picchi un po' maggiori, anche la forza di taglio raggiunge valori più elevati e infatti l'energia dissipata è più grande.

7.3.2.2.2 Parametri variabili: $\mu_1=5,1\%$ e $\mu_2=7,1\%$

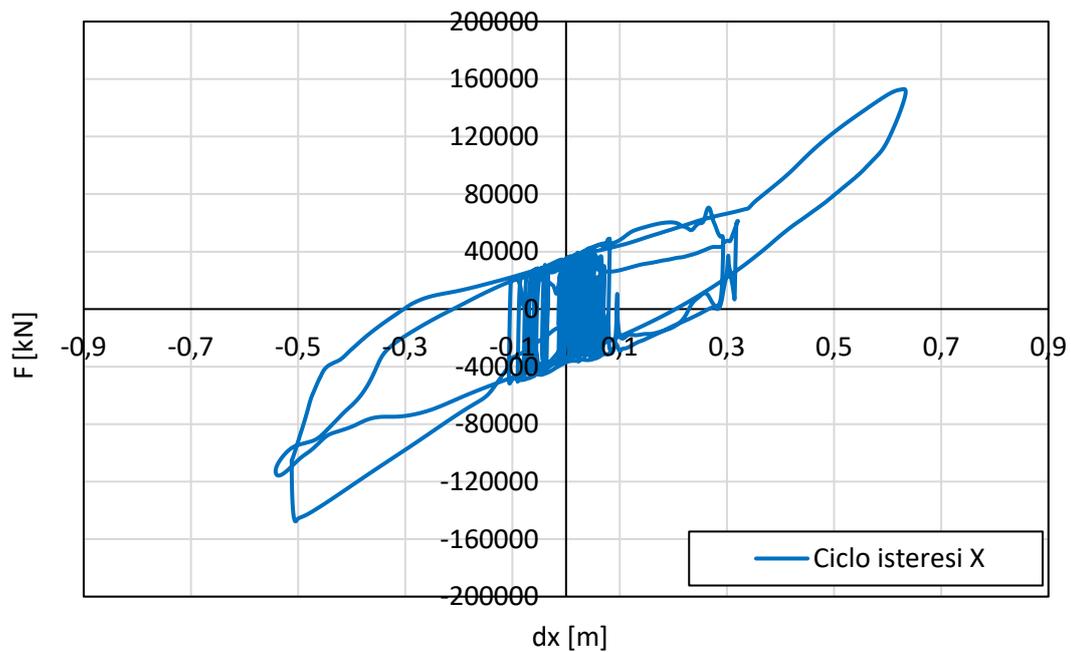
In questo caso si tengono invariati i valori dei due raggi di curvatura, che sono quindi pari a $R_1=4$ m e $R_2=2,2$ m, e la distanza di arresto della superficie 1, $d_1=0,24$ m. Ciò che si fa variare è il valore dei coefficienti di attrito delle due superfici, i quali vengono assunti $\mu_1=5,1\%$ e $\mu_2=7,1\%$.

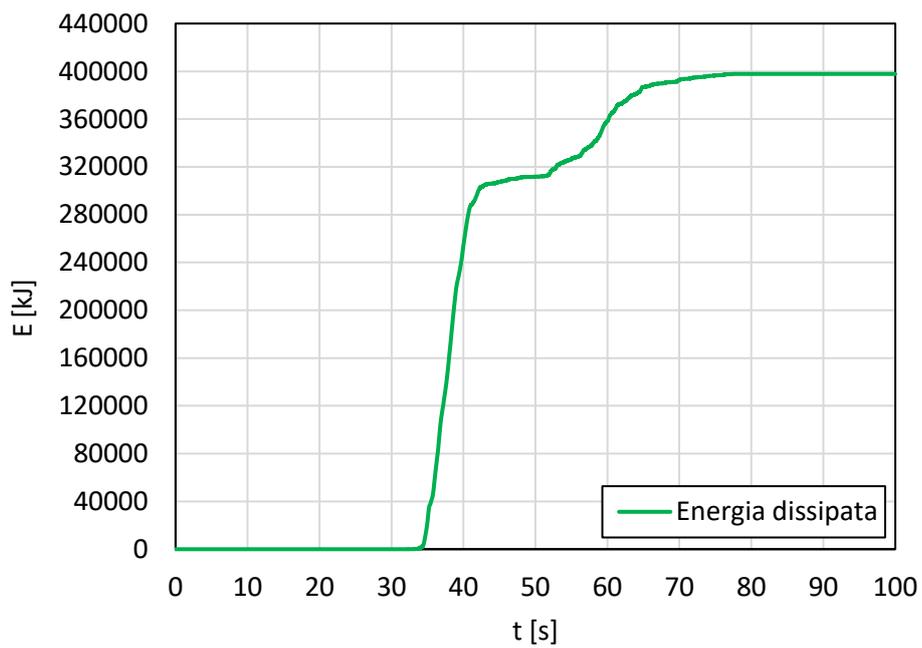
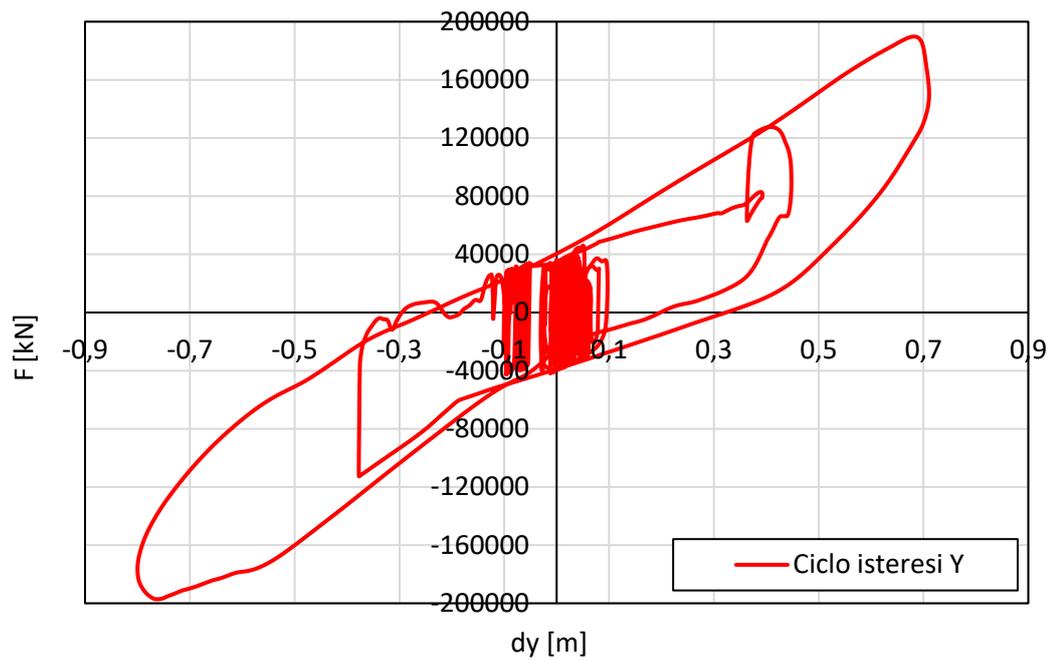
Si riporta ora il grafico che rappresenta l'andamento degli spostamenti in funzione del tempo.



L'andamento dello spostamento nelle due direzioni è molto simile a quello del caso con $\mu_1=3,65\%$ e $\mu_2=8\%$, con la differenza che dopo i 50 secondi le curve hanno dei picchi lievemente più piccoli.

Di seguito si riportano i cicli di isteresi nelle due direzioni e l'energia dissipata in funzione del tempo.





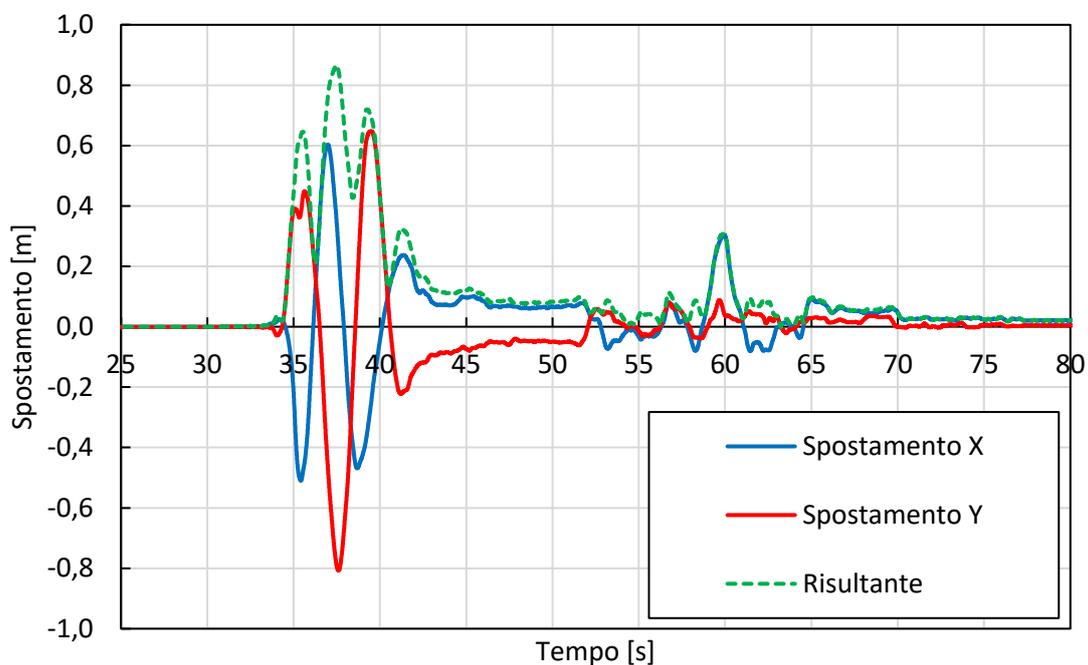
Anche qui gli andamenti sono molto simili al caso del paragrafo precedente, mentre l'energia dissipata risulta di poco inferiore.

7.3.2.3 Doppio pendolo adattivo: $\mu_1=5\%$, $\mu_2=8\%$, $d_1=0,24$ m costanti

7.3.2.3.1 Parametri variabili: $R_1=4$ m e $R_2=2,402$ m

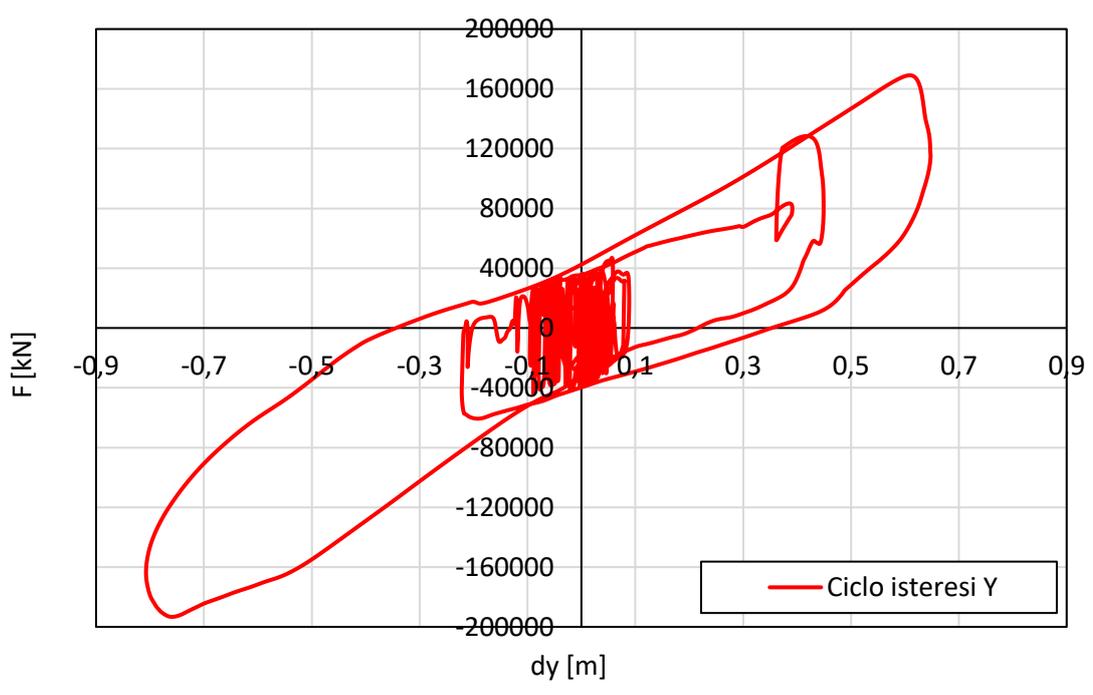
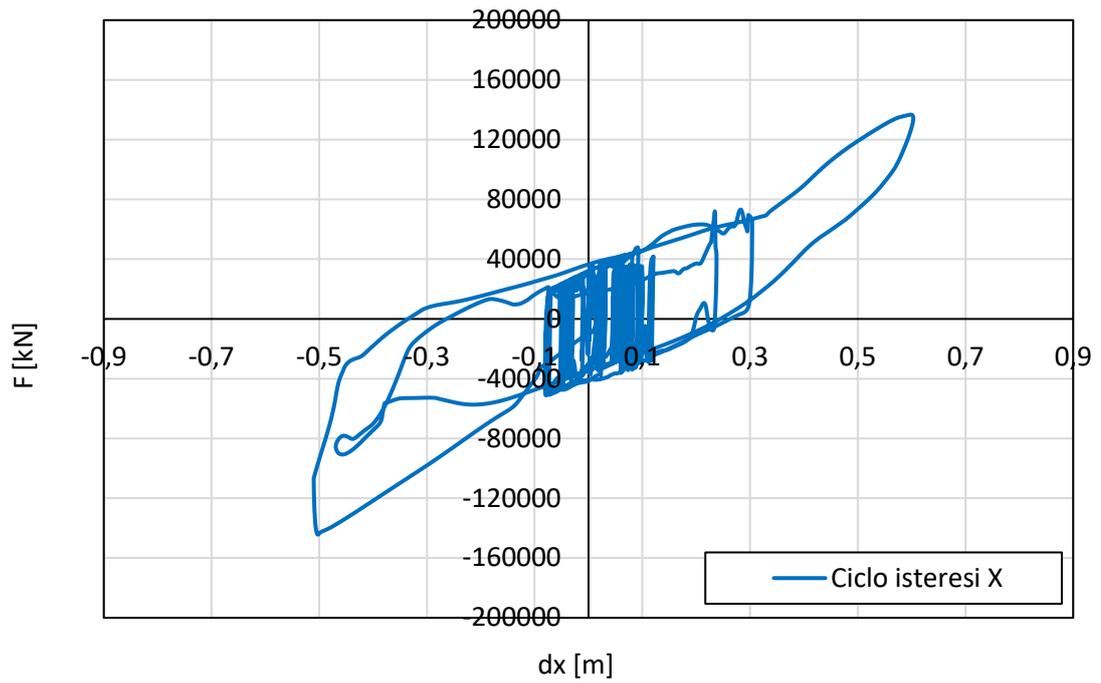
In questo paragrafo e nel successivo si riportano due casi in cui, fissati i valori dei due coefficienti di attrito $\mu_1=5\%$ e $\mu_2=8\%$ e la distanza di arresto $d_1=0,24$ m, si fanno variare i raggi di curvatura delle due superfici.

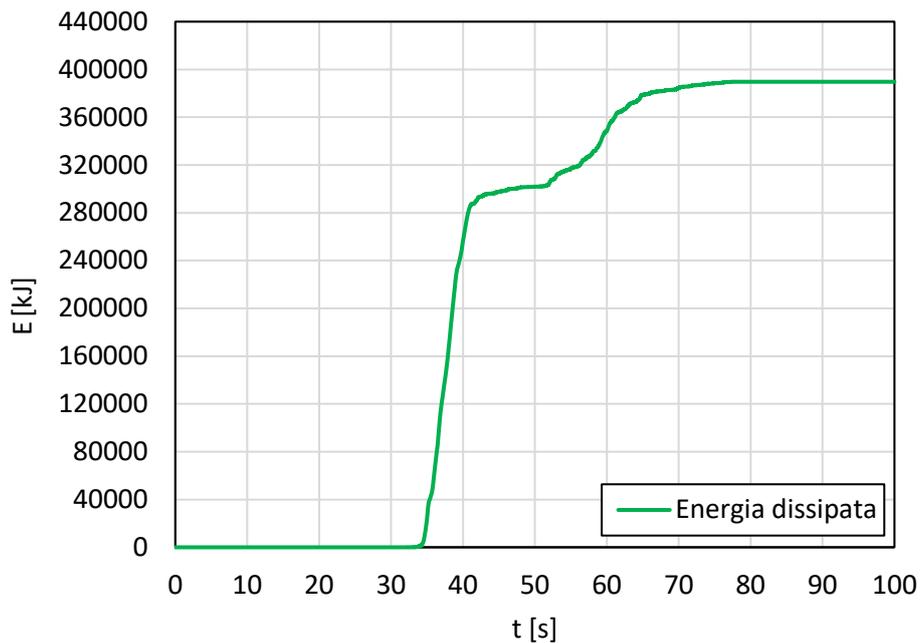
Andando ad assegnare come valori di R_1 ed R_2 rispettivamente 4 m e 2,402 m, si ottiene il seguente grafico tempo-spostamento.



Anche in questo caso l'andamento degli spostamenti nelle due direzioni risulta abbastanza simile ai due casi precedenti in cui si era fissato il raggio di curvatura e fatto variare il coefficiente di attrito.

Per quanto riguarda i cicli di isteresi e l'energia dissipata, i risultati ottenuti sono i seguenti.



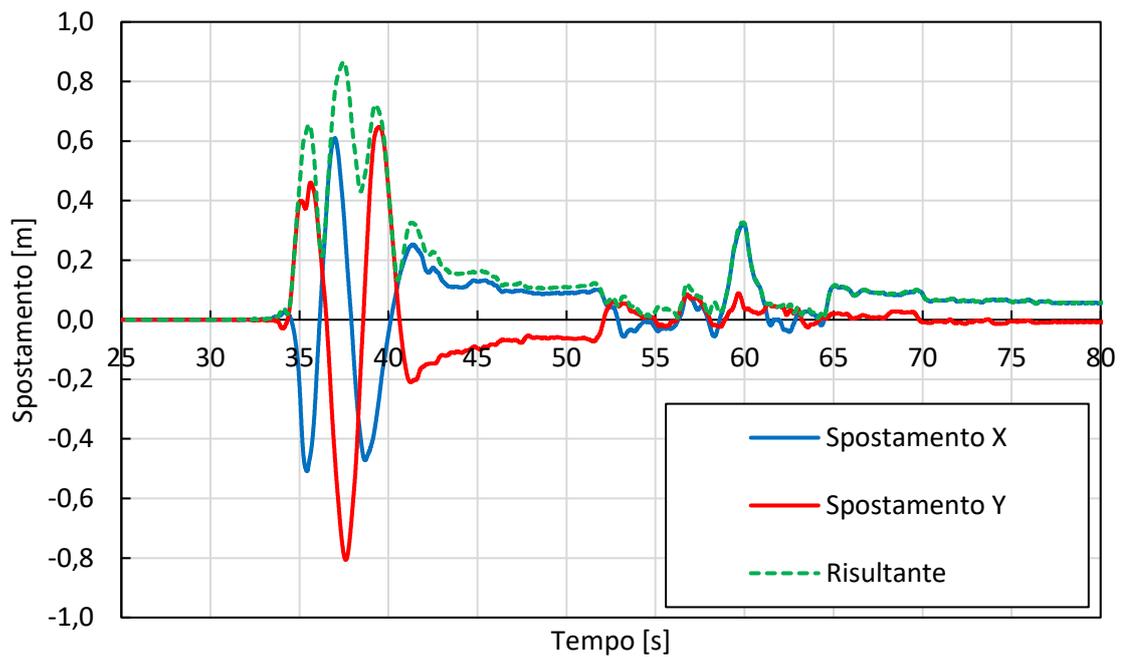


Quanto detto sopra vale anche per questi grafici, infatti gli andamenti sono abbastanza simili e l'energia dissipata risulta di poco inferiore

7.3.2.3.2 Parametri variabili: $R_1=6$ m e $R_2=2,404$ m

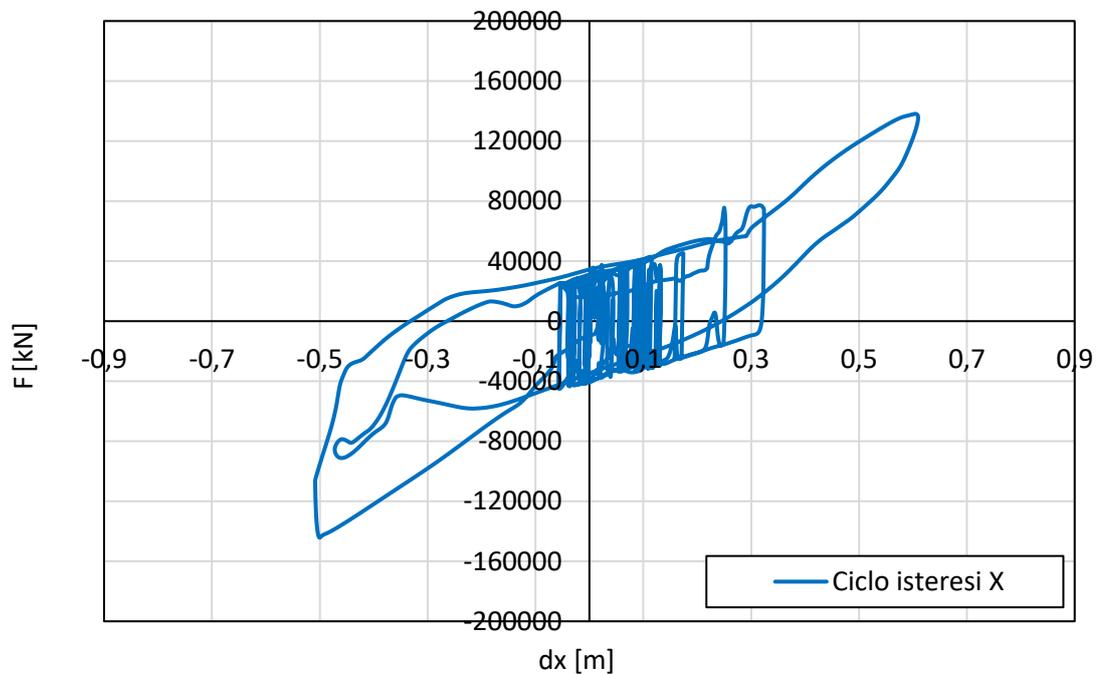
In questo paragrafo il coefficiente di attrito rimane invariato rispetto al caso precedente per entrambe le superfici di scorrimento, mentre i due raggi di curvatura sono $R_1=6$ m ed $R_2=2,404$ m.

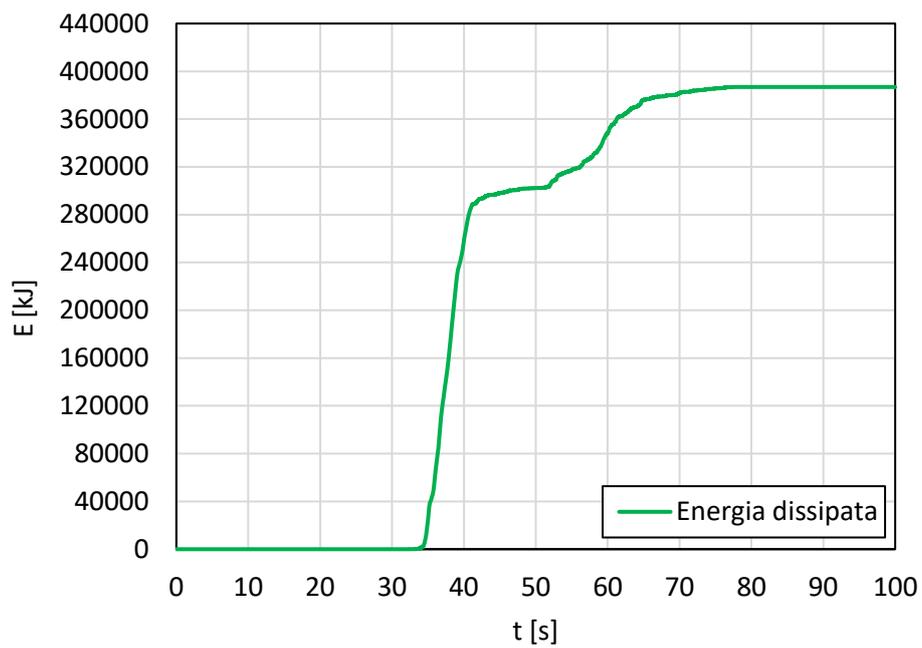
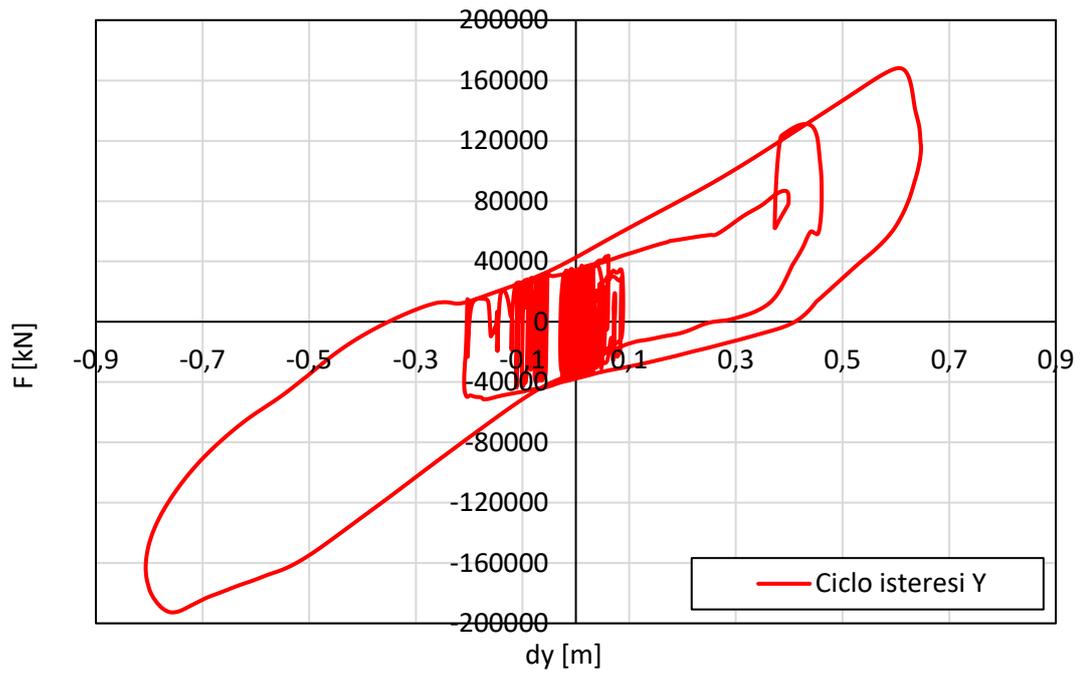
Gli spostamenti nel tempo che si ottengono con un dispositivo di isolamento con questi parametri sono i seguenti.



In questo caso si nota che l'andamento degli spostamenti nelle due direzioni X e Y per i primi 40 secondi è molto simile a ai precedenti, mentre poi le due curve risultano, anche se di poco, più distanti tra di loro.

Si riportano di seguito i cicli di isteresi nelle due direzioni e l'energia dissipata.



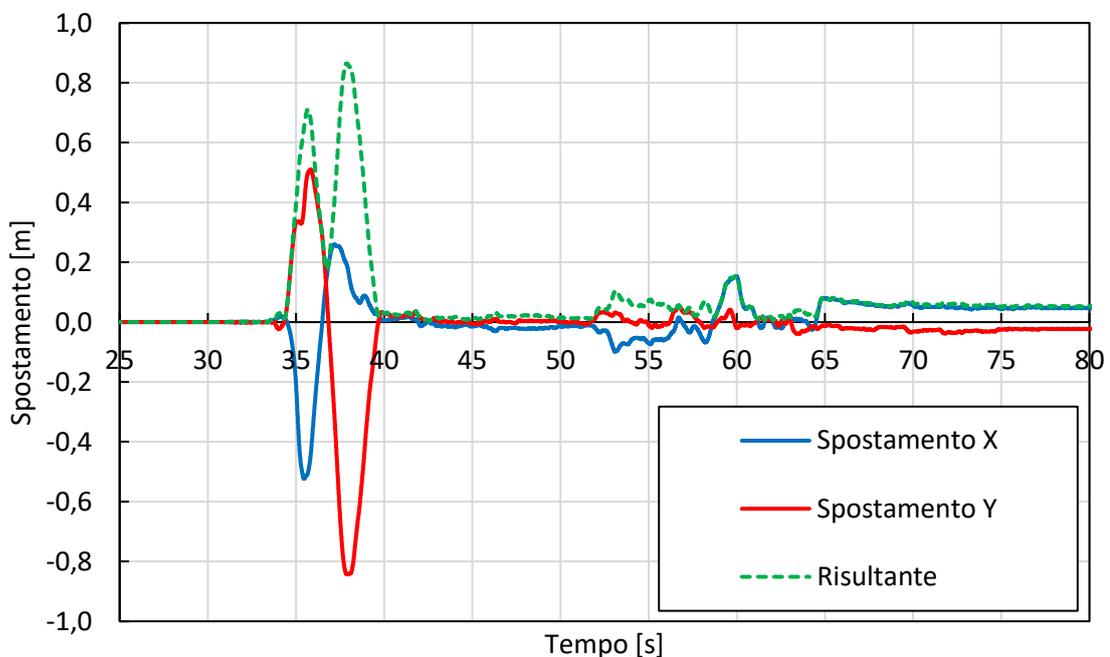


Gli andamenti dei grafici sopra esposti sono molto simili a quelli del caso descritto al paragrafo precedente.

7.3.2.4 Doppio pendolo adattivo: $\mu_1=7,2\%$, $\mu_2=9,4\%$, $d_1=0,35m$ costanti

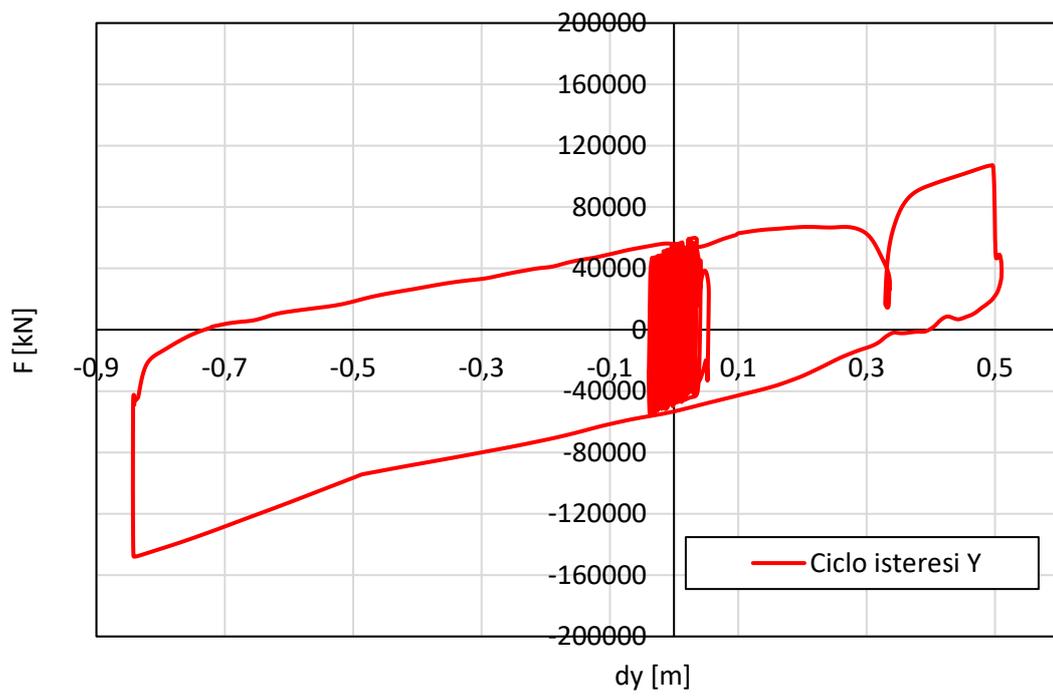
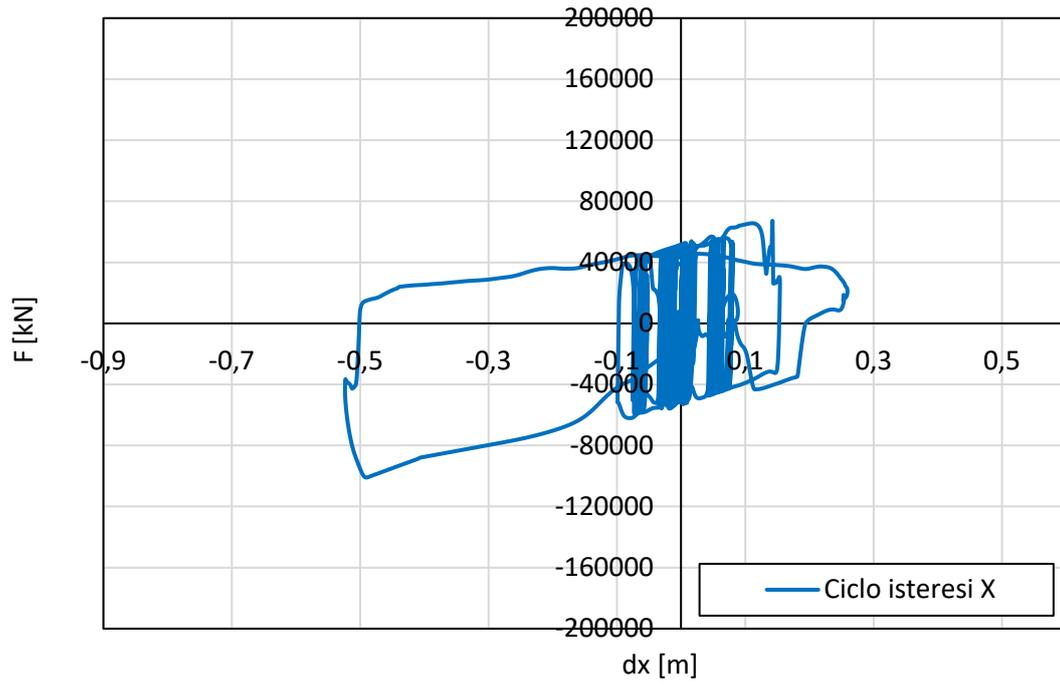
7.3.2.4.1 Parametri variabili: $R_1=4,9$ m e $R_2=4,3$ m

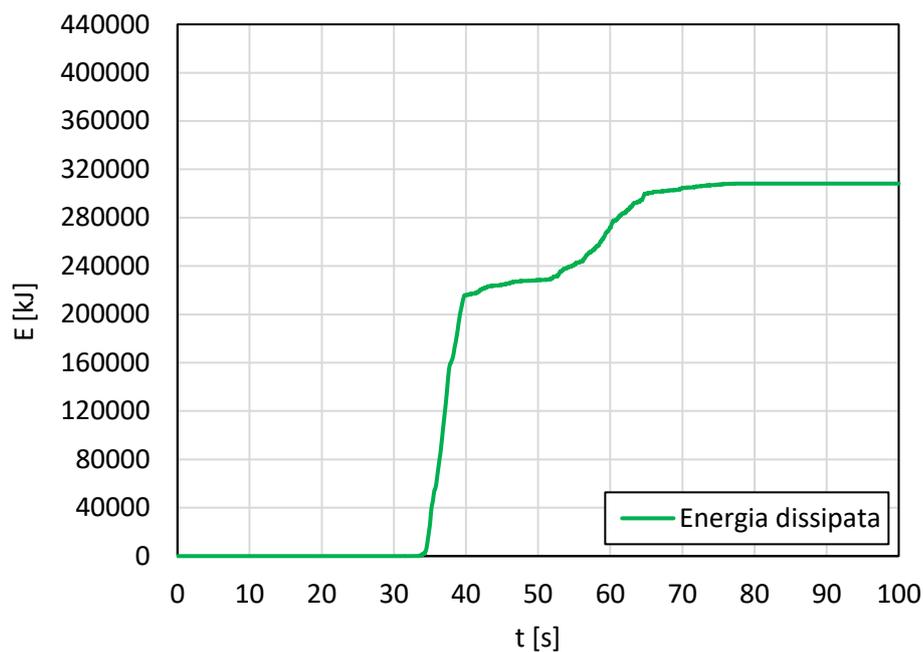
Fin qui è stata utilizzata una distanza di arresto per la superficie 1 pari a 0,24 m, mentre ora si va a variare questo valore e si prende $d_1=0,35$ m. Così facendo si modificano anche tutti gli altri parametri, infatti per ottenere la stessa risultante di spostamento massimo è necessario incrementare anche il coefficiente di attrito, che ora diventa $\mu_1=7,2\%$ e $\mu_2=9,4\%$. Andando ad assegnare dei raggi di curvatura $R_1=4,9$ m e $R_2=4,3$ m si ottiene il seguente grafico tempo-spostamento.



L'andamento delle curve è molto diverso da quello dei casi precedenti, quindi il valore della distanza di arresto influenza notevolmente il comportamento del dispositivo di isolamento. Questo lo si nota anche dai cicli di isteresi, i quali si estendono per un'ampiezza minore e raggiungono dei valori di forza inferiori rispetto ai casi precedenti, infatti anche l'energia dissipata risulta più piccola.

Di seguito si riportano i grafici dei cicli di isteresi nelle due direzioni per il caso in esame e l'energia dissipata in funzione del tempo.

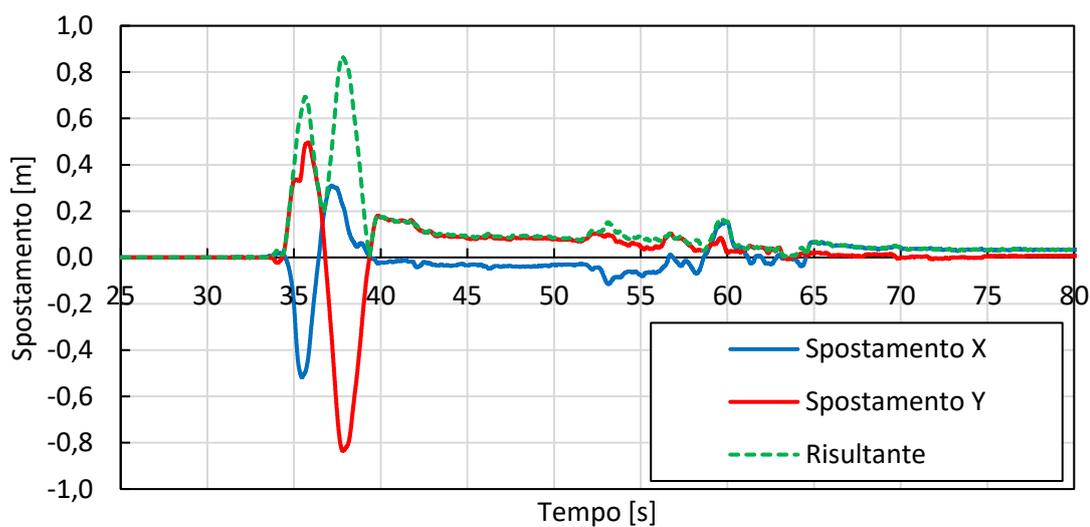




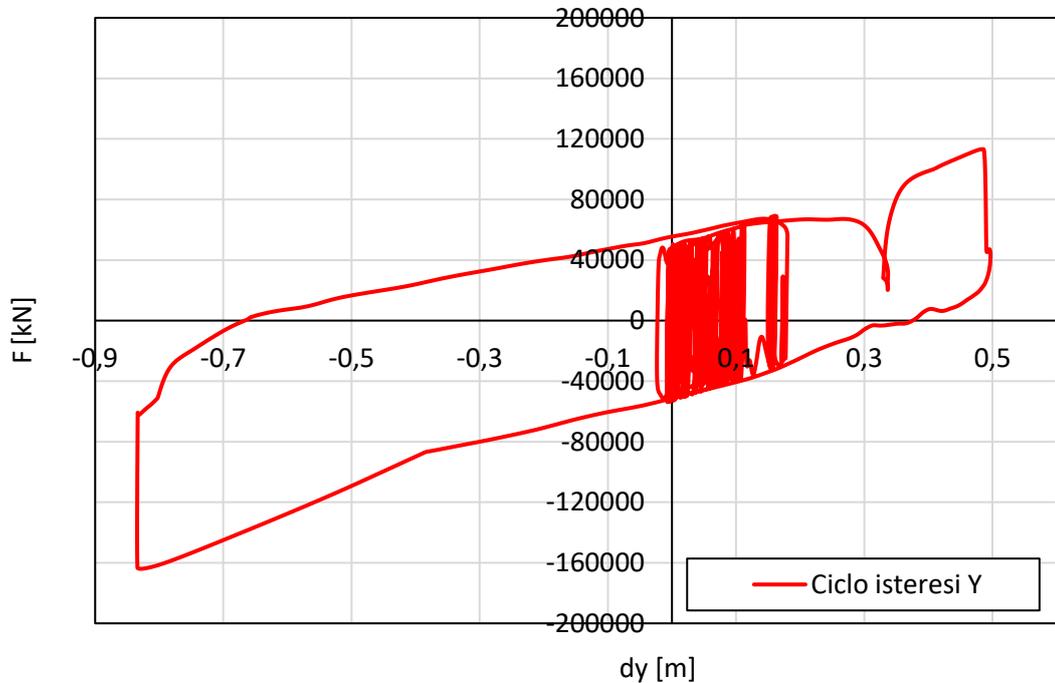
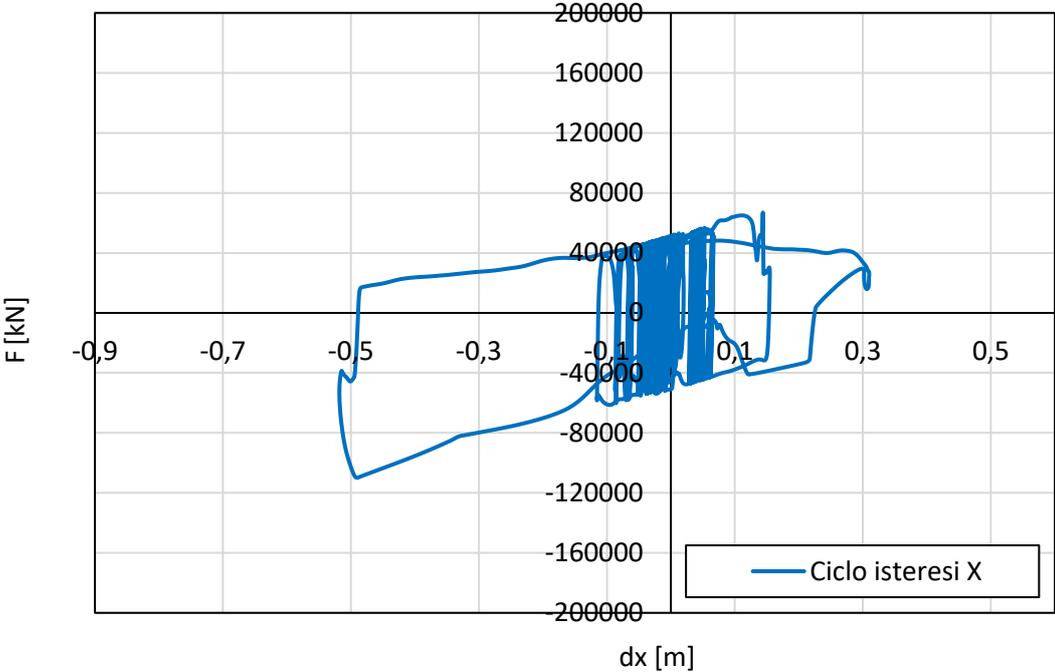
7.3.2.4.2 Parametri variabili: $R_1=5,3$ m e $R_2=3,5$ m

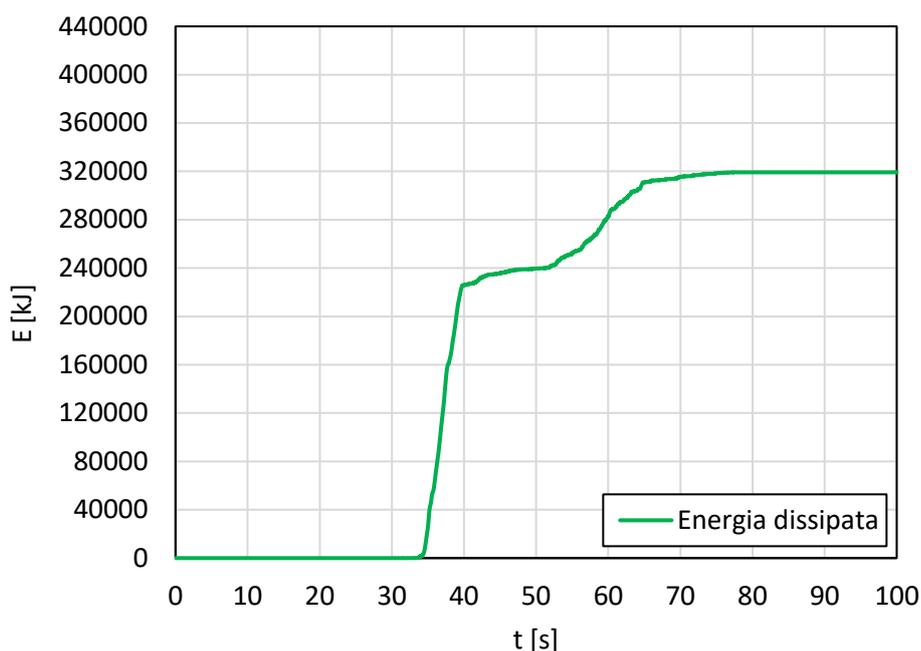
Utilizzando anche qui un valore di distanza di arresto pari a 0,35 m e dei coefficienti di attrito pari a $\mu_1=7,2\%$ e $\mu_2=9,4\%$, si assegnano all'elemento che rappresenta il dispositivo di isolamento dei valori dei raggi di curvatura $R_1=5,3$ m e $R_2=3,5$ m.

L'andamento dello spostamento in funzione del tempo, utilizzando i parametri sopra esposti, è il seguente.



Il grafico ha un andamento molto simile a quello del caso precedente, e quindi differisce di molto dai casi con distanza di arresto della superficie 1 pari a 0,24 m. Lo stesso discorso vale anche per i cicli di isteresi nelle due direzioni e per l'energia dissipata di cui si riportano di seguito i grafici.



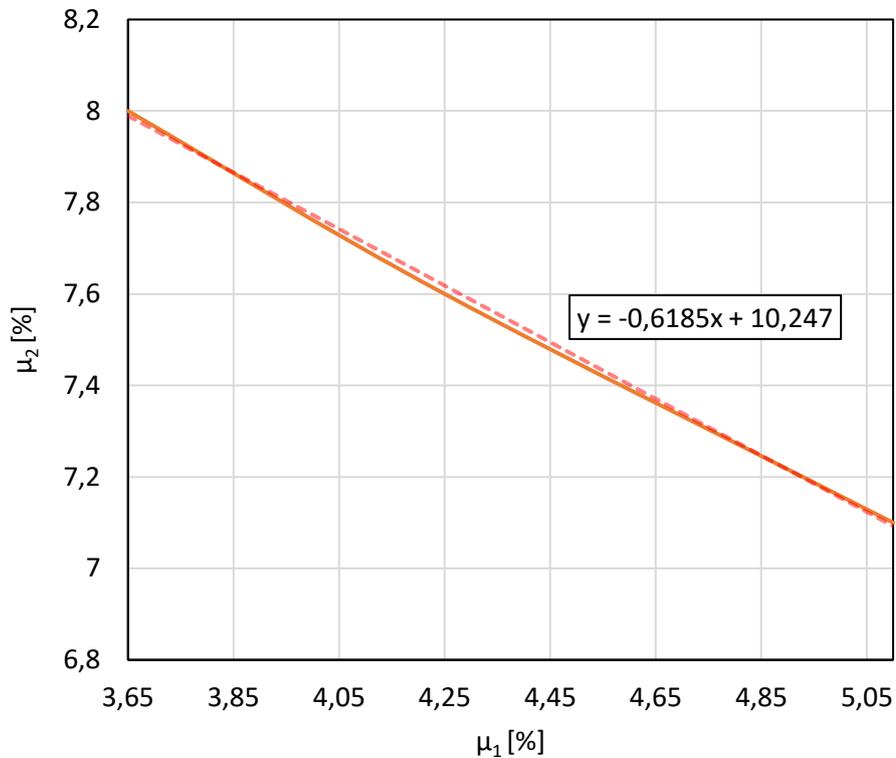


7.3.3 Confronto risultati

Nel capitolo precedente, il §7.3.2, sono stati esposti i risultati di alcuni casi studio che avevano tutti un fattore in comune, ossia la risultante massima di spostamento nelle due direzioni X e Y. Partendo quindi dal valore di partenza $d_{max}=0,864$ m ricavato dal caso base di doppio pendolo con coefficiente di attrito dell'8% e raggio di curvatura equivalente di 5 m, sono stati ricavati dei casi utilizzando il doppio pendolo adattivo come dispositivo di isolamento che restituissero lo stesso valore di spostamento massimo. Per fare ciò è stata eseguita un'analisi parametrica, andando a fissare, a seconda del caso, alcuni parametri fondamentali che governano il comportamento dell'isolatore, e facendone variare altri.

Inizialmente si sono esaminati i casi in cui si sono fissati i raggi di curvatura, $R_1=4$ m e $R_2=2,2$ m, e la distanza di arresto della superficie 1, $d_1=0,24$ m. Così facendo, la curva che si ottiene andando a variare i coefficienti di attrito, sempre in modo da ottenere lo stesso valore di spostamento massimo del caso base, è molto simile ad una retta. Come si nota dal grafico di seguito riportato, andando ad aumentare il valore del coefficiente di attrito della superficie 2 bisogna diminuire quello del coefficiente di attrito della superficie 1 e viceversa. Nella tabella invece sono indicati i tre casi utilizzati per l'interpolazione della curva.

R_1, R_2 costanti, $d_1=0,24$ m

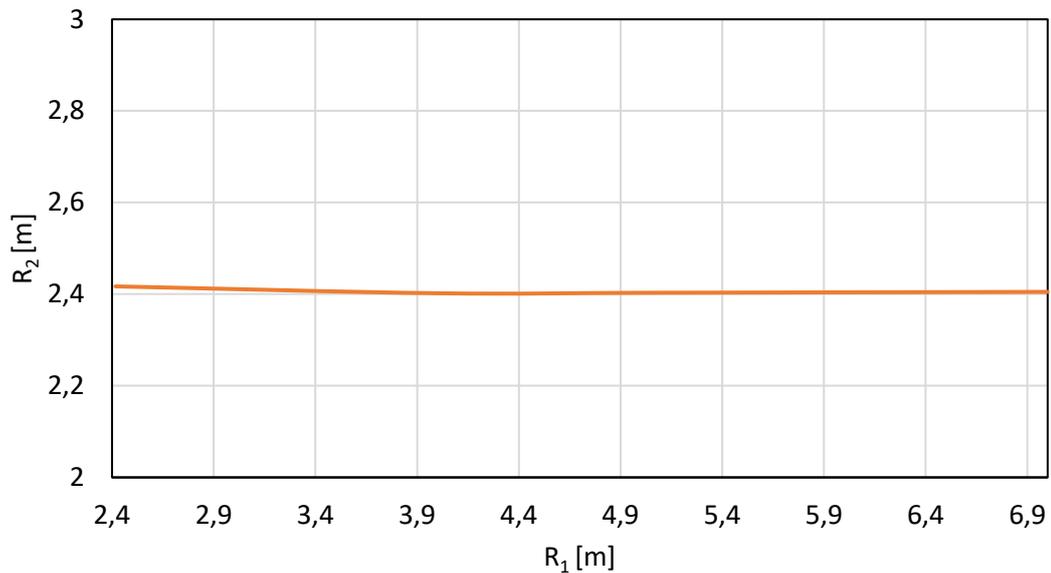


d_1 [m]	μ_1 [%]	μ_2 [%]	R_1 [m]	R_2 [m]	d_{max} [m]
0,24	3,65	8	4	2,2	0,86439
0,24	4,25	7,6	4	2,2	0,864289
0,24	5,1	7,1	4	2,2	0,864464

Una volta analizzato il caso in cui si fanno variare i coefficienti di attrito, si procede con i casi in cui i parametri delle superfici scorrevoli che cambiano sono i raggi di curvatura.

Dunque, fissati $\mu_1=5\%$ e $\mu_2=8\%$ e la distanza di arresto della superficie 1 $d_1=0,24$ m, si osserva il seguente andamento della curva che descrive come variano i due raggi di curvatura per ottenere sempre lo stesso valore di spostamento massimo uguale al caso base.

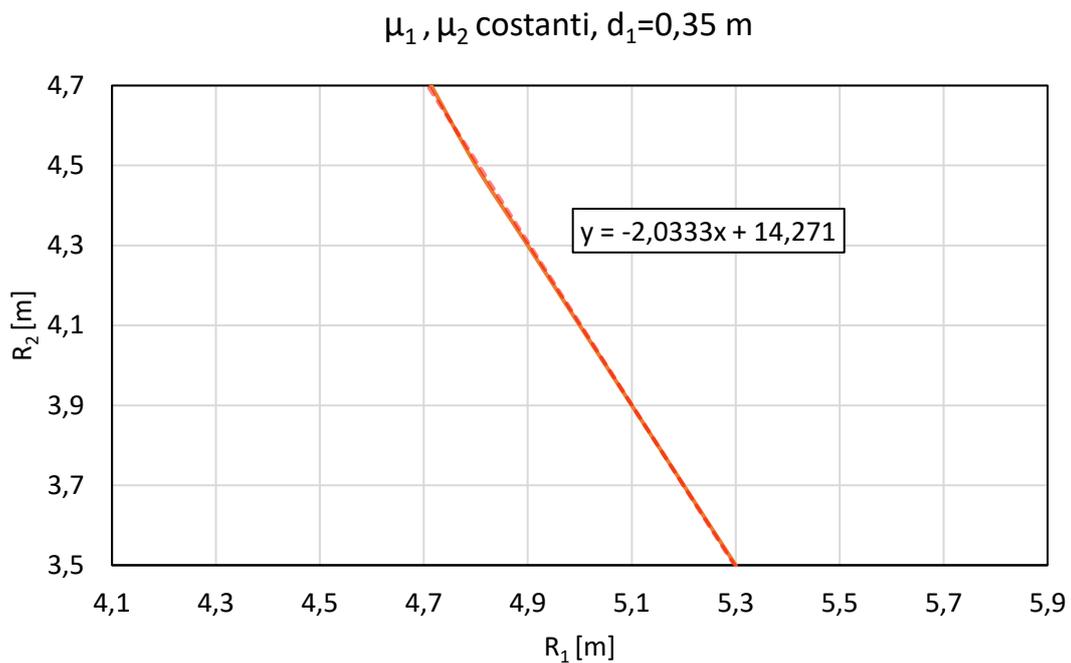
μ_1, μ_2 costanti, $d_1=0,24$ m



d_1 [m]	μ_1 [%]	μ_2 [%]	R_1 [m]	R_2 [m]	d_{max} [m]
0,24	5	8	2,42	2,42	0,864422
0,24	5	8	4	2,4	0,864482
0,24	5	8	5	2,4	0,864583
0,24	5	8	6	2,4	0,864529
0,24	5	8	7	2,41	0,864537

Si nota subito che il comportamento dell'isolatore è indipendente dal raggio della superficie 1. Questo comportamento lo si può giustificare dal fatto che, avendo spostamenti massimi molto alti, il contributo della superficie 1 è molto piccolo in quanto la sua distanza di arresto avviene per spostamenti troppo piccoli rispetto a quelli che vengono raggiunti con questo sisma. Per questo motivo è stato analizzato anche il comportamento del sistema di isolamento andando ad assegnare una distanza di arresto più grande, $d_1=0,35$ m, in modo da avere un comportamento dell'isolatore che sia influenzato da entrambe le superfici di scorrimento.

Utilizzando questo nuovo valore della distanza di arresto della superficie 1 è necessario aumentare un po' i coefficienti di attrito per avere un range di raggi di curvatura verosimile. Prendendo quindi dei coefficienti di attrito delle due superfici scorrevoli pari a $\mu_1=7,2\%$ e $\mu_2=9,4\%$ si ottiene il seguente grafico.

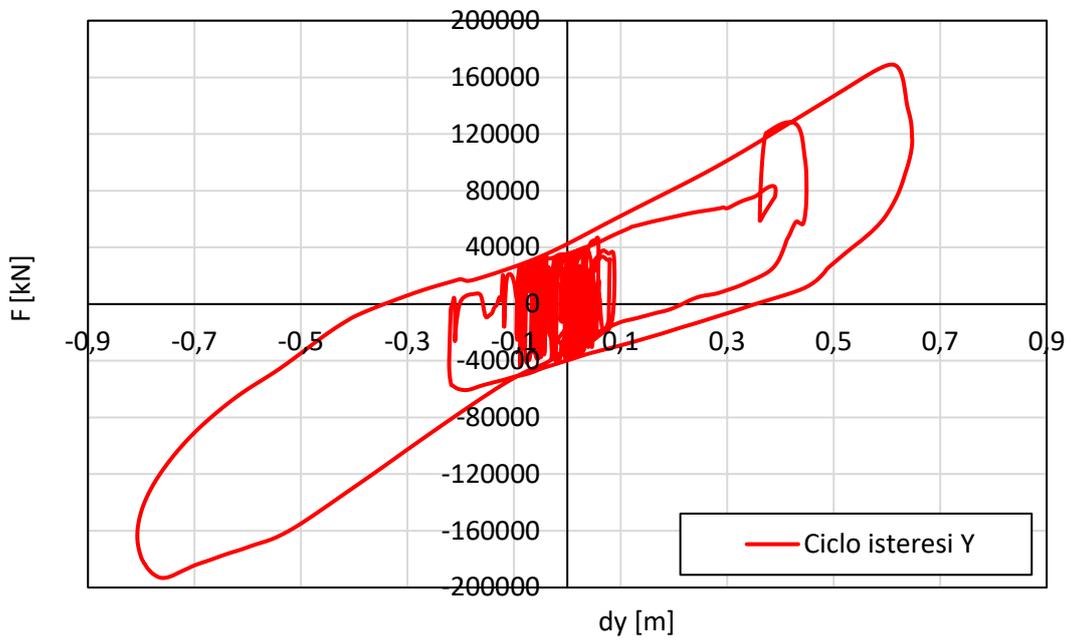


d_1 [m]	μ_1 [%]	μ_2 [%]	R_1 [m]	R_2 [m]	d_{max} [m]
0,35	7,2	9,4	4,71	4,71	0,864682
0,35	7,2	9,4	4,8	4,5	0,864451
0,35	7,2	9,4	4,9	4,3	0,864269
0,35	7,2	9,4	5,1	3,9	0,864645
0,35	7,2	9,4	5,3	3,5	0,864217

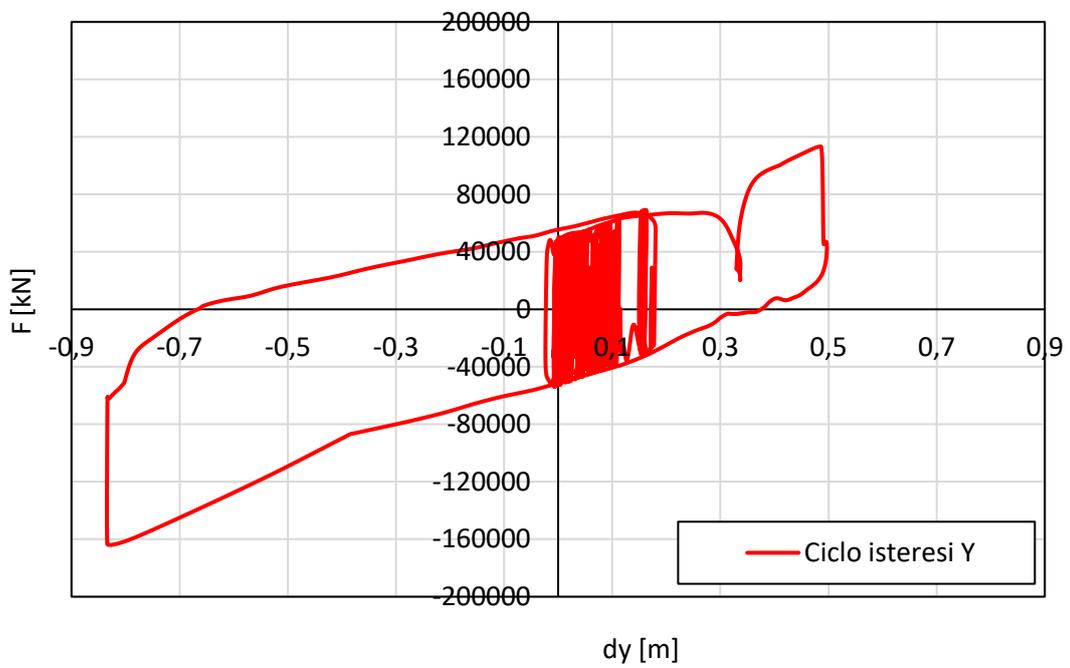
Avendo aumentato la distanza di arresto della superficie 1 si nota che il comportamento dell'isolatore non dipende più quasi esclusivamente dal valore del raggio di curvatura della superficie 2. Infatti la curva del grafico sopra riportato mostra come all'aumentare del valore di uno dei due raggi di curvatura l'altro debba diminuire.

Di seguito si riportano i cicli di isteresi in direzione Y di uno dei casi con $d_1=0,24$ m e di uno dei casi con $d_1=0,35$ m.

$\mu_1=5\%$, $R_1=4$ m, $\mu_2=8\%$, $R_2=2,4$ m, $d_1=0,24$ m

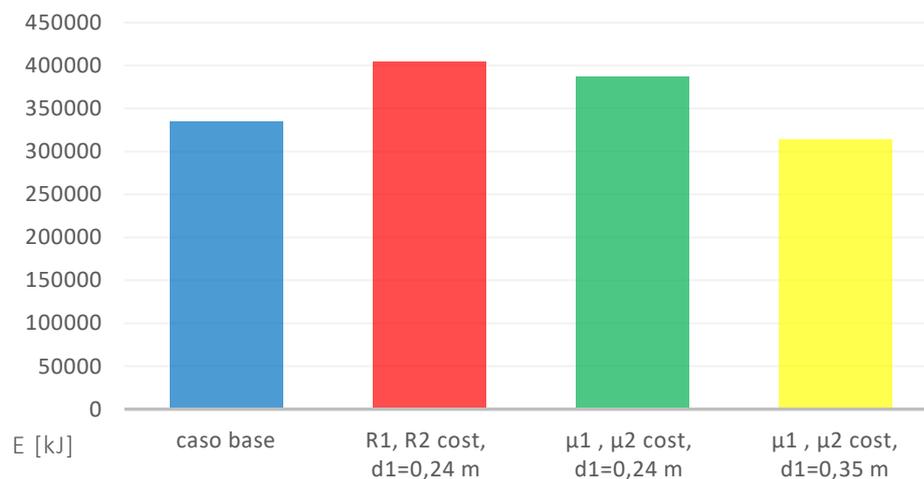


$\mu_1=7,2\%$, $R_1=5,3$ m, $\mu_2=9,4\%$, $R_2=3,5$ m, $d_1=0,35$ m



Di questi grafici, più che i valori della forza raggiunti nel ciclo, i quali dipendono anche dal fatto che i coefficienti di attrito sono diversi per i due casi, è interessante notare quanto già detto prima sul contributo della superficie 1. Infatti nel primo grafico si nota che la pendenza del ciclo per grandi spostamenti è quella governata dallo scorrimento della superficie 2. Mentre nel secondo caso si può osservare in modo chiaro che ad un valore di circa -0,4 m si ha il cambio di pendenza e che quindi solo da quel punto in poi agisce solo ed esclusivamente la superficie 2.

Infine si riporta il confronto tra le medie dell'energia dissipata nel caso con raggi di curvatura costanti, nel caso di coefficiente di attrito costante sia con $d_1=0,24$ m che con $d_1=0,35$ m e dell'energia dissipata al caso base.



Si nota che nei due casi in cui la distanza di arresto è uguale l'energia dissipata è abbastanza simile, mentre con $d_1=0,35$ m risulta molto inferiore. Questo lo si poteva già intuire dai cicli di isteresi e tutto ciò mette in evidenza quanto la distanza di arresto della superficie 1 non è solo un limite di capacità ma è un parametro che influenza significativamente il comportamento dell'isolatore.

7.4 Modello completo

In questo capitolo i casi studio visti per il modello semplificato ad un grado di libertà vengono ripetuti per il modello dell'edificio completo, assunto uguale a quello dell'ospedale di Adana.

Com'è già stato detto verranno utilizzate due combinazioni di carico, una all'MCE e una al DBE. La prima consiste nell'applicare alla struttura gli accelerogrammi registrati nelle due direzioni dalla stazione 4615 per il sisma di magnitudo 7.8, mentre nella seconda si applicano gli stessi accelerogrammi dell'MCE ma scalati del fattore 1,5.

Anche in questo caso si è deciso di dividere gli elementi del modello che costituiscono i dispositivi di isolamento in 3 gruppi per fasce di carico.

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

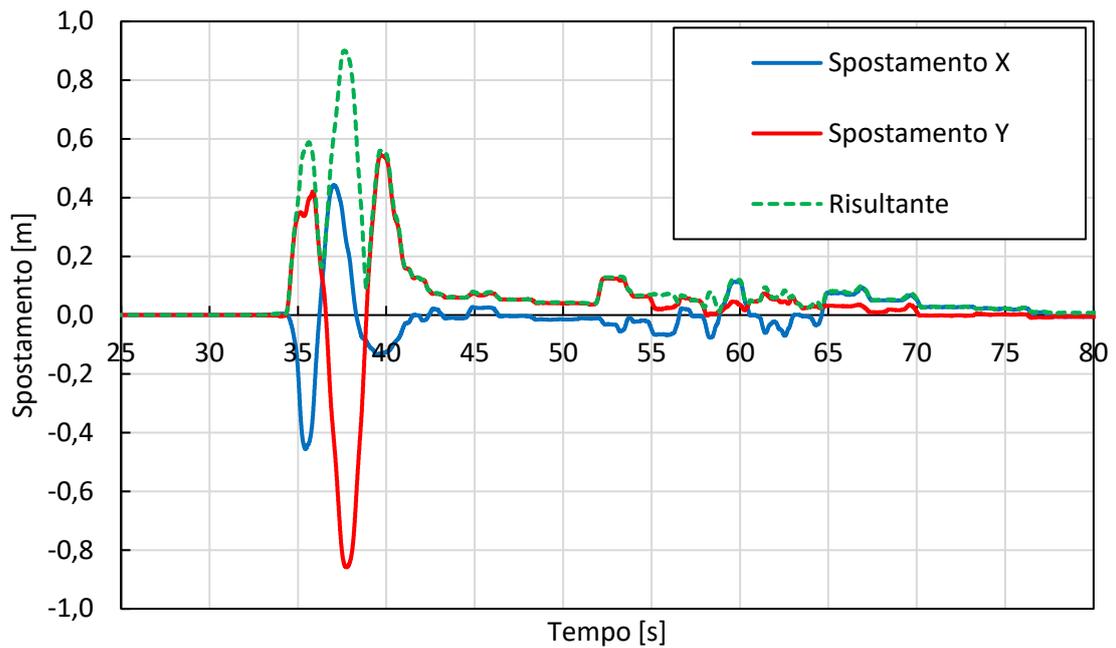
7.4.1 Risultati

Il primo passo è quello di confrontare gli spostamenti ottenuti dall'analisi svolta sul modello semplificato ad 1 grado di libertà con quelli ottenuti sul modello completo all'MCE. Una volta fatto ciò si analizzano i risultati nel caso DBE in termine di spostamento, drift di interpiano e accelerazione dei vari piani dell'edificio in esame.

7.4.1.1 Caso base: $\mu=8\%$, $R=5 m$

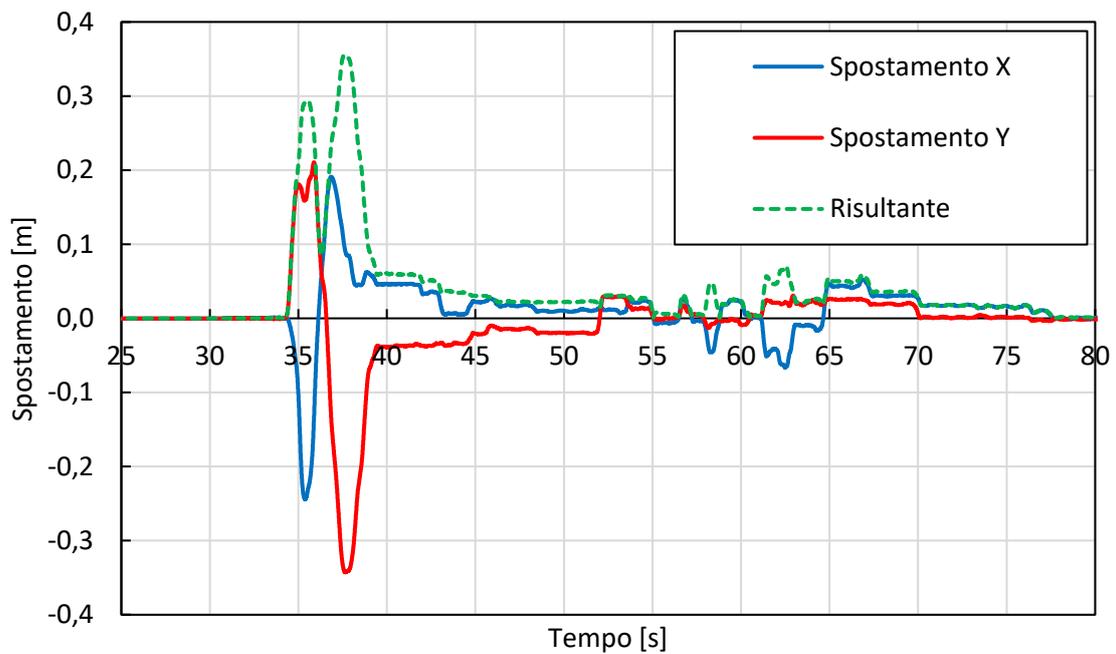
Partiamo innanzitutto con quello che abbiamo definito caso base, ossia quello con coefficiente di attrito dell'8% e raggio di curvatura 5 m.

Si riportano di seguito gli spostamenti nelle due direzioni X e Y e della risultante in funzione del tempo ottenuti nel caso di carico con sisma all'MCE.



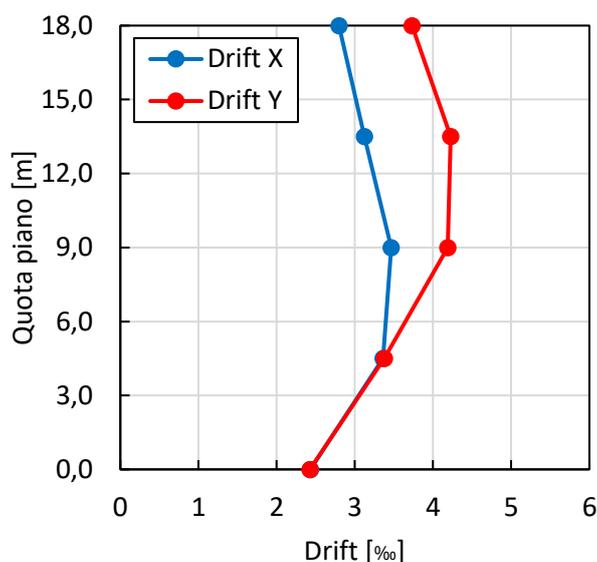
L'andamento è molto simile a quello ottenuto con il modello semplificato ad un grado di libertà e lo spostamento massimo in termini di risultante è pari a 0.9, ossia differisce da quello del modello ad 1 grado di libertà di 4 cm.

A questo punto si valuta la risposta della struttura completa al sisma DBE, che è comparabile allo SLV delle nostre normative. In questo caso gli spostamenti sono i seguenti.

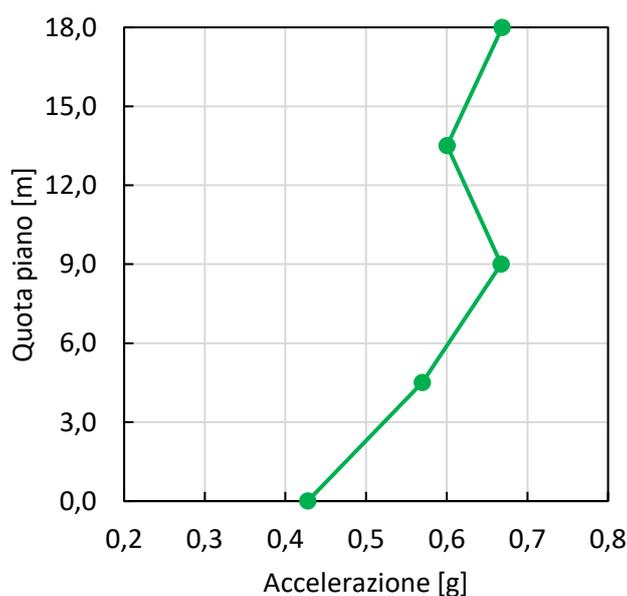


Si ottiene una risultante dello spostamento massimo pari a 0,355 m. L'andamento delle curve di spostamento in funzione del tempo è molto diverso da quello visto all'MCE, dove l'intensità del sisma era maggiore.

Si riporta anche il grafico delle curve che mostrano l'andamento del drift interpiano massimo nelle due direzioni X e Y man mano che si sale di piano. Il valore più grande lo si registra al piano a 13 m, dove si registra un drift di 4,26%. Tale valore rientra comunque nei limiti di normativa di drift massimo del 5%.



Infine si mostra l'andamento dei valori massimi della risultante di accelerazione nelle due direzioni per ogni piano.

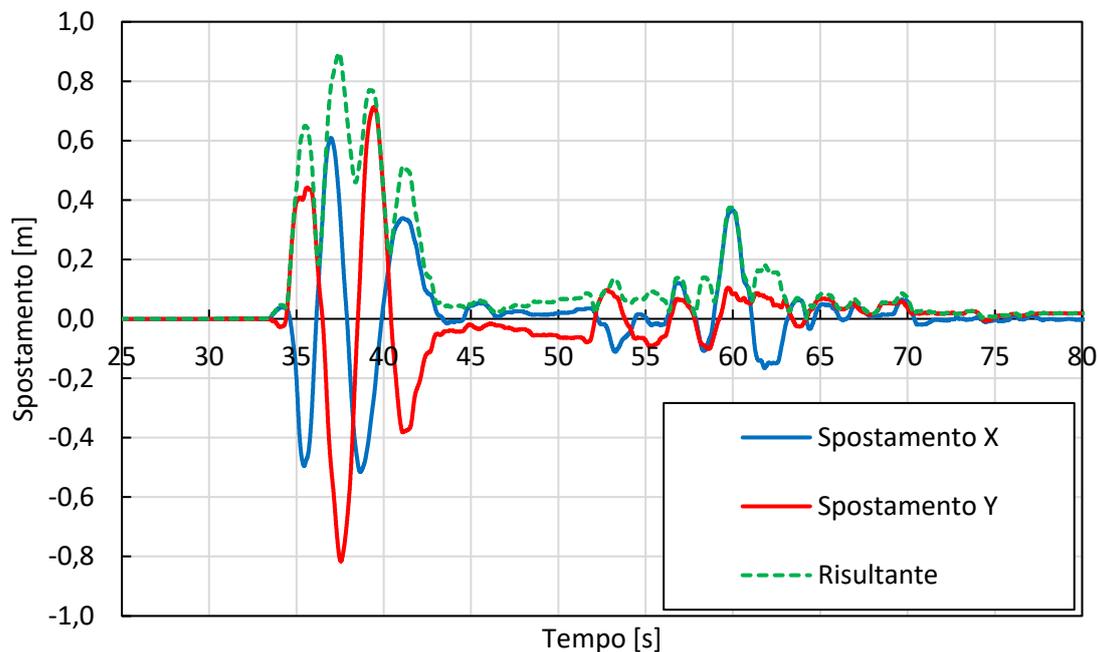


7.4.1.2 Doppio pendolo adattivo: $R_1=4\text{ m}$, $R_2=2,2\text{ m}$, $d_1=0,24\text{ m}$ costanti

7.4.1.2.1 Parametri variabili: $\mu_1=3,65\%$ e $\mu_2=8\%$

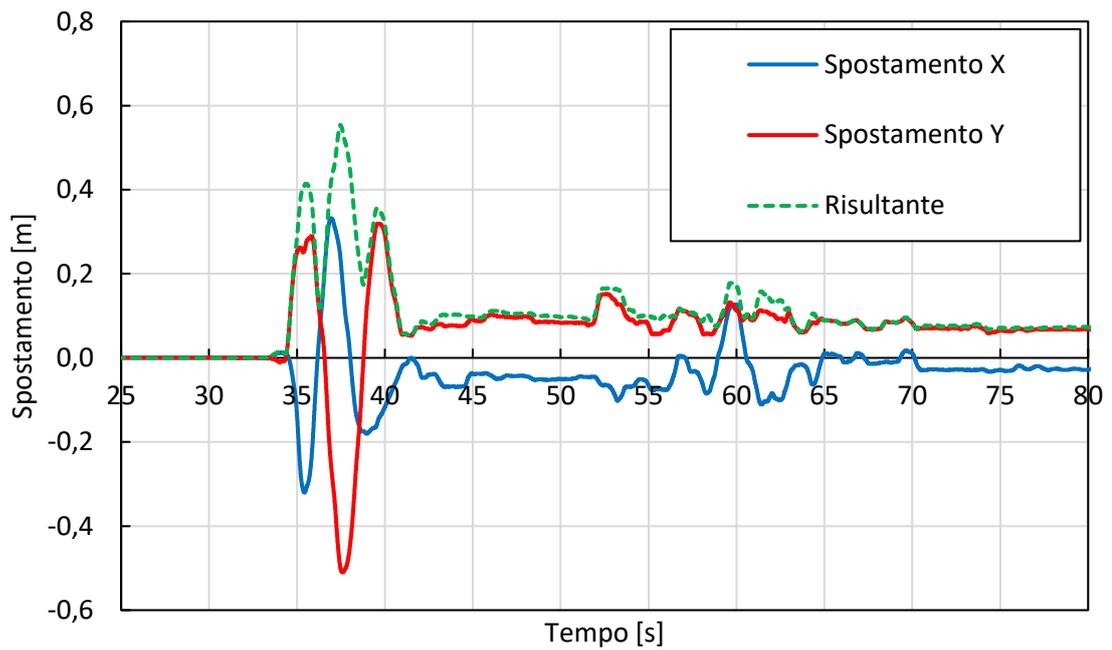
Seguendo l'ordine del modello a 1 grado di libertà, si riporta ora il caso in cui si ha $\mu_1=3,65\%$, $R_1=4\text{ m}$ e $d_1=0,24\text{ m}$ come caratteristiche della superficie di scorrimento 1, mentre per quanto riguarda la superficie di scorrimento 2 si ha $\mu_2=8\%$ e $R_2=2,2\text{ m}$.

Per prima cosa si riporta il grafico tempo-spostamento con sisma MCE.



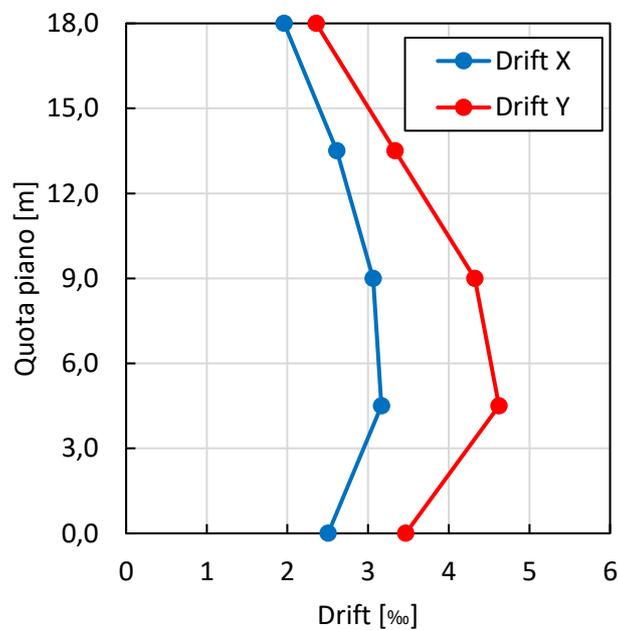
L'andamento è simile a quello ricavato con il modello a 1 grado di libertà, e lo spostamento massimo registrato in termine di risultante nelle due direzioni è pari a 0,893 m. Dal momento che lo spostamento massimo differisce di soli 3 cm tra quello ottenuto dal modello semplificato e quello del modello completo, si può dire che anche in questo caso i due modelli sono coerenti.

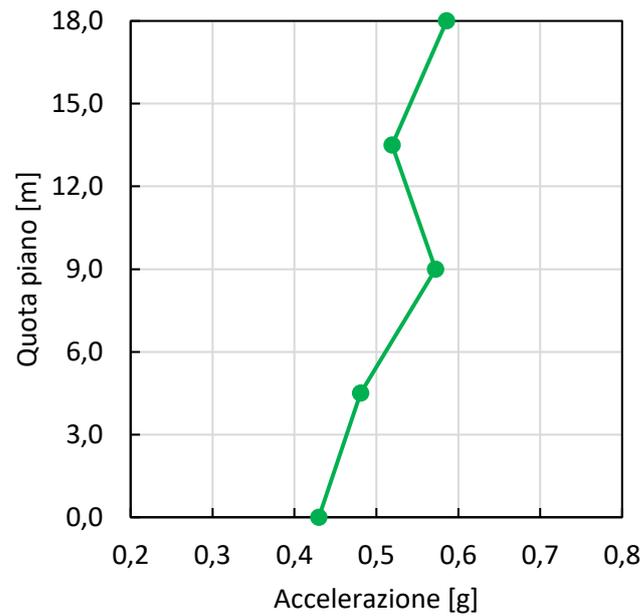
Si passa quindi ad analizzare i risultati nel caso di sisma al DBE, ed il grafico tempo-spostamento che si ottiene è il seguente.



Lo spostamento massimo ottenuto in termini di risultante nelle due direzioni è di 0,554 m. Questo valore e anche l'andamento del grafico è piuttosto diverso dal caso base analizzato nel paragrafo precedente.

Si riportano di seguito i grafici del drift interpiano e l'accelerazione massima di piano.





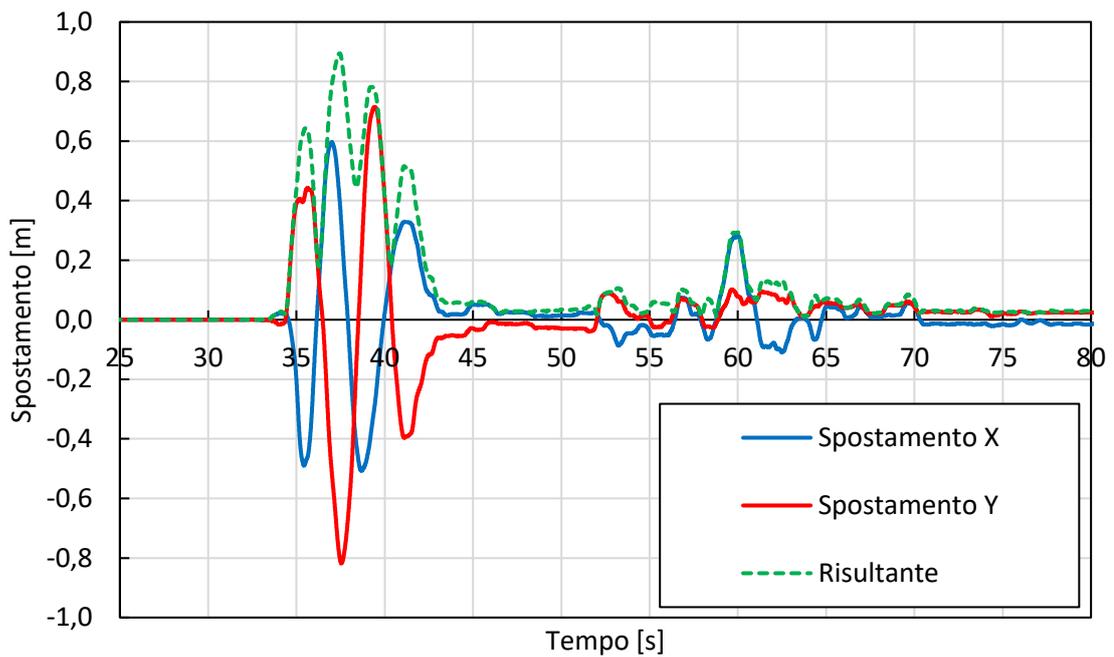
Per quanto riguarda il drift, in questo caso si hanno dei valori più alti rispetto al caso base, infatti si raggiunge un valore di drift massimo in direzione Y di 4,6‰, il quale risulta comunque inferiore dei limiti normativi.

Per quanto riguarda l'accelerazione di piano invece si registrano valori massimi inferiori.

7.4.1.2.2 Parametri variabili: $\mu_1=5,1\%$ e $\mu_2=7,1\%$

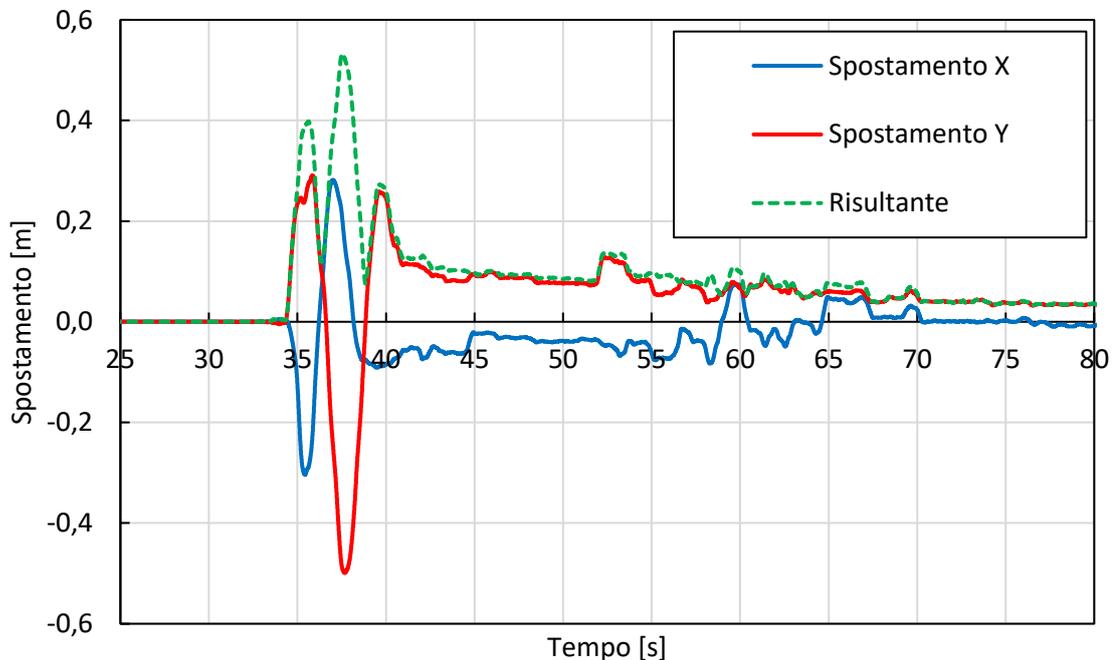
Tenendo fissi i valori dei raggi di curvatura delle due superfici e della distanza di arresto della superficie 1, si vanno ad assegnare i seguenti coefficienti di attrito: $\mu_1=5,1\%$ e $\mu_2=7,1\%$.

In questo caso il grafico tempo-spostamento con sisma di progetto MCE è il seguente.



Anche per questo caso l'andamento è simile a quello che si ha con il modello semplificato ad un grado di libertà e lo spostamento massimo ottenuto è 0,894 m.

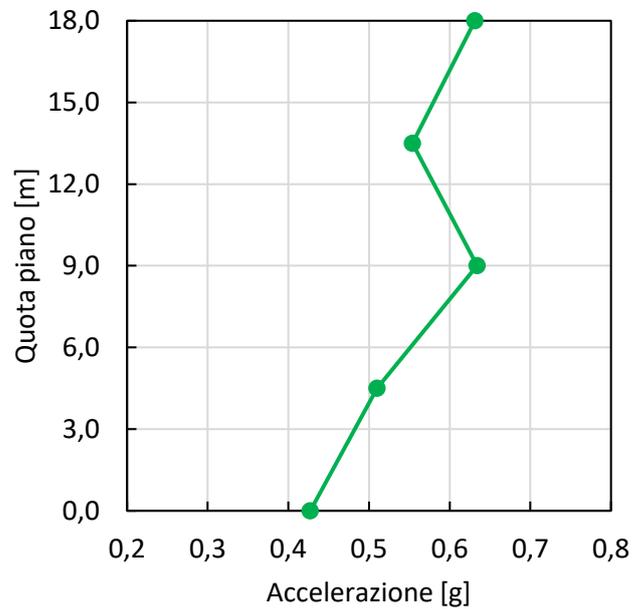
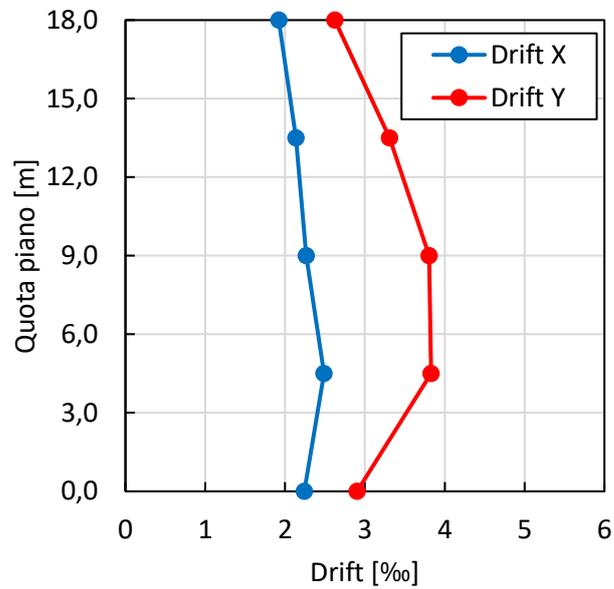
Passando al caso di carico con sisma DBE si hanno invece i seguenti risultati.



Si registra uno spostamento risultante massimo di 0,532 m, che risulta leggermente minore del caso precedente ma maggiore del caso base.

Per quanto riguarda invece al drift interpiano, in questo caso si ha un valore massimo registrato in direzione Y al piano 4,5 di 3,83‰ e un'accelerazione risultante massima di 0,63g.

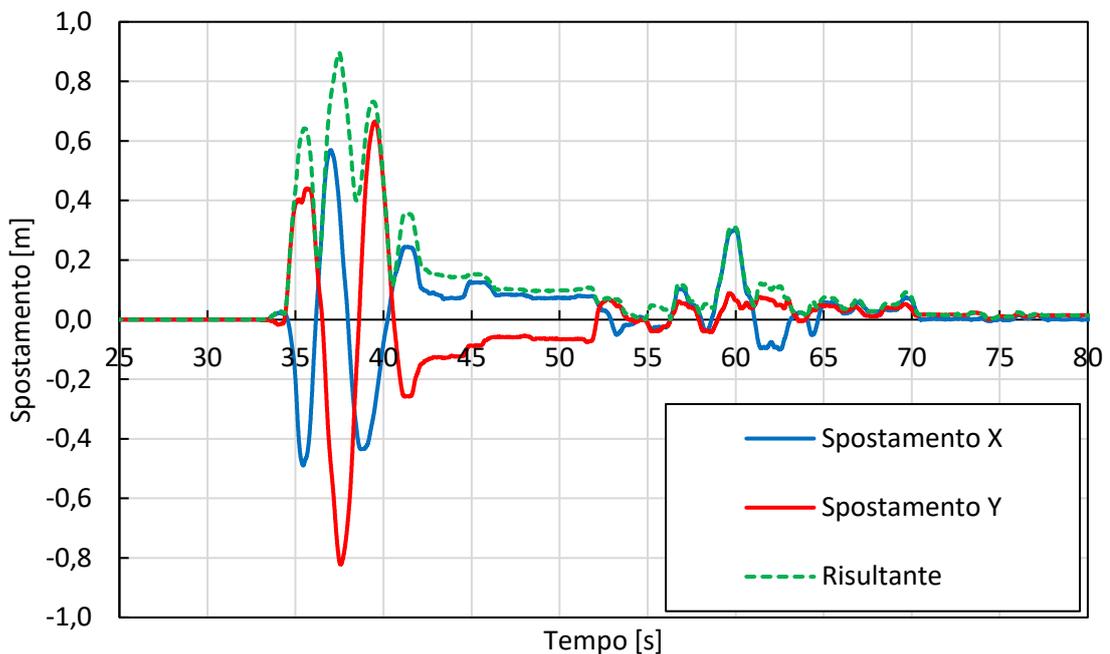
Di seguito si riportano i grafici di drift e accelerazione dei vari piani.



7.4.1.3 Doppio pendolo adattivo: $\mu_1=5\%$, $\mu_2=8\%$, $d_1=0,24$ m costanti

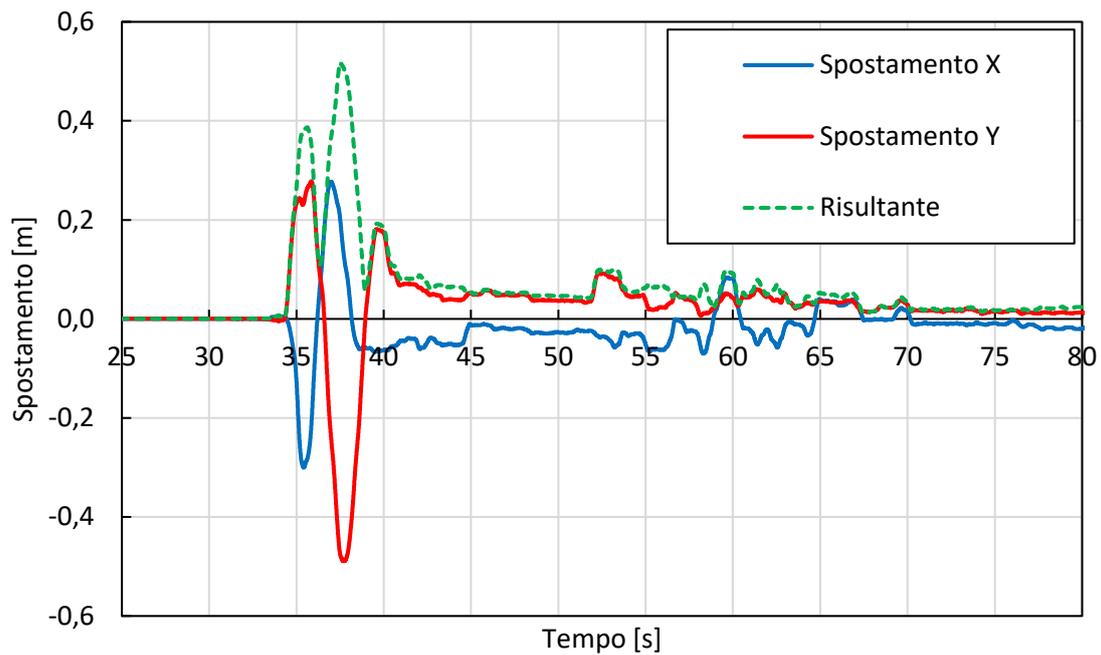
7.4.1.3.1 Parametri variabili: $R_1=4$ m e $R_2=2,402$ m

Passiamo ora ai casi dove si tengono fissi i coefficienti di attrito delle due superfici, con $\mu_1=5\%$ e $\mu_2=8\%$. Avendo una distanza di arresto della superficie 1 pari a 0,24 m e con dei raggi di curvatura $R_1=4$ m e $R_2=2,402$ m, con il sisma MCE, si ottiene il seguente grafico tempo-spostamento.

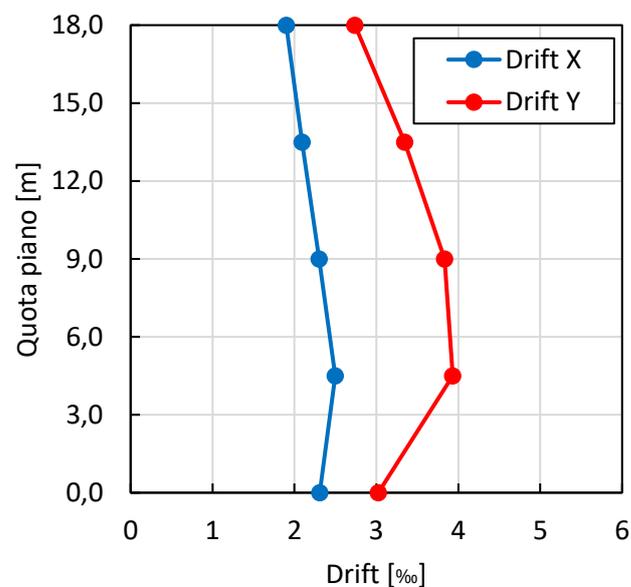


Il valore massimo della risultante di spostamento delle due direzioni è pari a 0,896 m. L'andamento dello spostamento risulta molto simile a quello dei casi precedenti per i primi 40 secondi, poi le curve invece sono più distanti tra di loro fino a 52 secondi, per poi riprendere un andamento simile ai precedenti.

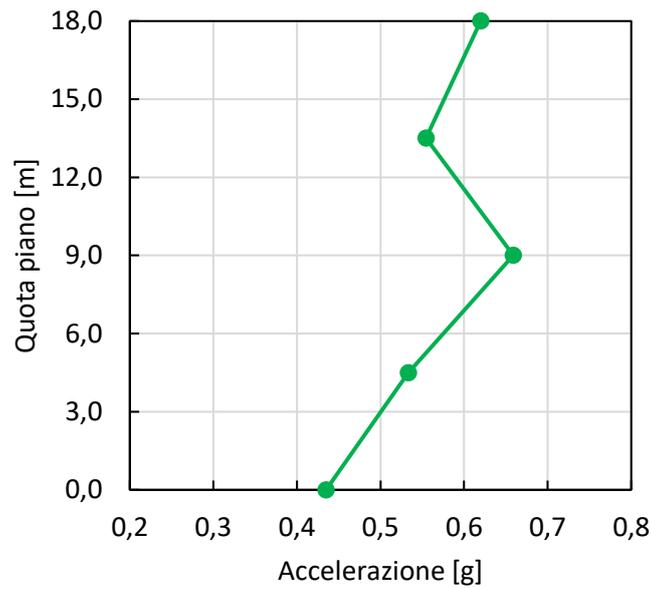
Di seguito si riporta il grafico tempo-spostamento del modello completo sottoposto al sisma di progetto DBE.



In questo caso la risultante massima di spostamento misura 0,517 m ed è quindi molto simile a quella trovata negli altri due casi con doppio pendolo adattivo. Quanto appena detto vale anche per il massimo drift interpiano registrato, infatti al piano 4,5 si ha un drift in direzione Y di 3,9%. Si riporta il grafico del drift massimo nelle due direzioni per ogni piano.



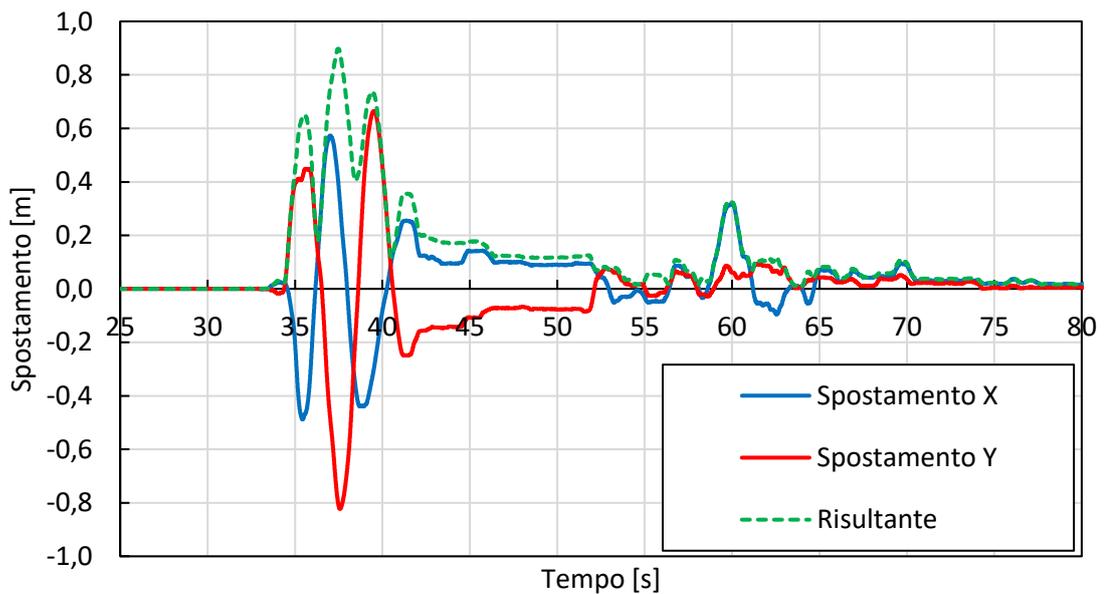
Infine si riporta il grafico della risultante delle accelerazioni massime per piano e si nota che si ha il valore più grande al piano 9, dov'è registrata un'accelerazione di 0,659 g.



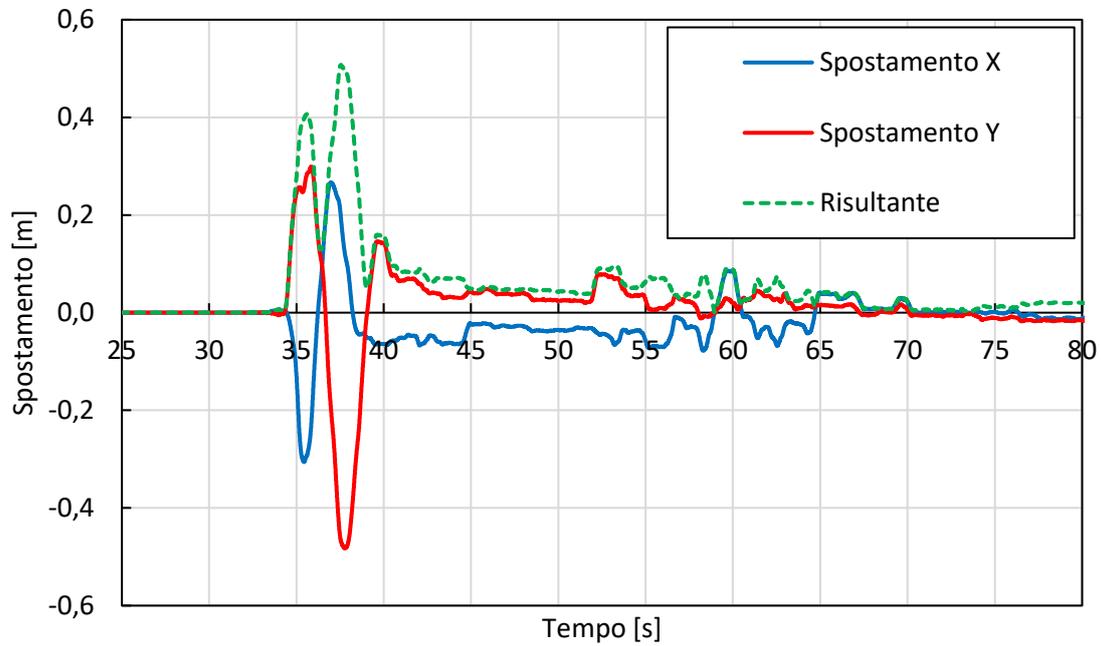
7.4.1.3.2 Parametri variabili: $R_1=6$ m e $R_2=2,404$ m

In questo caso studio si cambiano solo, rispetto al caso del paragrafo precedente, i due raggi di curvatura, che ora diventano $R_1=6$ m e $R_2=2,404$ m.

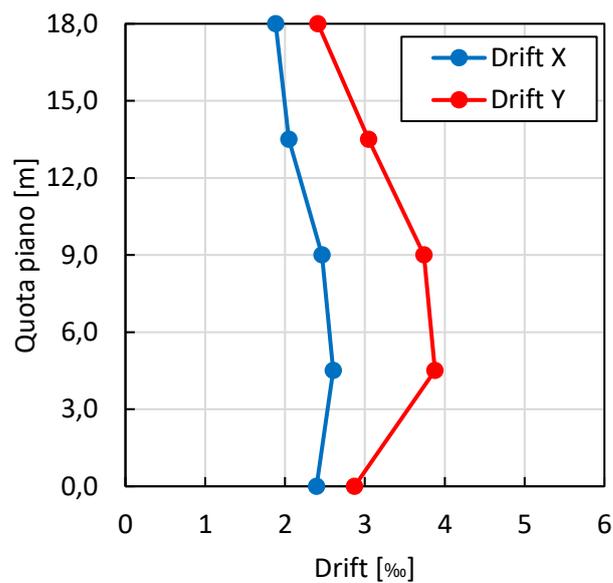
Con il sima di progetto MCE si ottiene un valore massimo della risultante di spostamento di 0,898 m e l'andamento dello spostamento nel tempo è descritto nel seguente grafico.

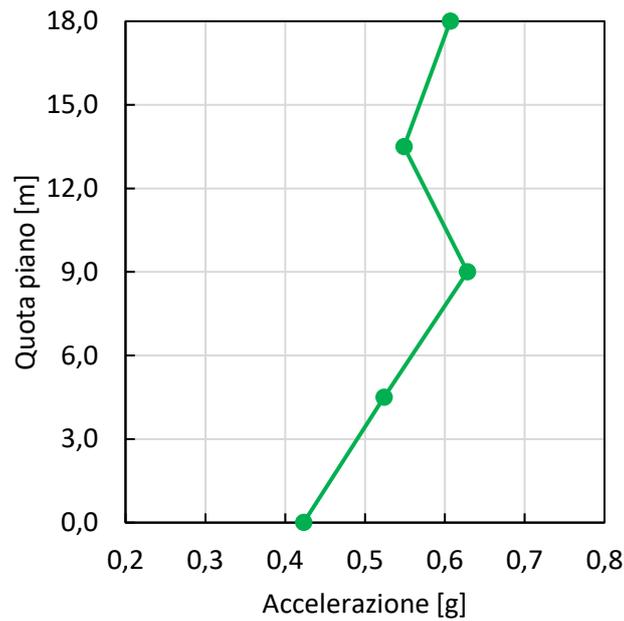


Andando invece ad utilizzare il sisma di progetto al DBE si ha uno spostamento massimo della risultante nelle due direzioni che vale 0,507 m. Di seguito il grafico tempo spostamento con sisma DBE.



Gli andamenti del drift e dell'accelerazione di piano sono molto simili al caso precedente e i valori massimi registrati sono, rispettivamente, 3,88‰ e 0,63 g. Di seguito vengono riportati i grafici che mostrano l'andamento.



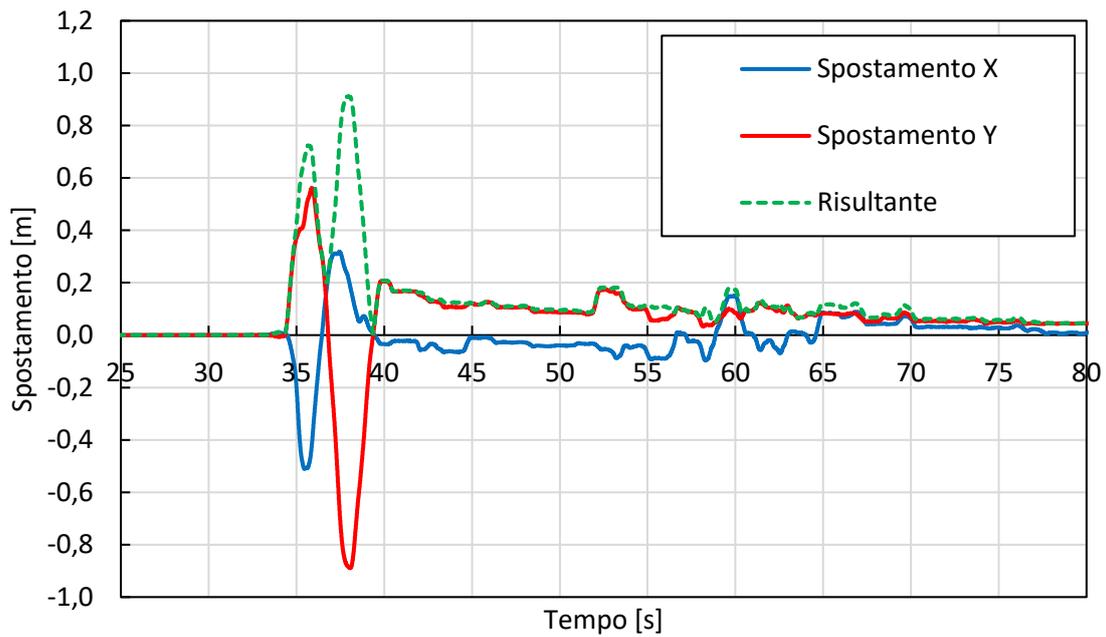


7.4.1.4 Doppio pendolo adattivo: $\mu_1=7,2\%$, $\mu_2=9,4\%$, $d_1=0,35\text{m}$ costanti

7.4.1.4.1 Parametri variabili: $R_1=4,9\text{ m}$ e $R_2=4,3\text{ m}$

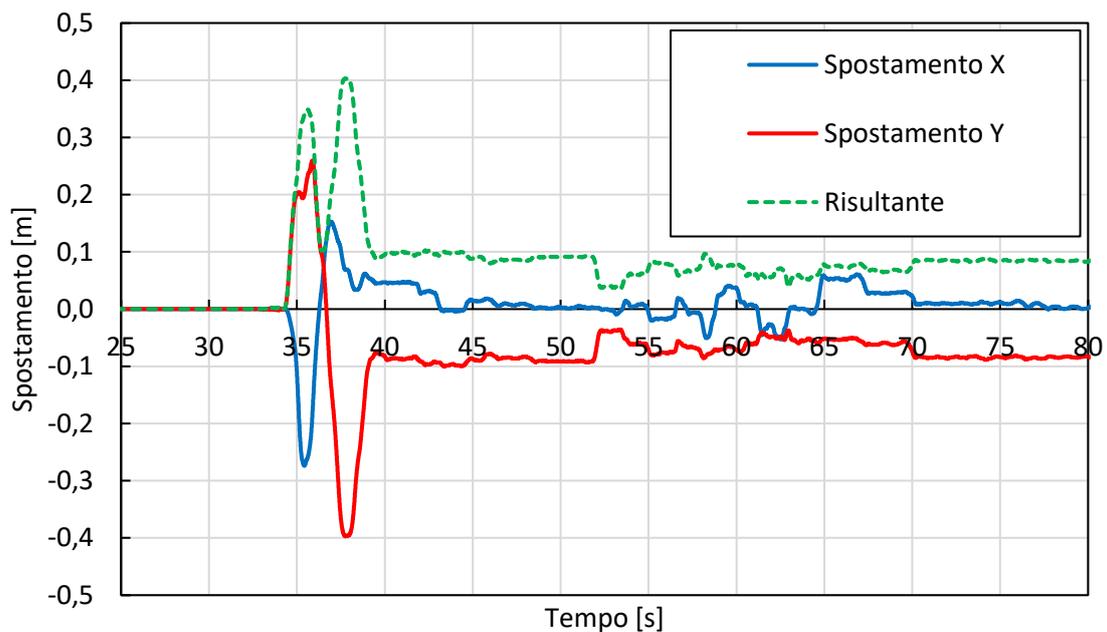
Seguendo lo schema utilizzato anche per il modello semplificato, si presentano ora due casi con gli stessi coefficienti di attrito, $\mu_1=7,2\%$ e $\mu_2=9,4\%$, e stessa distanza di arresto della superficie 1, $d_1=0,35\text{ m}$.

Nel caso descritto in questo paragrafo, i raggi di curvatura delle due superfici scorrevoli sono $R_1=4,9\text{ m}$ e $R_2=4,3\text{ m}$. Andando ad applicare alla struttura, avente dispositivi di isolamento con i parametri appena descritti, il sisma di progetto MCE, si ottiene il seguente diagramma tempo-spostamento.

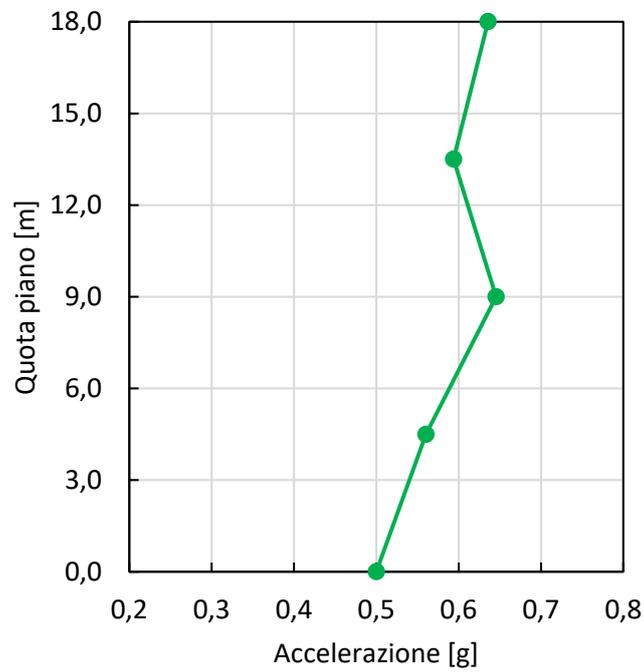
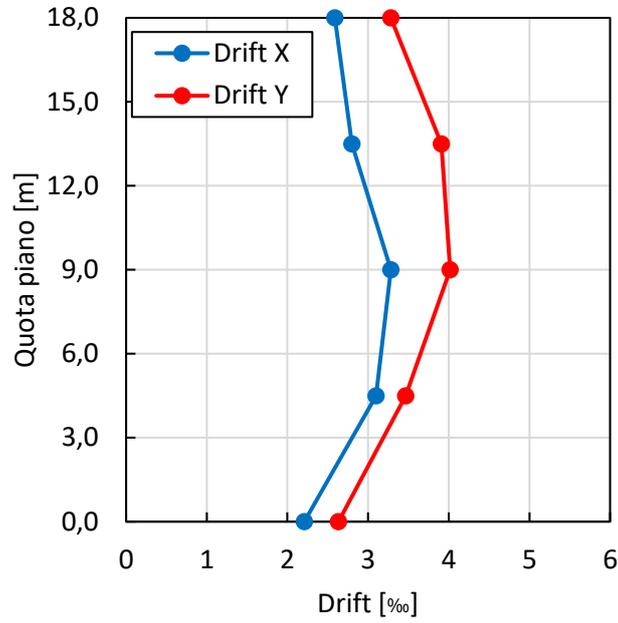


L'andamento delle curve è molto diverso da quello visto nei casi precedenti, ma la risultante di spostamento massima risulta essere molto simile, infatti è di 0,91 m.

Andando ad analizzare l'andamento degli spostamenti con struttura soggetta al sisma di progetto DBE, anche in questo caso l'andamento non risulta essere molto simile a quelli dei casi precedenti, e la risultante di spostamento massimo è di 0,402 m. Di seguito è riportato il grafico.



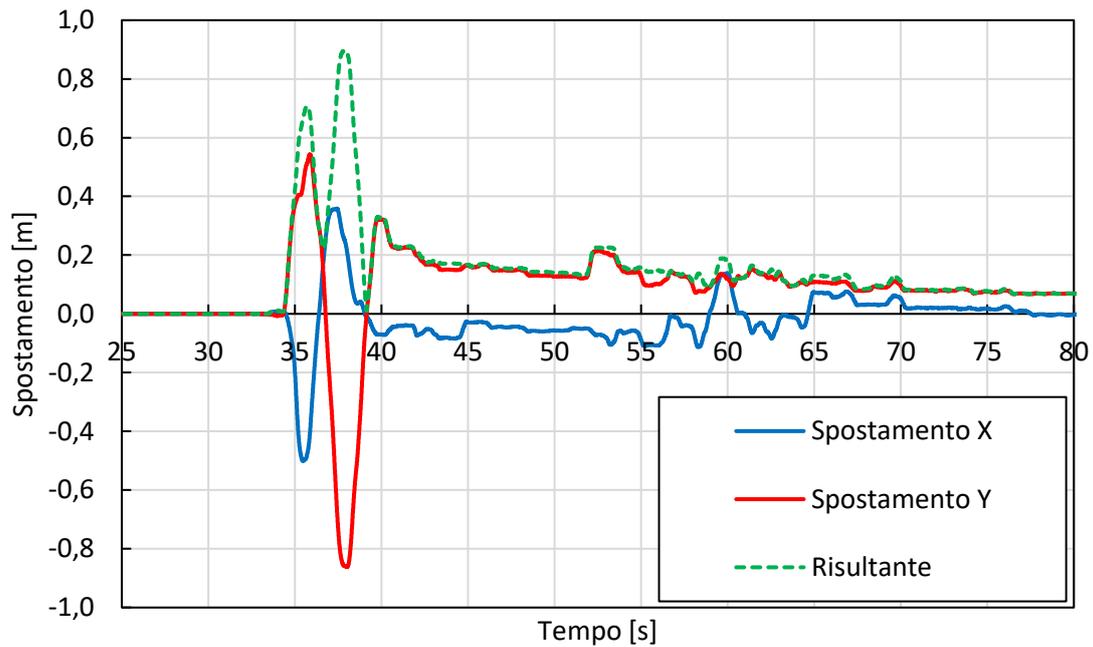
Per quanto riguarda il drift di interpiano il valore massimo registrato è del 4,02‰, mentre per quanto riguarda l'accelerazione massima di piano si ha 0,64 g. Di seguito si riportano i grafici del drift nelle due direzioni e dell'accelerazione lungo l'altezza dell'edificio.



7.4.1.4.2 Parametri variabili: $R_1=5,3$ m e $R_2=3,5$ m

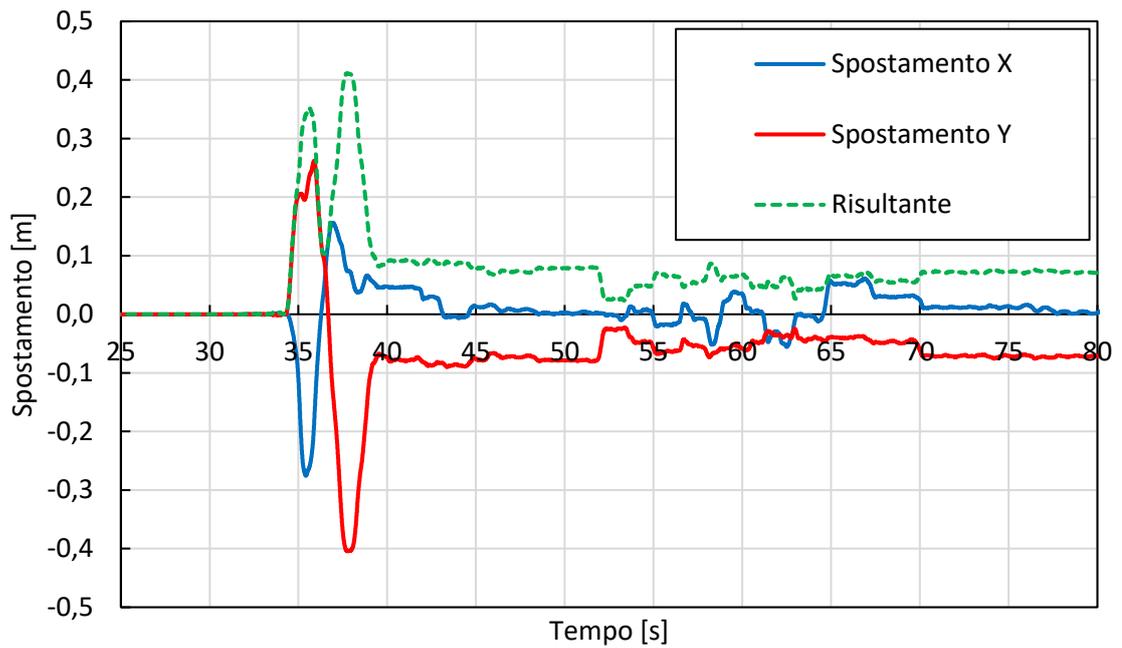
In questo ultimo caso presentato, rispetto al caso del paragrafo precedente, si mantengono costanti i valori dei coefficienti di attrito delle due superfici e di d_1 , e si assegnano dei raggi di curvatura pari a $R_1=5,3$ m e $R_2=3,5$ m.

Con sisma di progetto MCE il grafico tempo-spostamento ottenuto è il seguente.

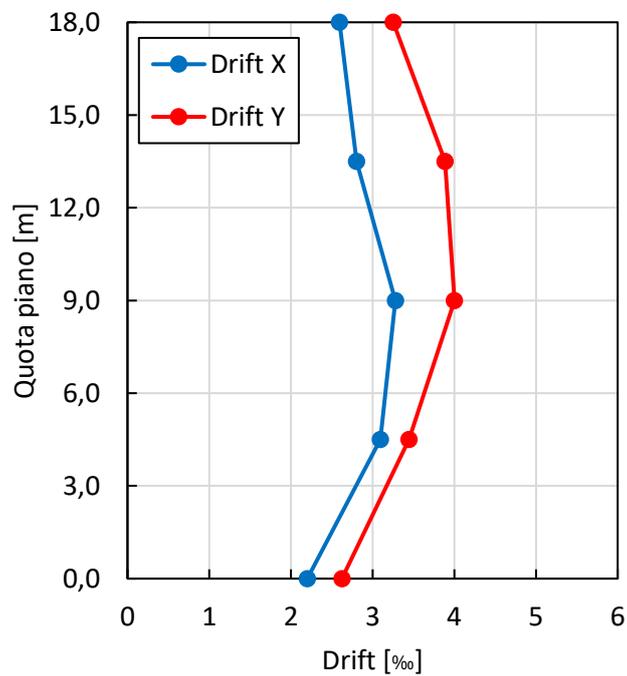


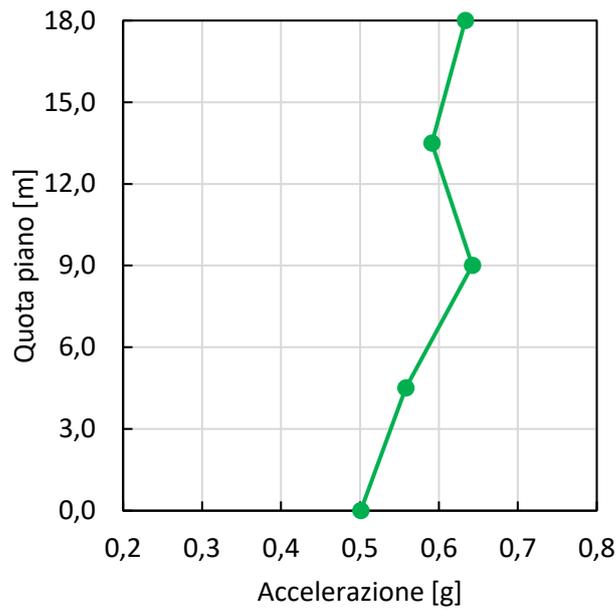
Si registra uno spostamento massimo di 0,896 m e ha un andamento simile a quello del caso precedente.

Per quanto riguarda la struttura sottoposta al sisma di progetto DBE si ha invece uno spostamento massimo di 0,411 m e l'andamento è mostrato nel seguente grafico.



Anche drift di interpiano e accelerazione di piano sono molto simili a quelli descritti nel caso al paragrafo precedente e di seguito si riportano i grafici.





7.4.2 Confronto risultati

Nel capitolo precedente, §7.4.1, sono state ripetute le analisi fatte sul modello ad 1 grado di libertà al modello completo e sono state integrate con le analisi per il sisma di progetto DBE.

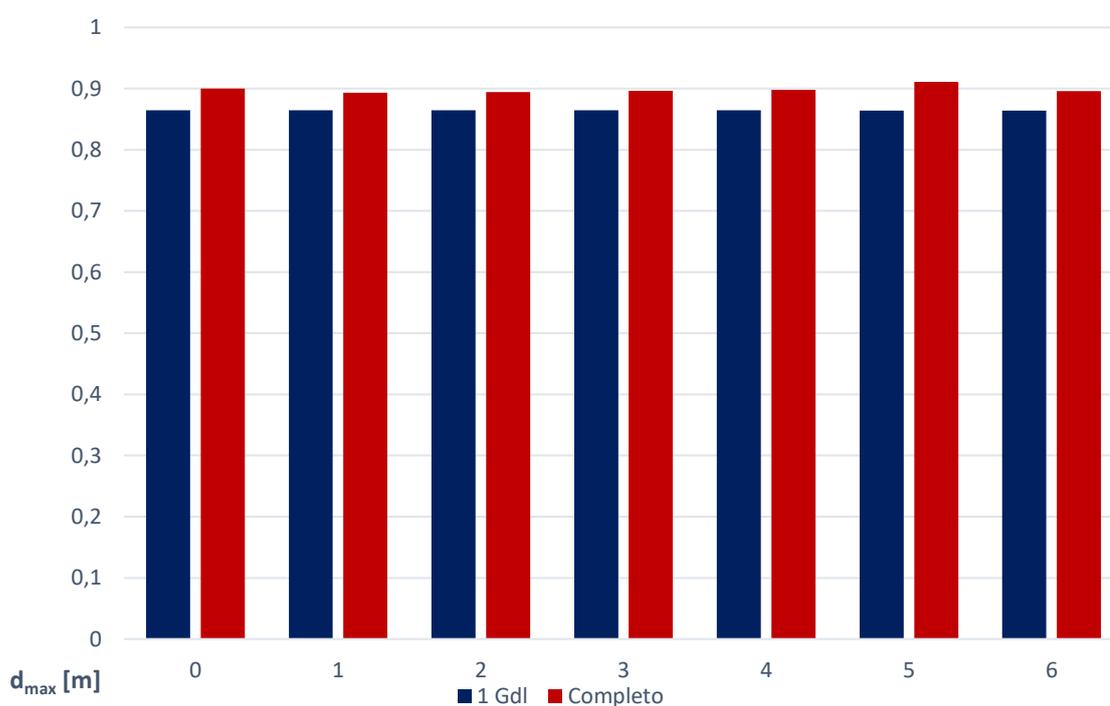
Il primo confronto che è interessante fare dunque è tra i risultati che sono stati ottenuti con i due modelli. In particolare, essendo che le analisi si basano sul fatto di avere un valore massimo della risultante dello spostamento uguali per tutti i casi implementati, si vanno innanzitutto a confrontare questi valori. Di seguito si riportano due tabelle dove vengono indicati i parametri delle superfici di scorrimento degli isolatori e i valori della risultante massima ottenuta dalla time history per il sisma di progetto MCE con il grafico che mette a confronto i valori indicati.

Modello 1 grado di libertà

	d_1 m	μ_1 %	μ_2 %	R_1 m	R_2 m	d_{max} m
0	-	8		5		0,86463
1	0,24	3,65	8	4	2,2	0,86439
2	0,24	5,1	7,1	4	2,2	0,864464
3	0,24	5	8	4	2,402	0,864482
4	0,24	5	8	6	2,404	0,864529
5	0,35	7,2	9,4	4,9	4,3	0,864269
6	0,35	7,2	9,4	5,3	3,5	0,864217

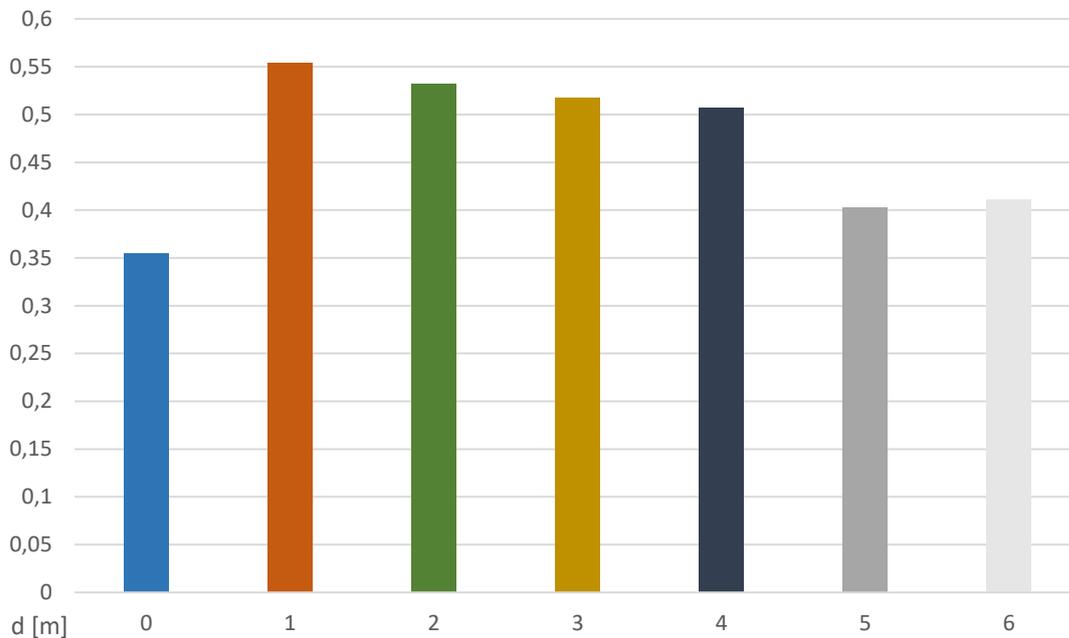
Modello completo

	d_1 m	μ_1 %	μ_2 %	R_1 m	R_2 m	d_{max} m
0	-		8		5	0,900004
1	0,24	3,65	8	4	2,2	0,89312
2	0,24	5,1	7,1	4	2,2	0,894286
3	0,24	5	8	4	2,402	0,896399
4	0,24	5	8	6	2,404	0,897862
5	0,35	7,2	9,4	4,9	4,3	0,911076
6	0,35	7,2	9,4	5,3	3,5	0,895649



Dal momento che l'analisi parametrica è stata fatta sul modello a 1 grado di libertà e come abbiamo già visto al capitolo §7.3.3, i valori di spostamento massimo per il modello semplificato sono precisi al millimetro. Andando invece ad osservare quelli del modello completo, l'errore è un po' maggiore, in particolare per il caso con $\mu_1=7,2\%$, $\mu_2=9,4\%$, $R_1=4,9\%$, $R_2=4,3\%$ e $d_1=0,35$ m. La differenza tra lo spostamento massimo ricavato dai casi nel modello semplificato e quello completo è al massimo di 5 cm, che comparato allo spostamento massimo che è quasi 90 cm si può considerare accettabile.

Constatato che i due modelli sono coerenti tra di loro si è passati poi ad analizzare gli effetti del sisma di progetto DBE sulla struttura completa. Per un sisma di questa entità la risultante di spostamento massimo ottenuta nei vari casi è riportata nel seguente grafico.



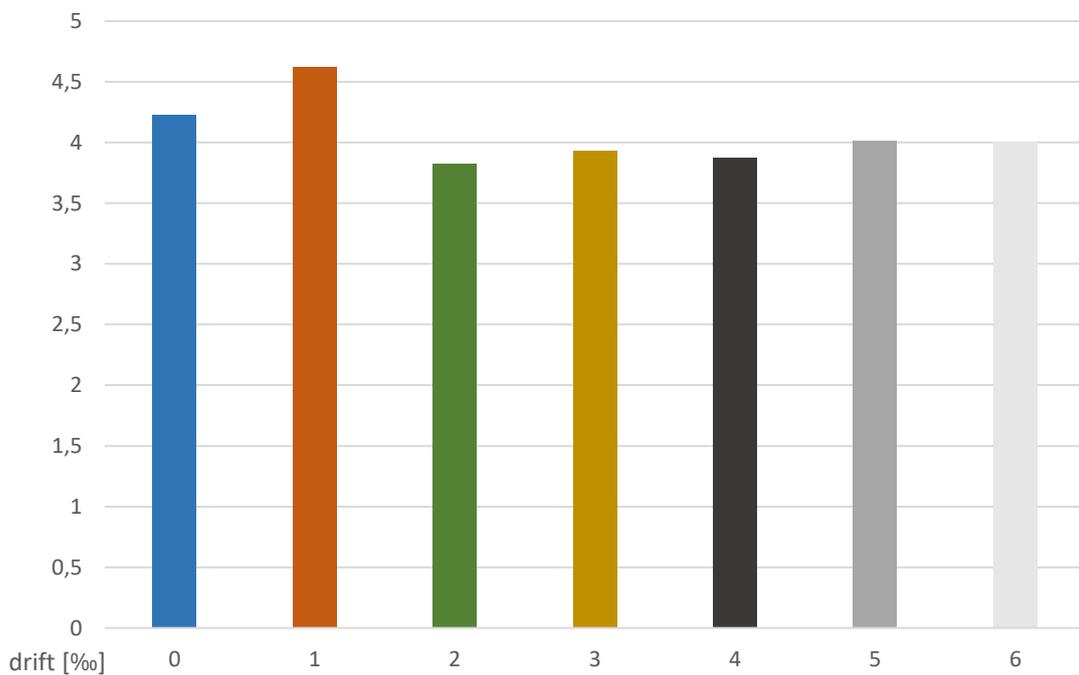
DBE

	d ₁ m	μ ₁ %	μ ₂ %	R ₁ m	R ₂ m	d _{max} m
0	-	8		5		0,355188
1	0,24	3,65	8	4	2,2	0,553731
2	0,24	5,1	7,1	4	2,2	0,531669
3	0,24	5	8	4	2,4	0,517141
4	0,24	5	8	6	2,4	0,507215
5	0,35	7,2	9,4	4,9	4,3	0,402847
6	0,35	7,2	9,4	5,3	3,5	0,411173

Come si può notare dai valori di questa tabella, lo spostamento massimo nel caso base risulta inferiore rispetto a tutti i casi con doppio pendolo adattivo. Questo risultato lo si può spiegare con il fatto che essendo un sisma di entità minore rispetto a quello MCE, il comportamento dell'isolatore a doppio pendolo adattivo è prevalentemente quello in cui si hanno le due superfici scorrevoli contemporaneamente attive. In questa configurazione la rigidezza dell'isolatore è data da $\frac{N_{sd}}{R_{eq}}$ con R_{eq} che è dato dalla somma dei raggi di curvatura

delle due superfici. Essendo quindi che il raggio di curvatura equivalente è maggiore del raggio di curvatura del caso base, la rigidità è minore e si ha uno spostamento maggiore. Nel caso di sisma MCE questo era bilanciato dal fatto che avendo spostamenti maggiori, il tratto in cui si aveva la superficie di scorrimento 2 come unica superficie attiva, che è il momento in cui si ha una rigidità molto più grande, era maggiore.

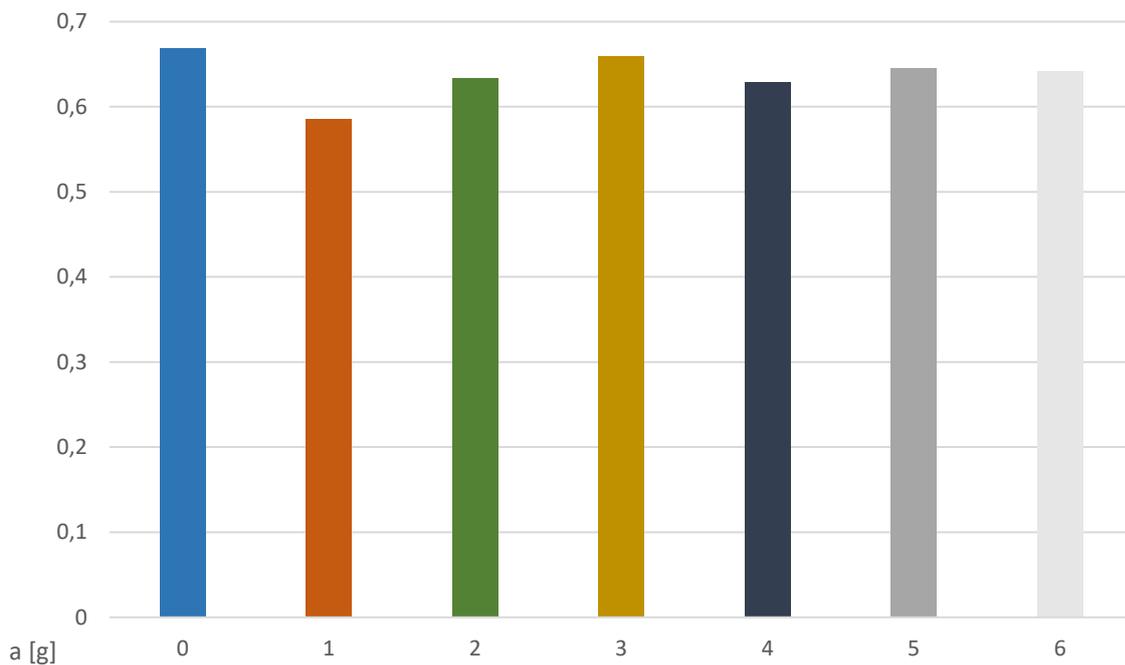
Sempre con sisma di progetto DBE sono stati ricavati anche i valori dei drift di interpiano per i vari casi analizzati. Nel grafico che segue vengono riportati i valori massimi del drift per ogni caso.



	d_1 m	μ_1 %	μ_2 %	R_1 m	R_2 m	$drift_{max}$ ‰
0	-	8		5		4,225771
1	0,24	3,65	8	4	2,2	4,623037
2	0,24	5,1	7,1	4	2,2	3,828783
3	0,24	5	8	4	2,4	3,932428
4	0,24	5	8	6	2,4	3,877285
5	0,35	7,2	9,4	4,9	4,3	4,017293
6	0,35	7,2	9,4	5,3	3,5	4,002583

Si nota che tra tutti i casi analizzati solo in uno il drift di interpiano risulta maggiore di quello ottenuto nel caso di sistema di isolamento con doppio pendolo e in ogni caso non si supera mai il limite di normativa che è il 5‰.

Infine si riporta un altro dato interessante che è quello dell'accelerazione massima di piano. Questa volta in tutti i casi analizzati il valore risulta inferiore di quello del caso base. Di seguito è riportato il grafico che mostra la risultante massima nelle due direzioni per l'accelerazione di piano di ogni caso.



	d_1 m	μ_1 %	μ_2 %	R_1 m	R_2 m	a_{max} g
0	-	8		5		0,668804
1	0,24	3,65	8	4	2,2	0,585798
2	0,24	5,1	7,1	4	2,2	0,634023
3	0,24	5	8	4	2,4	0,658872
4	0,24	5	8	6	2,4	0,62833
5	0,35	7,2	9,4	4,9	4,3	0,645482
6	0,35	7,2	9,4	5,3	3,5	0,642276

8 CONCLUSIONI

In questo elaborato è stata analizzata la risposta che degli edifici isolati alla base, attraverso l'utilizzo di isolatori a doppio pendolo scorrevole, hanno ad eventi sismici di entità molto elevata. Oltre ad aver valutato il comportamento di due ospedali che sono stati realmente colpiti dal sisma del 6 Febbraio 2023 avvenuto in Turchia, è stato fatto uno studio sul comportamento di una struttura nell'ipotesi che questa si trovasse sull'epicentro della scossa più forte registrata. In questo ultimo caso sono stati fatti dei confronti tra due diversi tipi di dispositivi di isolamento e del loro comportamento: il doppio pendolo e il doppio pendolo adattivo. Questo secondo tipo di isolatore è stato pensato per adattare il comportamento del dispositivo in base all'entità del sisma che lo sollecita. In questo modo è possibile isolare un edificio per un range di sismi più ampio, infatti avendo due superfici con dei coefficienti di attrito differenti è possibile attivarle con terremoti molto differenti tra loro. Mentre avendo un doppio pendolo semplice questa cosa non è possibile. Basti pensare al caso base analizzato al capitolo §7, avente un coefficiente di attrito dell'8% e un raggio di curvatura di 5 m. Questo tipo di isolatore è piuttosto efficiente per sismi di grande entità, ma per sismi più piccoli farà fatica ad attivarsi, dal momento che l'attrito è molto elevato. Andando invece ad utilizzare un doppio pendolo adattivo si è visto invece che è possibile assegnare dei valori del coefficiente di attrito, per una delle due superfici scorrevoli, anche molto bassi (come fatto per esempio nel caso in cui è stato utilizzato $\mu_1=3,65\%$ e $\mu_2=8\%$) e riuscire comunque ad ottenere la stessa performance per sismi molto forti. Disaccoppiando quindi il comportamento delle due superfici è possibile isolare un ipotetico edificio per sismi di diversa entità, senza andare a ridurre la capacità massima del sistema.

Si è anche visto però che nei casi dove sono stati utilizzati i doppi pendoli adattivi, per sismi di media entità, come per esempio con sisma di progetto DBE, gli spostamenti massimi risultano maggiori che nel caso di struttura isolata con doppio pendolo semplice. Questo implica che se la progettazione avviene con riferimento al DBE, che come già detto corrisponde allo SLV delle NTC2018, la capacità di spostamento massima sarà maggiore per

un dispositivo a doppio pendolo adattivo rispetto a quella che si avrebbe con doppio pendolo semplice.

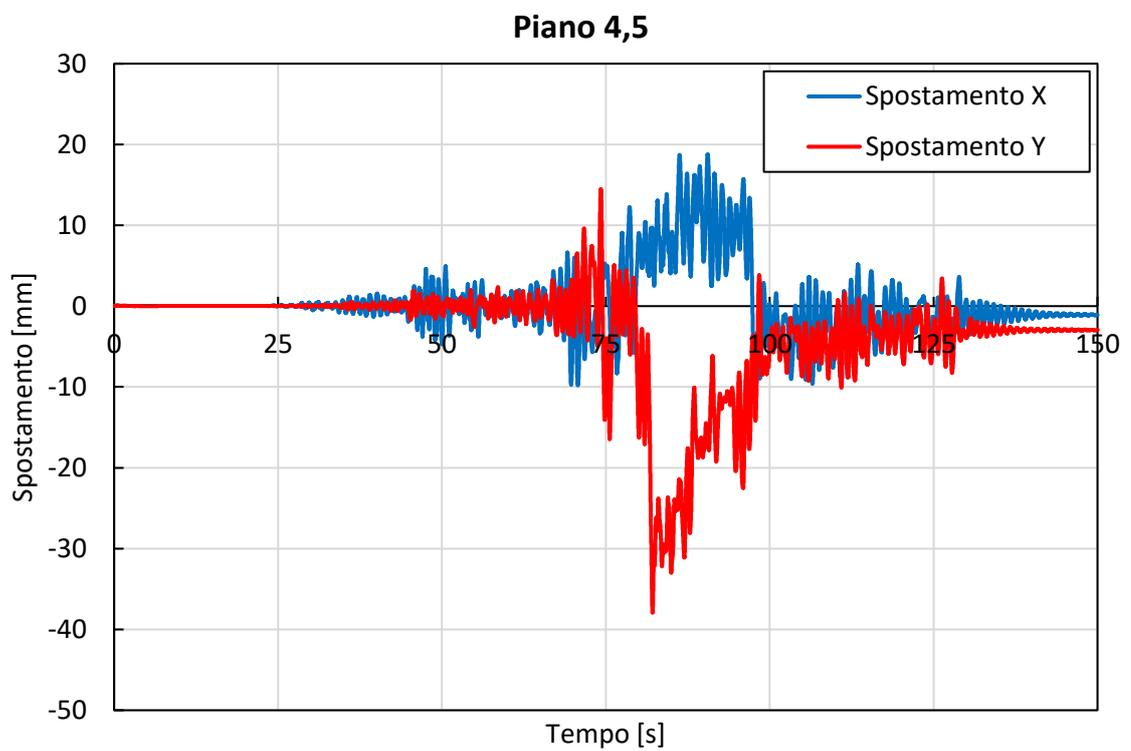
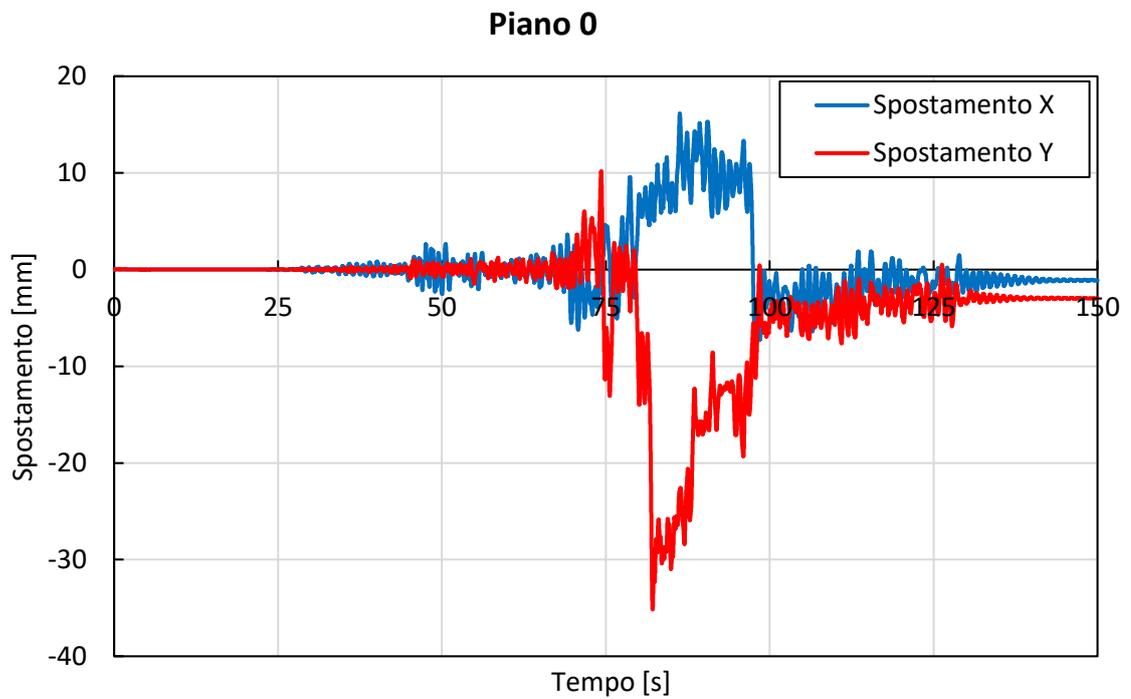
Un altro aspetto importante emerso dalle analisi fatte è l'importanza del valore della distanza di arresto che si attribuisce alla superficie di scorrimento che si attiva per prima.

Esso infatti deve essere tale da permettere l'attivazione di tutte le configurazioni dell'isolatore per poterne sfruttare le capacità. Inoltre variandone il valore si va a modificare in modo rilevante il comportamento complessivo, come dimostrato anche dal confronto dei cicli di isteresi.

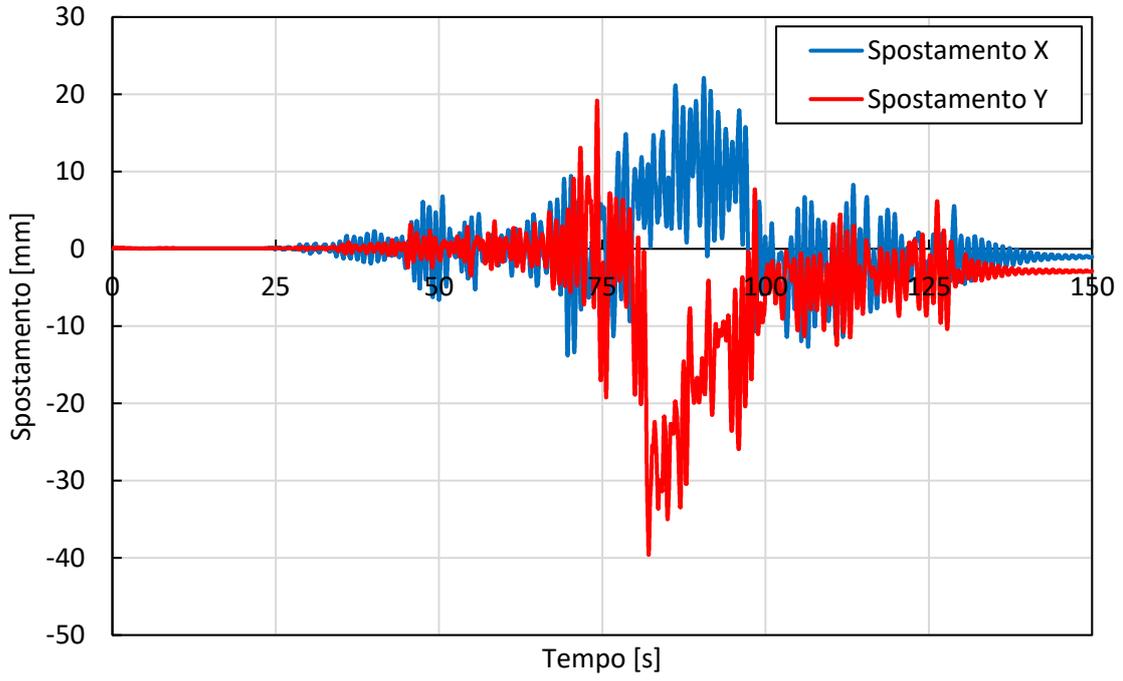
In questo elaborato si è anche visto come modellare questi tipi di dispositivi attraverso l'uso di programmi di calcolo agli elementi finiti e si è preso confidenza con le analisi dinamiche non lineari, in particolare con quella al passo con integrazione diretta e la FNA. Quest'ultima risulta utile soprattutto per poter condurre analisi di questo tipo su strutture grandi e che risultano quindi essere, dal punto di vista computazionale, molto pesanti. Prima di confrontare i risultati del modello semplificato, ottenuti facendo analisi al passo ad integrazione diretta, con quelli del modello completo, ricavati con analisi FNA, sono stati svolti dei controlli sul modello ad 1 grado di libertà per verificare che i risultati ottenuti con i due tipi diversi di analisi fossero uguali. Questa verifica non è stato possibile farla sul modello completo in quanto il peso computazionale dell'analisi al passo ad integrazione diretta non lo ha reso possibile.

APPENDICE A

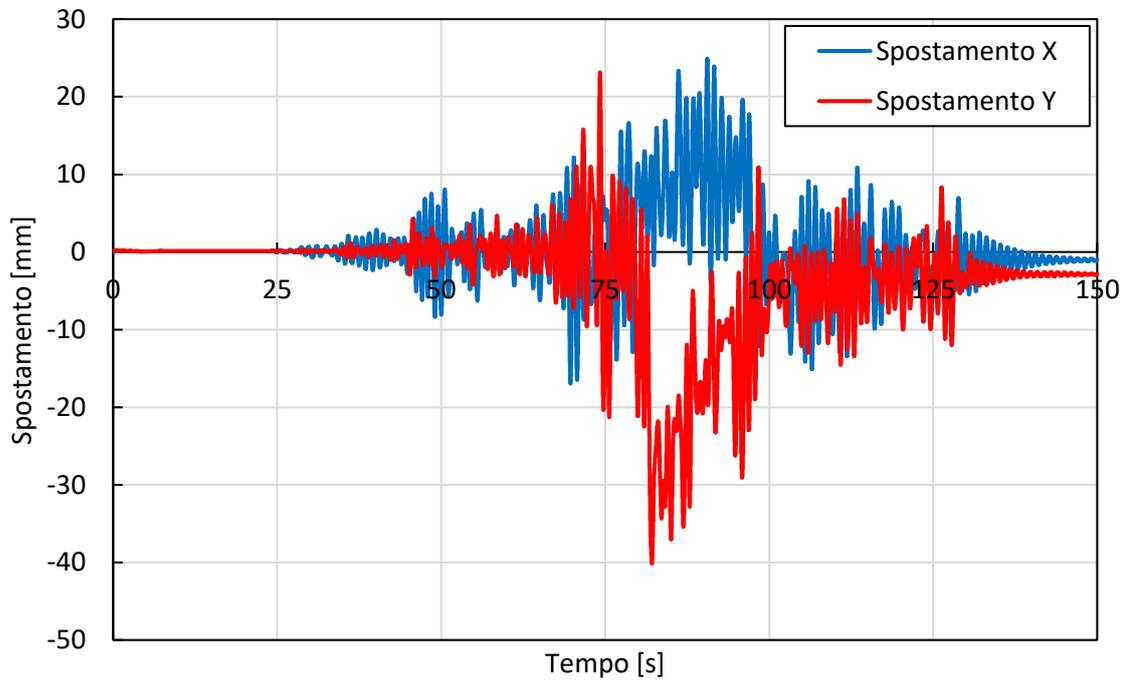
In questa appendice vengono riportati i grafici degli spostamenti di ogni piano dell'ospedale nel tempo.



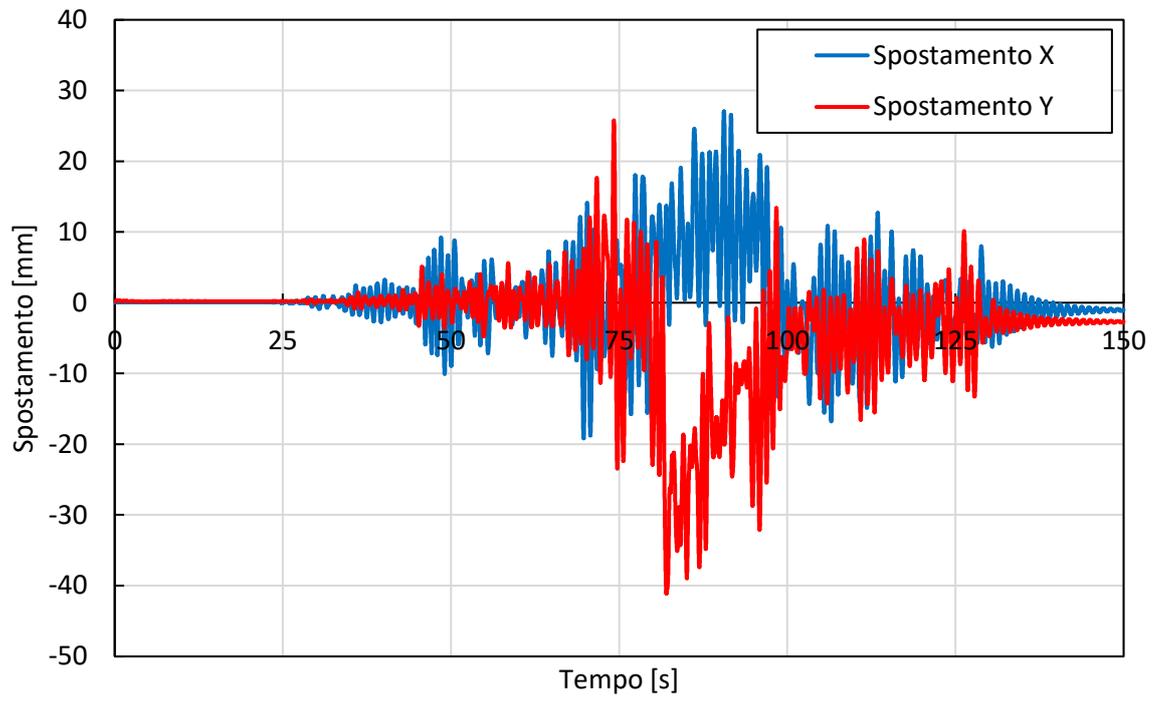
Piano 9



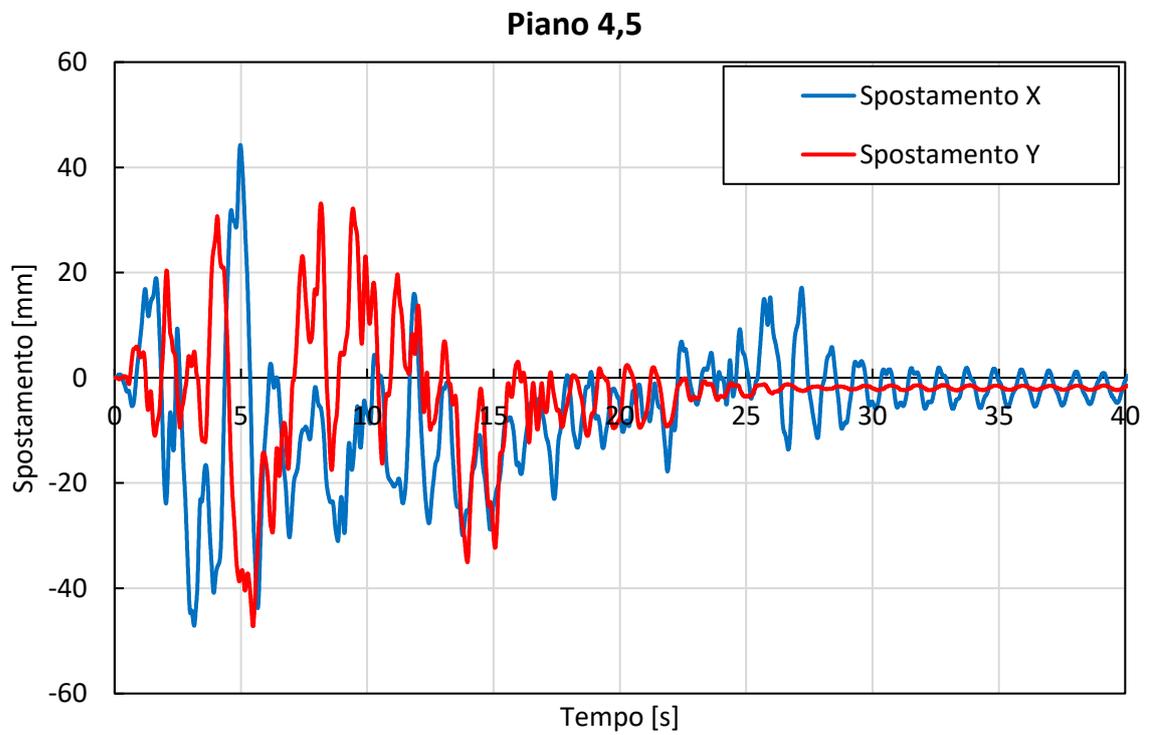
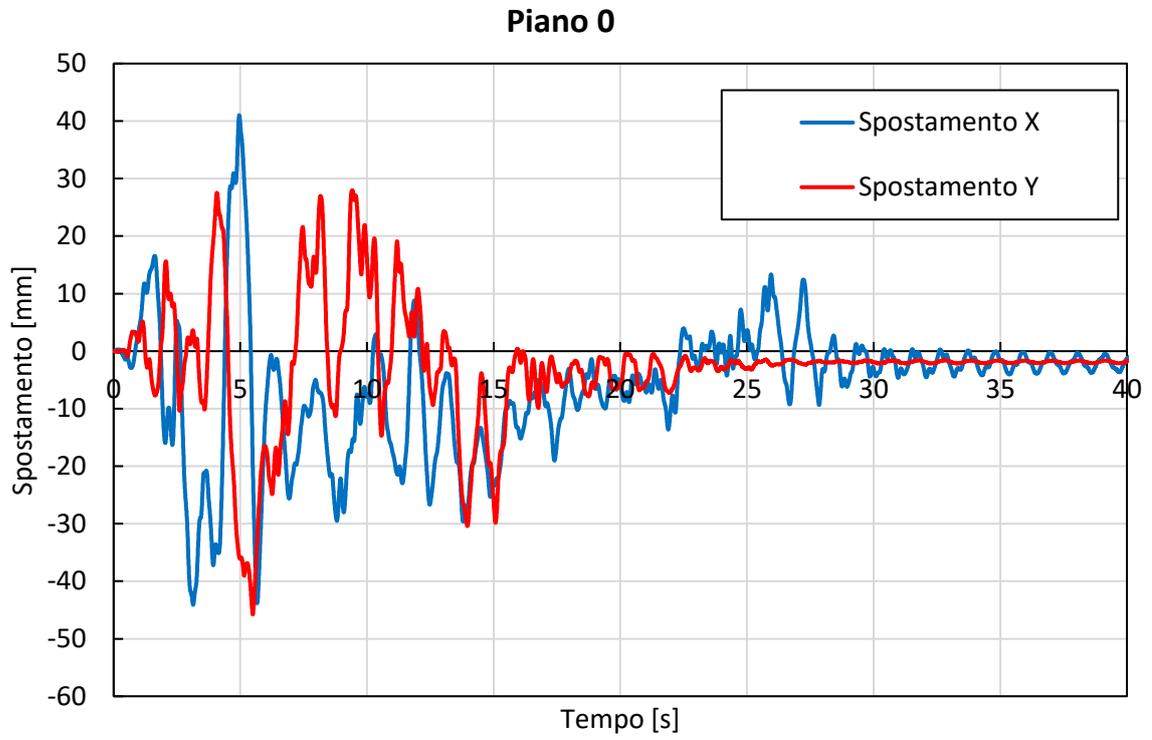
Piano 13,5



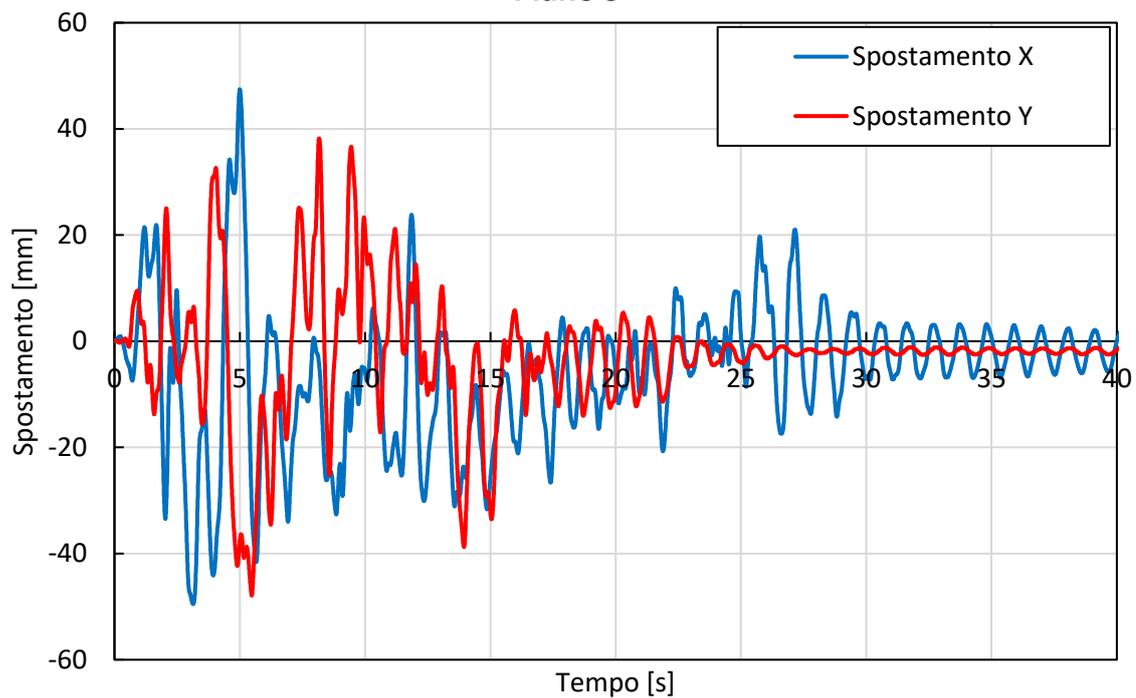
Piano 18



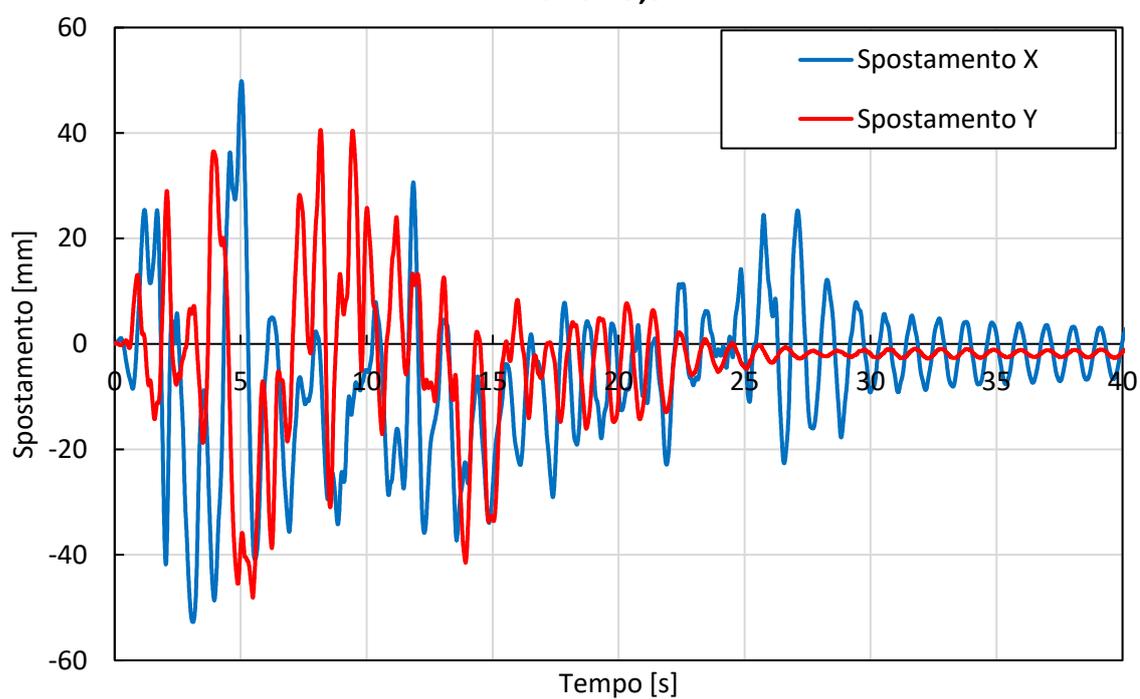
APPENDICE B



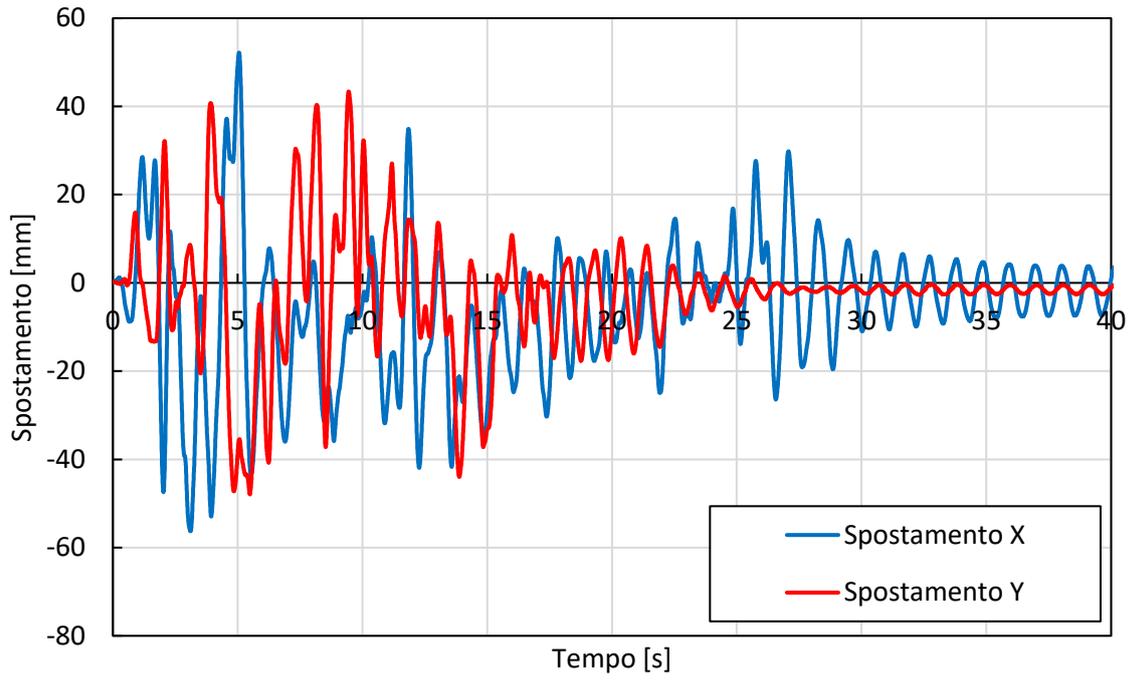
Piano 9



Piano 13,5

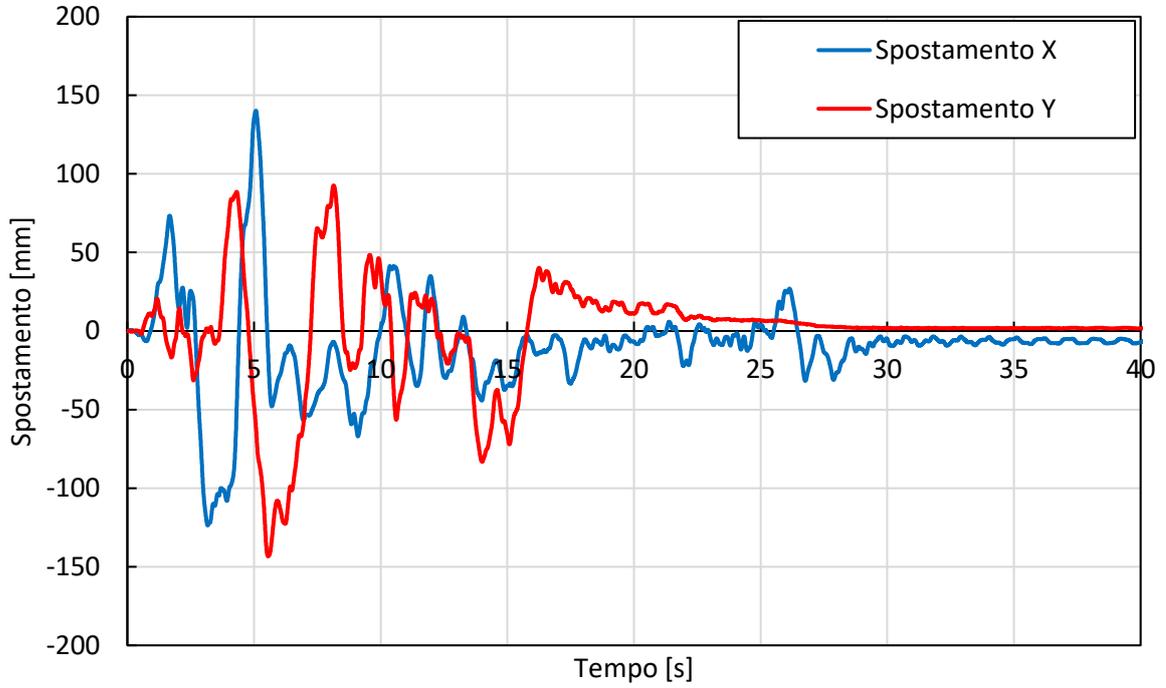


Piano 18

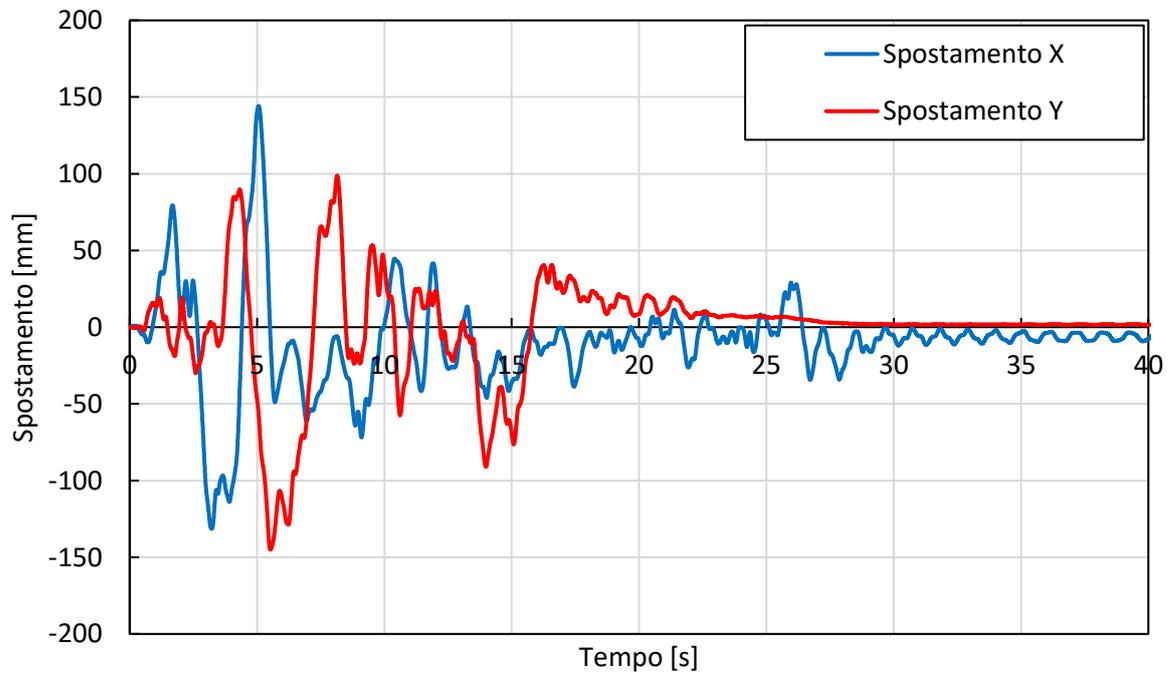


APPENDICE C

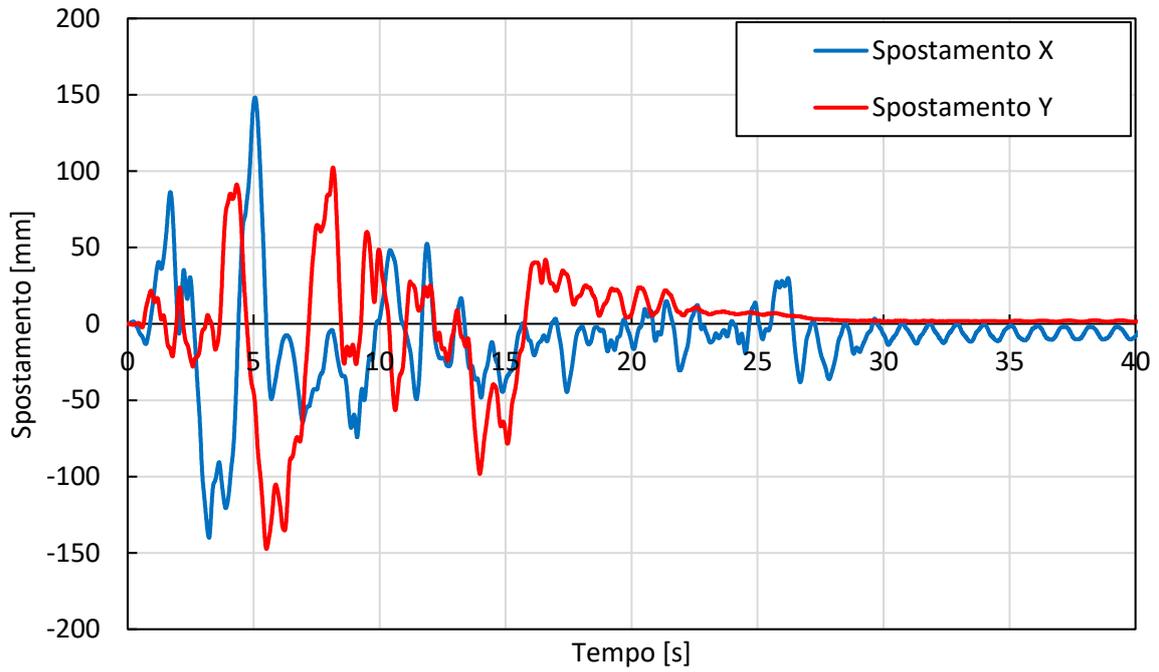
Piano 0



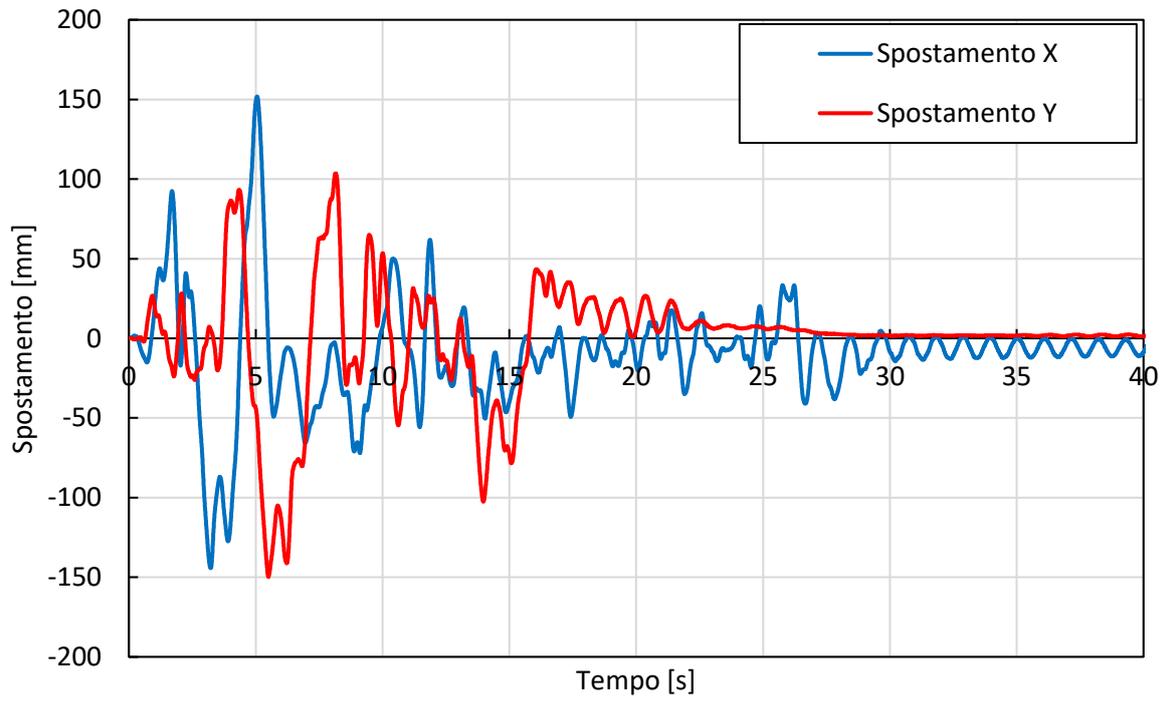
Piano 4,5



Piano 9



Piano 13,5



Piano 18

