

**INTERVENTI DI ADEGUAMENTO DELLA DIGA DI GIUDEA  
A GELLO NEL COMUNE DI PISTOIA (PT)**



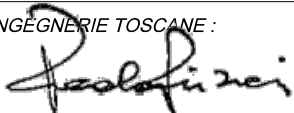
**PROGETTO DEFINITIVO**

Elaborato <b>ET09</b>	Nome Elaborato: <b>RELAZIONE VERIFICHE DI STABILITÀ SISMICHE MODELLO COMPLETO</b>	Scala: -
		Data: 27/12/2019

Settore:  <b>INGEGNERIE TOSCANE</b> <small>Organizzazione dotata di Sistema di Gestione Integrato certificato in conformità alle normative ISO9001 - ISO14001 - OHSAS18001 - SA8000</small>	Sede Firenze Via de Sanctis, 49 Cod. Fiscale e P.I. 06111950488
--	---

<b>PROGETTAZIONE :</b> <b>PROGETTISTA - PROJECT MANAGER :</b> <i>ING. GIOVANNI SIMONELLI</i> <b>GEOLOGO:</b> <b>DOTT.GEOL. FILIPPO LANDINI</b> <b>ESPROPRI:</b> <b>GEOM. ANDREA PATRIARCHI</b>	<b>COLLABORATORI :</b> <b>DOTT. GEOL. CARLO FERRI</b> <b>GEOM. MATTEO MASI</b>
---	--

<b>CONSULENTI TECNICI :</b>  <b>ING. DAVID SETTESOLDI</b>  <b>DOTT. GEOL. SIMONE FIASCHI</b>  <b>ING. GIOVANNI CANNATA</b>	<b>COMMESSA I.T. :</b> <b>INGT-TPLPD-PBAAC252</b>
---	--

<b>DIRETTORE TECNICO INGEGNERIE TOSCANE :</b>  <b>ING. PAOLO PIZZARI</b>	<b>RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO :</b> <b>ING. LEONARDO ROSSI</b>
--	--

Rev.	Data	Descrizione / Motivo della revisione	Redatto	Controllato / Approvato
01	27/12/2019	Prima Emissione	Catella	Settesoldi

## INDICE

<b>1</b>	<b>IL MODELLO NUMERICO .....</b>	<b>3</b>
1.1	DESCRIZIONE DEL MODELLO .....	3
1.2	CALIBRAZIONE DEL MODELLO.....	3
<b>2</b>	<b>IPOTESI DI CALCOLO.....</b>	<b>5</b>
2.1	MODELLAZIONE DEL TERRENO .....	5
2.1.1	<i>CARATTERISTICHE DEL TERRENO.....</i>	<i>5</i>
2.1.2	<i>IPOTESI DI DEGRADO CICLICO DEL MODULO E DELLA RESISTENZA A TAGLIO .....</i>	<i>5</i>
2.2	MODELLAZIONE DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI.....	6
2.3	SEGNALI DI INPUT SISMICO.....	7
<b>3</b>	<b>ELEBORAZIONE DEI RISULTATI .....</b>	<b>12</b>
3.1	ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA IN ACCELERAZIONE.....	12
3.2	ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA IN SPOSTAMENTO .....	17
3.3	VULNERABILITA' POST-SISMA .....	22
<b>4</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>24</b>

## ELENCO FIGURE

Figura 1-1 – Mesh adottata con gruppi di elementi piani. ....	4
Figura 1-2 – Gruppi di linee (vincoli e applicazione delle pressioni interstiziali).....	4
Figura 1-3 – Informazioni sulla mesh: numero di elementi (sx) e distribuzione della proporzione degli elementi (dx). ....	4
Figura 2-1 – Superfici di scorrimento principali evidenziate dalla mappa del degrado (in rosso). ....	6
Figura 2-2 – Degrado dinamico del terreno in termini di modulo di taglio (da [6])......	6
Figura 2-3 – Pressioni interstiziali di partenza.....	7
Figura 2-4 – Schema di applicazione del segnale sismico. L’accelerogramma fornito è a livello “free field”. Ciò genera un’ulteriore amplificazione del segnale, assunta in forma conservativa nell’applicazione al modello.....	7
Figura 2-5 – Segnali di input sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLO.....	8
Figura 2-6 – Segnali di input sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLD. ....	9
Figura 2-7 – Segnali di input sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLV. ....	10
Figura 2-8 – Segnali di input sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLC. ....	11
Figura 3-1 – Raffronto tra segnale di input (in blu) e segnale di output (in arancione con trasparenza), mediato sul corpo della diga, in termini di storia (sx) e in termini di spettro (dx), per il segnale SLV M3. Da notare l’amplificazione attorno al periodo di risposta del sistema (tra 0.4s e 0.5s), che assume un valore medio di circa 1.68. ....	12
Figura 3-2 – Segnali di output sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLO. ....	13
Figura 3-3 – Segnali di output sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLO. ....	14
Figura 3-4 – Segnali di output sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLV.....	15
Figura 3-5 – Segnali di output sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLC.....	16
Figura 3-6 – Evoluzione del degrado lungo le superfici di scorrimento durante il segnale sismico SLC M3. (a) t = 0 s, (b) t = 3 s, (c) t = 4 s, (d) t = 5 s, (e) t = 6 s, (f) t = istante finale del segnale.....	17
Figura 3-7 – Segnali di output sismico in termini di spostamenti in sommità e spettro di risposta allo SLO. ....	18
Figura 3-8 – Segnali di output sismico in termini di spostamenti in sommità e spettro di risposta allo SLD. ....	19
Figura 3-9 – Segnali di output sismico in termini di spostamenti in sommità e spettro di risposta allo SLV.. ....	20
Figura 3-10 – Segnali di output sismico in termini di spostamenti in sommità e spettro di risposta allo SLC. ....	21
Figura 3-11 – Spostamenti post-risma (magnitudo) con FS = 1.2 per il segnale SLC M3. ....	22
Figura 3-12 – Superfici di scorrimento con FS = 1.2 per il segnale SLC M3. ....	22
Figura 3-13 – Prosecuzione delle analisi post-sisma con fattore di sicurezza FS = 1.2 applicato dopo il segnale sismico, per una durata di 100 s (in condizioni quasi-statiche). ....	23

## ELENCO TABELLE

Tabella 2-1 – Caratteristiche geotecniche del terreno.....	5
Tabella 2-2 – Caratteristiche geotecniche del terreno.....	6

## 1 IL MODELLO NUMERICO

Il modello numerico implementato per la diga di Giudea a Gello (PT) viene utilizzato per i seguenti scopi:

- Valutare la stabilità del sistema in condizioni sismiche;
- Valutare gli spostamenti in cresta in condizioni sismiche;
- Valutare la stabilità del corpo della diga in condizioni di post-sisma.

Il codice di calcolo adottato è il codice agli Elementi Finiti **code\_aster**, utilizzato dalla casa madre EDF e validato negli ambiti di applicazione dell'ingegneria civile e, nello specifico, sui geo-materiali ([1], [2]). La geometria, le condizioni iniziali e al contorno, i segnali sismici e le caratteristiche meccaniche implementate per il comportamento della diga sono fornite da WestSystems Srl.

### 1.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO

Il modello della diga è stato utilizzato per l'analisi dinamica non lineare della risposta a 28 input sismici (7 per ogni stato limite come indicato dalla normativa vigente) generati per la zona ove sorge l'opera.

La modellazione THM (Thermo-Hydraulique-Mecanique, [3]) permette lo studio dell'evoluzione del comportamento di materiali porosi saturi o insaturi. Il terreno viene quindi trattato come un materiale che è soggetto al degrado delle proprie caratteristiche meccaniche in funzione del grado di danno che si sviluppa durante l'applicazione della sorgente esterna.

La tipologia di elemento finito adottato (D\_PLAN\_HM\_SI, [4]) all'interno del dominio discretizzato, ovvero la mesh (Figura 1-1), riproduce lo stato di deformazione piana. Data la natura non-lineare del problema, viene adottata la tipologia di elemento triangolare quadratico (ovvero con punti di risoluzione supplementari tra i nodi ai vertici), per un totale di 6 nodi per ciascun elemento.

Ognuna delle 28 analisi dinamiche si svolgono in tre diverse fasi:

- In una prima fase viene applicato il peso proprio e le pressioni interstiziali statiche;
- Successivamente il sistema viene eccitato dal rispettivo input sismico, campionato a 100 Hz, come in originariamente fornito;
- Da ultimo si effettua una verifica post sisma applicando ai carichi statici un fattore di sicurezza FS pari a 1.2 (a moltiplicare i carichi gravitazionali).

### 1.2 CALIBRAZIONE DEL MODELLO

Col fine di ridurre l'onere computazionale è stato creato un modello della sezione in oggetto con estensione degli strati per 50 metri sia a monte che a valle valutando i modi di vibrare e le relative frequenze attraverso un'analisi modale. Successivamente è stato costruito un modello ridotto alle cui estremità (a monte e a valle) sono stati introdotti due strati (che si estendono per tutta l'altezza della diga) i cui moduli elastici sono stati calibrati attraverso un'analisi parametrica in modo tale che le frequenze proprie associate alle prime forme modali di entrambi i sistemi fossero uguali (circa 0.45 Hz).

Di seguito si riporta il modello finale adottato con la definizione dei gruppi dei vincoli, delle pressioni interstiziali e dei diversi strati di terreno. Vengono inoltre riportate alcune informazioni relative al numero di elementi e alla qualità della mesh.

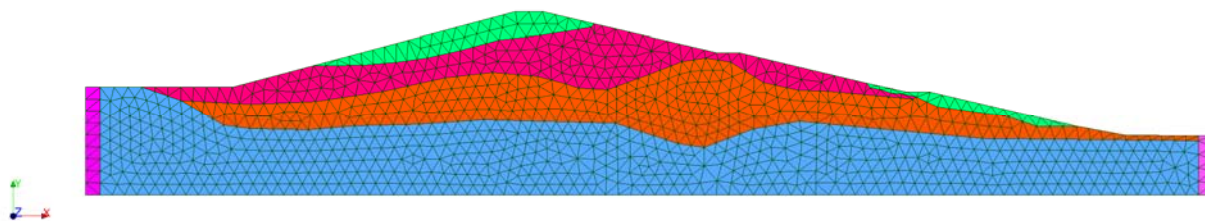


Figura 1-1 – Mesh adottata con gruppi di elementi piani.



Figura 1-2 – Gruppi di linee (vincoli e applicazioni delle pressioni interstiziali).

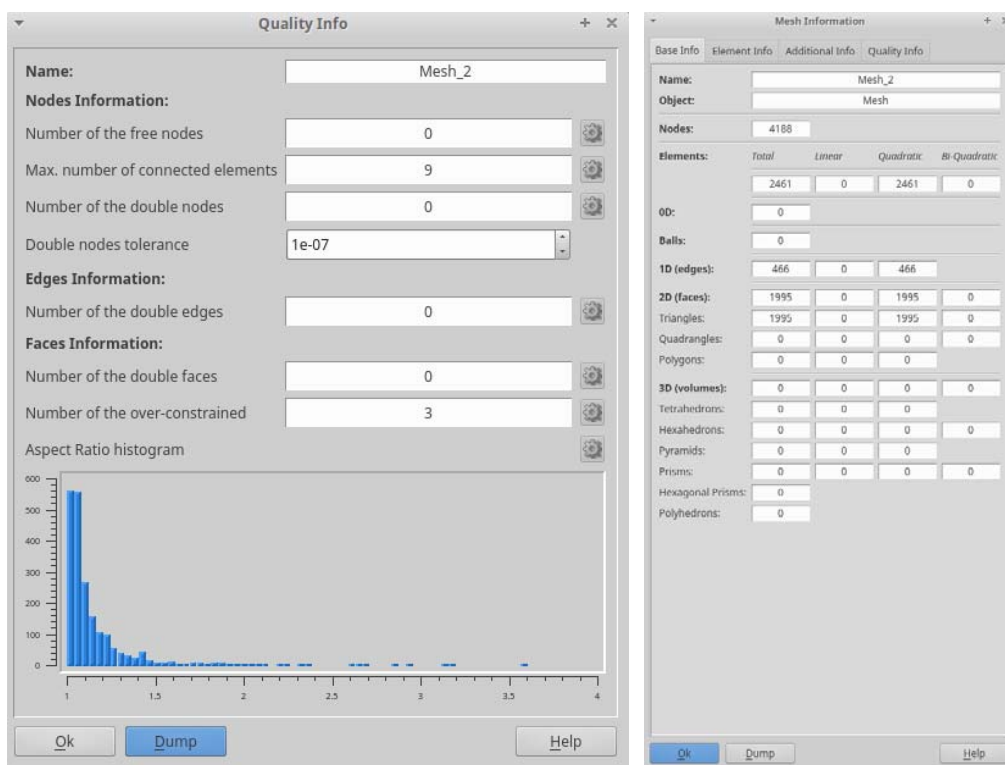


Figura 1-3 –Informazioni sulla mesh: numero di elementi (sx) e distribuzione della proporzione degli elementi (dx).

## 2 IPOTESI DI CALCOLO

Si riassumono in questo capitolo le ipotesi di calcolo per il modello numerico implementato. Nello specifico si tratta:

- La modellazione meccanica del terreno, incluso il suo comportamento degradativo;
- La modellazione delle pressioni interstiziali nella fase liquida contenuta nel terreno;
- La caratterizzazione degli input sismici in termini di accelerogrammi.

### 2.1 MODELLAZIONE DEL TERRENO

La modellazione meccanica del terreno è assunta secondo il modello di Mohr-Coulomb. I parametri di degrado dinamico-ciclico sono assunti conservativamente a priori.

#### 2.1.1 CARATTERISTICHE DEL TERRENO

Le caratteristiche del terreno fornite per il calcolo sono riassunte nella seguente tabella e individuano le proprietà di base per la caratterizzazione del comportamento meccanico del terreno, secondo la stratigrafia proposta.

Proprietà	Descrizione	UDM	LA	AL	LA2	SUB
$K_0$	<i>modulo di compressibilità</i>	[MPa]	401,2	759,3	1274	12122
$E_0$	<i>Modulo elastico</i>	[MPa]	231,5	400,5	735,4	1810,8
$G_0$	<i>modulo di taglio</i>	[MPa]	82,44	141,80	147	599
$\nu_0$	<i>coefficiente di Poisson</i>	[MPa]	0,40	0,41	0,44	0,46
$\rho$	<i>densità del materiale</i>	[kg/m <sup>3</sup> ]	2044,5	1935,5	2109,0	2169,3
$\phi$	<i>angolo di attrito interno</i>	[°]	21,6	24,2	23,4	23,6
$\psi$	<i>angolo di dilatanza</i>	[°]	21,6	24,2	23,4	23,6
$c'$	<i>coesione efficace</i>	[MPa]	0,024	0,023	0,022	0,024
$c_u$	<i>coesione non drenata</i>	[MPa]	0,074	0,076	0,073	0,146
$e$	<i>porosità</i>	[%]	31,85	34,94	30,4	32,3
$p$	<i>permeabilità</i>	[m/s]	1,00E-07	1,00E-08	1,00E-07	1,00E-08

Tabella 2-1 – Caratteristiche geotecniche del terreno.

#### 2.1.2 IPOTESI DI DEGRADO CICLICO DEL MODULO E DELLA RESISTENZA A TAGLIO

In funzione del comportamento ciclico del materiale, è possibile ipotizzare un degrado delle caratteristiche meccaniche adottate. Tale degrado si può adottare sul modulo di taglio ( $G$ ), sugli angoli di attrito e dilatanza ( $\phi$ ,  $\psi$ ) e sulla resistenza a coesione ( $c'$ ,  $c_u$ ).

In particolare, si possono individuare le superfici di scorrimento (Figura 2-1), lungo cui valutare il comportamento oscillatorio del materiale. Assumendo lungo tali superfici dei cicli di deformazione a taglio contenuti, in media, tra lo 0.1% e l'1%, si può assumere cautelativamente un degrado del modulo di taglio che abbatta il suo valore al **35%** di quello stimato in condizioni vergini (Figura 2-2).

Analogamente, con le medesime ipotesi sulle superfici di scorrimento, si può stimare che la risposta in termini tensionali sia affetta dalla ciclicità delle deformazioni e dalla frequenza della

risposta del sistema. In questo caso l'abbattimento porta ad adottare un valore delle caratteristiche di resistenza pari all'**85%** di quelle originarie.

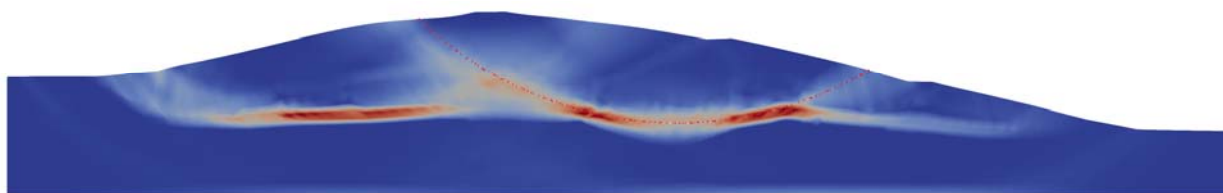


Figura 2-1 – Superfici di scorrimento principali evidenziate dalla mappa del degrado (in rosso).

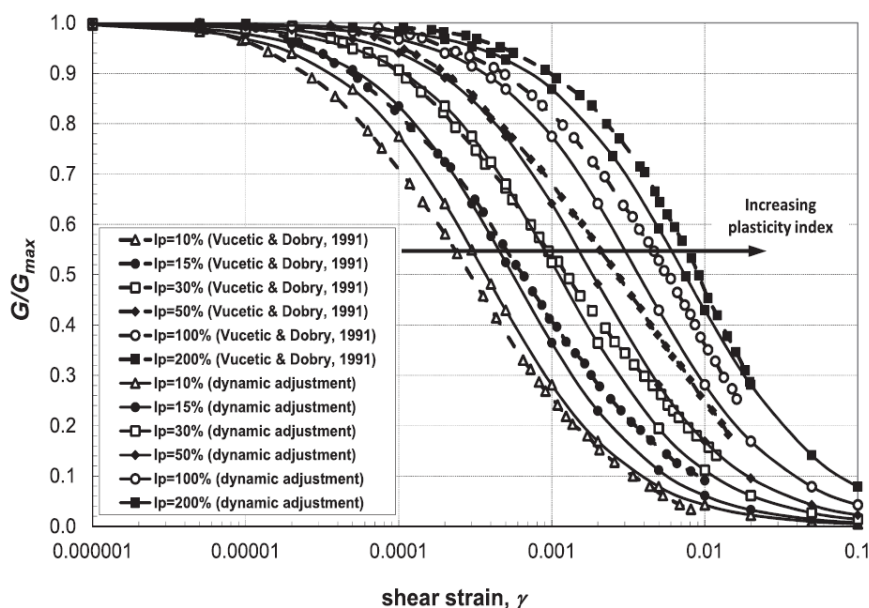


Figura 2-2 – Degrado dinamico del terreno in termini di modulo di taglio (da [6]).

## 2.2 MODELLAZIONE DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI

Le proprietà riguardanti il comportamento della fase liquida nel modello sono assunte da letteratura come valori standard, riassunti nella tabella seguente.

Proprietà	Descrizione	UDM	LIQ
B	coefficiente di Biot	[-]	1,00
$1/K_w$	compressibilità del liquido	[1/MPa]	5,00E-07
$c_{visc}$	viscosità del liquido	[MPa*s]	1,00E-09
$d_{visc,t}$	derivata della viscosità in funzione di T	[MPa*s/°]	0,00
$\rho_w$	densità del liquido	[kg/m <sup>3</sup> ]	1000,0

Tabella 2-2 – Caratteristiche geotecniche del terreno.

Si assume, inoltre, una distribuzione delle pressioni interstiziali iniziale, così come fornita e rappresentata nelle immagini sottostanti (Figura 2-3). Si ravvisa come l'effetto delle pressioni

interstiziali sia influente maggiormente in condizioni di calcolo drenate, quando la resistenza è regolata anche dalla pressione efficace.

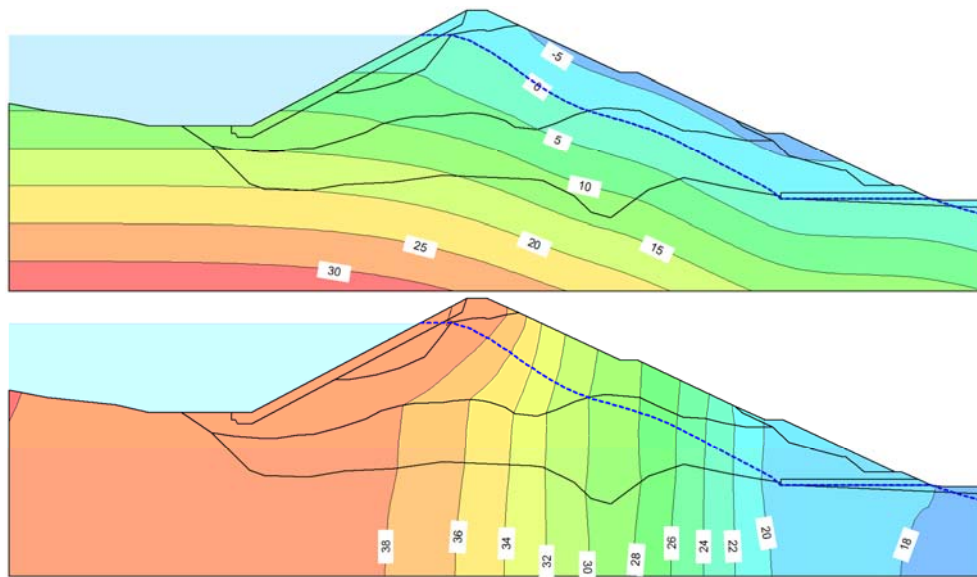


Figura 2-3 – Pressioni interstiziali di partenza.

La spinta idrodinamica dell'acqua contenuta viene valutata in forma cautelativa come pari a quella dinamica per un coefficiente amplificativo dinamico pari a 1.7. Risulta, ad ogni modo, di un'entità trascurabile rispetto all'azione sismica.

### 2.3 SEGNALI DI INPUT SISMICO

Di seguito si propongono illustrati i segnali sismici adottati per il calcolo in termini di analisi dinamica non lineare del sistema. I segnali sono identici a quelli forniti, con l'eliminazione della parte iniziale di rumore, ove esistente, e con l'aggiunta di una coda a valore costante nullo di durata pari a 5 s, ove poter osservare il comportamento a oscillazioni libere del sistema. Il segnale è applicato al livello di vincolo (circa al livello del "bedrock") e dunque risulta filtrato dagli strati soprastanti, generando un'ulteriore amplificazione rispetto al segnale "free field".

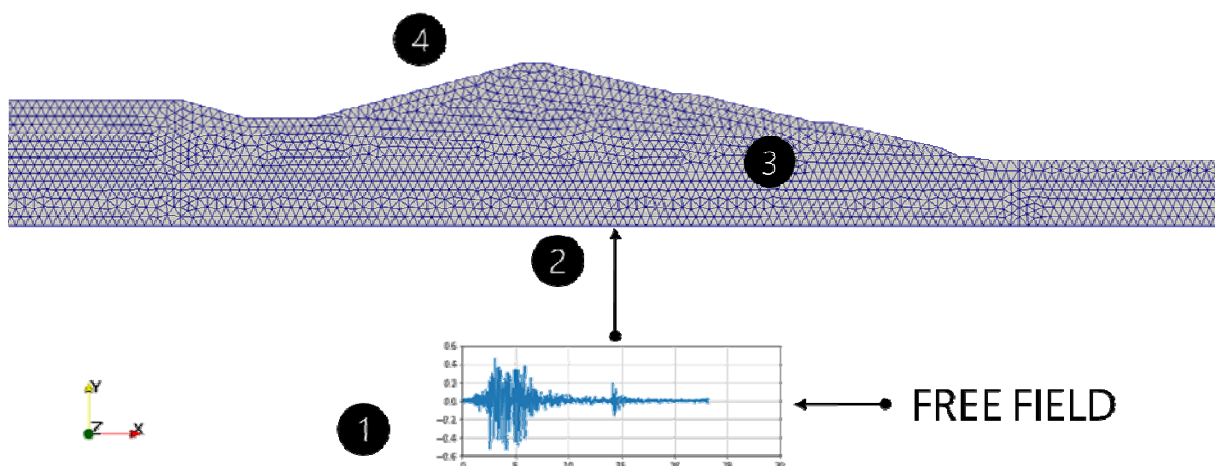


Figura 2-4 – Schema di applicazione del segnale sismico. L'accelerogramma fornito è a livello "free field". Ciò genera un'ulteriore amplificazione del segnale, assunta in forma conservativa nell'applicazione al modello.



### SLO

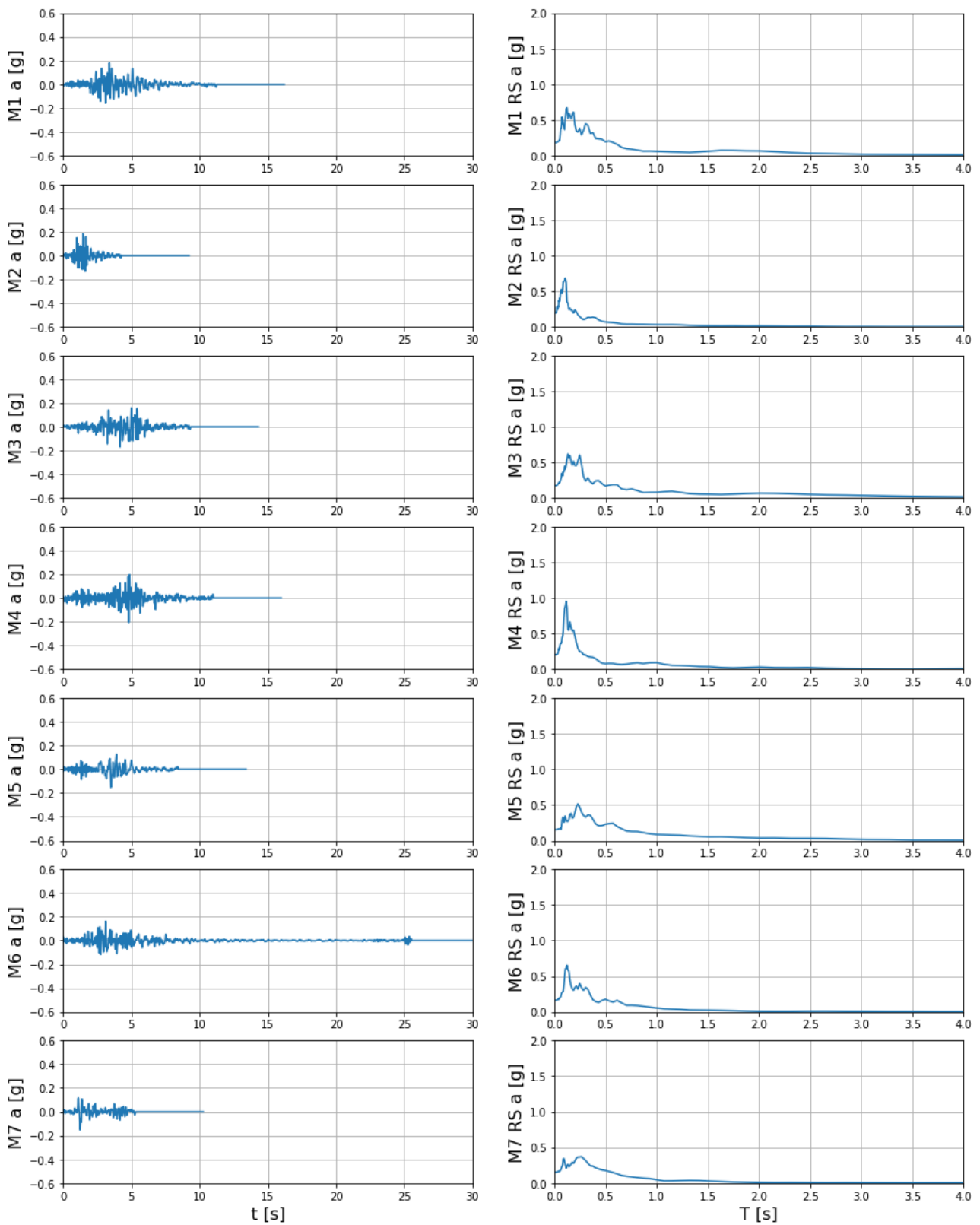


Figura 2-5 – Segnali di input sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLO.

### SLD

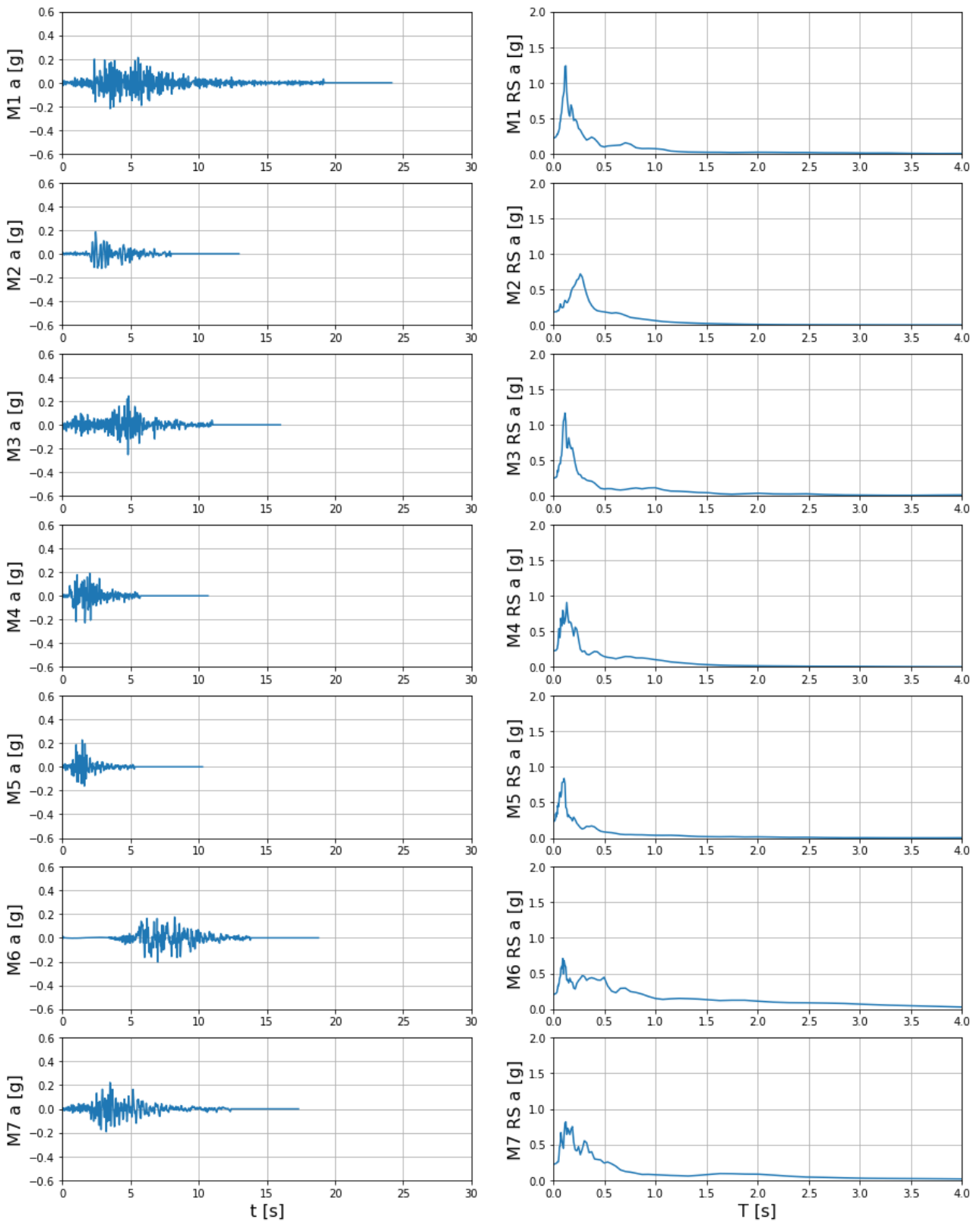


Figura 2-6 – Segnali di input sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLD.

### SLV

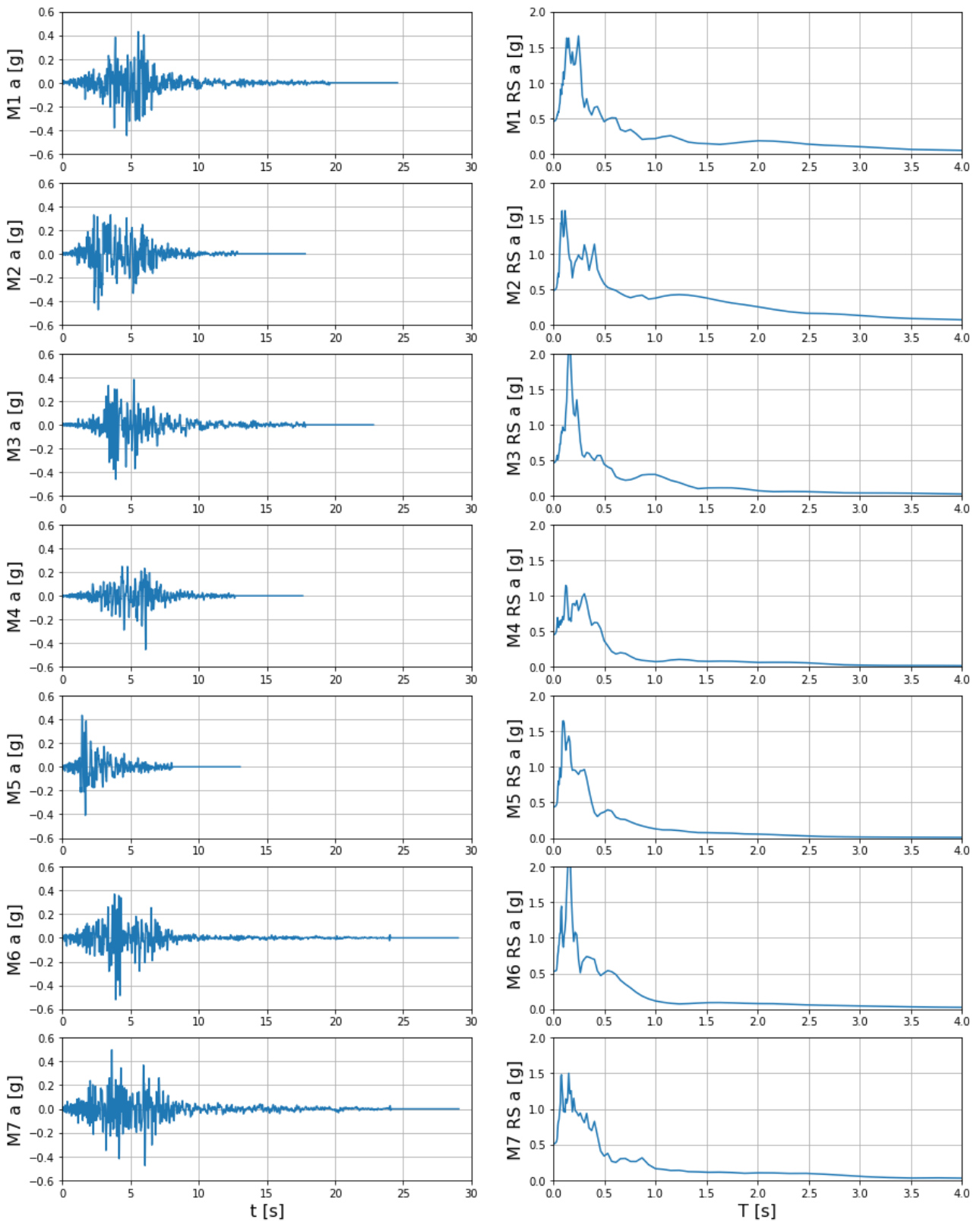


Figura 2-7 – Segnali di input sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLV.

### SLC

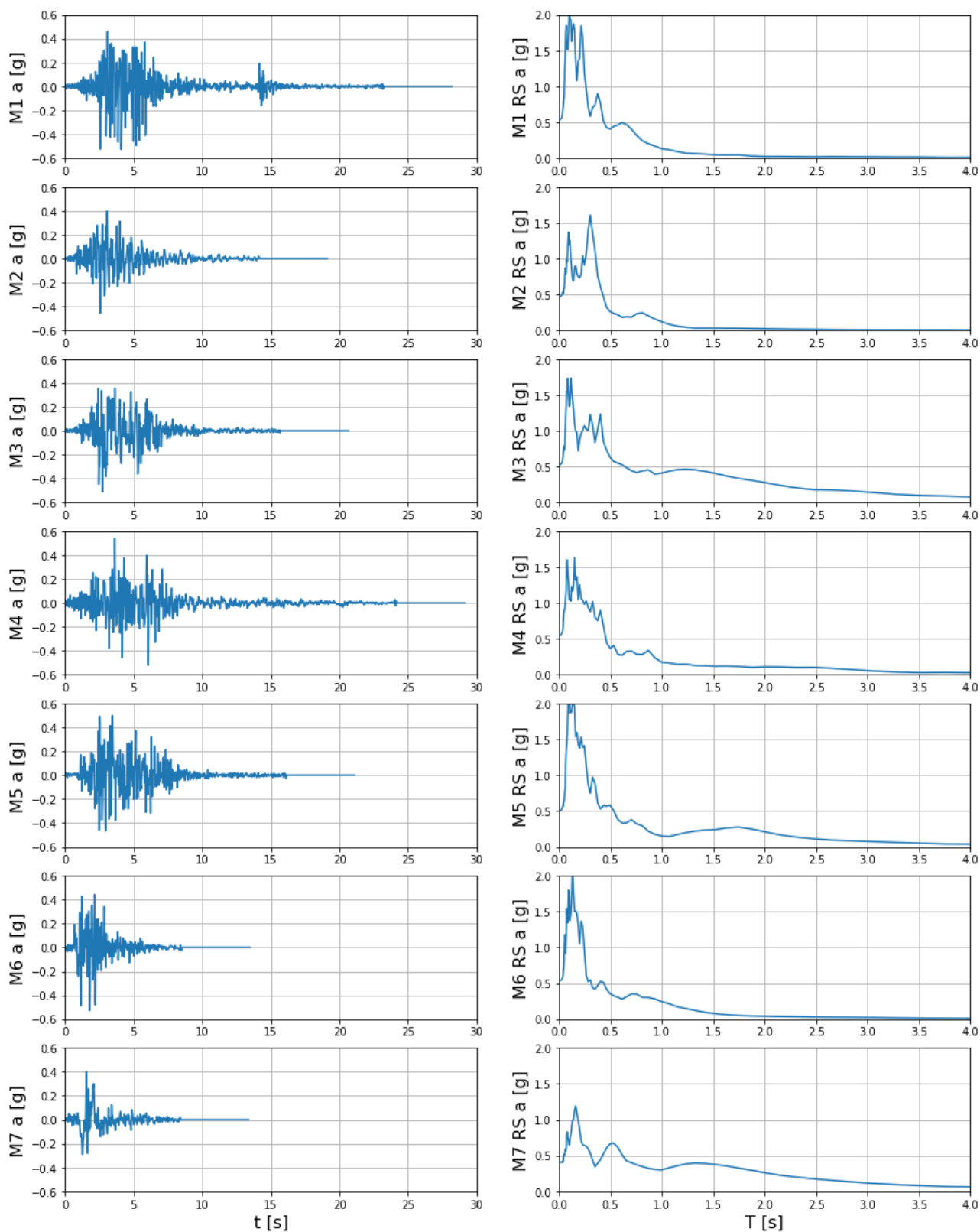


Figura 2-8 – Segnali di input sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLC.

### 3 ELEBORAZIONE DEI RISULTATI

Il post-trattamento dei dati è necessario per verificare le condizioni illustrate in partenza come obiettivo finale delle analisi:

- Valutare la stabilità del sistema in condizioni sismiche;
- Valutare gli spostamenti in cresta in condizioni sismiche;
- Valutare la stabilità del corpo della diga in condizioni di post-sisma.

Il primo punto può essere assunto come implicito rispetto al secondo, mentre il terzo punto si può valutare attraverso l'esistenza o meno dell'equilibrio del sistema nel caso dell'applicazione di un fattore di sicurezza rispetto alle condizioni di equilibrio raggiunte alla fine del segnale sismico.

Nei seguenti paragrafi si tratterà la risposta in condizioni **non drenate**, poiché risulta la più critica.

#### 3.1 ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA IN ACCELERAZIONE

Si riassumono in questo paragrafo le risposte sismiche in termini di accelerazione orizzontale, mediate sul corpo interessato dallo scorrimento. In particolare, si vuole ottenere la rappresentazione della risposta del sistema raffrontata con il segnale di input (Figura 3-1).

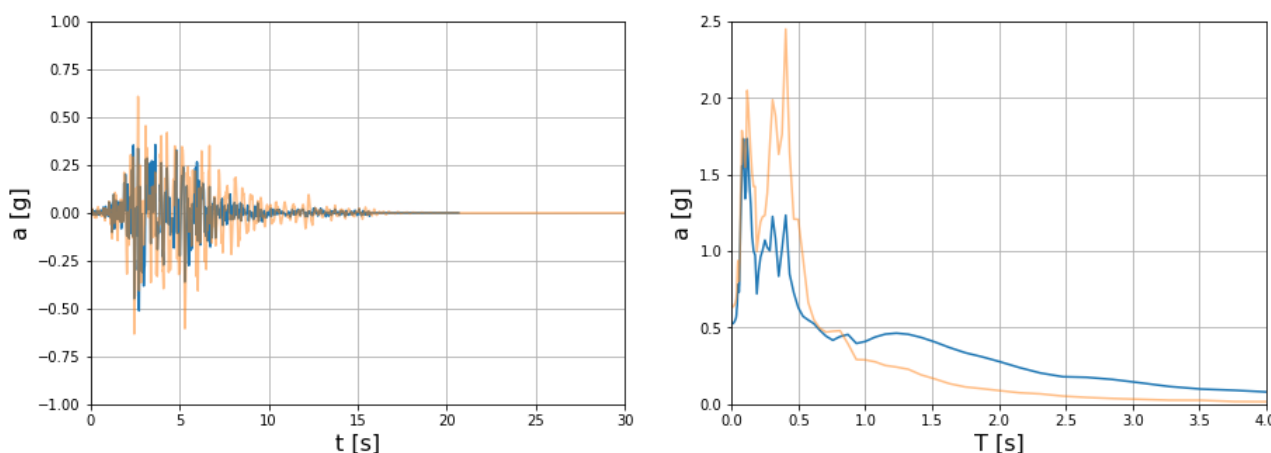


Figura 3-1 – Raffronto tra segnale di input (in blu) e segnale di output (in arancione con trasparenza), mediato sul corpo della diga, in termini di storia (sx) e in termini di spettro (dx), per il segnale SLV M3. Da notare l'amplificazione attorno al periodo di risposta del sistema (tra 0.4s e 0.5s), che assume un valore medio di circa 1.68.

Si può notare come l'amplificazione raggiunga valori notevoli attorno al periodo di oscillazione del sistema, con un valore medio pari a circa 1.68. Da ciò si evince come l'approccio possa essere considerato conservativo.

Di seguito saranno illustrati i dati di output per ciascun segnale.

### SLO

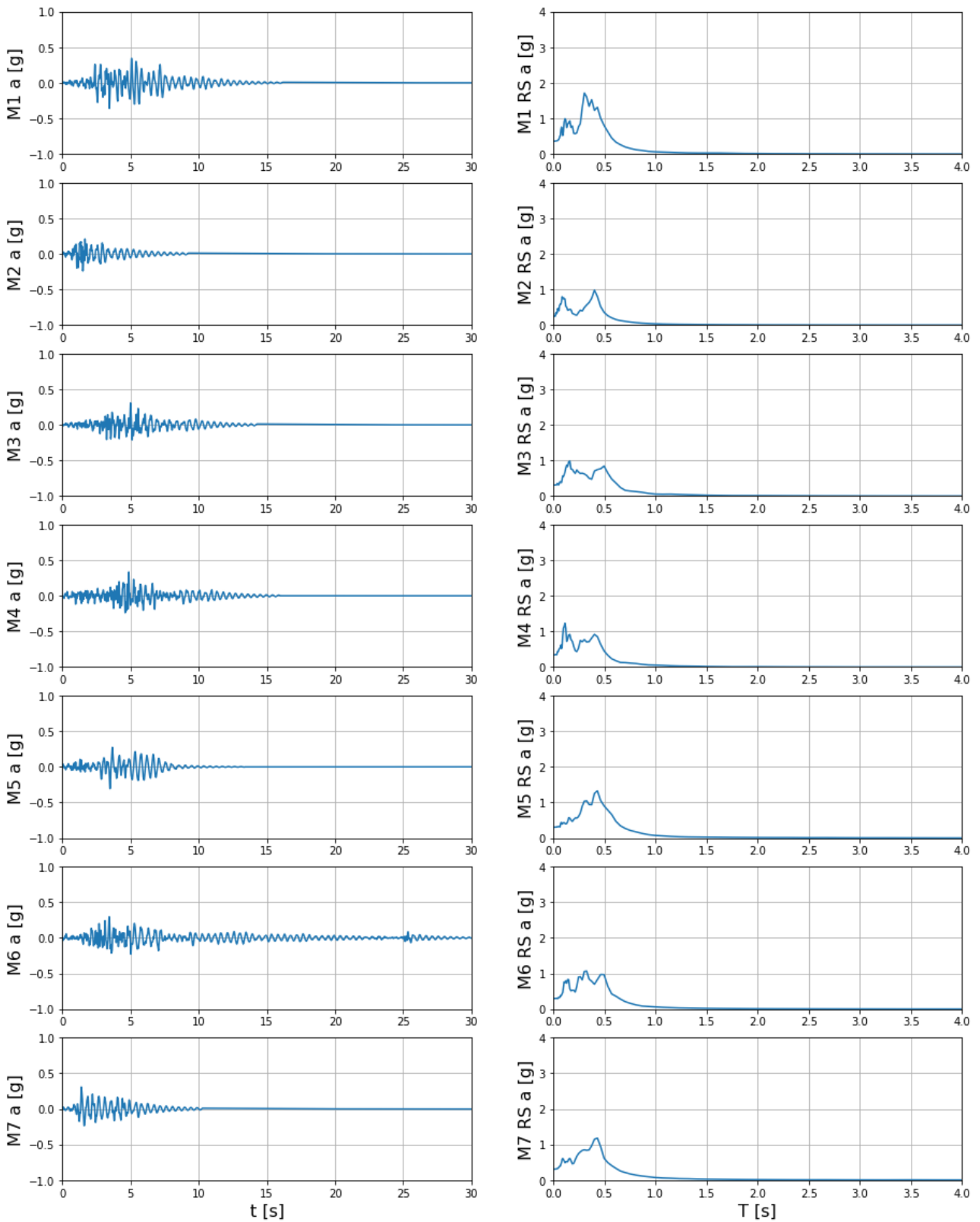


Figura 3-2 – Segnali di output sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLO.

### SLD

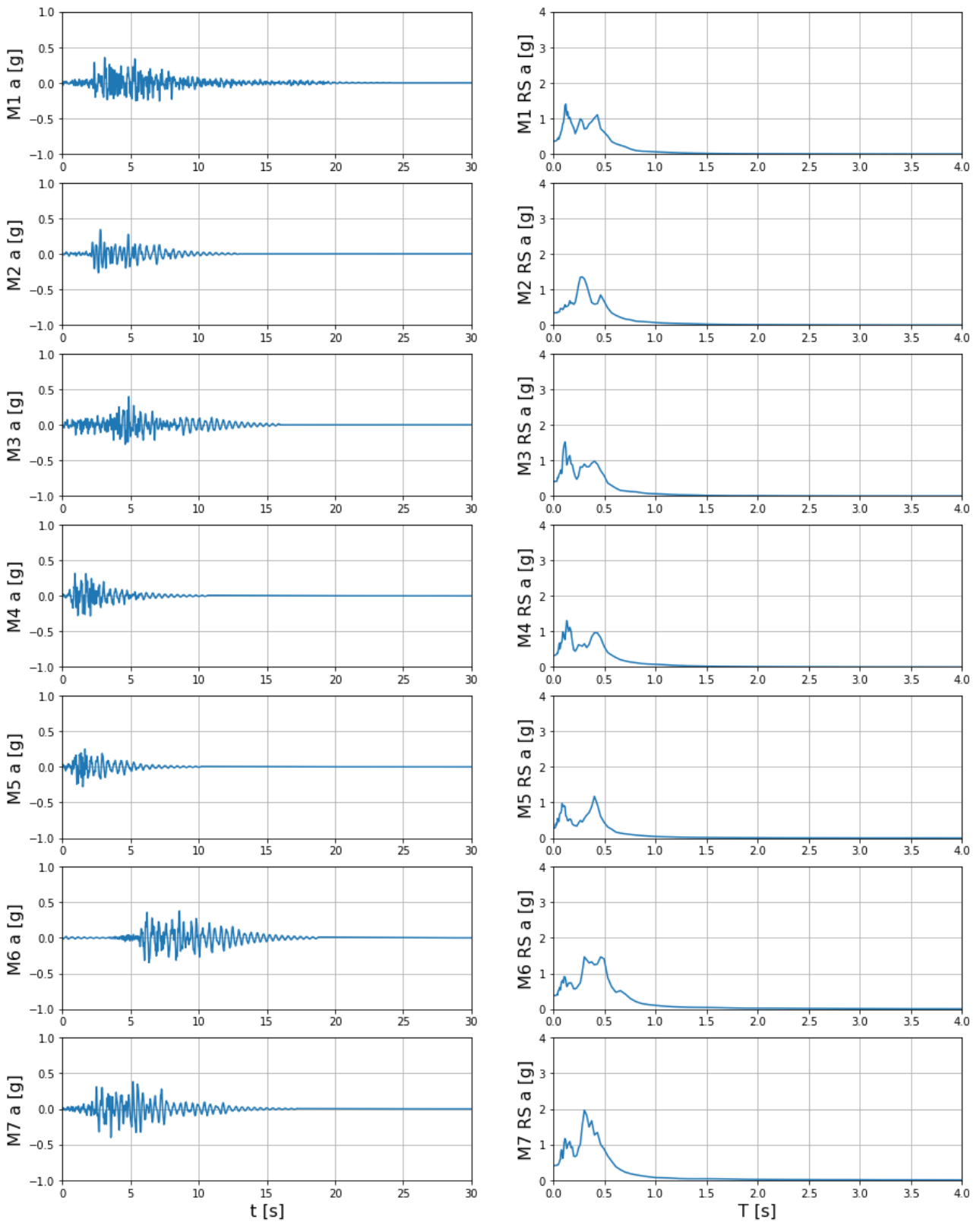


Figura 3-3 – Segnali di output sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLD.

### SLV

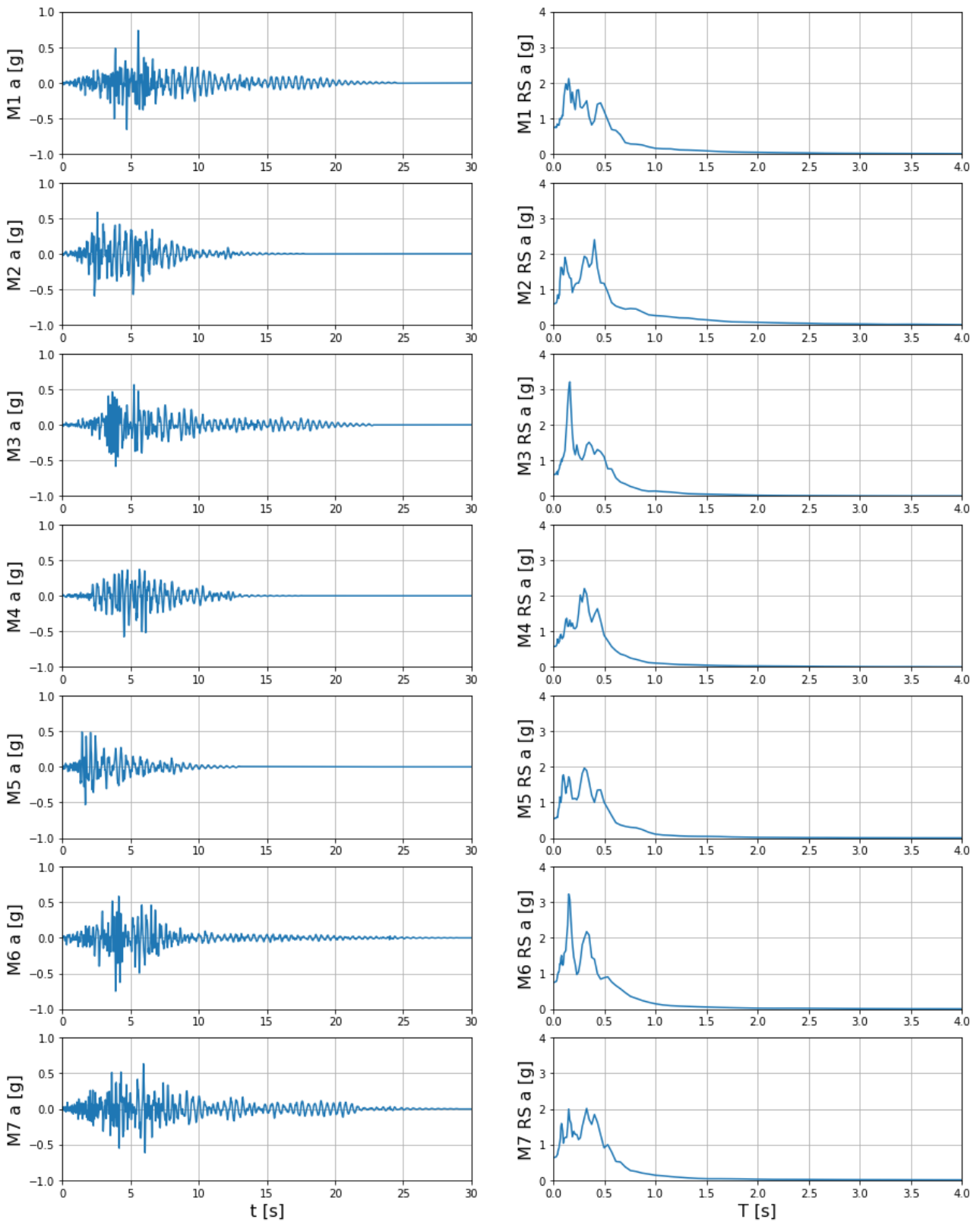


Figura 3-4 – Segnali di output sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLV.



### SLC

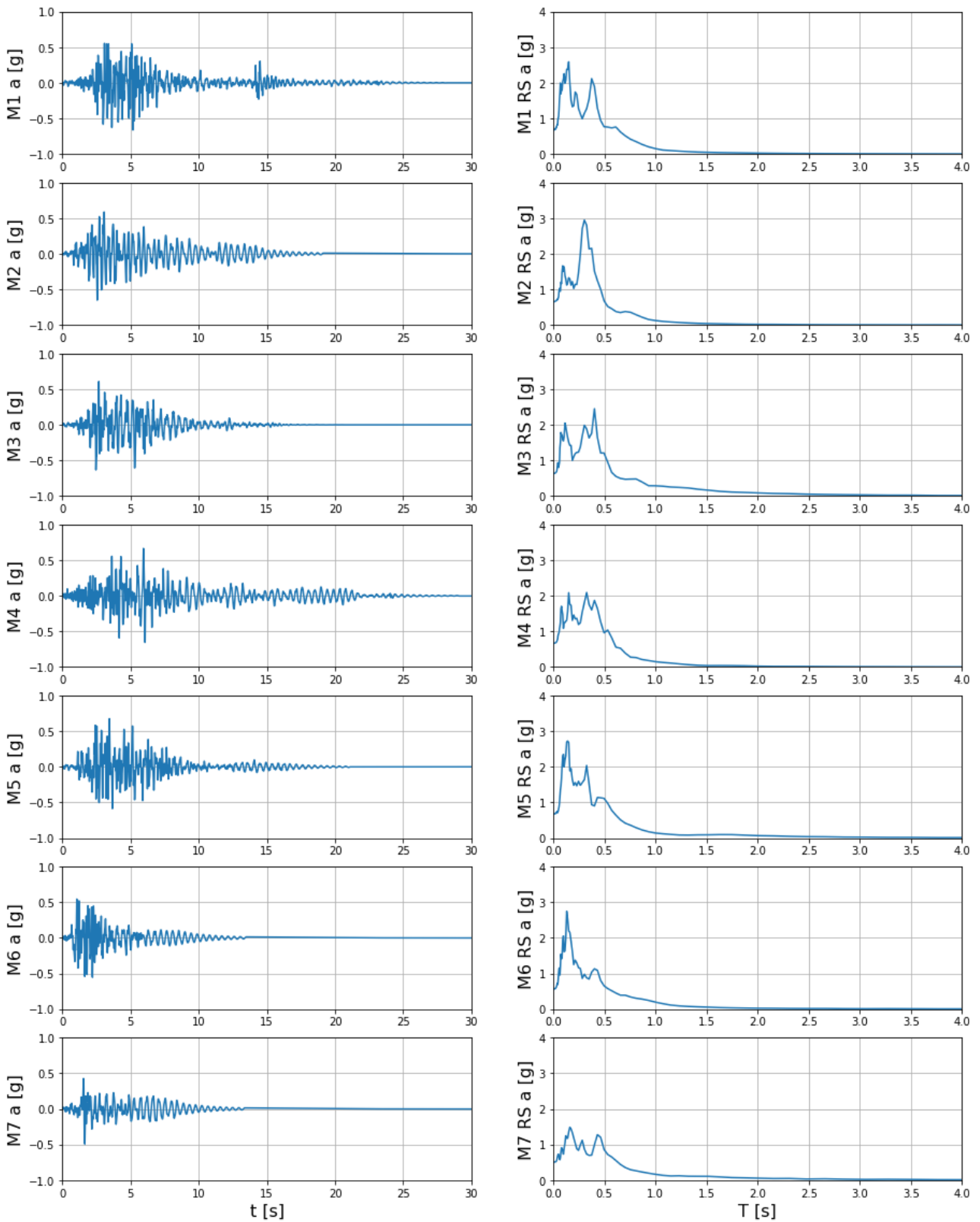


Figura 3-5 – Segnali di output sismico in termini di accelerazione e spettro di risposta allo SLC.

### 3.2 ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA IN SPOSTAMENTO

L'analisi degli spostamenti in cresta fornisce i dati fondamentali per la verifica del sistema in termini di franco verticale. Si illustreranno nelle seguenti pagine le storie degli spostamenti orizzontali (dx) e verticali (dz) della cresta.

Qui sotto si evidenzia l'evoluzione delle superfici di scorrimento durante il segnale sismico sulla deformata del corpo della diga.

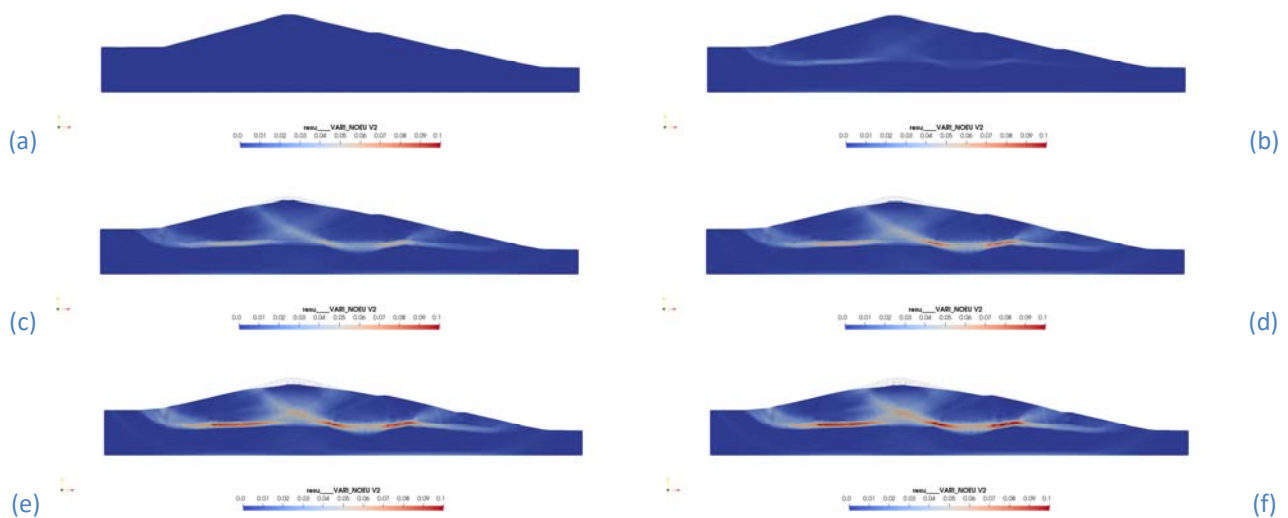


Figura 3-6 – Evoluzione del degrado lungo le superfici di scorrimento durante il segnale sismico SLC M3. (a)  $t = 0$  s, (b)  $t = 3$  s, (c)  $t = 4$  s, (d)  $t = 5$  s, (e)  $t = 6$  s, (f)  $t =$  istante finale del segnale.

Sintetizzando i risultati, si evince come lo spostamento verticale medio provocato dalla 7 analisi allo SLC sia pari a  $d_{z,mean} = -184.8$  mm, con una deviazione standard  $d_{z,std} = 68.02$  mm. Lo spostamento massimo è pari a circa -310 mm, per il segnale SLC M3.

Di seguito si illustreranno i segnali di output in termini di spostamenti della cresta per ciascun segnale.

### SLO

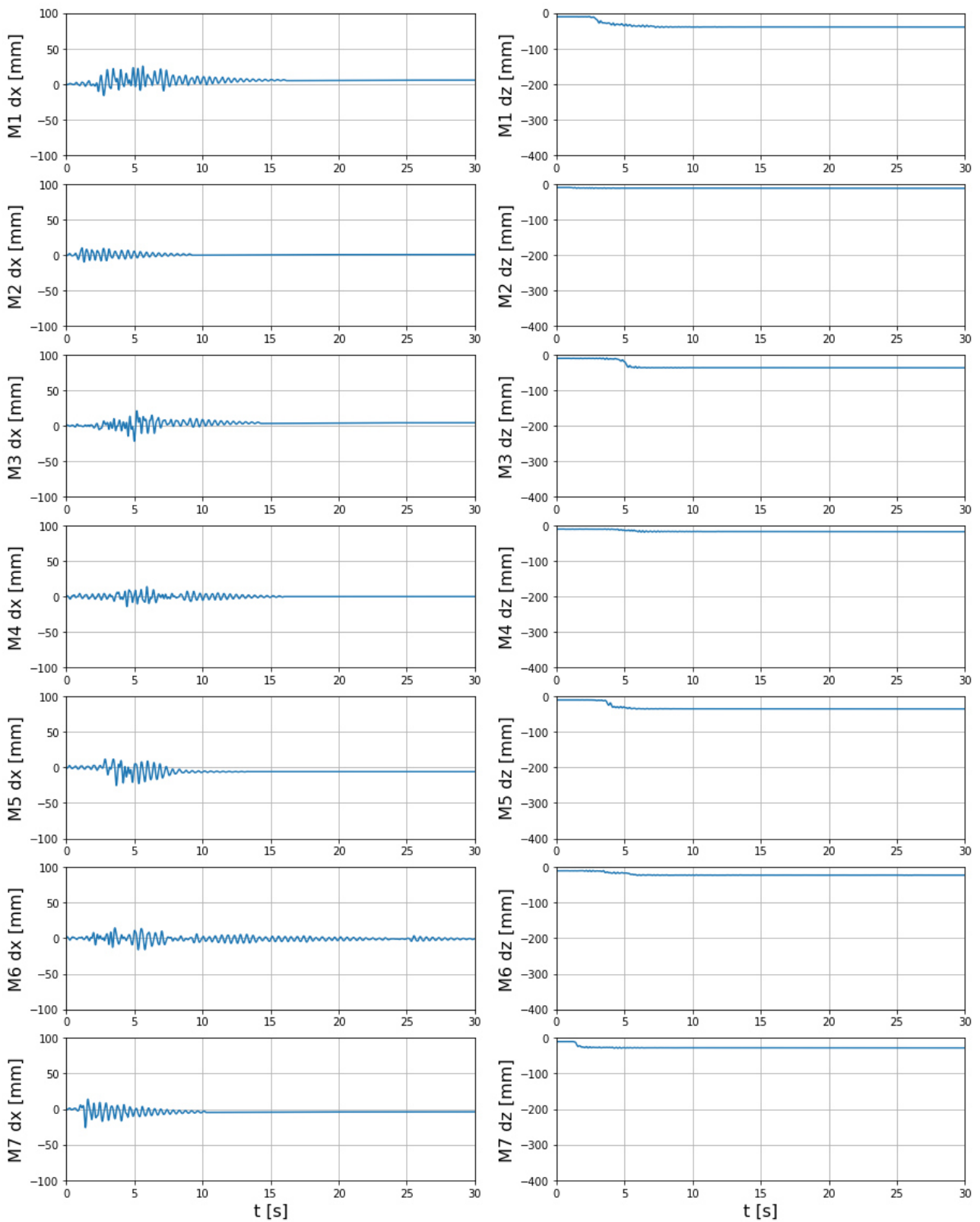


Figura 3-7 – Segnali di output sismico in termini di spostamenti in sommità e spettro di risposta allo SLO.

### SLD

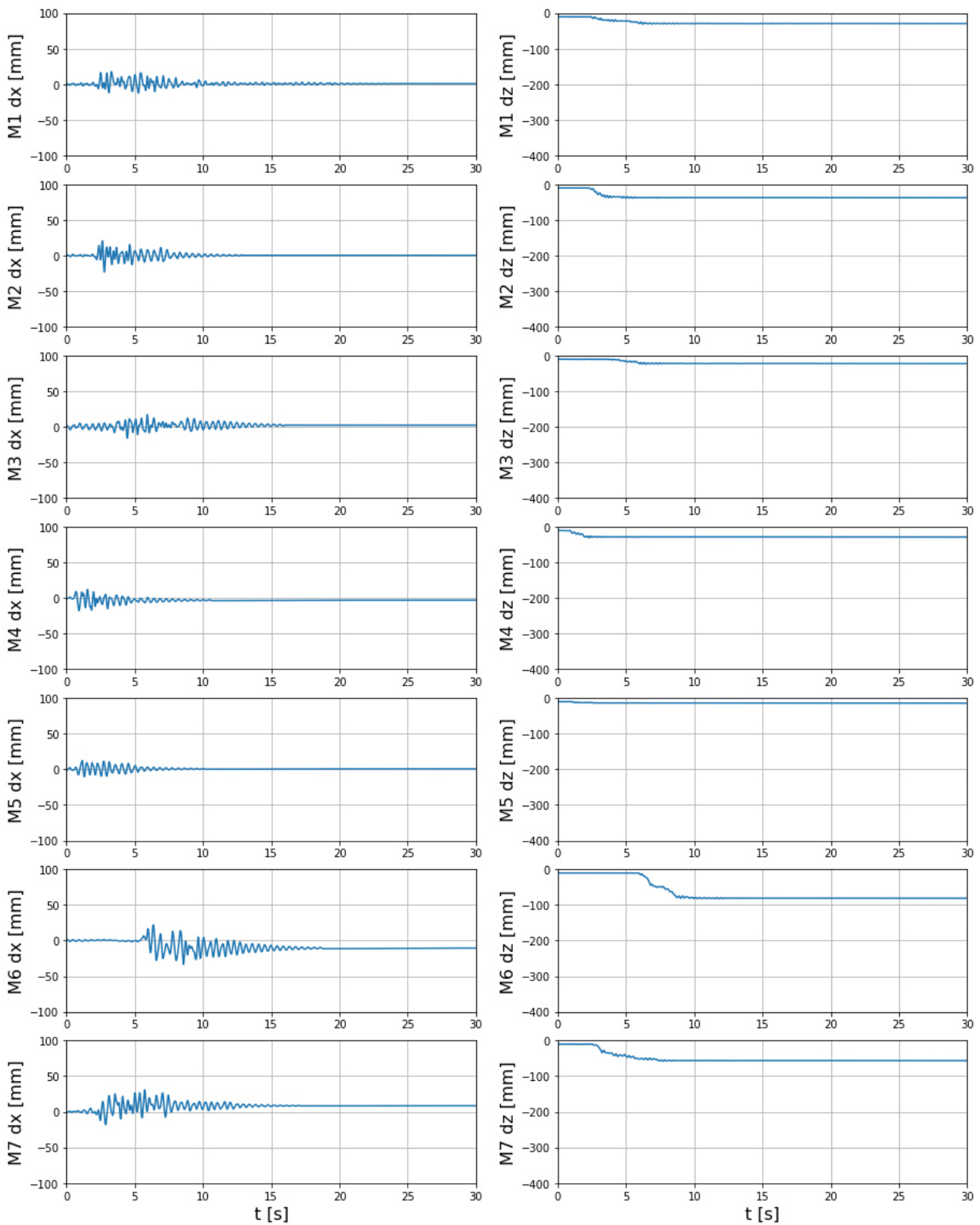


Figura 3-8 – Segnali di output sismico in termini di spostamenti in sommità e spettro di risposta allo SLD.

### SLV

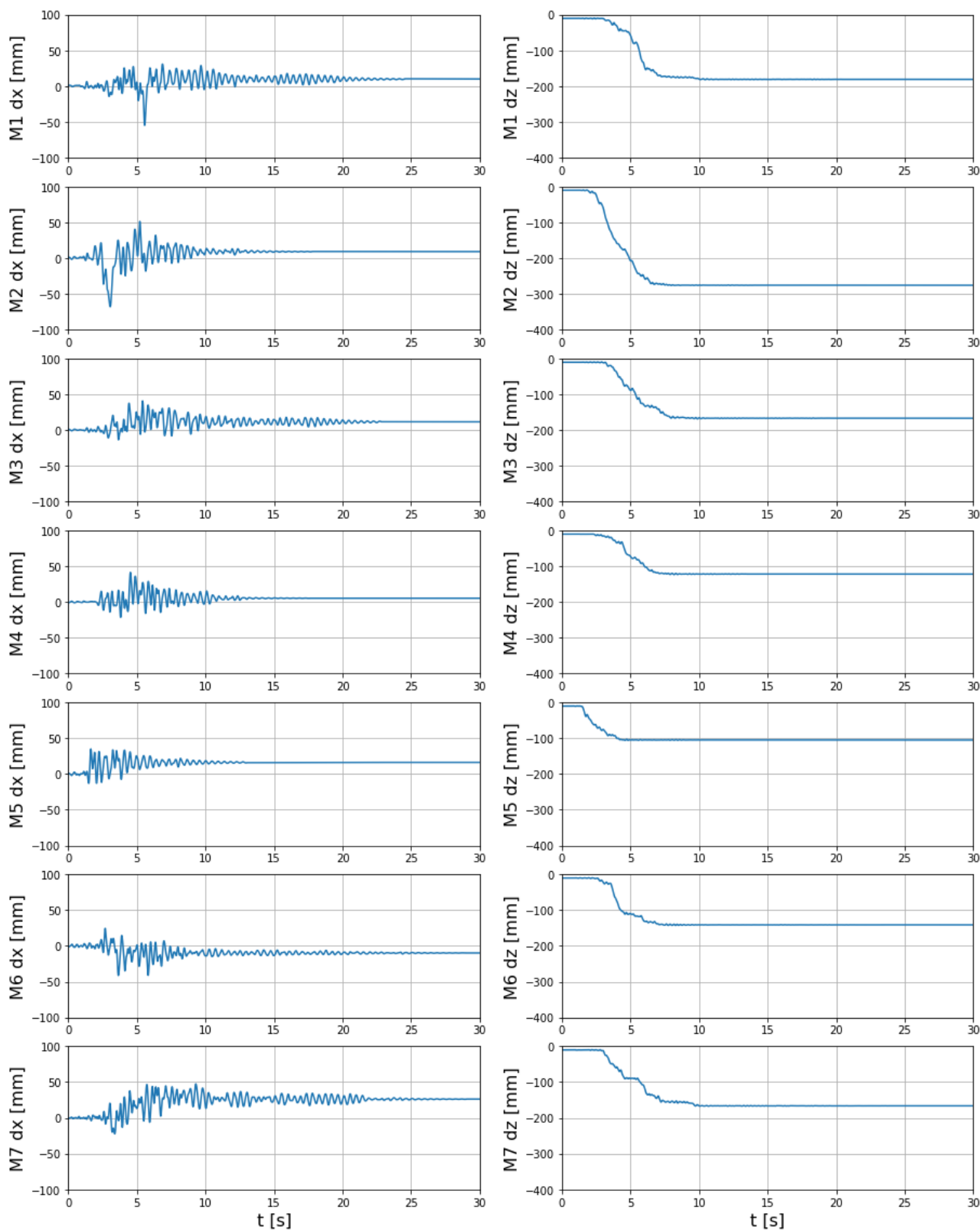


Figura 3-9 – Segnali di output sismico in termini di spostamenti in sommità e spettro di risposta allo SLV.

### SLC

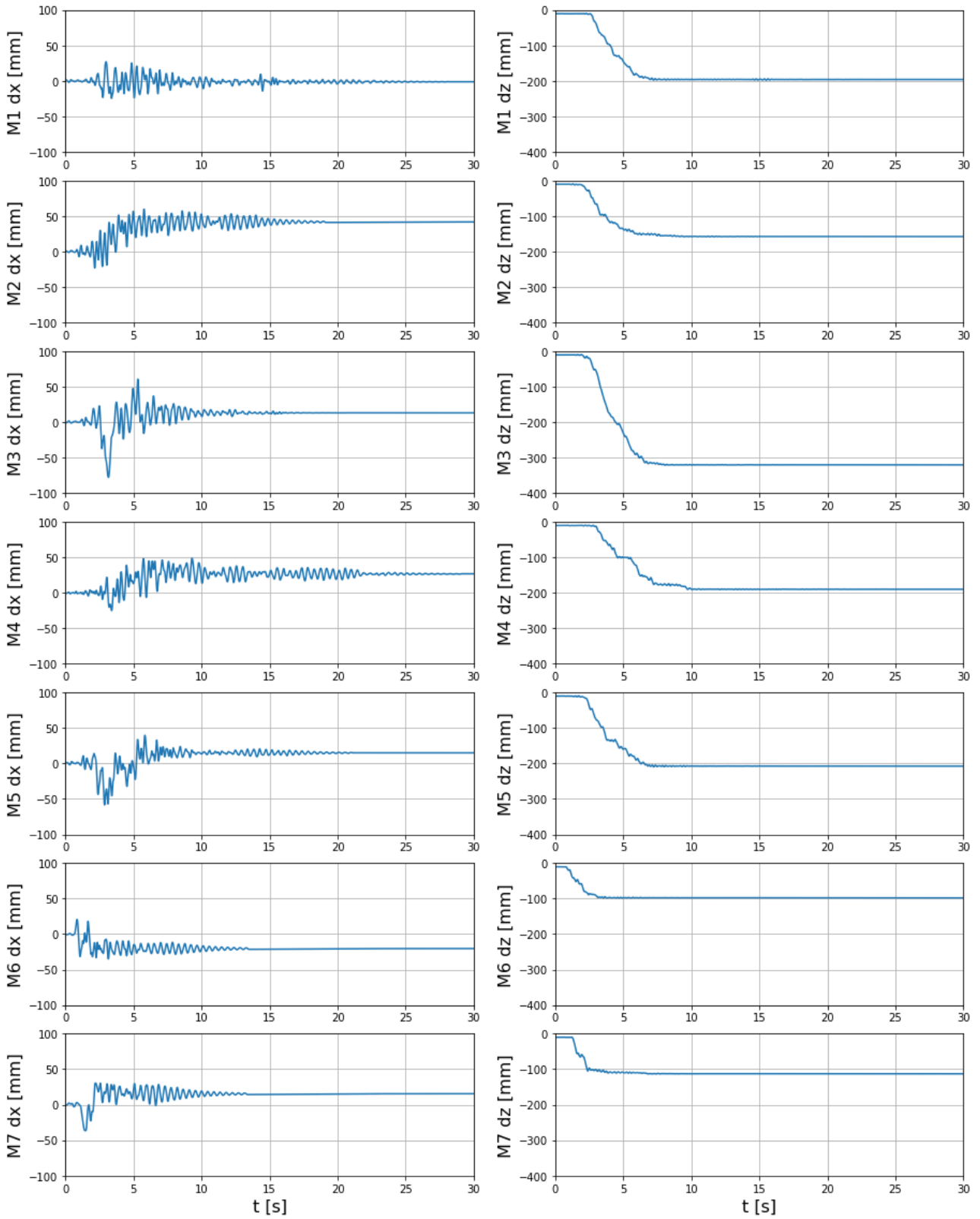


Figura 3-10 – Segnali di output sismico in termini di spostamenti in sommità e spettro di risposta allo SLC.

### 3.3 VULNERABILITA' POST-SISMA

La vulnerabilità è valutata sulla condizione di equilibrio raggiunta dopo il segnale sismico, applicando un fattore di sicurezza  $FS = 1.2$  ai carichi gravitazionali, equivalente circa ad un abbattimento della resistenza per lo stesso fattore. I seguenti risultati (Figura 3-11 e Figura 3-12) mostrano lo stato deformativo e delle superfici di scorrimento al termine di questa fase post-sisma.

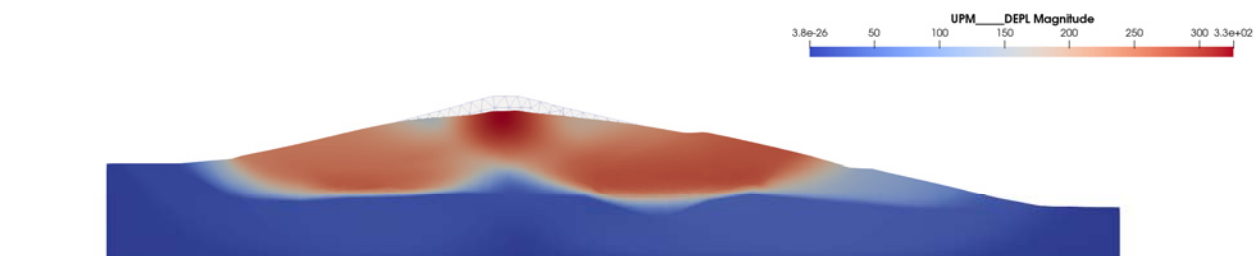


Figura 3-11 – Spostamenti post-terremoto (magnitudo) con  $FS = 1.2$  per il segnale SLC M3.

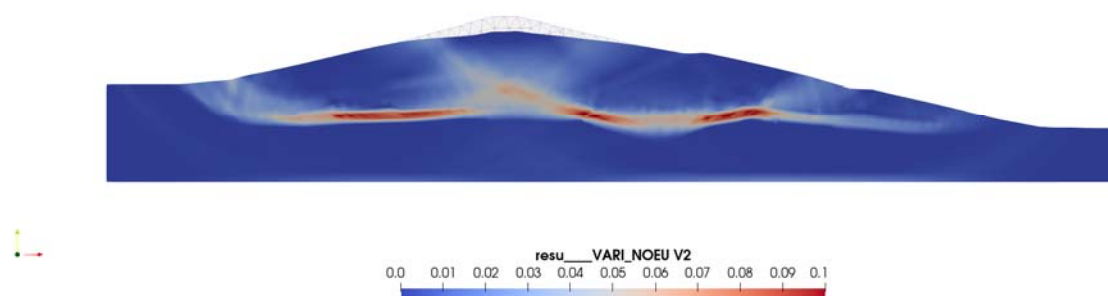


Figura 3-12 – Superfici di scorrimento con  $FS = 1.2$  per il segnale SLC M3.

Nei grafici seguenti è possibile vedere l'andamento della deformazione nella fase di applicazione del coefficiente di sicurezza, dopo il segnale sismico. Nessuno dei post-segnali SLC mostra segni di instabilità, sebbene vi sia un fisiologico incremento di deformazione.

### SLC

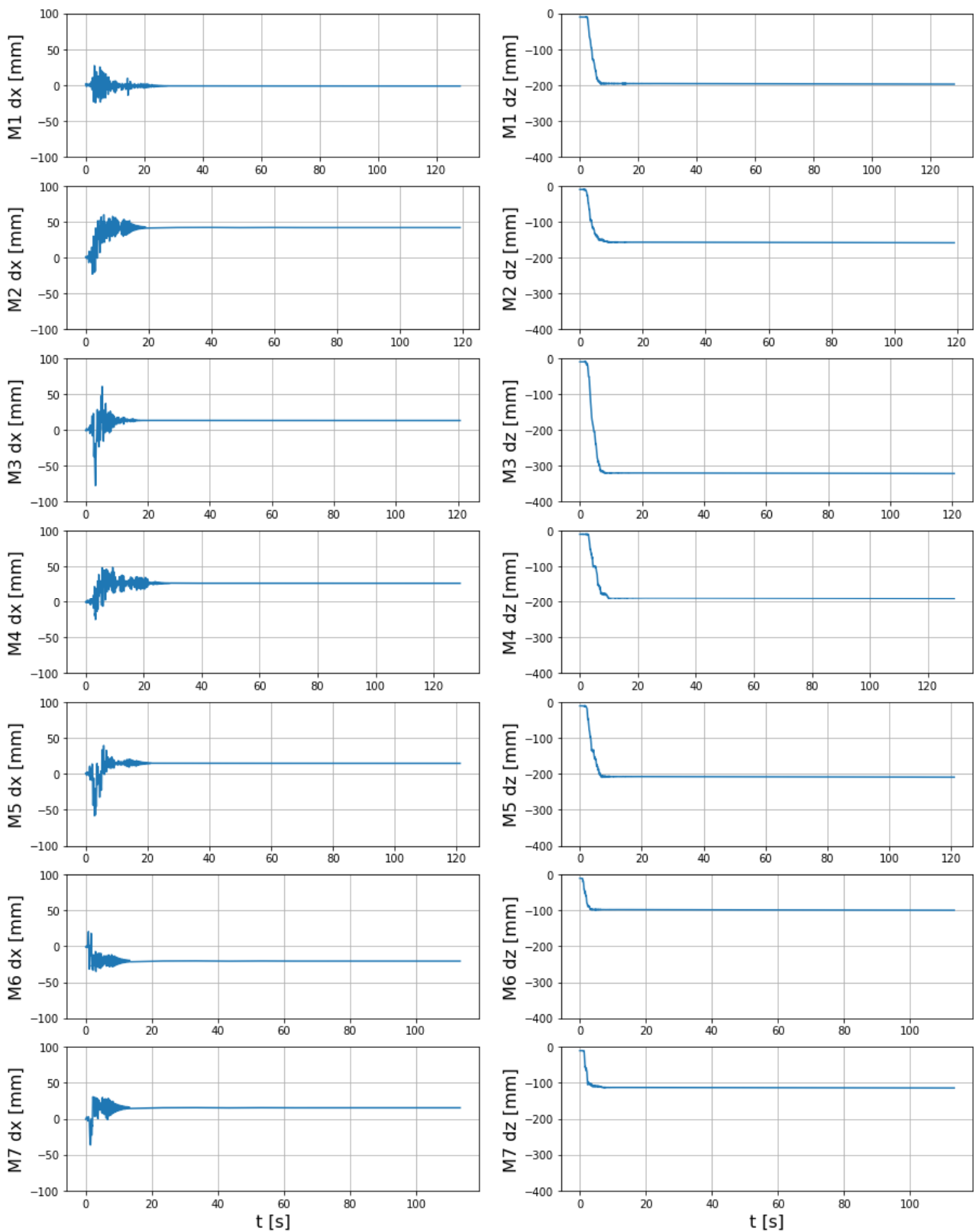


Figura 3-13 – Prosecuzione delle analisi post-sisma con fattore di sicurezza  $FS = 1.2$  applicato dopo il segnale sismico, per una durata di 100 s (in condizioni quasi-statiche).



## 4 BIBLIOGRAFIA

- [1] EDF (Electricité de France), *ASTER, Finite Element code\_aster, Analysis of Structures and Thermomechanics for Studies and Research*, 1989-2019
- [2] EDF (Electricité de France), *ASTER, Loi de Mohr-Coulomb (R7.01.28)*, Manuel de référence, Fascicule r7.01: Modélisations pour le Génie Civil et les géomatériaux, 2016
- [3] EDF (Electricité de France), *ASTER, Notice d'utilisation du modèle THM (U2.04.05)*, Manuel d'utilisation, Fascicule u2.04: Mécanique non linéaire, 2019
- [4] EDF (Electricité de France), *ASTER, Modélisations AXIS, D\_PLAN, C\_PLAN (U2.04.05)*, Manuel d'utilisation, Fascicule u3.13: Eléments finis 2D, 2013
- [5] J.A. Díaz-Rodríguez, and J.A. López-Molina, *Strain Thresholds In Soil Dynamics*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China
- [6] P. J. Vardanega, and M. D. Bolton, *Stiffness of Clays and Silts: Normalizing Shear Modulus and Shear Strain*, JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, ASCE / SEPTEMBER 2013
- [7] Ahmadreza Mortezaie, and Mladen Vucetic, *Threshold Shear Strains for Cyclic Degradation and Cyclic Pore Water Pressure Generation in Two Clays*, JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, ASCE / 2016
- [8] Ahmad Reza Mortezaie, and Mladen Vucetic, *Effect of Frequency and Vertical Stress on Cyclic Degradation and Pore Water Pressure in Clay in the NGI Simple Shear Device*, JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, ASCE / 2013