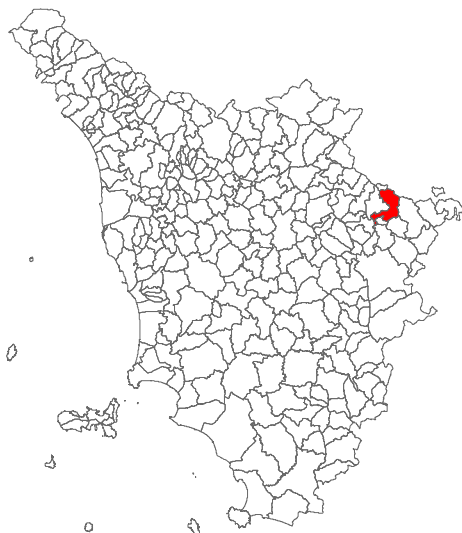


Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n. 77

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione Tecnica inerente l'elaborazione di Risposta Sismica Locale 2D (RSL2D)

Regione Toscana  
Comune di Chiusi della Verna (AR)



Regione	Soggetto realizzatore:	Data
Regione Toscana – Settore Sismica	<p>Comune di Chiusi della Verna /Servizio Assetto del Territorio/RUP Arch. Alessia Lanzini</p> <p>Professionisti incaricati: Dott. Geol. Eros Aiello Dott. Geol. Gabriele Grandini Dott. Geol. Alessandro Piazzini Dott. Geol. Cristian Pieroni Dott. Geol. Francesco Puccetti</p>	Ottobre 2022

---

## **INDICE**

<b>1 – INTRODUZIONE.....</b>	<b>2</b>
<b>2 - DESCRIZIONI DELLE FASI OPERATIVE.....</b>	<b>3</b>
2.1 Gli Accelerogrammi di INPUT.....	3
2.2 Modellazioni numeriche e analisi di risposta sismica locale.....	6
2.3 Parametrizzazione del modello geologico-tecnico.....	6
2.4 Risultati delle analisi di risposta sismica bidimensionale svolte.....	12
2.5 Analisi dinamiche nelle aree in frana MS3.....	27
2.6 Rappresentazione su mappa ed estrapolazione.....	28
2.7 Indicazioni relative alla fase progettuale.....	30

## **Allegati**

**ALLEGATO A – Report RSL2D sezione CC’\_Chiusi della Verna e analisi dinamica frana**

**ALLEGATO B – Report RSL2D sezione GG’\_Chiusi della Verna - Corsalone e analisi dinamica frana**

---

## 1 – INTRODUZIONE

Su incarico dell'Amministrazione Comunale di Chiusi della Verna (AR), sono stati eseguiti Studi di Microzonazione Sismica (MS) di livello 3 per le aree urbane principali dell'intero Comune.

L'esecuzione degli "Studi di Microzonazione sismica di livello3 (MS3)", sono stati eseguiti secondo la Delibera GRT n. 468 del 02 maggio 2018 e l'approvazione dei finanziamenti del Decreto GRT n. 16262 del 04.10.2018.

La Regione Toscana, al fine di dare attuazione all'Ordinanza CDPC n.344/16, disciplinante i contributi per gli interventi di prevenzione del rischio sismico previsti dall'art.11 della legge n.77 del 24/06/2009, tra cui gli studi di Microzonazione Sismica, con Delibera di GRT n. 468 del 02/05/2018, ha disposto la realizzazione di un ulteriore campagna di studi ed indagini con l'obiettivo di pervenire, per i Comuni interessati, all'implementazione degli studi di MS già effettuati, portandosi dall'approccio qualitativo del I Livello alla quantificazione della risposta sismica locale, propria dei Livelli II e III.

Il Livello 3 rappresenta il livello più approfondito che permette di giungere ad una microzonazione del territorio basata su metodologie analitiche di analisi di tipo quantitativo. Tale approfondimento è finalizzato alla realizzazione della "Carta di Microzonazione Sismica con approfondimenti".

Il Comune di Chiusi della Verna è classificato ai sensi della DGRT n.431 del 19.06.2006, in recepimento dell'OPCM n.3619 del 28.04.2006, in classe 2 e rientra nel Programma VEL (Valutazione Effetti Locali) della Regione Toscana.

---

---

## 2 - DESCRIZIONI DELLE FASI OPERATIVE

### 2.1 Gli Accelerogrammi di INPUT

La fase iniziale, finalizzata alla redazione di una cartografia di microzonazione sismica di livello 3, impone la preliminare definizione di un input sismico, costituito da un set composto da 7 accelerogrammi naturali sismocompatibili con le caratteristiche tettoniche dell'area e spettrocompatibili con quanto prescritto dalle vigenti NTC 2018.

L'input sismico è stato definito mediante la procedura messa a punto dall'Università di Pavia nell'ambito di un Accordo di Collaborazione Scientifica con la Regione Toscana, finalizzata alla "Definizione di input sismici sismocompatibili e spettro-compatibili per i comuni della regione Toscana".

A tal proposito è stato utilizzato un codice appositamente sviluppato in ambiente Fortran90, chiamato SCALCONA 3.0 (SCALing of COmpatible Natural Accelerograms) in grado di fornire, in funzione del sito e del periodo di ritorno considerati, l'input sismico compatibile con le NTC18 sia in termini spettrali che di accelerogrammi spettro-compatibili.

Gli accelerogrammi così ottenuti rientrano in una banca dati composta da eventi naturali da preferire all'utilizzo di accelerogrammi artificiali secondo la normativa e gli studi accademici svolti negli anni.

Ai fini della selezione degli accelerogrammi non è stata necessaria la suddivisione del territorio in più aree omogenee sismicamente in quanto l'estensione del Comune di Chiusi della Verna, oggetto di studio, ha permesso l'utilizzo di un solo set di accelerogrammi.

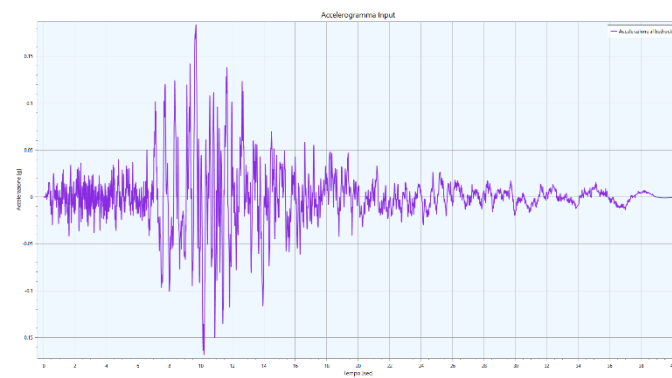
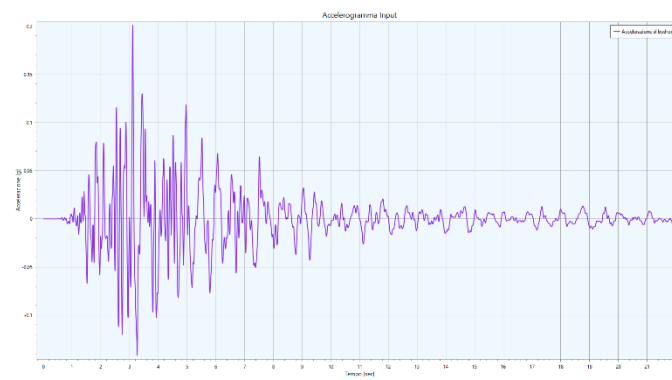
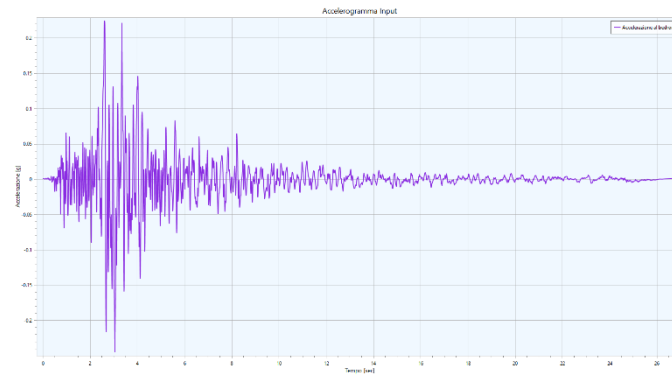
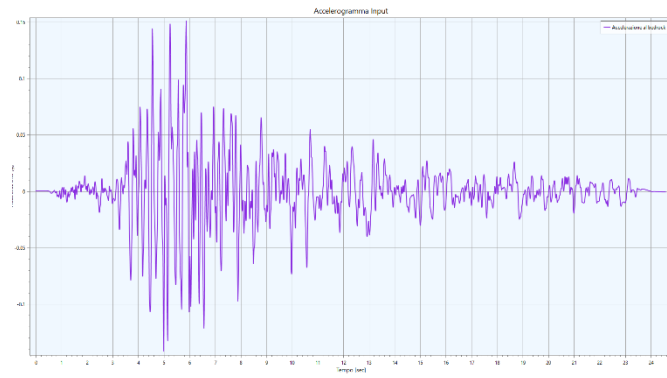
SCALCONA utilizza opportunamente i risultati della selezione degli accelerogrammi, consentendo di restituire, per il sito e periodo di ritorno di interesse, un gruppo di 7 accelerogrammi che soddisfano i requisiti di spettro-compatibilità prescritti dalle NTC18 e succ. Circolare.

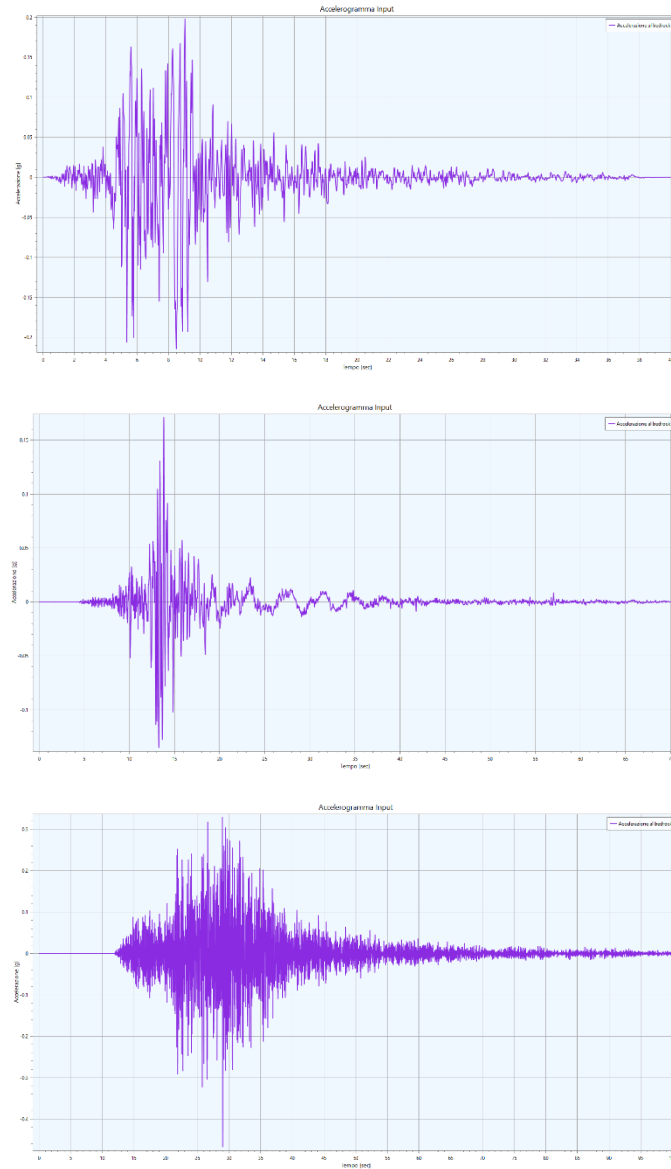
Gli accelerogrammi possono essere selezionati per ciascun punto interno ai territori di studio e per ciascuno dei 9 periodi di ritorno considerati nelle NTC18.

Le analisi di risposta sismica locale realizzate per la microzonazione sismica di livello 3 oggetto del presente lavoro fanno riferimento ad un input sismico relativo ad un periodo di ritorno di 475 anni (SLV) e di 50 anni (SLD).

Di seguito si riportano i 7 accelerogrammi utilizzati come input delle analisi svolte riferiti ad una condizione detta di 'outcrop':







**Fig. 1** – Storie temporali dei 7 accelerogrammi utilizzati come input sismico relativo ad un tempo di ritorno pari a 475 anni.

% Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
6.20	29.90	1.98	% ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC	
5.74	12.57	2.10	% NGA-West2 RSN146_COYOTELK_G01320.AT2	
5.90	10.10	2.01	% ESM IT.ATN..HNN.D.19840507.174943.C.ACC.ASC	
6.93	83.53	3.39	% NGA-West2 RSN804_LOMAP_SSF115.AT2	
6.69	38.07	1.41	% NGA-West2 RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2	
6.60	31.00	0.69	% KiK-net SMNH100010061330.EW2	
6.90	70.13	2.54	% NGA-West2 RSN5685_IWATE_MYGH11NS.AT2	

La tabella riporta le informazioni relative ai predetti accelerogrammi. Essi si riferiscono a registrazioni di eventi naturali registrati a stazioni poste sulla superficie terrestre, in corrispondenza di situazioni sismostratigrafiche inerenti alla CAT.A ai sensi dell'Eurocodice 8 e delle NTC2018.

---

## 2.2 Modellazioni numeriche e analisi di risposta sismica locale

Il modello geometrico da sottoporre ad analisi di risposta sismica locale 2D è stato rappresentato mediante sezioni geologico-tecniche sia desunte dalle sezioni utilizzate per la definizione del Modello Geologico di Riferimento della MS1 sia di nuova realizzazione nell'ambito dell'implementazione dello studio di MS3.

L'Analisi di Risposta Sismica Locale per studi di MS3 è stata condotta in assetto bidimensionale utilizzando approcci di tipo lineare-equivalente utilizzando il software LSR2D prodotto dall'azienda STACEC (Software per il calcolo strutturale).

Il numero di sezioni realizzate (n.8), ha consentito una buona copertura in riferimento all'estensione dell'area di studio in modo da intercettare tutte le geometrie superficiali e/o sepolte in grado di influenzare la risposta sismica locale in termini bidimensionali.

Nella trasposizione del modello geologico-tecnico delle sezioni in modelli numerici 2D sono stati definiti (oltre che i valori dei parametri fisico-meccanici derivati dalla campagna di esplorazione del sottosuolo a corredo dello studio di MS):

- le geometrie dei litotipi investigati, come desunto dalla ricostruzione del modello geologico-tecnico;
- le condizioni di vincolo lungo i bordi dei modelli numerici.

Le formazioni oggetto di studio sono state discretizzate mediante elementi finiti triangolari le cui dimensioni massime sono state selezionate secondo la regola (Kuhlemeyer e Lysmer, 1973):

$$D_{max} = \lambda / k = (T V_s) / k \quad (1)$$

dove  $V_s$  è la velocità di propagazione delle onde di taglio (ricavata dalle indagini geofisiche dirette svolte nell'ambito dello studio di MS1) e  $T$  è il periodo corrispondente alla più corta onda sismica propagabile e posto pari a 0.05s (frequenza massima propagata pari a 20Hz).

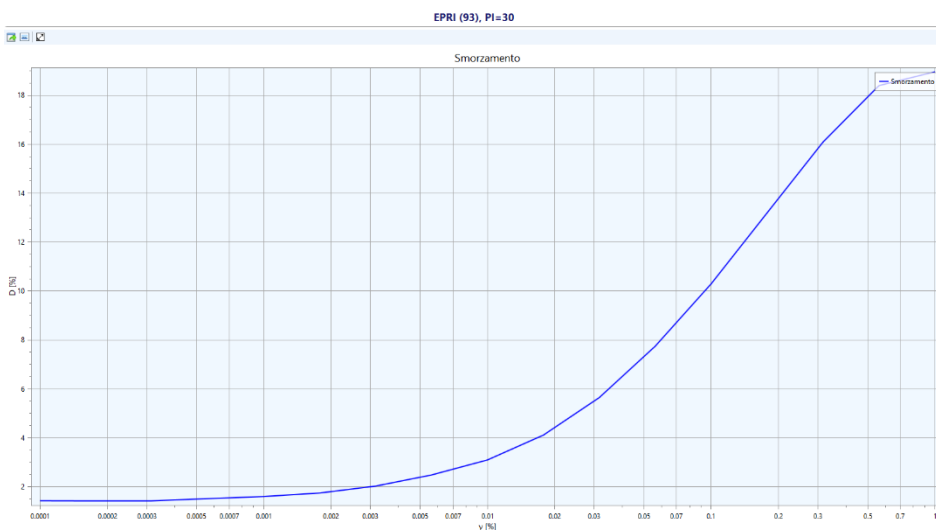
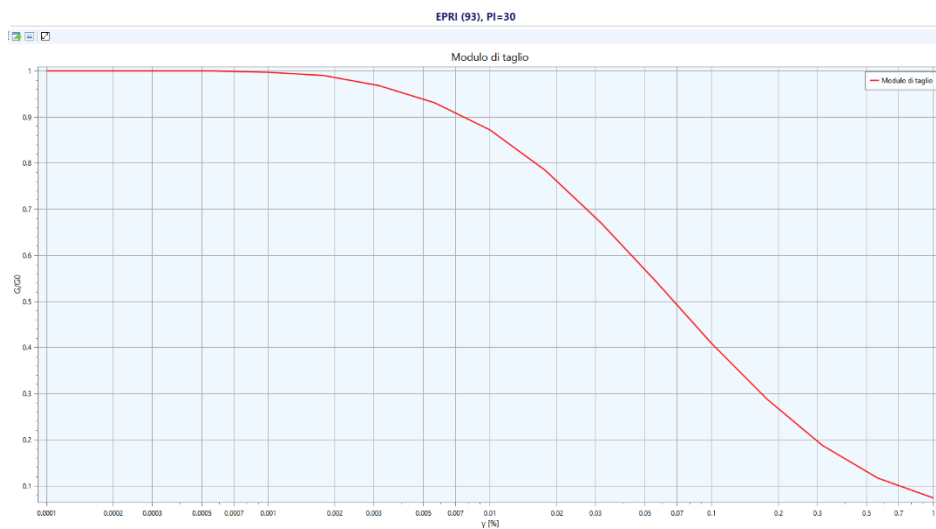
Tale periodo è quindi il minor periodo per cui si può ritenere attendibile il dato di output. Il coefficiente  $k$  è stato posto pari a 8 (Lanzo & Silvestri, 1999).

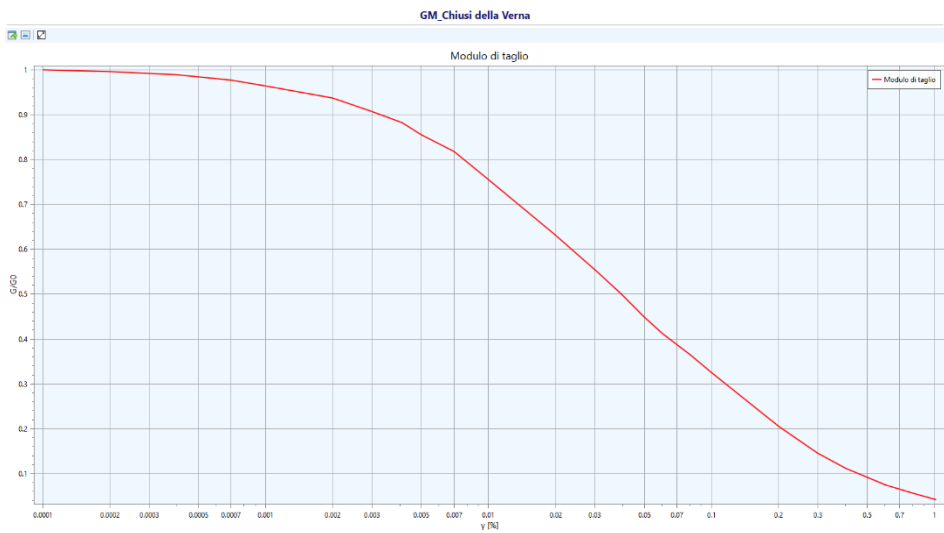
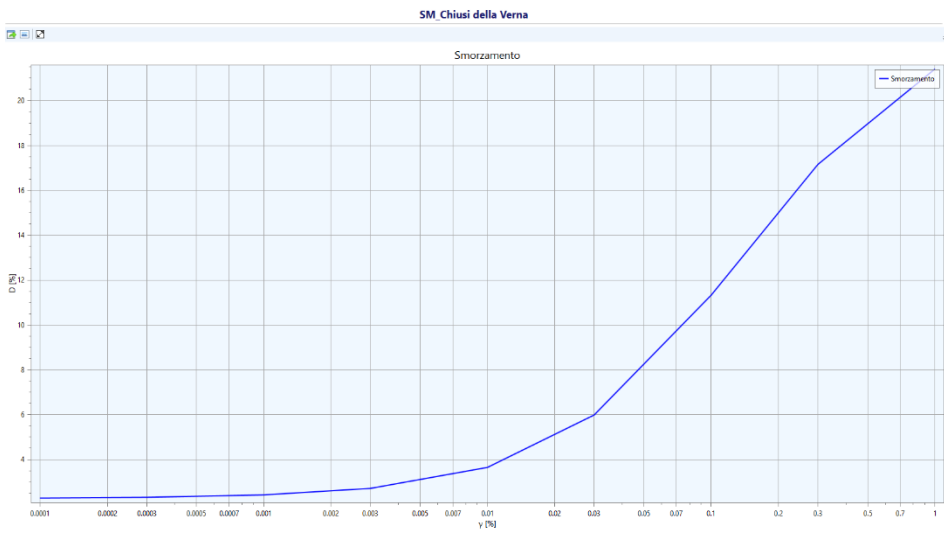
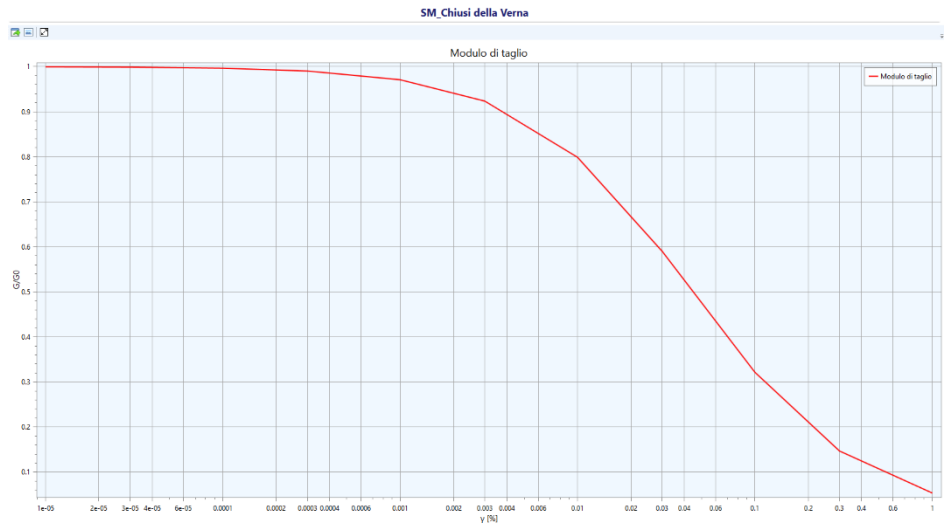
## 2.3 Parametrizzazione del modello geologico-tecnico

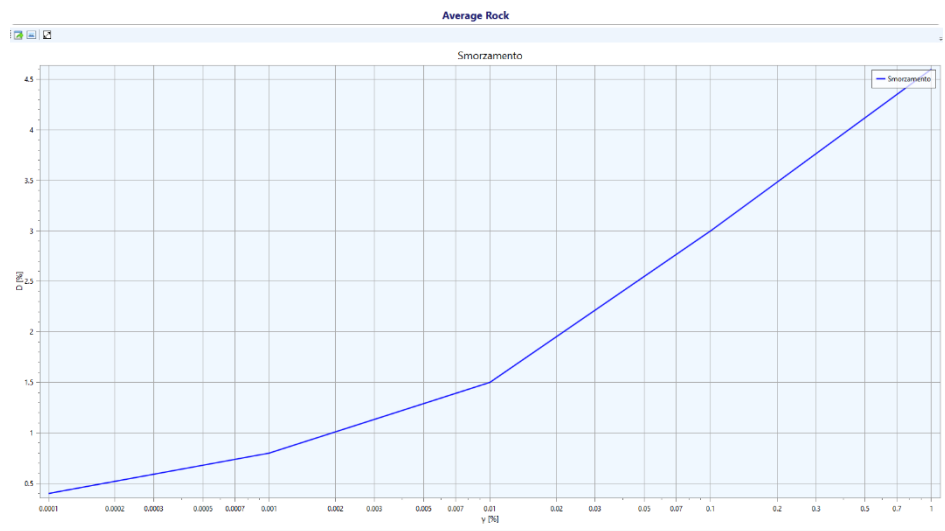
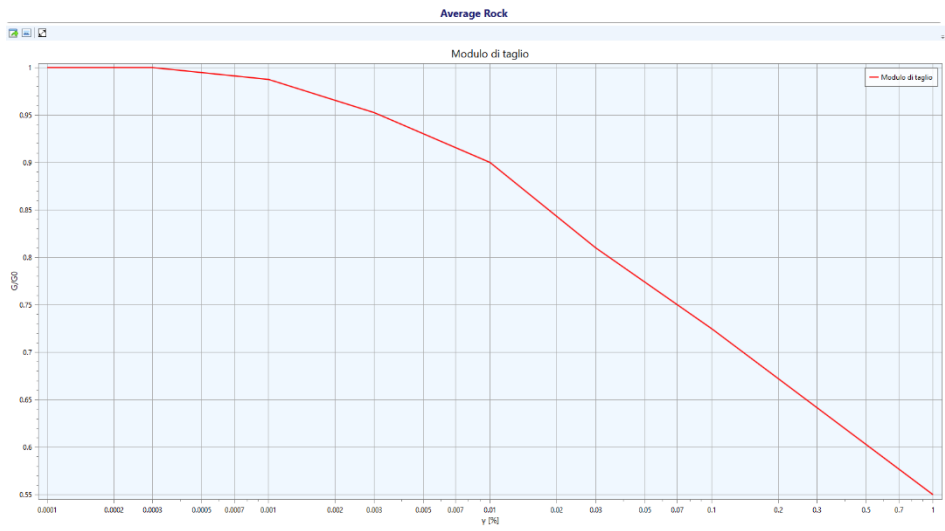
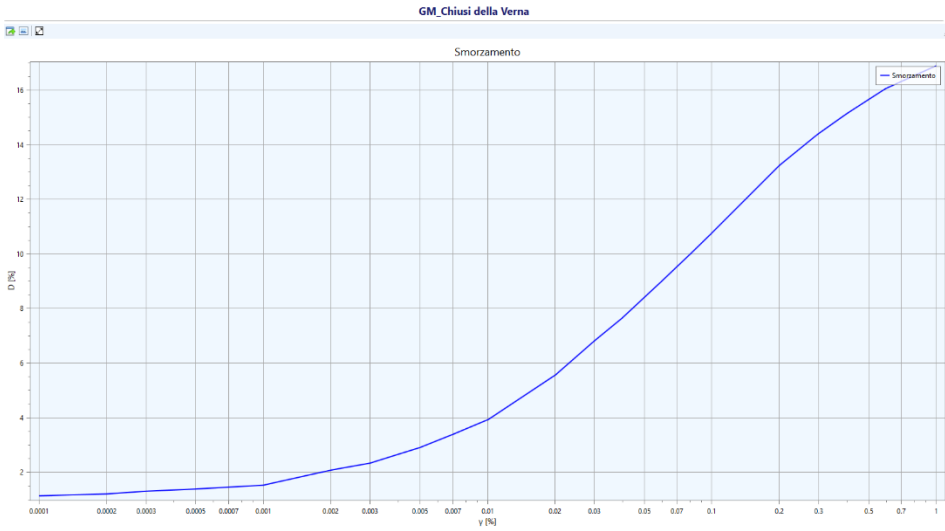
L'esecuzione di analisi di risposta sismica locale prevede la parametrizzazione in chiave dinamica dei terreni di studio. Avendo deciso di ricorrere all'utilizzo di codici di calcolo 2D operanti in ambito lineare-equivalente, è stato necessario ottenere, per ognuno dei sismostrati da modellare, i seguenti parametri:

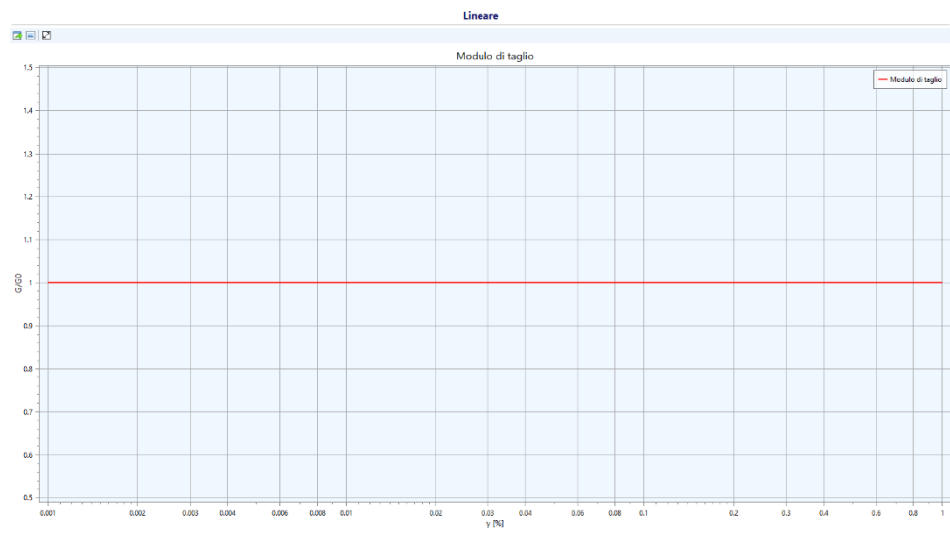
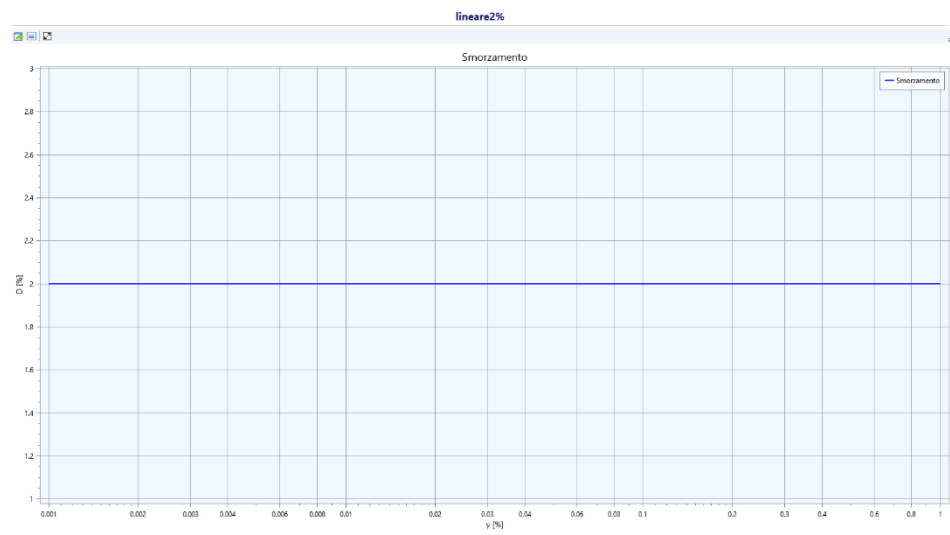
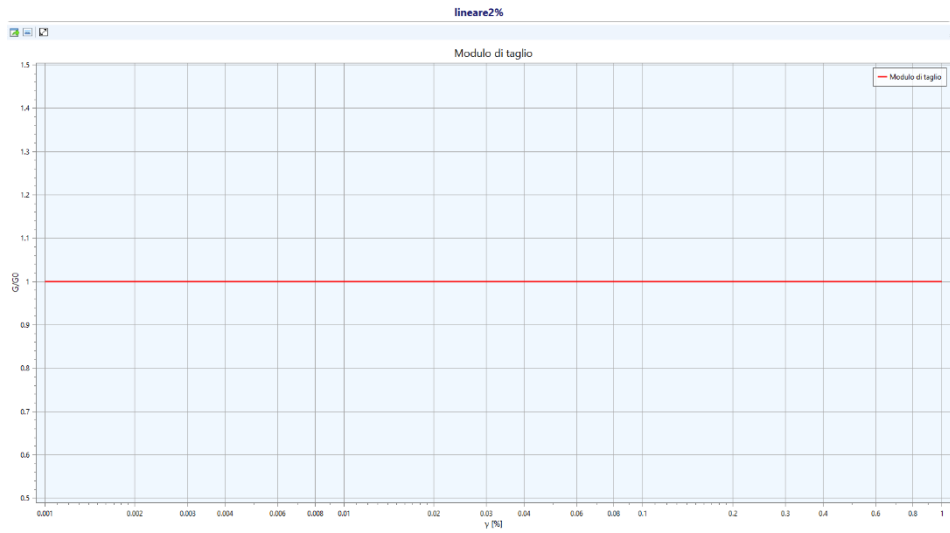
---

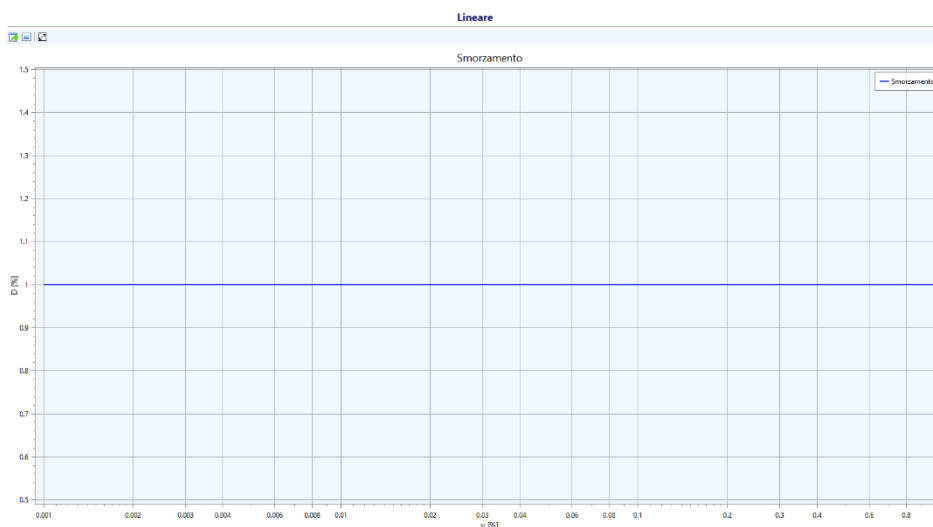
- Valori di  $V_p$  (velocità di propagazione delle onde di compressione) e di  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio). Il valore di  $V_s$  (come indicato nel precedente paragrafo) è servito anche per determinare la dimensione ottimale della mesh con cui è stata discretizzata la sezione da modellare;
- Pesì di volume dei litotipi in oggetto;
- Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato  $G(\gamma)$  e di incremento del rapporto di smorzamento  $D(\gamma)$  utilizzate per simulare il comportamento non lineare dei terreni mediante il legame costitutivo lineare equivalente.











**Fig. 2** - Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato  $G(\gamma)$  e di incremento del rapporto di smorzamento  $D(\gamma)$ , utilizzate nella MS3 di Chiusi della Verna (AR)

Tali curve possono essere definite mediante prove geotecniche di laboratorio in campo dinamico; in alternativa è possibile, conoscendo le caratteristiche litologiche del sismostrato in oggetto, estrapolare tali curve da banche dati nazionali o internazionali quali ad esempio quelle fornite da progetto VEL realizzato dalla Regione Toscana.

Strato	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$V_s$ [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
Fa	2100	245	0.32	EPRI (93), PI=30
fq	1950	220	0.37	EPRI (93), PI=30
SM	1900	280	0.45	SM_Chiusi della Verna
GM	2000	360	0.36	GM_Chiusi della Verna
GP	2000	345	0.36	GM_Chiusi della Verna)
ALS	2100	360	0.33	Average Rock
SFALS	2050	255	0.34	GM_Chiusi della Verna)
LP	2600	1125	0.24	lineare
SFLP	2400	875	0.27	lineare2%
LPS	2250	975	0.30	lineare

dove:

- $S$  = spessore del singolo strato;
- $\rho$  = densità di massa del singolo strato;
- $V_s$  = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato;
- $\gamma$  = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato;

In fase di predisposizione del modello, sono stati inseriti un numero congruo di punti complessivi di output (punti di controllo) al fine di ottenere una completa analisi dei risultati necessari per la successiva fase di estrapolazione dei dati.



## **2.4 Risultati delle analisi di risposta sismica bidimensionale svolte**

Sono state effettuate quindi successivamente due distinte analisi: la prima utilizzando una settupla di storie temporali relativa ad un periodo di ritorno di 475 anni e la seconda al periodo di ritorno di 50 anni.

La prima analisi è quella ufficiale dello studio di MS3, da cui sono stati estrapolati tutti i prodotti dello studio di Microzonazione (spettri di risposta elastici e Fattori di Amplificazione).

La seconda analisi è utilizzata esclusivamente per acquisire spettri medi caratteristici da utilizzare come indicazioni e strumenti per la progettazione edilizia.

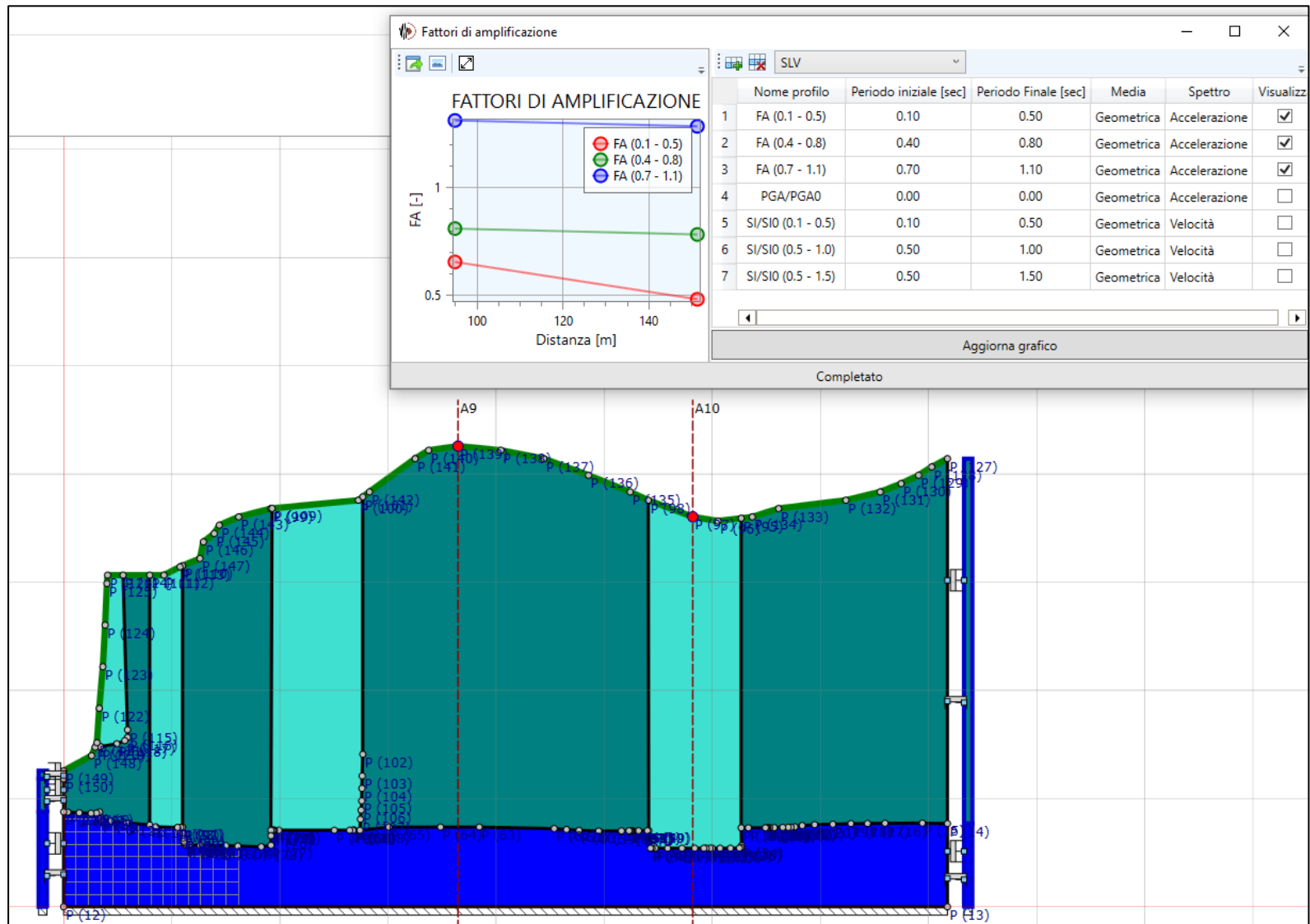
L'esecuzione di analisi di risposta sismica locale consente l'acquisizione di molteplici parametri e strumenti di output.

In particolare di seguito si riportano le sezioni geologico-tecniche con indicato la distribuzione e i valori dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali.

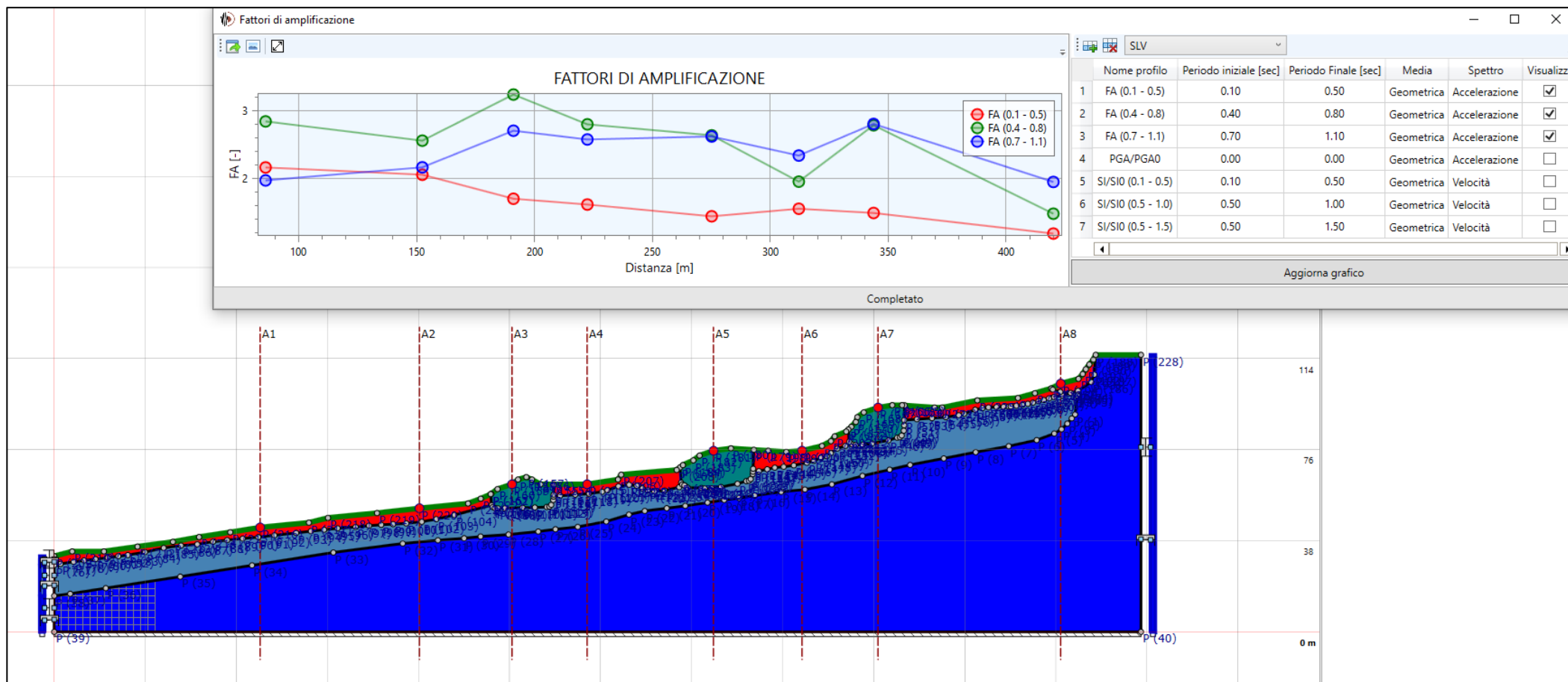
Alcune delle sezioni geologiche-tecniche in fase di elaborazione, data la criticità morfologica dell'area, sono state suddivise in parti per semplificare e snellire le operazioni di calcolo.

---

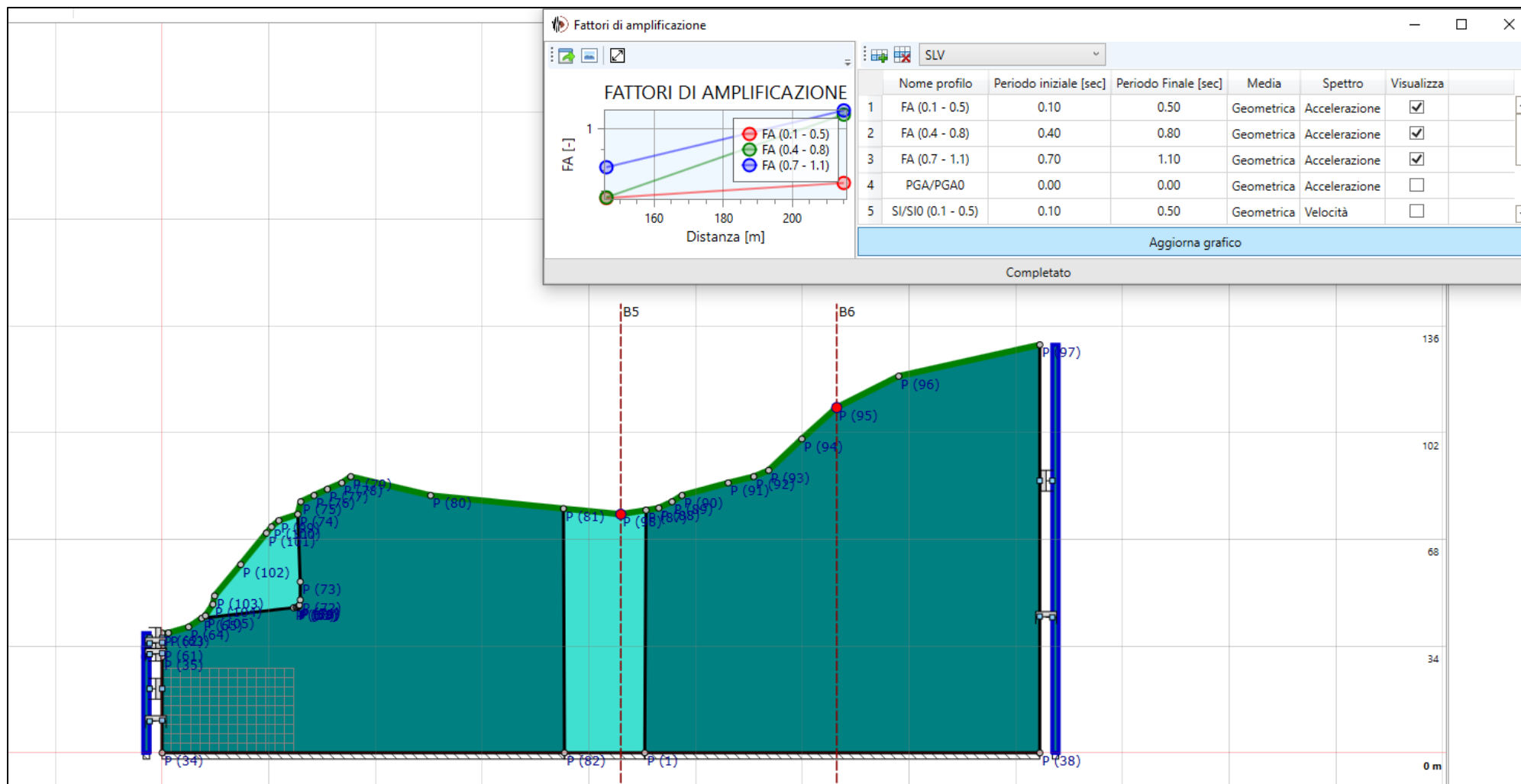
# Sezione AA'\_Chiusi della Verna\_Santuario – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



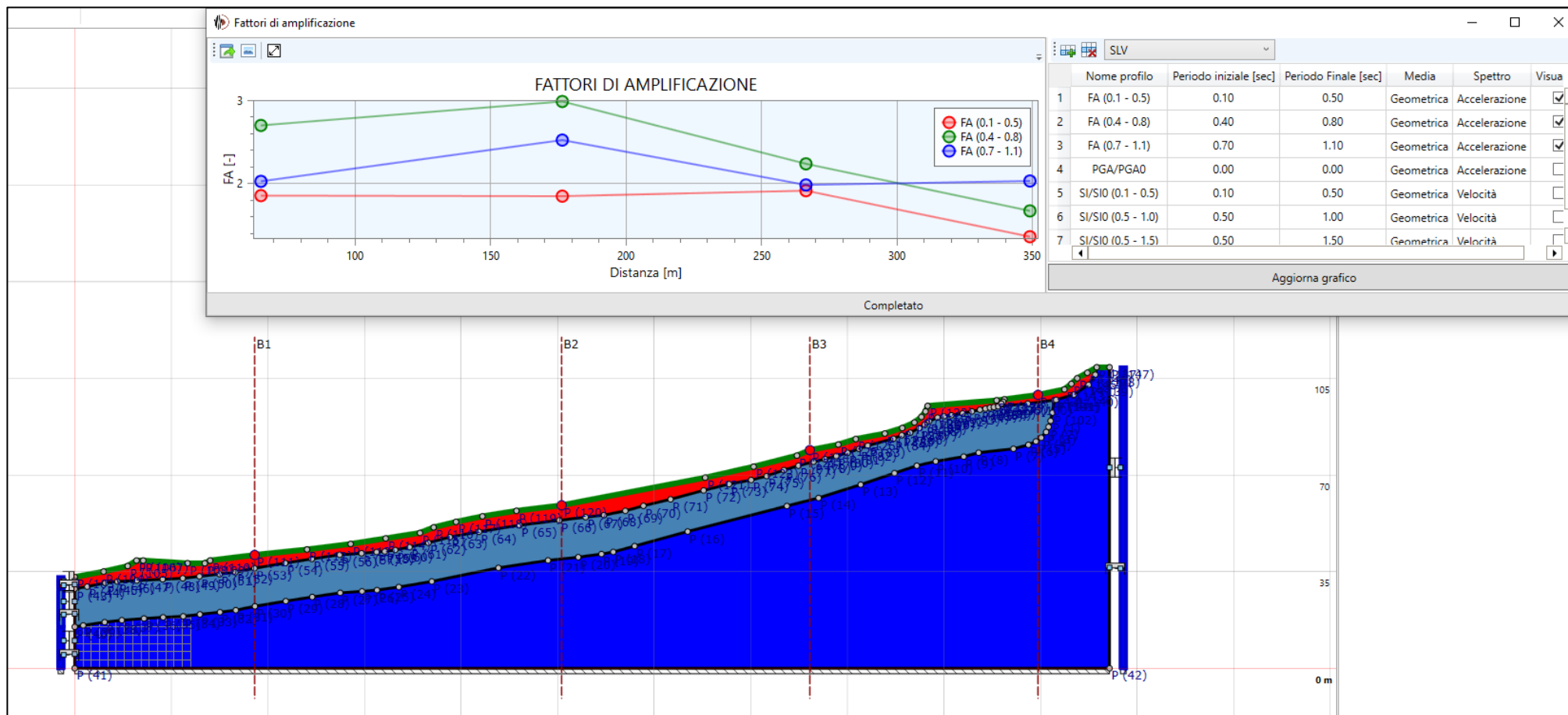
## Sezione AA'\_Chiusi della Verna – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



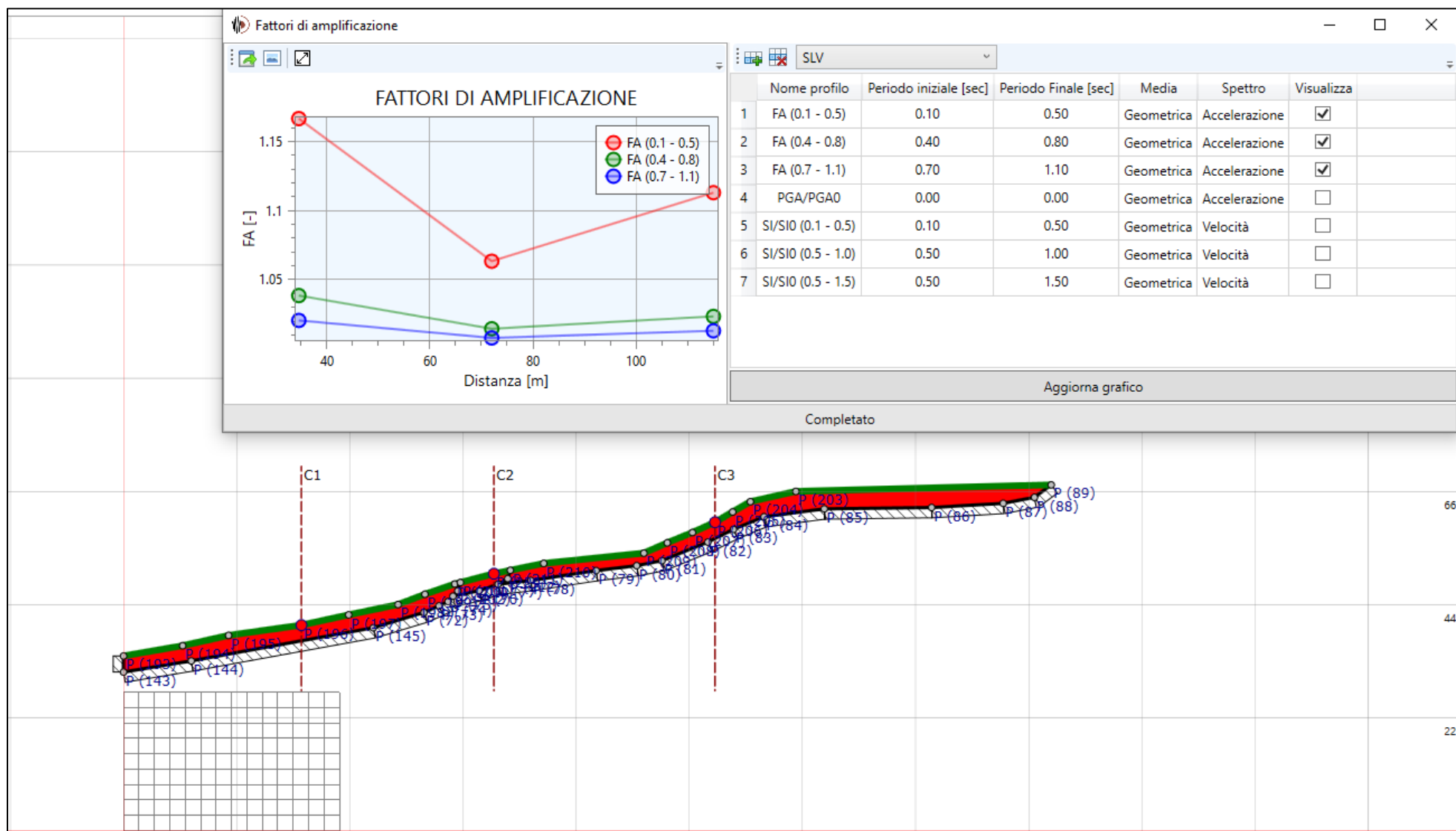
# Sezione BB'\_Chiusi della Verna\_Santuario – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



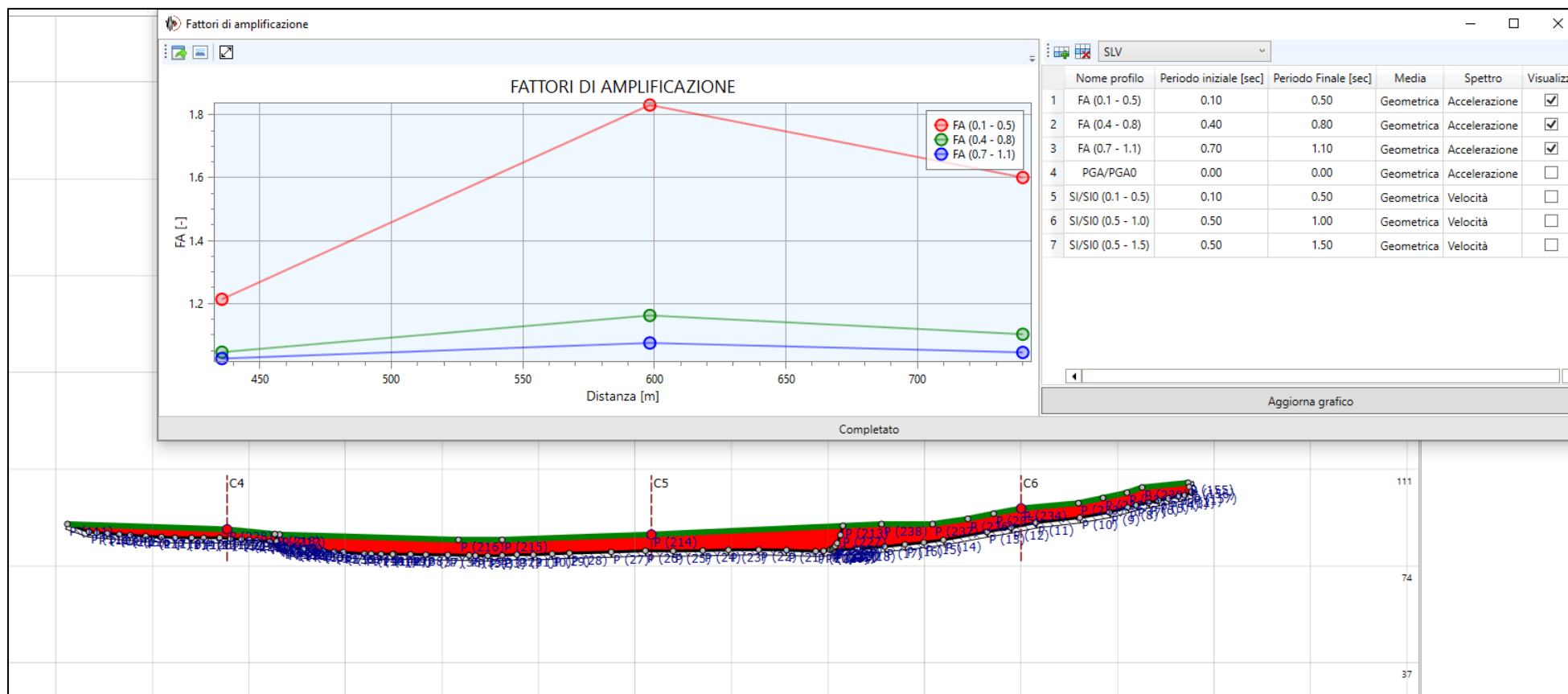
## Sezione BB'\_Chiusi della Verna – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



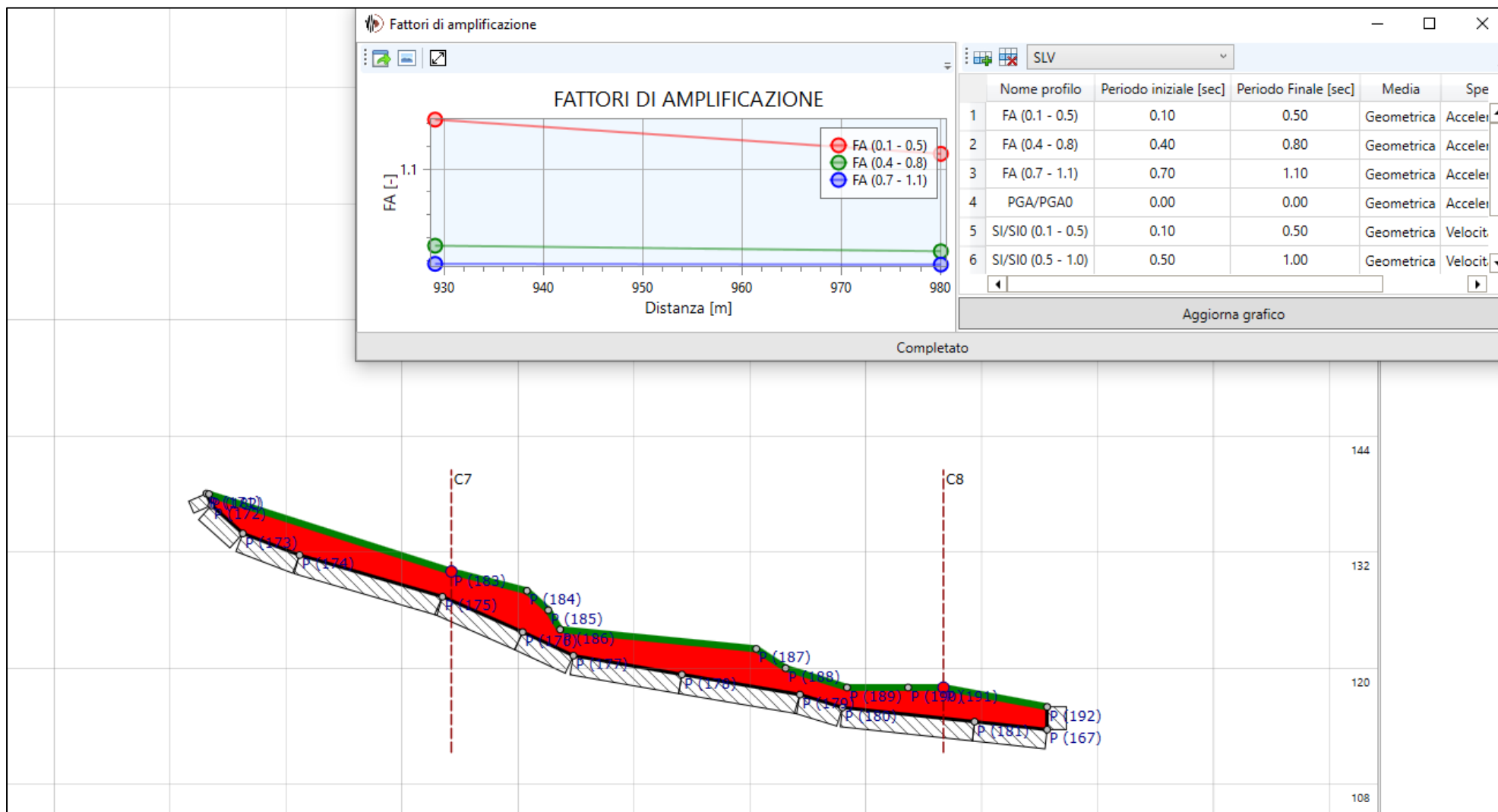
## Sezione CC'\_sx\_Chiusi della Verna – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



## Sezione CC'\_cx\_Chiusi della Verna – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



## Sezione CC'\_dx\_Chiasi della Verna – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali





**Fattori di amplificazione**

FA [-]

Distanza [m]

Legend:

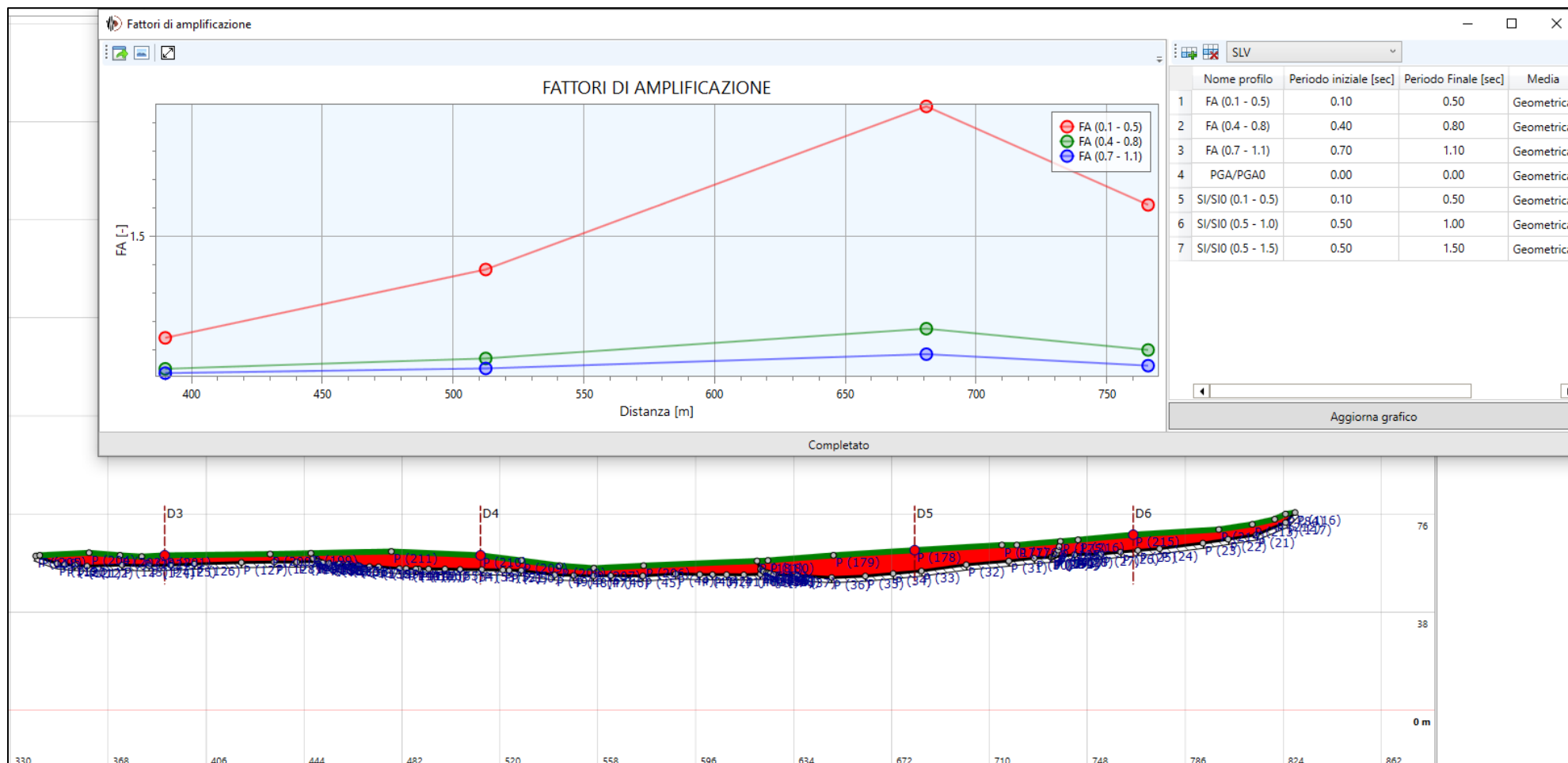
- FA (0.1 - 0.5)
- FA (0.4 - 0.8)
- FA (0.7 - 1.1)

	Nome profilo	Periodo iniziale [sec]	Periodo Finale [sec]	Media	Spettro	Visualizza
1	FA (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Accelerazione	<input checked="" type="checkbox"/>
2	FA (0.4 - 0.8)	0.40	0.80	Geometrica	Accelerazione	<input checked="" type="checkbox"/>
3	FA (0.7 - 1.1)	0.70	1.10	Geometrica	Accelerazione	<input checked="" type="checkbox"/>
4	PGA/PGA0	0.00	0.00	Geometrica	Accelerazione	<input type="checkbox"/>
5	SI/SI0 (0.1 - 0.5)	0.10	0.50	Geometrica	Velocità	<input type="checkbox"/>
6	SI/SI0 (0.5 - 1.0)	0.50	1.00	Geometrica	Velocità	<input type="checkbox"/>
7	SI/SI0 (0.5 - 1.5)	0.50	1.50	Geometrica	Velocità	<input type="checkbox"/>

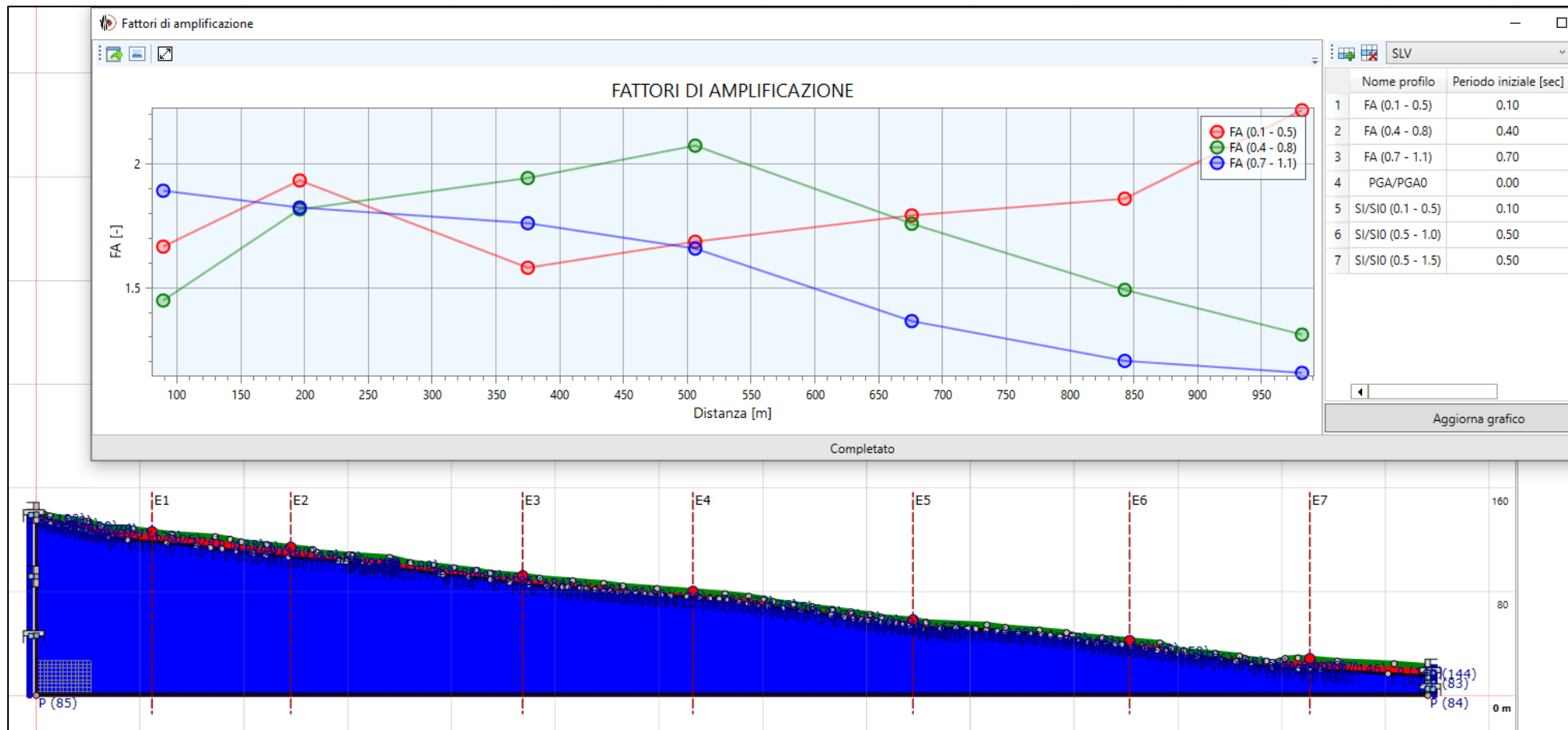
Aggiorna grafico

Completato

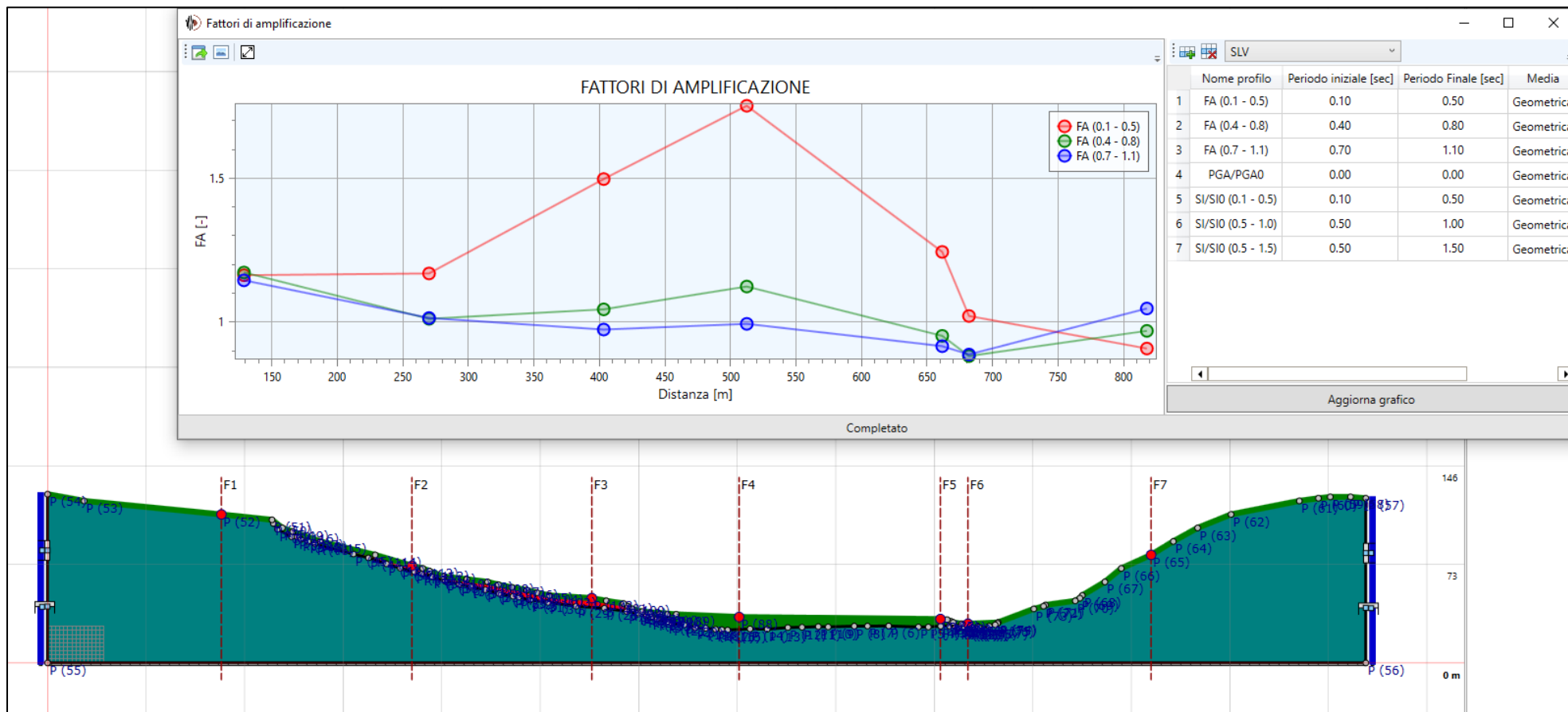
## Sezione DD'\_cx\_Chiusi della Verna – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



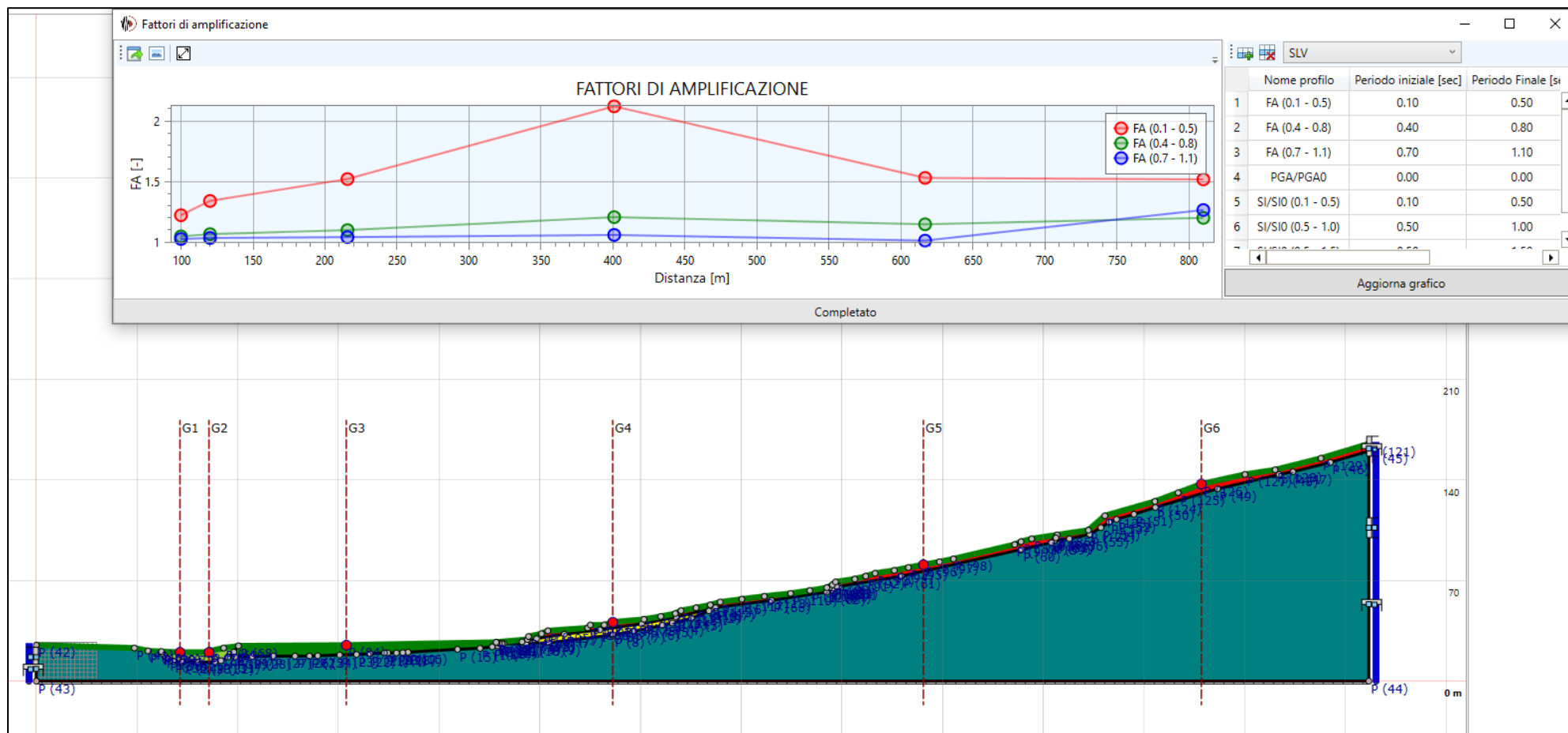
## Sezione EE'\_Chiusi della Verna – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



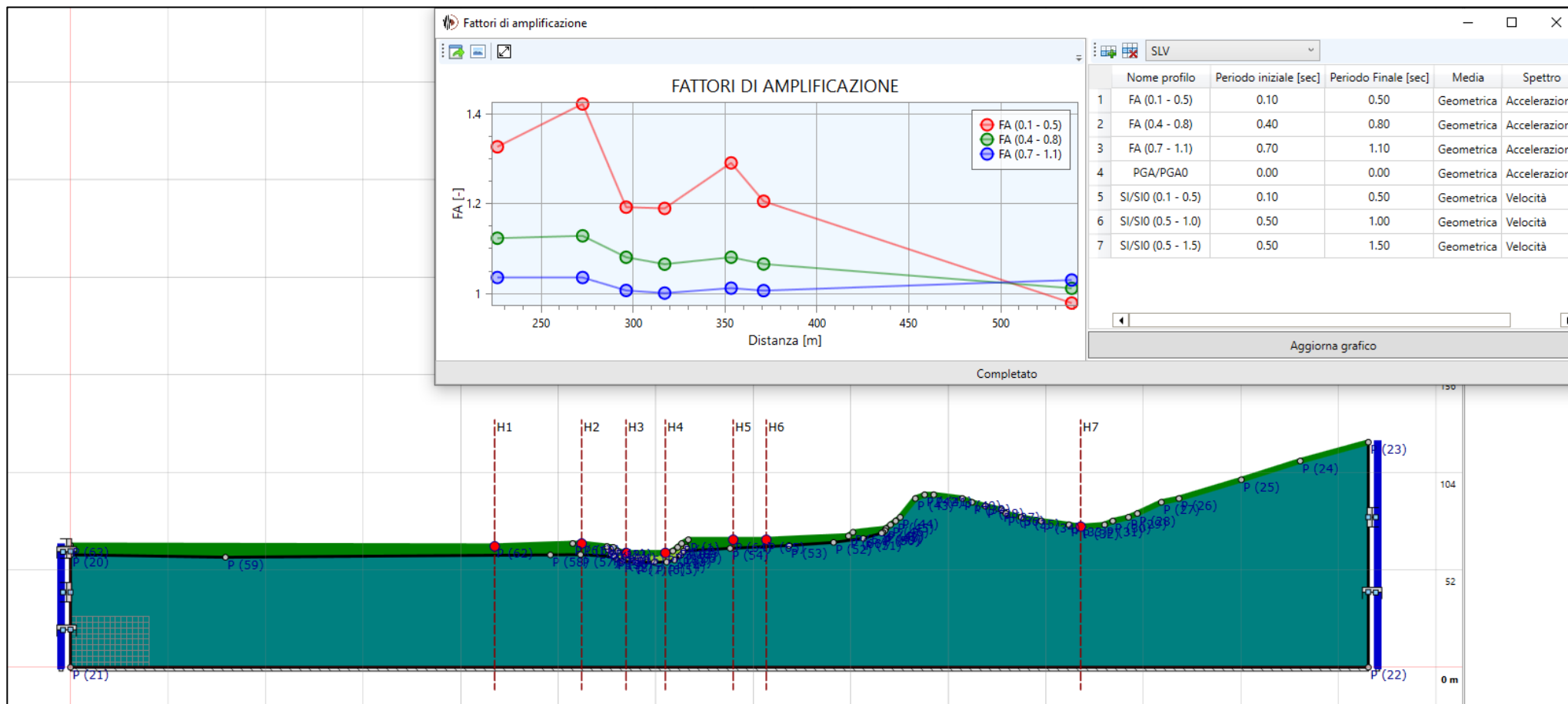
## Sezione FF'\_Chiusi della Verna – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



## Sezione GG'\_Chiusi della Verna – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



## Sezione HH'\_Chiusi della Verna – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



In seguito, partendo dallo spettro di risposta elastico in output, si è effettuato il confronto tra gli integrali di output e di input, in riferimento a 3 differenti intervalli di periodo

$$FA0105 = \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{out}(T) dT}{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{in}(T) dT}$$

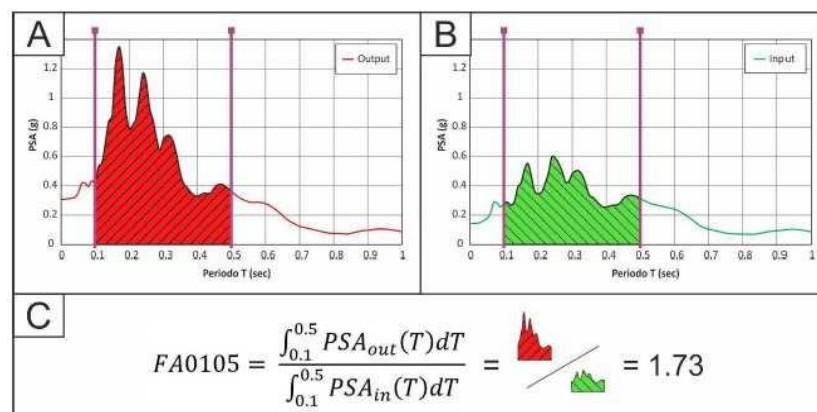
$$FA0408 = \frac{\int_{0.4}^{0.8} PSA_{out}(T) dT}{\int_{0.4}^{0.8} PSA_{in}(T) dT}$$

$$FA0711 = \frac{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{out}(T) dT}{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{in}(T) dT}$$

La metodologia necessaria per il calcolo dei predetti fattori consiste nel calcolare l'area sottesa allo spettro di output nell'intervallo di periodi richiesto (ad es. 0.1sec-0.5sec) mettendola a rapporto con l'area sottesa dallo spettro di input. Il valore risultante in tale caso sarà corrispondente a FA0105.

Gli altri intervalli sui quali è stato effettuato il calcolo corrispondono ai periodi di 0.4-0.8sec e di 0.7-1.1 sec.

Sia lo spettro di output sia lo spettro di input sono stati discretizzati con passo di campionamento lineare ed omogeneo  $\Delta t = 0.01\text{sec}$ , in modo da rendere possibile il calcolo del fattore di amplificazione come rapporto tra le sommatorie dei valori di pseudoaccelerazione (PSA) nell'intervallo di periodi necessario (sia per l'output sia per l'input).



**Fig. 3** - Procedura per il calcolo del fattore di amplificazione FA0105

Il calcolo dei fattori di amplificazione è stato effettuato sui singoli spettri di risposta (messi a rapporto con il corrispondente spettro di input) mediando successivamente i sette fattori determinati.

## 2.5 Analisi dinamiche nelle aree in frana MS3

Le zone di attenzione per instabilità di versante derivano dalle carte MOPS di livello 1.

La valutazione dell'attività con forzante sismica tramite metodi semplificati ha previsto per le aree in frana la valutazione dei coefficienti  $K_c$  (coefficiente sismico critico) e  $K_{heq}$  (coefficiente sismico orizzontale equivalente) così come definiti nelle “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte”.

In particolare  $K_c$  corrisponde ad un coefficiente sismico critico in condizioni di collasso incipiente, posto  $FS = 1.2$  (analisi pseudostatica inversa), mentre  $K_{heq}$  deriva da appropriata analisi numerica che presuppone il calcolo dell'accelerazione massima equivalente nella sezione di studio. In particolare come descritto nelle NTC 2018, § 7.11.3.5.2

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g}$$

$$k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$$

dove

$\beta_s$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

$a_{max}$  = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

$g$  = accelerazione di gravità.

Imponendo  $\beta = 0.24$  come da tabella seguente (Tab.7.11.I - NTC2018)

**Tab. 7.11.I** – Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0,2 < a_g (g) \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g (g) \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g (g) \leq 0,1$	0,20	0,20

Si perviene al calcolo di  $K_{heq}$ , da confrontare con il valore di  $K_c$ , precedentemente descritto.

Sono state quindi definite suscettibili di instabilità le aree per le quali si è riconosciuto  $K_{heq} > K_c$ .

In due aree in frana si è proceduto al calcolo in condizioni dinamiche dello spostamento sismoindotto; tale calcolo ha permesso l'inserimento di dette aree tra le Zone di rispetto per instabilità di versante (vedi allegato).

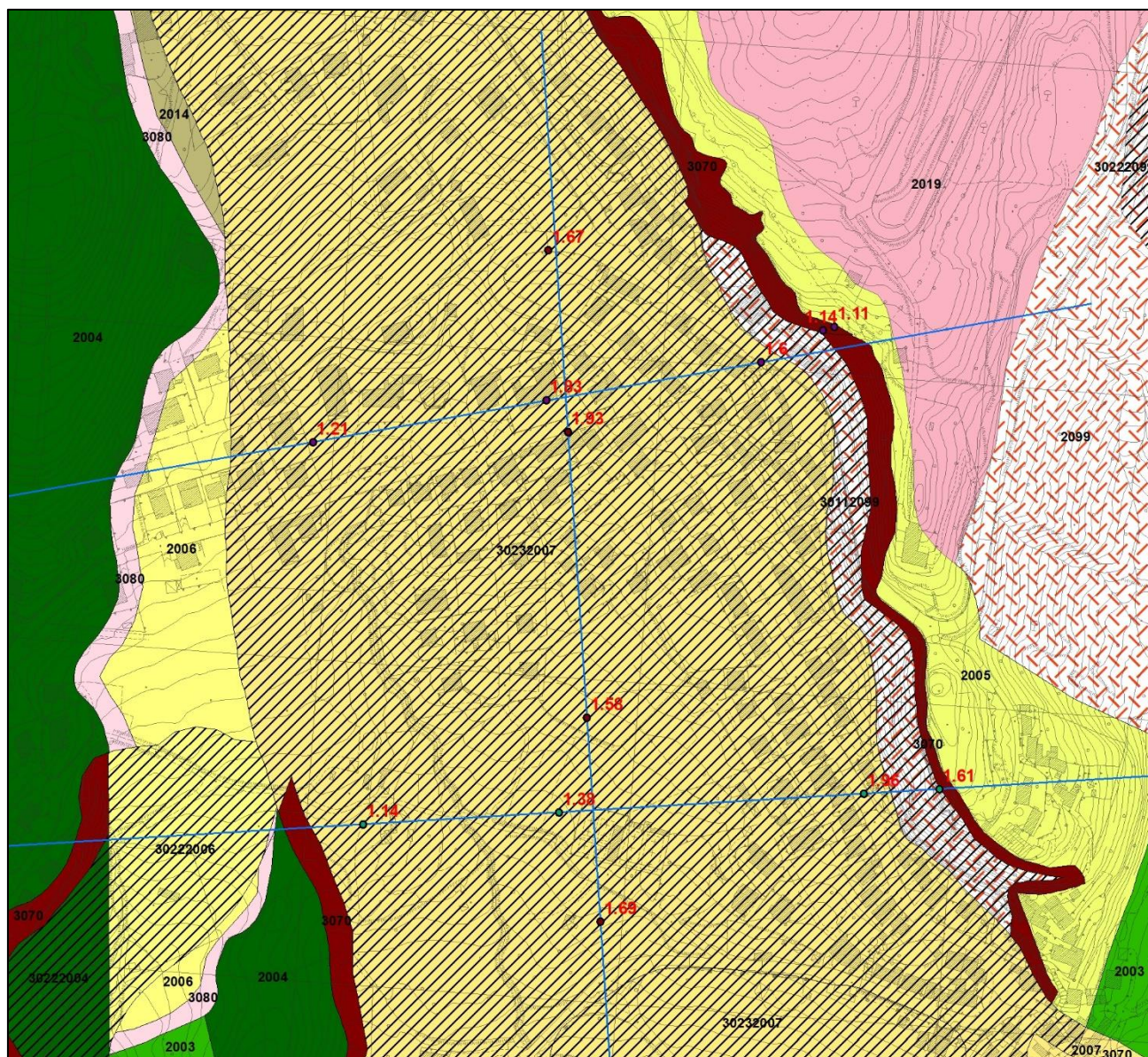
Il calcolo di tali spostamenti è stato effettuato mediante l'utilizzo del software *Slope* della Geostru, in particolare con l'applicativo *QSIM*, il quale consente di ricavare con il metodo Newmark l'andamento degli spostamenti e delle velocità durante la fase sismica e lo spostamento massimo permanente.



## 2.6 Rappresentazione su mappa ed estrapolazione

Ai fini dell'estensione areale del dato, nei settori dell'area di studio non coperti dalle sezioni geologico-tecniche e, quindi, sprovvisti dei dati di output delle analisi numeriche, si è ricorso ad estrapolazione areale.

Tale processo è stato effettuato mediante l'ausilio combinato della cartografia geologico-tecnica e della cartografia MOPS.



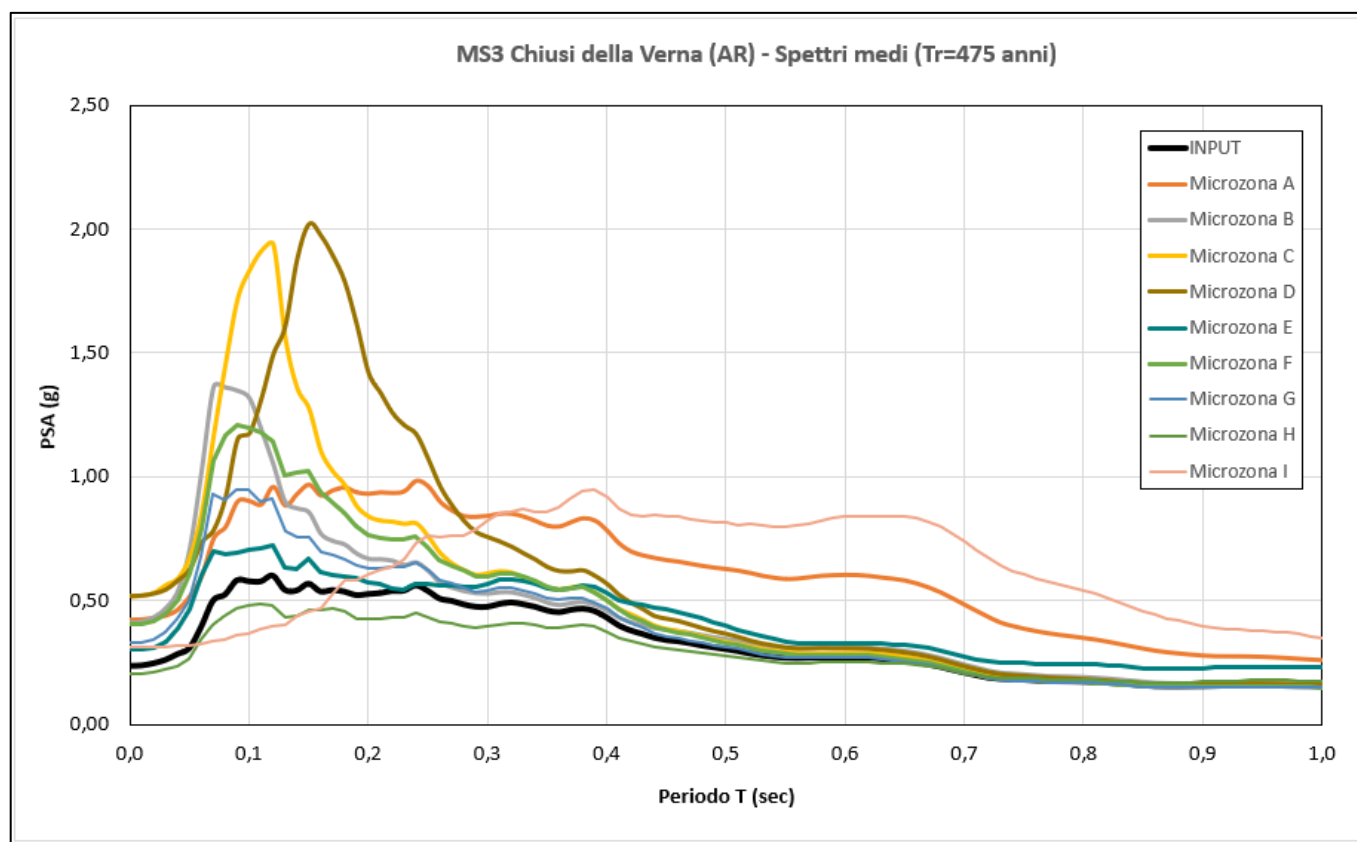
**Fig. 4** - Esempio di sovrapposizione dei valori di FA0105 con le MOPS individuate nello studio di MS1



L'estrapolazione areale dei dati di amplificazione si è basato sul seguente modello logico:

- Rappresentazione su mappa di tutti i punti di output delle modellazioni dinamiche effettuate, con il relativo valore del fattore di amplificazione;
- Individuazione del contesto sismostratigrafico alla base di ogni valore di FA desunto;
- Identificazione sulle cartografie geologico-tecnica e MOPS di analoghe condizioni sismostratigrafiche su aree non coperte da analisi di risposta sismica locale tenendo conto delle indagini sismiche presenti;
- Raggruppamento di situazioni tipologiche ed amplificative simili mediante la discretizzazione dell'area in classi distinte da differenti intervalli di FA0105;
- Stima, in corrispondenza delle microzone individuate al punto precedente, dei fattori di amplificazione richiesti dagli Standard nazionali e regionali (FA0105, FA0408 ed FA0711);
- Rappresentazione della cartografia prodotta mediante software operante in ambiente GIS;
- Calcolo degli spettri medi per ogni microzona individuata nella MS3.

Per ognuna delle microzone individuate, sono stati calcolati gli spettri di risposta elastici medi in termini di PSA, in formato .txt secondo le specifiche richieste.



**Fig. 5** - Spettri di risposta elastici medi in pseudoaccelerazione relativi alle microzone stabili suscettibili di amplificazione locale individuate nell'ambito della MS3 del Comune di Chiusi della Verna (AR).

---

## 2.7 Indicazioni relative alla fase progettuale

Effettuate le analisi di risposta sismica locale ( $T_r=475$  anni e per  $T_r=50$  anni) è stato possibile, realizzata la carta di microzonazione sismica di terzo livello, pervenire alla definizione di spettri “caratteristici”, tramite i seguenti step:

1) Raggruppamento per ogni microzona individuata (caratterizzata da un valore omogeneo del Fattore di amplificazione scelto) di tutti gli spettri di risposta elastici di output ricadenti in essa, ricavandone lo spettro medio (nella fig. 6 sono rappresentati gli spettri medi associati alle 9 microzone omogenee individuate nella MS3);

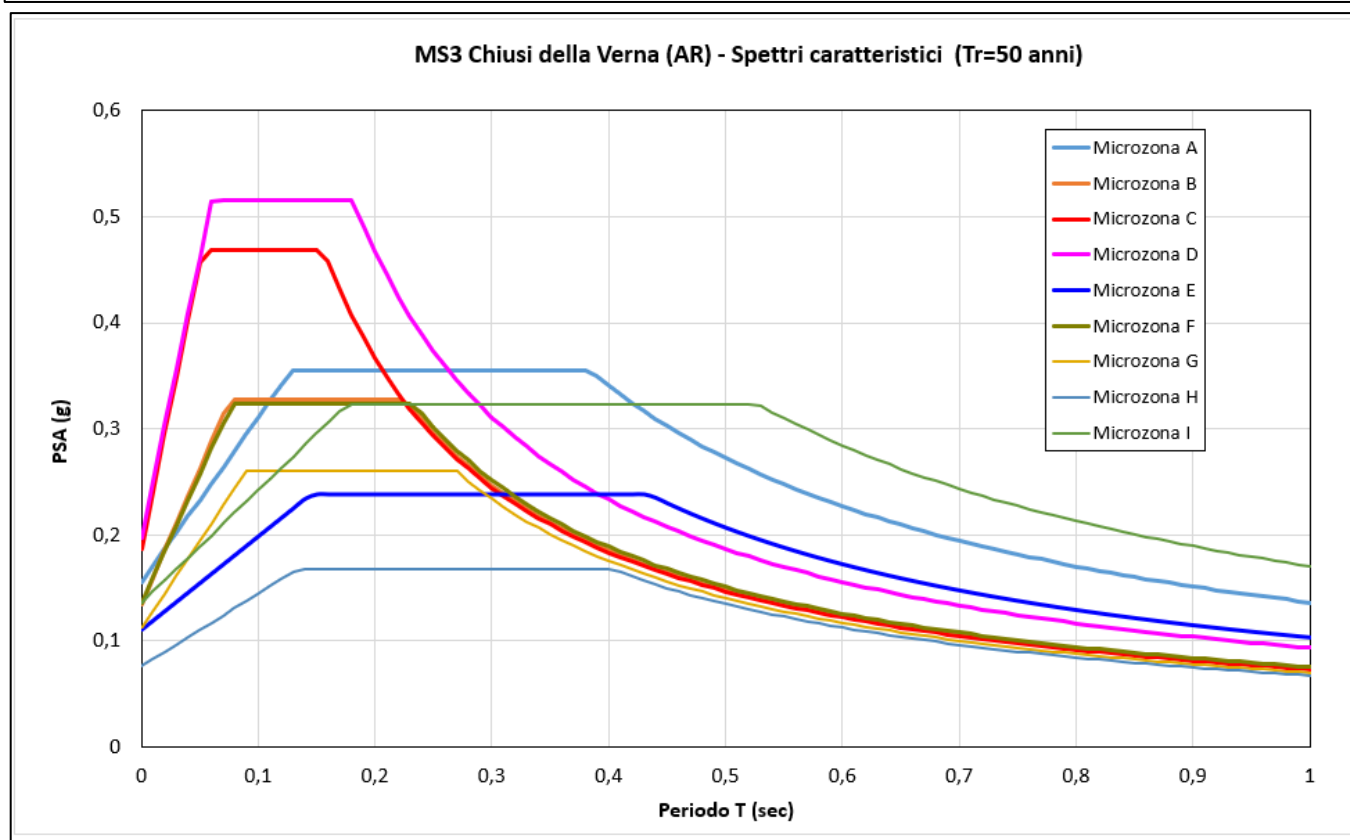
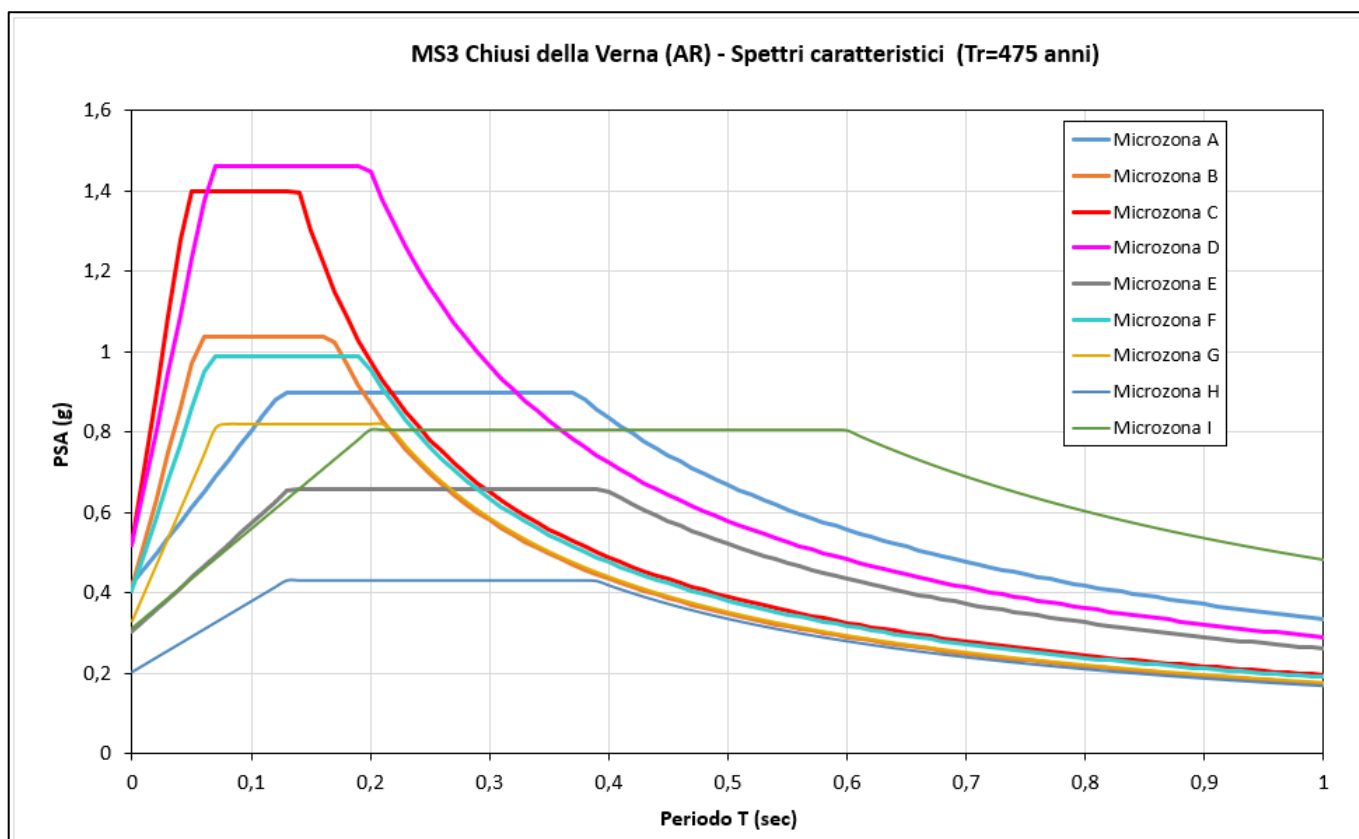
2) Regularizzazione dello spettro medio con definizione sia di uno spettro di forma simile a quelli semplificati di normativa sia, di conseguenza, i suoi parametri dipendenti (**S**, **T<sub>b</sub>** e **T<sub>c</sub>**), mentre i parametri indipendenti sono fissati, come noto, dalla localizzazione del sito e dalle scelte progettuali alla base, in funzione della progettazione.

La regularizzazione dello spettro è stata effettuata secondo le procedure illustrate negli ICMS 2008 e meglio specificate da Pergalani e Compagnoni (2013).

Gli spettri si riferiscono a **periodi di ritorno di 475 anni e di 50 anni** e, pertanto, possono essere paragonati agli spettri semplificati di normativa relativi all’azione sismica per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (**SLV**) per un edificio “ordinario” (Vita nominale **VN = 50 anni** e **Classe d’uso CU = II**) e per lo Stato Limite di Esercizio (Stato limite di Danno, **SLD**), che nel caso specifico corrispondono ad un  **$T_r=50$  anni**. Tali spettri caratteristici normalizzati sono utilizzabili per rappresentare l’azione sismica allo SLE.

Di seguito, gli Spettri caratteristici normalizzati secondo la procedura descritta nel testo, relativi alle microzone individuate per il Comune di Chiusi della Verna per periodi di ritorno pari a 475 e 50 anni.

---



Regolarizzati gli spettri è stato possibile produrre i parametri indipendenti e dipendenti desunti a seguito della regolarizzazione dello spettro medio.

Chiusi della Verna (AR)							Chiusi della Verna (AR)						
Microzonazione sismica di 3° livello - SLV (Tr=475 anni)							Microzonazione sismica di 3° livello - SLD (Tr=50 anni)						
Spettri caratteristici delle microzone sismiche - parametri							Spettri caratteristici delle microzone sismiche - parametri						
ag = 0.205g							ag = 0.084g						
microzona	località	F0 (-)	S (-)	Tb (s)	Tc (s)	Td (s)	microzona	località	F0 (-)	S (-)	Tb (s)	Tc (s)	Td (s)
A	Chiusi della Verna	2,133	2,05	0,124	0,372	3,283	A	Chiusi della Verna	2,285	1,85	0,128	0,384	2,221
B		2,526	2,00	0,056	0,168	3,244	B		2,447	1,60	0,075	0,226	2,136
C		2,705	2,52	0,047	0,140	3,670	C		2,515	2,22	0,052	0,157	2,345
D		2,819	2,53	0,066	0,198	3,673	D		2,610	2,35	0,060	0,181	2,391
E		2,171	1,48	0,132	0,396	2,815	E		2,150	1,32	0,145	0,434	2,042
F		2,446	1,97	0,064	0,192	3,218	F		2,392	1,61	0,078	0,233	2,142
G		2,494	1,60	0,071	0,214	2,914	G		2,337	1,33	0,090	0,270	2,045
H		2,130	0,99	0,130	0,389	2,412	H		2,218	0,90	0,134	0,402	1,903
I		2,580	1,52	0,200	0,599	2,849	I		2,380	1,62	0,176	0,528	2,143

**Fig. 6** – Parametri dipendenti relativi agli spettri di risposta caratteristici (Tr=475 anni e Tr=50 anni), desunti a seguito del processo di normalizzazione

## **ALLEGATO A – Report RSL2D sezione CC '\_Chiusi della Verna e analisi dinamica frana**

- ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE
- VERIFICA DI STABILITA' IN CONDIZIONI STATICHE
- ESTRATTI DI ANALISI DINAMICA DELLO SPOSTAMENTO SISMOINDOTTO

## **ALLEGATO B – Report RSL2D sezione GG '\_Chiusi della Verna - Corsalone e analisi dinamica frana**

- ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE
- VERIFICA DI STABILITA' IN CONDIZIONI STATICHE
- ESTRATTI DI ANALISI DINAMICA DELLO SPOSTAMENTO SISMOINDOTTO

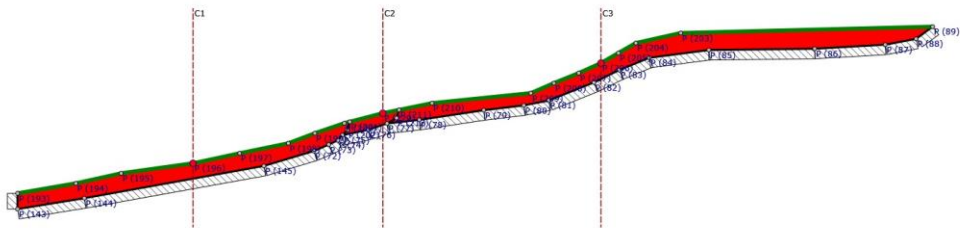
## **ALLEGATO A – Report RSL2D sezione CC '\_Chiusi della Verna e analisi dinamica frana**

- ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE
- VERIFICA DI STABILITA' IN CONDIZIONI STATICHE
- ESTRATTI DI ANALISI DINAMICA DELLO SPOSTAMENTO SISMOINDOTTO



RELAZIONE DI CALCOLO

ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE



Oggetto: MS3\_Comune di Chiusi della Verna

Committente

Progettista



## Sommario

1 - Introduzione.....	2
1.1 - Impostazione del Problema di Calcolo dell'Amplificazione Locale .....	5
1.2 - Normativa di Riferimento .....	6
2 - Risposta Sismica Locale .....	7
3 - Metodo di calcolo adottato e descrizione del codice di calcolo LSR 2D .....	8
3.1 - Metodo lineare equivalente .....	8
3.2 - Soluzione alla singola iterazione mediante FEM .....	10
Smorzamento .....	11
Free-field boundaries .....	11
3.3 - Procedimento iterativo .....	12
3.4 - Interpretazione dei risultati.....	12
4 - Input .....	14
4.1 - Curve di Decadimento dei Materiali .....	14
4.2 - Stratigrafia e Caratteristiche meccaniche dei singoli strati .....	16
4.3 - Accelerogrammi e Spettri di Input.....	17
4.4 - Modello di Calcolo FEM.....	21
5 - Output .....	58
5.1 - Accelerogrammi Output .....	58
5.2 - Spettri Output .....	68
5.3 - Interpretazione dei risultati.....	79
5.4 - Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL .....	81

## 1 - Introduzione

In passato si è potuto osservare, a seguito di terremoti distruttivi, una distribuzione anomala del danneggiamento delle costruzioni, con forti differenziazioni fra zone contigue anche di modeste dimensioni.

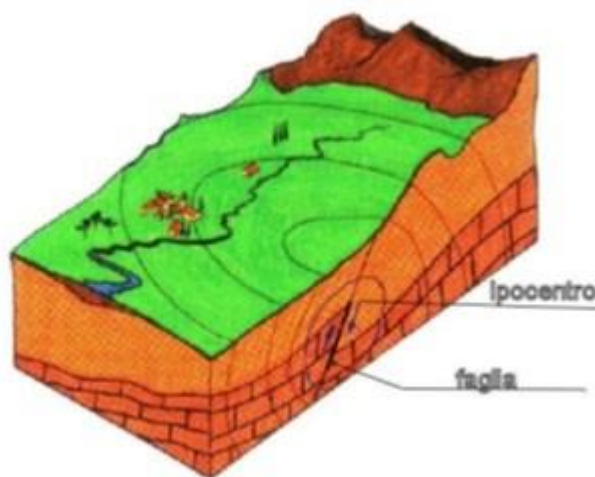
Oltre alle intrinseche differenze della vulnerabilità sismica delle costruzioni ed alle differenti caratteristiche dinamiche delle stesse, tali cause possono essere attribuite principalmente alle modificazioni delle caratteristiche del moto sismico indotte da condizioni geologiche e geomorfologiche locali.

Il moto sismico in un determinato sito, infatti, è influenzato da tre parametri importanti:

- Il meccanismo di sorgente;
- La propagazione;
- La risposta sismica locale;

I primi due fattori dipendono fortemente dalle caratteristiche dell'evento sismico; questi variano in funzione delle caratteristiche della sorgente (magnitudo e tipo di rottura della faglia) e dalla distanza tra il sito in esame e la sorgente.

La risposta sismica locale è il risultato di interazioni tra le onde sismiche e le condizioni locali, cioè l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno ed ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.



**Figura 1.** Schema della rottura del terreno e generazione e propagazione delle onde sismiche.

In altre parole le caratteristiche del sito sono le responsabili delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (terremoto di riferimento), subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo G. et al., 1999).

Nella Figura 1 è rappresentato uno schema della rottura fragile del terreno in profondità con conseguente generazione di onde che si irradiano dall'ipocentro.

Se si ipotizza di avere installato un sismometro ad una grande distanza dall'ipocentro un possibile segnale registrato potrebbe essere quello mostrato nella Figura 2. Il segnale inizia con l'arrivo delle onde P caratterizzate da alte frequenze a bassa ampiezza. Successivamente arrivano le onde S che si propagano meno velocemente delle P e sono di frequenza più bassa e di maggiore ampiezza. Queste ultime sono in genere la causa dei maggiori danni. Le onde P e quelle S, come già descritto

nel capitolo A sono chiamate onde di volume per distinguerle da quelle di superficie che sono più lente.



**Figura 2.** Tipico sismogramma registrato in superficie a grande distanza.

In generale si può dire che le onde generate dalla sorgente sismica sono di due differenti tipi, cioè quelle associate a stati deformativi di compressione-dilatazione volumetrica, dette onde *P* che si propagano con velocità  $V_p$  pari a:

$$V_p = \sqrt{\frac{Mv}{\rho}}$$

con:

$$Mv = \lambda + 2G$$

dove:

- $\lambda$  = modulo di Lamé del terreno;
- $G$  = modulo elastico del taglio del terreno;
- $\rho$  = densità del volume del terreno;

Per le onde *P* il moto oscillatorio delle particelle di terreno avviene parallelamente alla direzione di propagazione.

Le onde *S* sono associate a deformazione di taglio ed hanno una velocità  $V_s$  pari a:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Il moto delle particelle di terreno è in tal caso perpendicolare alla direzione di propagazione. Il campo di spostamenti, in genere, è scomposto in due componenti perpendicolari tra di loro: le onde *SV* polarizzate nel piano verticale contenente la sorgente e le onde *SH* polarizzate nel piano orizzontale (piano della superficie libera del terreno in direzione perpendicolare al precedente).

Per maggiore chiarezza, se si considera il piano  $\pi$  verticale e contenente la direzione di propagazione dell'onda incidente, il moto della particella di terreno perpendicolare a tale piano costituisce l'onda *SH*, viceversa il moto nel piano costituisce l'onda *SV*.

Le onde *P* e *S* arrivate in superficie possono trasformarsi parzialmente in onde di diverso tipo (*P* in *S* oppure *S* in *P*) oppure in onde superficiali chiamate così perché viaggiano in superficie attenuandosi rapidamente con la profondità. Queste ultime si differenziano in onde di Rayleigh

quando il moto della particella di terreno è in un piano verticale oppure onde di Love quando il moto è in un piano orizzontale.

Con riferimento alla Figura 3, il fenomeno della propagazione delle onde può essere descritto come segue. Nella sua complessità morfologica, litologica e stratigrafica, un territorio può essere rappresentato come un insieme di formazioni superficiali, interessate dai loro fenomeni evolutivi tipici, poggianti su formazioni più profonde, i cui andamenti possono essere stati resi complessi fino alla creazione di affioramenti dai fenomeni tettonici ed orogenetici.

Prevalentemente, le formazioni profonde saranno costituite da rocce ignee o metamorfiche di origine sedimentaria, mentre quelle superficiali saranno di natura sedimentaria più recente, coerenti od incoerenti, e quindi di caratteristiche meccaniche ben differenziate rispetto alle prime. Le onde sismiche che si sono generate in profondità, e che sono già caratterizzate diversamente a seconda del meccanismo proprio della sorgente, subiscono una serie di modificazioni ulteriori (riflessioni e rifrazioni) nell'attraversare la crosta terrestre e giungere fino alle formazioni di base per il sito. Ad una certa distanza dall'epicentro, e per una porzione di territorio ragionevolmente limitata, il moto sismico apparirà come un fronte d'onda uniforme propagantesi dal basso verso l'alto, con una certa angolazione rispetto alla verticale, che viene trasmesso dalle formazioni di base a quelle superficiali.

Il moto al suolo tende a non dipendere più solamente dal tipo di rottura della sorgente e a diventare il risultato di due ulteriori meccanismi eventualmente combinati:

- la propagazione delle onde sismiche all'interno delle formazioni di base e dalla conformazione delle frontiere della stessa;
- la risposta dinamica delle formazioni superficiali.

Tutto ciò comporta una non omogeneità del moto vibratorio in superficie che può cambiare da punto a punto anche a breve distanza. Sugli aspetti quantitativi e qualitativi del fenomeno hanno pertanto grande rilevanza diversi fattori quali la natura delle onde sismiche incidenti ed in particolare il meccanismo di sorgente, le diversità fra le caratteristiche meccaniche dei terreni attraversati, ed in particolare tra formazioni di base e superficiali, la conformazione e la giacitura degli strati, la presenza di falde idriche, l'entità dei fenomeni dissipativi ed altri ancora.

Al variare delle condizioni locali, il moto alla superficie risulterà quindi differente per quanto attiene ai suoi caratteri principali e cioè: ampiezza, contenuto in frequenza e durata. Si osserva che tutti e tre questi caratteri sono significativi e concorrono a causare il danneggiamento delle strutture e l'instabilità dei terreni (frane, cedimenti, liquefazioni).

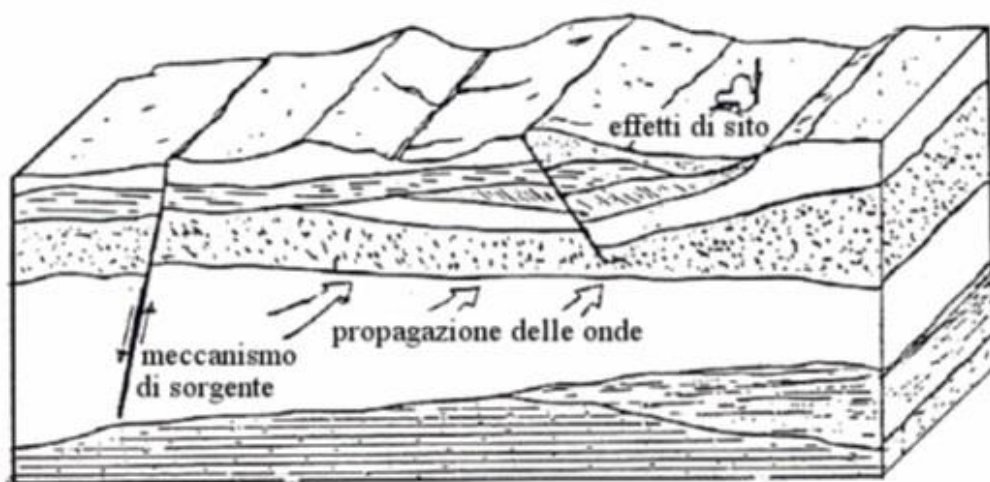


Figura 3. Schema di una situazione reale.

## 1.1 - Impostazione del Problema di Calcolo dell'Amplificazione Locale

Per illustrare gli aspetti principali del fenomeno della risposta sismica locale si paragoni il moto in corrispondenza di tre siti, indicati con A, B e C nella Figura 4, posti alla stessa distanza dalla sorgente sismica durante lo stesso evento sismico. Si supponga inoltre che il primo sito sia su un semispazio affiorante (per esempio roccia) e il secondo B su un deposito alluvionale posto al di sopra del semi spazio ed il terzo C su di un rilievo.

In corrispondenza della coltre alluvionale si verifica, rispetto al moto sul semi spazio affiorante, una amplificazione del moto in particolari campi di frequenza e una deamp1ificazione negli altri campi. Analogamente sul rilievo in C si verificheranno focalizzazioni oppure diradazioni di onde per effetto della forma del rilievo e della direzione di incidenza delle onde.

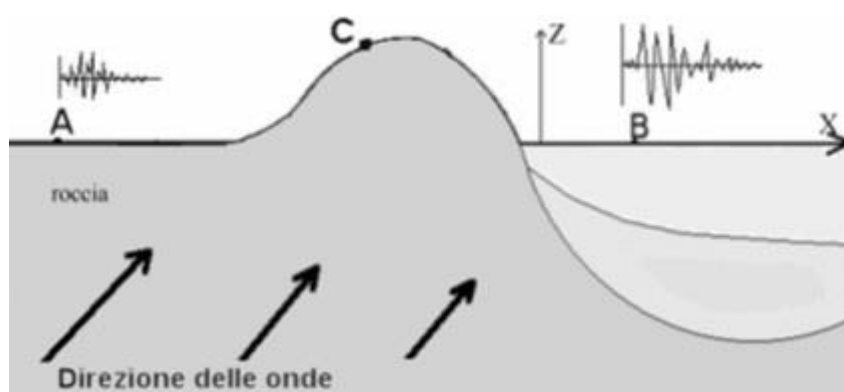


Figura 4. Schema della propagazione delle onde dalla sorgente e delle differenti condizioni locali.

In letteratura si parla di effetti stratigrafici o monodimensionali nel caso in cui le modifiche che il moto sismico subisce nel propagarsi in direzione prevalentemente verticale verso la superficie dal sottostante basamento roccioso siano essenzialmente attribuibili a fenomeni di filtraggio. L'amplificazione delle onde sismiche dipende, in questo caso dalla stratigrafia del sottosuolo, dalle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni e del contenuto in frequenza del moto sismico.

Il termine "effetti di bacino" è utilizzato quando le onde incidenti incontrano una valle alluvionale; in tal caso ai fenomeni sopra descritti si sovrappongono quelli dovuti al manifestarsi di fenomeni complessi di interazione tra le onde, che possono sommarsi o elidersi a vicenda, e generazione di onde superficiali. Spesso ai bordi della valle si verificano maggiori amplificazioni, dette: "effetti di bordo".

Con "effetti topografici" si intendono le modifiche delle caratteristiche del moto sismico causate essenzialmente da fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche per effetto della particolare geometria della superficie (per es. la cresta di un rilievo o un canyon) e sono molto influenzati dalla lunghezza d'onda del moto incidente e dalla direzione di incidenza.

Lo scopo delle analisi di amplificazione sismica locale è quello di determinare il moto in B oppure in C una volta noto il moto nel sito di riferimento A. Tale moto di riferimento è in genere determinabile in via statistica (analisi di pericolosità) o deterministica dallo studio del meccanismo di rottura della sorgente nell'ipotesi che tra la sorgente stessa ed il sito in esame il mezzo sia omogeneo ed isotropo. Come è facile immaginare le caratteristiche del moto in superficie sono fortemente influenzate, oltre che dalla geometria degli strati e delle loro proprietà meccaniche, anche dalle caratteristiche

del moto incidente, cioè dalla direzione di propagazione, dal suo contenuto energetico e dalla direzione del moto delle particelle del terreno.

## **1.2 - Normativa di Riferimento**

La normative di riferimento per lo studio del problema in esame sono:

- NTC 2018 Cap 7.11.3.1 (Risposta Sismica Locale);
- Legge Regionale n. 35 del 19/10/2009 (Allegato 3 - Effetti di sito per interventi di tipo edilizio).



## 2 - Risposta Sismica Locale

Come già detto in precedenza, il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa dei fattori anzidetti, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I passi da seguire nello studio del problema della risposta sismica locale sono:

1. Definizione input sismico;
2. Stima dell'accelerazione di base;
3. Dati di disaggregazione;
4. Estrazione, conversione e normalizzazione accelerogrammi di input;
5. Analisi di Risposta Sismica Locale;
6. Inserimento sismostratigrafia di input (derivata da indagine sismica MASW);
7. Esecuzione dell'analisi e restituzione grafica.

Le analisi numeriche che consentono di valutare gli effetti del sito nell'amplificazione delle onde sismiche possono essere distinte in:

- Analisi numeriche monodimensionali;
- Analisi numeriche bidimensionali;
- Analisi numeriche tridimensionali.

Il primo approccio consente di definire una realistica risposta sismica stratigrafica di terreni non affetti da problematiche bidimensionali. Questo approccio è ritenuto la via ufficiale delle NTC 2018 (Cap. 3.2.2) e consente, in determinati casi e mediante il confronto con la relativa categoria di sottosuolo, elementi di risparmio rispetto all'approccio semplificato di normativa, poiché identifica amplificazione per intervalli di periodi solitamente più limitati rispetto a quelli di normativa.

Il secondo approccio è da preferire in quelle situazioni in cui il sottosuolo presenta una geometria variabile in cui, oltre alla profondità, è importante considerare un'altra delle due restanti dimensioni spaziali. Un esempio di situazione che richiede l'utilizzo di modelli bidimensionali è il caso delle aree marginali delle valli alluvionali, in cui alle normali cause di amplificazione del moto sismico si sommano gli effetti di bordo connessi alla geometria del problema.

Il terzo approccio necessita di modelli complessi che richiedono capacità computazionali notevoli; solo recentemente iniziano ad avere una certa diffusione grazie al rapido sviluppo degli strumenti informatici. Il loro utilizzo è principalmente concentrato sulla valutazione delle amplificazioni in presenza di effetti morfologici, data l'importanza assunta in queste analisi dalla conoscenza precisa e dalla gestione di un modello tridimensionale del terreno.

### 3 - Metodo di calcolo adottato e descrizione del codice di calcolo LSR 2D

Il codice di calcolo LSR 2d, alla stregua di software ben noti dalla comunità scientifica (es. QUAD4 e QUAD4M), consente di effettuare una modellazione bidimensionale del problema mediante il metodo degli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando il metodo lineare equivalente e tenendo conto della deformabilità del substrato.

Qualora la stratigrafia in esame non presenti problematiche di carattere bidimensionale è comunque possibile studiare il problema monodimensionale grazie ad una discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

#### 3.1 - Metodo lineare equivalente

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso e caratterizzato da marcata non linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e degradazione progressiva delle caratteristiche meccaniche per effetto del numero di cicli di carico applicati. In presenza di fluido interstiziale, alle suddette problematiche si aggiunge l'accumulo di sovrappressioni interstiziali in condizioni di drenaggio impedito o parziale, che sono comunque le più frequenti, in considerazione della velocità di applicazione del carico.

La modellazione di tali fenomeni richiede l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che oltretutto difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione spesso si preferisce fare riferimento a modelli costitutivi semplificati che, pur non essendo rigorosi, riescono a riprodurre il comportamento in modo adeguato in riferimento alla specifica applicazione.

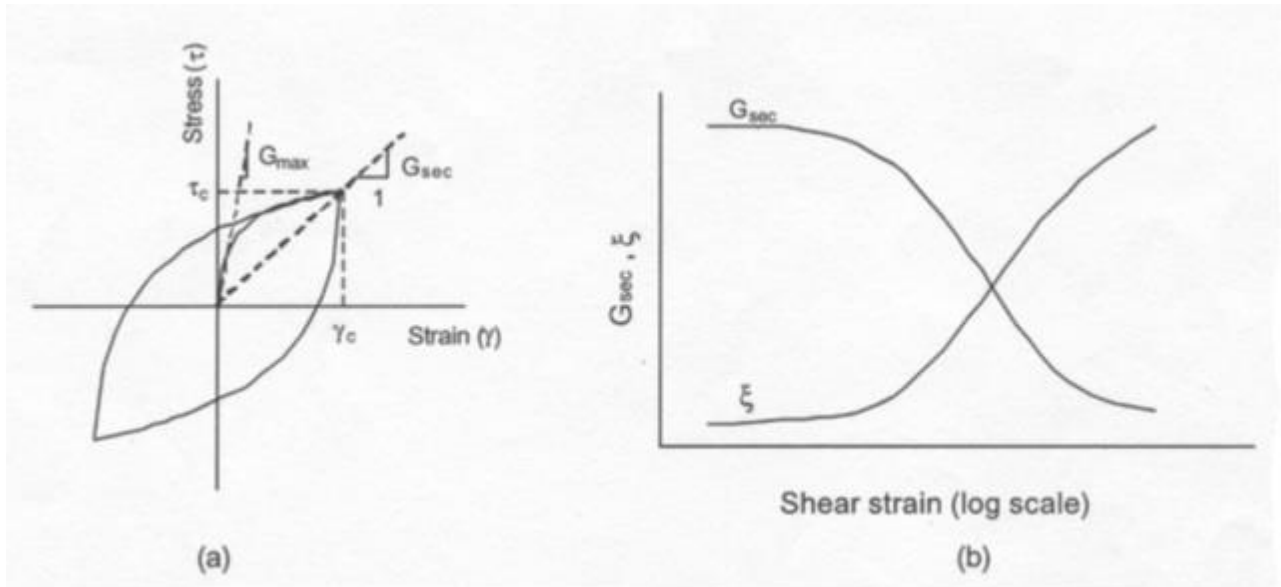
In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in Figura 5. La tensione  $\tau$  dipende dalla deformazione  $\gamma$  e dalla sua derivata  $\dot{\gamma}$ , secondo la relazione:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}$$

dove:

- $G$  = Modulo di taglio;
- $\eta$  = viscosità del mezzo;



**Figura 5.** Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Figura 5. Il modulo di taglio equivalente,  $G$ , è preso considerando il modulo di taglio secante  $G_s$ .

È possibile notare come alla fine di un ciclo controllato e simmetrico di tensioni si ha:

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

La curva  $G_s - \gamma$  non può avere una forma arbitraria ma deriva dalla curva  $\tau - \gamma$  e sussiste la seguente relazione:

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = G_s(\gamma) + \frac{dG_s}{d\gamma} \gamma \geq 0$$

La descrizione del comportamento meccanico dei terreni nei confronti dei carichi ciclici non può peraltro prescindere dalla dissipazione intrinseca di energia che si verifica durante i cicli di carico-scarico. Il parametro di riferimento a tal riguardo è costituito dal coefficiente di smorzamento  $D$ , definito come:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W^{dissp}}{W^{max}}$$

dove:

- $\Delta W^{dissp}$  = quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;
- $W^{max}$  = massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico;

In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento (Figura 5b).

### 3.2 - Soluzione alla singola iterazione mediante FEM

L'approccio utilizzato per la soluzione visco-elastica lineare all'interno dell'*i*-esimo ciclo iterativo utilizza il metodo degli elementi finiti. In particolare, il deposito di terreno viene discretizzato mediante una "mesh" di elementi finiti piani che possono avere forma quadrangolare o rettangolare a seconda dei casi (figura 6) e caricato mediante un'accelerazione alla base dello stesso (bedrock), la soluzione dell'equazione del moto viene poi ottenuta nel dominio del tempo utilizzando il metodo di integrazione di Newmark.

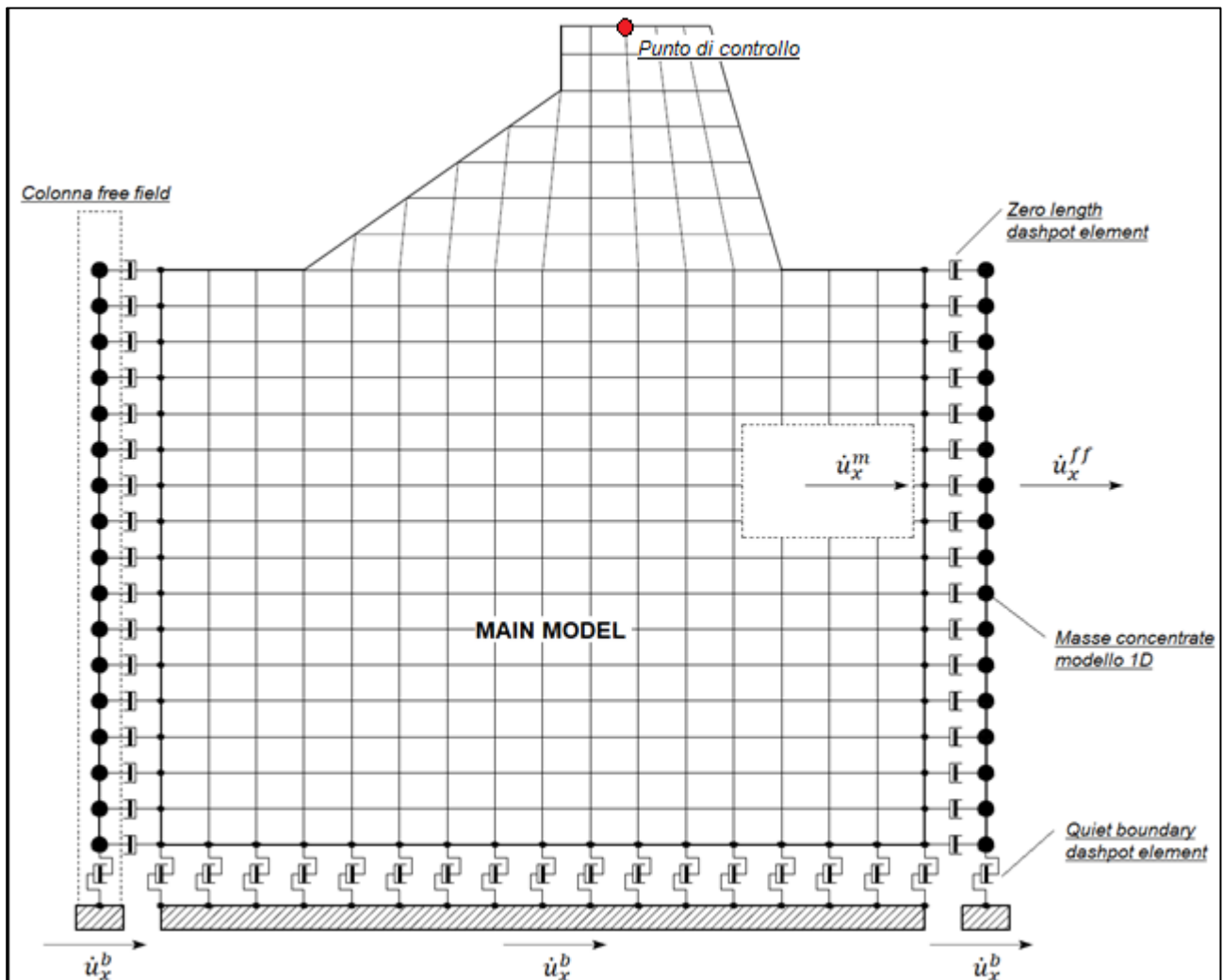


Figura 6. Discretizzazione FEM del deposito di terreno.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Ma_g$$

dove:

- $M$  = matrice di massa del sistema;
- $C$  = matrice di smorzamento del sistema;
- $K$  = matrice di rigidità del sistema;
- $\ddot{u}, \dot{u}, u$  = rispettivamente vettori di accelerazione, velocità e spostamento del sistema;
- $a_g$  = vettore di accelerazione alla base;

Tale equazione vale per ogni istante di tempo  $tn$  e descrive l'equilibrio dinamico del sistema. La soluzione in termini di spostamento velocità ed accelerazione per ogni  $tn$  viene ottenuta a partire dalle seguenti relazioni:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n]$$

dove:

- $\Delta t$  = incremento temporale tra l'istante di tempo  $tn$  e  $tn - 1$ ;
- $\beta$  = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25;
- $\gamma$  = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50;

### Smorzamento

La matrice di smorzamento del sistema viene ottenuta mediante l'assemblaggio delle matrici di smorzamento dei singoli elementi, queste ultime ottenute a loro volta come:

$$C_q = \alpha_q M_q + \beta_q K_q$$

dove:

- $\alpha_q$  e  $\beta_q$  = coefficienti di smorzamento alla Rayleigh;

Tali coefficienti vengono ottenuti a partire dal rapporto di smorzamento viscoso del singolo elemento e dalla relazione seguente:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n]$$

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

$$D_q = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha_q}{\omega} + \beta_q \omega \right)$$

dove:

- $\omega_1$  = frequenza naturale del primo modo del deposito;
- $\omega_2 = n * \omega_1$  con  $n = \omega_i / \omega_1$  (approssimato all'intero pari più grande) e  $\omega_i$  frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock;

### Free-field boundaries

Le condizioni di free-field sulle frontiere laterali vengono implementate mediante l'accoppiamento di smorzatori viscosi tra i nodi delle frontiere laterali del modello e i nodi di opportune colonne di terreno monodimensionali (colonne free-field) in grado di descrivere il moto in condizioni di campo libero. Le coordinate dei nodi delle frontiere laterali del modello e delle colonne free-field possono essere uguali. È necessario, affinché tali condizioni al contorno siano applicabili, che le frontiere laterali del modello siano perfettamente verticali. Le forze interne agli smorzatori possono essere ottenute mediante le seguenti equazioni:

$$F_x = -\rho V_p (\dot{u}_x^m - \dot{u}_x^{ff}) A \quad (1)$$

$$F_y = -\rho V_s (\dot{u}_y^m - \dot{u}_y^{ff}) A \quad (2)$$

dove:

- $\rho$ : densità di massa del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $V_p$ : velocità delle onde P del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $V_s$ : velocità delle onde S del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $A$ : area di influenza relativa al nodo su cui agisce lo smorzatore;
- $\dot{u}_x^m$ : velocità del nodo del modello in direzione x;
- $\dot{u}_y^m$ : velocità del nodo del modello in direzione y;
- $\dot{u}_x^{ff}$ : velocità del nodo della colonna free-field in direzione x;
- $\dot{u}_y^{ff}$ : velocità del nodo della colonna free-field in direzione y.

Le componenti della velocità dei nodi delle colonne laterali ad ogni istante di tempo vengono ottenute mediante una soluzione numerica monodimensionale a masse concentrate dell'equazione di propagazione delle onde. Tale soluzione è affidata ad un processo di calcolo che opera in parallelo rispetto a quello impiegato per la soluzione del modello principale. In altre parole, per il generico passo di integrazione temporale, vengono dapprima ottenute le componenti delle velocità delle colonne di campo libero attraverso la soluzione 1D, per poi essere convertite in carichi applicati al modello principale mediante le equazioni (1) e (2).

### 3.3 - Procedimento iterativo

La procedura iterativa che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema consiste nell'eseguire una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidità e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Facendo riferimento alla Figura 7, lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico:

- definizione di curve  $G = G(\gamma)$  e  $D = D(\gamma)$  per i diversi strati;
- inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni ( $G_0$  e  $D_0$ );
- calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato ( $\gamma_1$ , Figura 7);
- aggiornamento dei valori  $G_1 = G(\gamma_1)$  e  $D_1 = D(\gamma_1)$ ;
- iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ( $\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$ ).

### 3.4 - Interpretazione dei risultati

Il risultato della procedura iterativa sopradescritta non è altro che la storia temporale di accelerazione, velocità e spostamento di ogni grado di libertà del modello FEM. Tuttavia, dal punto di vista ingegneristico è interessante monitorare la risposta in termini di accelerazione in superficie

in corrispondenza di uno o più punti di controllo in modo da comprendere quelli che sono gli effetti indotti dal sito sull'amplificazione della sorgente sismica.

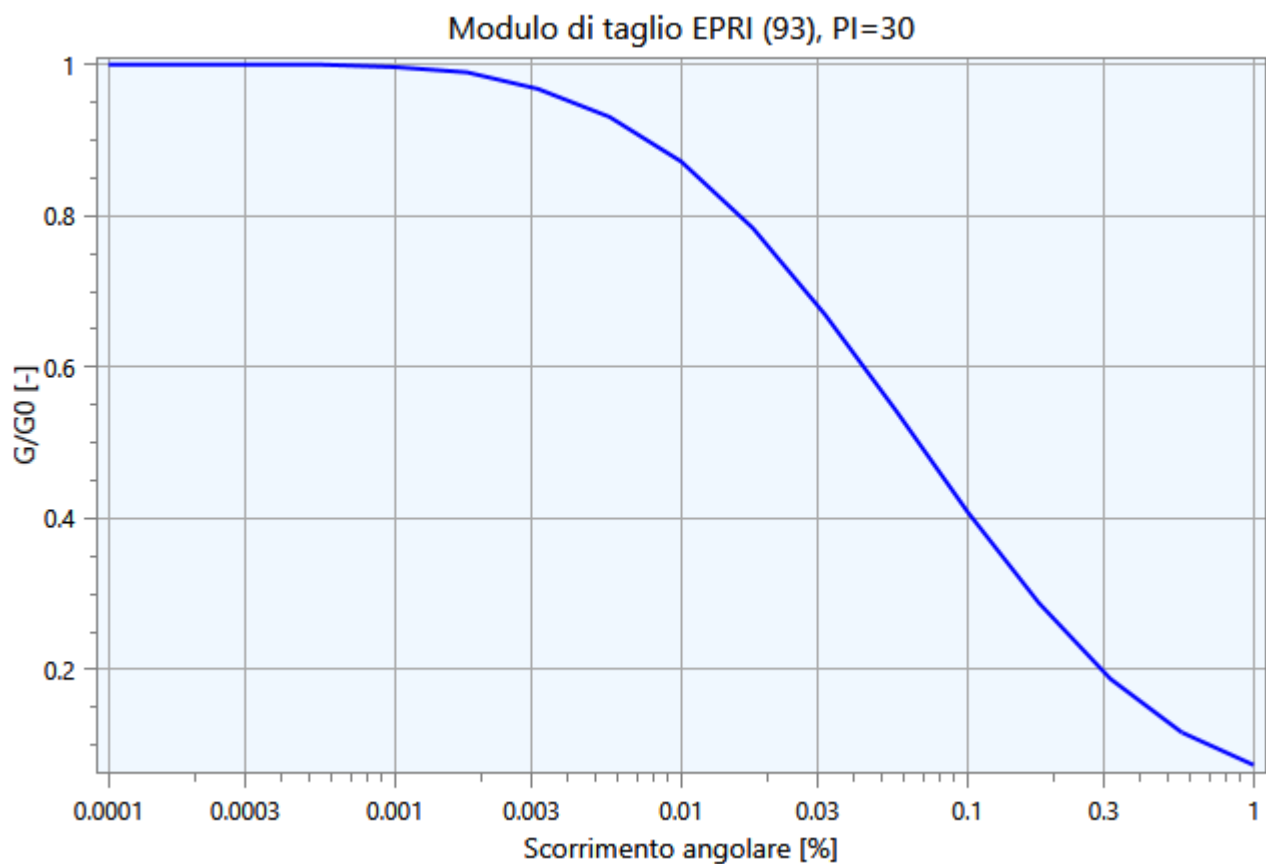
## 4 - Input

Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai dati di input utilizzati per lo studio della risposta sismica locale del deposito.

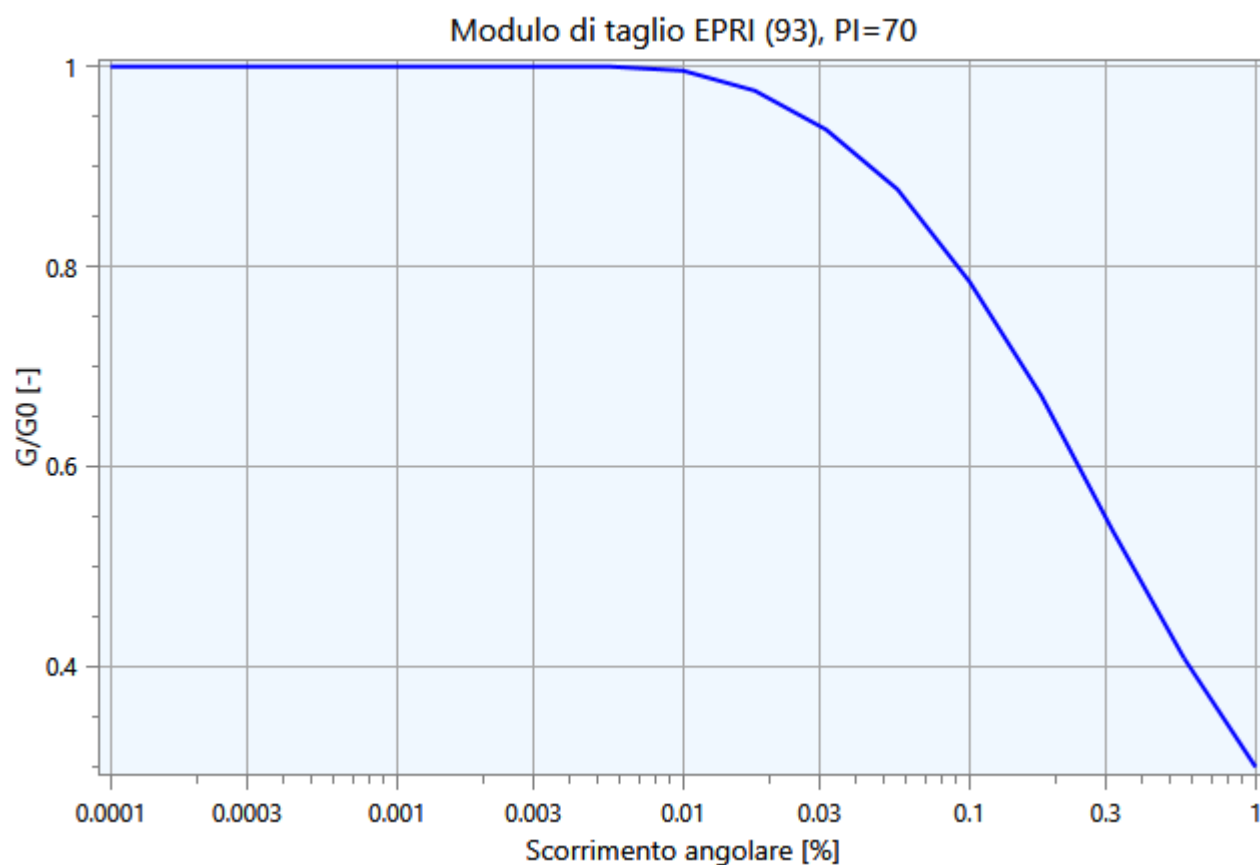
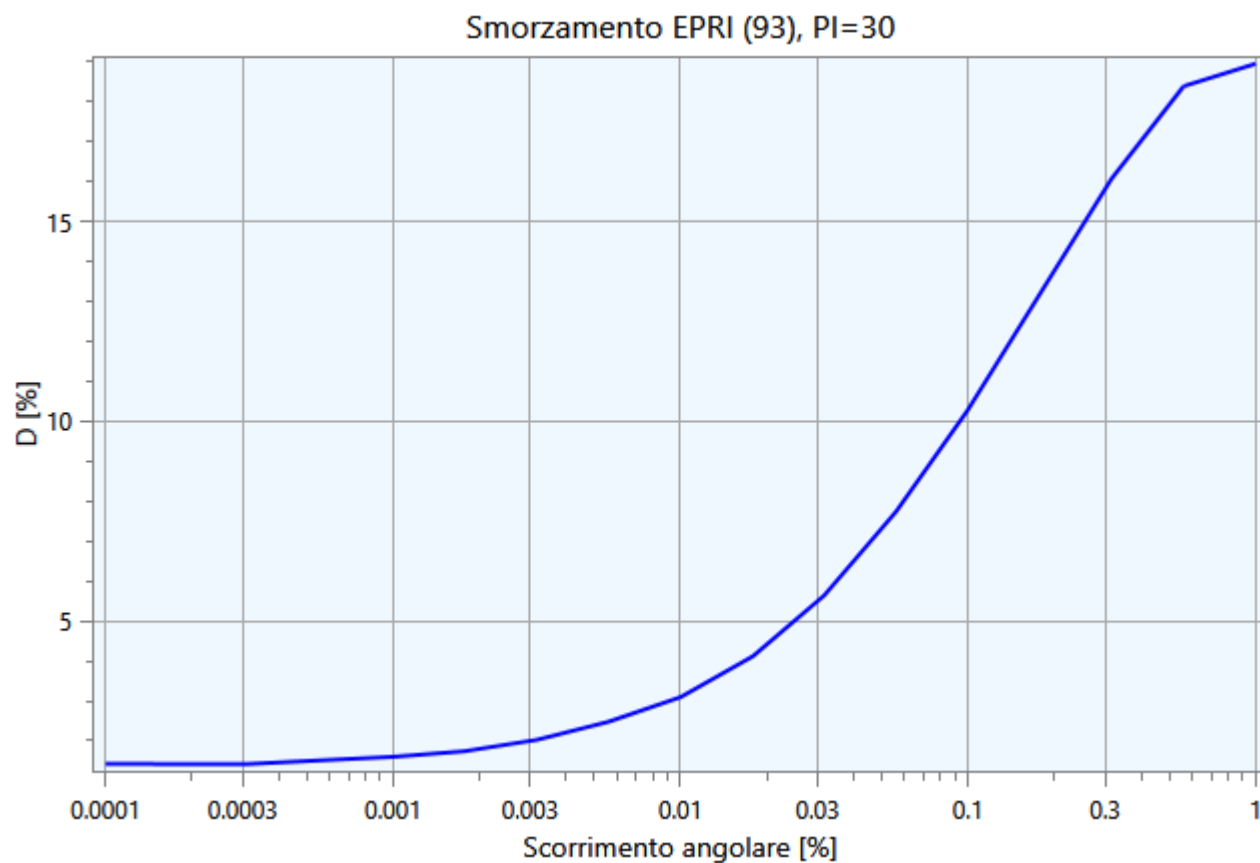
### 4.1 - Curve di Decadimento dei Materiali

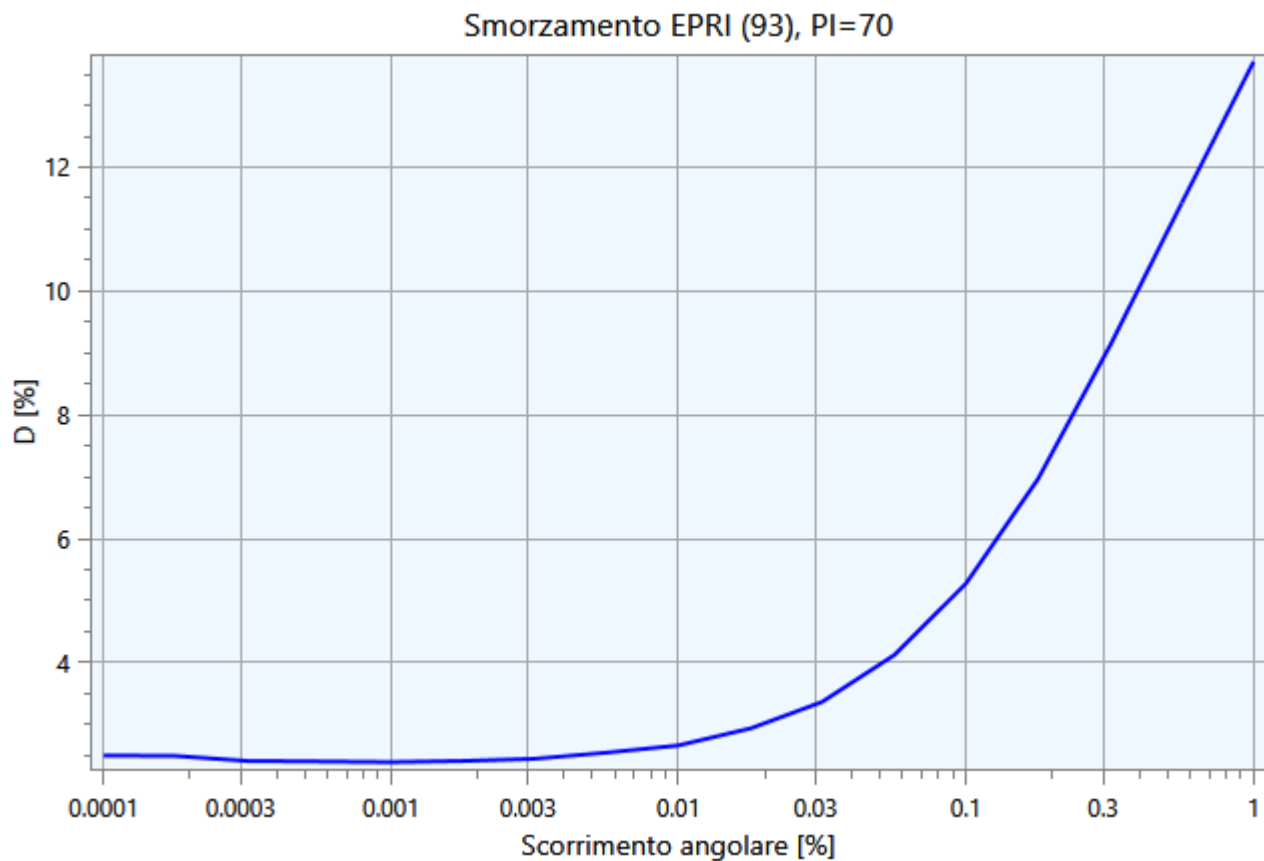
All'aumentare del livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno si ha una diminuzione del modulo di taglio  $G$  ed un aumento del rapporto di smorzamento  $D$ . Tale comportamento può essere descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento una relativa a  $G$  ed una  $D$ .

Di seguito si riportano le curve di riferimento utilizzate nell'analisi:







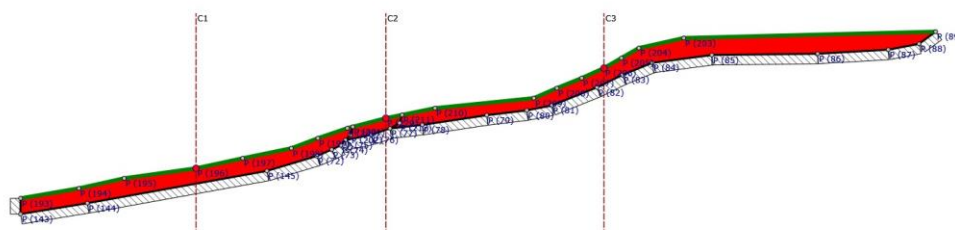


#### 4.2 - Stratigrafia e Caratteristiche meccaniche dei singoli strati

Sulla base del cosiddetto volume significativo di terreno interessato dal problema in esame, viene definita una stratigrafia di progetto che rappresenta l'andamento delle singole lenti di terreno in una sezione verticale.

Tale stratigrafia viene rappresentata nel piano verticale X-Z mediante una serie di spezzate ognuna delle quali identifica l'andamento del singolo strato. La prima di tali spezzate serve ad identificare l'orografia della porzione di sito oggetto di studio.

Di seguito si riporta una rappresentazione grafica della stratigrafia di progetto:



**Figura 7.** Stratigrafia di progetto.

Di seguito si riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

Strato	Descrizione	S [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
fq_1		-	1950.00	205.00	0.37	EPRI (93), PI=30
fq_2		-	1950.00	205.00	0.37	EPRI (93), PI=70
fq_3		-	1950.00	205.00	0.37	EPRI (93), PI=30

**Tabella 1.** Caratteristiche meccaniche strati.

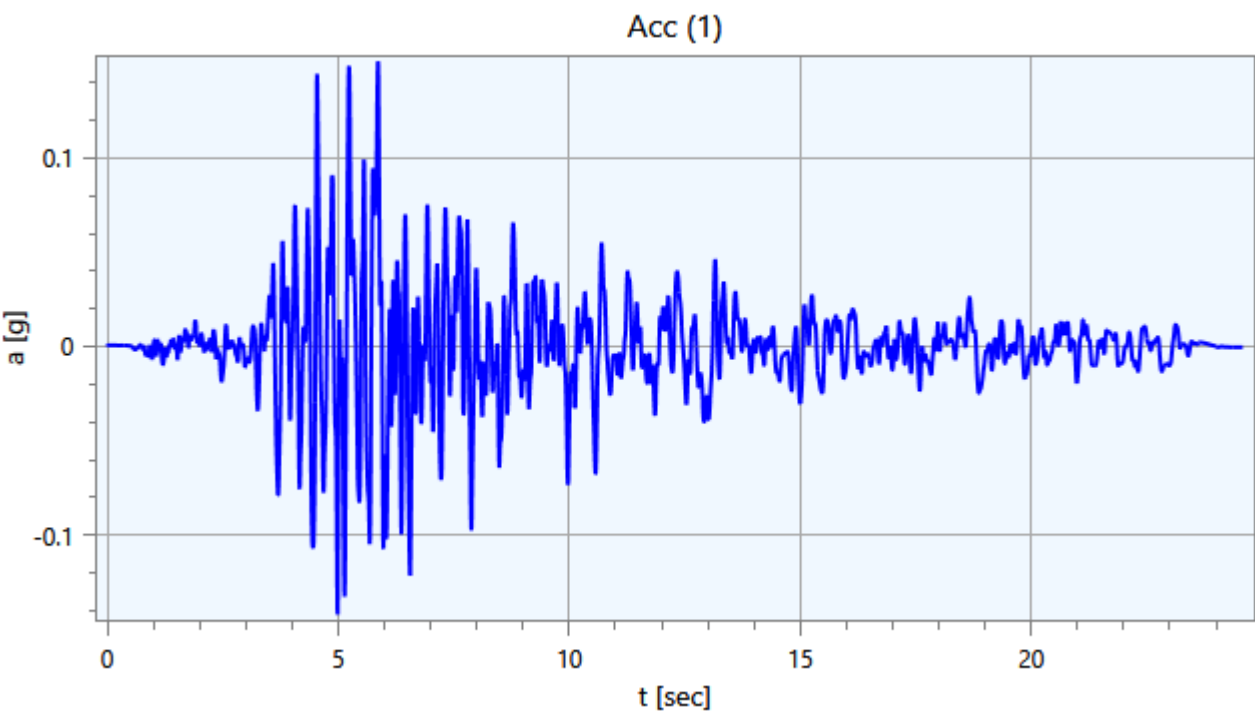
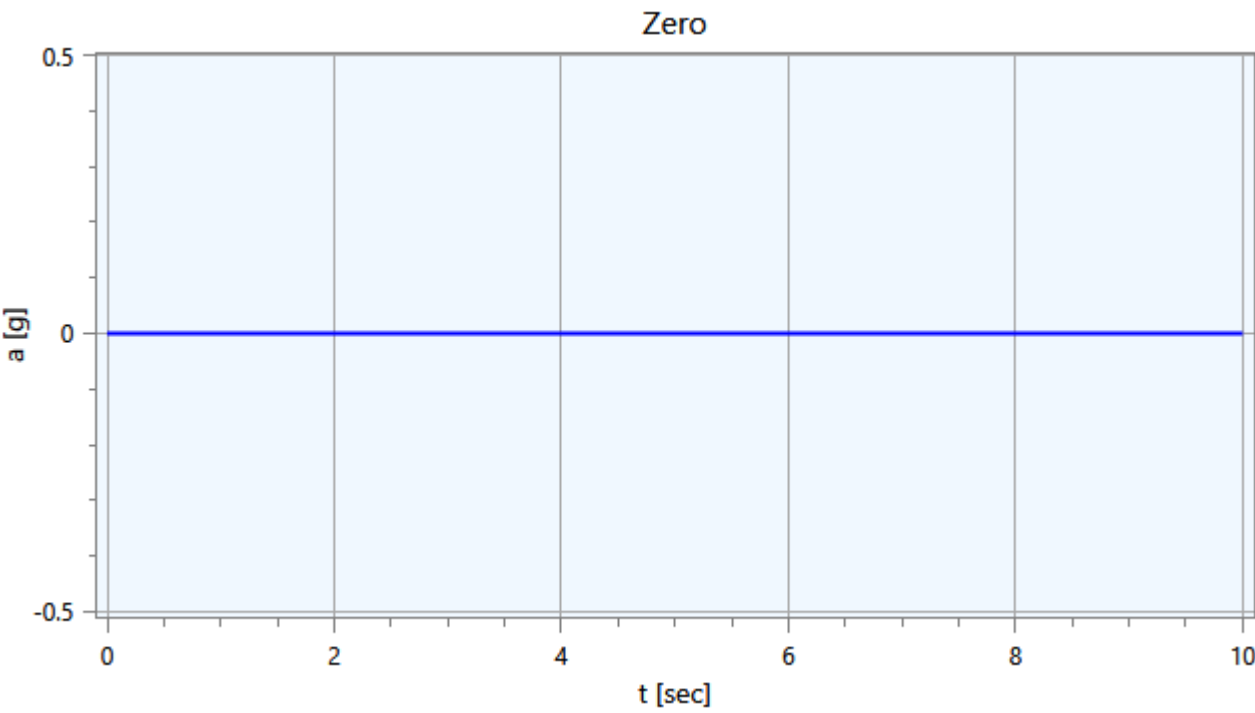
dove:

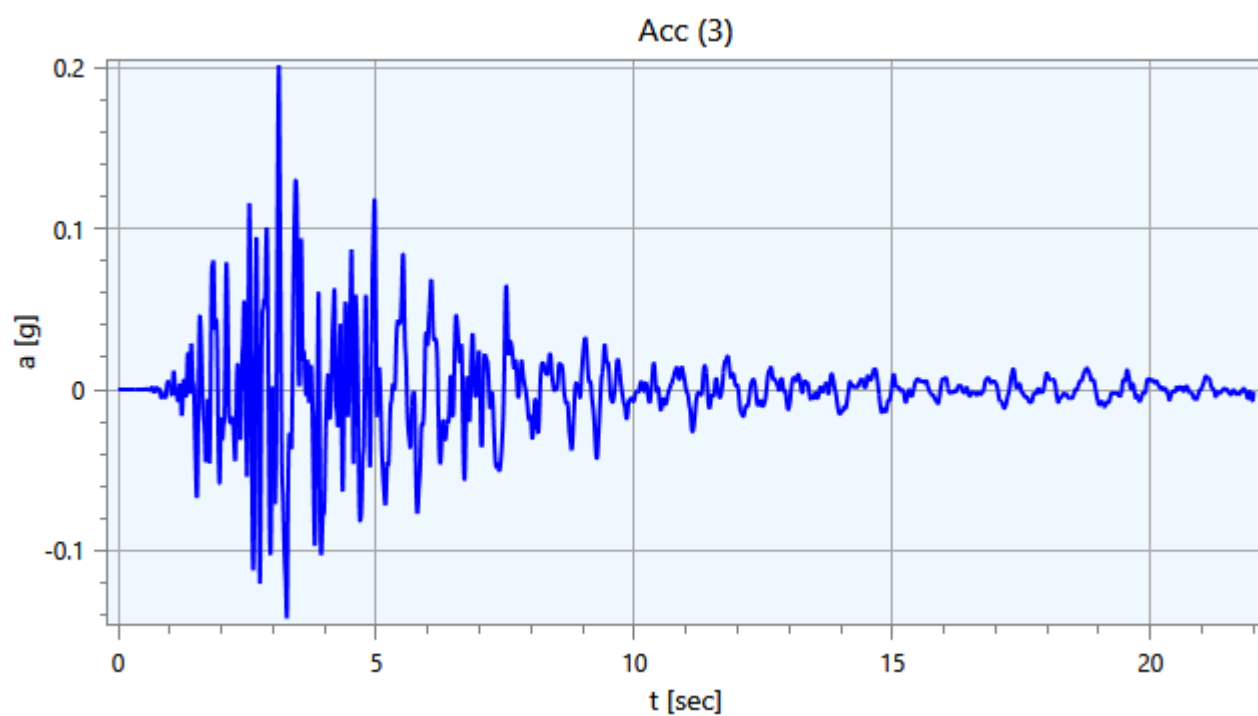
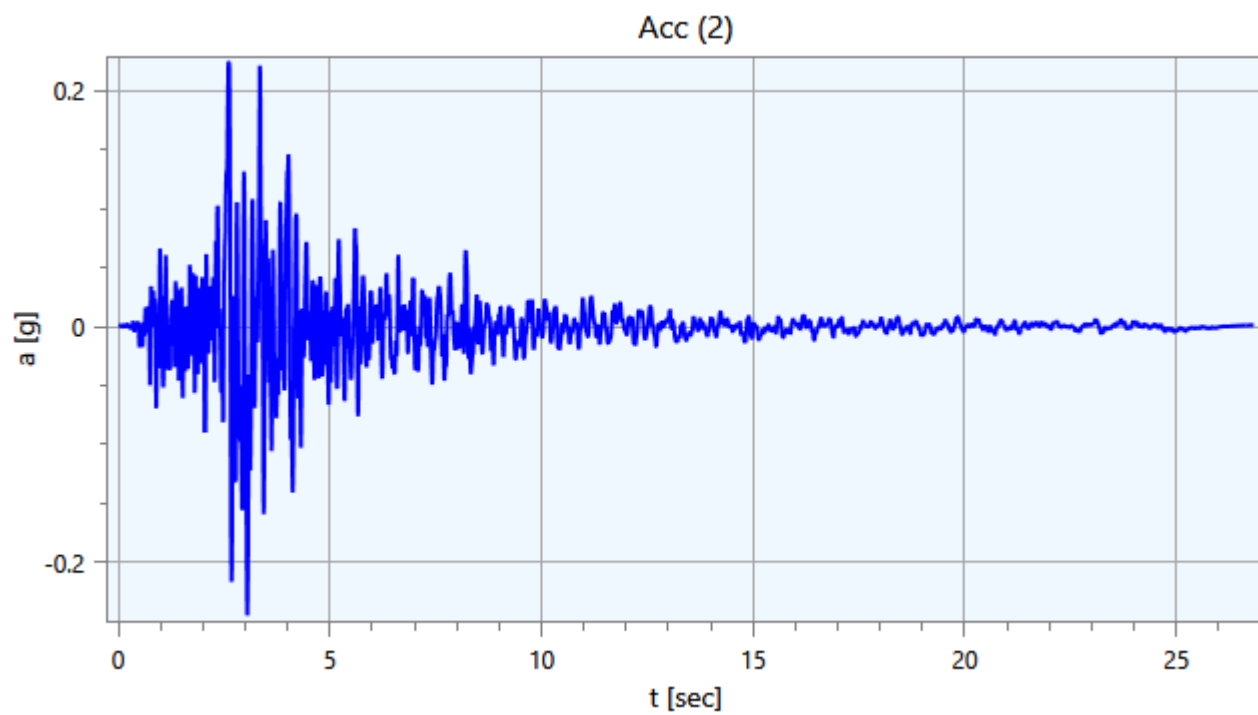
- $S$  = spessore del singolo strato;
- $\rho$  = densità di massa del singolo strato;
- $V_s$  = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato;
- $\gamma$  = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato;

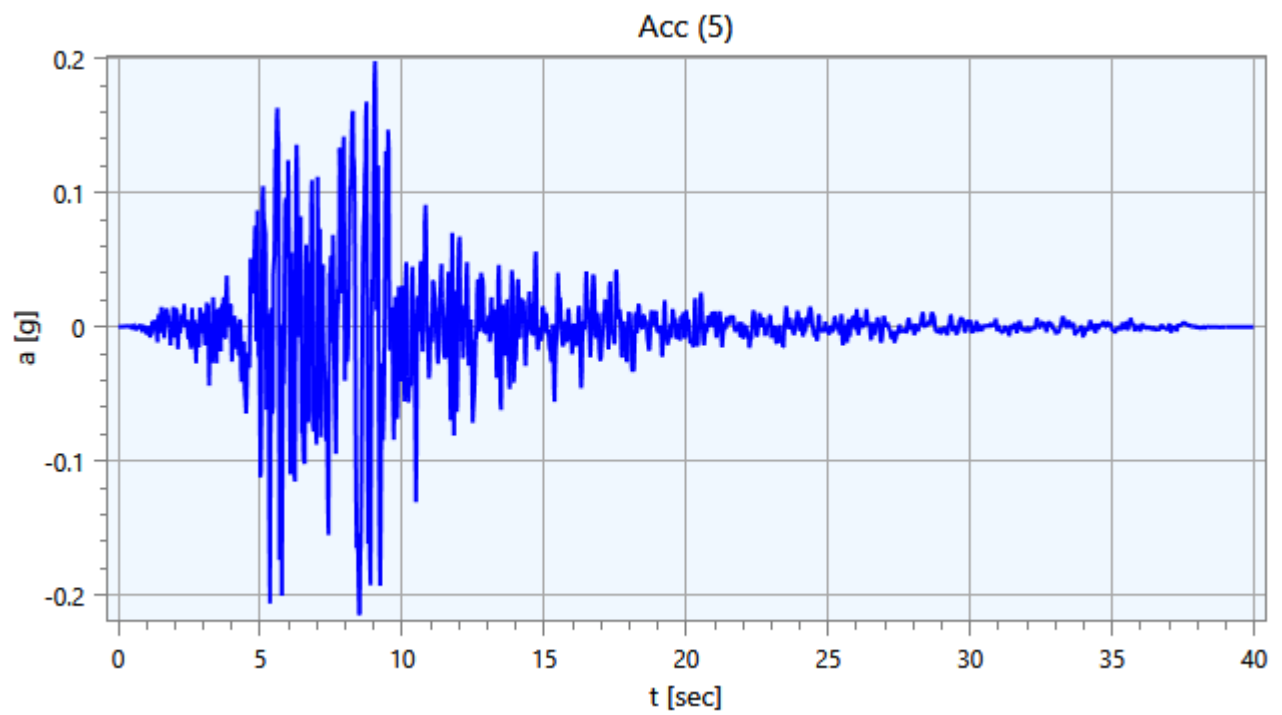
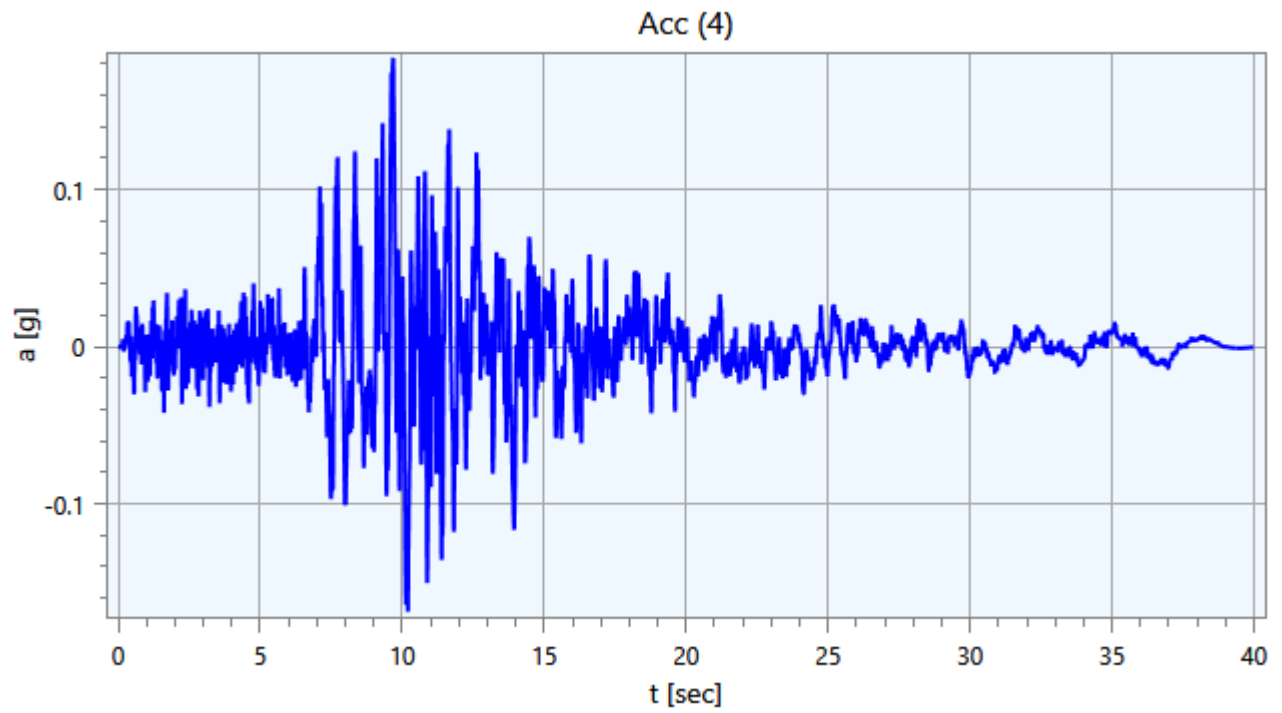
### 4.3 - Accelerogrammi e Spettri di Input

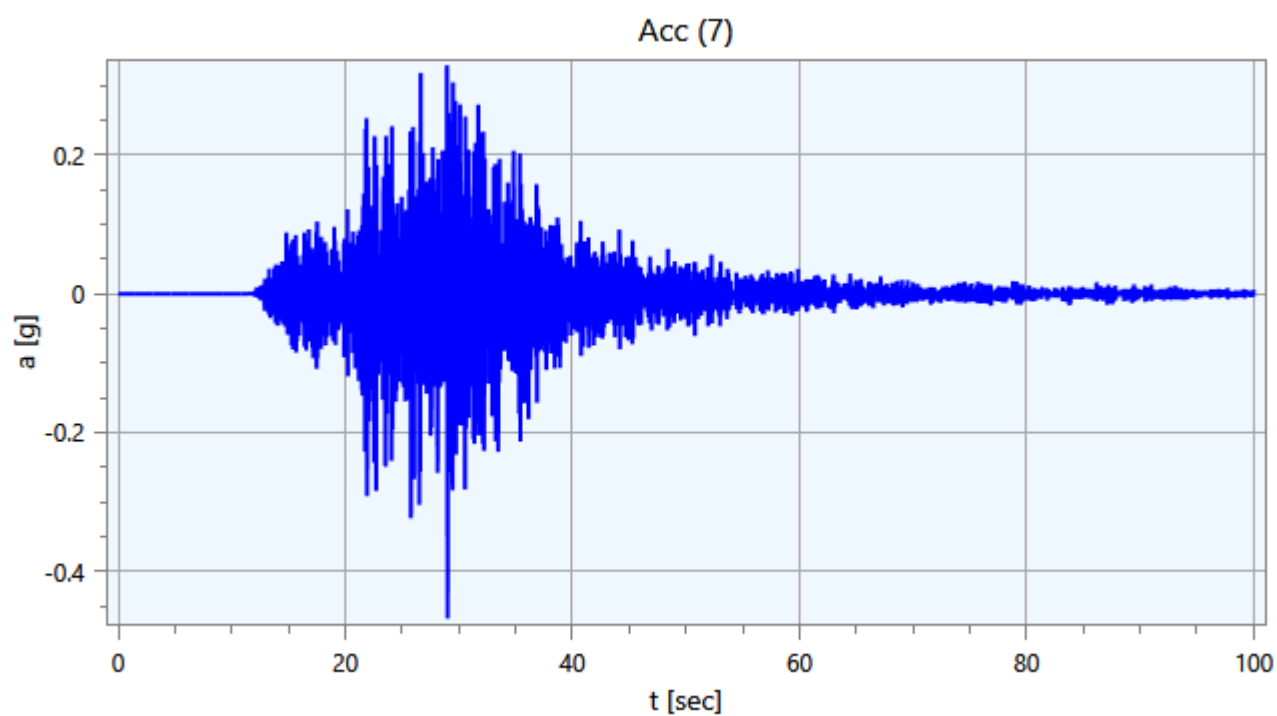
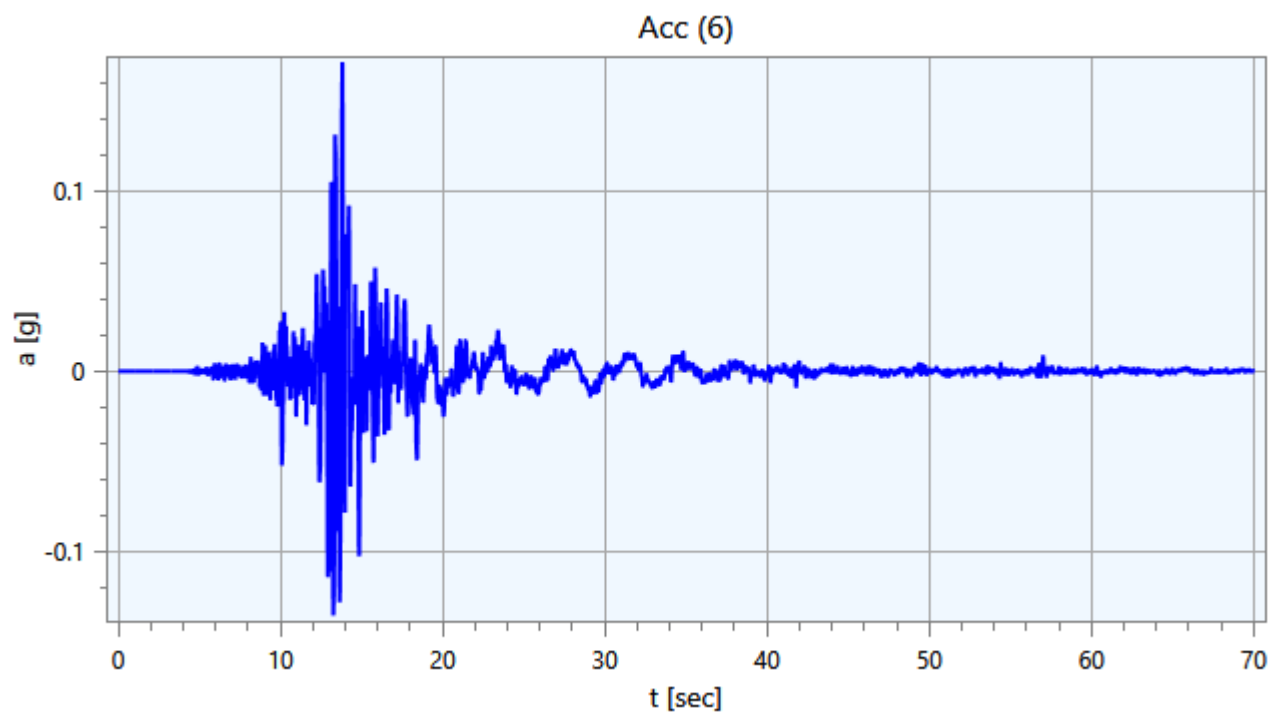
Gli accelerogrammi di input relativi allo stato limite in esame (ad esempio SLV) possono essere ottenuti tramite un'analisi con l'utilizzo dell'applicativo software REXEL v. 3.4 beta, che permette la ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018), dell'Eurocodice 8 (EC – CEN 2003), dell'ASCE/SEI 7-10 (ASCE, 2010). Il database utilizzato è l'Italian Accelerometric Archive (ITACA) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), scaricabile dal sito <http://itaca.mi.ingv.it>.

Di seguito si riportano gli accelerogrammi di progetto riferiti ad una condizione detta di 'outcrop':









#### 4.4 - Modello di Calcolo FEM

Il modello di calcolo agli elementi finiti da utilizzare per lo studio della problematica in esame viene di seguito descritto.

Per ogni analisi, nel caso più generale, è necessario specificare due componenti di sollecitazione. In particolare vi sono, per ogni condizione, un accelerogramma di in direzione X (Orizzontale), ed uno in direzione Z (Verticale).

Ad ogni analisi corrispondono una serie di condizioni di carico. Per ognuna di esse vengono specificate due componenti di accelerazione di input in outcrop. In tabella vengono riportate le condizioni di carico relative al caso in esame:

## SLV

Condizione	Accelerogramma X	Accelerogramma Z
CDC (1)	Acc (1)	Zero
CDC (2)	Acc (2)	Zero
CDC (3)	Acc (3)	Zero
CDC (4)	Acc (4)	Zero
CDC (5)	Acc (5)	Zero
CDC (6)	Acc (6)	Zero
CDC (7)	Acc (7)	Zero

**Tabella 2.** Condizioni di carico.

Il modello FEM viene ottenuto mediante una discretizzazione con elementi finiti piani a tre o a quattro nodi del dominio. Il passo ed i rapporti di infittimento della mesh in corrispondenza dei punti di controllo sono dati di input e possono variare a seconda del caso. Il passo della mesh deve soddisfare la seguente relazione:

$$p \leq \frac{V_{s,min}}{8 f_{max}}$$

dove:

- $p$  = passo della mesh;
- $V_{s,min}$  = velocità delle onde di taglio minima presente nel modello;
- $f_{max}$  = frequenza massima che si vuole analizzare;

Di seguito si riportano i nodi del modello con le rispettive coordinate nel riferimento X-Z:

Nodo	X [m]	Z [m]
1	58.41	0.00
2	61.33	0.00
3	63.11	0.00
4	64.04	0.00
5	69.15	0.00
6	72.83	0.00
7	79.18	0.00
8	91.89	0.00
9	99.77	0.00
10	104.68	0.00
11	113.61	0.00
12	118.60	0.00
13	124.52	0.00
14	136.25	0.00
15	157.11	0.00
16	171.03	0.00
17	177.10	0.00
18	180.37	0.00



19	0.00	0.00
20	13.17	0.00
21	48.55	0.00
22	0.00	0.00
23	11.49	0.00
24	20.42	0.00
25	34.59	0.00
26	43.77	0.00
27	53.38	0.00
28	58.60	0.00
29	64.40	0.00
30	65.48	0.00
31	64.98	0.00
32	130.72	0.00
33	121.88	0.00
34	118.43	0.00
35	115.00	0.00
36	110.60	0.00
37	105.72	0.00
38	101.17	0.00
39	81.69	0.00
40	75.20	0.00
41	74.70	0.00
42	72.01	0.00
43	59.87	0.00
44	62.22	0.00
45	63.24	0.00
46	62.08	0.00
47	60.92	0.00
48	59.76	0.00
49	57.29	0.00
50	55.99	0.00
51	54.68	0.00
52	52.18	0.00
53	50.98	0.00
54	49.78	0.00
55	48.58	0.00
56	47.37	0.00
57	46.17	0.00
58	44.97	0.00
59	42.46	0.00
60	41.15	0.00
61	39.83	0.00
62	38.52	0.00
63	37.21	0.00
64	35.90	0.00
65	33.30	0.00
66	32.01	0.00
67	30.72	0.00
68	29.43	0.00
69	28.15	0.00
70	26.86	0.00
71	25.57	0.00
72	24.28	0.00
73	22.99	0.00

74	21.71	0.00
75	19.14	0.00
76	17.87	0.00
77	16.59	0.00
78	15.32	0.00
79	14.04	0.00
80	12.76	0.00
81	10.21	0.00
82	8.94	0.00
83	7.66	0.00
84	6.38	0.00
85	5.11	0.00
86	3.83	0.00
87	2.55	0.00
88	1.28	0.00
89	0.00	0.00
90	1.32	0.00
91	2.63	0.00
92	3.95	0.00
93	5.27	0.00
94	6.58	0.00
95	7.90	0.00
96	9.22	0.00
97	10.53	0.00
98	11.85	0.00
99	14.43	0.00
100	15.69	0.00
101	16.96	0.00
102	18.22	0.00
103	19.49	0.00
104	20.75	0.00
105	22.01	0.00
106	23.28	0.00
107	24.54	0.00
108	25.80	0.00
109	27.07	0.00
110	28.33	0.00
111	29.60	0.00
112	30.86	0.00
113	32.12	0.00
114	33.39	0.00
115	34.65	0.00
116	35.91	0.00
117	37.18	0.00
118	38.44	0.00
119	39.71	0.00
120	40.97	0.00
121	42.23	0.00
122	43.50	0.00
123	44.76	0.00
124	46.02	0.00
125	47.29	0.00
126	49.78	0.00
127	51.02	0.00
128	52.25	0.00

129	53.48	0.00
130	54.71	0.00
131	55.94	0.00
132	57.17	0.00
133	65.32	0.00
134	66.60	0.00
135	67.88	0.00
136	70.38	0.00
137	71.60	0.00
138	73.76	0.00
139	74.13	0.00
140	73.07	0.00
141	70.70	0.00
142	69.40	0.00
143	68.09	0.00
144	66.79	0.00
145	74.10	0.00
146	75.37	0.00
147	76.64	0.00
148	77.91	0.00
149	80.45	0.00
150	81.72	0.00
151	82.99	0.00
152	84.26	0.00
153	85.54	0.00
154	86.81	0.00
155	88.08	0.00
156	89.35	0.00
157	90.62	0.00
158	93.20	0.00
159	94.52	0.00
160	95.83	0.00
161	97.14	0.00
162	98.46	0.00
163	101.00	0.00
164	102.23	0.00
165	103.45	0.00
166	105.79	0.00
167	106.91	0.00
168	108.03	0.00
169	109.14	0.00
170	110.26	0.00
171	111.37	0.00
172	112.49	0.00
173	114.85	0.00
174	116.10	0.00
175	117.35	0.00
176	119.78	0.00
177	120.97	0.00
178	122.15	0.00
179	123.34	0.00
180	125.82	0.00
181	127.13	0.00
182	128.43	0.00
183	129.73	0.00

184	131.03	0.00
185	132.34	0.00
186	133.64	0.00
187	134.94	0.00
188	137.55	0.00
189	138.85	0.00
190	140.16	0.00
191	141.46	0.00
192	142.77	0.00
193	144.07	0.00
194	145.38	0.00
195	146.68	0.00
196	147.98	0.00
197	149.29	0.00
198	150.59	0.00
199	151.90	0.00
200	153.20	0.00
201	154.51	0.00
202	155.81	0.00
203	158.38	0.00
204	159.64	0.00
205	160.91	0.00
206	162.17	0.00
207	163.44	0.00
208	164.70	0.00
209	165.97	0.00
210	167.23	0.00
211	168.50	0.00
212	169.76	0.00
213	172.24	0.00
214	173.46	0.00
215	174.67	0.00
216	175.89	0.00
217	178.19	0.00
218	179.28	0.00
219	179.10	0.00
220	177.82	0.00
221	176.55	0.00
222	175.28	0.00
223	174.00	0.00
224	172.73	0.00
225	171.46	0.00
226	170.18	0.00
227	168.91	0.00
228	167.64	0.00
229	166.36	0.00
230	165.09	0.00
231	163.82	0.00
232	162.54	0.00
233	161.27	0.00
234	160.00	0.00
235	158.73	0.00
236	157.45	0.00
237	156.18	0.00
238	154.91	0.00

239	153.63	0.00
240	152.36	0.00
241	151.09	0.00
242	149.81	0.00
243	148.54	0.00
244	147.27	0.00
245	145.99	0.00
246	144.72	0.00
247	143.45	0.00
248	142.17	0.00
249	140.90	0.00
250	139.63	0.00
251	138.36	0.00
252	137.08	0.00
253	135.81	0.00
254	134.54	0.00
255	133.26	0.00
256	131.99	0.00
257	129.45	0.00
258	128.19	0.00
259	126.93	0.00
260	125.66	0.00
261	124.40	0.00
262	123.14	0.00
263	120.73	0.00
264	119.58	0.00
265	117.28	0.00
266	116.14	0.00
267	113.90	0.00
268	112.80	0.00
269	111.70	0.00
270	109.38	0.00
271	108.16	0.00
272	106.94	0.00
273	104.58	0.00
274	103.44	0.00
275	102.31	0.00
276	99.87	0.00
277	98.57	0.00
278	97.27	0.00
279	95.98	0.00
280	94.68	0.00
281	93.38	0.00
282	92.08	0.00
283	90.78	0.00
284	89.48	0.00
285	88.18	0.00
286	86.88	0.00
287	85.59	0.00
288	84.29	0.00
289	82.99	0.00
290	80.39	0.00
291	79.09	0.00
292	77.79	0.00
293	76.50	0.00

294	32.90	0.00
295	32.51	0.00
296	48.15	0.00
297	47.72	0.00
298	56.37	0.00
299	55.54	0.00
300	54.69	0.00
301	53.01	0.00
302	53.85	0.00
303	50.19	0.00
304	49.44	0.00
305	48.96	0.00
306	50.99	0.00
307	51.46	0.00
308	52.62	0.00
309	51.70	0.00
310	57.25	0.00
311	57.21	0.00
312	60.63	0.00
313	61.46	0.00
314	61.72	0.00
315	62.18	0.00
316	63.03	0.00
317	63.04	0.00
318	64.23	0.00
319	58.57	0.00
320	60.29	0.00
321	59.66	0.00
322	41.45	0.00
323	40.65	0.00
324	38.90	0.00
325	39.36	0.00
326	37.61	0.00
327	36.76	0.00
328	35.06	0.00
329	35.48	0.00
330	33.78	0.00
331	34.18	0.00
332	36.33	0.00
333	38.06	0.00
334	40.17	0.00
335	45.27	0.00
336	44.52	0.00
337	41.94	0.00
338	42.72	0.00
339	44.01	0.00
340	43.24	0.00
341	45.73	0.00
342	46.50	0.00
343	46.94	0.00
344	17.26	0.00
345	17.56	0.00
346	8.59	0.00
347	8.25	0.00
348	12.16	0.00

349	12.46	0.00
350	11.25	0.00
351	11.30	0.00
352	9.55	0.00
353	9.88	0.00
354	15.02	0.00
355	15.99	0.00
356	16.29	0.00
357	14.72	0.00
358	13.75	0.00
359	13.46	0.00
360	6.03	0.00
361	6.96	0.00
362	7.31	0.00
363	3.04	0.00
364	3.43	0.00
365	1.91	0.00
366	1.00	0.00
367	5.65	0.00
368	4.74	0.00
369	4.35	0.00
370	24.88	0.00
371	25.23	0.00
372	22.66	0.00
373	23.60	0.00
374	23.94	0.00
375	19.79	0.00
376	18.83	0.00
377	18.53	0.00
378	21.07	0.00
379	21.39	0.00
380	20.11	0.00
381	22.33	0.00
382	28.59	0.00
383	27.61	0.00
384	26.58	0.00
385	26.19	0.00
386	29.15	0.00
387	30.13	0.00
388	31.13	0.00
389	31.57	0.00
390	70.54	0.00
391	67.98	0.00
392	66.69	0.00
393	69.19	0.00
394	71.81	0.00
395	72.95	0.00
396	73.95	0.00
397	75.95	0.00
398	77.21	0.00
399	131.61	0.00
400	131.16	0.00
401	130.17	0.00
402	128.77	0.00
403	129.08	0.00

404	110.37	0.00
405	110.49	0.00
406	93.95	0.00
407	95.25	0.00
408	105.02	0.00
409	104.24	0.00
410	103.64	0.00
411	102.32	0.00
412	99.17	0.00
413	99.82	0.00
414	101.08	0.00
415	97.86	0.00
416	96.56	0.00
417	109.23	0.00
418	105.60	0.00
419	108.07	0.00
420	106.91	0.00
421	92.63	0.00
422	85.14	0.00
423	84.70	0.00
424	86.02	0.00
425	87.49	0.00
426	90.05	0.00
427	91.35	0.00
428	88.77	0.00
429	81.27	0.00
430	80.86	0.00
431	82.56	0.00
432	82.14	0.00
433	83.85	0.00
434	83.42	0.00
435	78.69	0.00
436	79.58	0.00
437	79.98	0.00
438	78.30	0.00
439	119.65	0.00
440	119.71	0.00
441	123.30	0.00
442	122.06	0.00
443	120.97	0.00
444	120.90	0.00
445	126.21	0.00
446	125.31	0.00
447	123.70	0.00
448	124.03	0.00
449	122.55	0.00
450	121.35	0.00
451	124.93	0.00
452	126.58	0.00
453	127.50	0.00
454	127.85	0.00
455	114.93	0.00
456	117.32	0.00
457	118.50	0.00
458	118.55	0.00



459	116.12	0.00
460	116.13	0.00
461	112.71	0.00
462	113.75	0.00
463	113.83	0.00
464	111.48	0.00
465	111.59	0.00
466	112.60	0.00
467	130.07	0.00
468	153.78	0.00
469	153.07	0.00
470	151.19	0.00
471	151.78	0.00
472	140.84	0.00
473	141.55	0.00
474	135.67	0.00
475	135.10	0.00
476	132.48	0.00
477	133.46	0.00
478	131.44	0.00
479	132.51	0.00
480	134.32	0.00
481	132.88	0.00
482	138.95	0.00
483	139.55	0.00
484	140.23	0.00
485	138.26	0.00
486	136.96	0.00
487	136.38	0.00
488	137.67	0.00
489	149.22	0.00
490	149.90	0.00
491	150.50	0.00
492	145.53	0.00
493	144.72	0.00
494	148.61	0.00
495	147.20	0.00
496	146.01	0.00
497	147.93	0.00
498	146.38	0.00
499	146.80	0.00
500	142.36	0.00
501	143.21	0.00
502	144.07	0.00
503	142.79	0.00
504	152.49	0.00
505	155.67	0.00
506	155.07	0.00
507	165.81	0.00
508	166.52	0.00
509	168.35	0.00
510	167.79	0.00
511	172.13	0.00
512	172.80	0.00
513	174.66	0.00

514	174.06	0.00
515	175.99	0.00
516	177.19	0.00
517	175.28	0.00
518	173.40	0.00
519	170.33	0.00
520	170.88	0.00
521	169.06	0.00
522	169.62	0.00
523	171.57	0.00
524	167.08	0.00
525	161.45	0.00
526	160.73	0.00
527	158.72	0.00
528	159.46	0.00
529	156.55	0.00
530	157.47	0.00
531	158.31	0.00
532	157.60	0.00
533	156.97	0.00
534	160.18	0.00
535	162.00	0.00
536	162.72	0.00
537	163.99	0.00
538	163.27	0.00
539	164.54	0.00
540	165.26	0.00
541	154.35	0.00

**Tabella 3.** Nodi del modello FEM.

Di seguito gli elementi:

Elemento	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
1	302	300	301	-
2	302	130	300	-
3	27	300	51	-
4	27	301	300	-
5	27	52	301	-
6	303	126	127	-
7	305	303	304	-
8	305	126	303	-
9	296	304	55	-
10	296	305	304	-
11	297	21	305	-
12	297	125	21	-
13	21	126	305	-
14	305	296	297	-
15	129	308	128	-
16	129	302	308	-
17	129	130	302	-
18	128	307	127	-
19	128	308	307	-
20	306	309	53	-
21	309	307	308	-
22	309	306	307	-

23	52	309	301	-
24	52	53	309	-
25	301	308	302	-
26	301	309	308	-
27	303	306	304	-
28	303	307	306	-
29	303	127	307	-
30	54	306	53	-
31	54	304	306	-
32	54	55	304	-
33	299	300	298	-
34	299	51	300	-
35	131	300	130	-
36	131	298	300	-
37	131	132	298	-
38	315	316	314	-
39	317	3	4	-
40	317	315	3	-
41	317	316	315	-
42	317	4	316	-
43	315	44	3	-
44	316	46	314	-
45	29	31	30	-
46	29	318	31	-
47	318	4	31	-
48	318	316	4	-
49	45	318	29	-
50	45	316	318	-
51	45	46	316	-
52	315	313	44	-
53	313	314	312	-
54	313	315	314	-
55	47	314	46	-
56	47	312	314	-
57	47	48	312	-
58	310	319	49	-
59	311	319	310	-
60	311	1	319	-
61	1	43	319	-
62	311	132	1	-
63	2	313	320	-
64	2	44	313	-
65	313	312	320	-
66	320	43	2	-
67	321	28	319	-
68	48	321	312	-
69	48	28	321	-
70	28	49	319	-
71	321	320	312	-
72	320	319	43	-
73	320	321	319	-
74	50	310	49	-
75	50	299	310	-
76	50	51	299	-
77	298	310	299	-

78	298	311	310	-
79	298	132	311	-
80	25	329	64	-
81	25	331	329	-
82	328	330	115	-
83	331	328	329	-
84	331	330	328	-
85	331	294	330	-
86	331	65	294	-
87	331	25	65	-
88	295	330	294	-
89	114	295	113	-
90	114	330	295	-
91	114	115	330	-
92	329	327	64	-
93	116	328	115	-
94	116	332	328	-
95	332	329	328	-
96	332	327	329	-
97	332	326	327	-
98	117	332	116	-
99	117	326	332	-
100	117	118	326	-
101	333	62	63	-
102	333	325	62	-
103	333	324	325	-
104	325	61	62	-
105	326	333	327	-
106	326	324	333	-
107	327	63	64	-
108	327	333	63	-
109	326	118	324	-
110	119	334	324	-
111	119	120	334	-
112	334	325	324	-
113	324	118	119	-
114	120	322	334	-
115	120	121	322	-
116	334	323	325	-
117	334	322	323	-
118	323	61	325	-
119	123	339	122	-
120	335	123	124	-
121	335	339	123	-
122	335	336	339	-
123	59	340	26	-
124	337	59	60	-
125	337	340	59	-
126	337	338	340	-
127	336	340	339	-
128	336	26	340	-
129	339	338	122	-
130	339	340	338	-
131	323	60	61	-
132	337	323	322	-

133	337	60	323	-
134	121	338	322	-
135	121	122	338	-
136	338	337	322	-
137	343	297	296	-
138	343	342	297	-
139	343	341	342	-
140	342	125	297	-
141	57	343	56	-
142	57	341	343	-
143	56	296	55	-
144	56	343	296	-
145	57	58	341	-
146	342	124	125	-
147	335	342	341	-
148	335	124	342	-
149	336	58	26	-
150	336	341	58	-
151	336	335	341	-
152	23	349	80	-
153	23	350	349	-
154	23	81	350	-
155	348	350	351	-
156	348	349	350	-
157	351	98	348	-
158	352	347	96	-
159	353	346	352	-
160	82	353	81	-
161	82	346	353	-
162	346	347	352	-
163	347	95	96	-
164	353	350	81	-
165	353	351	350	-
166	353	352	351	-
167	97	352	96	-
168	97	351	352	-
169	97	98	351	-
170	354	356	78	-
171	354	355	356	-
172	356	77	78	-
173	78	79	354	-
174	355	344	356	-
175	355	101	344	-
176	356	345	77	-
177	356	344	345	-
178	345	76	77	-
179	359	357	358	-
180	359	99	357	-
181	359	20	99	-
182	99	100	357	-
183	349	358	80	-
184	359	348	20	-
185	359	349	348	-
186	359	358	349	-
187	348	98	20	-

188	358	79	80	-
189	354	358	357	-
190	354	79	358	-
191	100	355	357	-
192	100	101	355	-
193	355	354	357	-
194	347	361	95	-
195	346	362	347	-
196	83	346	82	-
197	83	362	346	-
198	362	361	347	-
199	362	360	361	-
200	84	362	83	-
201	84	360	362	-
202	84	85	360	-
203	87	364	86	-
204	363	365	91	-
205	364	365	363	-
206	364	87	365	-
207	87	88	365	-
208	366	89	365	-
209	366	22	89	-
210	90	89	19	-
211	90	365	89	-
212	90	91	365	-
213	366	88	22	-
214	366	365	88	-
215	364	368	86	-
216	369	363	92	-
217	364	369	368	-
218	364	363	369	-
219	363	91	92	-
220	369	367	368	-
221	369	93	367	-
222	369	92	93	-
223	93	94	367	-
224	85	368	360	-
225	85	86	368	-
226	368	367	360	-
227	361	94	95	-
228	361	367	94	-
229	361	360	367	-
230	372	374	73	-
231	372	373	374	-
232	374	72	73	-
233	73	74	372	-
234	374	371	72	-
235	374	370	371	-
236	373	370	374	-
237	373	107	370	-
238	371	71	72	-
239	375	103	104	-
240	377	375	376	-
241	377	103	375	-
242	377	102	103	-

243	344	377	345	-
244	344	102	377	-
245	345	376	76	-
246	345	377	376	-
247	344	101	102	-
248	376	75	76	-
249	376	380	75	-
250	375	380	376	-
251	378	375	104	-
252	378	380	375	-
253	379	380	378	-
254	24	379	74	-
255	380	24	75	-
256	380	379	24	-
257	106	381	105	-
258	106	373	381	-
259	106	107	373	-
260	105	378	104	-
261	105	381	378	-
262	381	379	378	-
263	381	372	379	-
264	381	373	372	-
265	372	74	379	-
266	385	383	384	-
267	385	109	383	-
268	385	108	109	-
269	382	110	111	-
270	110	383	109	-
271	110	382	383	-
272	370	385	371	-
273	370	108	385	-
274	371	384	71	-
275	371	385	384	-
276	370	107	108	-
277	295	388	113	-
278	389	294	66	-
279	295	389	388	-
280	295	294	389	-
281	294	65	66	-
282	68	387	67	-
283	68	386	387	-
284	68	69	386	-
285	389	387	388	-
286	389	67	387	-
287	389	66	67	-
288	384	70	71	-
289	69	383	386	-
290	70	383	69	-
291	70	384	383	-
292	388	112	113	-
293	112	387	111	-
294	112	388	387	-
295	386	382	387	-
296	386	383	382	-
297	382	111	387	-

298	31	392	30	-
299	133	31	4	-
300	134	31	133	-
301	134	392	31	-
302	392	144	30	-
303	392	391	144	-
304	392	135	391	-
305	392	134	135	-
306	391	143	144	-
307	390	393	136	-
308	390	142	393	-
309	390	141	142	-
310	143	393	142	-
311	143	391	393	-
312	393	5	136	-
313	5	391	135	-
314	5	393	391	-
315	139	41	40	-
316	139	396	41	-
317	396	138	41	-
318	395	396	140	-
319	395	138	396	-
320	396	139	140	-
321	395	6	138	-
322	395	394	6	-
323	395	42	394	-
324	395	140	42	-
325	394	137	6	-
326	390	394	141	-
327	390	137	394	-
328	394	42	141	-
329	390	136	137	-
330	397	146	147	-
331	41	397	40	-
332	41	146	397	-
333	145	138	6	-
334	145	41	138	-
335	145	146	41	-
336	275	410	274	-
337	275	411	410	-
338	275	38	411	-
339	411	165	410	-
340	414	411	38	-
341	414	164	411	-
342	414	163	164	-
343	164	165	411	-
344	413	414	276	-
345	413	163	414	-
346	414	38	276	-
347	413	9	163	-
348	412	276	277	-
349	412	413	276	-
350	412	9	413	-
351	416	278	279	-
352	416	415	278	-



353	416	161	415	-
354	415	277	278	-
355	416	160	161	-
356	407	416	279	-
357	407	160	416	-
358	407	159	160	-
359	162	415	161	-
360	412	162	9	-
361	415	412	277	-
362	415	162	412	-
363	409	410	408	-
364	409	274	410	-
365	10	410	165	-
366	10	408	410	-
367	10	166	408	-
368	404	417	170	-
369	405	417	404	-
370	405	270	417	-
371	405	36	270	-
372	270	271	417	-
373	417	169	170	-
374	419	271	272	-
375	417	419	169	-
376	417	271	419	-
377	167	418	166	-
378	168	420	167	-
379	168	419	420	-
380	168	169	419	-
381	420	418	167	-
382	420	37	418	-
383	420	272	37	-
384	420	419	272	-
385	408	418	409	-
386	408	166	418	-
387	273	418	37	-
388	273	409	418	-
389	273	274	409	-
390	406	280	281	-
391	406	407	280	-
392	406	159	407	-
393	407	279	280	-
394	153	424	423	-
395	153	154	424	-
396	422	424	287	-
397	422	423	424	-
398	423	152	153	-
399	427	421	282	-
400	427	8	421	-
401	427	157	8	-
402	421	281	282	-
403	427	283	426	-
404	427	282	283	-
405	283	284	426	-
406	426	157	427	-
407	425	428	285	-

408	155	425	154	-
409	155	428	425	-
410	155	156	428	-
411	428	284	285	-
412	426	156	157	-
413	426	428	156	-
414	426	284	428	-
415	425	424	154	-
416	425	286	424	-
417	425	285	286	-
418	286	287	424	-
419	433	422	288	-
420	423	433	434	-
421	423	422	433	-
422	152	434	151	-
423	152	423	434	-
424	422	287	288	-
425	431	433	289	-
426	434	431	432	-
427	434	433	431	-
428	151	432	150	-
429	151	434	432	-
430	433	288	289	-
431	429	431	39	-
432	430	432	429	-
433	150	430	149	-
434	150	432	430	-
435	432	431	429	-
436	431	289	39	-
437	437	435	436	-
438	437	291	435	-
439	437	290	291	-
440	291	292	435	-
441	430	436	149	-
442	430	437	436	-
443	430	429	437	-
444	429	290	437	-
445	429	39	290	-
446	438	398	148	-
447	435	398	438	-
448	435	292	398	-
449	398	147	148	-
450	436	7	149	-
451	438	436	435	-
452	438	7	436	-
453	438	148	7	-
454	406	158	159	-
455	406	421	158	-
456	406	281	421	-
457	421	8	158	-
458	444	442	443	-
459	444	178	442	-
460	444	177	178	-
461	441	179	13	-
462	441	178	179	-

463	441	442	178	-
464	440	444	439	-
465	440	177	444	-
466	439	443	264	-
467	439	444	443	-
468	440	176	177	-
469	262	448	261	-
470	262	449	448	-
471	262	33	449	-
472	447	449	441	-
473	447	448	449	-
474	442	449	443	-
475	442	441	449	-
476	450	263	443	-
477	450	33	263	-
478	450	449	33	-
479	450	443	449	-
480	263	264	443	-
481	445	180	181	-
482	451	445	446	-
483	451	180	445	-
484	448	446	261	-
485	448	451	446	-
486	451	13	180	-
487	447	451	448	-
488	447	441	451	-
489	441	13	451	-
490	258	403	257	-
491	259	454	258	-
492	259	452	454	-
493	259	260	452	-
494	454	403	258	-
495	402	453	182	-
496	454	402	403	-
497	454	453	402	-
498	454	452	453	-
499	446	260	261	-
500	181	453	445	-
501	181	182	453	-
502	445	452	446	-
503	445	453	452	-
504	452	260	446	-
505	458	456	12	-
506	457	456	458	-
507	457	265	456	-
508	456	175	12	-
509	458	440	457	-
510	458	176	440	-
511	458	12	176	-
512	457	34	265	-
513	457	439	34	-
514	457	440	439	-
515	439	264	34	-
516	266	456	265	-
517	266	460	456	-

518	460	175	456	-
519	460	459	175	-
520	460	455	459	-
521	460	35	455	-
522	460	266	35	-
523	459	174	175	-
524	174	455	173	-
525	174	459	455	-
526	463	455	267	-
527	462	455	463	-
528	462	173	455	-
529	455	35	267	-
530	461	268	269	-
531	463	461	462	-
532	268	463	267	-
533	268	461	463	-
534	464	404	171	-
535	465	405	464	-
536	36	465	269	-
537	36	405	465	-
538	405	404	464	-
539	404	170	171	-
540	465	461	269	-
541	466	464	172	-
542	465	466	461	-
543	465	464	466	-
544	464	171	172	-
545	466	462	461	-
546	466	11	462	-
547	466	172	11	-
548	11	173	462	-
549	399	184	185	-
550	400	467	399	-
551	401	467	400	-
552	401	403	467	-
553	401	257	403	-
554	467	184	399	-
555	183	402	182	-
556	467	183	184	-
557	467	402	183	-
558	467	403	402	-
559	479	256	478	-
560	479	477	256	-
561	479	476	477	-
562	479	478	476	-
563	400	476	478	-
564	400	399	476	-
565	255	477	254	-
566	255	256	477	-
567	401	32	257	-
568	478	401	400	-
569	478	32	401	-
570	478	256	32	-
571	185	481	399	-
572	185	186	481	-

573	480	187	474	-
574	480	186	187	-
575	480	481	186	-
576	187	14	474	-
577	475	480	474	-
578	475	477	480	-
579	475	254	477	-
580	476	480	477	-
581	476	481	480	-
582	476	399	481	-
583	250	484	249	-
584	250	482	484	-
585	249	473	248	-
586	249	484	473	-
587	250	251	482	-
588	484	472	473	-
589	484	483	472	-
590	484	482	483	-
591	483	190	472	-
592	483	189	190	-
593	483	485	189	-
594	483	482	485	-
595	188	486	14	-
596	188	485	486	-
597	188	189	485	-
598	253	487	252	-
599	253	475	487	-
600	252	488	251	-
601	252	487	488	-
602	253	254	475	-
603	488	482	251	-
604	474	487	475	-
605	474	486	487	-
606	474	14	486	-
607	488	485	482	-
608	488	486	485	-
609	488	487	486	-
610	241	471	240	-
611	242	491	241	-
612	242	489	491	-
613	242	243	489	-
614	491	471	241	-
615	491	470	471	-
616	491	490	470	-
617	491	489	490	-
618	490	198	470	-
619	196	495	195	-
620	494	197	490	-
621	494	196	197	-
622	494	495	196	-
623	496	195	495	-
624	493	194	496	-
625	493	193	194	-
626	194	195	496	-
627	197	198	490	-

628	499	497	244	-
629	499	495	497	-
630	499	498	495	-
631	497	243	244	-
632	499	492	498	-
633	499	245	492	-
634	499	244	245	-
635	498	496	495	-
636	496	492	493	-
637	496	498	492	-
638	497	489	243	-
639	494	497	495	-
640	489	494	490	-
641	489	497	494	-
642	500	503	473	-
643	503	501	502	-
644	503	500	501	-
645	493	501	193	-
646	493	502	501	-
647	493	492	502	-
648	246	492	245	-
649	246	502	492	-
650	246	247	502	-
651	248	503	247	-
652	248	473	503	-
653	503	502	247	-
654	472	500	473	-
655	472	191	500	-
656	472	190	191	-
657	501	192	193	-
658	192	500	191	-
659	192	501	500	-
660	504	471	470	-
661	469	504	468	-
662	469	471	504	-
663	469	240	471	-
664	199	470	198	-
665	504	200	468	-
666	504	199	200	-
667	504	470	199	-
668	200	201	468	-
669	218	220	217	-
670	218	219	220	-
671	218	18	219	-
672	516	221	515	-
673	516	220	221	-
674	516	217	220	-
675	516	17	217	-
676	17	515	216	-
677	17	516	515	-
678	517	515	513	-
679	517	216	515	-
680	222	515	221	-
681	222	513	515	-
682	215	517	514	-

683	215	216	517	-
684	517	513	514	-
685	514	214	215	-
686	514	512	214	-
687	518	513	223	-
688	514	518	512	-
689	514	513	518	-
690	513	222	223	-
691	518	511	512	-
692	518	224	511	-
693	518	223	224	-
694	224	225	511	-
695	226	520	225	-
696	522	227	509	-
697	226	522	520	-
698	226	227	522	-
699	522	519	520	-
700	521	522	509	-
701	521	519	522	-
702	521	212	519	-
703	211	510	210	-
704	211	521	510	-
705	211	212	521	-
706	521	509	510	-
707	523	511	520	-
708	512	213	214	-
709	512	523	213	-
710	512	511	523	-
711	511	225	520	-
712	523	16	213	-
713	523	519	16	-
714	523	520	519	-
715	519	212	16	-
716	228	509	227	-
717	524	228	229	-
718	524	509	228	-
719	507	229	230	-
720	507	524	229	-
721	510	508	210	-
722	524	510	509	-
723	508	524	507	-
724	508	510	524	-
725	531	528	235	-
726	531	527	528	-
727	531	532	527	-
728	530	527	532	-
729	530	203	527	-
730	528	234	235	-
731	529	533	505	-
732	532	529	530	-
733	532	533	529	-
734	532	531	533	-
735	533	237	505	-
736	531	236	533	-
737	531	235	236	-

738	236	237	533	-
739	530	15	203	-
740	15	529	202	-
741	15	530	529	-
742	506	529	505	-
743	506	202	529	-
744	506	201	202	-
745	528	526	234	-
746	534	528	527	-
747	534	526	528	-
748	534	525	526	-
749	204	527	203	-
750	205	534	204	-
751	205	525	534	-
752	205	206	525	-
753	534	527	204	-
754	538	536	537	-
755	538	535	536	-
756	538	232	535	-
757	207	536	206	-
758	207	537	536	-
759	207	208	537	-
760	539	538	537	-
761	231	539	230	-
762	538	231	232	-
763	538	539	231	-
764	209	540	208	-
765	209	508	540	-
766	209	210	508	-
767	508	507	540	-
768	539	507	230	-
769	540	537	208	-
770	540	539	537	-
771	540	507	539	-
772	233	535	232	-
773	233	526	535	-
774	233	234	526	-
775	525	535	526	-
776	525	536	535	-
777	525	206	536	-
778	506	468	201	-
779	541	506	505	-
780	541	468	506	-
781	541	469	468	-
782	238	505	237	-
783	239	541	238	-
784	239	469	541	-
785	239	240	469	-
786	541	505	238	-
787	397	293	40	-
788	397	398	293	-
789	397	147	398	-
790	398	292	293	-

Tabella 3bis. Elementi del modello FEM.



Le condizioni al contorno del problema in esame (posizione del bedrock) vengono prese in considerazione sul modello FEM mediante l'applicazione di smorzatori viscosi sui nodi facenti parte della porzione di terreno a contatto con il bedrock. Tali smorzatori esprimono due componenti (una orizzontale ed una verticale) di forza proporzionali alla velocità.

Le costanti di smorzamento  $C_x$  e  $C_z$  sono rispettivamente:

$$C_x = \rho_b * V_{sb} * V_{sb} \text{ e } C_z = \rho_b * V_{pb} * V_{pb}$$

dove:

- $\rho_b$  = densità di massa del substrato;
- $V_{sb}$  = velocità delle onde di taglio del substrato;
- $V_{pb}$  = velocità delle onde p del substrato;

Sul modello possono essere applicati dei vincoli fissi nel caso in cui il substrato lo si volesse modellare come infinitamente rigido o per simulare un comportamento monodimensionale. In tal caso vengono applicati su tutti i nodi del modello dei vincoli in direzione verticale, in modo da consentire solo deformazioni di taglio.

Di seguito vengono indicati i vincoli applicati al modello (B: "bloccato"; L: "libero") :

Nodo	Direzione X	Direzione Z
«TabVinc_No me»	«TabVinc_X»	«TabVinc_Z»

**Tabella «TabVinc\_ProgrTab».** Vincoli esterni del Modello FEM.

I cinematismi di controllo, in corrispondenza dei quali vengono monitorate le storie temporali, sono di seguito riportati:

ID Nodo	Target in X	Target in Z
1	NO	NO
2	NO	NO
3	NO	NO
4	NO	NO
5	NO	NO
6	NO	NO
7	NO	NO
8	NO	NO
9	NO	NO
10	NO	NO
11	NO	NO
12	NO	NO
13	NO	NO
14	NO	NO
15	NO	NO
16	NO	NO
17	NO	NO
18	NO	NO
19	NO	NO
20	NO	NO
21	NO	NO
22	NO	NO
23	NO	NO

24	NO	NO
25	SI	NO
26	NO	NO
27	NO	NO
28	NO	NO
29	NO	NO
30	NO	NO
31	NO	NO
32	NO	NO
33	NO	NO
34	NO	NO
35	SI	NO
36	NO	NO
37	NO	NO
38	NO	NO
39	NO	NO
40	NO	NO
41	NO	NO
42	SI	NO
43	NO	NO
44	NO	NO
45	NO	NO
46	NO	NO
47	NO	NO
48	NO	NO
49	NO	NO
50	NO	NO
51	NO	NO
52	NO	NO
53	NO	NO
54	NO	NO
55	NO	NO
56	NO	NO
57	NO	NO
58	NO	NO
59	NO	NO
60	NO	NO
61	NO	NO
62	NO	NO
63	NO	NO
64	NO	NO
65	NO	NO
66	NO	NO
67	NO	NO
68	NO	NO
69	NO	NO
70	NO	NO
71	NO	NO
72	NO	NO
73	NO	NO
74	NO	NO
75	NO	NO
76	NO	NO
77	NO	NO
78	NO	NO

79	NO	NO
80	NO	NO
81	NO	NO
82	NO	NO
83	NO	NO
84	NO	NO
85	NO	NO
86	NO	NO
87	NO	NO
88	NO	NO
89	NO	NO
90	NO	NO
91	NO	NO
92	NO	NO
93	NO	NO
94	NO	NO
95	NO	NO
96	NO	NO
97	NO	NO
98	NO	NO
99	NO	NO
100	NO	NO
101	NO	NO
102	NO	NO
103	NO	NO
104	NO	NO
105	NO	NO
106	NO	NO
107	NO	NO
108	NO	NO
109	NO	NO
110	NO	NO
111	NO	NO
112	NO	NO
113	NO	NO
114	NO	NO
115	NO	NO
116	NO	NO
117	NO	NO
118	NO	NO
119	NO	NO
120	NO	NO
121	NO	NO
122	NO	NO
123	NO	NO
124	NO	NO
125	NO	NO
126	NO	NO
127	NO	NO
128	NO	NO
129	NO	NO
130	NO	NO
131	NO	NO
132	NO	NO
133	NO	NO

134	NO	NO
135	NO	NO
136	NO	NO
137	NO	NO
138	NO	NO
139	NO	NO
140	NO	NO
141	NO	NO
142	NO	NO
143	NO	NO
144	NO	NO
145	NO	NO
146	NO	NO
147	NO	NO
148	NO	NO
149	NO	NO
150	NO	NO
151	NO	NO
152	NO	NO
153	NO	NO
154	NO	NO
155	NO	NO
156	NO	NO
157	NO	NO
158	NO	NO
159	NO	NO
160	NO	NO
161	NO	NO
162	NO	NO
163	NO	NO
164	NO	NO
165	NO	NO
166	NO	NO
167	NO	NO
168	NO	NO
169	NO	NO
170	NO	NO
171	NO	NO
172	NO	NO
173	NO	NO
174	NO	NO
175	NO	NO
176	NO	NO
177	NO	NO
178	NO	NO
179	NO	NO
180	NO	NO
181	NO	NO
182	NO	NO
183	NO	NO
184	NO	NO
185	NO	NO
186	NO	NO
187	NO	NO
188	NO	NO

189	NO	NO
190	NO	NO
191	NO	NO
192	NO	NO
193	NO	NO
194	NO	NO
195	NO	NO
196	NO	NO
197	NO	NO
198	NO	NO
199	NO	NO
200	NO	NO
201	NO	NO
202	NO	NO
203	NO	NO
204	NO	NO
205	NO	NO
206	NO	NO
207	NO	NO
208	NO	NO
209	NO	NO
210	NO	NO
211	NO	NO
212	NO	NO
213	NO	NO
214	NO	NO
215	NO	NO
216	NO	NO
217	NO	NO
218	NO	NO
219	NO	NO
220	NO	NO
221	NO	NO
222	NO	NO
223	NO	NO
224	NO	NO
225	NO	NO
226	NO	NO
227	NO	NO
228	NO	NO
229	NO	NO
230	NO	NO
231	NO	NO
232	NO	NO
233	NO	NO
234	NO	NO
235	NO	NO
236	NO	NO
237	NO	NO
238	NO	NO
239	NO	NO
240	NO	NO
241	NO	NO
242	NO	NO
243	NO	NO

244	NO	NO
245	NO	NO
246	NO	NO
247	NO	NO
248	NO	NO
249	NO	NO
250	NO	NO
251	NO	NO
252	NO	NO
253	NO	NO
254	NO	NO
255	NO	NO
256	NO	NO
257	NO	NO
258	NO	NO
259	NO	NO
260	NO	NO
261	NO	NO
262	NO	NO
263	NO	NO
264	NO	NO
265	NO	NO
266	NO	NO
267	NO	NO
268	NO	NO
269	NO	NO
270	NO	NO
271	NO	NO
272	NO	NO
273	NO	NO
274	NO	NO
275	NO	NO
276	NO	NO
277	NO	NO
278	NO	NO
279	NO	NO
280	NO	NO
281	NO	NO
282	NO	NO
283	NO	NO
284	NO	NO
285	NO	NO
286	NO	NO
287	NO	NO
288	NO	NO
289	NO	NO
290	NO	NO
291	NO	NO
292	NO	NO
293	NO	NO
294	NO	NO
295	NO	NO
296	NO	NO
297	NO	NO
298	NO	NO

299	NO	NO
300	NO	NO
301	NO	NO
302	NO	NO
303	NO	NO
304	NO	NO
305	NO	NO
306	NO	NO
307	NO	NO
308	NO	NO
309	NO	NO
310	NO	NO
311	NO	NO
312	NO	NO
313	NO	NO
314	NO	NO
315	NO	NO
316	NO	NO
317	NO	NO
318	NO	NO
319	NO	NO
320	NO	NO
321	NO	NO
322	NO	NO
323	NO	NO
324	NO	NO
325	NO	NO
326	NO	NO
327	NO	NO
328	NO	NO
329	NO	NO
330	NO	NO
331	NO	NO
332	NO	NO
333	NO	NO
334	NO	NO
335	NO	NO
336	NO	NO
337	NO	NO
338	NO	NO
339	NO	NO
340	NO	NO
341	NO	NO
342	NO	NO
343	NO	NO
344	NO	NO
345	NO	NO
346	NO	NO
347	NO	NO
348	NO	NO
349	NO	NO
350	NO	NO
351	NO	NO
352	NO	NO
353	NO	NO

354	NO	NO
355	NO	NO
356	NO	NO
357	NO	NO
358	NO	NO
359	NO	NO
360	NO	NO
361	NO	NO
362	NO	NO
363	NO	NO
364	NO	NO
365	NO	NO
366	NO	NO
367	NO	NO
368	NO	NO
369	NO	NO
370	NO	NO
371	NO	NO
372	NO	NO
373	NO	NO
374	NO	NO
375	NO	NO
376	NO	NO
377	NO	NO
378	NO	NO
379	NO	NO
380	NO	NO
381	NO	NO
382	NO	NO
383	NO	NO
384	NO	NO
385	NO	NO
386	NO	NO
387	NO	NO
388	NO	NO
389	NO	NO
390	NO	NO
391	NO	NO
392	NO	NO
393	NO	NO
394	NO	NO
395	NO	NO
396	NO	NO
397	NO	NO
398	NO	NO
399	NO	NO
400	NO	NO
401	NO	NO
402	NO	NO
403	NO	NO
404	NO	NO
405	NO	NO
406	NO	NO
407	NO	NO
408	NO	NO



409	NO	NO
410	NO	NO
411	NO	NO
412	NO	NO
413	NO	NO
414	NO	NO
415	NO	NO
416	NO	NO
417	NO	NO
418	NO	NO
419	NO	NO
420	NO	NO
421	NO	NO
422	NO	NO
423	NO	NO
424	NO	NO
425	NO	NO
426	NO	NO
427	NO	NO
428	NO	NO
429	NO	NO
430	NO	NO
431	NO	NO
432	NO	NO
433	NO	NO
434	NO	NO
435	NO	NO
436	NO	NO
437	NO	NO
438	NO	NO
439	NO	NO
440	NO	NO
441	NO	NO
442	NO	NO
443	NO	NO
444	NO	NO
445	NO	NO
446	NO	NO
447	NO	NO
448	NO	NO
449	NO	NO
450	NO	NO
451	NO	NO
452	NO	NO
453	NO	NO
454	NO	NO
455	NO	NO
456	NO	NO
457	NO	NO
458	NO	NO
459	NO	NO
460	NO	NO
461	NO	NO
462	NO	NO
463	NO	NO

464	NO	NO
465	NO	NO
466	NO	NO
467	NO	NO
468	NO	NO
469	NO	NO
470	NO	NO
471	NO	NO
472	NO	NO
473	NO	NO
474	NO	NO
475	NO	NO
476	NO	NO
477	NO	NO
478	NO	NO
479	NO	NO
480	NO	NO
481	NO	NO
482	NO	NO
483	NO	NO
484	NO	NO
485	NO	NO
486	NO	NO
487	NO	NO
488	NO	NO
489	NO	NO
490	NO	NO
491	NO	NO
492	NO	NO
493	NO	NO
494	NO	NO
495	NO	NO
496	NO	NO
497	NO	NO
498	NO	NO
499	NO	NO
500	NO	NO
501	NO	NO
502	NO	NO
503	NO	NO
504	NO	NO
505	NO	NO
506	NO	NO
507	NO	NO
508	NO	NO
509	NO	NO
510	NO	NO
511	NO	NO
512	NO	NO
513	NO	NO
514	NO	NO
515	NO	NO
516	NO	NO
517	NO	NO
518	NO	NO

519	NO	NO
520	NO	NO
521	NO	NO
522	NO	NO
523	NO	NO
524	NO	NO
525	NO	NO
526	NO	NO
527	NO	NO
528	NO	NO
529	NO	NO
530	NO	NO
531	NO	NO
532	NO	NO
533	NO	NO
534	NO	NO
535	NO	NO
536	NO	NO
537	NO	NO
538	NO	NO
539	NO	NO
540	NO	NO
541	NO	NO

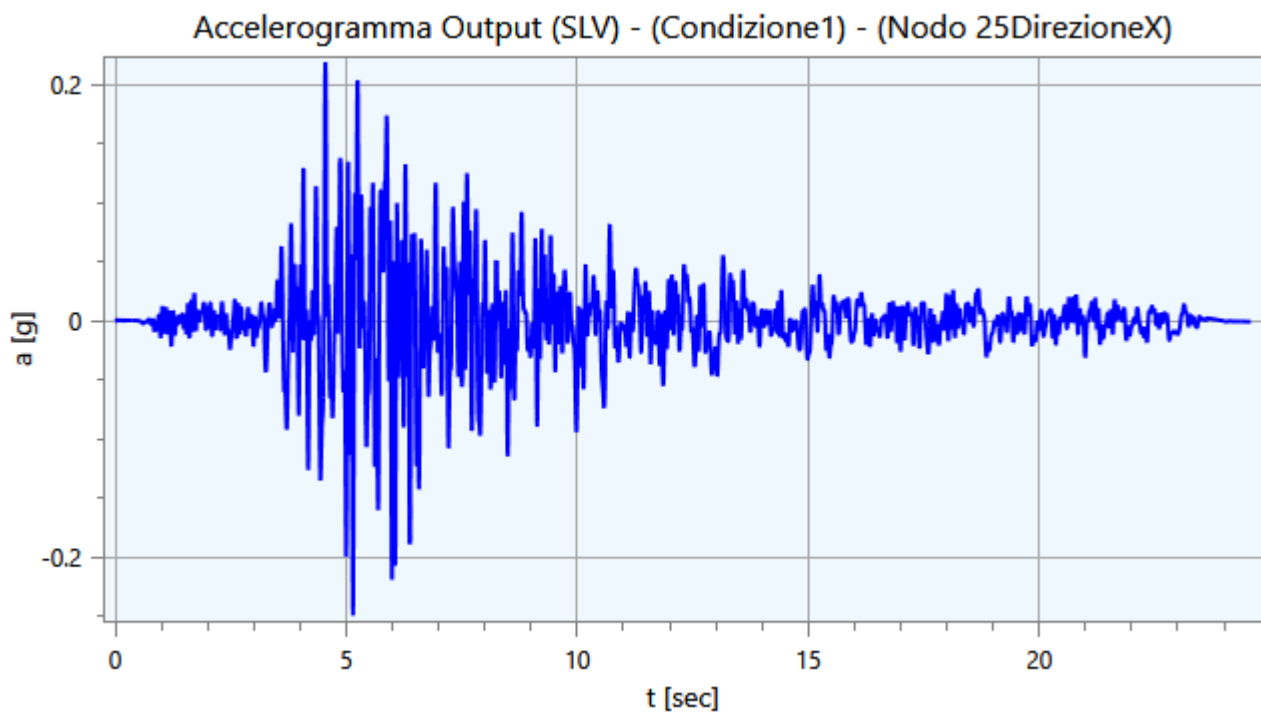
**Tabella 5.** Cinematismi di controllo.

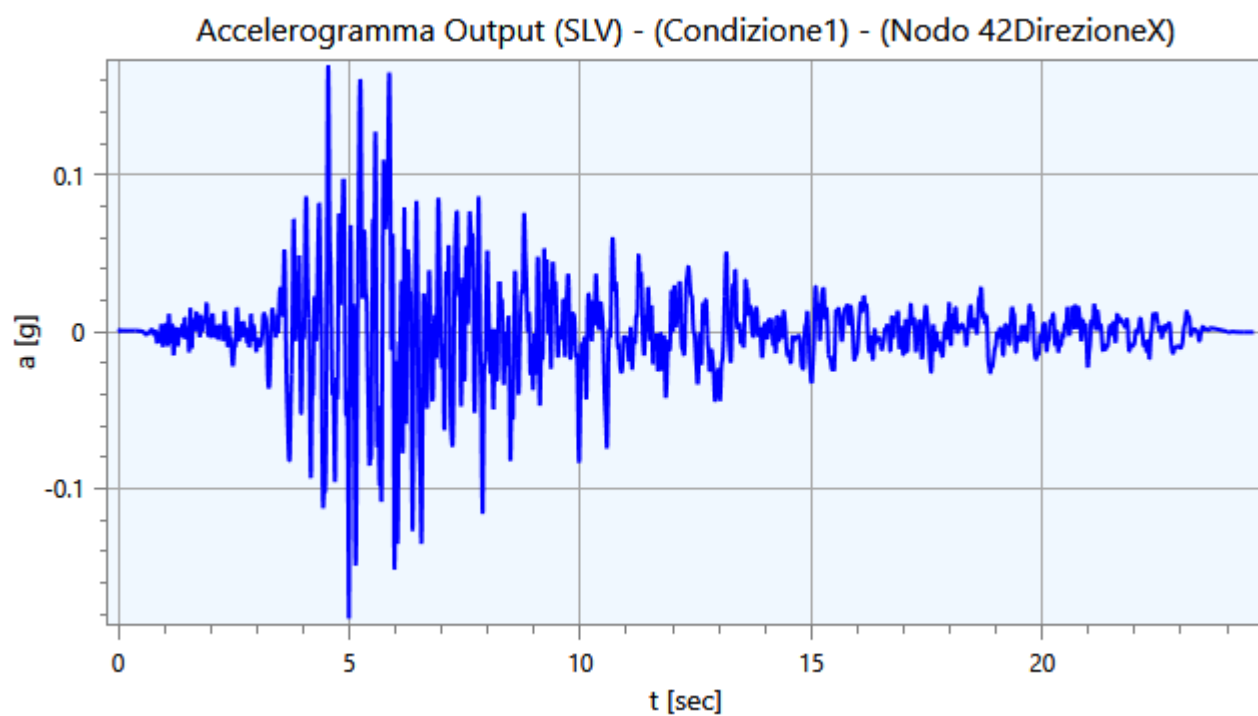
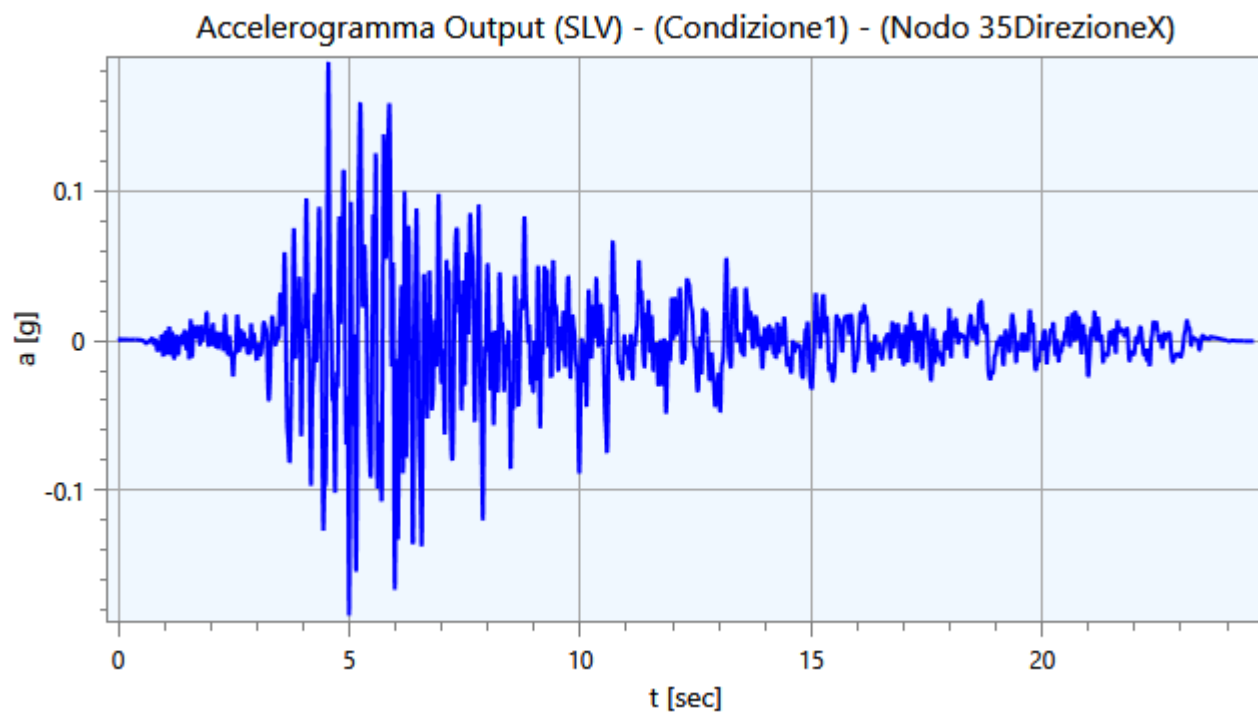
## 5 - Output

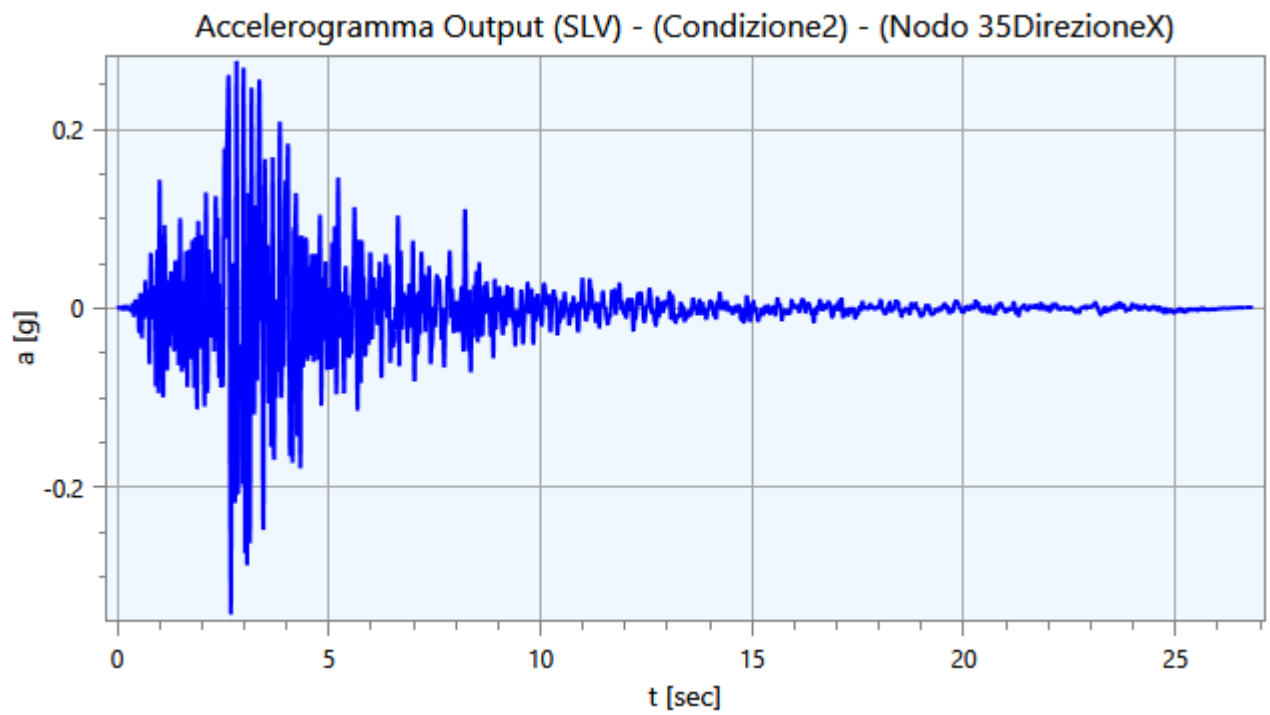
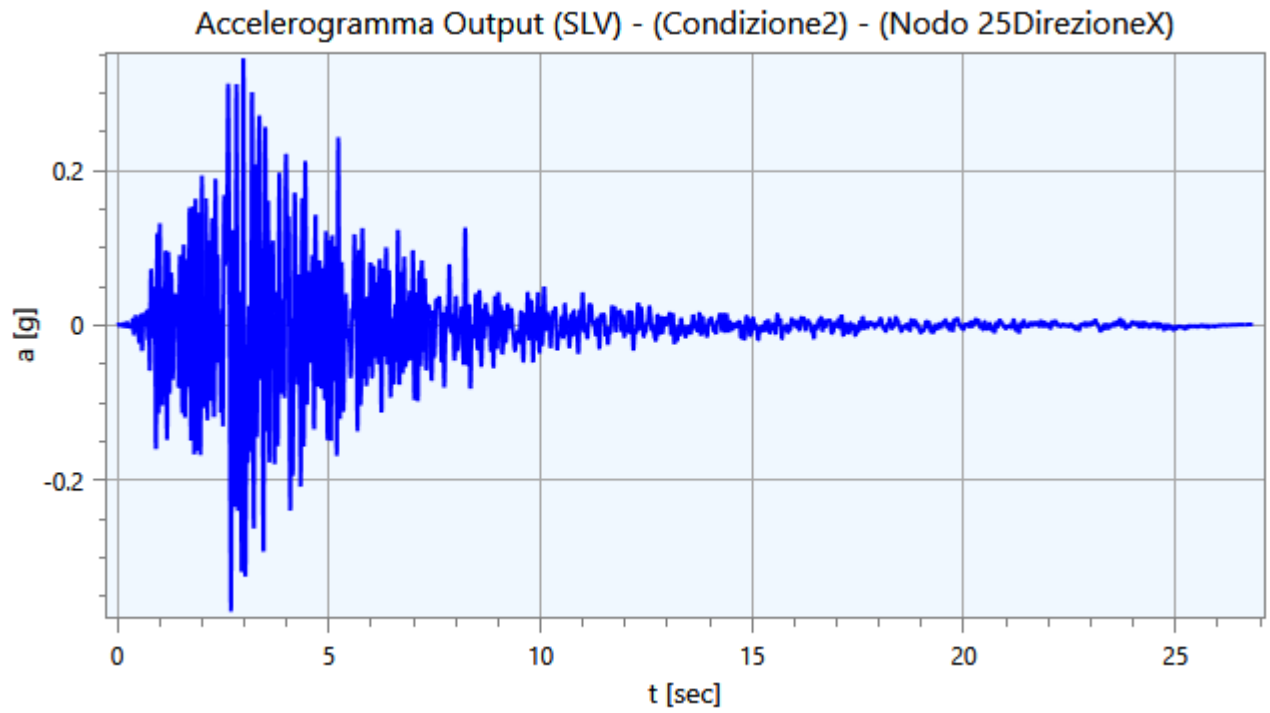
Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai risultati del calcolo.

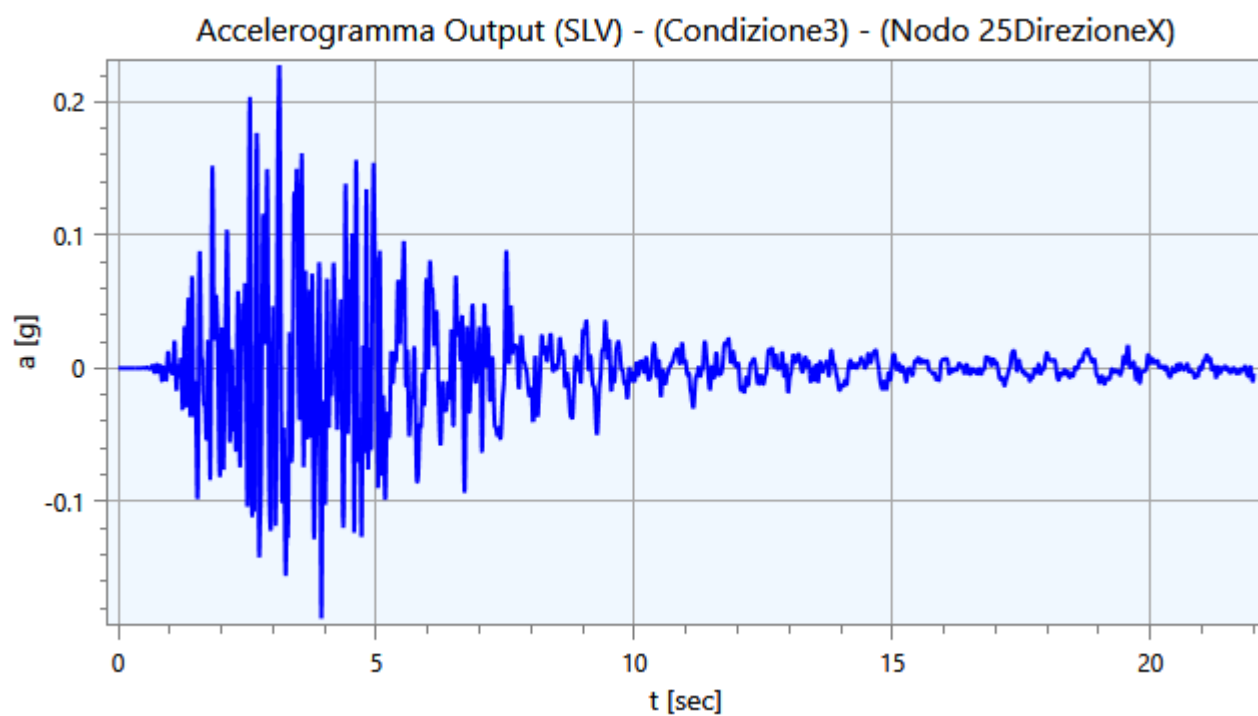
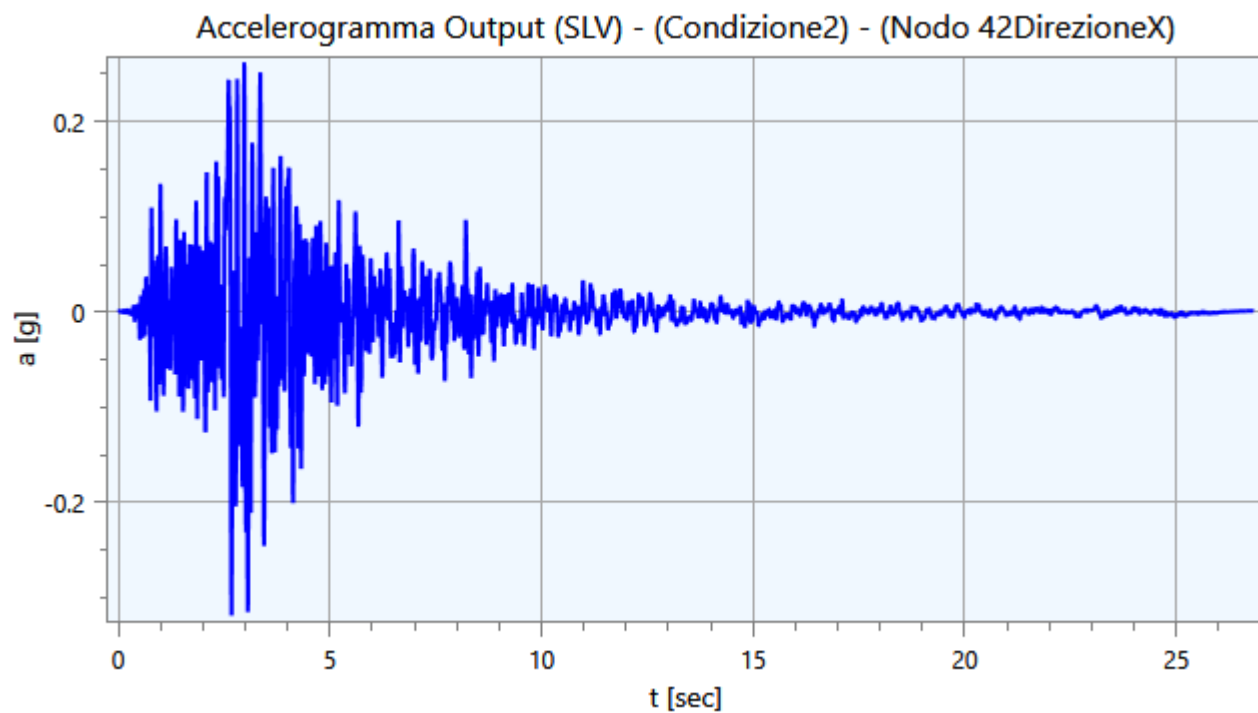
### 5.1 - Accelerogrammi Output

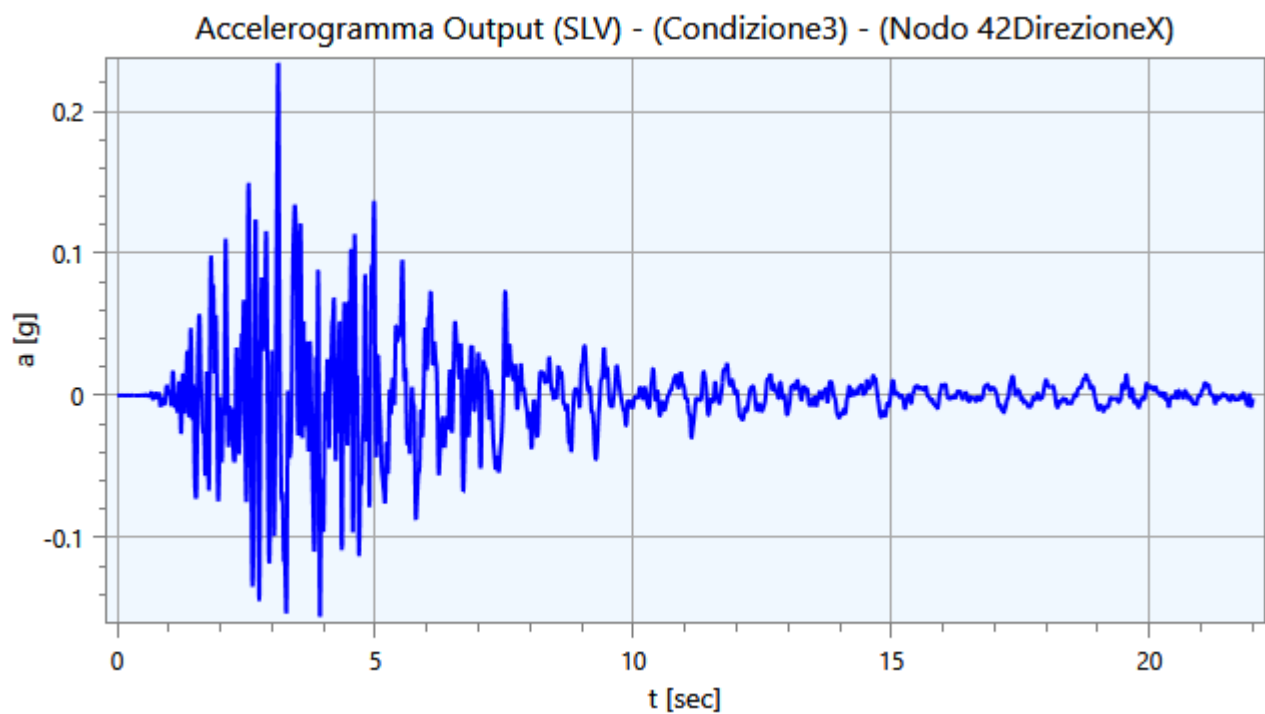
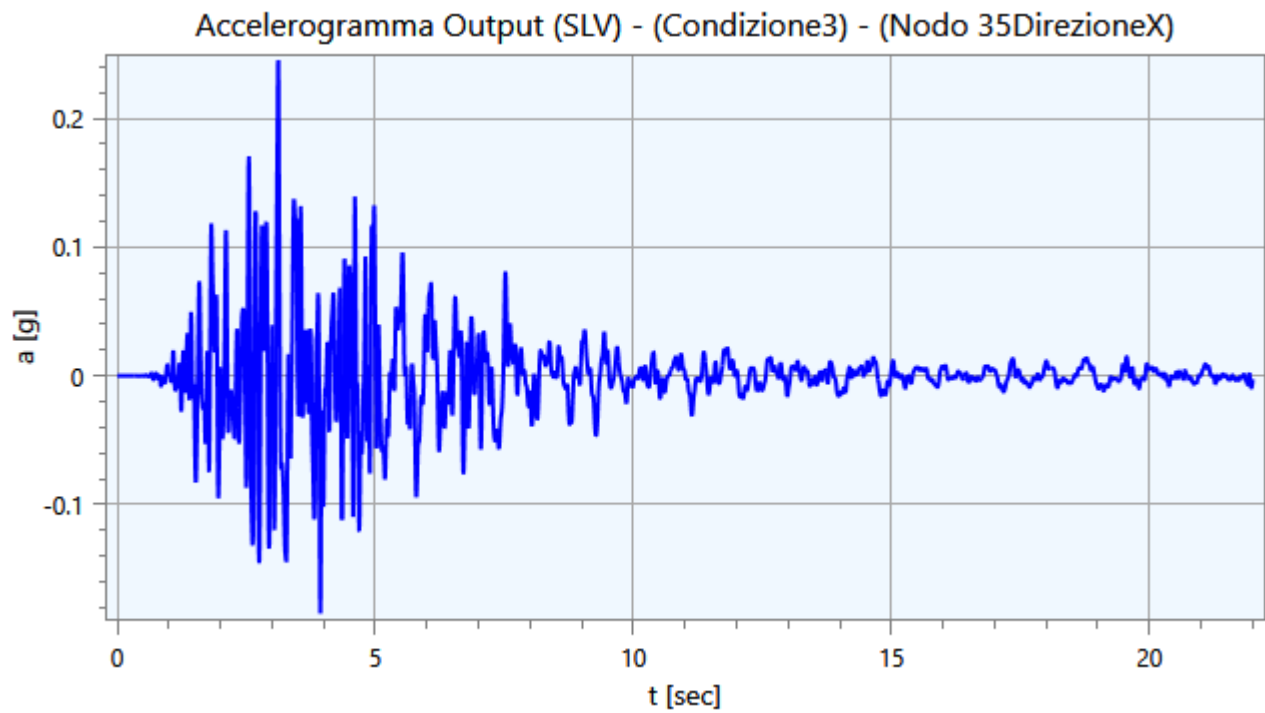
Di seguito vengono riportati gli accelerogrammi relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:



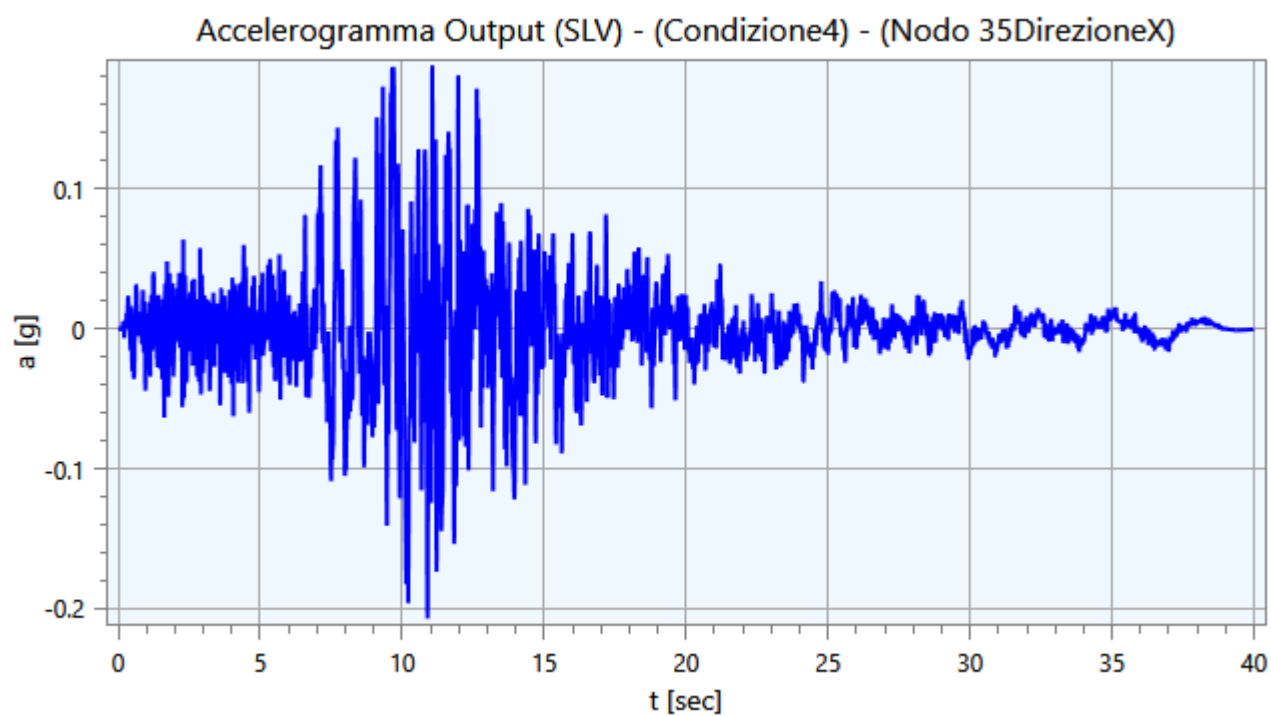
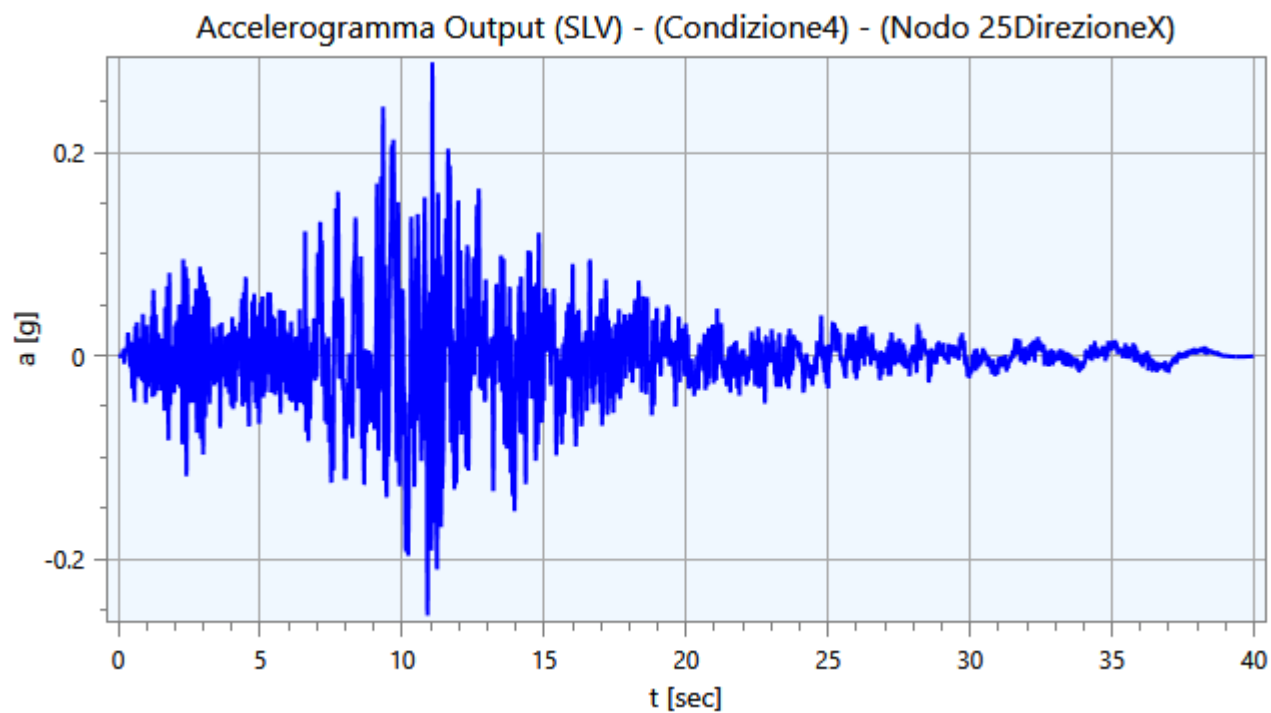


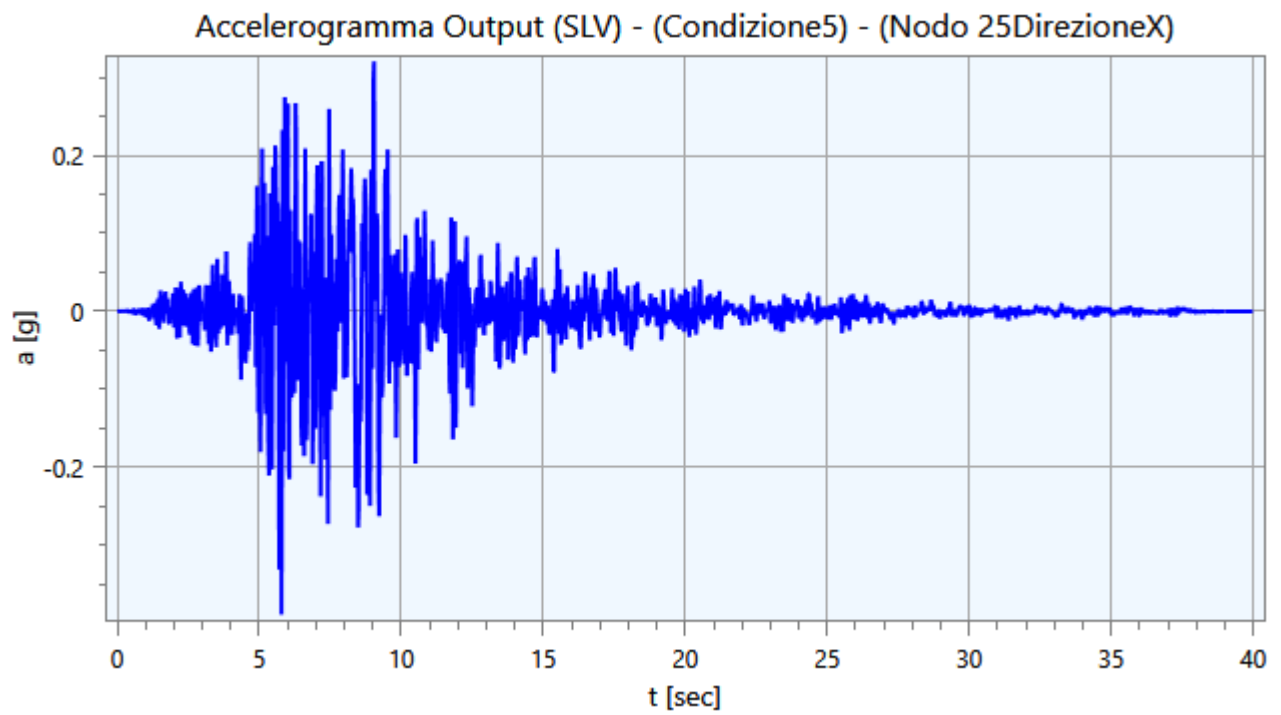
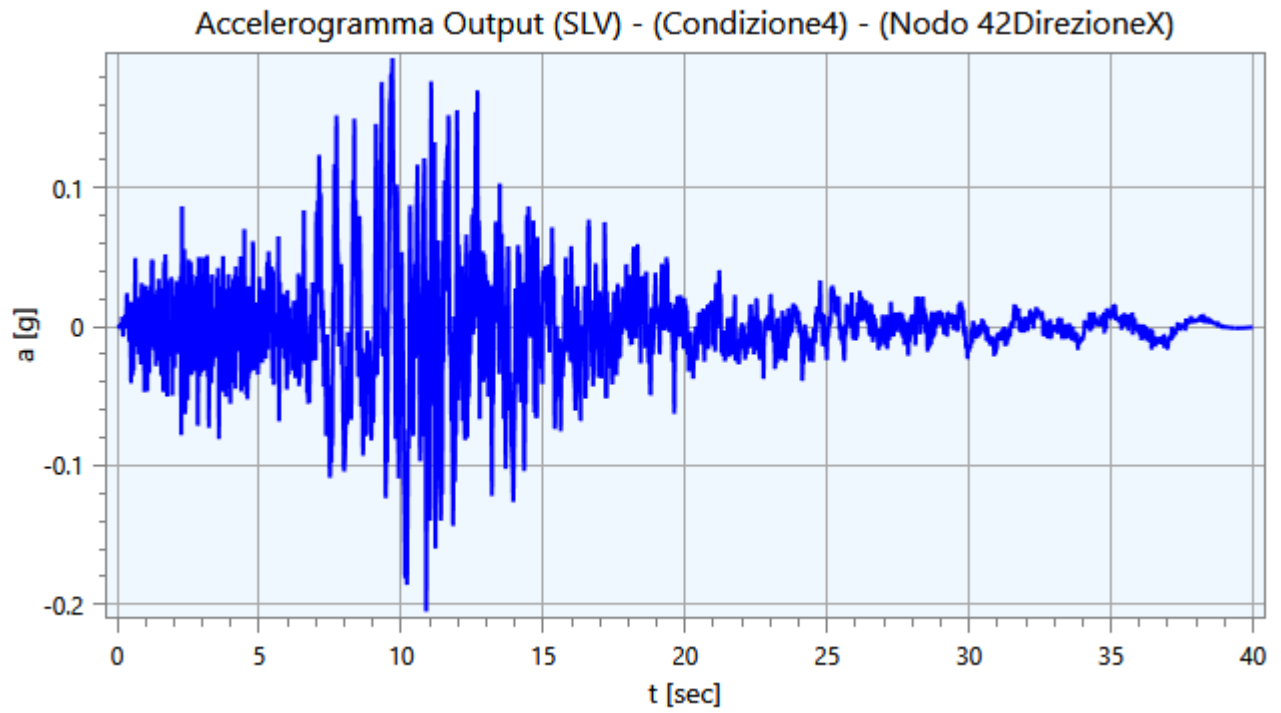


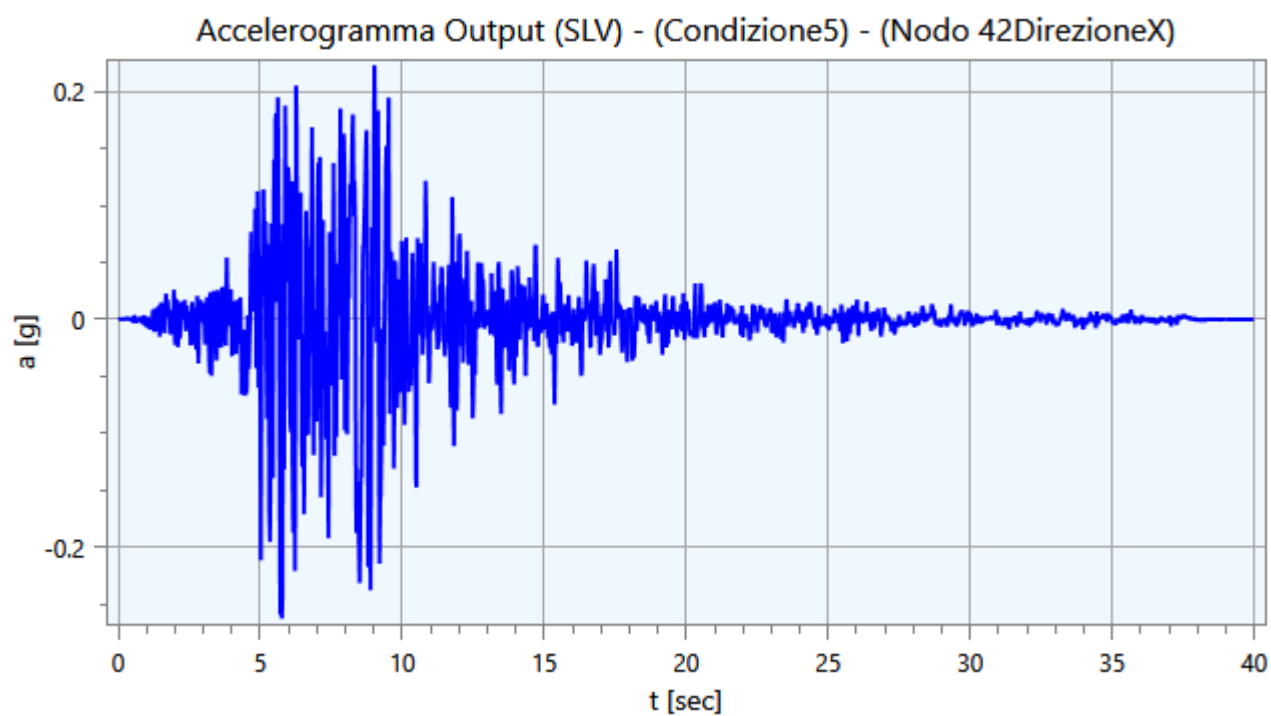
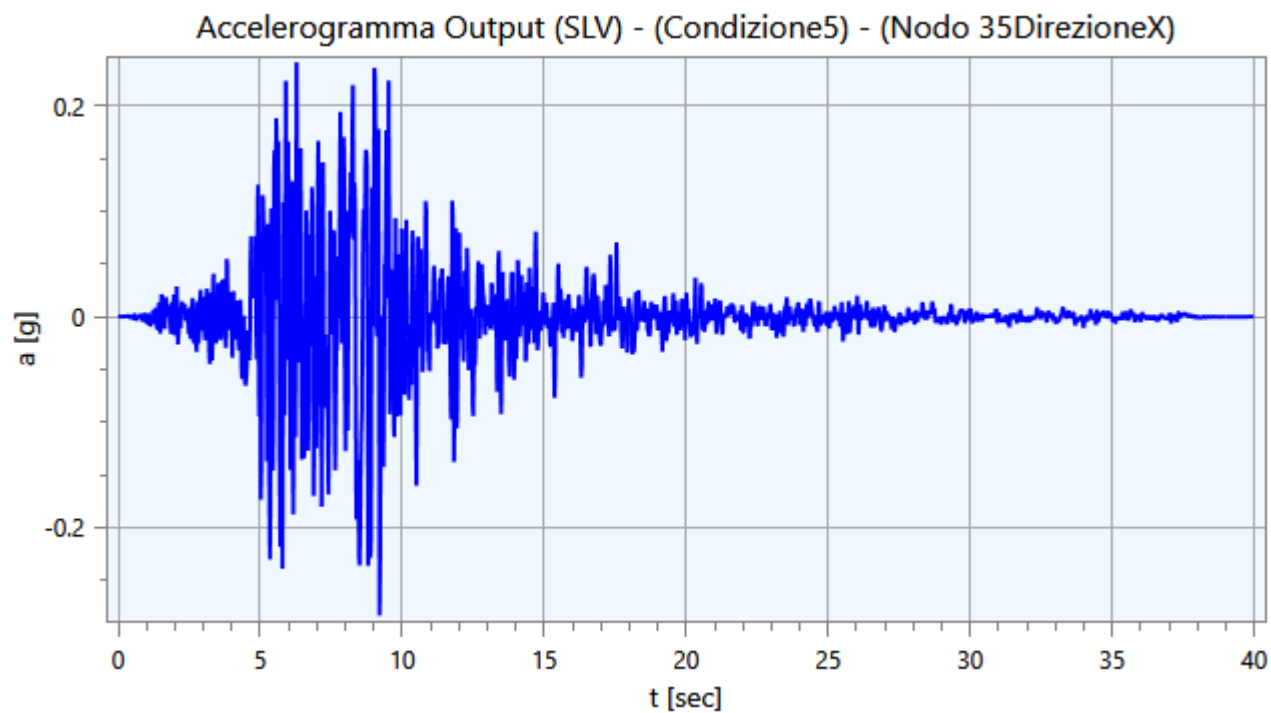


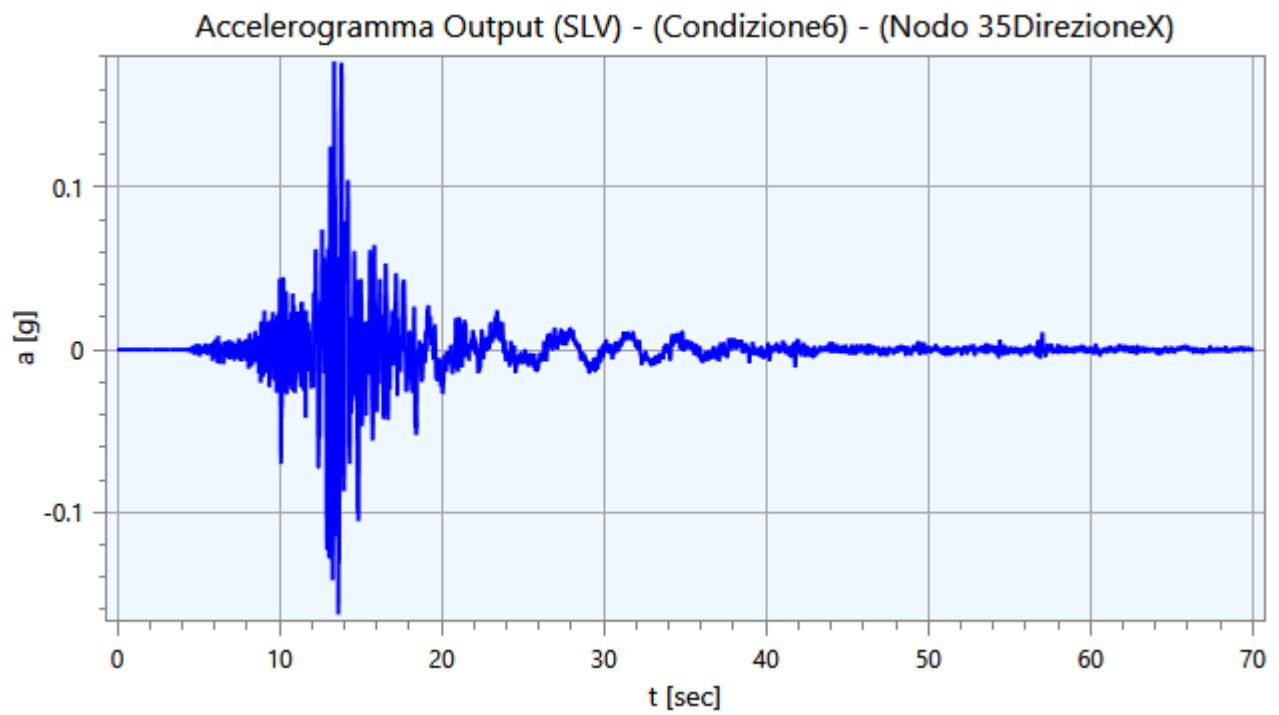
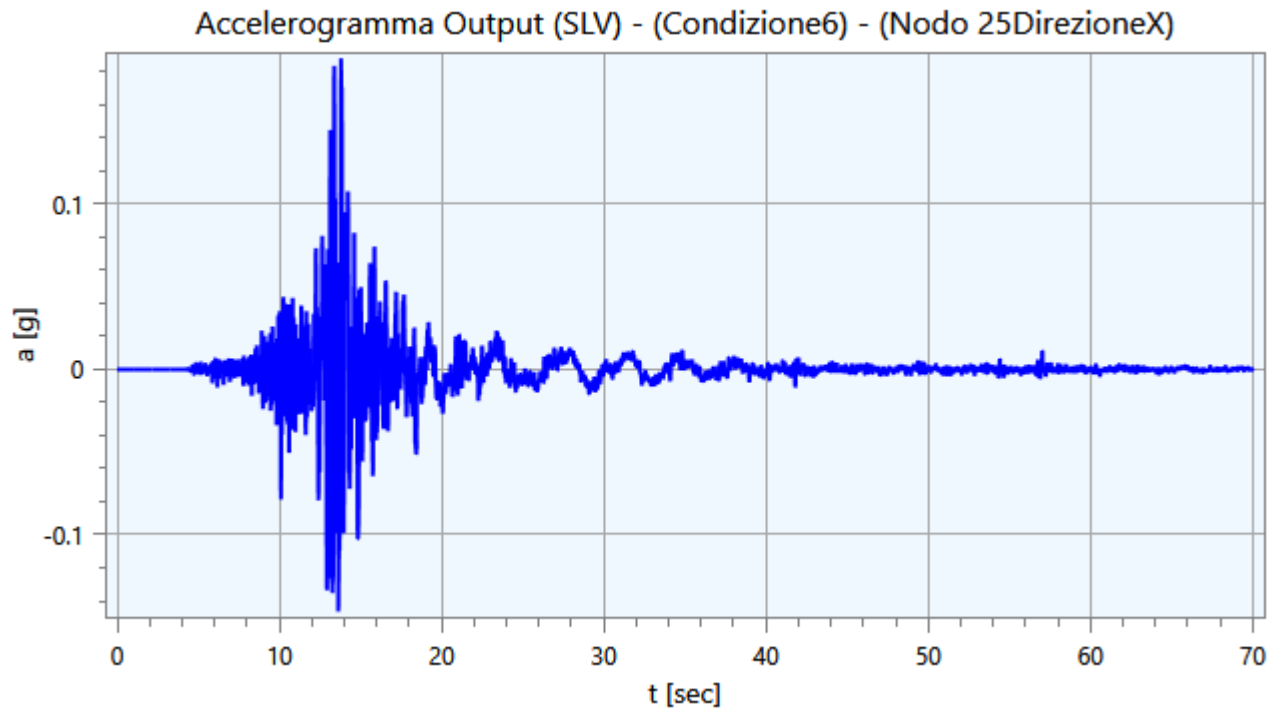


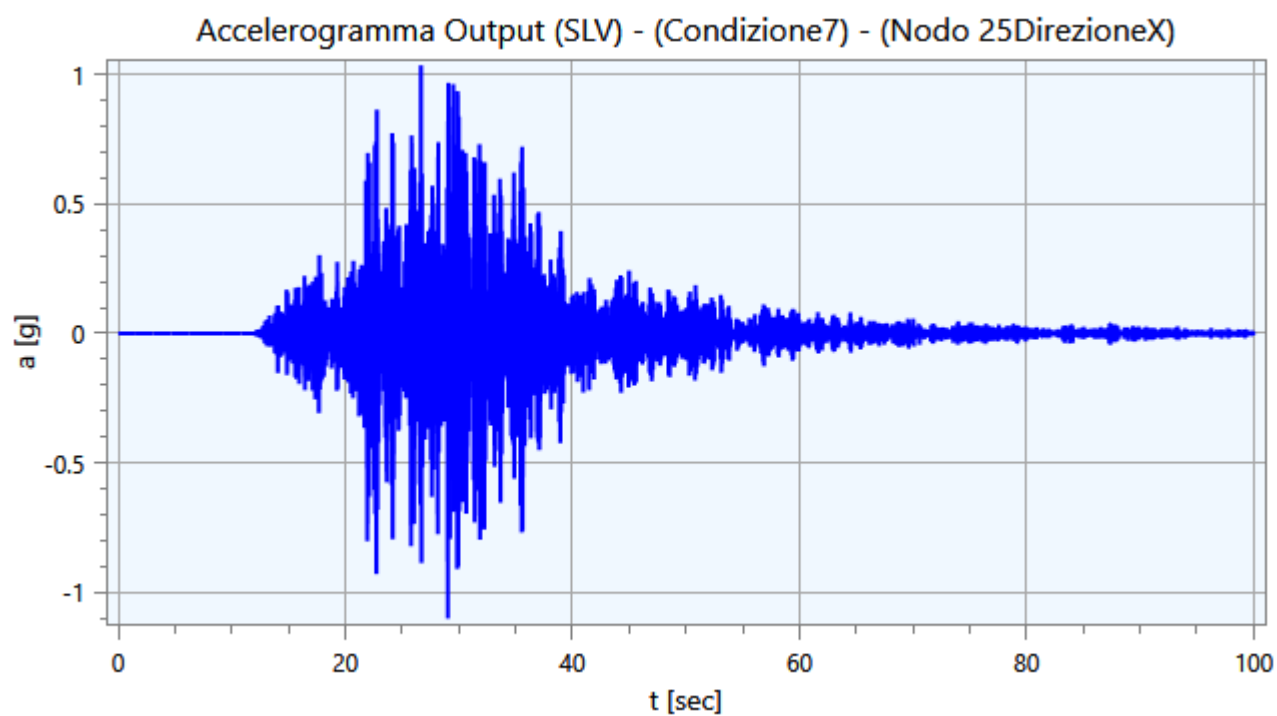
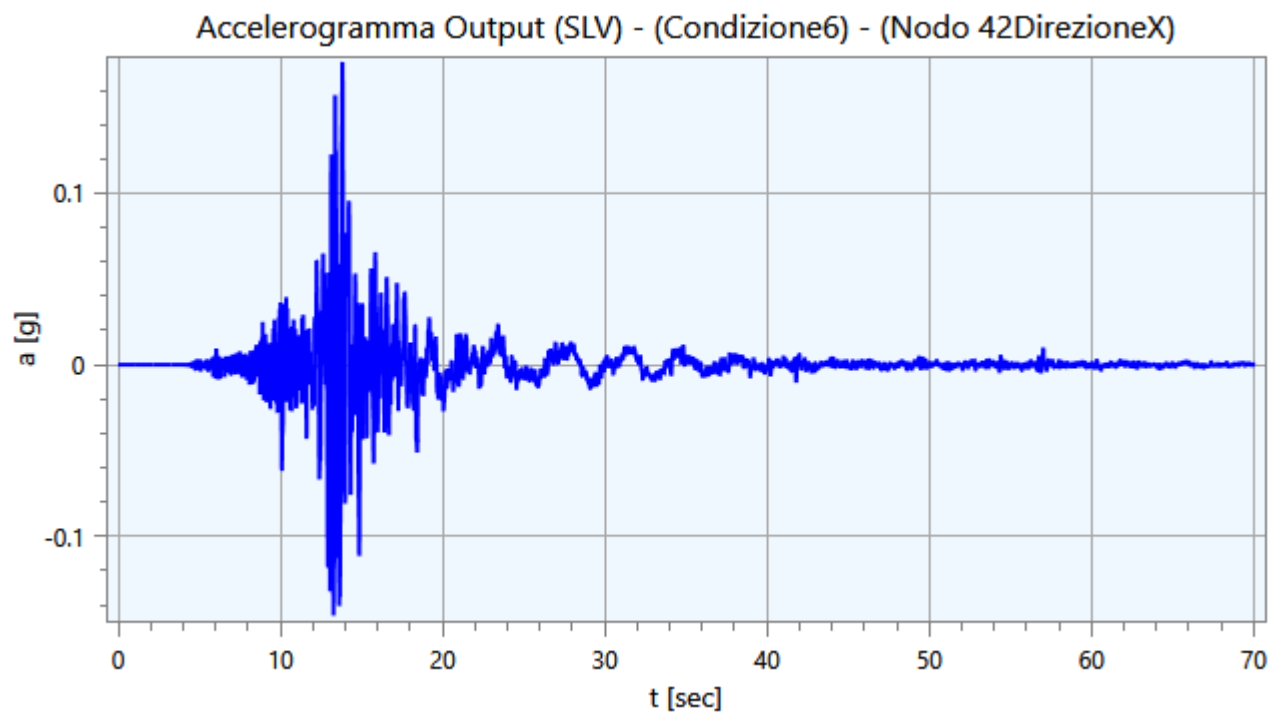


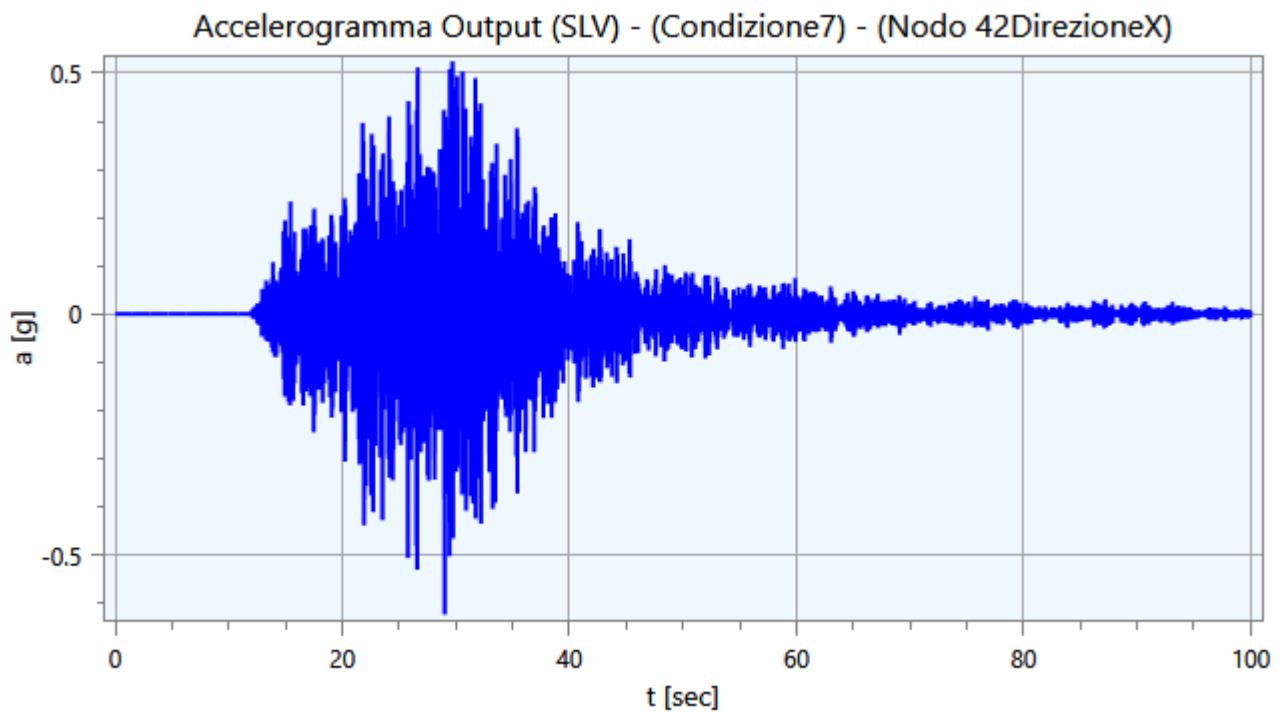
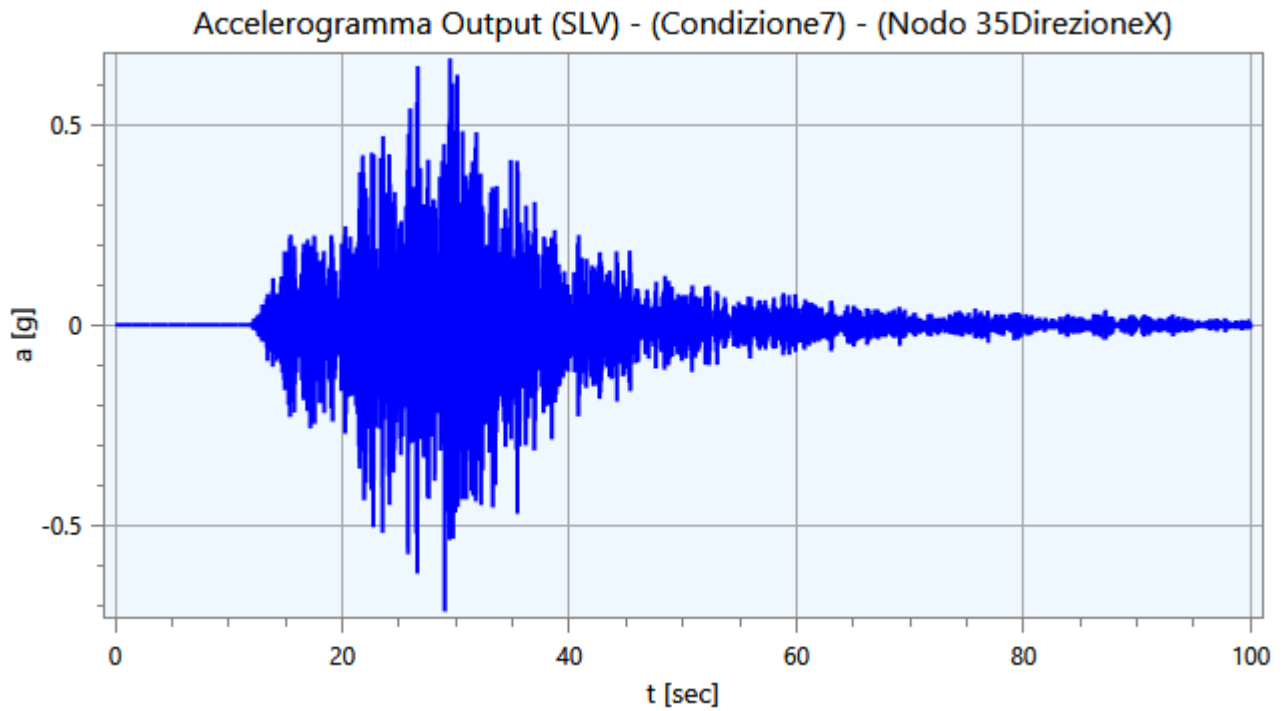






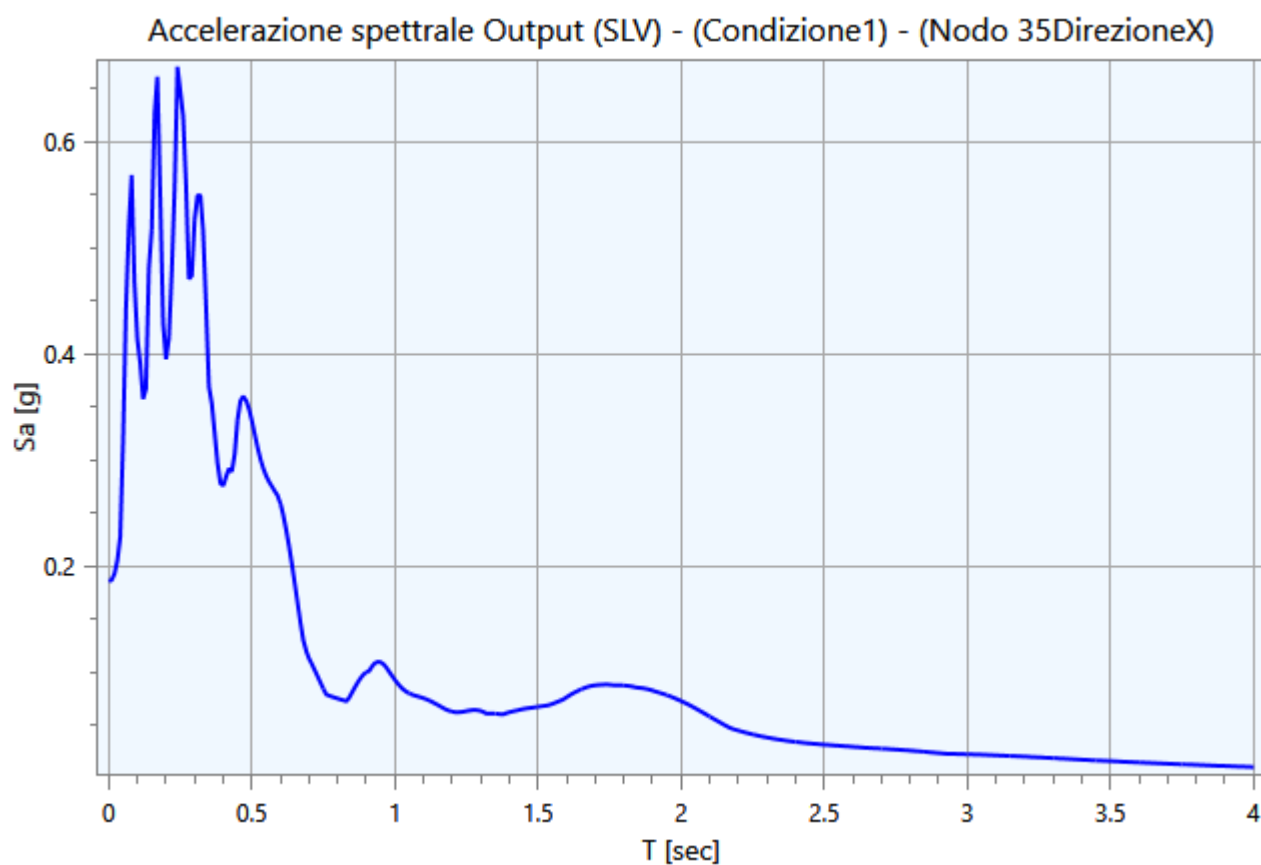
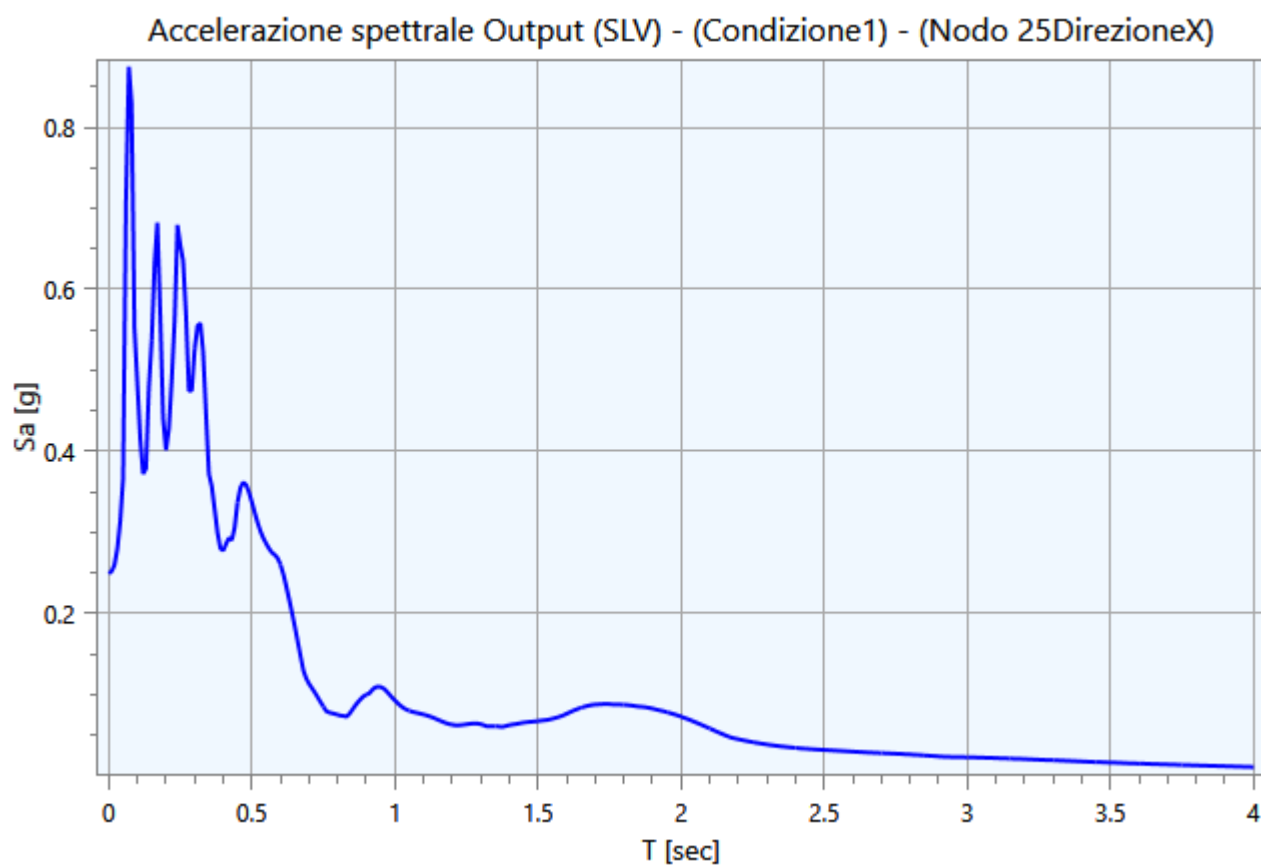


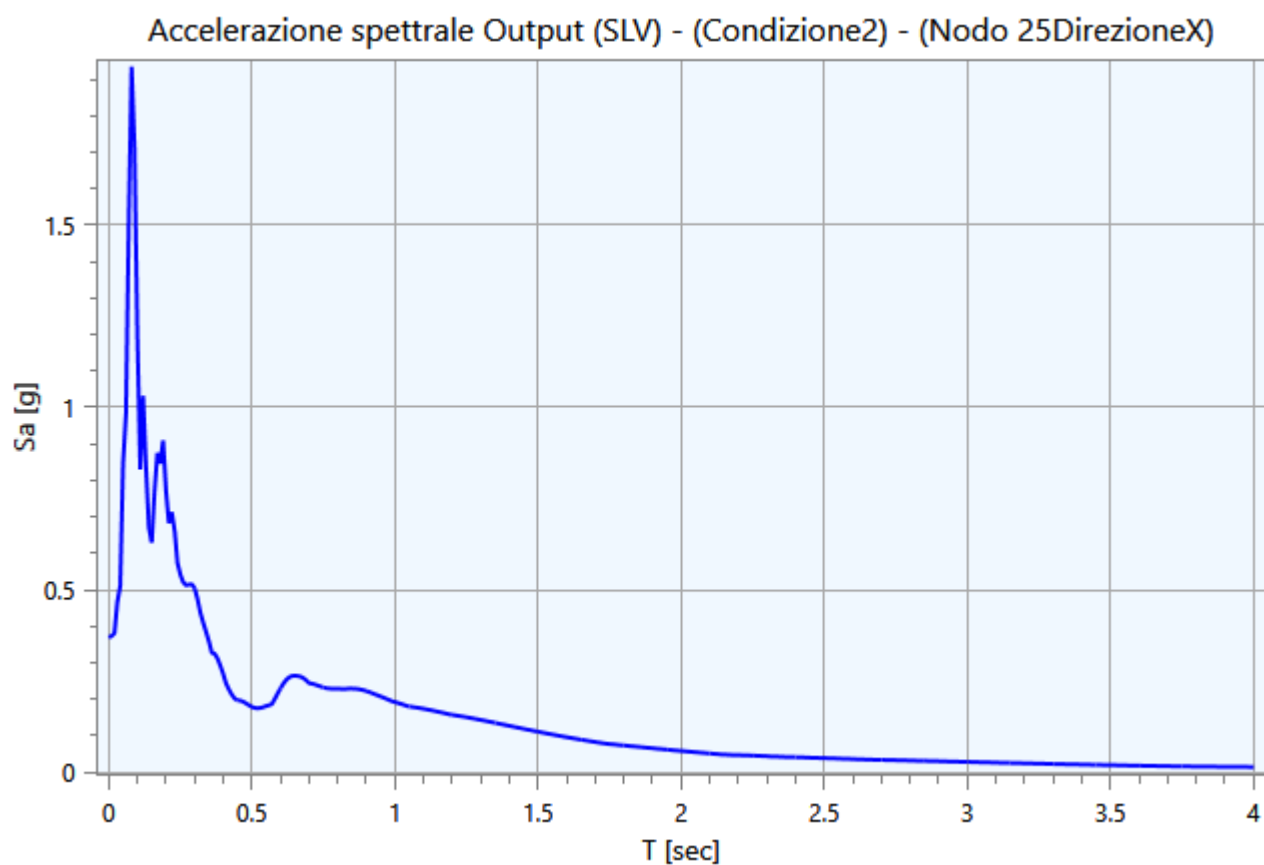
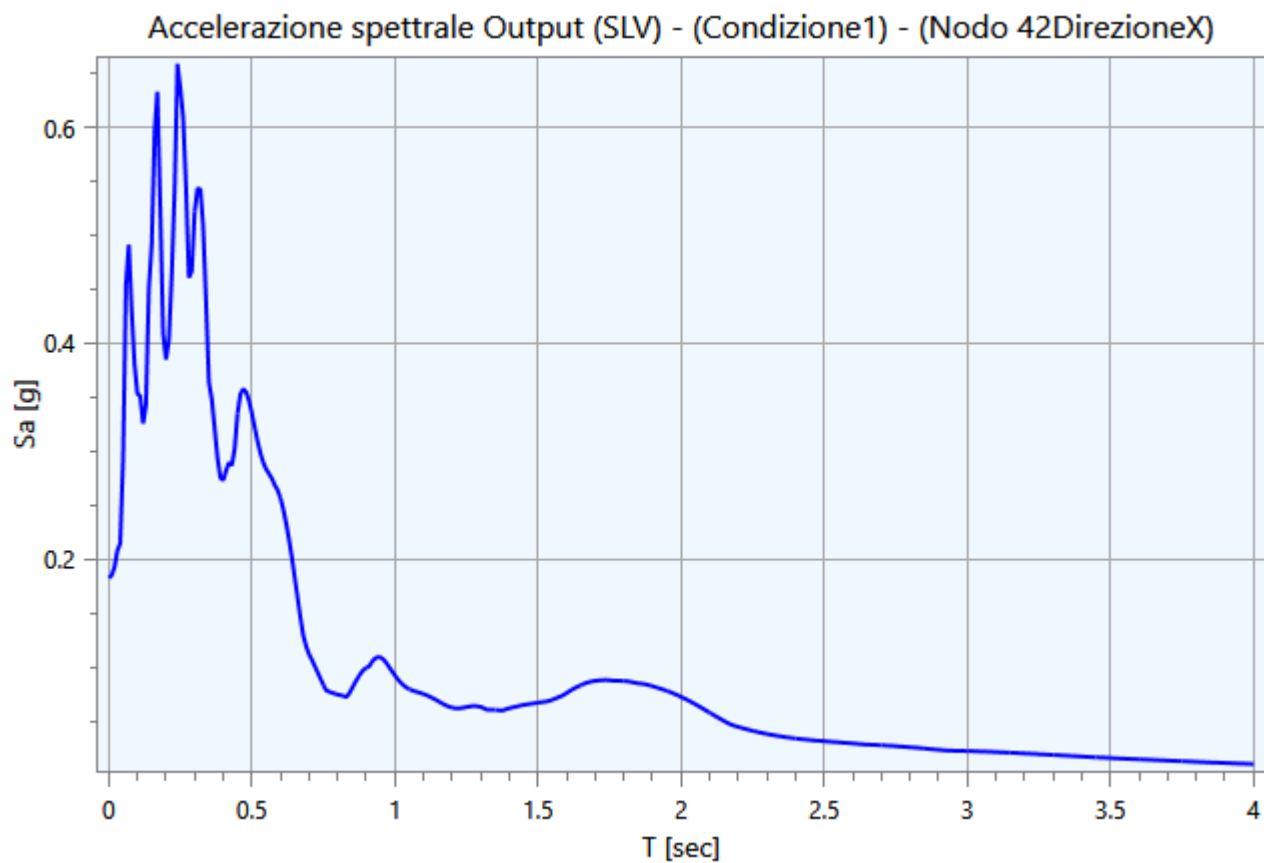




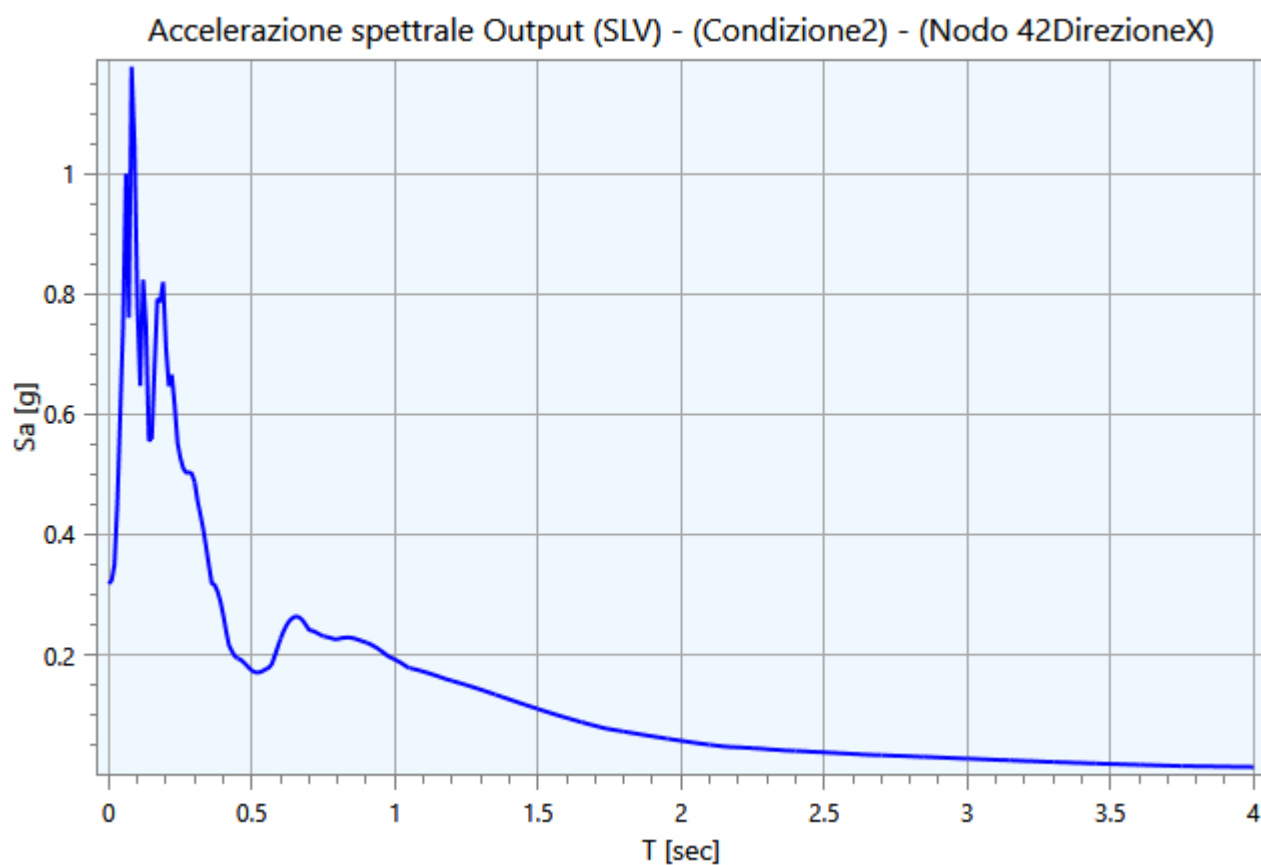
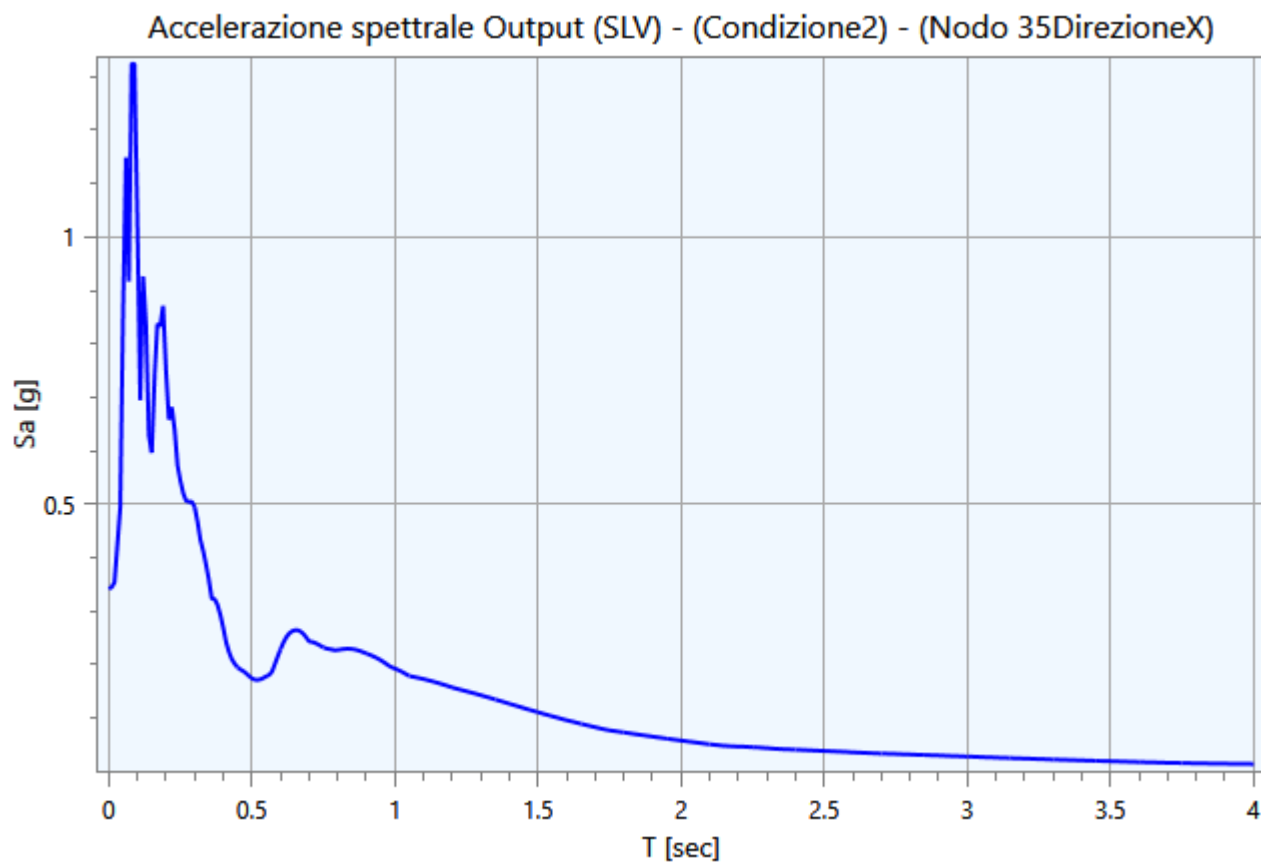
## 5.2 - Spettri Output

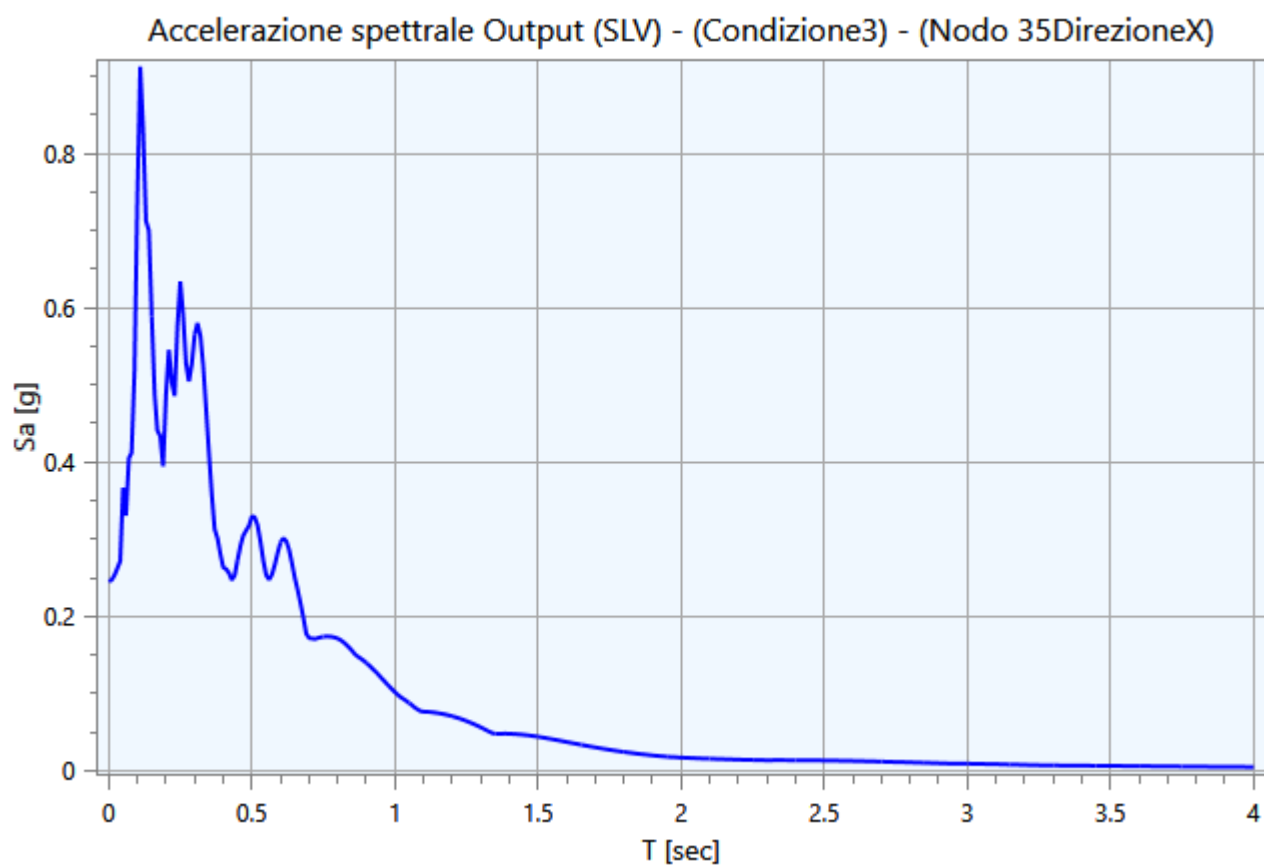
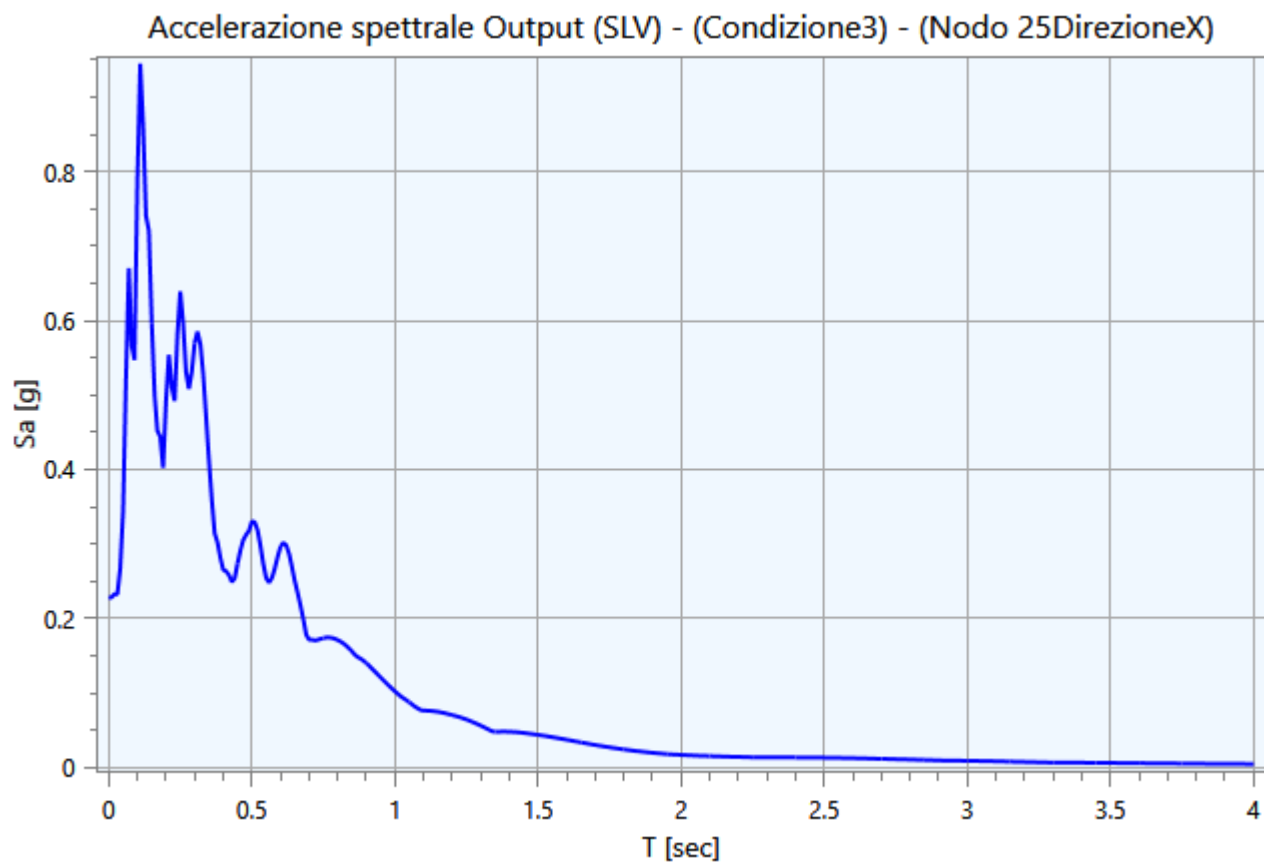
Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

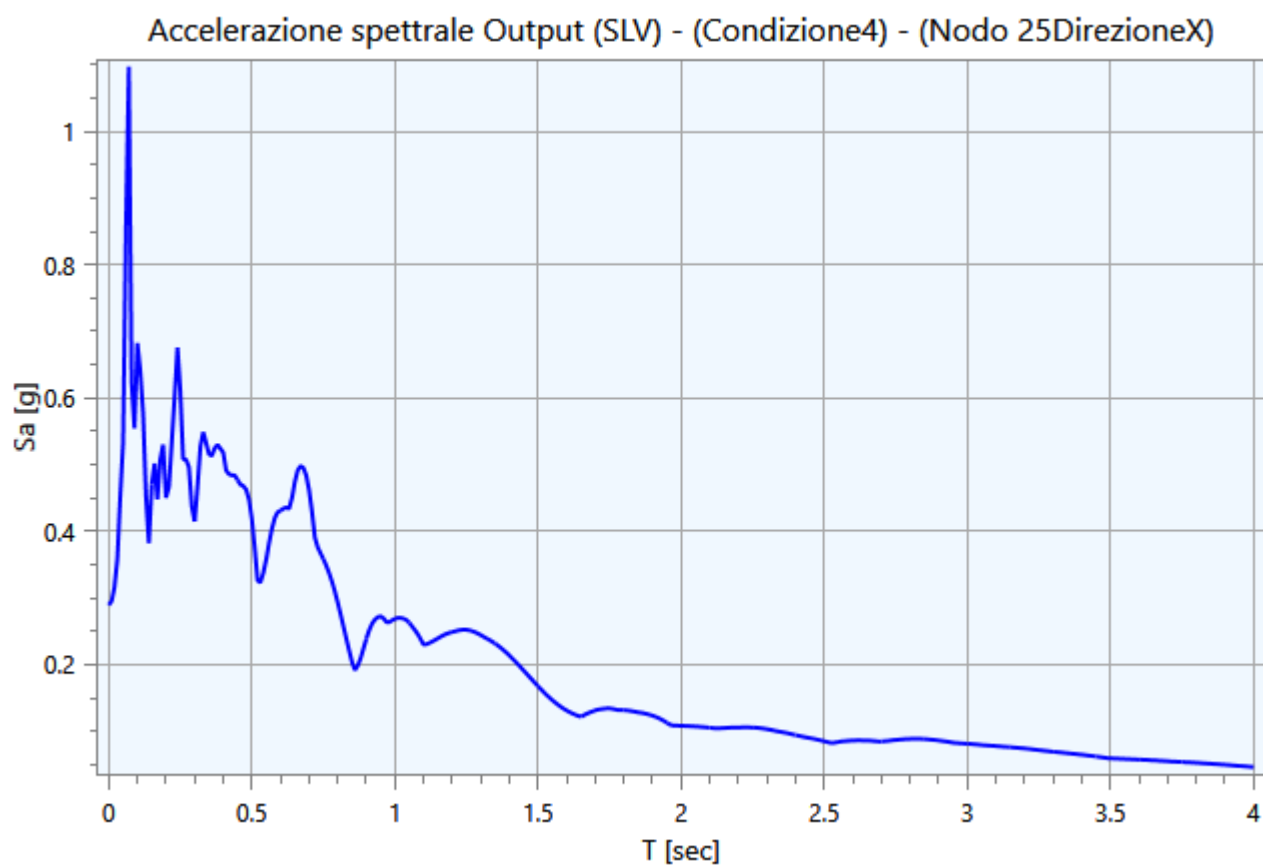
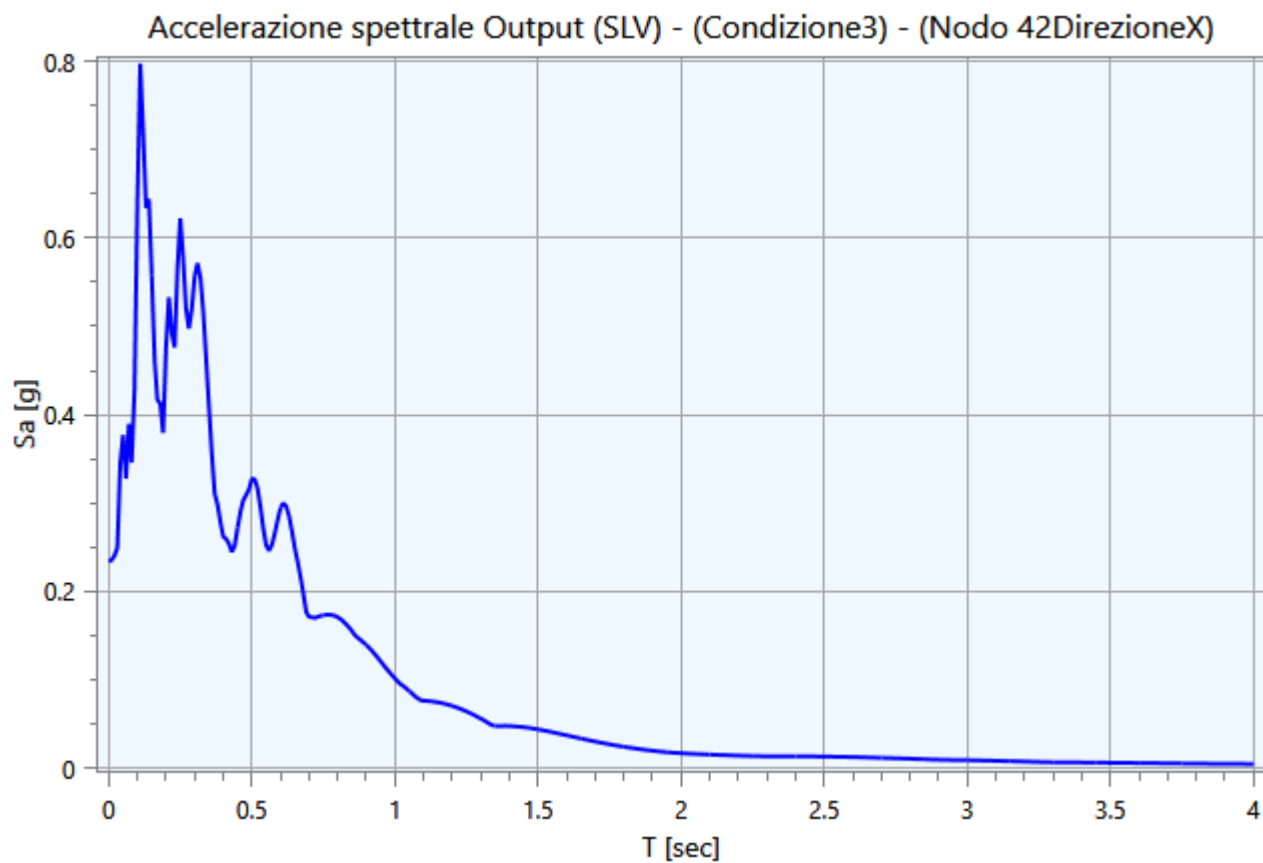


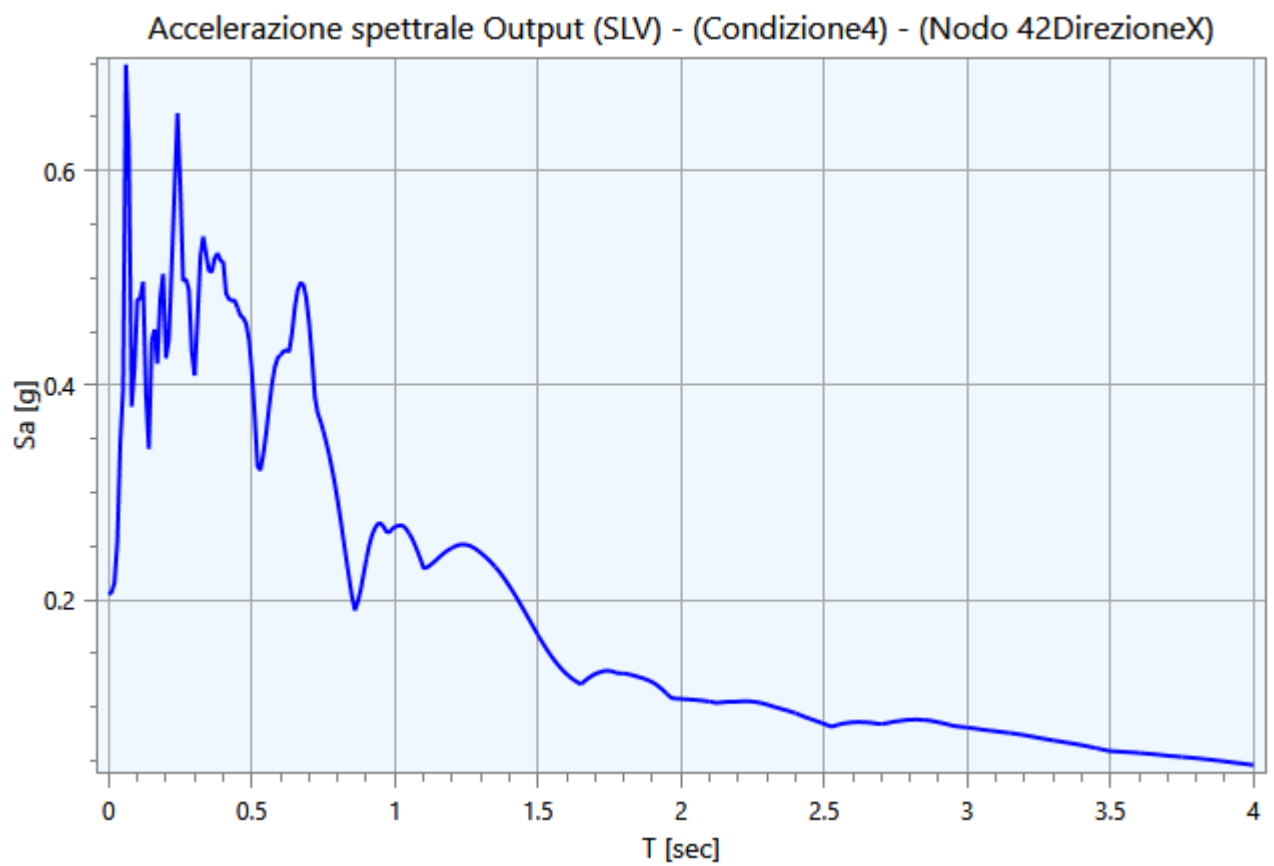
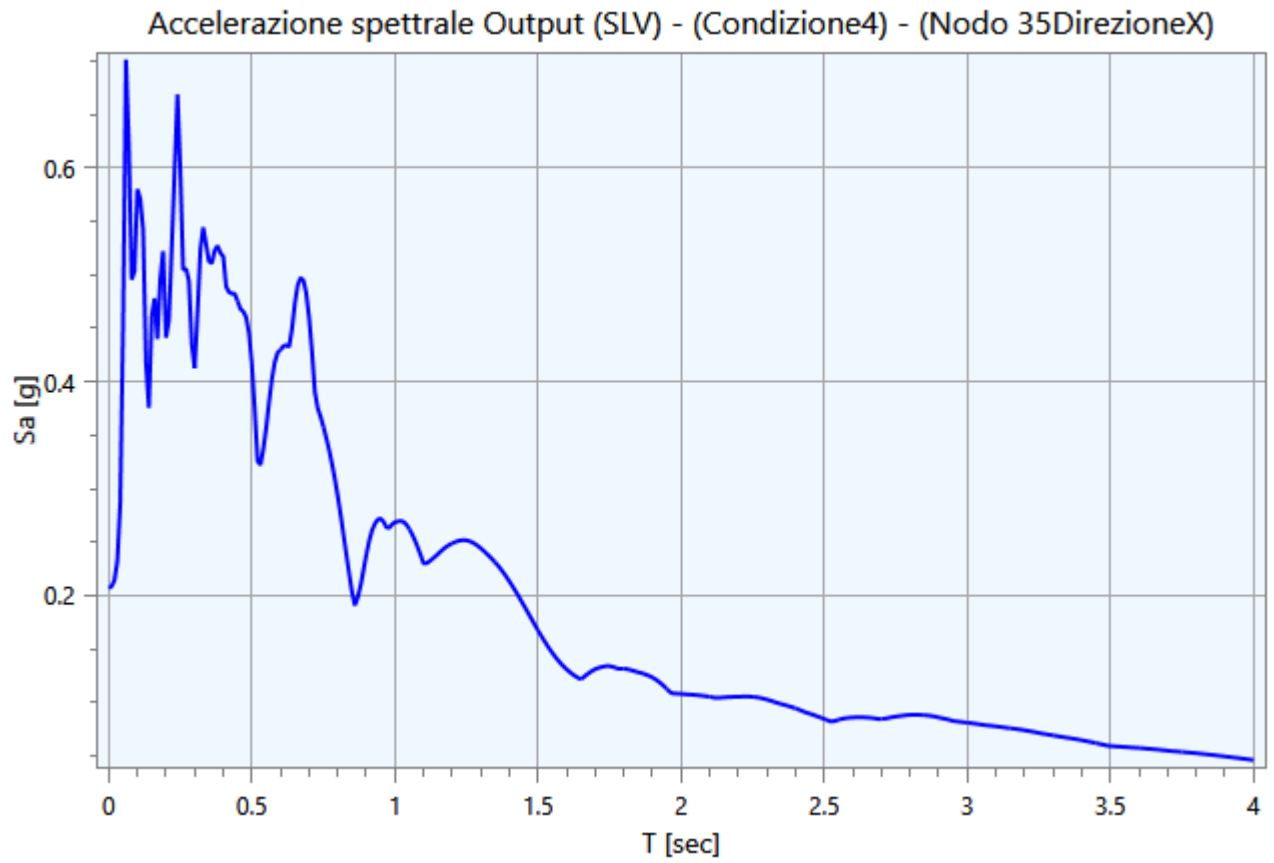


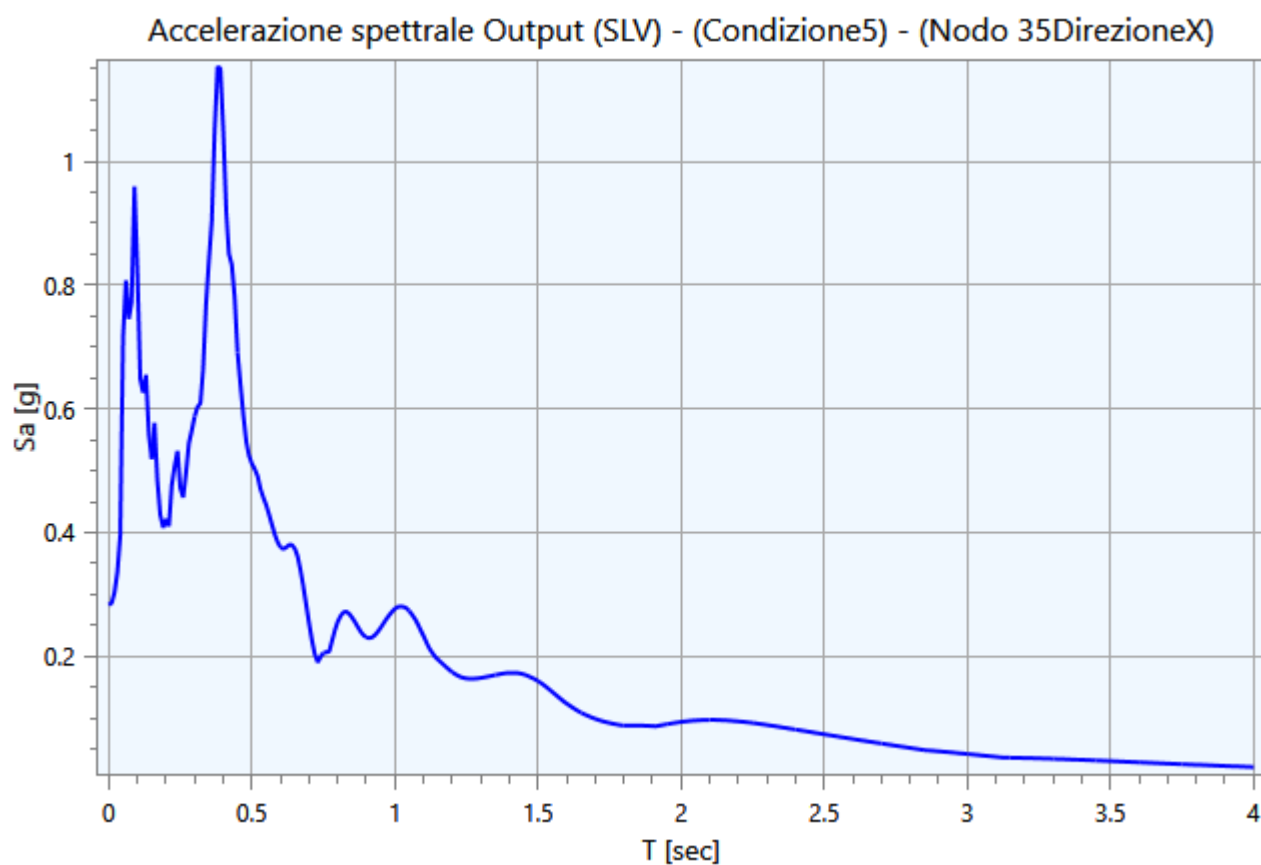
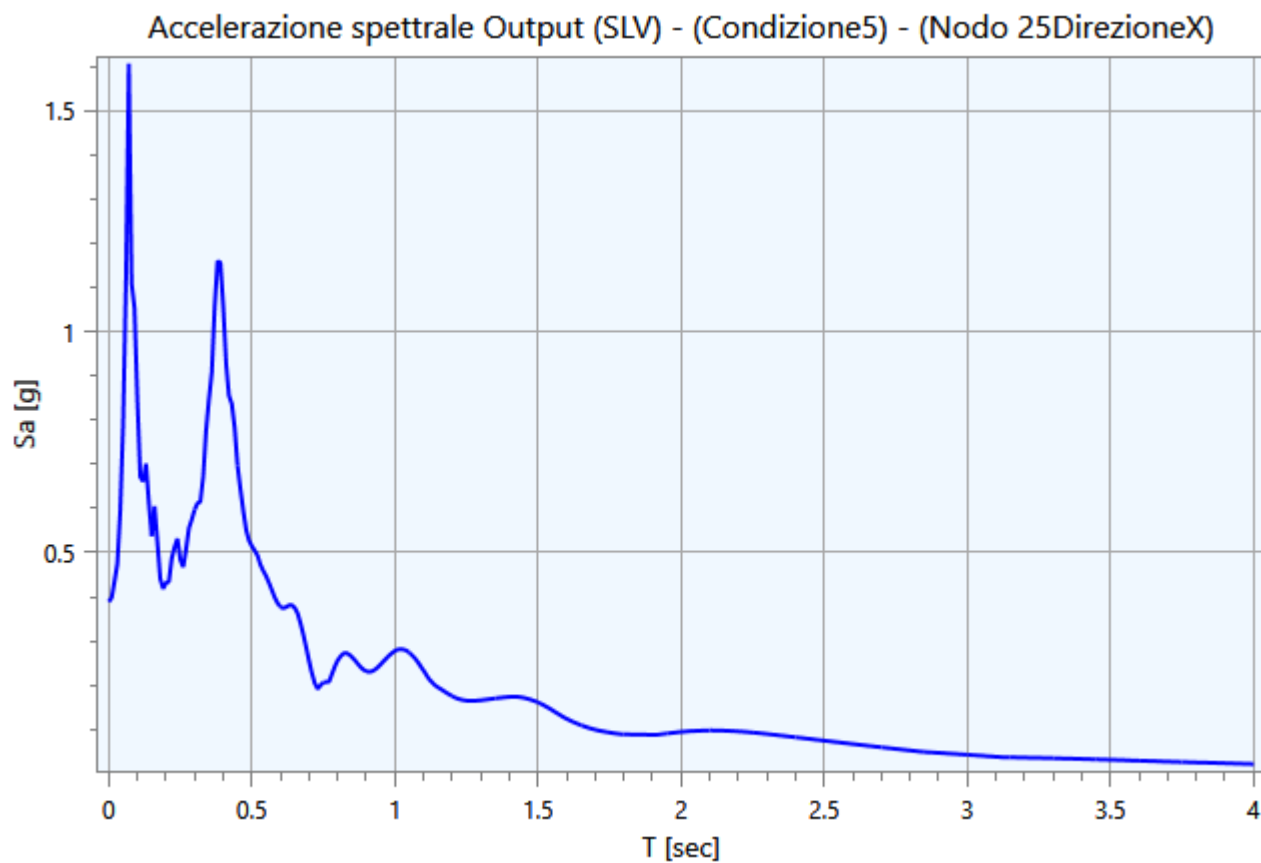


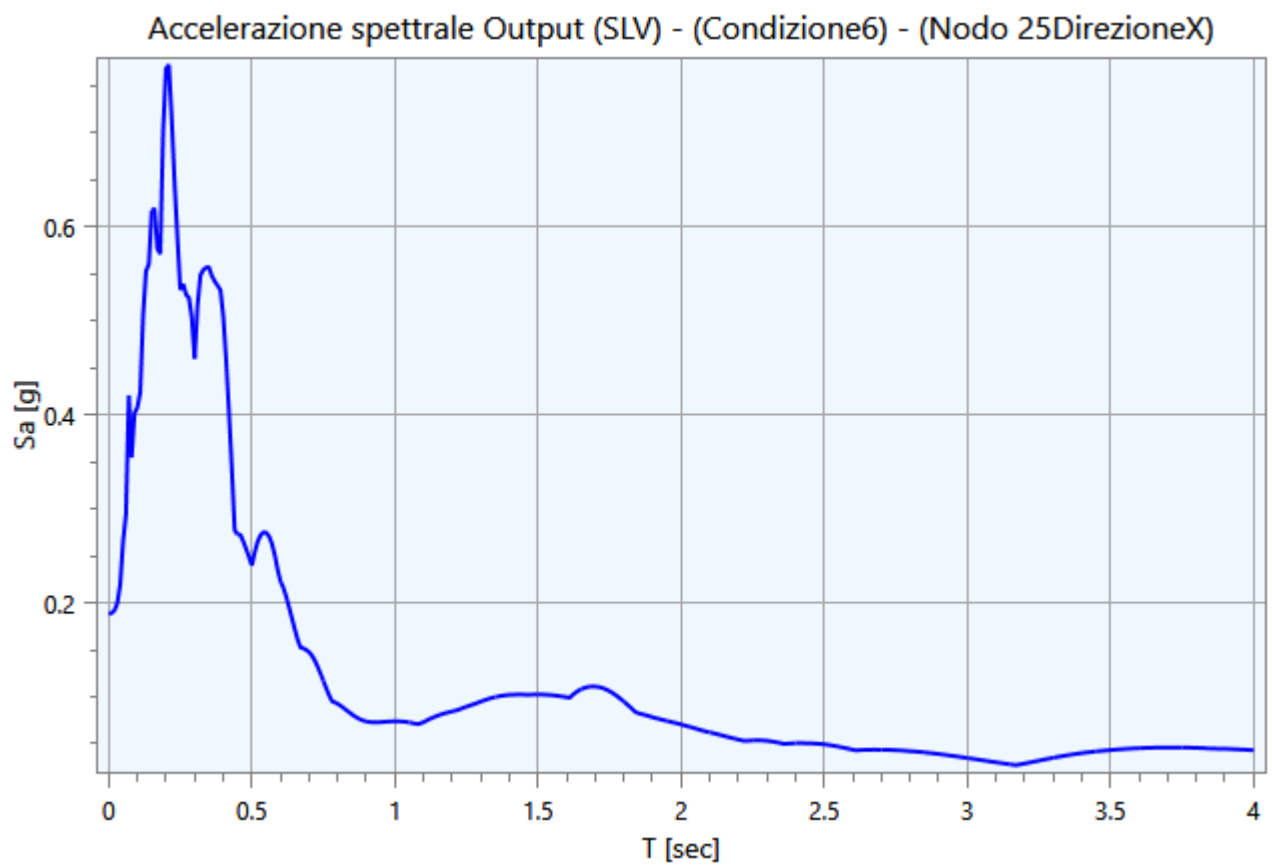
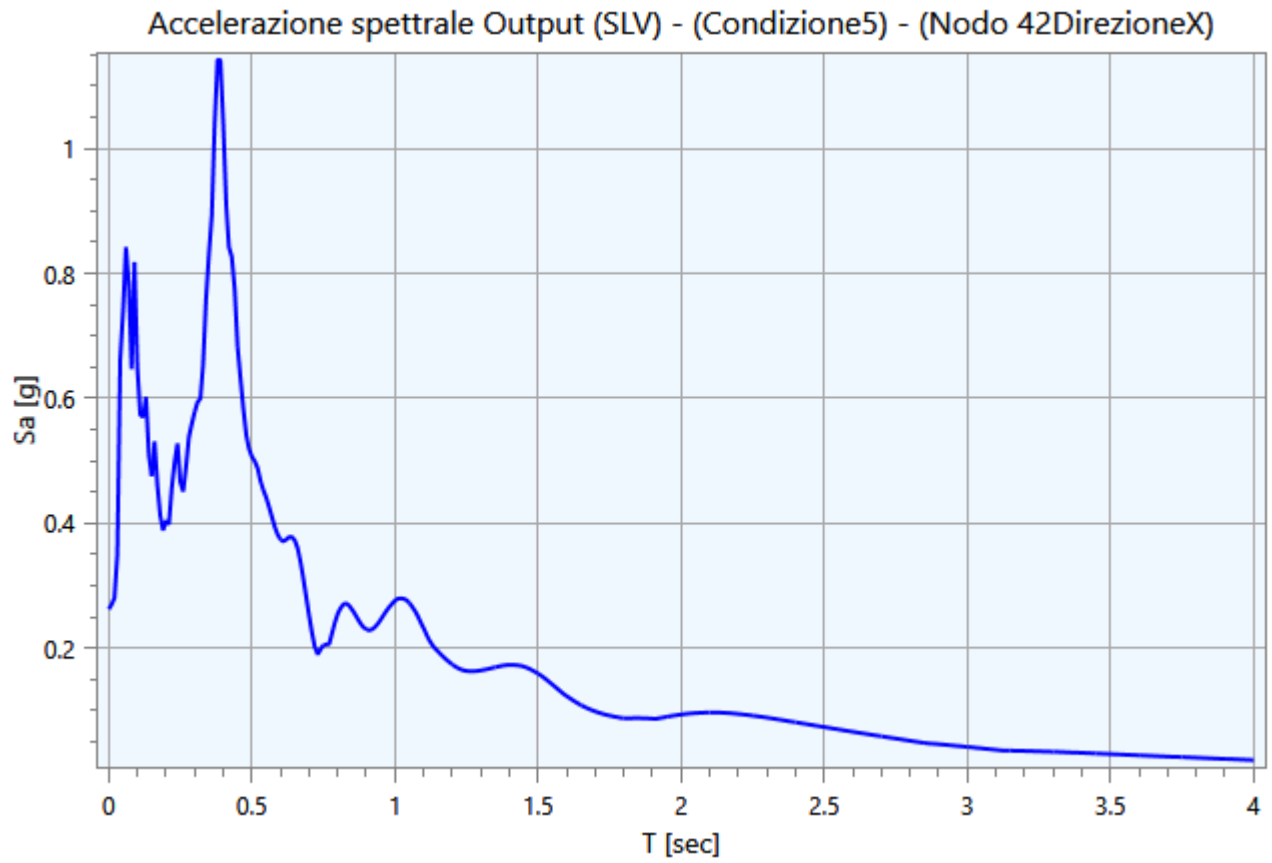


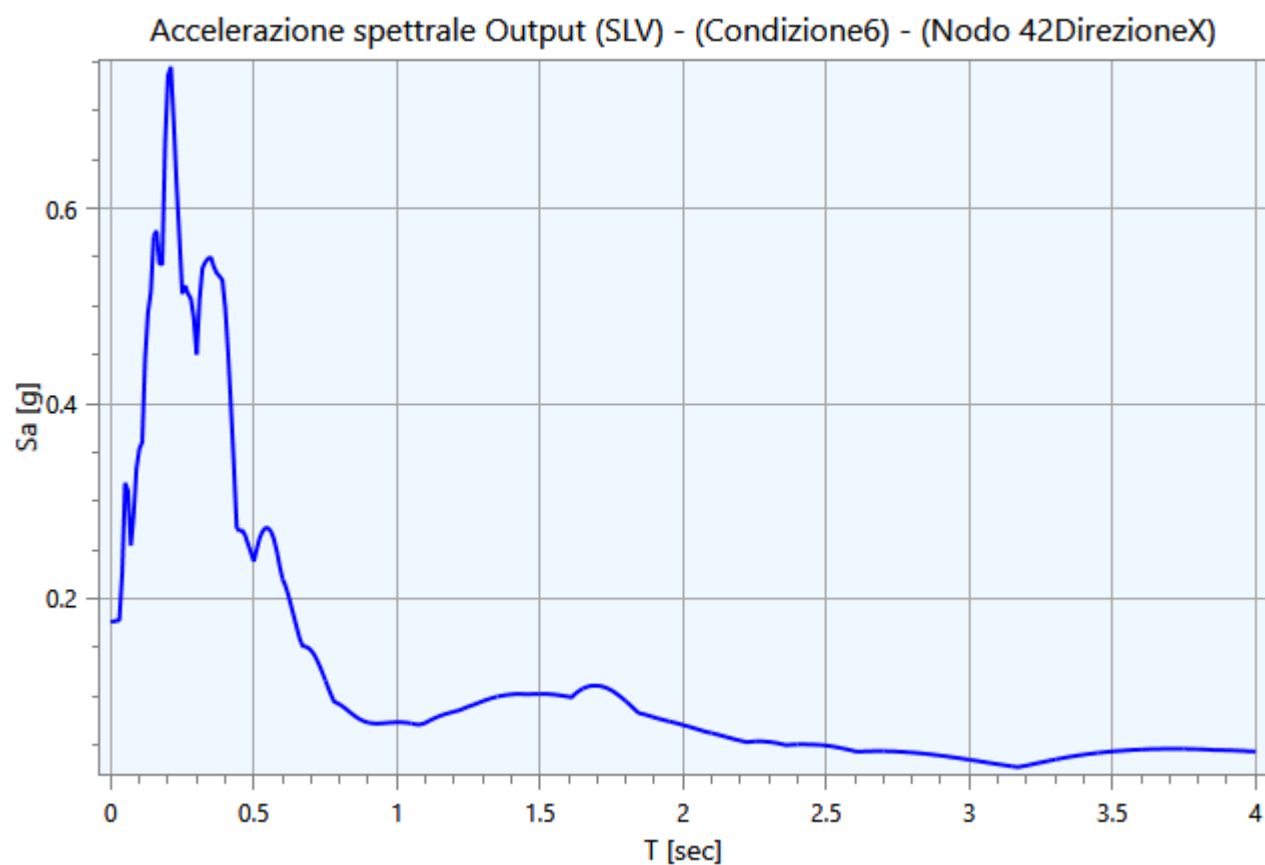
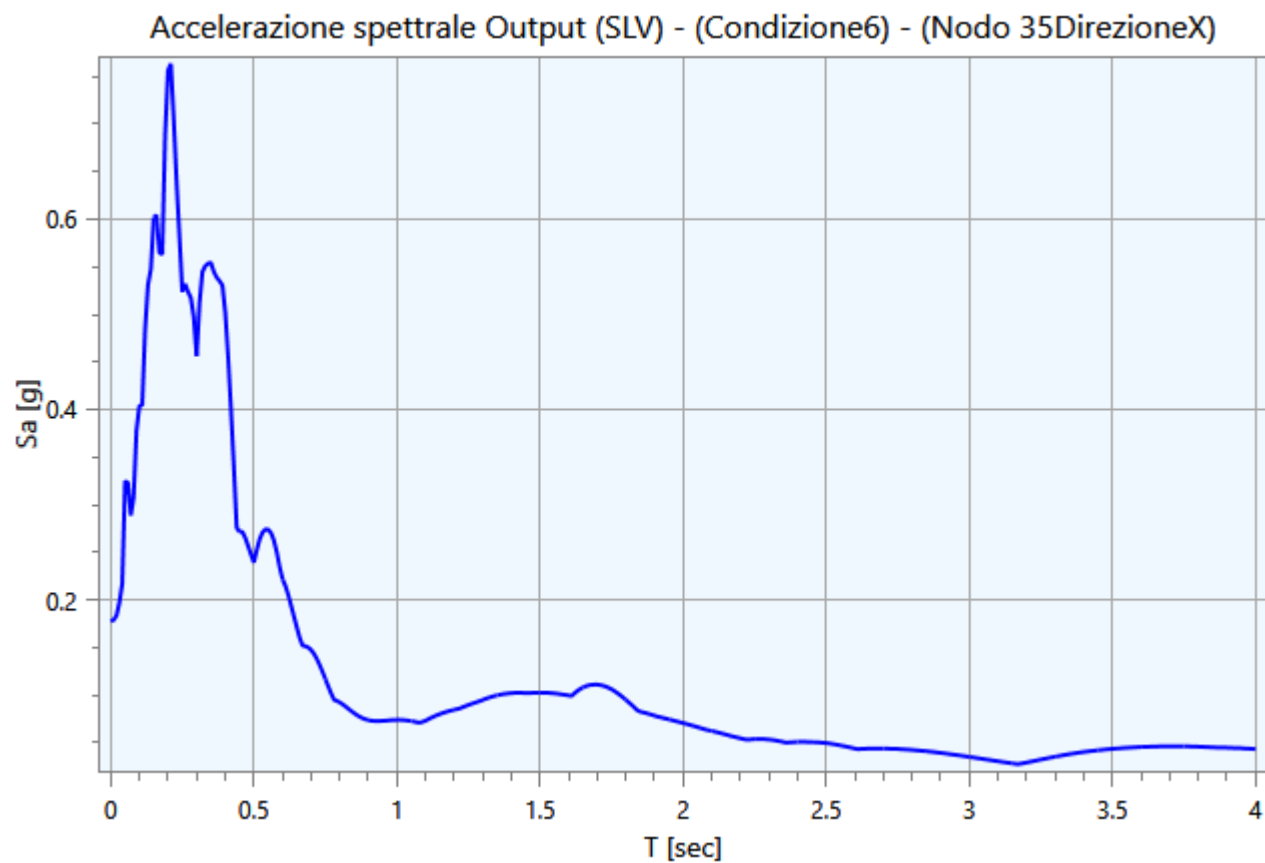


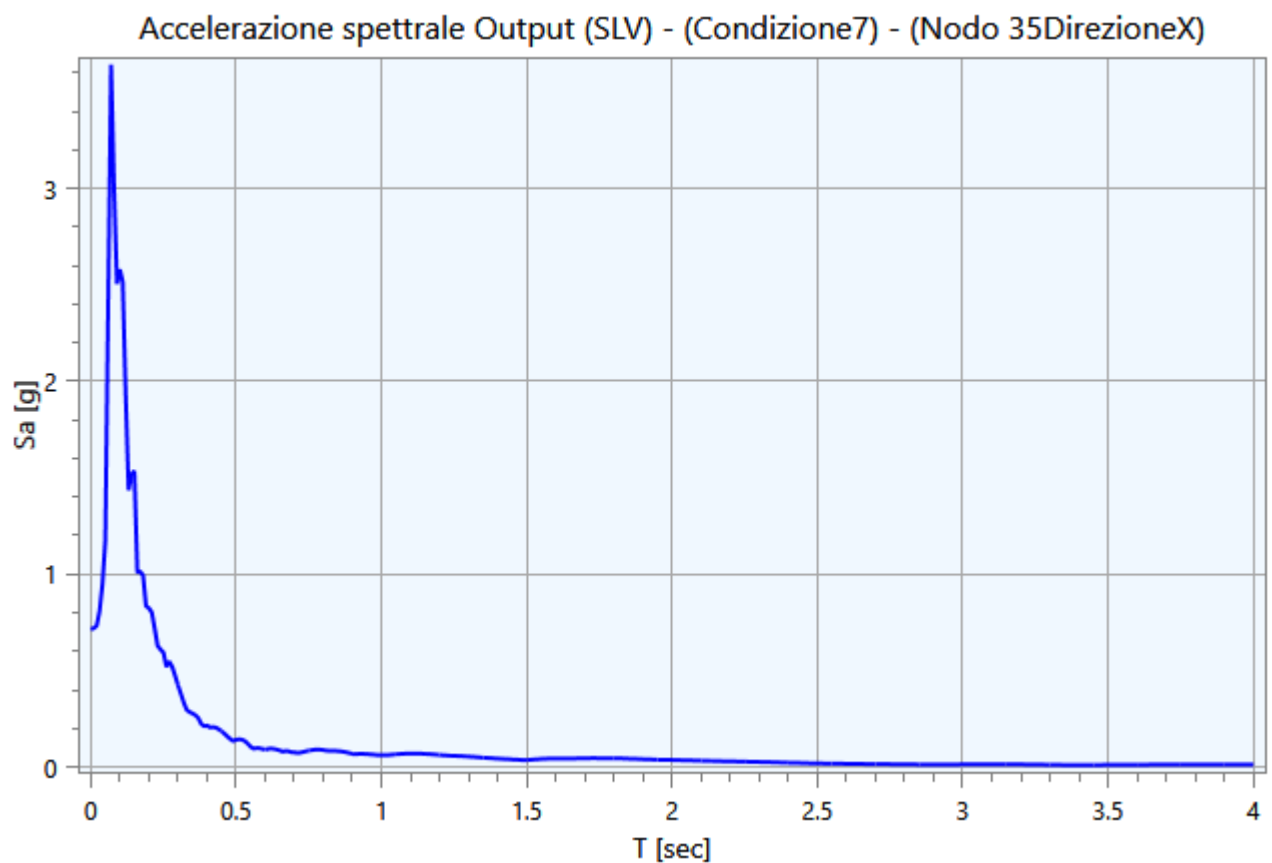
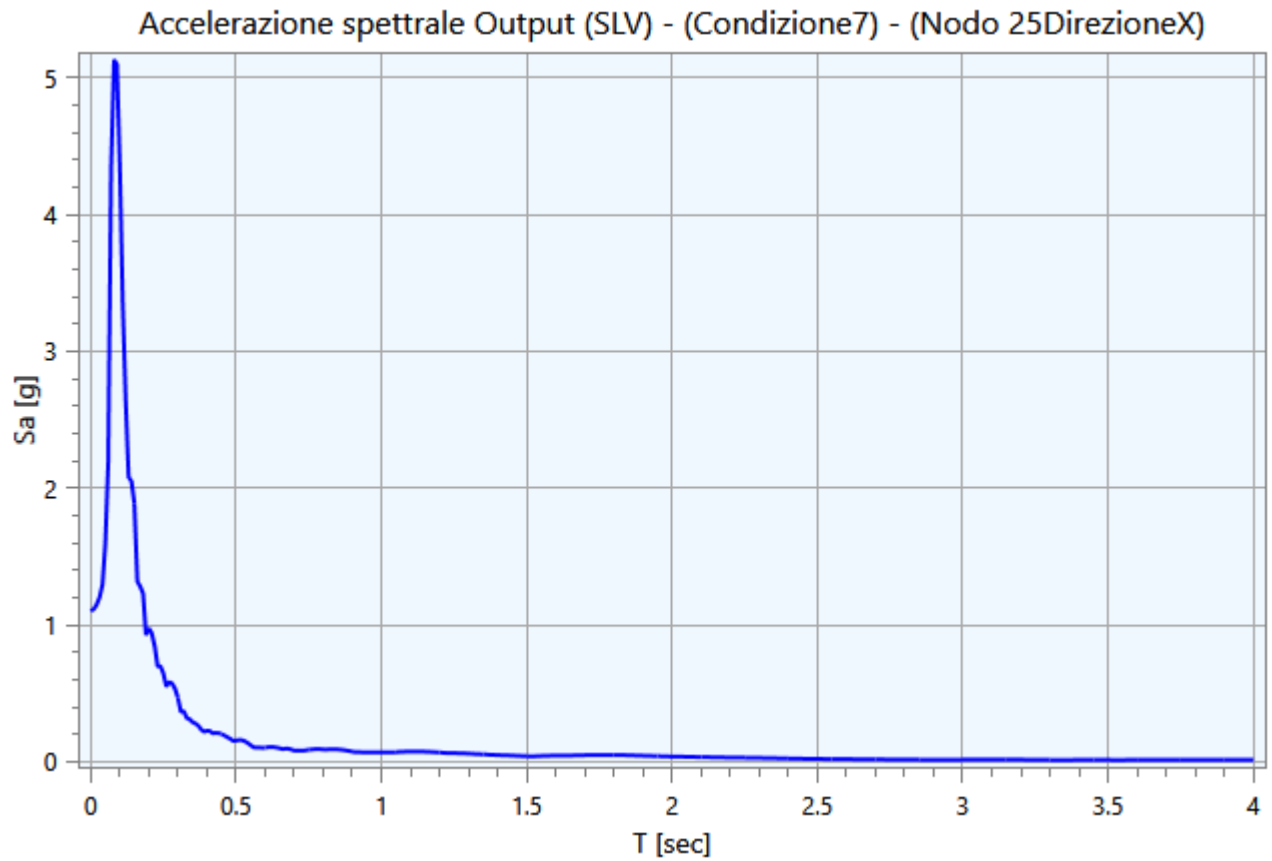




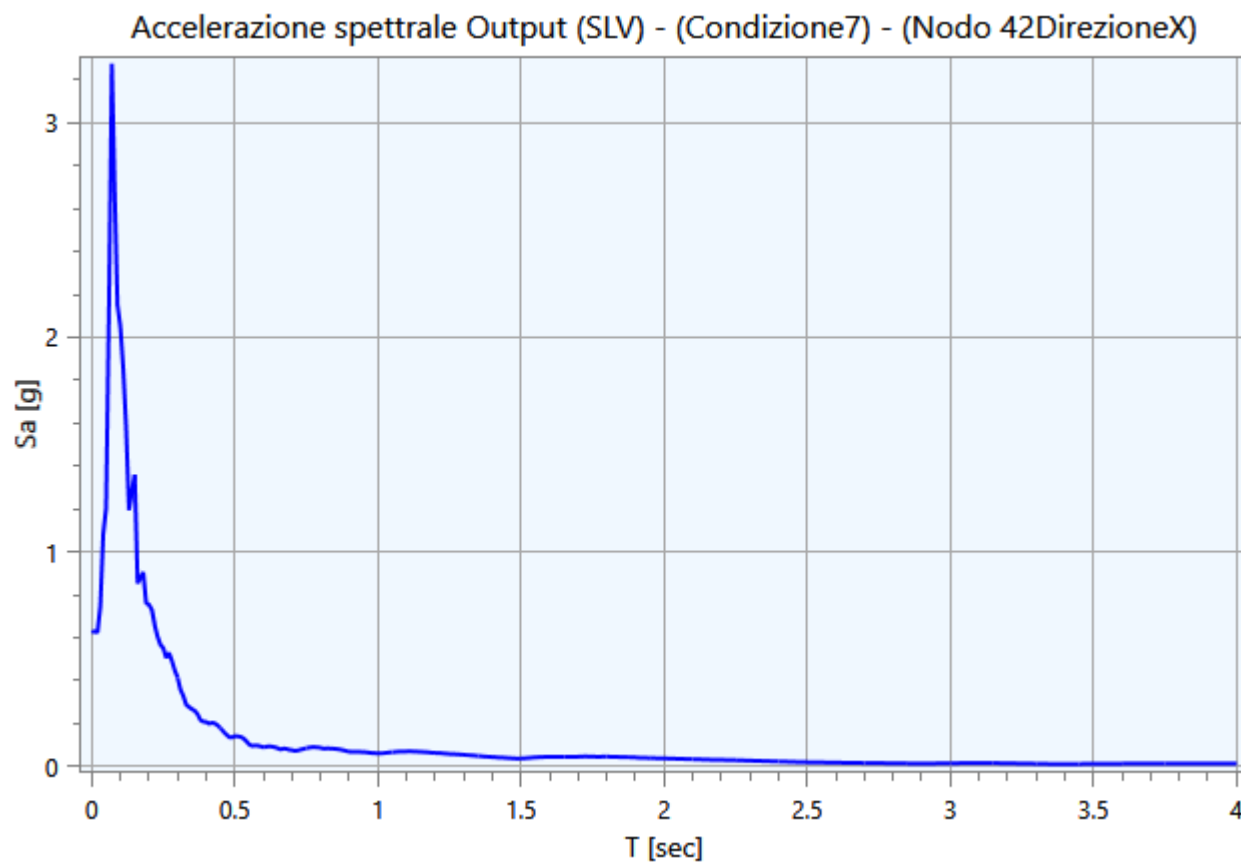






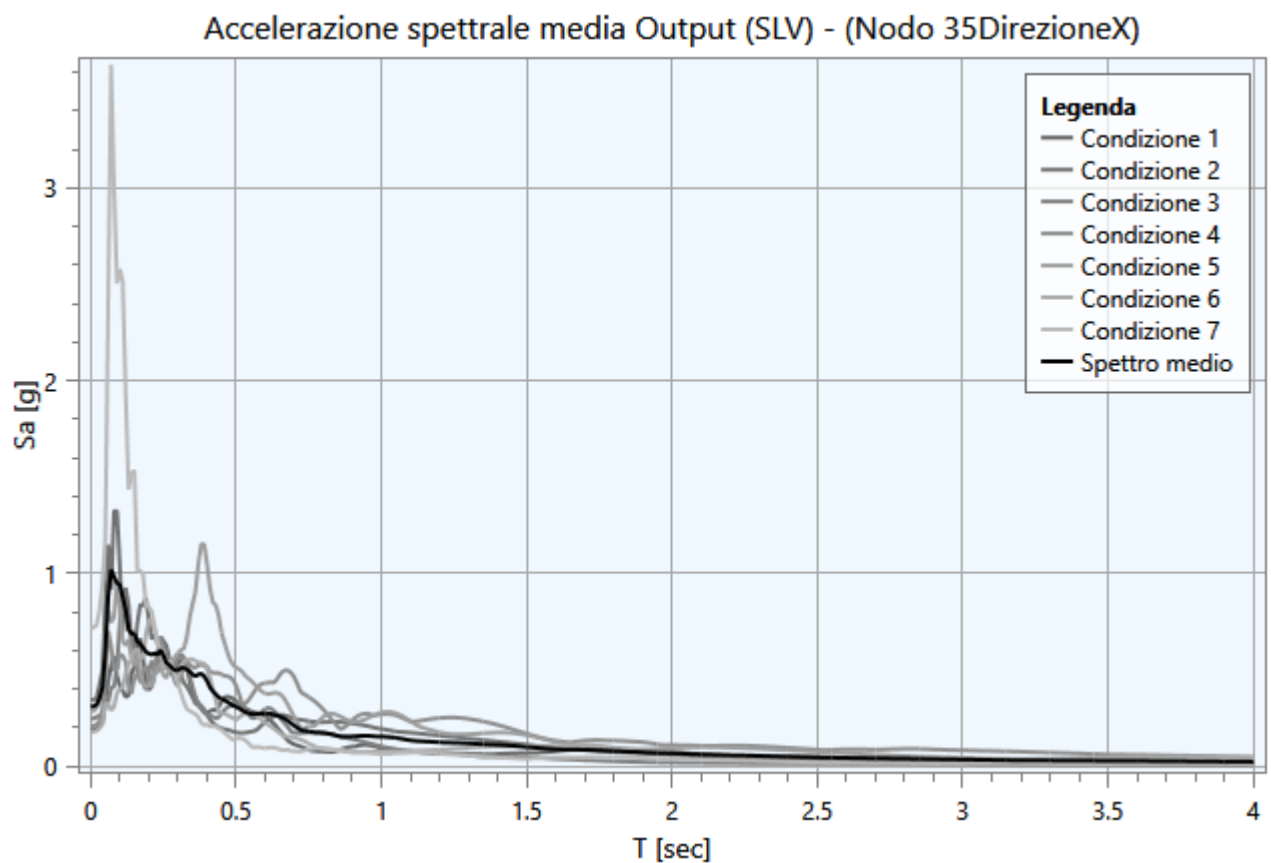
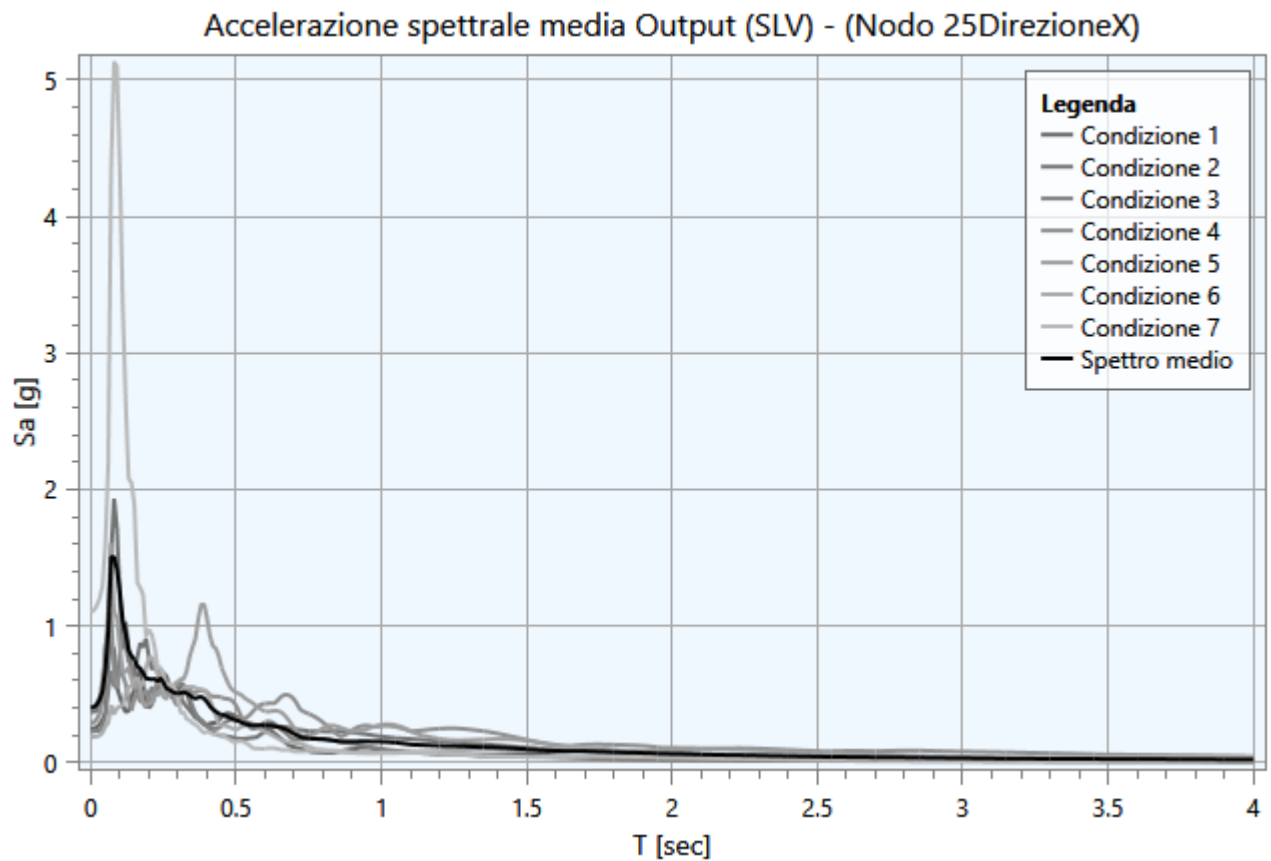


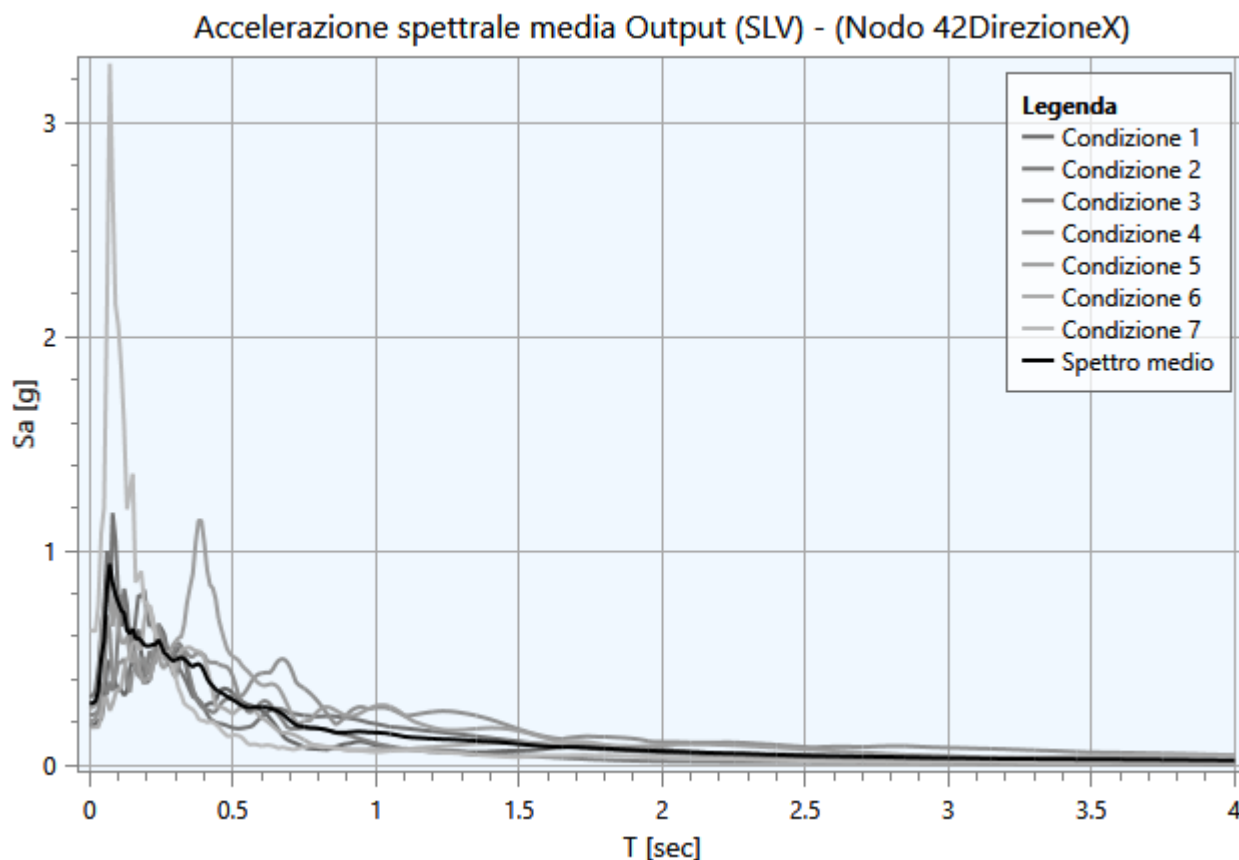




### 5.3 - Interpretazione dei risultati

Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:





#### 5.4 - Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL

La parametrizzazione degli spettri di risposta ottenuti nei vari punti di controllo viene condotta mediante la procedura suggerita dagli “Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica” (*GdL MS, 2008 – parti I e II – punto 2.5.4.3.1 pag 92*). Partendo dallo spettro di risposta medio in accelerazione rappresentativo dei 7 accelerogrammi, tale procedura prevede:

- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in accelerazione ( $TA$ );
- il calcolo del valor medio dello spettro in accelerazione ( $SA$ ) nell'intorno tra  $0.5 TA - 1.5 TA$ ;
- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in pseudovelocità ( $TV$ );
- il calcolo del valor medio dello spettro in pseudovelocità ( $SV$ ) nell'intorno tra  $0.8 TV - 1.2 TV$ ;
- il calcolo del valore di  $T_c = 2\pi \frac{SV}{SA}$ ;
- il calcolo del valore di  $T_b = 1/3 T_c$ ;
- il calcolo del valore  $T_d = 4 a_g + 1.6$  con  $a_g$  uguale al valore di accelerazione a  $T$  uguale a zero;
- l'applicazione delle equazioni riportate nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) per la determinazione dei tratti dello spettro tra  $T_0, T_b, T_c, T_d, T_4$ .

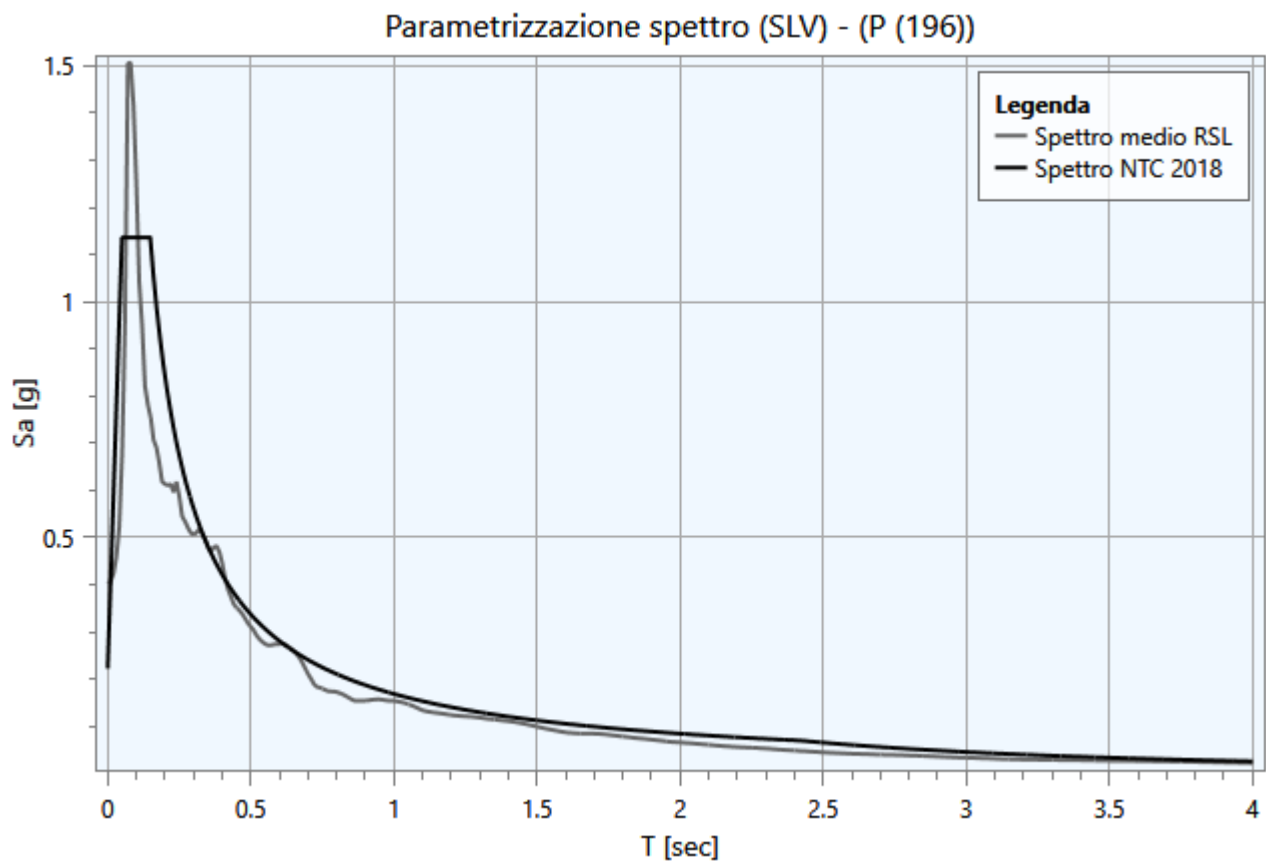
Di seguito vengono riportati, per ogni analisi, i parametri degli spettri parametrizzati per i vari punti di controllo presenti nella sezione oggetto di studio.

**SLV**

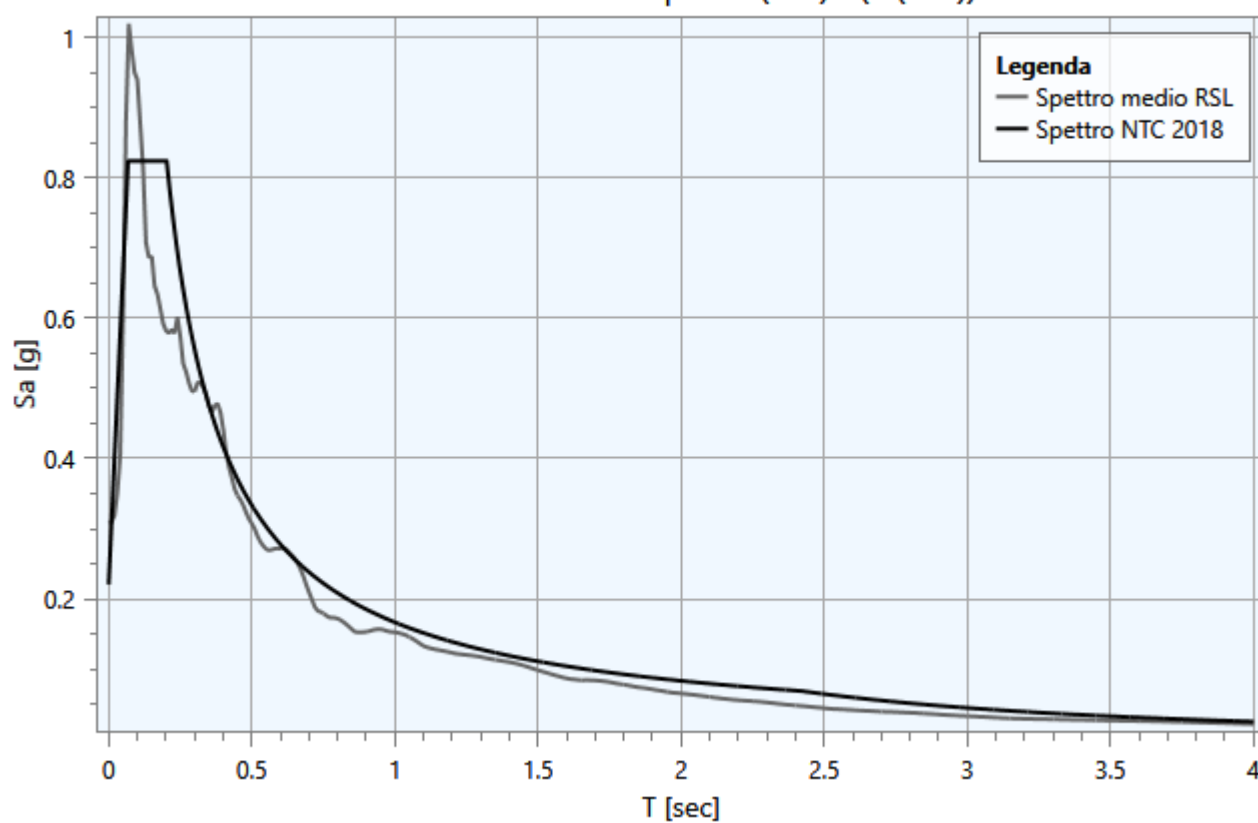
<b>Punto di controllo</b>	<b><math>A_g</math> [g]</b>	<b><math>F0</math></b>	<b><math>S</math></b>	<b><math>A_{max}</math> [g]</b>	<b><math>T_b</math> [sec]</b>	<b><math>T_c</math> [sec]</b>	<b><math>T_d</math> [sec]</b>
P (196)	0.205	5.104	1.086	0.223	0.049	0.148	2.420
P (206)	0.205	3.732	1.077	0.221	0.067	0.202	2.420
P (229)	0.205	3.426	1.063	0.218	0.074	0.221	2.420

dove:

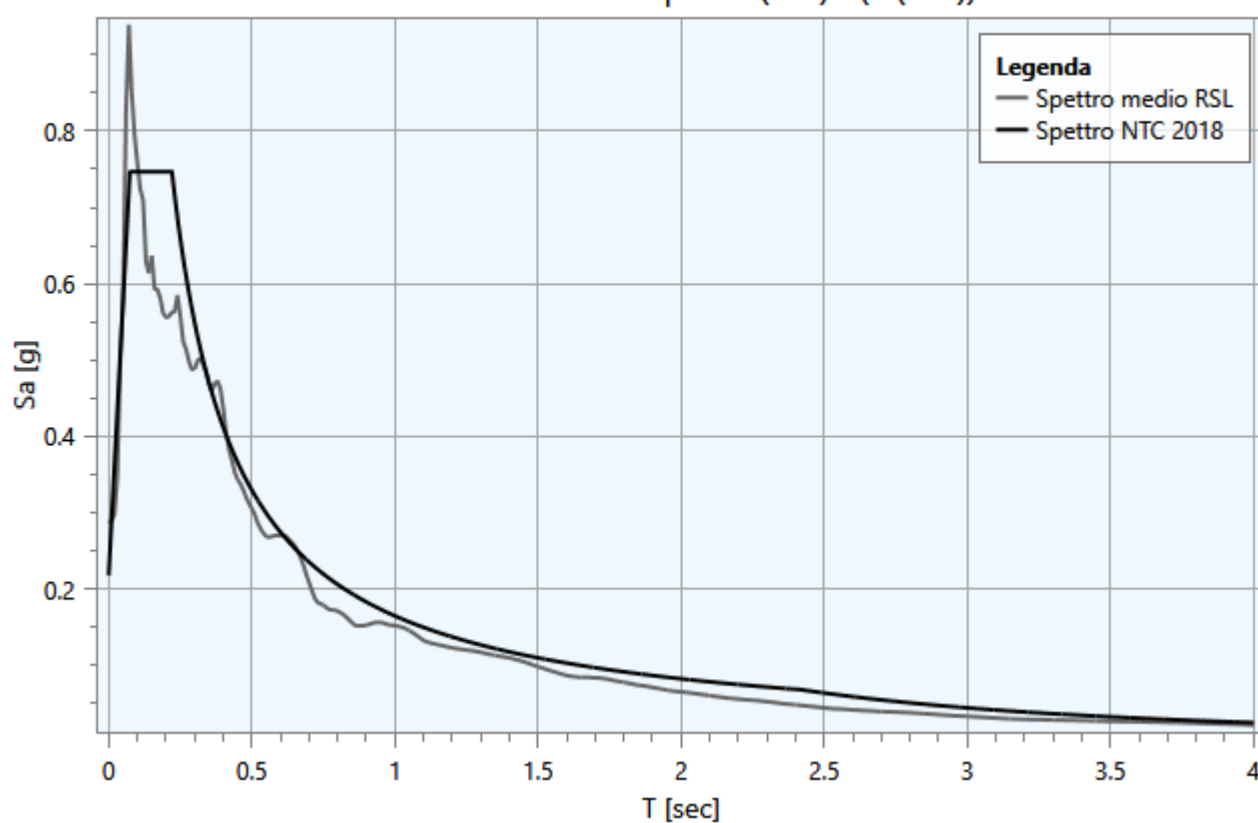
- $A_g$  : accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F0$  : valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $S$  : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- $A_{max}$  : punto di ancoraggio a  $T=0$  dello spettro di output;
- $T_b$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- $T_c$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- $T_d$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.



Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (206))



Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (229))



**Analisi di stabilità dei pendii con : JANBU (1967) - SEZIONE CC' - CONDIZIONI STATICHE**

Calcolo eseguito secondo	NTC 2018
Numero di strati	2.0
Numero dei conci	10.0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1.1
Coefficiente parziale resistenza	1.1
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	2891.83 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	1579.62 m
Ascissa vertice destro superiore xs	2918.34 m
Ordinata vertice destro superiore ys	1592.97 m
Passo di ricerca	10.0
Numero di celle lungo x	10.0
Numero di celle lungo y	10.0

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	2798.84	1538.26
2	2810.32	1540.26
3	2819.25	1542.26
4	2833.42	1544.26
5	2852.22	1548.26
6	2857.43	1550.26
7	2863.24	1552.26
8	2870.84	1554.26
9	2880.53	1556.26
10	2900.01	1558.26
11	2909.44	1562.26
12	2913.84	1564.26
13	2920.71	1568.26
14	2929.55	1570.26
15	2979.2	1571.52
16	2986.35	1571.7

**Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	2798.84	1535.13
2	2812.0	1537.3
3	2847.39	1543.74
4	2857.24	1546.71
5	2860.17	1547.99
6	2861.94	1548.83
7	2862.88	1549.88

8	2867.99	1550.95
9	2871.66	1552.2
10	2898.61	1555.82
11	2903.51	1556.78
12	2912.44	1560.4
13	2917.43	1562.87
14	2923.36	1565.32
15	2935.08	1566.86
16	2955.95	1567.12
17	2969.87	1567.93
18	2975.94	1569.1
19	2986.35	1571.1

#### Coefficienti parziali azioni

Sfavorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0
Favorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0

#### Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Tangente angolo di resistenza al taglio	1.25
Coesione efficace	1.25
Coesione non drenata	1.4
Riduzione parametri geotecnici terreno	Si

#### Stratigrafia

Strato	Coesione (kg/cm2)	Coesione non drenata (kg/cm2)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (kN/m3)	Peso saturo (kN/m3)	Litologia	
1	0.05		28	19.90	22	fq	
2	0.4		31	20	22.60	LPS	

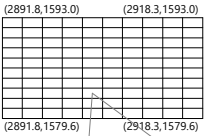
# Risultati analisi pendio [A2+M2+R2]

Fs minimo individuato	1.06
Ascissa centro superficie	2903.76 m
Ordinata centro superficie	1582.95 m
Raggio superficie	23.95 m

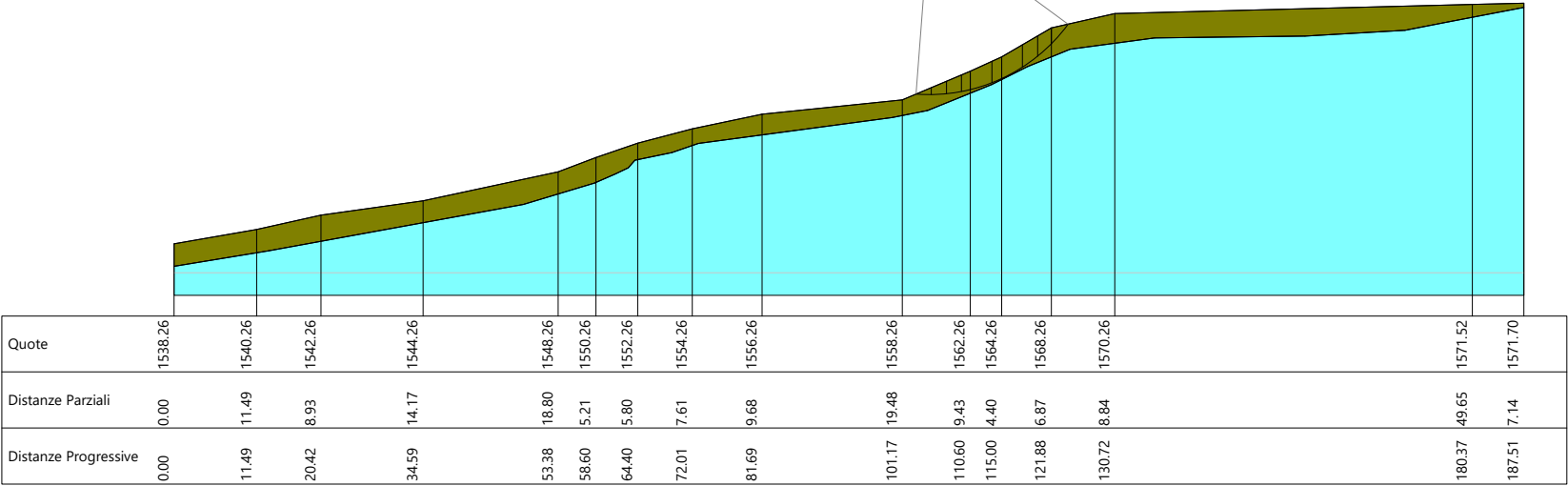
$x_c = 2903.756$   $y_c = 1582.954$   $R_c = 23.954$   $F_s = 1.062$

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)	Kh•Wi (Kg)	Kv•Wi (Kg)	c (kg/cm2)	Fi (°)	Ui (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)
1	2.11	-1.4	2.12	103.38	0.0	0.0	0.04	23.0	0.0	2140.9	1503.1
2	2.11	3.4	2.15	874.82	0.0	0.0	0.04	23.0	0.0	5718.3	2811.0
3	2.11	8.0	2.18	833.71	0.0	0.0	0.04	23.0	0.0	8389.9	3821.3
4	1.19	12.1	1.25	967.86	0.0	0.0	0.04	23.0	0.0	5577.9	2504.3
5	3.03	17.5	3.21	7400.26	0.0	0.0	0.04	23.0	0.01	6059.1	7269.7
6	1.37	23.8	1.58	391.22	0.0	0.0	0.04	23.0	0.0	7708.1	3624.9
7	2.86	28.5	3.31	8143.41	0.0	0.0	0.04	23.0	0.01	6733.6	8199.6
8	2.11	35.9	2.61	2911.81	0.0	0.0	0.04	23.0	0.01	2103.1	6539.1
9	1.9	41.9	2.6	9910.8	0.0	0.0	0.04	23.0	0.0	9445.4	5797.5
10	2.32	49.8	3.65	835.56	0.0	0.0	0.04	23.0	0.0	5300.9	4896.5



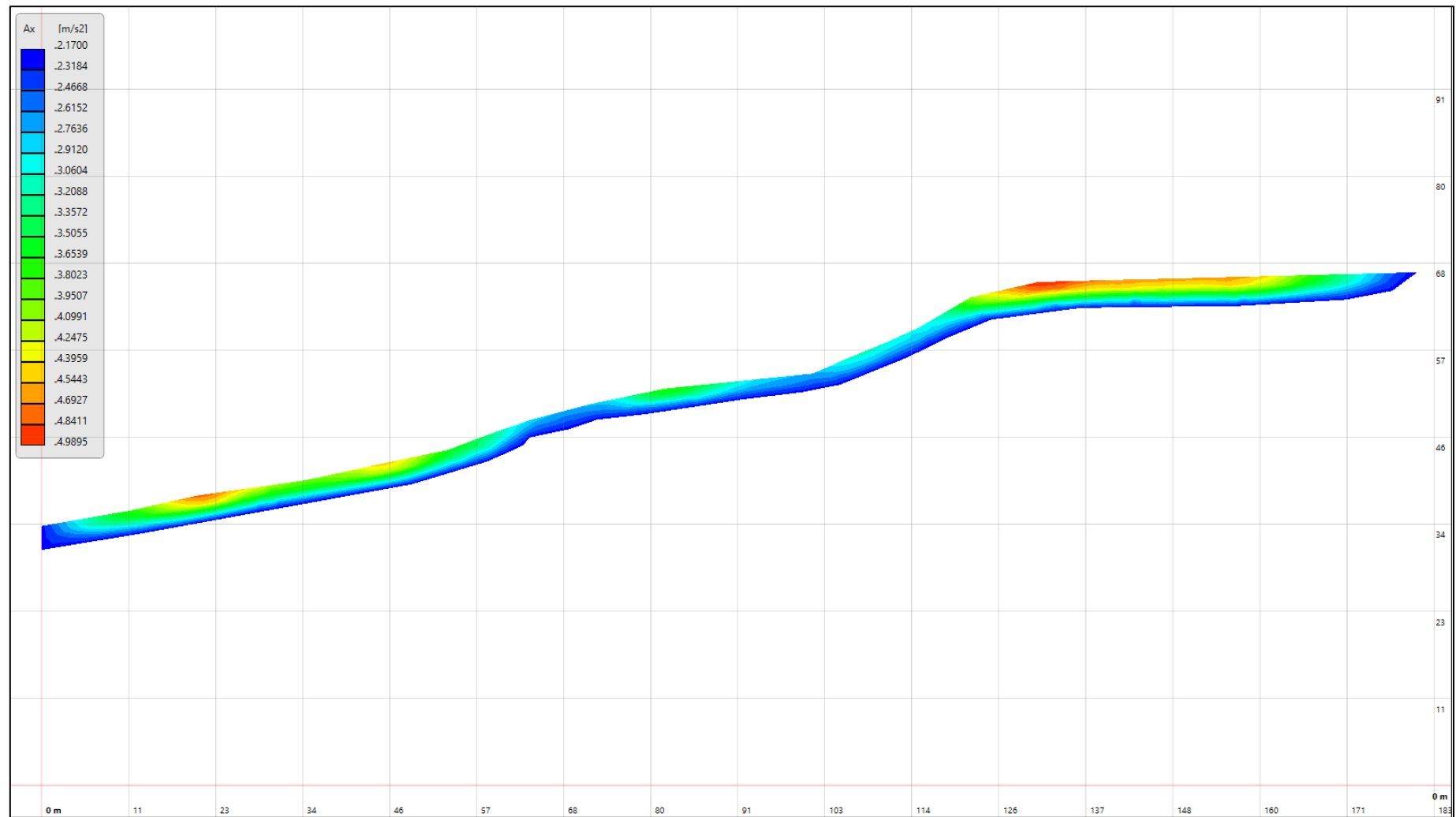


xc=2903.76 yc=1582.95 Rc=23.95 Fs=1.06

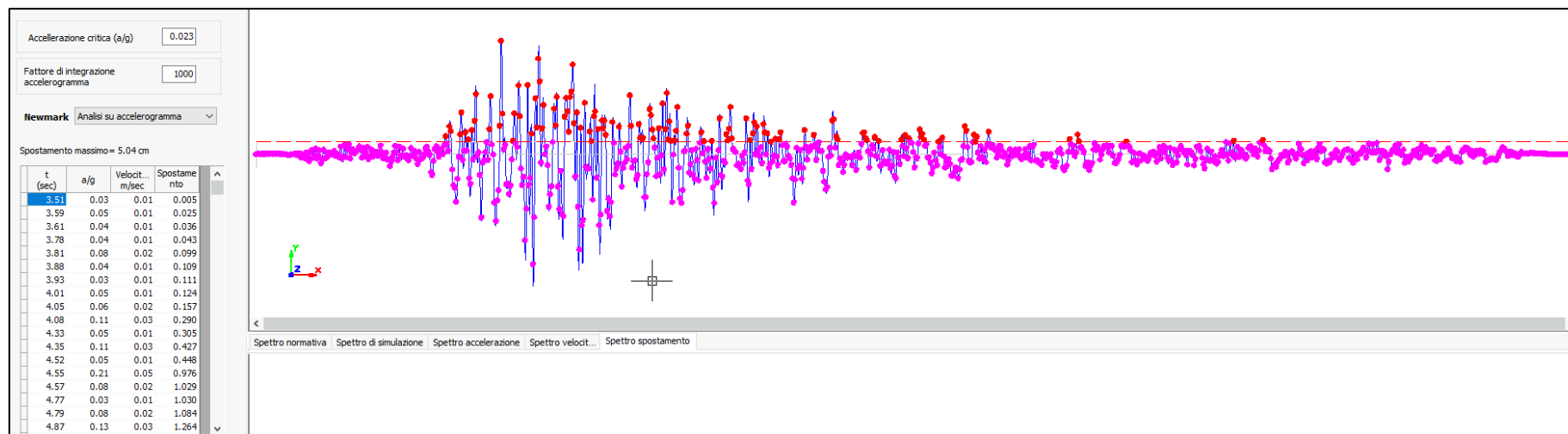


- fq  
g=19.90 kN/m3  
gs=22 kN/m3  
Fi=28°
- LPS  
g=20 kN/m3  
gs=22.60 kN/m3  
Fi=31°

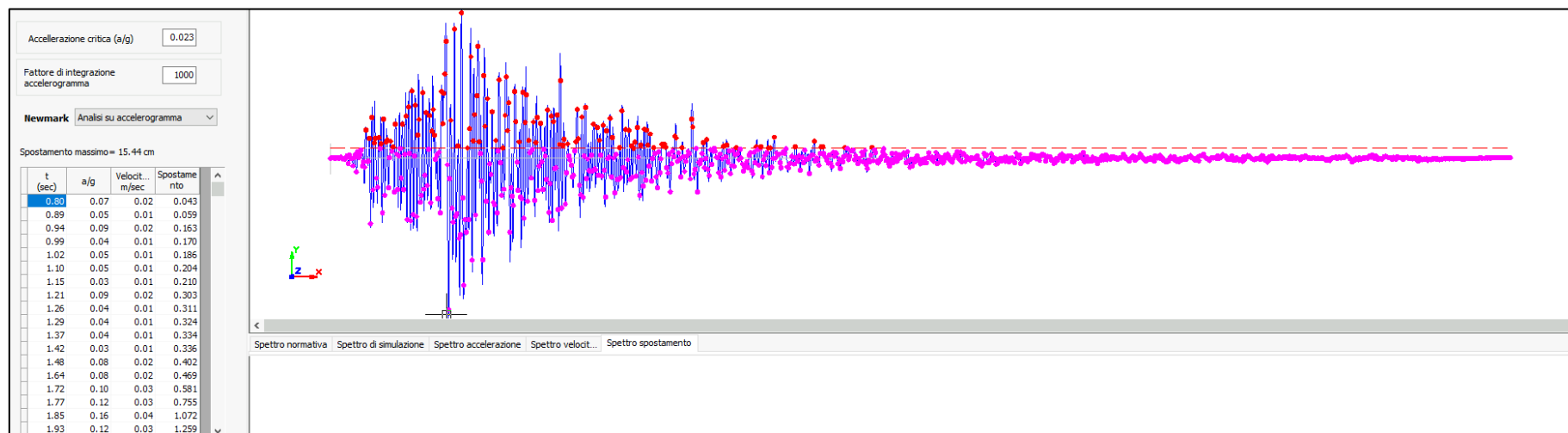
### Accelerazione massima calcolata da analisi bidimensionale (RSL2D) – Sezione CC' Chiuse della Verna



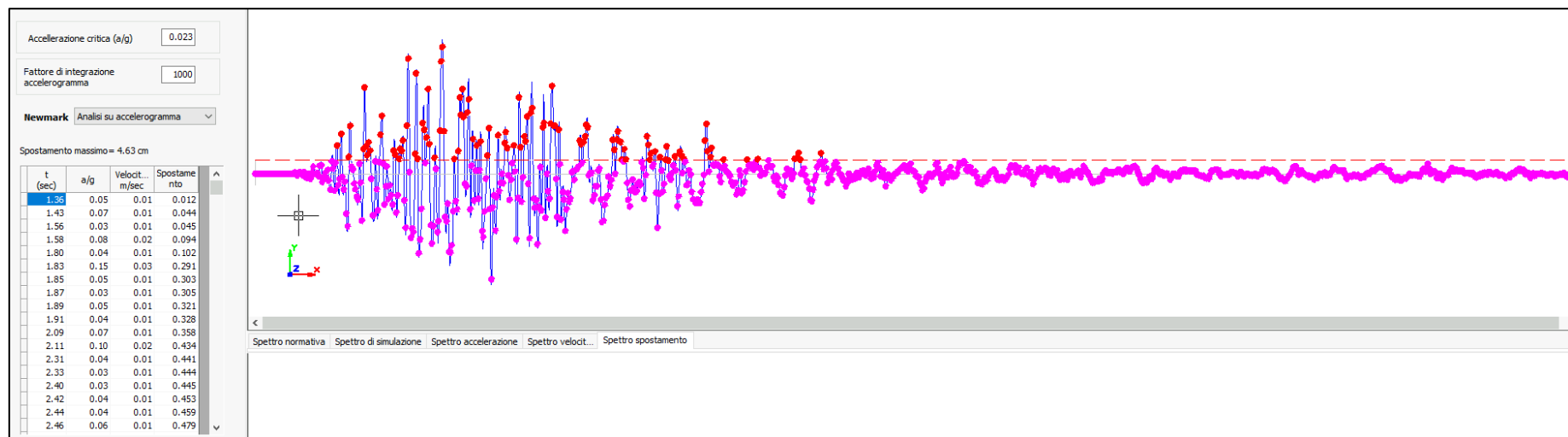
## Analisi su accelerogramma 1 e spostamento risultante



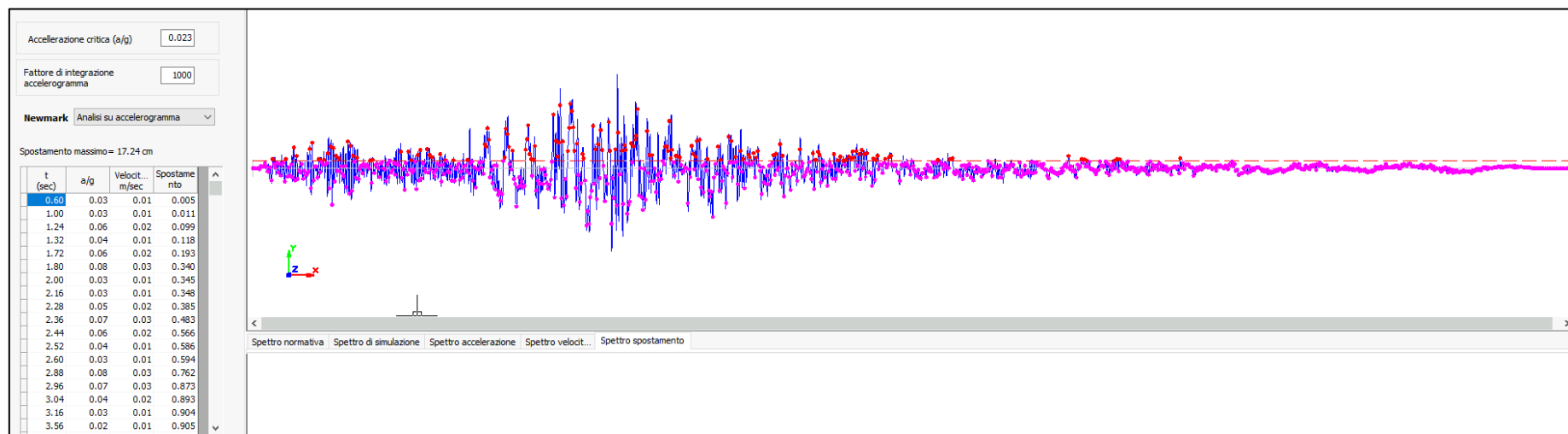
## Analisi su accelerogramma 2 e spostamento risultante



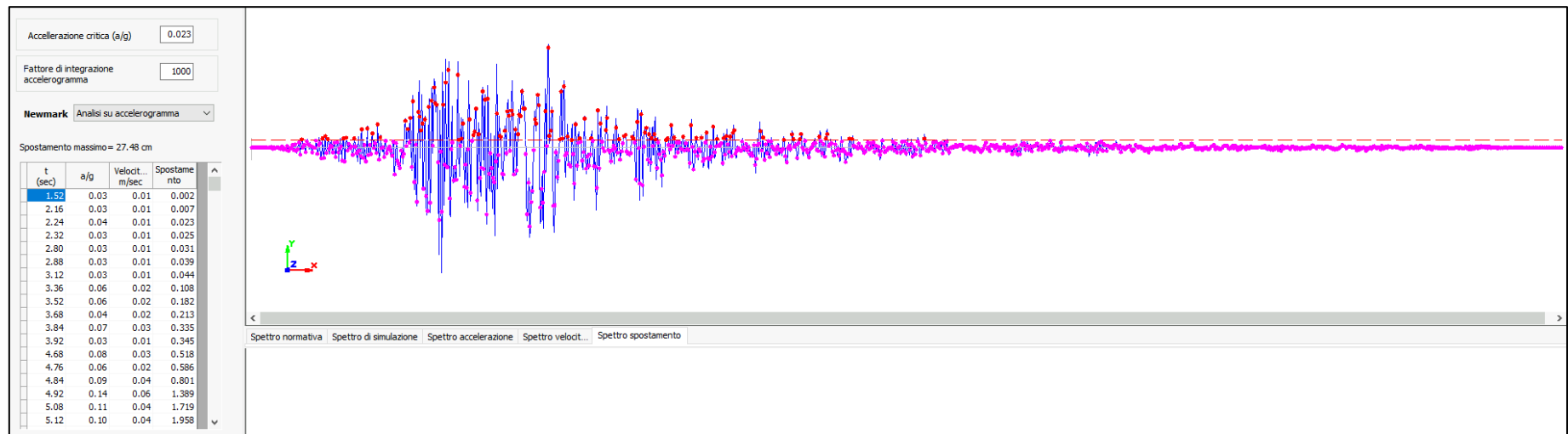
## Analisi su accelerogramma 3 e spostamento risultante



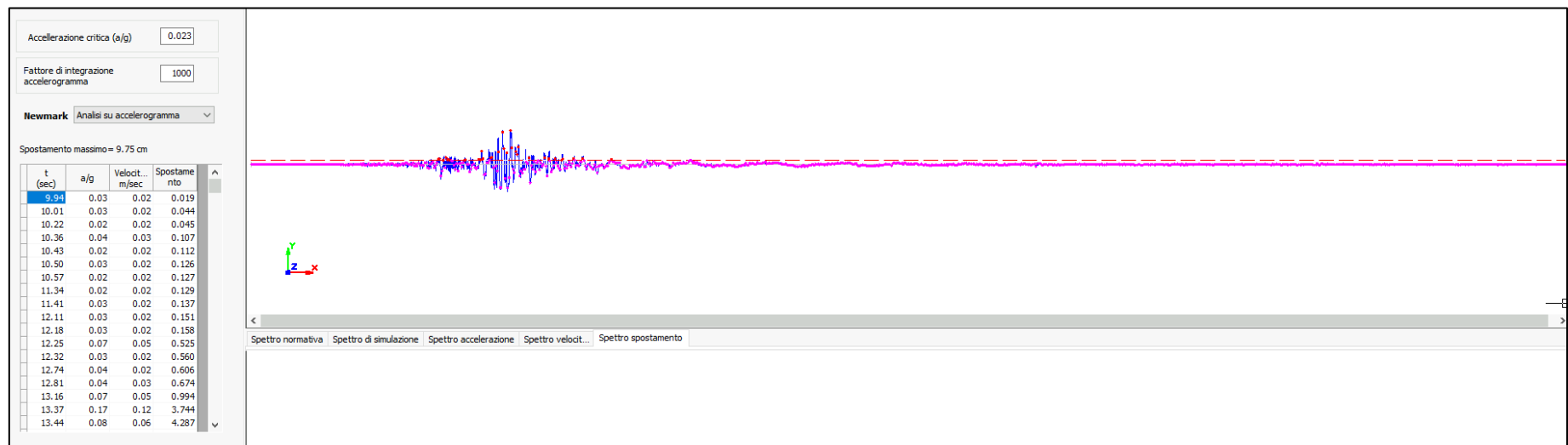
## Analisi su accelerogramma 4 e spostamento risultante



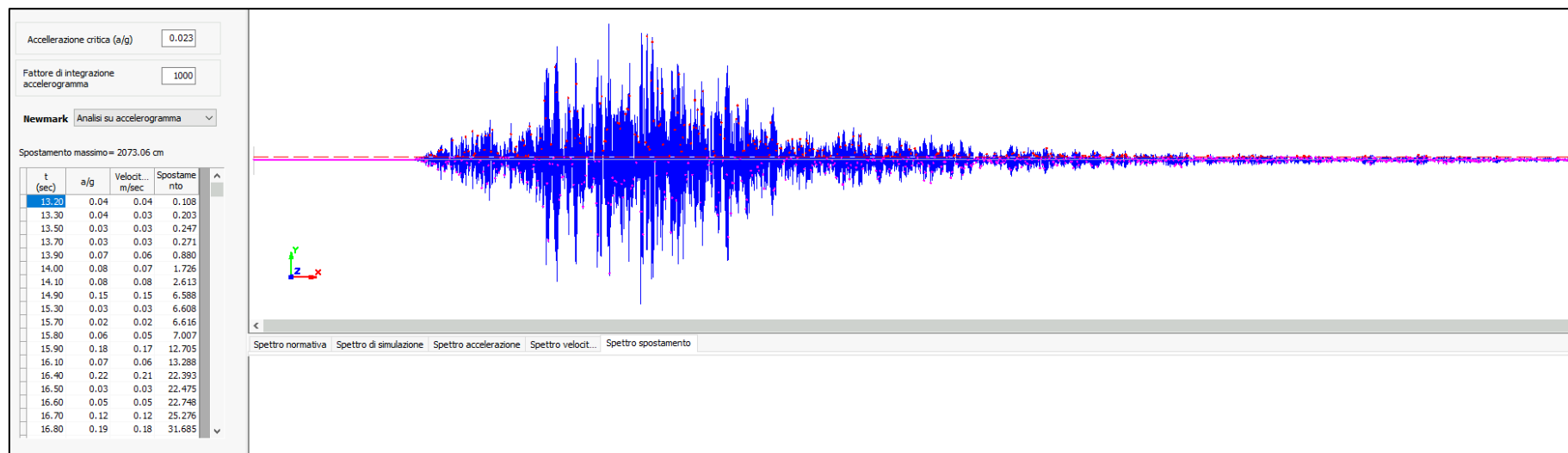
## Analisi su accelerogramma 5 e spostamento risultante



## Analisi su accelerogramma 6 e spostamento risultante



## Analisi su accelerogramma 7 e spostamento risultante



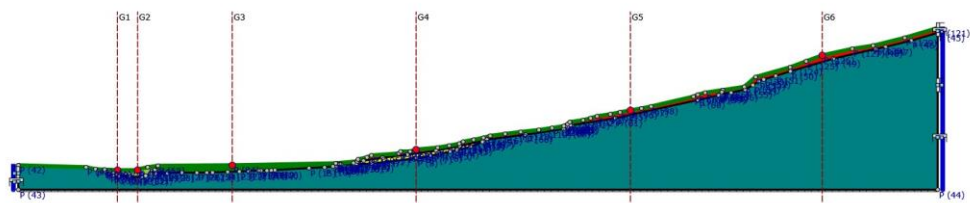
## **ALLEGATO B – Report RSL2D sezione GG '\_Chiusi della Verna - Corsalone e analisi dinamica frana**

- ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE
- VERIFICA DI STABILITA' IN CONDIZIONI STATICHE
- ESTRATTI DI ANALISI DINAMICA DELLO SPOSTAMENTO SISMOINDOTTO

Ubicazione sito: Corsalone - Sezione\_GG

RELAZIONE DI CALCOLO

ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE



Oggetto: MS3\_Comune di Chiusi della Verna





## Sommario

1 - Introduzione.....	2
1.1 - Impostazione del Problema di Calcolo dell'Amplificazione Locale .....	5
1.2 - Normativa di Riferimento .....	6
2 - Risposta Sismica Locale .....	7
3 - Metodo di calcolo adottato e descrizione del codice di calcolo LSR 2D .....	8
3.1 - Metodo lineare equivalente .....	8
3.2 - Soluzione alla singola iterazione mediante FEM .....	10
Smorzamento .....	11
Free-field boundaries .....	11
3.3 - Procedimento iterativo .....	12
3.4 - Interpretazione dei risultati.....	12
4 - Input .....	14
4.1 - Curve di Decadimento dei Materiali .....	14
4.2 - Stratigrafia e Caratteristiche meccaniche dei singoli strati .....	18
4.3 - Accelerogrammi e Spettri di Input.....	19
4.4 - Modello di Calcolo FEM.....	23
5 - Output .....	25
5.1 - Accelerogrammi Output .....	25
5.2 - Spettri Output .....	46
5.3 - Interpretazione dei risultati.....	68
5.4 - Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL .....	71

## 1 - Introduzione

In passato si è potuto osservare, a seguito di terremoti distruttivi, una distribuzione anomala del danneggiamento delle costruzioni, con forti differenziazioni fra zone contigue anche di modeste dimensioni.

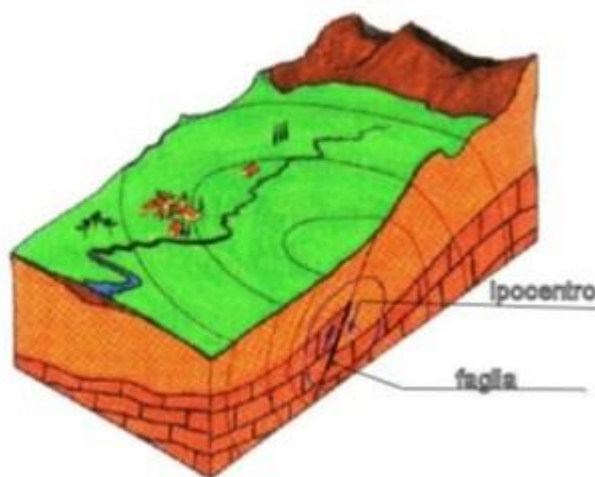
Oltre alle intrinseche differenze della vulnerabilità sismica delle costruzioni ed alle differenti caratteristiche dinamiche delle stesse, tali cause possono essere attribuite principalmente alle modificazioni delle caratteristiche del moto sismico indotte da condizioni geologiche e geomorfologiche locali.

Il moto sismico in un determinato sito, infatti, è influenzato da tre parametri importanti:

- Il meccanismo di sorgente;
- La propagazione;
- La risposta sismica locale;

I primi due fattori dipendono fortemente dalle caratteristiche dell'evento sismico; questi variano in funzione delle caratteristiche della sorgente (magnitudo e tipo di rottura della faglia) e dalla distanza tra il sito in esame e la sorgente.

La risposta sismica locale è il risultato di interazioni tra le onde sismiche e le condizioni locali, cioè l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno ed ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.



**Figura 1.** Schema della rottura del terreno e generazione e propagazione delle onde sismiche.

In altre parole le caratteristiche del sito sono le responsabili delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (terremoto di riferimento), subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo G. et al., 1999).

Nella Figura 1 è rappresentato uno schema della rottura fragile del terreno in profondità con conseguente generazione di onde che si irradiano dall'ipocentro.

Se si ipotizza di avere installato un sismometro ad una grande distanza dall'ipocentro un possibile segnale registrato potrebbe essere quello mostrato nella Figura 2. Il segnale inizia con l'arrivo delle onde P caratterizzate da alte frequenze a bassa ampiezza. Successivamente arrivano le onde S che si propagano meno velocemente delle P e sono di frequenza più bassa e di maggiore ampiezza. Queste ultime sono in genere la causa dei maggiori danni. Le onde P e quelle S, come già descritto

nel capitolo A sono chiamate onde di volume per distinguerle da quelle di superficie che sono più lente.



**Figura 2.** Tipico sismogramma registrato in superficie a grande distanza.

In generale si può dire che le onde generate dalla sorgente sismica sono di due differenti tipi, cioè quelle associate a stati deformativi di compressione-dilatazione volumetrica, dette onde  $P$  che si propagano con velocità  $V_p$  pari a:

$$V_p = \sqrt{\frac{Mv}{\rho}}$$

con:

$$Mv = \lambda + 2G$$

dove:

- $\lambda$  = modulo di Lamé del terreno;
- $G$  = modulo elastico del taglio del terreno;
- $\rho$  = densità del volume del terreno;

Per le onde  $P$  il moto oscillatorio delle particelle di terreno avviene parallelamente alla direzione di propagazione.

Le onde  $S$  sono associate a deformazione di taglio ed hanno una velocità  $V_s$  pari a:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Il moto delle particelle di terreno è in tal caso perpendicolare alla direzione di propagazione. Il campo di spostamenti, in genere, è scomposto in due componenti perpendicolari tra di loro: le onde  $SV$  polarizzate nel piano verticale contenente la sorgente e le onde  $SH$  polarizzate nel piano orizzontale (piano della superficie libera del terreno in direzione perpendicolare al precedente).

Per maggiore chiarezza, se si considera il piano  $\pi$  verticale e contenente la direzione di propagazione dell'onda incidente, il moto della particella di terreno perpendicolare a tale piano costituisce l'onda  $SH$ , viceversa il moto nel piano costituisce l'onda  $SV$ .

Le onde  $P$  e  $S$  arrivate in superficie possono trasformarsi parzialmente in onde di diverso tipo ( $P$  in  $S$  oppure  $S$  in  $P$ ) oppure in onde superficiali chiamate così perché viaggiano in superficie attenuandosi rapidamente con la profondità. Queste ultime si differenziano in onde di Rayleigh

quando il moto della particella di terreno è in un piano verticale oppure onde di Love quando il moto è in un piano orizzontale.

Con riferimento alla Figura 3, il fenomeno della propagazione delle onde può essere descritto come segue. Nella sua complessità morfologica, litologica e stratigrafica, un territorio può essere rappresentato come un insieme di formazioni superficiali, interessate dai loro fenomeni evolutivi tipici, poggianti su formazioni più profonde, i cui andamenti possono essere stati resi complessi fino alla creazione di affioramenti dai fenomeni tettonici ed orogenetici.

Prevalentemente, le formazioni profonde saranno costituite da rocce ignee o metamorfiche di origine sedimentaria, mentre quelle superficiali saranno di natura sedimentaria più recente, coerenti od incoerenti, e quindi di caratteristiche meccaniche ben differenziate rispetto alle prime. Le onde sismiche che si sono generate in profondità, e che sono già caratterizzate diversamente a seconda del meccanismo proprio della sorgente, subiscono una serie di modificazioni ulteriori (riflessioni e rifrazioni) nell'attraversare la crosta terrestre e giungere fino alle formazioni di base per il sito. Ad una certa distanza dall'epicentro, e per una porzione di territorio ragionevolmente limitata, il moto sismico apparirà come un fronte d'onda uniforme propagantesi dal basso verso l'alto, con una certa angolazione rispetto alla verticale, che viene trasmesso dalle formazioni di base a quelle superficiali.

Il moto al suolo tende a non dipendere più solamente dal tipo di rottura della sorgente e a diventare il risultato di due ulteriori meccanismi eventualmente combinati:

- la propagazione delle onde sismiche all'interno delle formazioni di base e dalla conformazione delle frontiere della stessa;
- la risposta dinamica delle formazioni superficiali.

Tutto ciò comporta una non omogeneità del moto vibratorio in superficie che può cambiare da punto a punto anche a breve distanza. Sugli aspetti quantitativi e qualitativi del fenomeno hanno pertanto grande rilevanza diversi fattori quali la natura delle onde sismiche incidenti ed in particolare il meccanismo di sorgente, le diversità fra le caratteristiche meccaniche dei terreni attraversati, ed in particolare tra formazioni di base e superficiali, la conformazione e la giacitura degli strati, la presenza di falde idriche, l'entità dei fenomeni dissipativi ed altri ancora.

Al variare delle condizioni locali, il moto alla superficie risulterà quindi differente per quanto attiene ai suoi caratteri principali e cioè: ampiezza, contenuto in frequenza e durata. Si osserva che tutti e tre questi caratteri sono significativi e concorrono a causare il danneggiamento delle strutture e l'instabilità dei terreni (frane, cedimenti, liquefazioni).

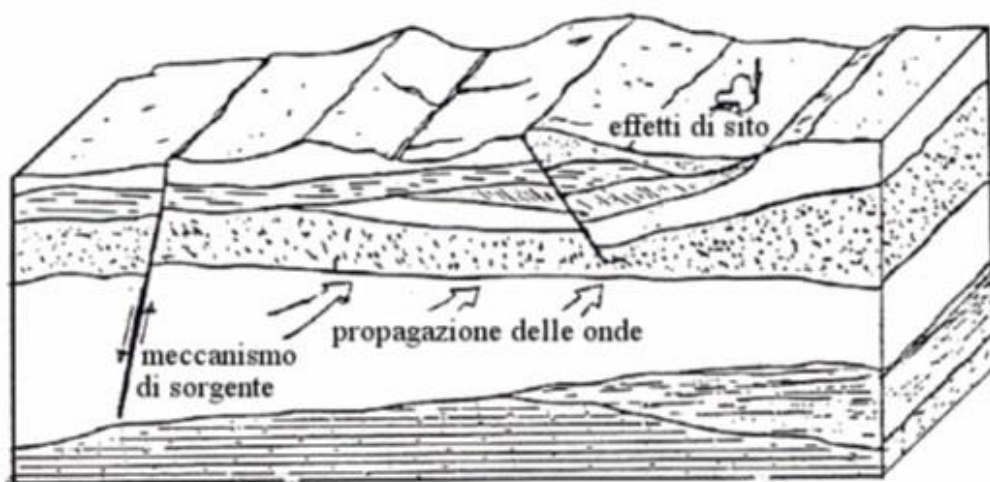


Figura 3. Schema di una situazione reale.

## 1.1 - Impostazione del Problema di Calcolo dell'Amplificazione Locale

Per illustrare gli aspetti principali del fenomeno della risposta sismica locale si paragoni il moto in corrispondenza di tre siti, indicati con A, B e C nella Figura 4, posti alla stessa distanza dalla sorgente sismica durante lo stesso evento sismico. Si supponga inoltre che il primo sito sia su un semispazio affiorante (per esempio roccia) e il secondo B su un deposito alluvionale posto al di sopra del semi spazio ed il terzo C su di un rilievo.

In corrispondenza della coltre alluvionale si verifica, rispetto al moto sul semi spazio affiorante, una amplificazione del moto in particolari campi di frequenza e una deamp1ificazione negli altri campi. Analogamente sul rilievo in C si verificheranno focalizzazioni oppure diradazioni di onde per effetto della forma del rilievo e della direzione di incidenza delle onde.

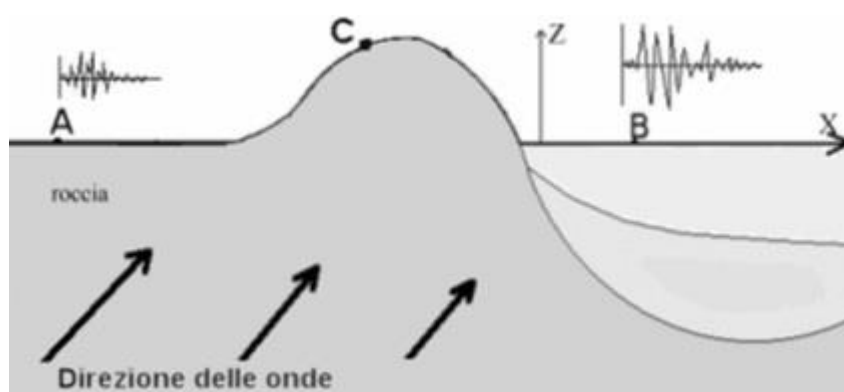


Figura 4. Schema della propagazione delle onde dalla sorgente e delle differenti condizioni locali.

In letteratura si parla di effetti stratigrafici o monodimensionali nel caso in cui le modifiche che il moto sismico subisce nel propagarsi in direzione prevalentemente verticale verso la superficie dal sottostante basamento roccioso siano essenzialmente attribuibili a fenomeni di filtraggio. L'amplificazione delle onde sismiche dipende, in questo caso dalla stratigrafia del sottosuolo, dalle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni e del contenuto in frequenza del moto sismico.

Il termine "effetti di bacino" è utilizzato quando le onde incidenti incontrano una valle alluvionale; in tal caso ai fenomeni sopra descritti si sovrappongono quelli dovuti al manifestarsi di fenomeni complessi di interazione tra le onde, che possono sommarsi o elidersi a vicenda, e generazione di onde superficiali. Spesso ai bordi della valle si verificano maggiori amplificazioni, dette: "effetti di bordo".

Con "effetti topografici" si intendono le modifiche delle caratteristiche del moto sismico causate essenzialmente da fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche per effetto della particolare geometria della superficie (per es. la cresta di un rilievo o un canyon) e sono molto influenzati dalla lunghezza d'onda del moto incidente e dalla direzione di incidenza.

Lo scopo delle analisi di amplificazione sismica locale è quello di determinare il moto in B oppure in C una volta noto il moto nel sito di riferimento A. Tale moto di riferimento è in genere determinabile in via statistica (analisi di pericolosità) o deterministica dallo studio del meccanismo di rottura della sorgente nell'ipotesi che tra la sorgente stessa ed il sito in esame il mezzo sia omogeneo ed isotropo.

Come è facile immaginare le caratteristiche del moto in superficie sono fortemente influenzate, oltre che dalla geometria degli strati e delle loro proprietà meccaniche, anche dalle caratteristiche

del moto incidente, cioè dalla direzione di propagazione, dal suo contenuto energetico e dalla direzione del moto delle particelle del terreno.

## **1.2 - Normativa di Riferimento**

La normative di riferimento per lo studio del problema in esame sono:

- NTC 2018 Cap 7.11.3.1 (Risposta Sismica Locale);
- Legge Regionale n. 35 del 19/10/2009 (Allegato 3 - Effetti di sito per interventi di tipo edilizio).

## 2 - Risposta Sismica Locale

Come già detto in precedenza, il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa dei fattori anzidetti, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I passi da seguire nello studio del problema della risposta sismica locale sono:

1. Definizione input sismico;
2. Stima dell'accelerazione di base;
3. Dati di disaggregazione;
4. Estrazione, conversione e normalizzazione accelerogrammi di input;
5. Analisi di Risposta Sismica Locale;
6. Inserimento sismostratigrafia di input (derivata da indagine sismica MASW);
7. Esecuzione dell'analisi e restituzione grafica.

Le analisi numeriche che consentono di valutare gli effetti del sito nell'amplificazione delle onde sismiche possono essere distinte in:

- Analisi numeriche monodimensionali;
- Analisi numeriche bidimensionali;
- Analisi numeriche tridimensionali.

Il primo approccio consente di definire una realistica risposta sismica stratigrafica di terreni non affetti da problematiche bidimensionali. Questo approccio è ritenuto la via ufficiale delle NTC 2018 (Cap. 3.2.2) e consente, in determinati casi e mediante il confronto con la relativa categoria di sottosuolo, elementi di risparmio rispetto all'approccio semplificato di normativa, poiché identifica amplificazione per intervalli di periodi solitamente più limitati rispetto a quelli di normativa.

Il secondo approccio è da preferire in quelle situazioni in cui il sottosuolo presenta una geometria variabile in cui, oltre alla profondità, è importante considerare un'altra delle due restanti dimensioni spaziali. Un esempio di situazione che richiede l'utilizzo di modelli bidimensionali è il caso delle aree marginali delle valli alluvionali, in cui alle normali cause di amplificazione del moto sismico si sommano gli effetti di bordo connessi alla geometria del problema.

Il terzo approccio necessita di modelli complessi che richiedono capacità computazionali notevoli; solo recentemente iniziano ad avere una certa diffusione grazie al rapido sviluppo degli strumenti informatici. Il loro utilizzo è principalmente concentrato sulla valutazione delle amplificazioni in presenza di effetti morfologici, data l'importanza assunta in queste analisi dalla conoscenza precisa e dalla gestione di un modello tridimensionale del terreno.



### 3 - Metodo di calcolo adottato e descrizione del codice di calcolo LSR 2D

Il codice di calcolo LSR 2d, alla stregua di software ben noti dalla comunità scientifica (es. QUAD4 e QUAD4M), consente di effettuare una modellazione bidimensionale del problema mediante il metodo degli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando il metodo lineare equivalente e tenendo conto della deformabilità del substrato.

Qualora la stratigrafia in esame non presenti problematiche di carattere bidimensionale è comunque possibile studiare il problema monodimensionale grazie ad una discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

#### 3.1 - Metodo lineare equivalente

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso e caratterizzato da marcata non linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e degradazione progressiva delle caratteristiche meccaniche per effetto del numero di cicli di carico applicati. In presenza di fluido interstiziale, alle suddette problematiche si aggiunge l'accumulo di sovrappressioni interstiziali in condizioni di drenaggio impedito o parziale, che sono comunque le più frequenti, in considerazione della velocità di applicazione del carico.

La modellazione di tali fenomeni richiede l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che oltretutto difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione spesso si preferisce fare riferimento a modelli costitutivi semplificati che, pur non essendo rigorosi, riescono a riprodurre il comportamento in modo adeguato in riferimento alla specifica applicazione.

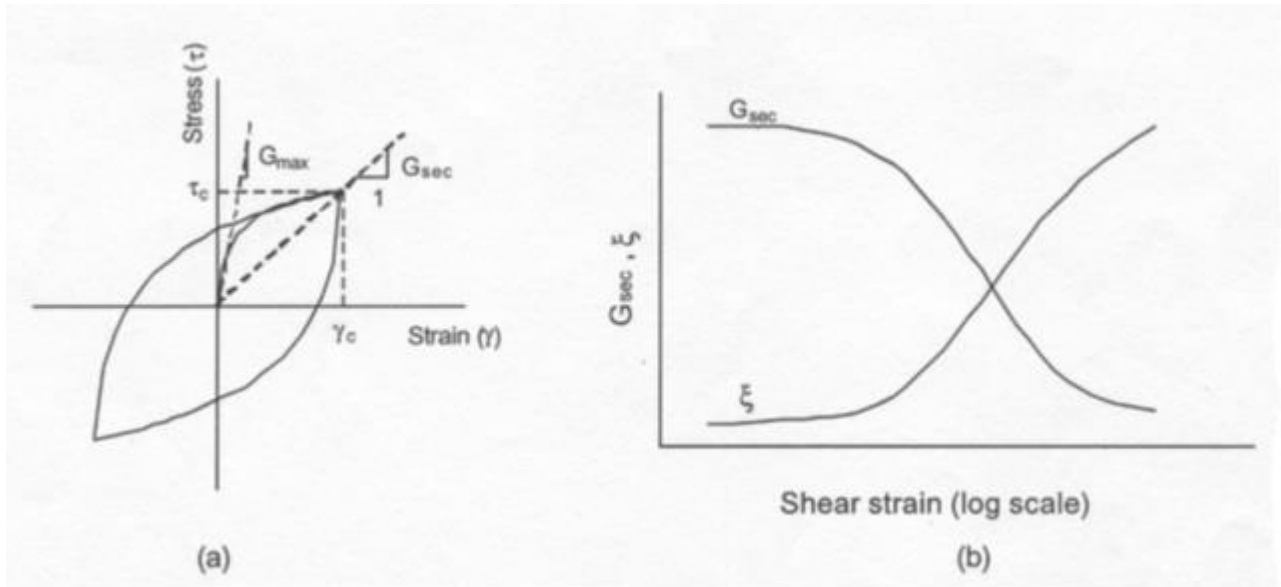
In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in Figura 5. La tensione  $\tau$  dipende dalla deformazione  $\gamma$  e dalla sua derivata  $\dot{\gamma}$ , secondo la relazione:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}$$

dove:

- $G$  = Modulo di taglio;
- $\eta$  = viscosità del mezzo;



**Figura 5.** Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Figura 5. Il modulo di taglio equivalente,  $G$ , è preso considerando il modulo di taglio secante  $G_s$ .

È possibile notare come alla fine di un ciclo controllato e simmetrico di tensioni si ha:

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

La curva  $G_s - \gamma$  non può avere una forma arbitraria ma deriva dalla curva  $\tau - \gamma$  e sussiste la seguente relazione:

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = G_s(\gamma) + \frac{dG_s}{d\gamma} \gamma \geq 0$$

La descrizione del comportamento meccanico dei terreni nei confronti dei carichi ciclici non può peraltro prescindere dalla dissipazione intrinseca di energia che si verifica durante i cicli di carico-scarico. Il parametro di riferimento a tal riguardo è costituito dal coefficiente di smorzamento  $D$ , definito come:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W^{dissp}}{W^{max}}$$

dove:

- $\Delta W^{dissp}$  = quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;
- $W^{max}$  = massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico;

In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento (Figura 5b).

### 3.2 - Soluzione alla singola iterazione mediante FEM

L'approccio utilizzato per la soluzione visco-elastica lineare all'interno dell' i-esimo ciclo iterativo utilizza il metodo degli elementi finiti. In particolare, il deposito di terreno viene discretizzato mediante una "mesh" di elementi finiti piani che possono avere forma quadrangolare o rettangolare a seconda dei casi (figura 6) e caricato mediante un'accelerazione alla base dello stesso (bedrock), la soluzione dell'equazione del moto viene poi ottenuta nel dominio del tempo utilizzando il metodo di integrazione di Newmark.

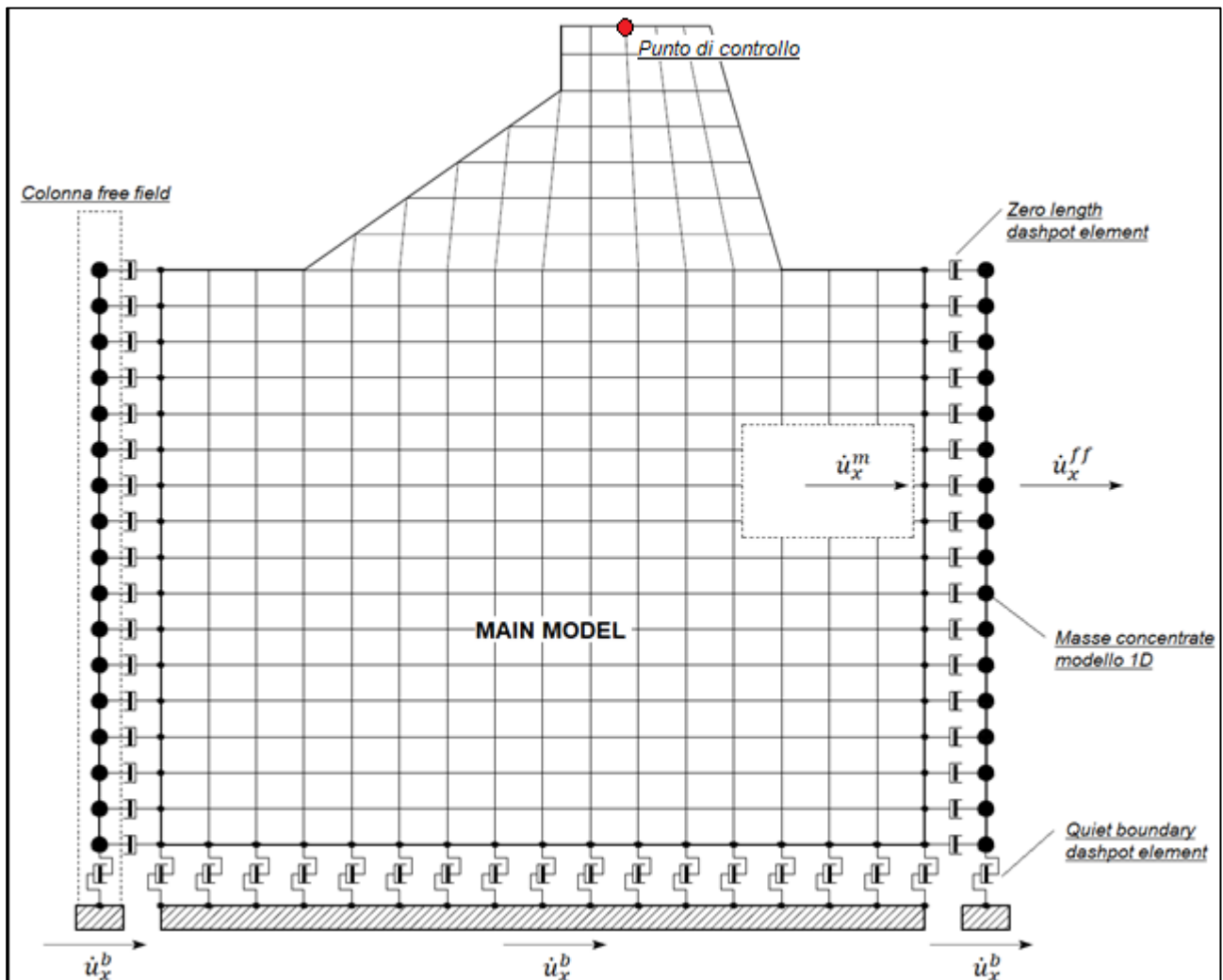


Figura 6. Discretizzazione FEM del deposito di terreno.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Ma_g$$

dove:

- $M$  = matrice di massa del sistema;
- $C$  = matrice di smorzamento del sistema;
- $K$  = matrice di rigidità del sistema;
- $\ddot{u}, \dot{u}, u$  = rispettivamente vettori di accelerazione, velocità e spostamento del sistema;
- $a_g$  = vettore di accelerazione alla base;

Tale equazione vale per ogni istante di tempo  $tn$  e descrive l'equilibrio dinamico del sistema. La soluzione in termini di spostamento velocità ed accelerazione per ogni  $tn$  viene ottenuta a partire dalle seguenti relazioni:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n]$$

dove:

- $\Delta t$  = incremento temporale tra l'istante di tempo  $tn$  e  $tn - 1$ ;
- $\beta$  = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25;
- $\gamma$  = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50;

### Smorzamento

La matrice di smorzamento del sistema viene ottenuta mediante l'assemblaggio delle matrici di smorzamento dei singoli elementi, queste ultime ottenute a loro volta come:

$$C_q = \alpha_q M_q + \beta_q K_q$$

dove:

- $\alpha_q$  e  $\beta_q$  = coefficienti di smorzamento alla Rayleigh;

Tali coefficienti vengono ottenuti a partire dal rapporto di smorzamento viscoso del singolo elemento e dalla relazione seguente:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n]$$

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

$$D_q = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha_q}{\omega} + \beta_q \omega \right)$$

dove:

- $\omega_1$  = frequenza naturale del primo modo del deposito;
- $\omega_2 = n * \omega_1$  con  $n = \omega_i / \omega_1$  (approssimato all'intero pari più grande) e  $\omega_i$  frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock;

### Free-field boundaries

Le condizioni di free-field sulle frontiere laterali vengono implementate mediante l'accoppiamento di smorzatori viscosi tra i nodi delle frontiere laterali del modello e i nodi di opportune colonne di terreno monodimensionali (colonne free-field) in grado di descrivere il moto in condizioni di campo libero. Le coordinate dei nodi delle frontiere laterali del modello e delle colonne free-field possono essere uguali. È necessario, affinché tali condizioni al contorno siano applicabili, che le frontiere laterali del modello siano perfettamente verticali. Le forze interne agli smorzatori possono essere ottenute mediante le seguenti equazioni:

$$F_x = -\rho V_p (\dot{u}_x^m - \dot{u}_x^{ff}) A \quad (1)$$

$$F_y = -\rho V_s (\dot{u}_y^m - \dot{u}_y^{ff}) A \quad (2)$$

dove:

- $\rho$ : densità di massa del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $V_p$ : velocità delle onde P del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $V_s$ : velocità delle onde S del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $A$ : area di influenza relativa al nodo su cui agisce lo smorzatore;
- $\dot{u}_x^m$ : velocità del nodo del modello in direzione x;
- $\dot{u}_y^m$ : velocità del nodo del modello in direzione y;
- $\dot{u}_x^{ff}$ : velocità del nodo della colonna free-field in direzione x;
- $\dot{u}_y^{ff}$ : velocità del nodo della colonna free-field in direzione y.

Le componenti della velocità dei nodi delle colonne laterali ad ogni istante di tempo vengono ottenute mediante una soluzione numerica monodimensionale a masse concentrate dell'equazione di propagazione delle onde. Tale soluzione è affidata ad un processo di calcolo che opera in parallelo rispetto a quello impiegato per la soluzione del modello principale. In altre parole, per il generico passo di integrazione temporale, vengono dapprima ottenute le componenti delle velocità delle colonne di campo libero attraverso la soluzione 1D, per poi essere convertite in carichi applicati al modello principale mediante le equazioni (1) e (2).

### 3.3 - Procedimento iterativo

La procedura iterativa che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema consiste nell'eseguire una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidezza e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Facendo riferimento alla Figura 7, lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico:

- definizione di curve  $G = G(\gamma)$  e  $D = D(\gamma)$  per i diversi strati;
- inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni ( $G0$  e  $D0$ );
- calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato ( $\gamma1$ , Figura 7);
- aggiornamento dei valori  $G1 = G(\gamma1)$  e  $D1 = D(\gamma1)$ ;
- iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ( $\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$ ).

### 3.4 - Interpretazione dei risultati

Il risultato della procedura iterativa sopradescritta non è altro che la storia temporale di accelerazione, velocità e spostamento di ogni grado di libertà del modello FEM. Tuttavia, dal punto di vista ingegneristico è interessante monitorare la risposta in termini di accelerazione in superficie

in corrispondenza di uno o più punti di controllo in modo da comprendere quelli che sono gli effetti indotti dal sito sull'amplificazione della sorgente sismica.

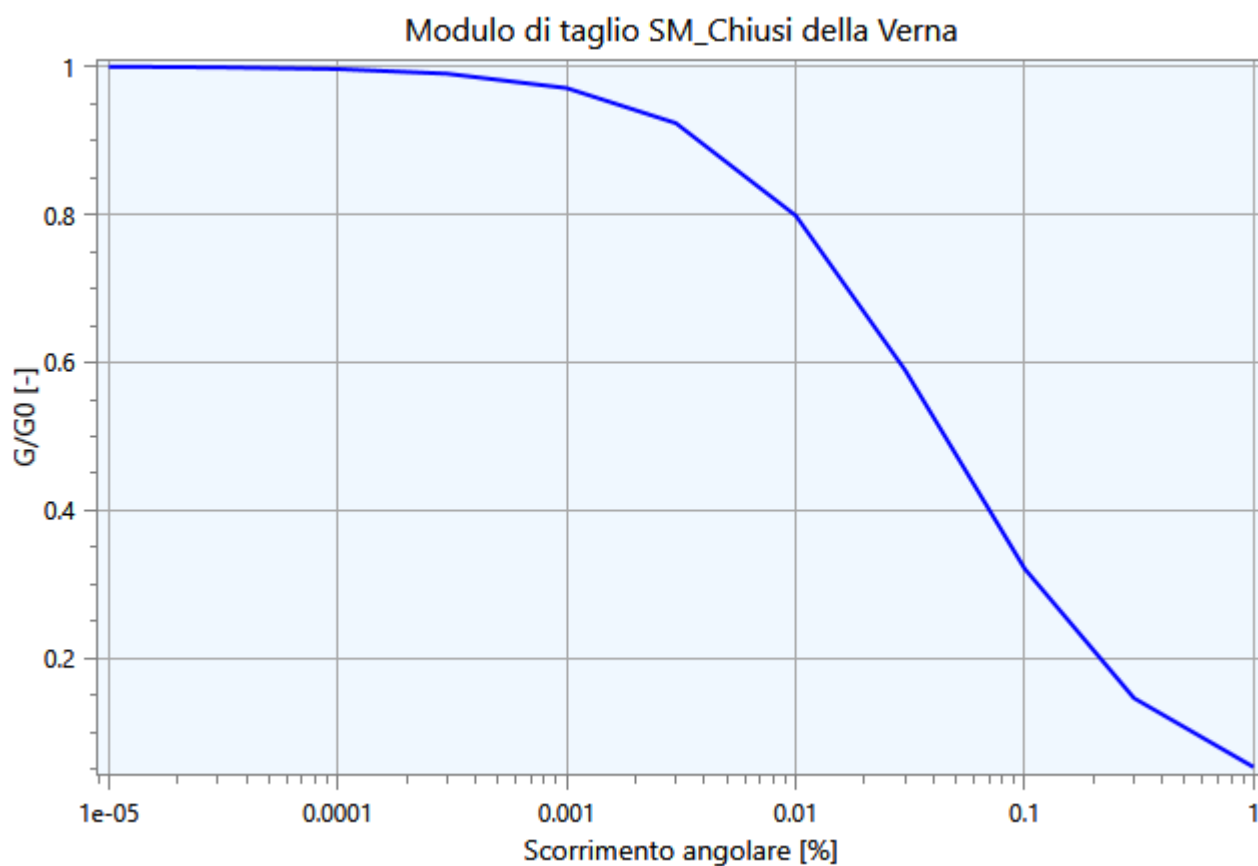
## 4 - Input

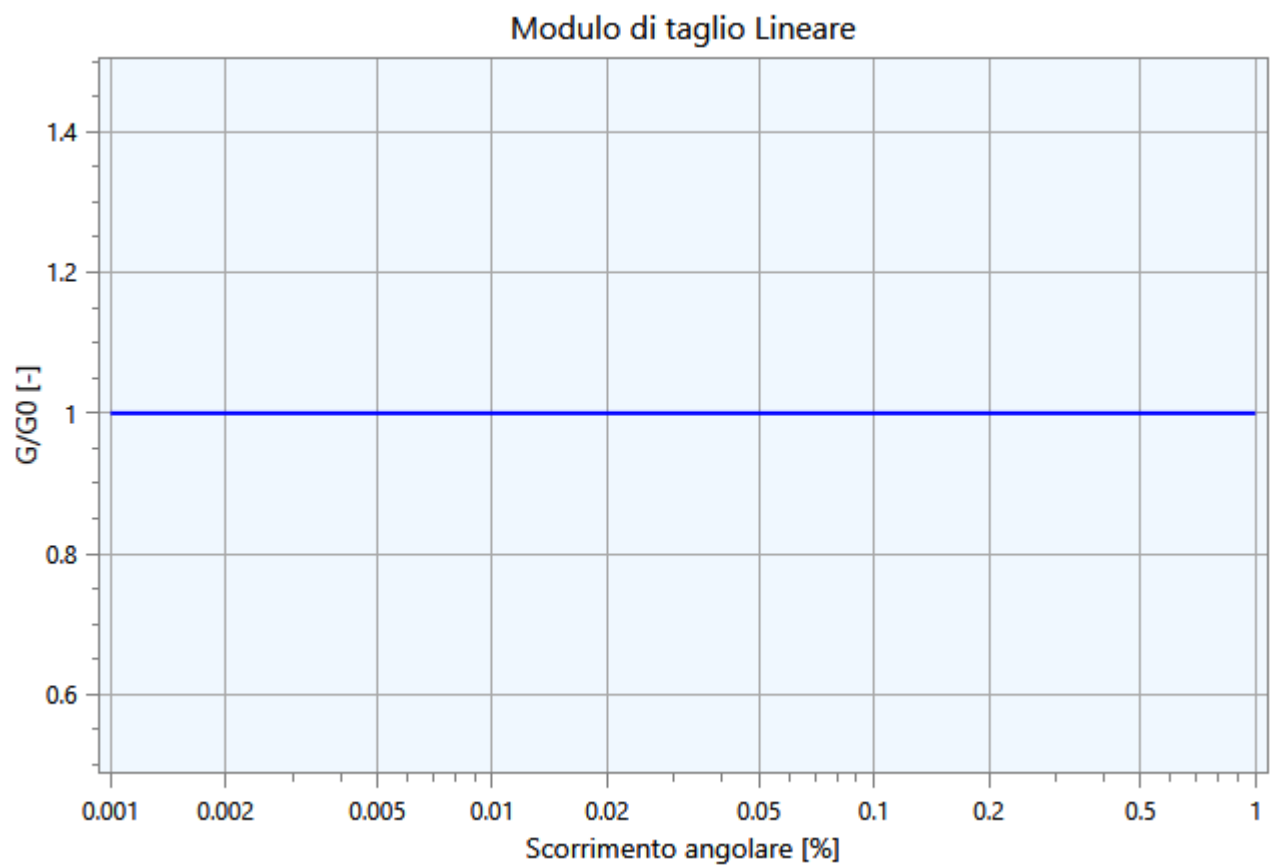
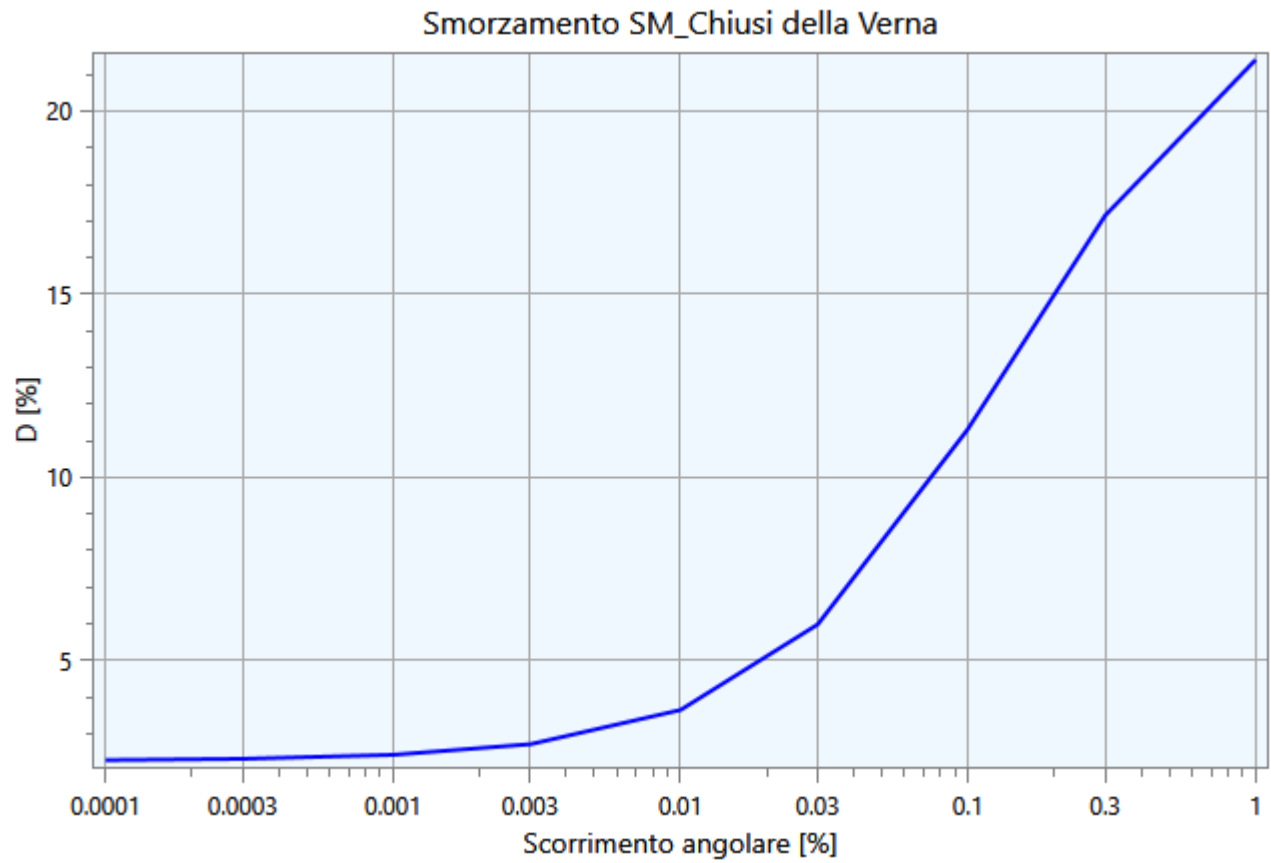
Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai dati di input utilizzati per lo studio della risposta sismica locale del deposito.

### 4.1 - Curve di Decadimento dei Materiali

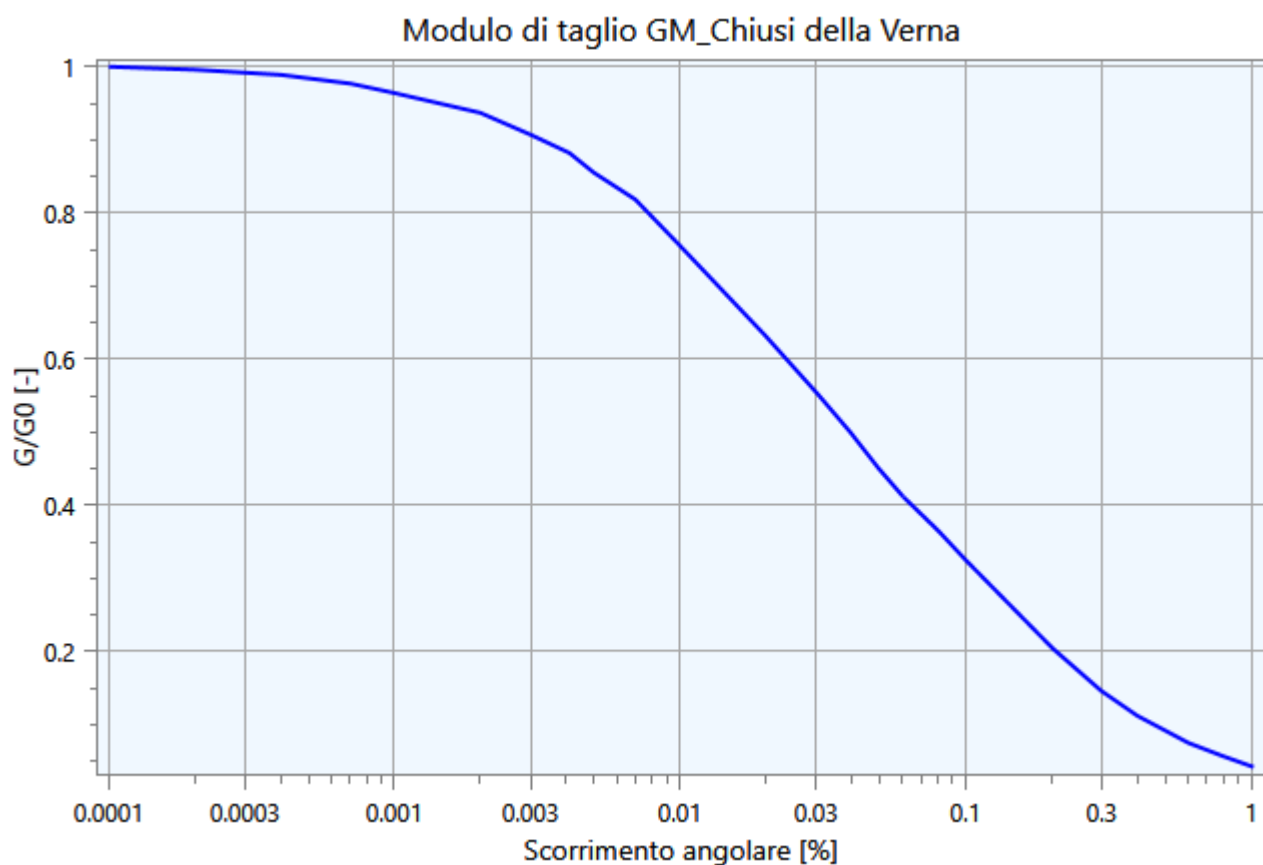
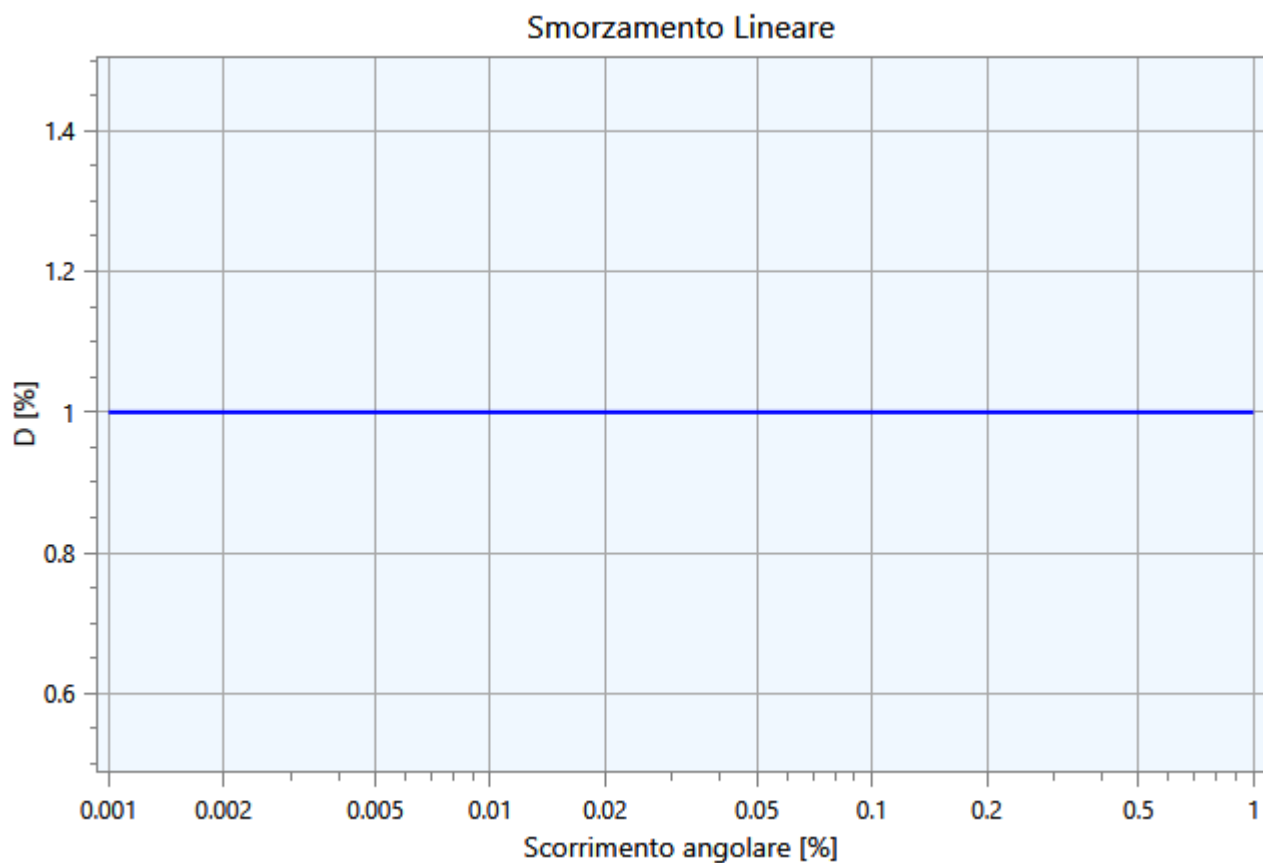
All'aumentare del livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno si ha una diminuzione del modulo di taglio  $G$  ed un aumento del rapporto di smorzamento  $D$ . Tale comportamento può essere descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento una relativa a  $G$  ed una  $D$ .

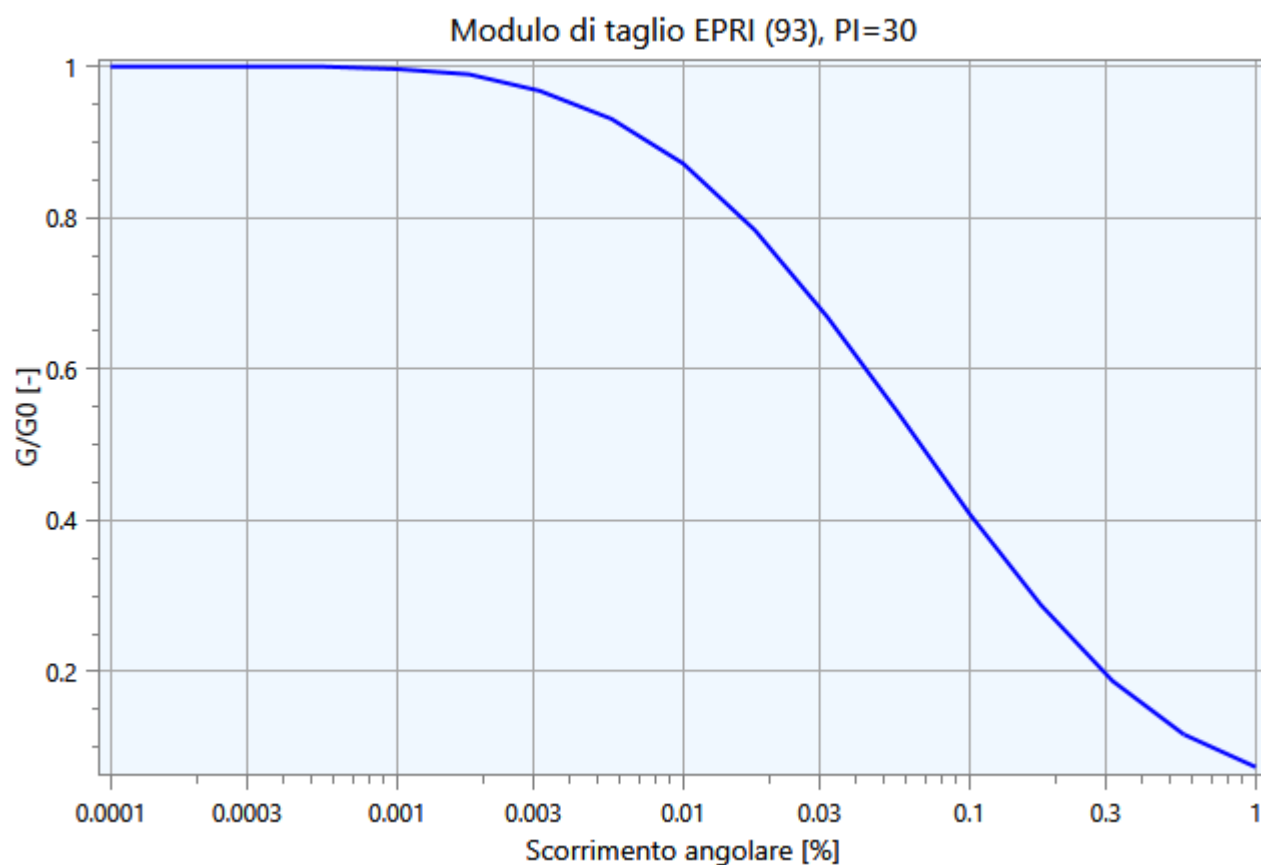
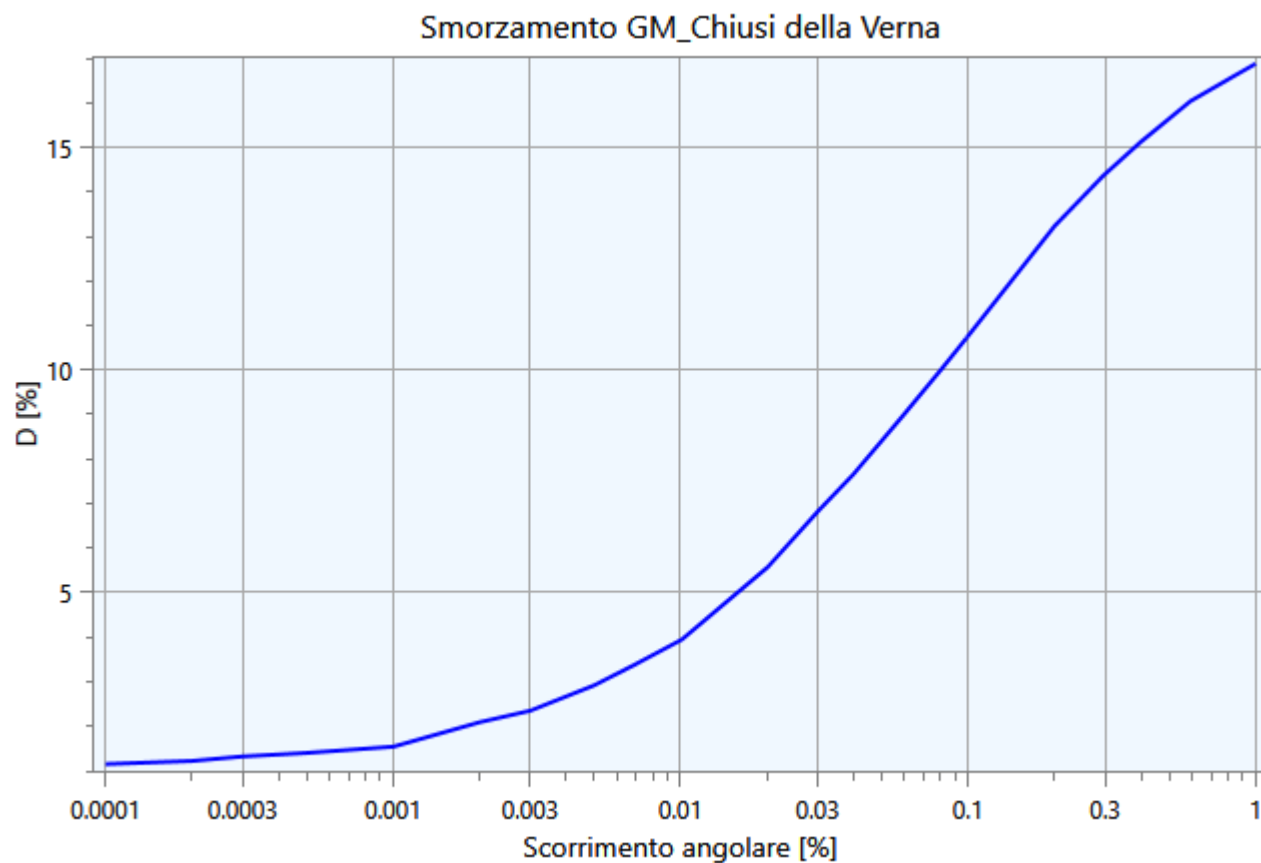
Di seguito si riportano le curve di riferimento utilizzate nell'analisi:

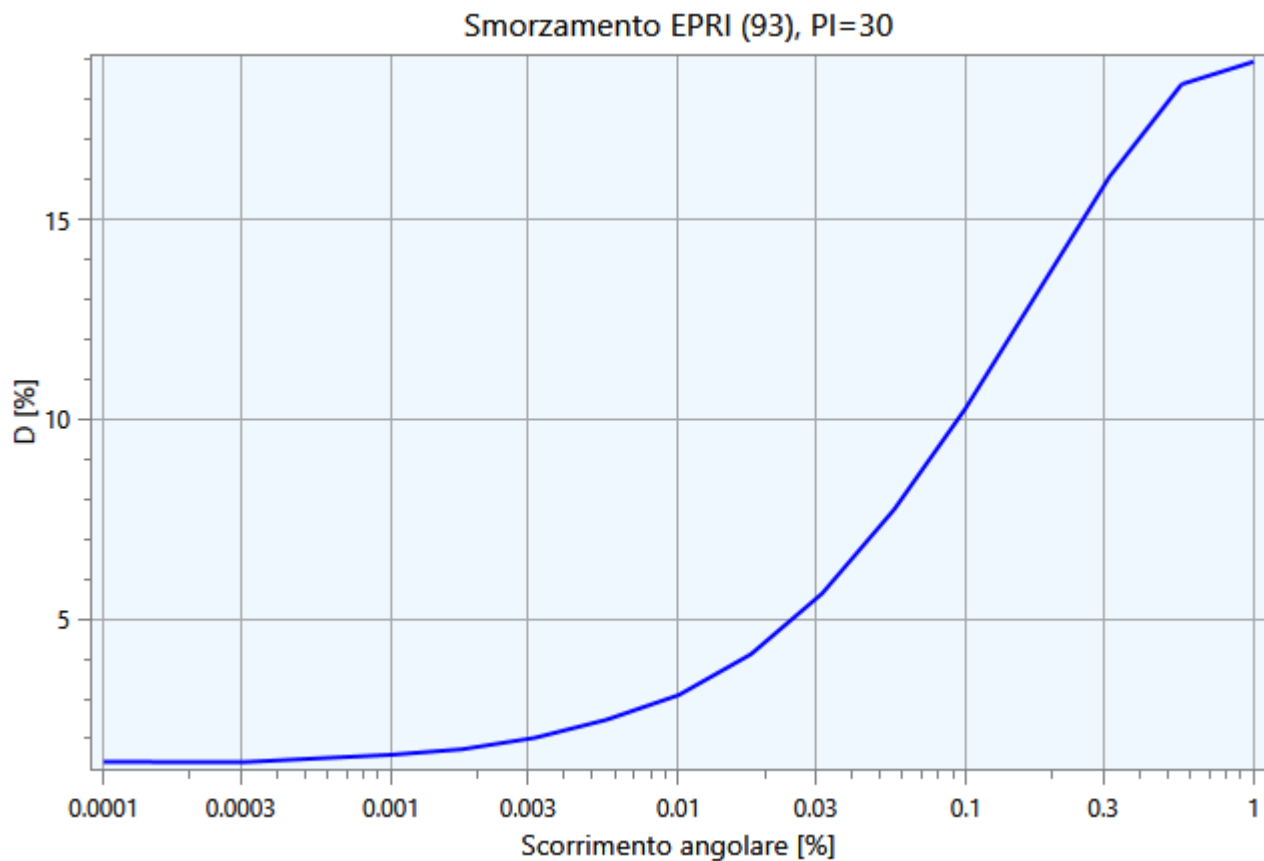










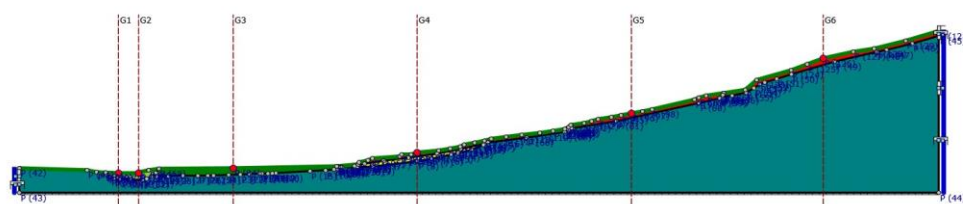


#### 4.2 - Stratigrafia e Caratteristiche meccaniche dei singoli strati

Sulla base del cosiddetto volume significativo di terreno interessato dal problema in esame, viene definita una stratigrafia di progetto che rappresenta l'andamento delle singole lenti di terreno in una sezione verticale.

Tale stratigrafia viene rappresentata nel piano verticale X-Z mediante una serie di spezzate ognuna delle quali identifica l'andamento del singolo strato. La prima di tali spezzate serve ad identificare l'orografia della porzione di sito oggetto di studio.

Di seguito si riporta una rappresentazione grafica della stratigrafia di progetto:



**Figura 7.** Stratigrafia di progetto.

Di seguito si riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

Strato	Descrizione	S [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
SM		-	1900.00	280.00	0.45	SM_Chiusi della Verna
LPS		-	2250.00	895.00	0.30	Lineare
GM		-	2000.00	320.00	0.36	GM_Chiusi della Verna
GP		-	2000.00	345.00	0.36	GM_Chiusi della Verna
fq_3		-	1900.00	250.00	0.37	EPRI (93), PI=30
fq_2		-	1900.00	250.00	0.37	EPRI (93), PI=30
fq_1		-	1900.00	250.00	0.37	EPRI (93), PI=30

**Tabella 1.** Caratteristiche meccaniche strati.

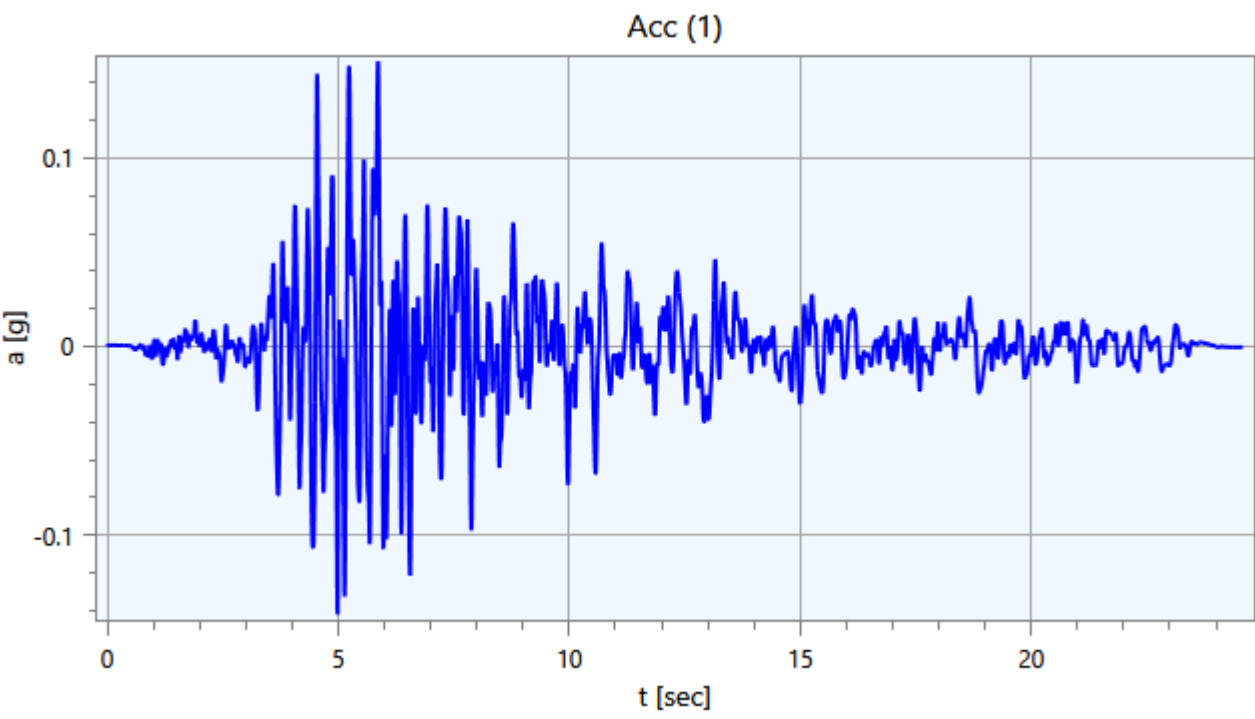
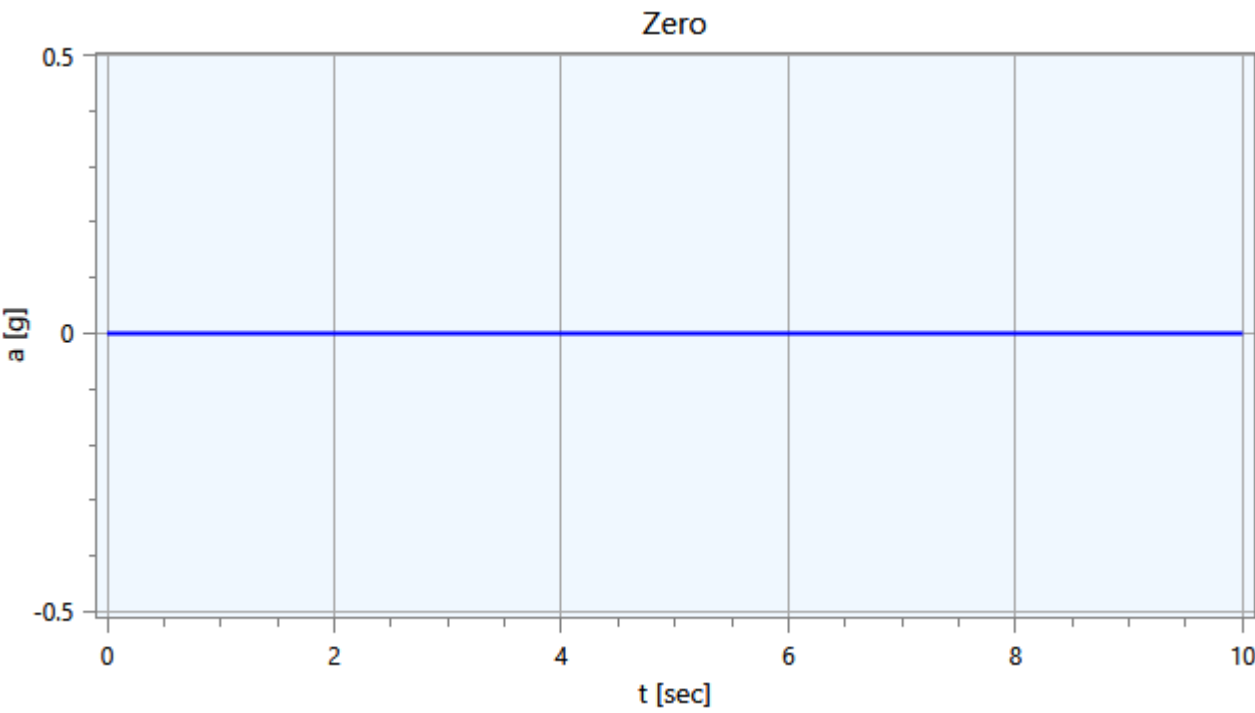
dove:

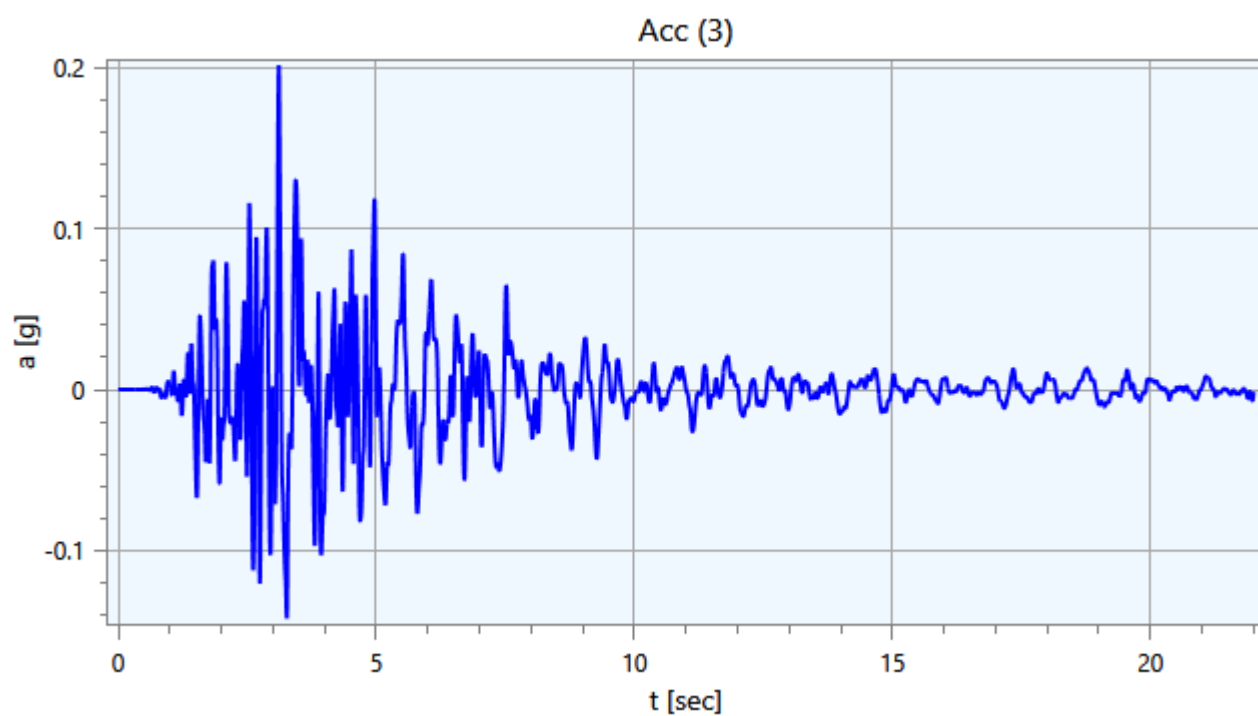
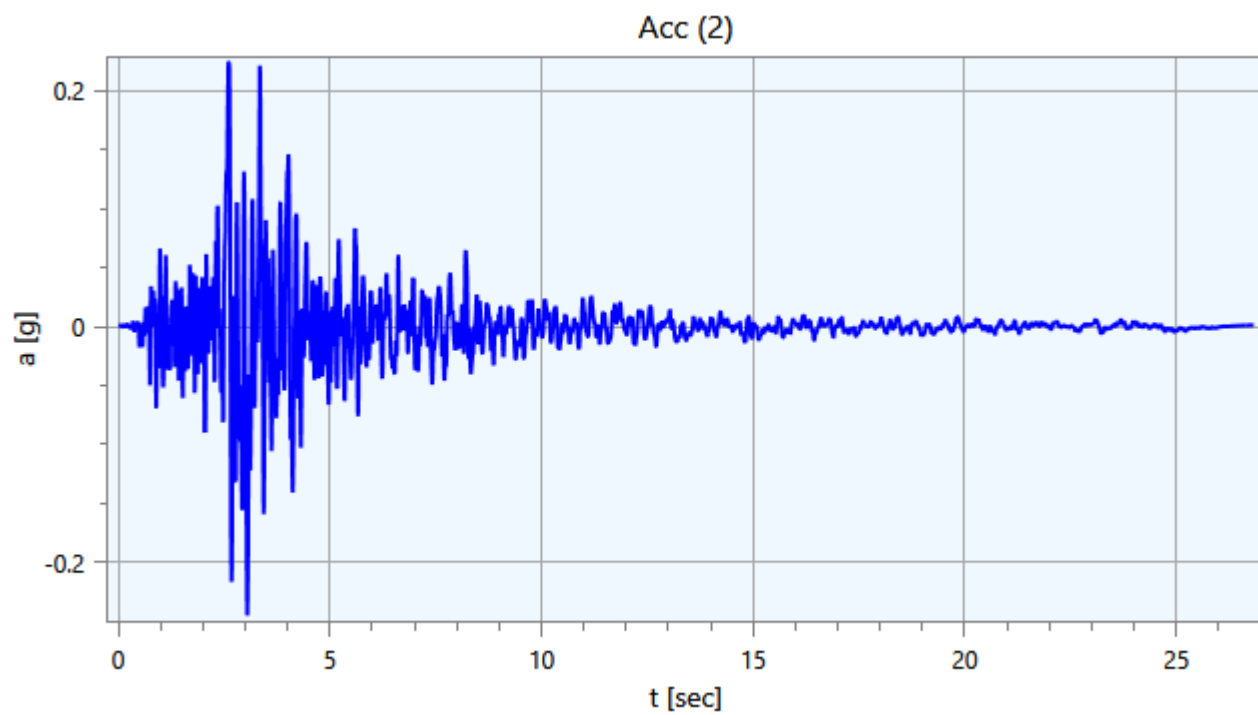
- $S$  = spessore del singolo strato;
- $\rho$  = densità di massa del singolo strato;
- $V_s$  = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato;
- $\gamma$  = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato;

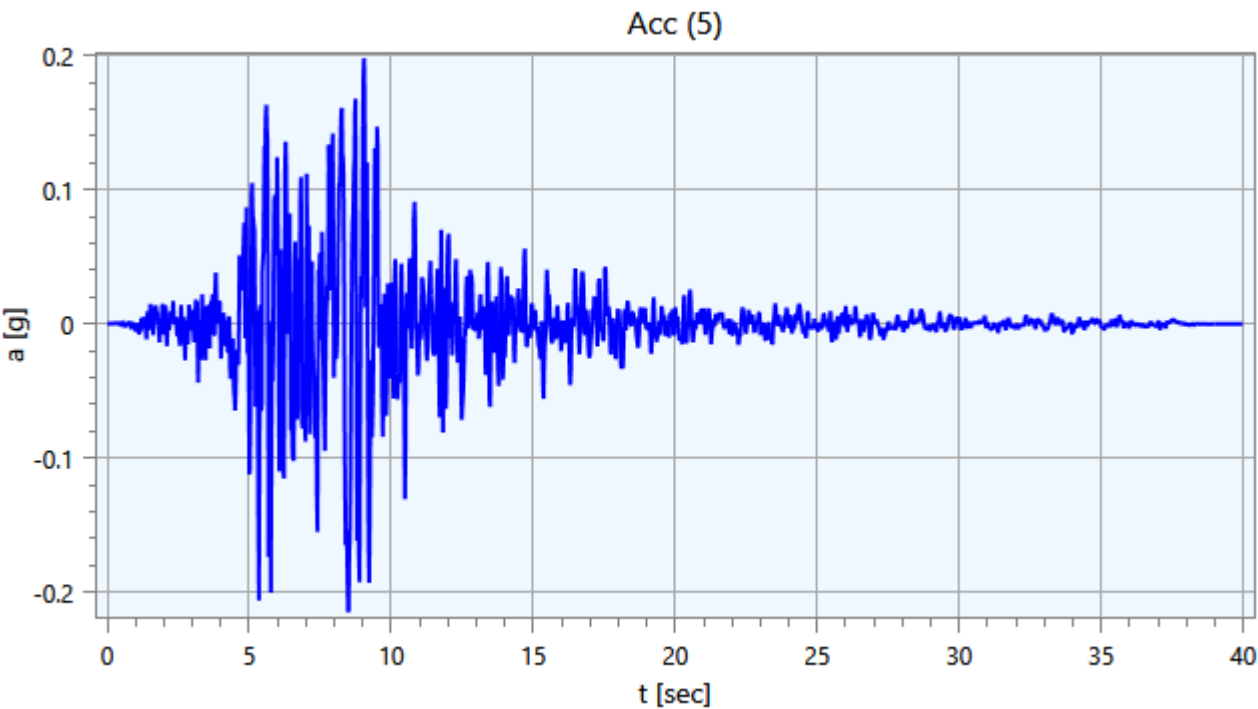
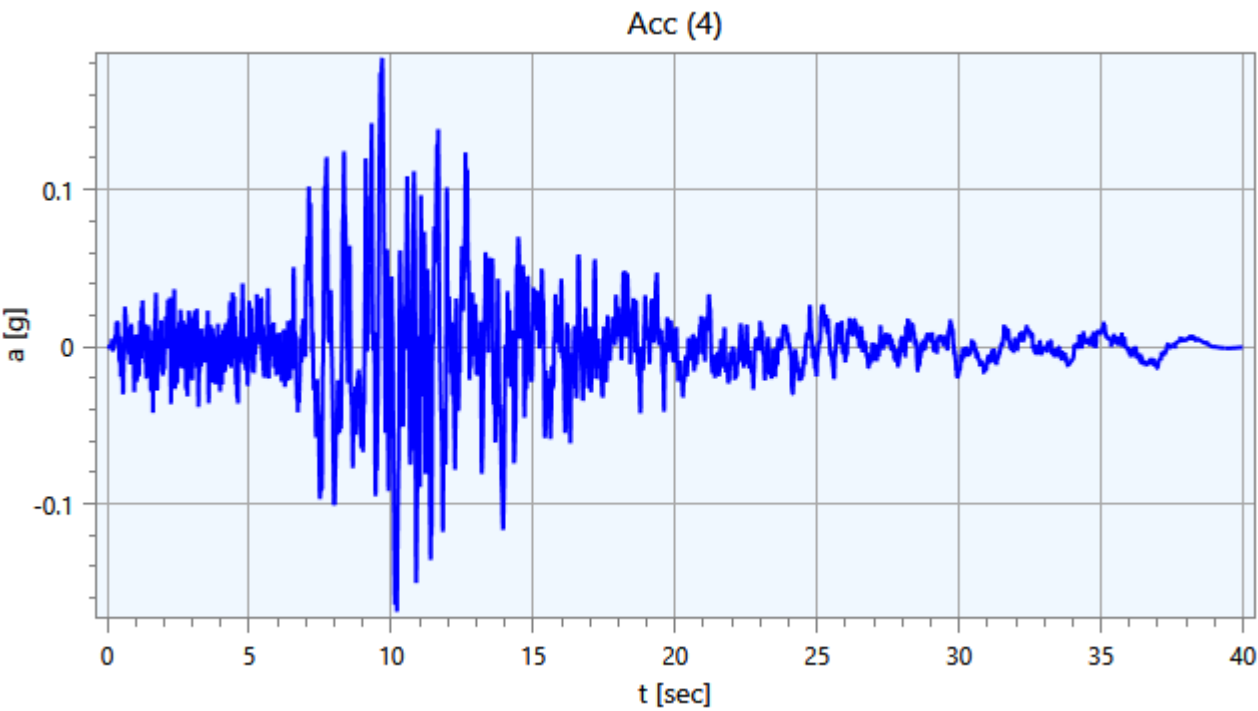
### 4.3 - Accelerogrammi e Spettri di Input

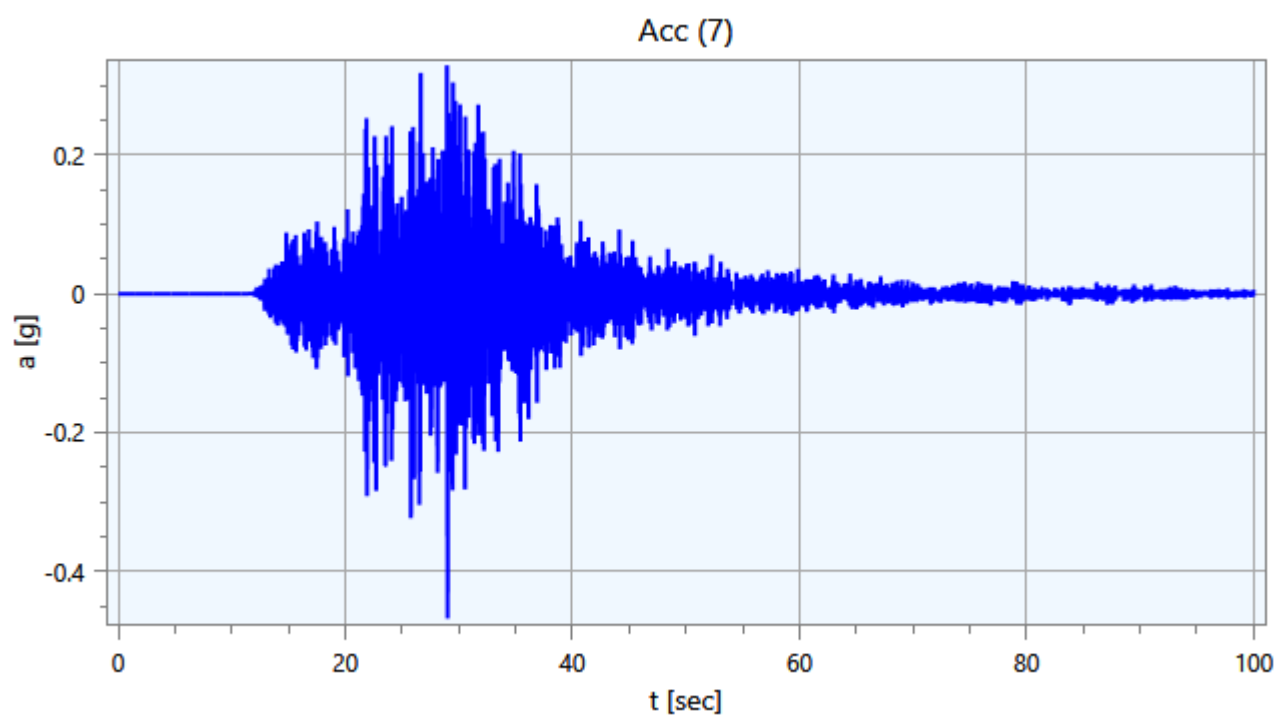
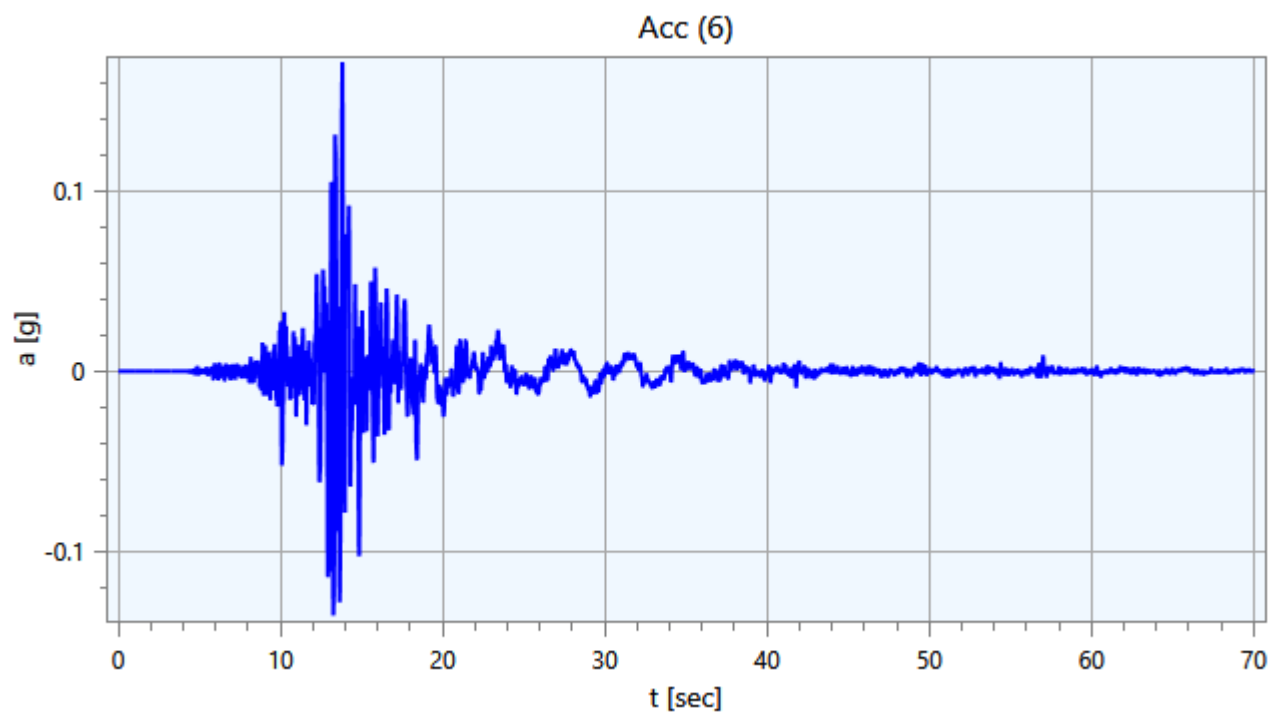
Gli accelerogrammi di input relativi allo stato limite in esame (ad esempio SLV) possono essere ottenuti tramite un'analisi con l'utilizzo dell'applicativo software REXEL v. 3.4 beta, che permette la ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018), dell'Eurocodice 8 (EC – CEN 2003), dell'ASCE/SEI 7-10 (ASCE, 2010). Il database utilizzato è l'Italian Accelerometric Archive (ITACA) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), scaricabile dal sito <http://itaca.mi.ingv.it>.

Di seguito si riportano gli accelerogrammi di progetto riferiti ad una condizione detta di 'outcrop':









#### 4.4 - Modello di Calcolo FEM

Il modello di calcolo agli elementi finiti da utilizzare per lo studio della problematica in esame viene di seguito descritto.



Per ogni analisi, nel caso più generale, è necessario specificare due componenti di sollecitazione. In particolare vi sono, per ogni condizione, un accelerogramma di in direzione X (Orizzontale), ed uno in direzione Z (Verticale).

Ad ogni analisi corrispondono una serie di condizioni di carico. Per ognuna di esse vengono specificate due componenti di accelerazione di input in outcrop. In tabella vengono riportate le condizioni di carico relative al caso in esame:

## SLV

Condizione	Accelerogramma X	Accelerogramma Z
CDC (1)	Acc (1)	Zero
CDC (2)	Acc (2)	Zero
CDC (3)	Acc (3)	Zero
CDC (4)	Acc (4)	Zero
CDC (5)	Acc (5)	Zero
CDC (6)	Acc (6)	Zero
CDC (7)	Acc (7)	Zero

**Tabella 6.** Condizioni di carico.

Il modello FEM viene ottenuto mediante una discretizzazione con elementi finiti piani a tre o a quattro nodi del dominio. Il passo ed i rapporti di infittimento della mesh in corrispondenza dei punti di controllo sono dati di input e possono variare a seconda del caso. Il passo della mesh deve soddisfare la seguente relazione:

$$p \leq \frac{V_{s,min}}{8 f_{max}}$$

dove:

- $p$  = passo della mesh;
- $V_{s,min}$  = velocità delle onde di taglio minima presente nel modello;
- $f_{max}$  = frequenza massima che si vuole analizzare;

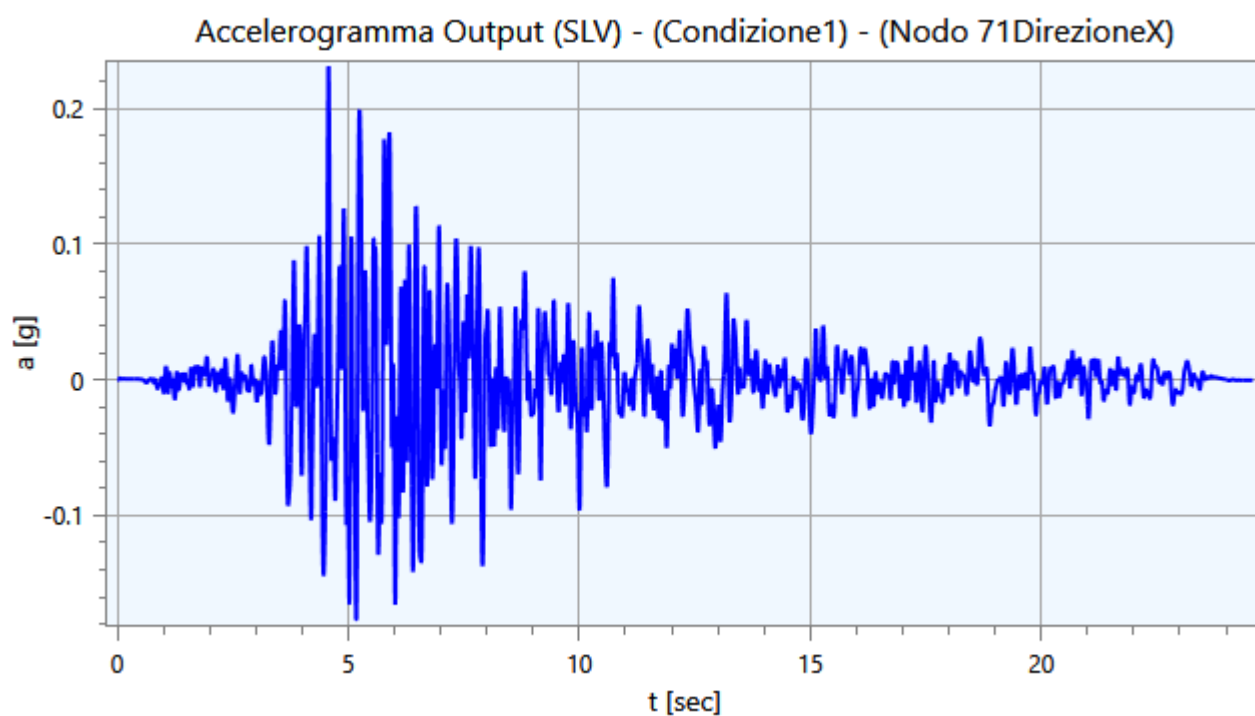
Di seguito si riportano i nodi del modello con le rispettive coordinate nel riferimento X-Z:

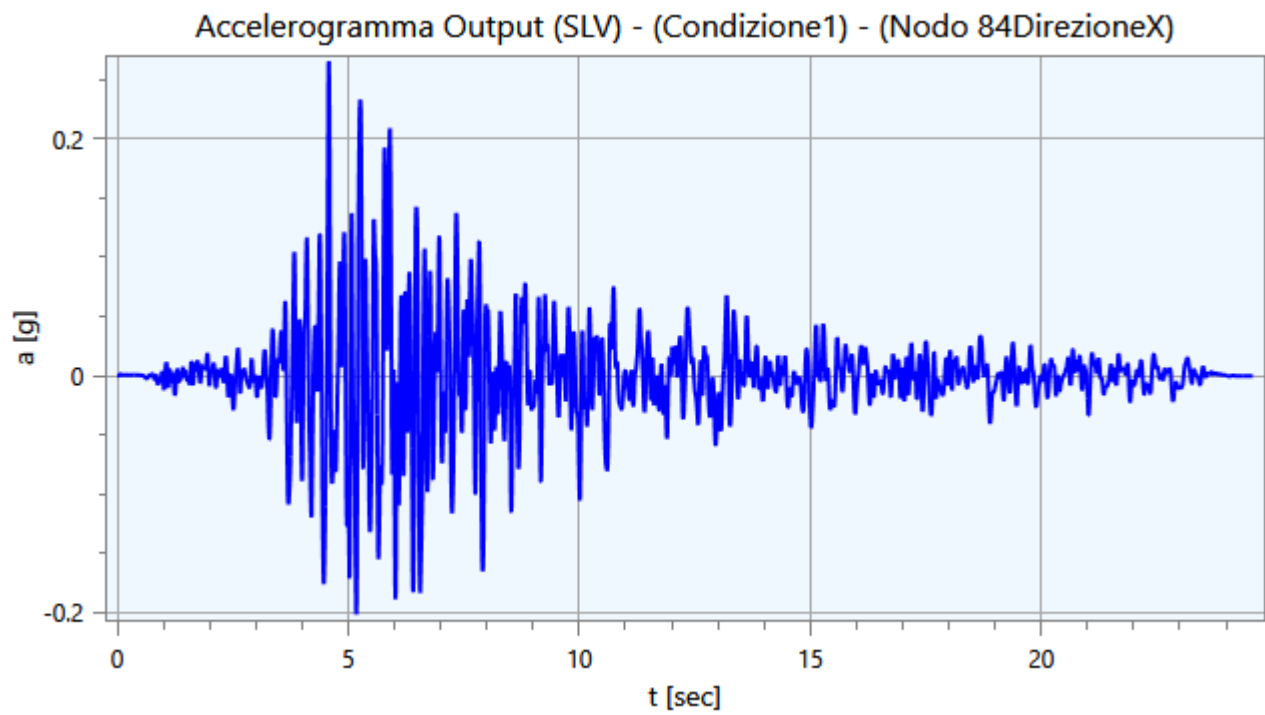
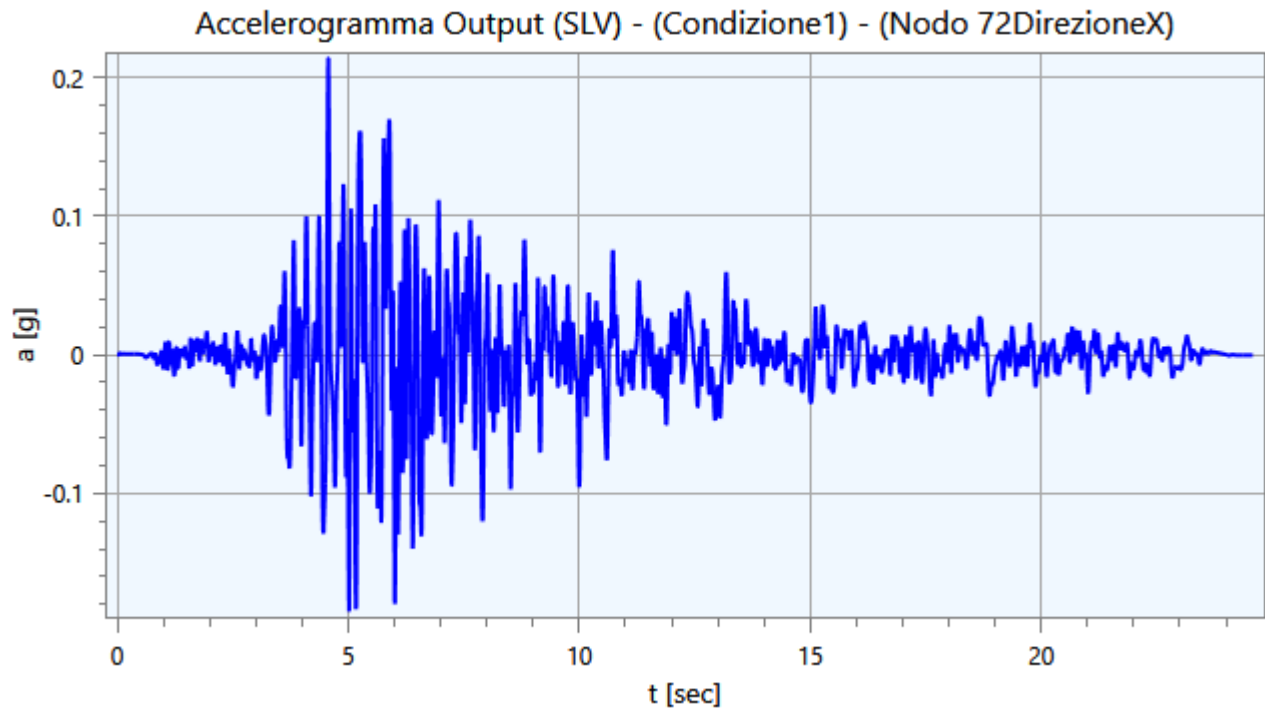
## 5 - Output

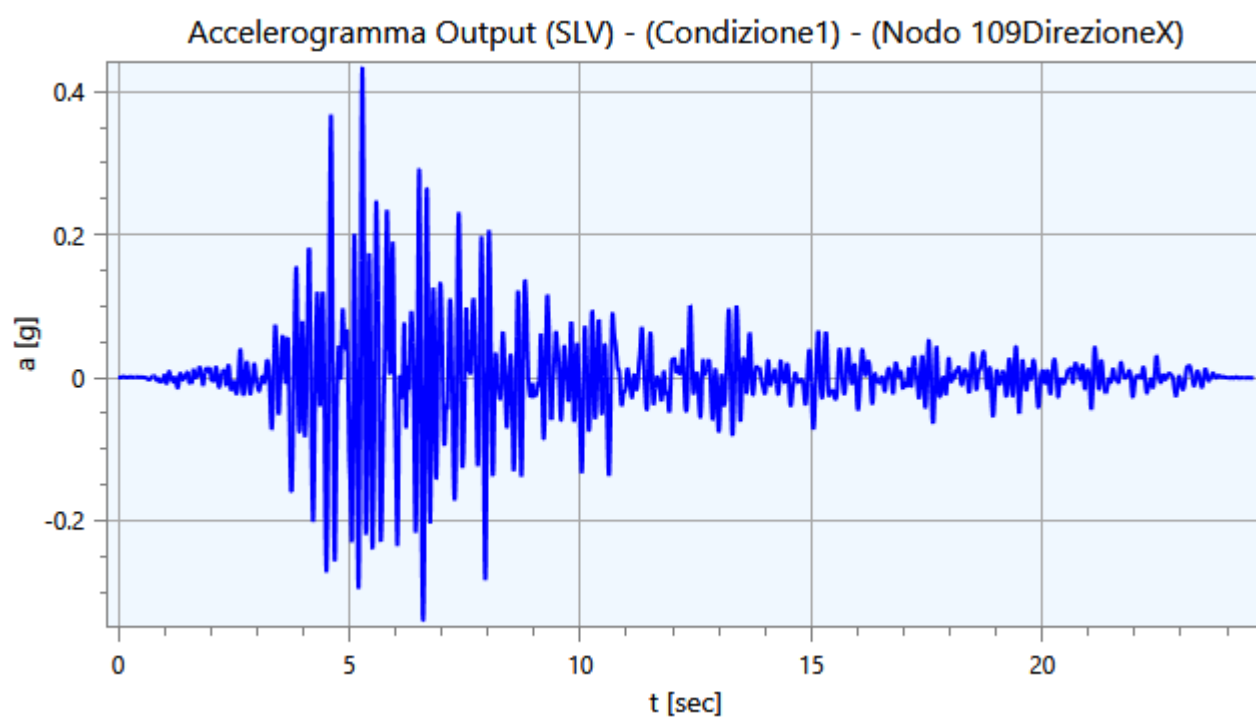
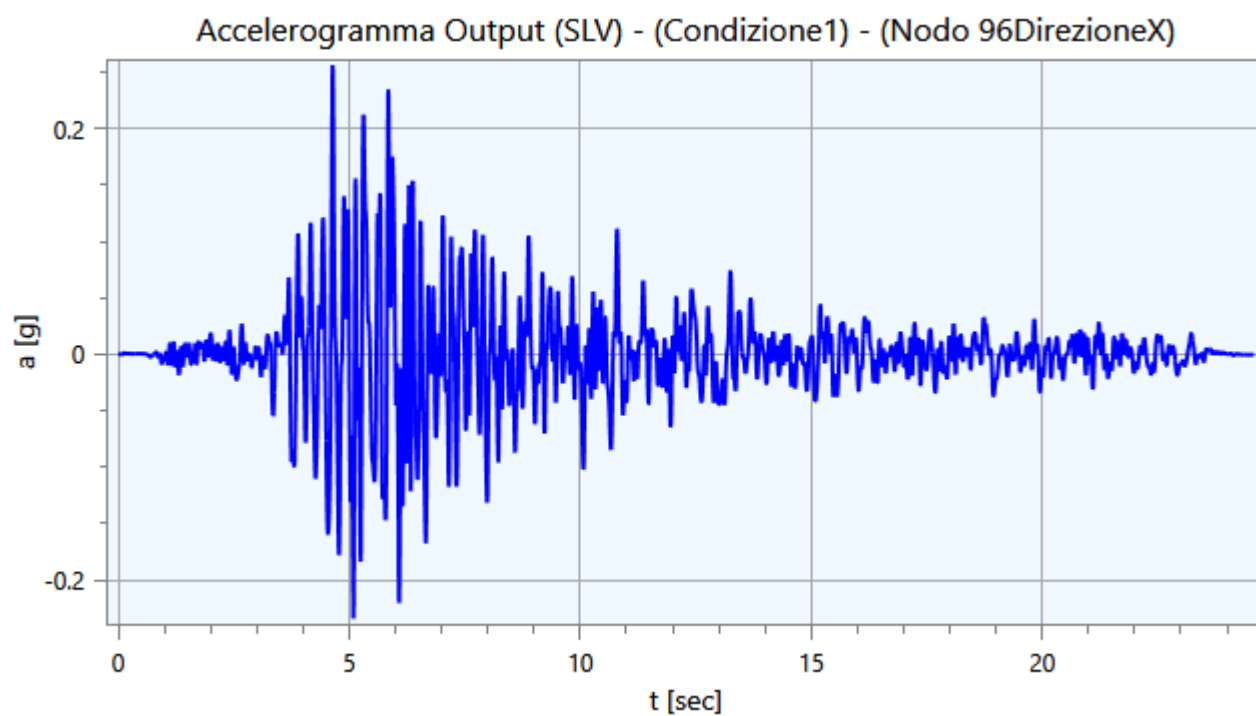
Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai risultati del calcolo.

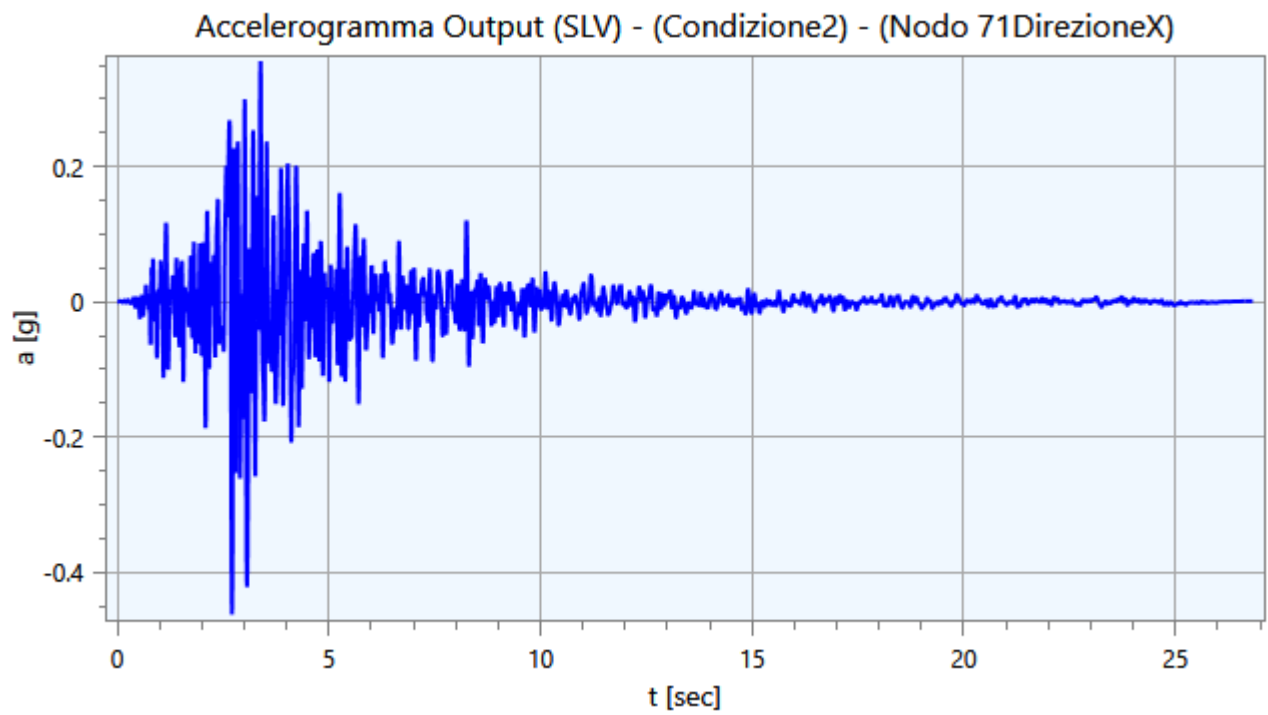
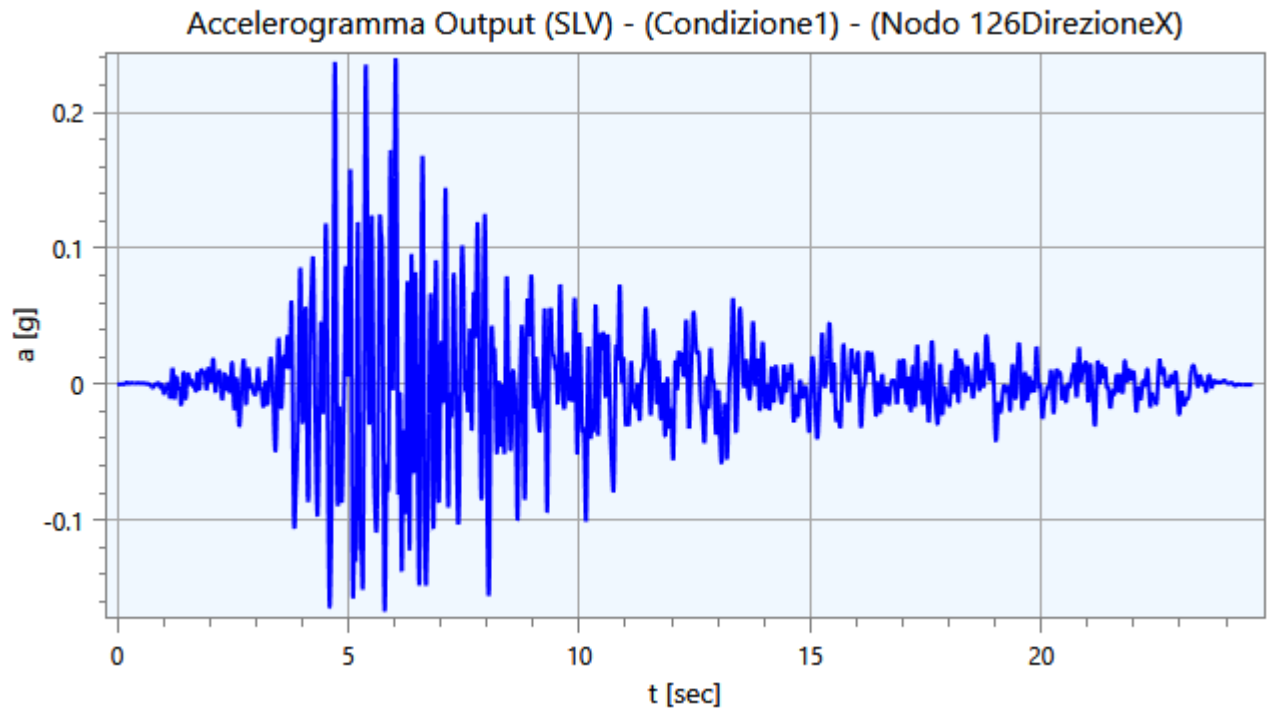
### 5.1 - Accelerogrammi Output

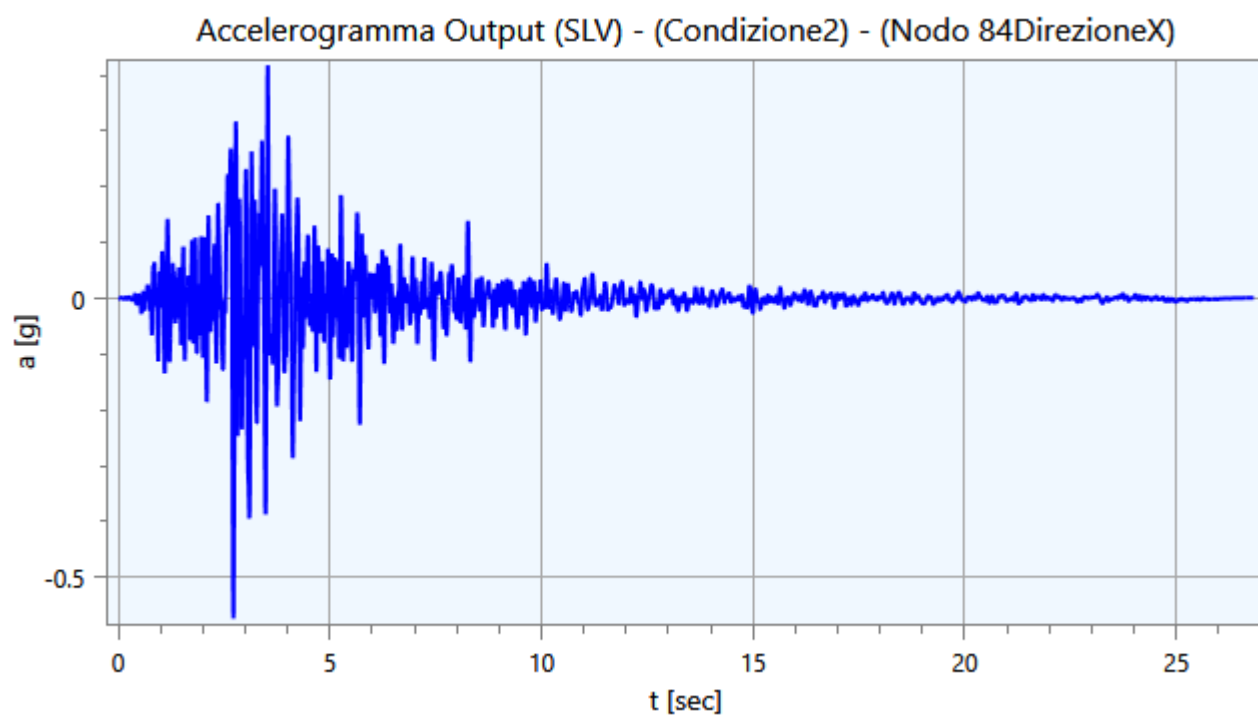
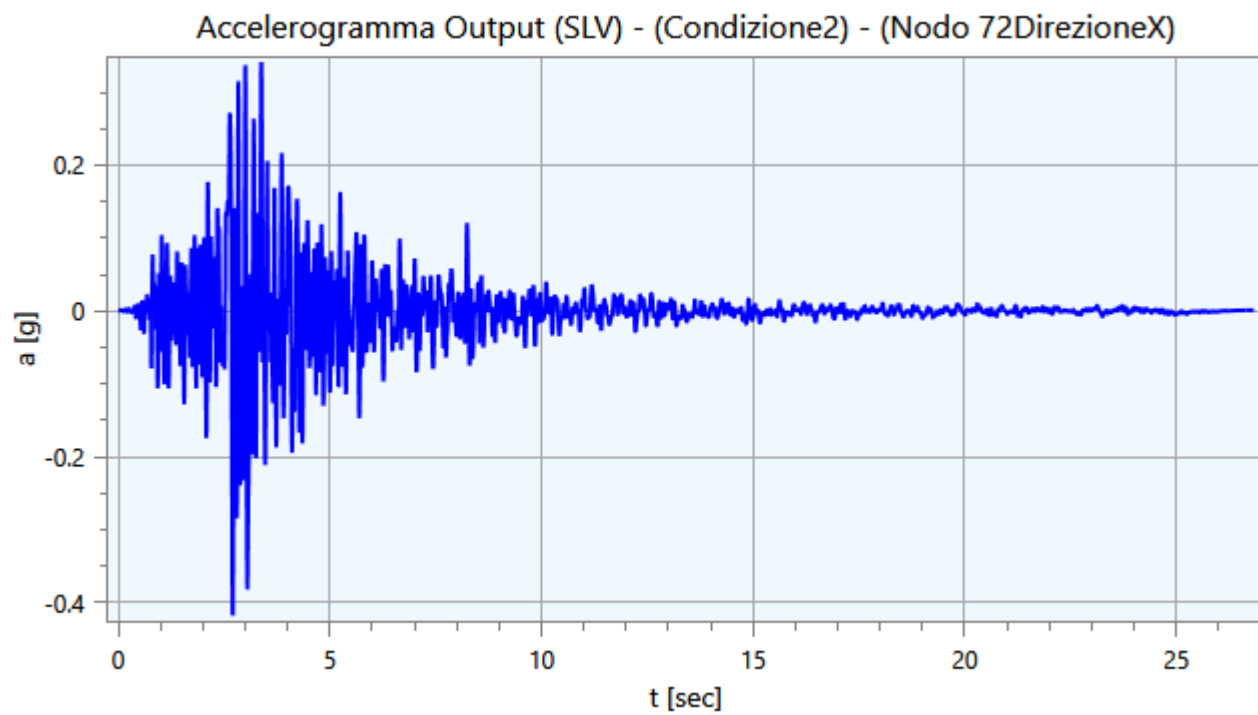
Di seguito vengono riportati gli accelerogrammi relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

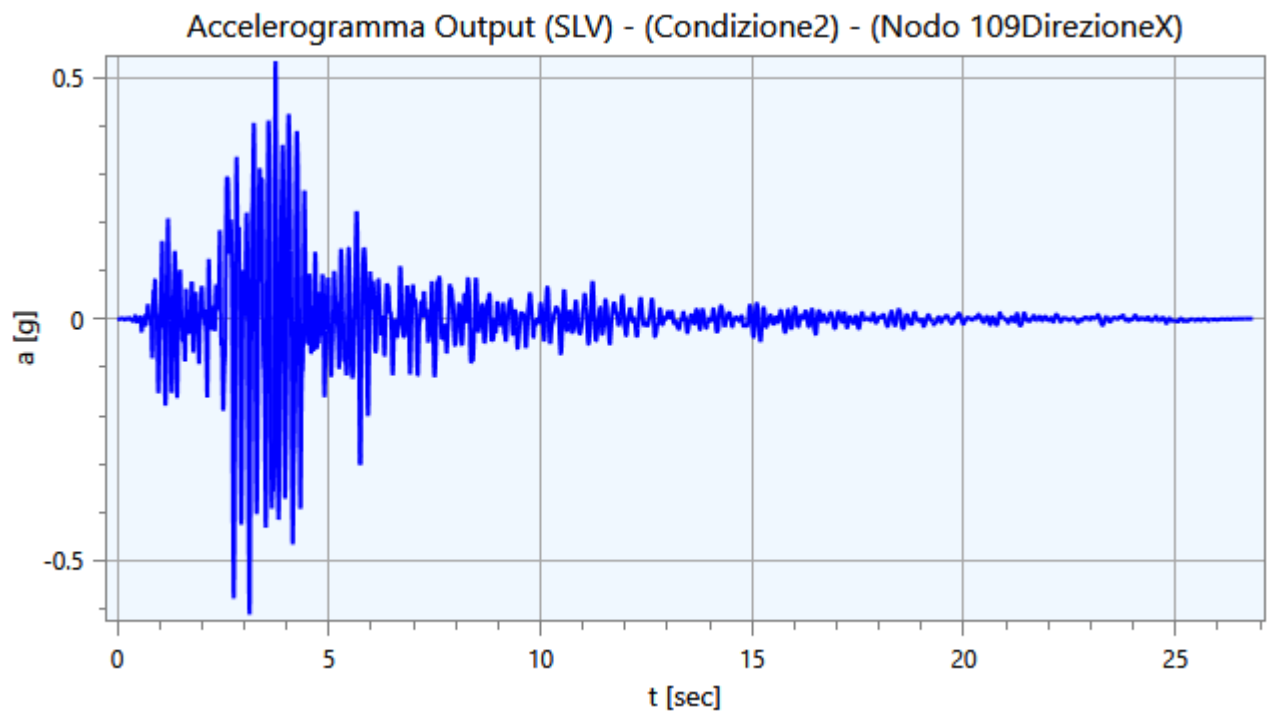
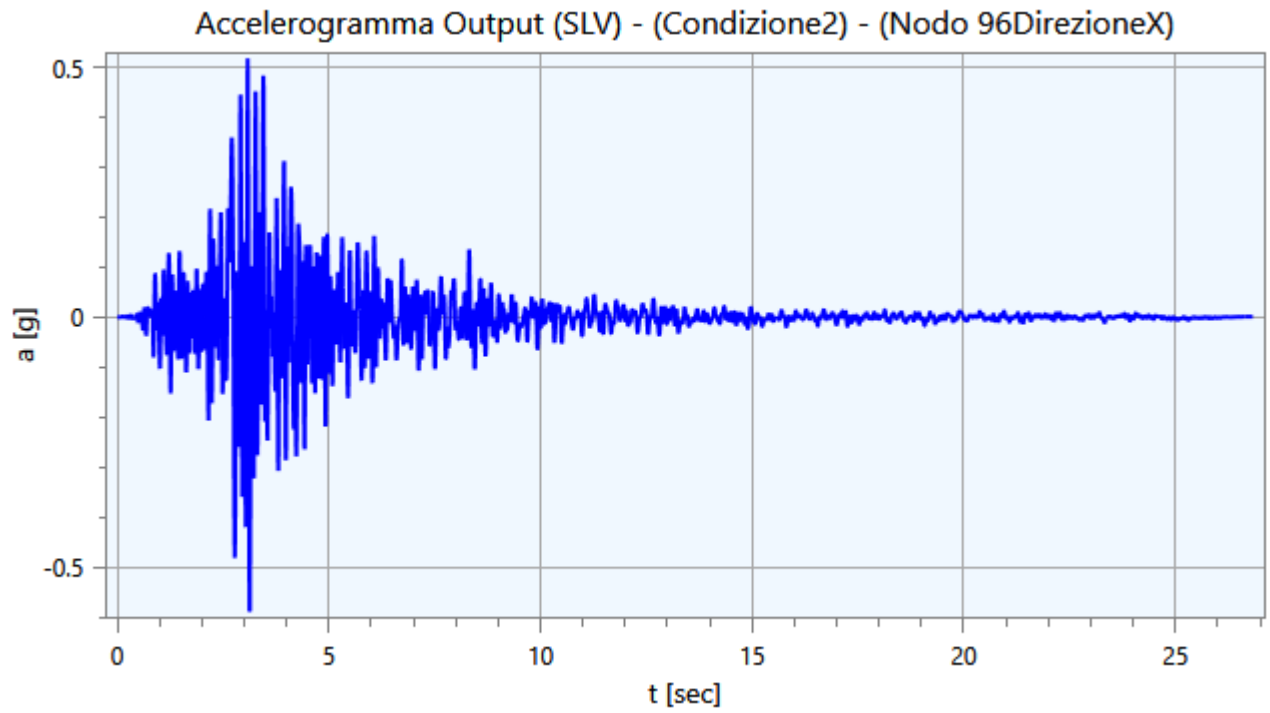


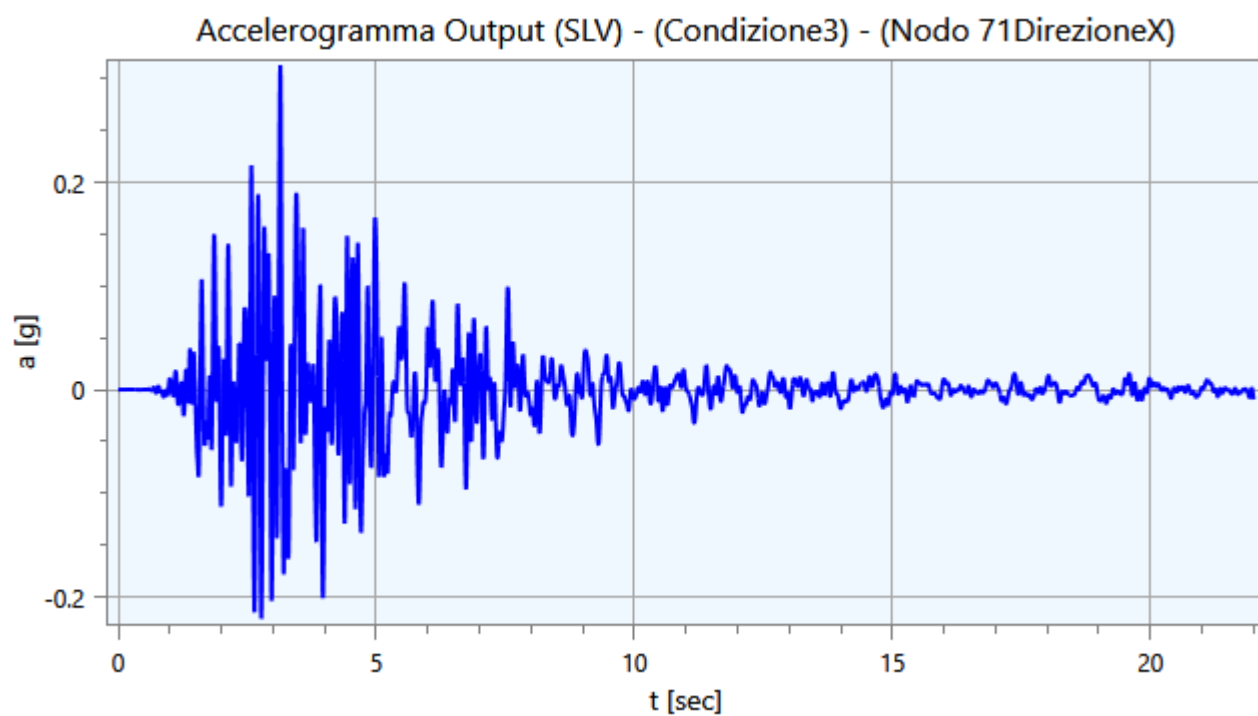
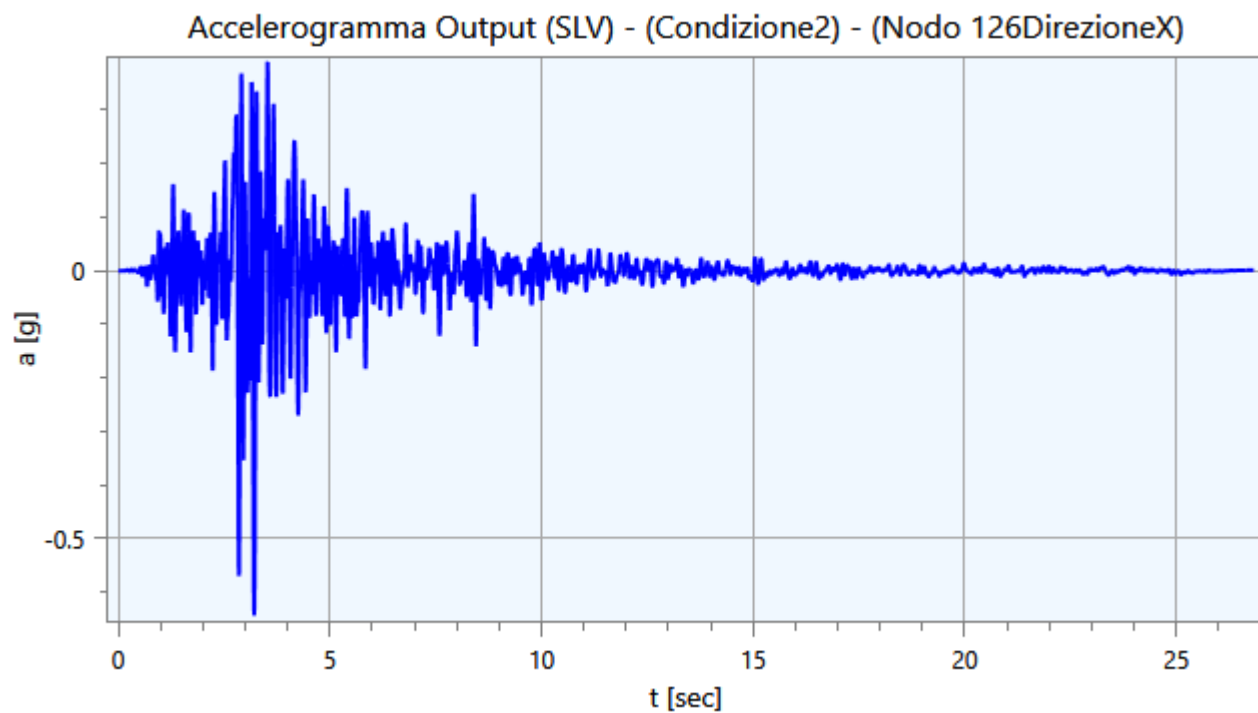




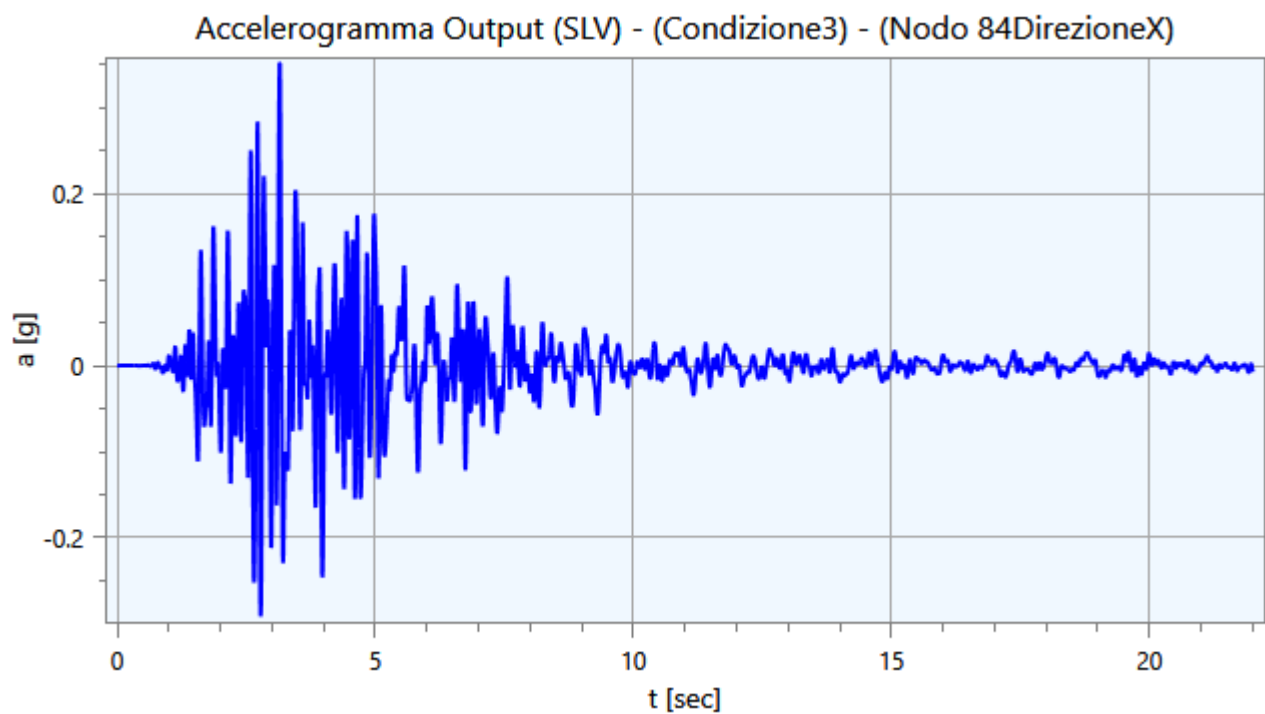
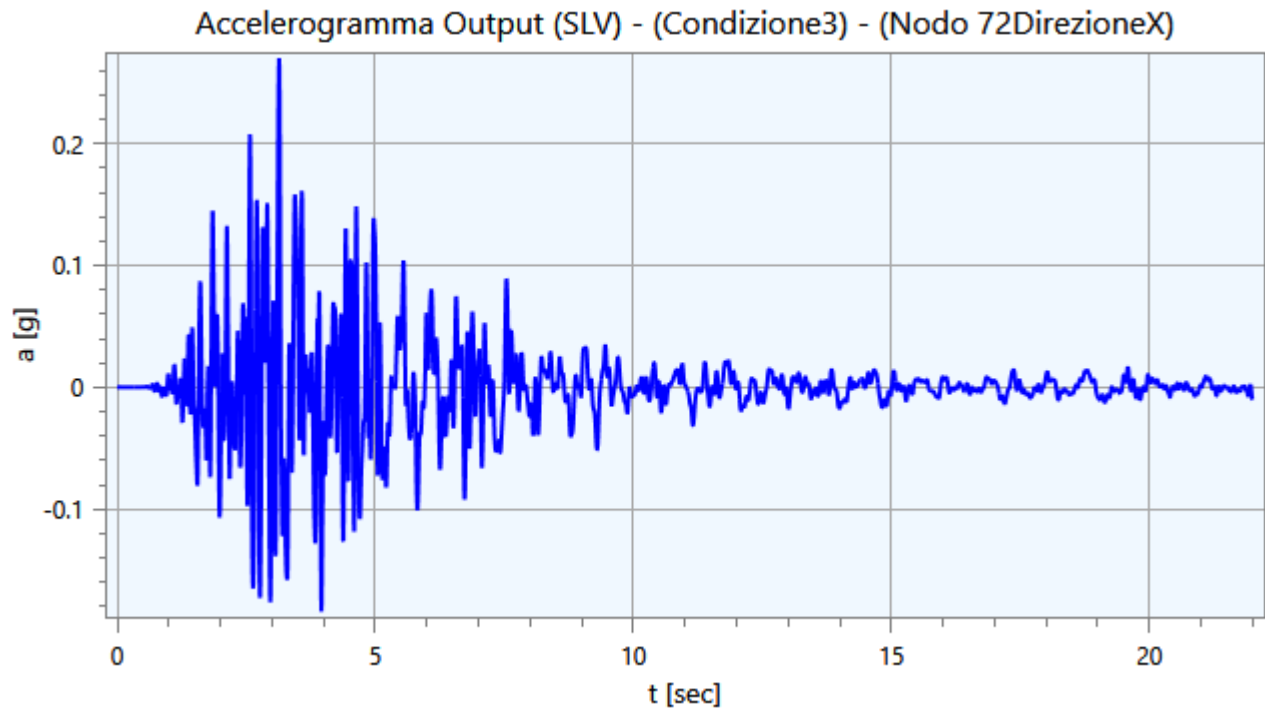


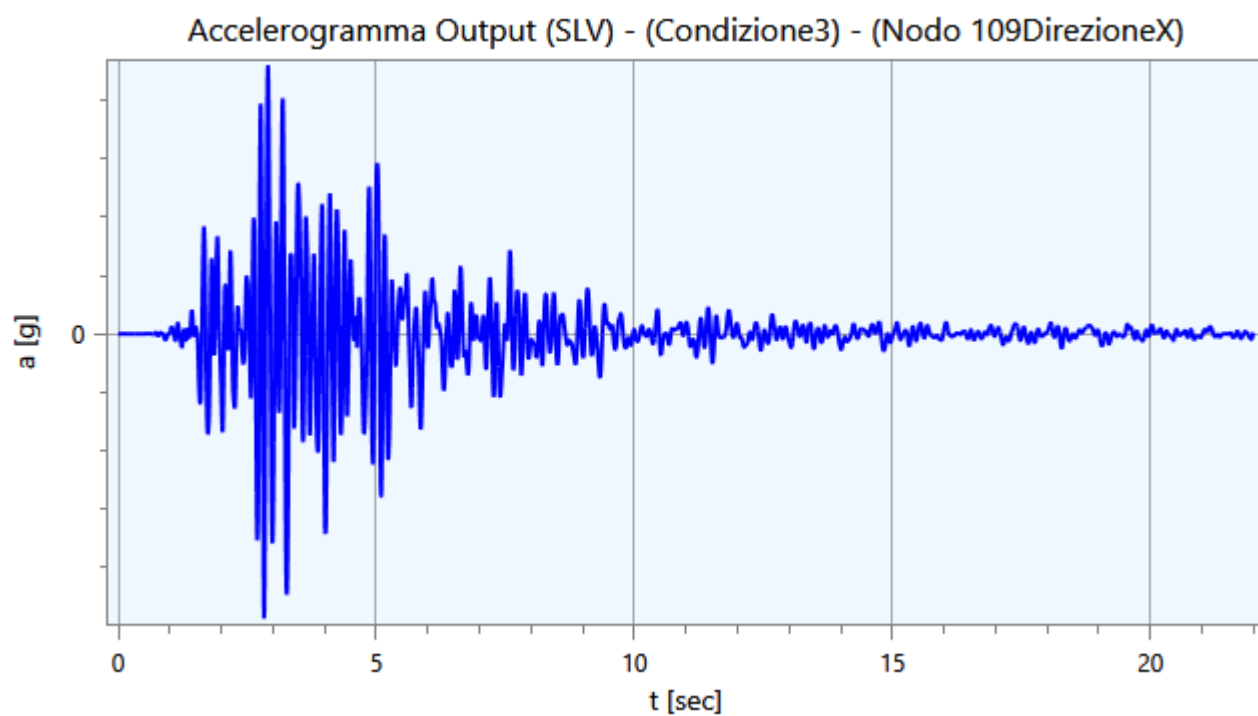
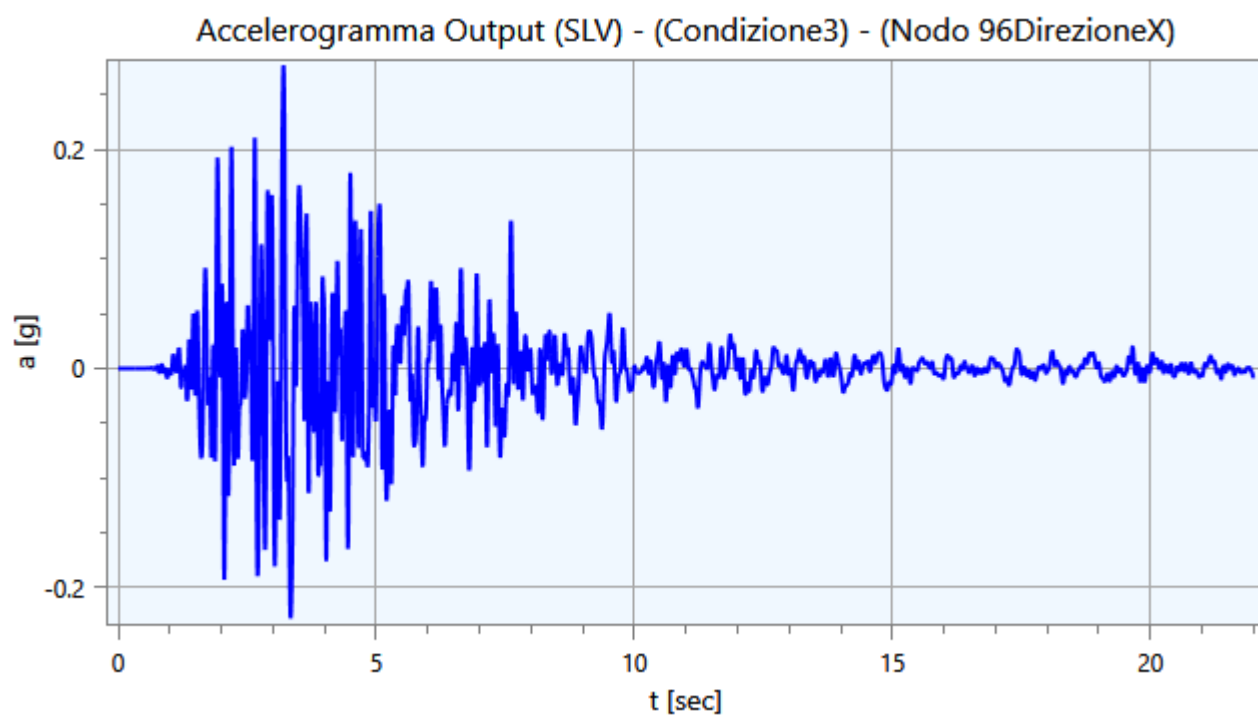


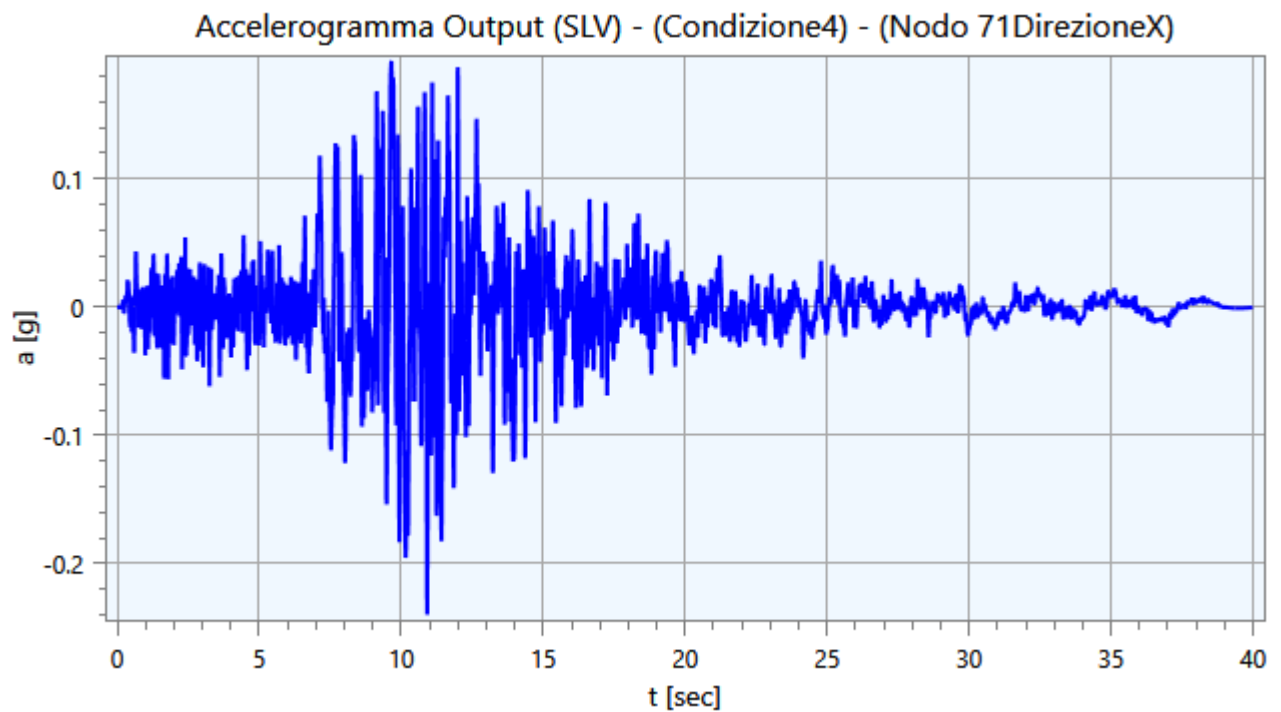
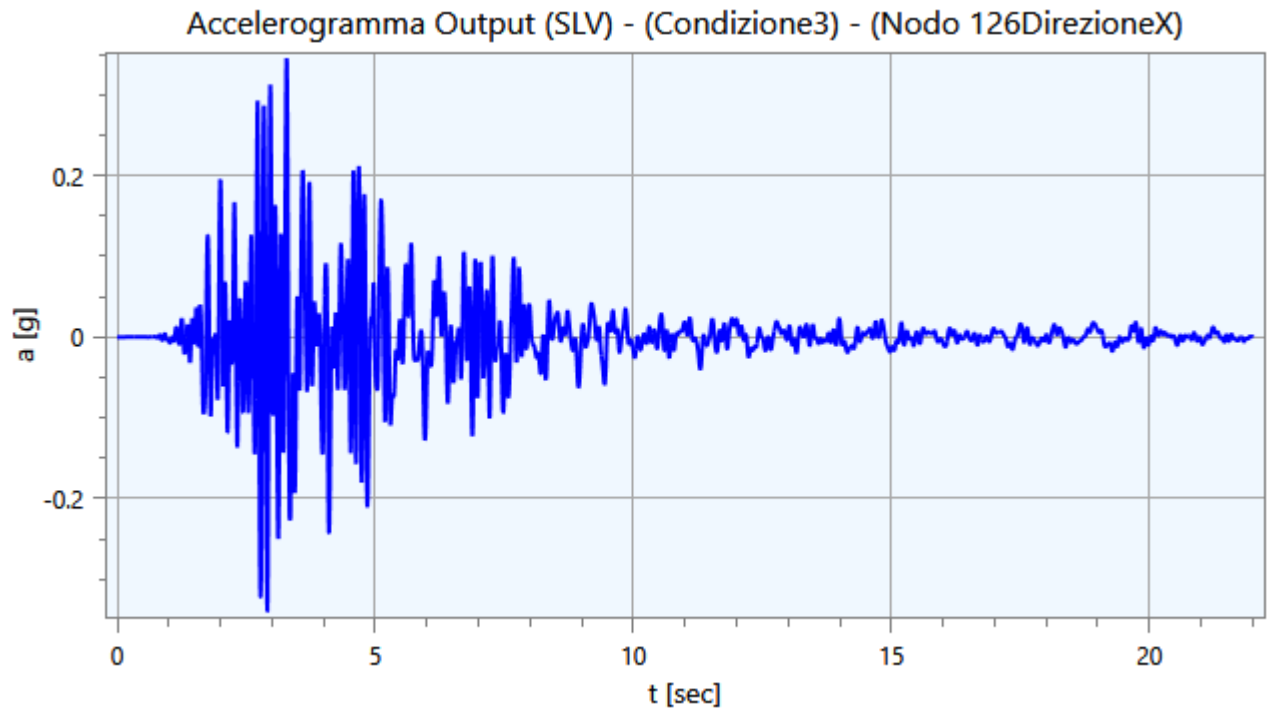


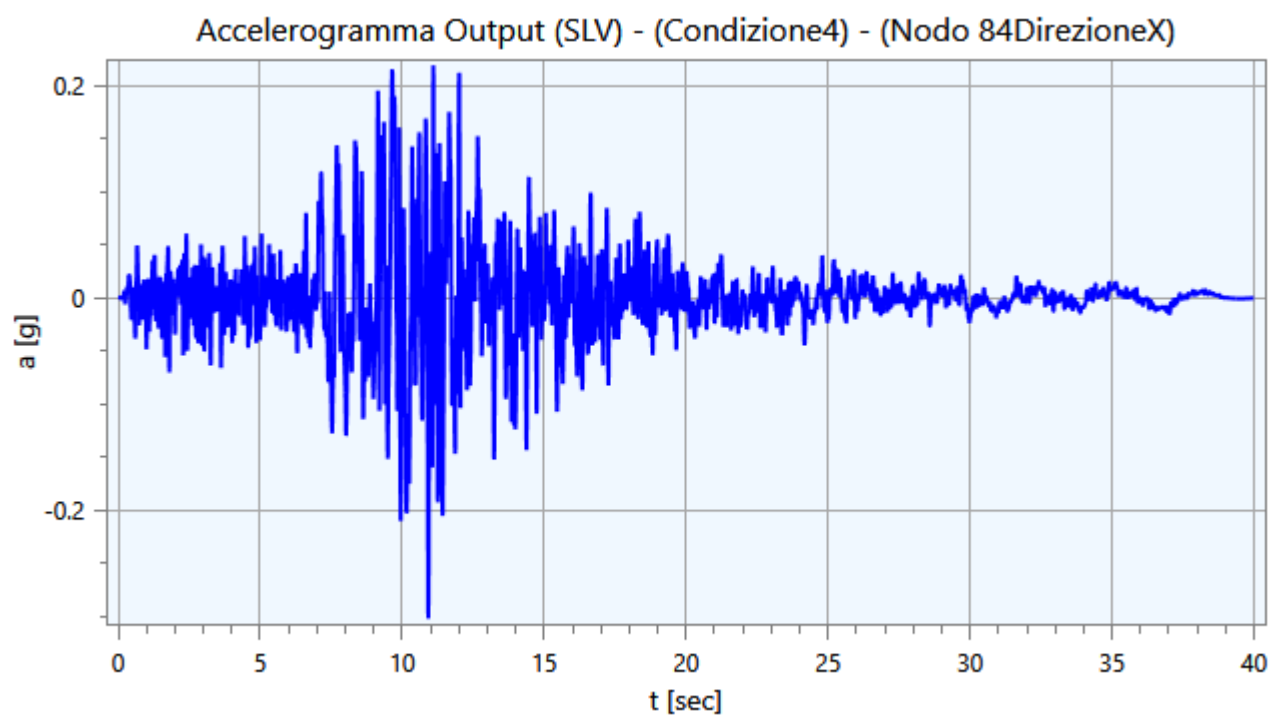
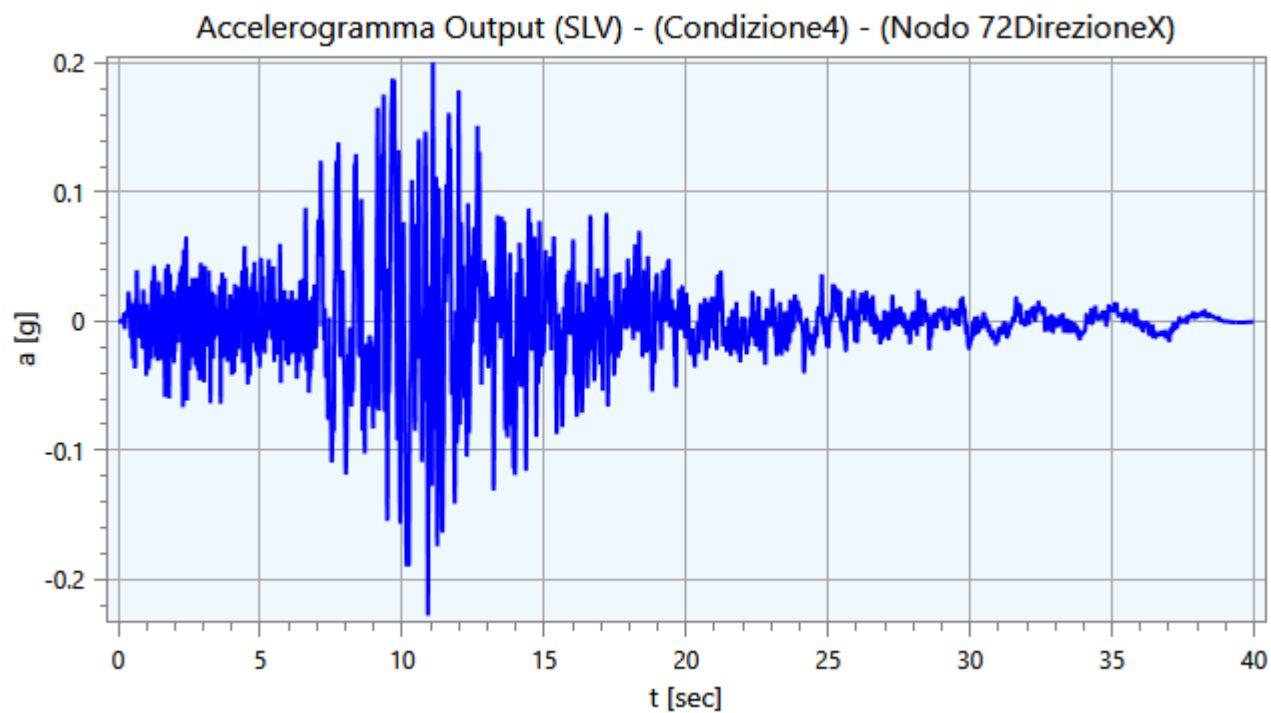


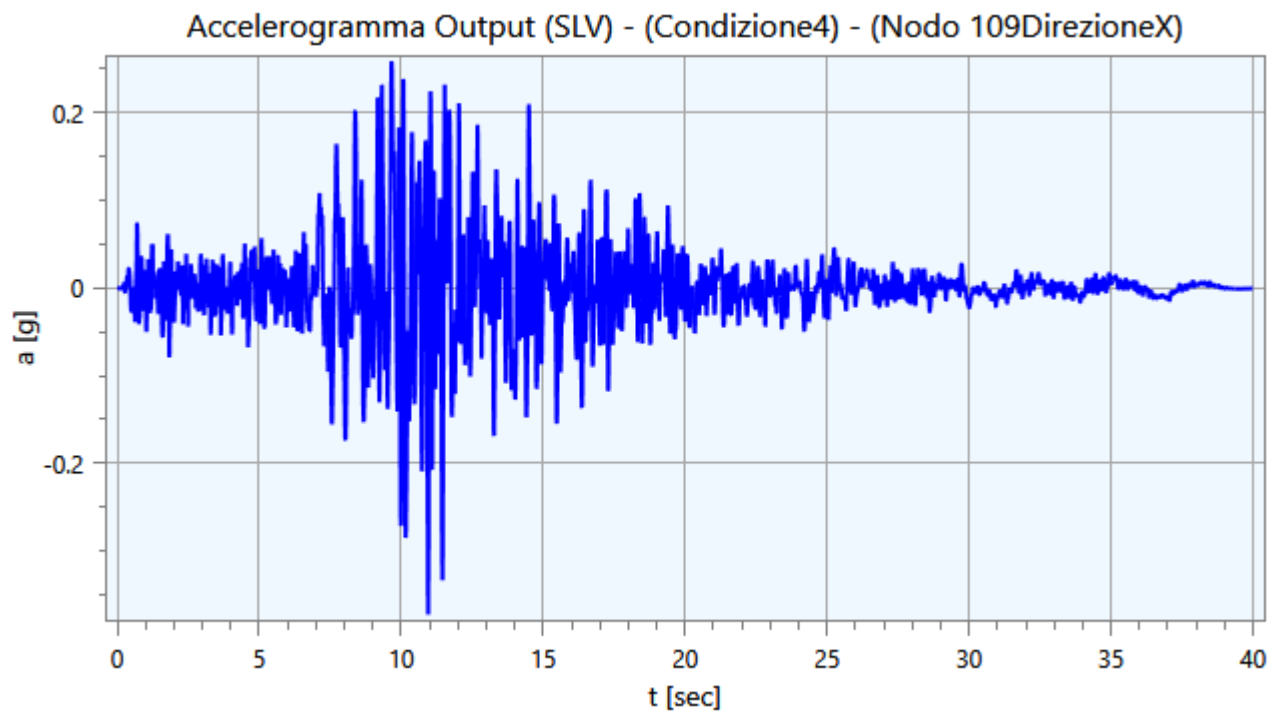
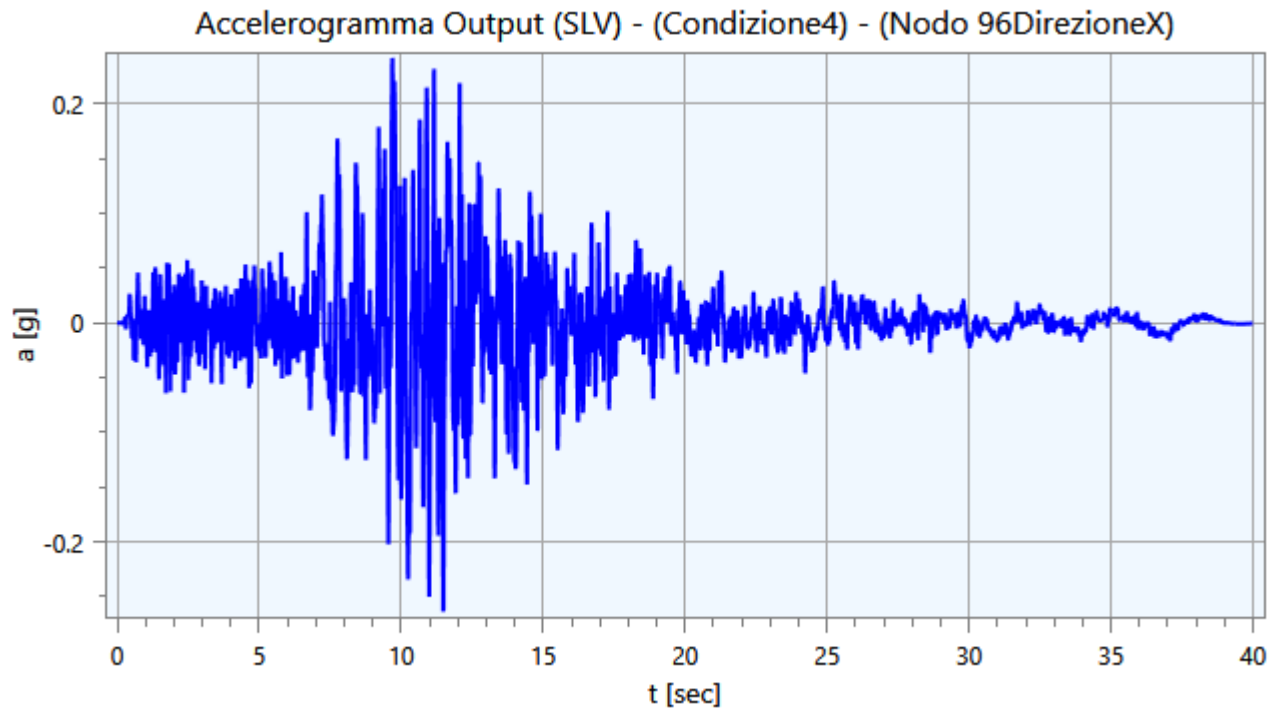


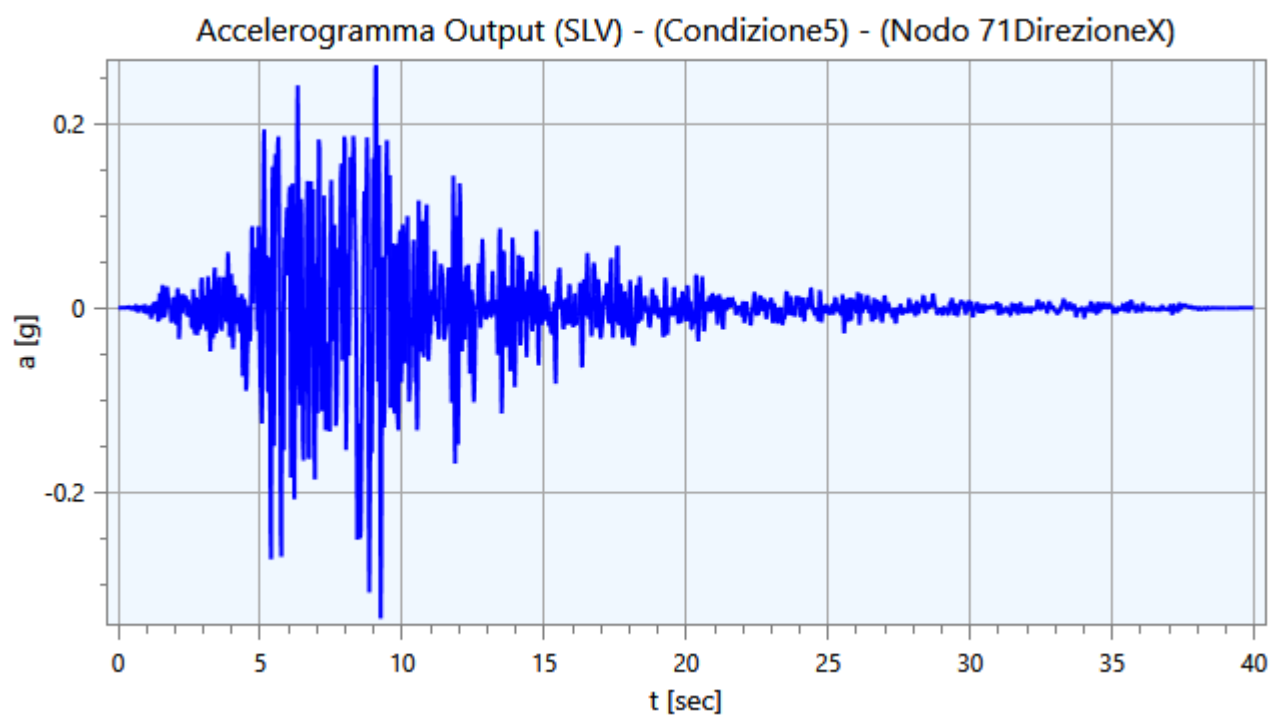
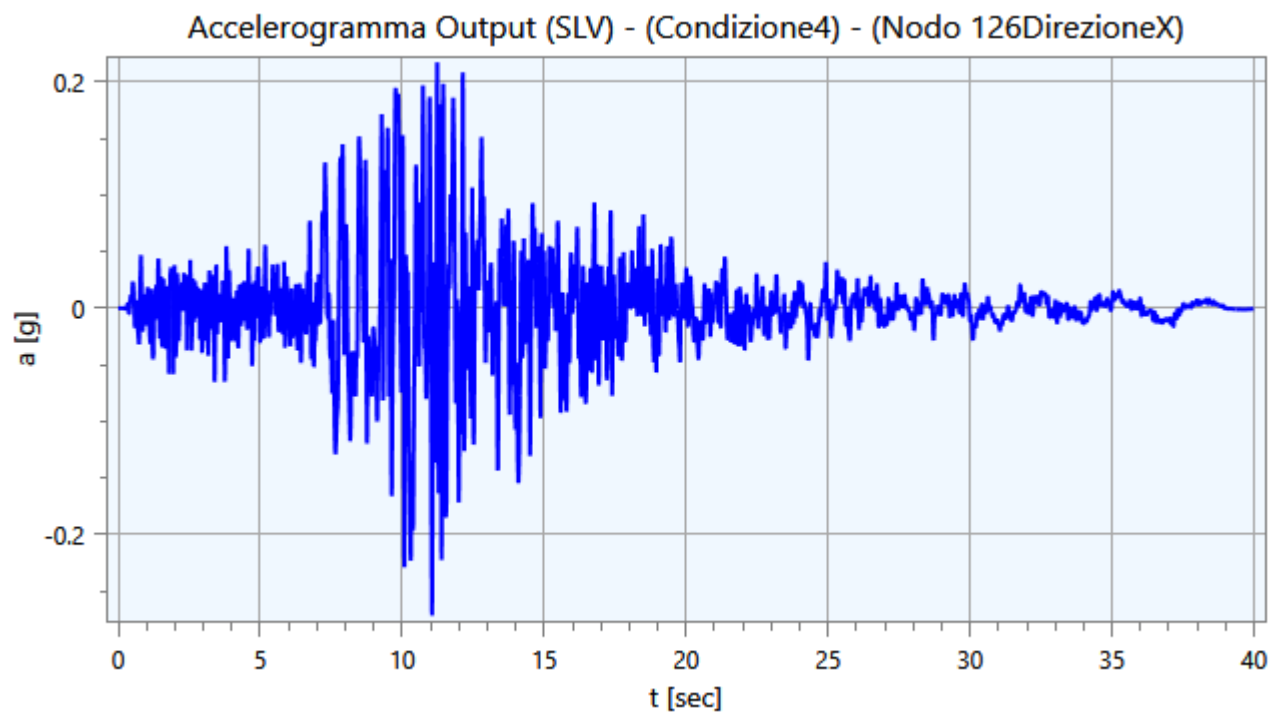


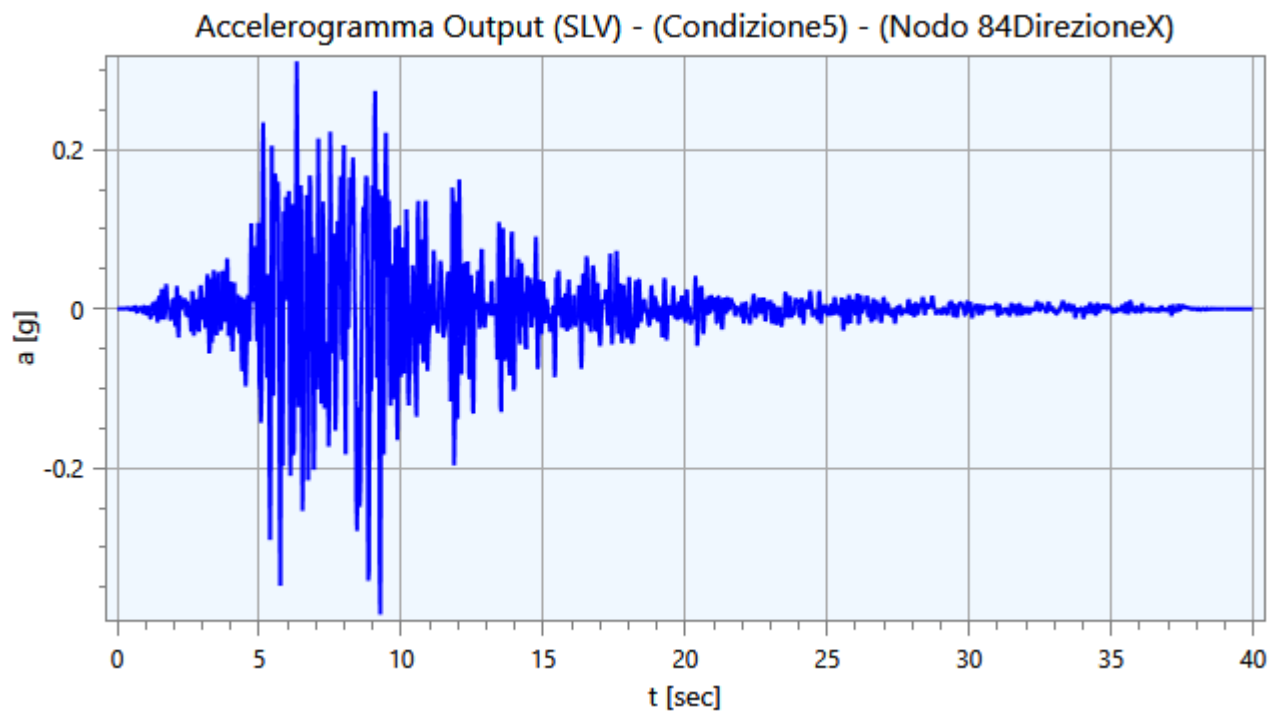
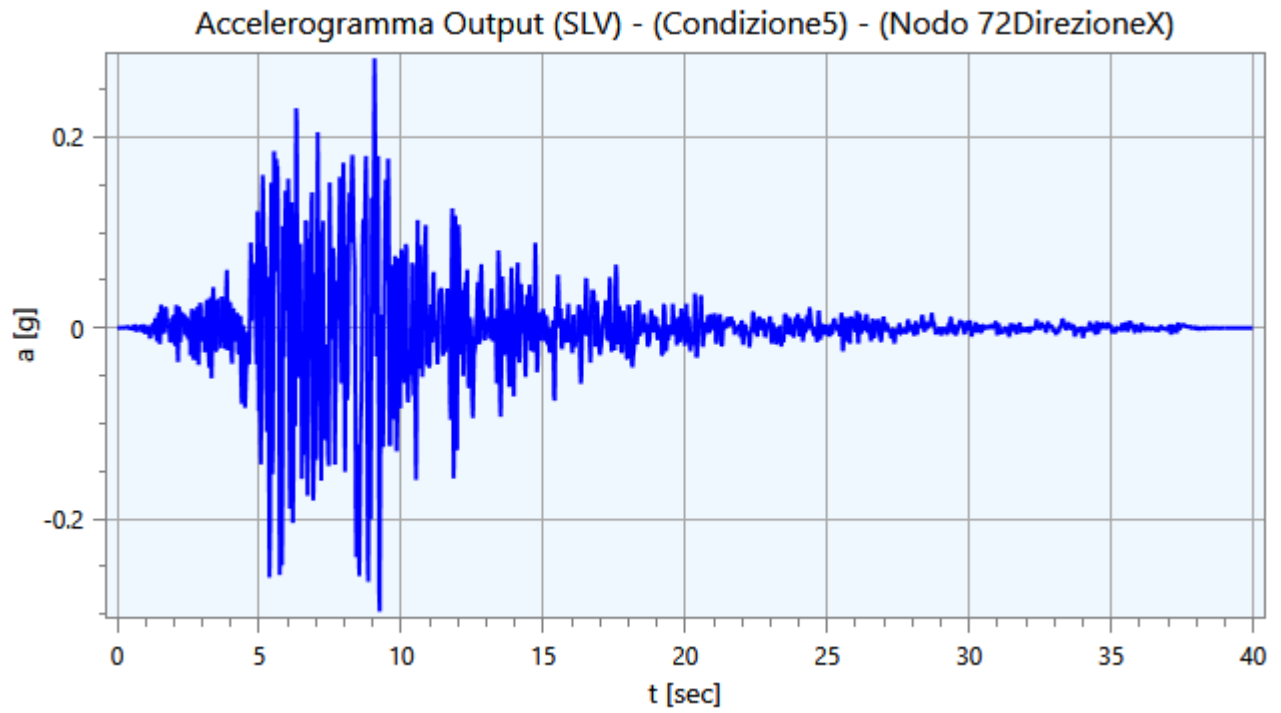


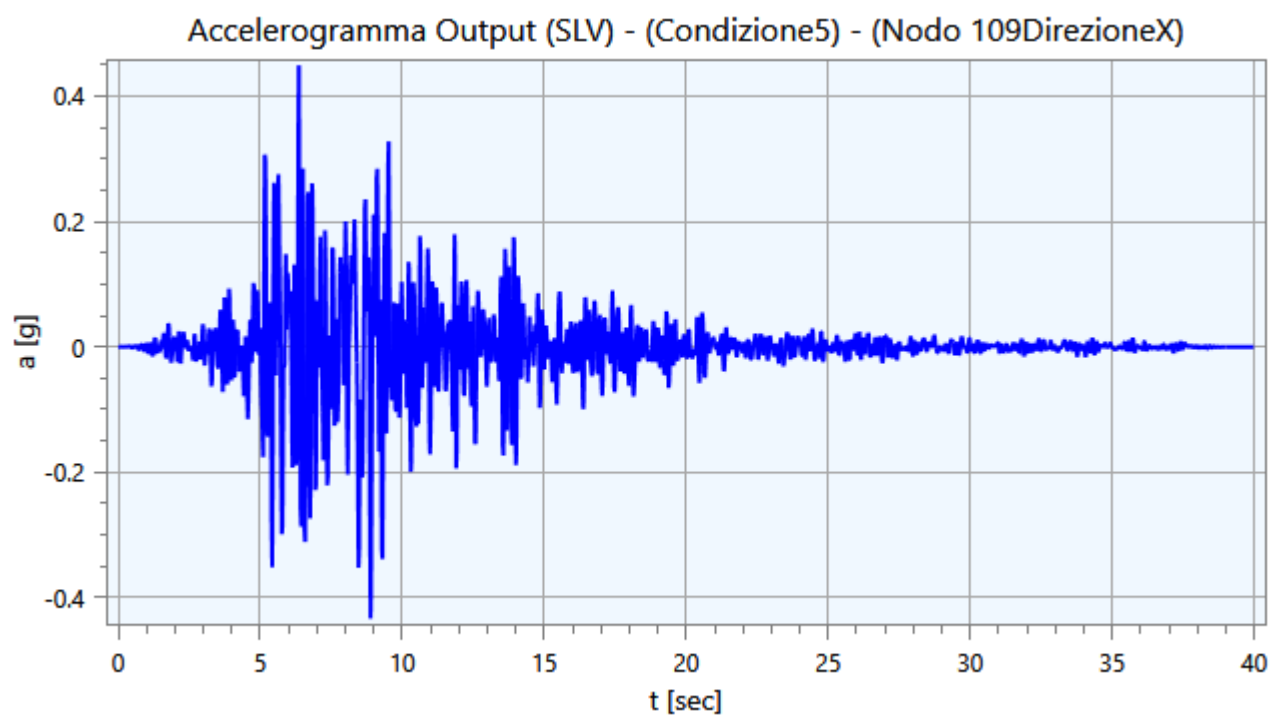
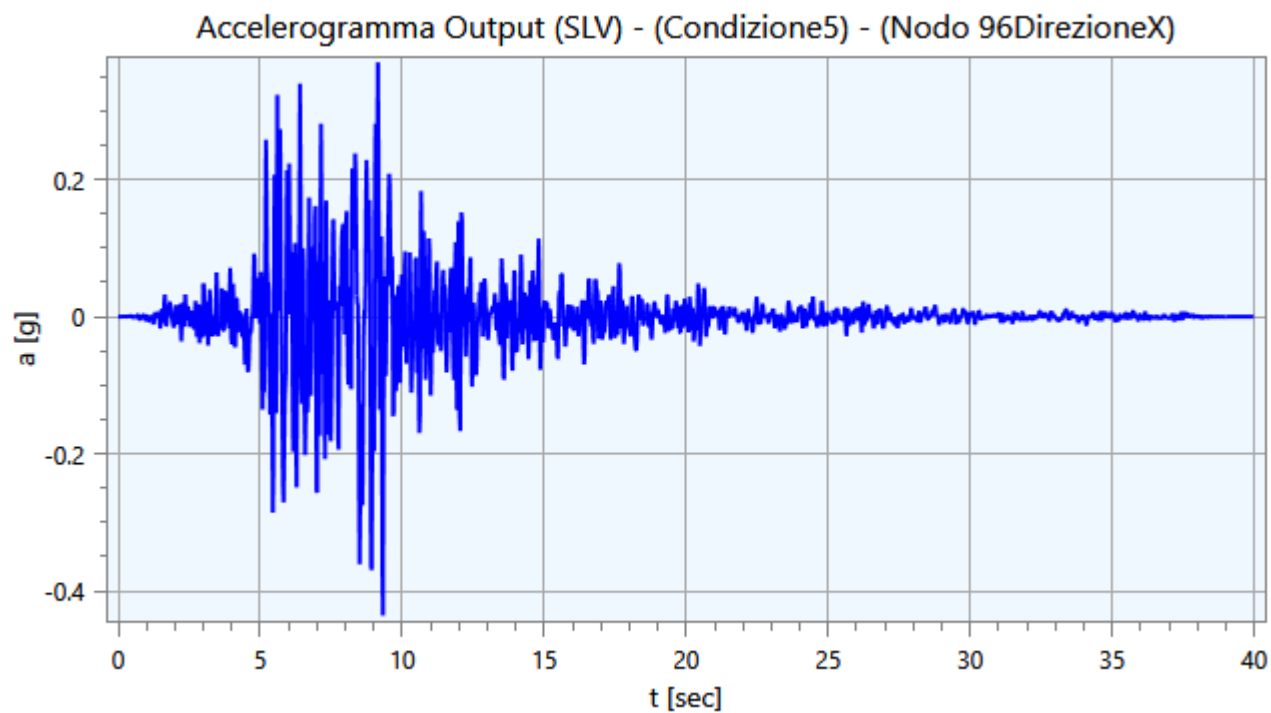




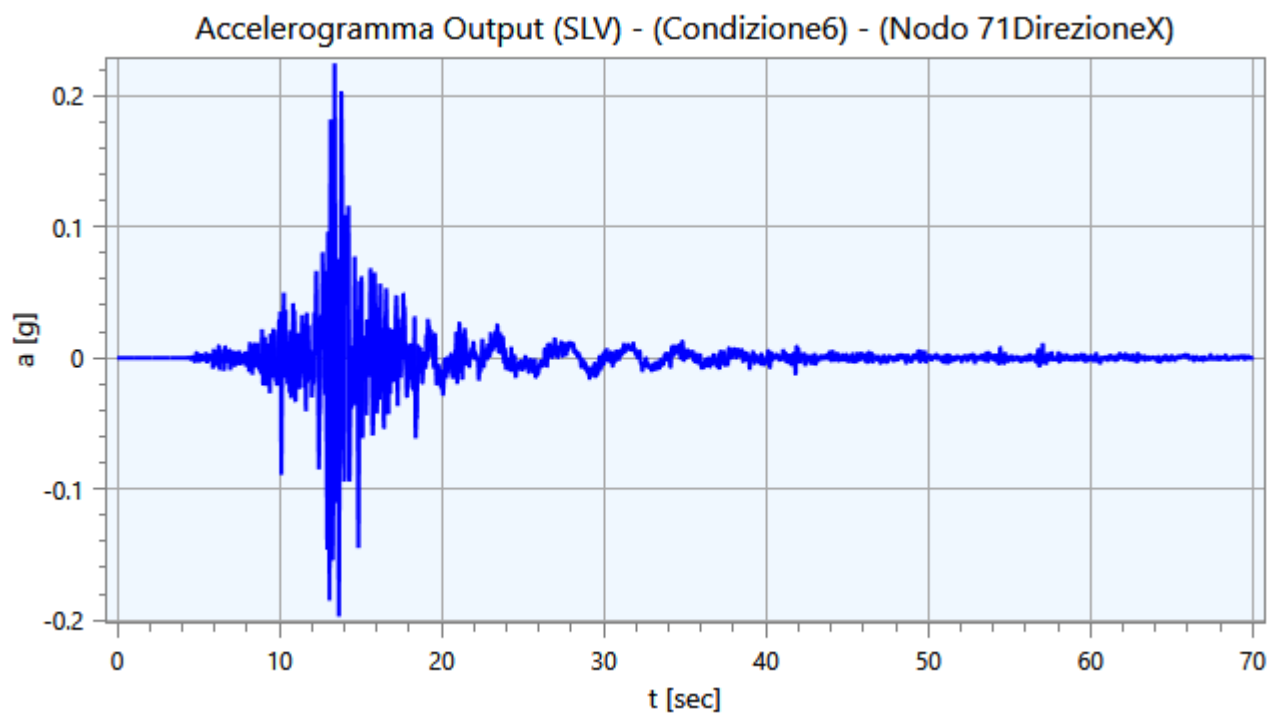
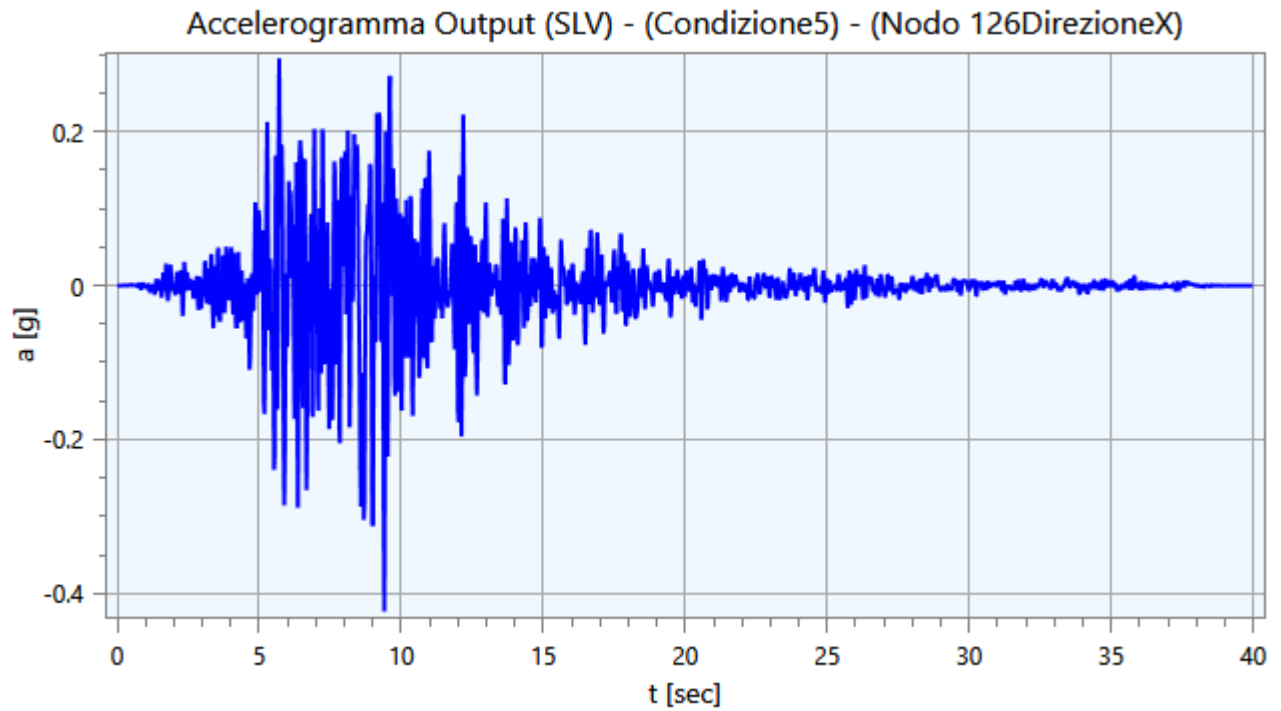


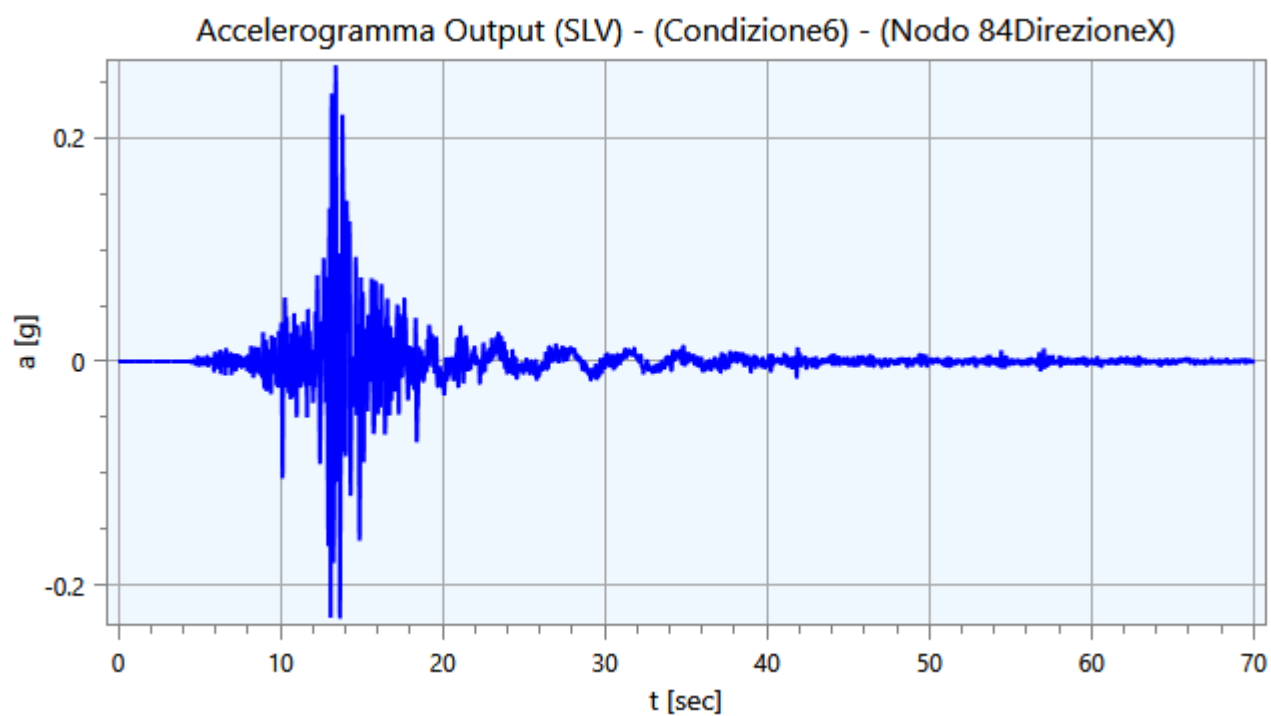
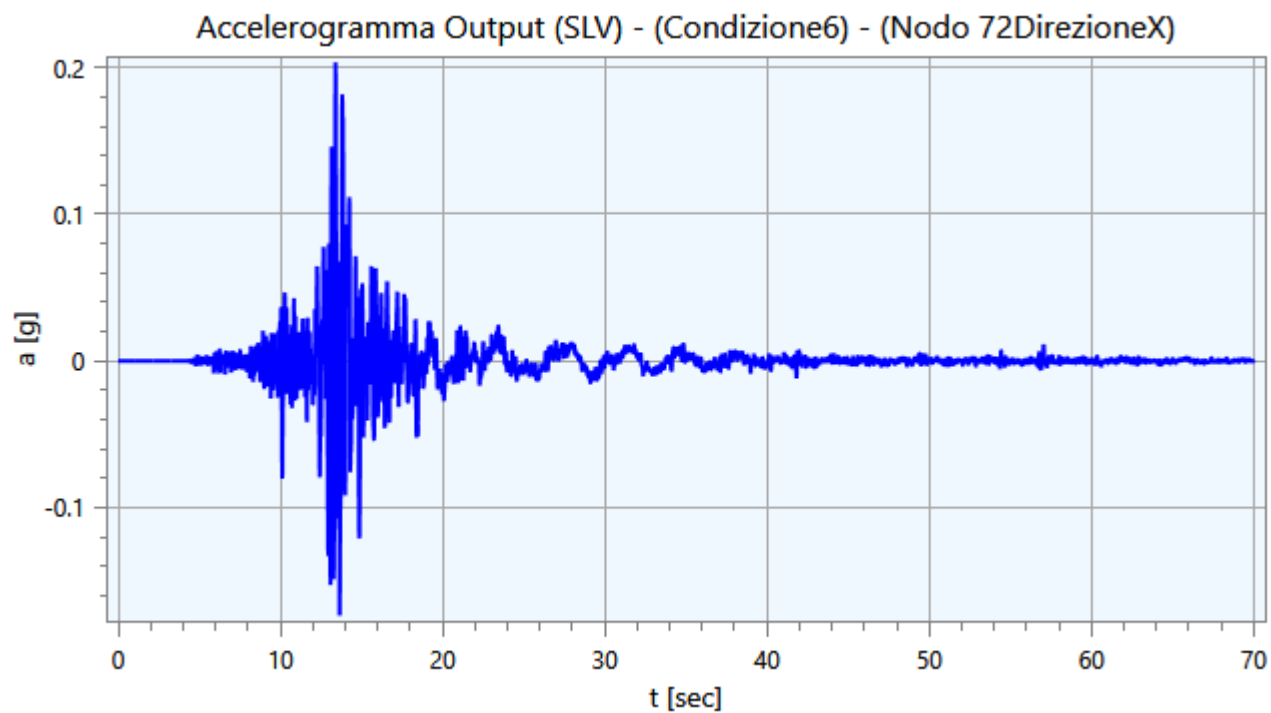


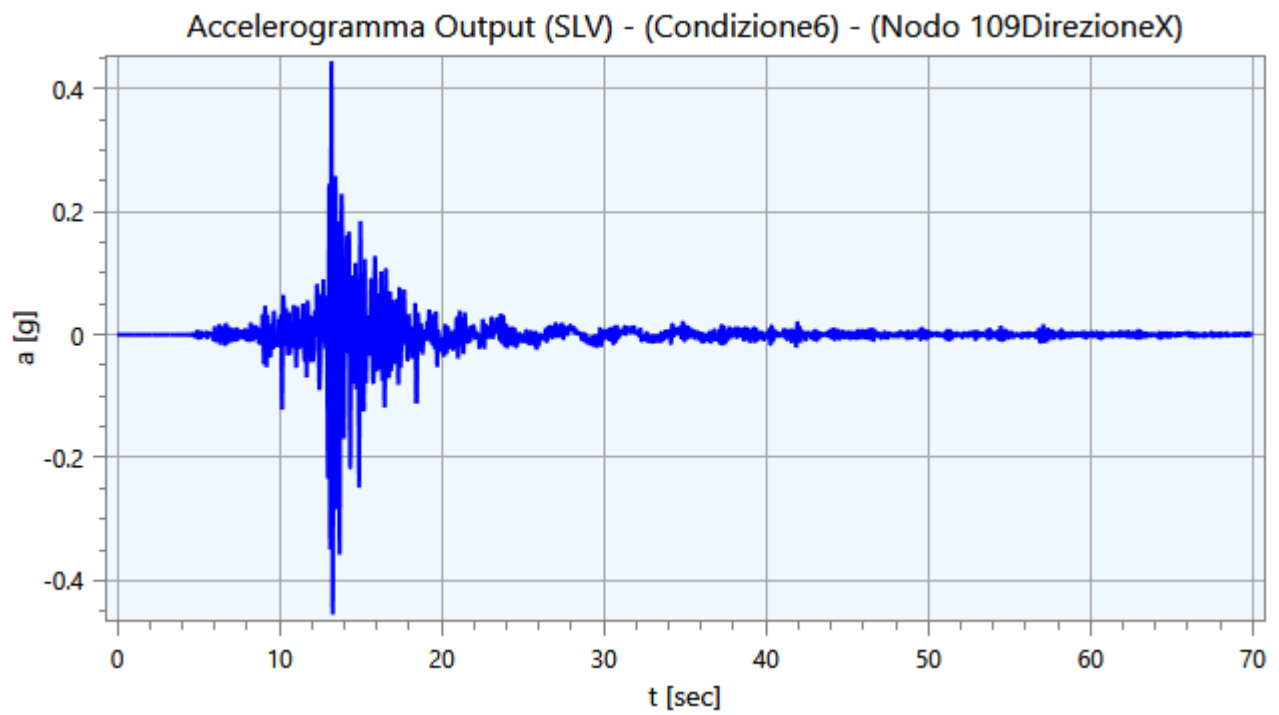
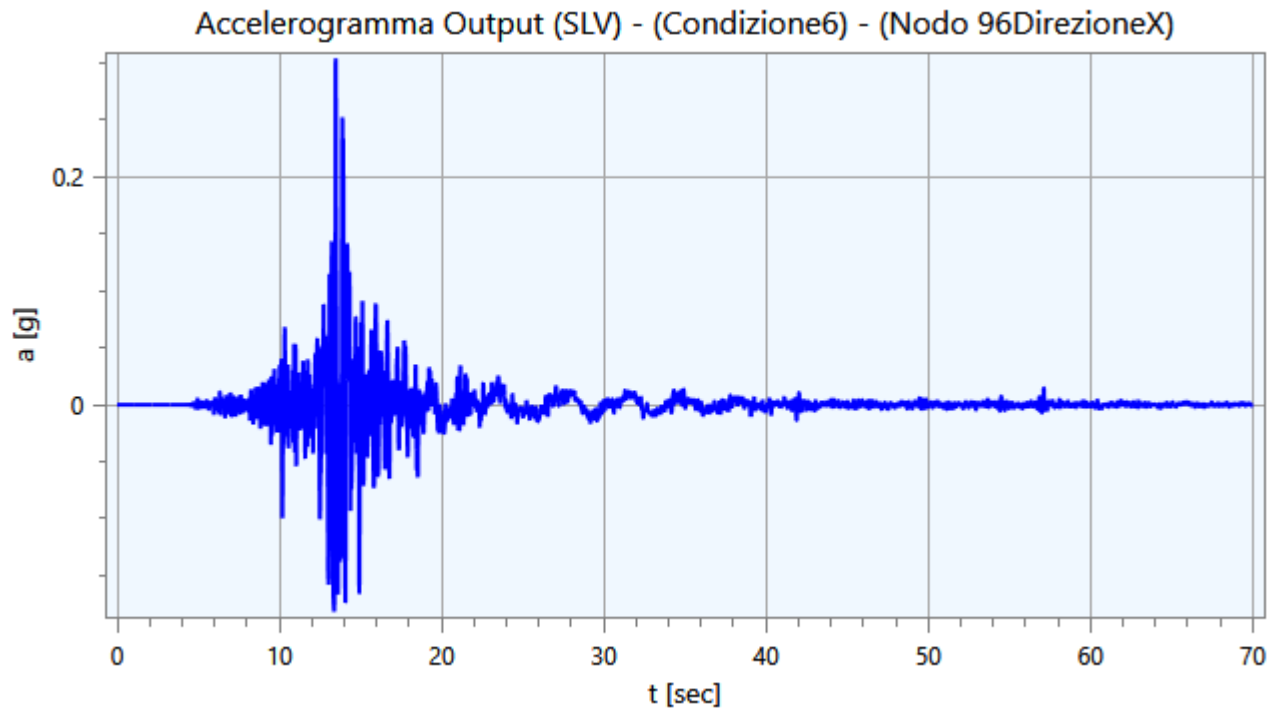


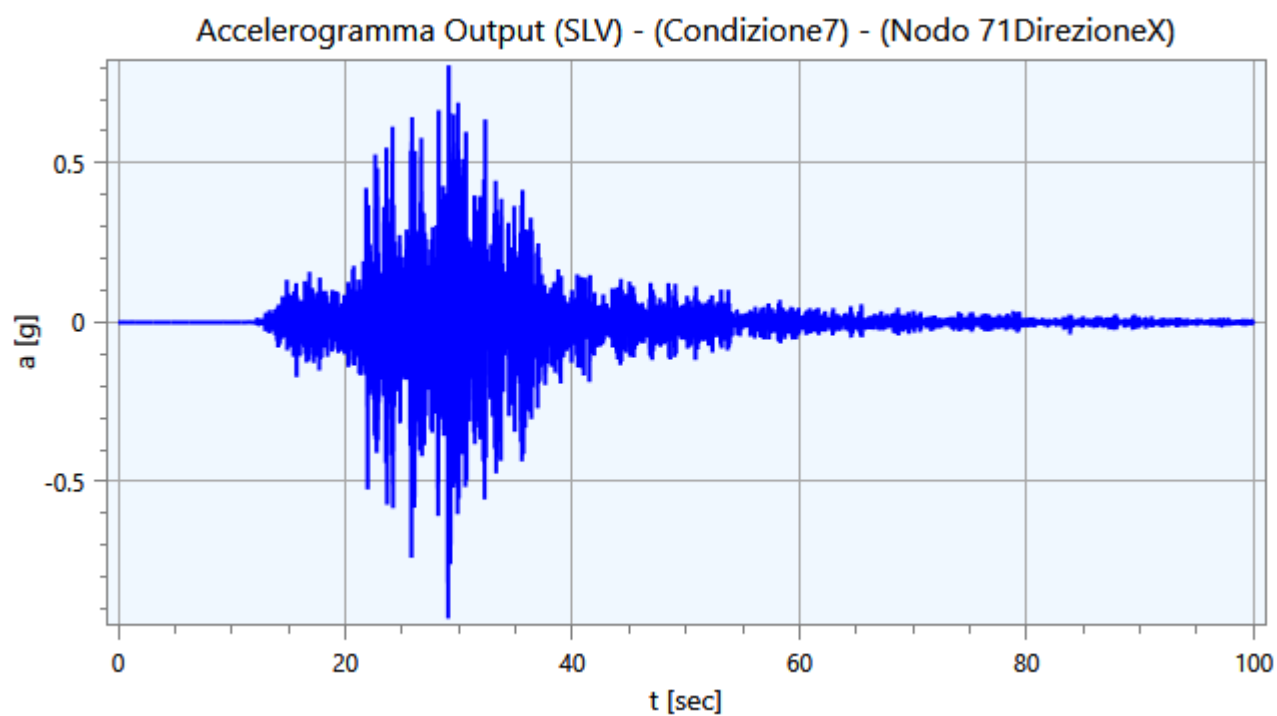
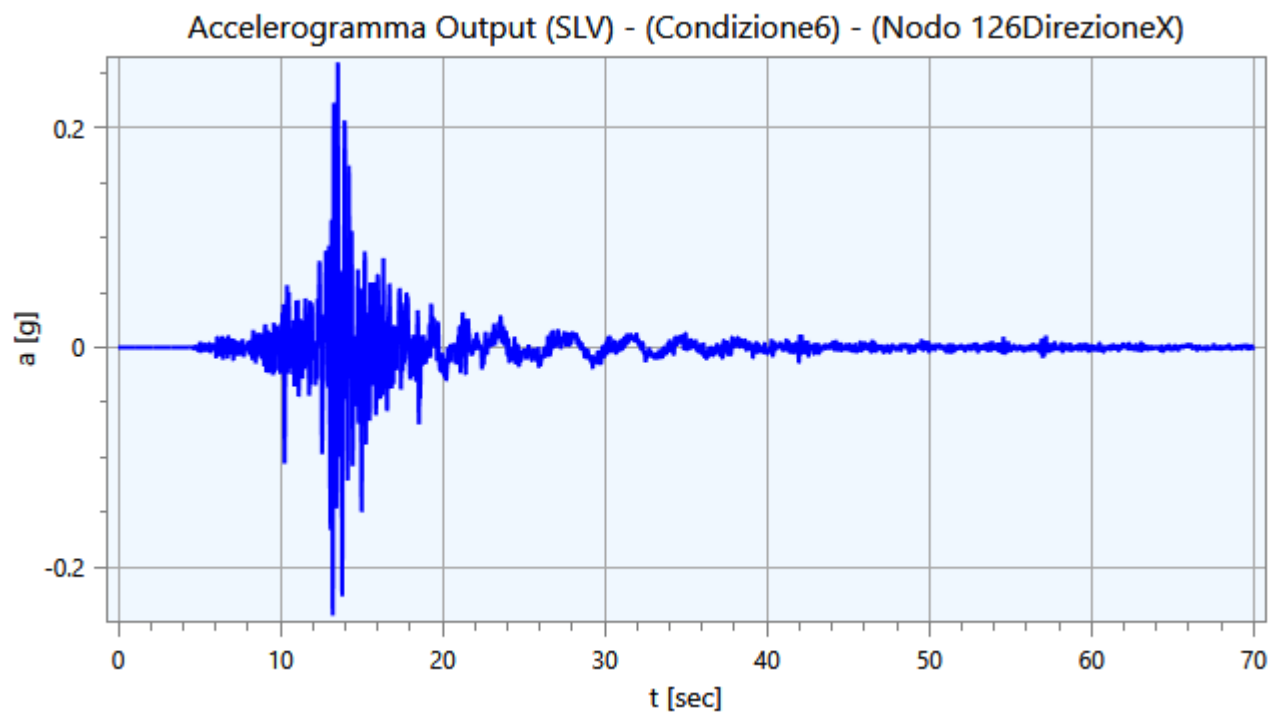


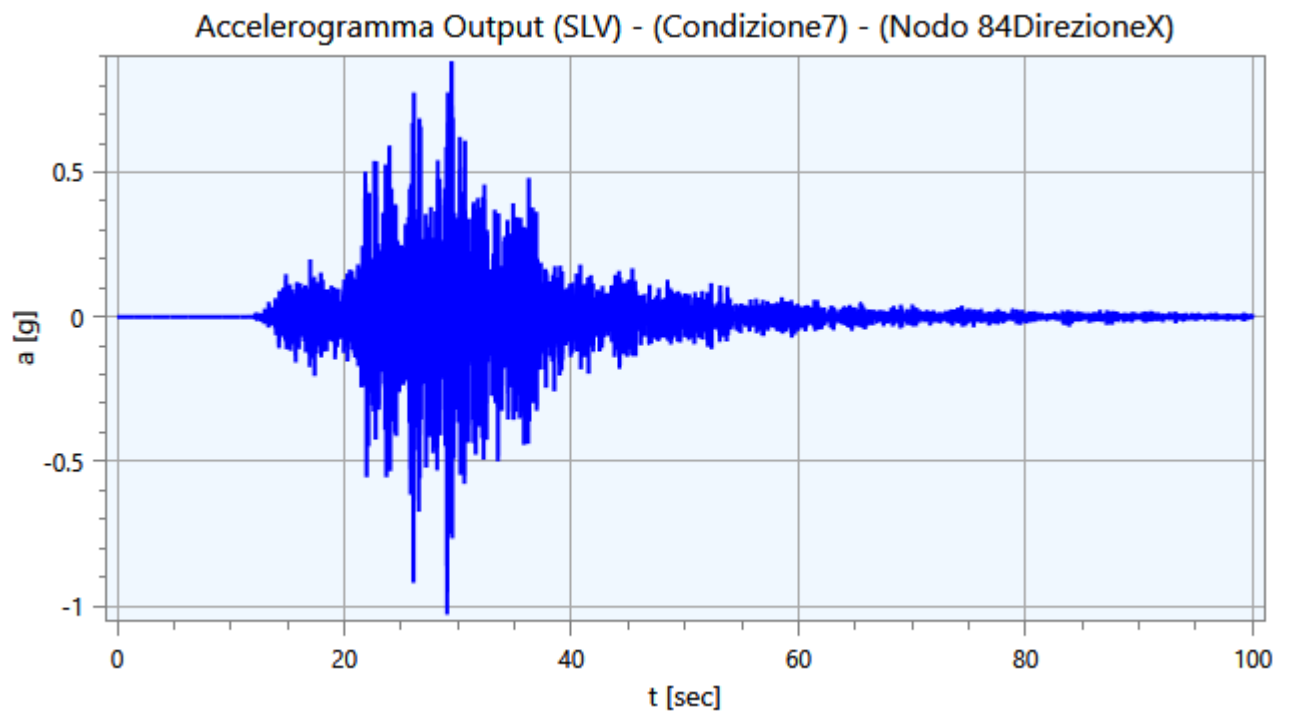
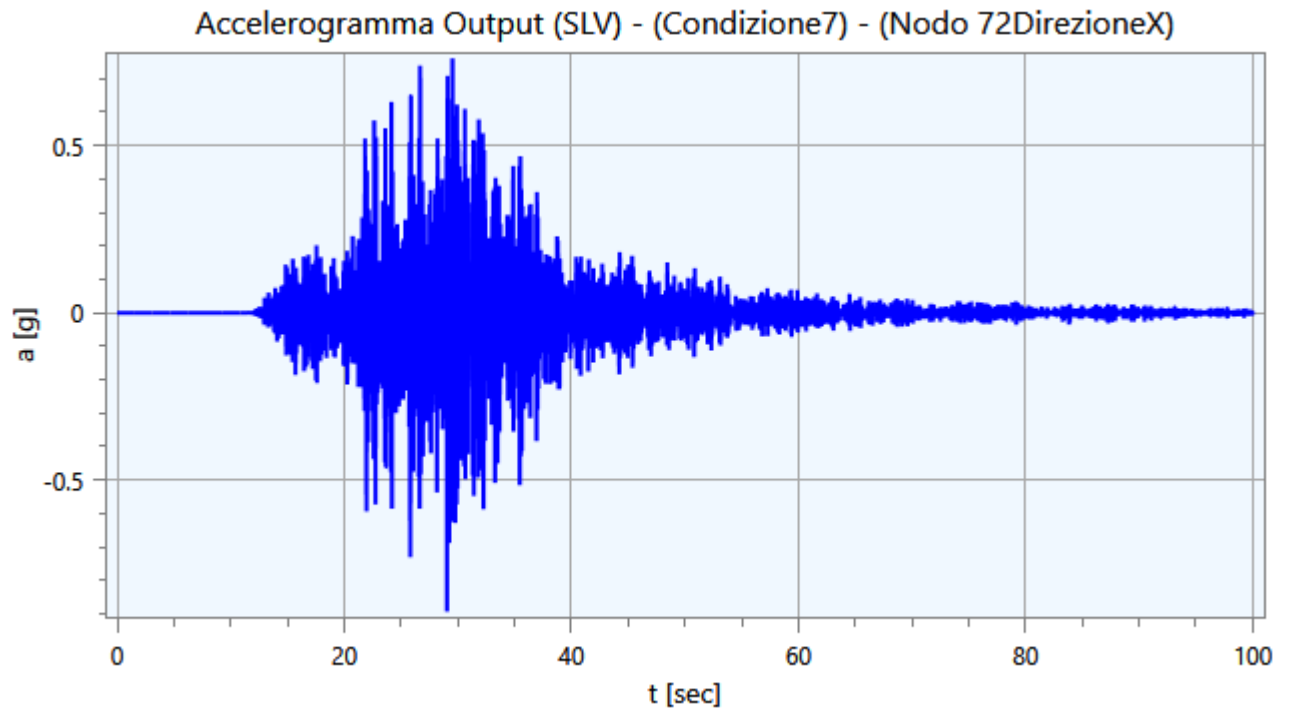


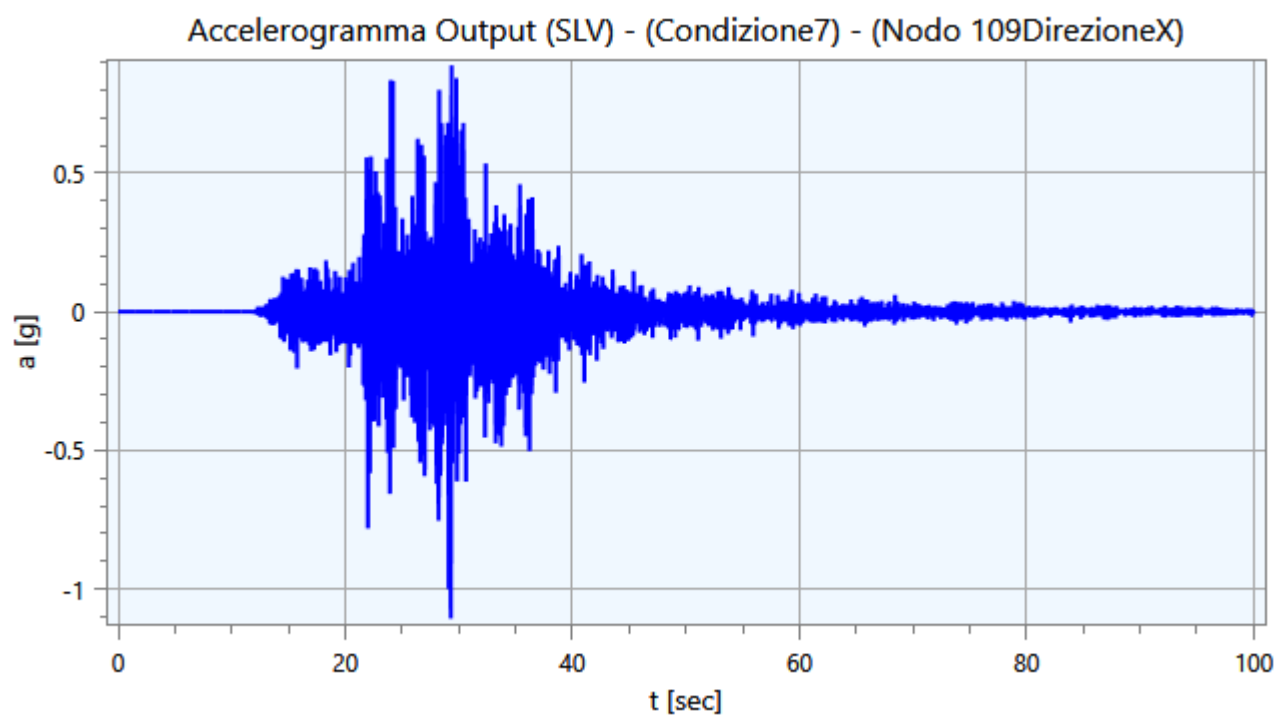
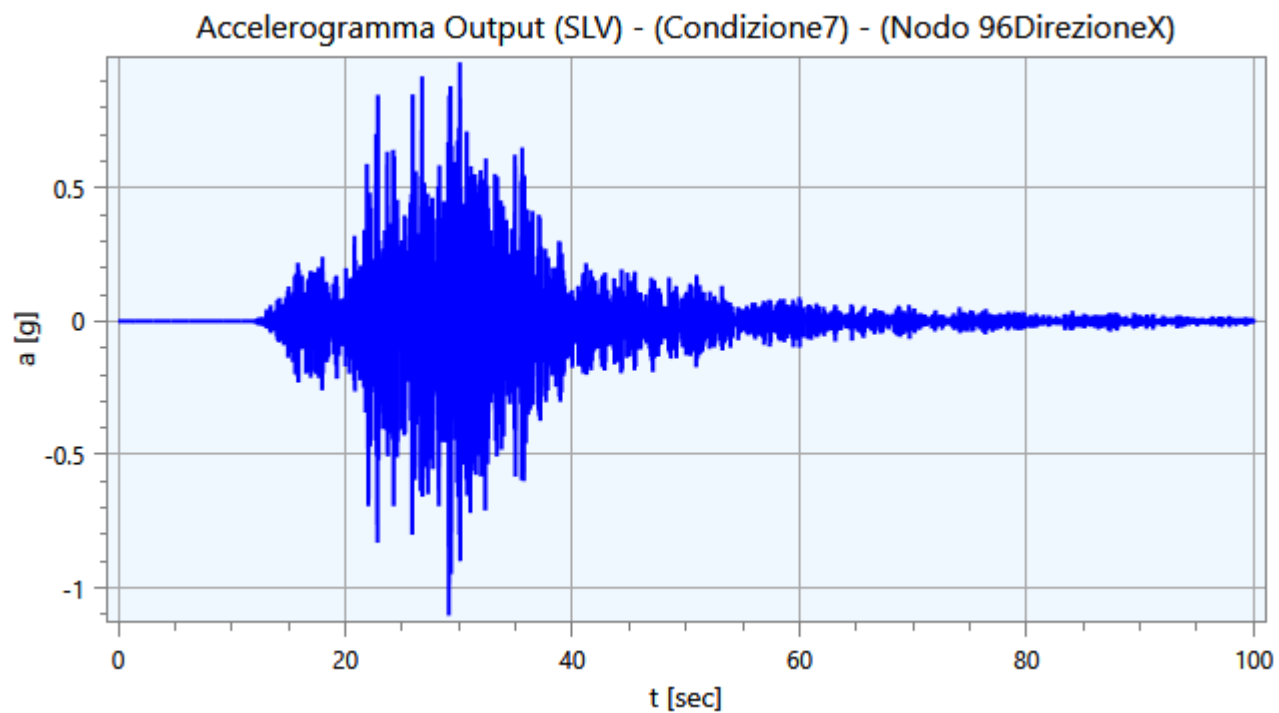


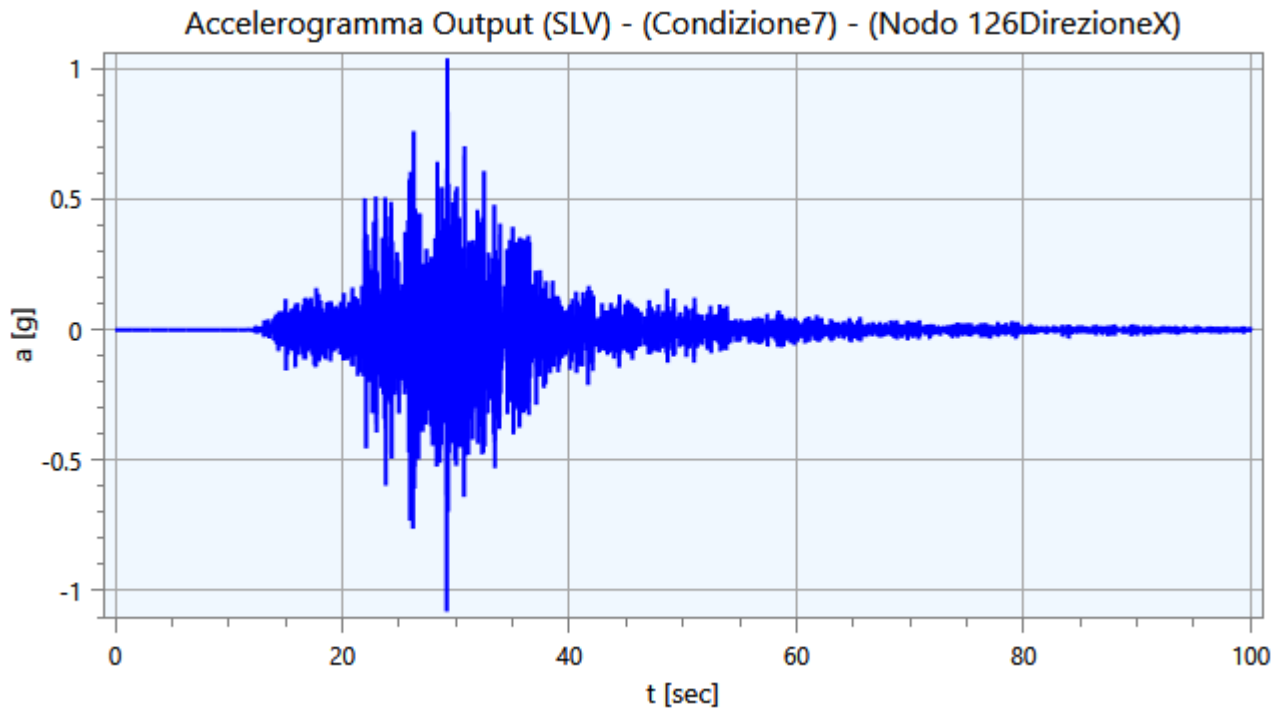






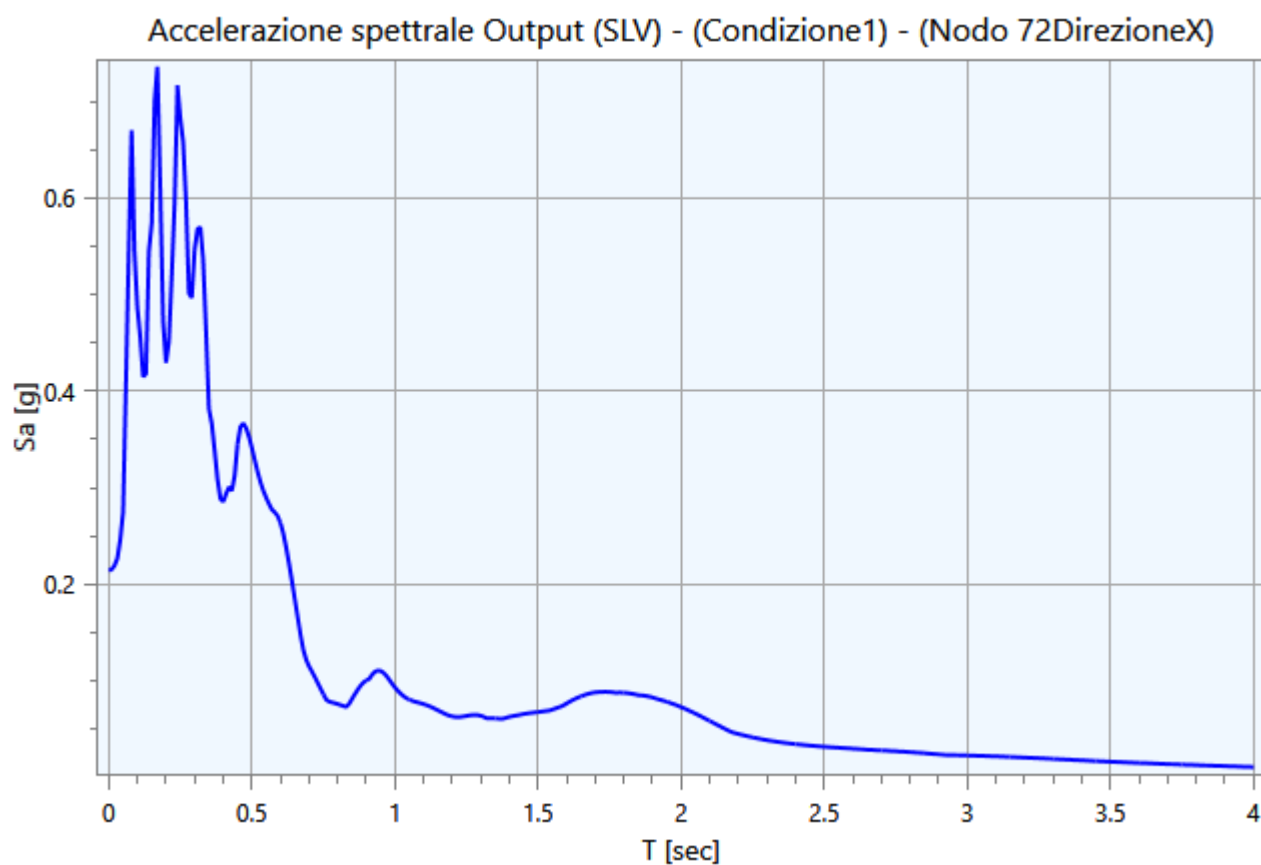
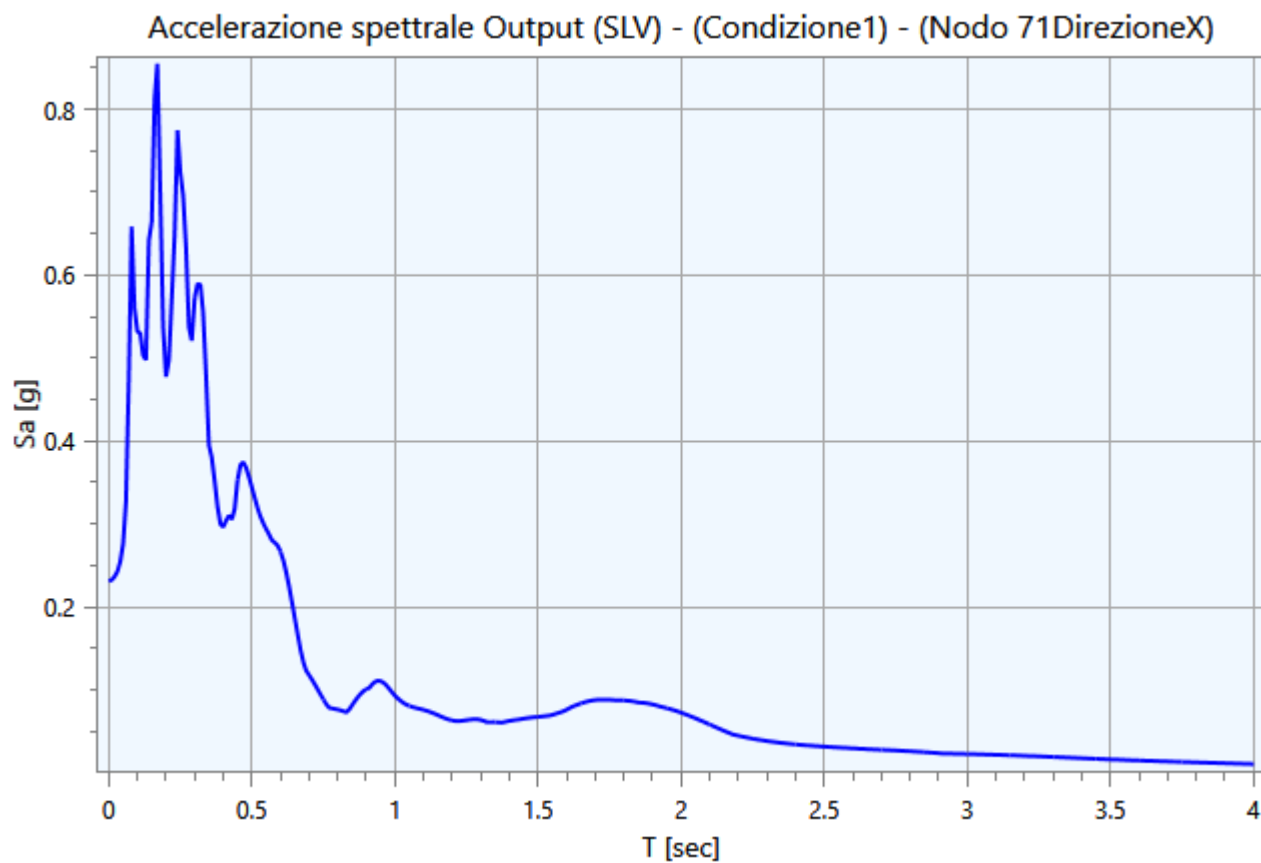




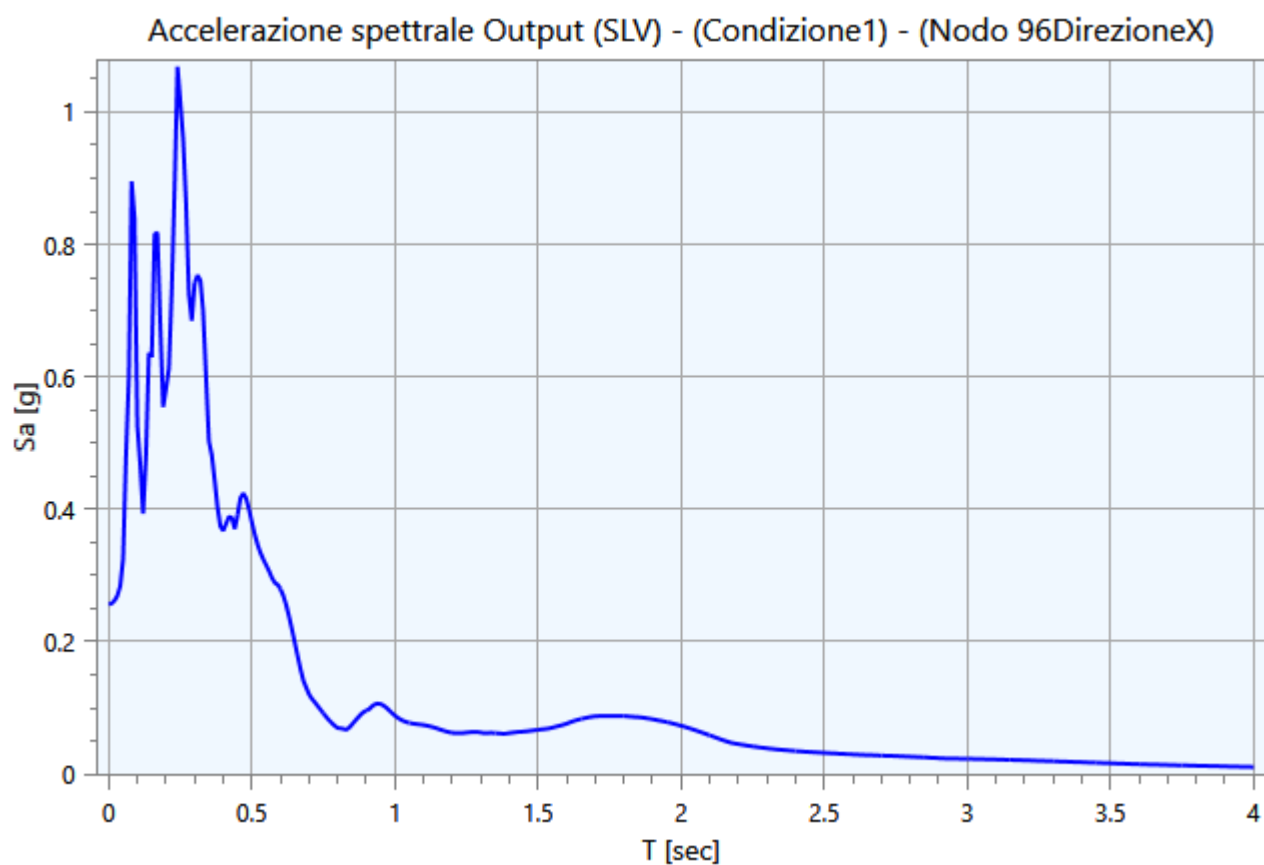
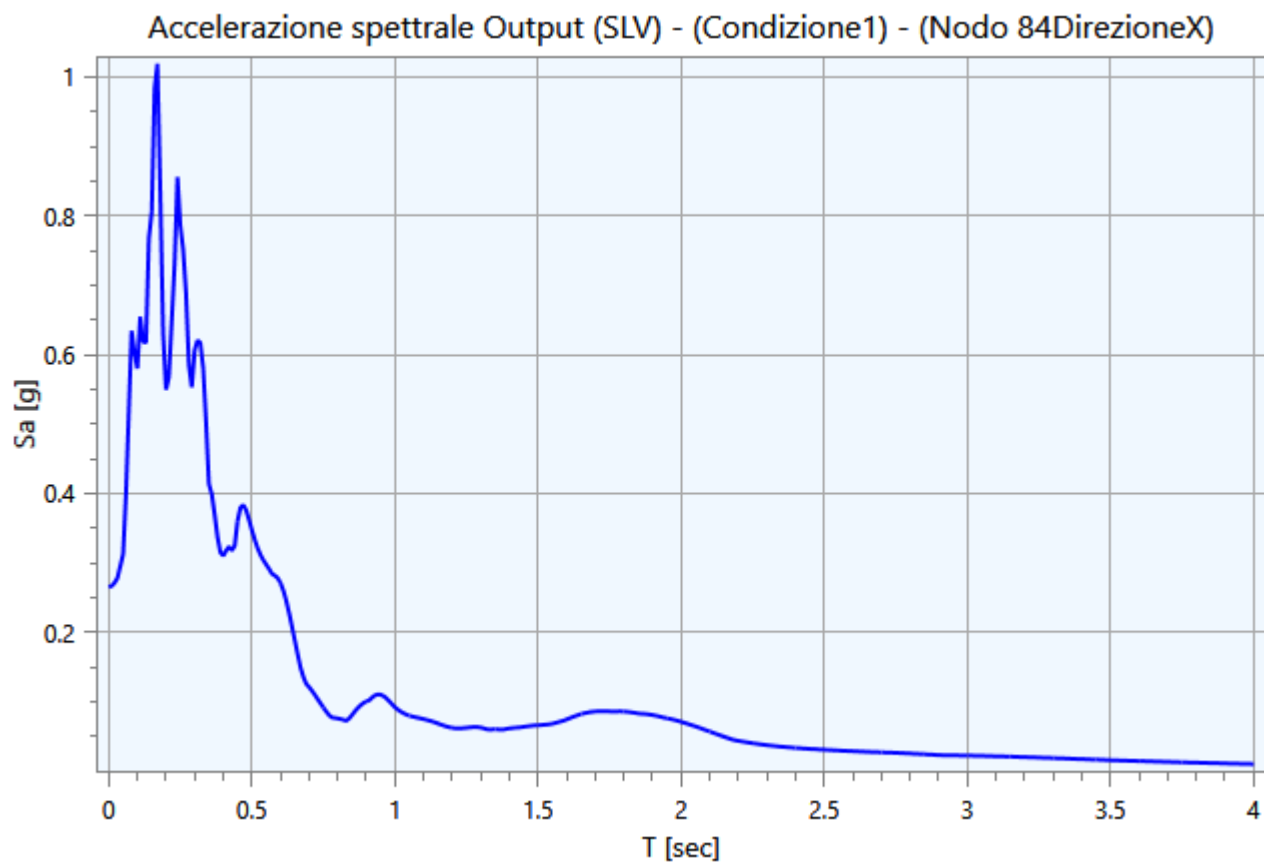


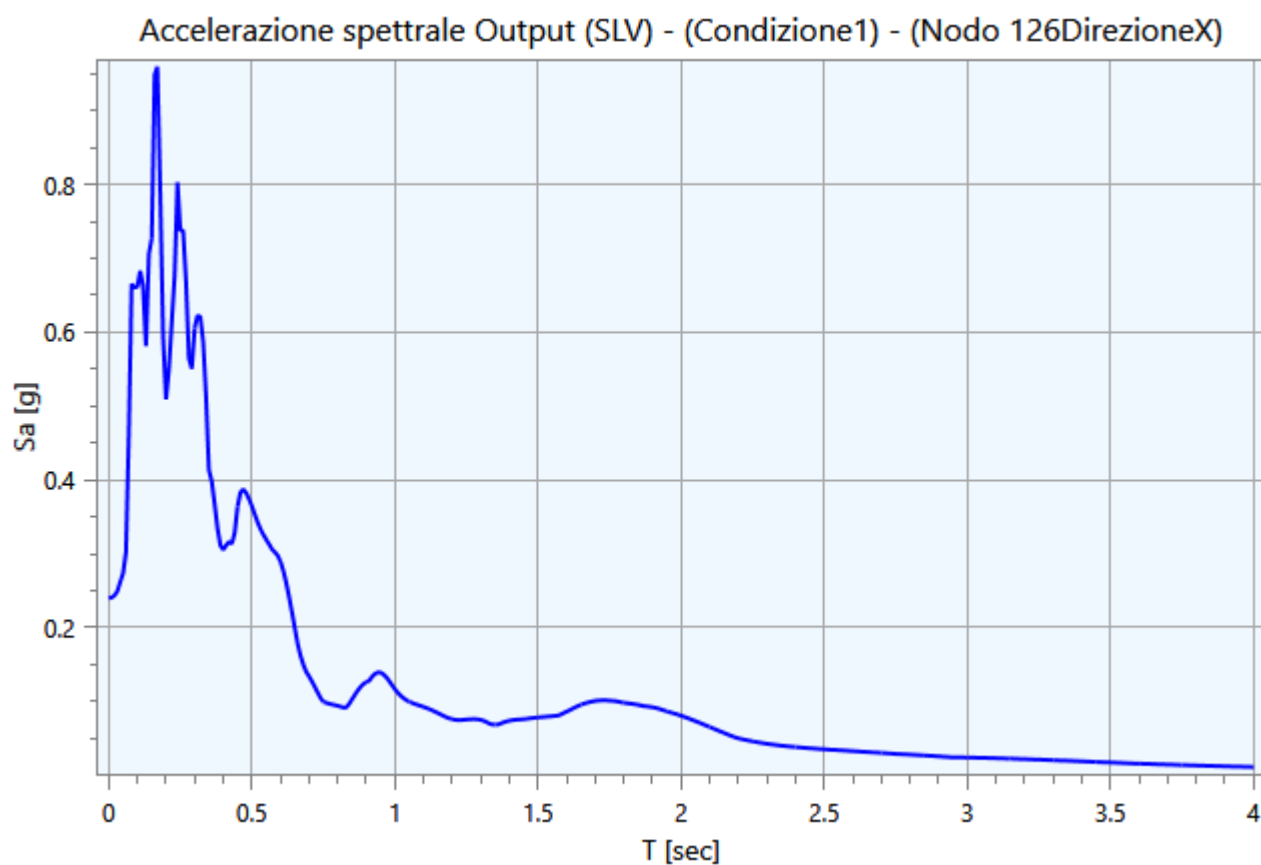
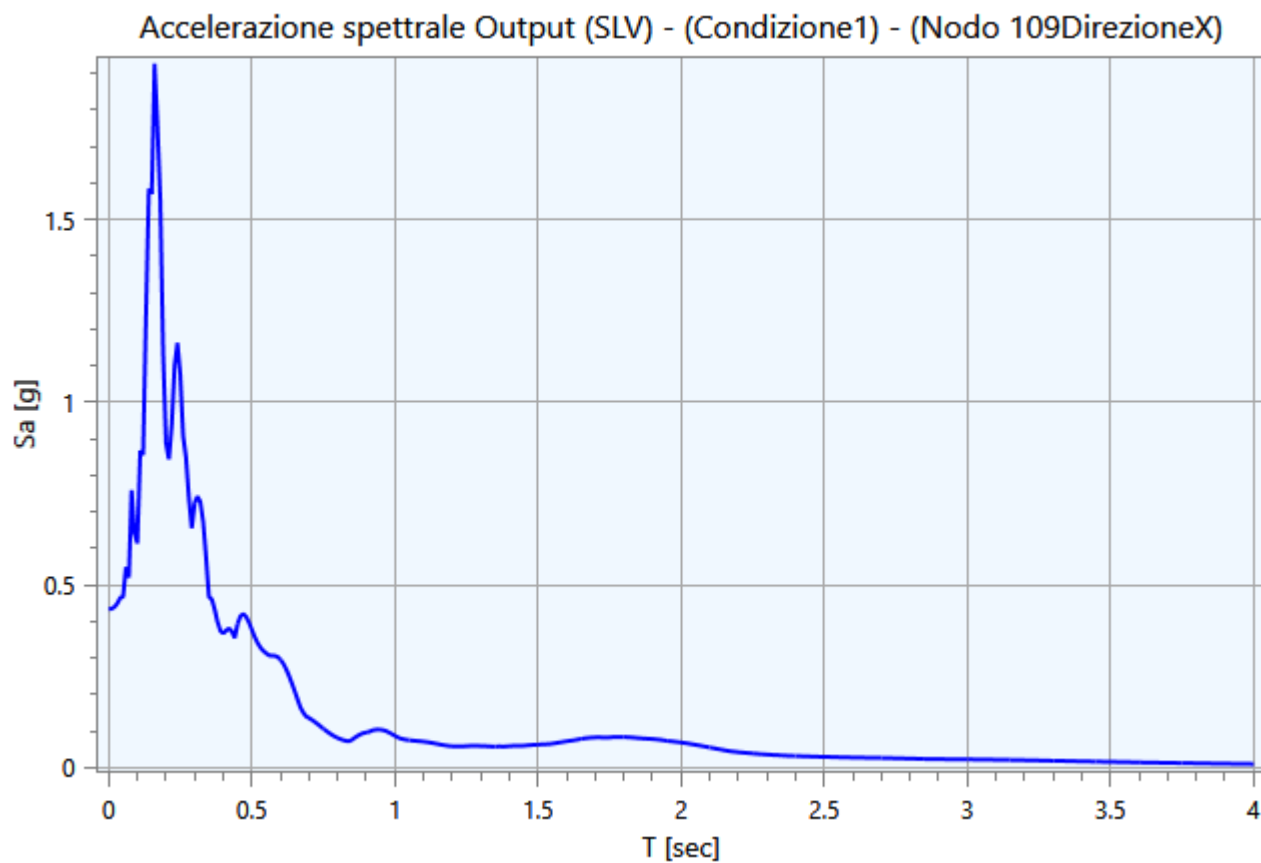
## 5.2 - Spettri Output

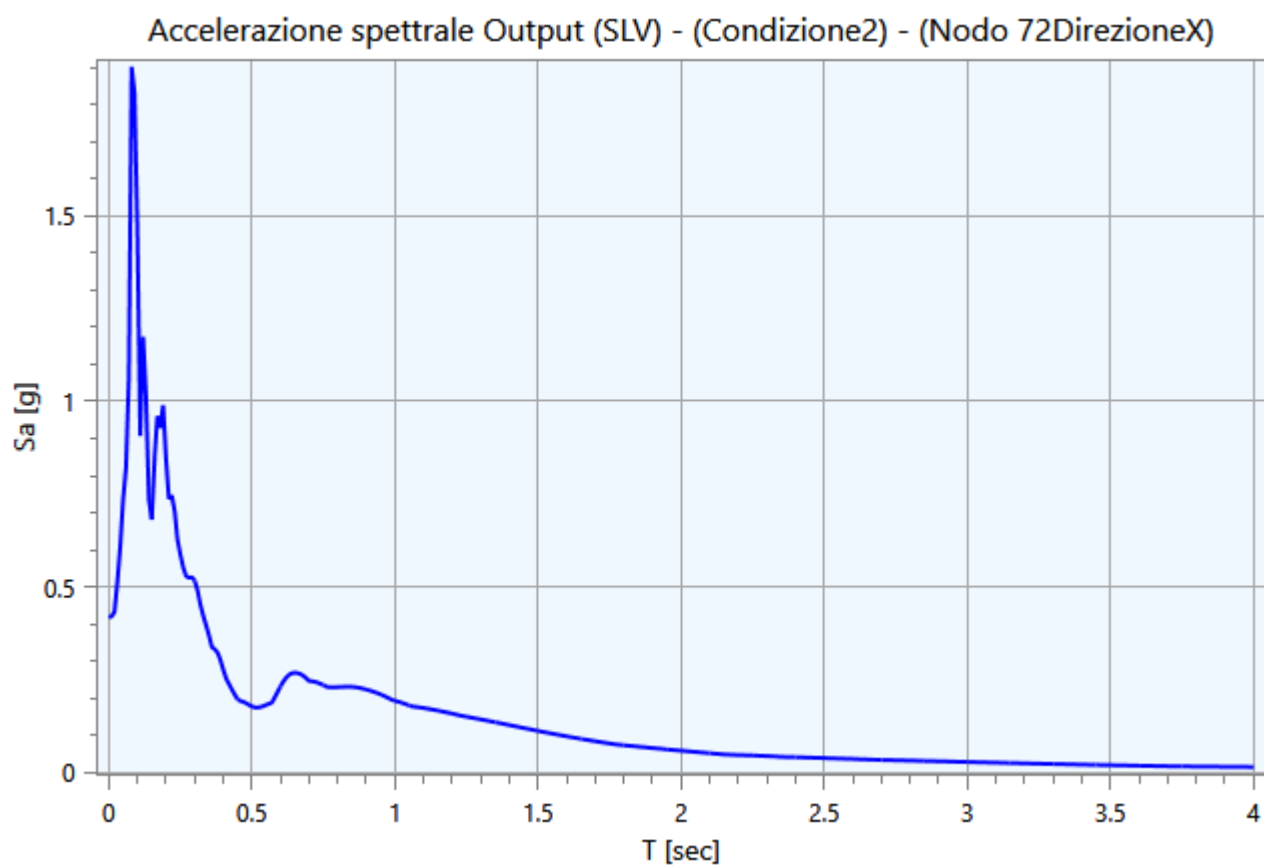
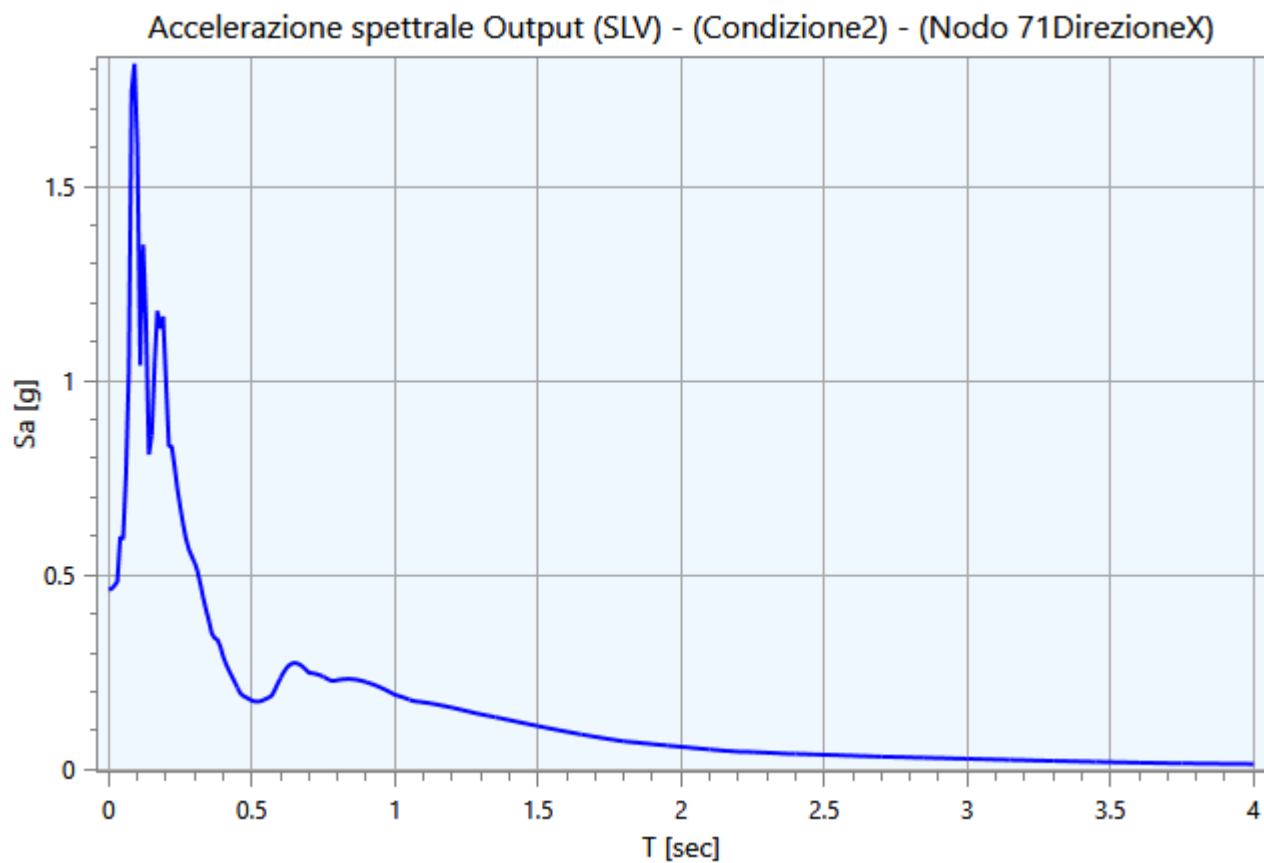
Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

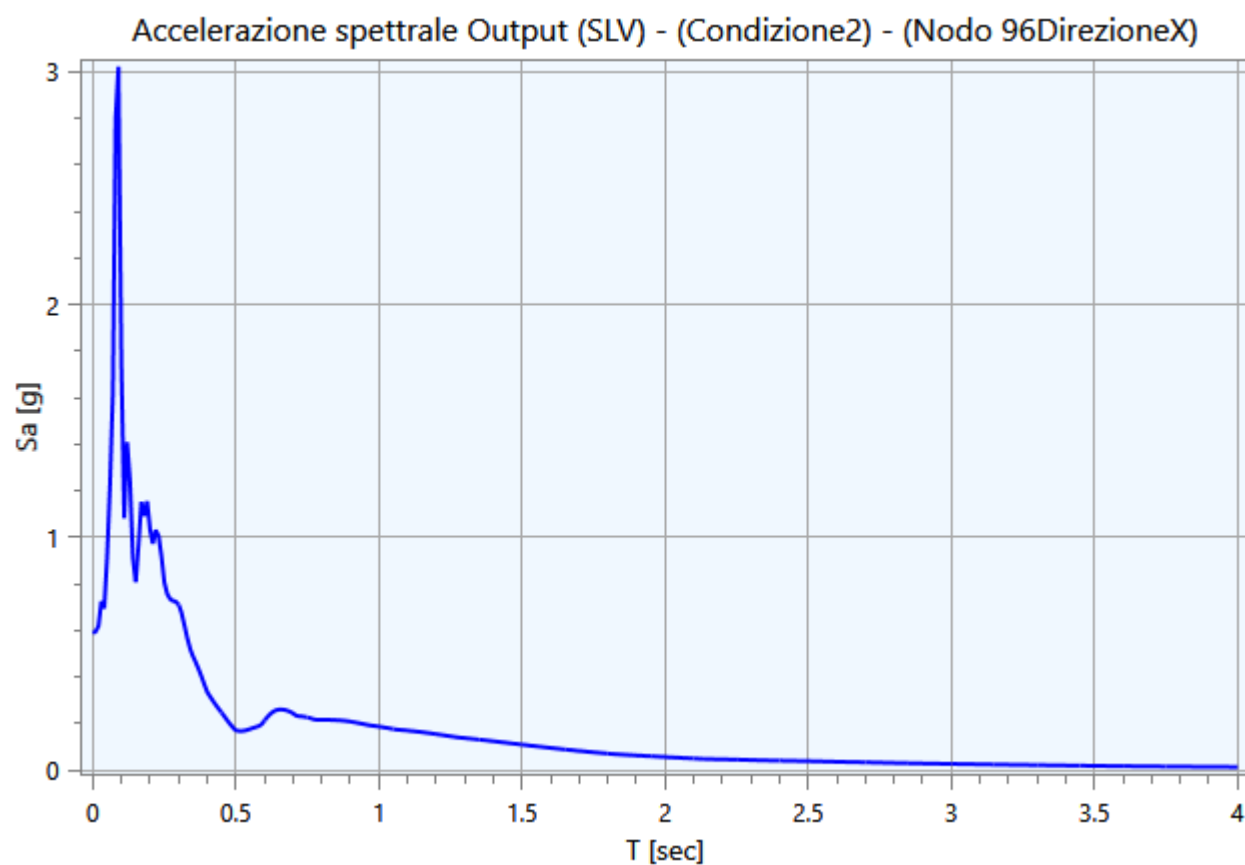
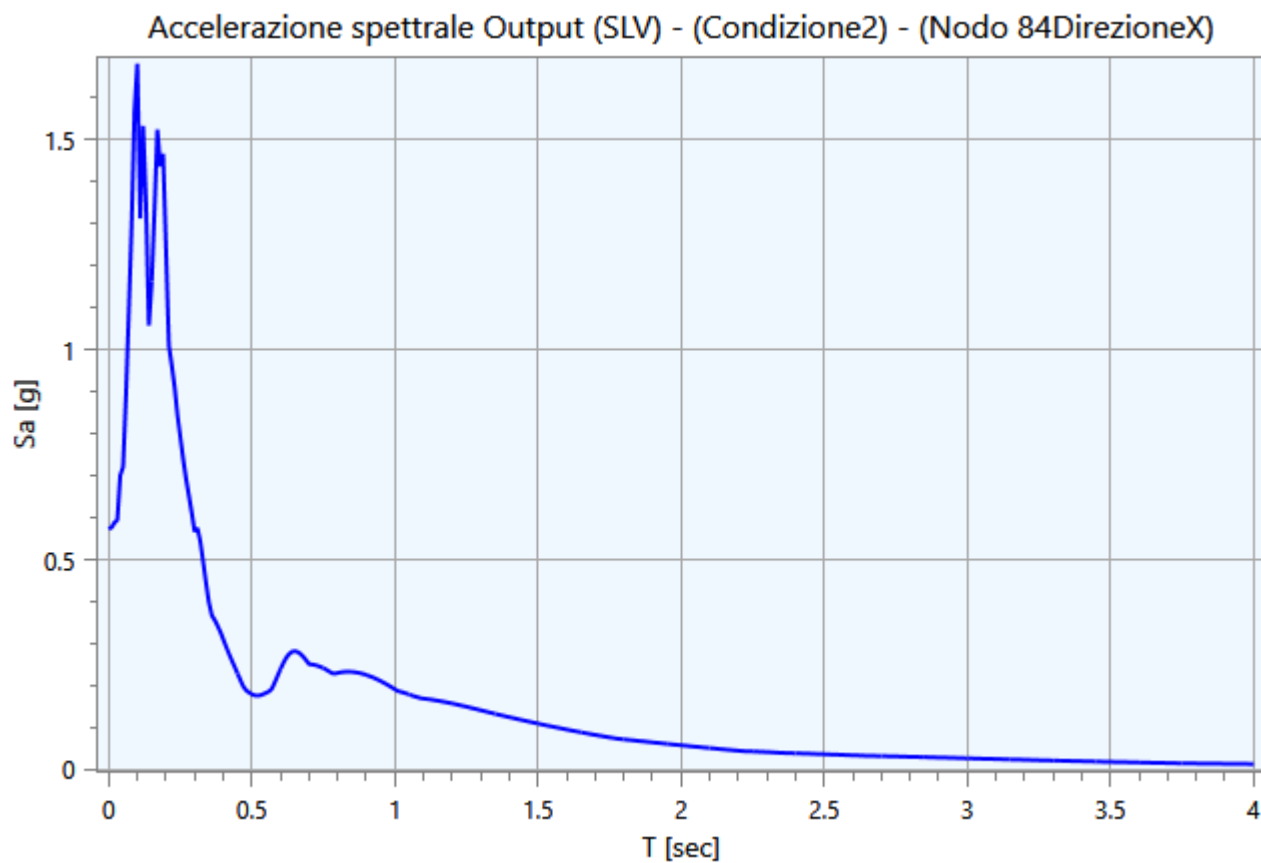


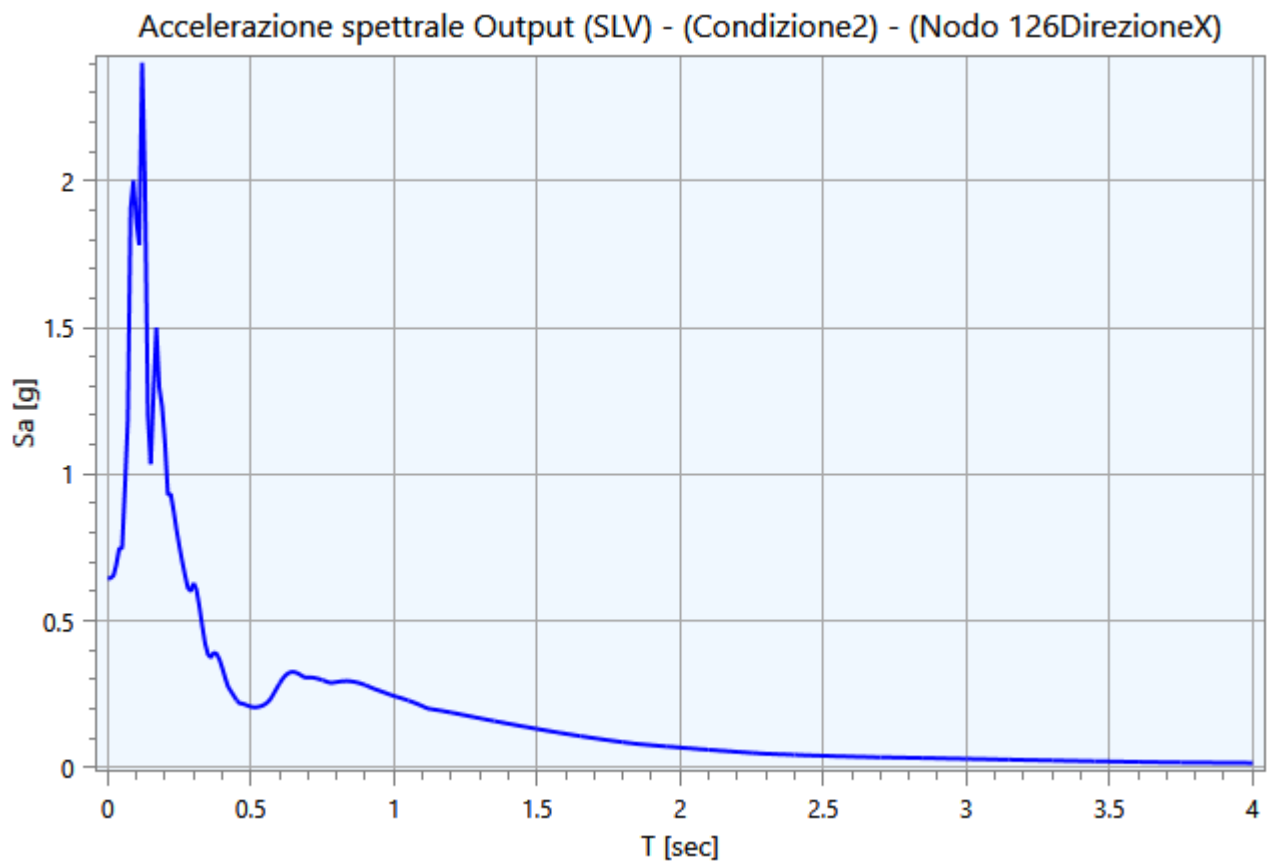
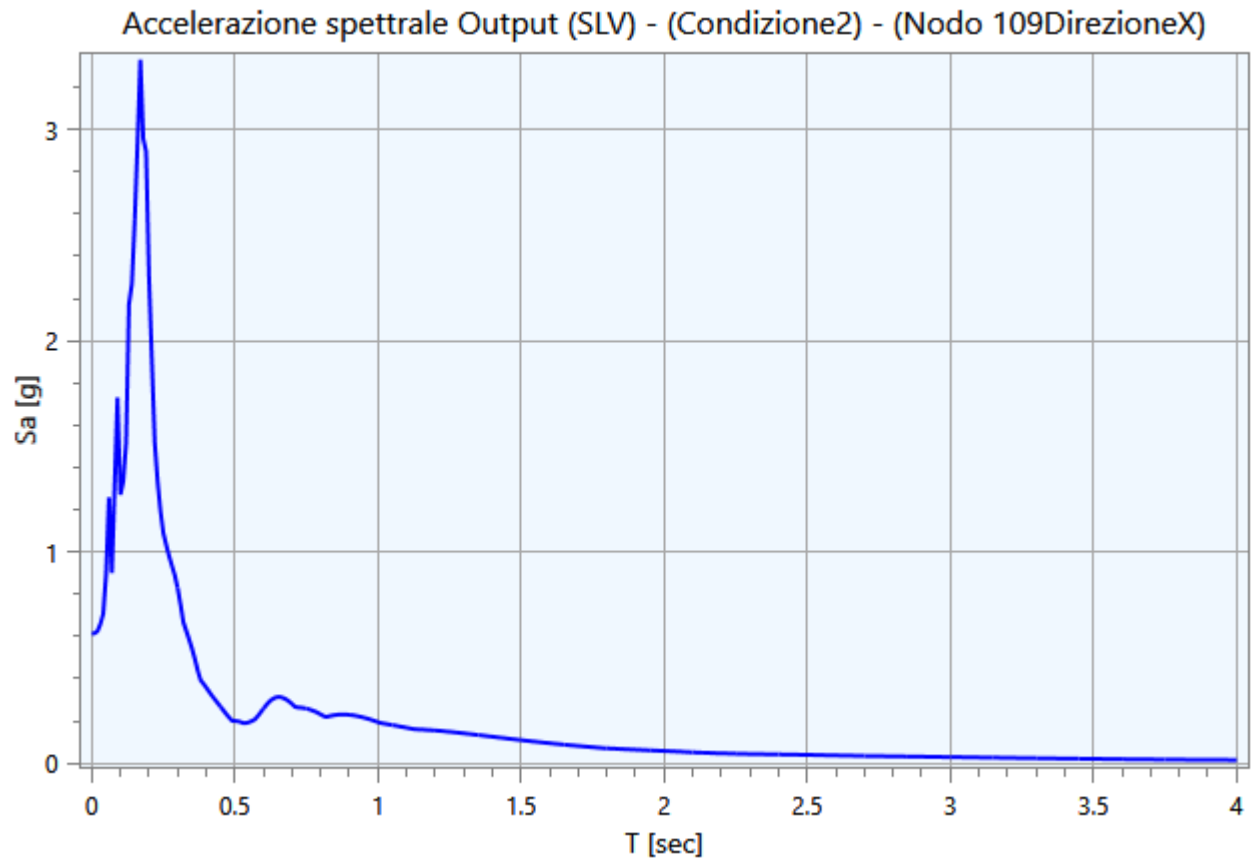


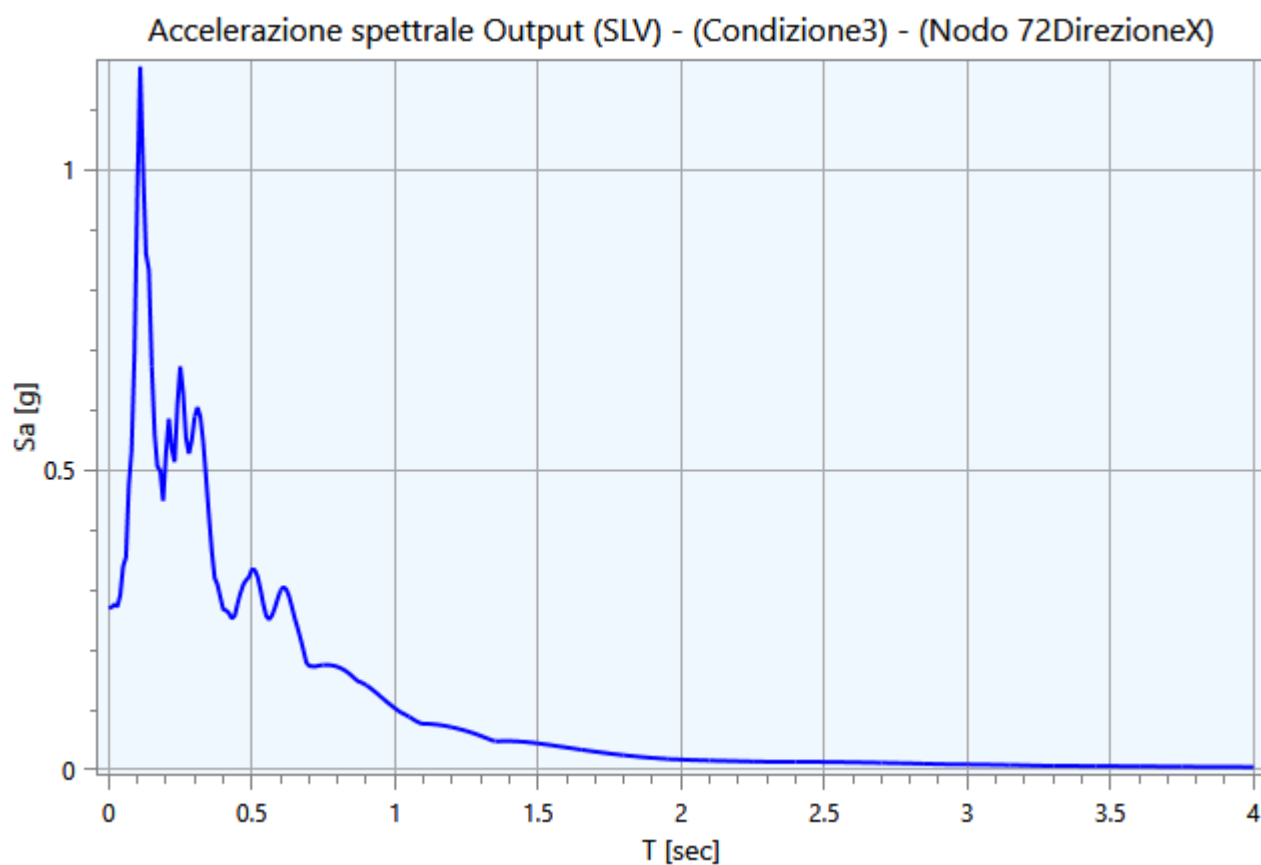
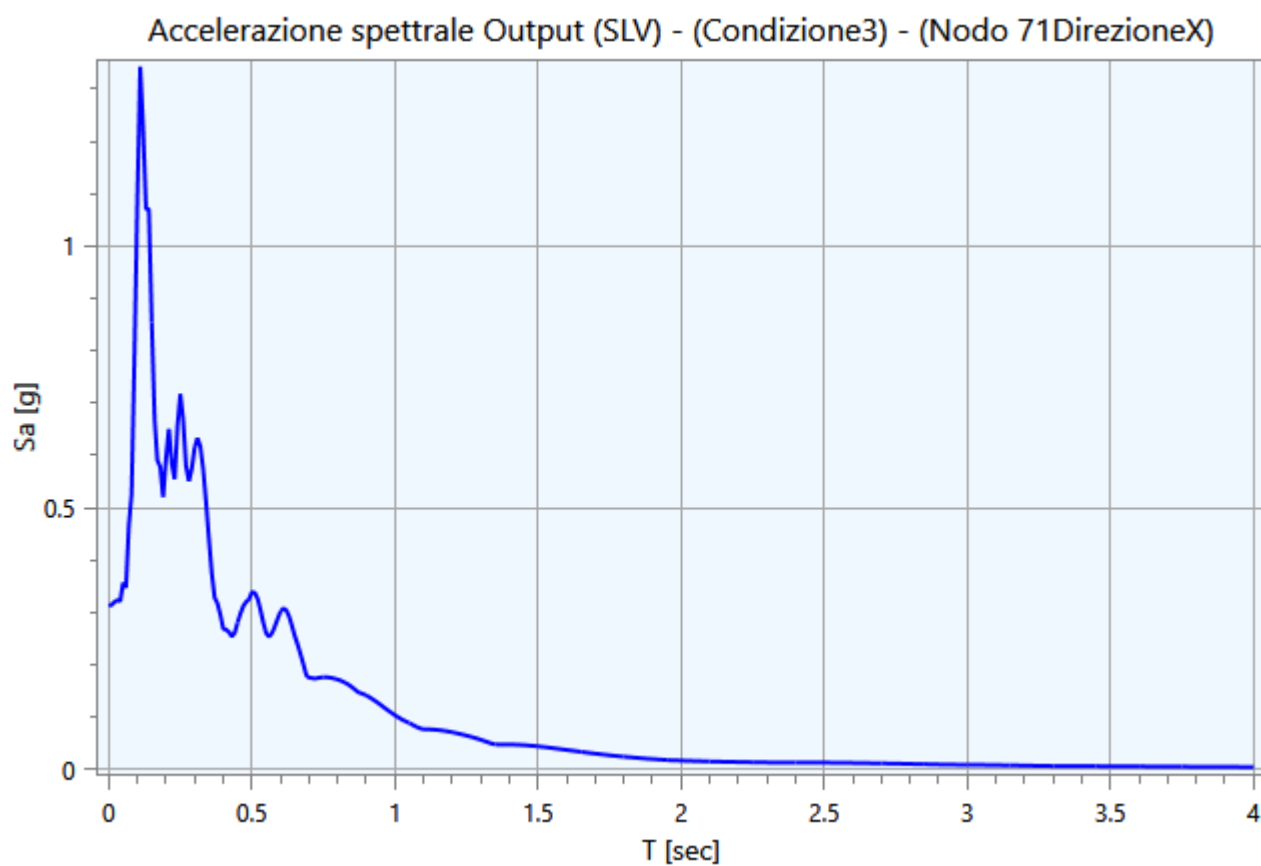


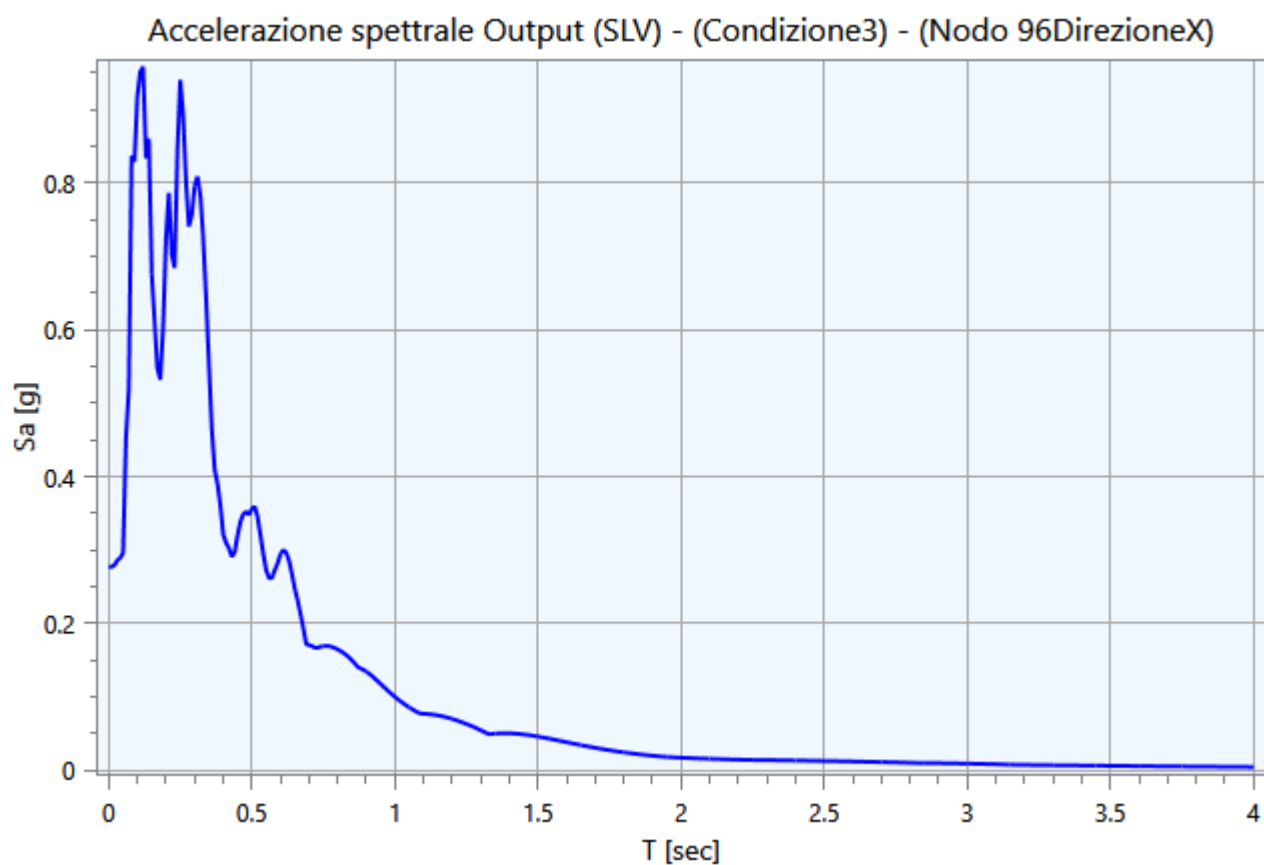
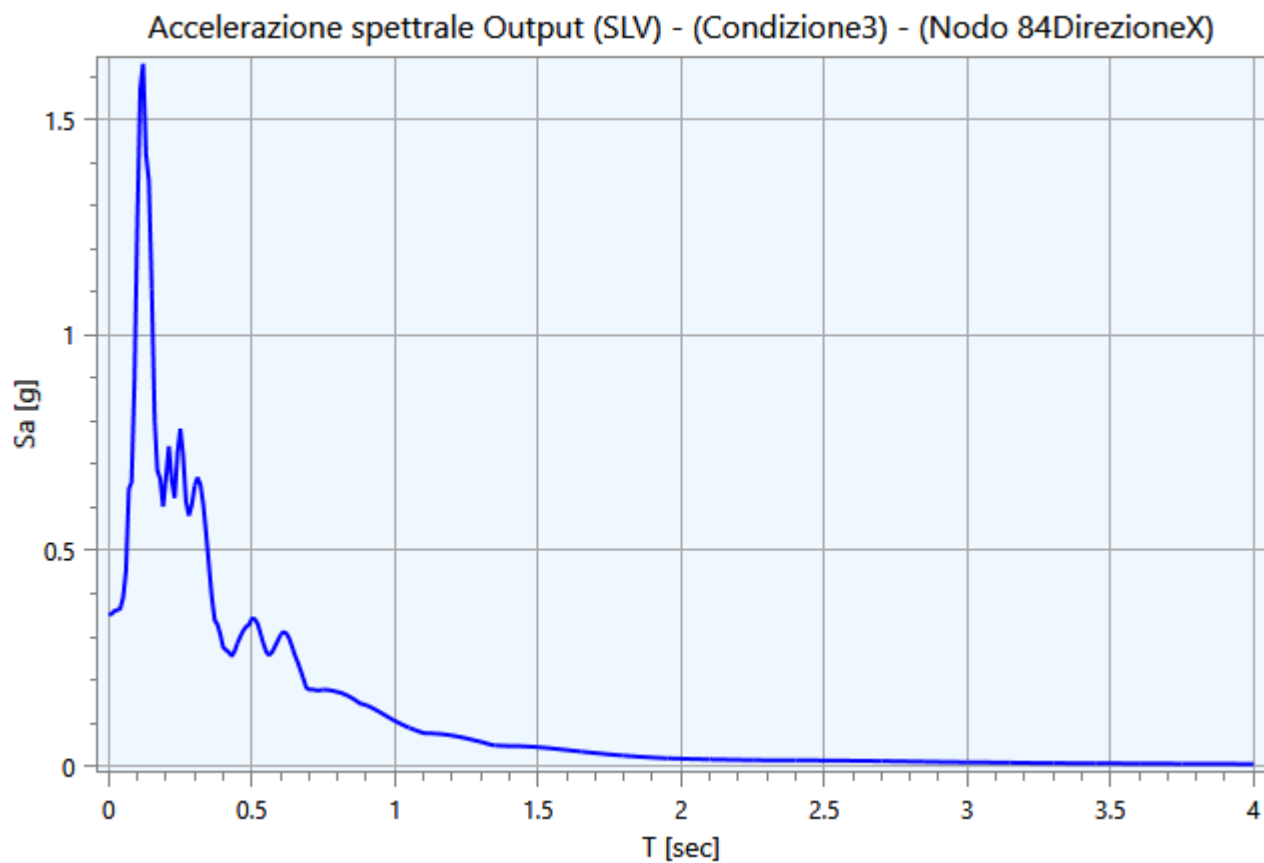


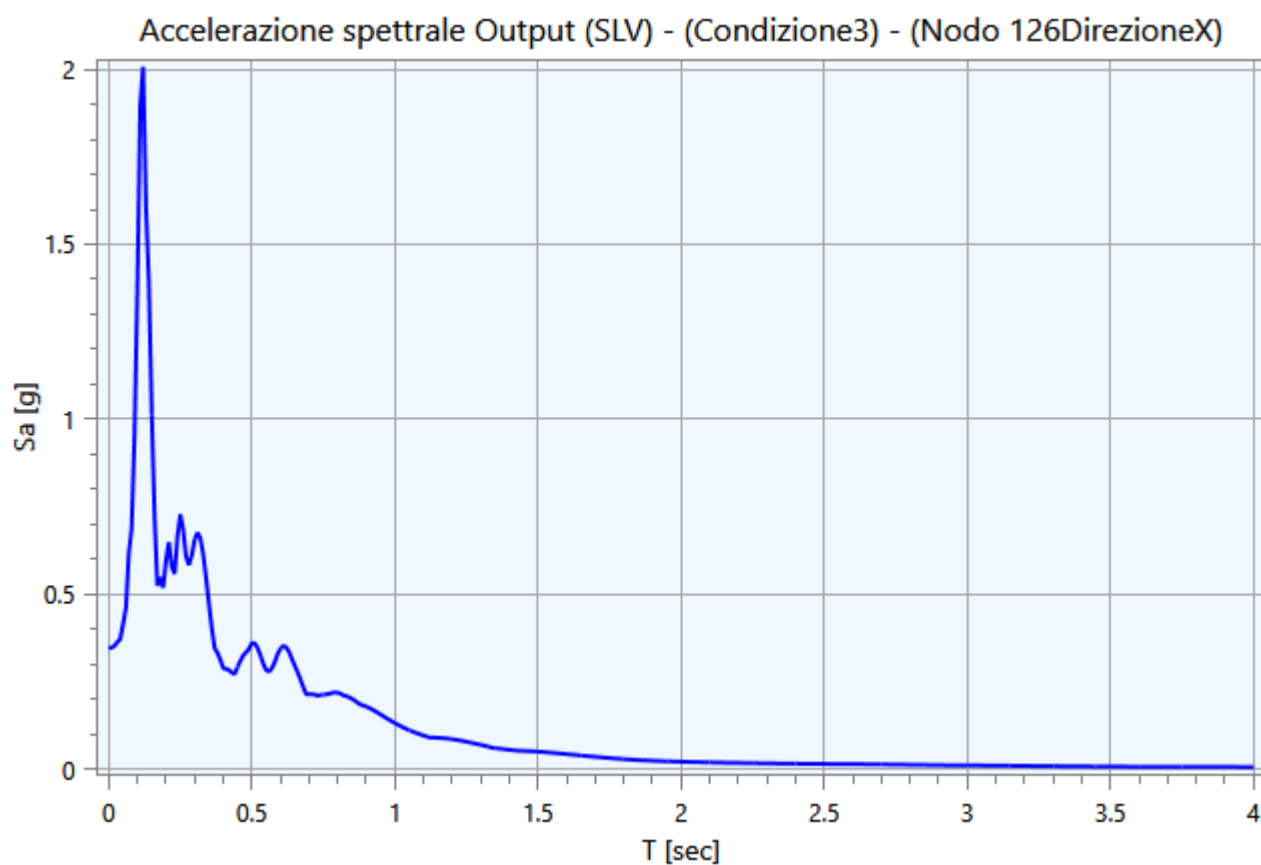
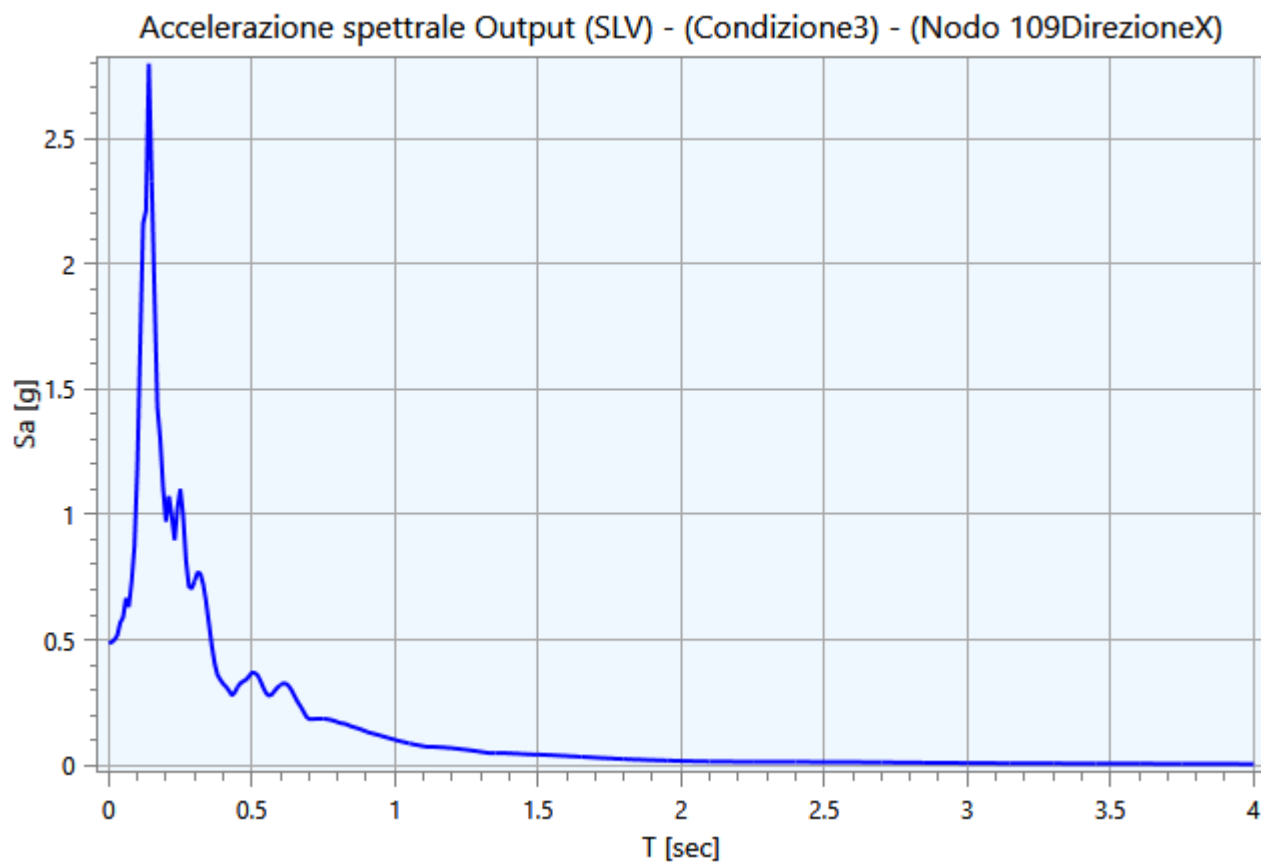




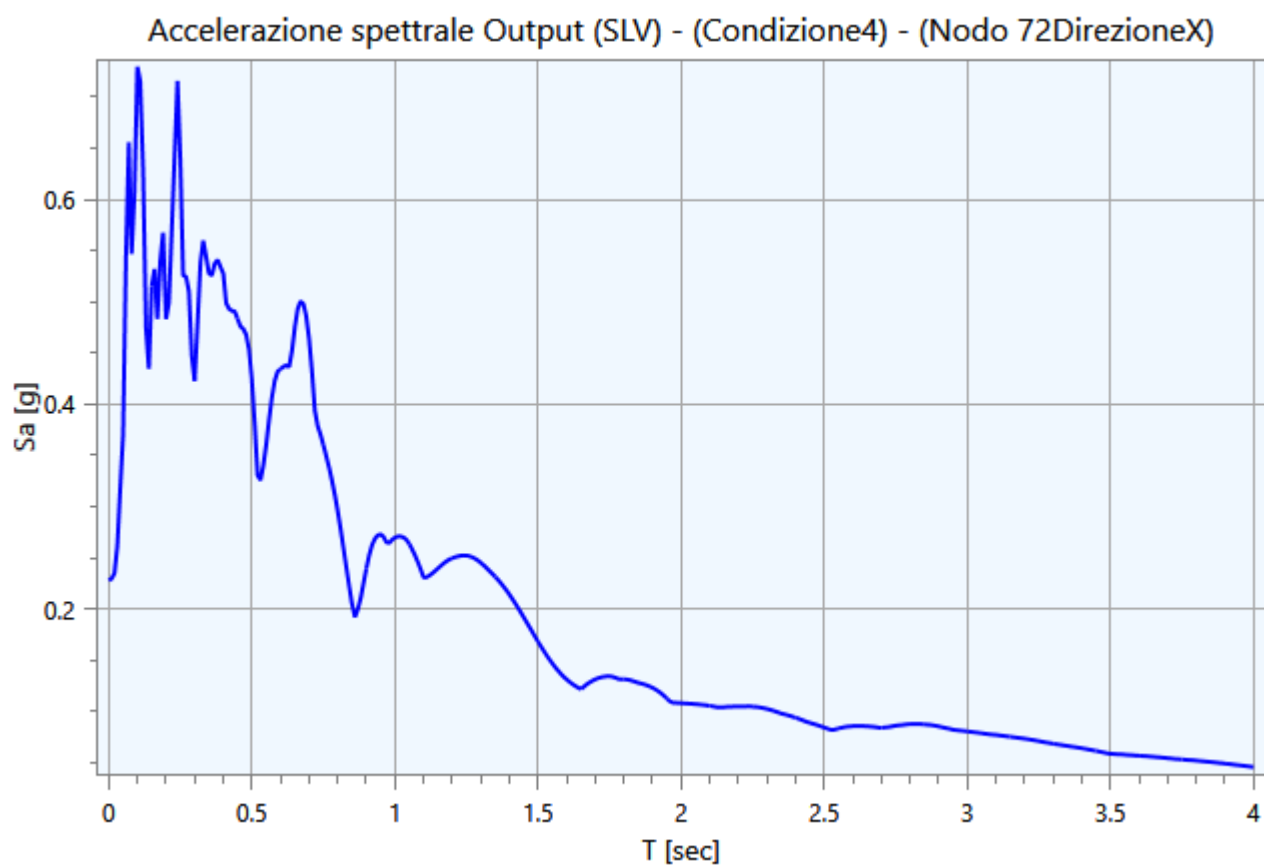
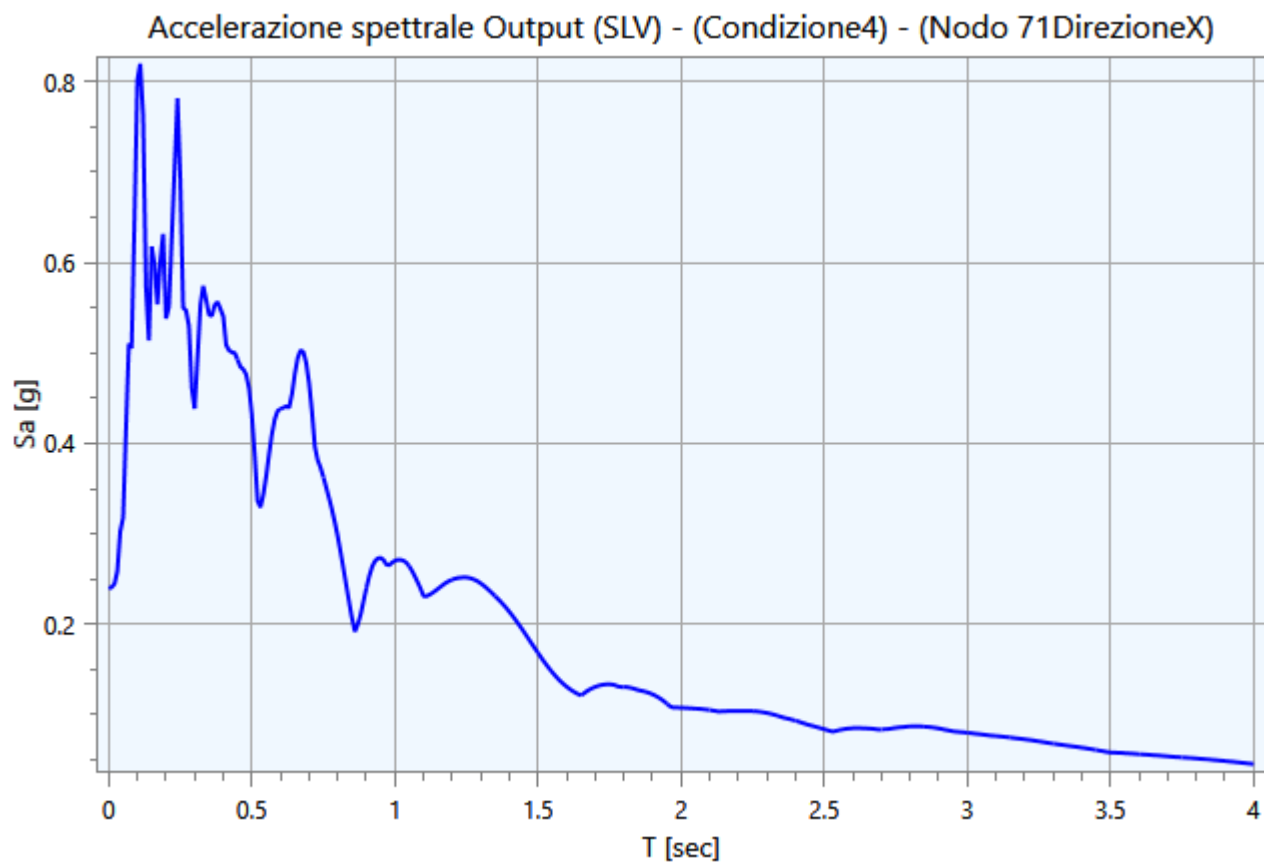


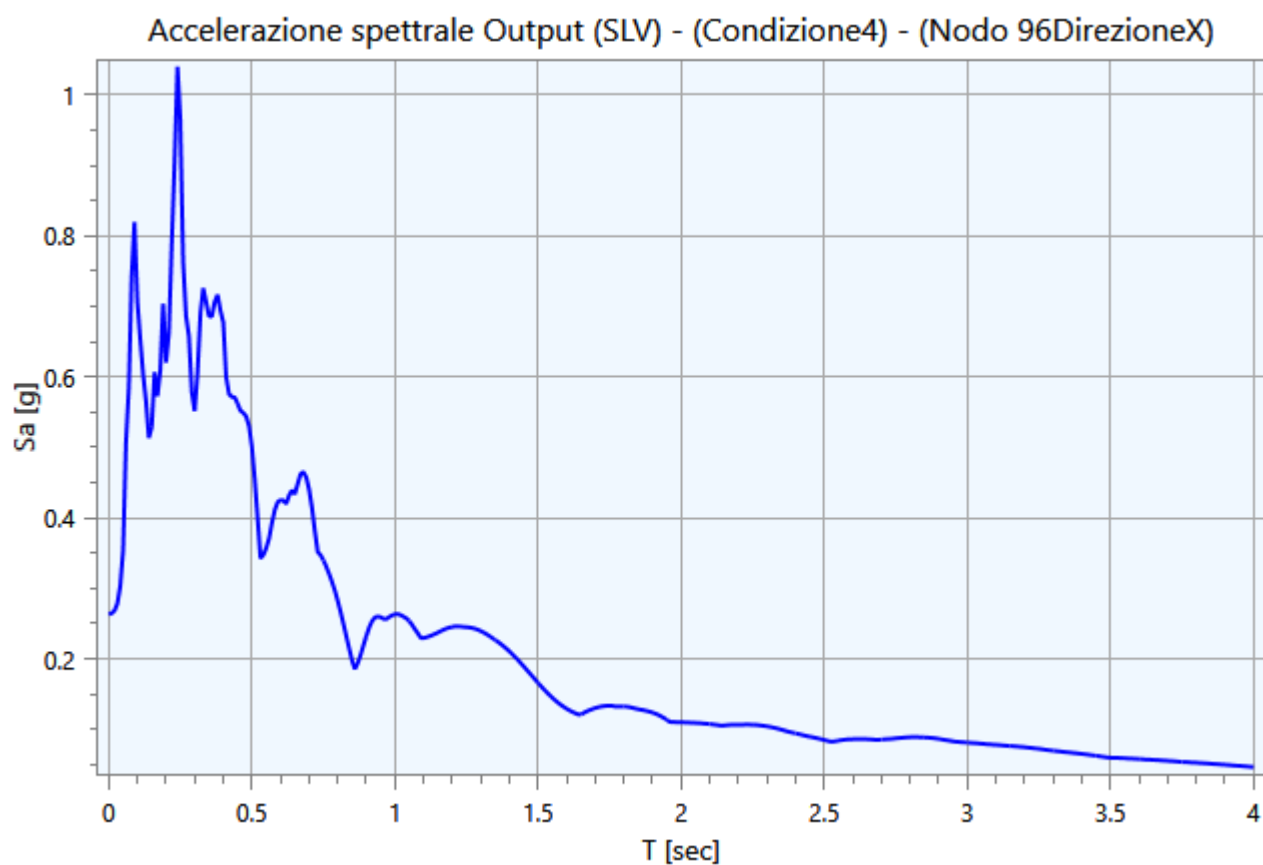
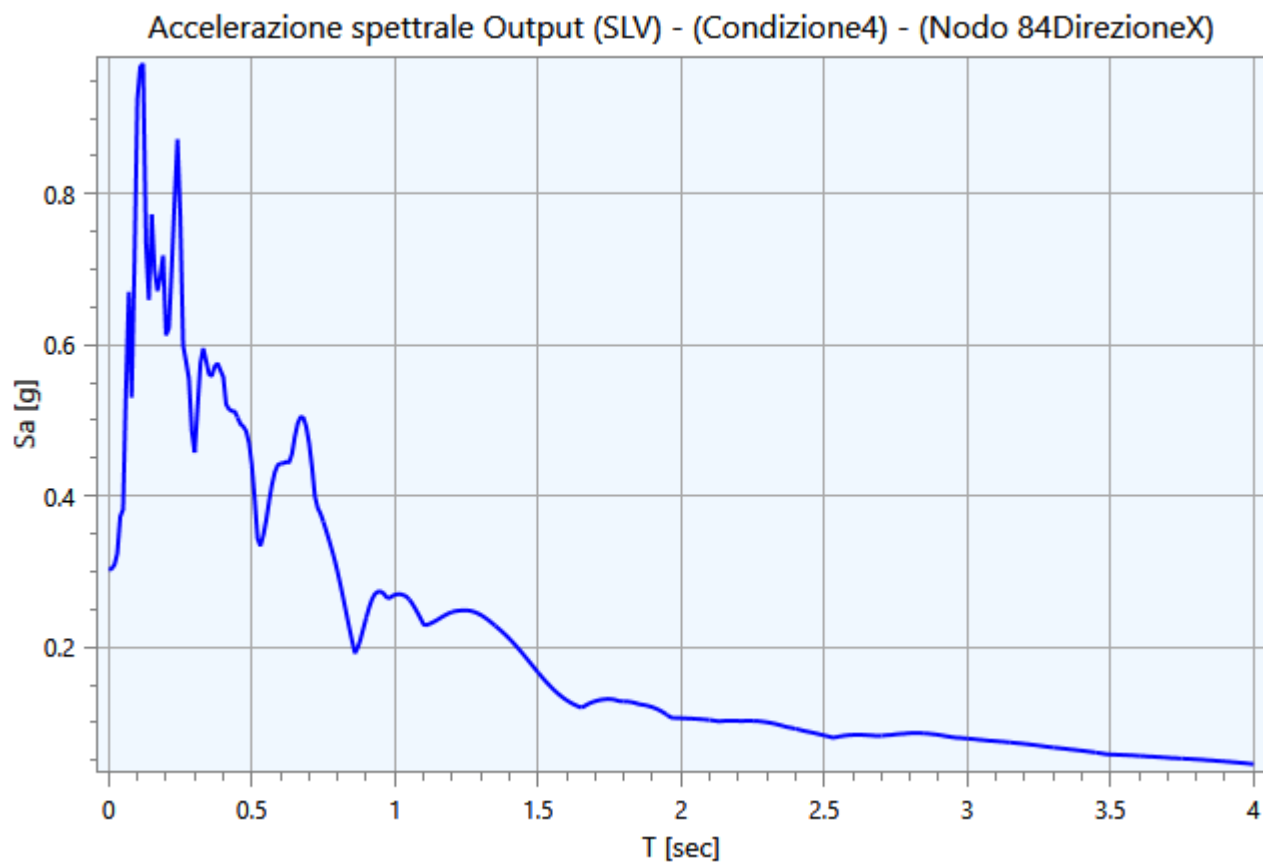


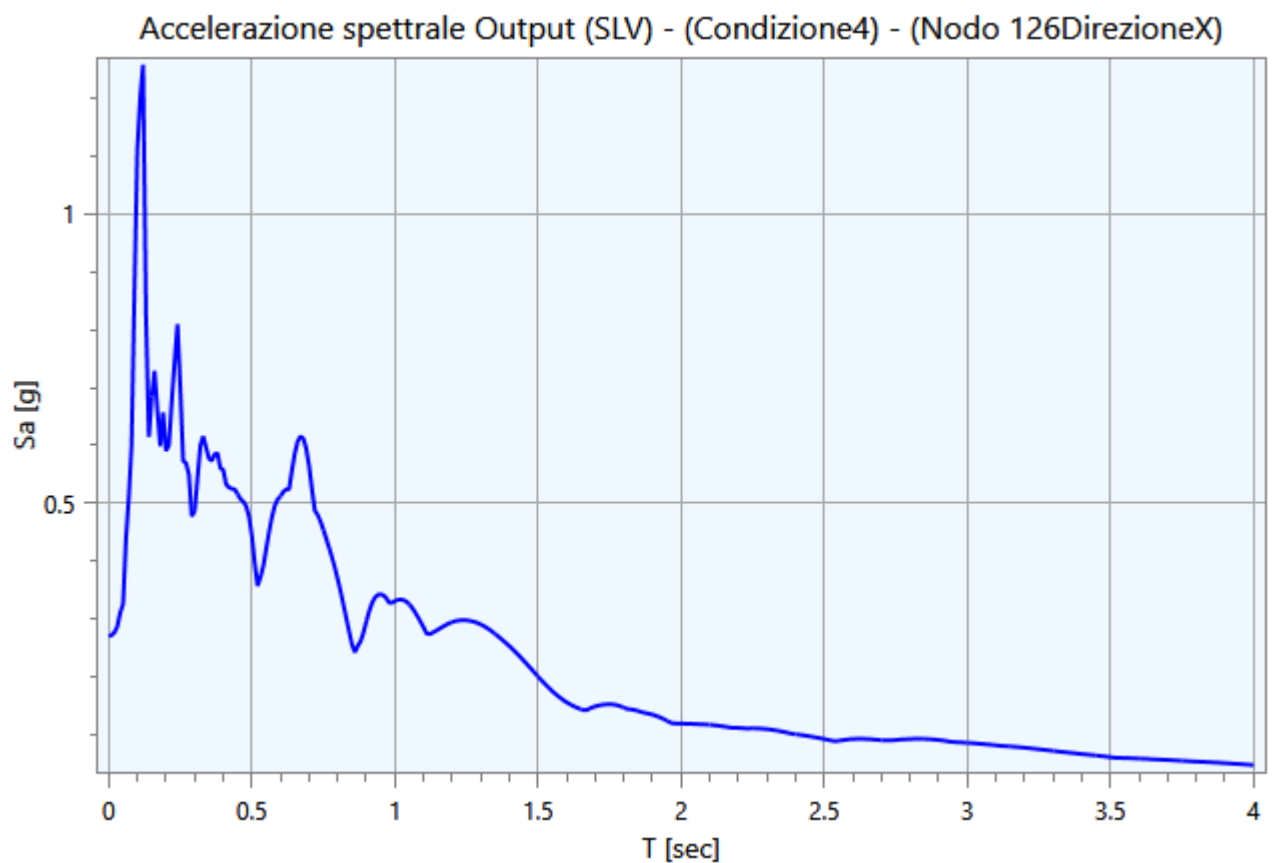
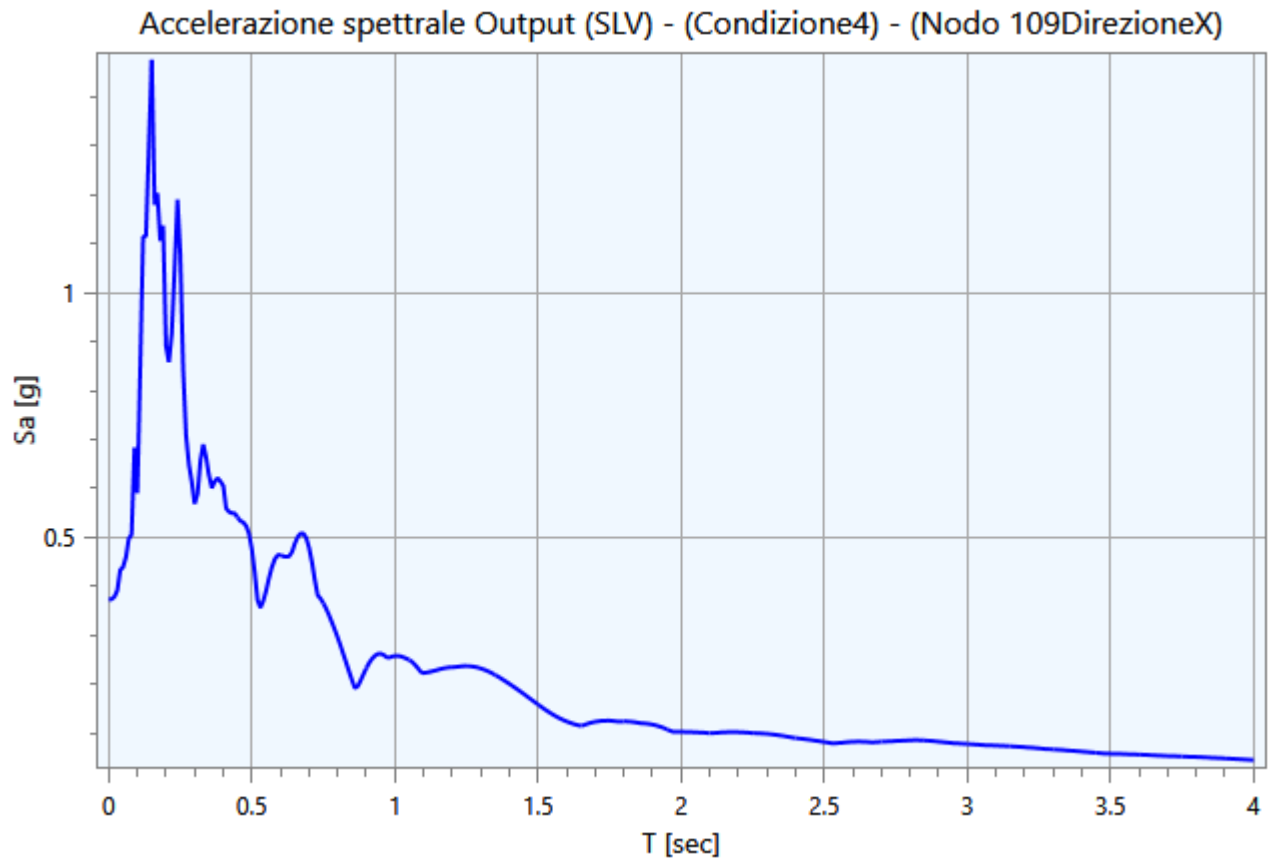


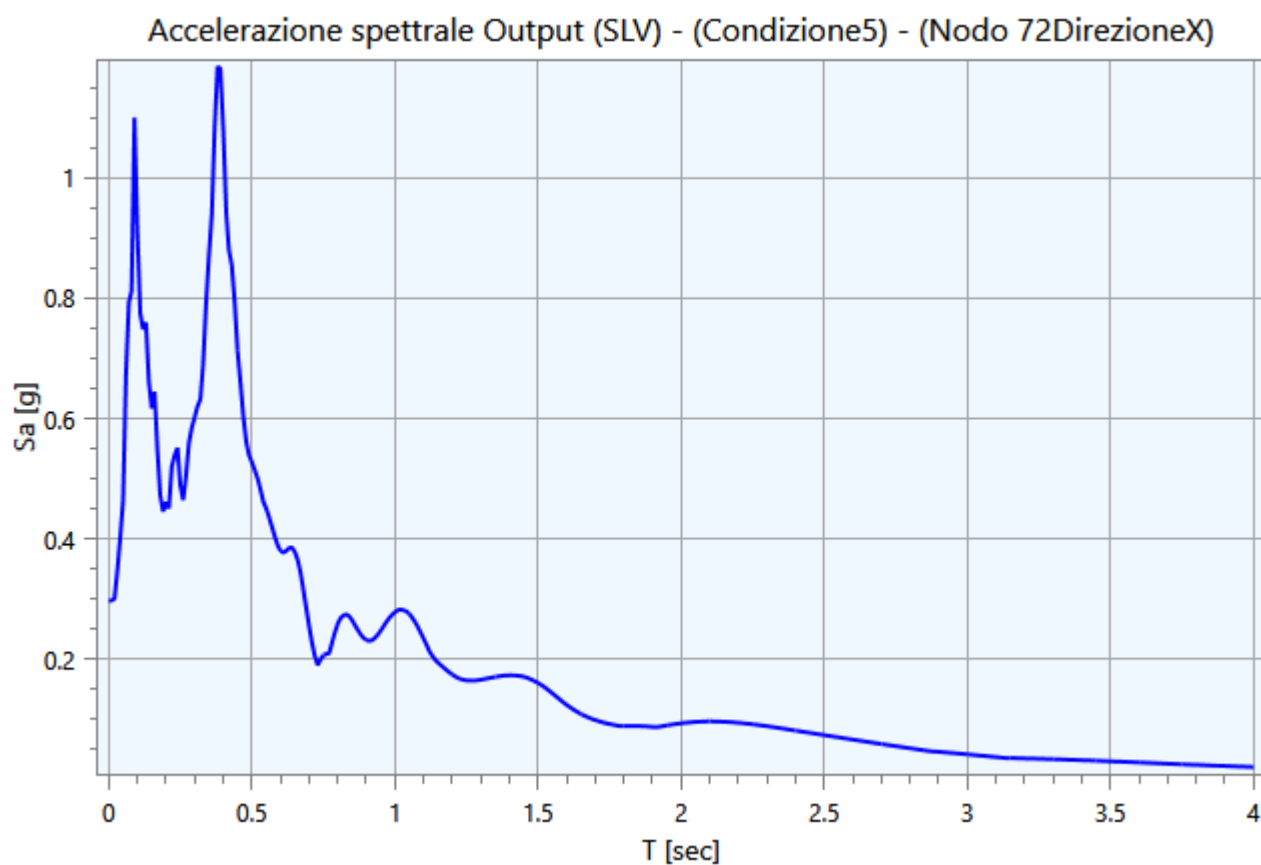
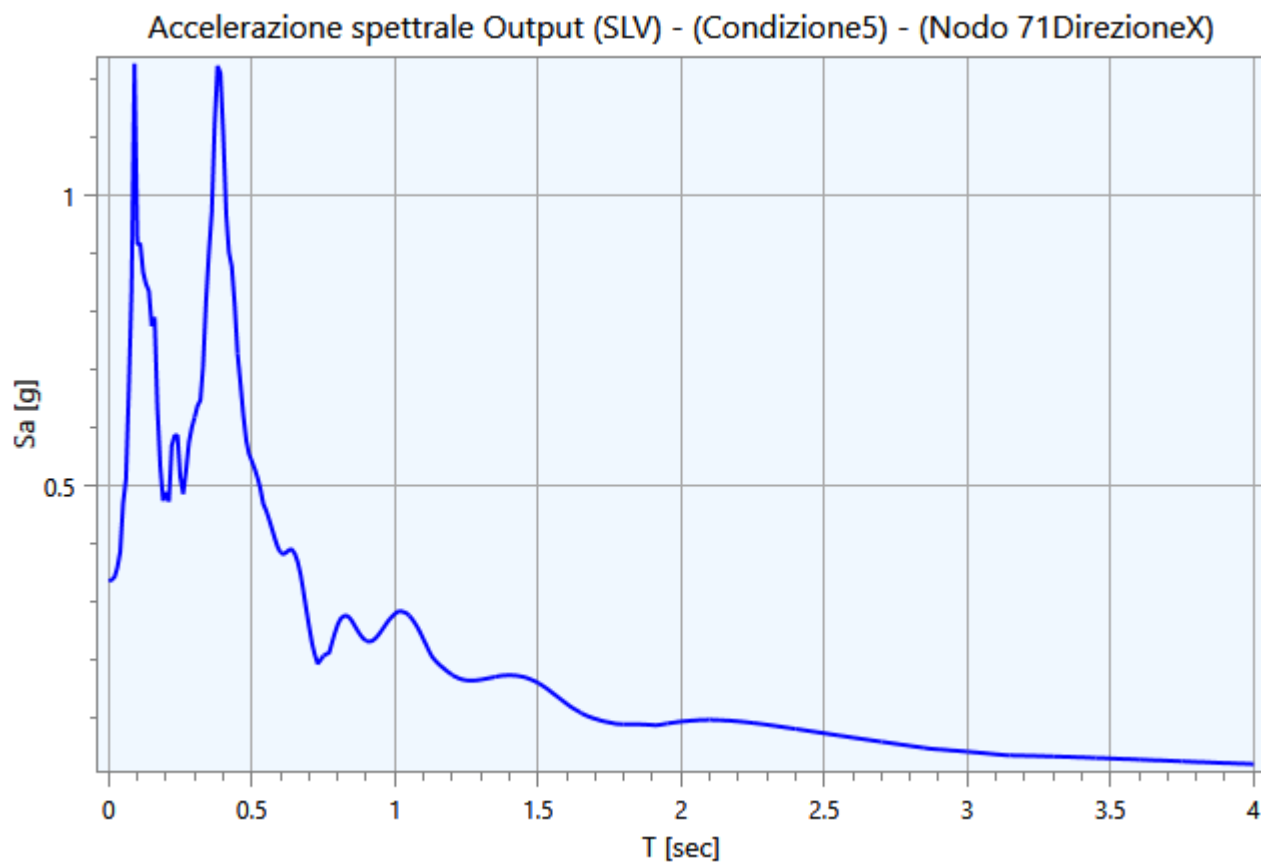


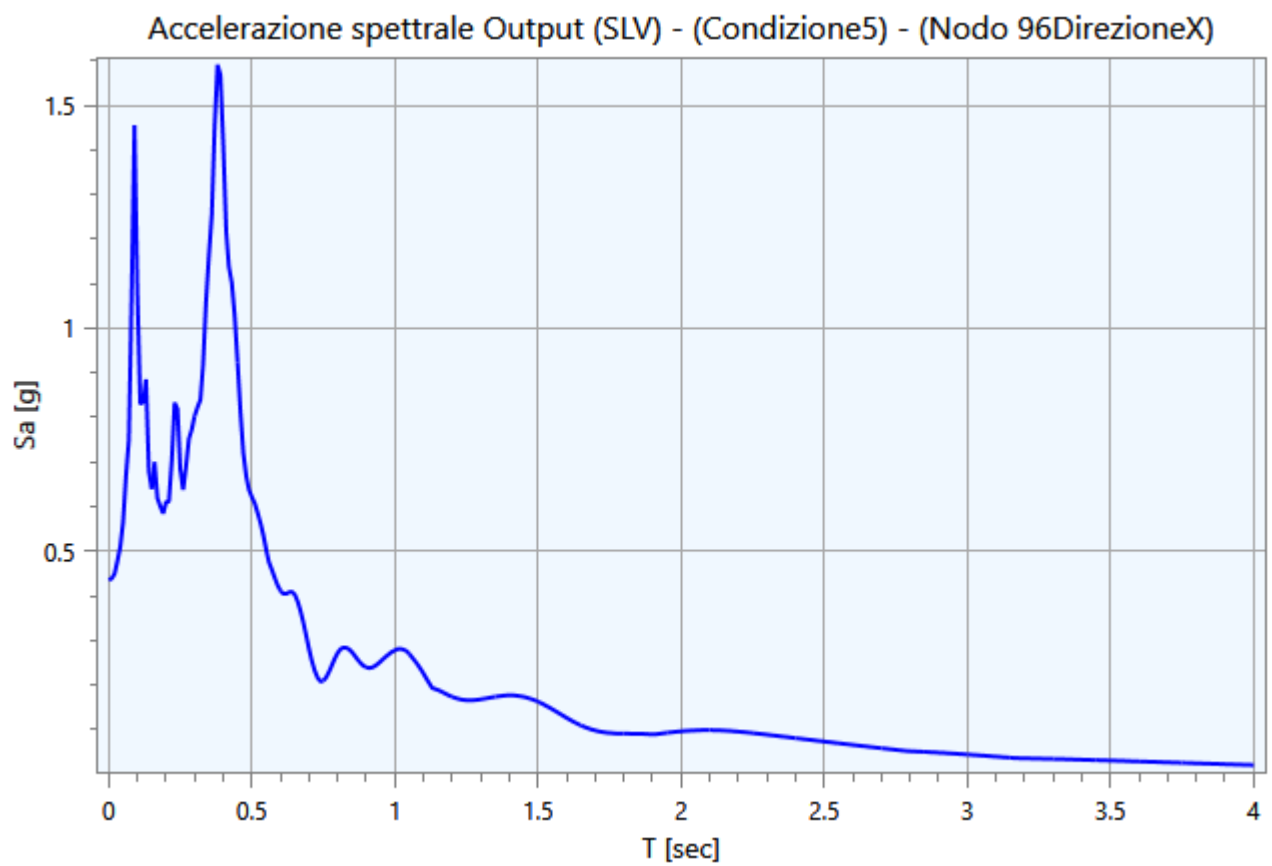
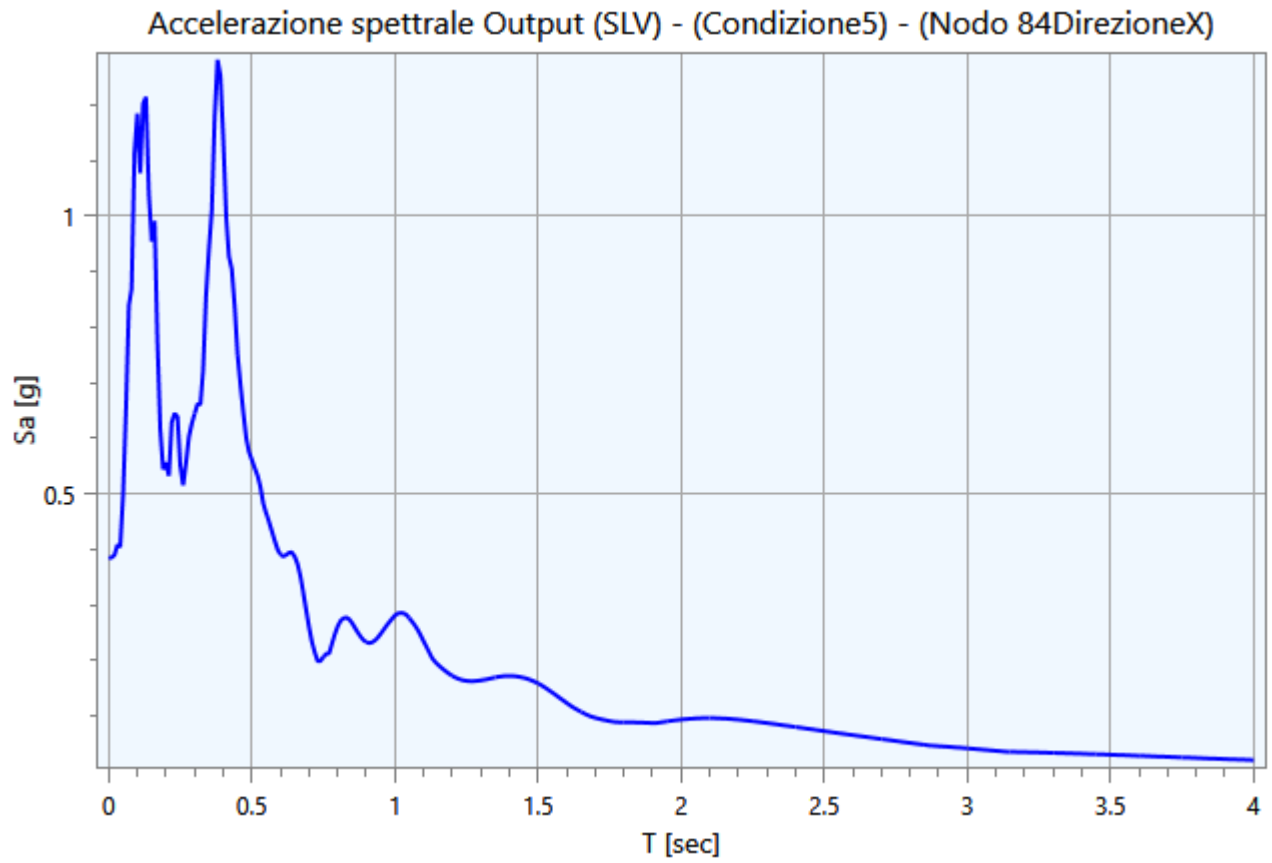


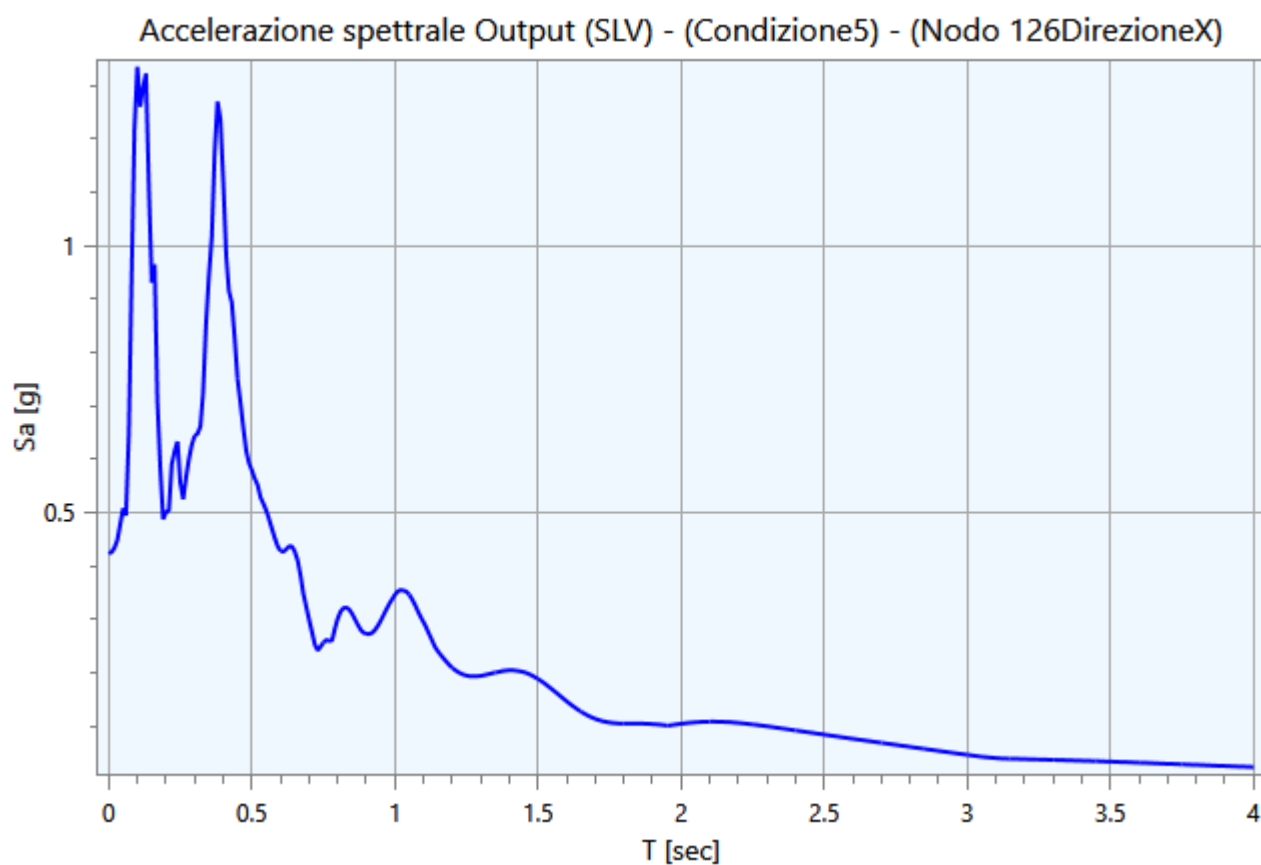
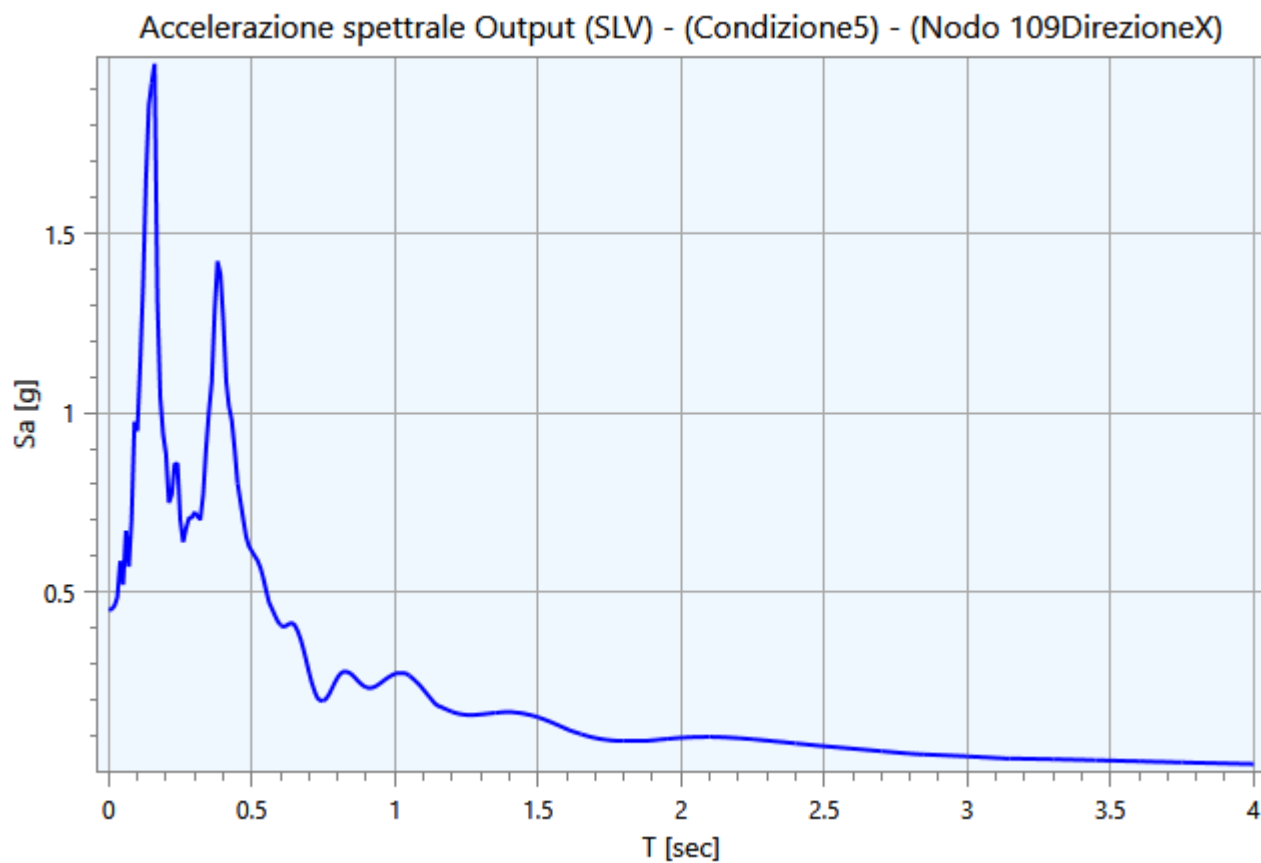


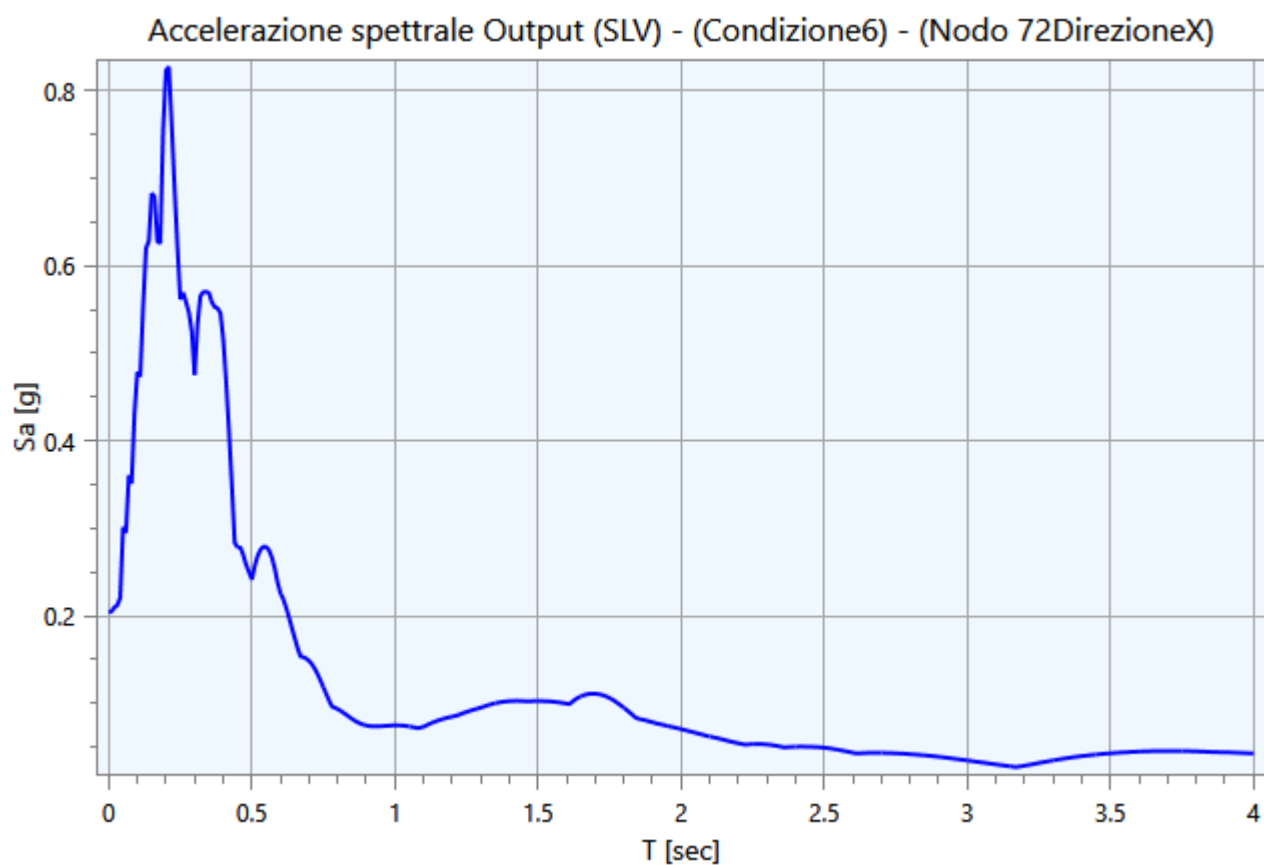
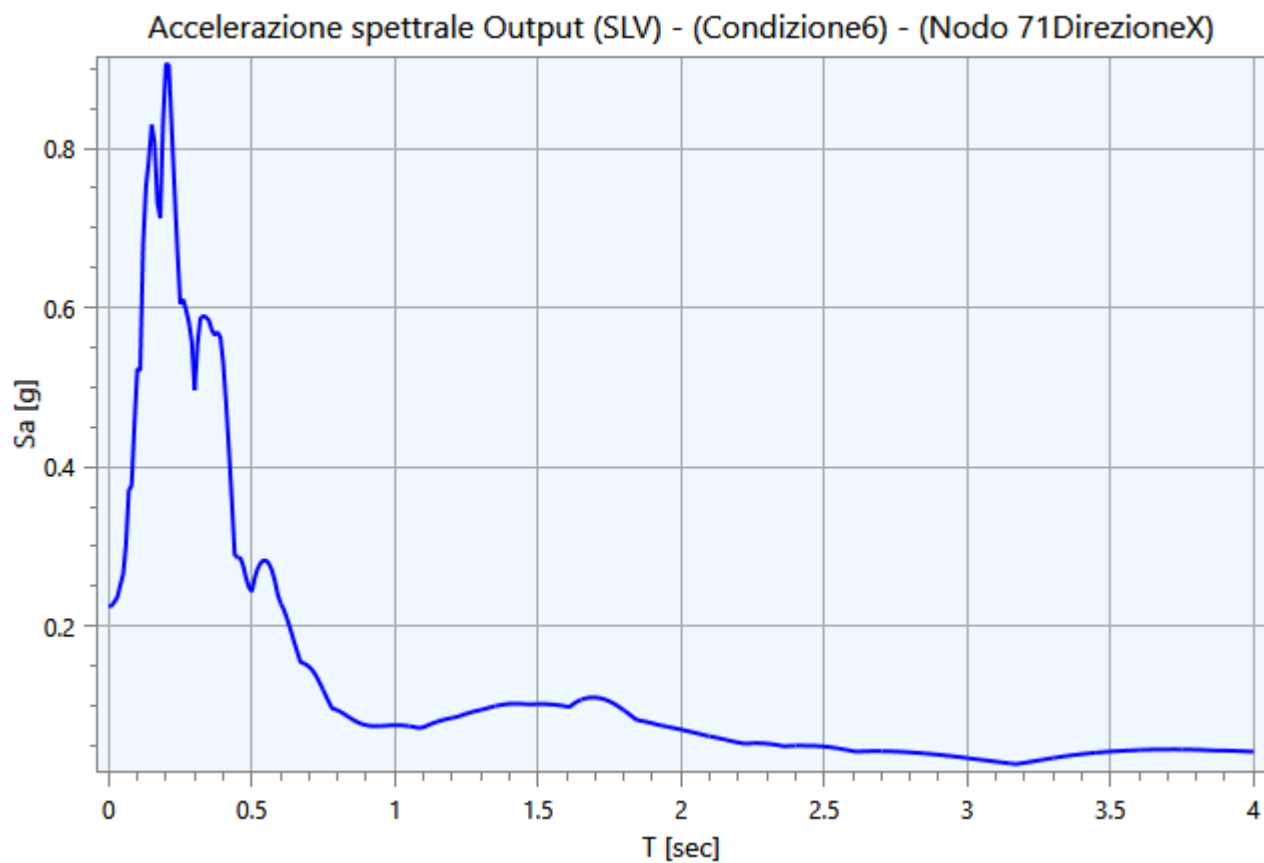


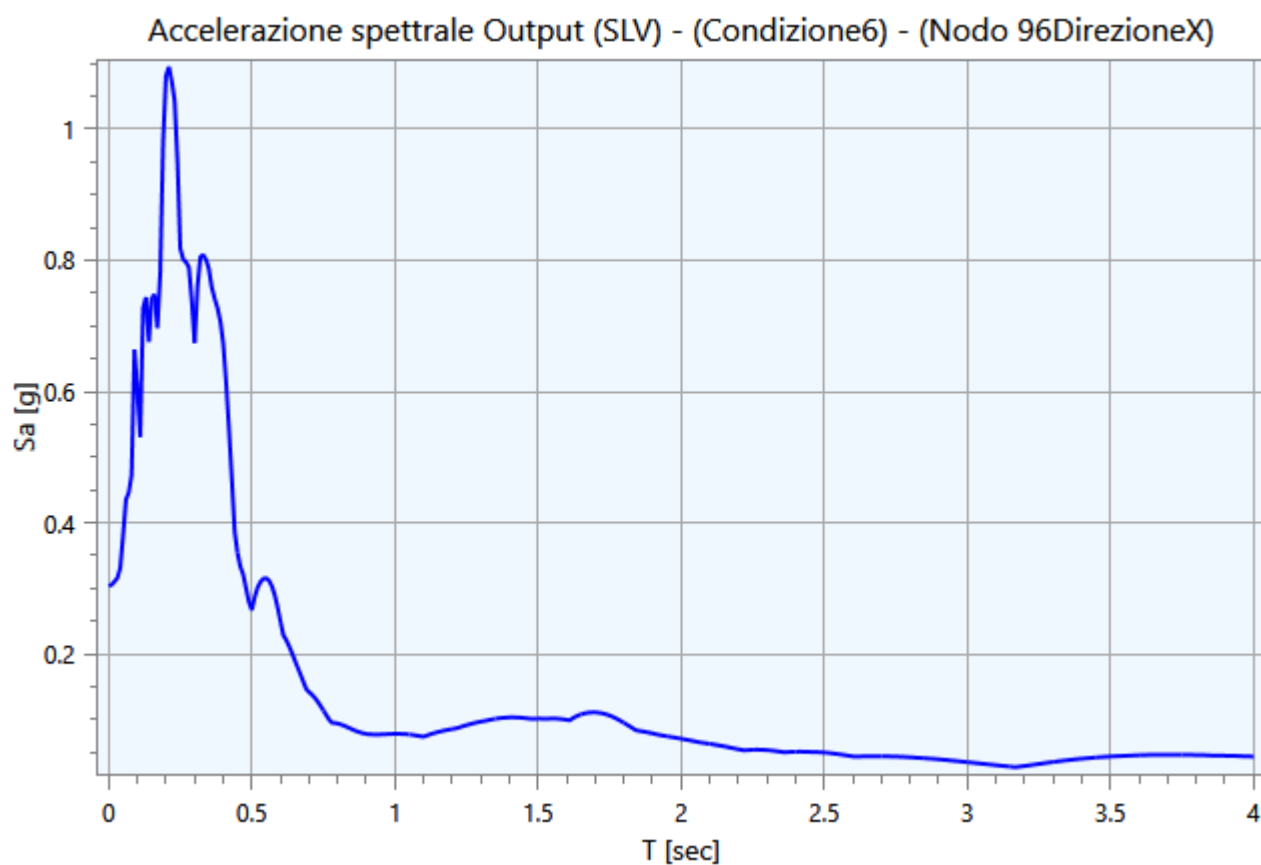
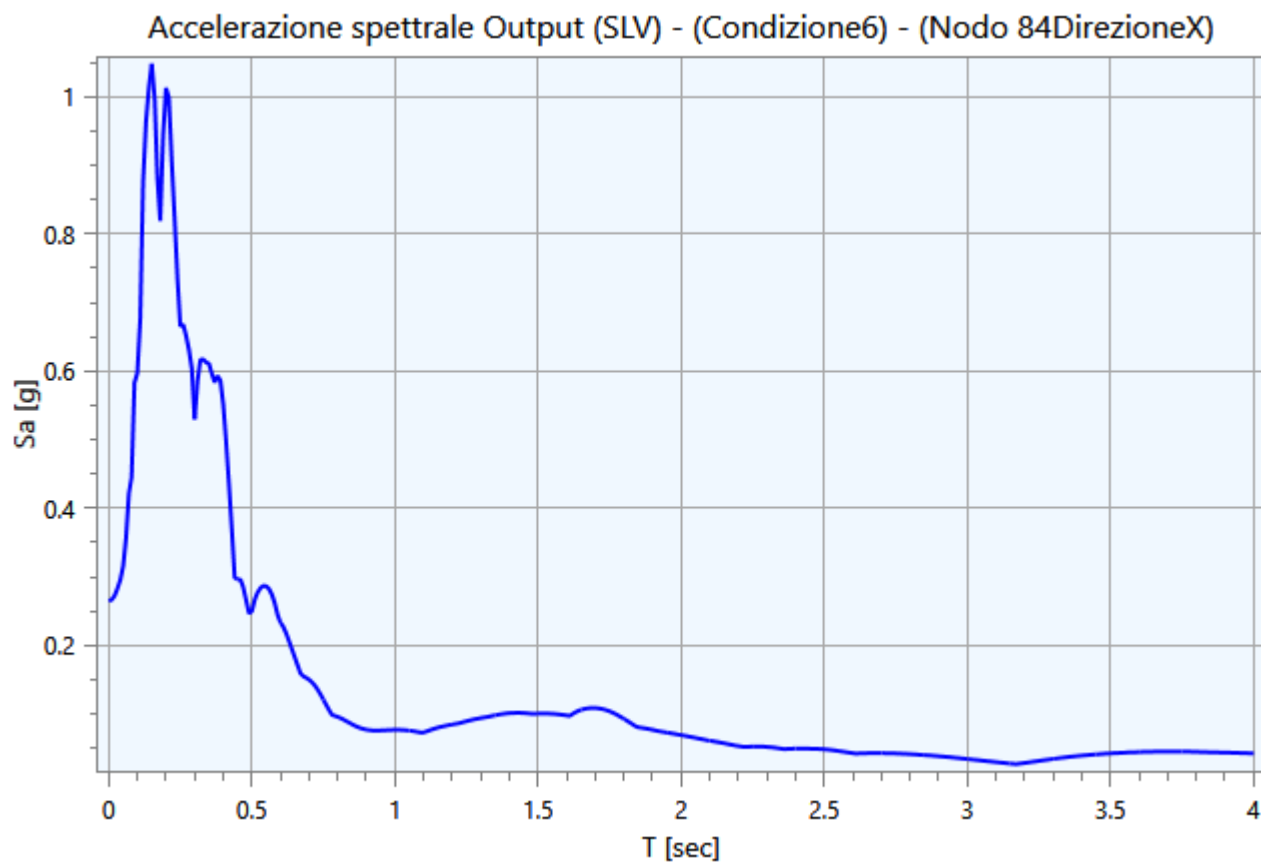




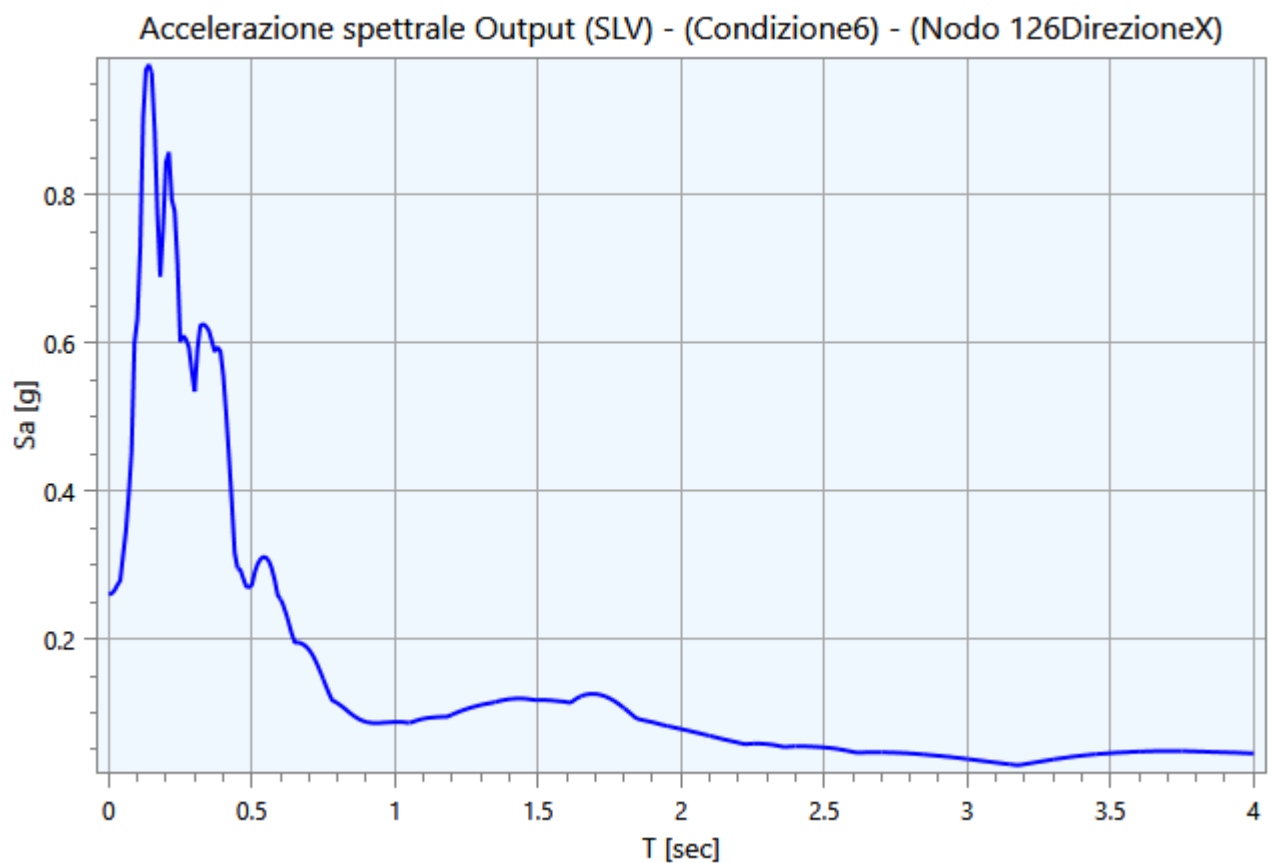
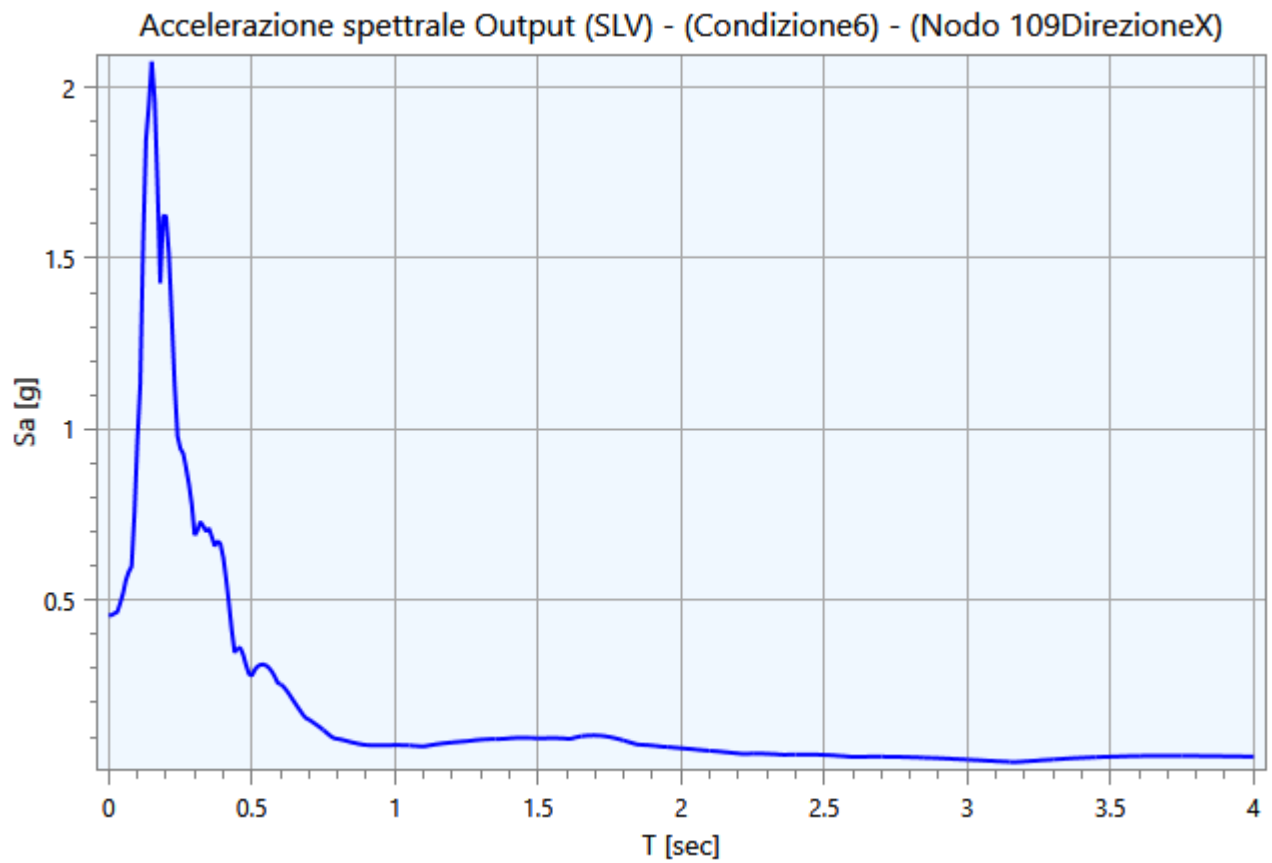


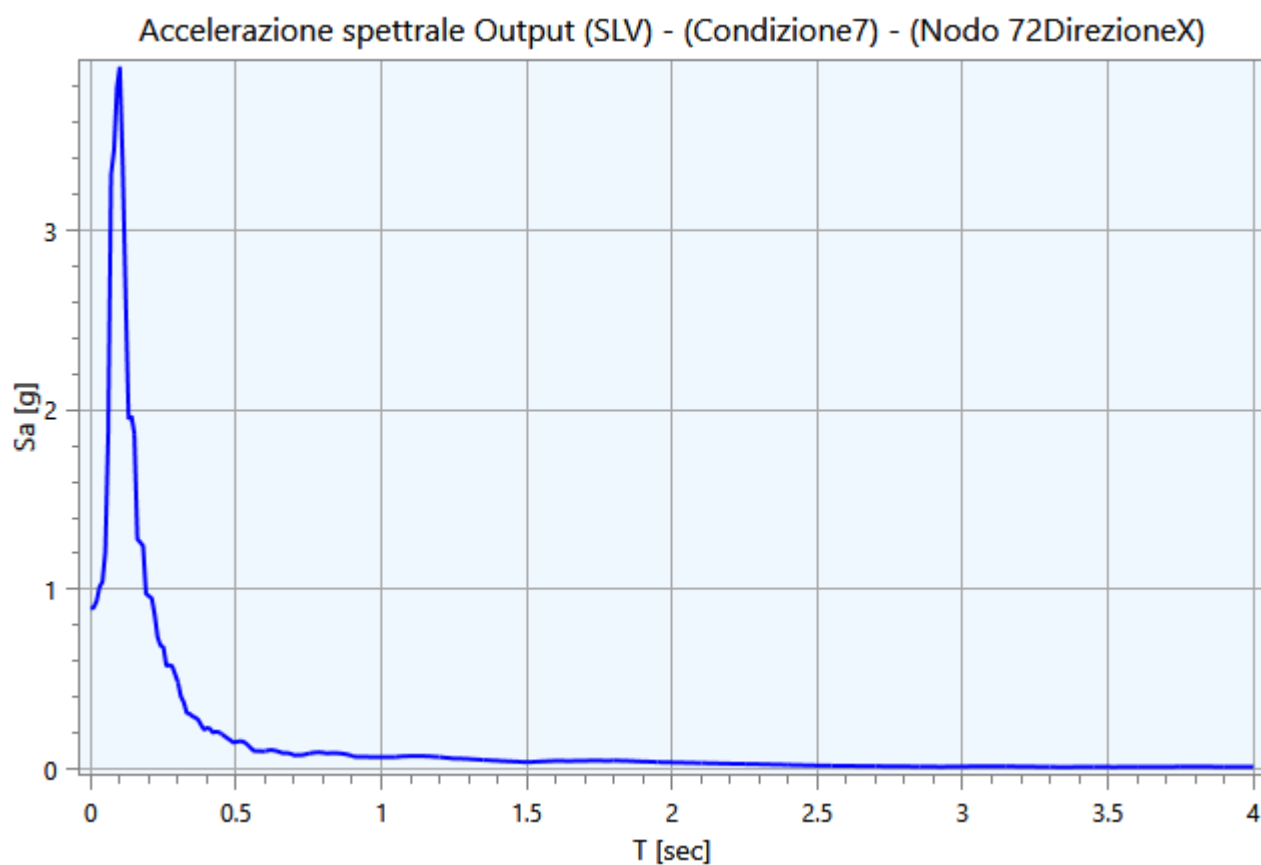
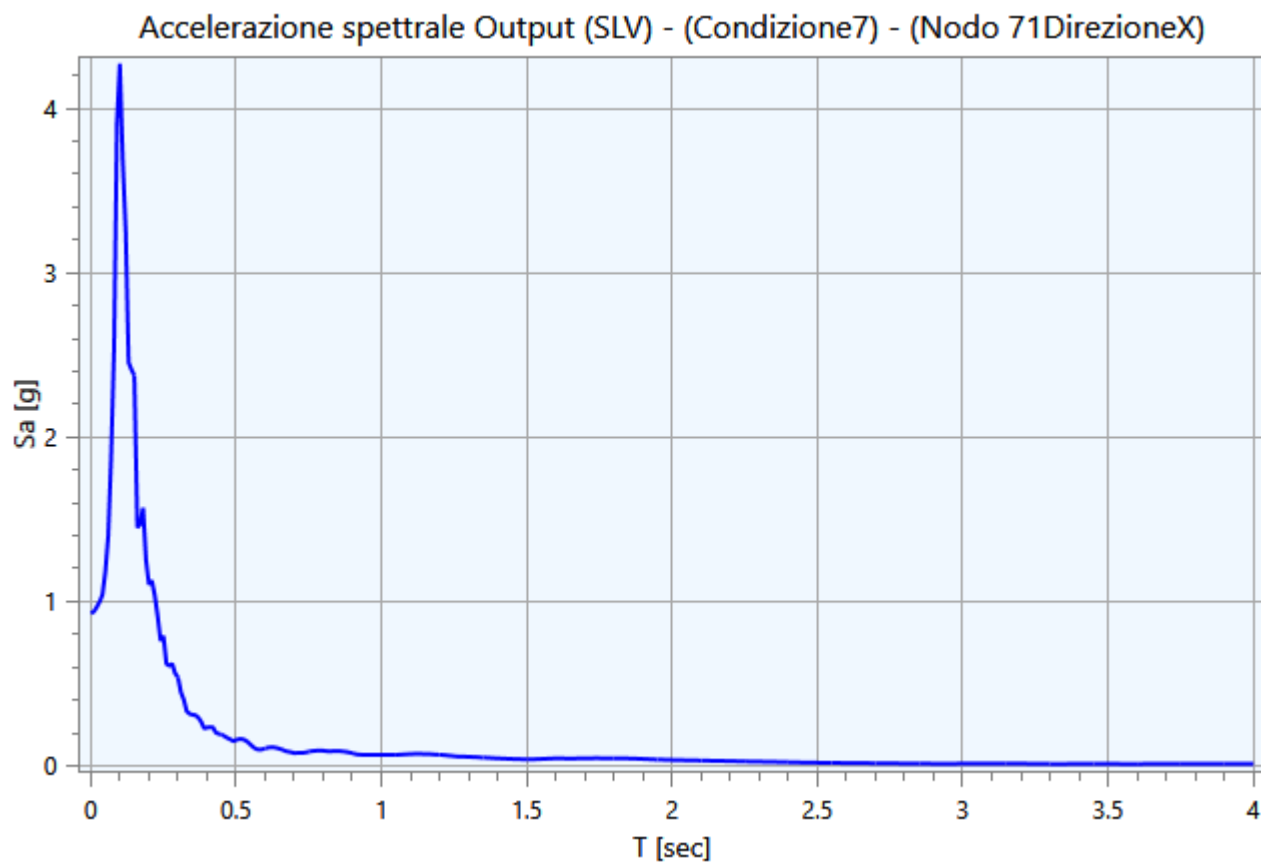


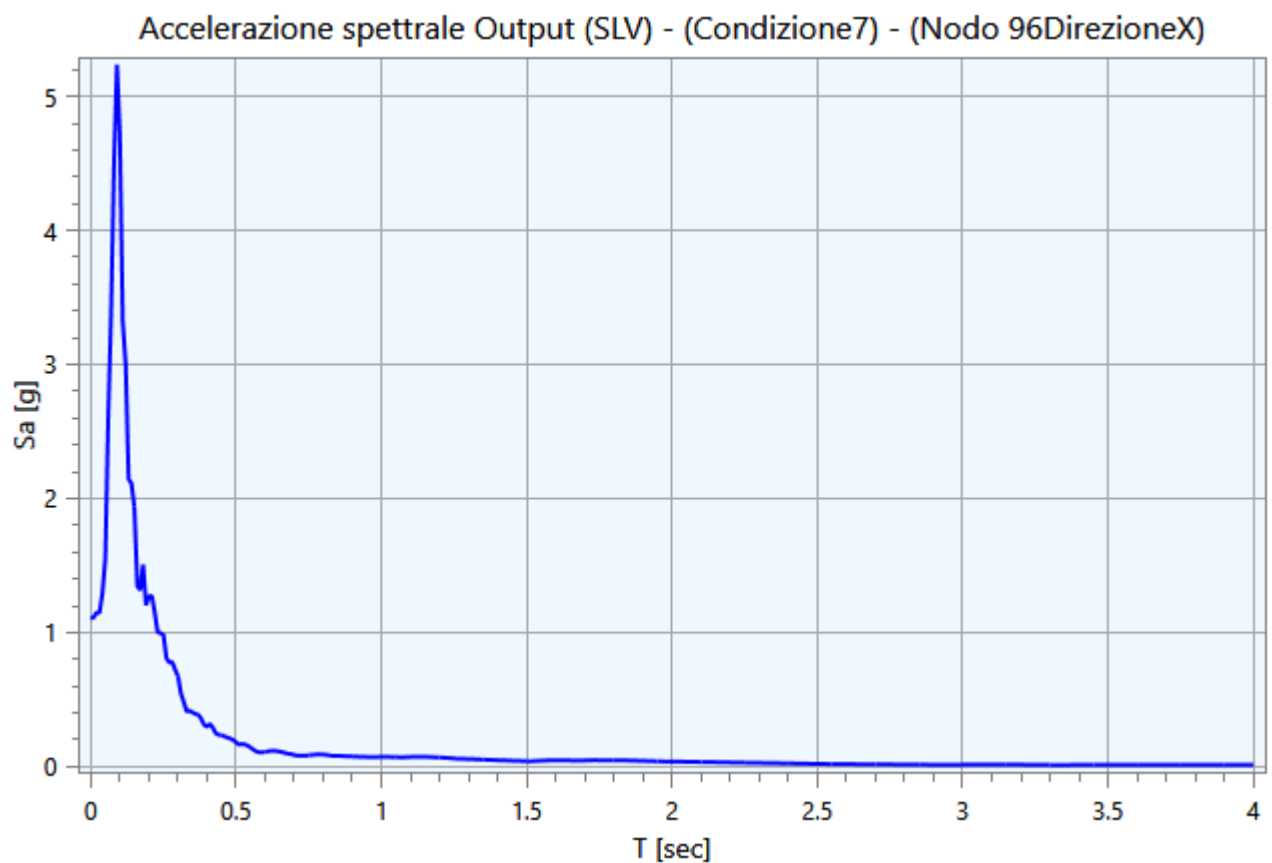
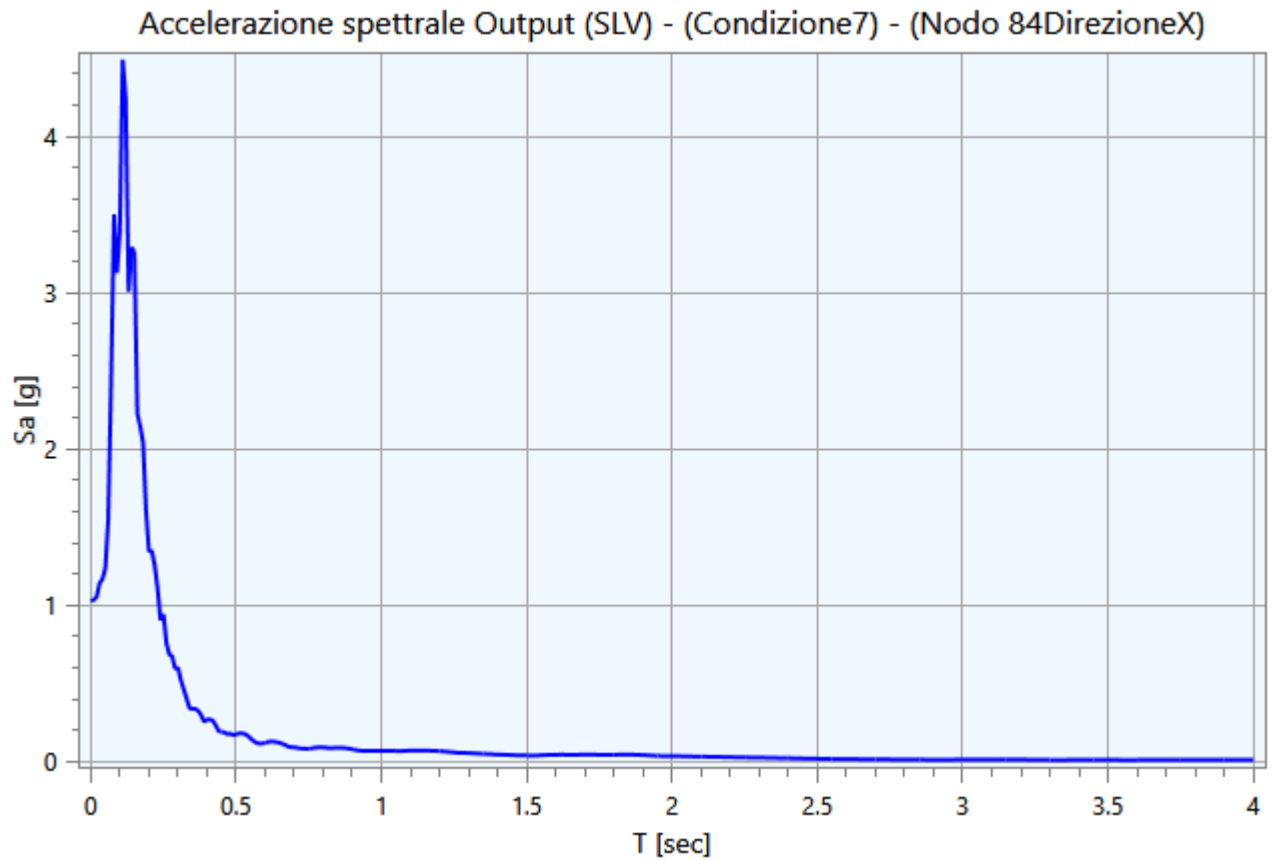


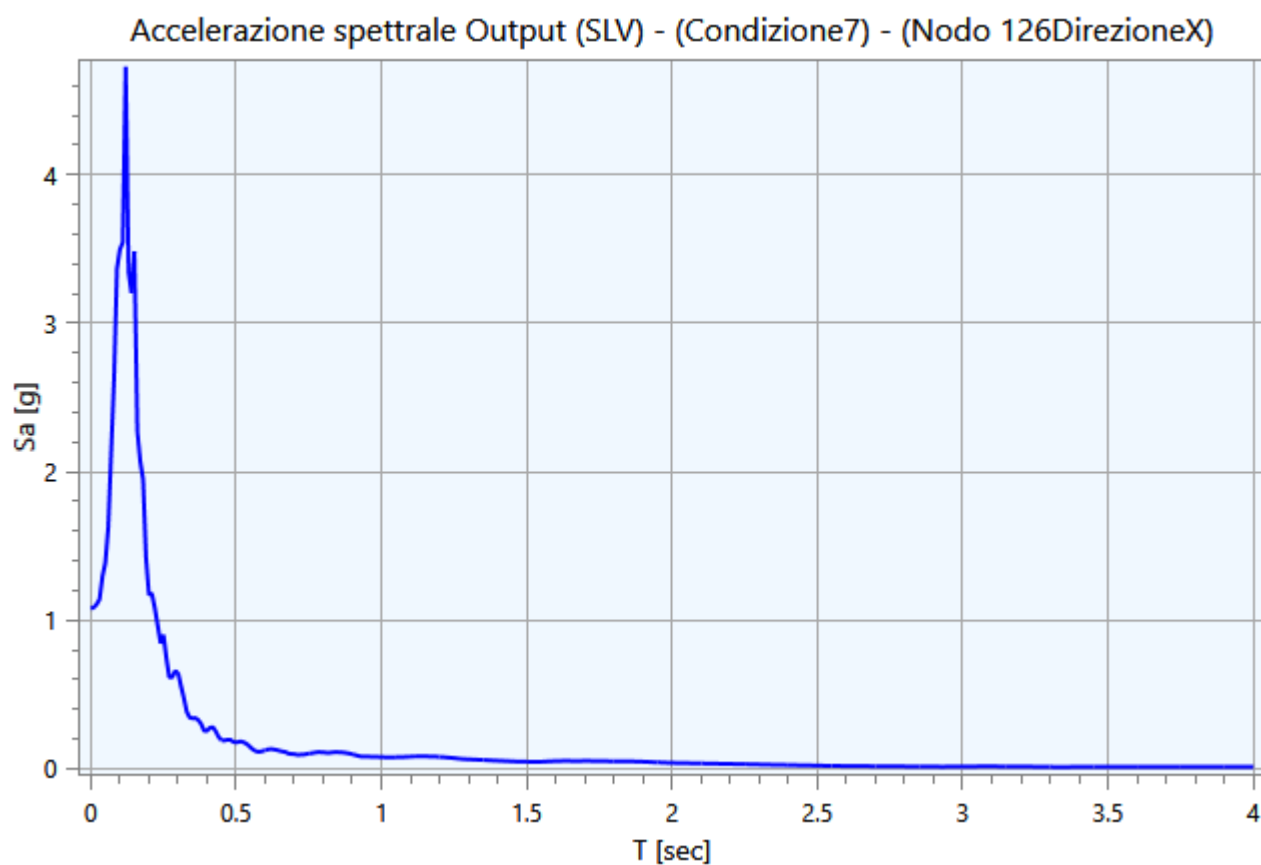
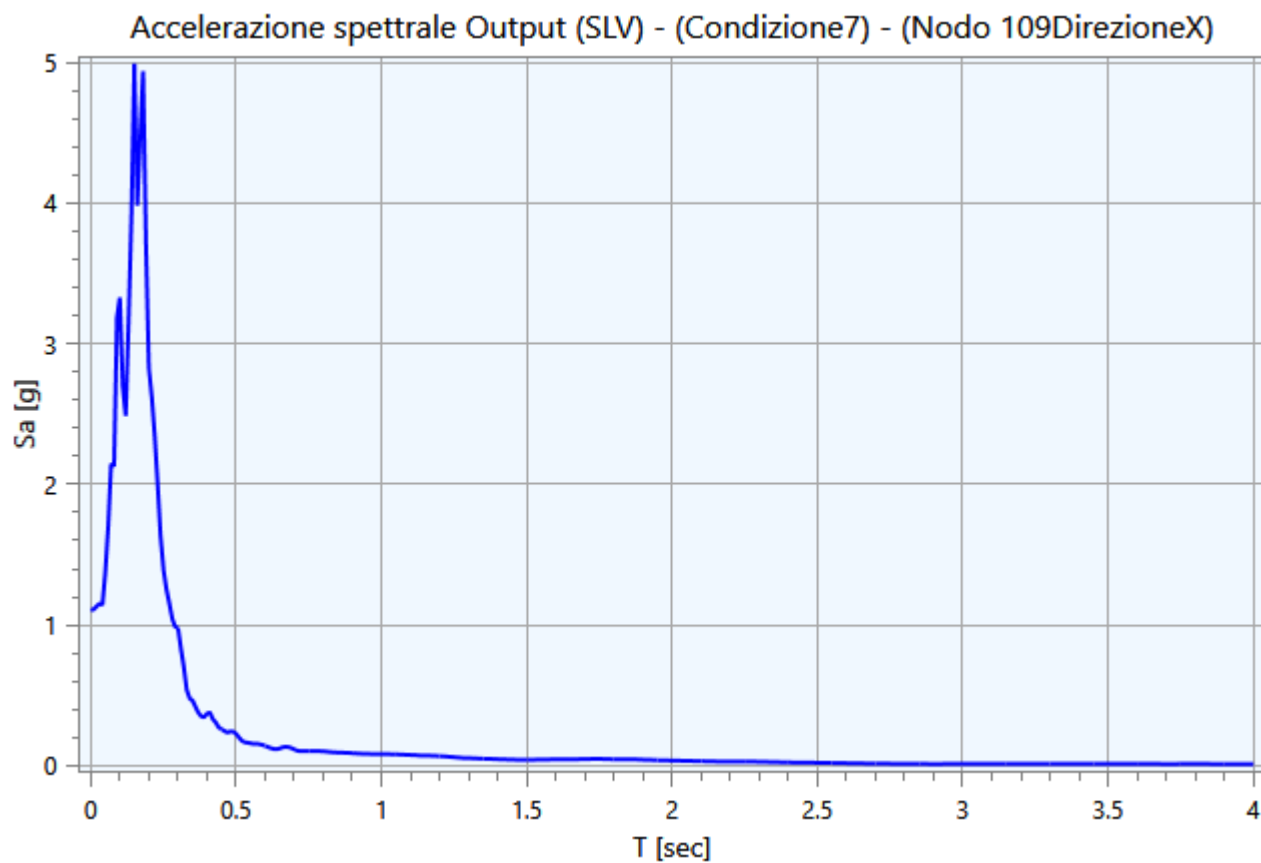






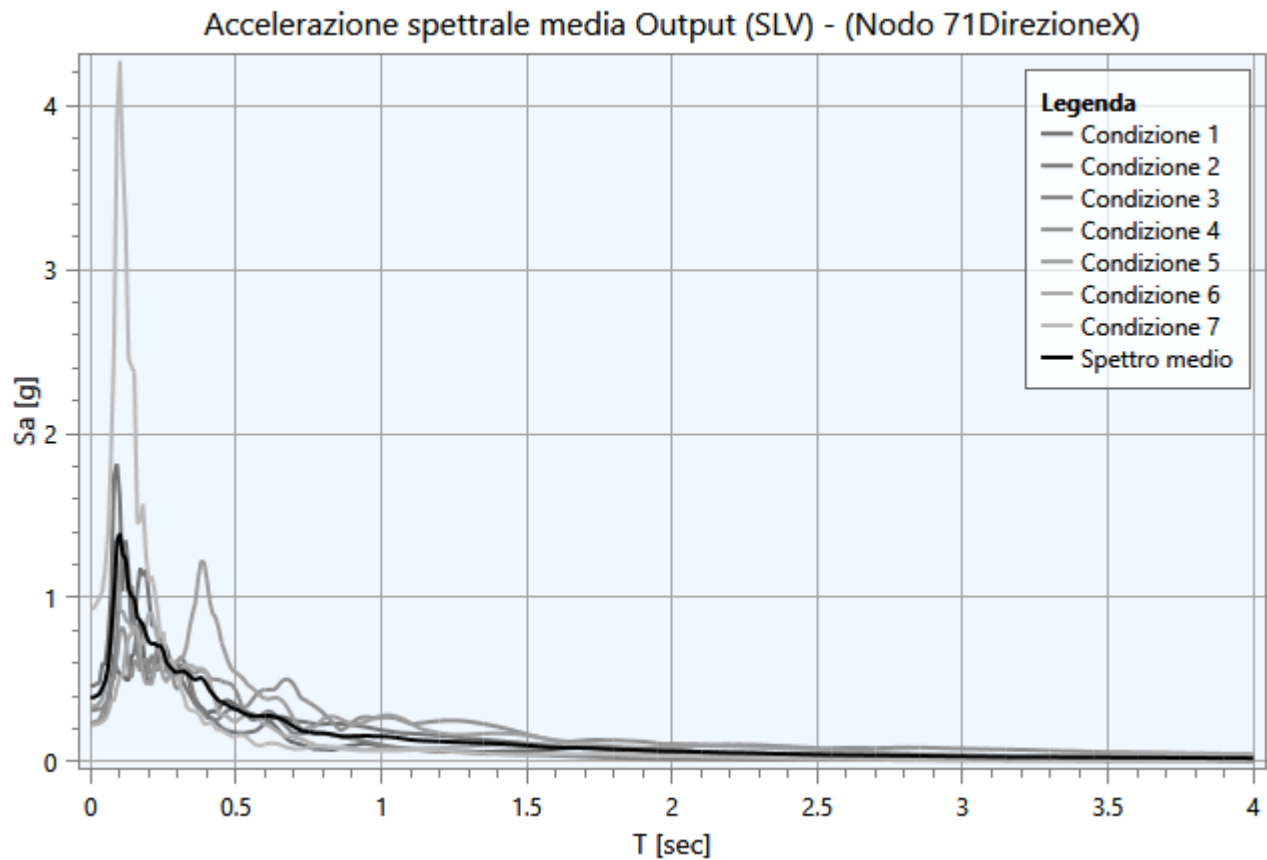




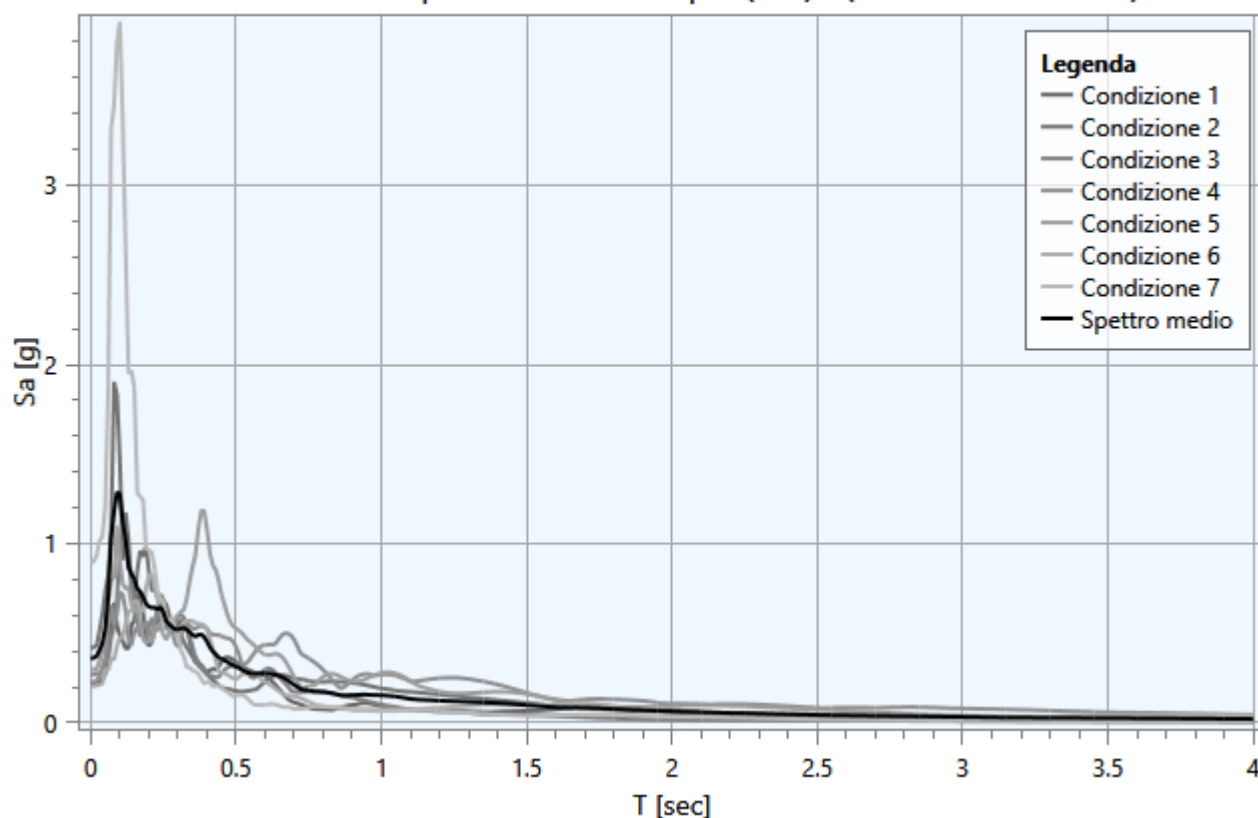


### 5.3 - Interpretazione dei risultati

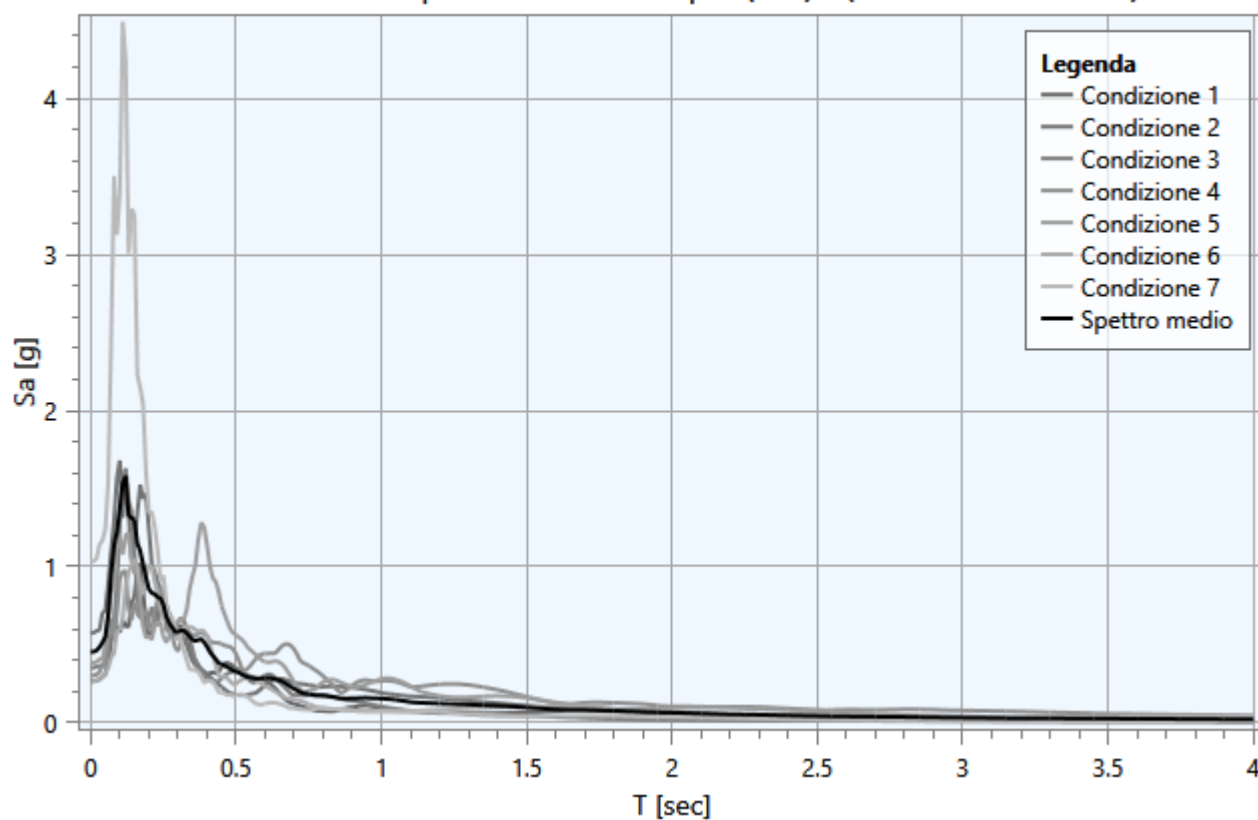
Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

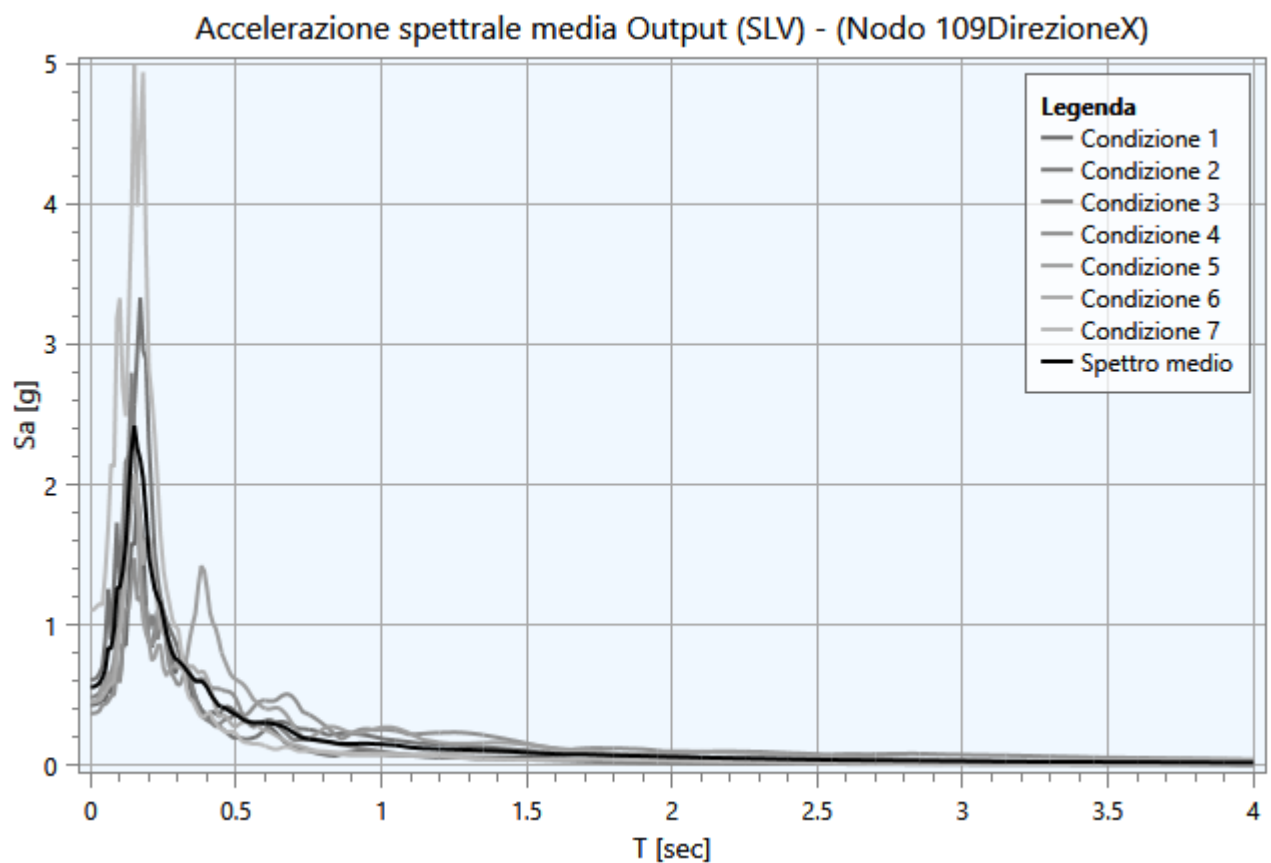
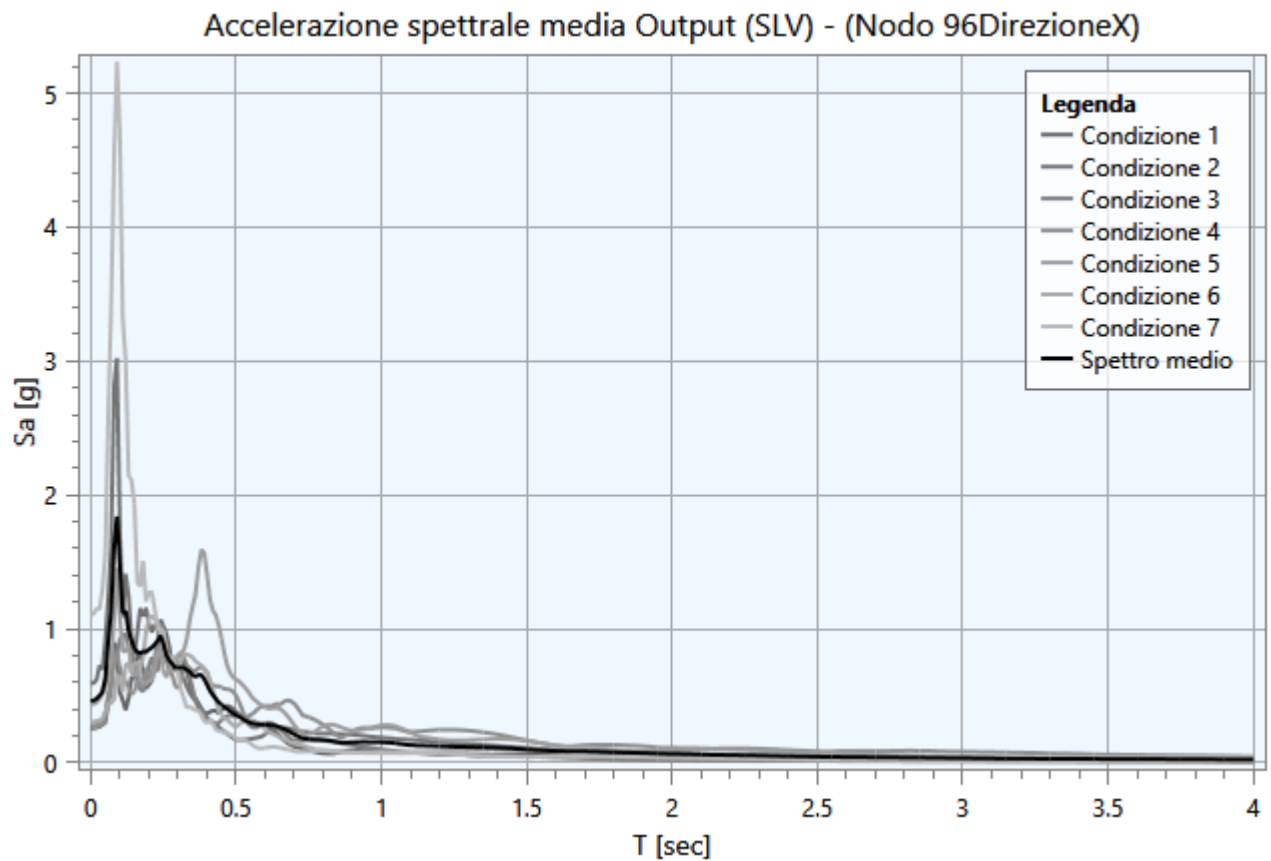


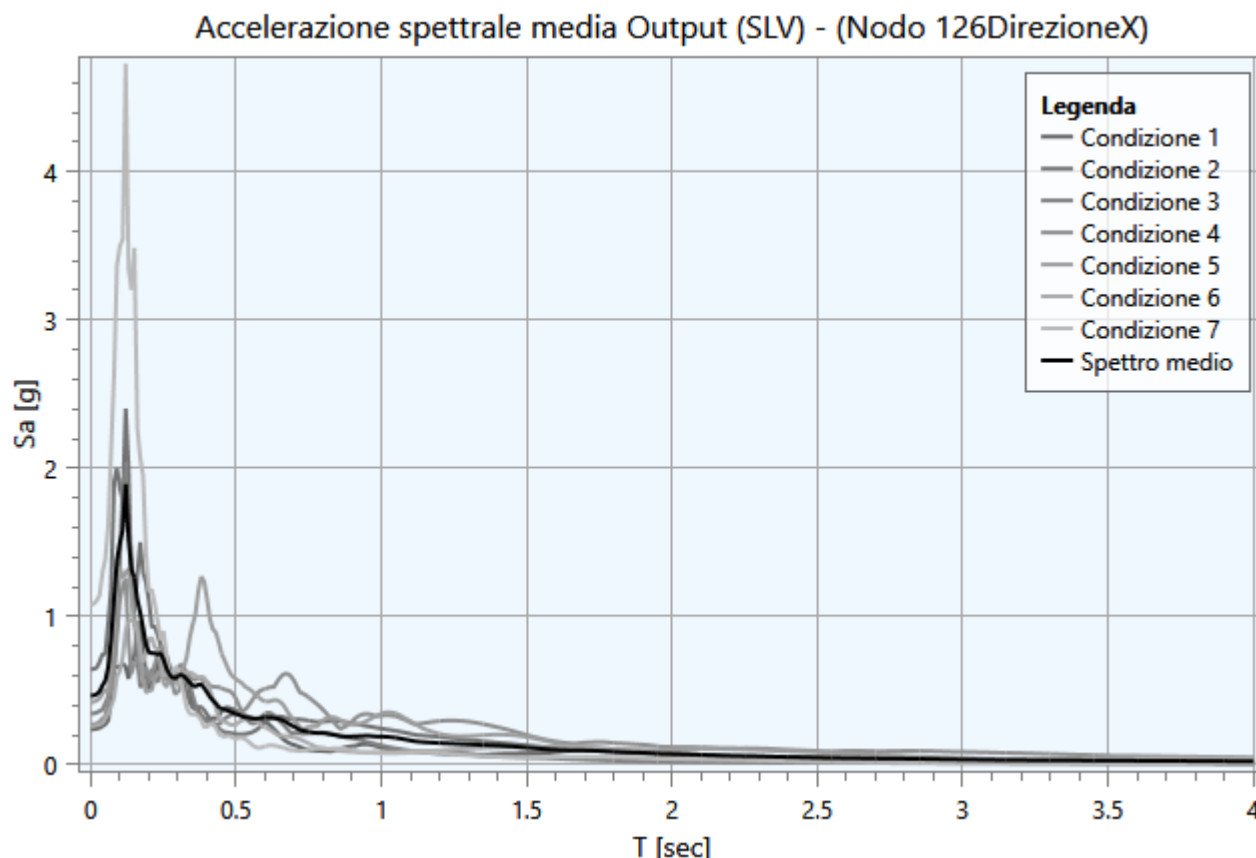
Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 72Direzionex)



Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 84Direzionex)







## 5.4 - Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL

La parametrizzazione degli spettri di risposta ottenuti nei vari punti di controllo viene condotta mediante la procedura suggerita dagli “Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica” (GdL MS, 2008 – parti I e II – punto 2.5.4.3.1 pag 92). Partendo dallo spettro di risposta medio in accelerazione rappresentativo dei 7 accelerogrammi, tale procedura prevede:

- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in accelerazione ( $TA$ );
- il calcolo del valor medio dello spettro in accelerazione ( $SA$ ) nell'intorno tra  $0.5 TA - 1.5 TA$ ;
- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in pseudovelocità ( $TV$ );
- il calcolo del valor medio dello spettro in pseudovelocità ( $SV$ ) nell'intorno tra  $0.8 TV - 1.2 TV$ ;
- il calcolo del valore di  $T_c = 2\pi \frac{SV}{SA}$ ;
- il calcolo del valore di  $T_b = 1/3 T_c$ ;
- il calcolo del valore  $T_d = 4 a_g + 1.6$  con  $a_g$  uguale al valore di accelerazione a  $T$  uguale a zero;
- l'applicazione delle equazioni riportate nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) per la determinazione dei tratti dello spettro tra  $T_0, T_b, T_c, T_d, T_4$ .

Di seguito vengono riportati, per ogni analisi, i parametri degli spettri parametrizzati per i vari punti di controllo presenti nella sezione oggetto di studio.

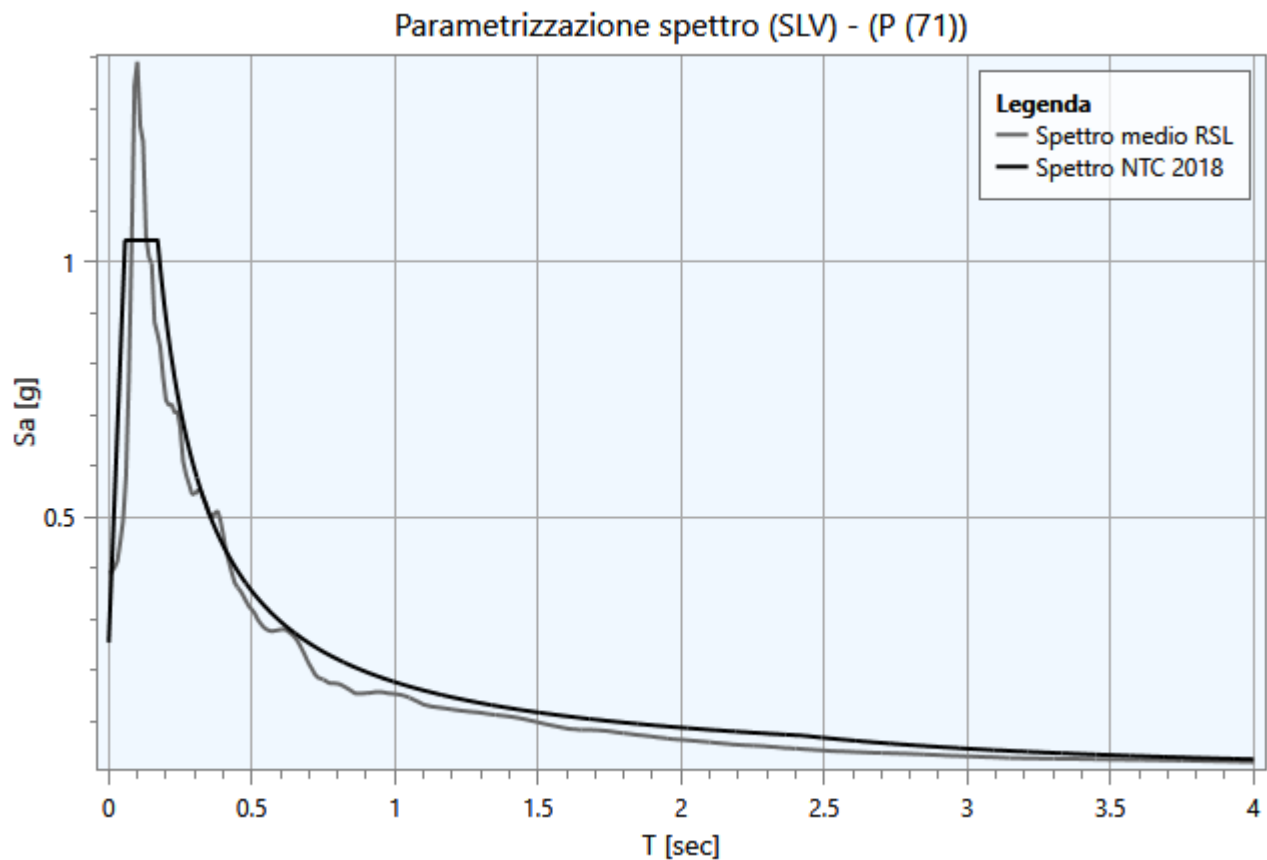
**SLV**



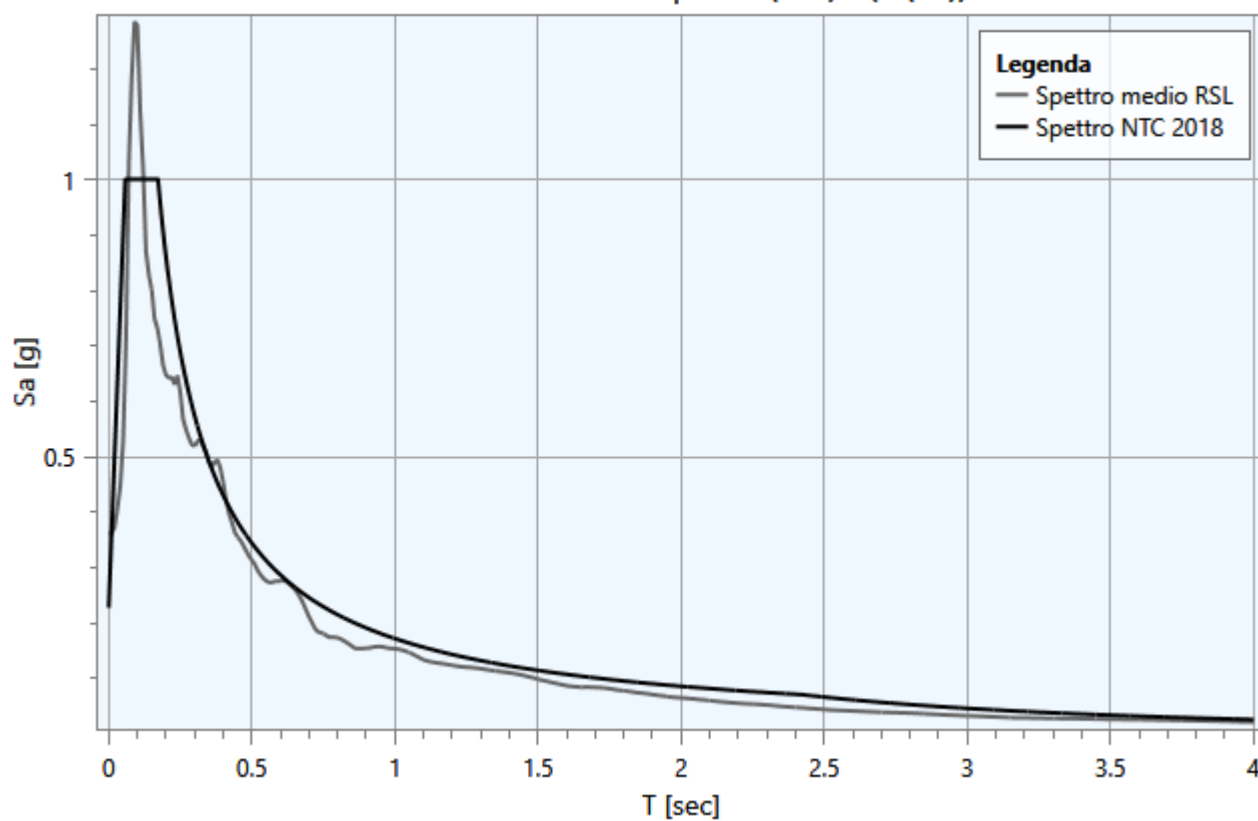
Punto di controllo	$A_g [g]$	$F0$	$S$	$A_{max} [g]$	$T_b [sec]$	$T_c [sec]$	$T_d [sec]$
P (71)	0.205	4.080	1.246	0.255	0.057	0.171	2.420
P (72)	0.205	4.392	1.112	0.228	0.057	0.172	2.420
P (84)	0.205	4.737	1.274	0.261	0.050	0.151	2.420
P (96)	0.205	3.712	1.579	0.324	0.062	0.187	2.420
P (109)	0.205	4.610	1.791	0.367	0.068	0.204	2.420
P (126)	0.205	4.945	1.263	0.259	0.049	0.146	2.420

dove:

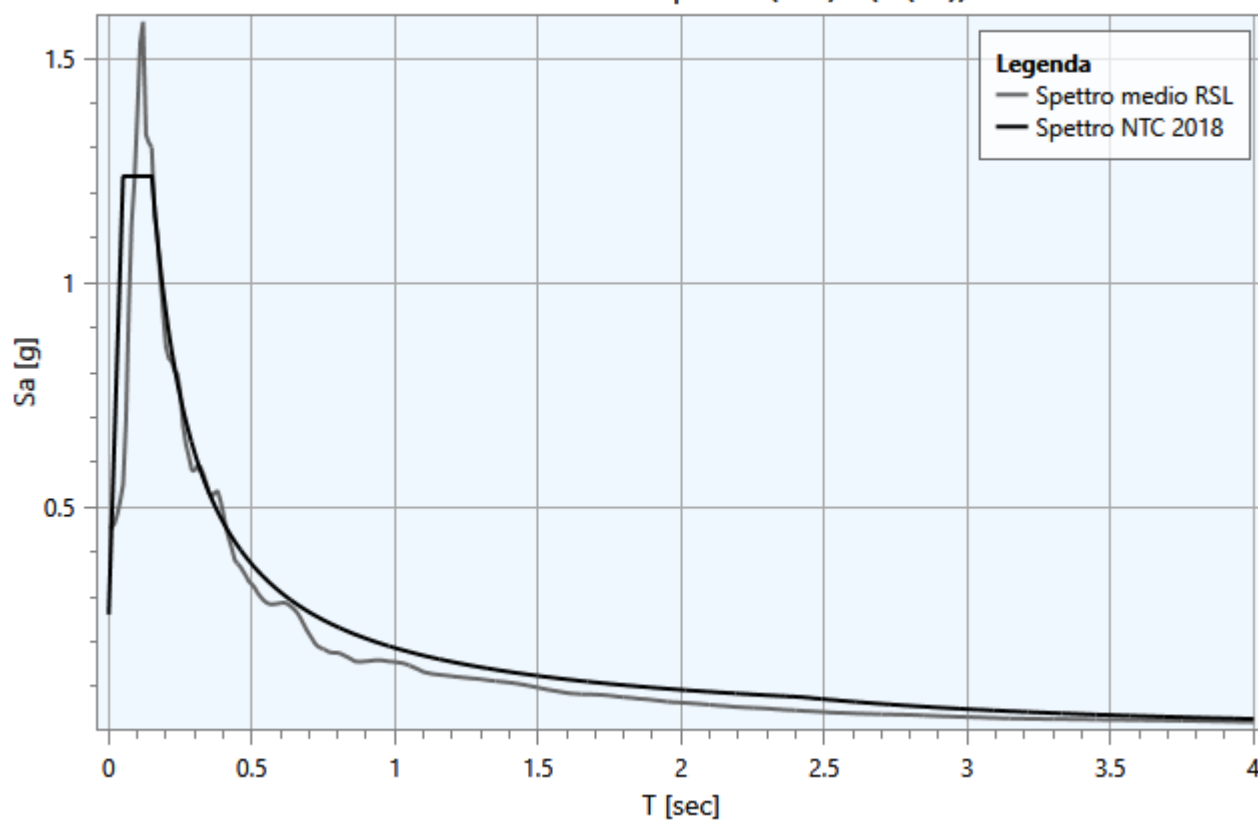
- $A_g$  : accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F0$  : valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $S$  : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- $A_{max}$  : punto di ancoraggio a  $T=0$  dello spettro di output;
- $T_b$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- $T_c$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- $T_d$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

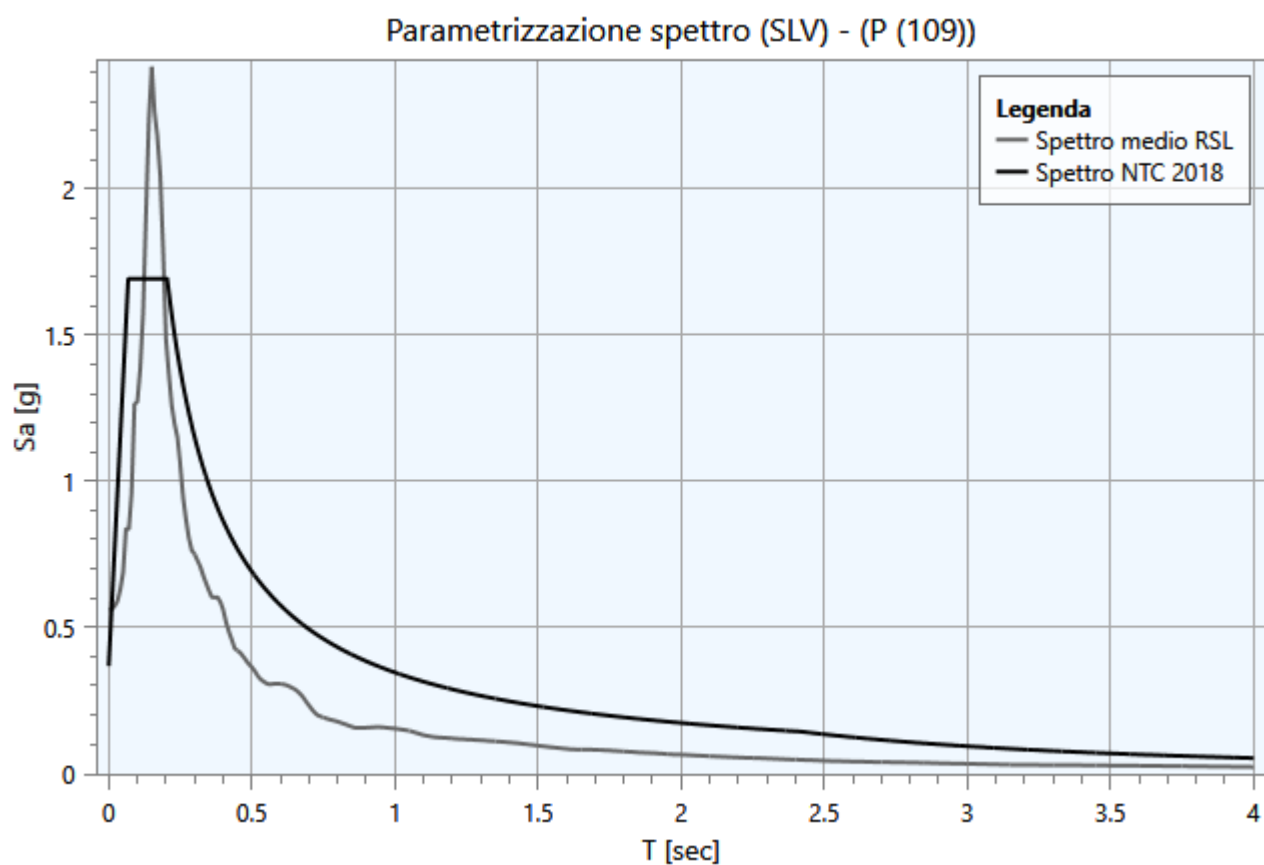
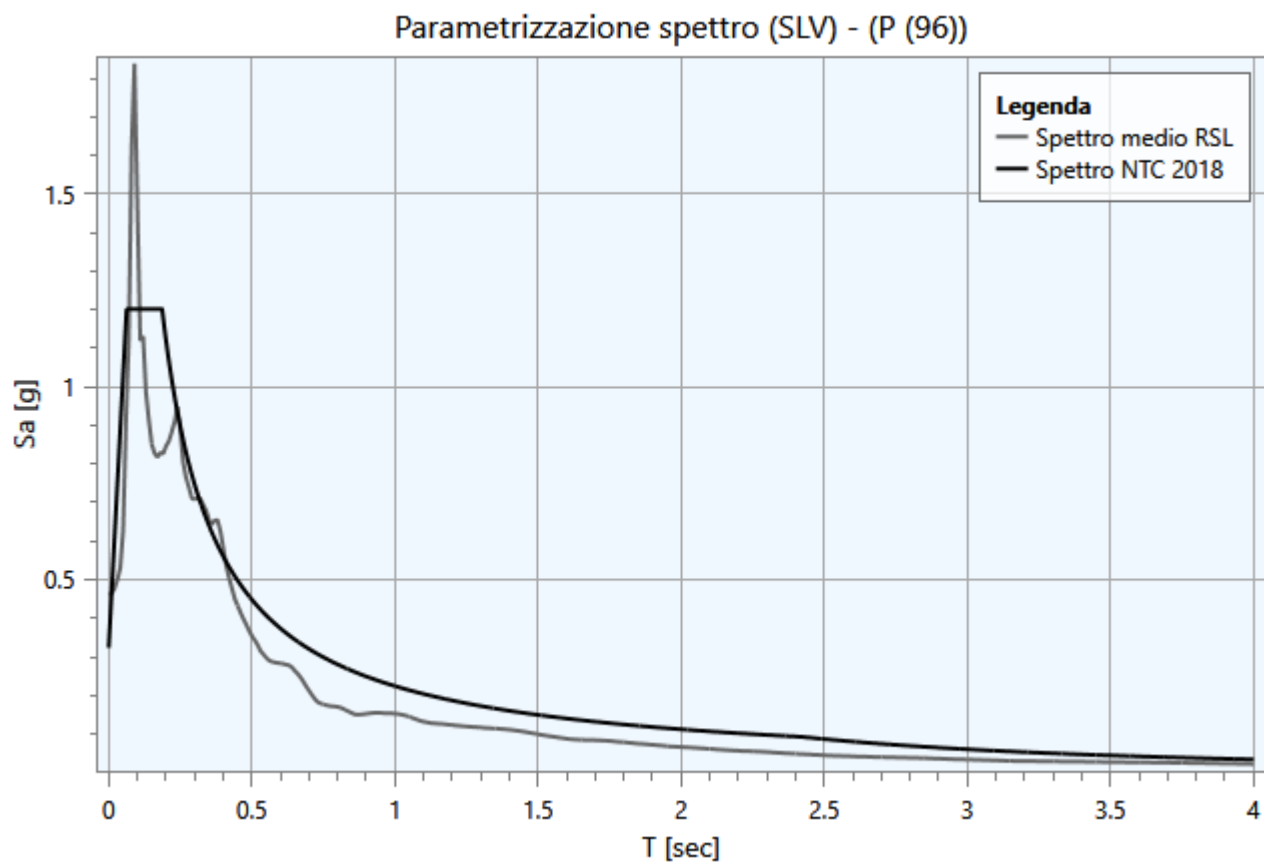


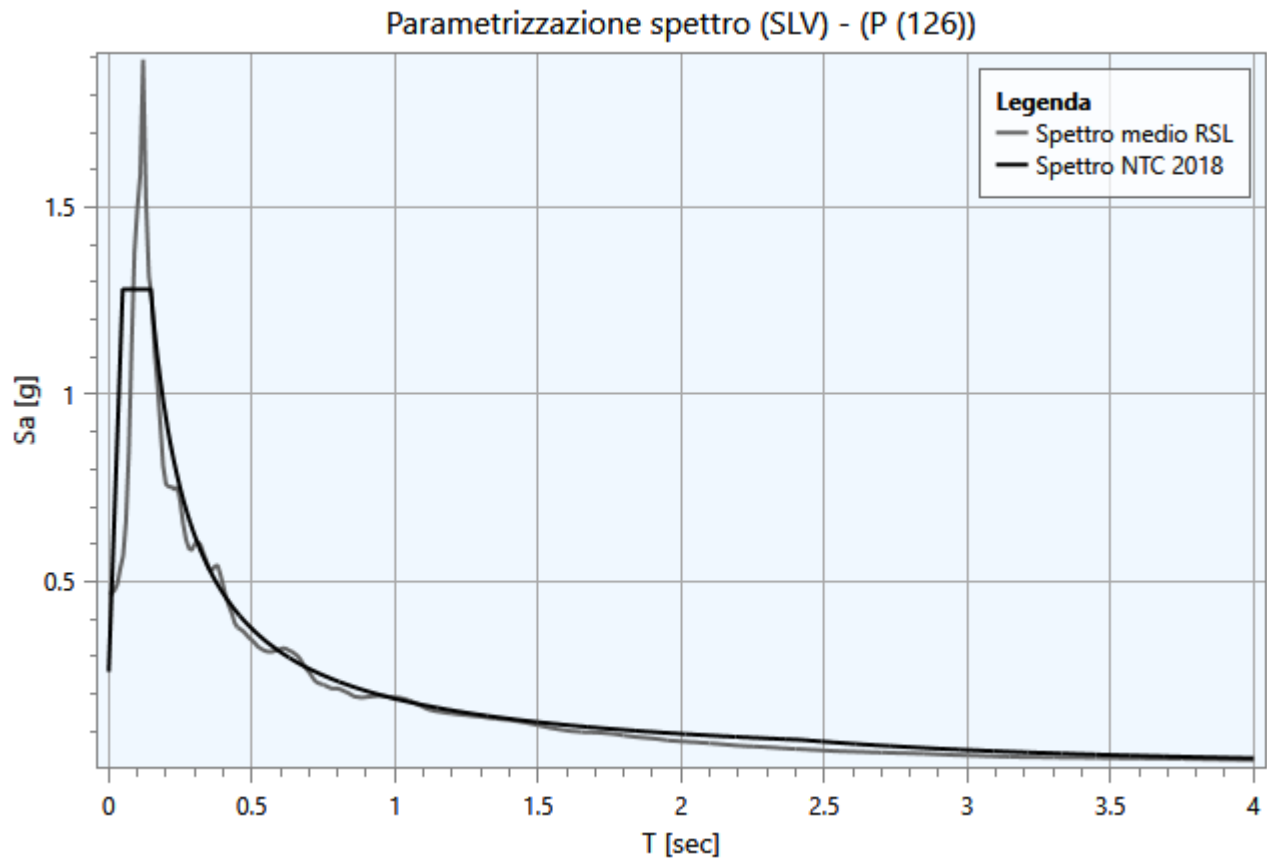
Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (72))



Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (84))







**Analisi di stabilità dei pendii con : BISHOP (1955) - SEZIONE GG' - CONDIZIONI STATICHE**

Calcolo eseguito secondo	NTC 2018
Numero di strati	2.0
Numero dei conci	10.0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1.1
Coefficiente parziale resistenza	1.1
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	2970.62 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	1620.99 m
Ascissa vertice destro superiore xs	3026.02 m
Ordinata vertice destro superiore ys	1654.99 m
Passo di ricerca	10.0
Numero di celle lungo x	10.0
Numero di celle lungo y	10.0

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	2560.24	1471.54
2	2581.97	1473.54
3	2582.79	1475.54
4	2591.82	1477.54
5	2596.2	1479.54
6	2623.82	1481.54
7	2625.69	1483.54
8	2635.29	1483.54
9	2641.32	1485.54
10	2663.02	1487.54
11	2684.78	1491.54
12	2688.72	1493.54
13	2709.67	1497.54
14	2716.0	1499.54
15	2746.7	1503.54
16	2764.94	1505.54
17	2789.45	1509.22
18	2794.02	1511.54
19	2796.16	1513.54
20	2809.52	1515.54
21	2823.67	1519.54
22	2836.99	1521.54
23	2878.14	1529.54
24	2920.68	1539.54
25	2925.08	1541.54
26	2932.5	1543.54
27	2971.96	1549.54

28	2983.37	1559.54
29	3018.17	1569.54
30	3050.46	1581.65
31	3080.74	1588.31
32	3101.76	1591.54
33	3133.58	1599.54
34	3166.85	1609.54
35	3174.32	1611.78

Vertici strato .....1

N	X (m)	y (m)
1	2560.24	1470.08
2	2578.23	1471.86
3	2588.37	1474.06
4	2607.66	1477.22
5	2632.42	1480.22
6	2661.47	1484.33
7	2685.55	1489.05
8	2712.69	1495.65
9	2751.68	1500.7
10	2790.62	1506.54
11	2793.81	1507.99
12	2796.99	1510.21
13	2842.04	1517.58
14	2925.28	1536.1
15	2945.8	1540.67
16	2948.08	1541.97
17	2958.68	1543.6
18	2972.9	1546.67
19	2986.35	1555.15
20	2991.53	1557.09
21	3003.6	1560.66
22	3018.44	1565.36
23	3061.75	1578.3
24	3104.4	1588.23
25	3114.18	1590.19
26	3140.1	1596.68
27	3166.85	1604.64
28	3174.32	1606.85

Coefficienti parziali azioni

Sfavorevoli: Permanenti, variabili

1.0 1.0

Favorevoli: Permanenti, variabili

1.0 1.0

# Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Tangente angolo di resistenza al taglio	1.25
Coesione efficace	1.25
Coesione non drenata	1.4
Riduzione parametri geotecnici terreno	Si

## Stratigrafia

Strato	Coesione (kg/cm2)	Coesione non drenata (kg/cm2)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (kN/m3)	Peso saturo (kN/m3)	Litologia	
1	0.12		21	19.10	20.70	f <sub>q</sub>	
2	0.4		32	20.50	22.70	LPS	

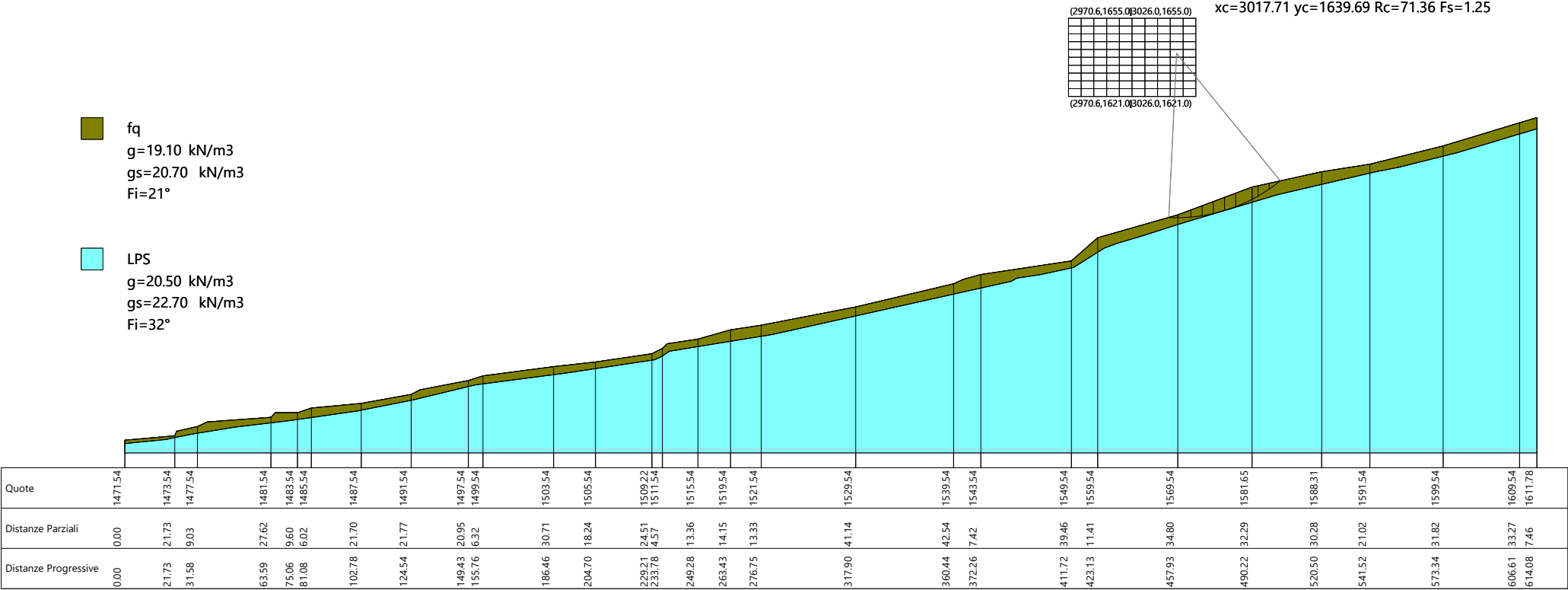
## Risultati analisi pendio [A2+M2+R2]

Fs minimo individuato	1.25
Ascissa centro superficie	3017.71 m
Ordinata centro superficie	1639.69 m
Raggio superficie	71.36 m

B: Larghezza del concio; Alfa: Angolo di inclinazione della base del concio; Li: Lunghezza della base del concio; Wi: Peso del concio ; Ui: Forze derivanti dalle pressioni neutre; Ni: forze agenti normalmente alla direzione di scivolamento; Ti: forze agenti parallelamente alla superficie di scivolamento; Fi: Angolo di attrito; c: coesione.

$$x_c = 3017.711 \quad y_c = 1639.688 \quad R_c = 71.36 \quad F_s = 1.254$$

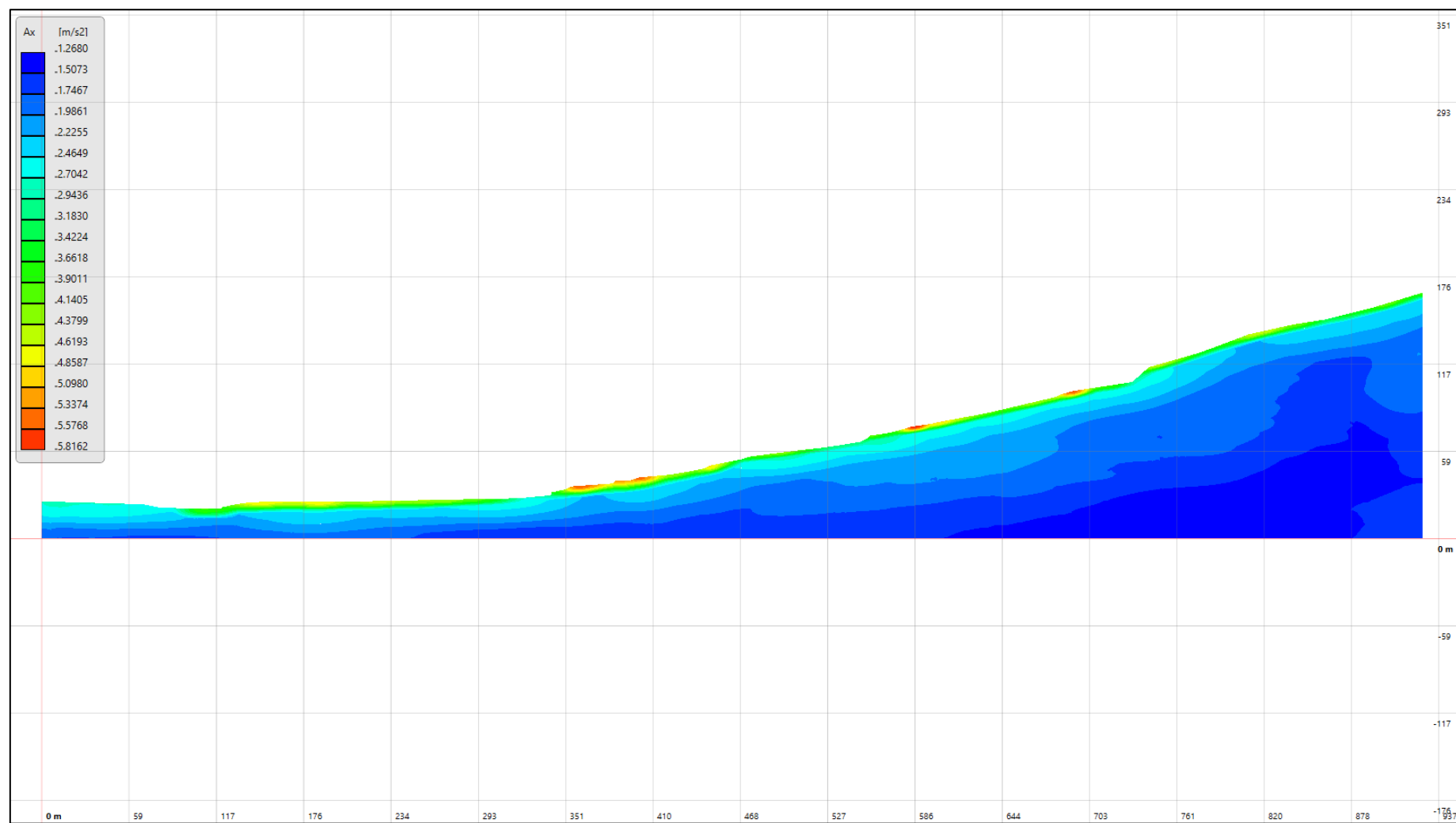
Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)	Kh•Wi (Kg)	Kv•Wi (Kg)	c (kg/cm2)	Fi (°)	Ui (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)
1	3.93	-1.3	3.94869.54	0.0	0.0	0.1	17.1	0.0	4954.8	3837.7	
2	5.78	2.7	5.825018.02	0.0	0.0	0.1	17.1	0.024603.5	9508.9		
3	4.85	7.0	4.935605.32	0.0	0.0	0.1	17.1	0.034514.8	11090.8		
4	4.85	11.0	4.945565.57	0.0	0.0	0.1	17.1	0.043850.5	13208.0		
5	4.85	14.9	5.052266.84	0.0	0.0	0.1	17.1	0.050182.5	14671.8		
6	4.85	19.1	5.155470.42	0.0	0.0	0.1	17.1	0.053348.1	15455.8		
7	7.09	24.2	7.879415.59	0.0	0.0	0.1	17.1	0.076934.4	22545.1		
8	2.62	28.4	3.025311.55	0.0	0.0	0.1	17.1	0.024685.8	7569.6		
9	4.85	32.0	5.734112.41	0.0	0.0	0.1	17.1	0.033123.8	11361.2		
10	4.85	36.8	6.112847.92	0.0	0.0	0.1	17.1	0.011047.7	6679.7		



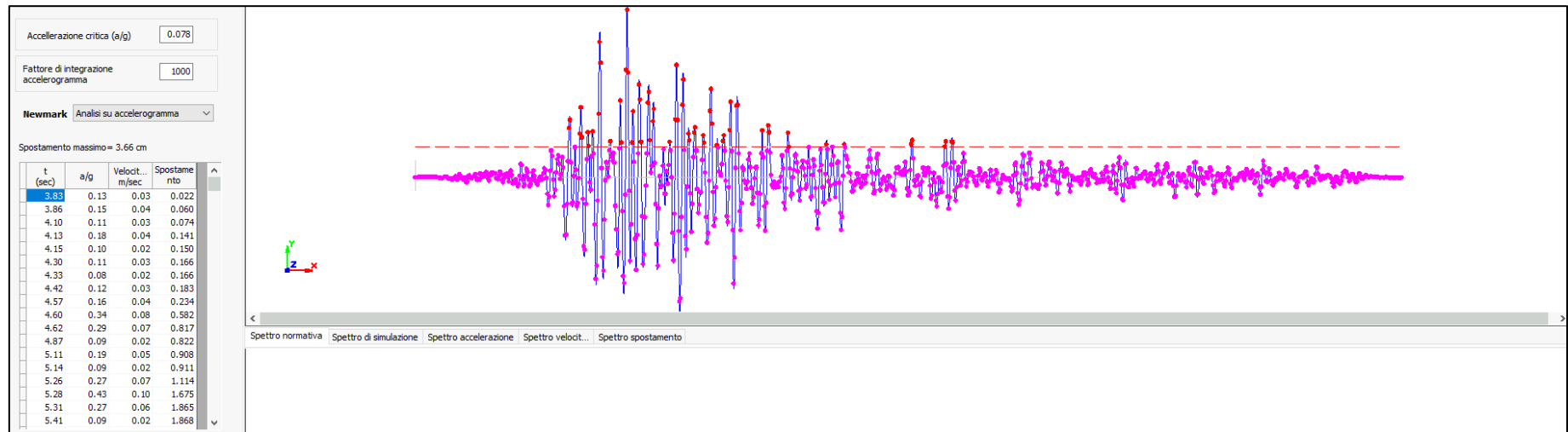
(2970.6,1655.0) (3026.0,1655.0)  
xc=3017.71 yc=1639.69 Rc=71.36 Fs=1.25  
(2970.6,1621.0) (3026.0,1621.0)



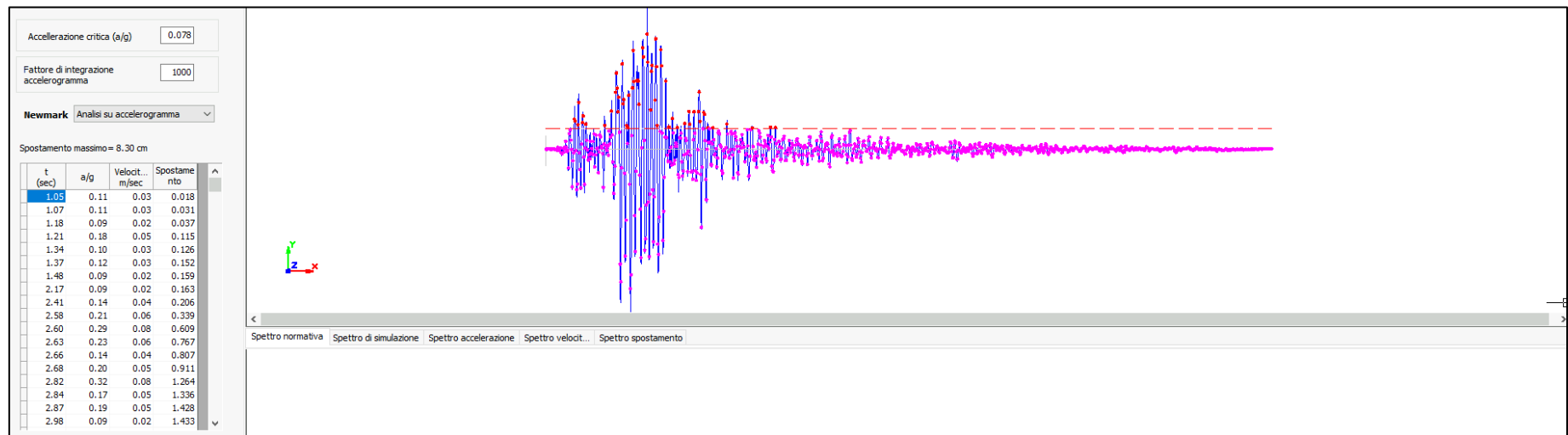
## Accelerazione massima calcolata da analisi bidimensionale (RSL2D) – Sezione GG' Chiusi della Verna



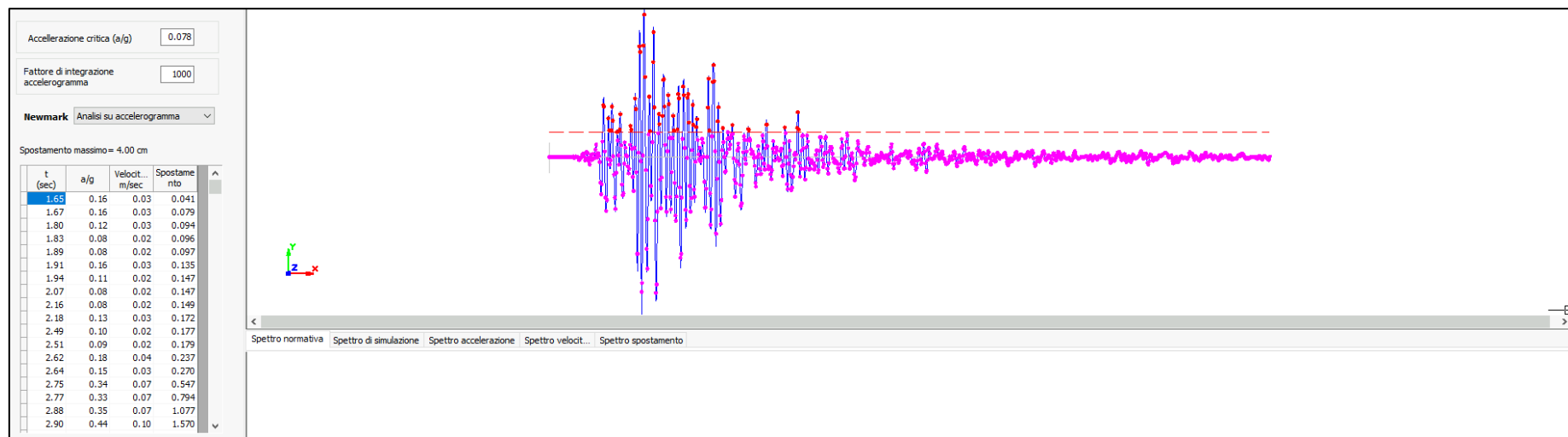
## Analisi su accelerogramma 1 e spostamento risultante



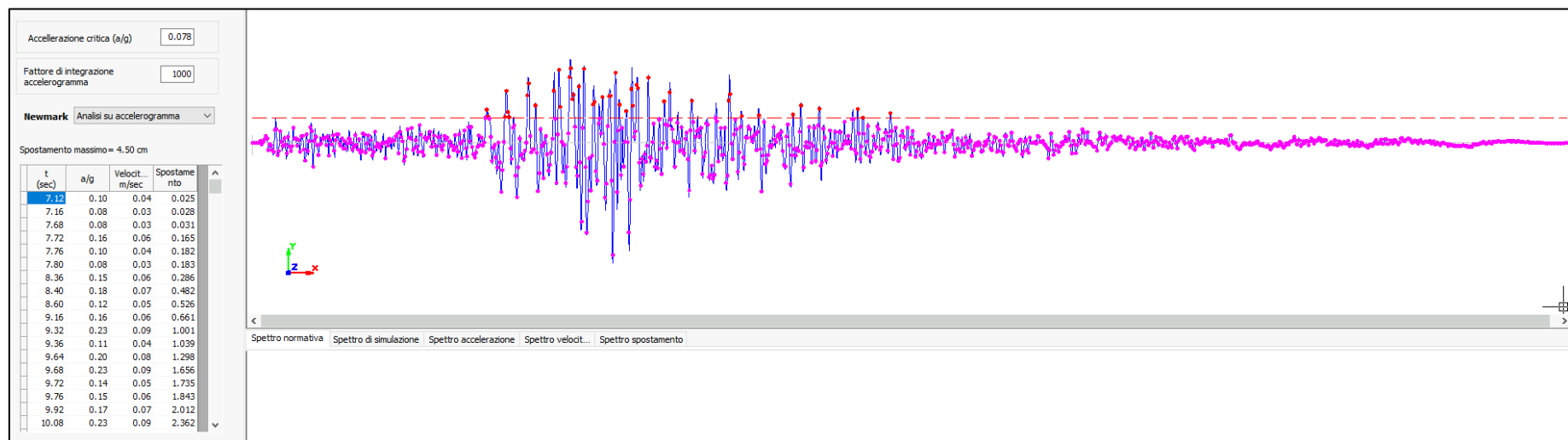
## Analisi su accelerogramma 2 e spostamento risultante



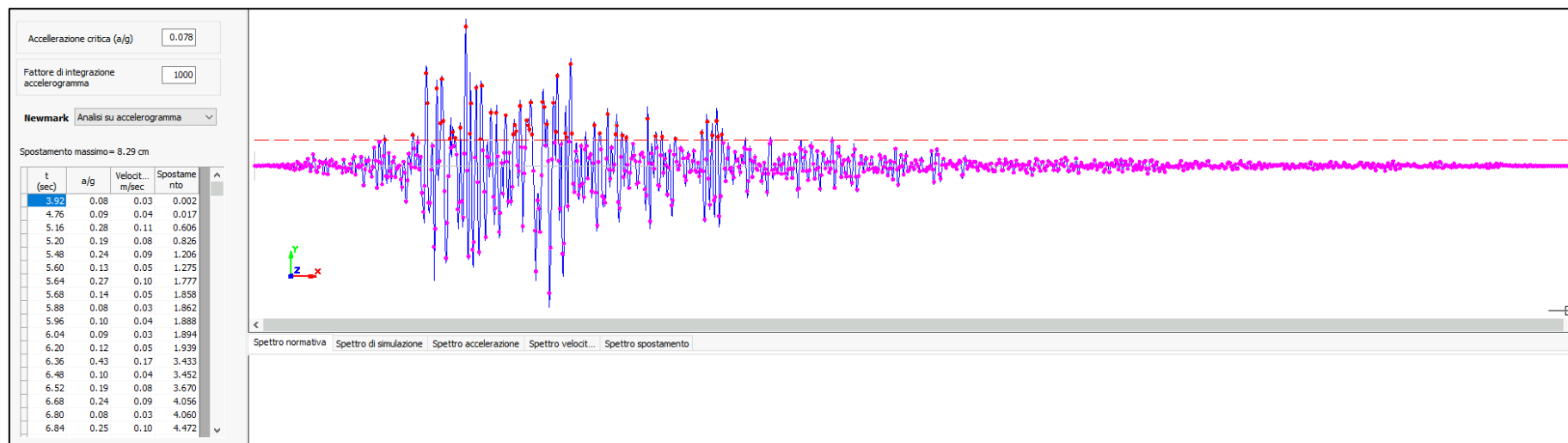
## Analisi su accelerogramma 3 e spostamento risultante



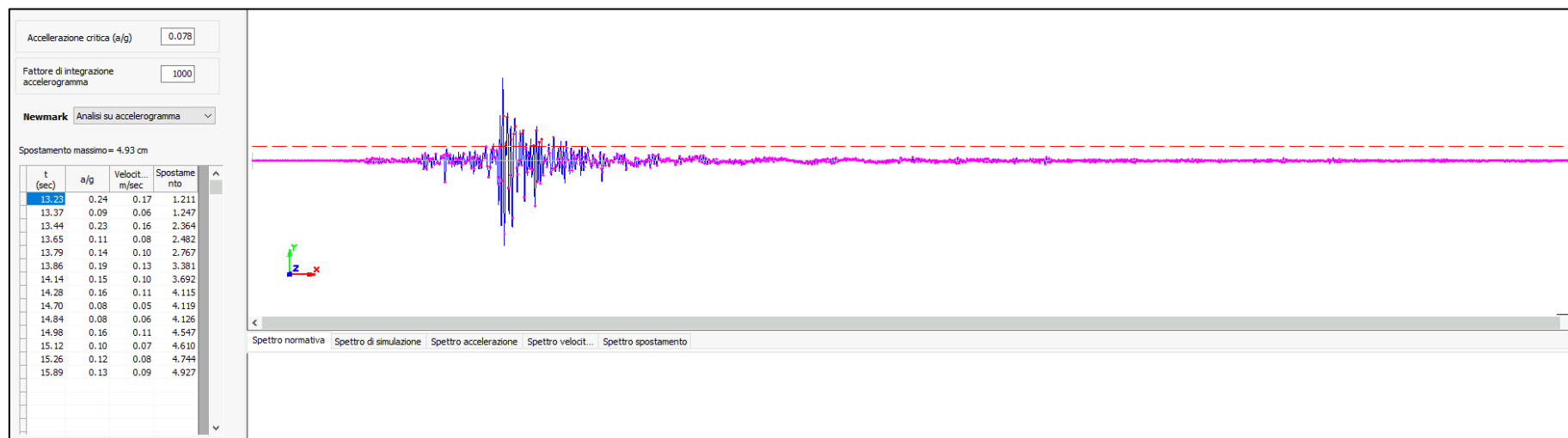
## Analisi su accelerogramma 4 e spostamento risultante



## Analisi su accelerogramma 5 e spostamento risultante



## Analisi su accelerogramma 6 e spostamento risultante



## Analisi su accelerogramma 7 e spostamento risultante

