



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Toscana



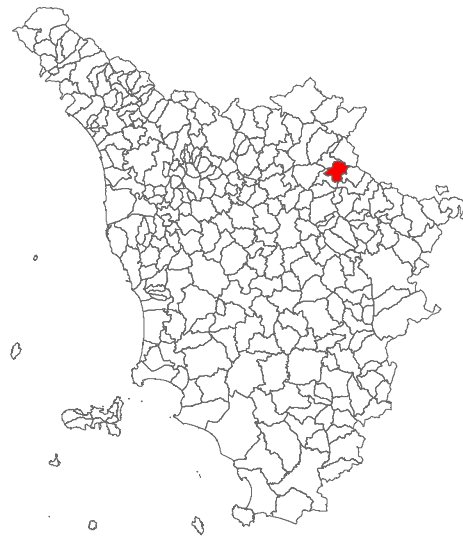
CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME

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 Londa (FI)



<b>Regione</b>  Regione Toscana – Settore Sismica	<b>Soggetto realizzatore:</b>  Comune di Londa /Servizio Assetto del Territorio/RUP Geom. Franco Pretolani  Professionisti incaricati: Dott. Geol. Eros Aiello Dott. Geol. Gabriele Grandini Dott. Geol. Cristian Pieroni Dott. Geol. Francesco Puccetti   <small>Via Andrea del Castagno, 8 – 50132 Firenze tel.055/571393, 055/579954; fax.055/6522329 25 info@geoeccoprogetti.com</small>	<b>Data</b>  Novembre 2021
---	--	----------------------------------

---

## **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.....	10
2.5 Analisi dinamiche nelle aree in frana MS3.....	29
2.6 Rappresentazione su mappa ed estrapolazione.....	30
2.7 Indicazioni relative alla fase progettuale.....	32

### **Allegati**

**ALLEGATO A – Report RSL2D sezione BB’ e analisi dinamica frana versante sx**

**ALLEGATO B – Report RSL2D sezione EE’ e analisi dinamica frana versante dx**

---

---

## 1 – INTRODUZIONE

Su incarico dell'Amministrazione Comunale di Londa (FI), 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 Londa 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.

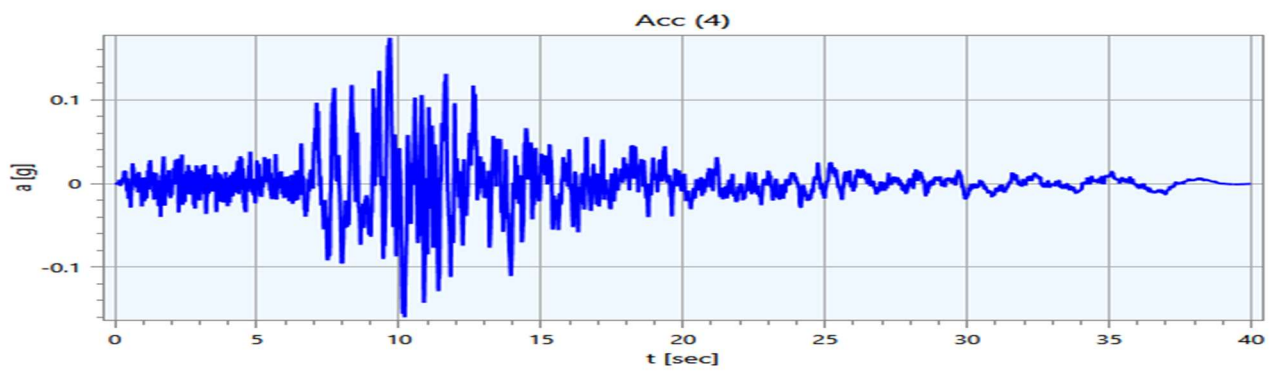
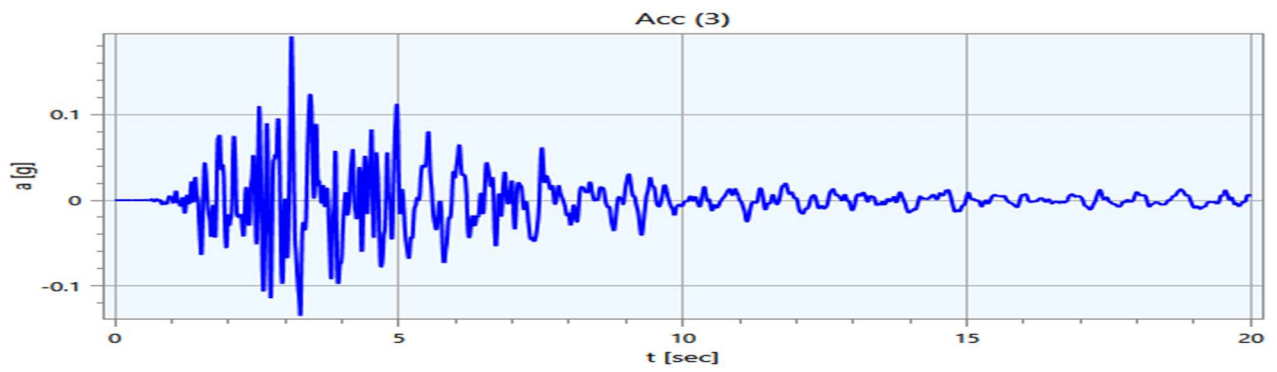
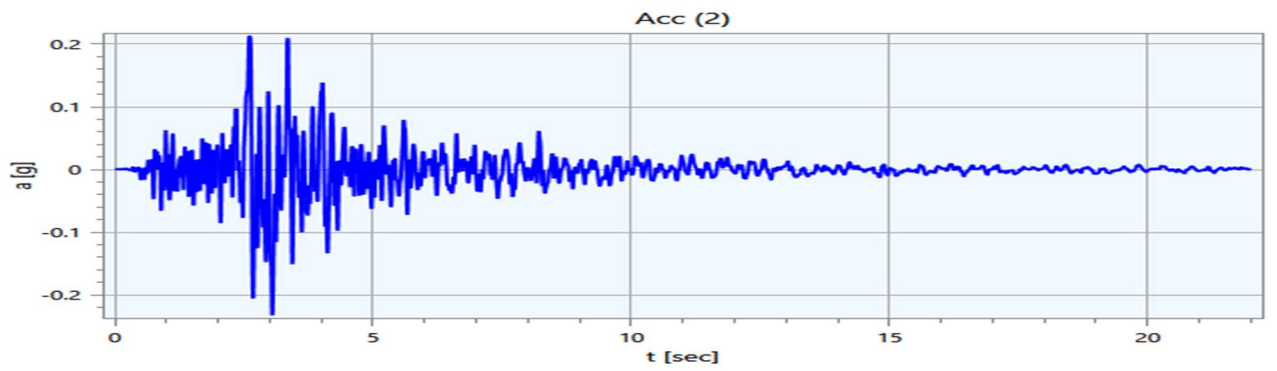
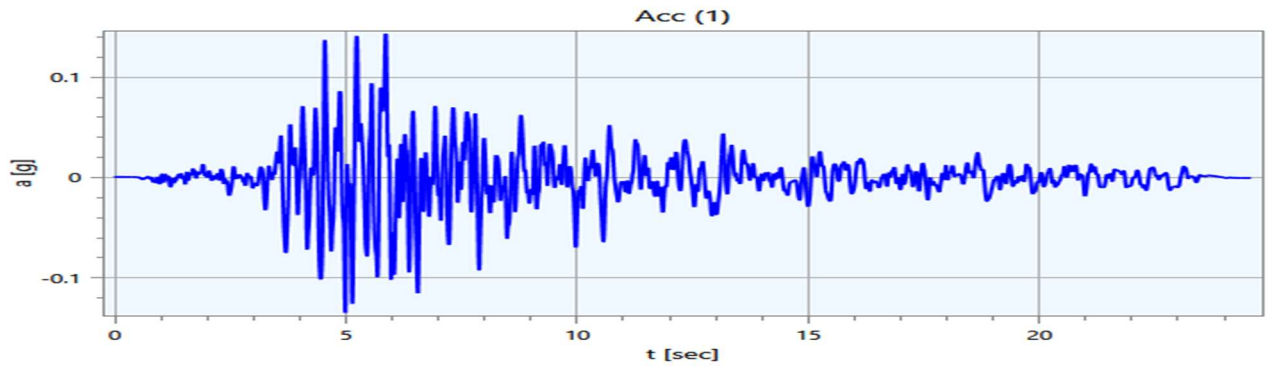
Ai fini della selezione degli accelerogrammi non è stata necessaria la suddivisione del territorio in più aree omogenee sismicamente in quanto l'estensione ridotta del Comune di Londa oggetto di studio ha permesso l'utilizzo di un solo set di accelerogrammi.

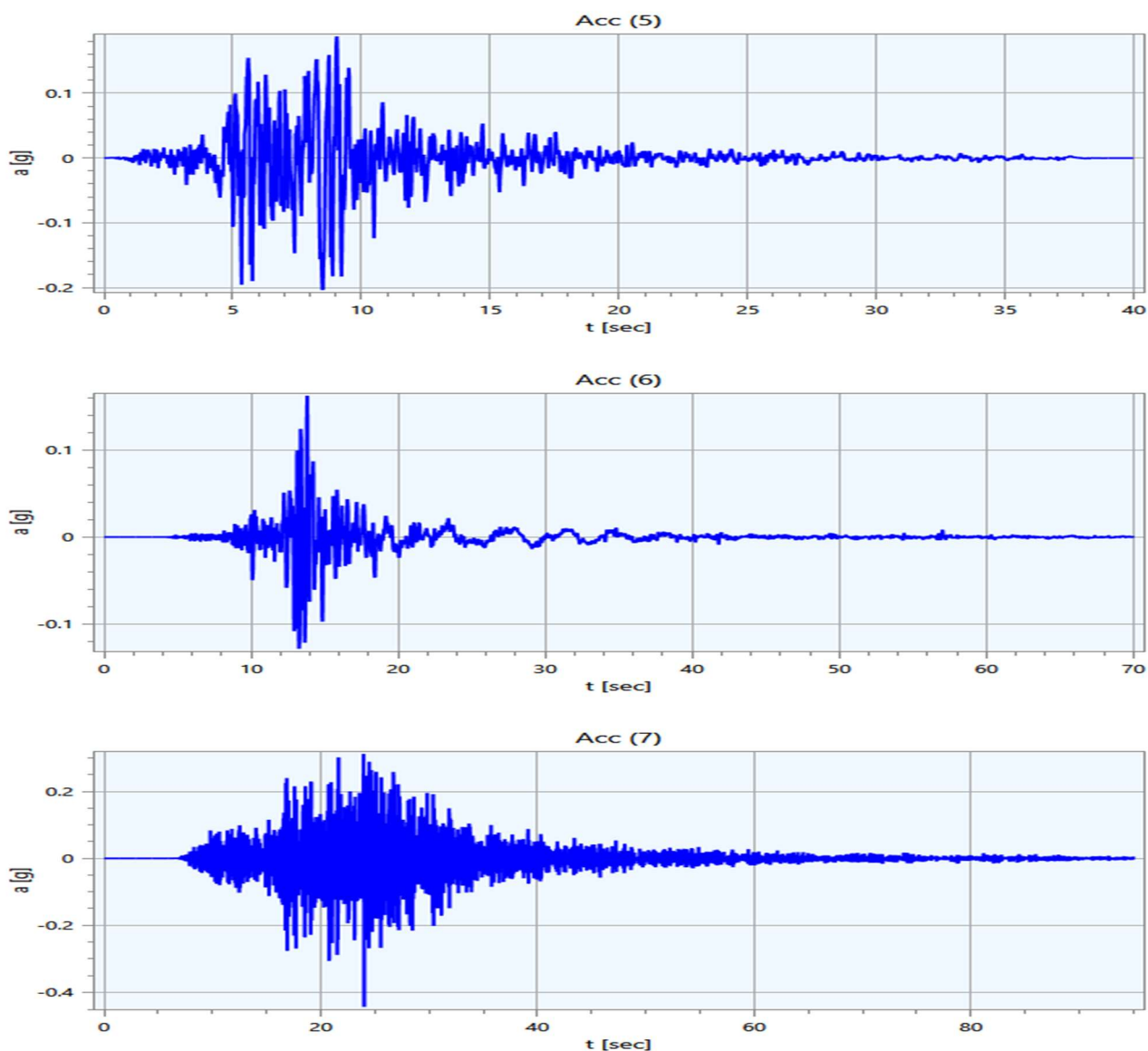
SCALCONA utilizza opportunamente i risultati della selezione degli accelerogrammi, consentendo di restituire, per il sito e periodo di ritorno di interesse, un gruppo di 7 accelerogrammi che soddisfano i requisiti di spettro-compatibilità prescritti dalle NTC18 e succ. Circolare.

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.

n°	Magnitude (Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling Factor	Source File Name
1	6.20	29.90	1.87	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
2	5.74	12.57	1.99	NGA-West2 RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
3	5.90	10.10	1.90	ESM IT.ATN..HNN.D.19840507.174943.C.ACC.ASC
4	6.93	83.53	3.21	NGA-West2 RSN804_LOMAP_SSF115.AT2
5	6.69	38.07	1.34	NGA-West2 RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
6	6.60	31.00	0.66	KiK-net SMNH100010061330.EW2
7	6.90	70.13	2.41	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.6), 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).

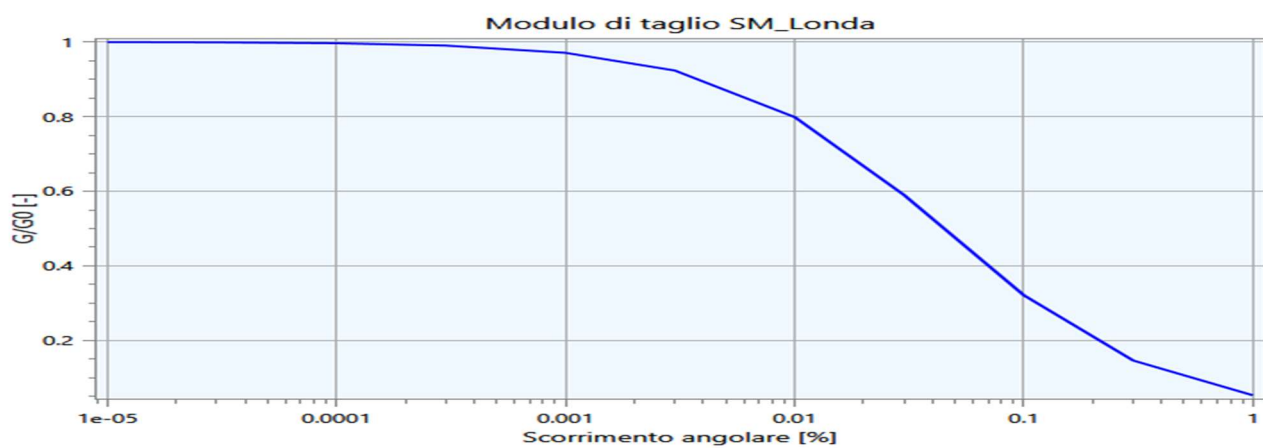
## 2.3 Parametrizzazione del modello geologico-tecnico

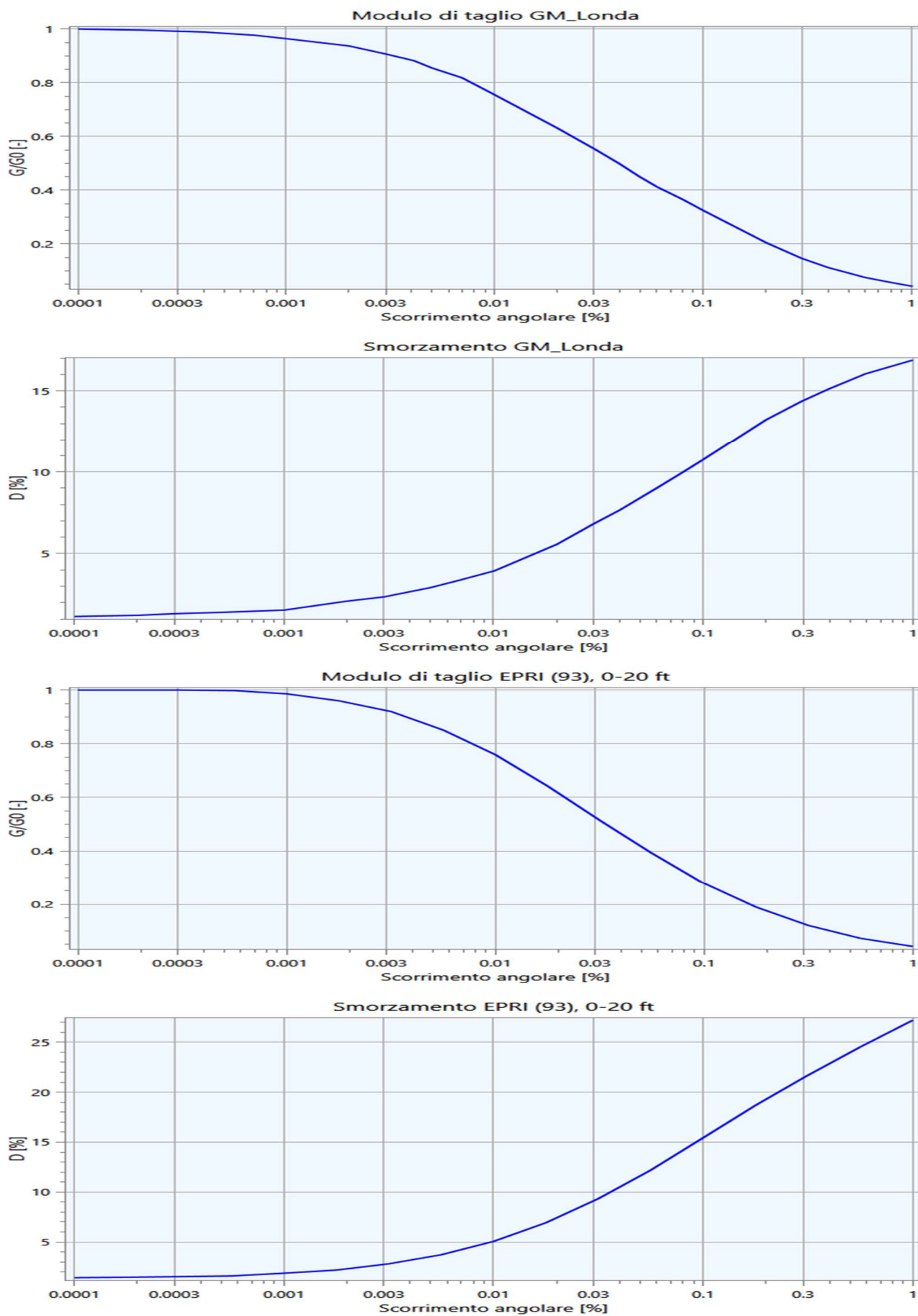
L'esecuzione di analisi di risposta sismica locale prevede la parametrizzazione in chiave dinamica dei terreni di studio. Avendo deciso di ricorrere all'utilizzo di codici di calcolo 2D operanti in ambito lineare-equivalente, è stato necessario ottenere, per ognuno dei sismostrati da modellare, i seguenti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

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.

Nel presente studio, sono state tutte derivate da banche dati ad eccezione di GM\_Londa e SM\_Londa le quali sono state scaricate nell'applicativo della banca dati VEL.

Strato	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento G/G0 - D
LPS	2250.00	1155.00	0.30	Lineare
SM	1900.00	495.00	0.45	SM_Londa
ALS	2100.00	695.00	0.33	lineare2%
GM	2000.00	220.00	0.36	GM_Londa
fq	1950.00	435.00	0.37	EPRI (93), 0-20 ft

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).

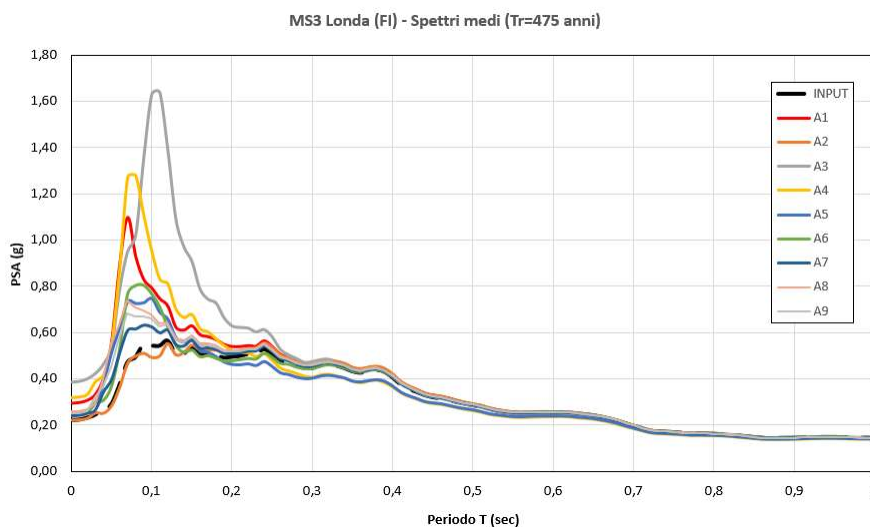
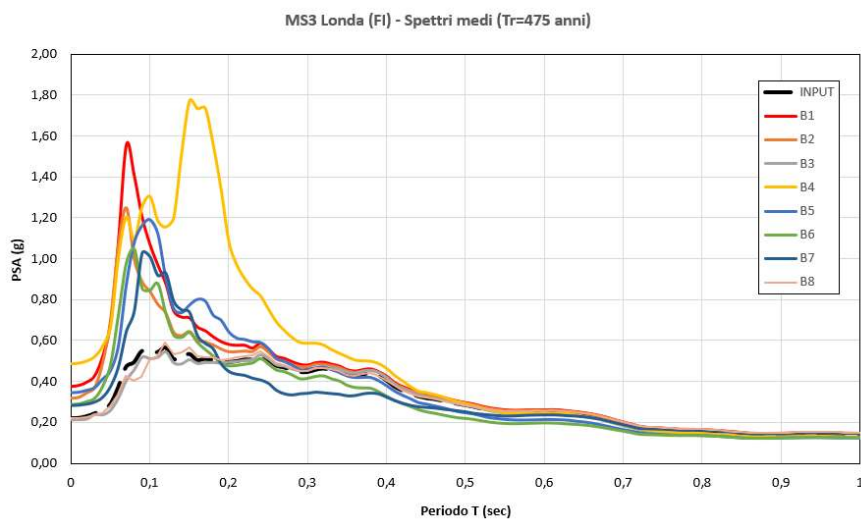
La seconda analisi è utilizzata esclusivamente per acquisire spettri medi caratteristici da utilizzare come indicazioni e strumenti per la progettazione edilizia.

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

In particolare di seguito si riportano gli spettri di risposta elastici relativi alle analisi di RSL in asse bidimensionale e le sezioni geologico-tecniche con indicato la distribuzione e i valori dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali.

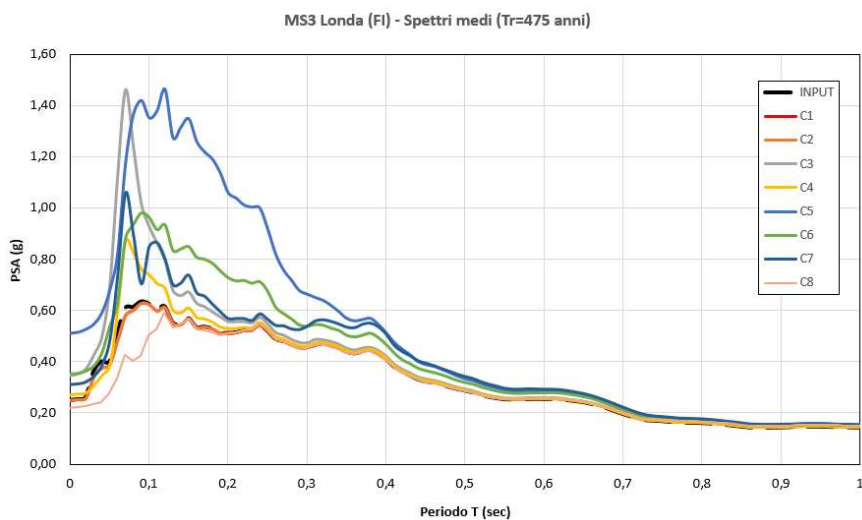
Alcune delle sezioni geologiche-tecniche in fase di elaborazione, data la criticità morfologica dell'area, sono state suddivise in parti sinistra (sx), centrale (cx) e destra (dx) per semplificare e snellire le operazioni di calcolo.

---

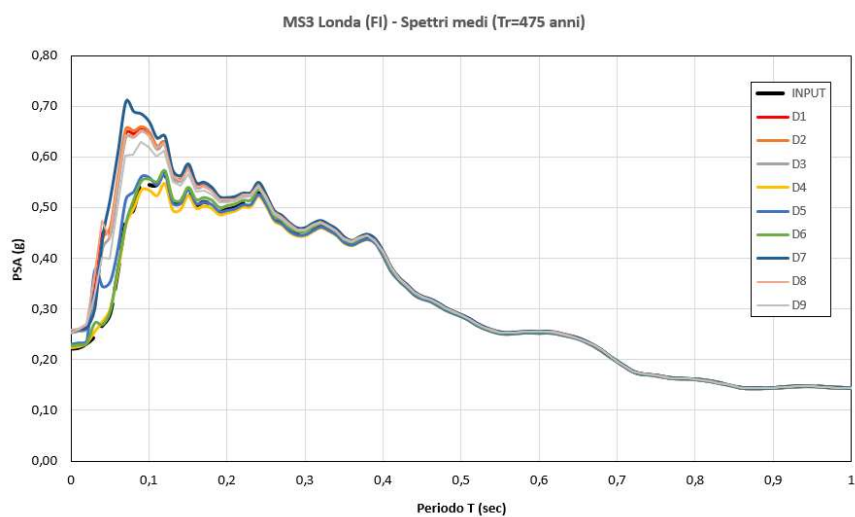
**Sezione AA'** – Spettri medi di risposta elastici (damping=5%) da analisi bidimensionali**Sezione BB'** – Spettri medi di risposta elastici (damping=5%) da analisi bidimensionali

---

### Sezione CC' – Spettri medi di risposta elastici (damping=5%) da analisi bidimensionali

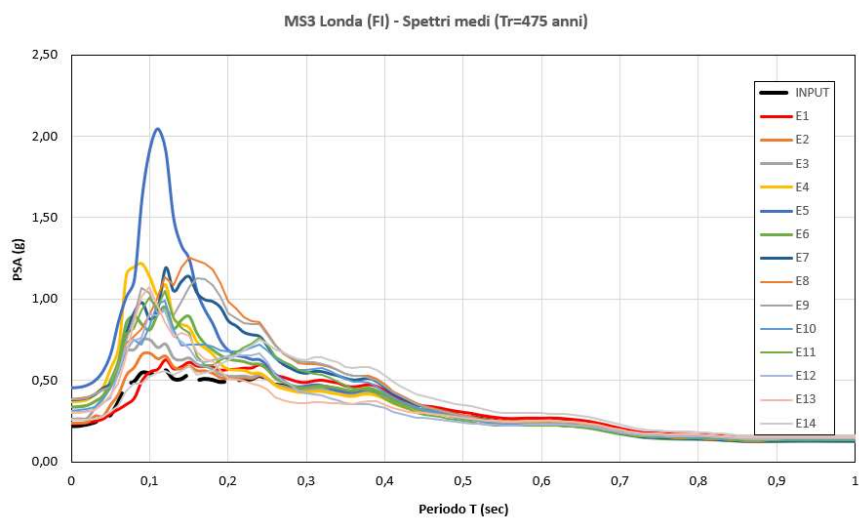


### Sezione DD' – Spettri medi di risposta elastici (damping=5%) da analisi bidimensionali

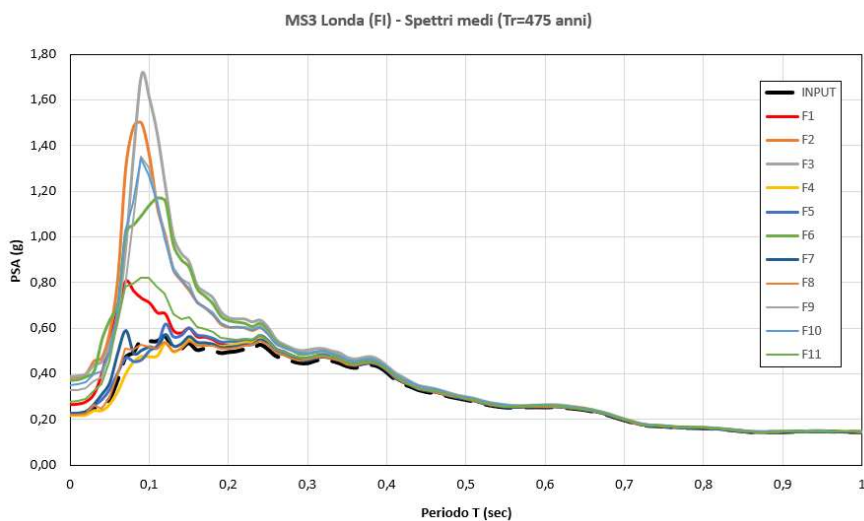


---

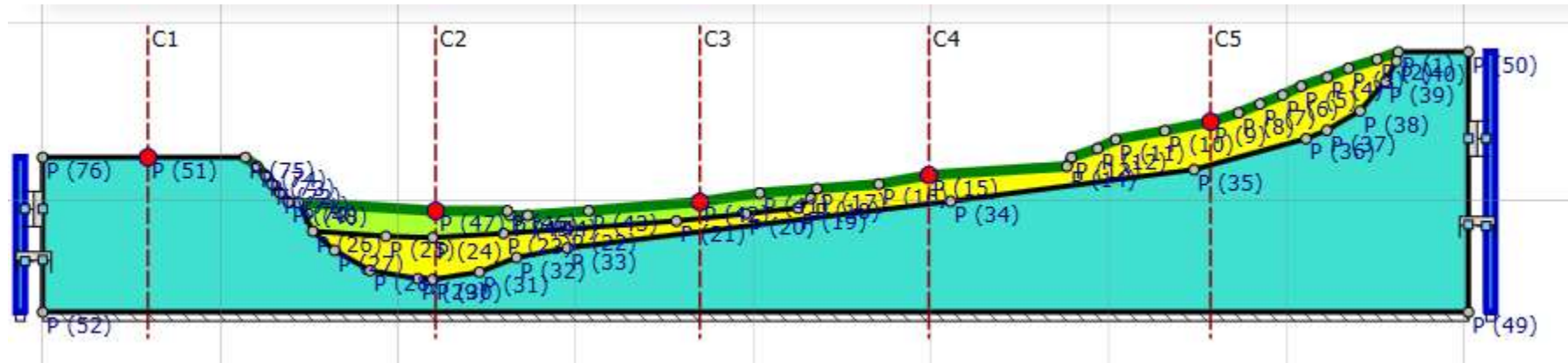
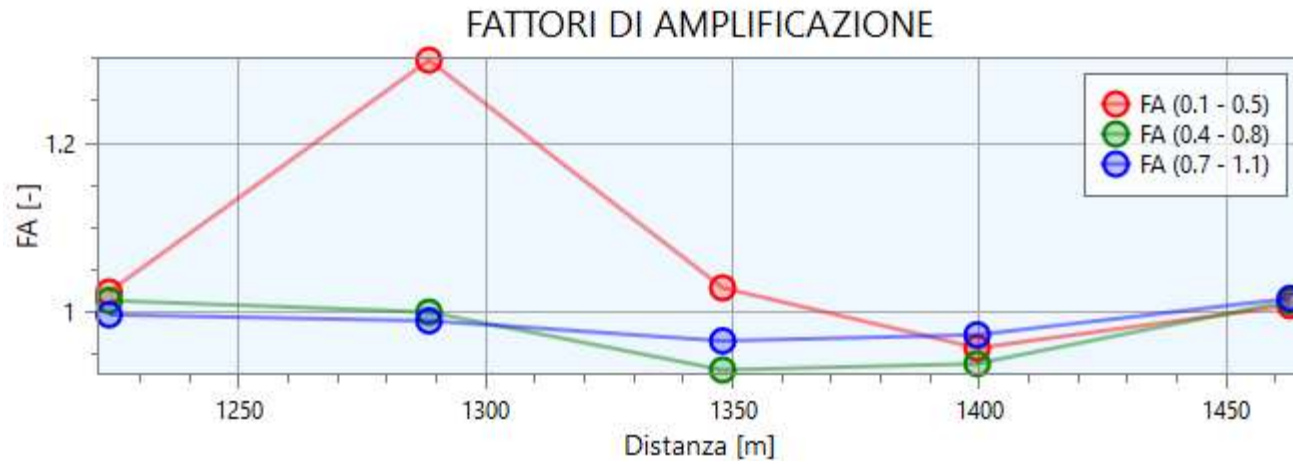
## Sezione EE' – Spettri medi di risposta elastici (damping=5%) da analisi bidimensionali

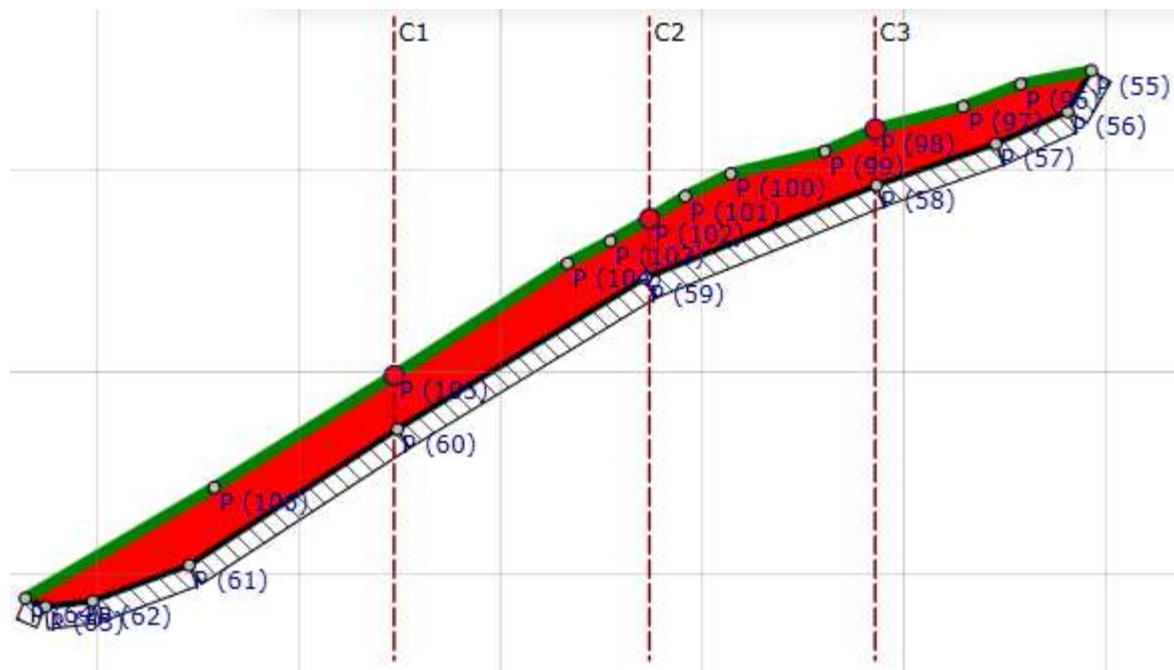
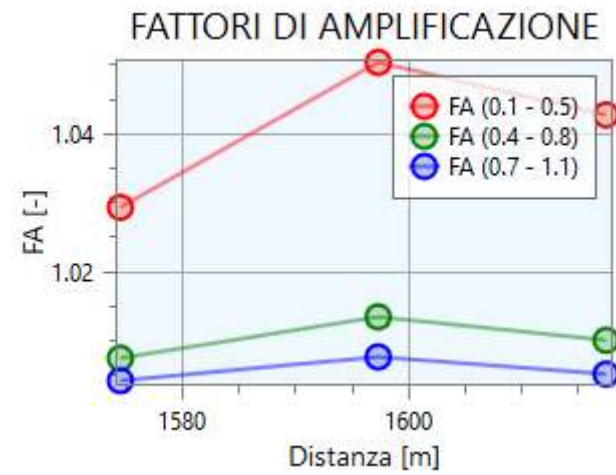


## Sezione FF' – Spettri medi di risposta elastici (damping=5%) da analisi bidimensionali

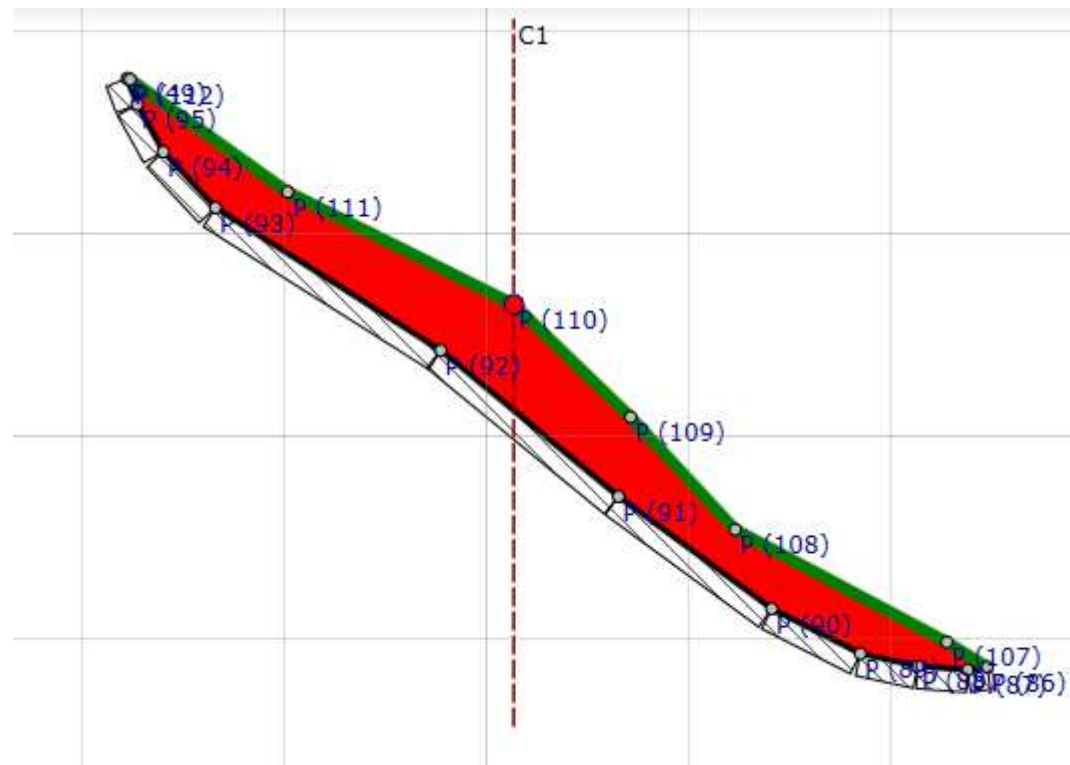
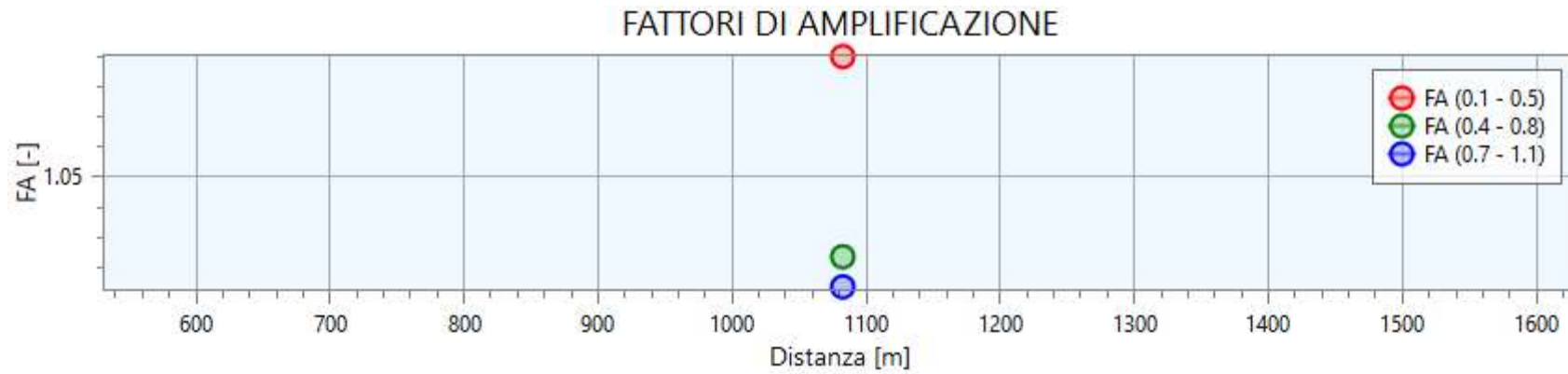


### Sezione AA'\_cx – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali

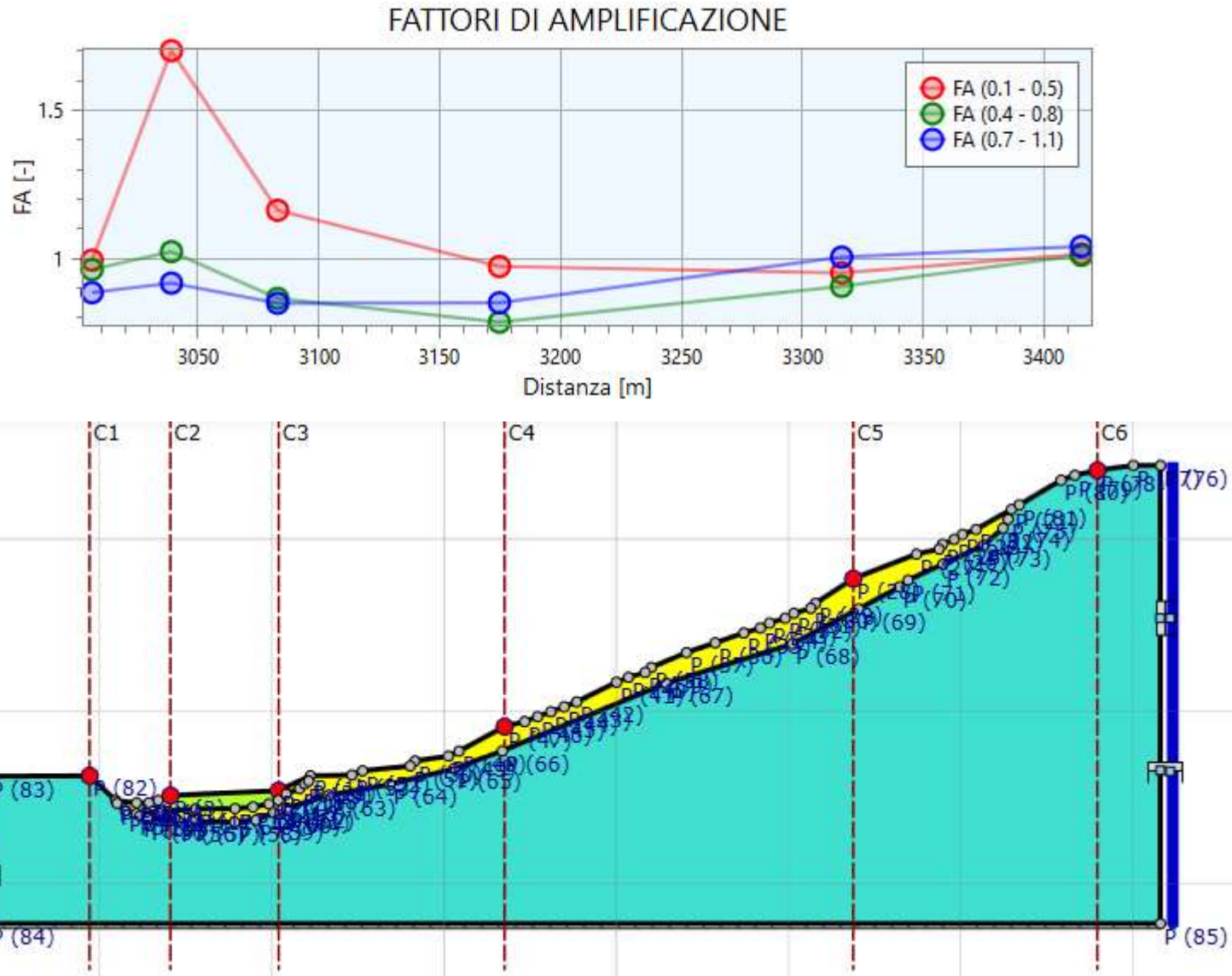


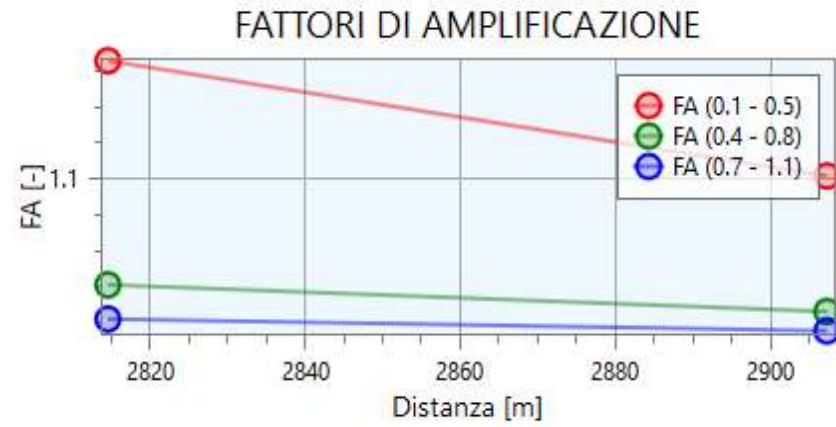
**Sezione AA'\_dx** – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



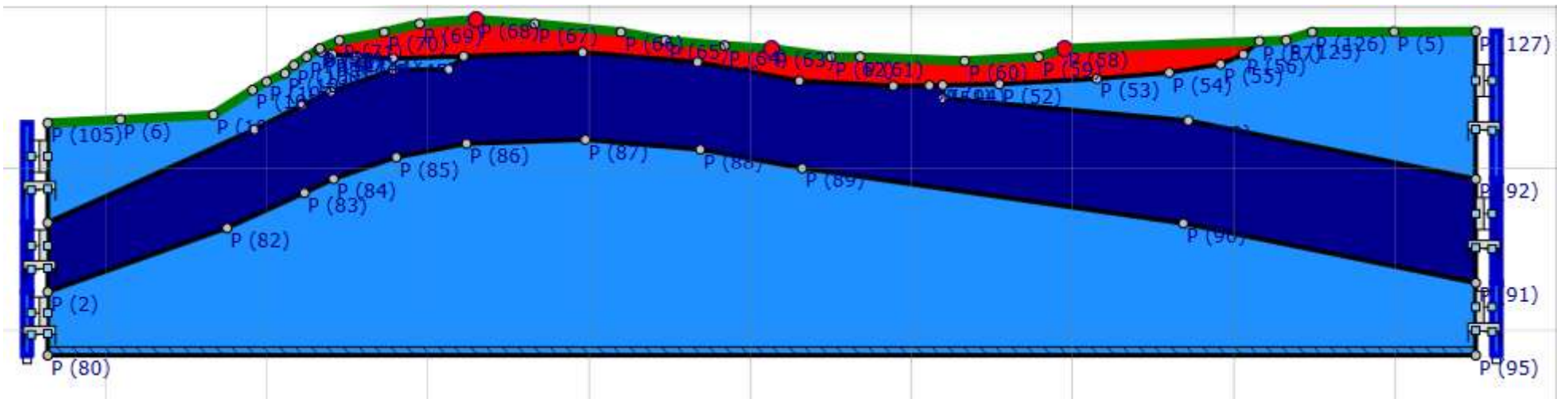
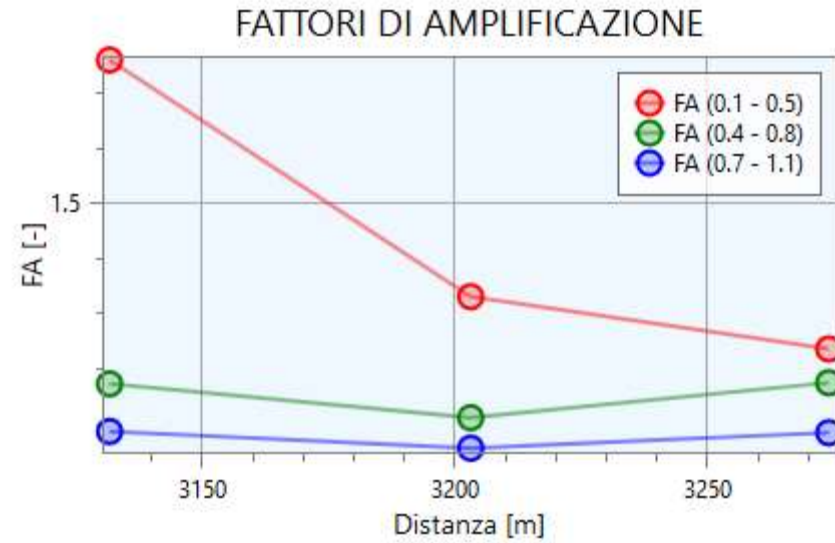
**Sezione AA'\_sx** – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali

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

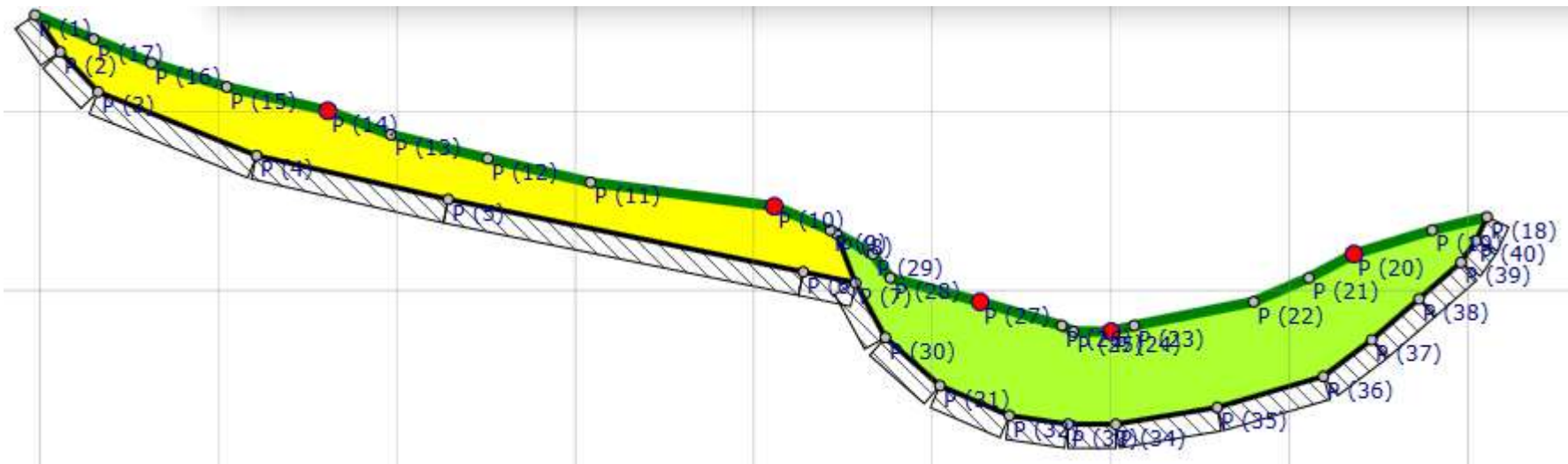
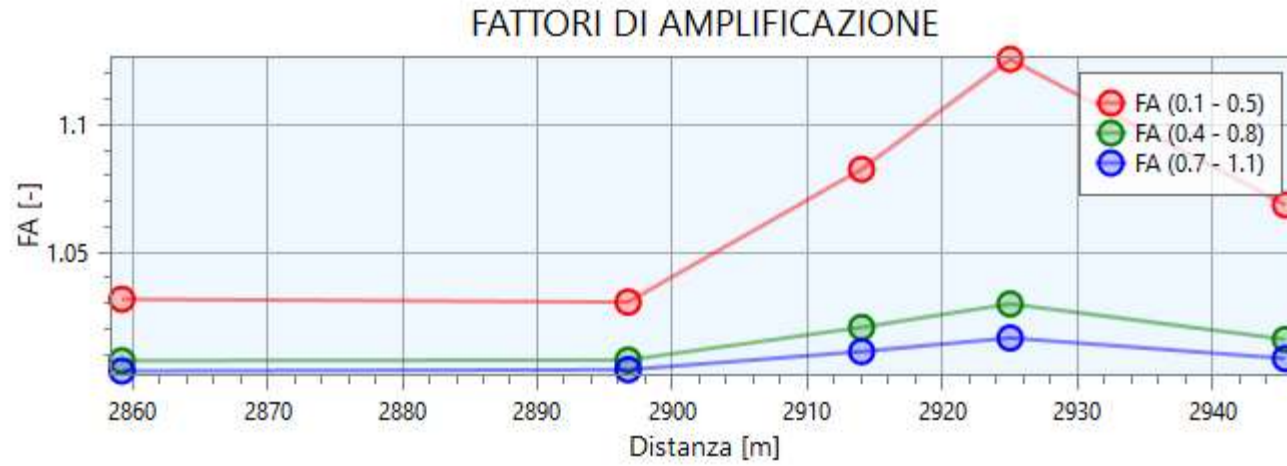


**Sezione BB'\_sx** – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali

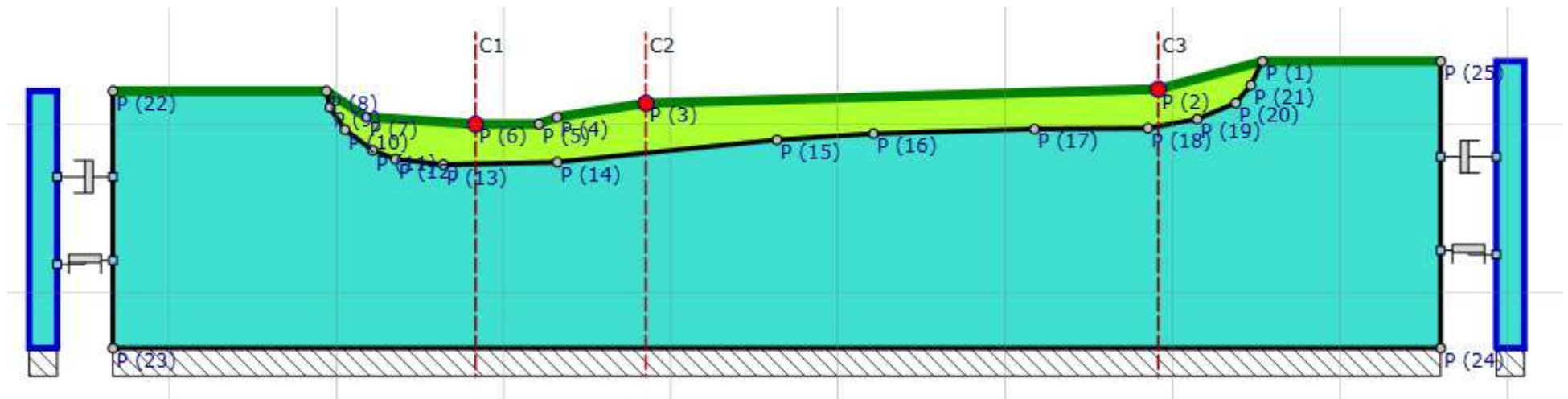
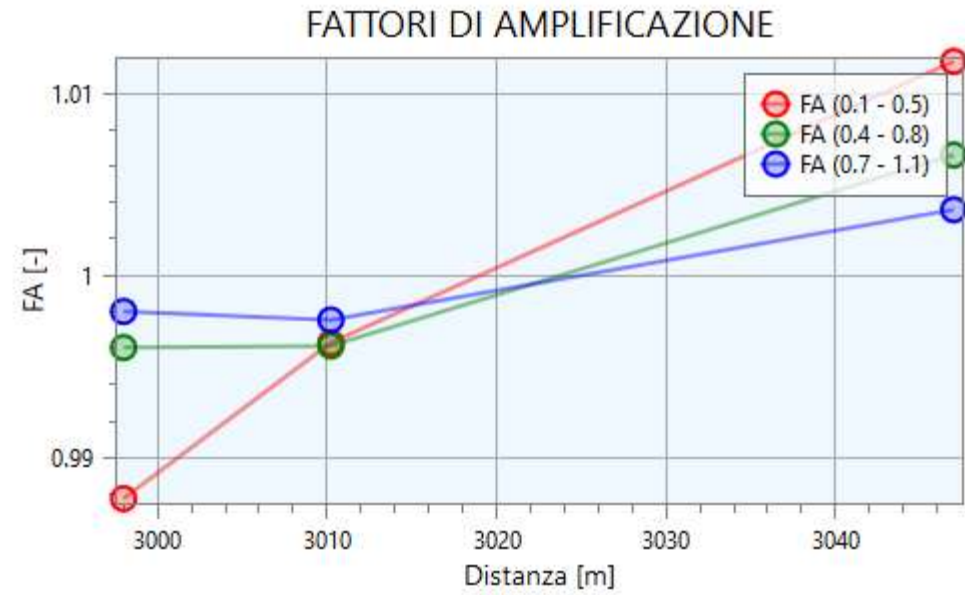
Sezione CC'\_dx – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



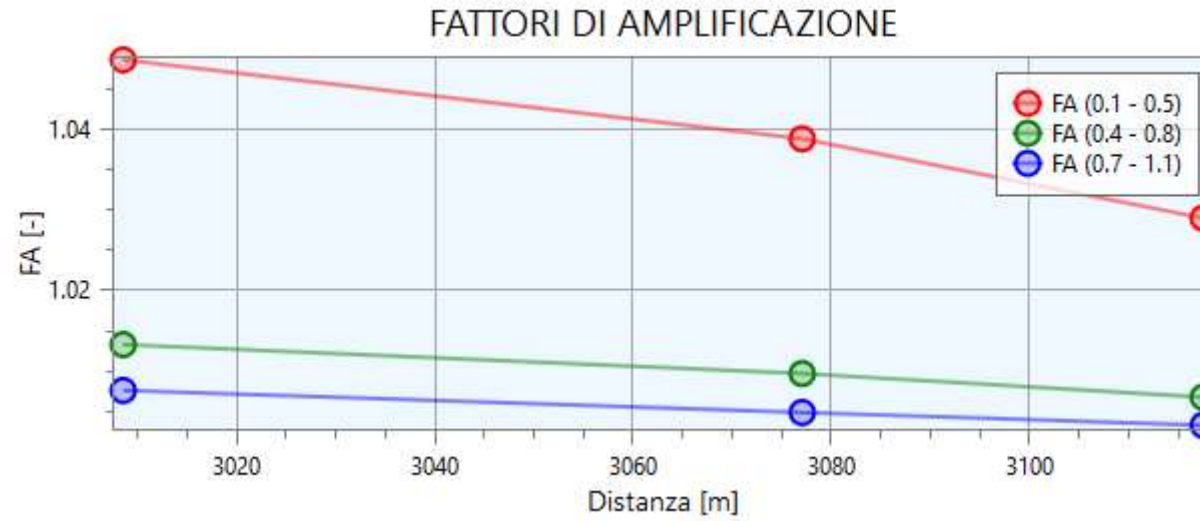
### Sezione CC'\_sx – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



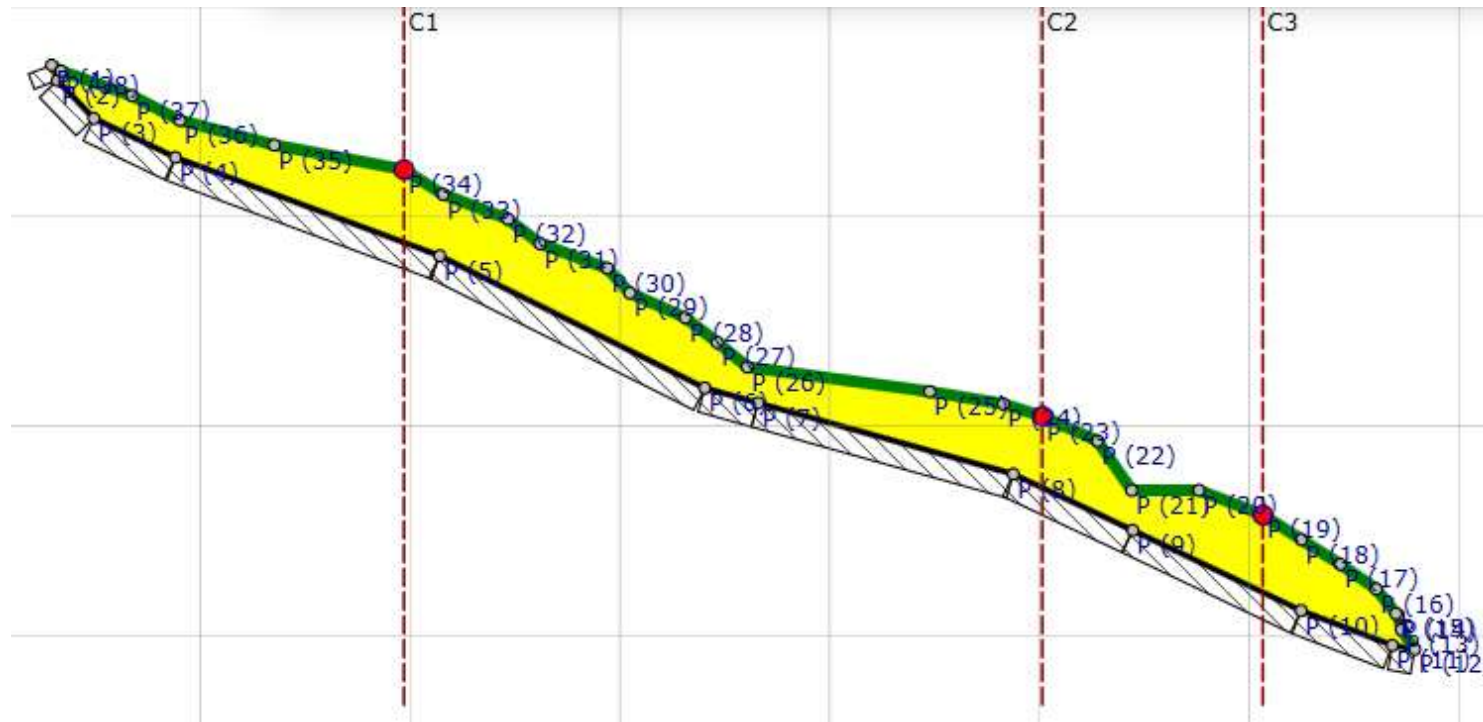
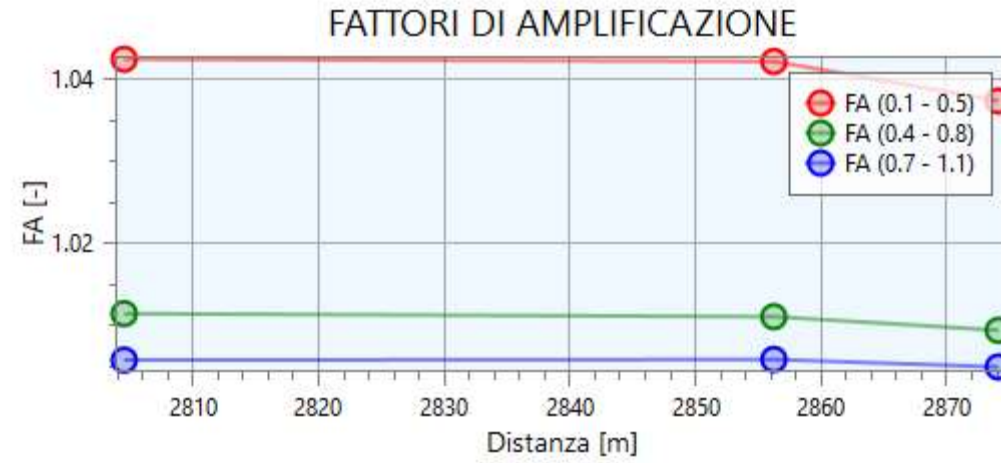
**Sezione DD'\_cx** – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



### Sezione DD'\_dx – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali

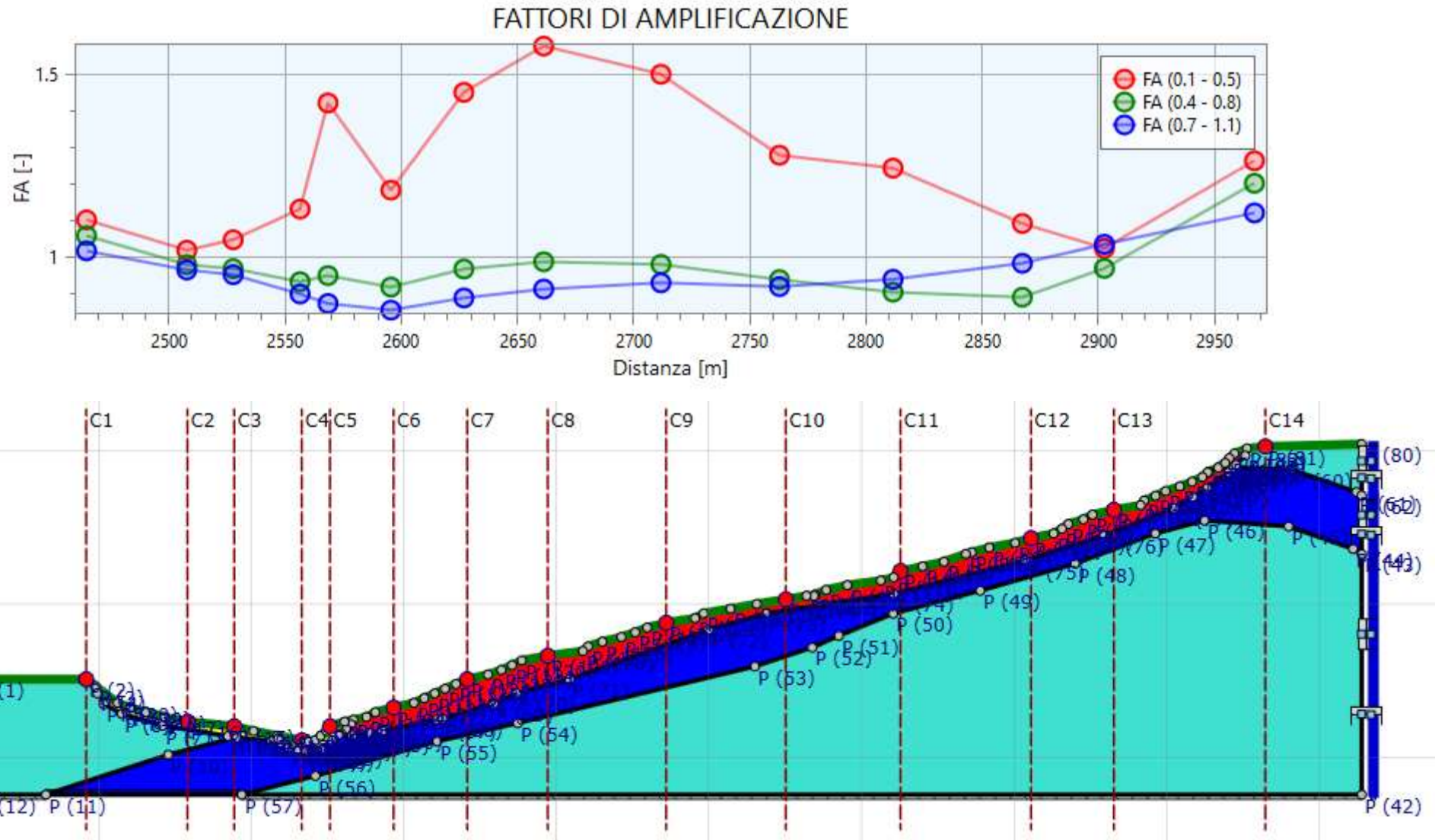


### Sezione DD'\_sx – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali

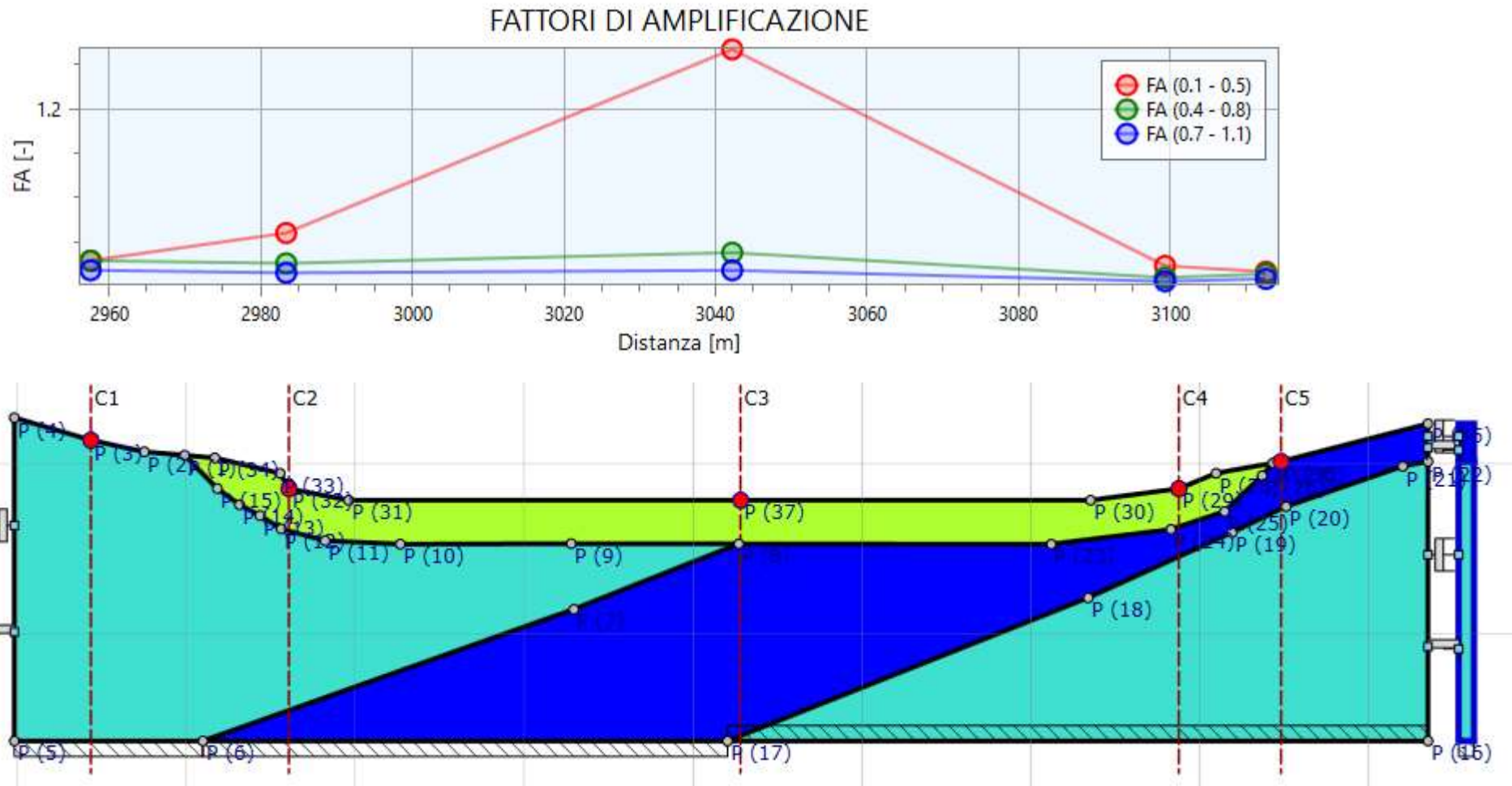


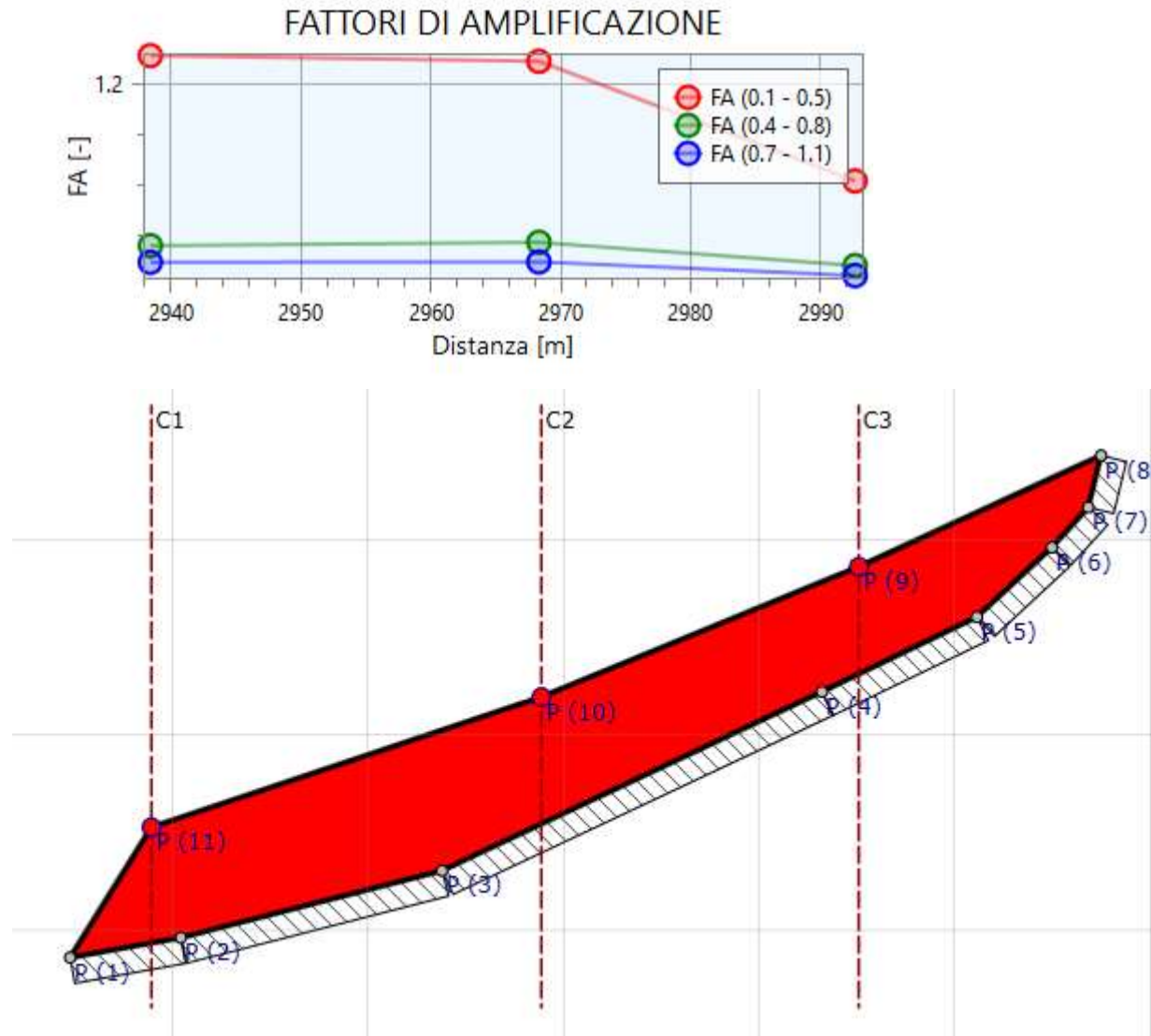


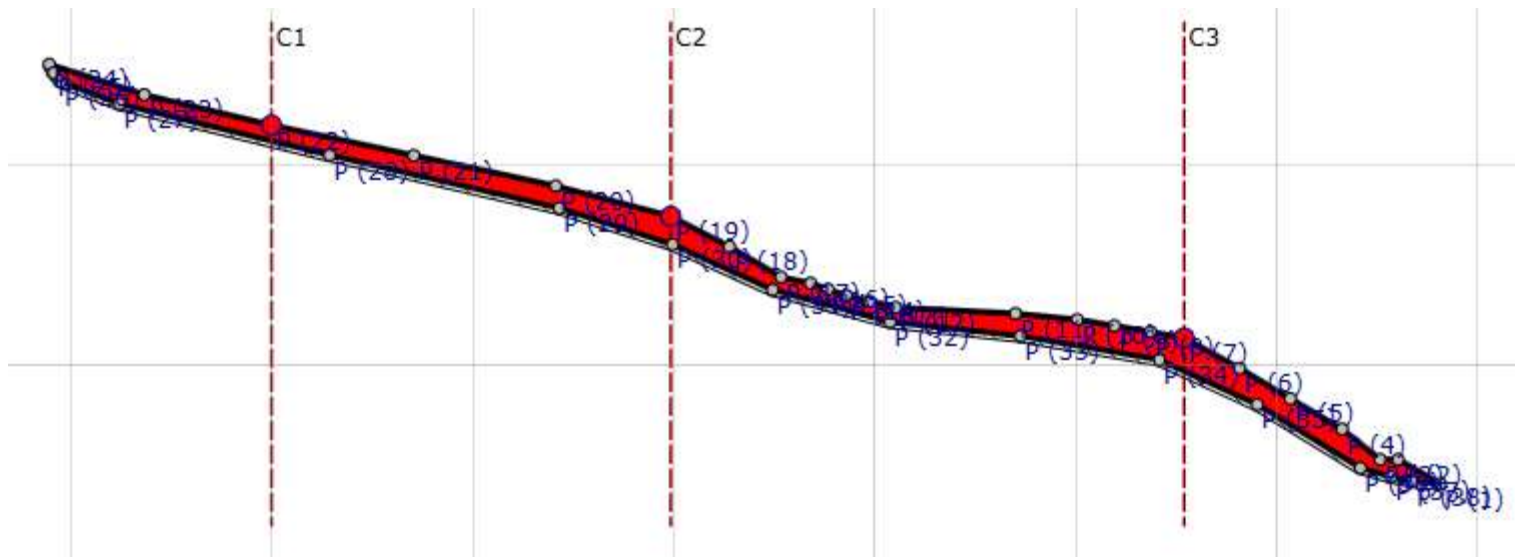
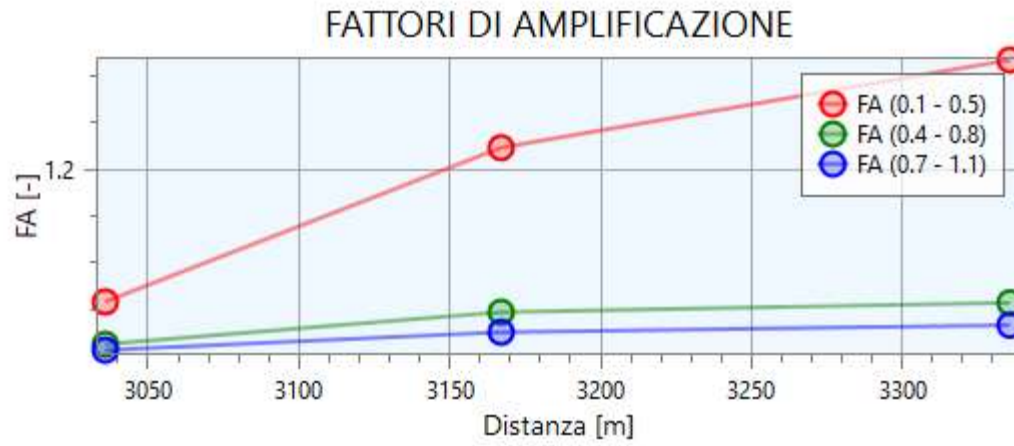
### Sezione EE' – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali



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



**Sezione FF' dx** – Distribuzione dei 3 fattori di amplificazione previsti dai vigenti Standard Nazionali

**Sezione FF'\_sx** – 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).

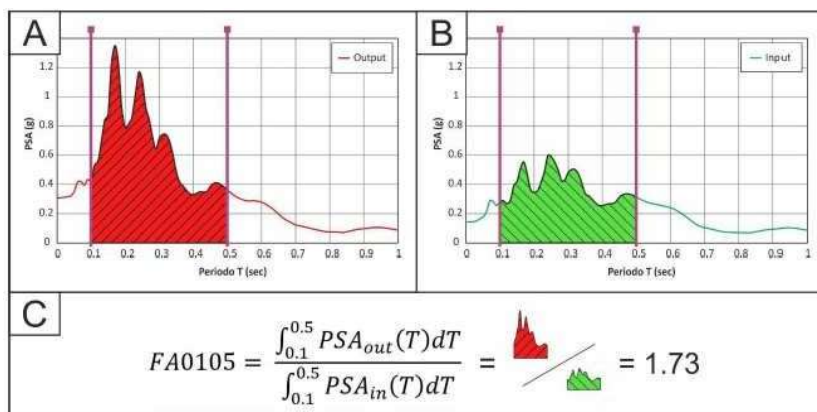


Fig. 3 - Procedura per il calcolo del fattore di amplificazione FA0105

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-technica e della cartografia MOPS.

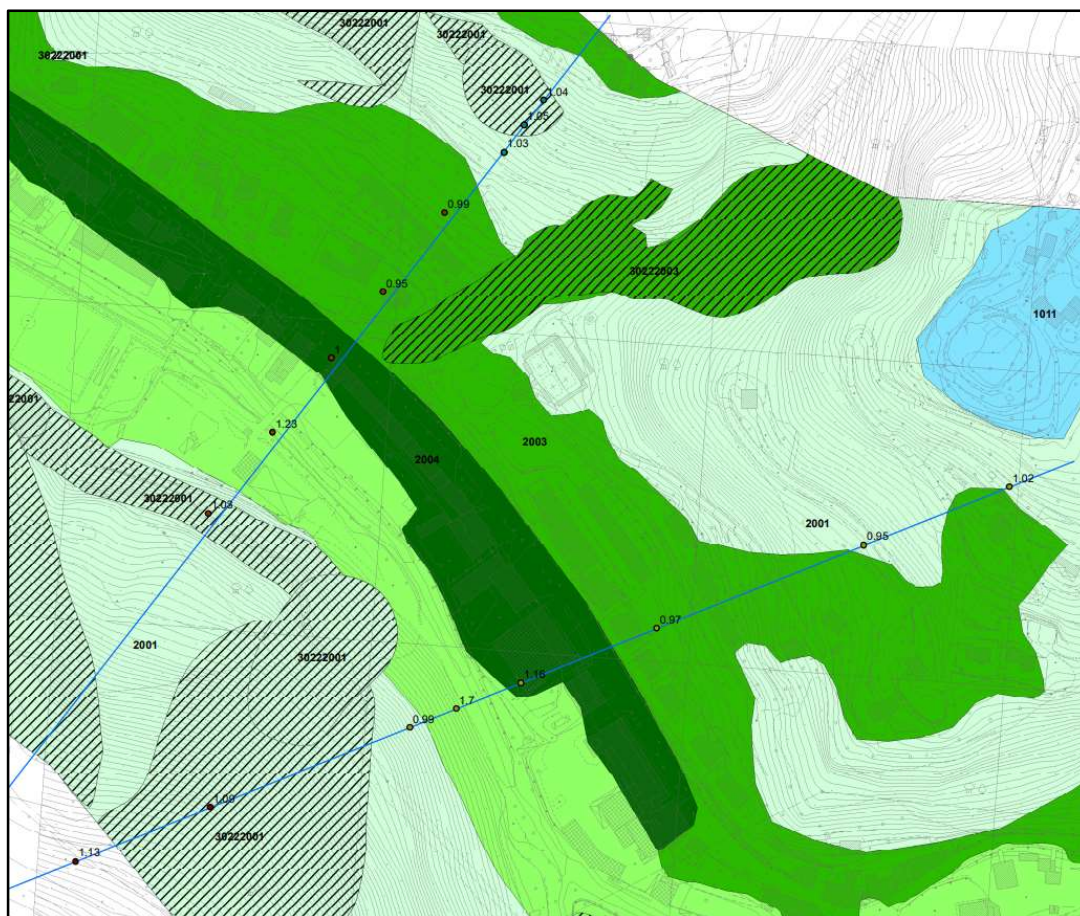


Fig. 4 - Esempio di sovrapposizione dei valori di FA0105 con le MOPS individuate nello studio di MS1



Regione Toscana



CONFERENZA DELLE REGIONI E DELLE PROVINCE AUTONOME

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Carta delle Microzone

Scala 1:5000  
Regione Toscana  
Comune di Londa (FI)

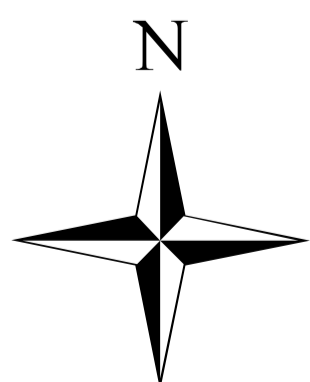


<b>Regione</b> Regione Toscana - Settore Sismica	<b>Soggetto realizzatore:</b> Comune di Londa /Servizio Assetto del Territorio/RUP Geom. Franco Pretolani  Professionisti incaricati: Dott. Geol. Eros Aiello Dott. Geol. Gabriele Grandini Dott. Geol. Cristian Pieroni Dott. Geol. Francesco Puccetti   Via Nobile del Campello, 8 - 50128 Firenze tel. 055/2701100 - fax 055/2701101 www.g40000.com	<b>Data</b> Dicembre 2021
---	---	------------------------------

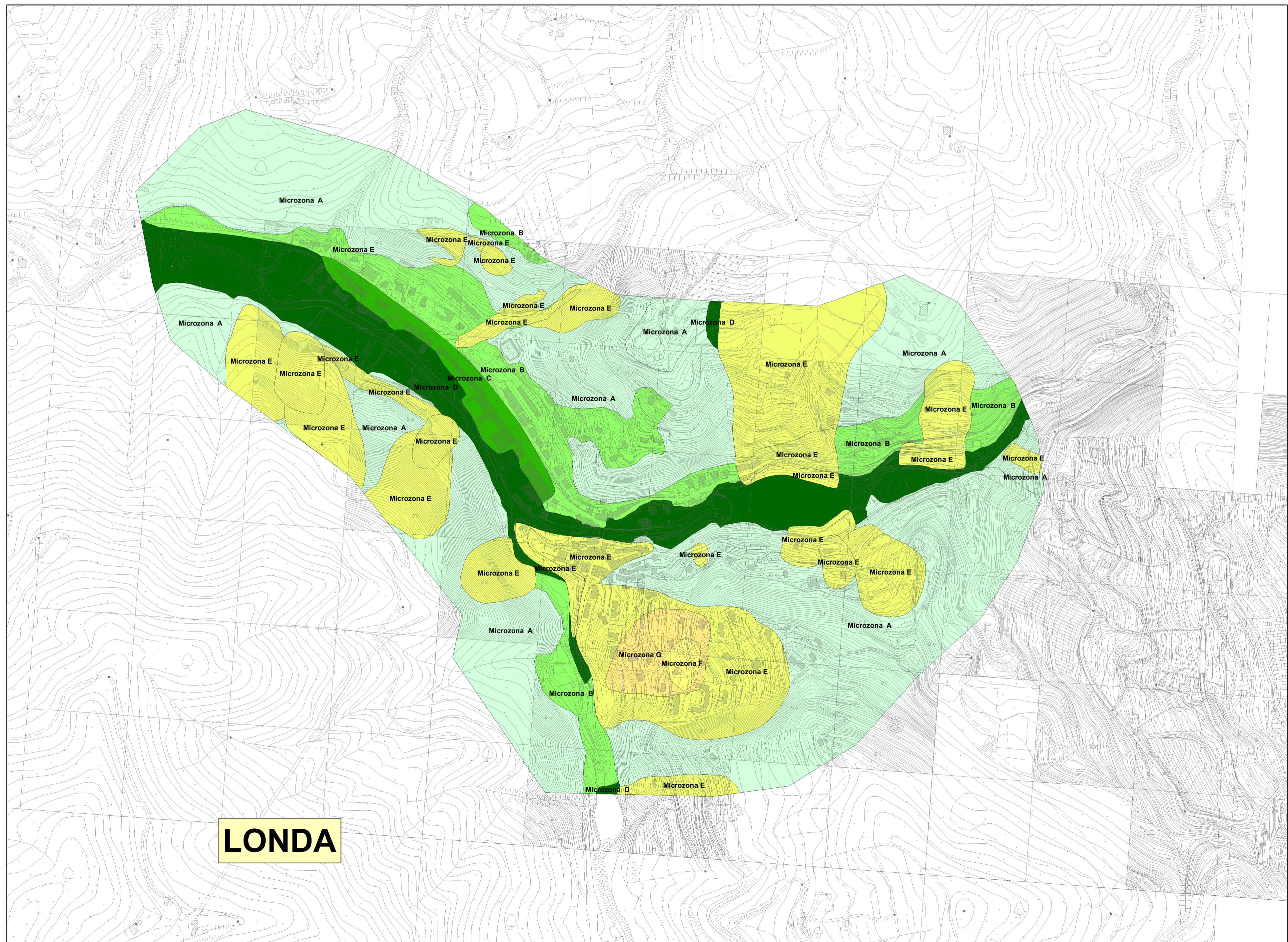
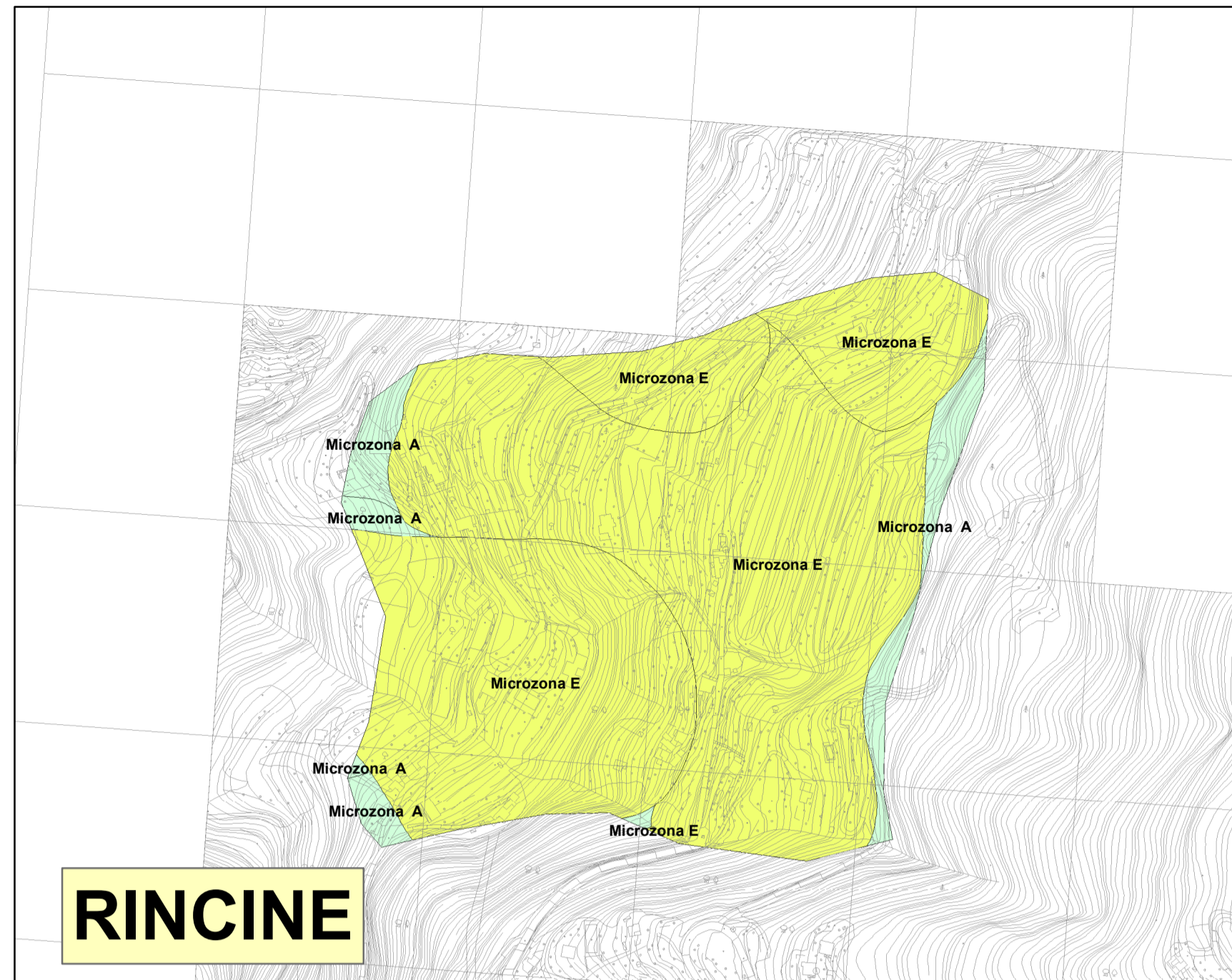
### Legenda

#### Microzona

- Microzona A
- Microzona B
- Microzona C
- Microzona D
- Microzona E
- Microzona F
- Microzona G



0 210 420 840 Meters

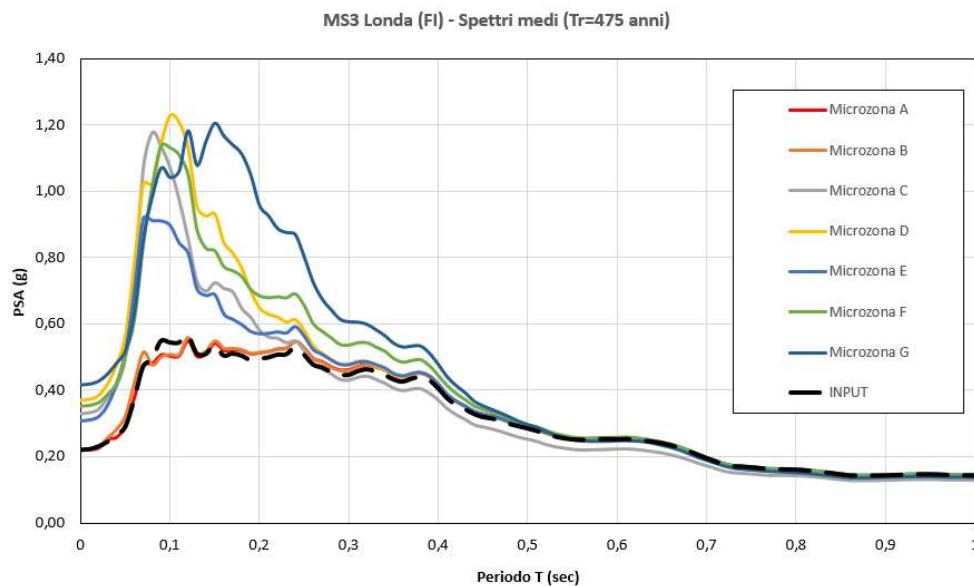




L'estrapolazione areale dei dati di amplificazione si è basato sul seguente modello logico:

- 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 similari 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 Londa (FI).

---

## 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 7 microzone omogenee individuate nella MS3);

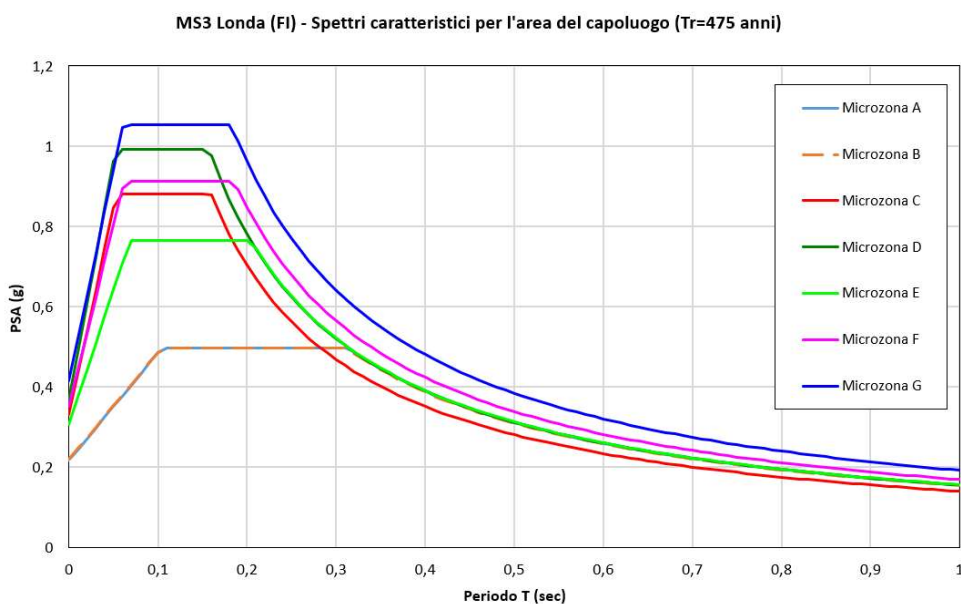
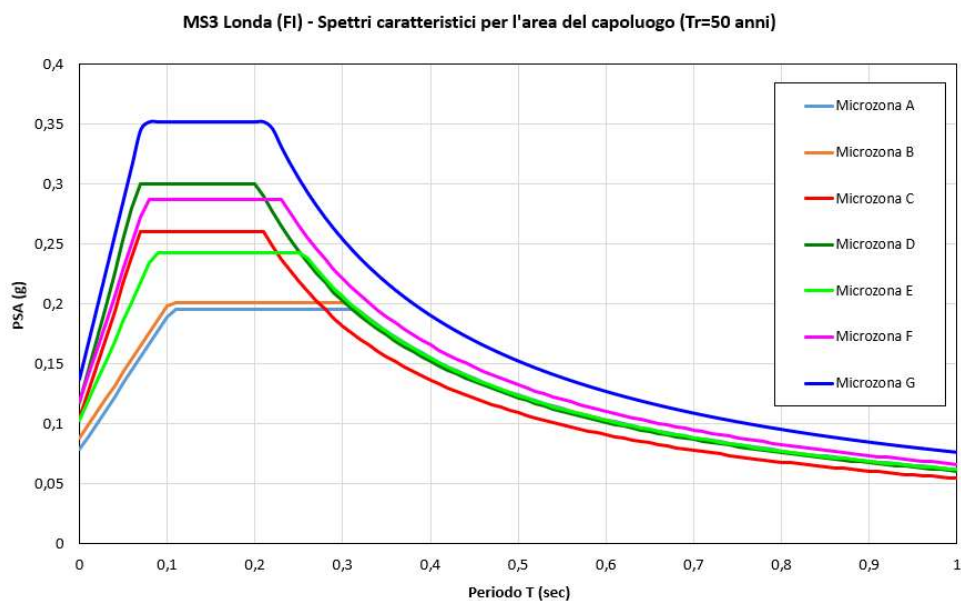
2) Regolarizzazione dello spettro medio con definizione sia di uno spettro di forma simile a quelli semplificati di normativa sia, di conseguenza, i suoi parametri dipendenti (**S**, **T<sub>b</sub>** e **T<sub>c</sub>**), mentre i parametri indipendenti sono fissati, come noto, dalla localizzazione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

La regolarizzazione 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<sub>r</sub>=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 Londa 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.

Londa (FI)						Londa (FI)							
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 = 0.195g						ag = 0.079g							
microzona	località	F0 (-)	S (-)	Tb (s)	Tc (s)	Td (s)	microzona	località	F0 (-)	S (-)	Tb (s)	Tc (s)	Td (s)
A	LONDA	2,291	1,11	0,105	0,314	2,468	A	LONDA	2,487	1,00	0,106	0,318	1,914
B		2,256	1,13	0,104	0,312	2,481	B		2,285	1,11	0,102	0,307	1,952
C		2,662	1,70	0,053	0,160	2,922	C		2,496	1,32	0,070	0,210	2,018
D		2,694	1,89	0,052	0,157	3,072	D		2,552	1,49	0,068	0,203	2,071
E		2,494	1,57	0,068	0,205	2,826	E		2,348	1,31	0,085	0,255	2,013
F		2,596	1,80	0,062	0,186	3,005	F		2,419	1,51	0,077	0,231	2,076
G		2,541	2,13	0,061	0,182	3,260	G		2,568	1,74	0,072	0,216	2,149

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

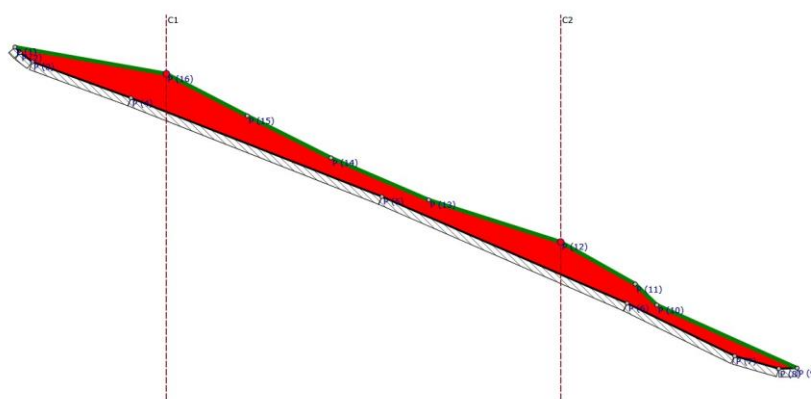
## **ALLEGATO A – Report RSL2D sezione BB' e analisi dinamica frana versante sx**

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

Ubicazione sito: Centro abitato di Londa - Sezione BB\_sx

RELAZIONE DI CALCOLO

**ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE**



Archivio: LOE464~1.LSR.lsr - Data : 02/02/2021

**Oggetto:** MS3 Comune di Londa

**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.....	15
4.3 - Accelerogrammi e Spettri di Input .....	16
4.4 - Modello di Calcolo FEM.....	20
5 - Output .....	22
5.1 - Accelerogrammi Output.....	22
5.2 - Spettri Output .....	29
5.3 - Interpretazione dei risultati .....	37
5.4 - Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL .....	38



## 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.

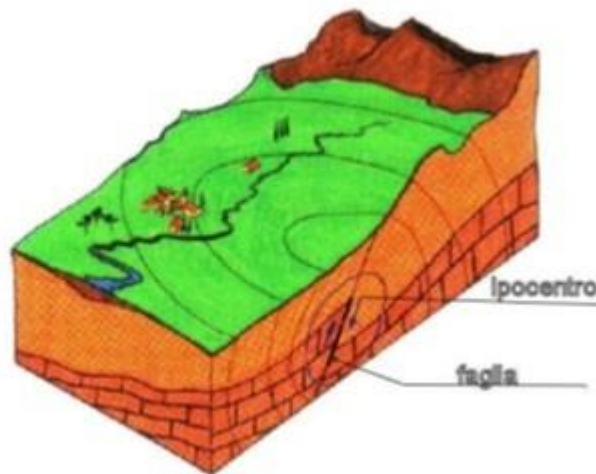
Oltre alle intrinseche differenze della vulnerabilità sismica delle costruzioni ed alle differenti caratteristiche dinamiche delle stesse, tali cause possono essere attribuite principalmente alle modificazioni delle caratteristiche del moto sismico indotte da condizioni geologiche e geomorfologiche locali.

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).

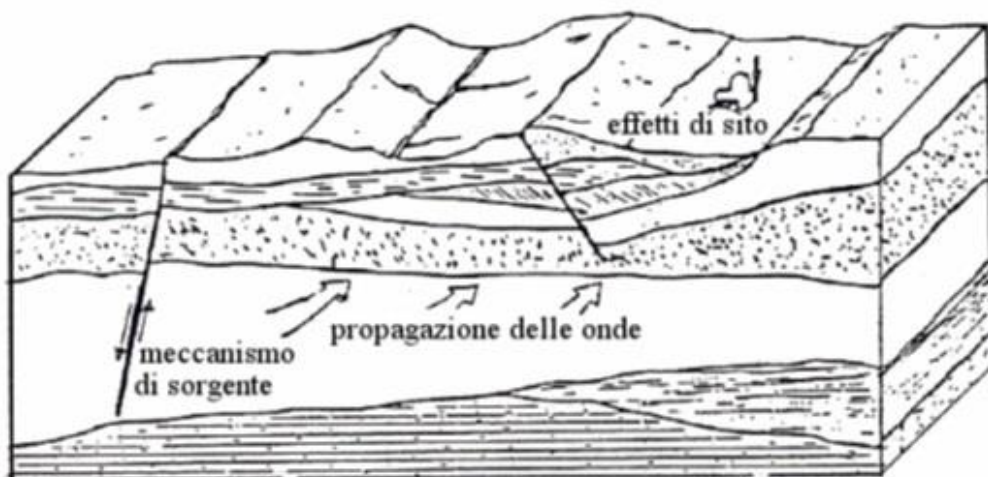


Figura 3. Schema di una situazione reale.

## 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 deamplificazione 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.

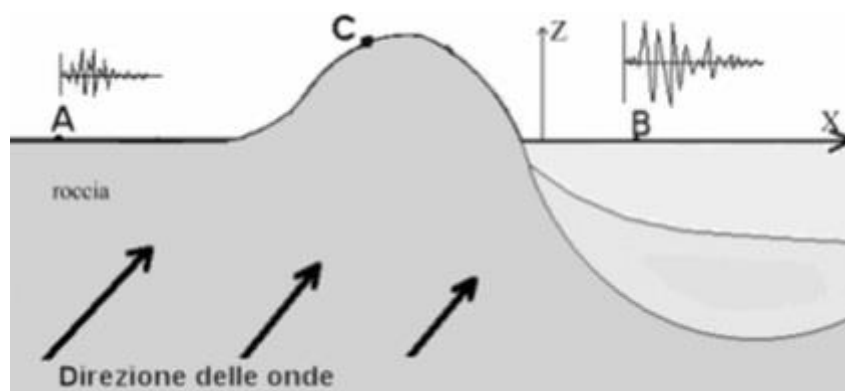


Figura 4. Schema della propagazione delle onde dalla sorgente e delle differenti condizioni locali.

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;

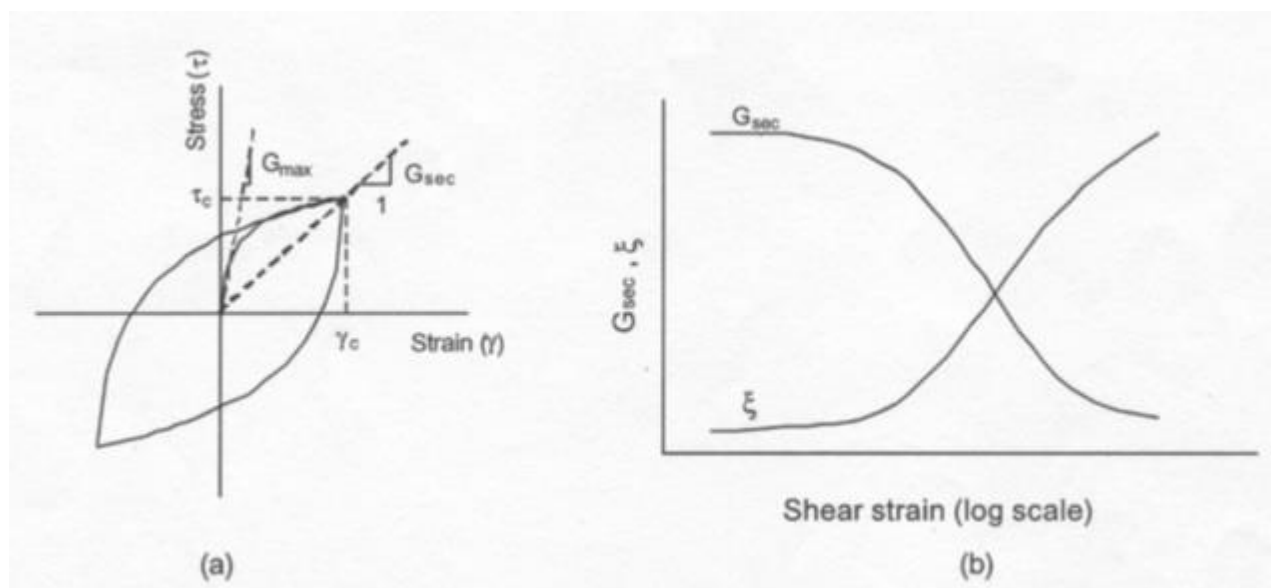


Figura 5. Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

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.

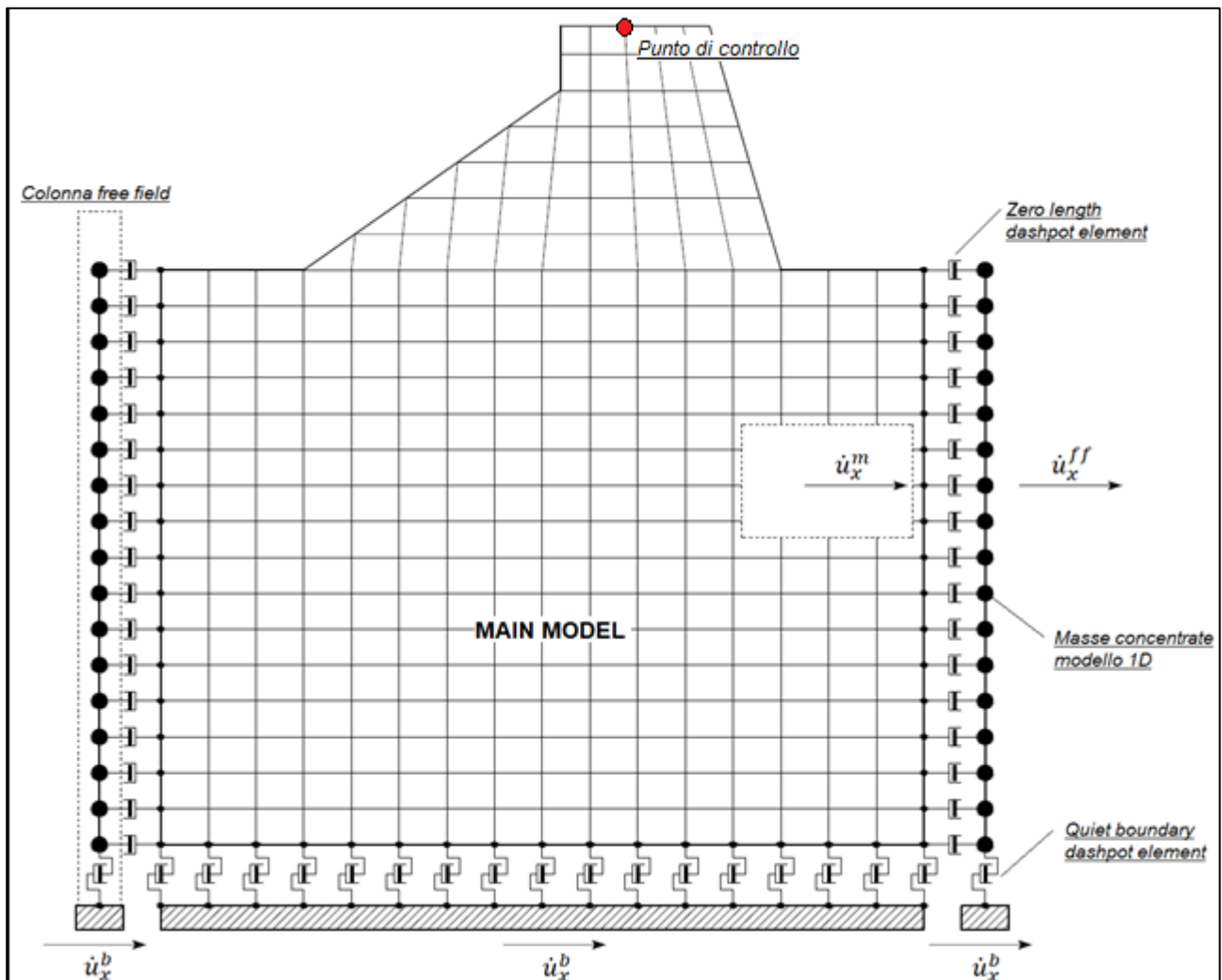


Figura 6. Discretizzazione FEM del deposito di terreno.

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

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 Reyleigh;

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.

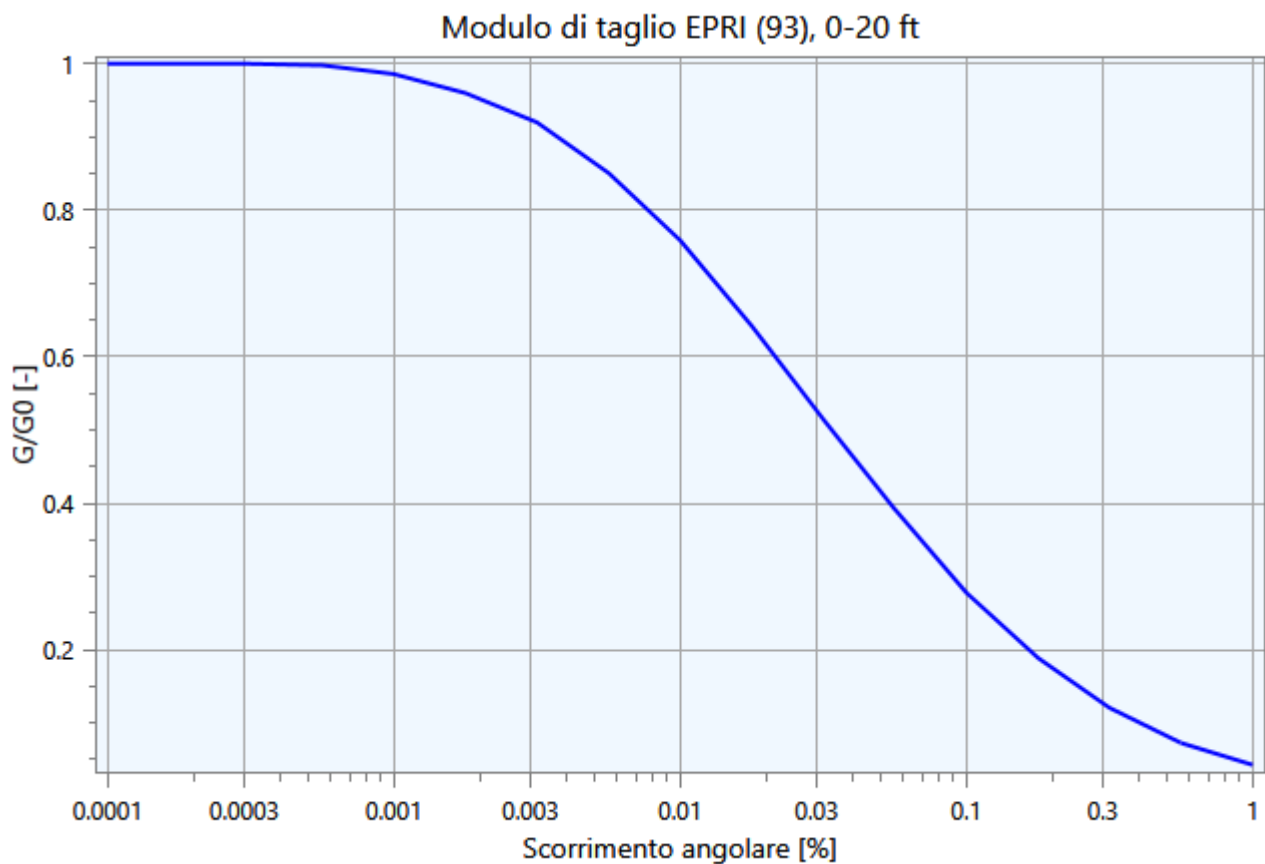
## 4 - Input

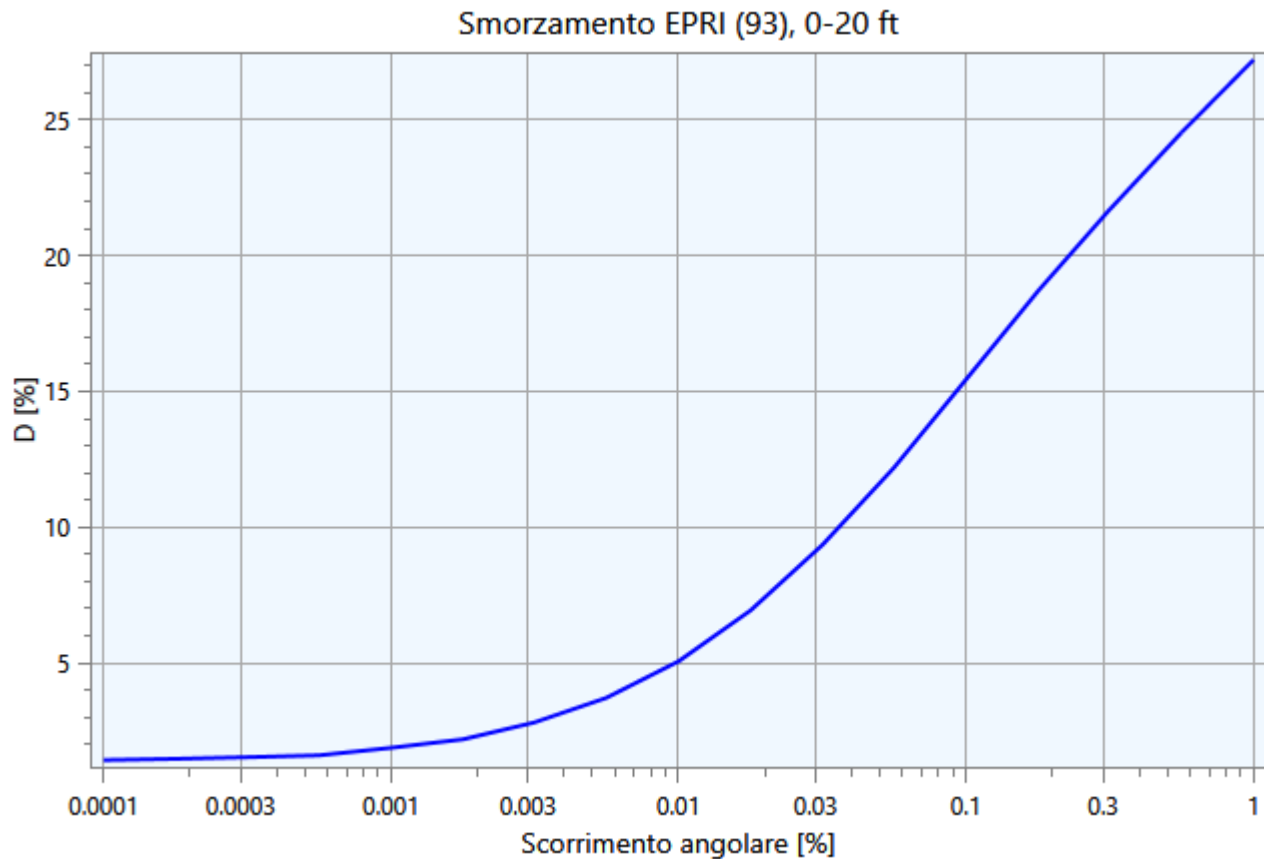
Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai dati di input utilizzati per lo studio della risposta sismica locale del deposito.

### 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:

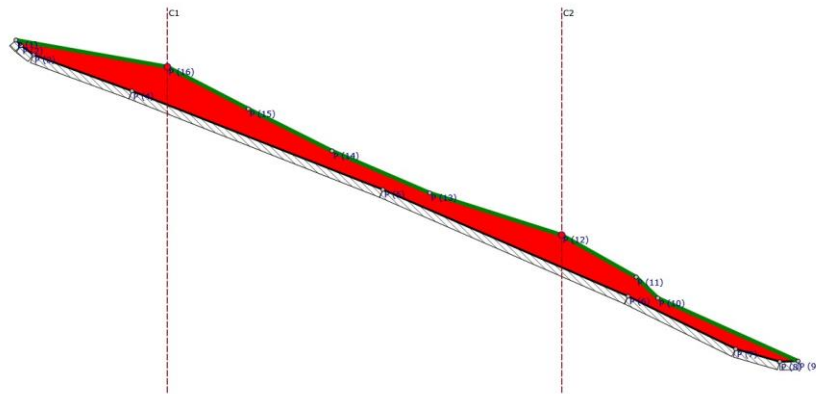


Figura 7. Stratigrafia di progetto.

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		-	1950.00	435.00	0.37	EPRI (93), 0-20 ft

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche strati.

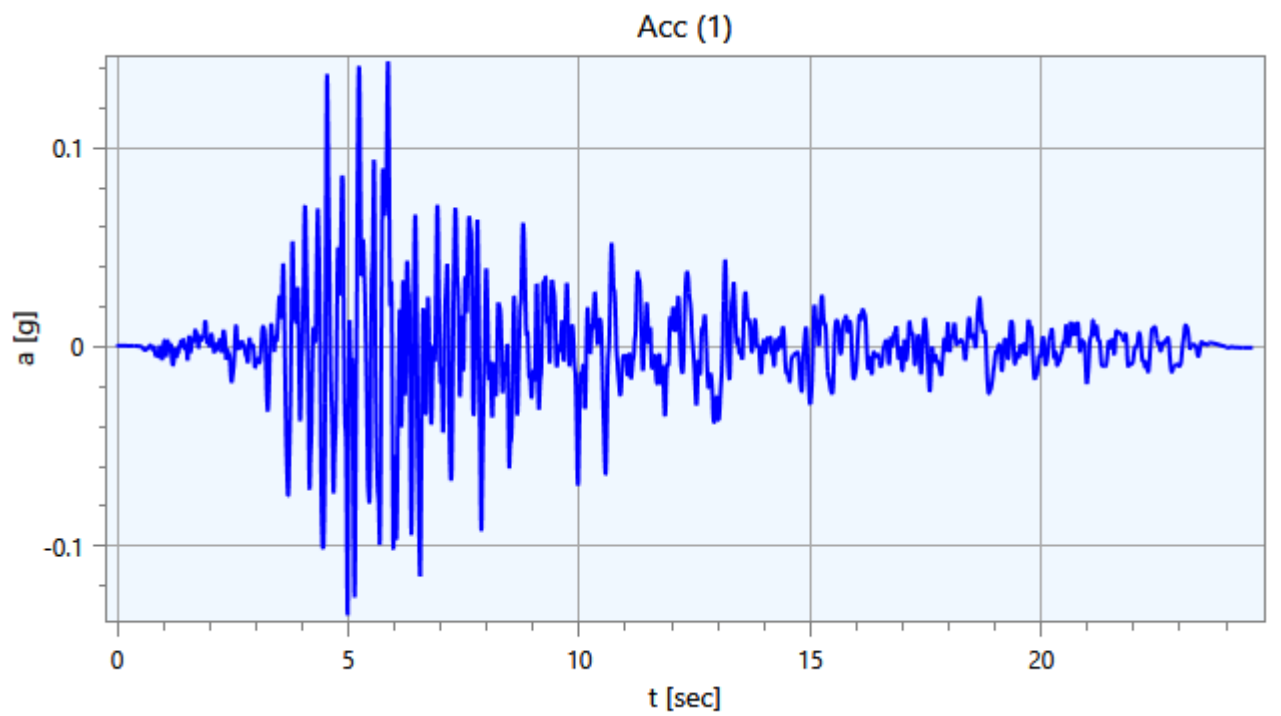
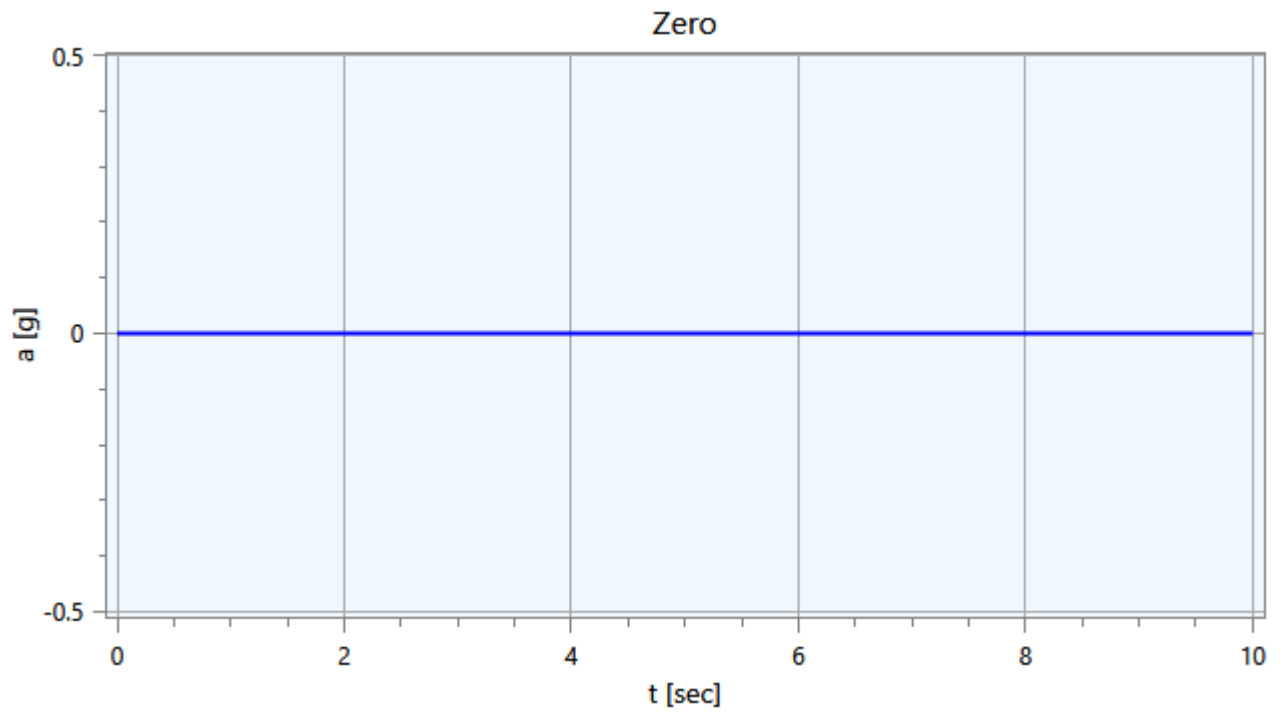
dove:

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

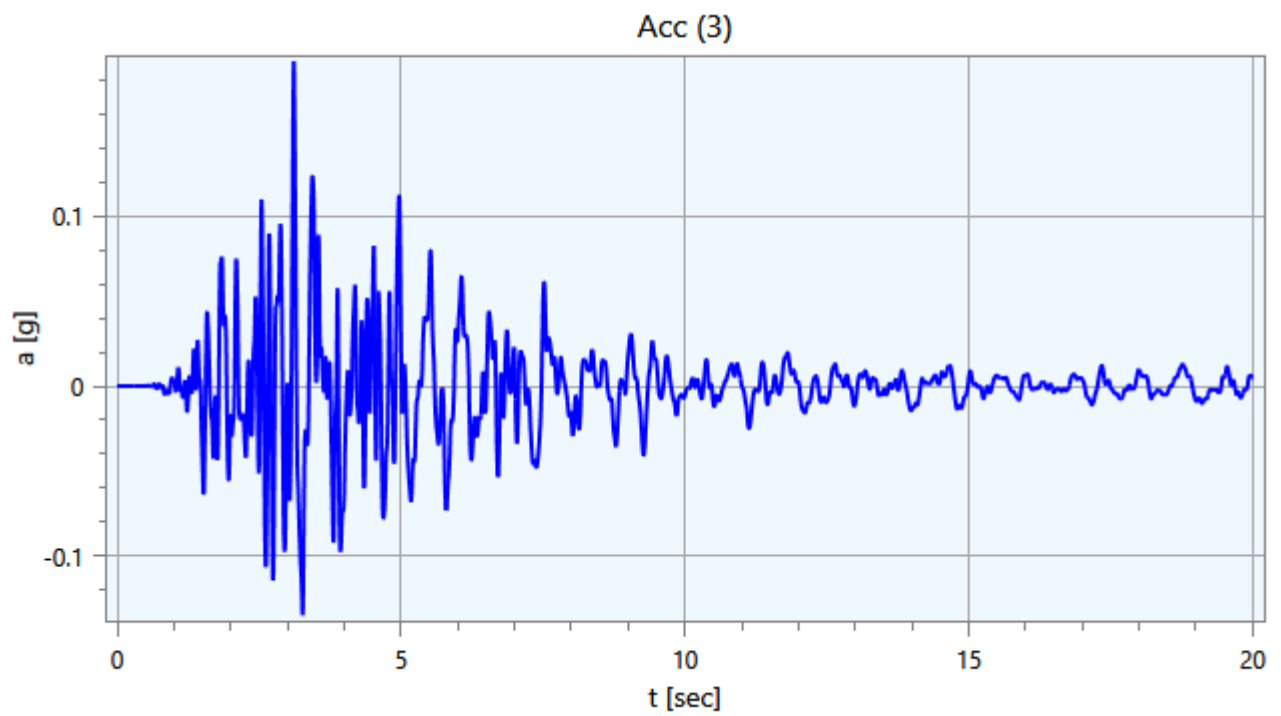
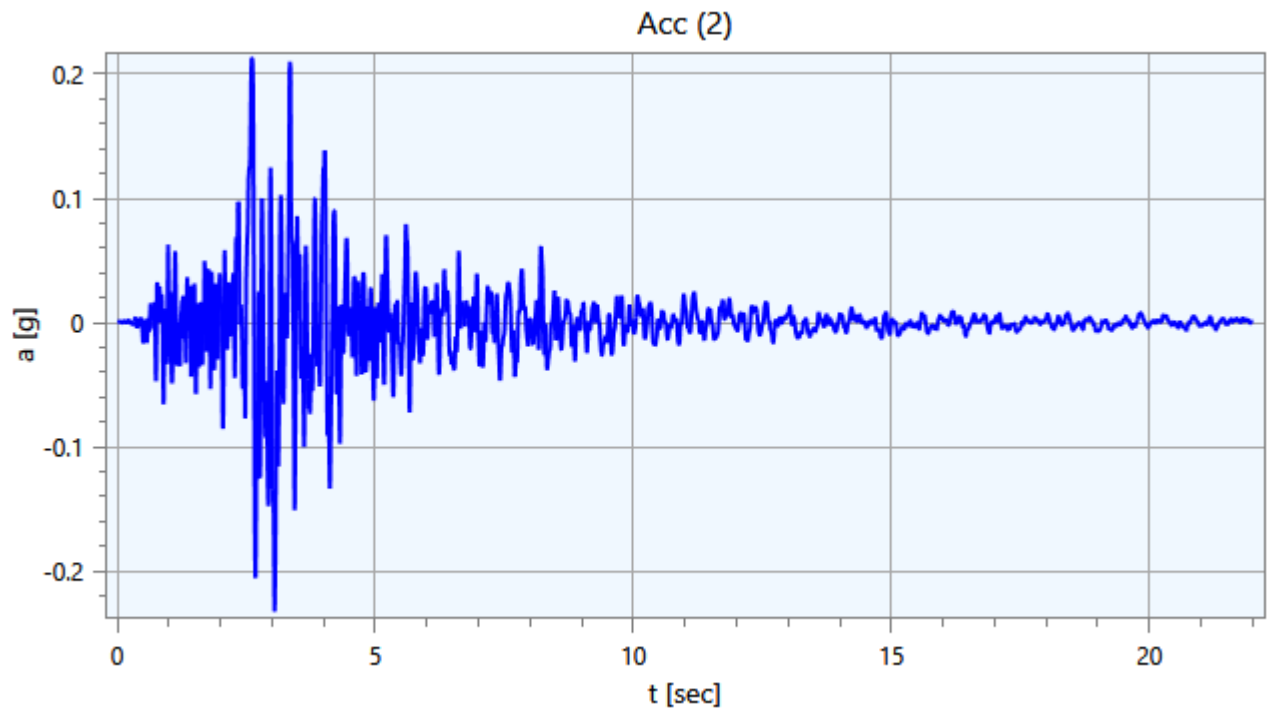
### 4.3 - Accelerogrammi e Spettri di Input

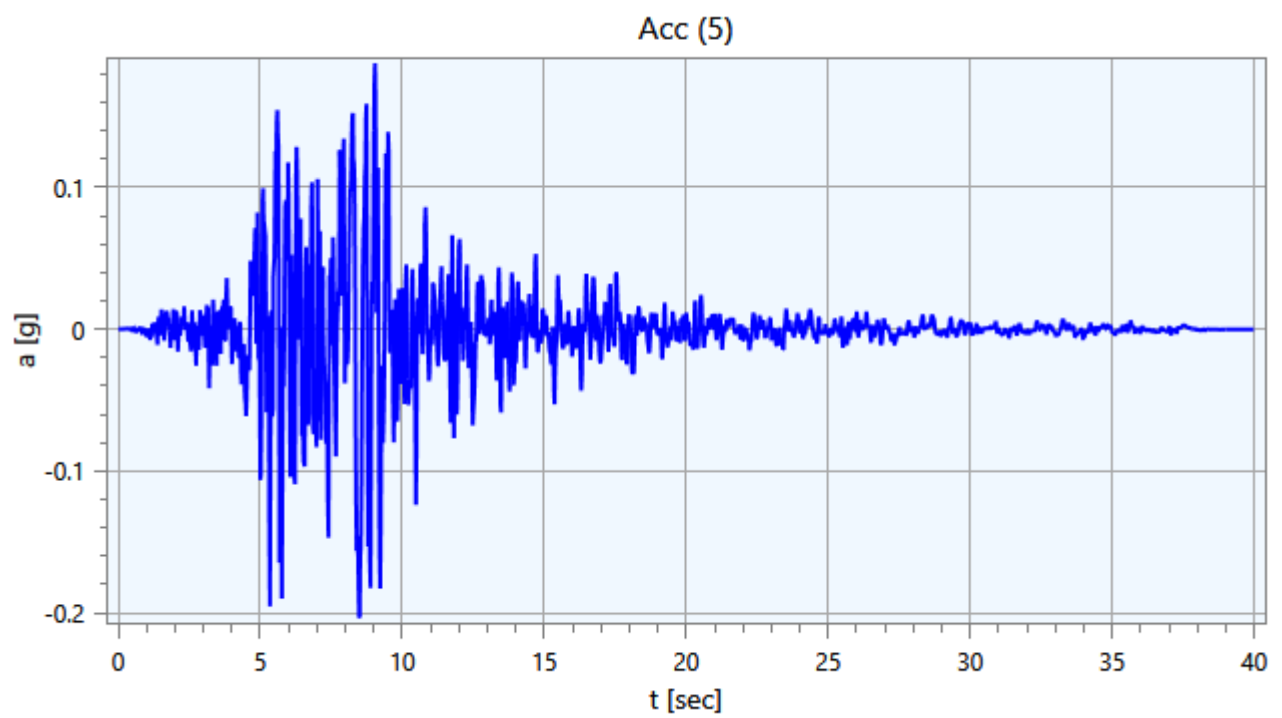
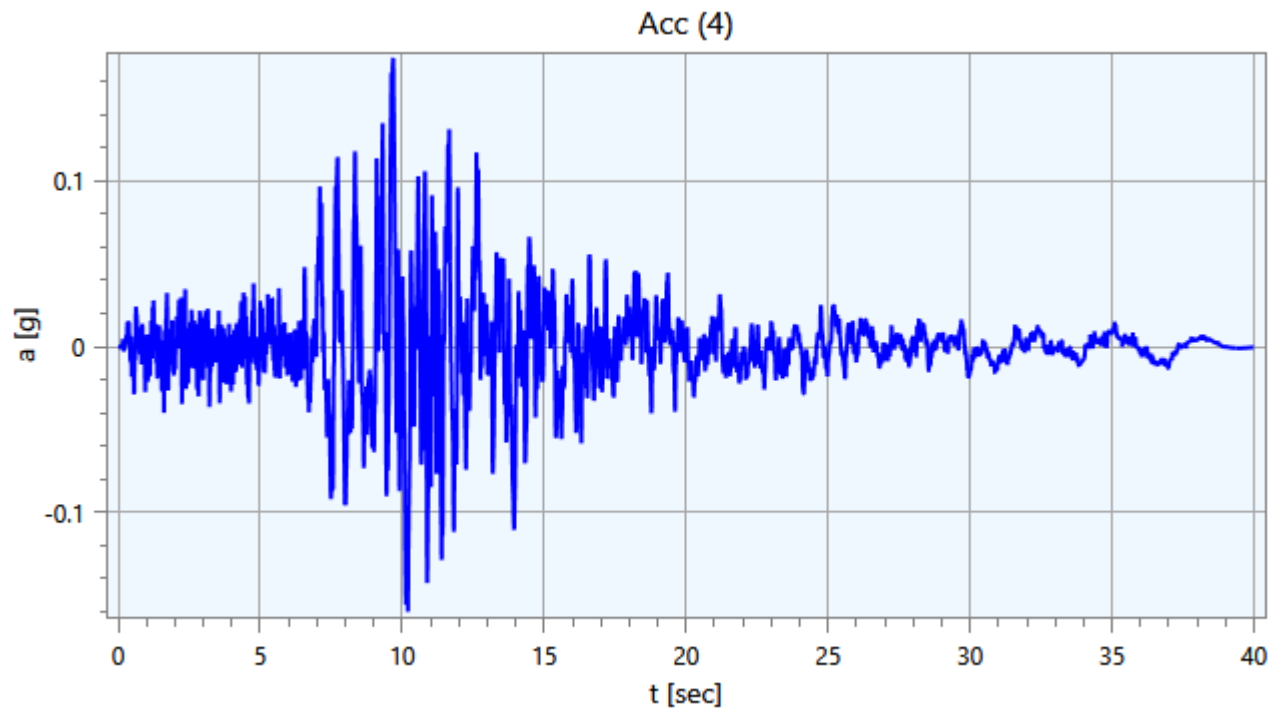
Gli accelerogrammi di input relativi allo stato limite in esame (ad esempio SLV) possono essere ottenuti tramite un'analisi con l'utilizzo dell'applicativo software REXEL v. 3.4 beta, che permette la ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle Norme Tecniche per 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>.

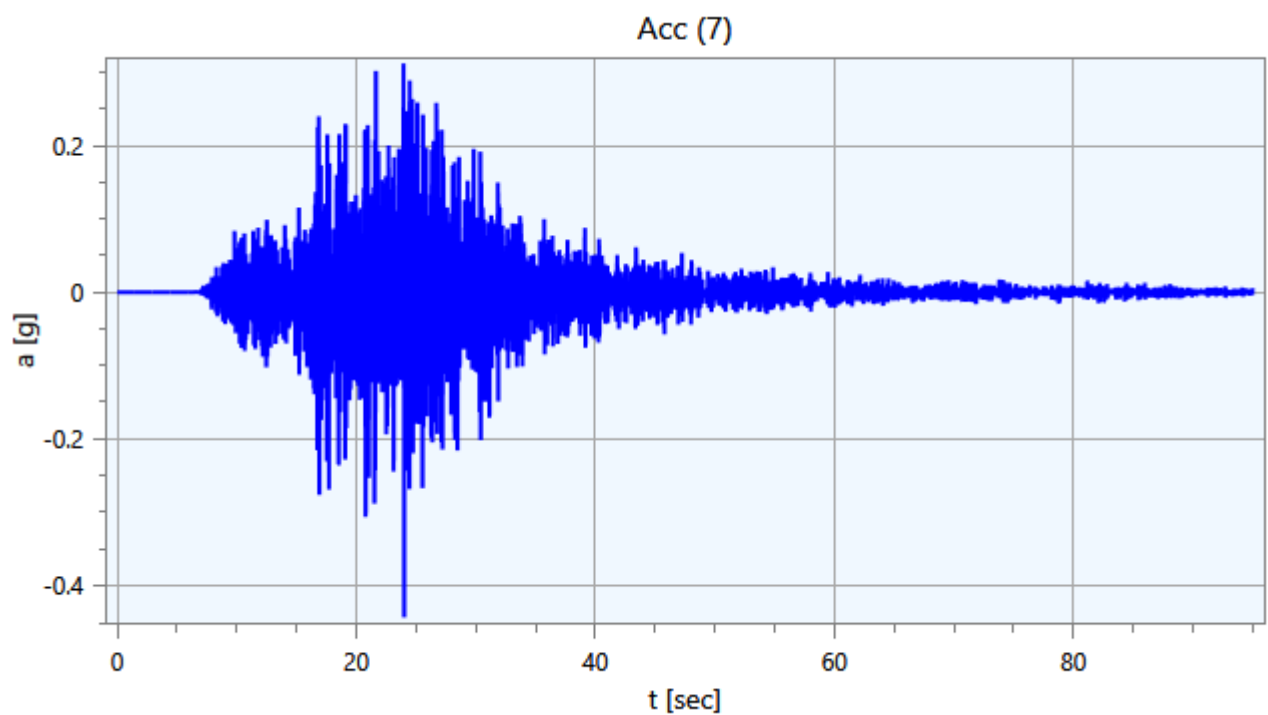
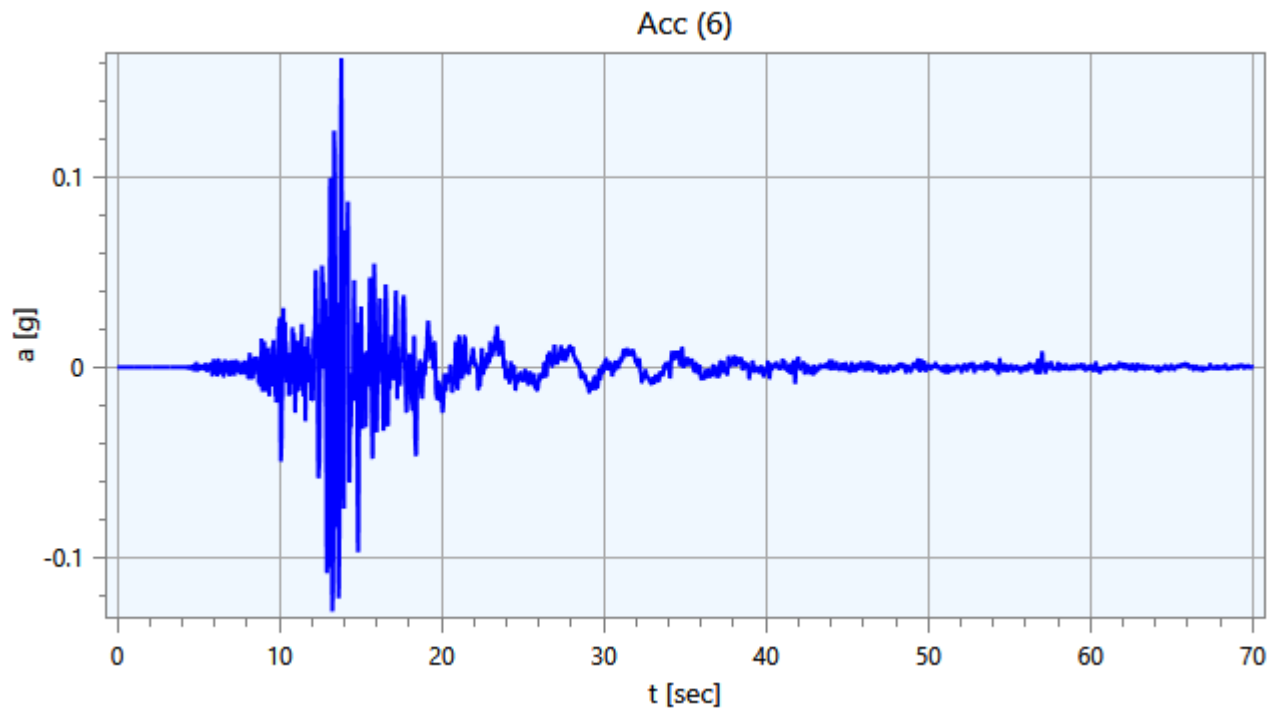
Di seguito si riportano gli accelerogrammi di progetto riferiti ad una condizione detta di 'outcrop':











#### 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:

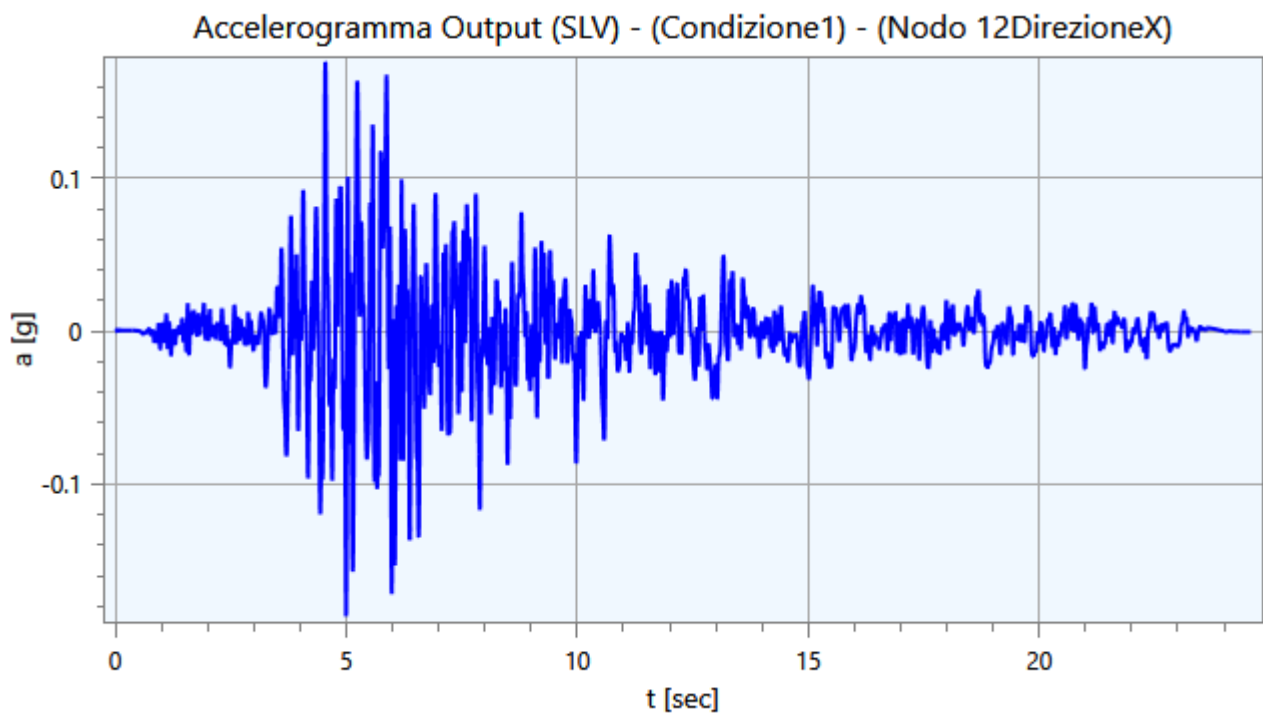
- $p$  = passo della mesh;
- $V_{s,min}$  = velocità delle onde di taglio minima presente nel modello;
- $f_{max}$  = frequenza massima che si vuole analizzare;

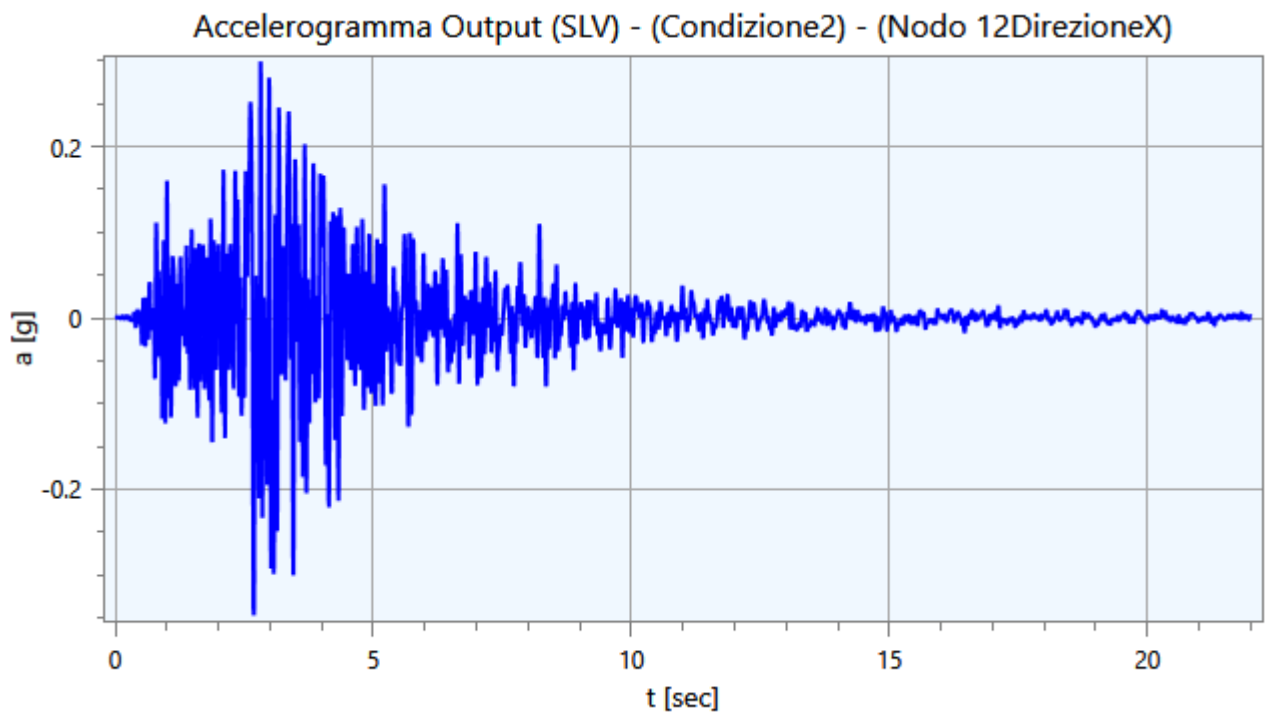
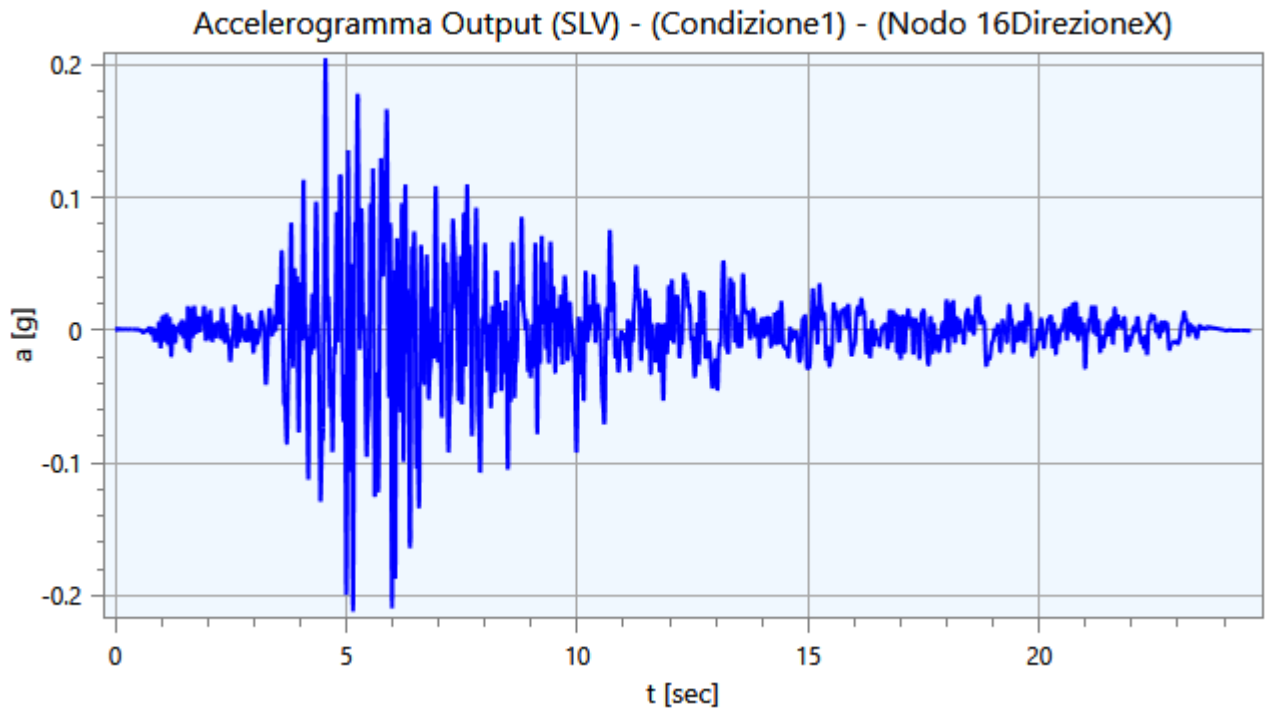
## 5 - Output

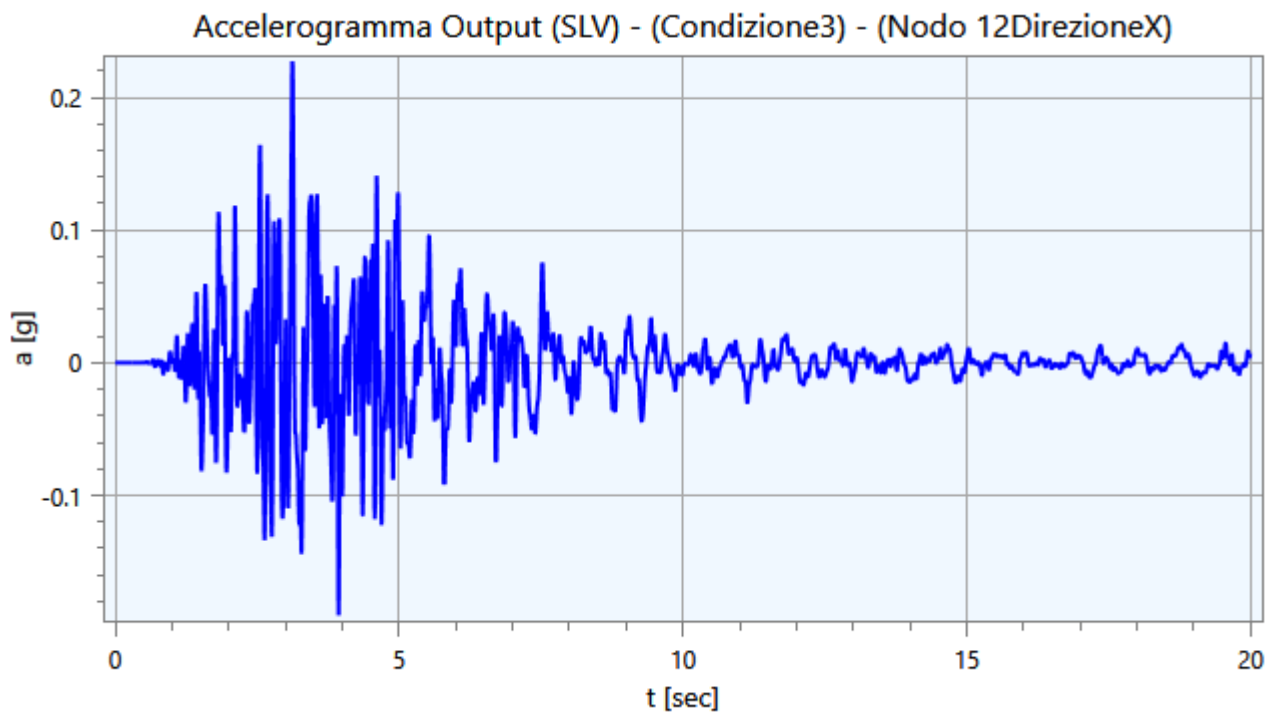
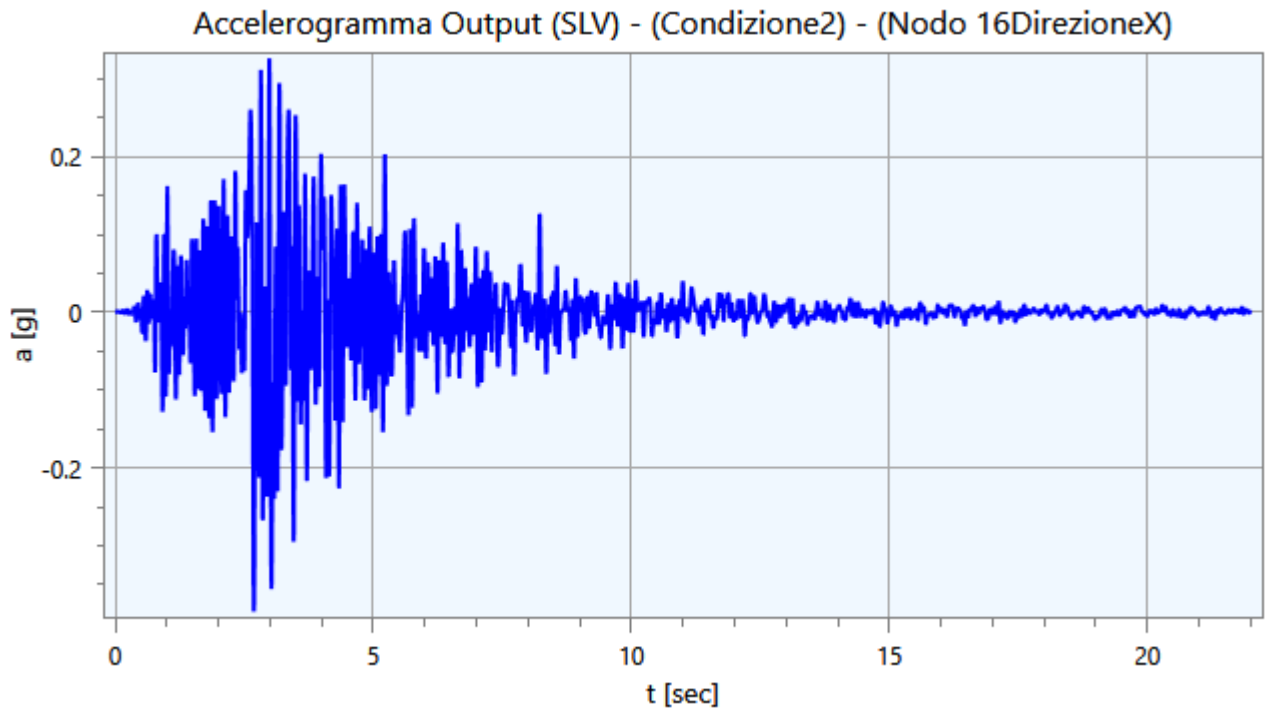
Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai risultati del calcolo.

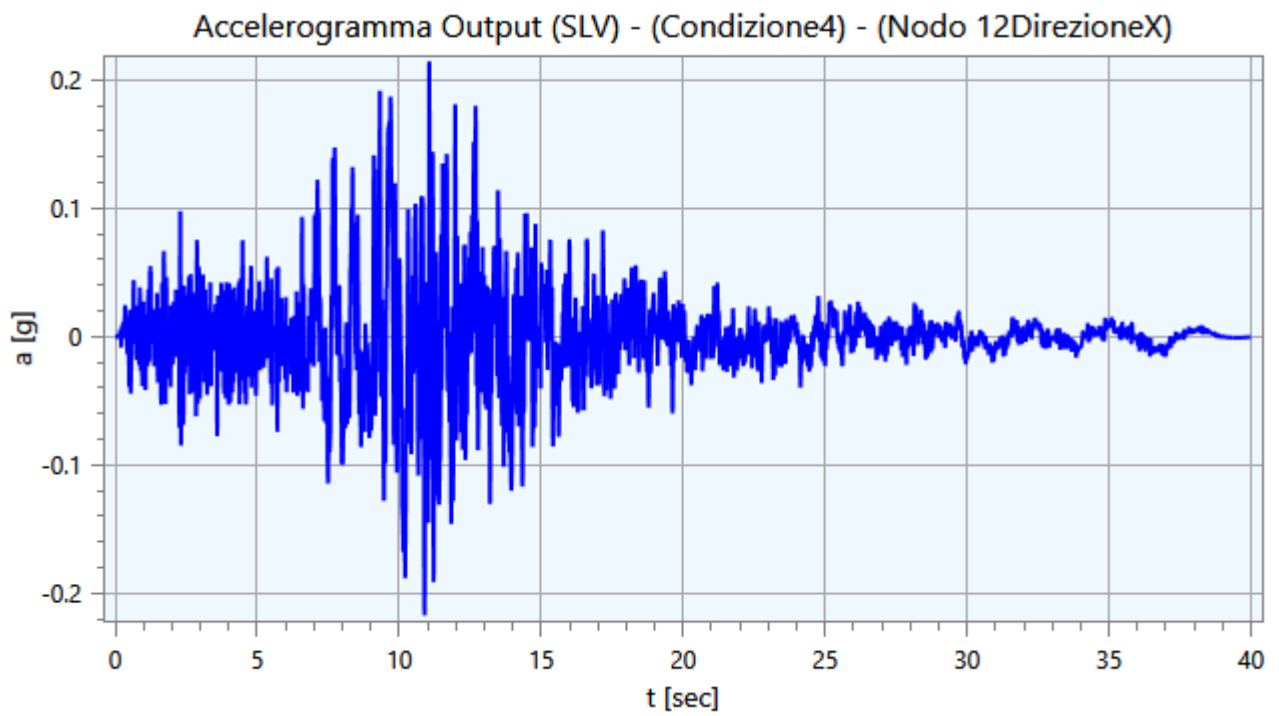
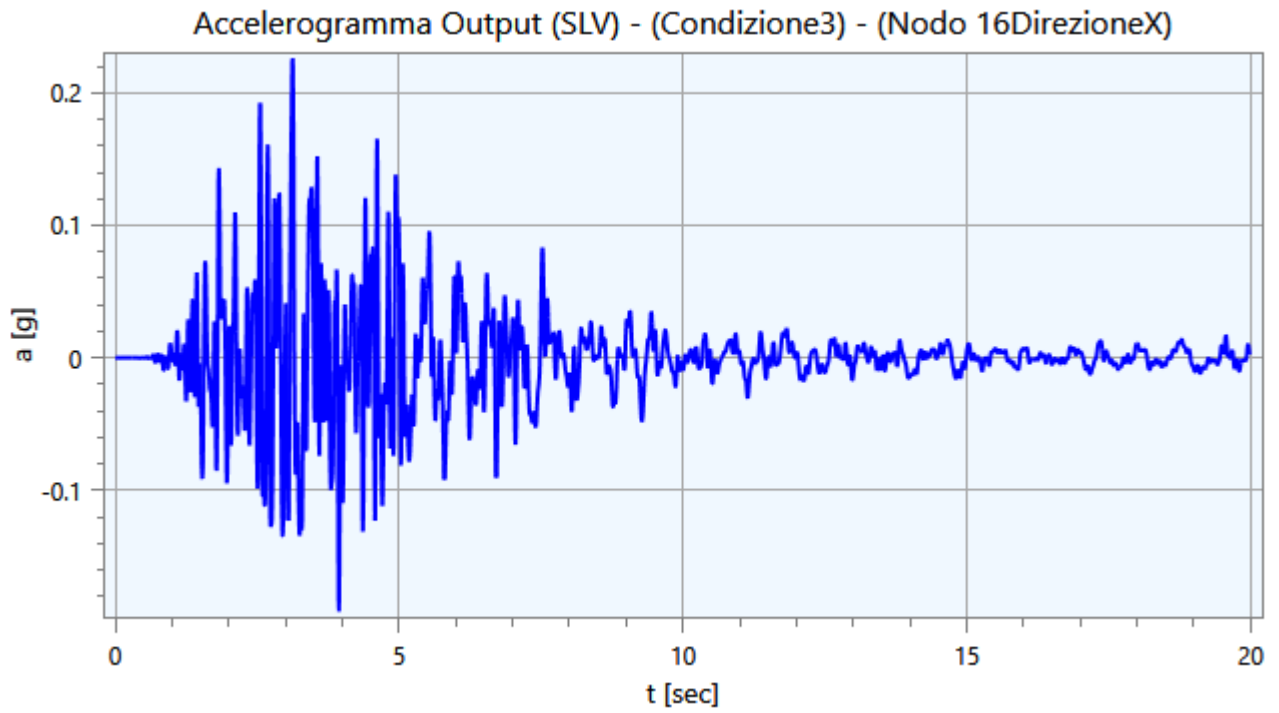
### 5.1 - Accelerogrammi Output

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

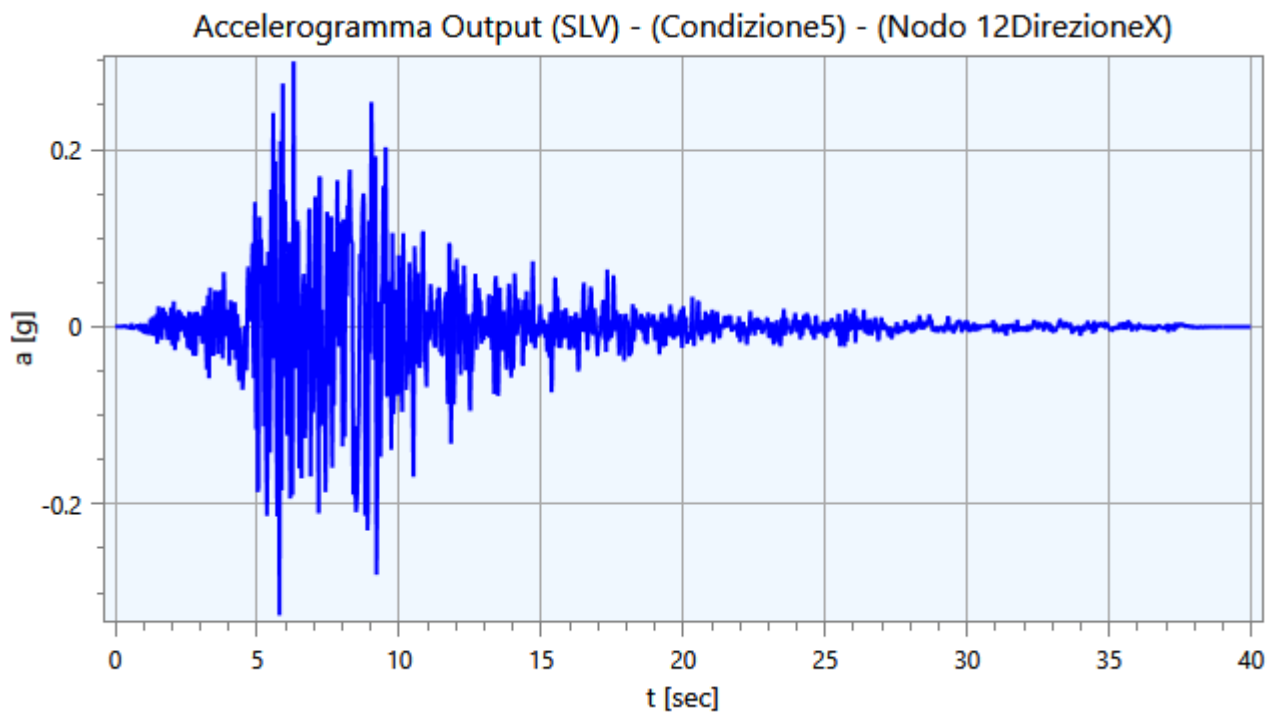
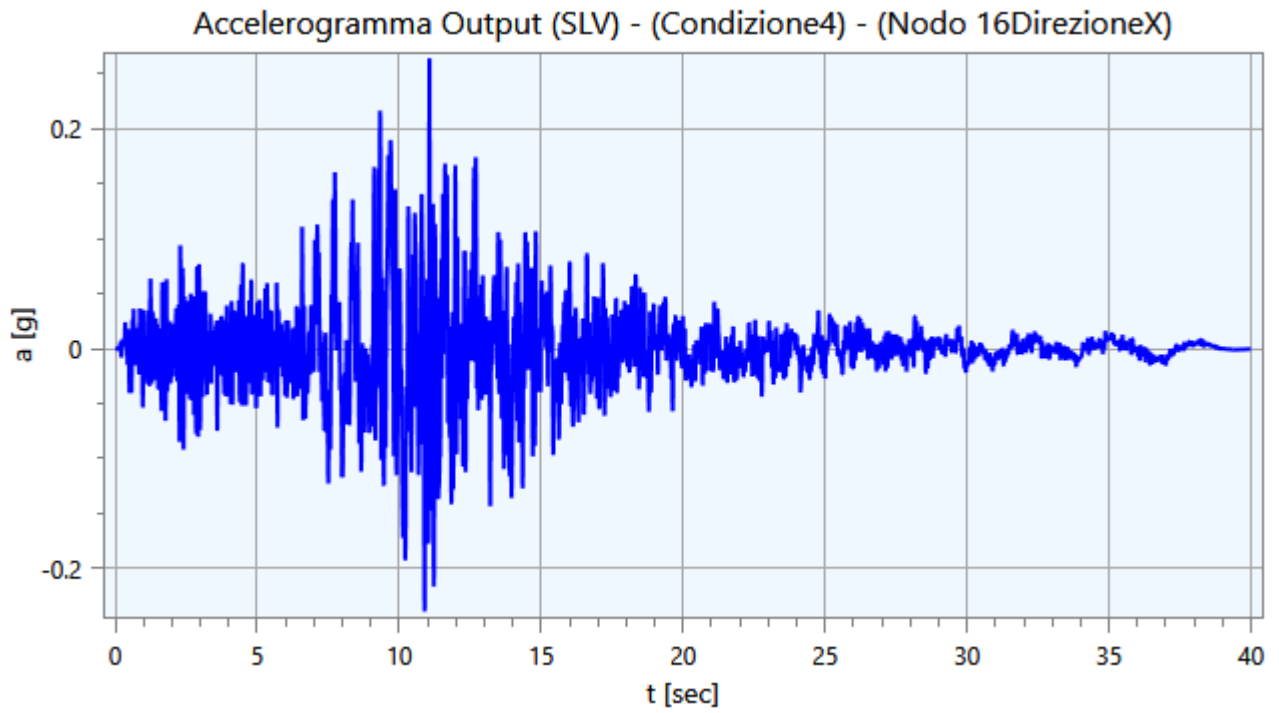




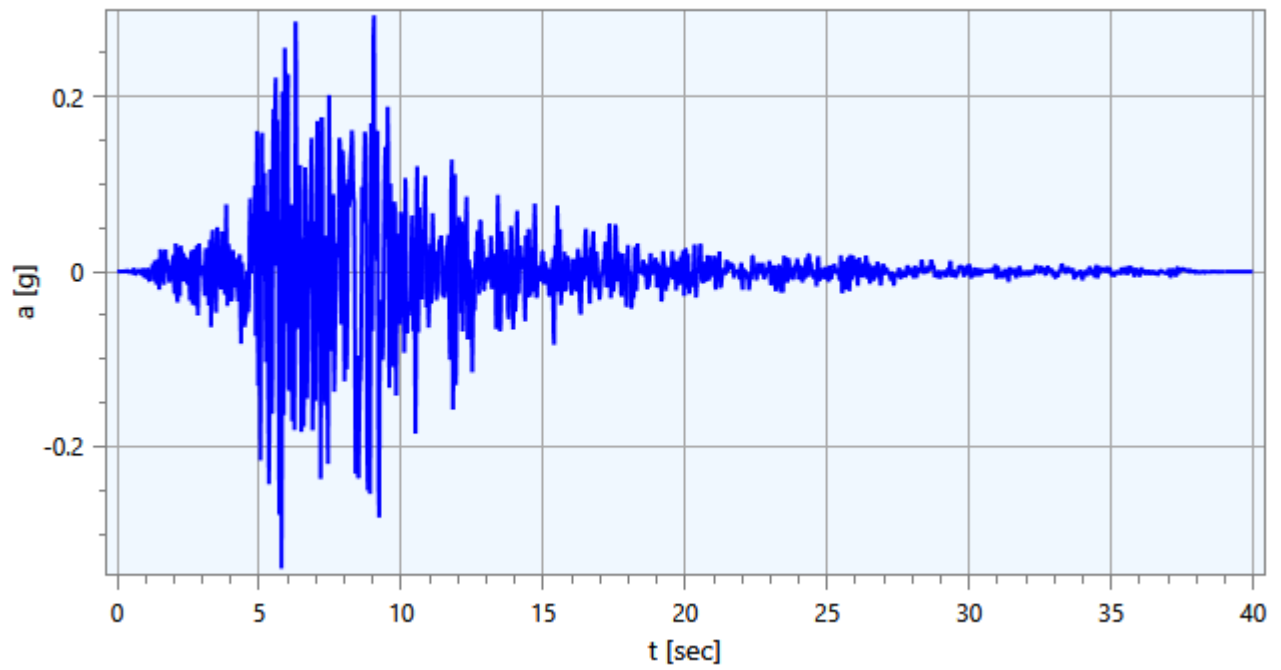




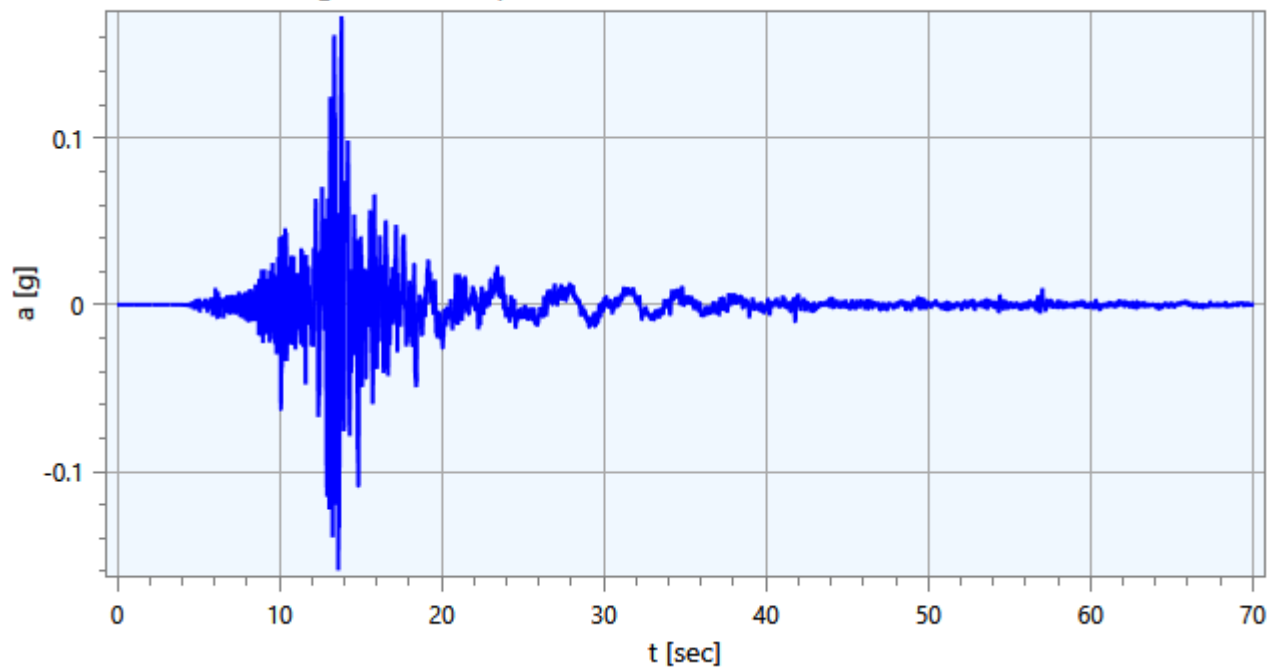




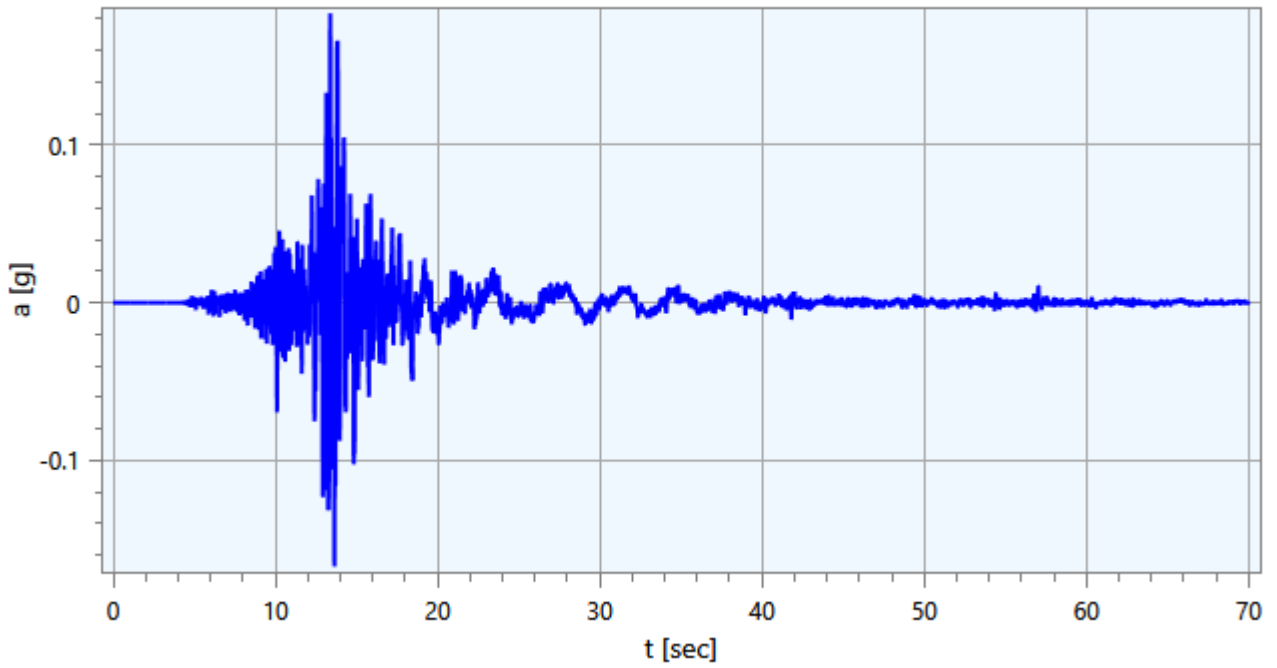
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 16DirezioneX)



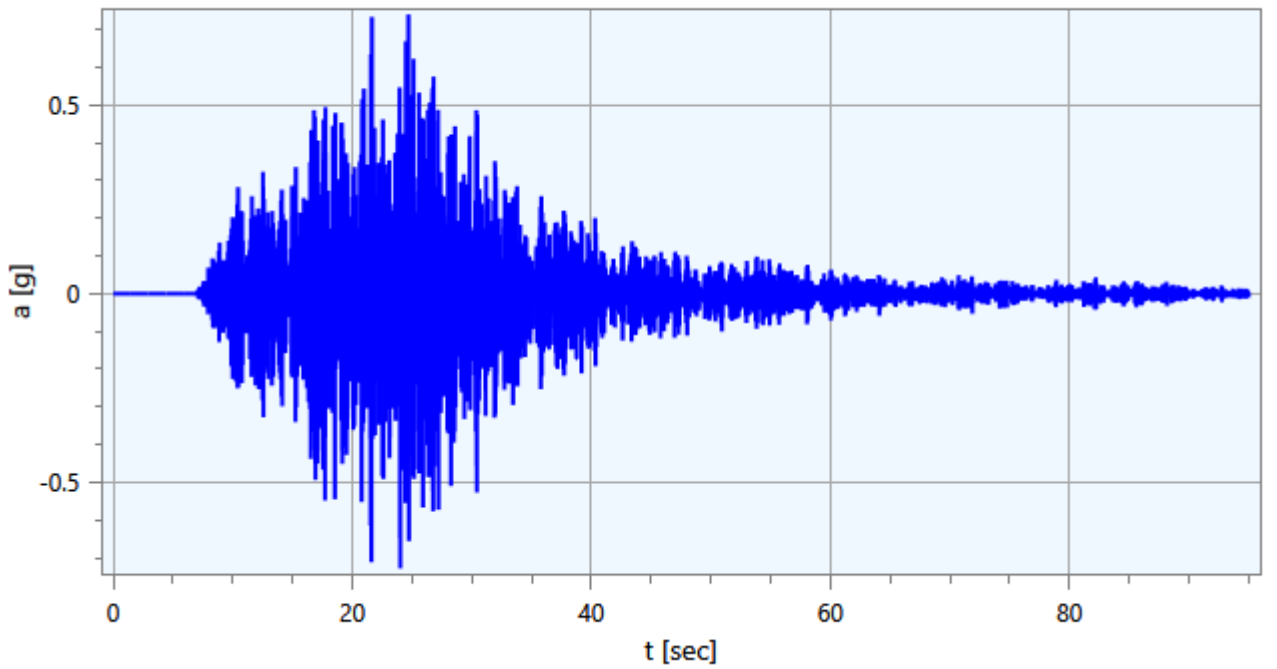
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 12DirezioneX)

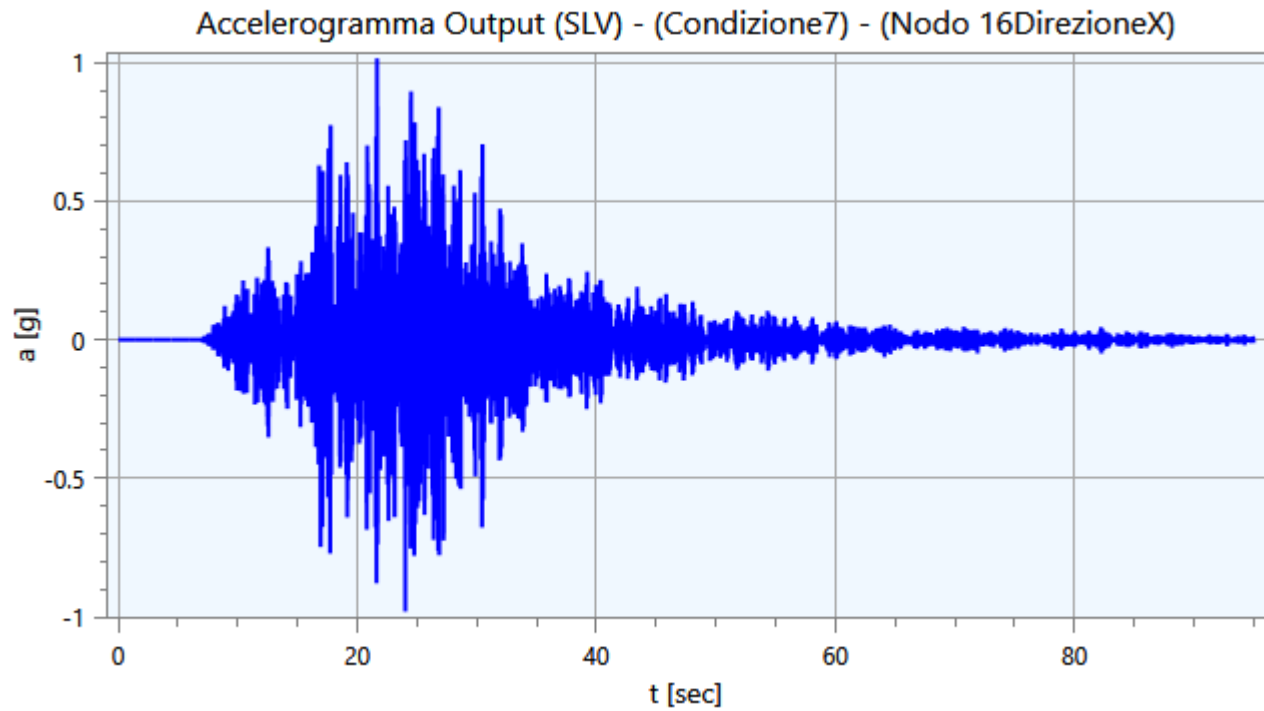


Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 16DirezioneX)



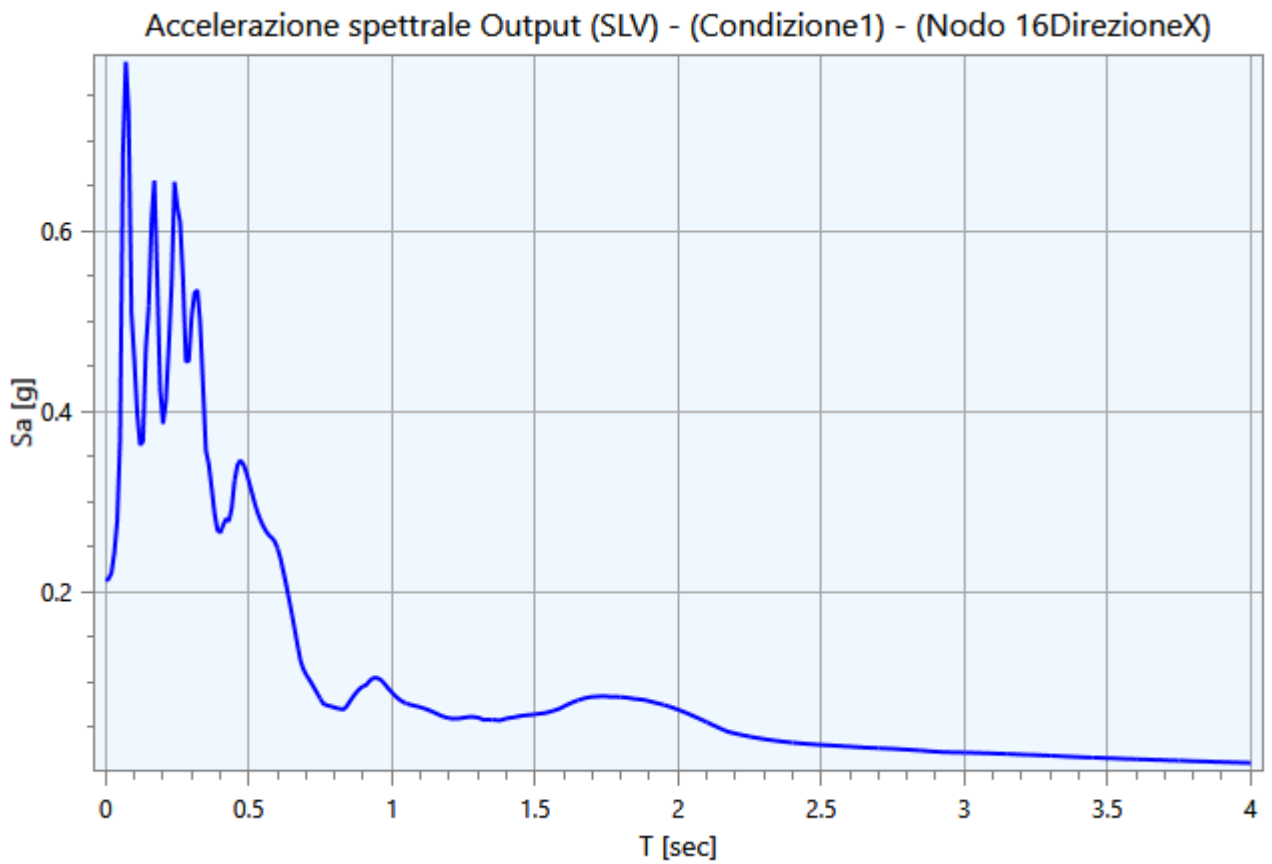
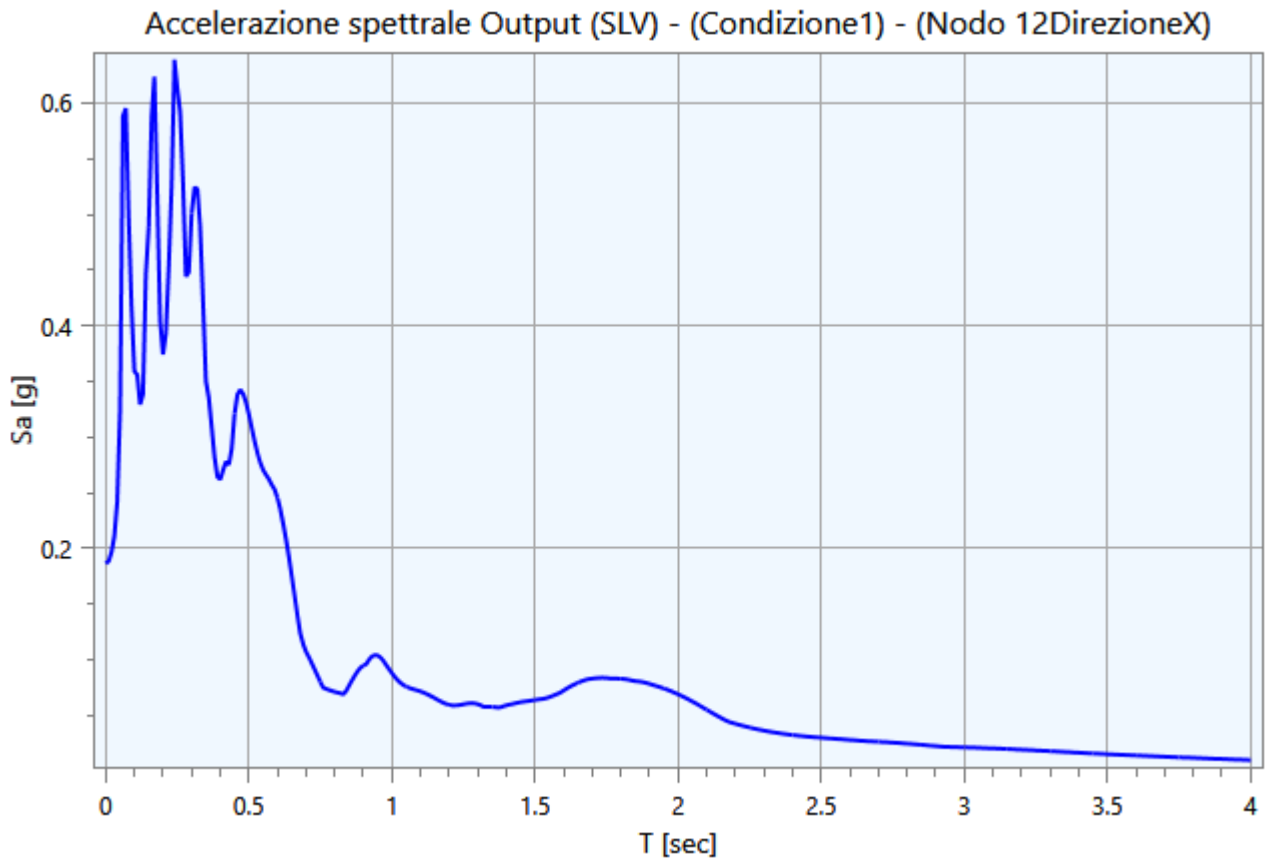
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione7) - (Nodo 12DirezioneX)



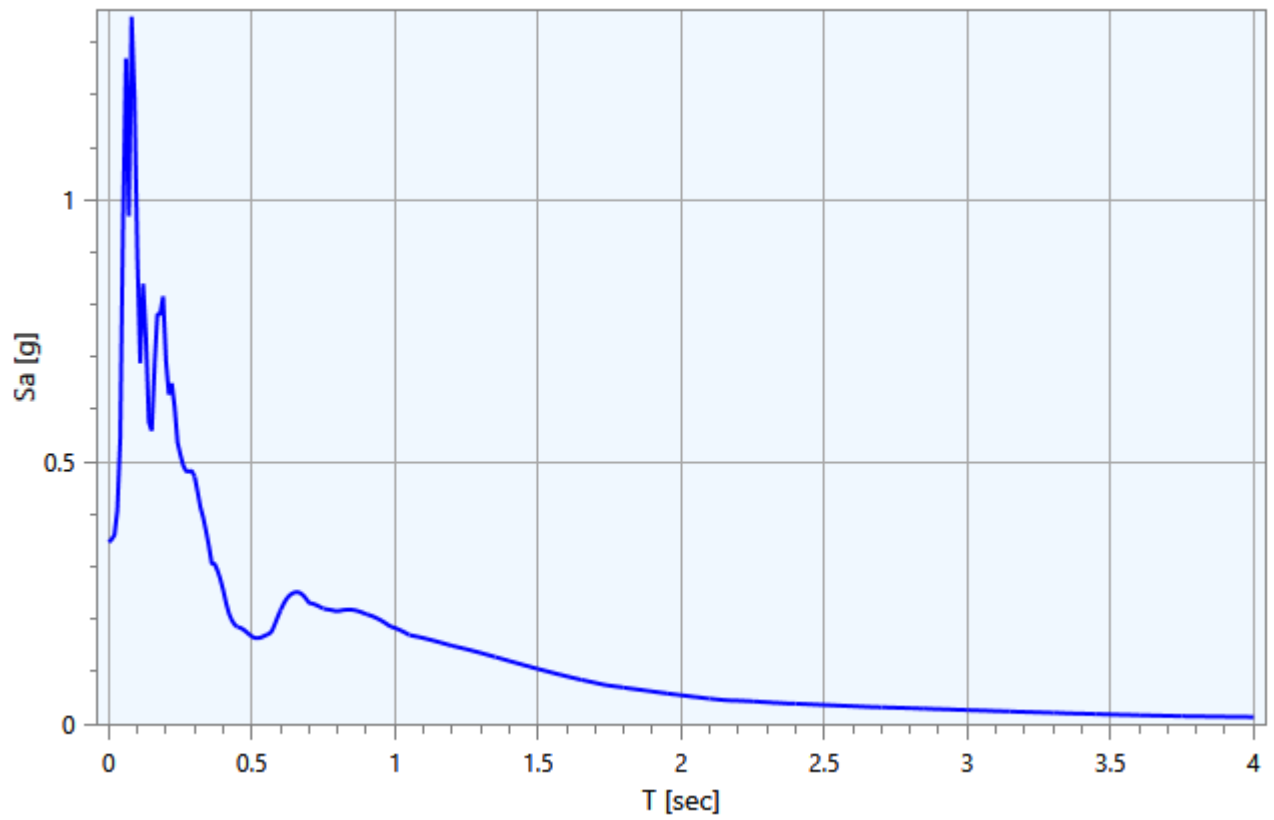


## 5.2 - Spettri Output

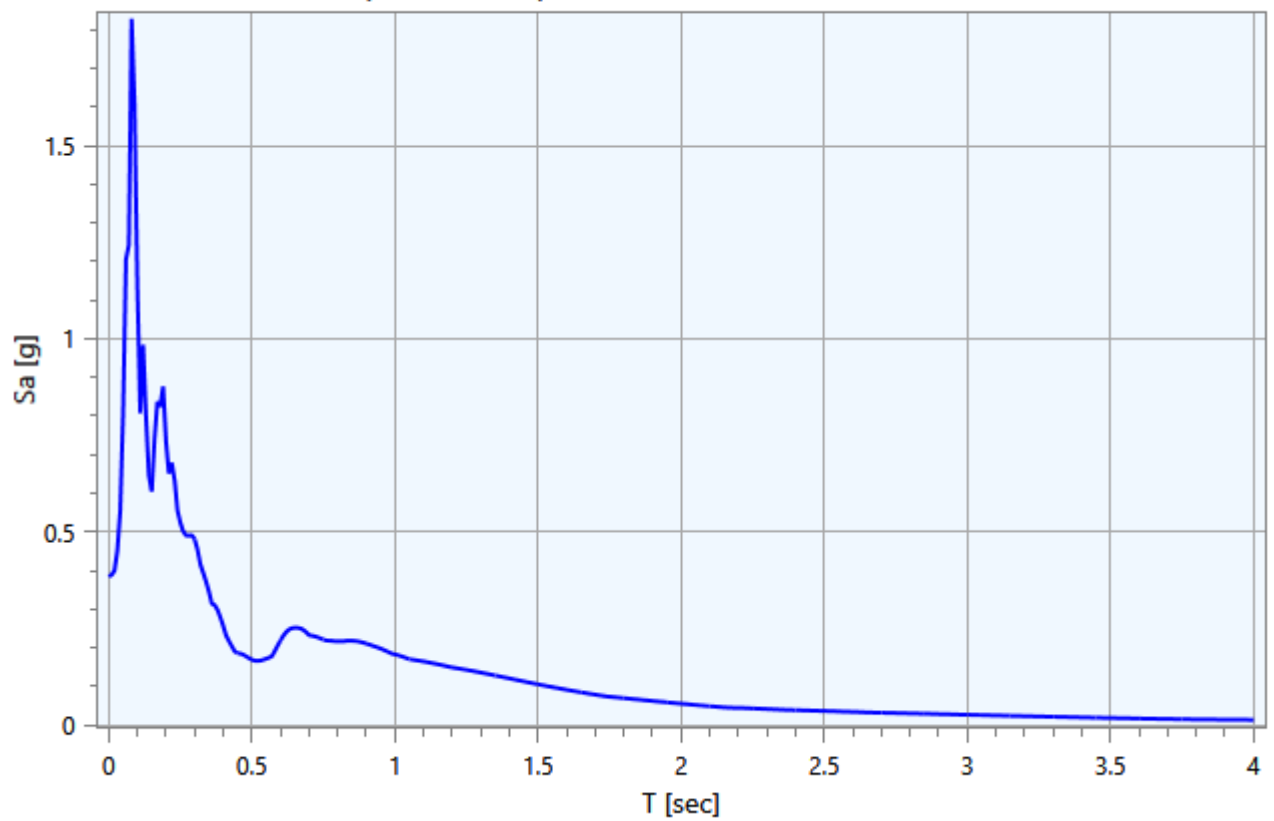
Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

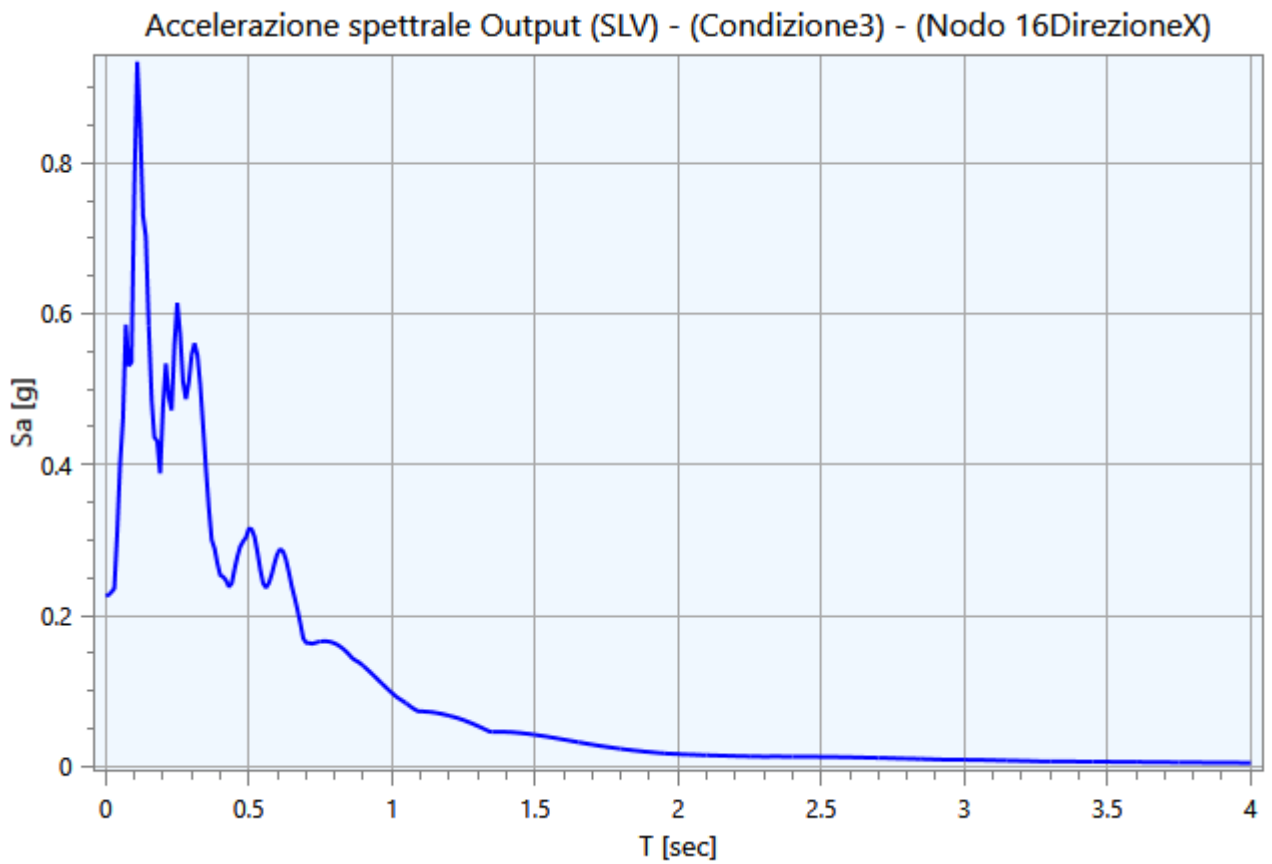
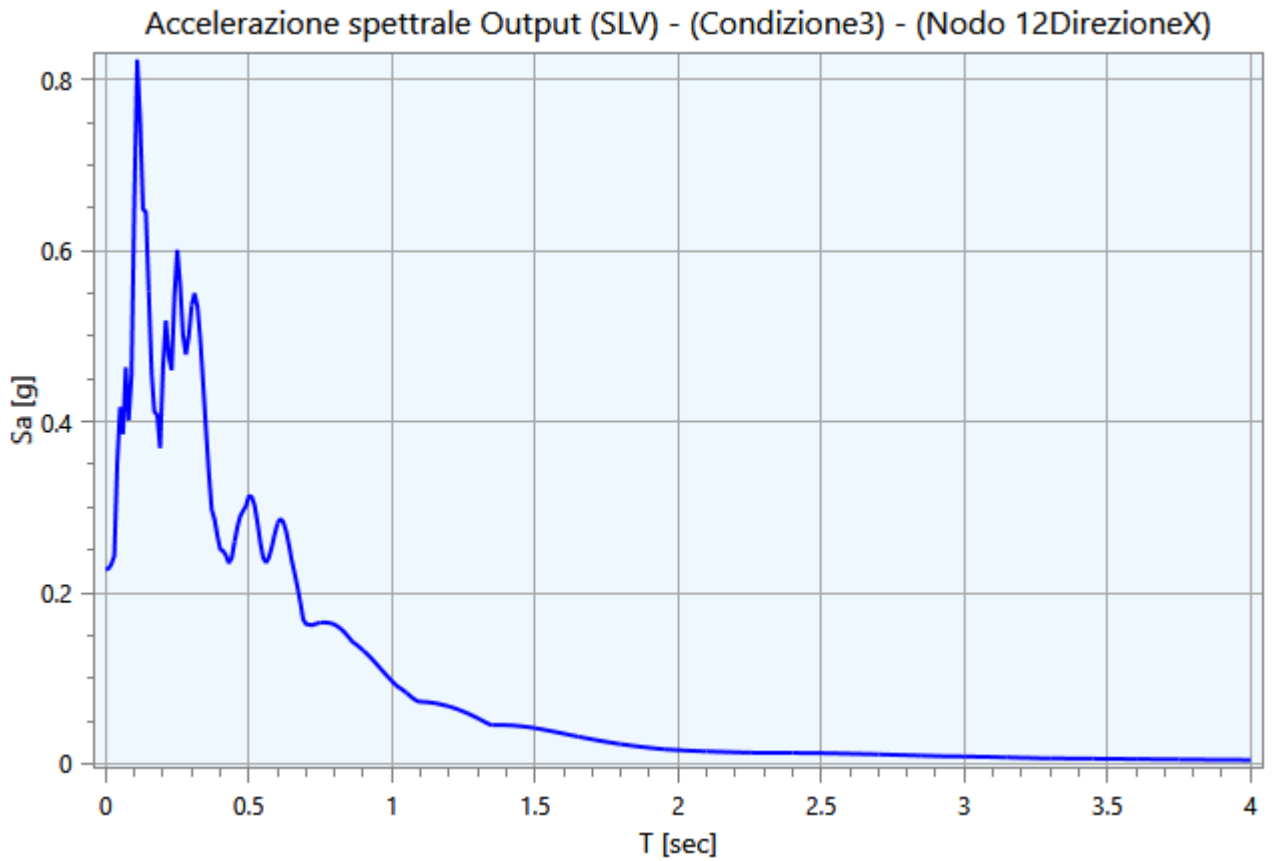


Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 12DirezioneX)

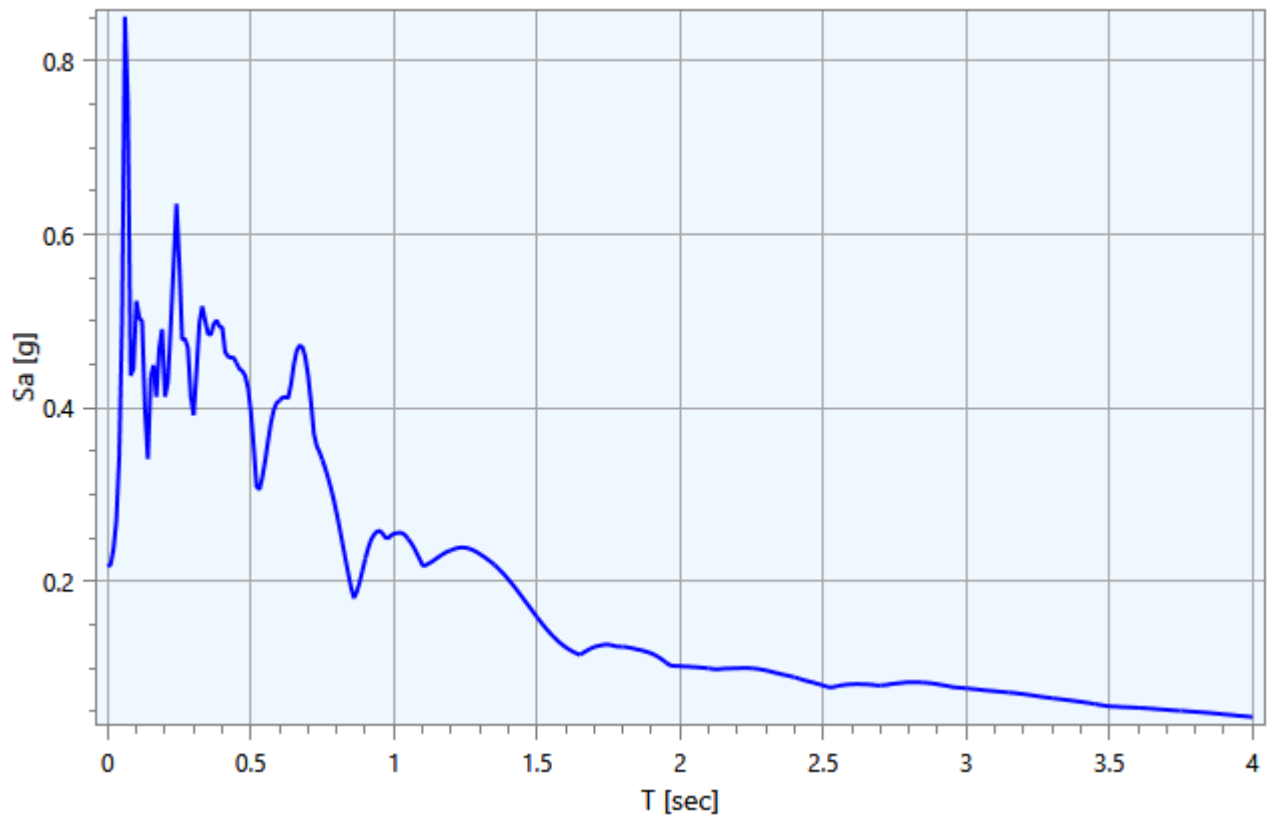


Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 16DirezioneX)

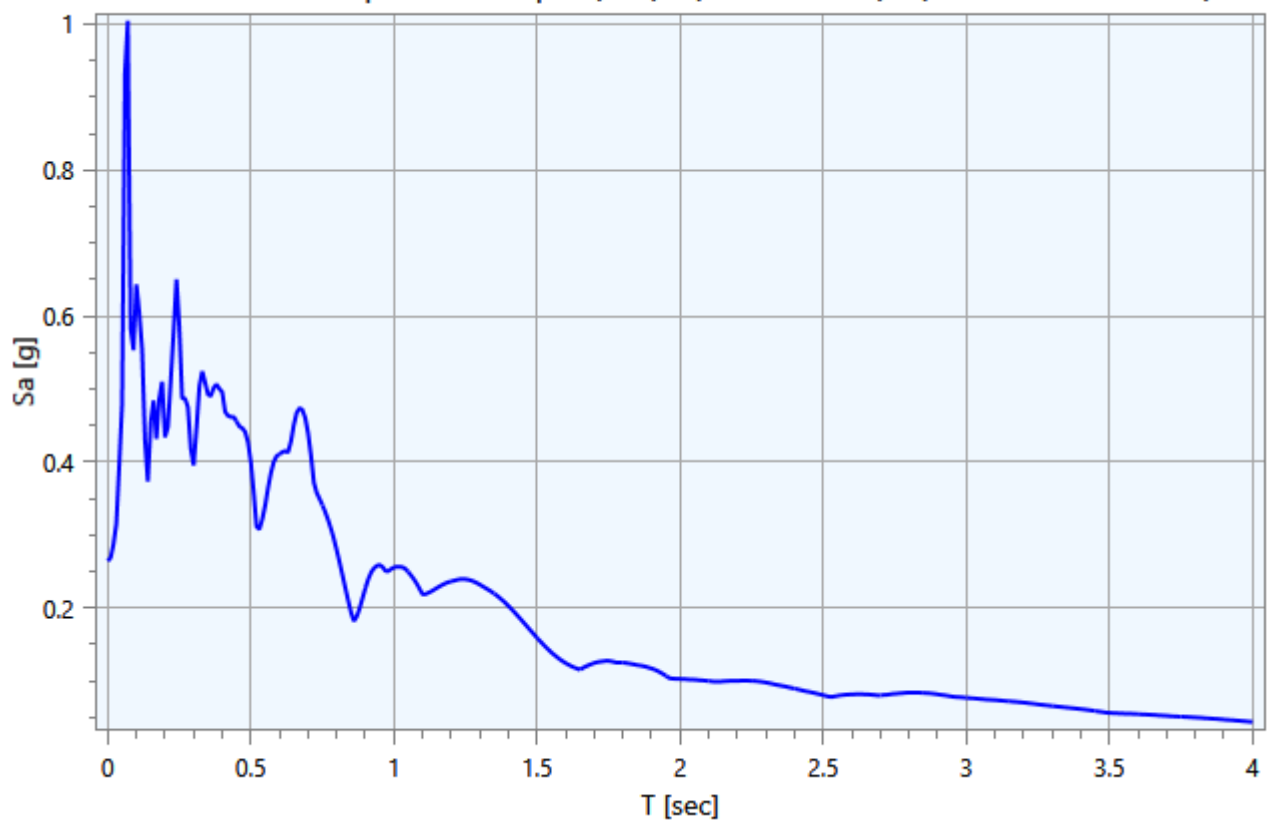




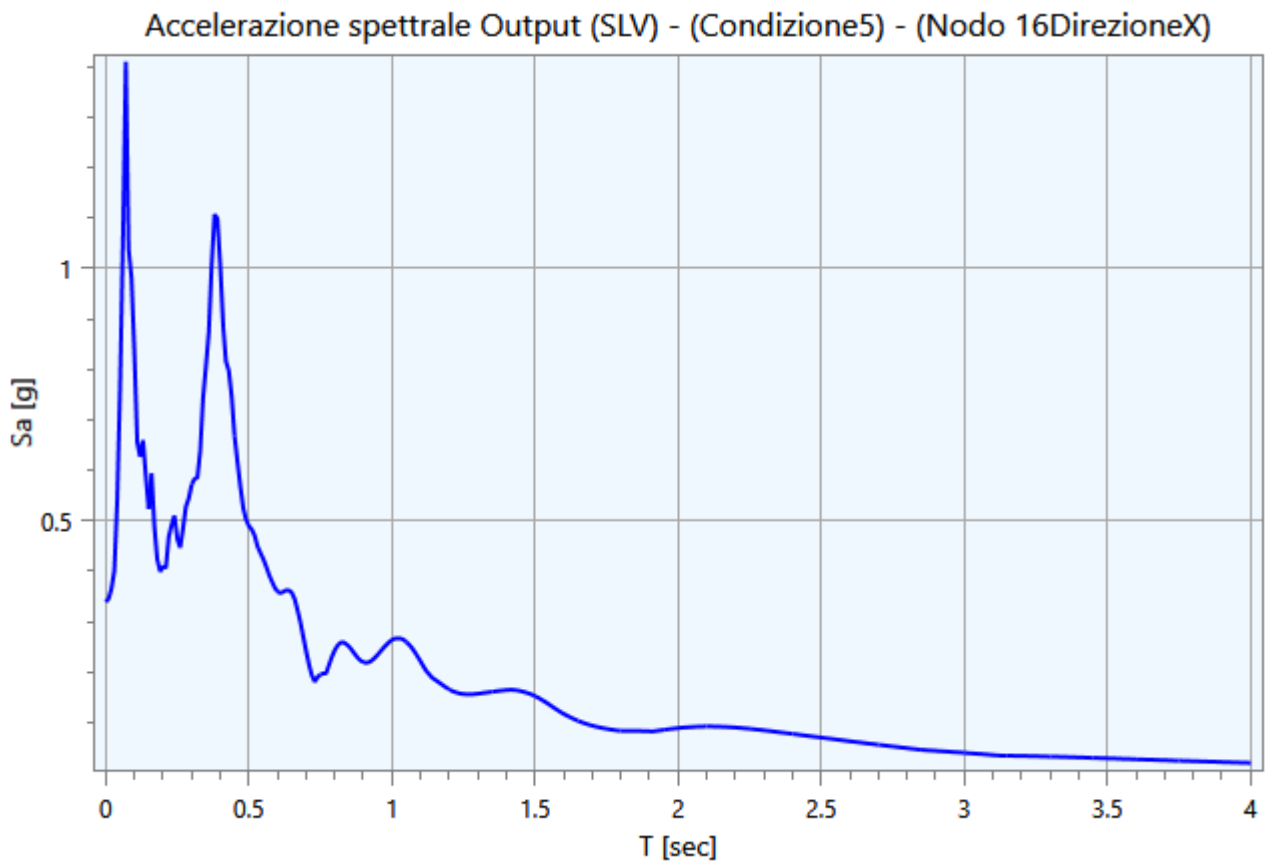
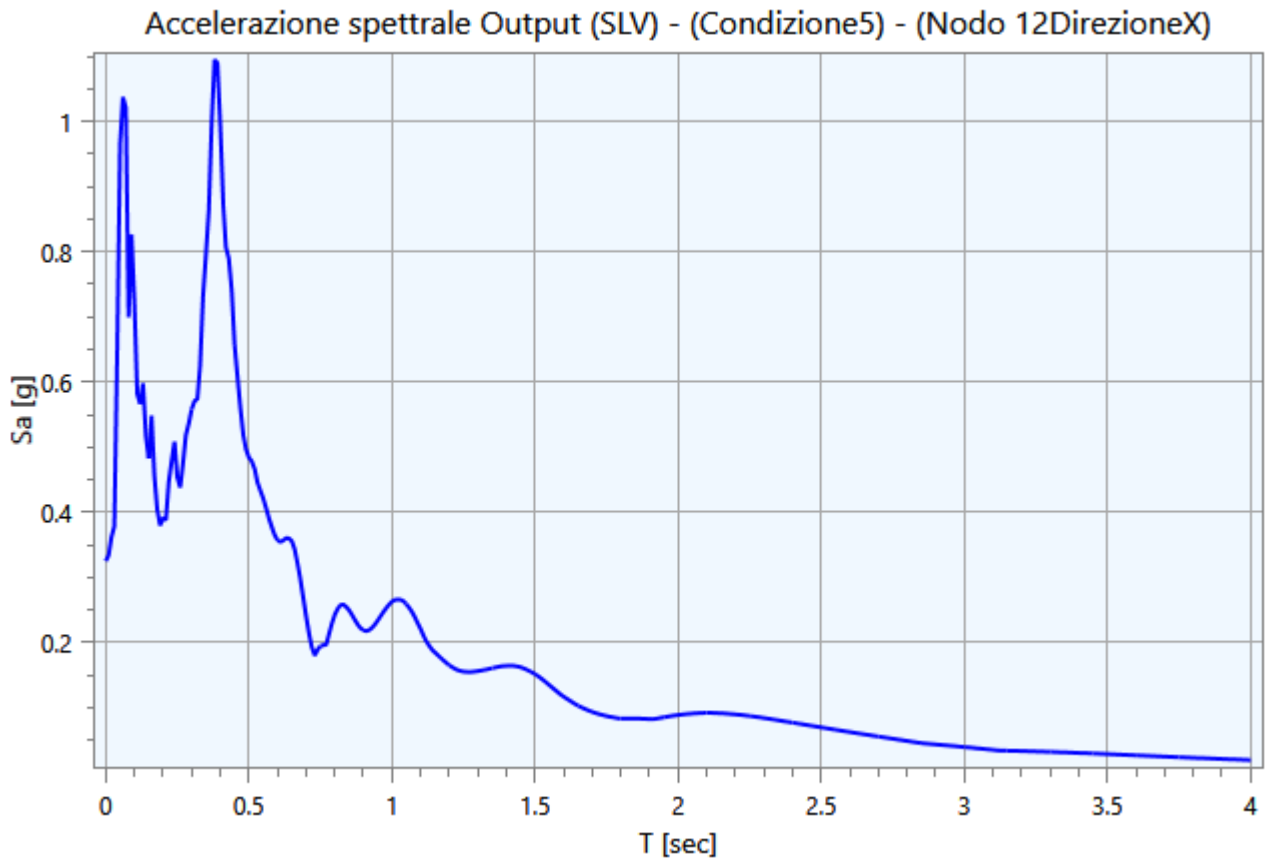
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 12DirezioneX)



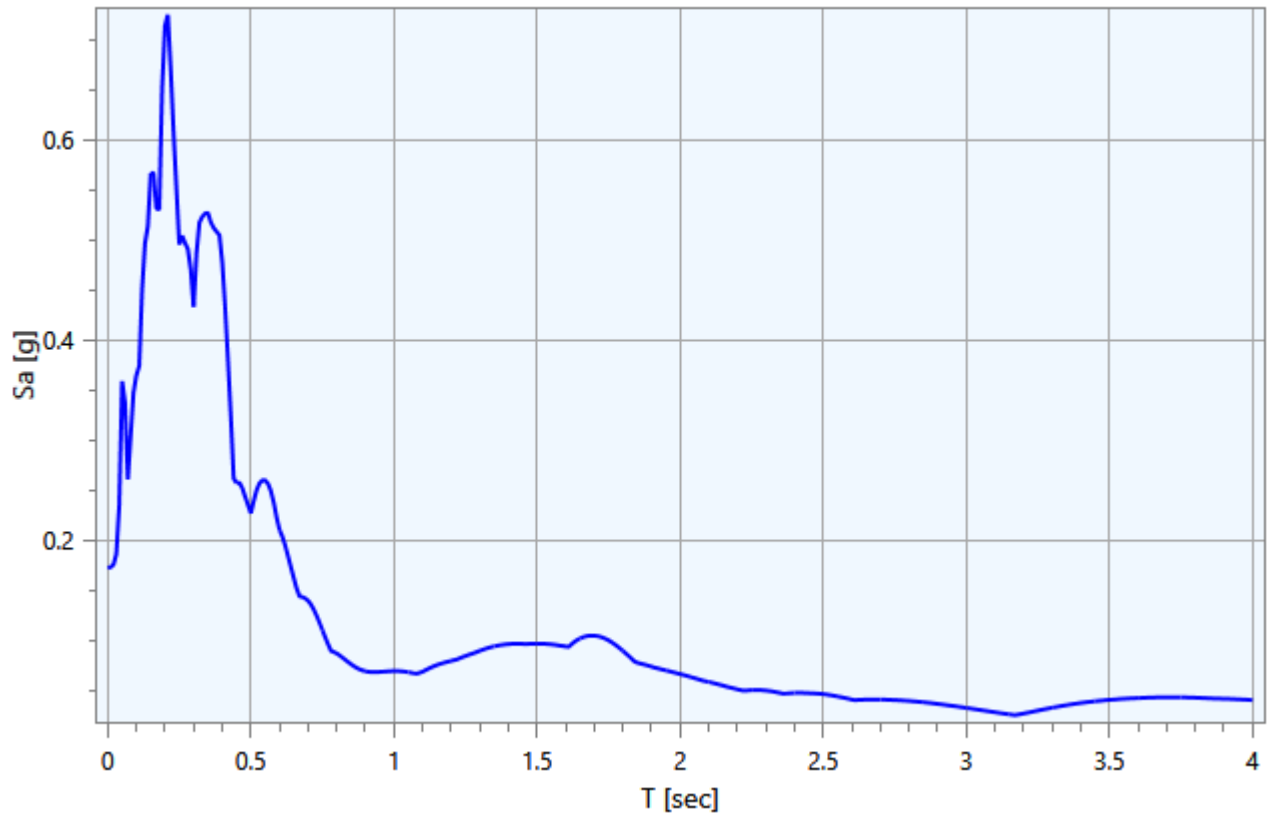
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 16DirezioneX)



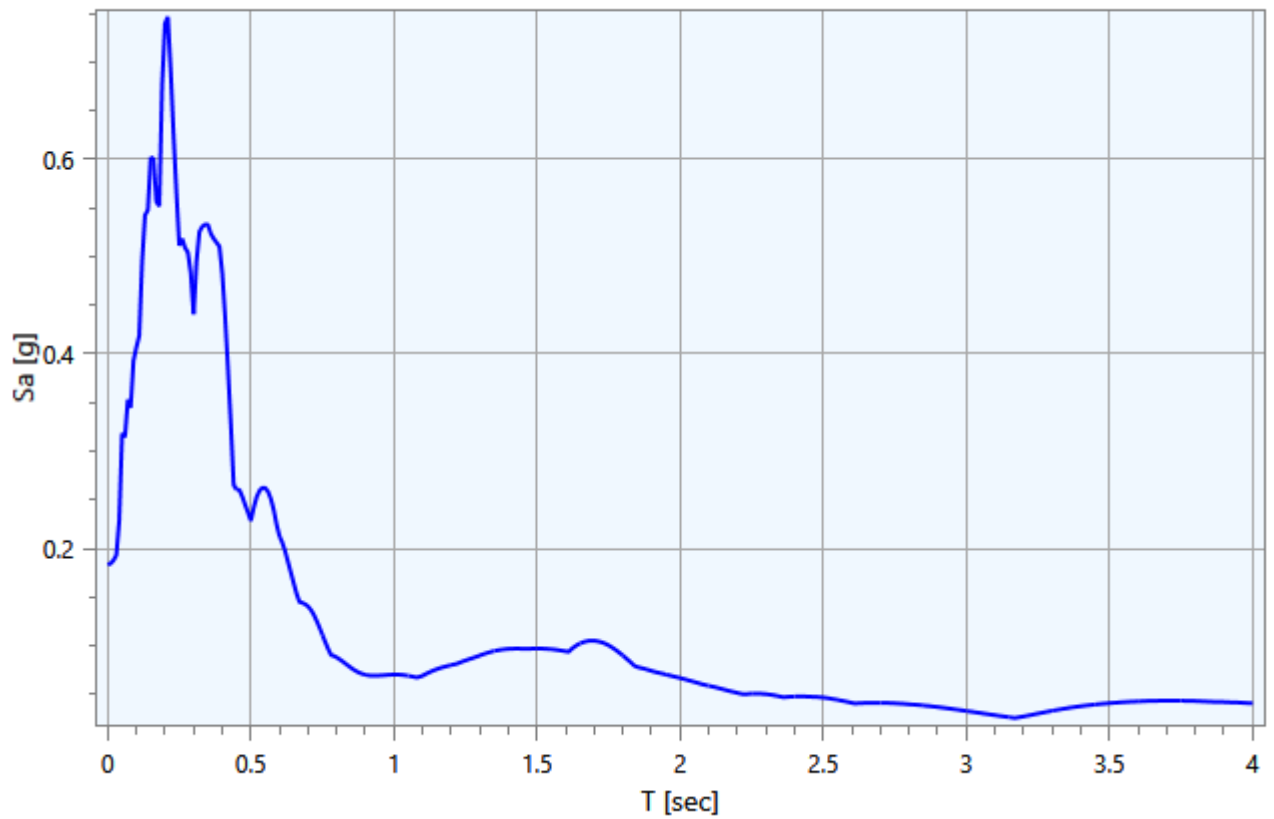


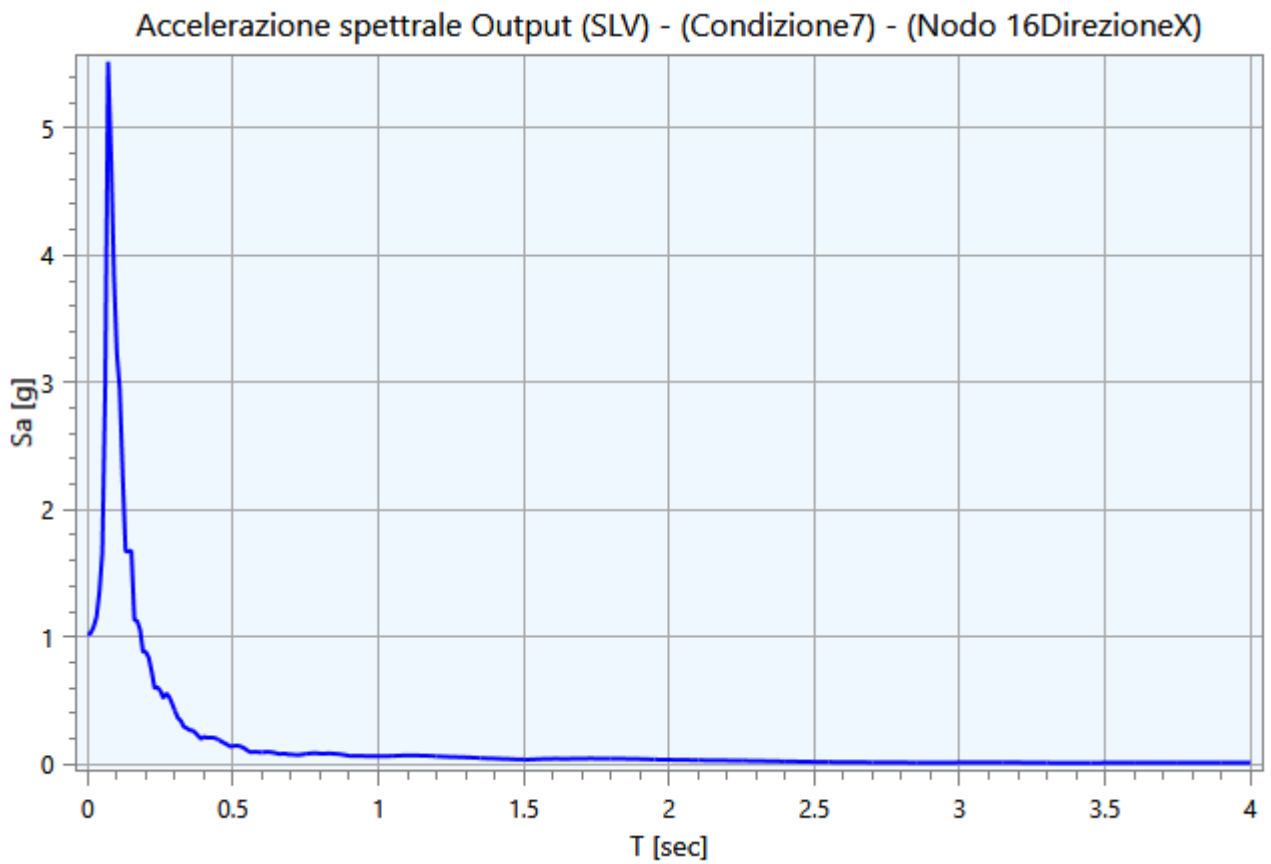
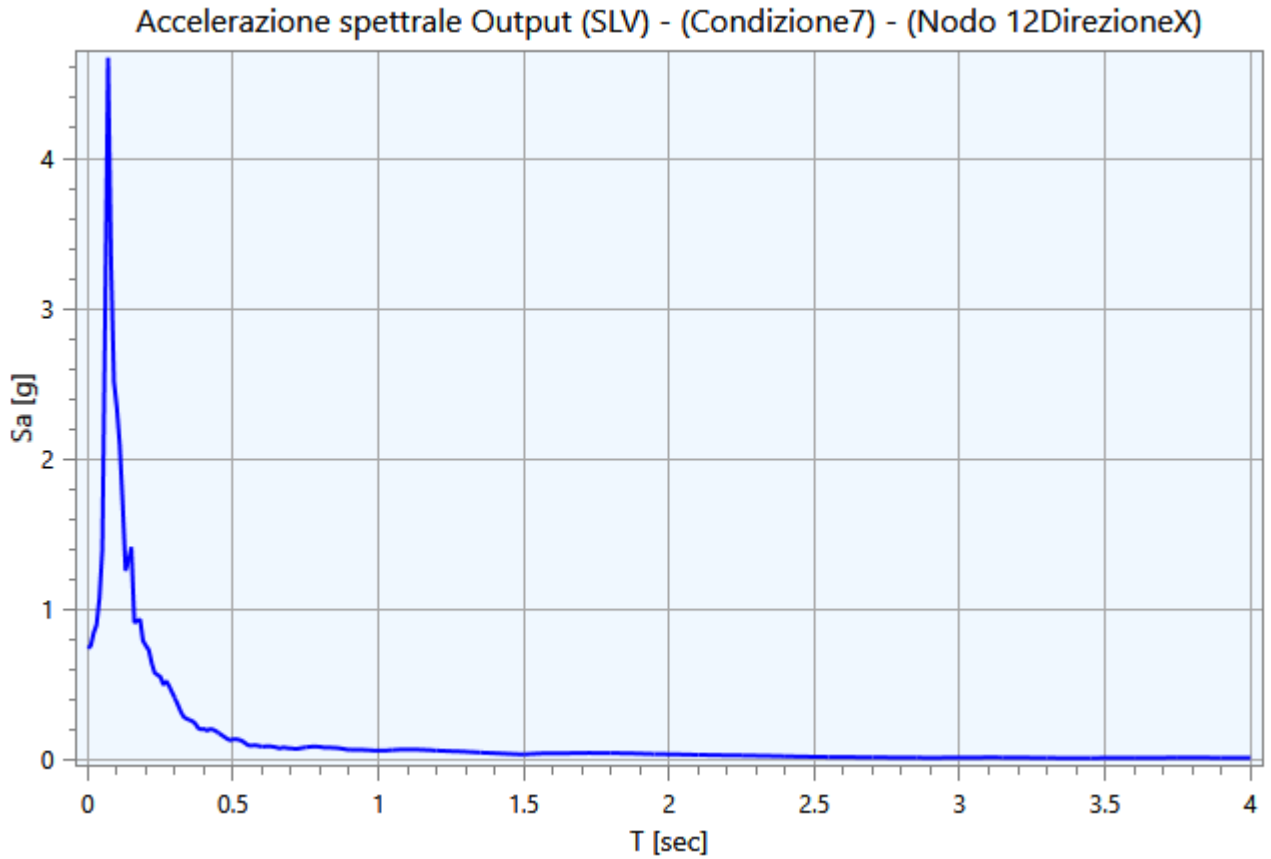


Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 12DirezioneX)



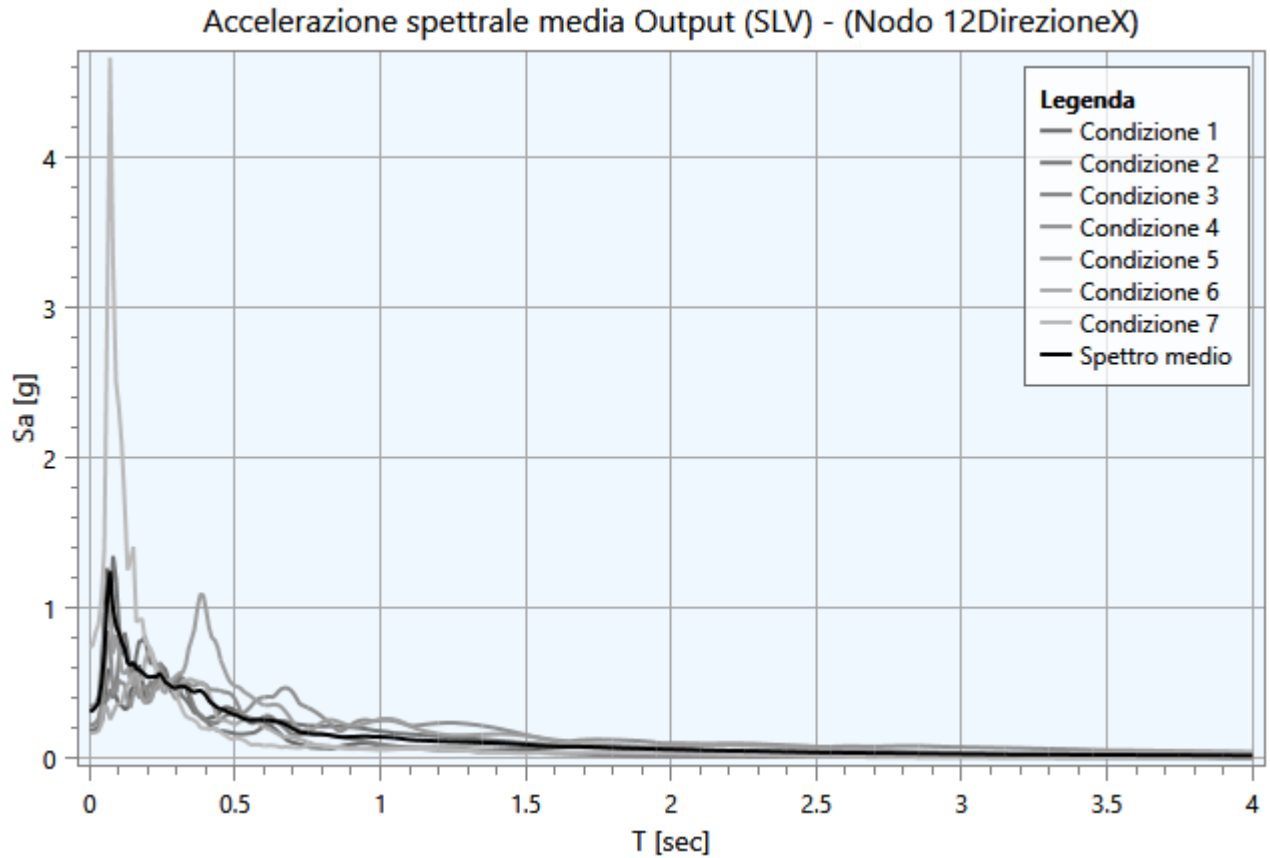
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 16DirezioneX)

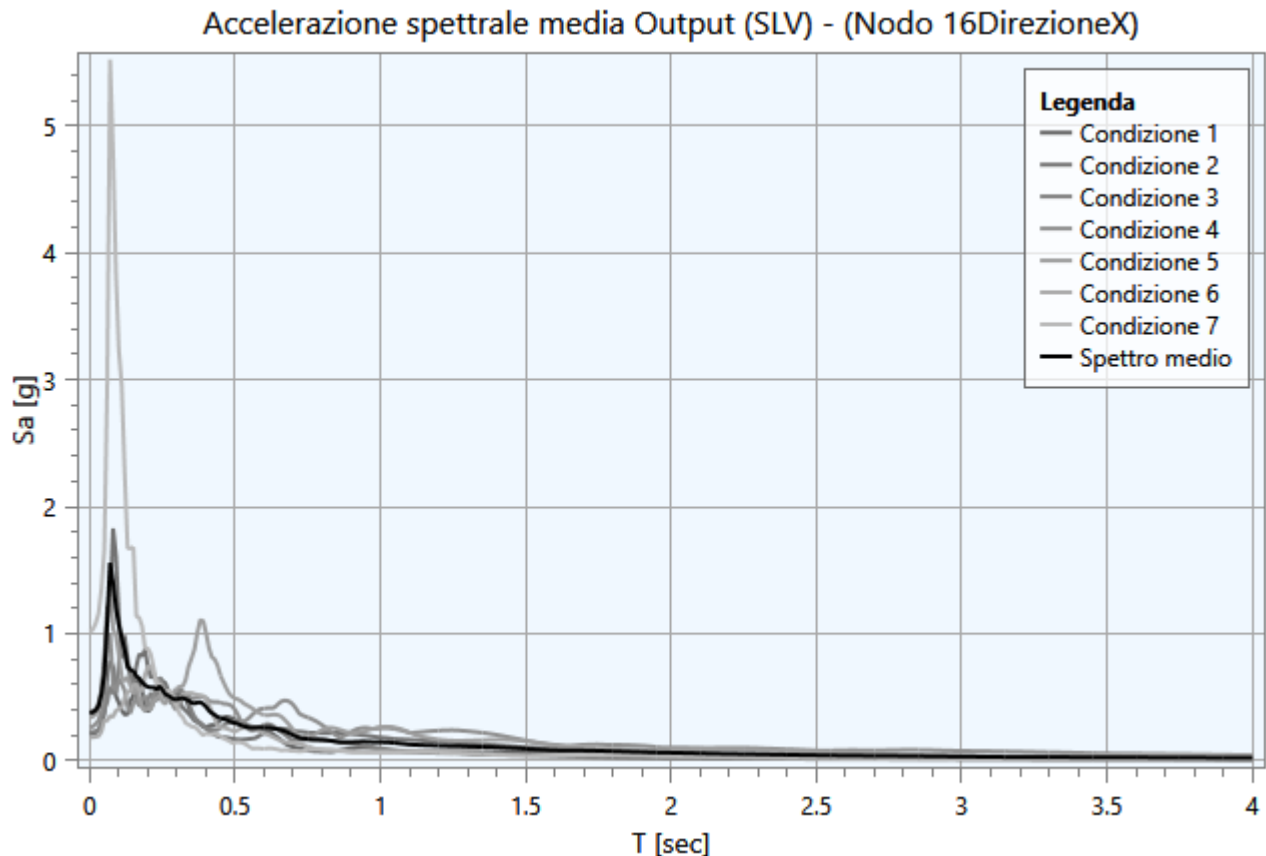




### 5.3 - Interpretazione dei risultati

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.

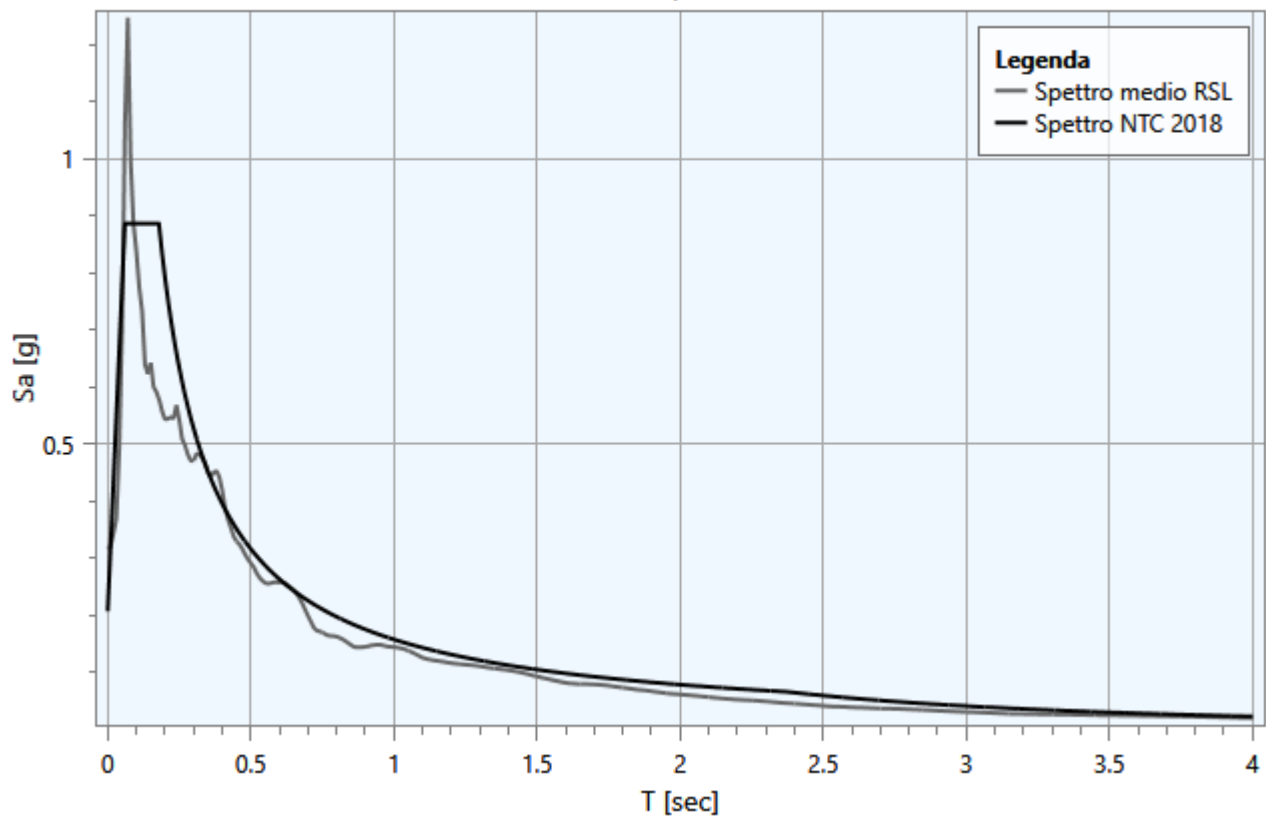
## SLV

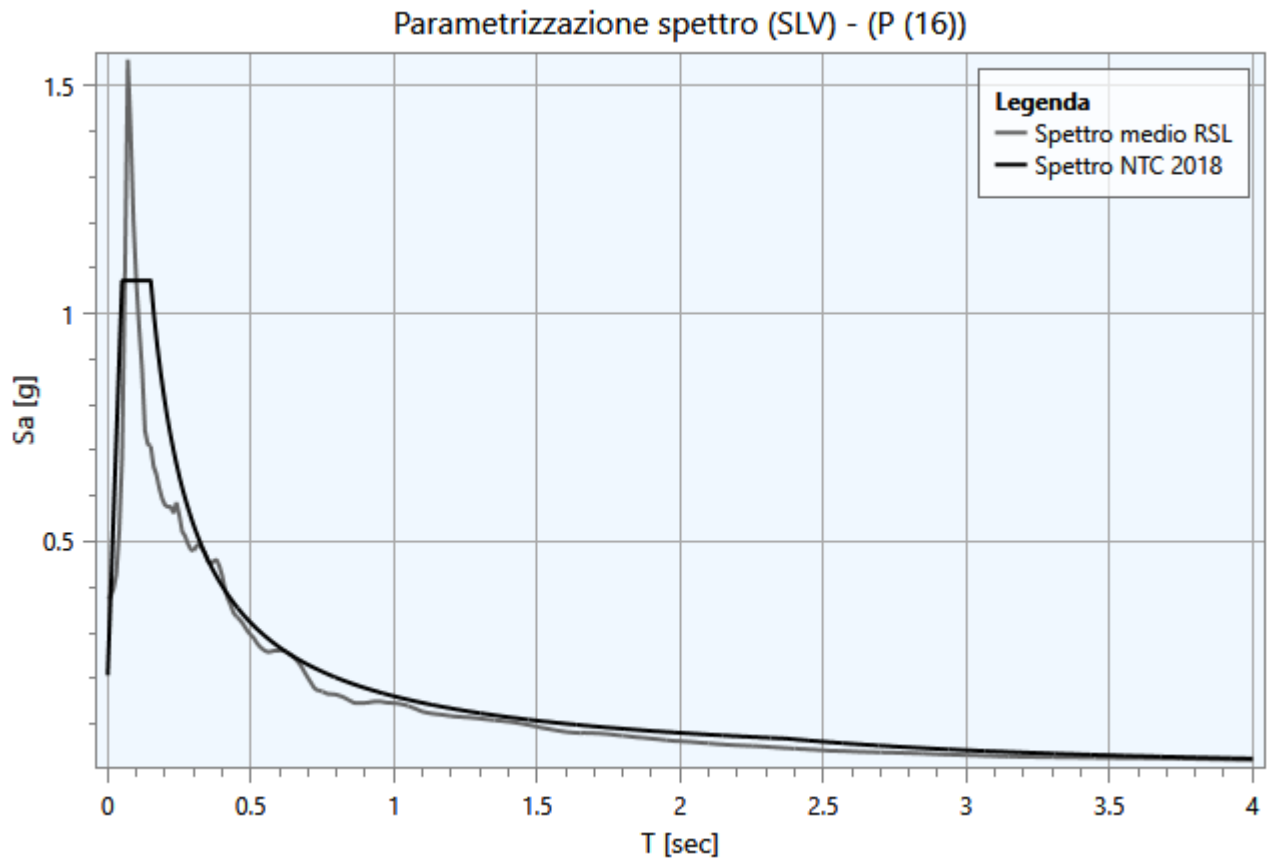
Punto di controllo	$A_g$ [g]	$F0$	$S$	$A_{max}$ [g]	$T_b$ [sec]	$T_c$ [sec]	$T_d$ [sec]
P (12)	0.193	4.265	1.077	0.208	0.060	0.179	2.372
P (16)	0.193	5.182	1.073	0.207	0.050	0.150	2.372

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 (12))





---

**Analisi di stabilità dei pendii con: JANBU (1967) – Frana Sezione BB' - Condizioni statiche**

---

Lat./Long.	43.861615/11.56557
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
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	Picco
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma generica	

---

**Coefficienti sismici [N.T.C.]**

---

**Dati generali**

Tipo opera:	2 - Opere ordinarie
Classe d'uso:	Classe II
Vita nominale:	50.0 [anni]
Vita di riferimento:	50.0 [anni]

**Parametri sismici su sito di riferimento**

Categoria sottosuolo:	B
Categoria topografica:	T2

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30.0	0.6	2.47	0.26
S.L.D.	50.0	0.65	2.45	0.26
S.L.V.	475.0	1.67	2.4	0.29
S.L.C.	975.0	2.16	2.39	0.29

**Coefficienti sismici orizzontali e verticali**

Opera: Opere di sostegno

S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.864	0.18	0.0159	0.0079
S.L.D.	0.936	0.18	0.0172	0.0086
S.L.V.	2.4048	0.24	0.0589	0.0294
S.L.C.	3.083	0.31	0.0975	0.0487



---

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0.0	1322.02
2	4.73	1324.08
3	9.14	1325.29
4	12.57	1328.28
5	23.73	1339.46
6	37.71	1349.46
7	49.85	1359.46
8	61.63	1369.46
9	72.63	1379.46
10	105.58	1394.46
11	110.66	1399.46
12	128.15	1409.46
13	159.16	1419.46
14	182.1	1429.46
15	220.8	1449.46
16	256.36	1455.81
17	276.8	1459.46
18	312.23	1469.46
19	329.83	1479.46

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

N	X (m)	y (m)
1	0.0	1322.02
2	4.73	1324.08
3	9.14	1325.29
4	12.57	1328.28
5	23.73	1339.46
6	37.71	1349.46
7	49.85	1359.46
8	61.63	1369.46
9	72.63	1379.46
10	76.93	1379.33
11	87.31	1382.34
12	112.57	1394.87
13	170.16	1420.25
14	229.11	1443.7
15	252.27	1452.3
16	256.36	1455.81
17	276.8	1459.46
18	312.23	1469.46
19	329.83	1479.46

**Vertici superficie Nr...1**

N	X m	y m
1	204.63	1441.21
2	210.23	1441.7
3	217.28	1443.58
4	223.71	1446.56
5	231.54	1451.41

### 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

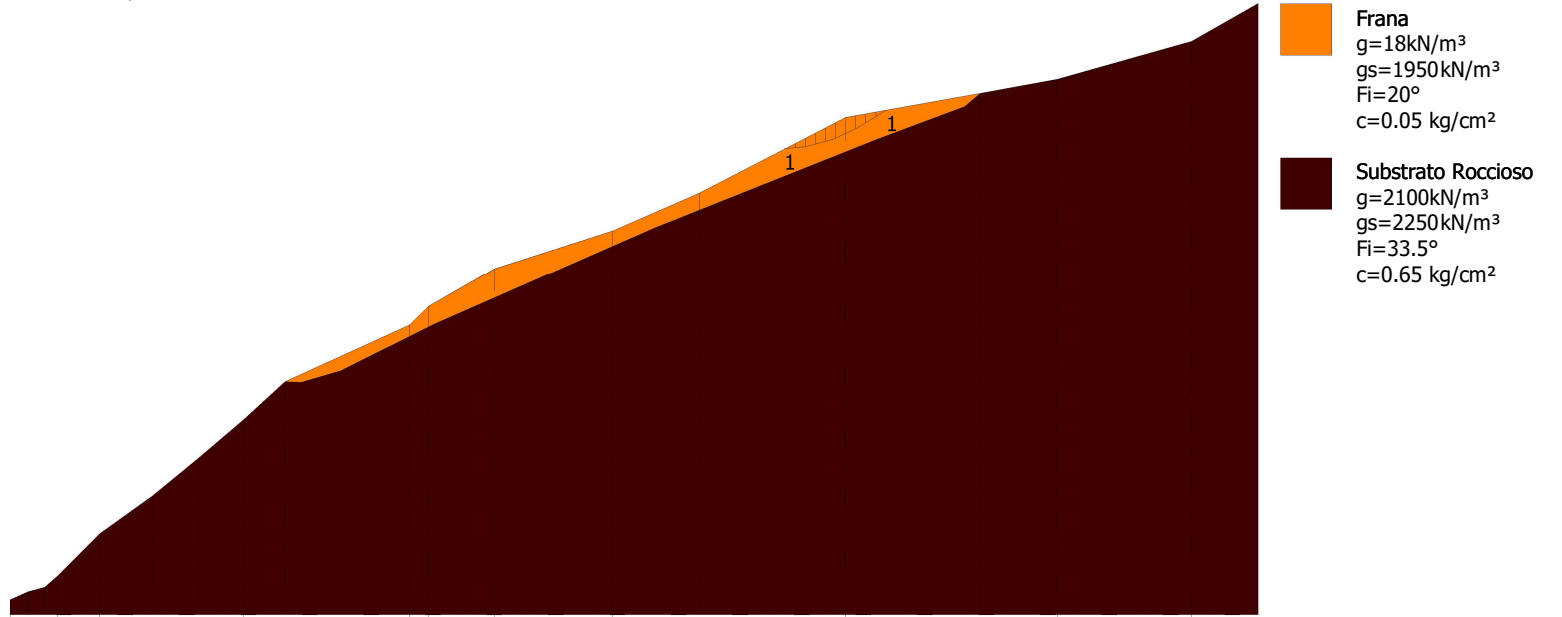
Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (kN/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (kN/m <sup>3</sup> )	Litologia
1	0.05		20	18	1950	Frana
2	0.65		33.5	2100	2250	Substrato Roccioso

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.

Superficie Nr...1 Fattore di sicurezza=0.92

Nr.	B (m)	Alfa (°)	Li (m)	Wi (Kg)	Kh•Wi (Kg)	Kv•Wi (Kg)	c (kg/cm <sup>2</sup> )	Fi (°)	Ui (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)
1	2.66	5.0	2.67	2788.68	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0	2641.8	1819.7
2	2.66	5.1	2.67	8347.57	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0	8078.3	3389.2
3	2.66	14.7	2.75	12764.06	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0	12005.3	4689.9
4	2.66	15.1	2.75	16017.32	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0	15124.9	5627.3
5	2.66	18.3	2.81	8825.66	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0	17773.1	6546.8
6	2.66	24.8	2.93	20383.19	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0	19349.7	7399.5
7	2.66	25.0	2.93	18819.1	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0	17834.4	6933.8
8	2.66	31.1	3.11	4203.67	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0	13505.4	5962.2
9	2.66	31.7	3.13	8599.51	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0	7937.3	4134.3
10	2.66	31.9	3.13	2871.47	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0	2216.9	2205.1

Fs=0.92 Sup...1



- Frana**  
 g=18kN/m<sup>3</sup>  
 gs=1950kN/m<sup>3</sup>  
 Fi=20°  
 c=0.05 kg/cm<sup>2</sup>
- Substrato Roccioso**  
 g=2100kN/m<sup>3</sup>  
 gs=2250kN/m<sup>3</sup>  
 Fi=33.5°  
 c=0.65 kg/cm<sup>2</sup>

Quote	0.00	1322.02	1324.08	1325.28	1339.46	1349.46	1359.46	1369.46	1379.46	1394.46	1399.46	1409.46	1419.46	1429.46	1449.46	1455.81	1459.46	1469.46	1479.46
Distanze Parziali	0.00	4.73	3.43	11.16	13.97	12.14	11.79	11.00	32.95	5.08	17.49	31.01	22.94	38.70	35.56	20.44	35.43	17.60	
Distanze Progressive	0.00	4.73	12.57	23.73	37.71	49.85	61.63	72.63	105.58	110.66	128.15	159.16	182.10	220.80	256.36	276.80	312.23	329.83	

---

**Analisi di stabilità dei pendii con: JANBU (1967) – Frana Sezione BB'- Condizioni sismiche**

---

Lat./Long.	43.861615/11.56557
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	1.2
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	Picco
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma generica	

---

**Coefficienti sismici [N.T.C.]**

---

**Dati generali**

Tipo opera:	2 - Opere ordinarie
Classe d'uso:	Classe II
Vita nominale:	50.0 [anni]
Vita di riferimento:	50.0 [anni]

**Parametri sismici su sito di riferimento**

Categoria sottosuolo:	B
Categoria topografica:	T2

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30.0	0.6	2.47	0.26
S.L.D.	50.0	0.65	2.45	0.26
S.L.V.	475.0	1.67	2.4	0.29
S.L.C.	975.0	2.16	2.39	0.29

**Coefficienti sismici orizzontali e verticali**

Opera: Opere di sostegno

S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.864	0.18	0.0159	0.0079
S.L.D.	0.936	0.18	0.0172	0.0086
S.L.V.	2.4048	0.24	0.0589	0.0294
S.L.C.	3.083	0.31	0.0975	0.0487

Coefficiente azione sismica orizzontale	0.0589
Coefficiente azione sismica verticale	0.0294

---

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	0.0	1322.02
2	4.73	1324.08
3	9.14	1325.29
4	12.57	1328.28
5	23.73	1339.46
6	37.71	1349.46
7	49.85	1359.46
8	61.63	1369.46
9	72.63	1379.46
10	105.58	1394.46
11	110.66	1399.46
12	128.15	1409.46
13	159.16	1419.46
14	182.1	1429.46
15	220.8	1449.46
16	256.36	1455.81
17	276.8	1459.46
18	312.23	1469.46
19	329.83	1479.46

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

N	X (m)	y (m)
1	0.0	1322.02
2	4.73	1324.08
3	9.14	1325.29
4	12.57	1328.28
5	23.73	1339.46
6	37.71	1349.46
7	49.85	1359.46
8	61.63	1369.46
9	72.63	1379.46
10	76.93	1379.33
11	87.31	1382.34
12	112.57	1394.87
13	170.16	1420.25
14	229.11	1443.7
15	252.27	1452.3
16	256.36	1455.81
17	276.8	1459.46
18	312.23	1469.46
19	329.83	1479.46

**Vertici superficie Nr...1**

N	X m	y m
1	204.63	1441.21
2	210.23	1441.7
3	217.28	1443.58
4	223.71	1446.56
5	231.54	1451.41

### 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	No

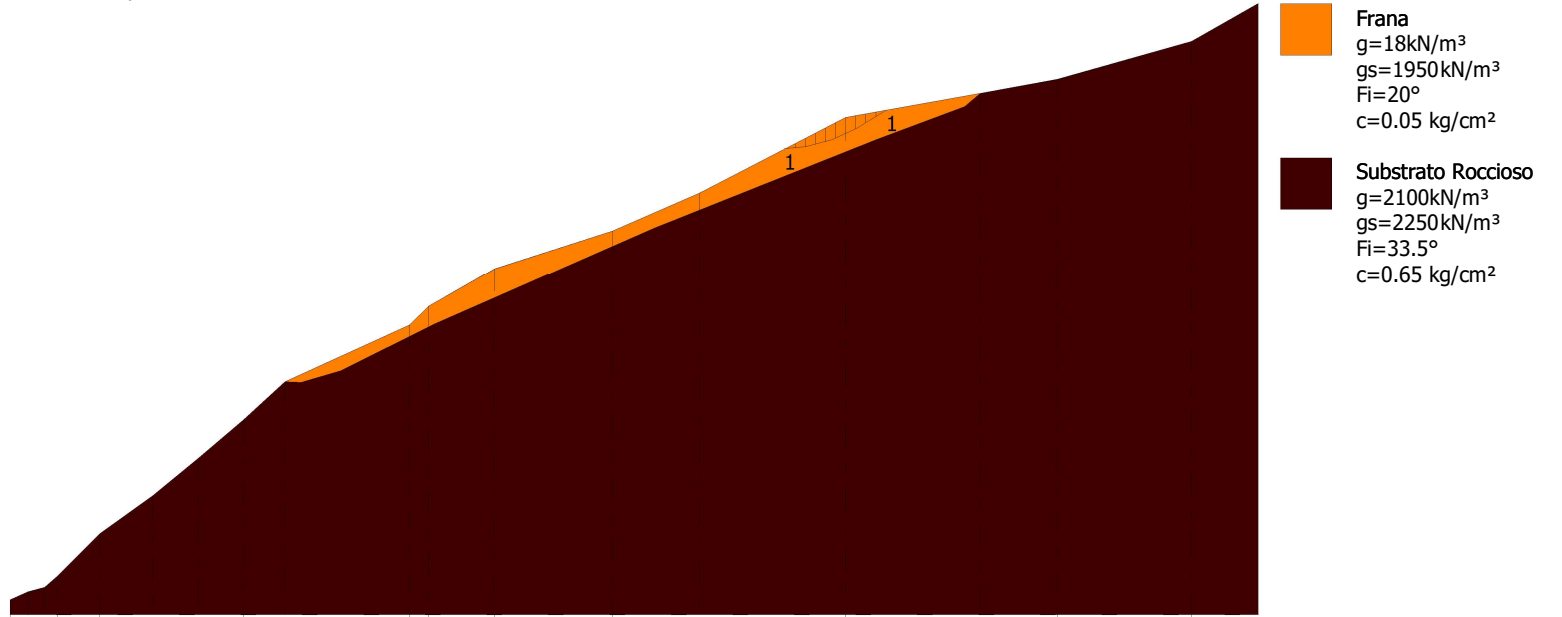
### Stratigrafia

Strato	Coesione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (kN/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (kN/m <sup>3</sup> )	Litologia
1	0.05		20	18	1950	Frana
2	0.65		33.5	2100	2250	Substrato Roccioso

Superficie Nr...1 Fattore di sicurezza=0.88

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)	Kh•Wi (Kg)	Kv•Wi (Kg)	c (kg/cm <sup>2</sup> )	Fi (°)	Ui (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)
1	2.66	5.0	2.67	2788.68	164.25	81.99	0.05	20.0	0.0	2610.6	2180.2
2	2.66	5.1	2.67	8347.57	491.67	245.42	0.05	20.0	0.0	8018.4	4060.0
3	2.66	14.7	2.75	12764.06	751.8	375.26	0.05	20.0	0.0	11782.2	5567.2
4	2.66	15.1	2.75	16017.32	943.42	470.91	0.05	20.0	0.0	14852.0	6677.8
5	2.66	18.3	2.81	825.66	1108.83	553.47	0.05	20.0	0.0	17395.9	7745.2
6	2.66	24.8	2.93	20383.19	1200.57	599.27	0.05	20.0	0.0	18803.8	8701.5
7	2.66	25.0	2.93	18819.1	1108.45	553.28	0.05	20.0	0.0	17319.5	8152.1
8	2.66	31.1	3.11	4203.67	836.6	417.59	0.05	20.0	0.0	12985.9	6969.1
9	2.66	31.7	3.13	8599.51	506.51	252.83	0.05	20.0	0.0	7571.7	4829.2
10	2.66	31.9	3.13	2871.47	169.13	84.42	0.05	20.0	0.0	2021.4	2575.4

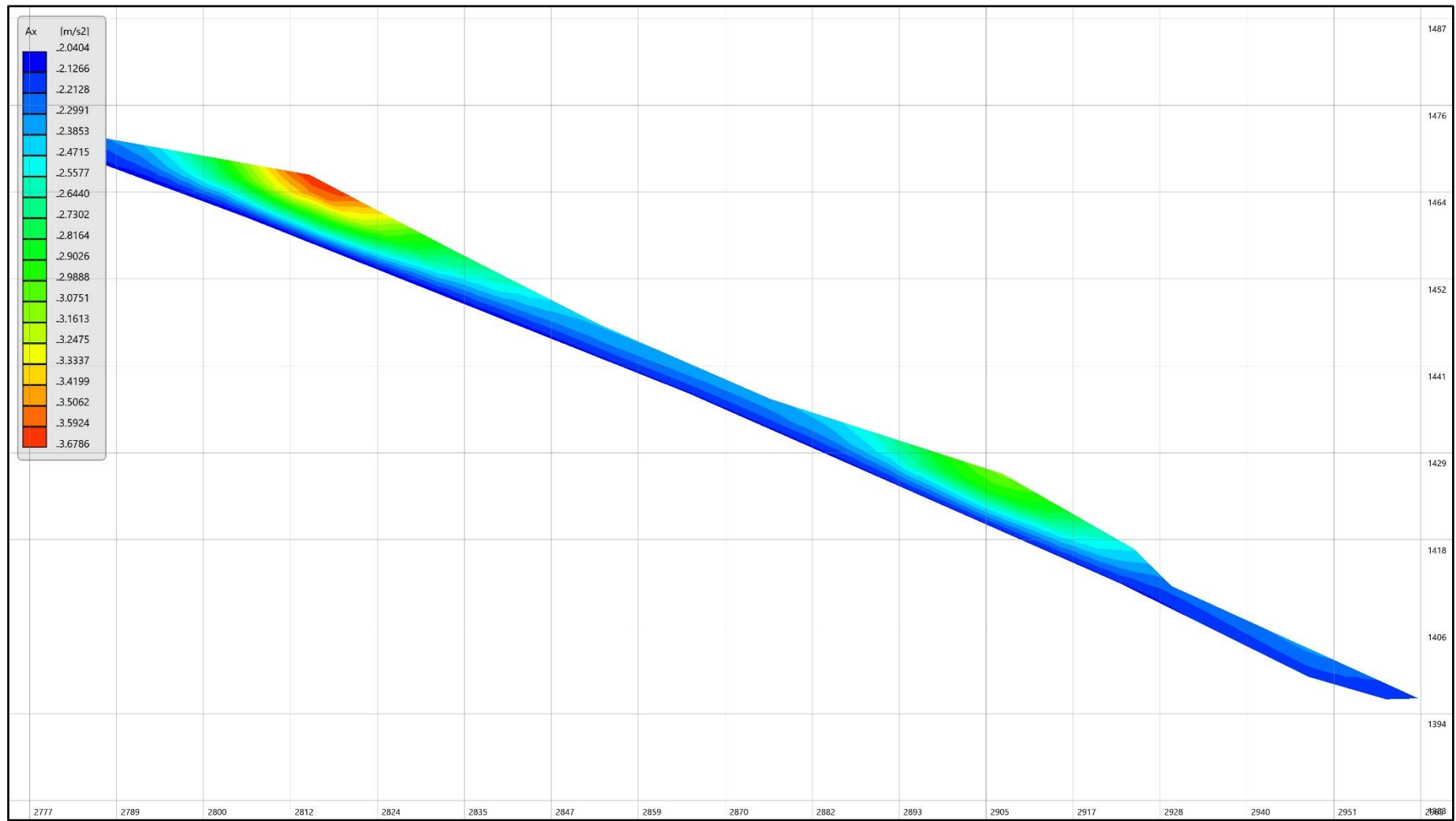
Fs=0.88 Sup...1



- Frana**  
 g=18kN/m<sup>3</sup>  
 gs=1950kN/m<sup>3</sup>  
 Fi=20°  
 c=0.05 kg/cm<sup>2</sup>
  
- Substrato Roccioso**  
 g=2100kN/m<sup>3</sup>  
 gs=2250kN/m<sup>3</sup>  
 Fi=33.5°  
 c=0.65 kg/cm<sup>2</sup>

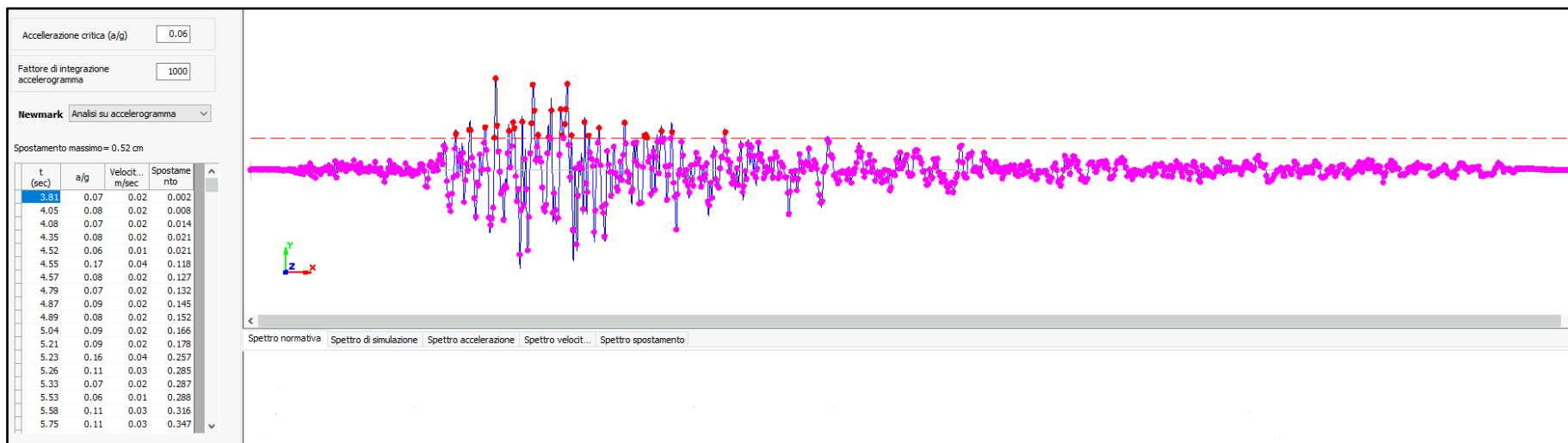
Quote	0.00	1322.02	1324.08	1325.28	1339.46	1349.46	1359.46	1369.46	1379.46	1394.46	1399.46	1409.46	1419.46	1429.46	1449.46	1455.81	1459.46	1469.46	1479.46
Distanze Parziali	0.00	4.73	3.43	11.16	13.97	12.14	11.79	11.00		32.95	5.08	17.49	31.01	22.94	38.70	35.56	20.44	35.43	17.60
Distanze Progressive	0.00	4.73	9.17	23.73	37.71	49.85	61.63	72.63		105.58	110.66	128.15	159.16	182.10	220.80	256.36	276.80	312.23	329.83

**Accelerazione massima calcolata da analisi bidimensionale (RSL2D) – Sezione BB'**

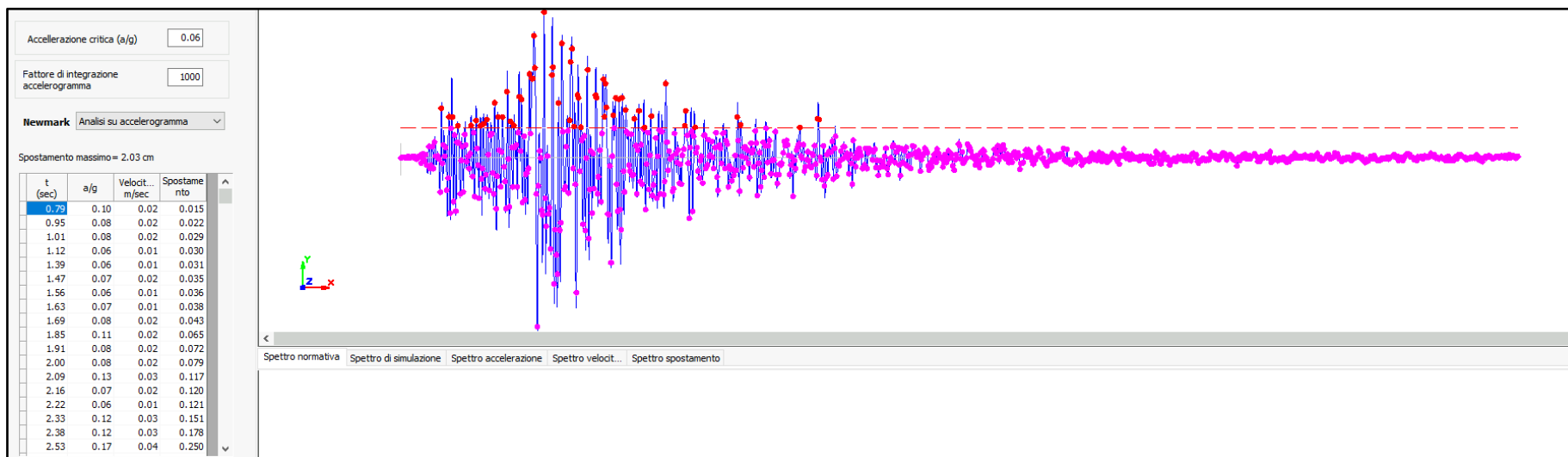




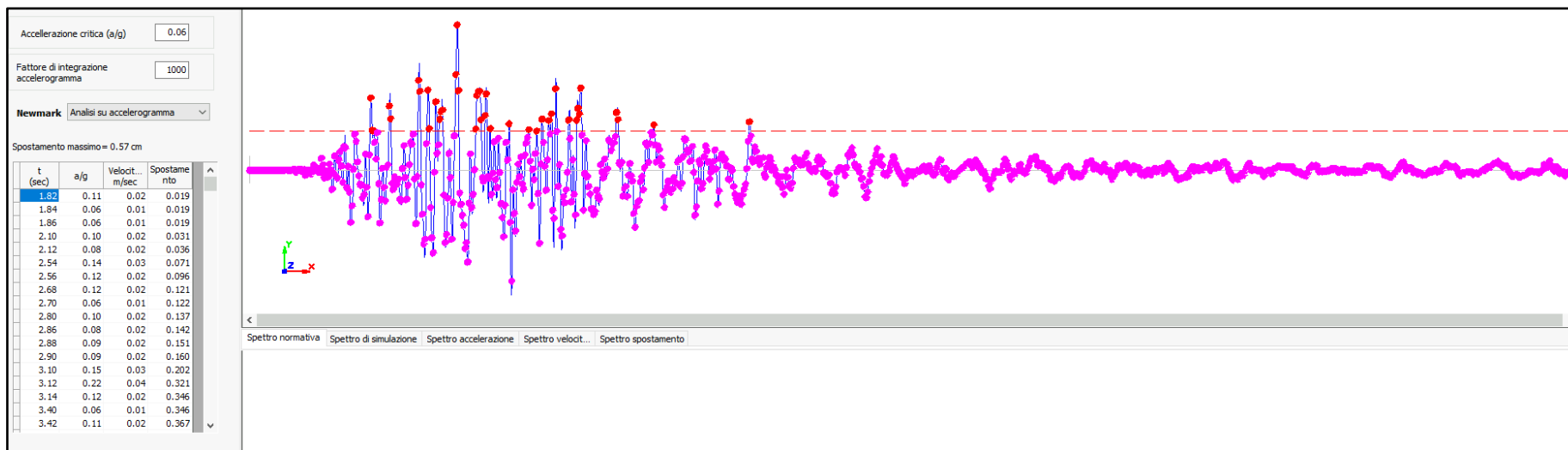
## Analisi su accelerogramma 1 e spostamento risultante



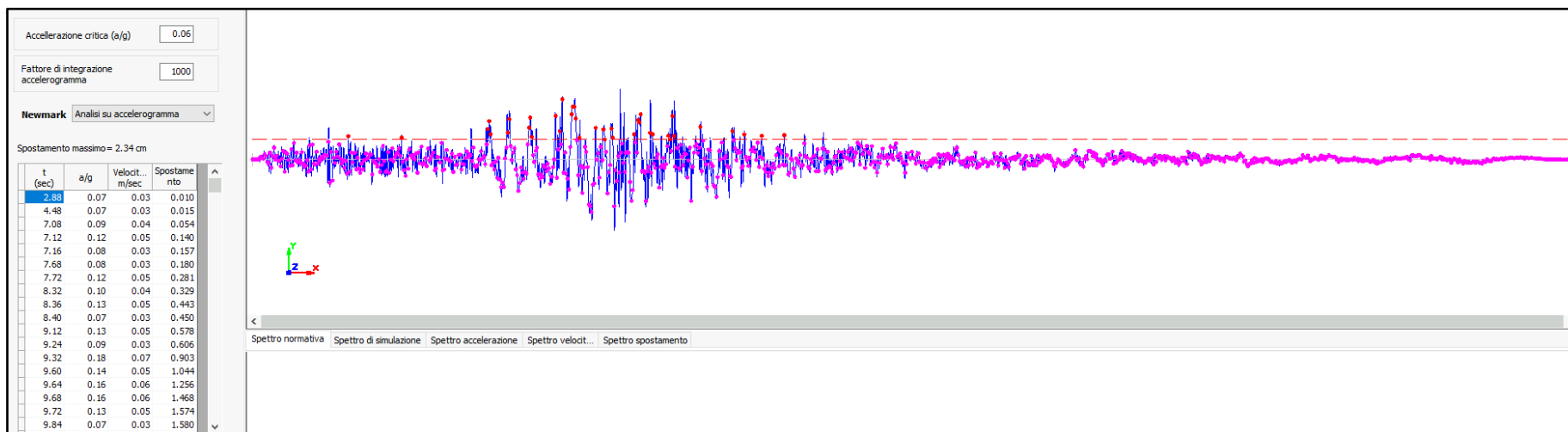
## Analisi su accelerogramma 2 e spostamento risultante



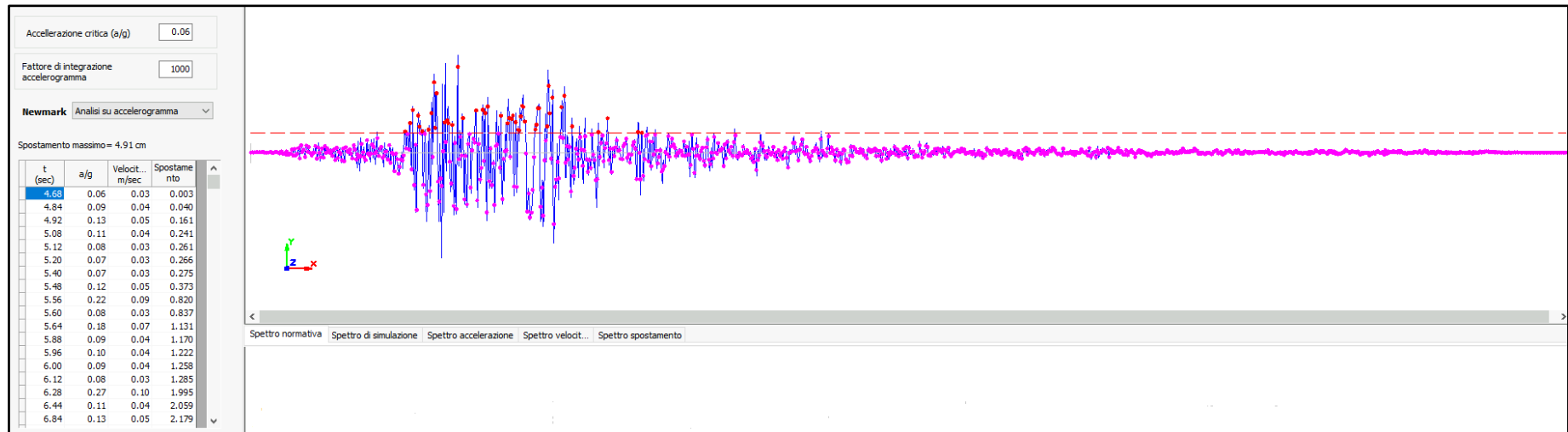
### Analisi su accelerogramma 3 e spostamento risultante



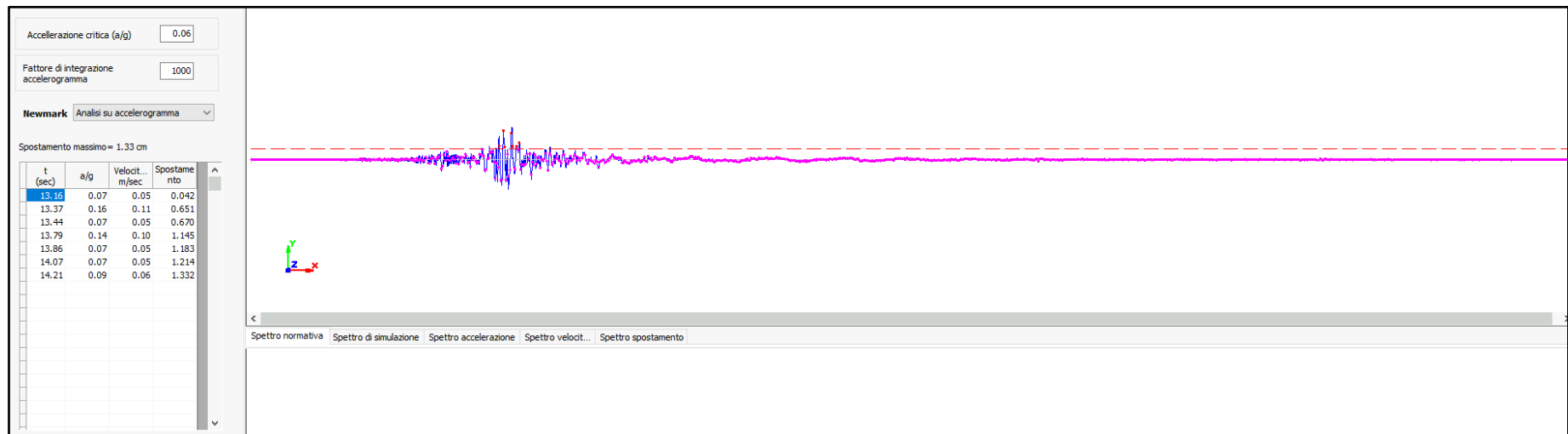
### Analisi su accelerogramma 4 e spostamento risultante



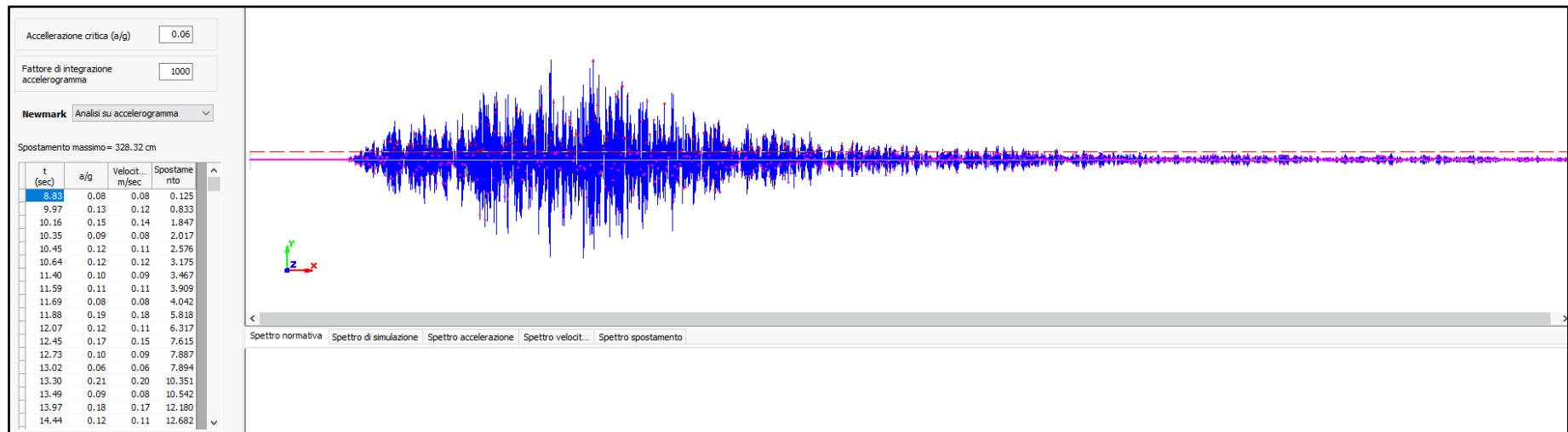
## Analisi su accelerogramma 5 e spostamento risultante



## Analisi su accelerogramma 6 e spostamento risultante



## Analisi su accelerogramma 7 e spostamento risultante



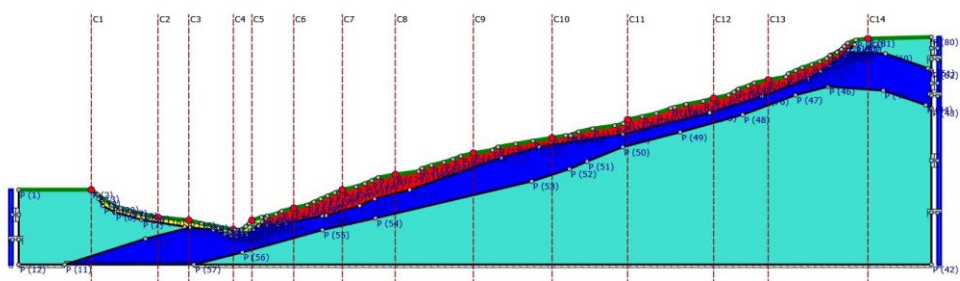
## **ALLEGATO B – Report RSL2D sezione EE' e analisi dinamica frana versante dx**

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

Ubicazione sito: Centro abitato di Londa - Sezione EE

RELAZIONE DI CALCOLO

# ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE



Archivio: LO382B~1.LSR.lsr - Data : 02/02/2021

Oggetto: MS3 Comune di Londa

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.....	19
4.3 - Accelerogrammi e Spettri di Input .....	20
4.4 - Modello di Calcolo FEM.....	24
5 - Output .....	25
5.1 - Accelerogrammi Output.....	25
5.2 - Spettri Output .....	74
5.3 - Interpretazione dei risultati .....	124
5.4 - Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL .....	131



## 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.

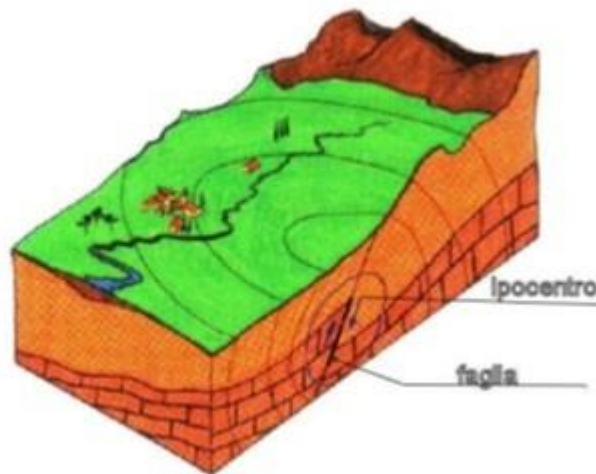
Oltre alle intrinseche differenze della vulnerabilità sismica delle costruzioni ed alle differenti caratteristiche dinamiche delle stesse, tali cause possono essere attribuite principalmente alle modificazioni delle caratteristiche del moto sismico indotte da condizioni geologiche e geomorfologiche locali.

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).

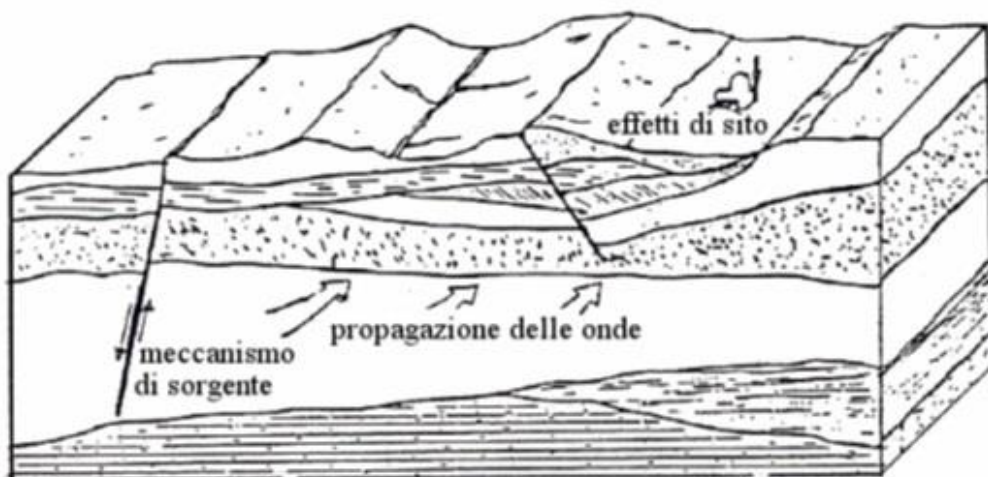


Figura 3. Schema di una situazione reale.

## 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 deamplificazione 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.

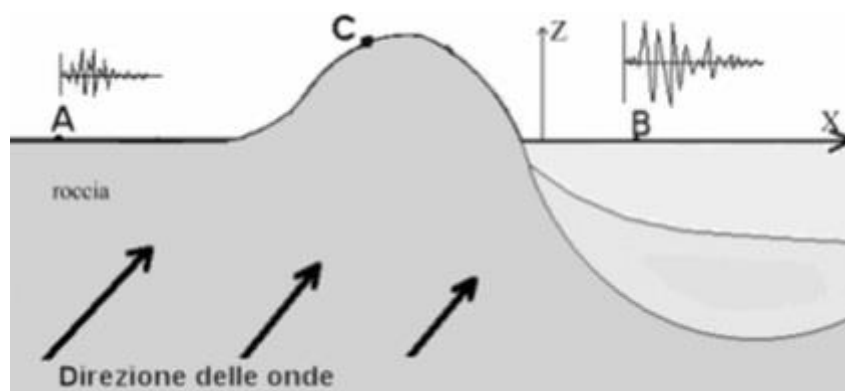


Figura 4. Schema della propagazione delle onde dalla sorgente e delle differenti condizioni locali.

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;

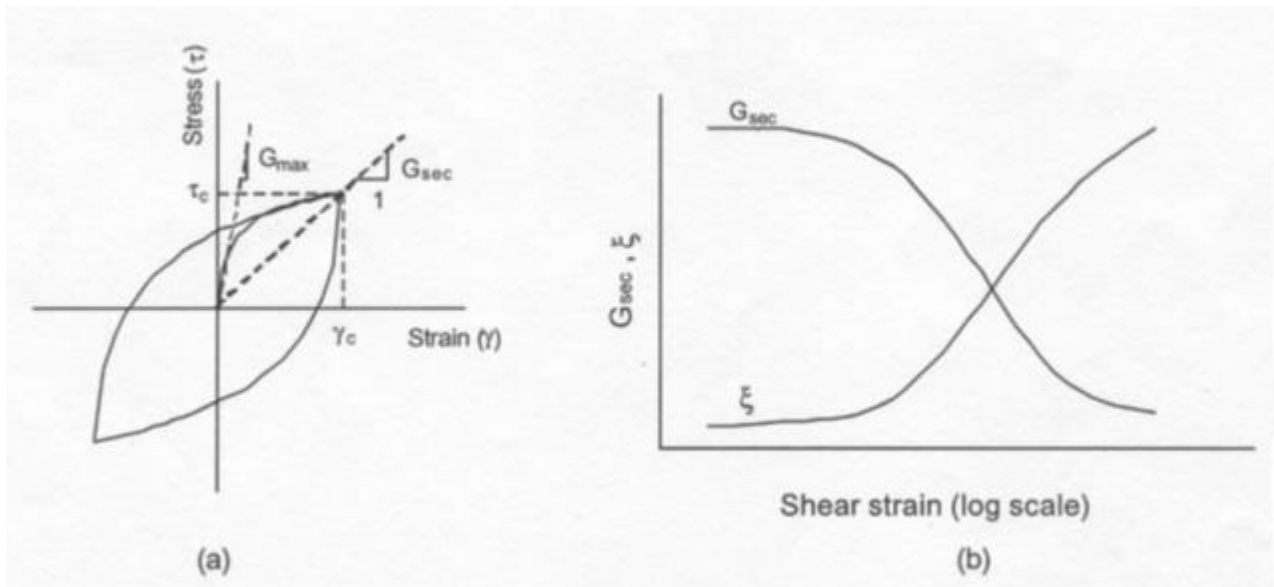


Figura 5. Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

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.

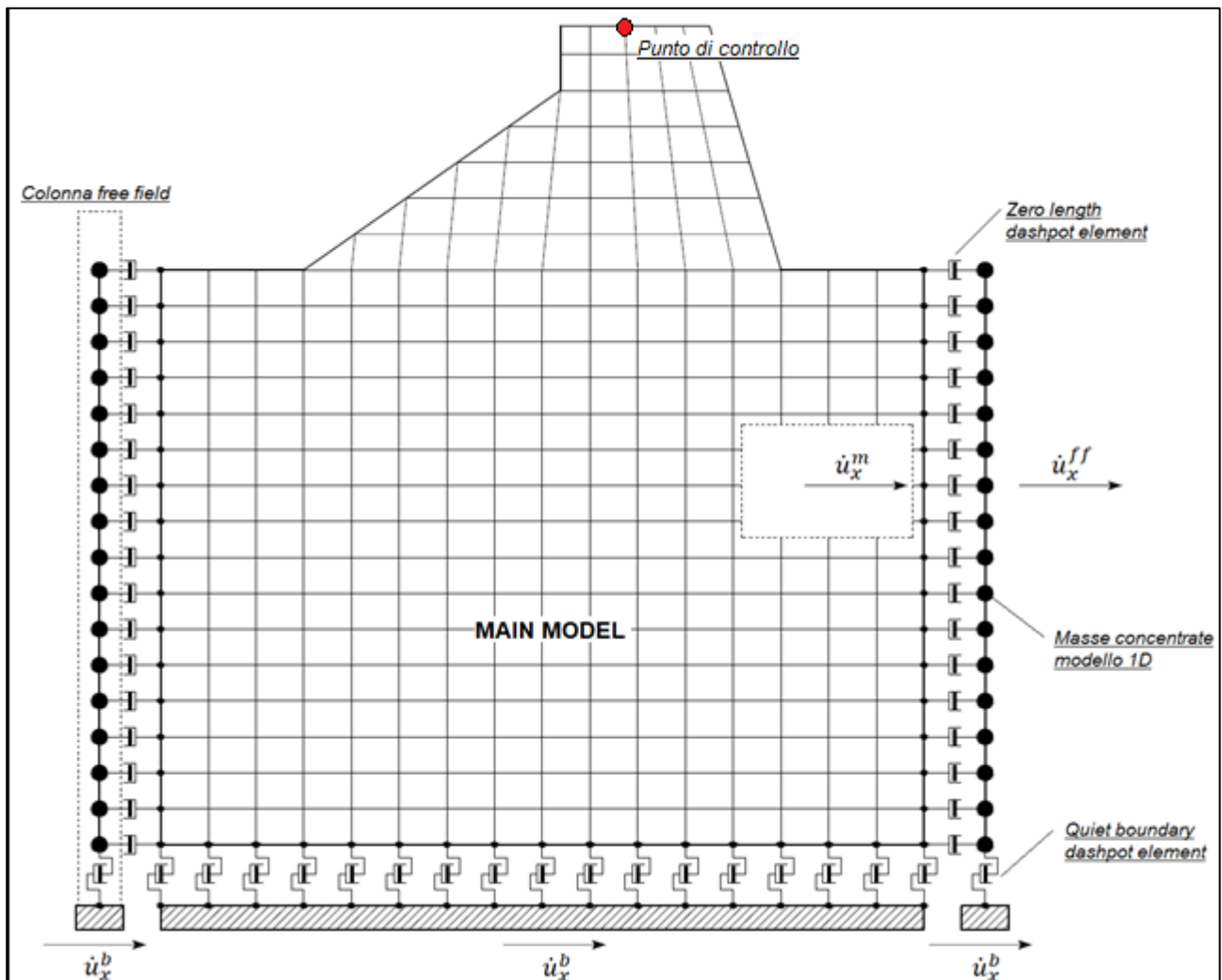


Figura 6. Discretizzazione FEM del deposito di terreno.

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

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 Reyleigh;

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.

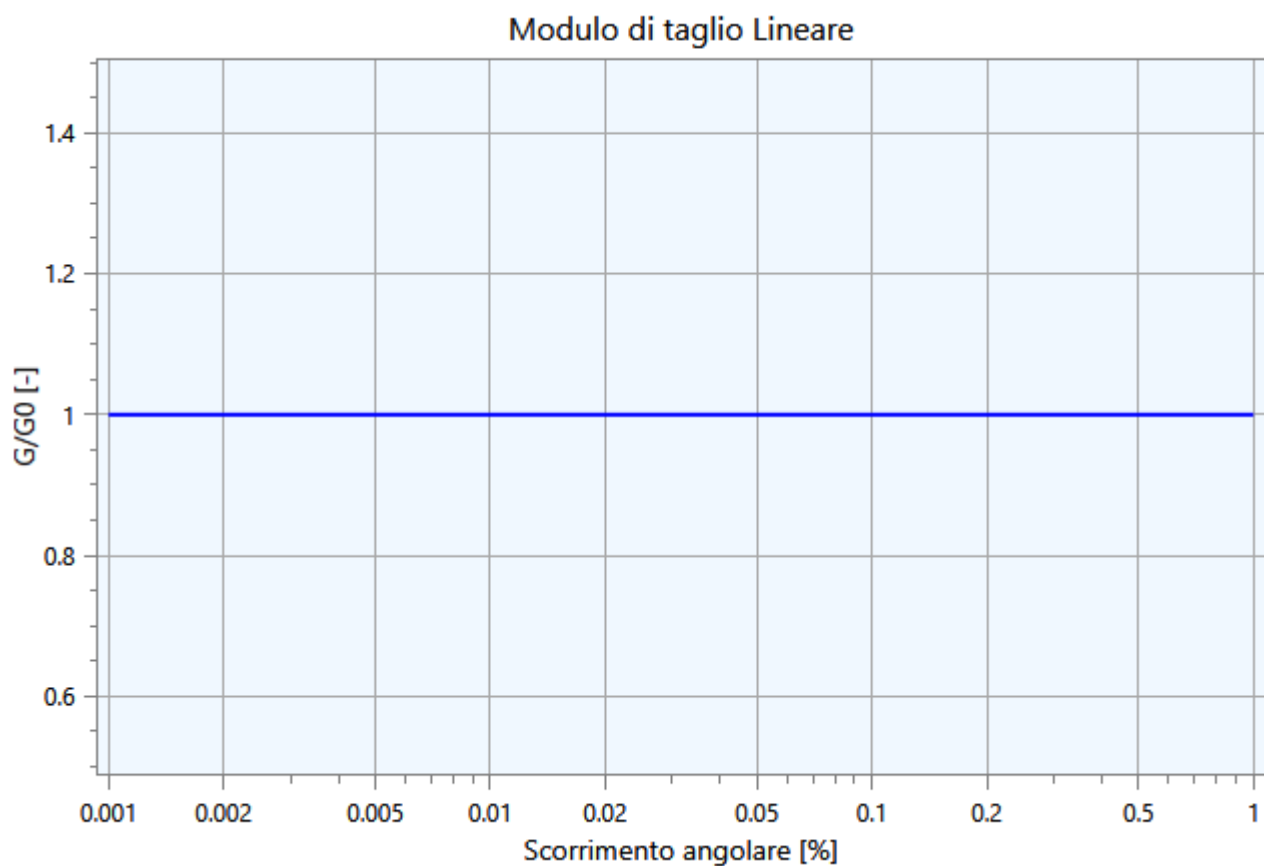
## 4 - Input

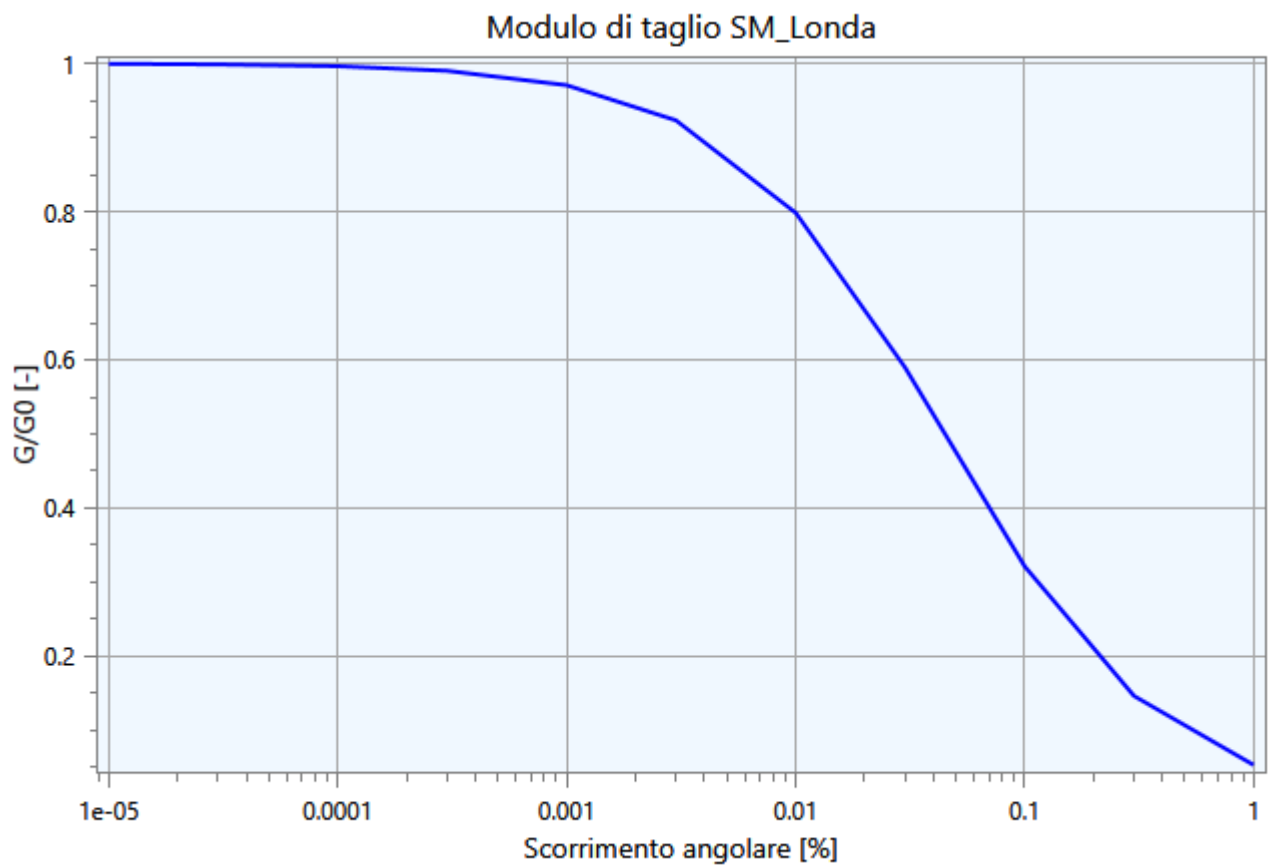
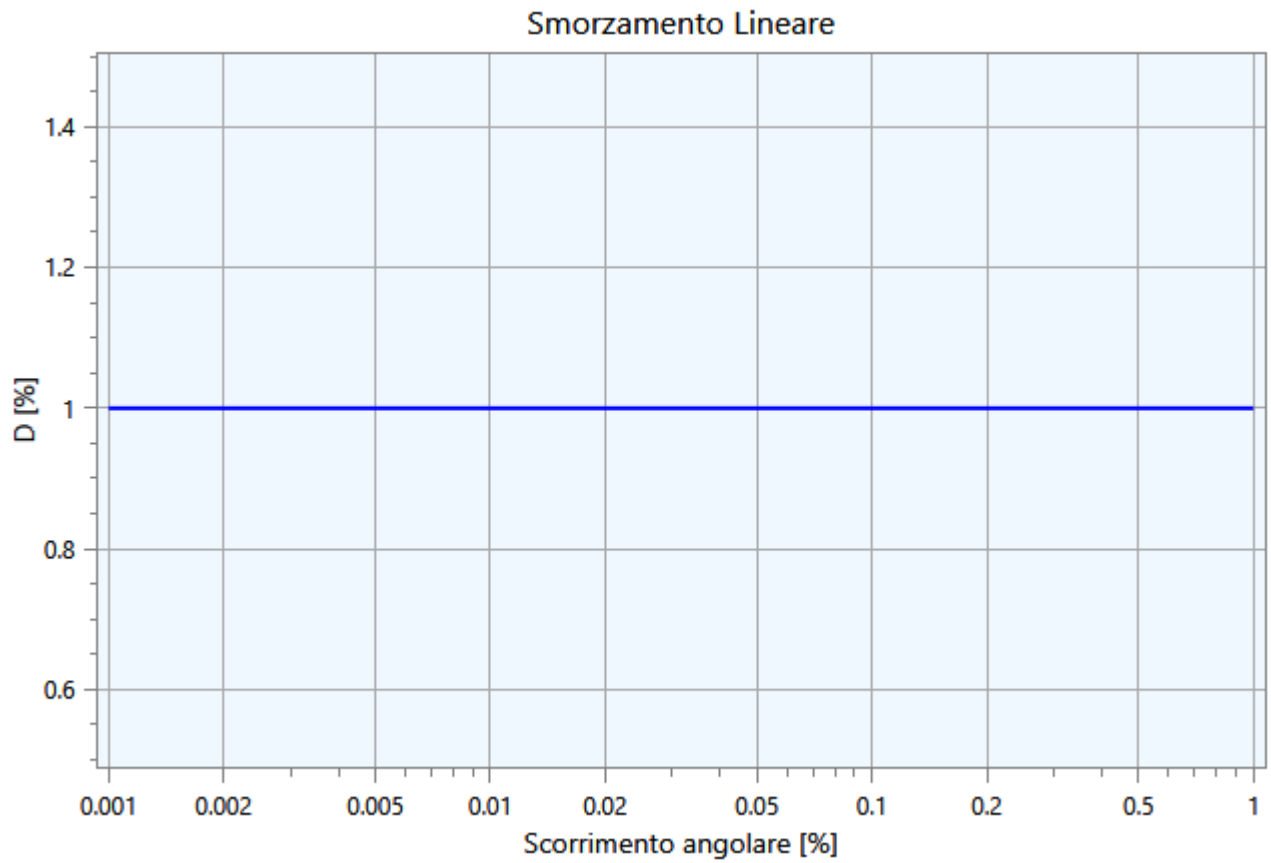
Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai dati di input utilizzati per lo studio della risposta sismica locale del deposito.

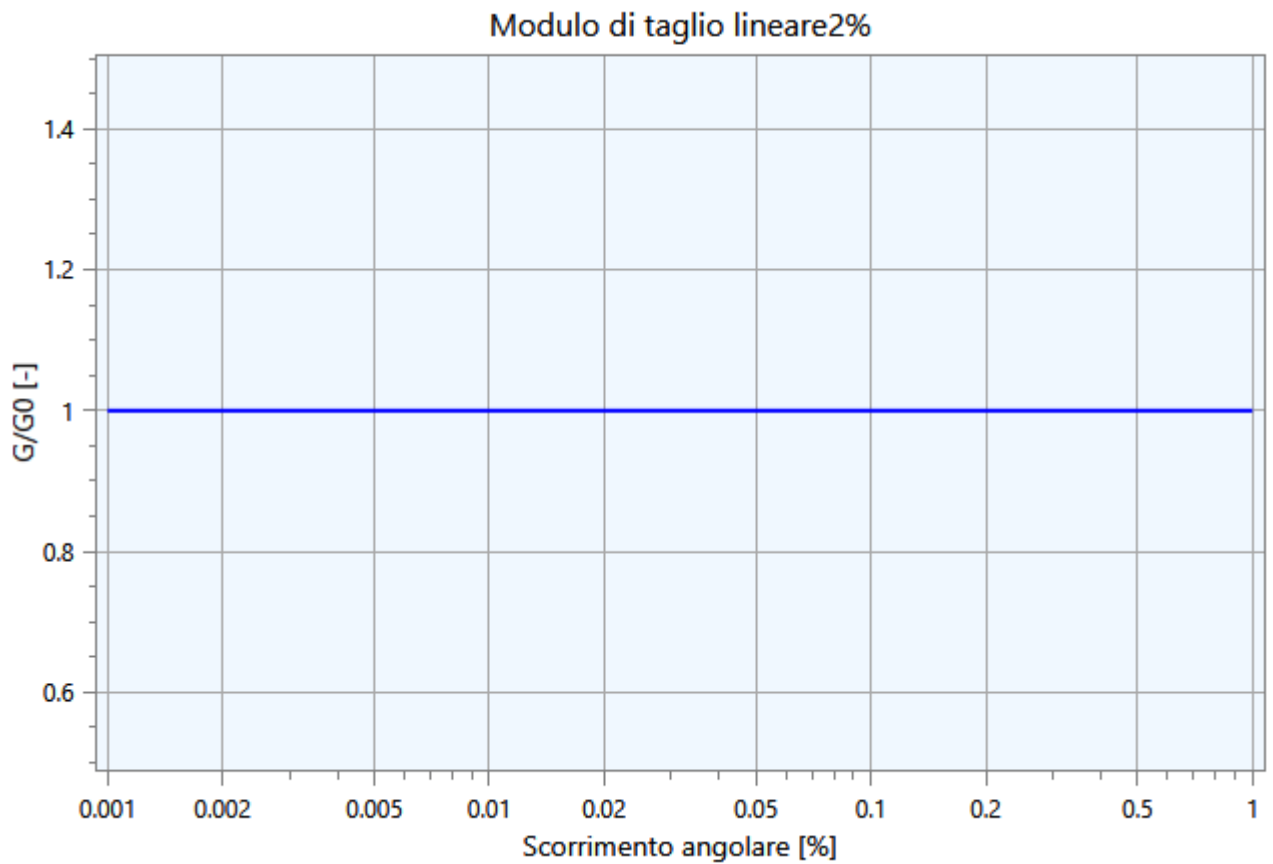
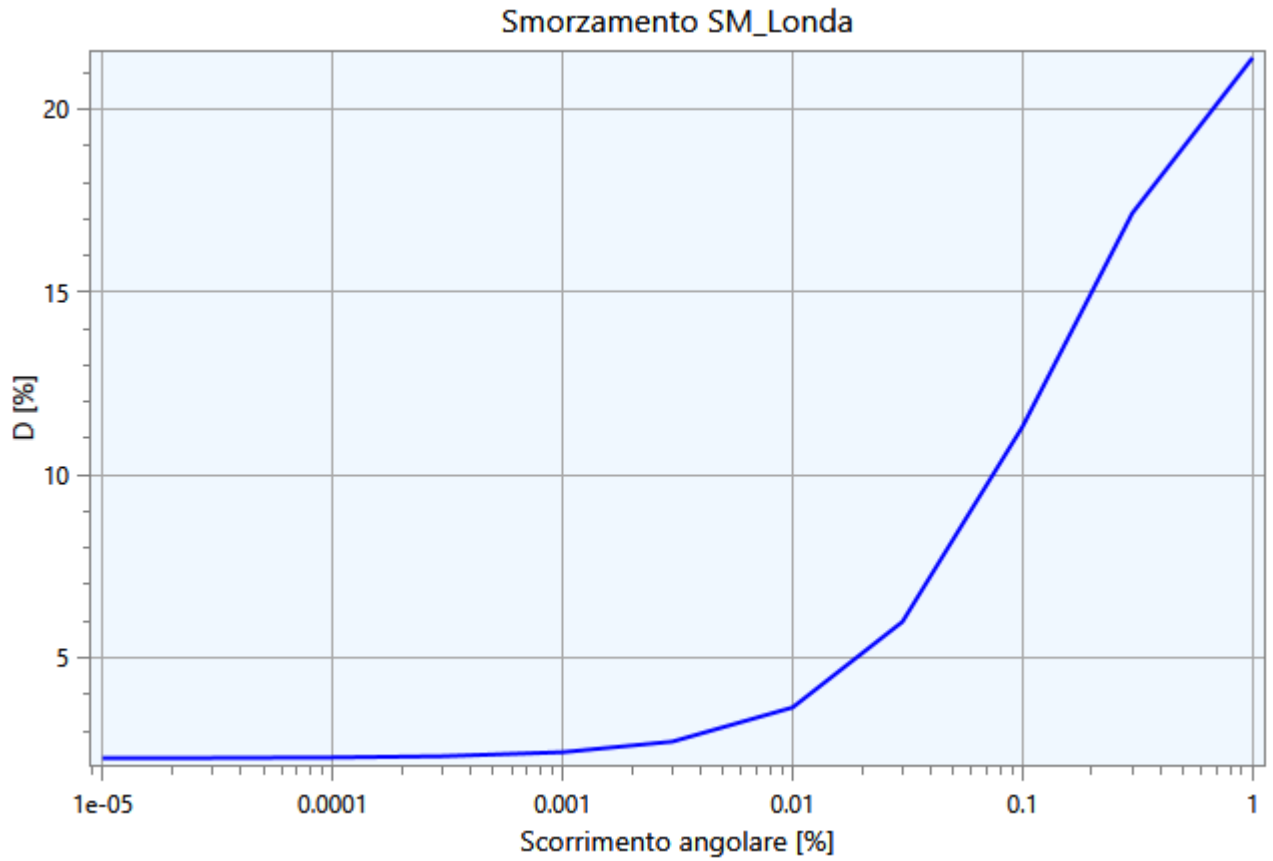
### 4.1 - Curve di Decadimento dei Materiali

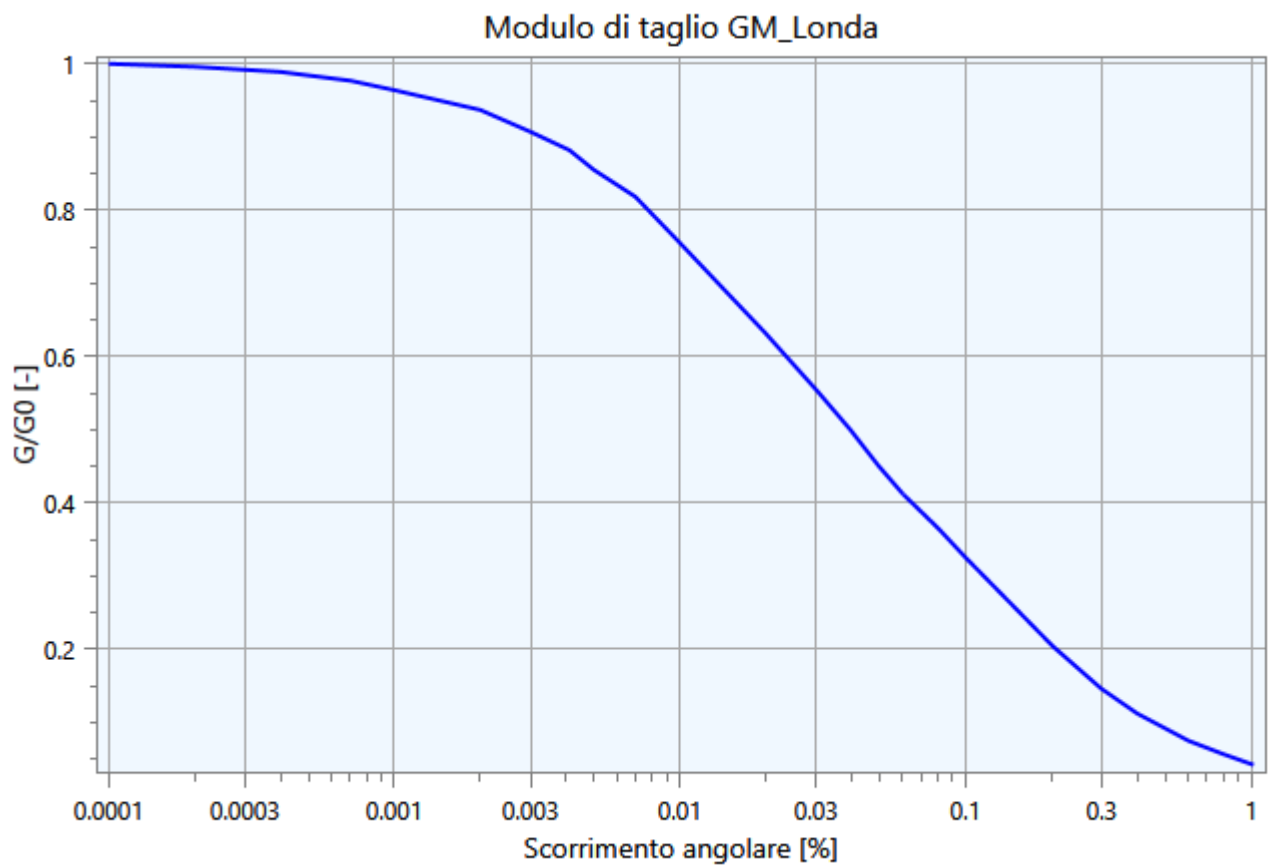
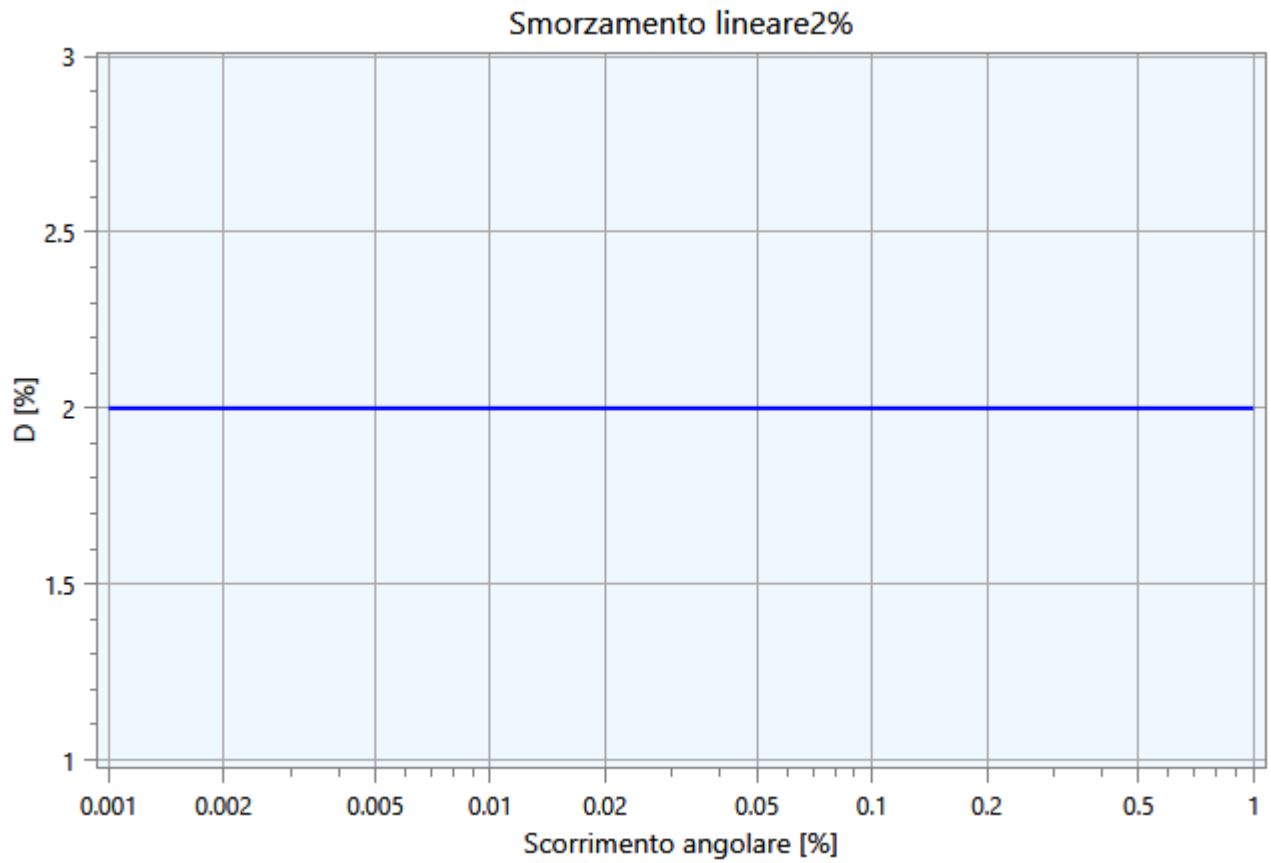
All'aumentare del livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno si ha una diminuzione del modulo di taglio  $G$  ed un aumento del rapporto di smorzamento  $D$ . Tale comportamento può essere descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento una relativa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

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

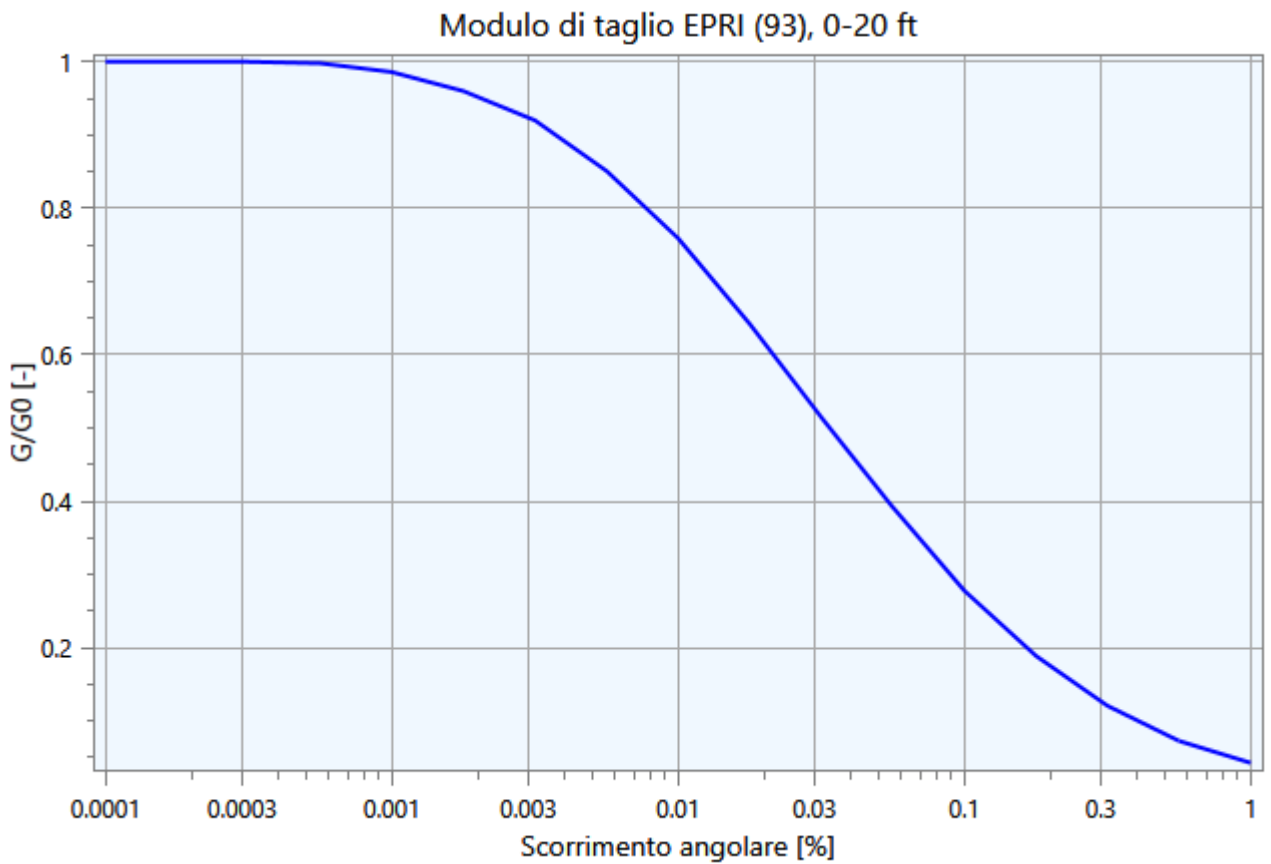
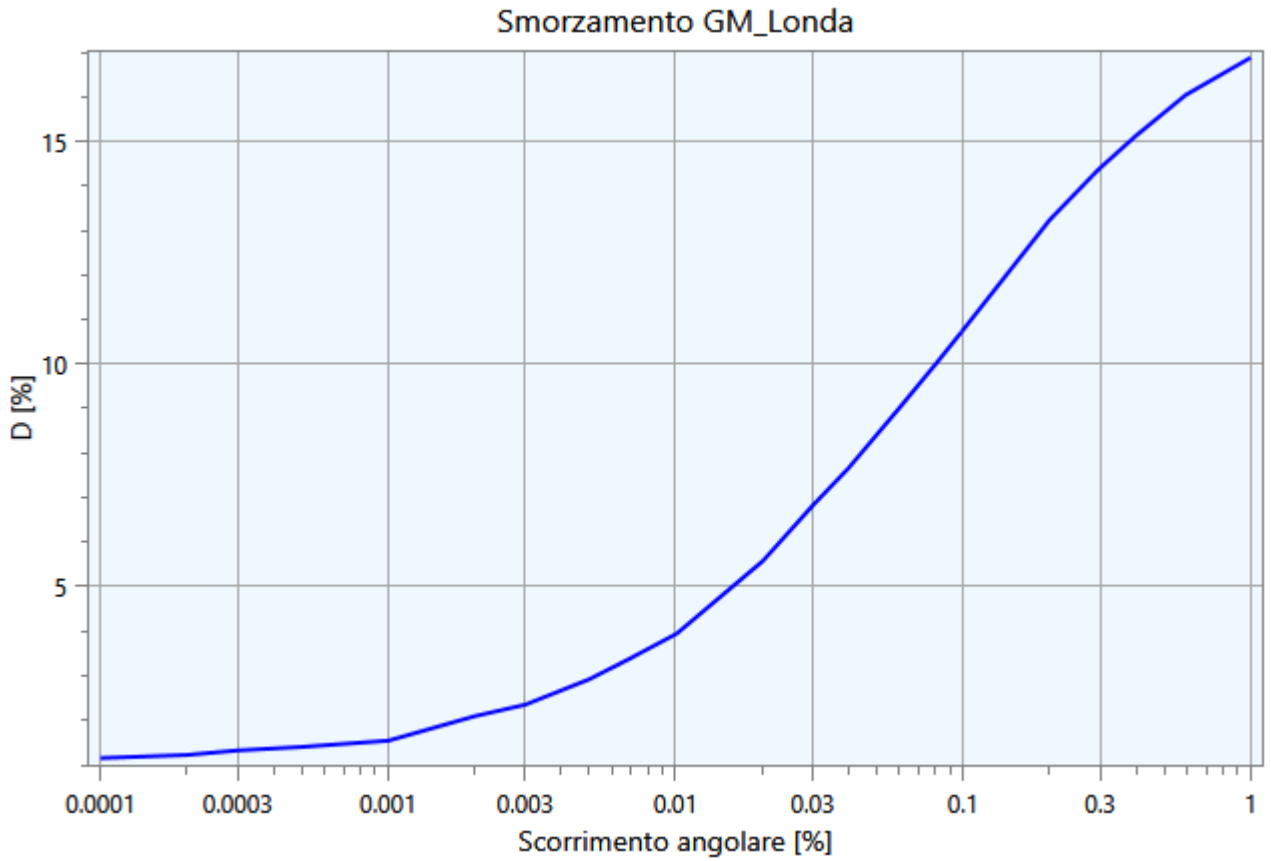


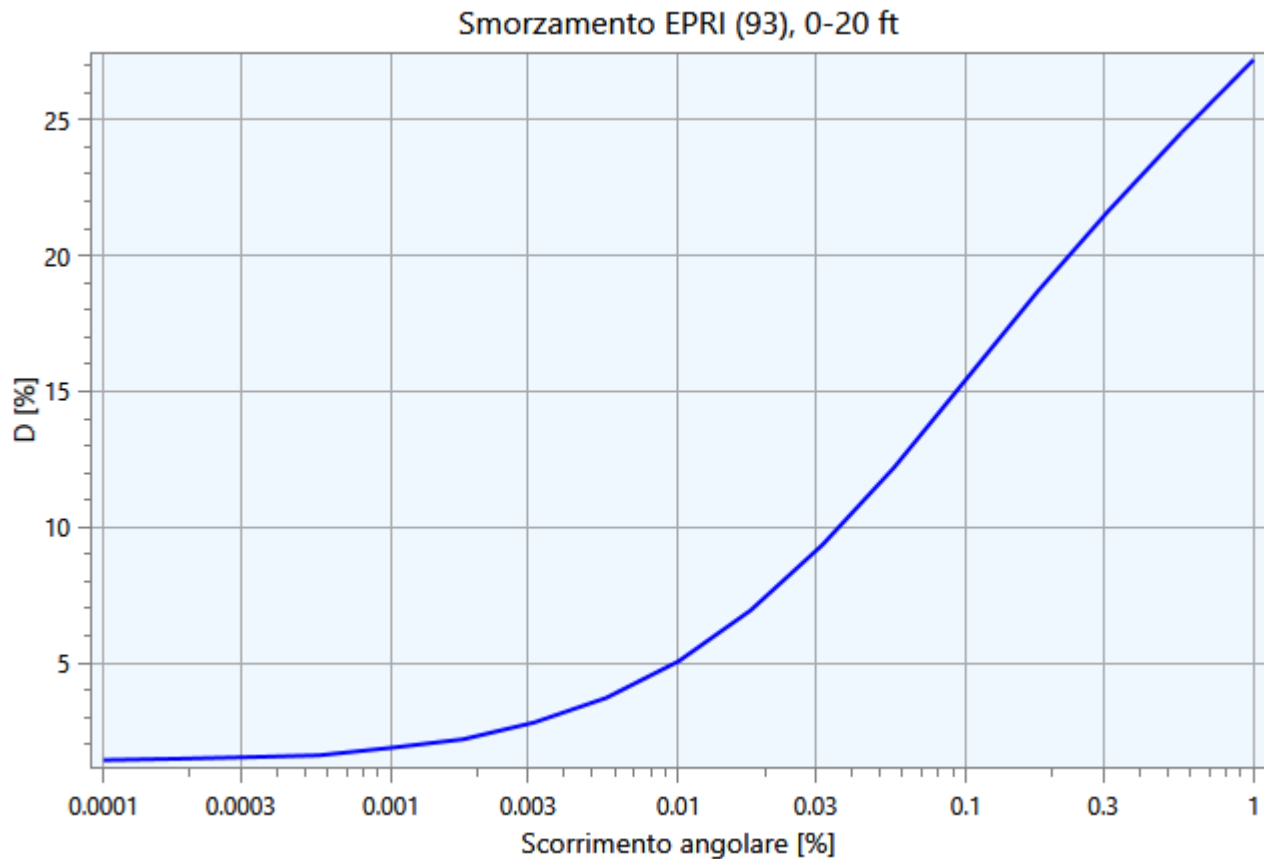












#### 4.2 - Stratigrafia e Caratteristiche meccaniche dei singoli strati

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:

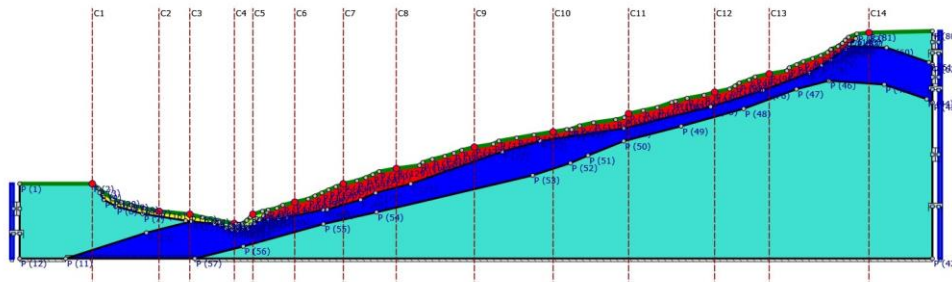


Figura 7. Stratigrafia di progetto.

Di seguito i 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
LPS_1		-	2250.00	1155.00	0.30	Lineare
SM		-	1900.00	495.00	0.45	SM_Londa
ALS		-	2100.00	695.00	0.33	lineare2%
GM		-	2000.00	220.00	0.36	GM_Londa
fq		-	1950.00	435.00	0.37	EPRI (93), 0-20 ft
LPS_2		-	2250.00	1155.00	0.30	Lineare
LPS_3		-	2250.00	1155.00	0.30	Lineare

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche strati.

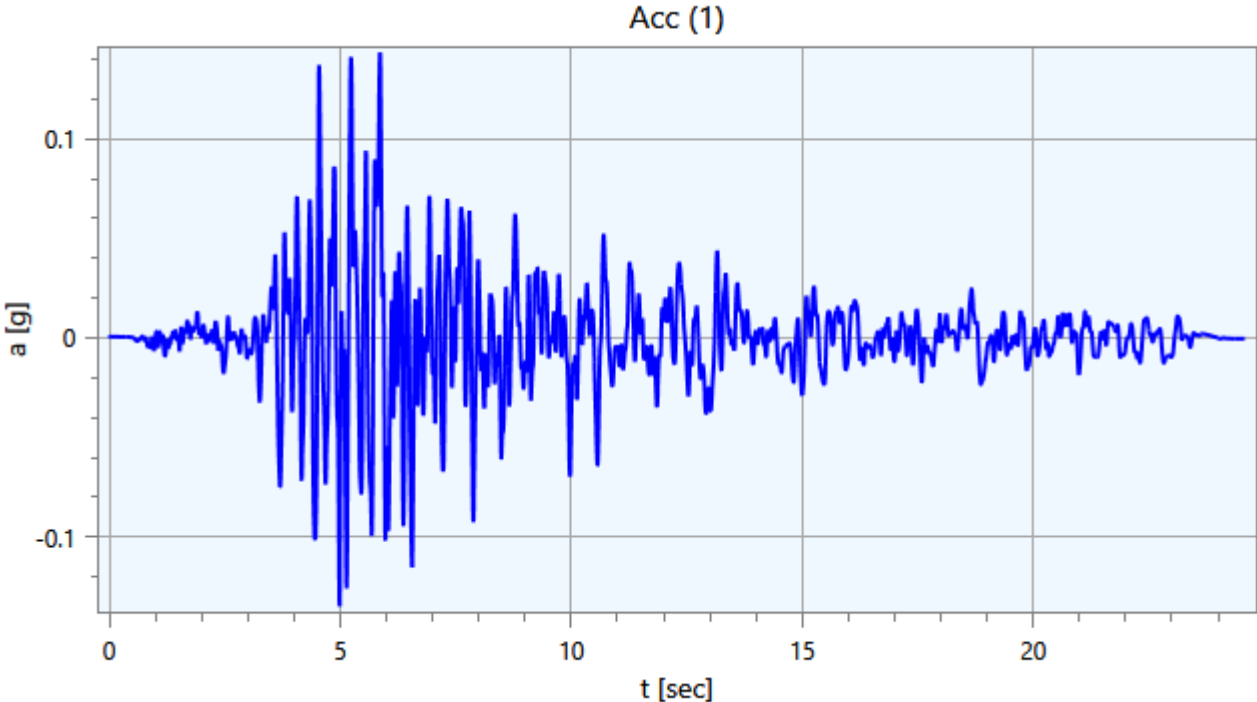
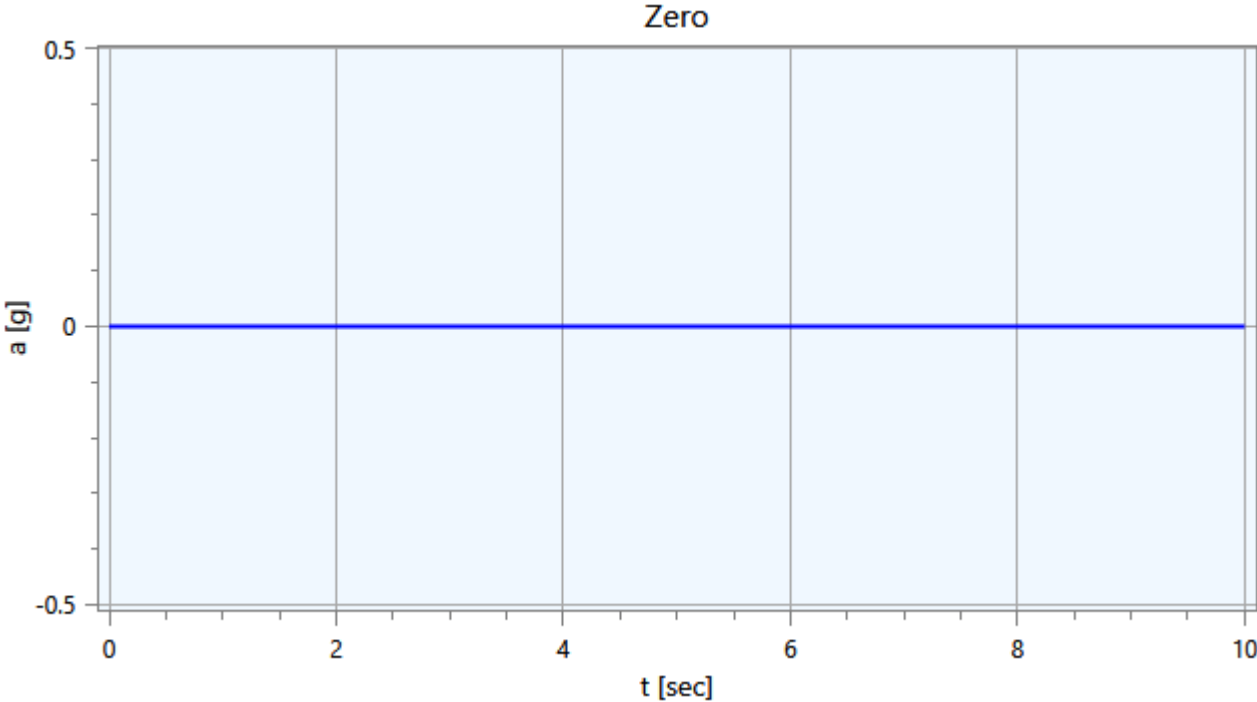
dove:

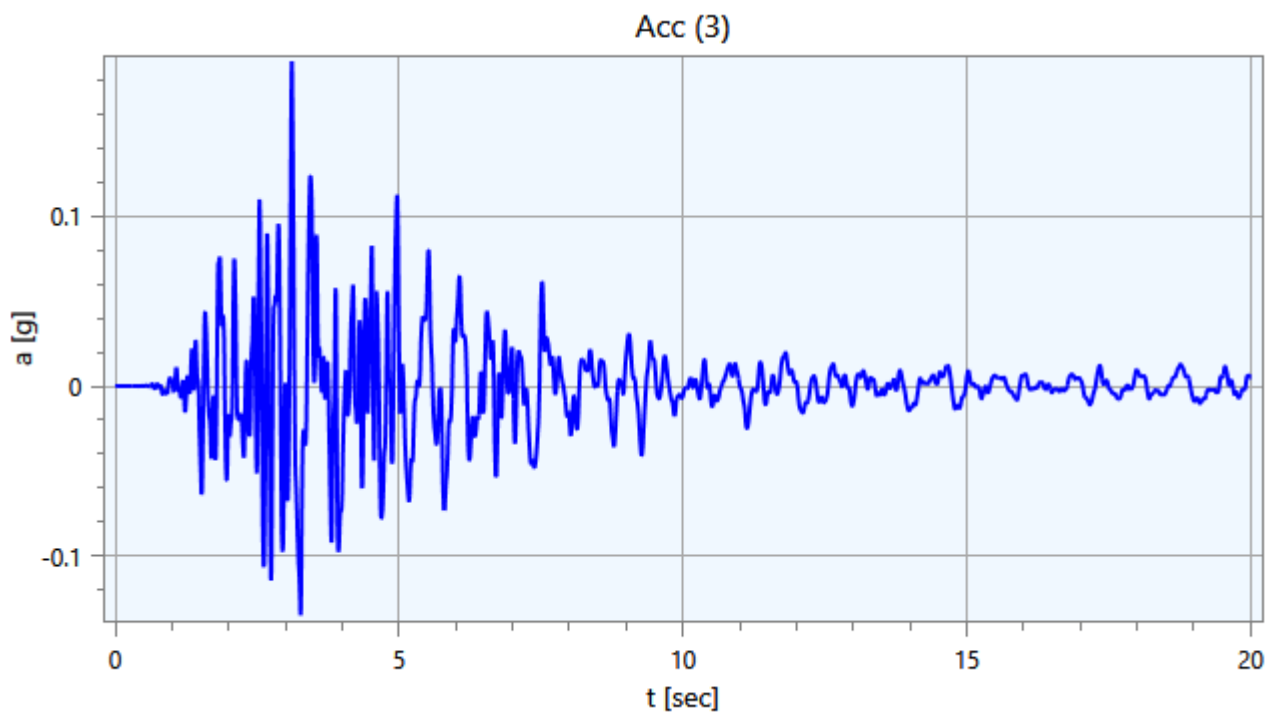
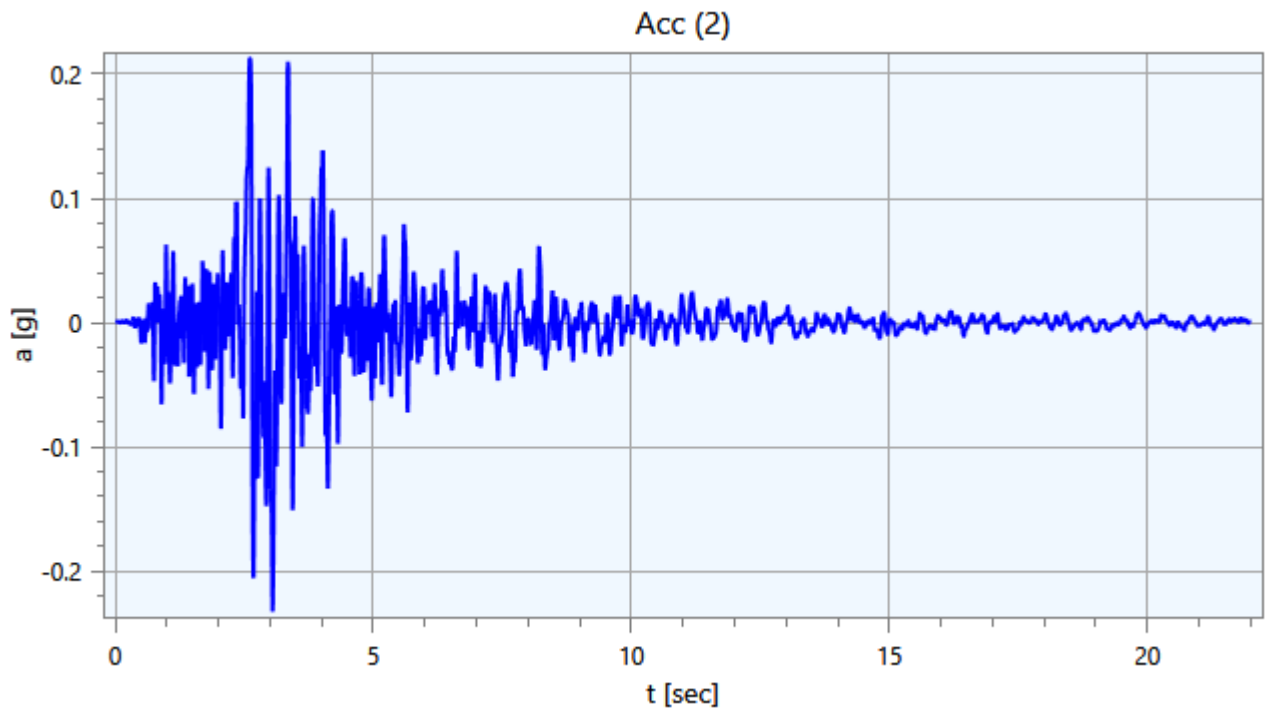
- S = spessore del singolo strato;
- $\rho$  = densità di massa del singolo strato;
- Vs = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato;
- $\gamma$  = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato;

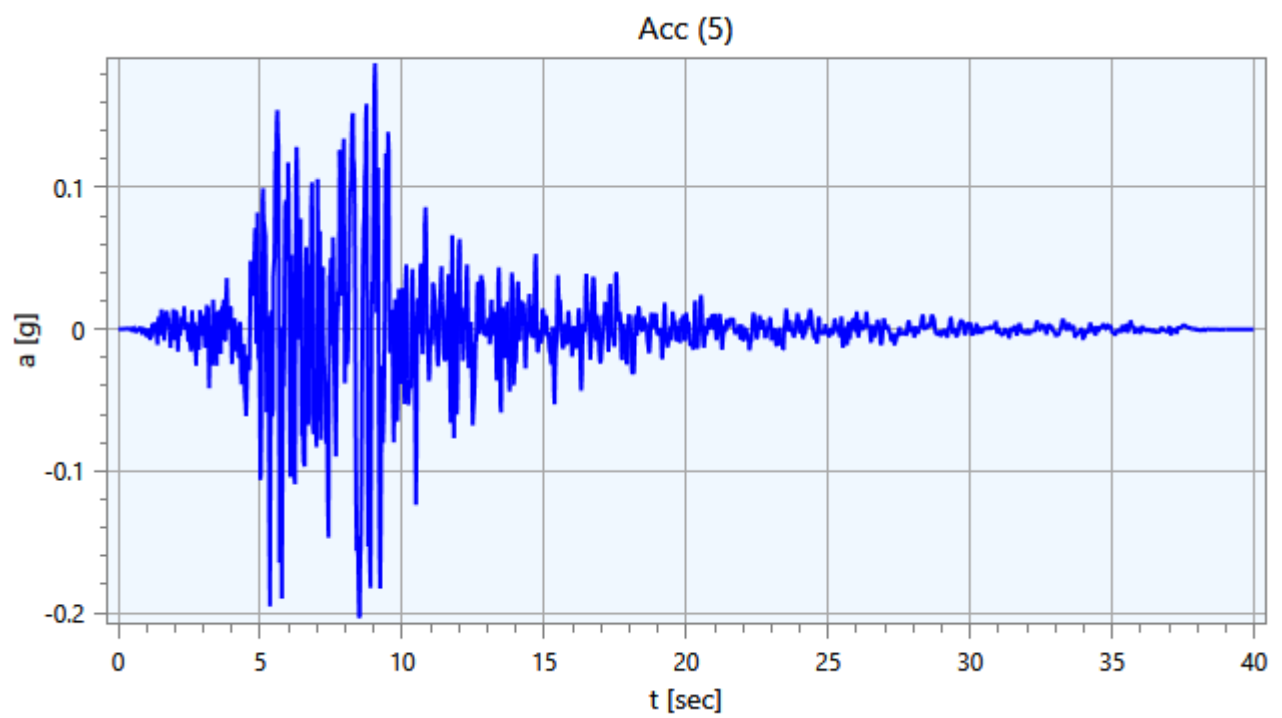
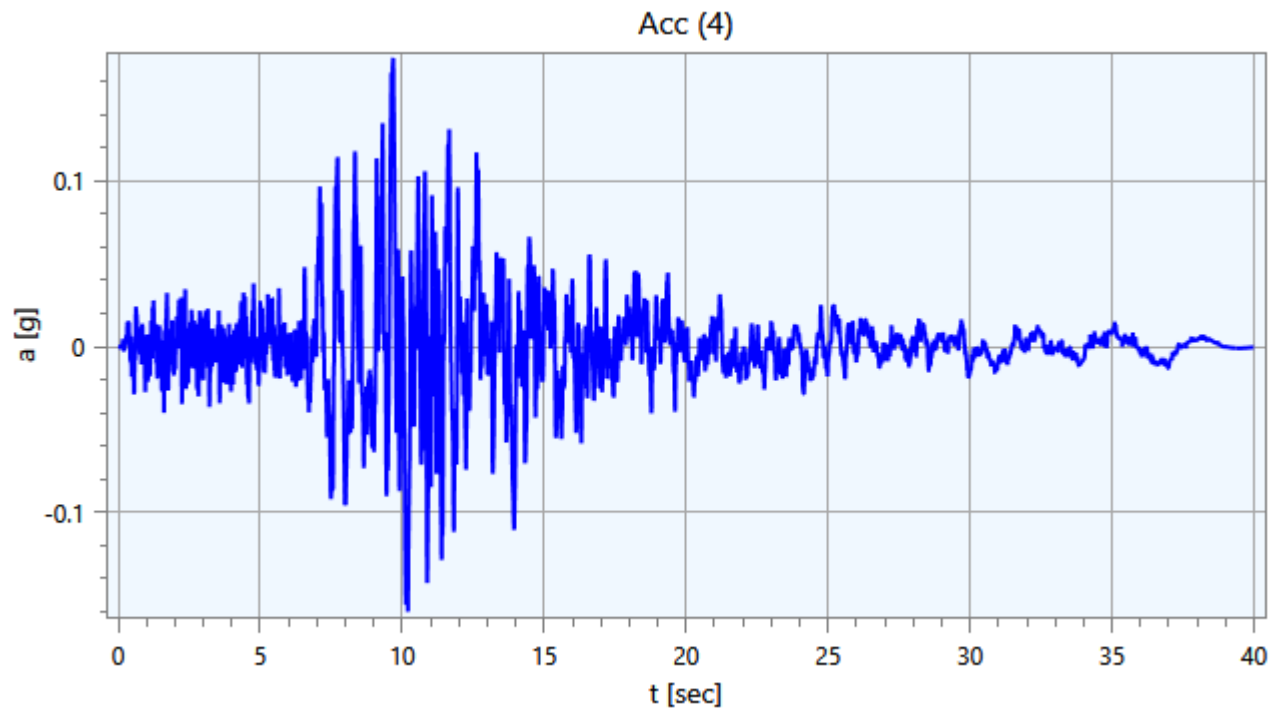
### 4.3 - Accelerogrammi e Spettri di Input

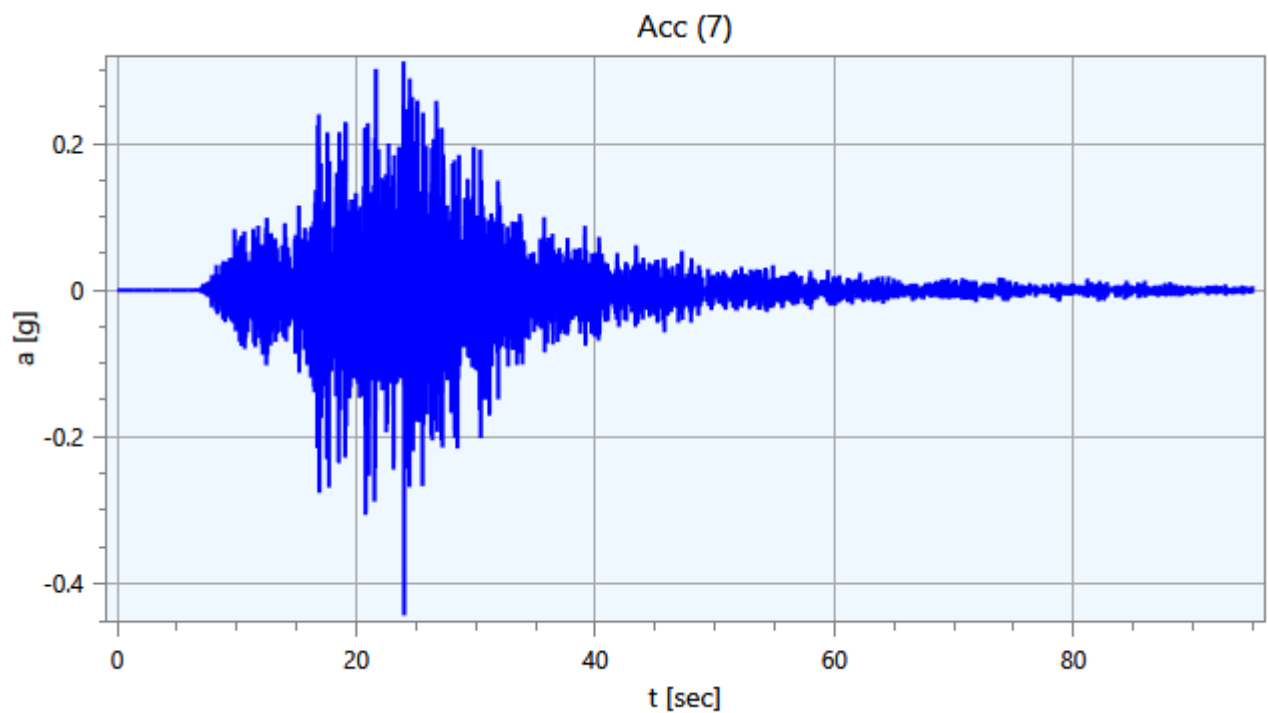
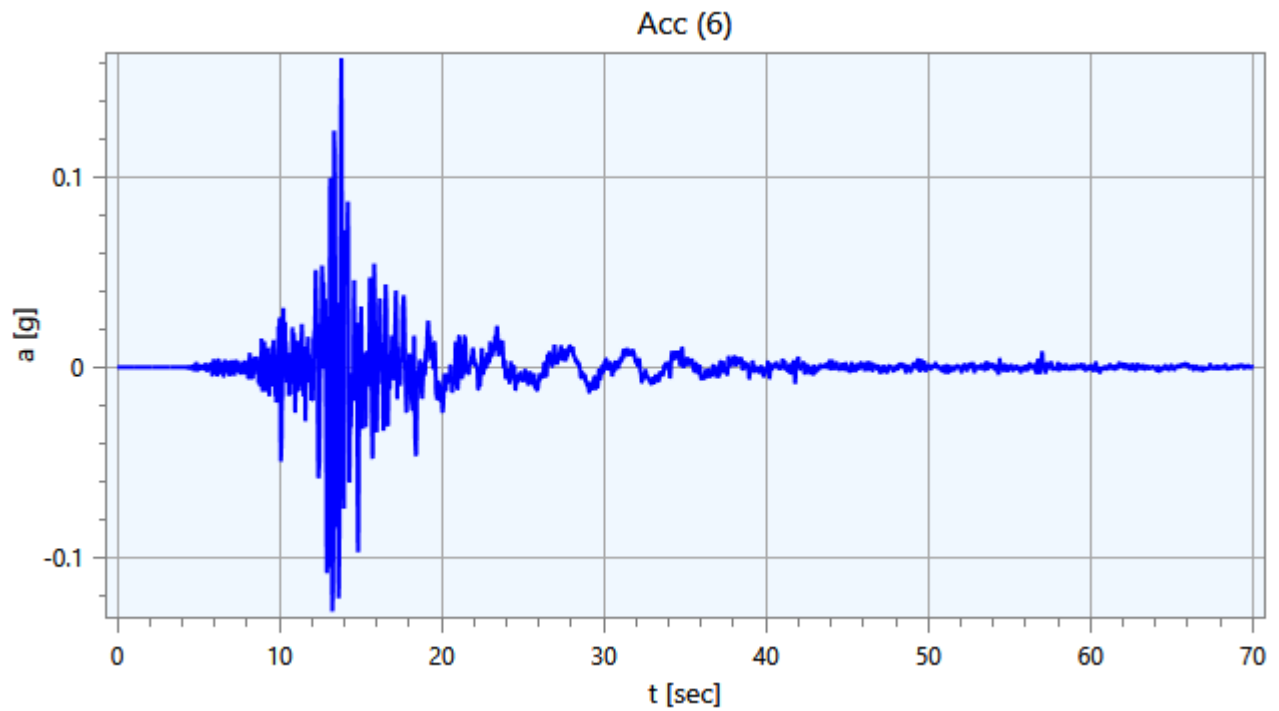
Gli accelerogrammi di input relativi allo stato limite in esame (ad esempio SLV) possono essere ottenuti tramite un'analisi con l'utilizzo dell'applicativo software REXEL v. 3.4 beta, che permette la ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle Norme Tecniche per 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;

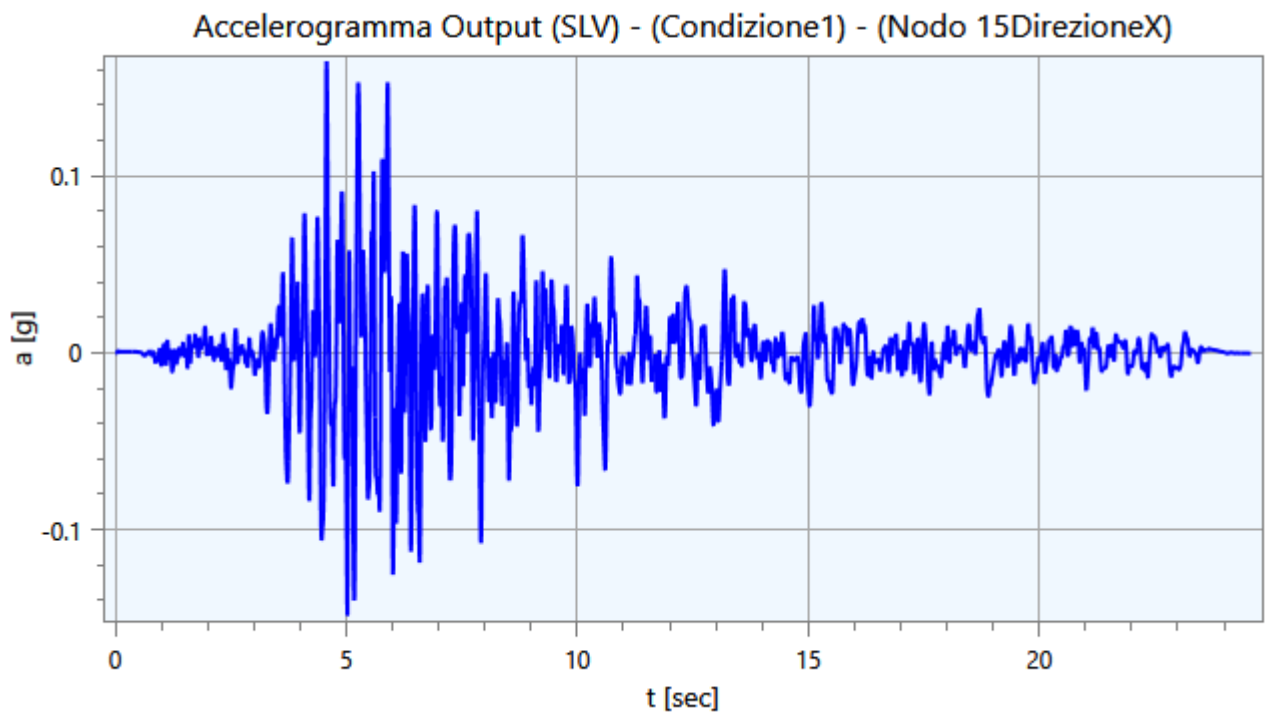
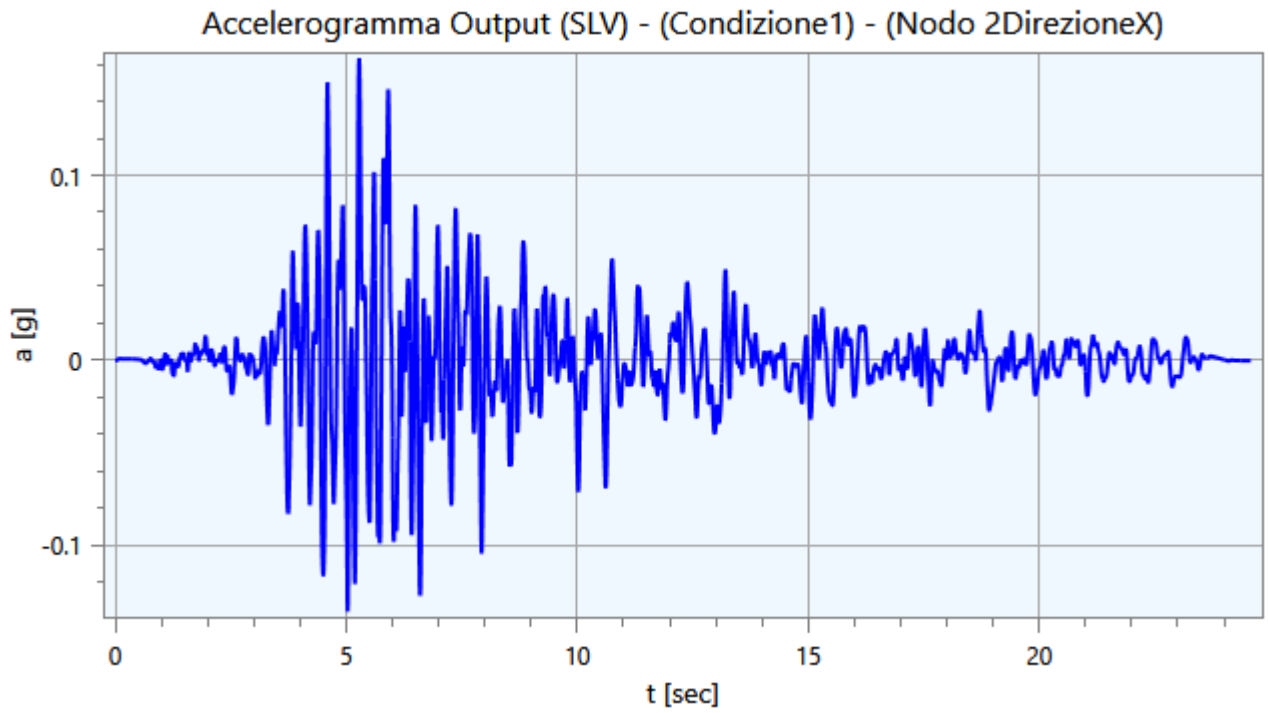
## 5 - Output

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

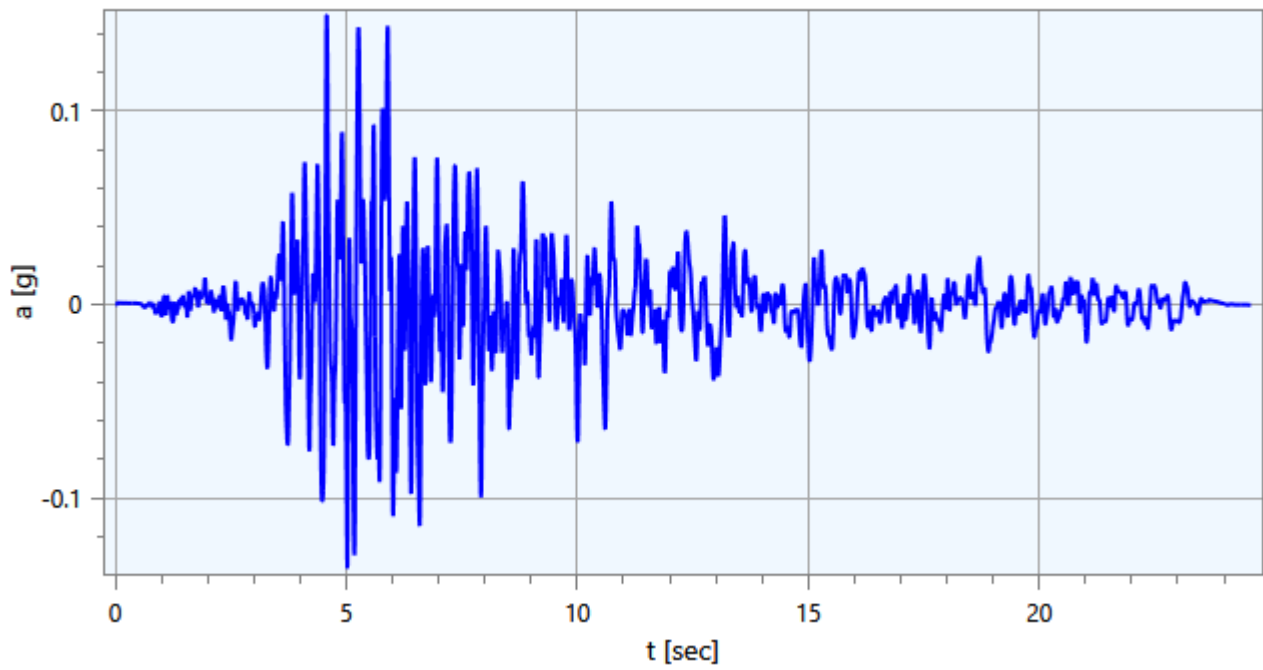
### 5.1 - Accelerogrammi Output

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

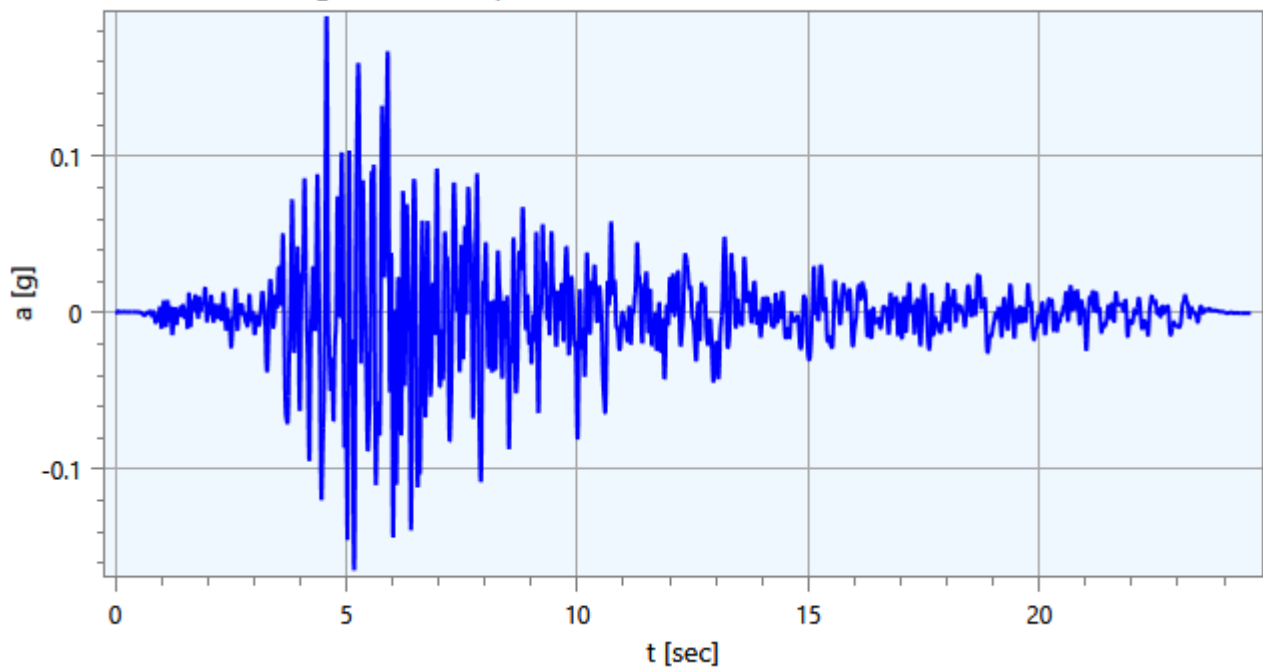


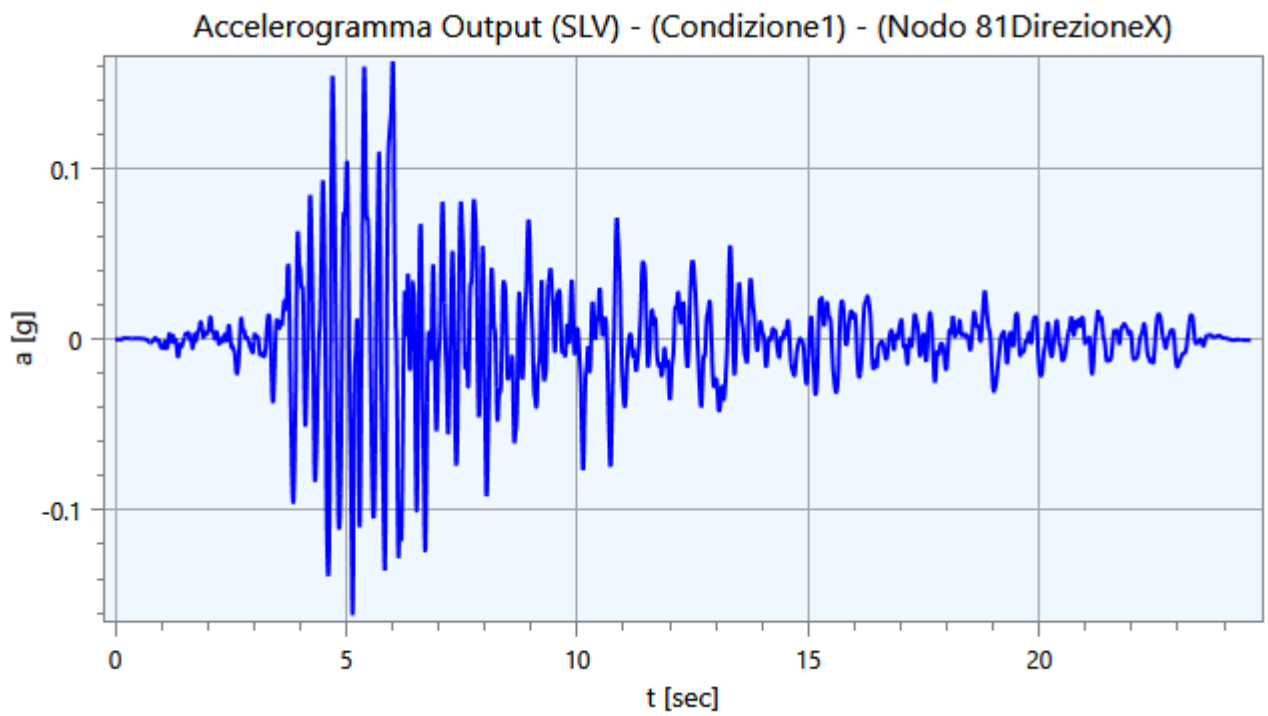
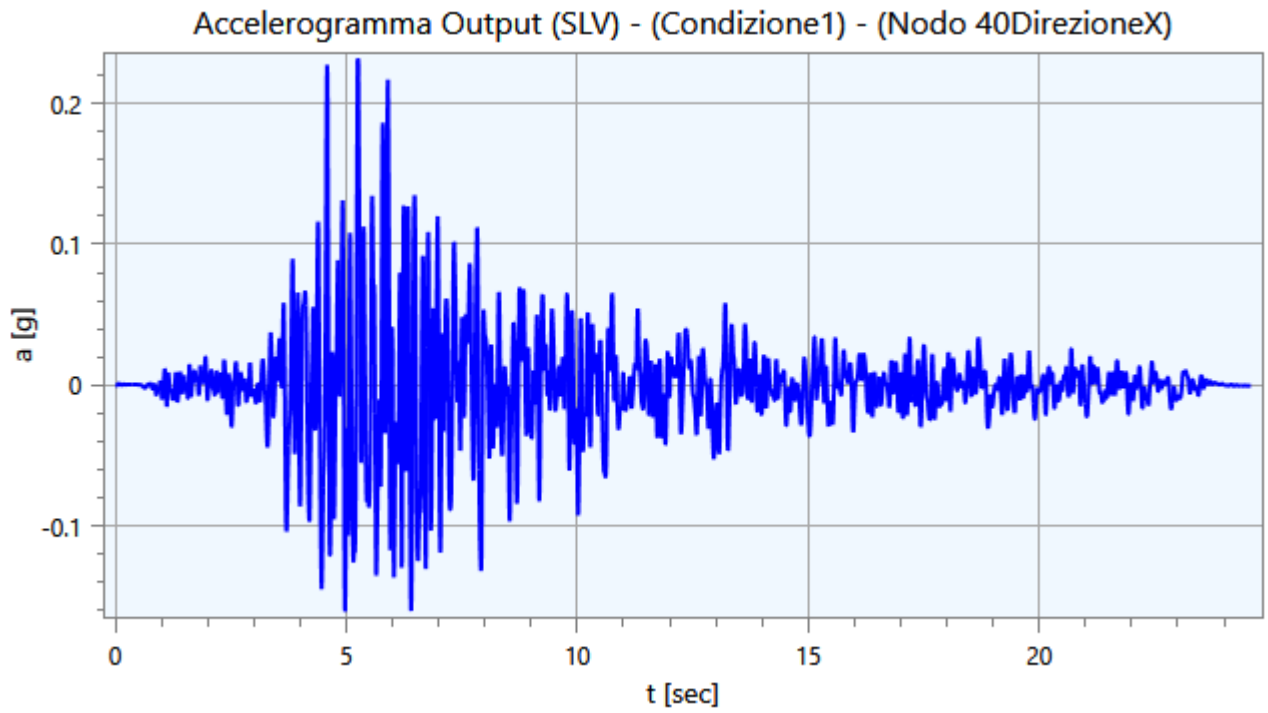


Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 16DirezioneX)

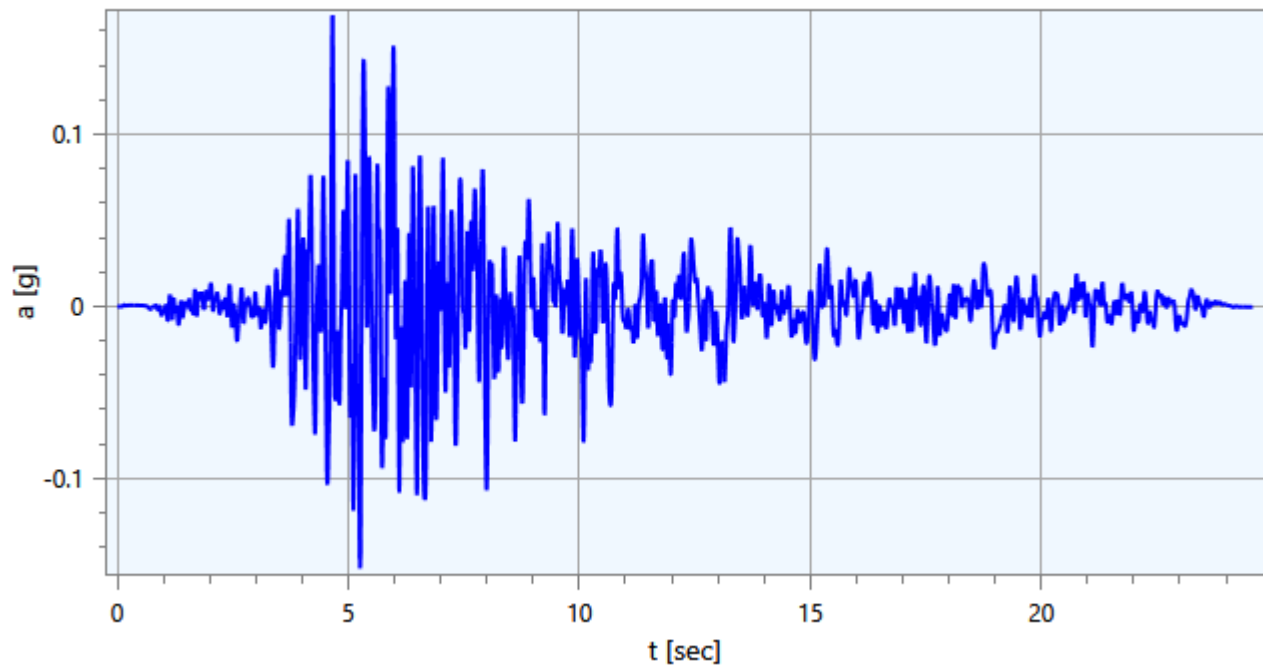


Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 34DirezioneX)

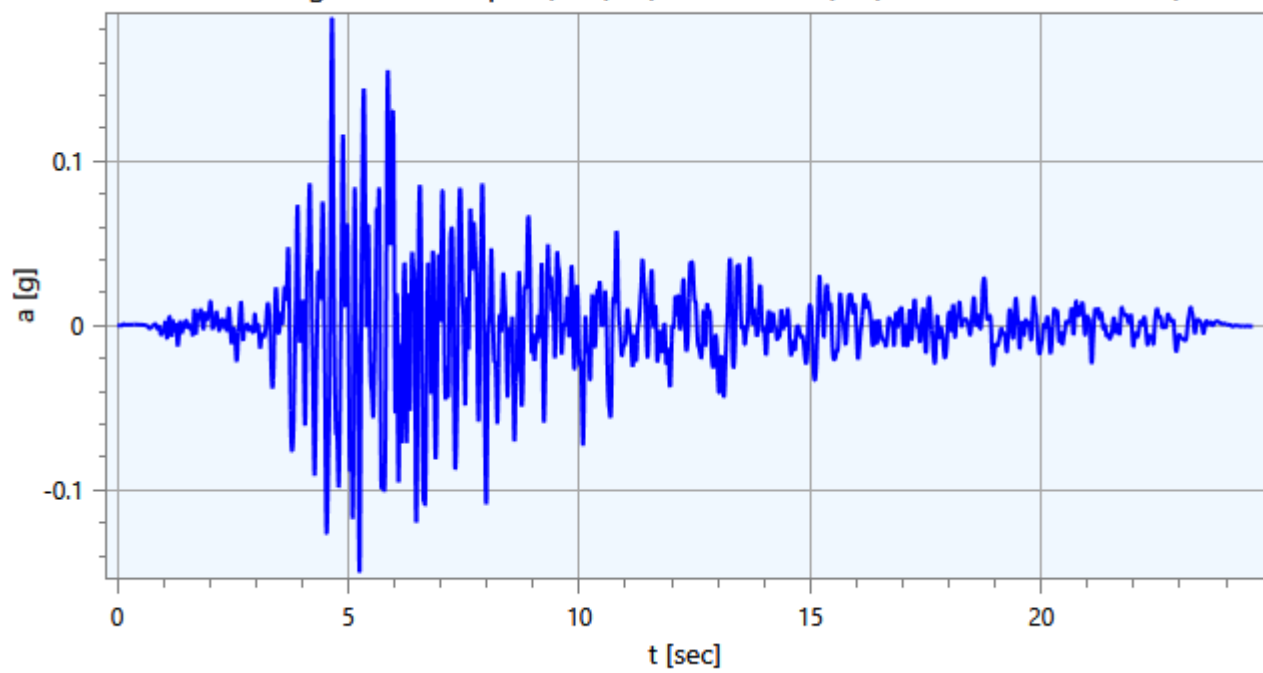




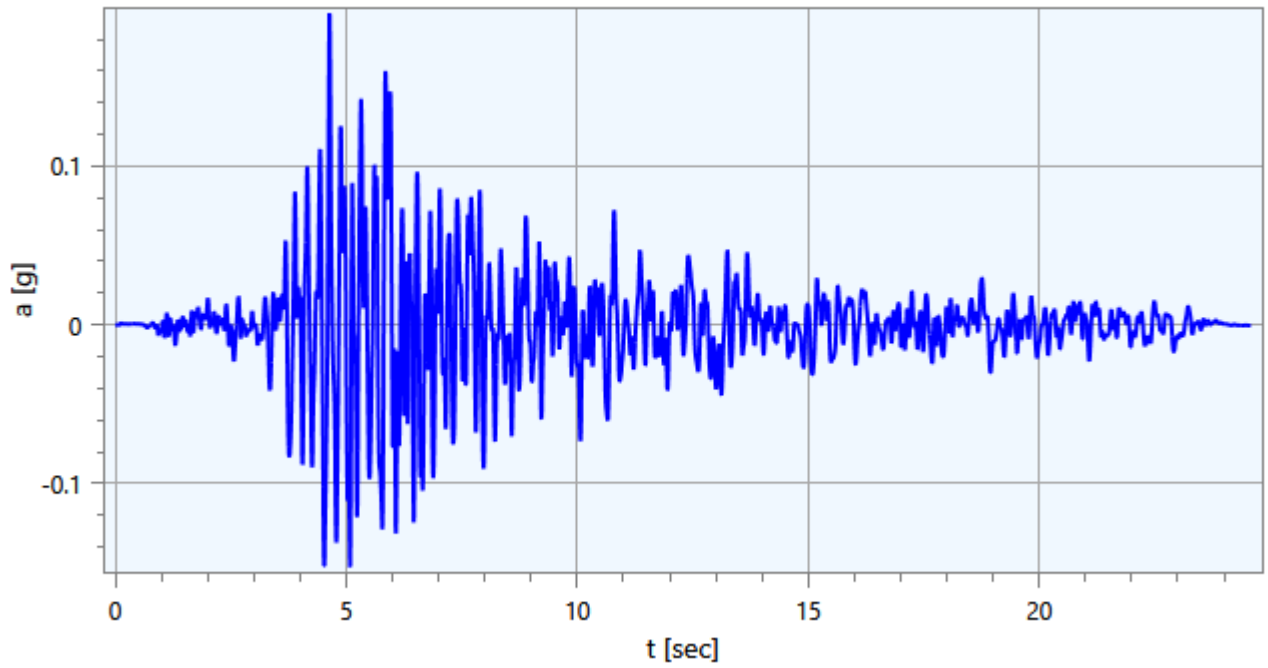
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 96DirezioneX)



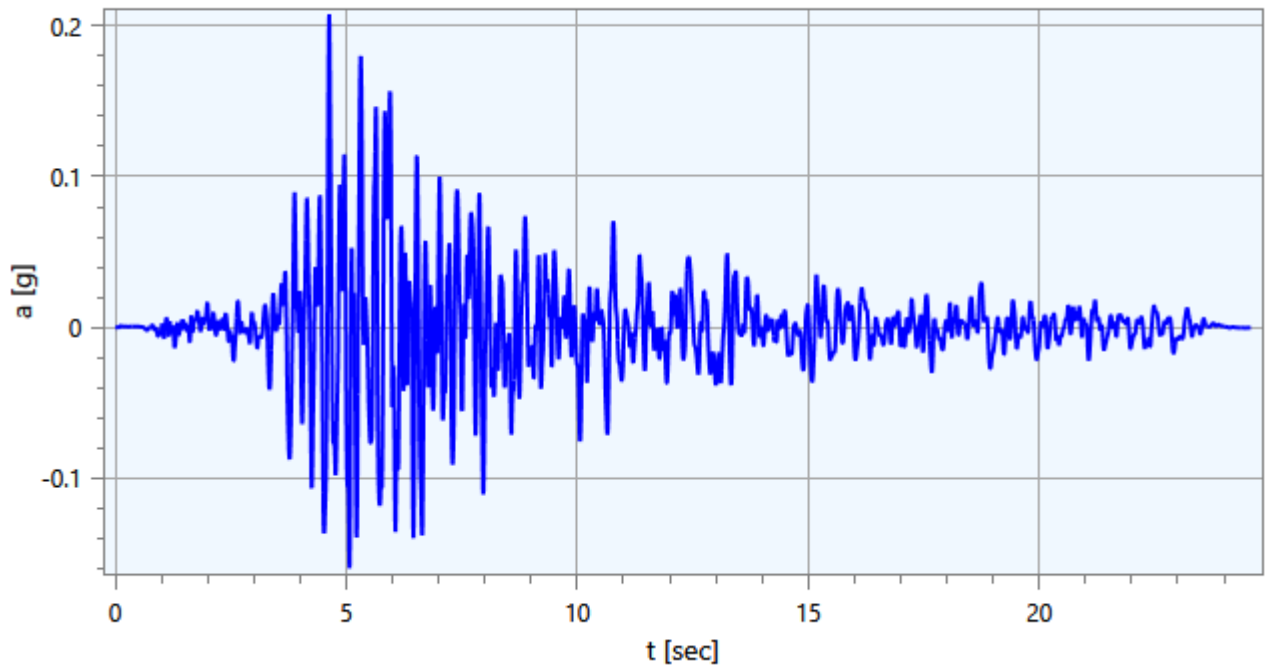
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 102DirezioneX)

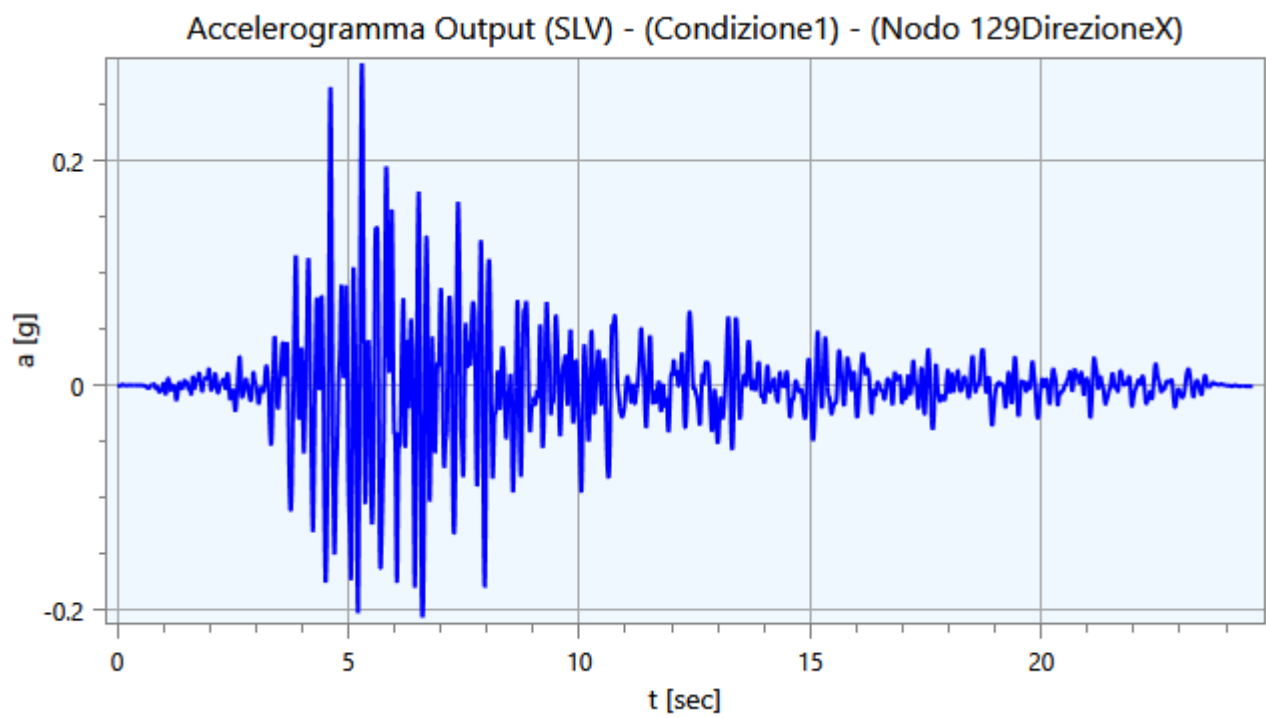
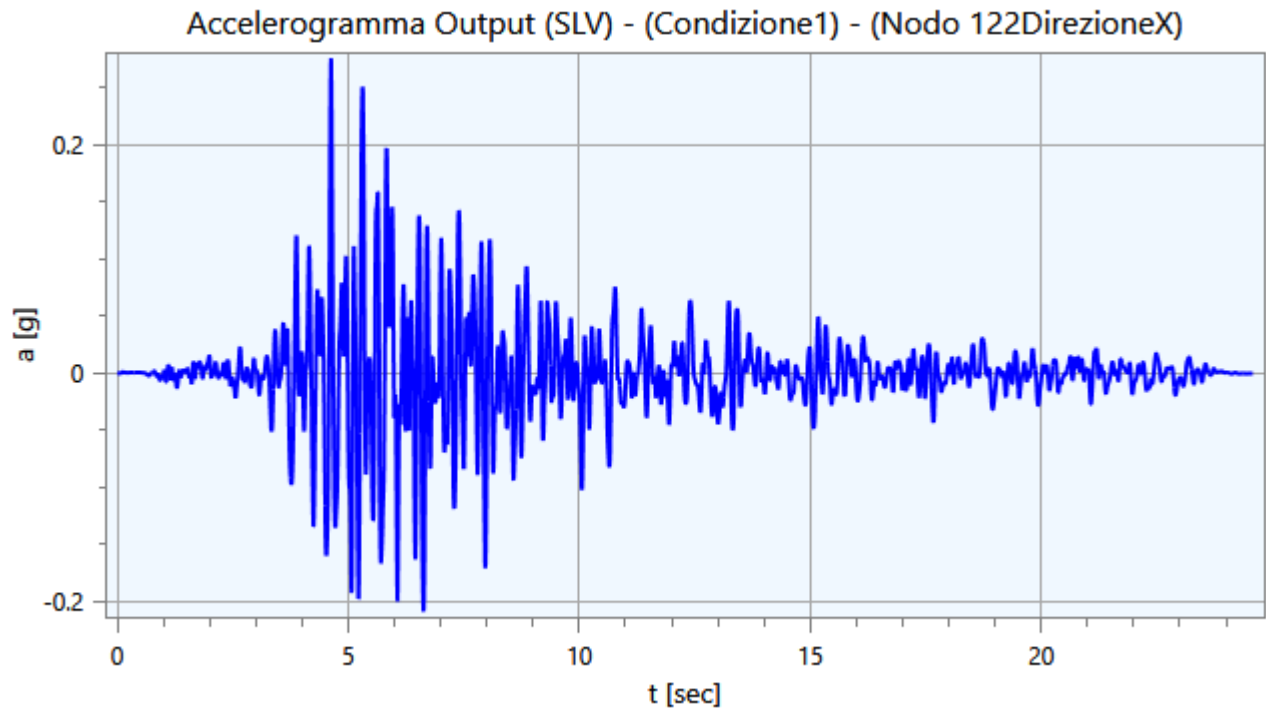


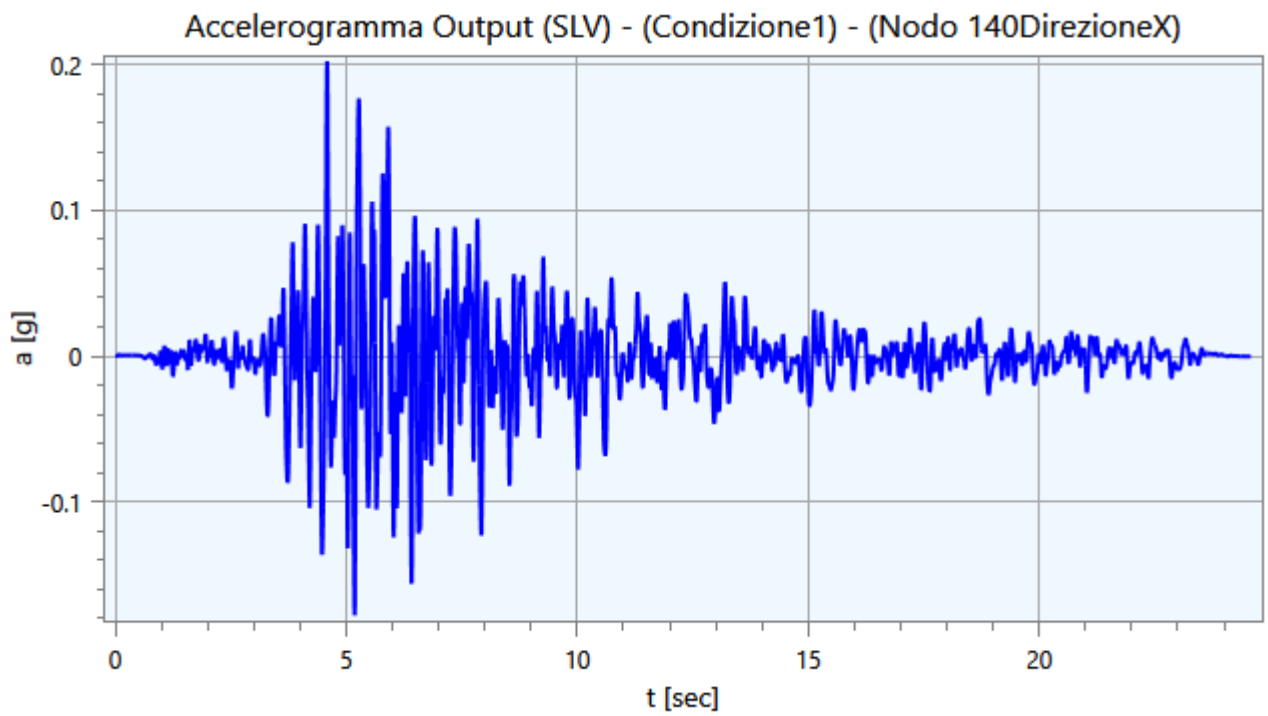
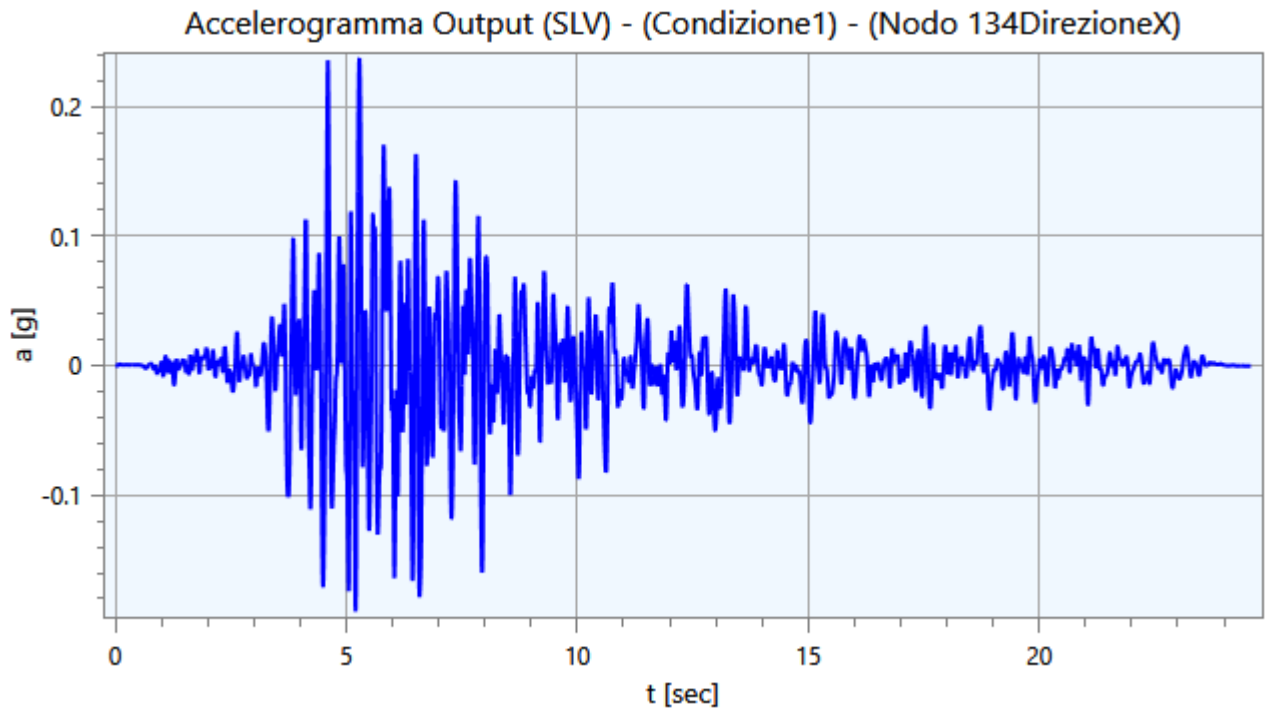
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 109DirezioneX)

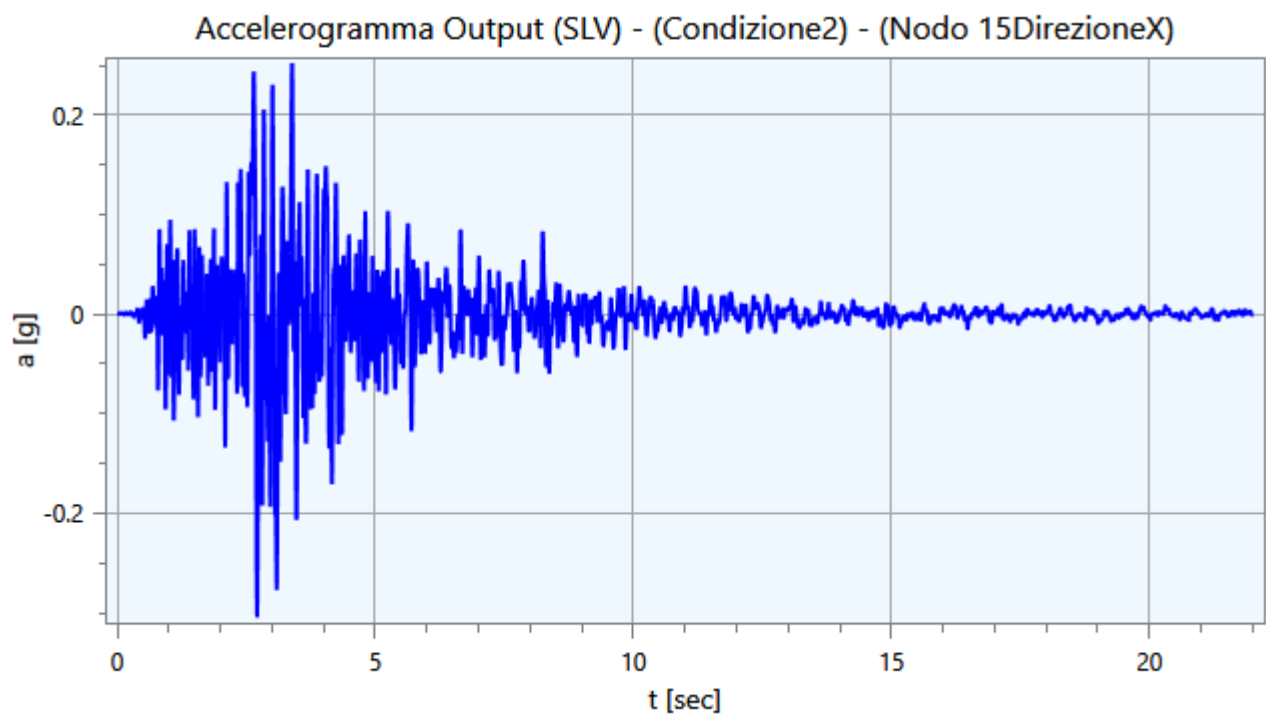
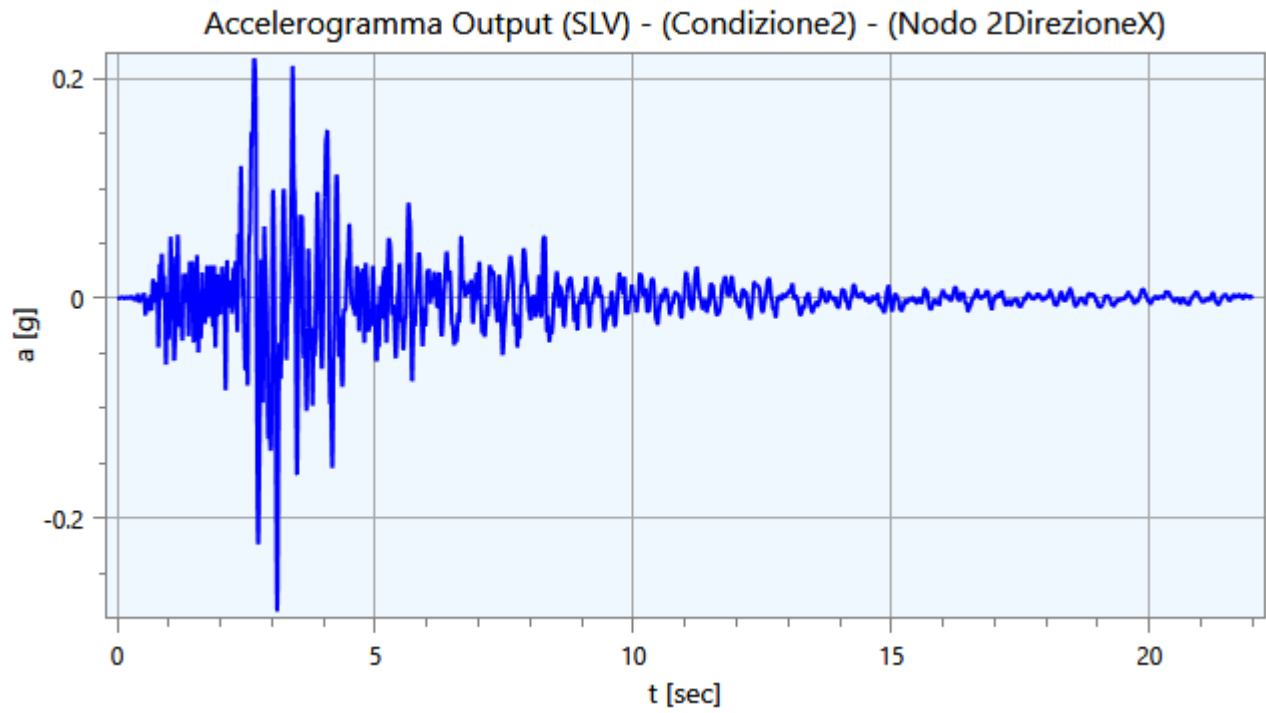


Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 117DirezioneX)

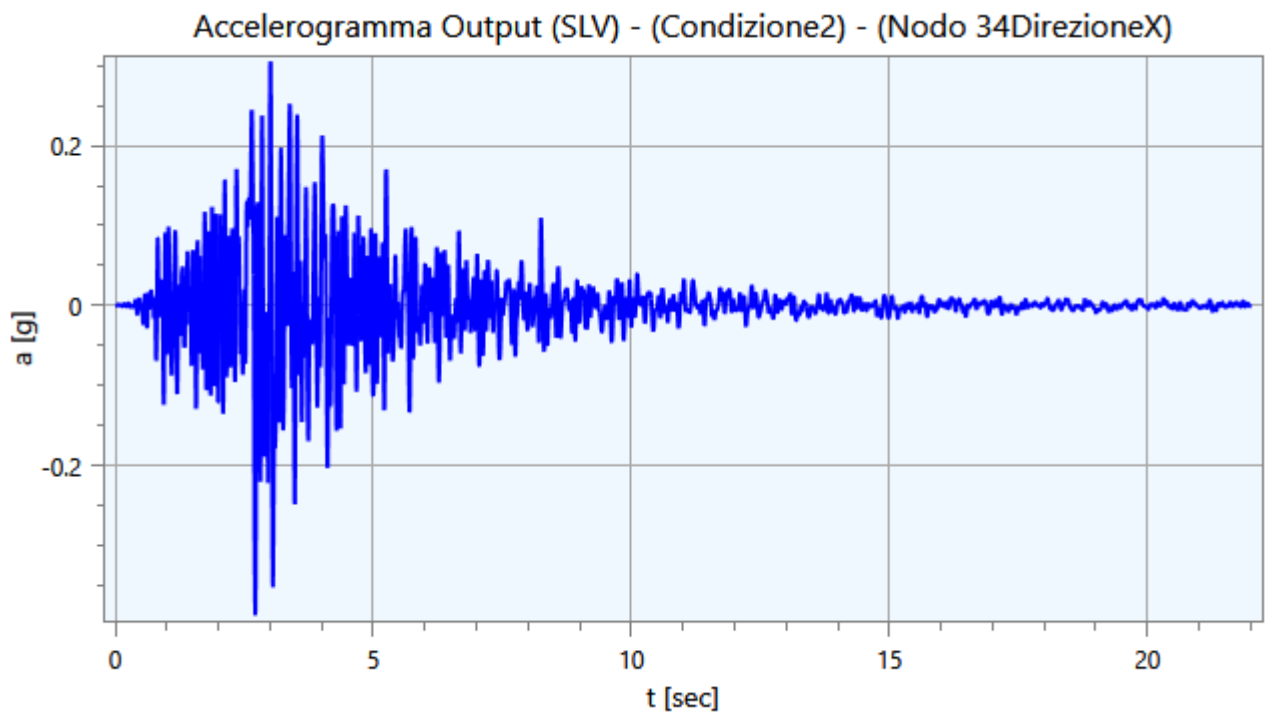
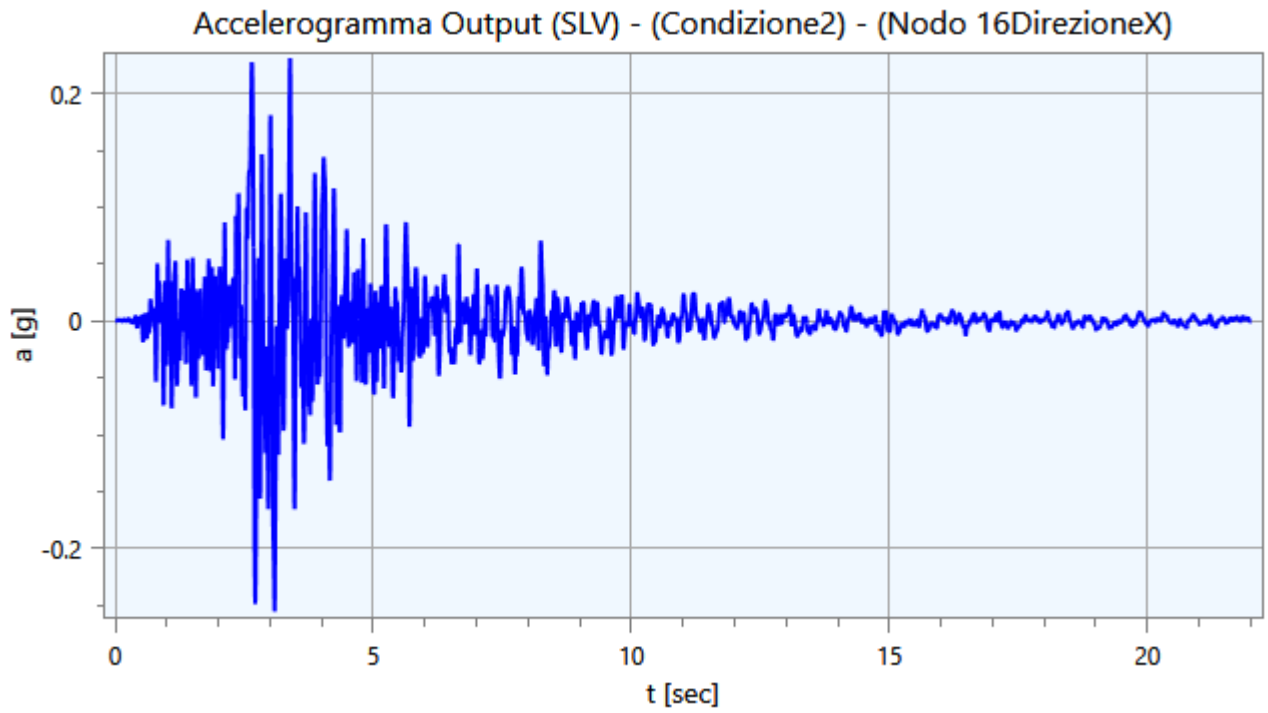




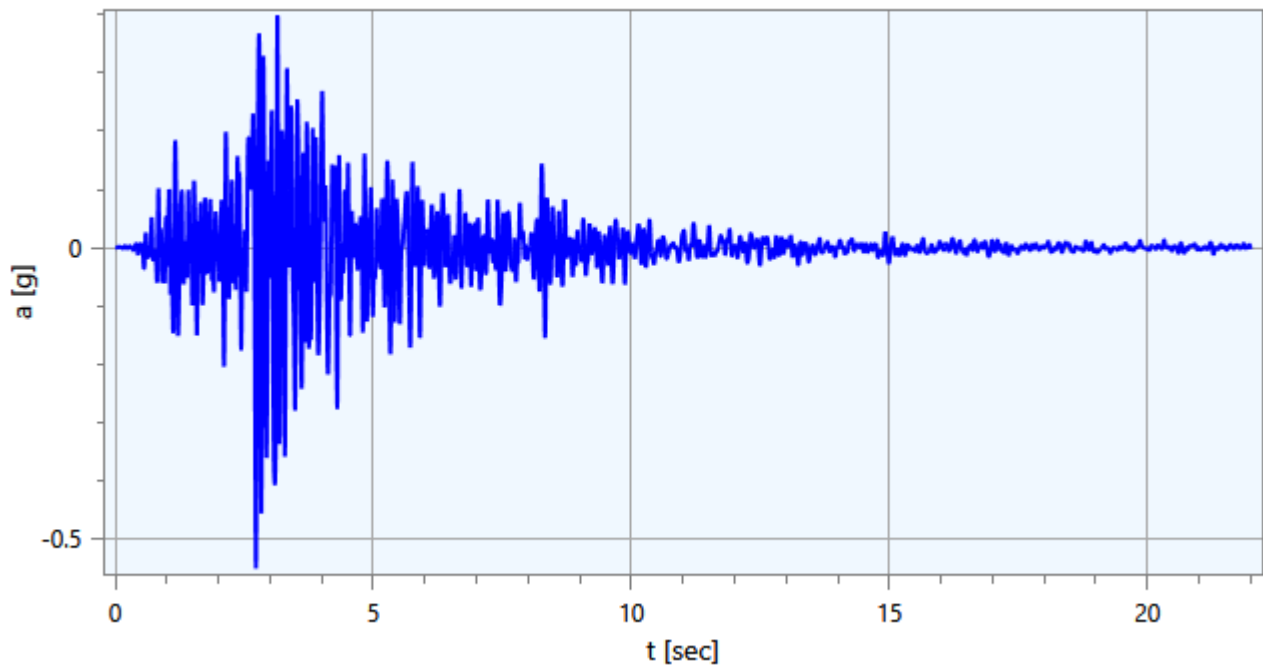




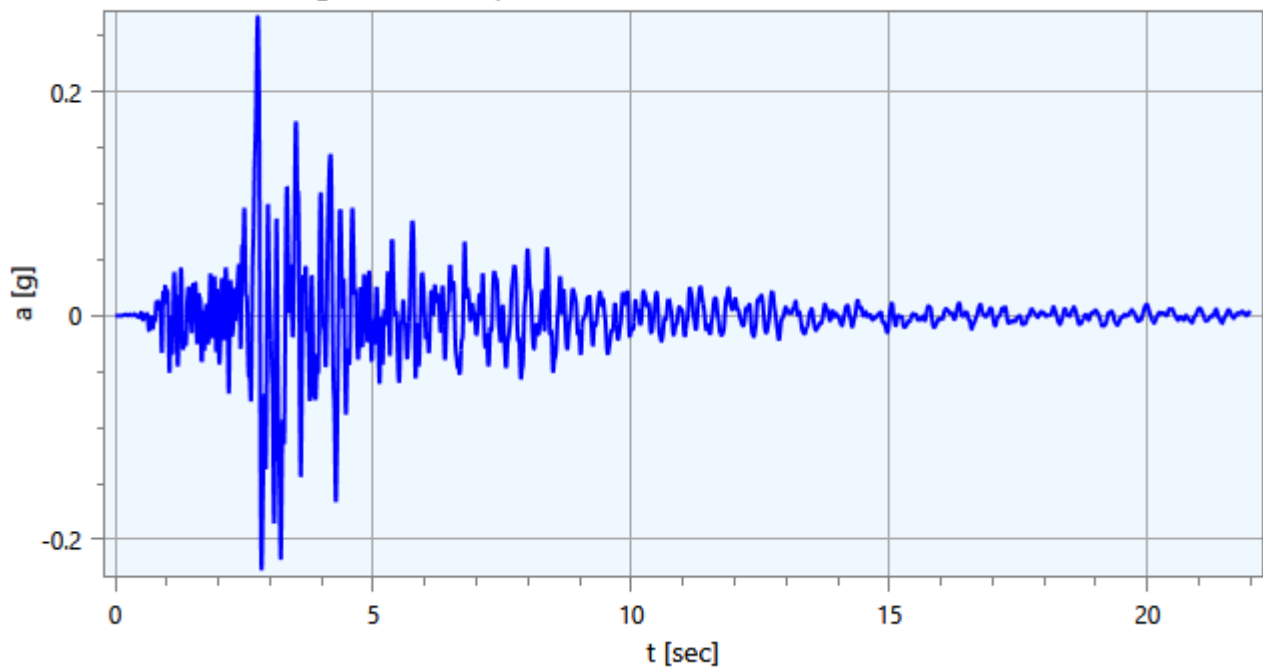


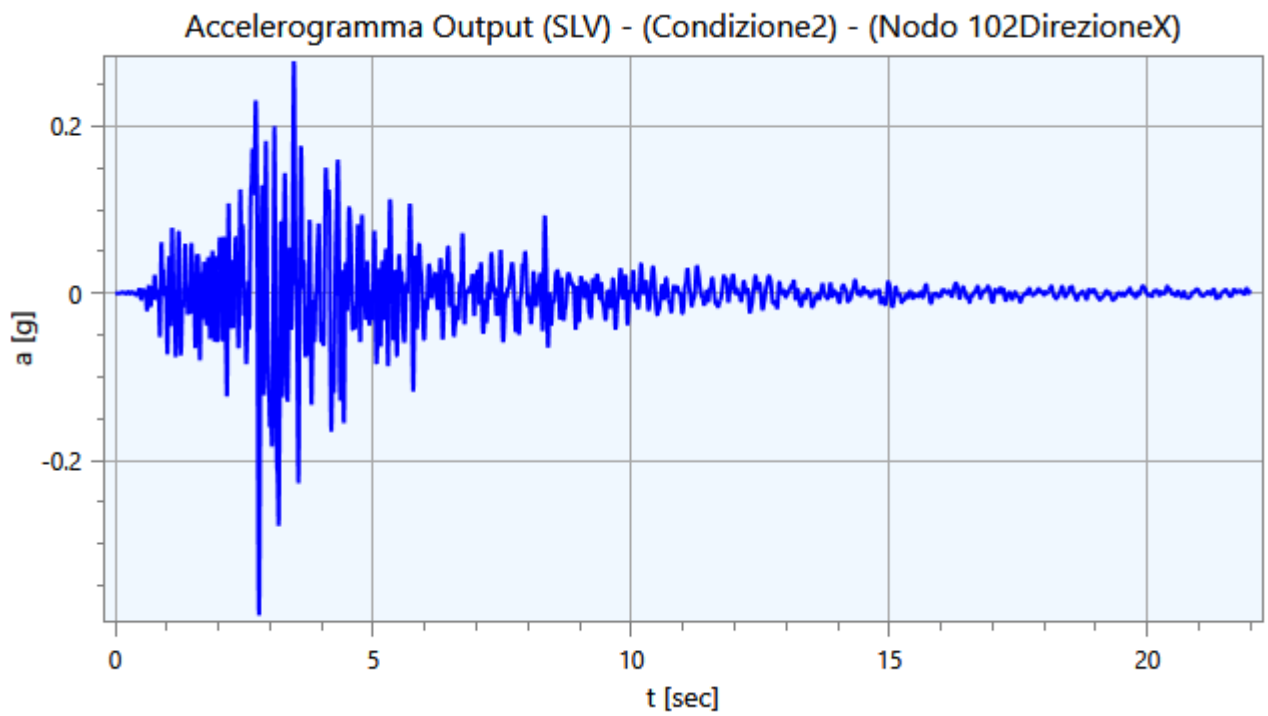
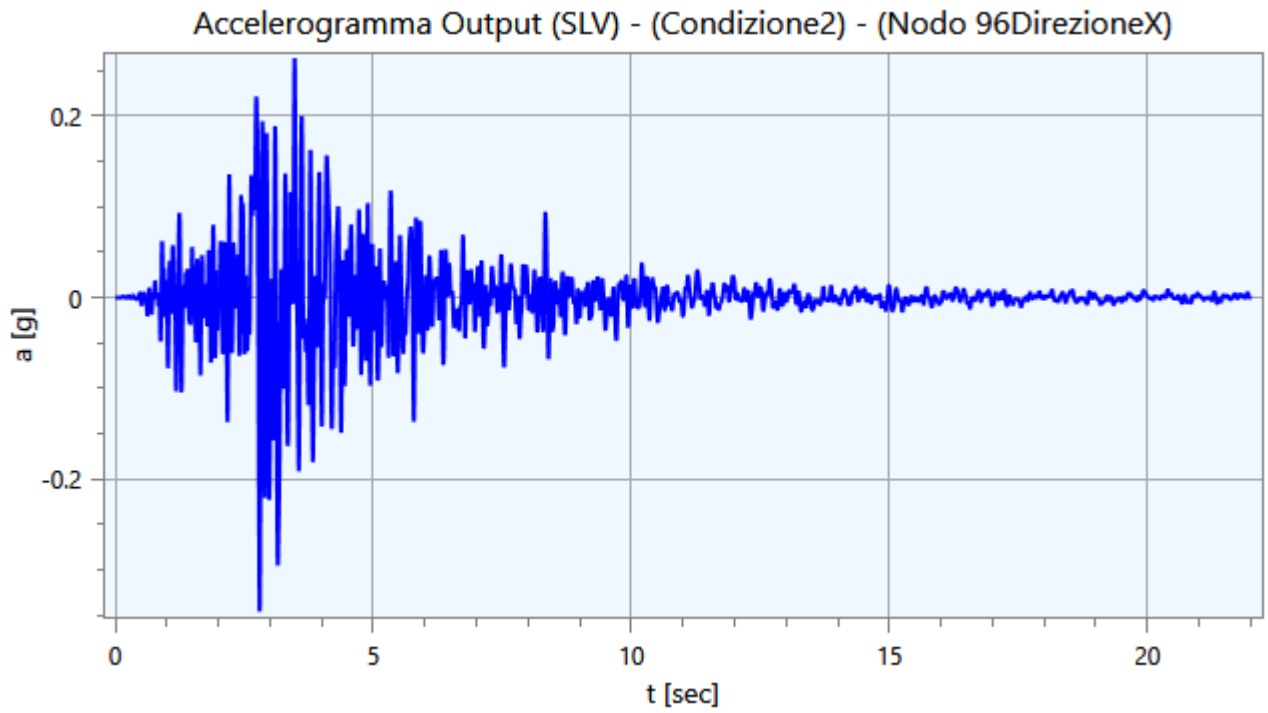


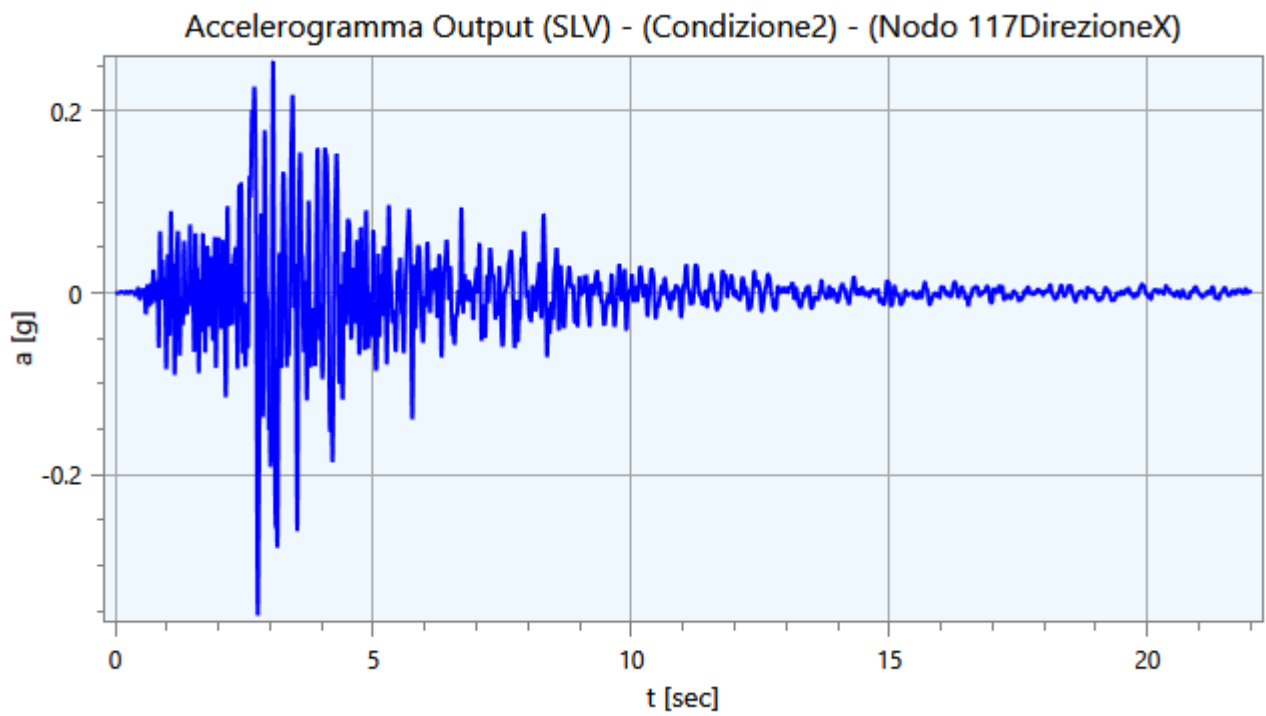
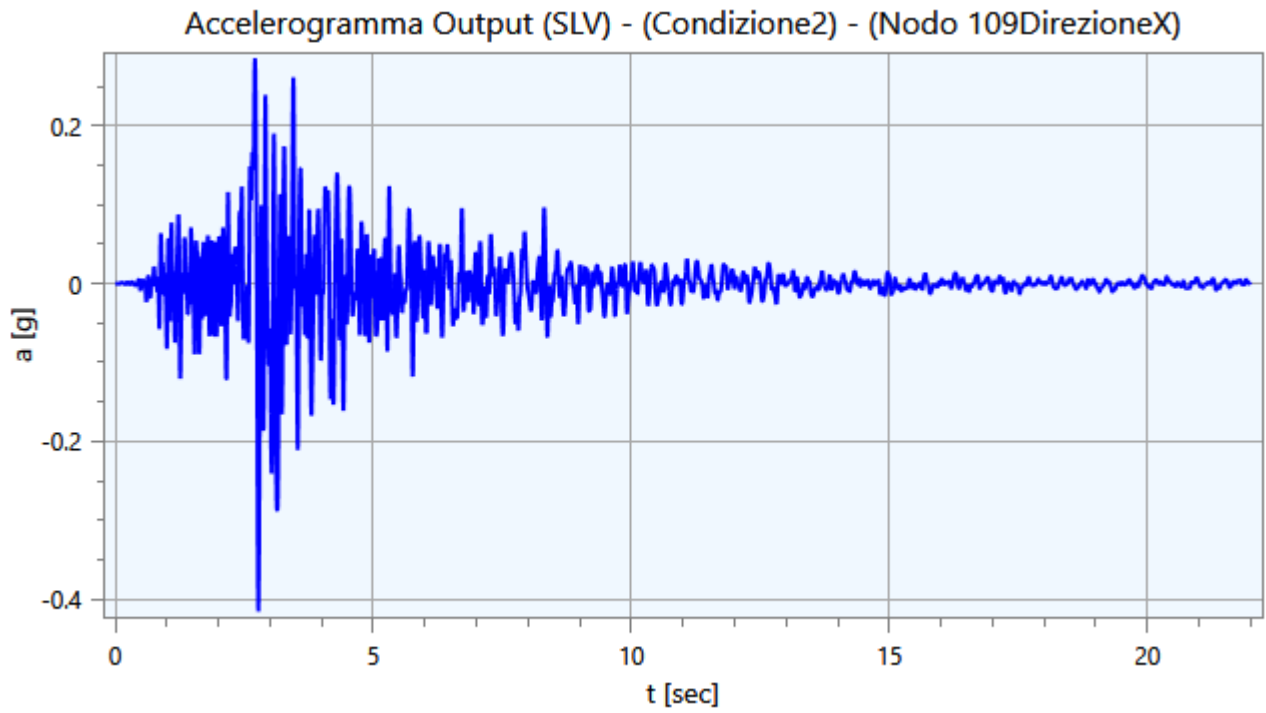
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 40DirezioneX)

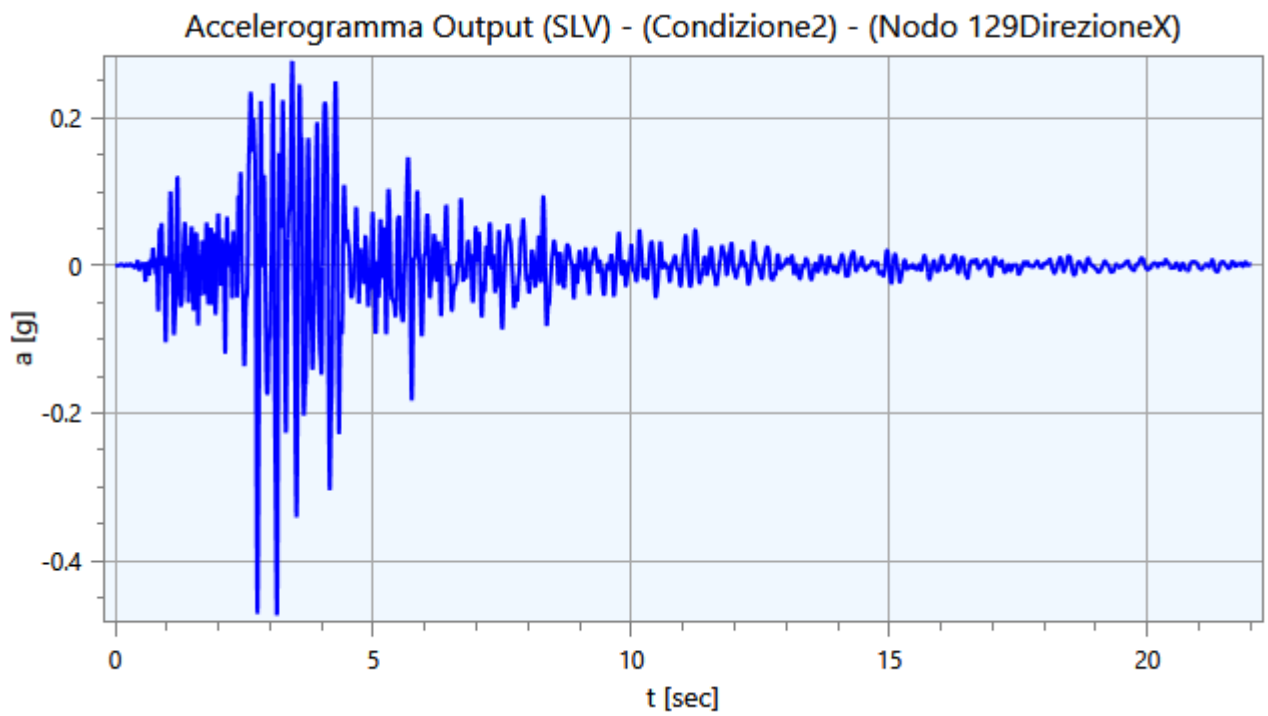
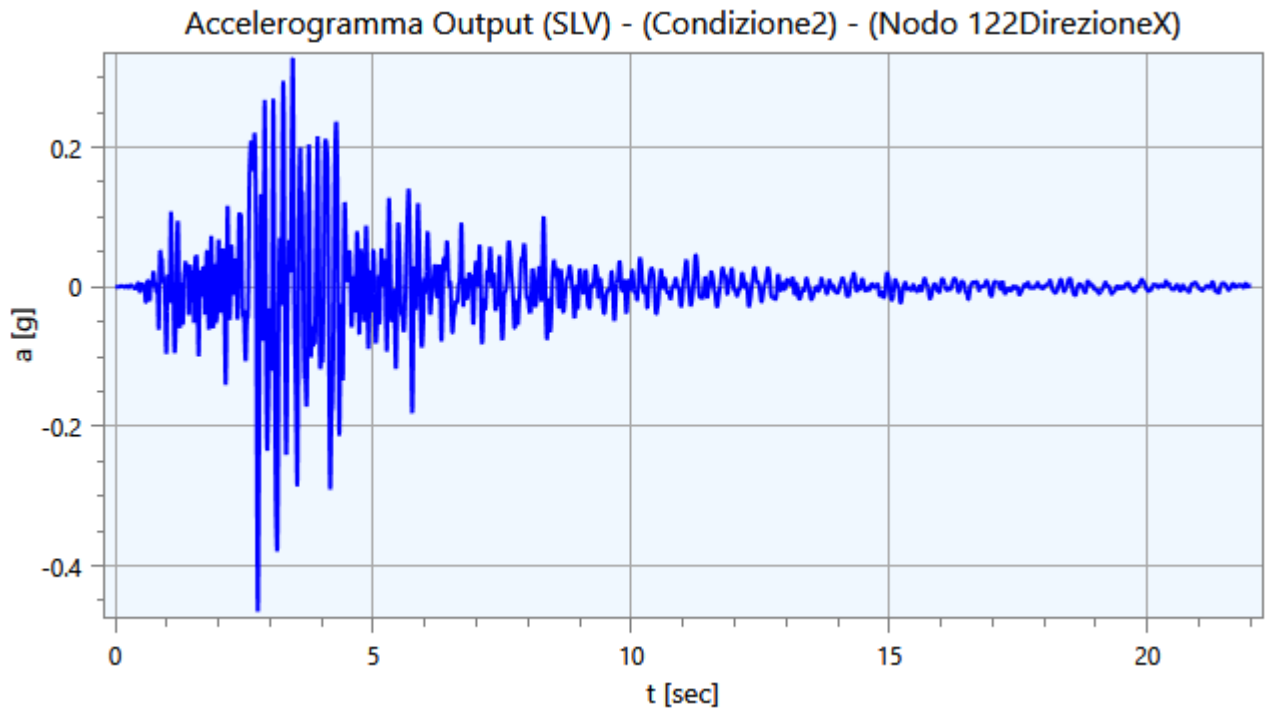


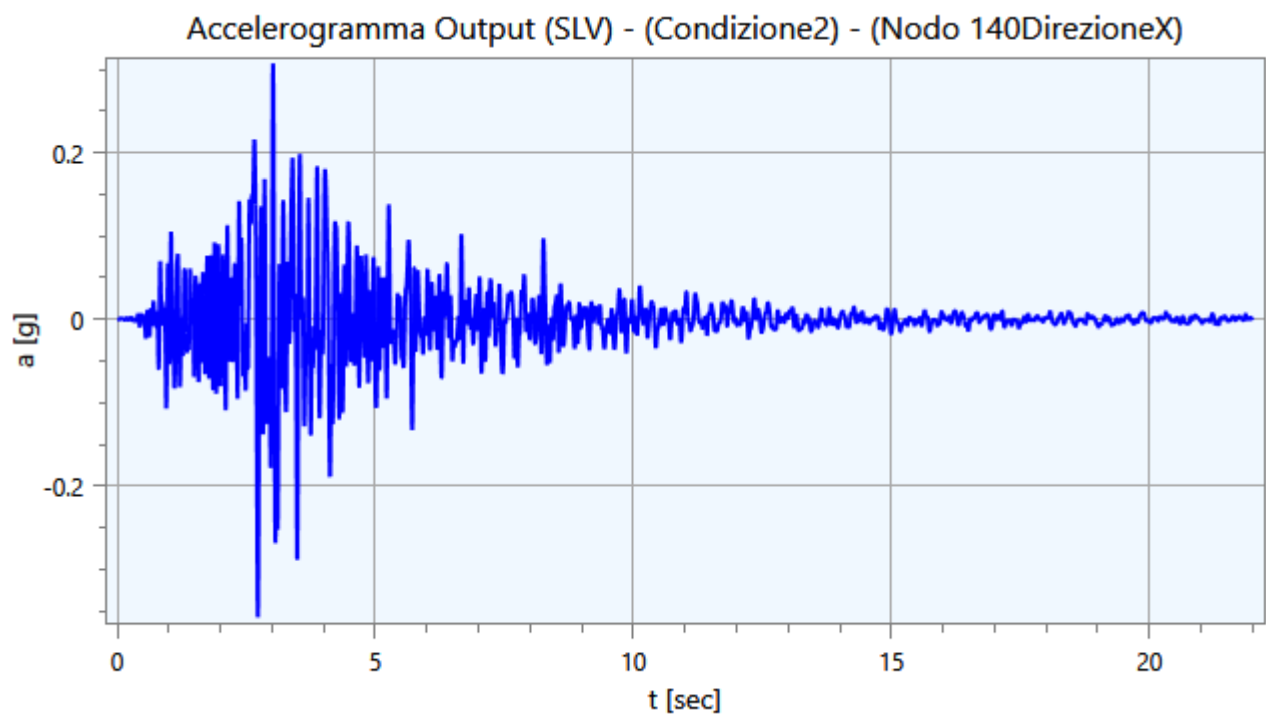
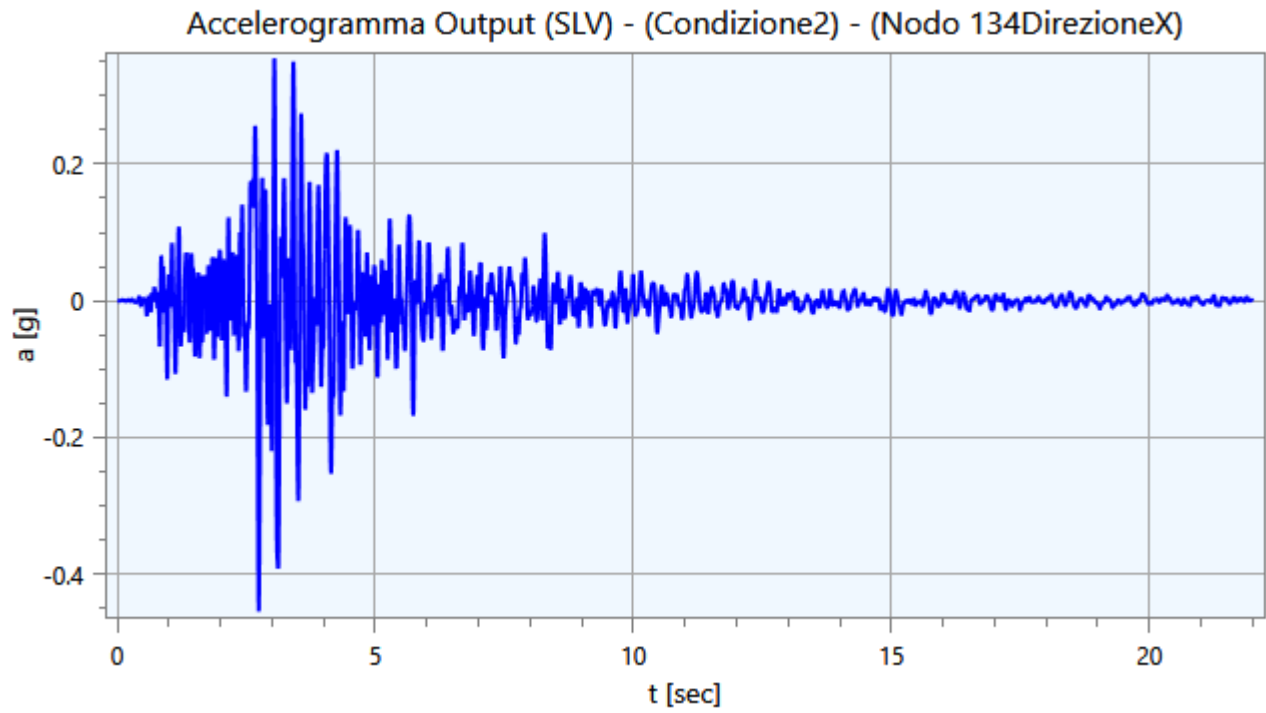
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 81DirezioneX)

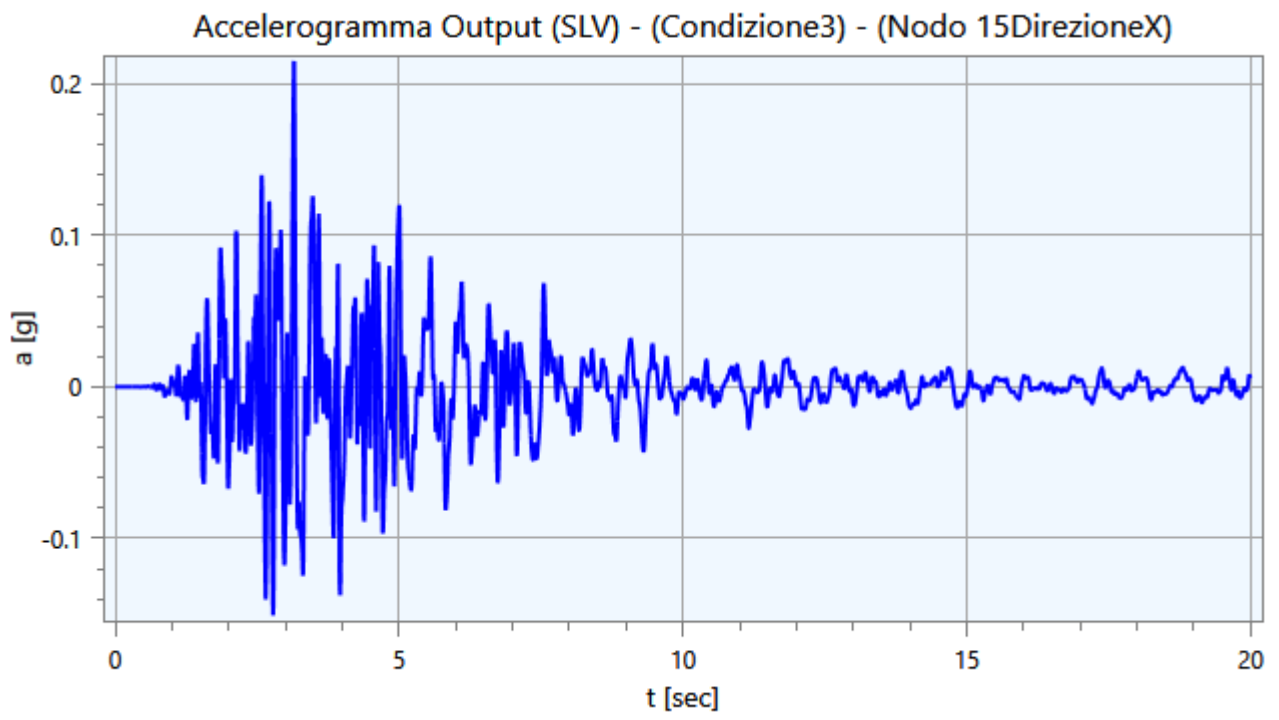
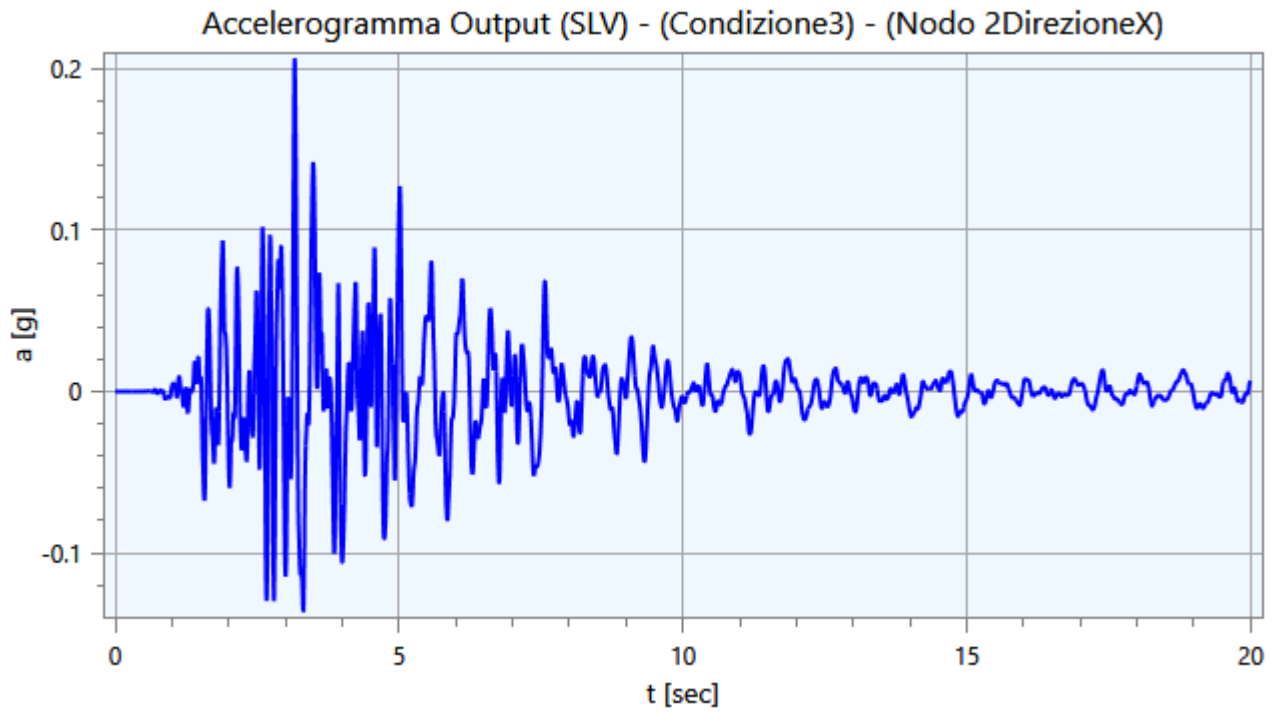


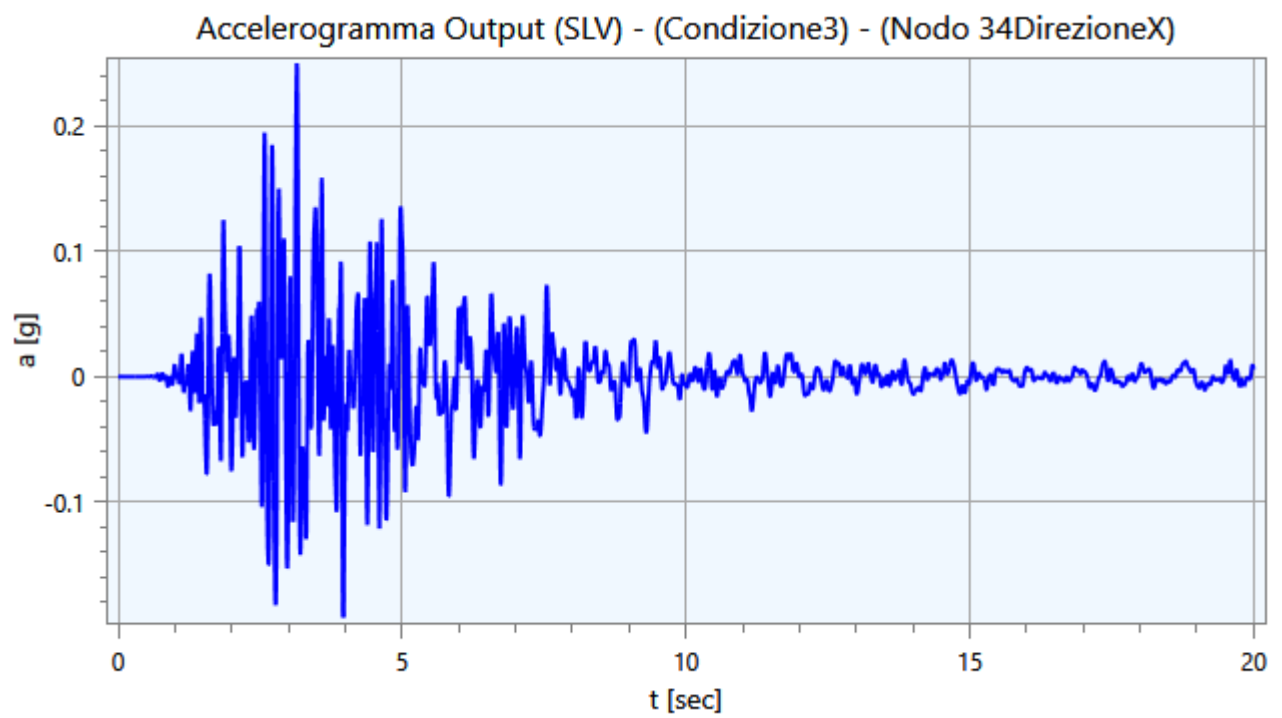
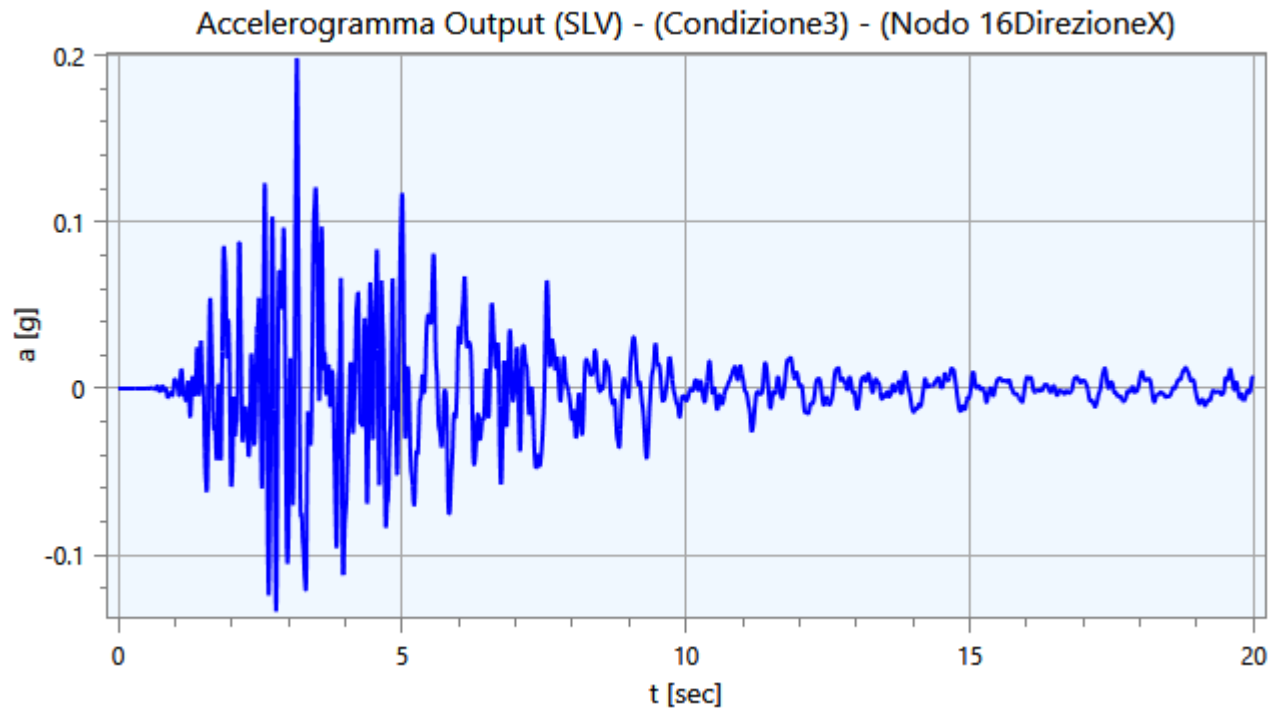




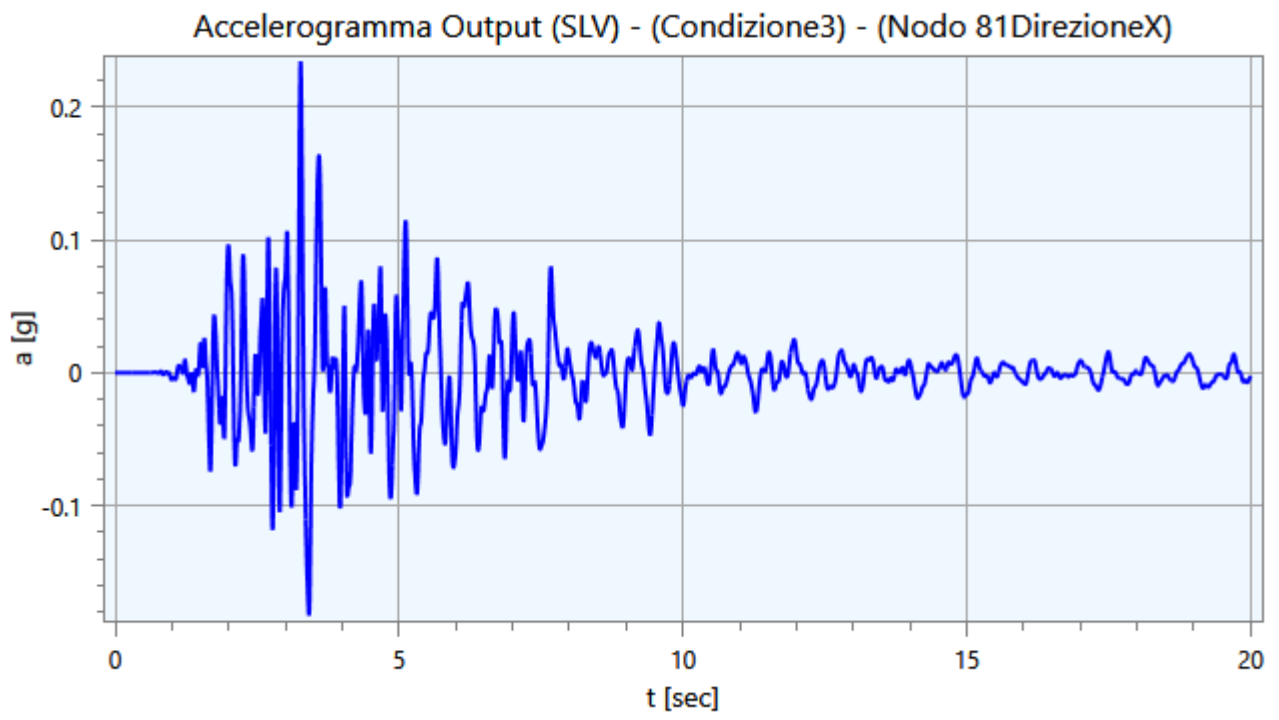
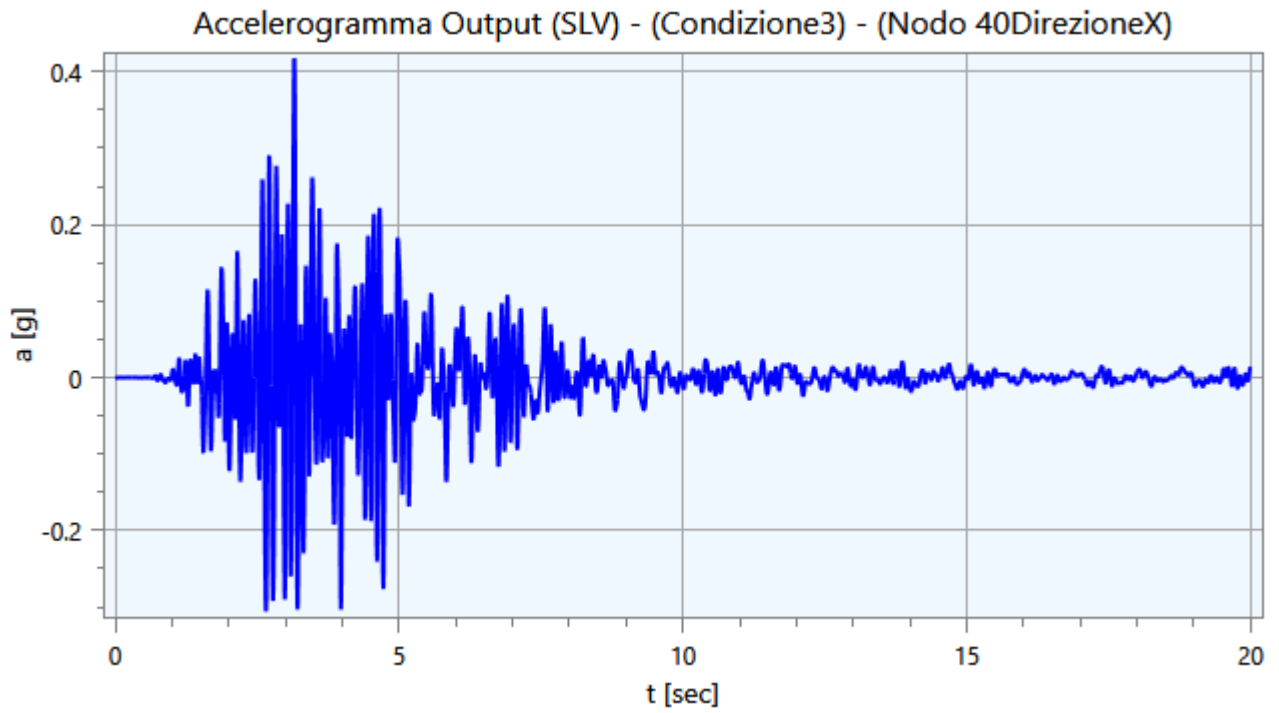


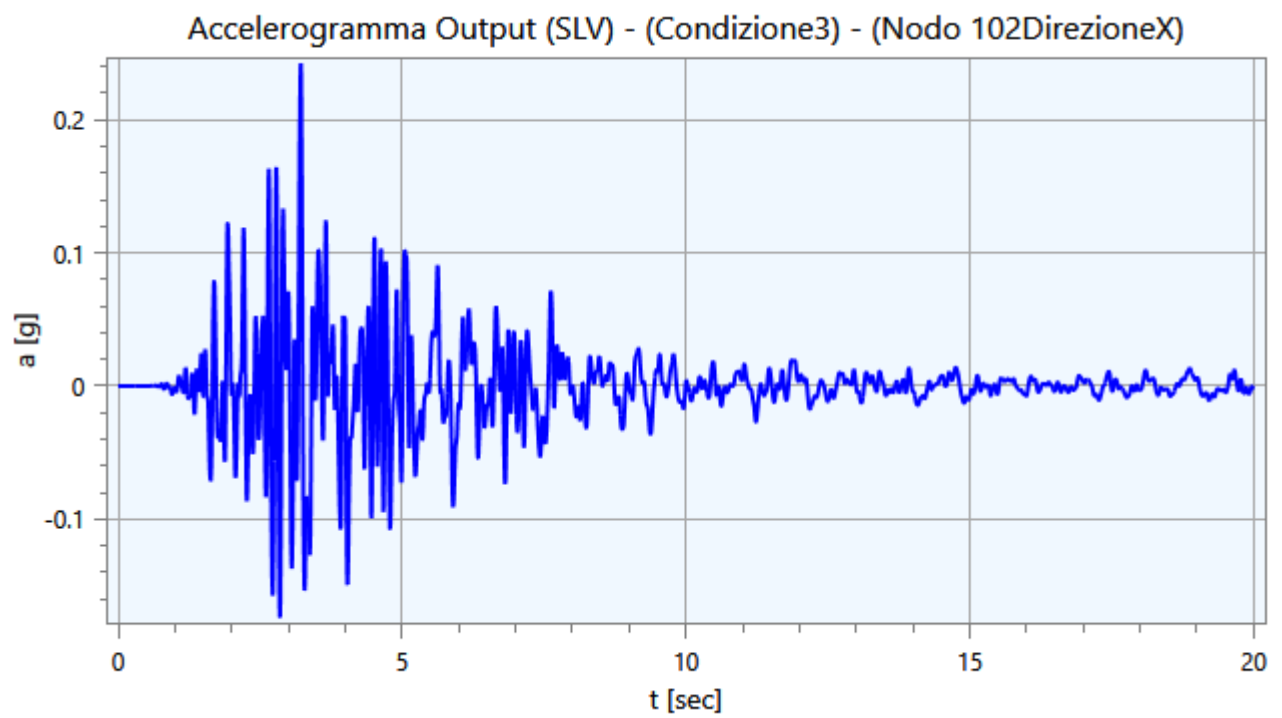
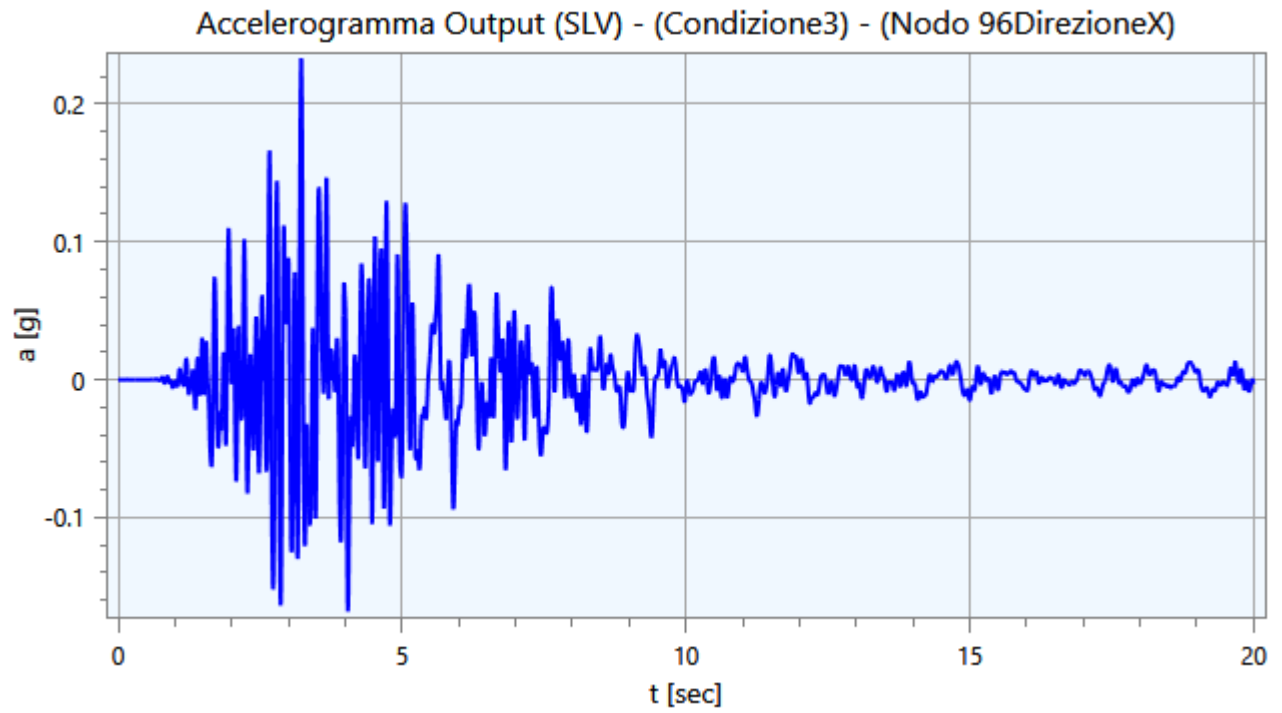


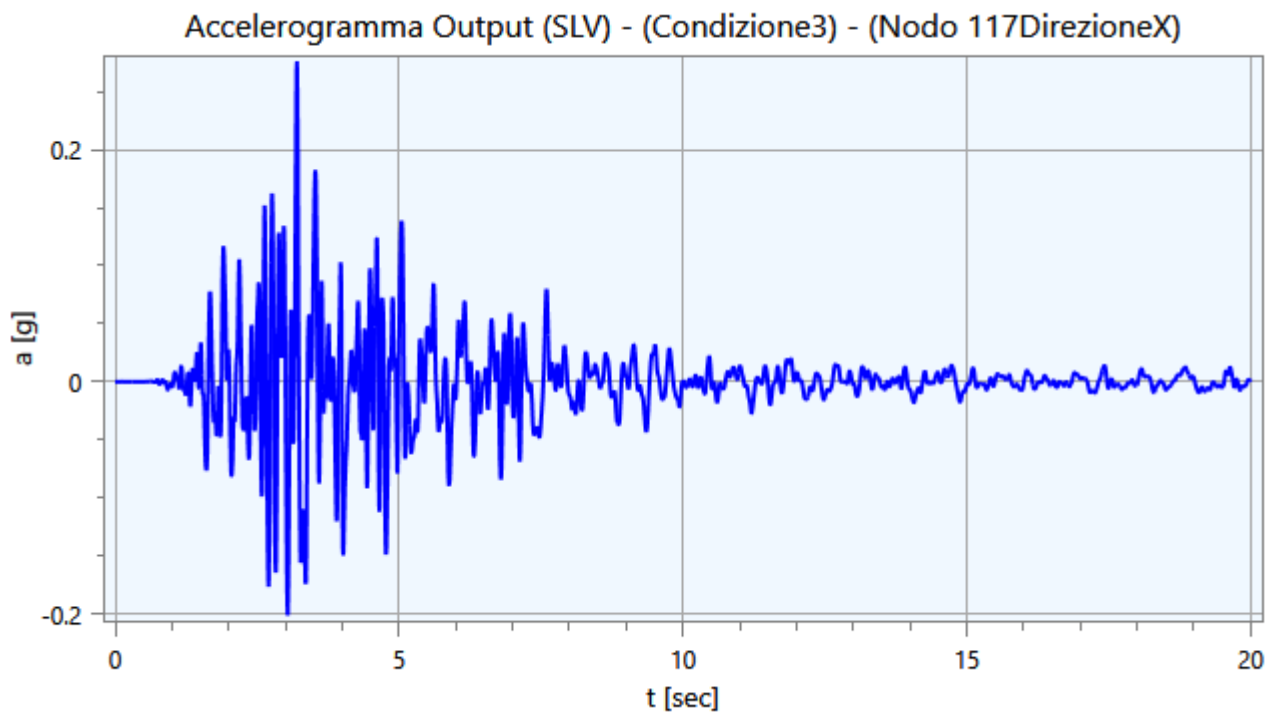
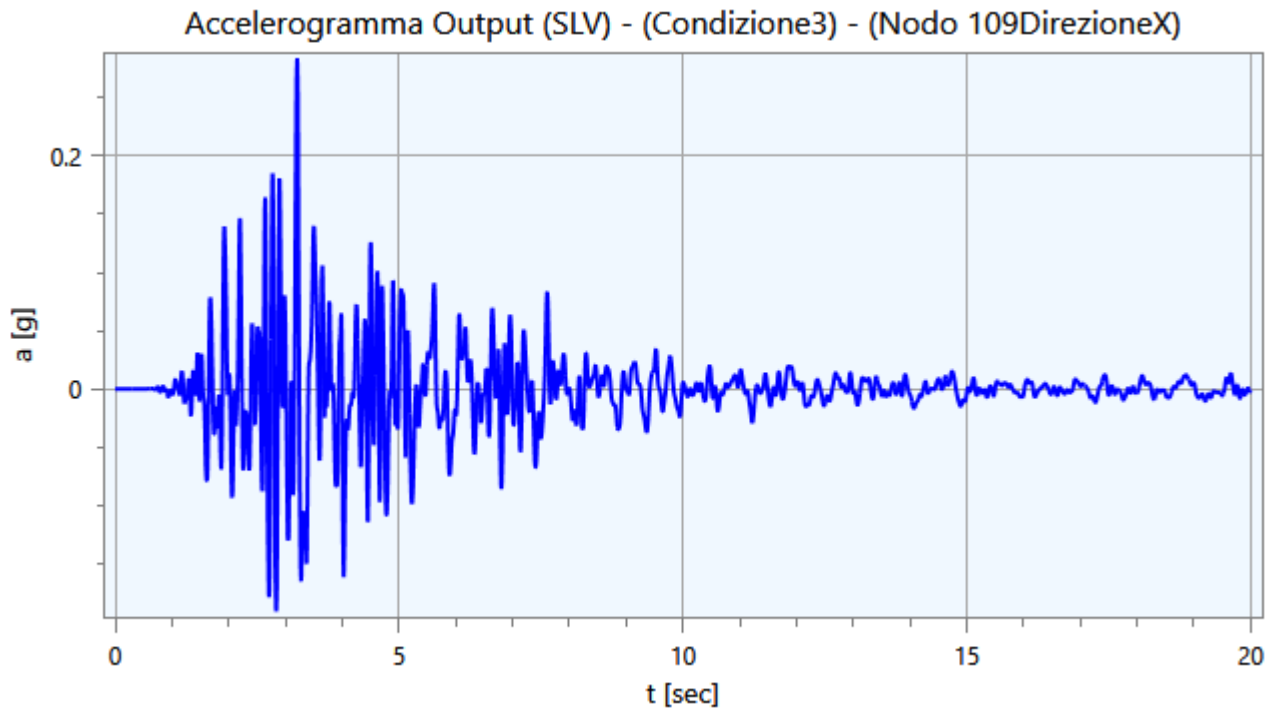


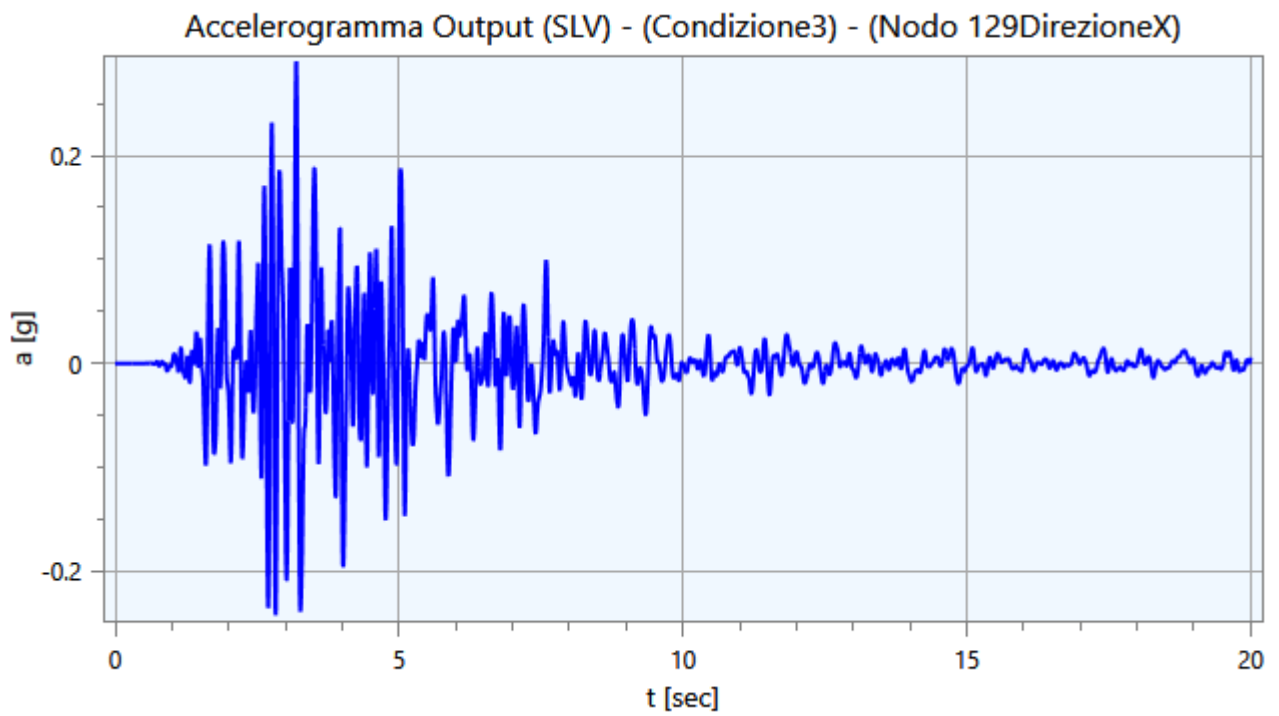
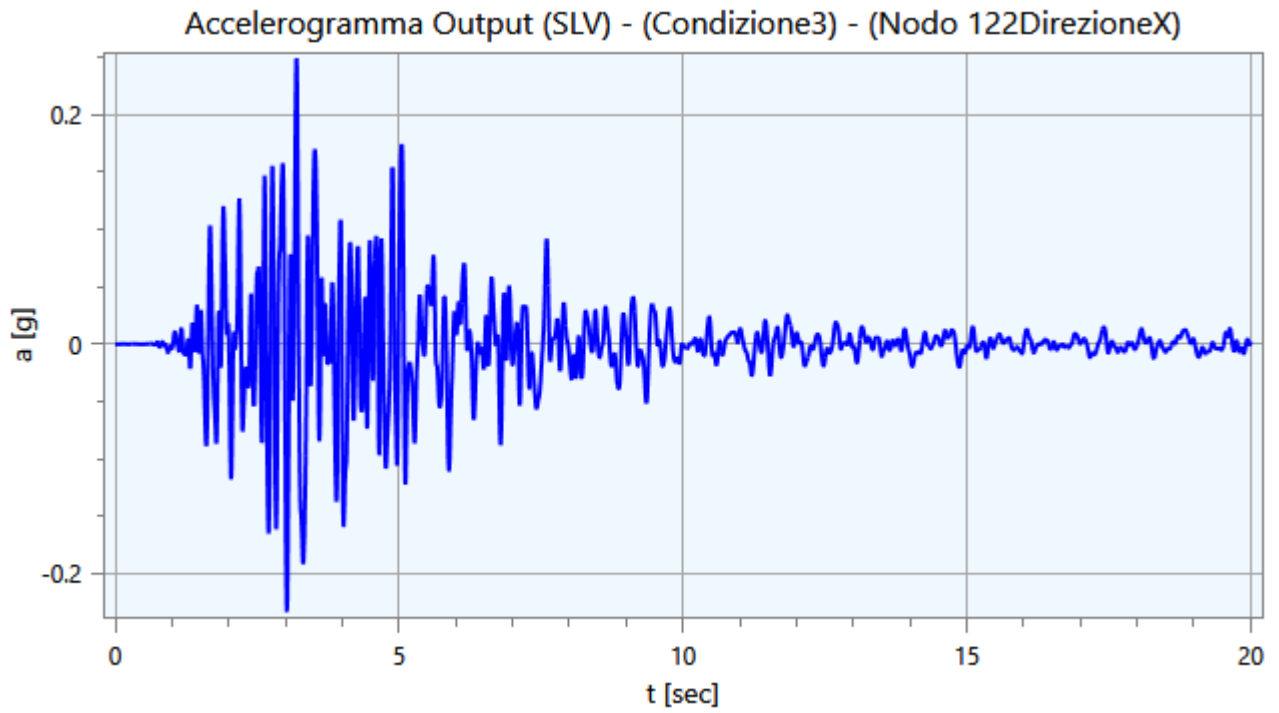


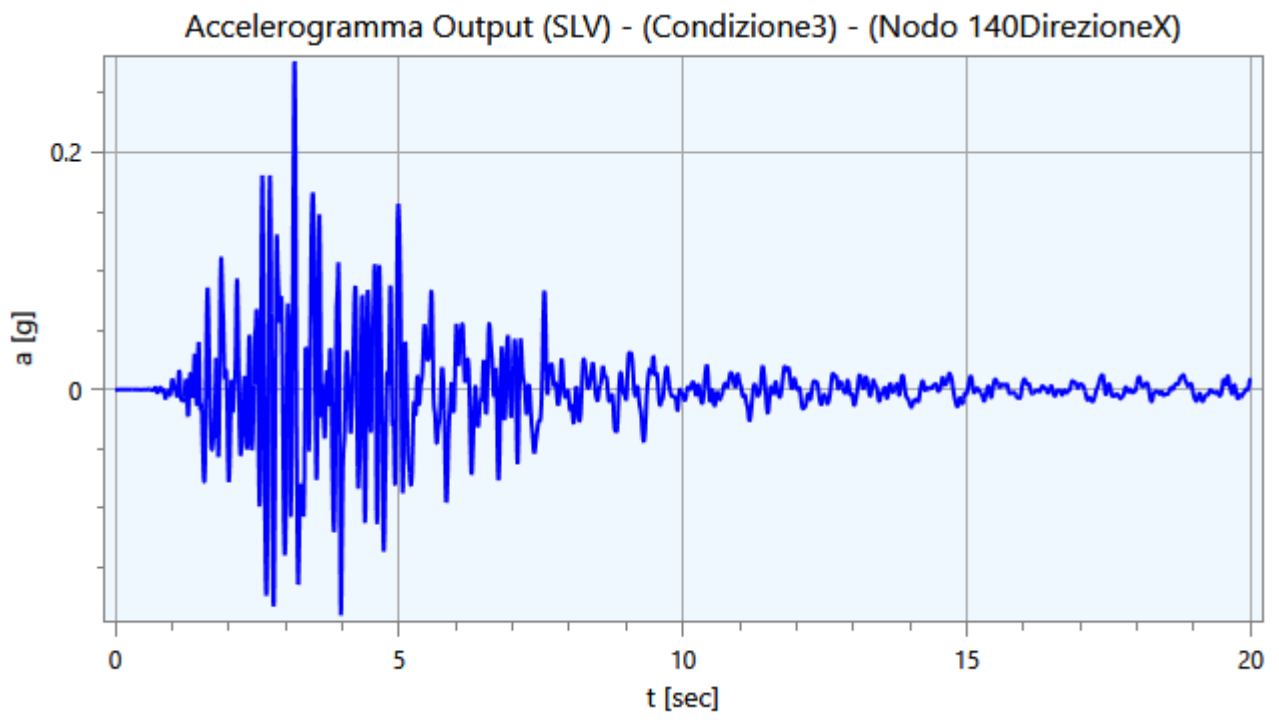
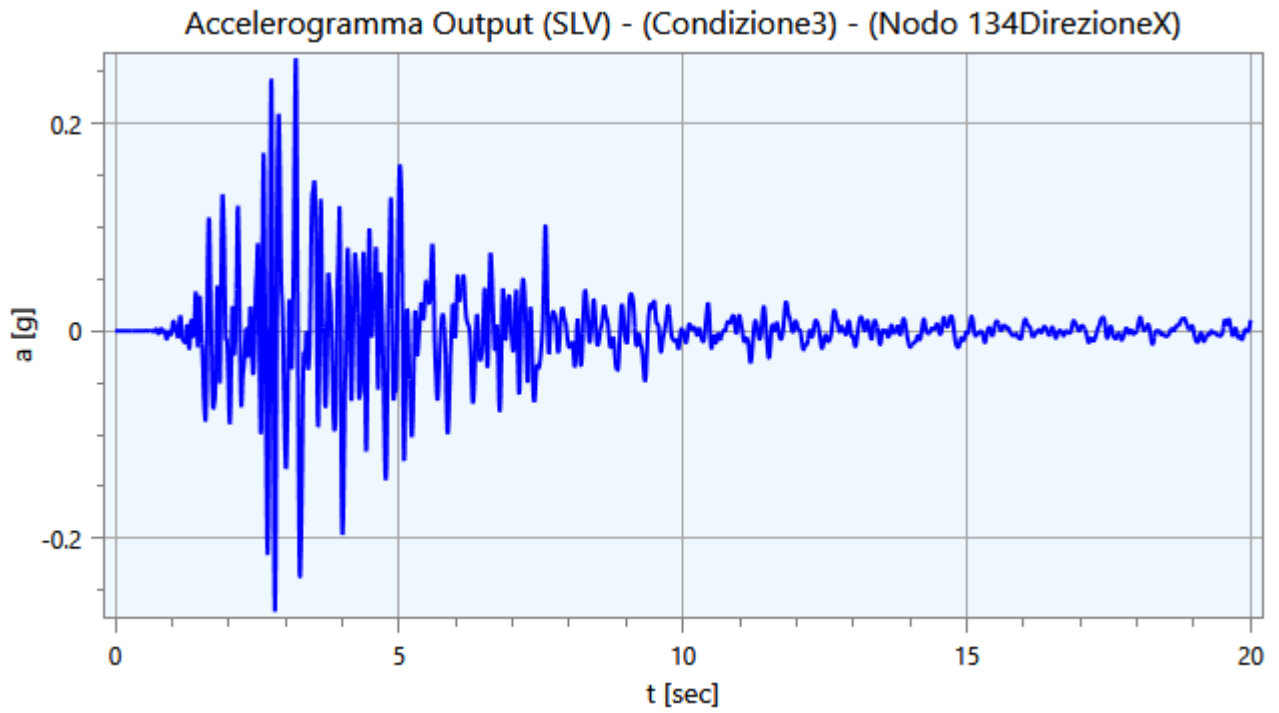




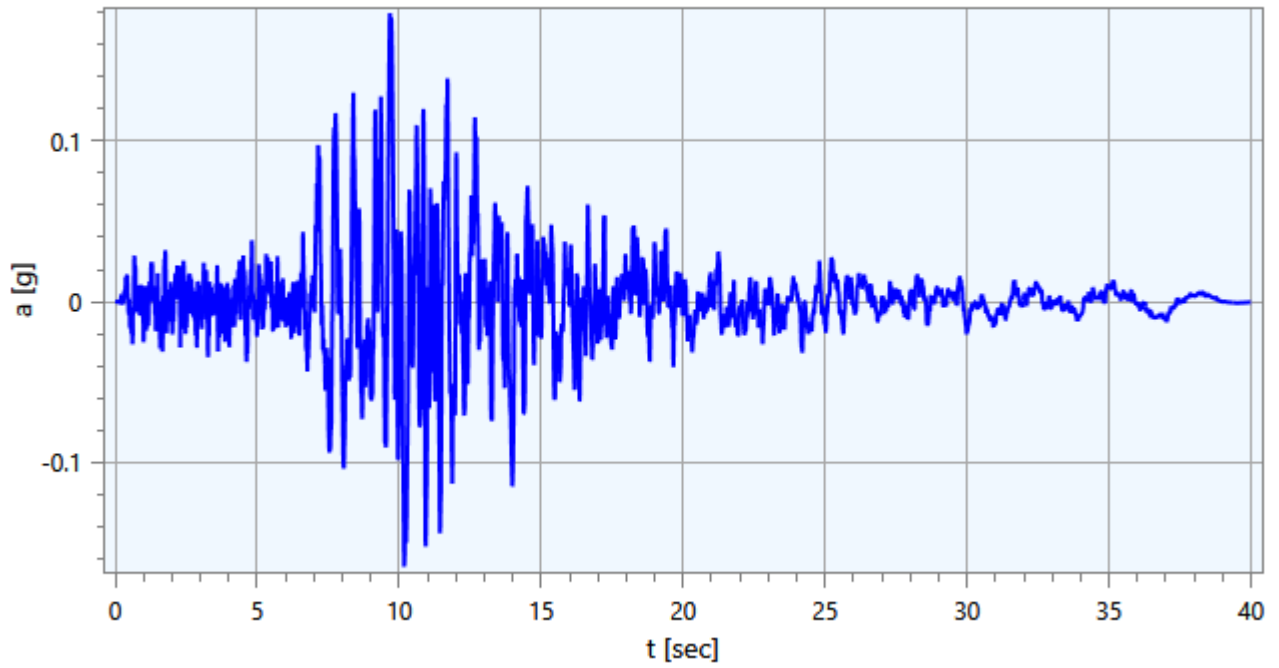




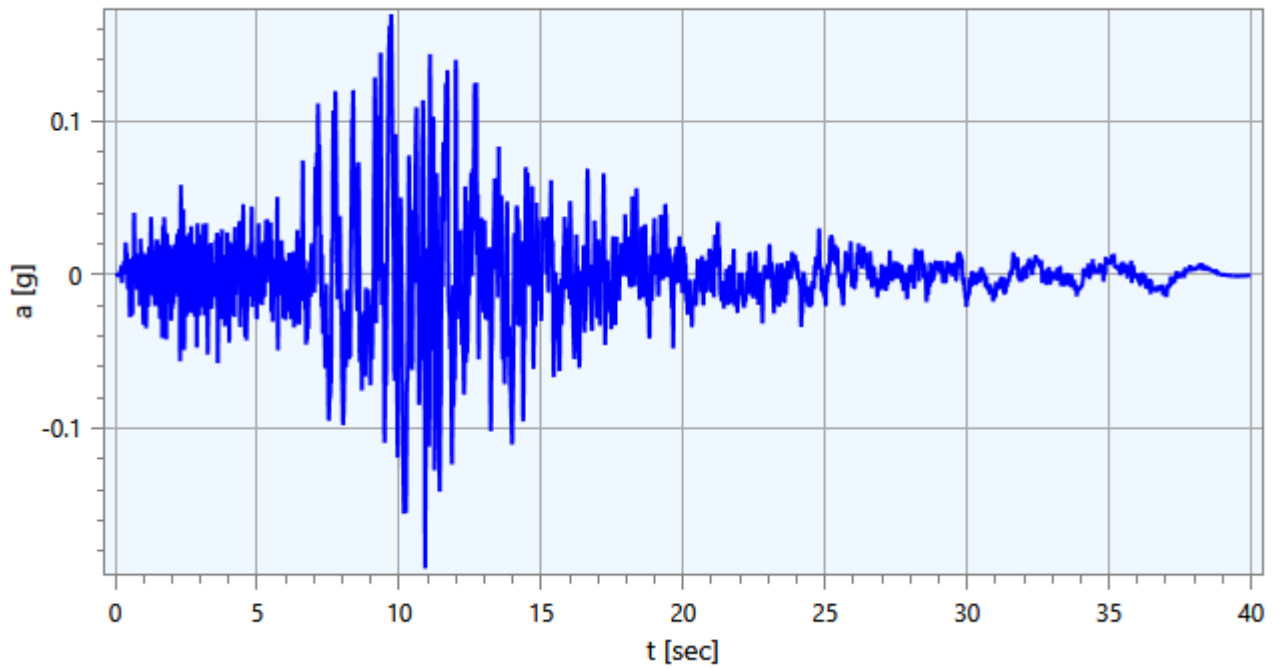




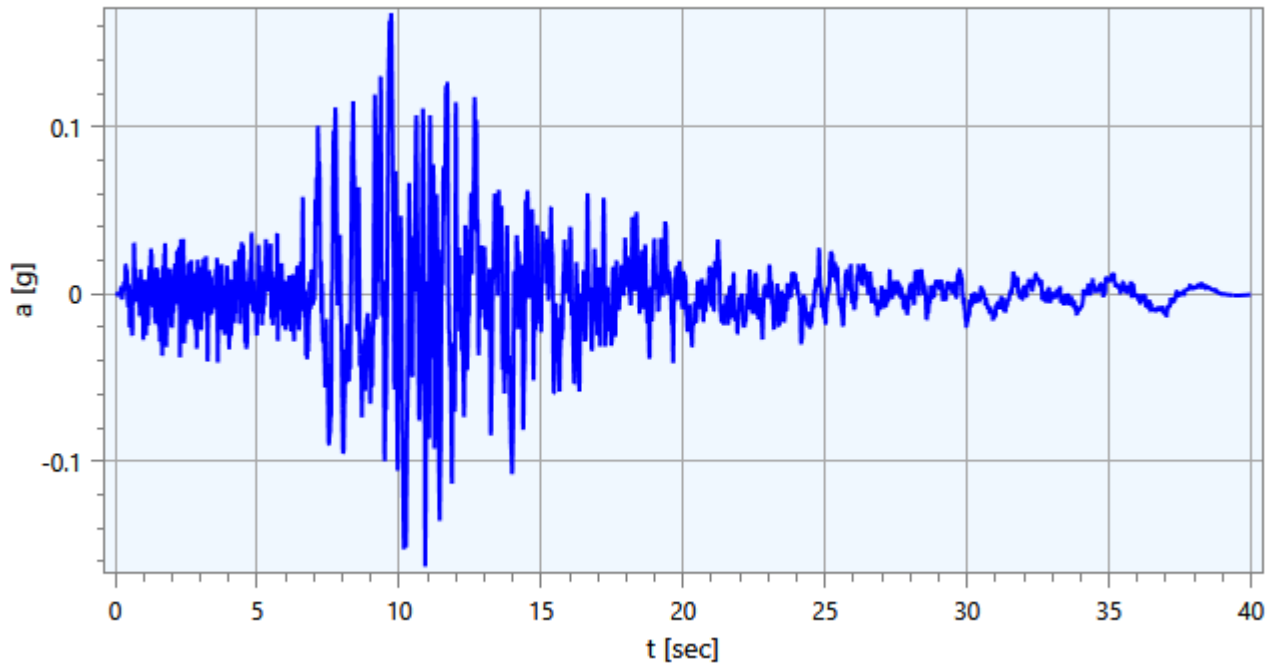
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 2DirezioneX)



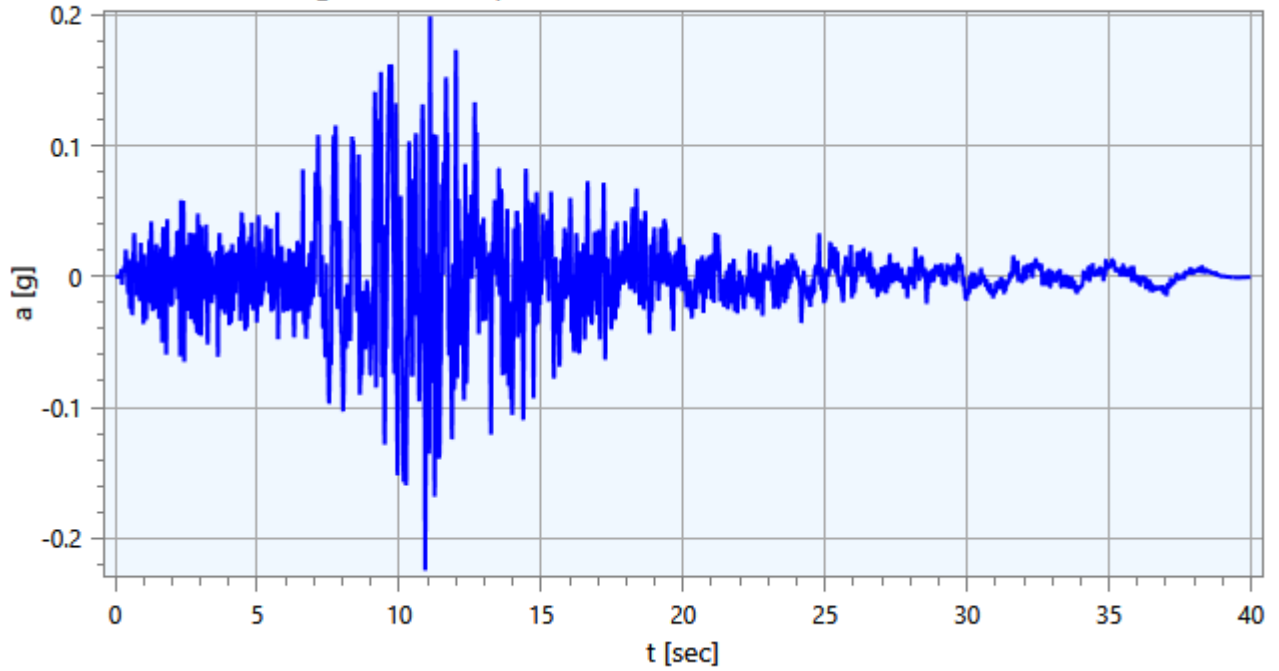
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 15DirezioneX)



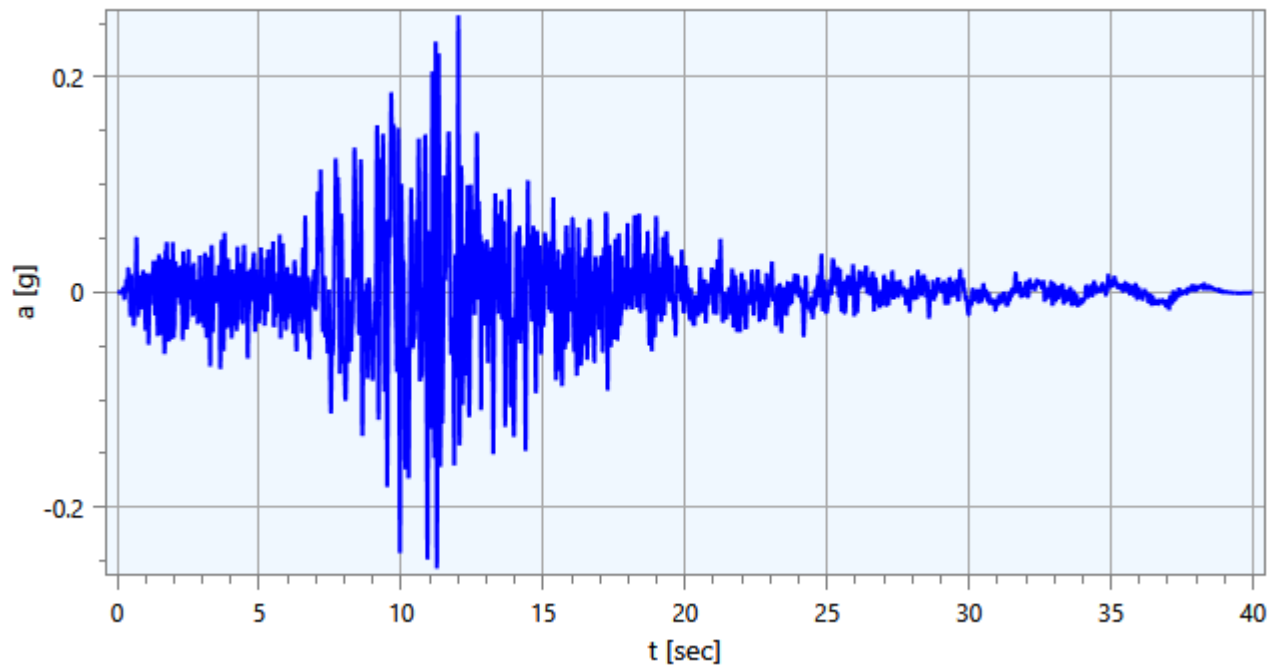
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 16DirezioneX)



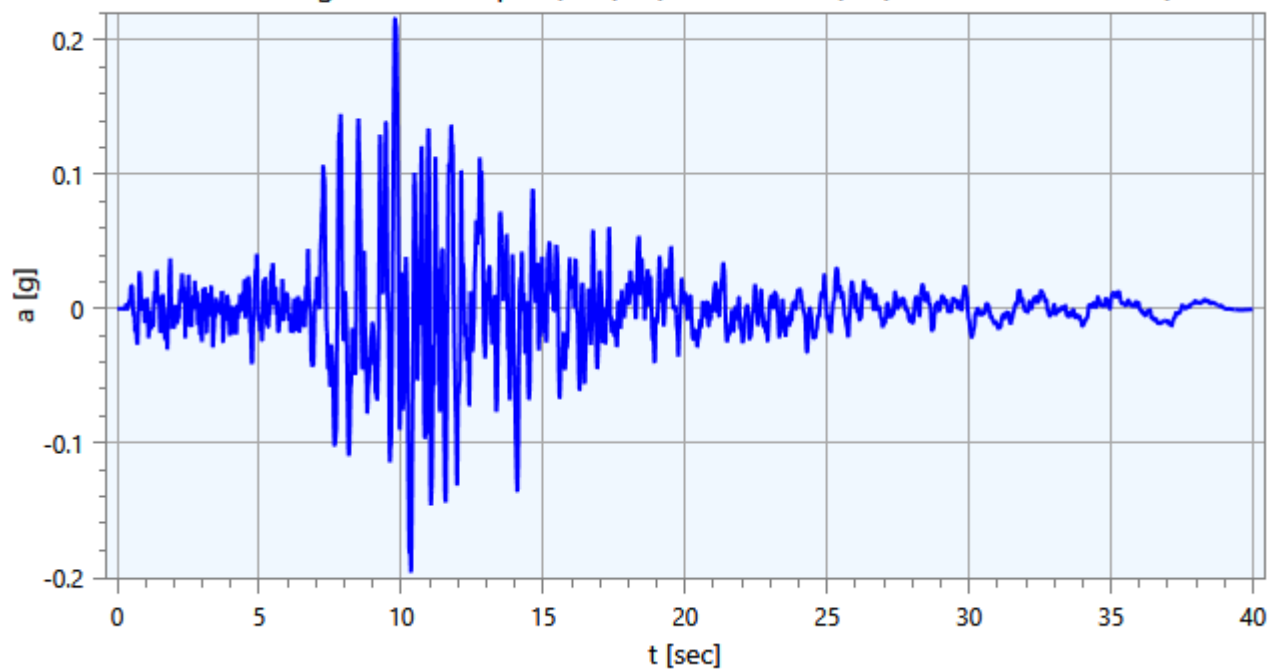
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 34DirezioneX)



Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 40DirezioneX)

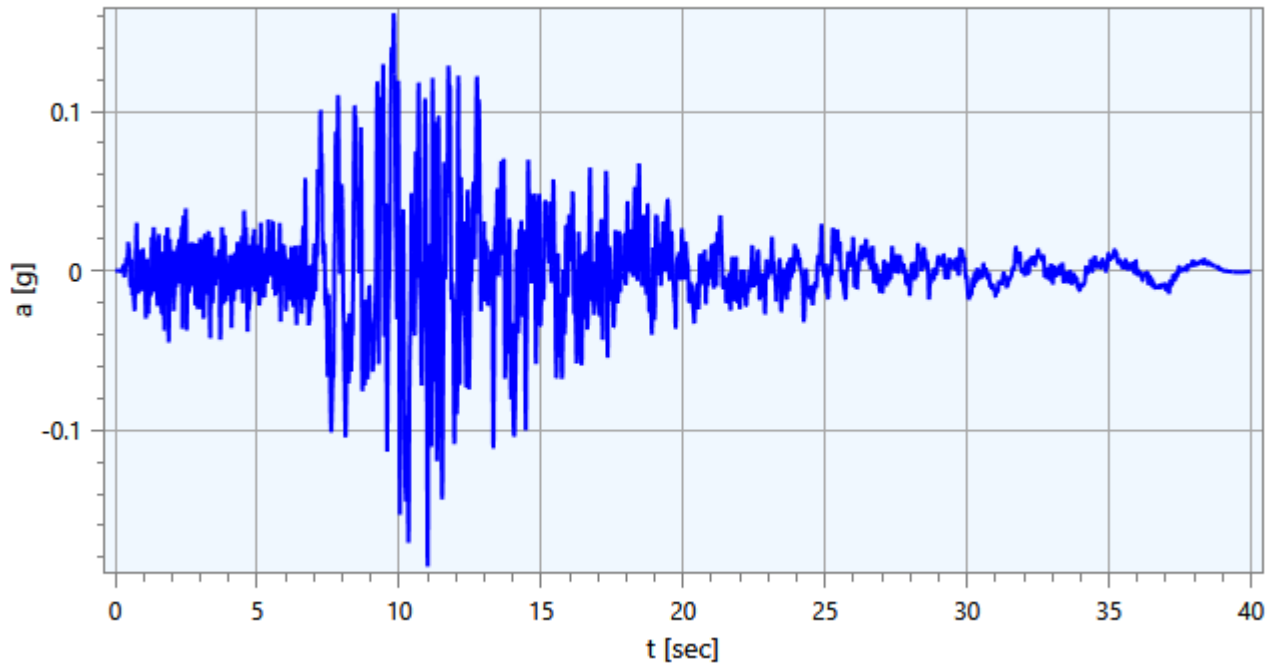


Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 81DirezioneX)

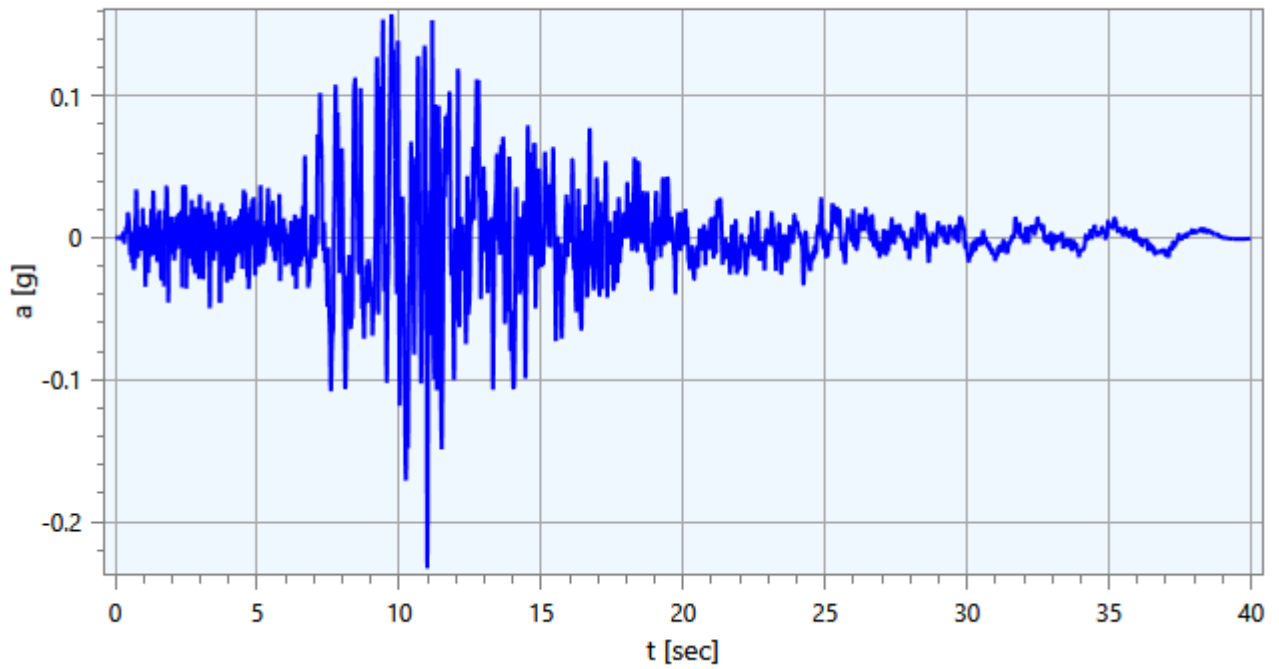




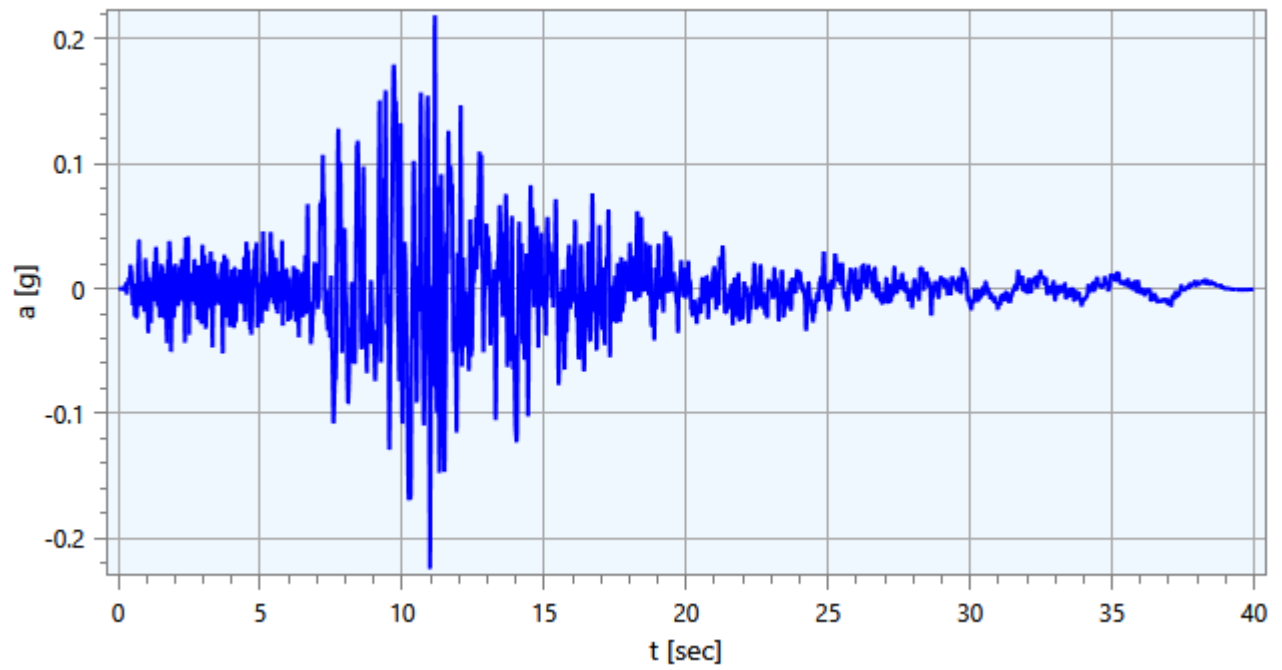
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 96DirezioneX)



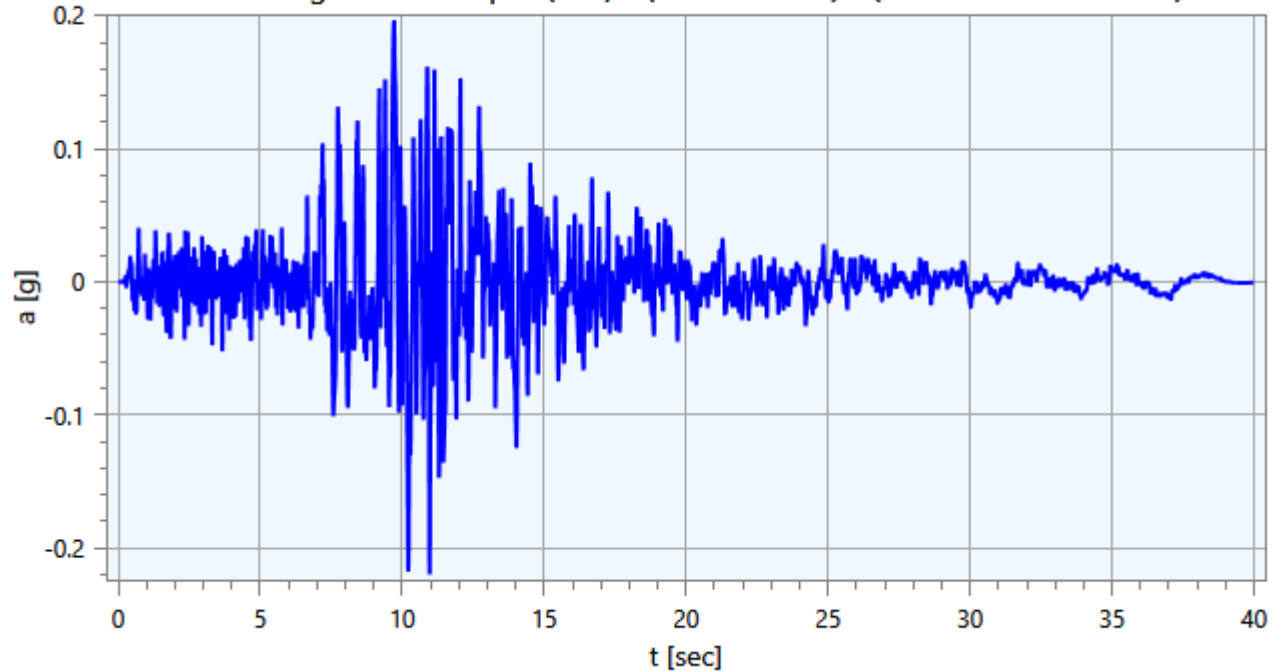
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 102DirezioneX)

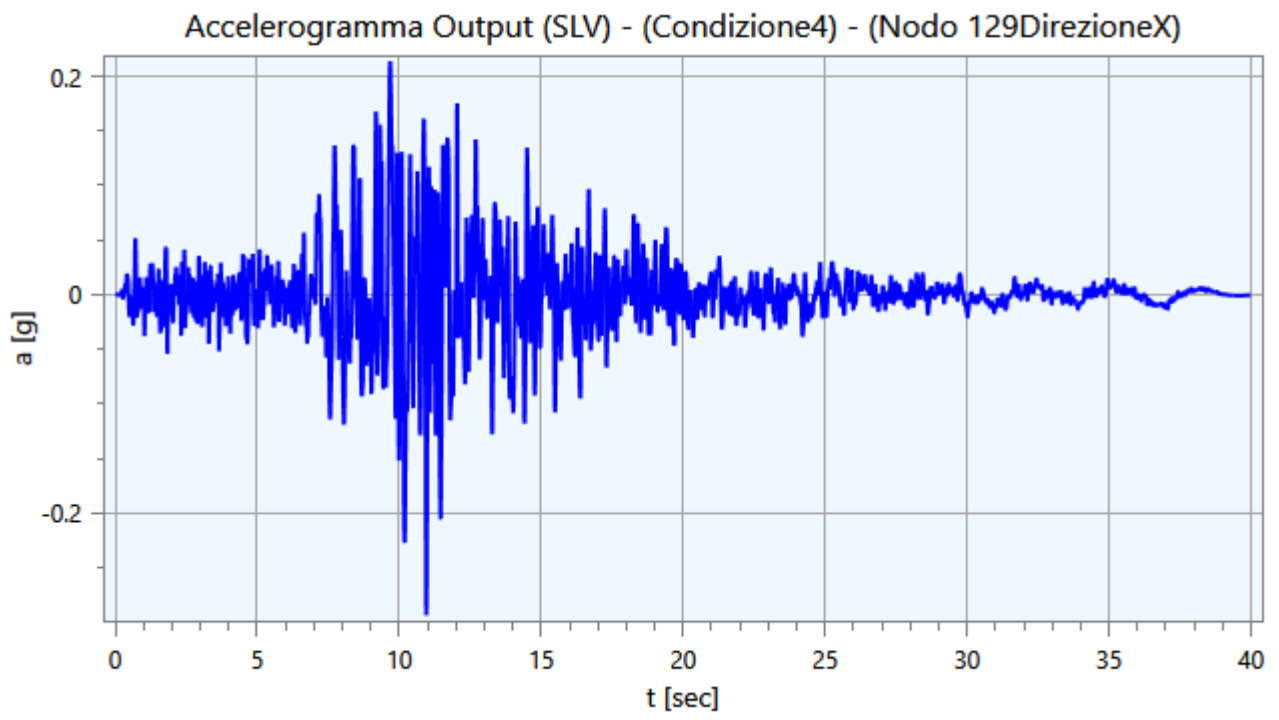
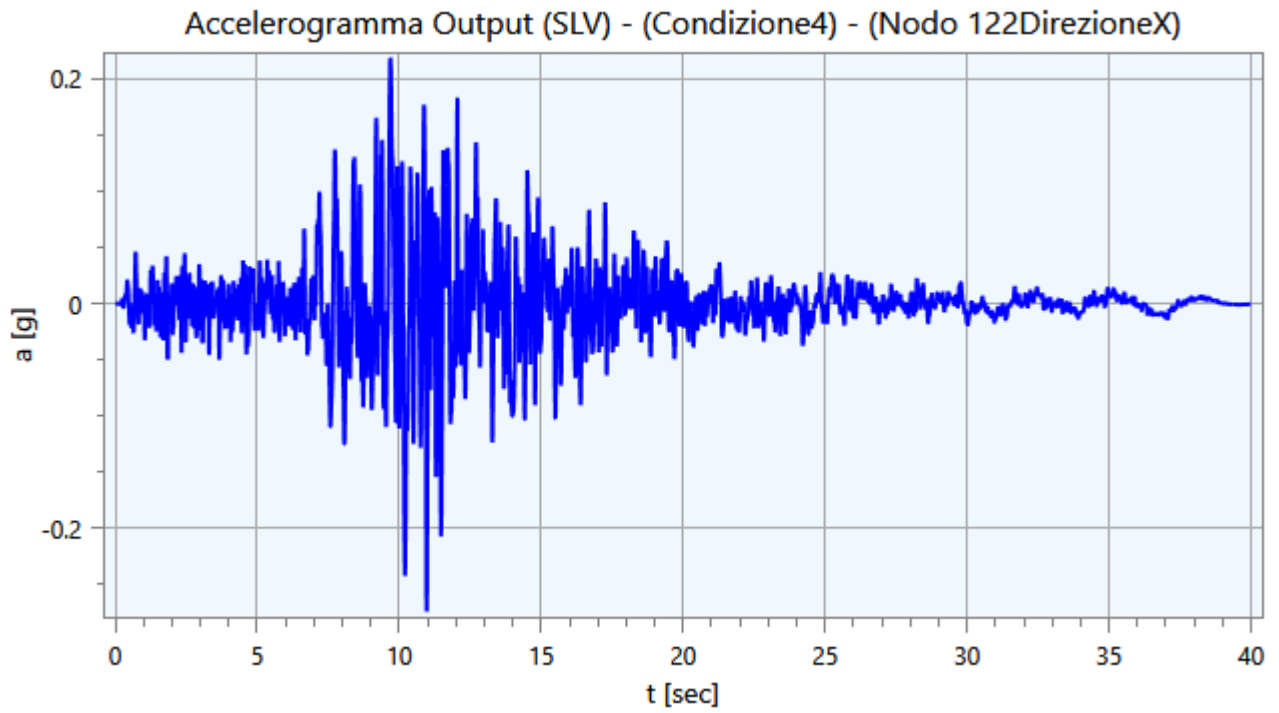


Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 109DirezioneX)

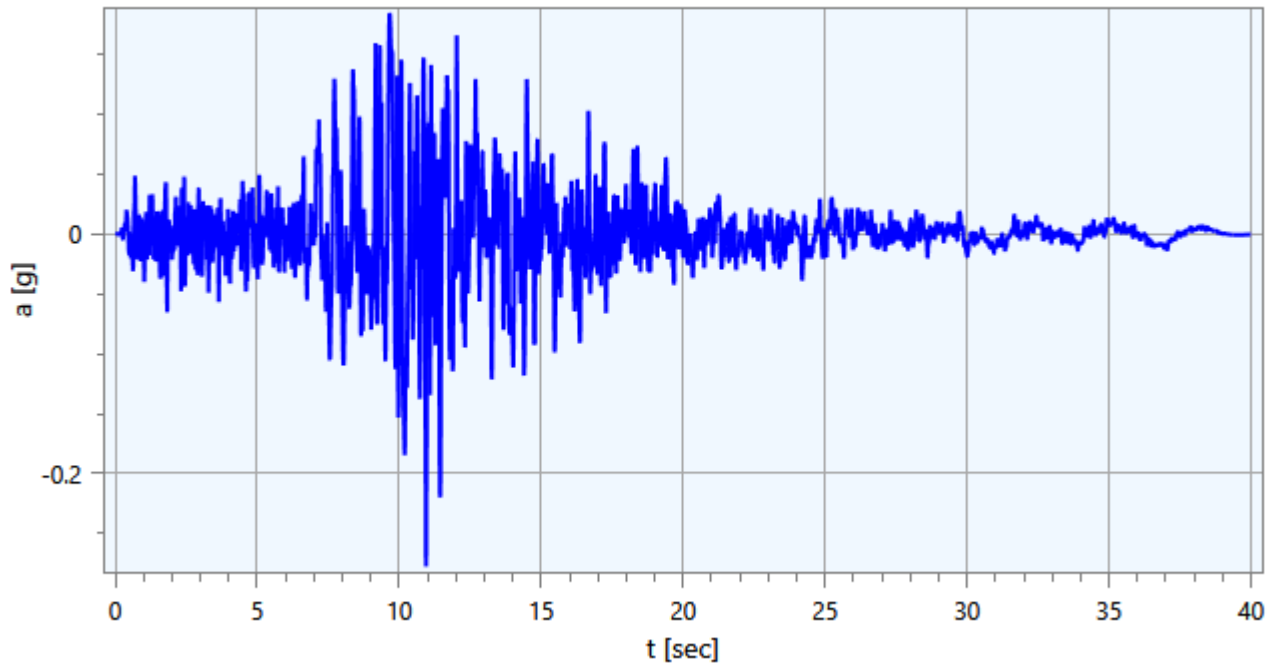


Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 117DirezioneX)

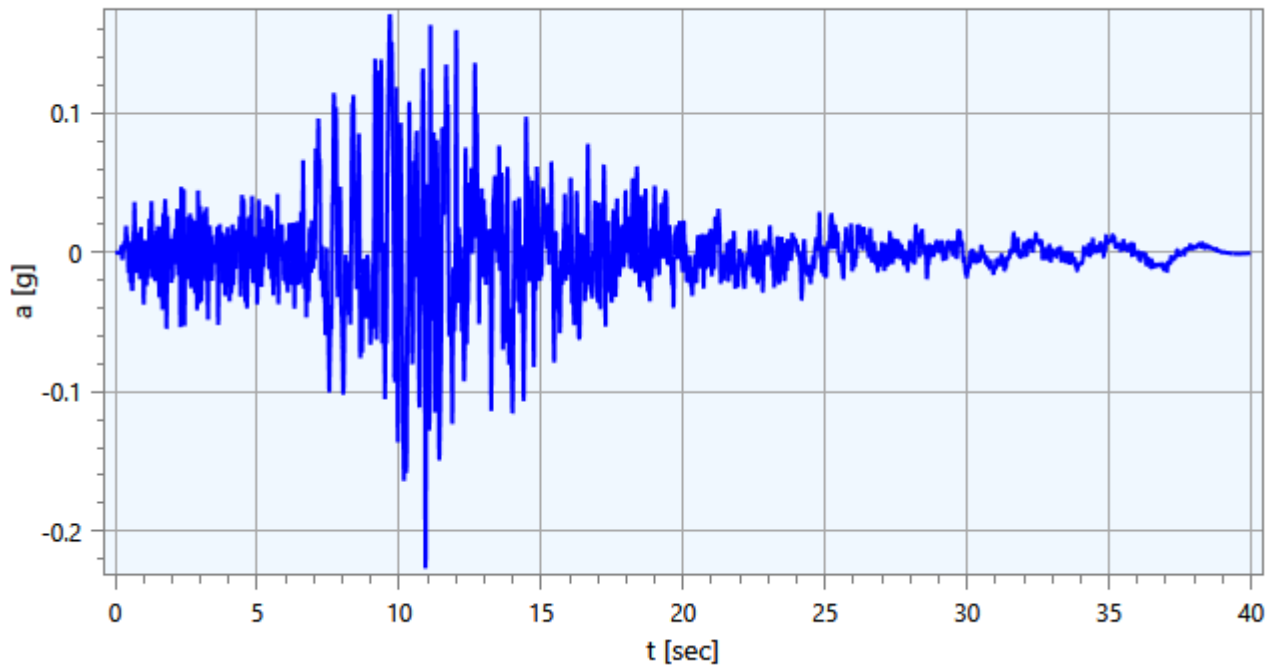




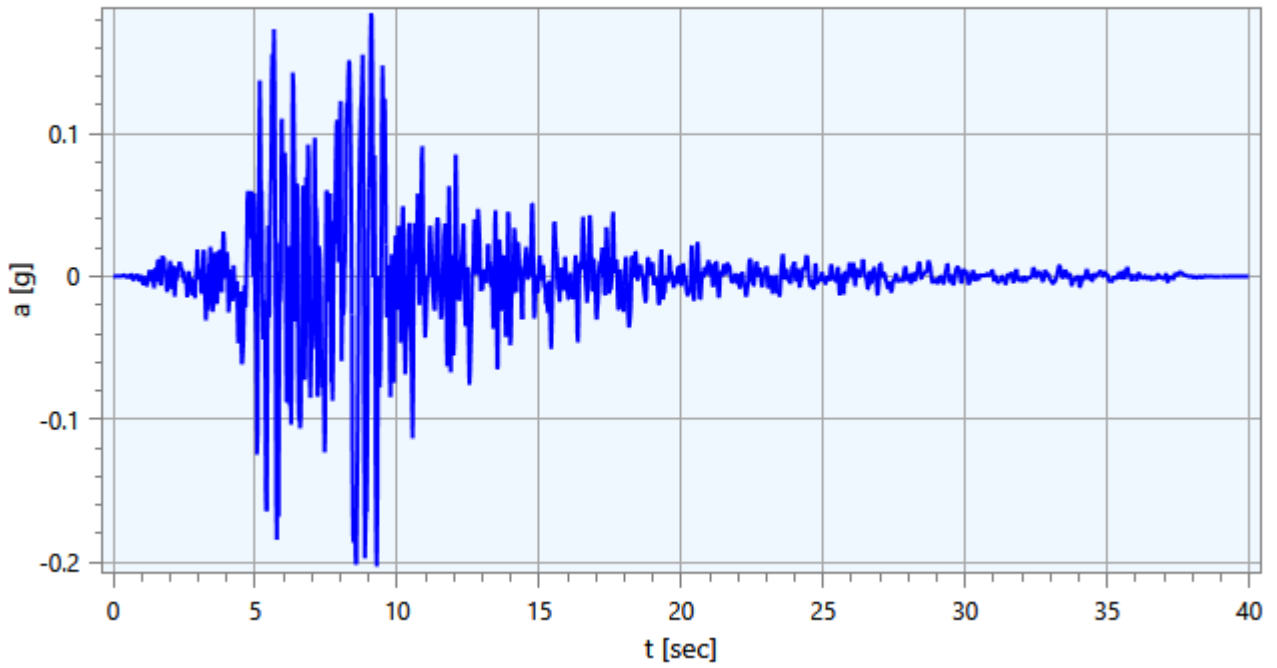
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 134DirezioneX)



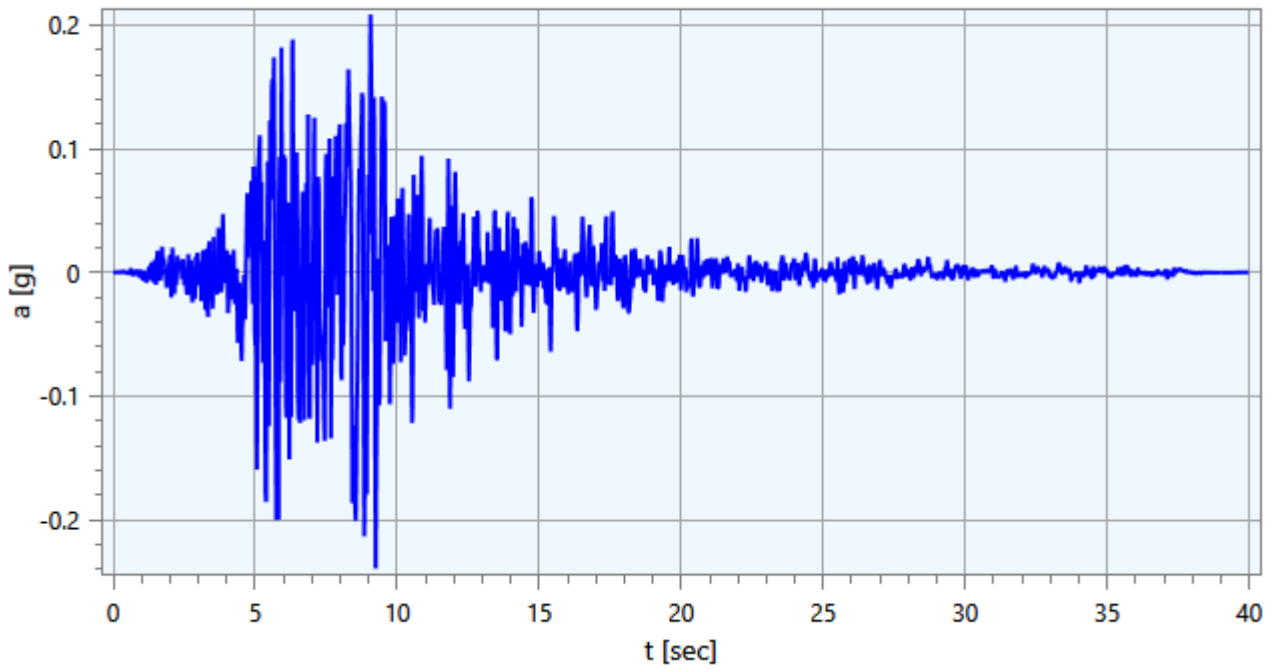
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 140DirezioneX)



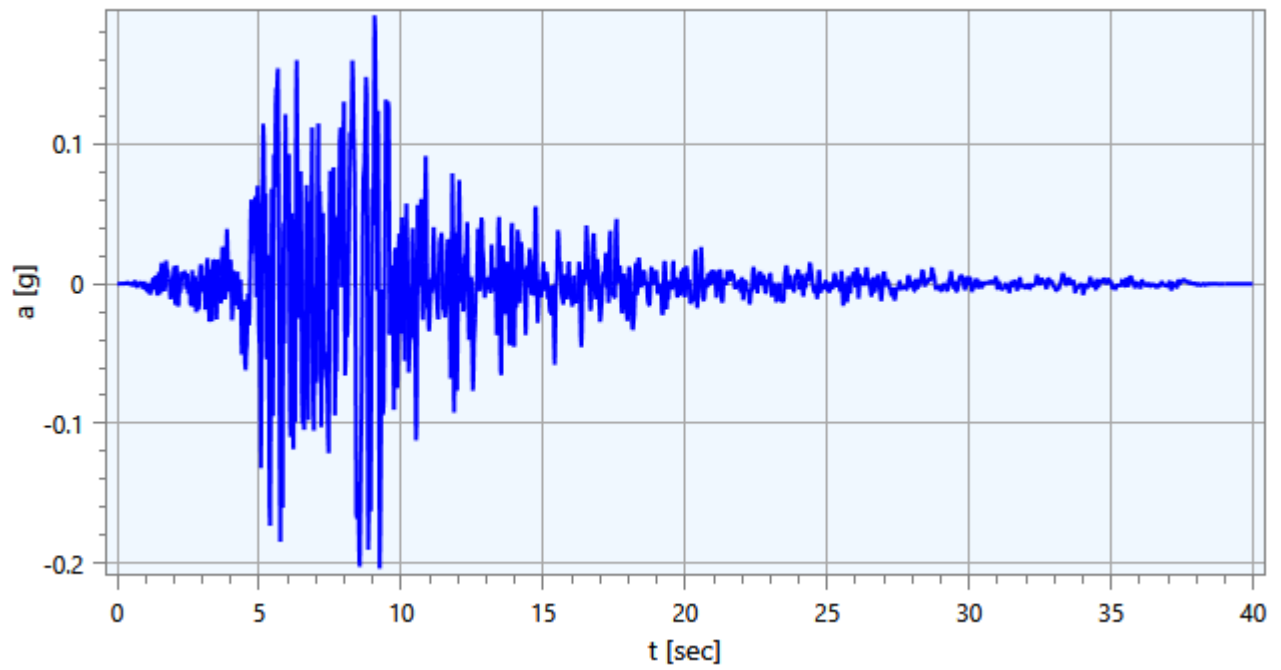
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 2DirezioneX)



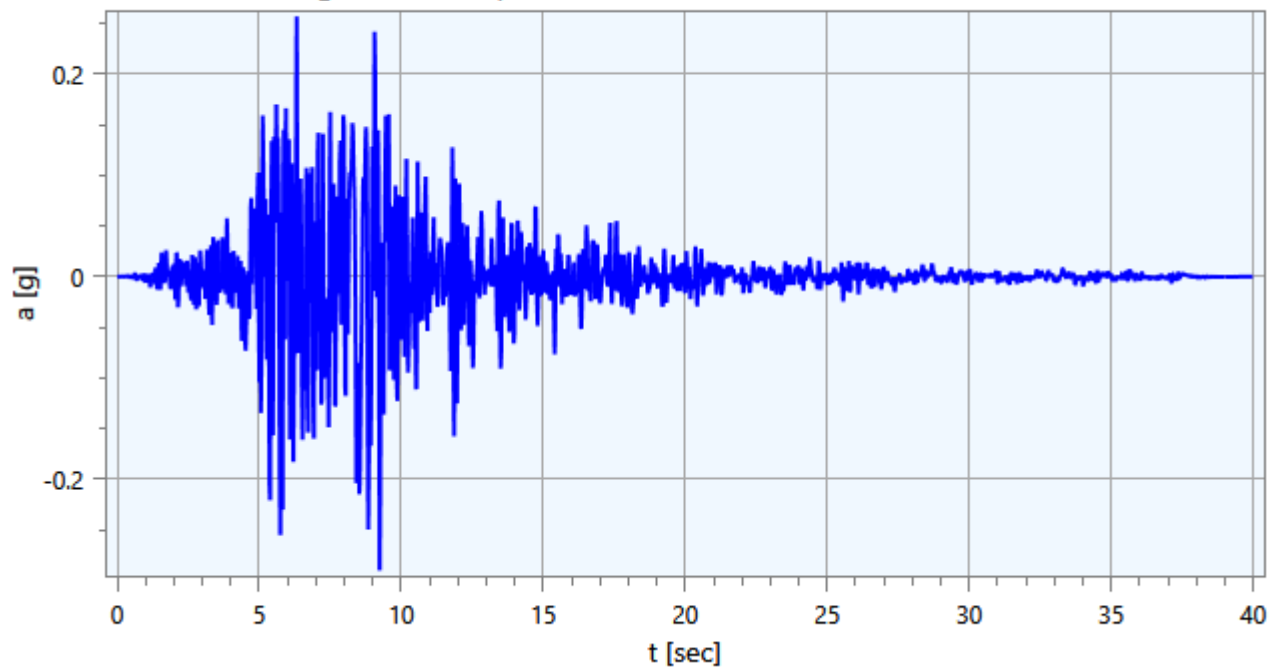
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 15DirezioneX)

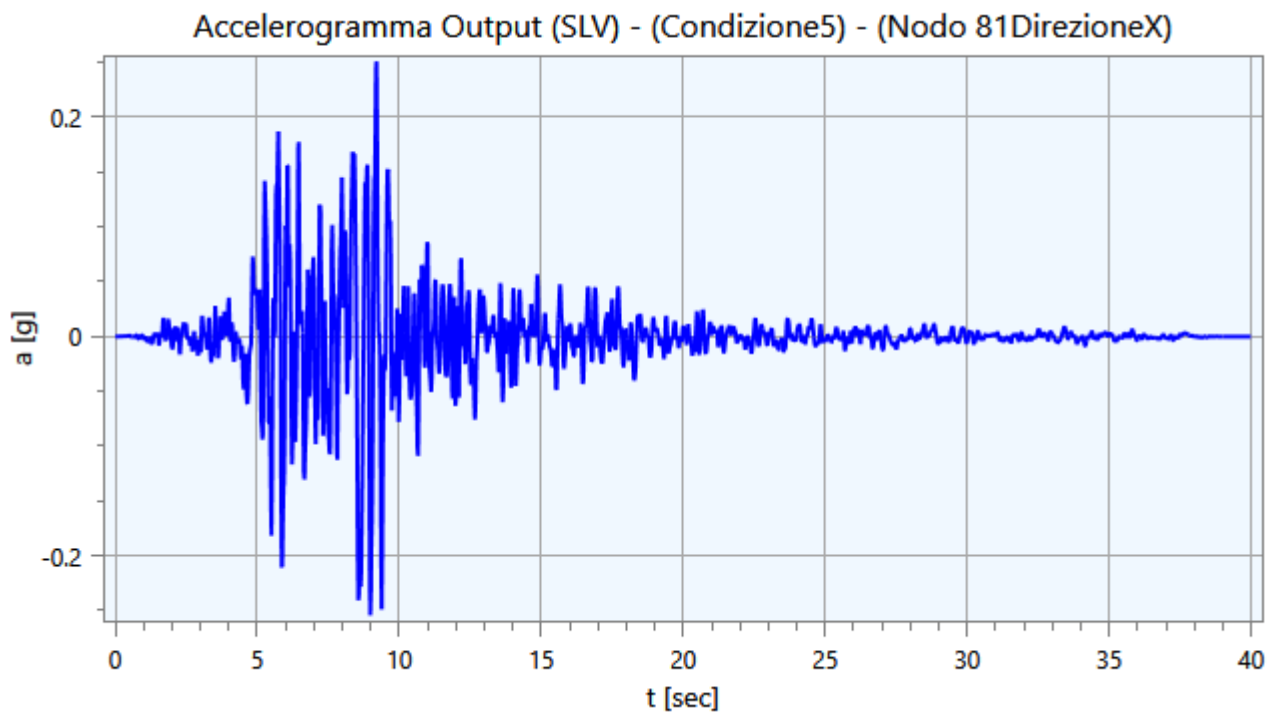
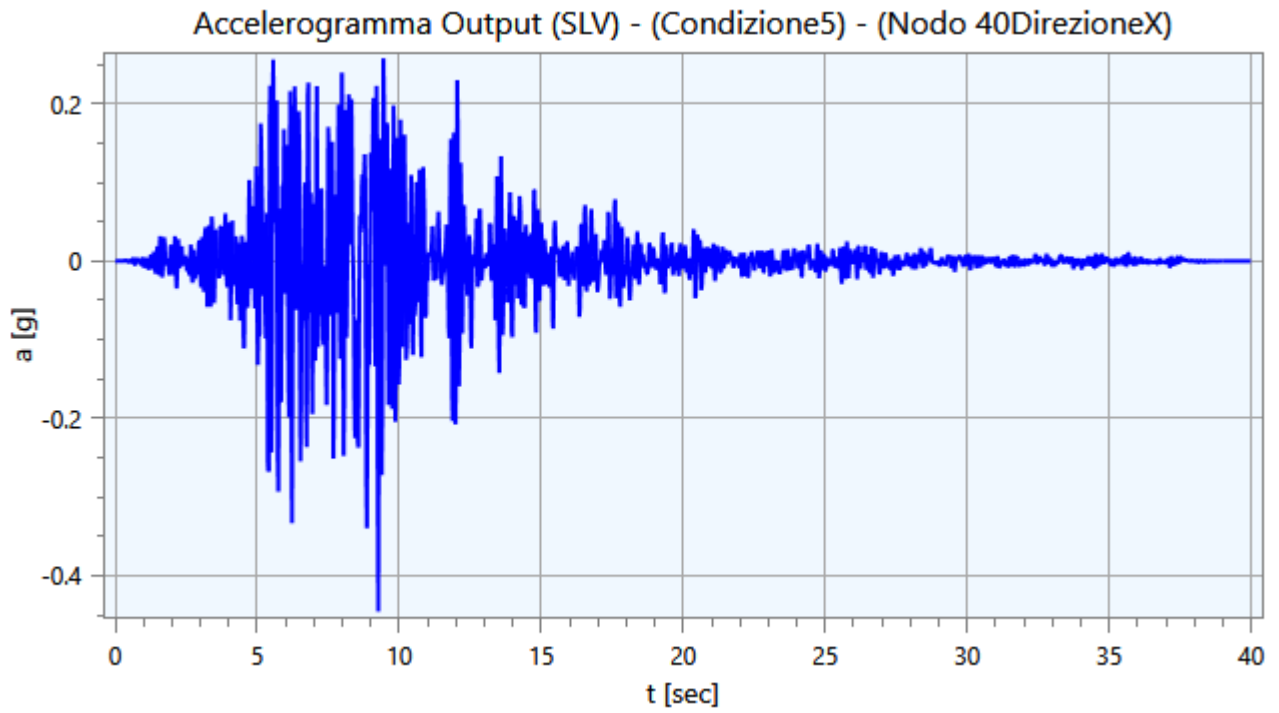


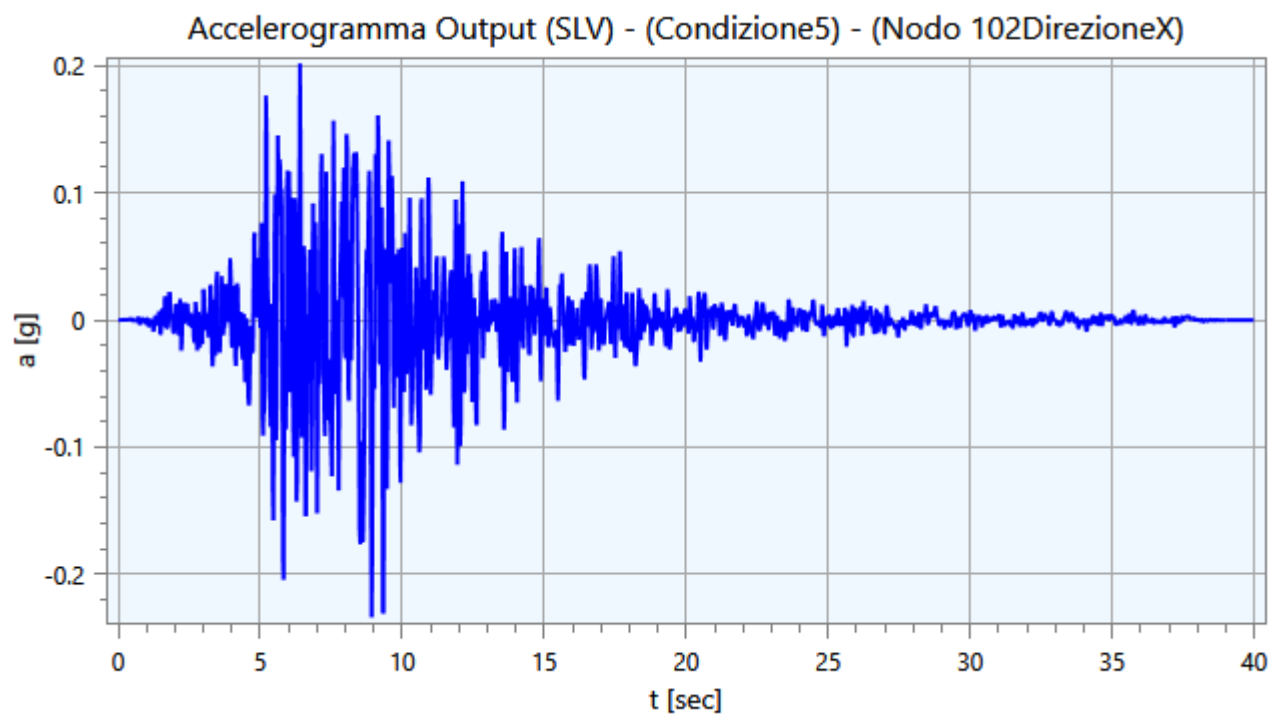
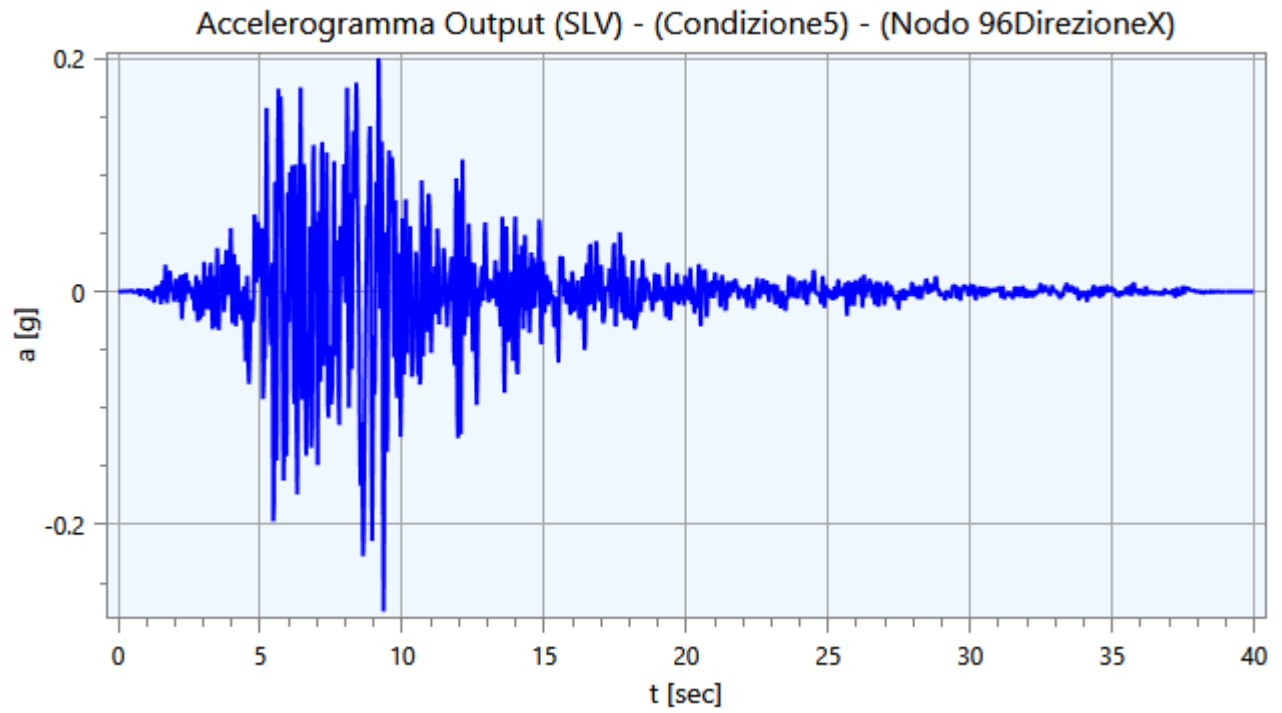
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 16DirezioneX)



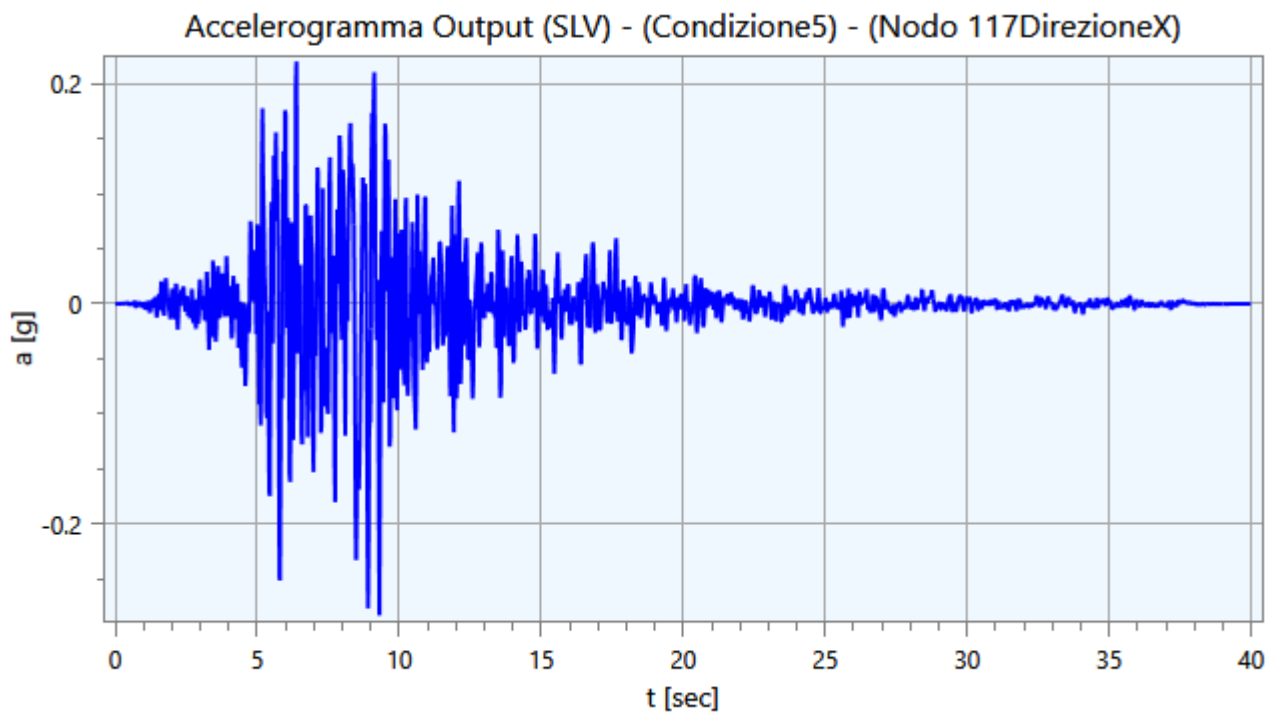
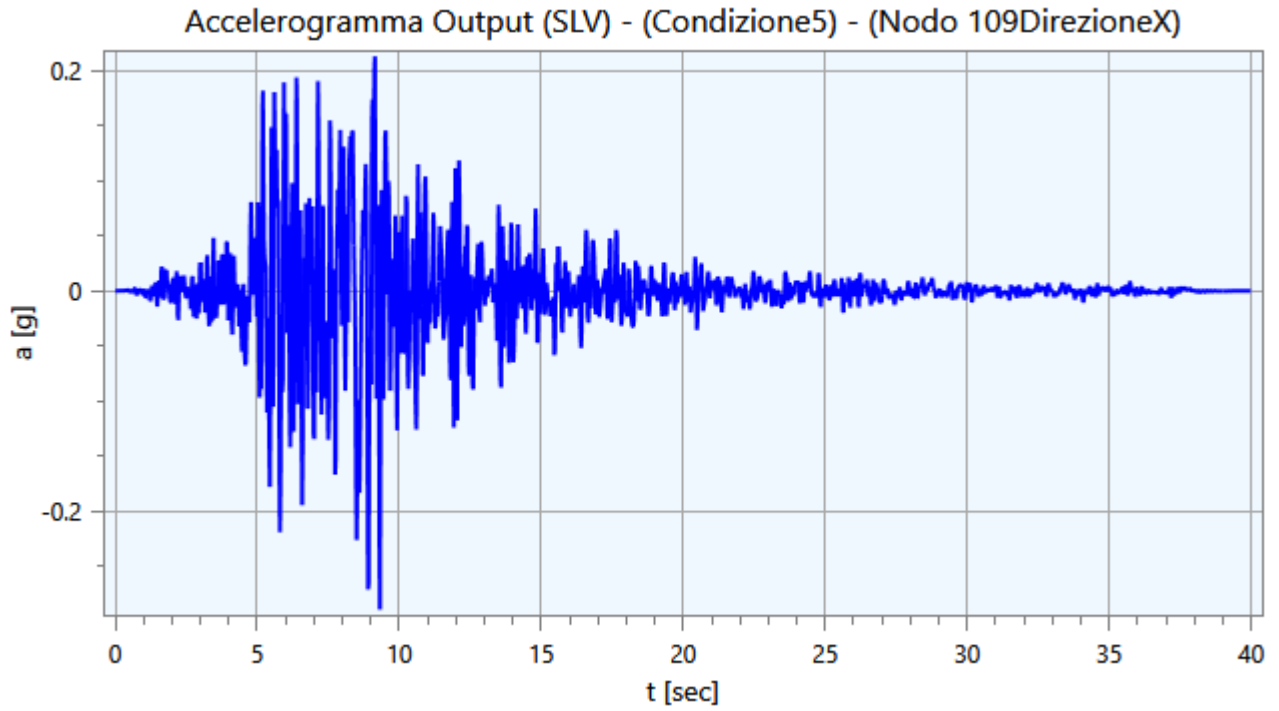
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 34DirezioneX)



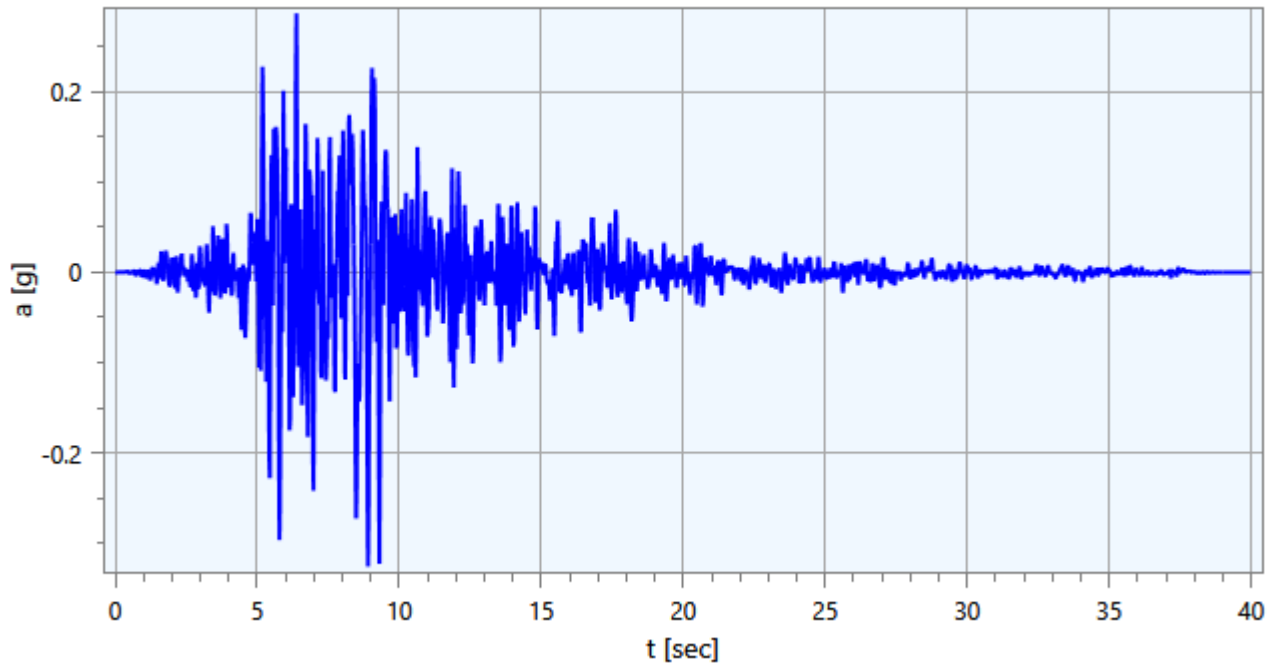




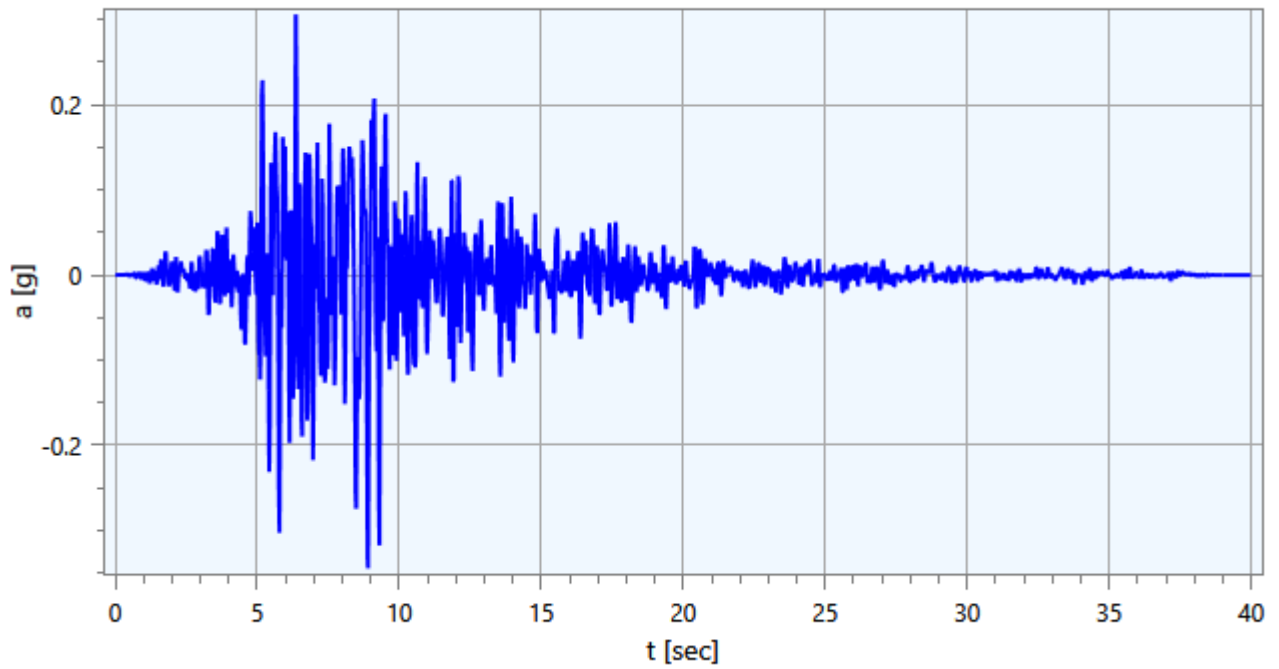




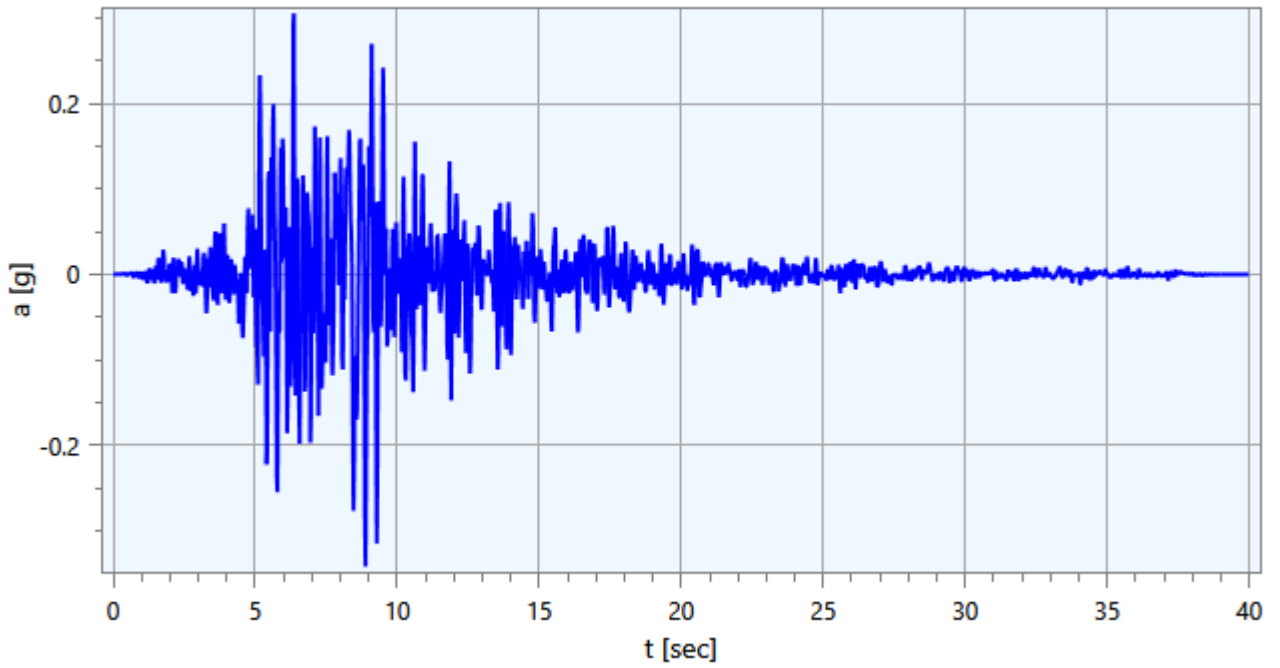
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 122DirezioneX)



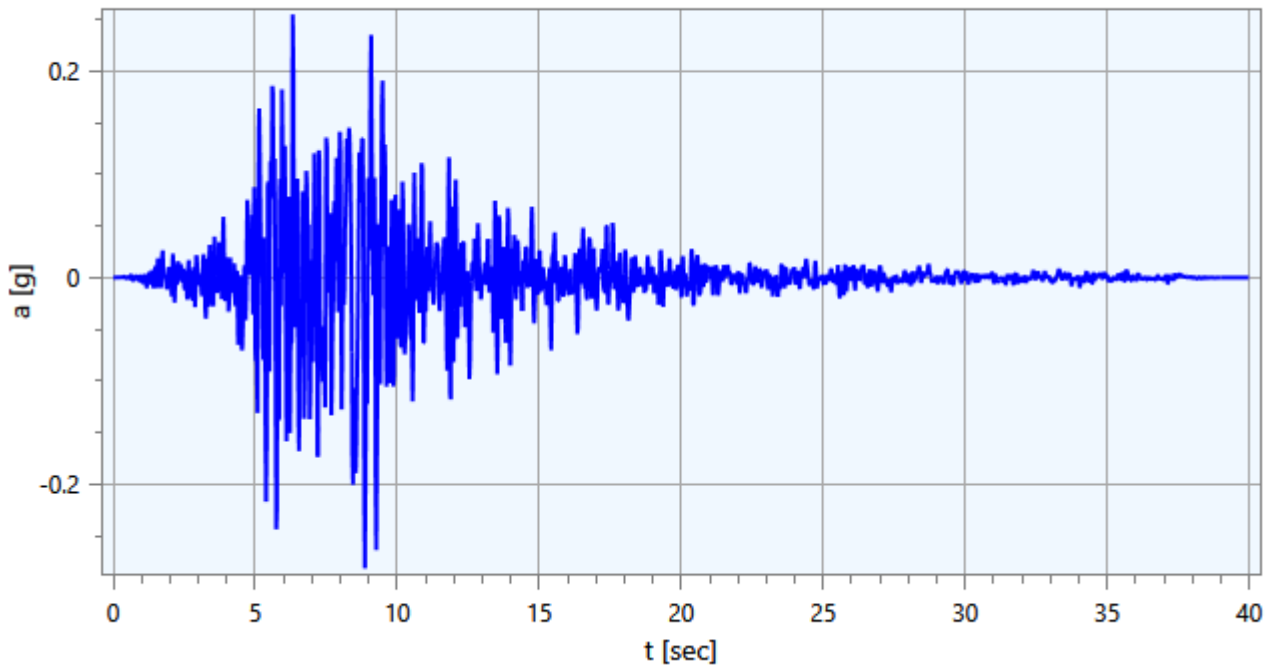
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 129DirezioneX)



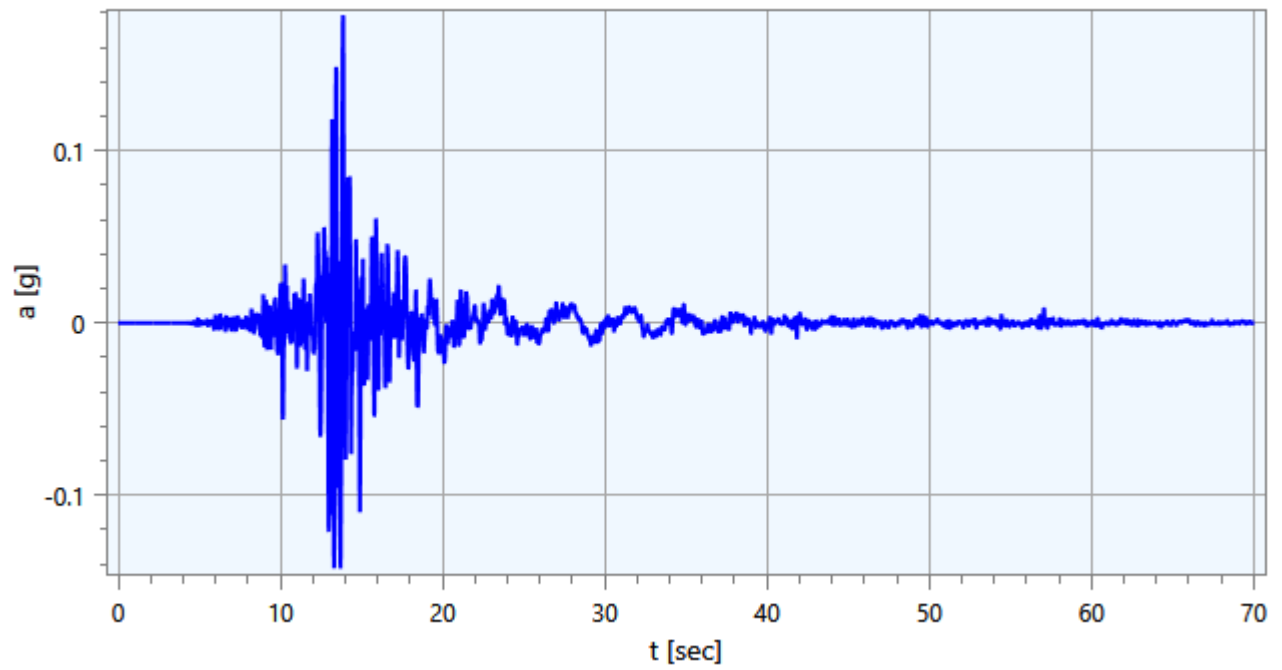
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 134DirezioneX)



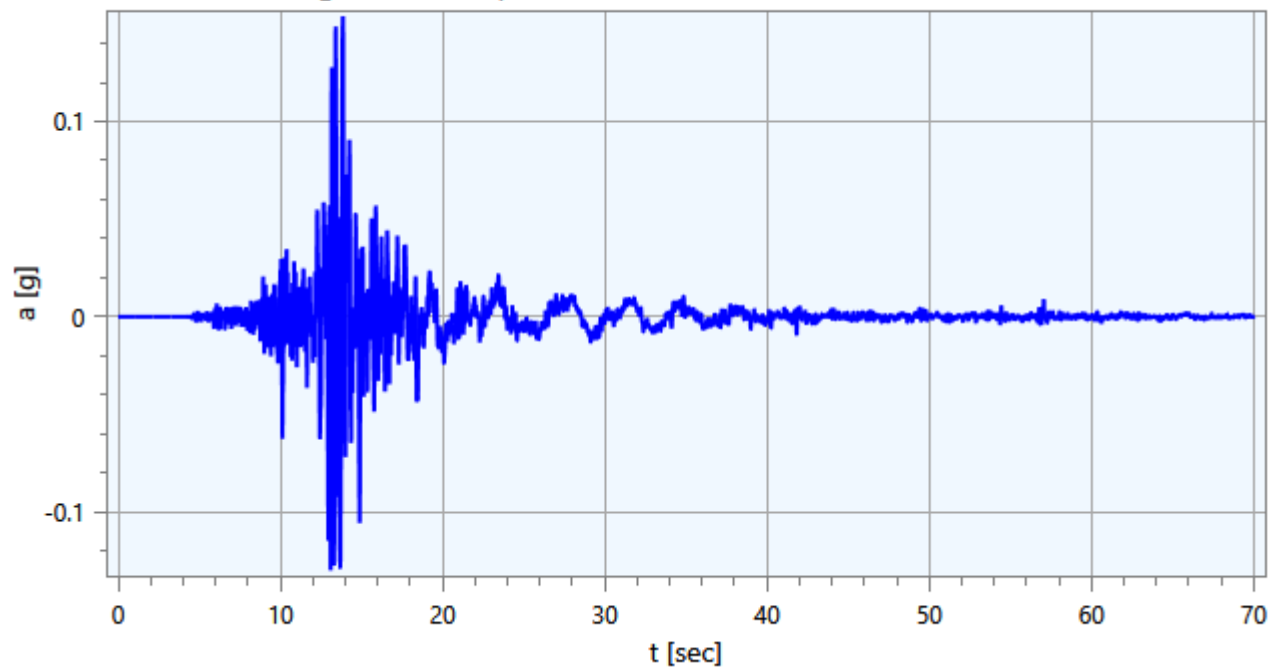
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 140DirezioneX)



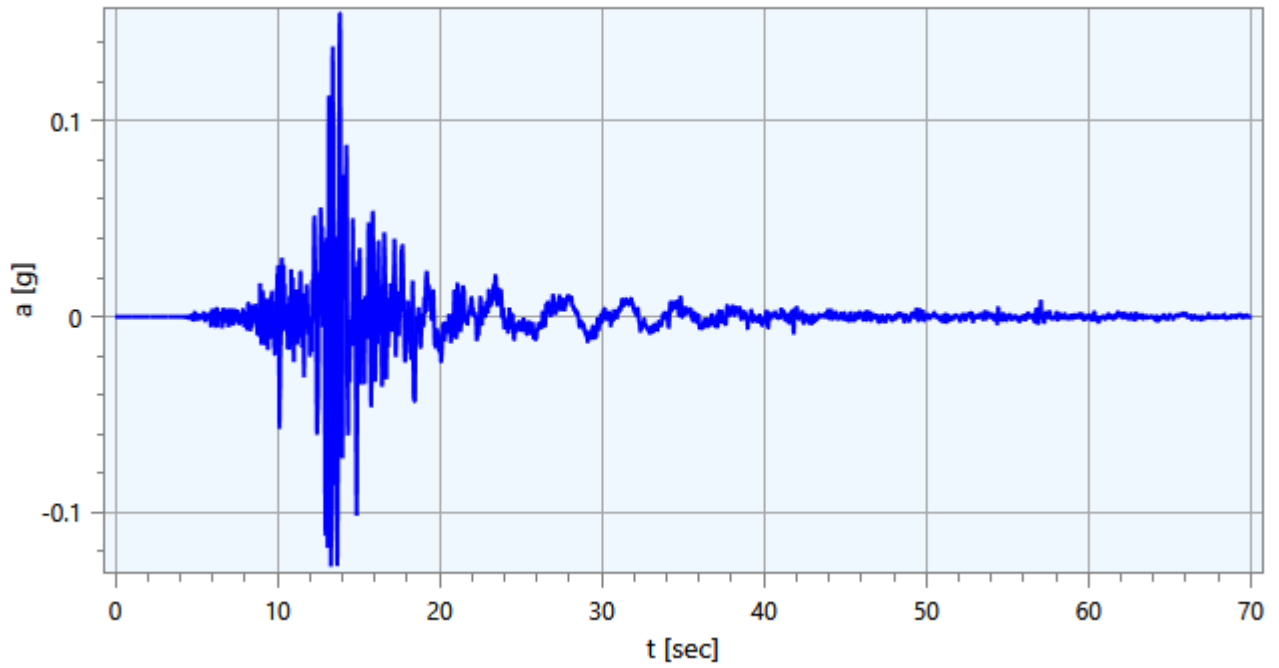
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 2DirezioneX)



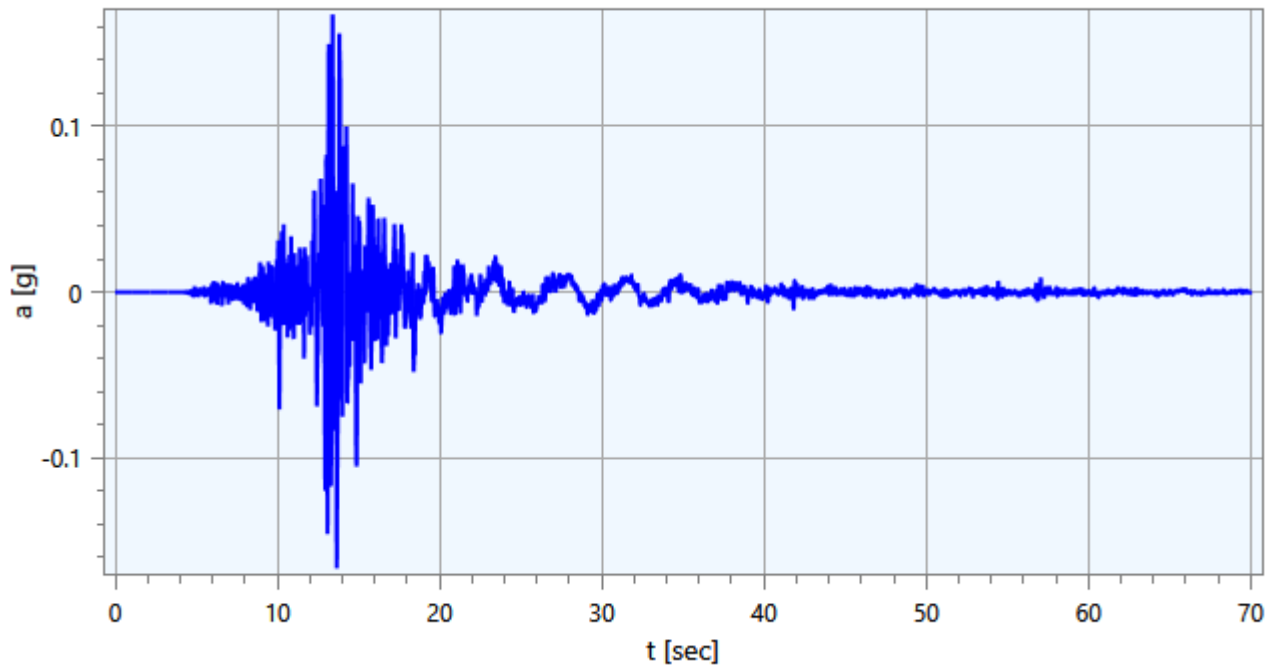
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 15DirezioneX)



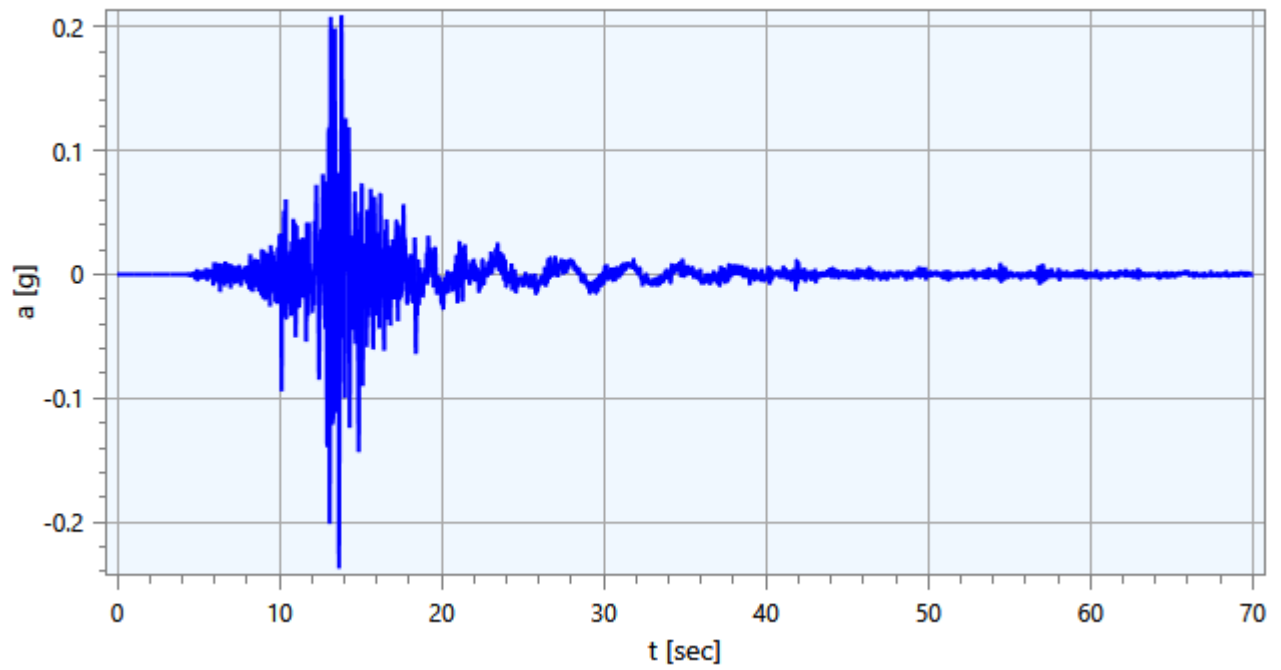
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 16DirezioneX)



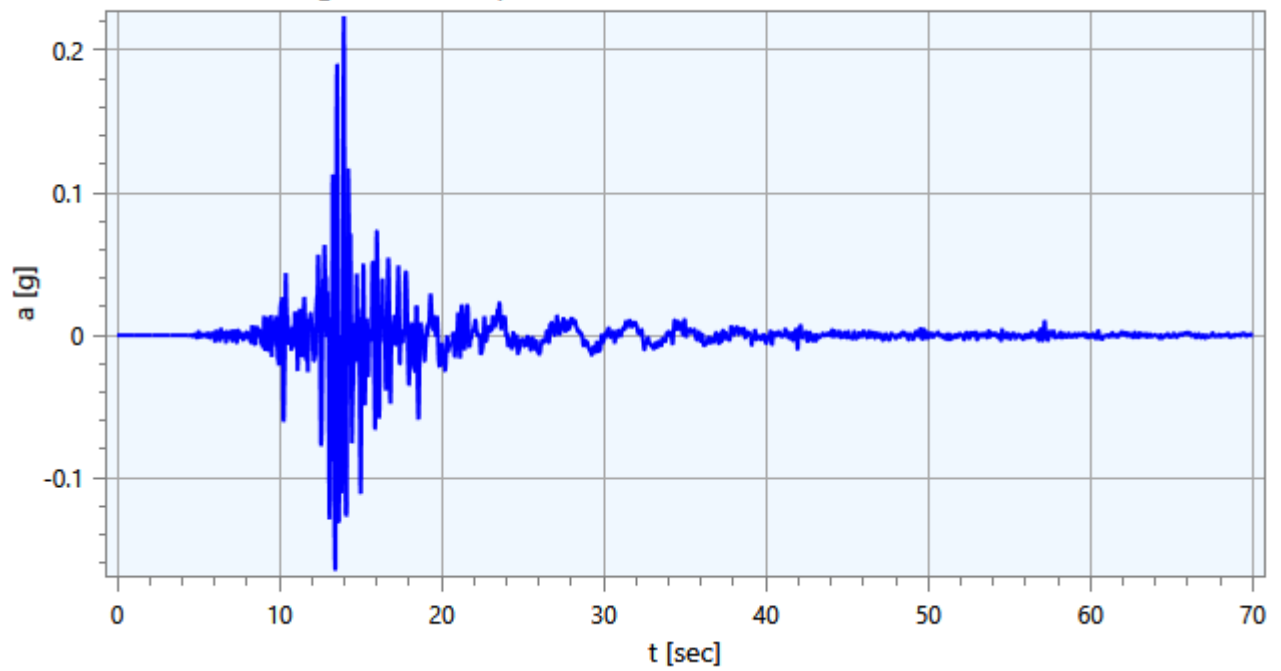
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 34DirezioneX)



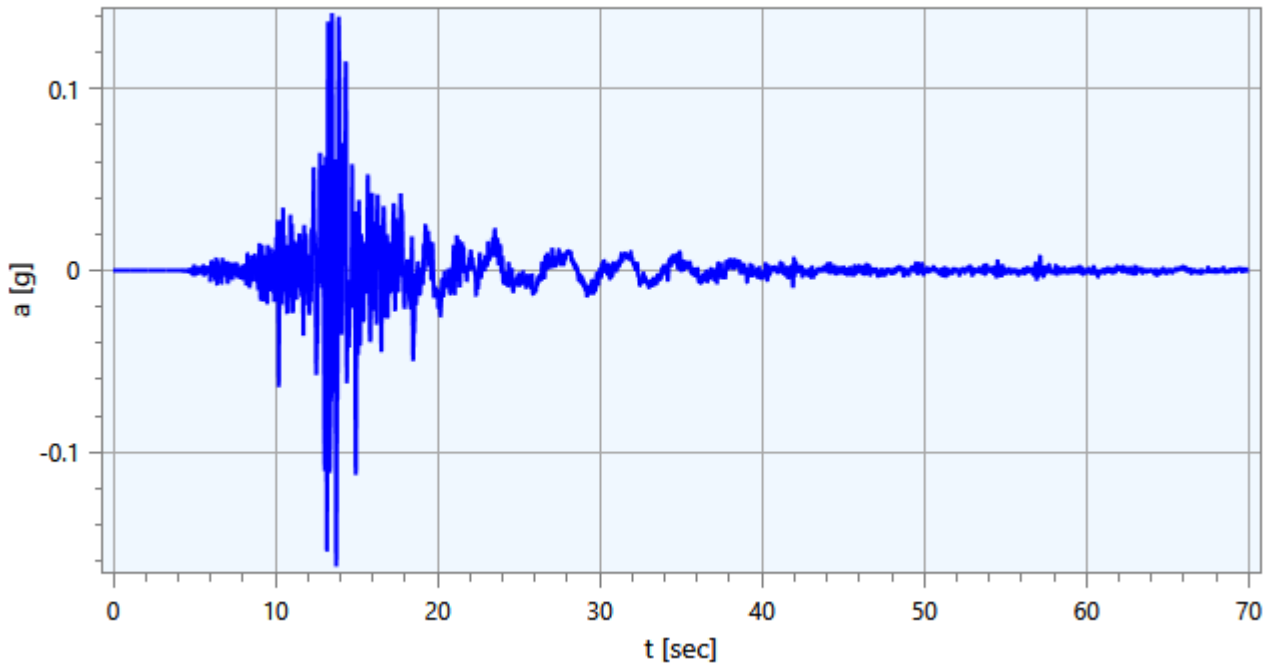
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 40DirezioneX)



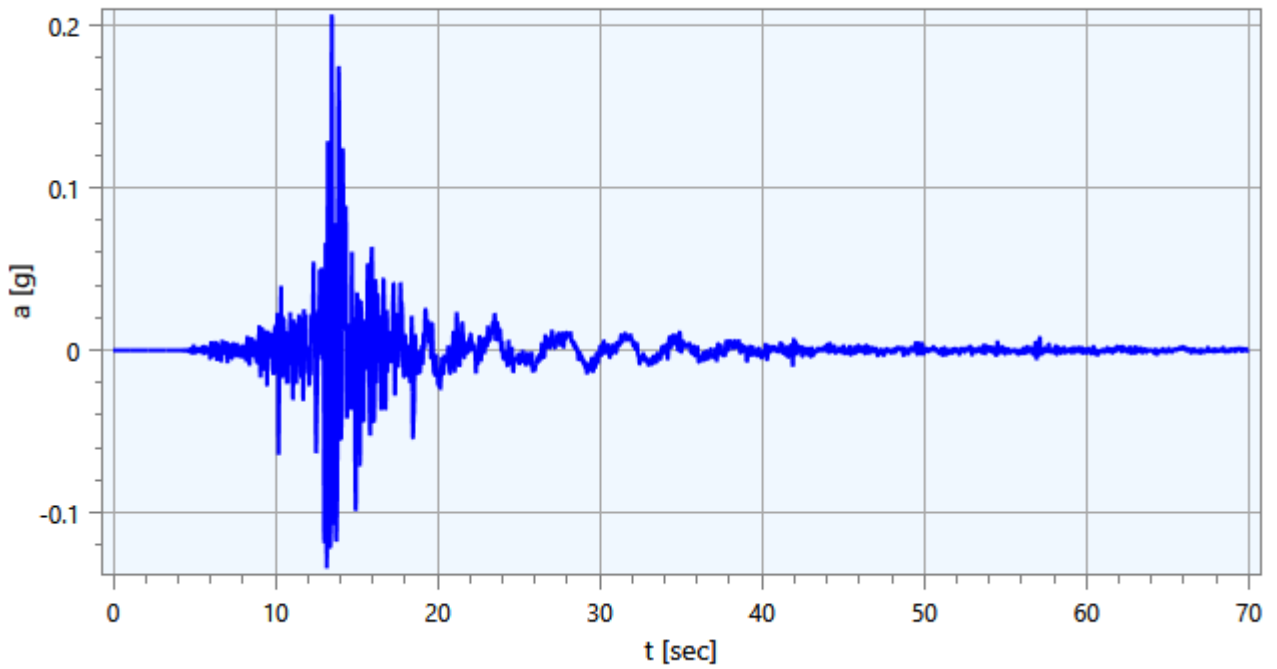
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 81DirezioneX)



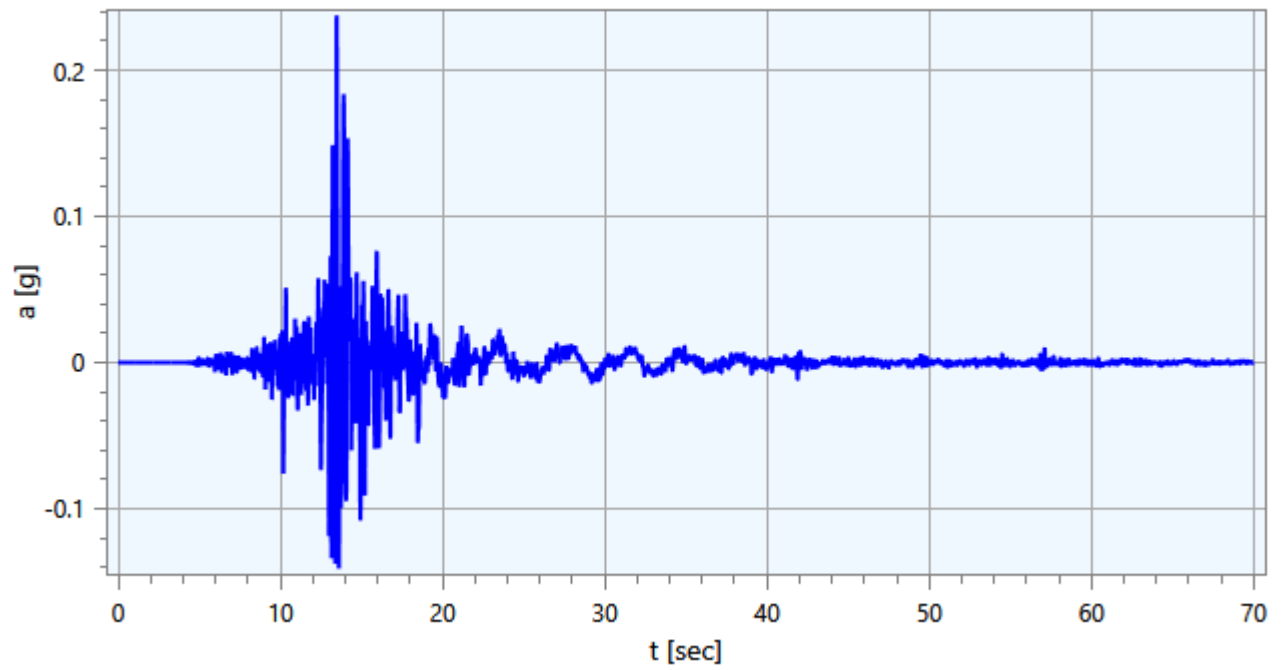
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 96DirezioneX)



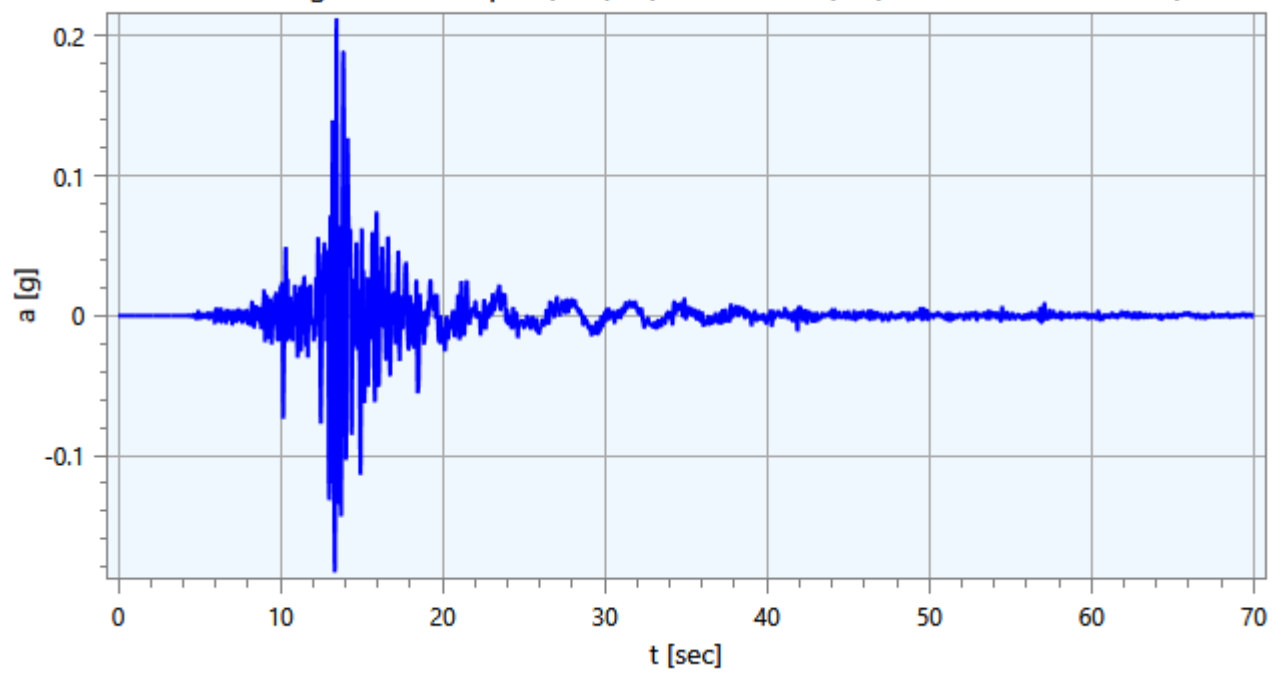
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 102DirezioneX)



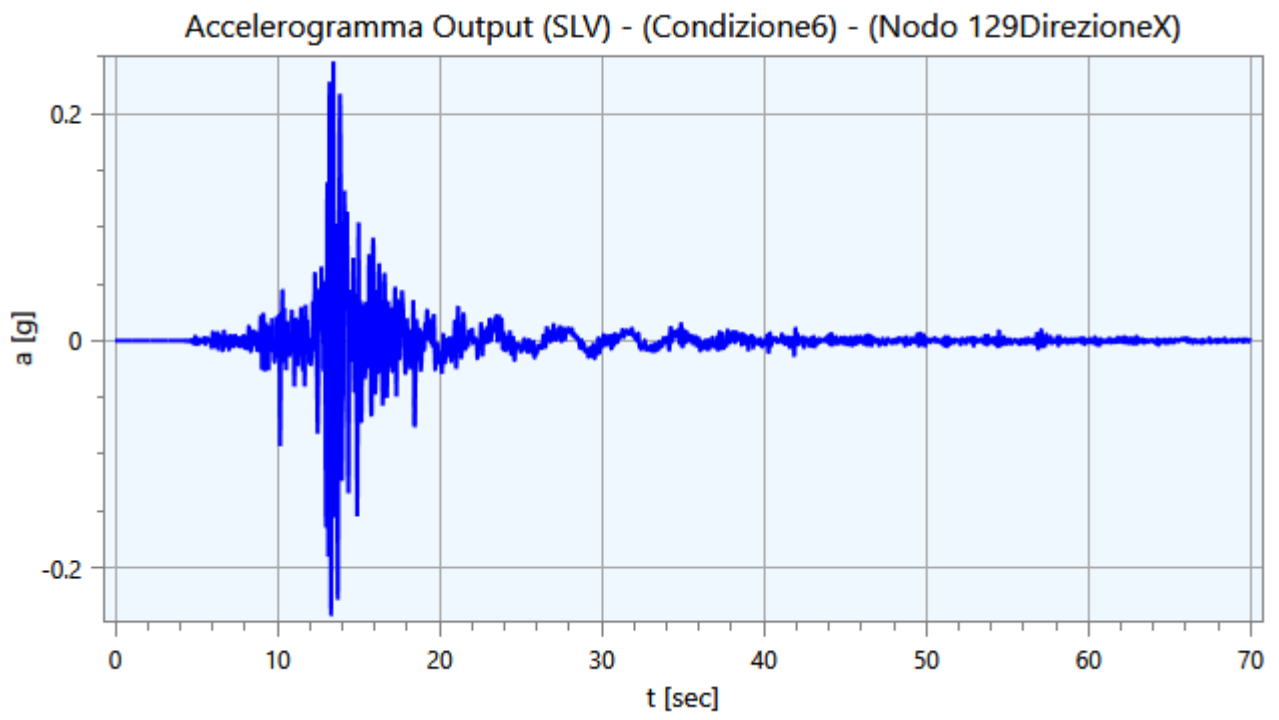
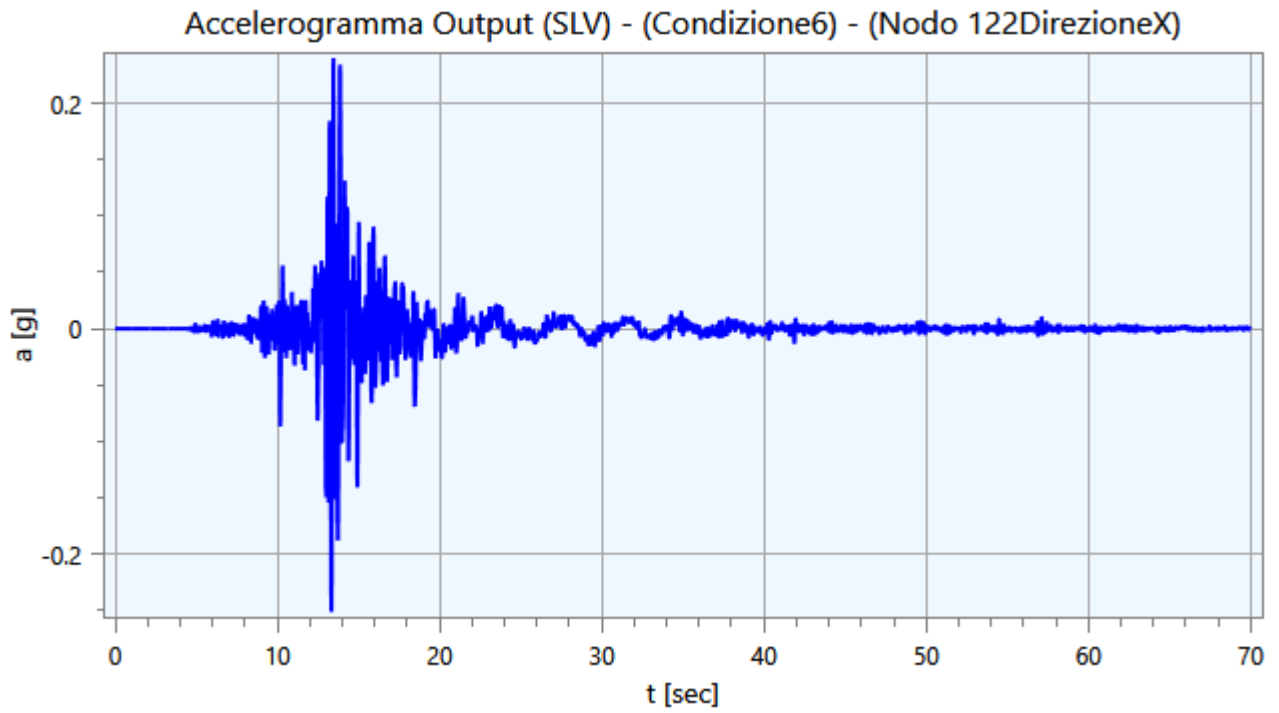
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 109DirezioneX)



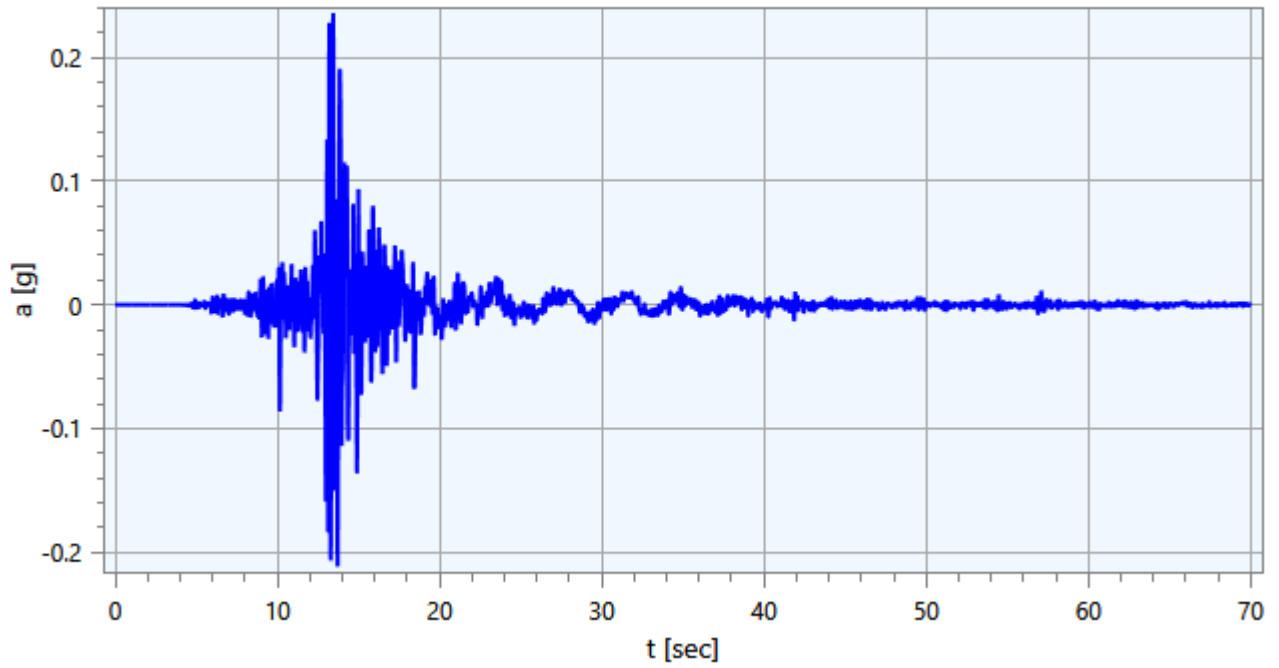
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 117DirezioneX)



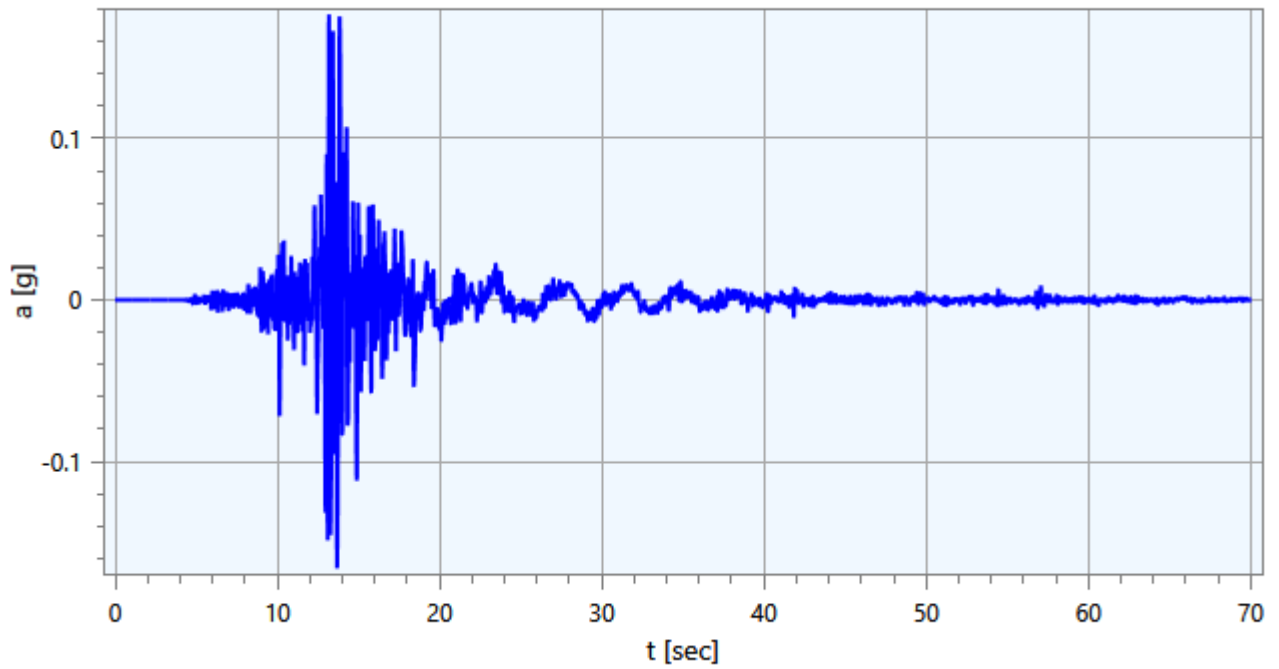


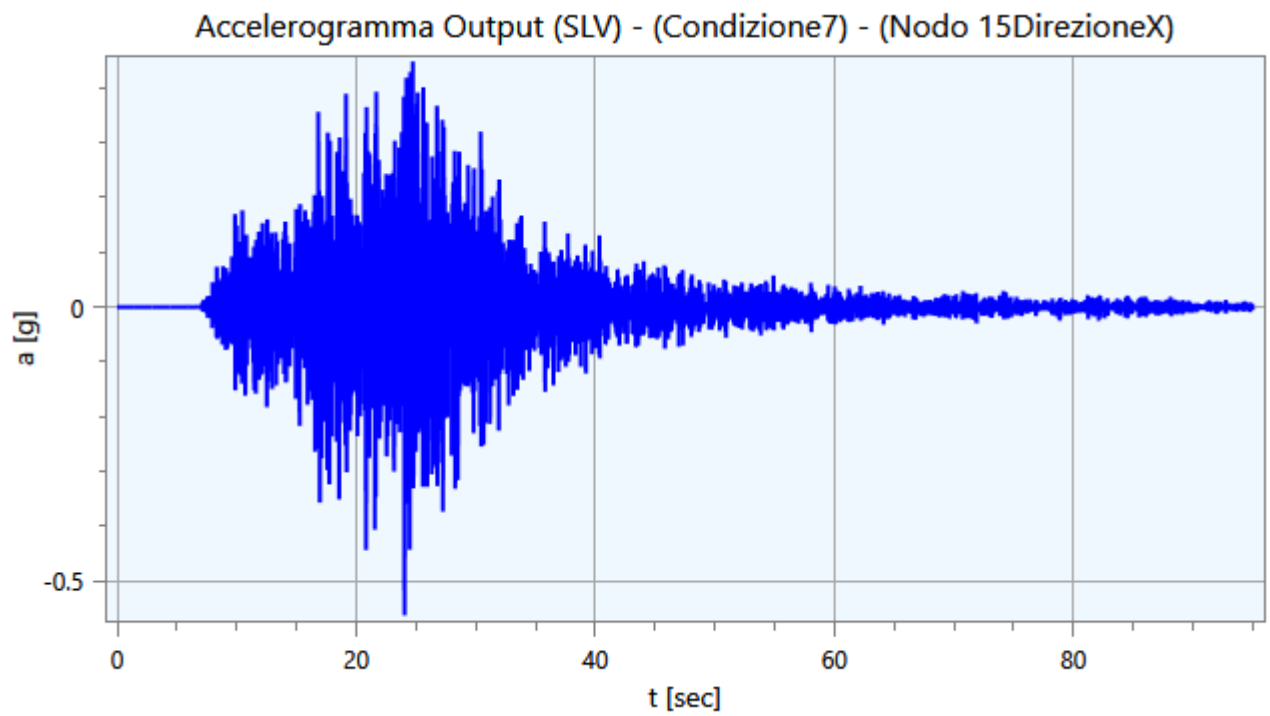
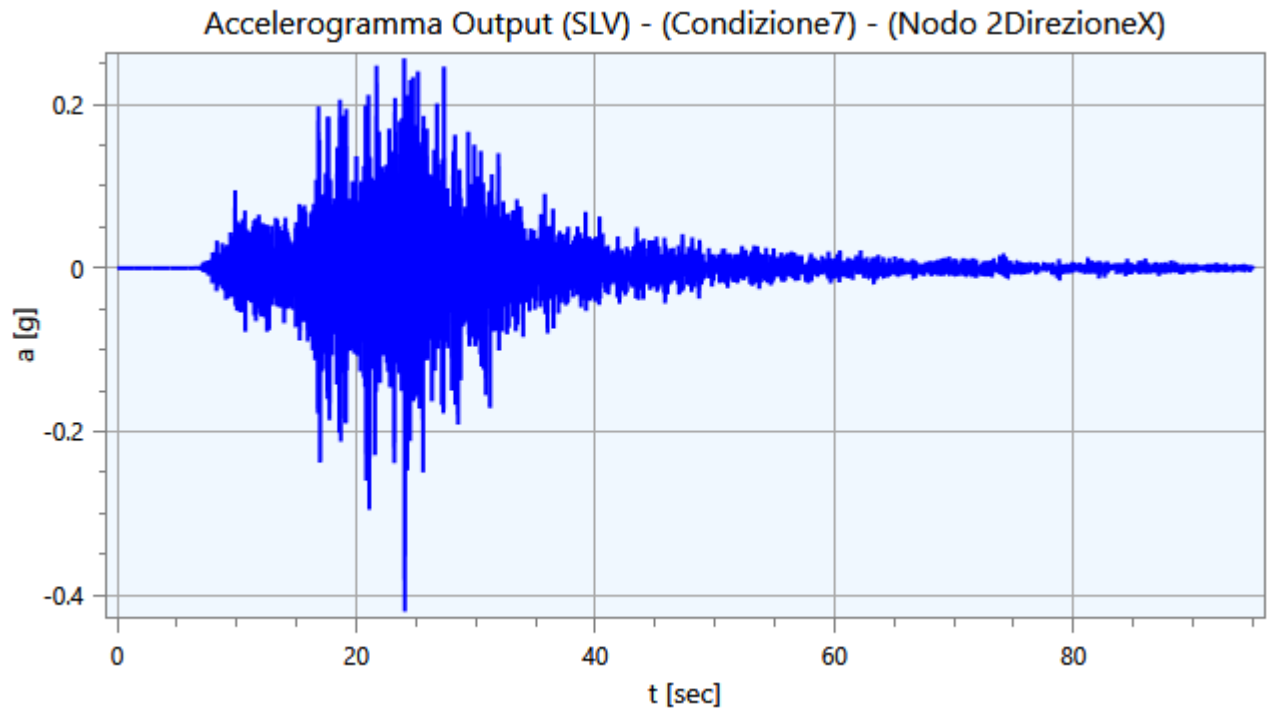


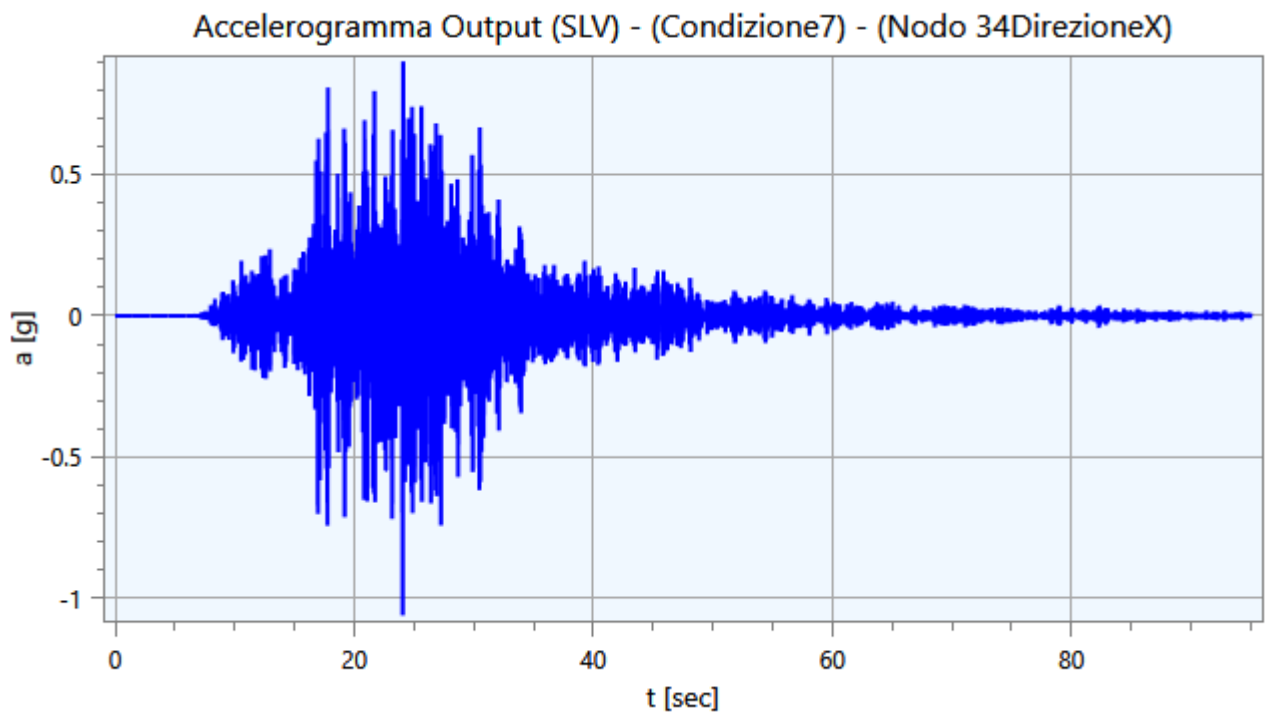
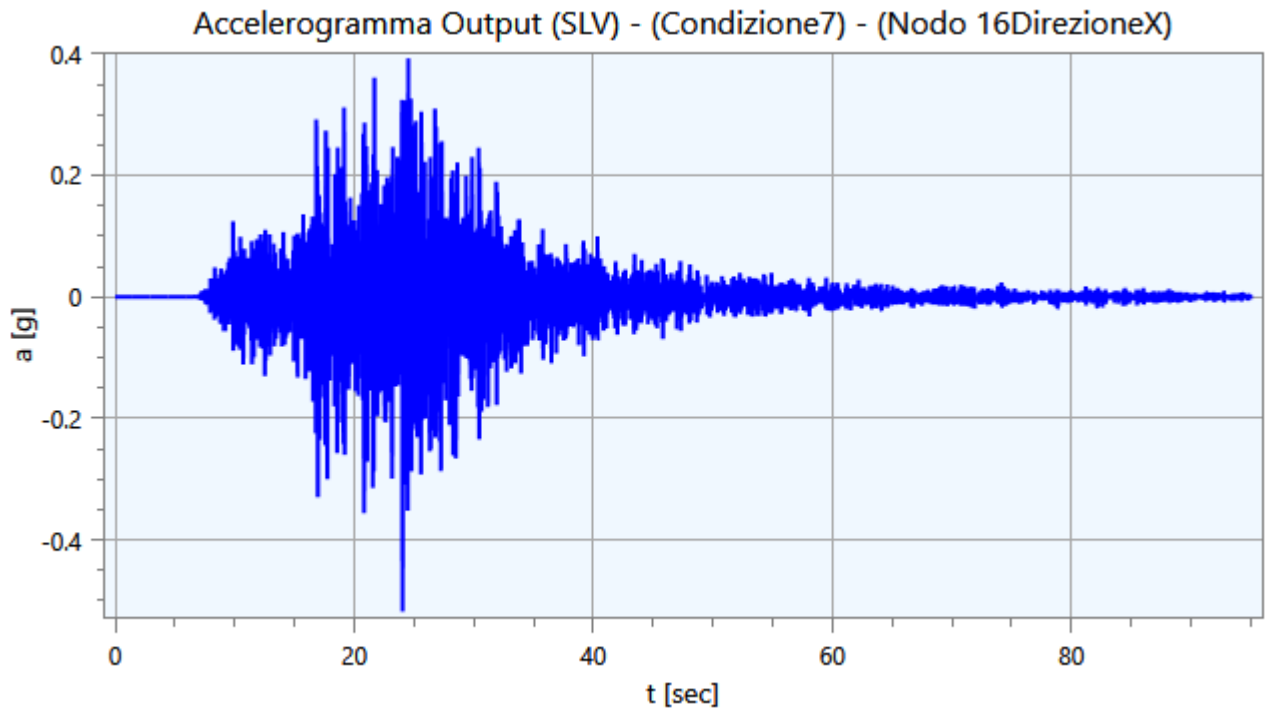
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 134DirezioneX)



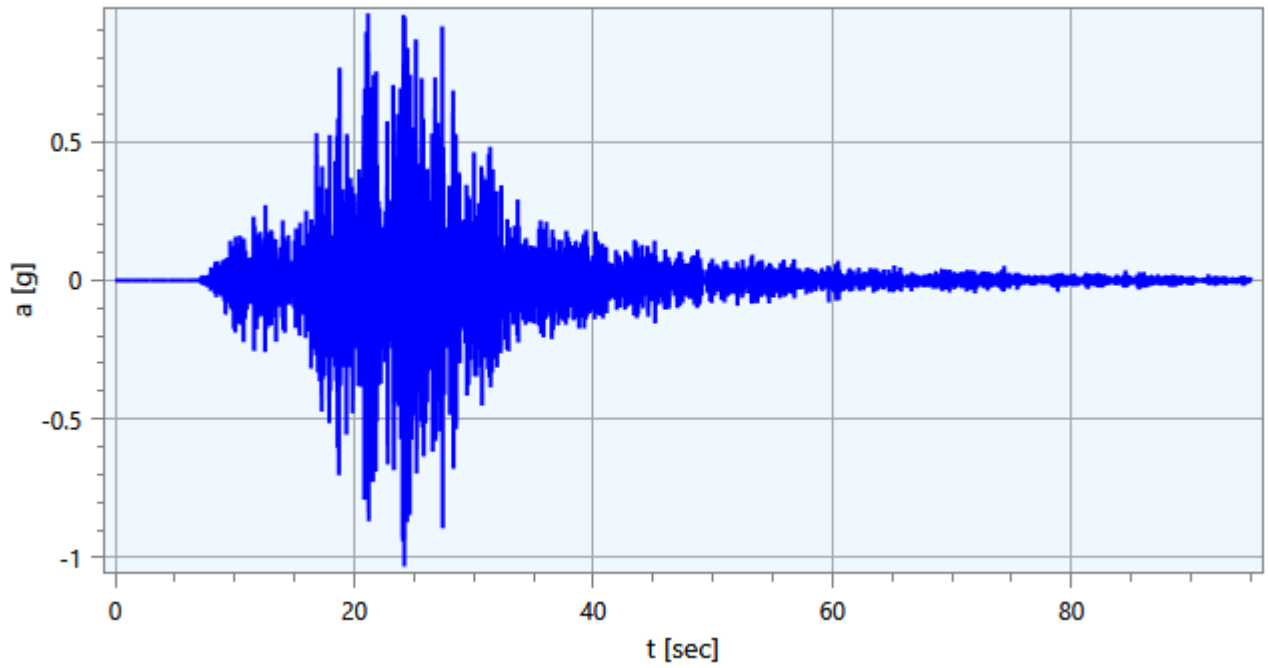
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 140DirezioneX)



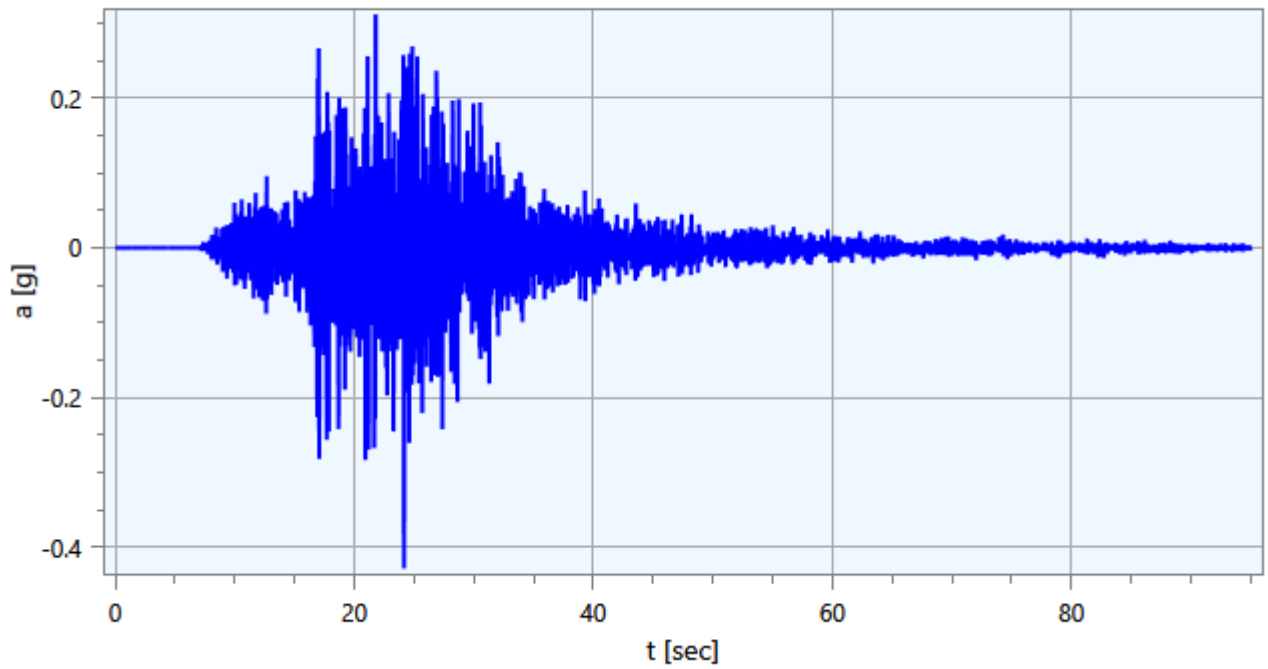


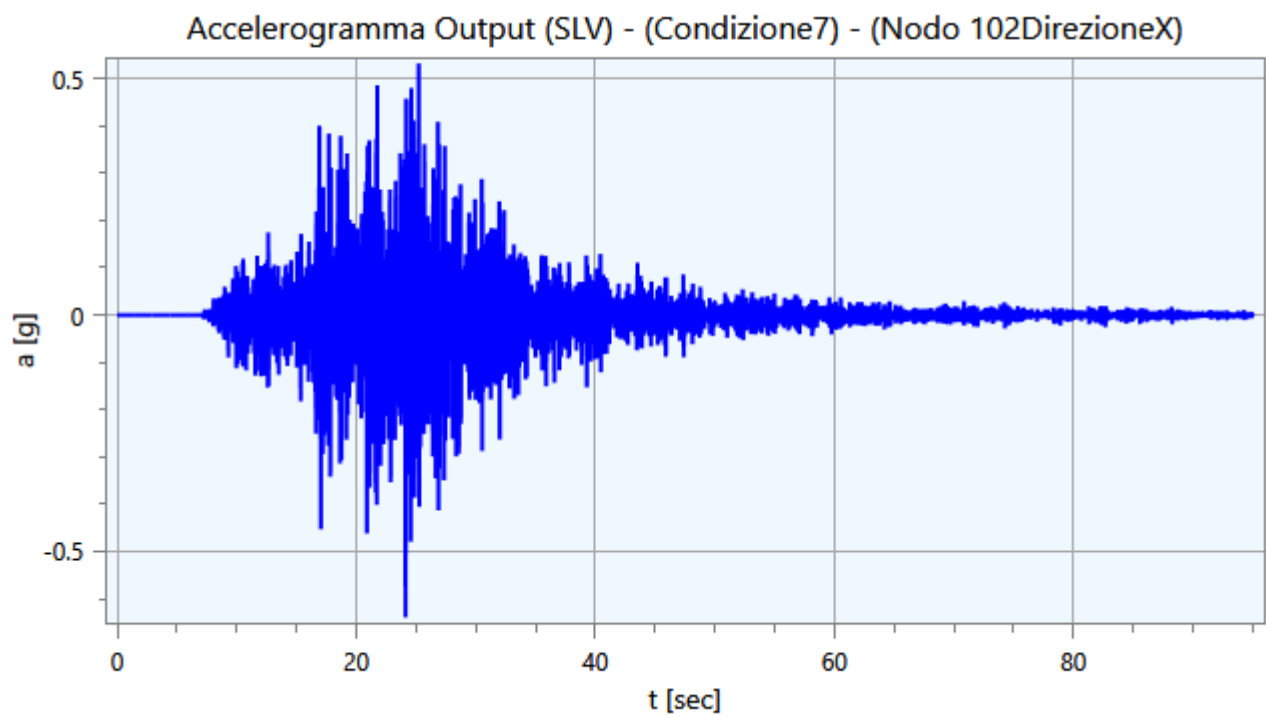
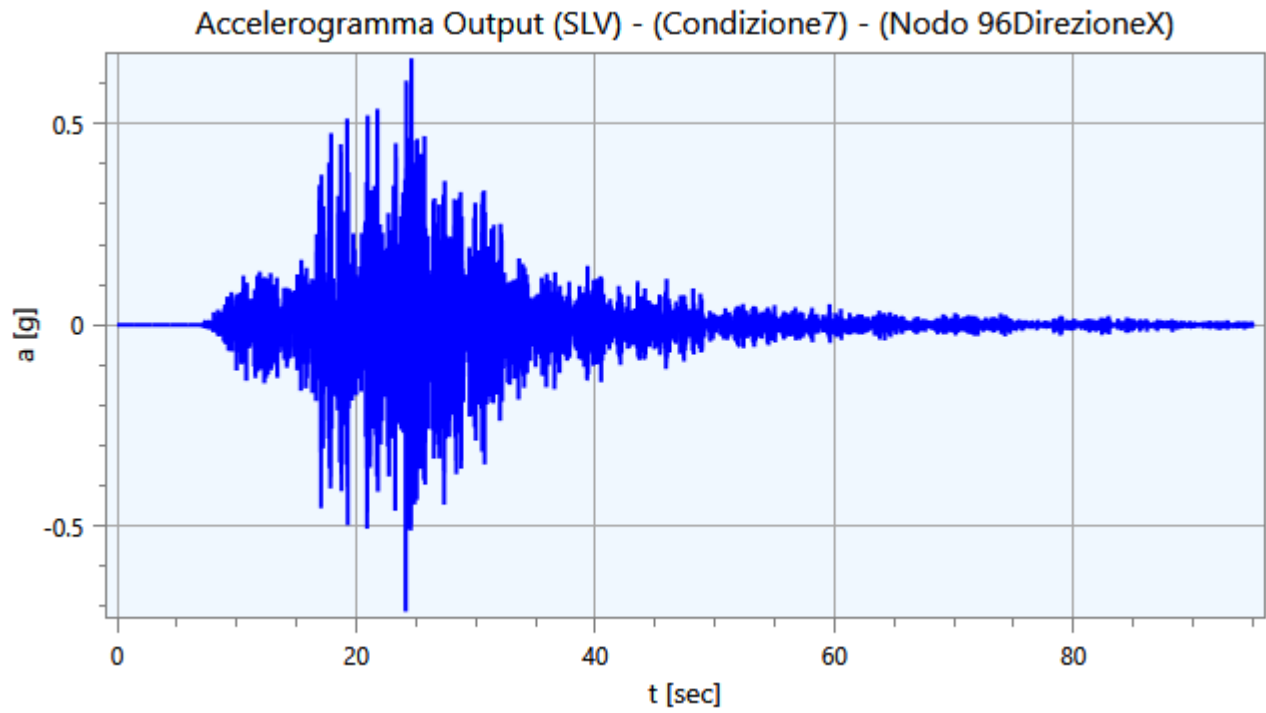


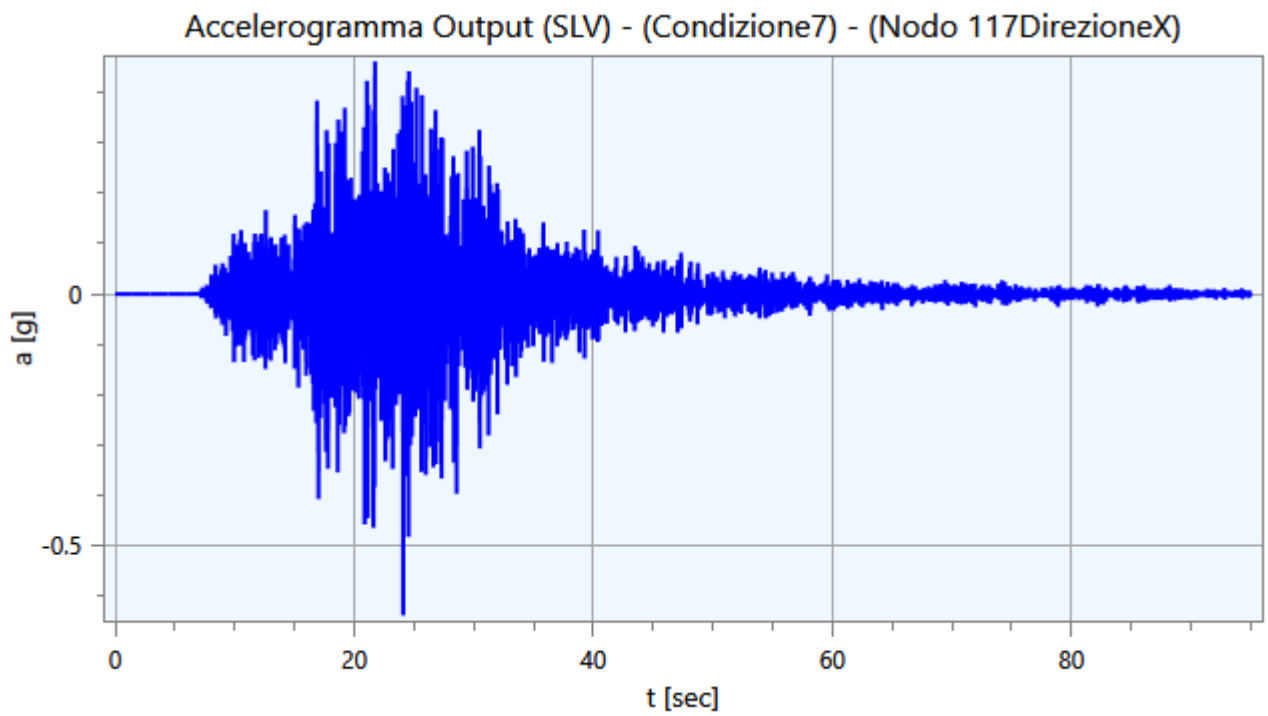
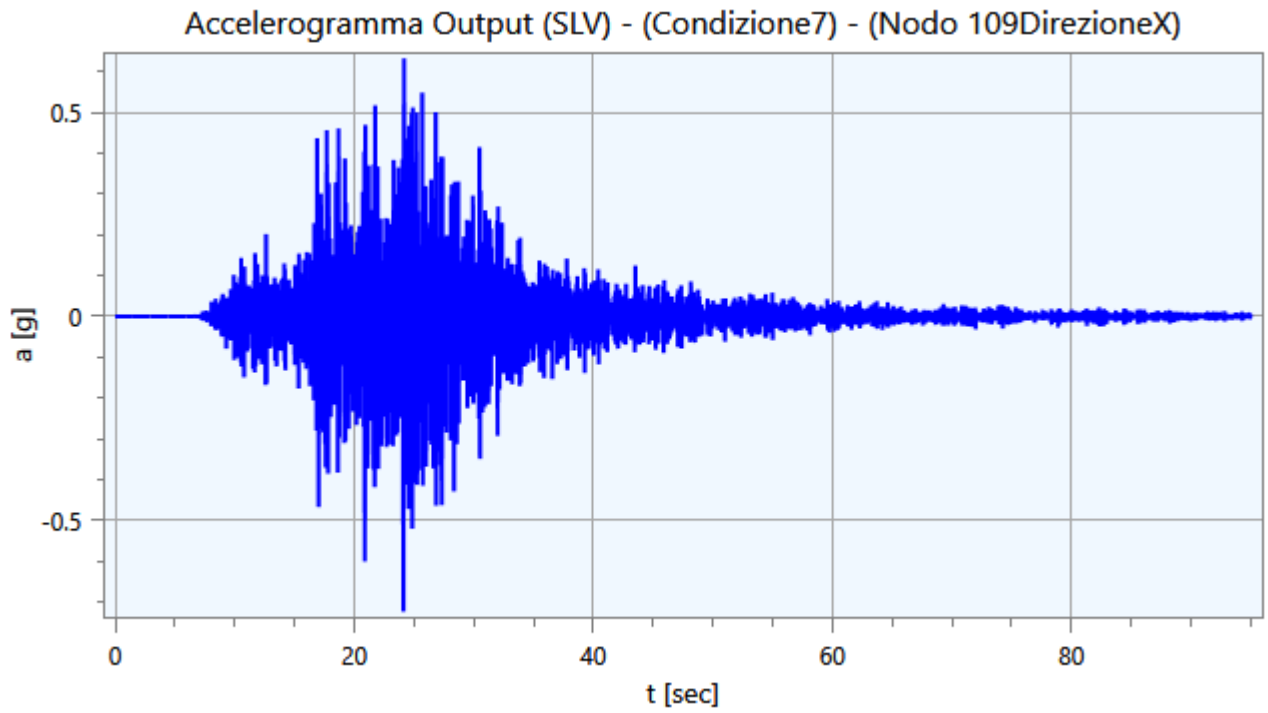
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione7) - (Nodo 40DirezioneX)



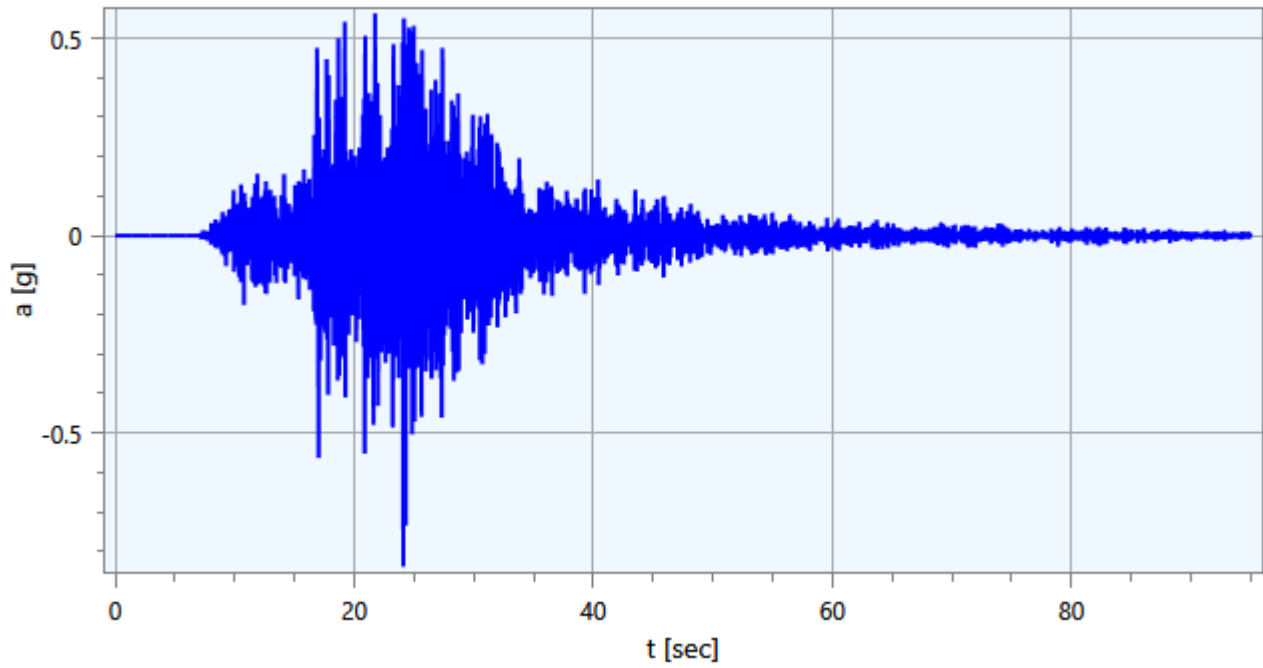
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione7) - (Nodo 81DirezioneX)



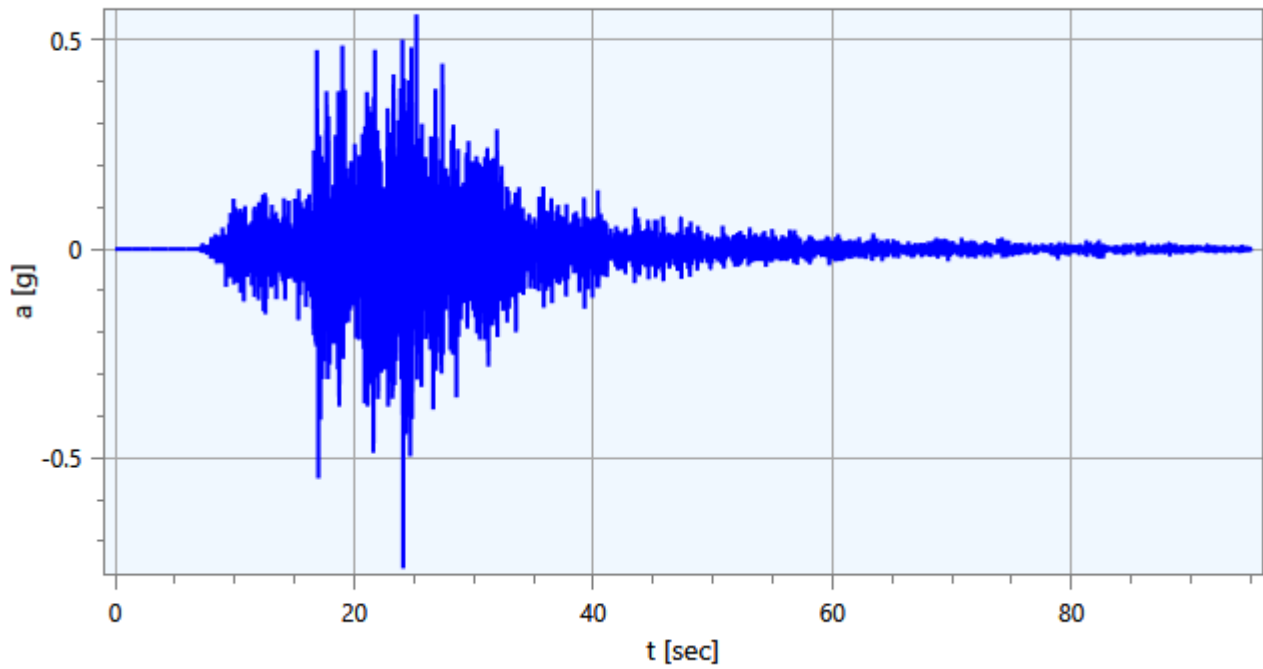




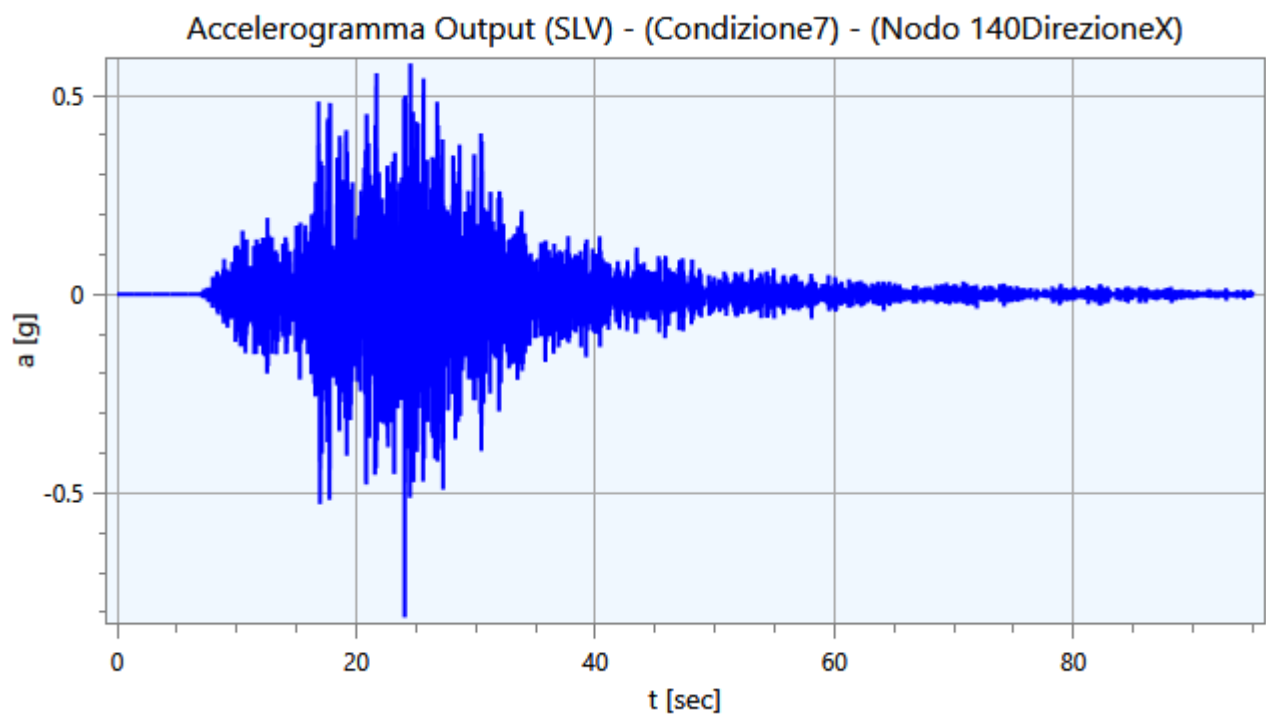
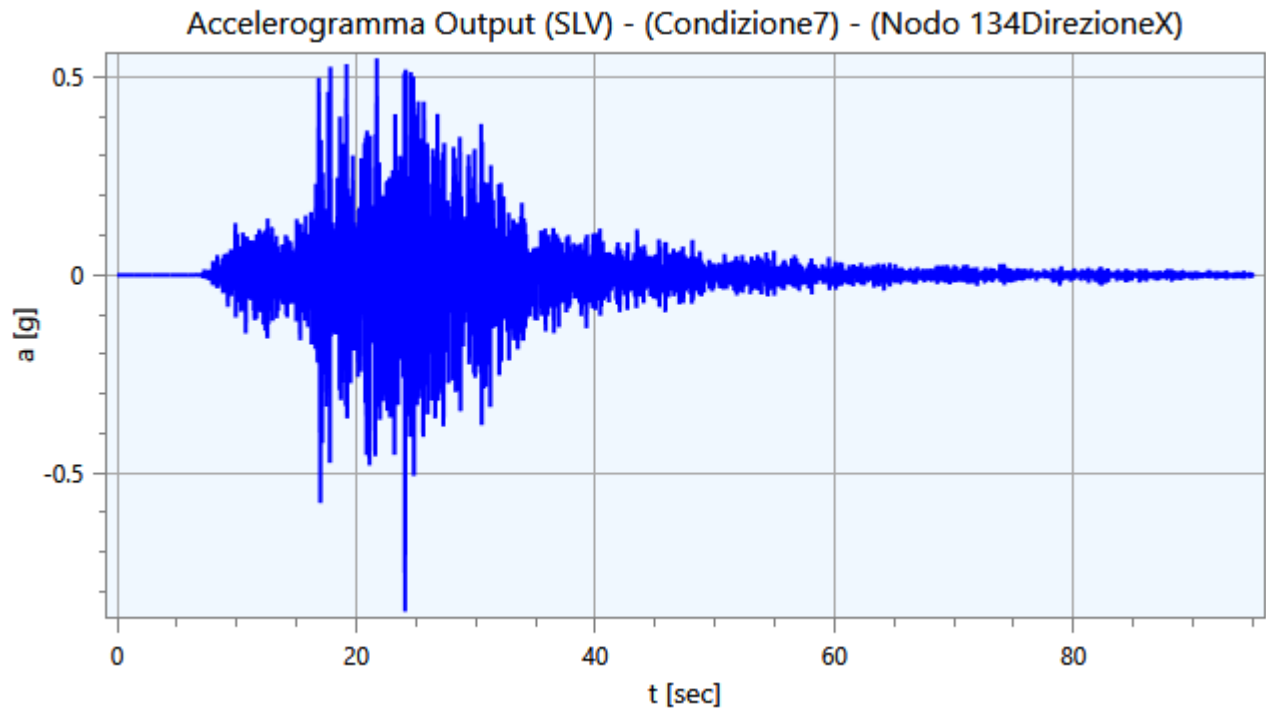
Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione7) - (Nodo 122DirezioneX)



Accelerogramma Output (SLV) - (Condizione7) - (Nodo 129DirezioneX)

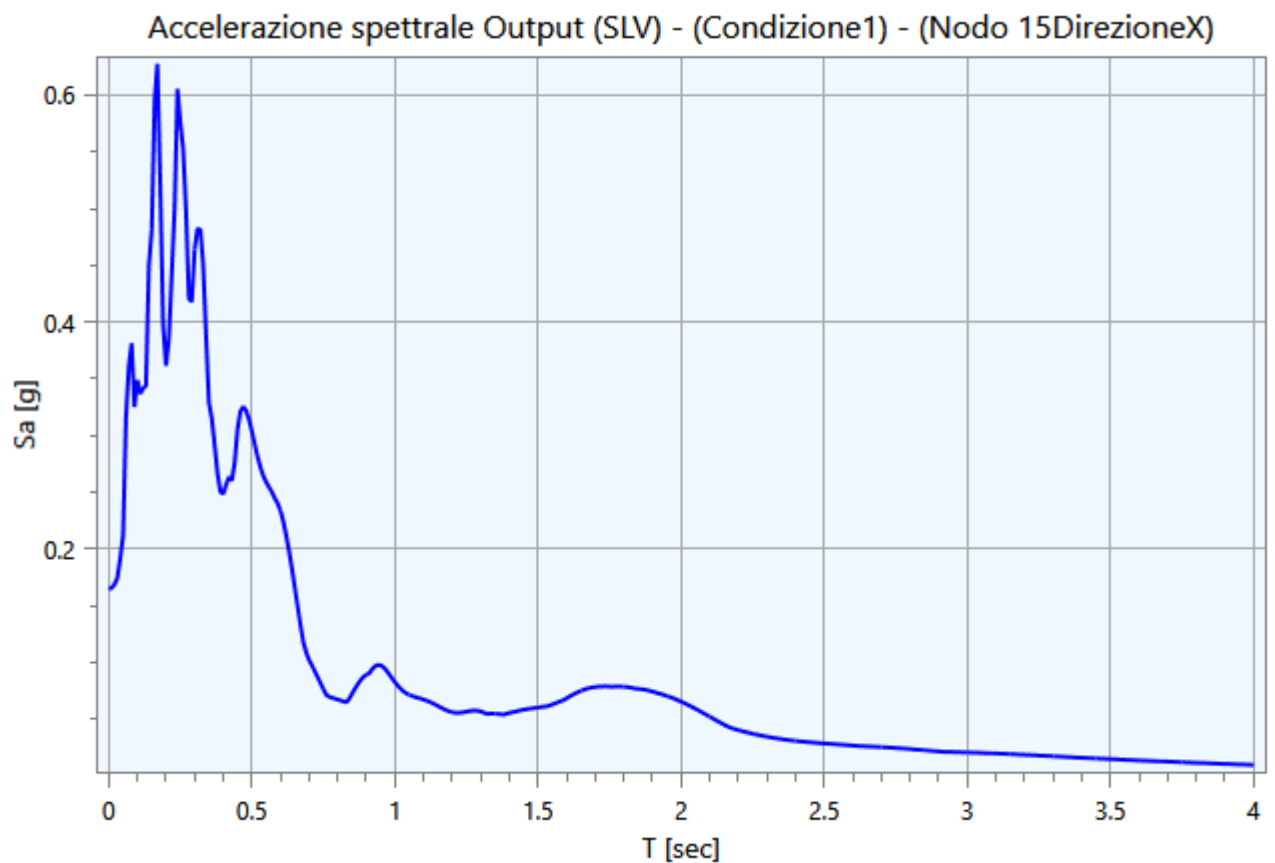
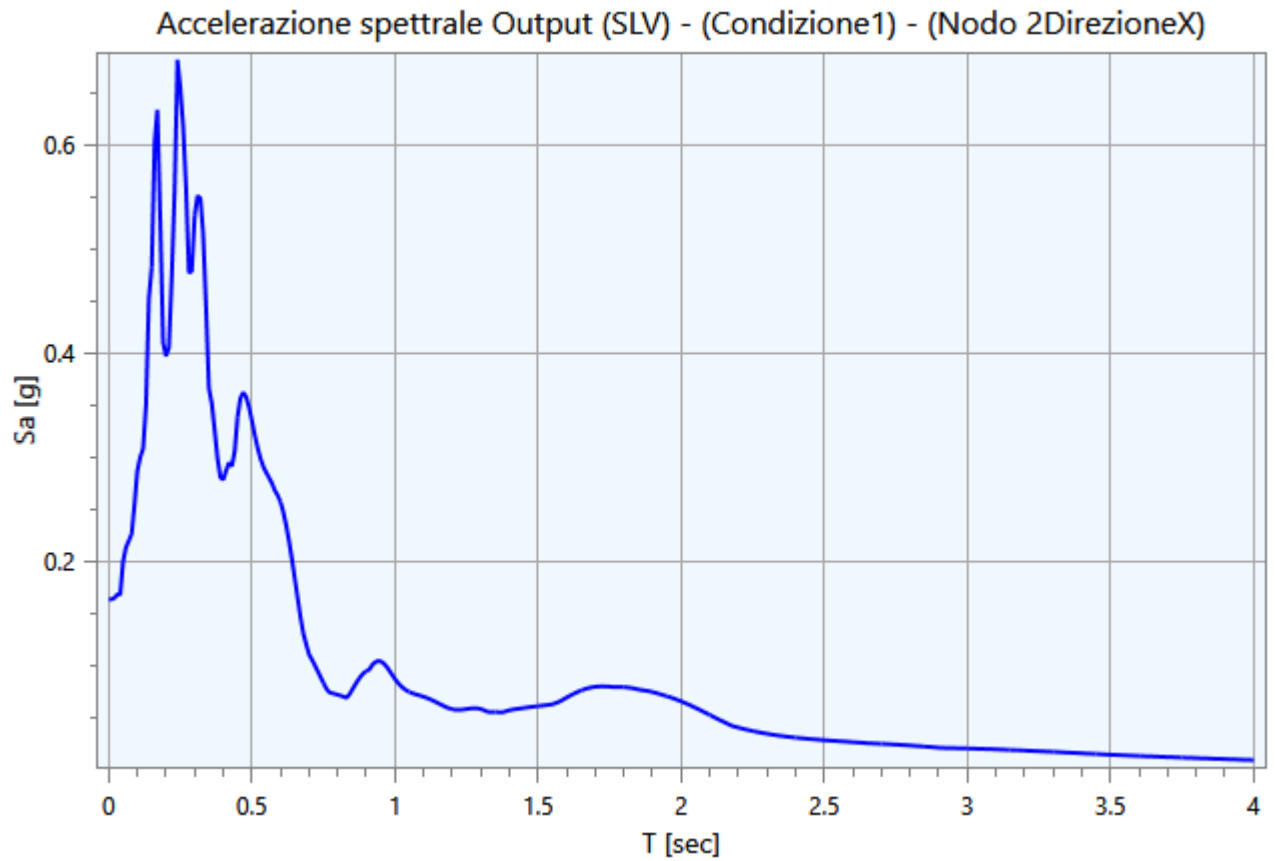


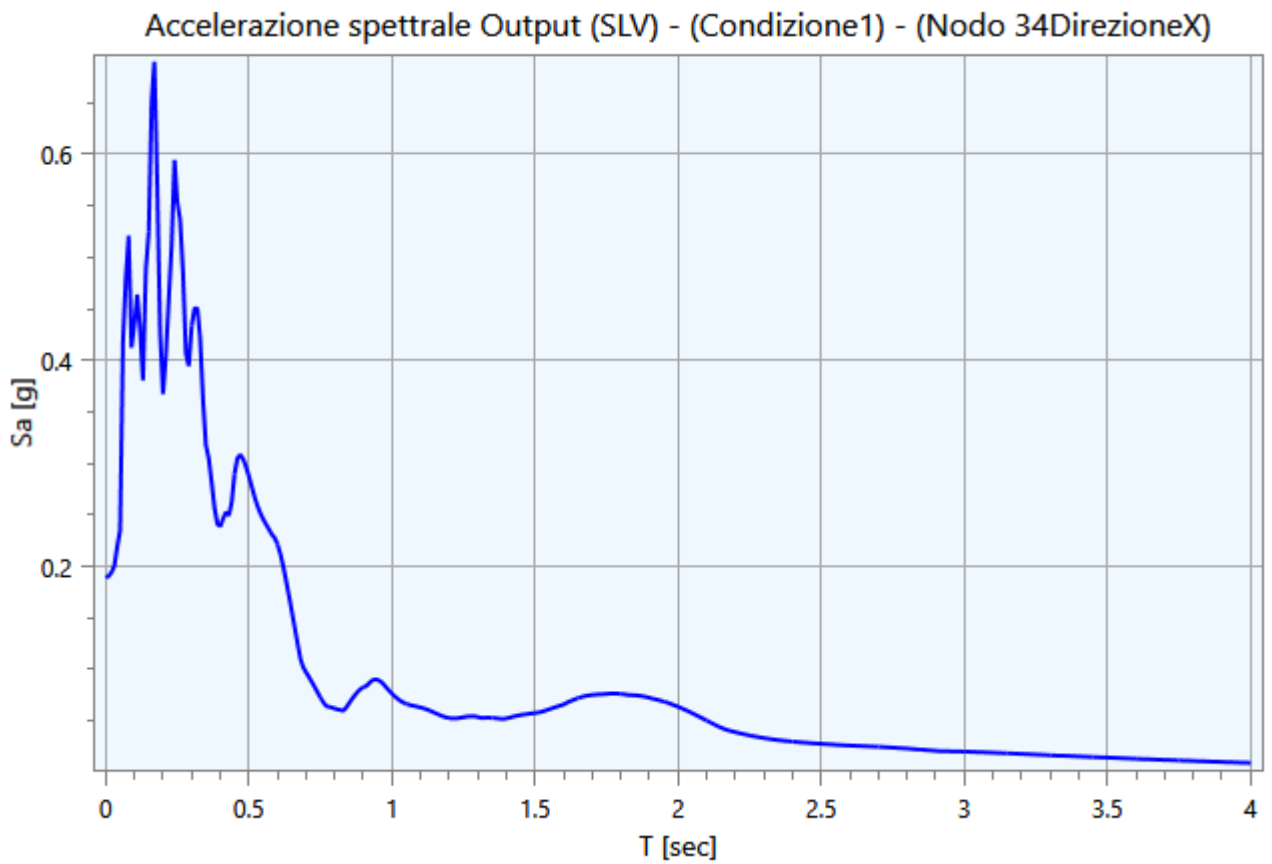
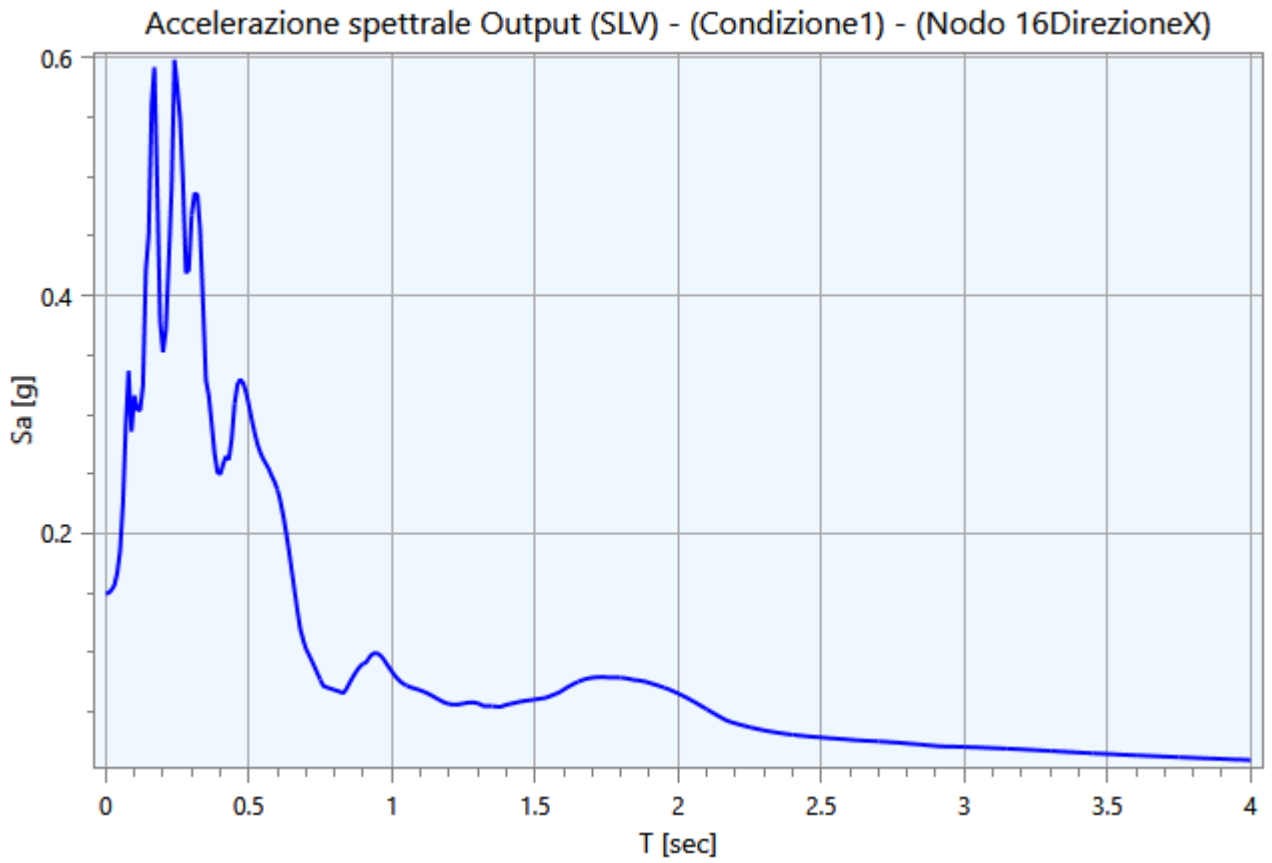




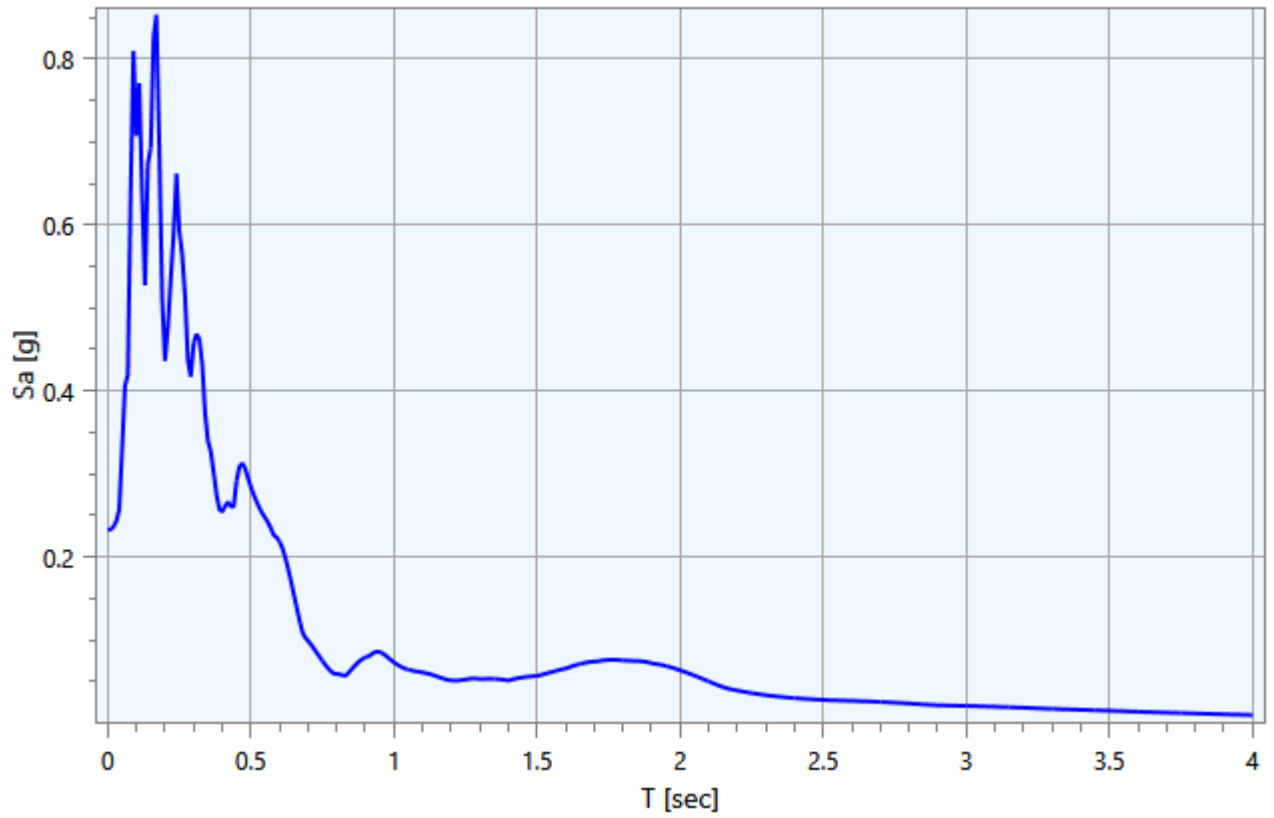
## 5.2 - Spettri Output

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

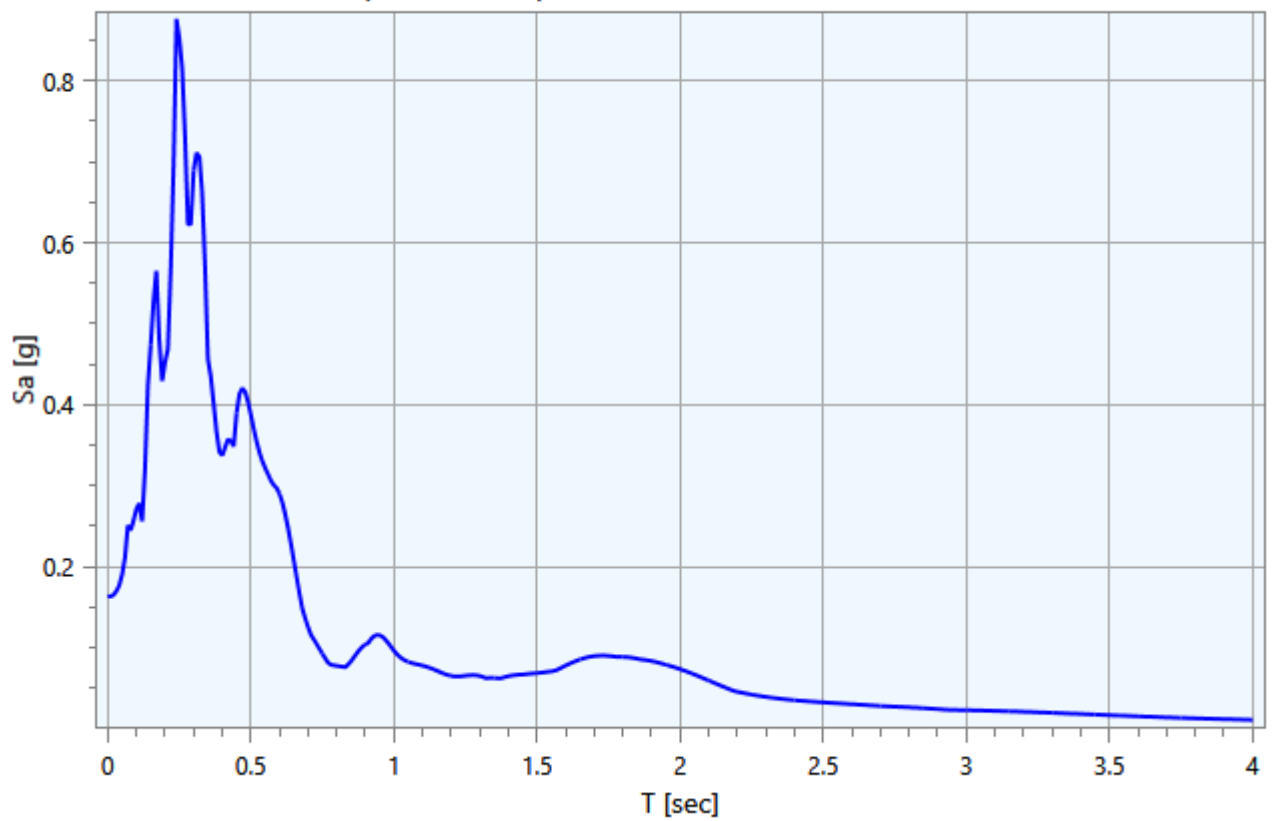




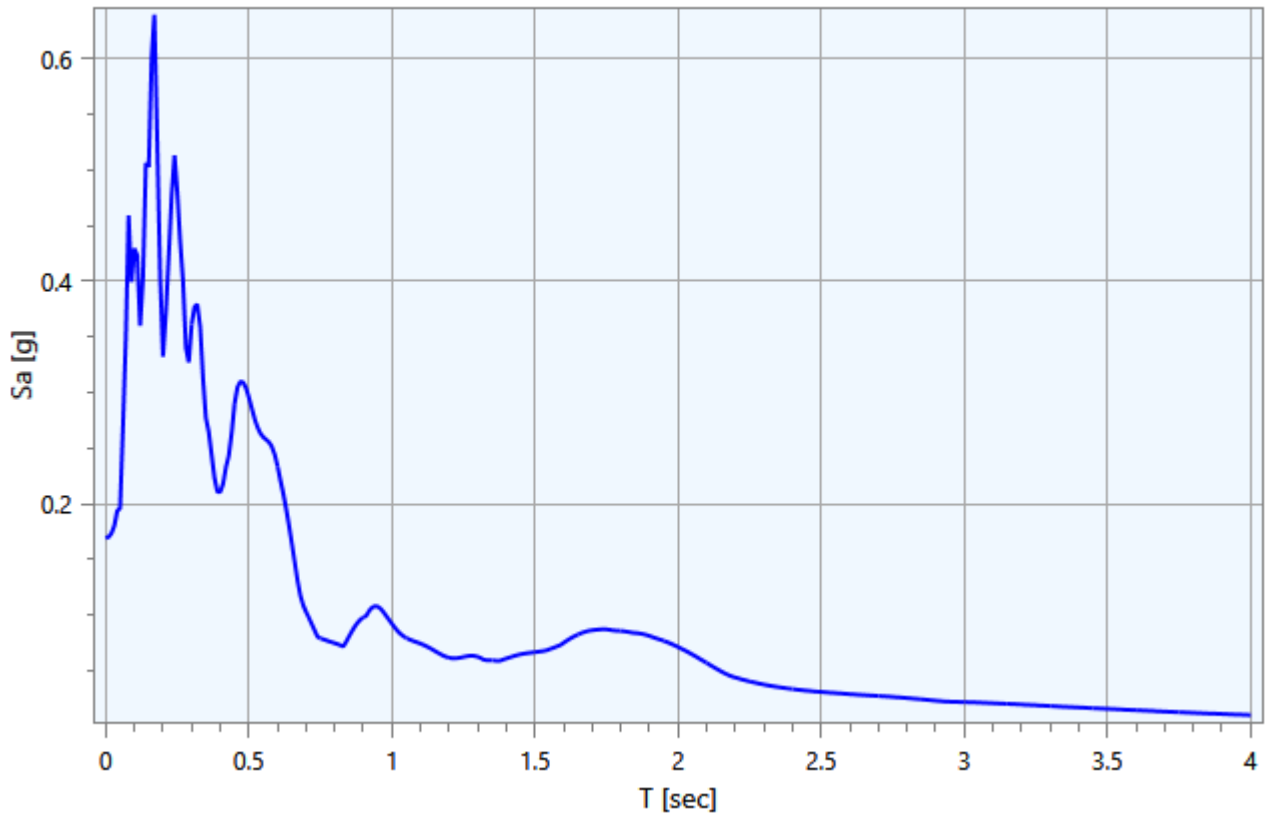
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 40DirezioneX)



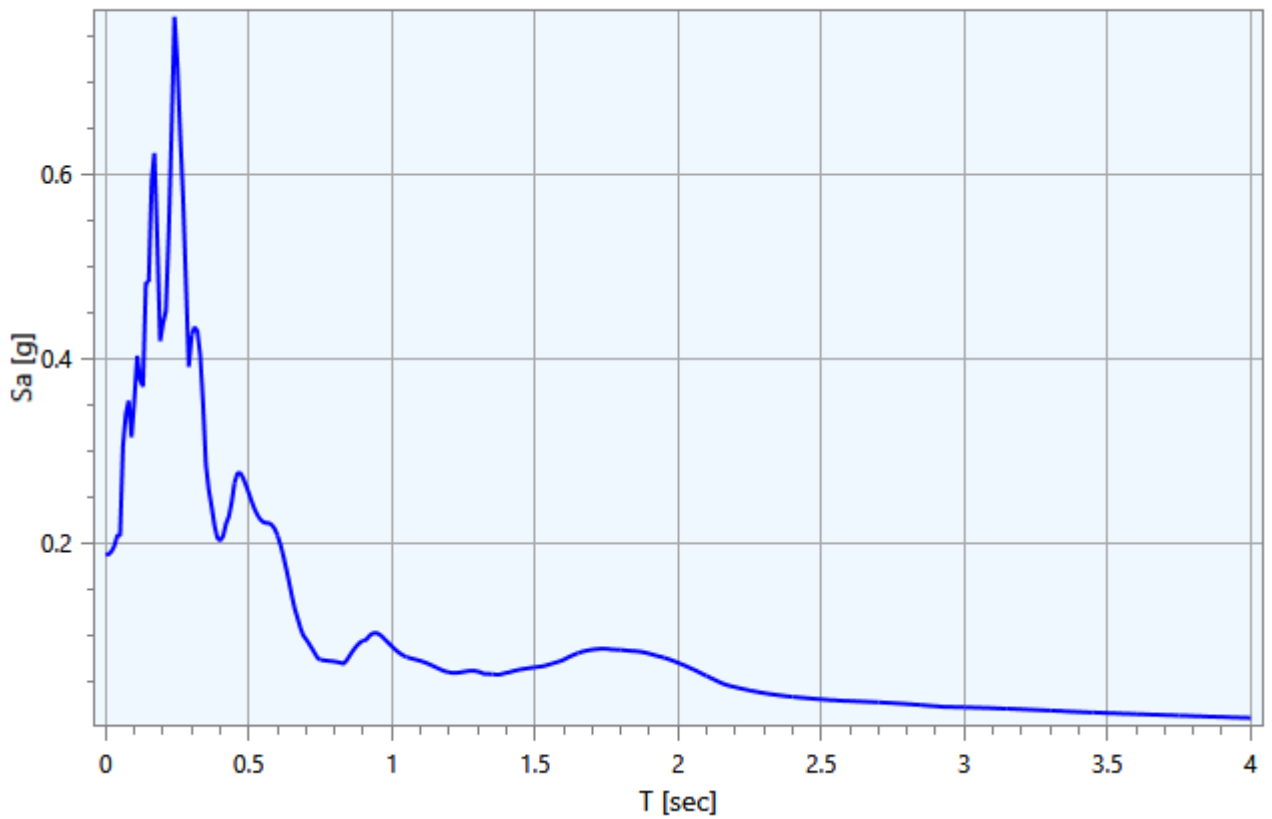
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 81DirezioneX)

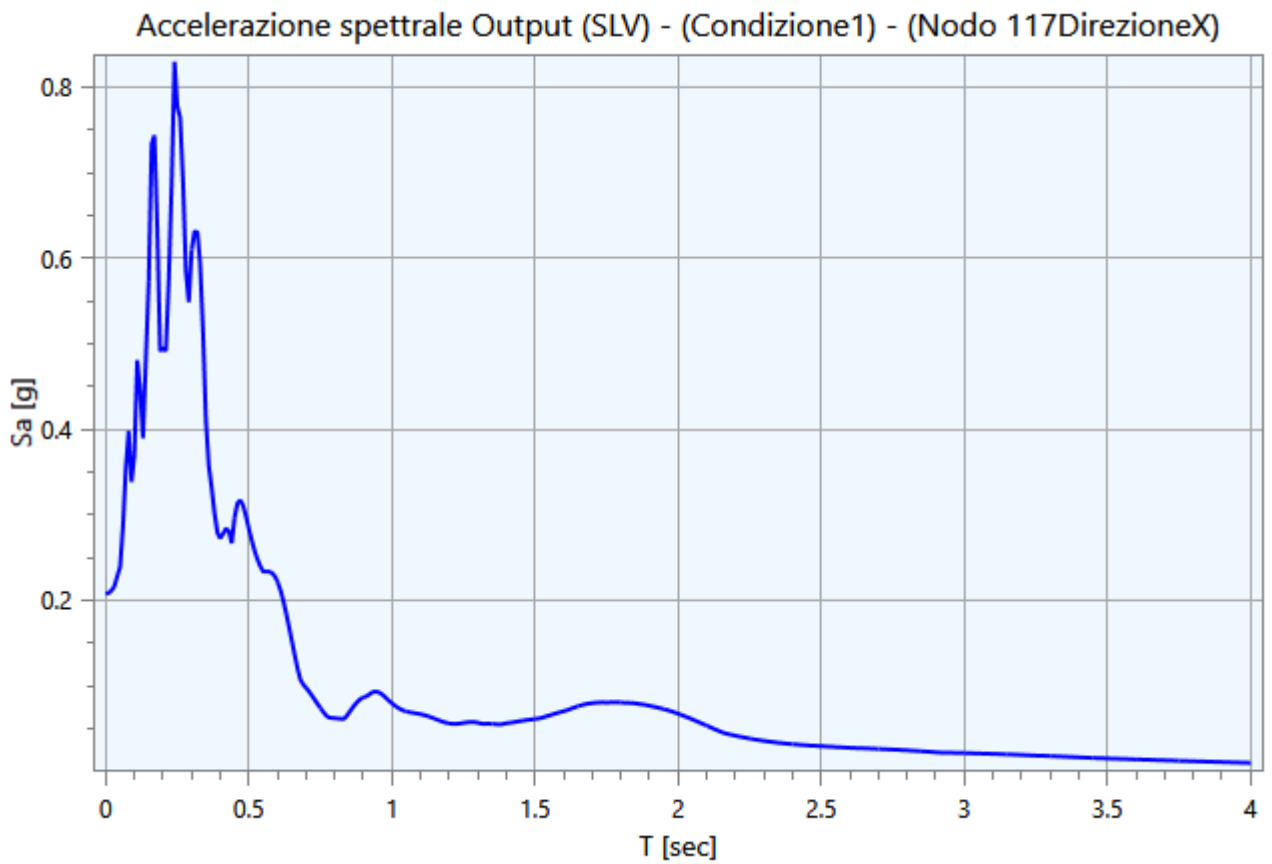
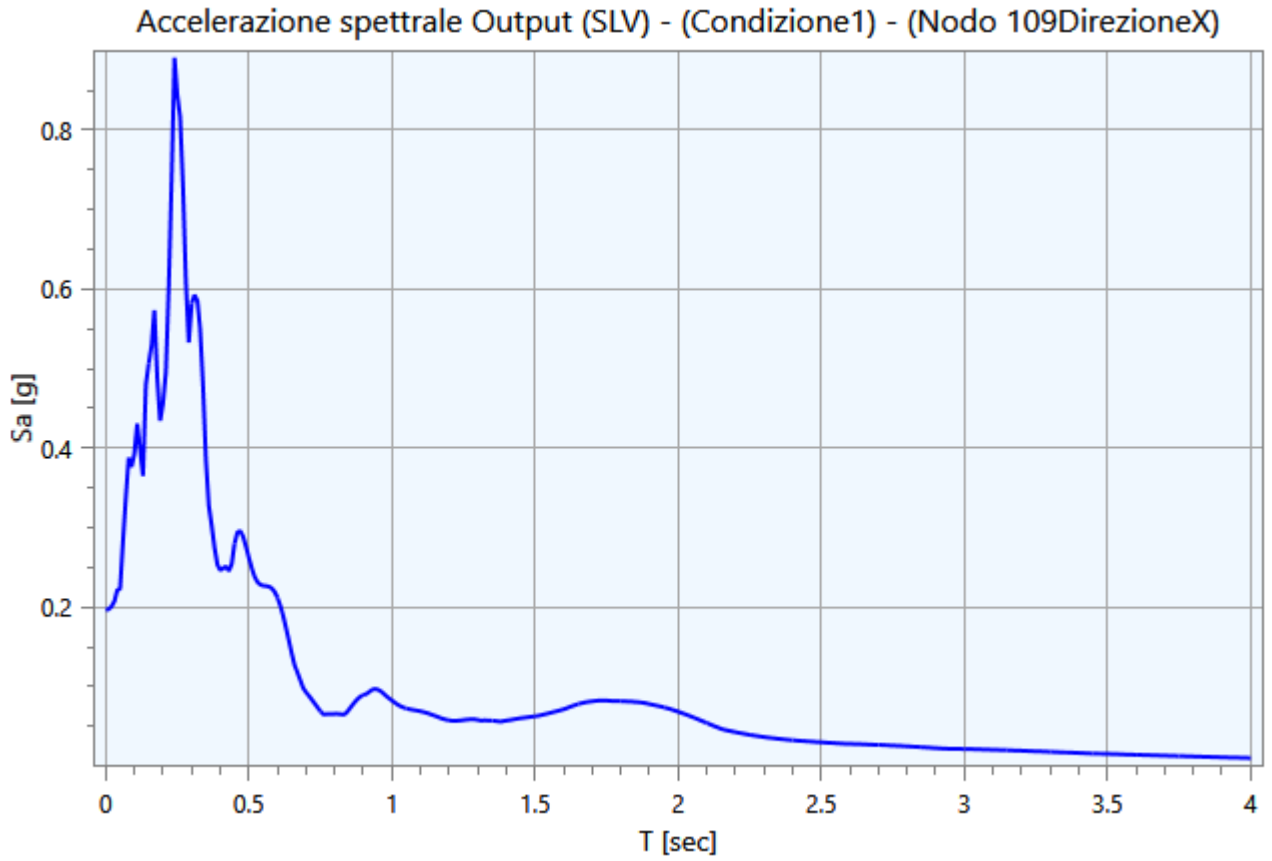


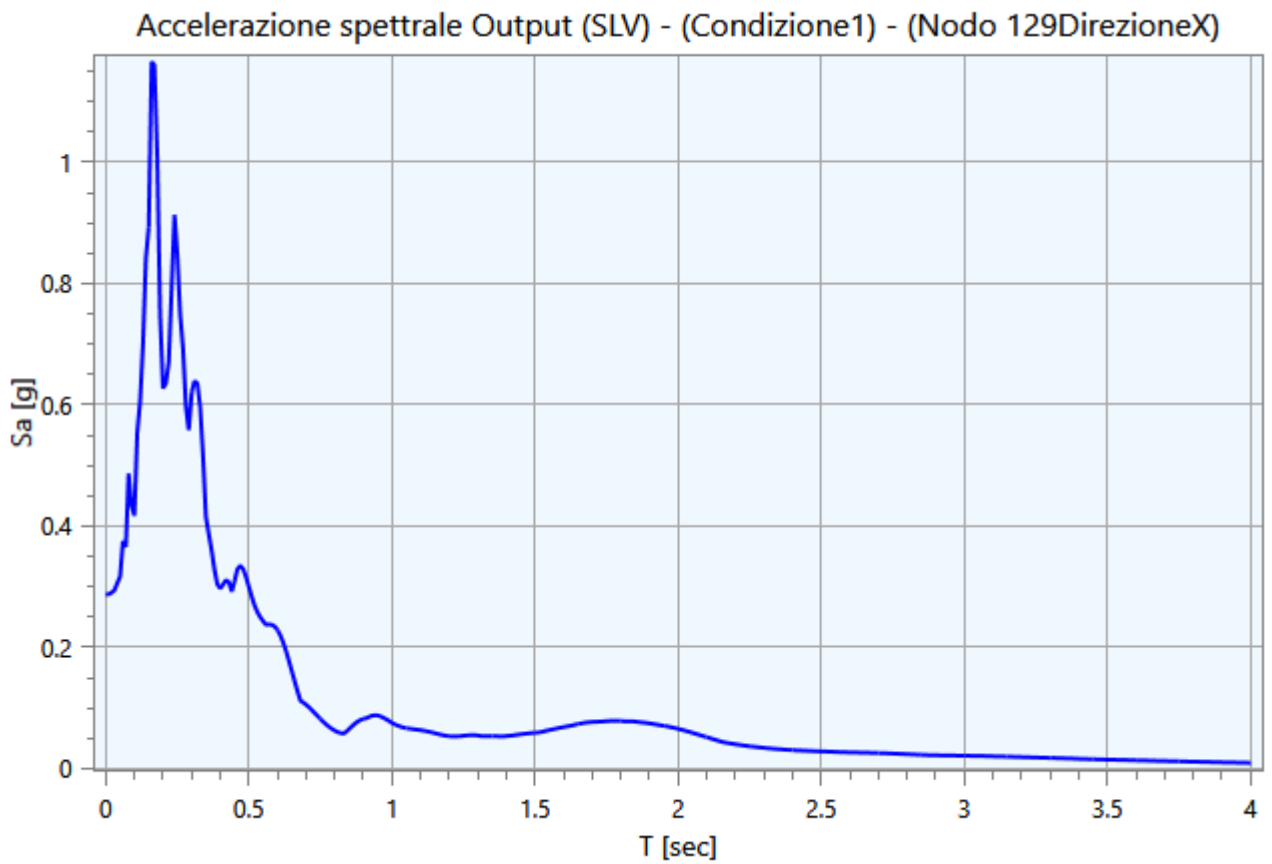
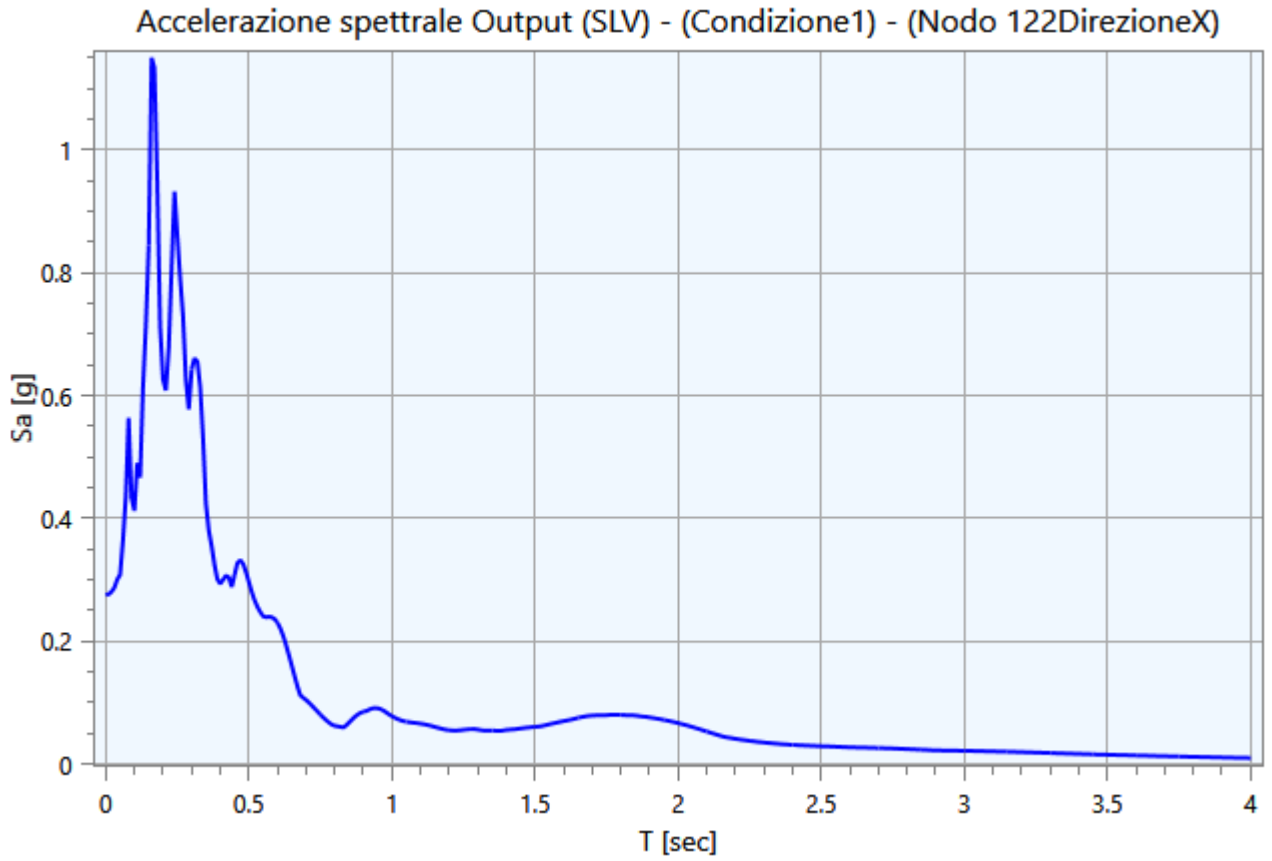
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 96DirezioneX)



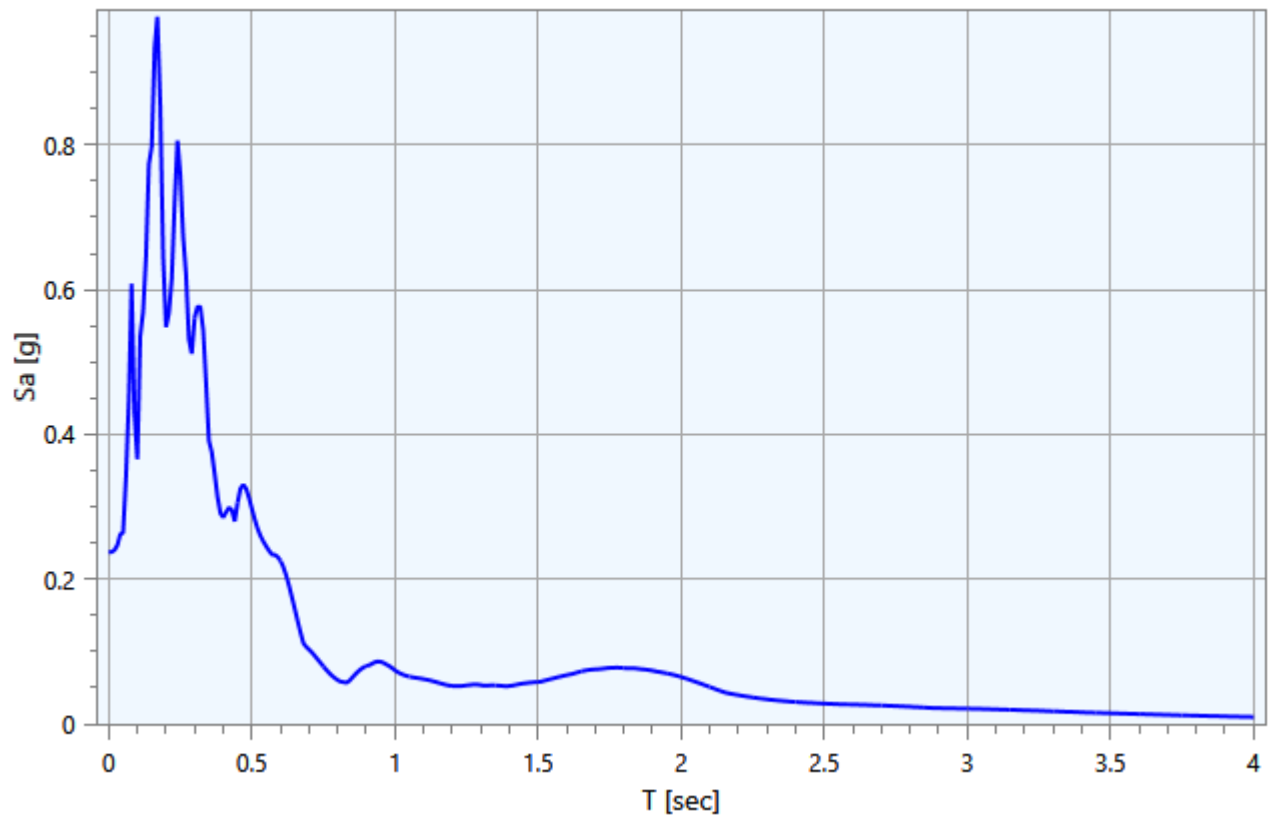
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 102DirezioneX)



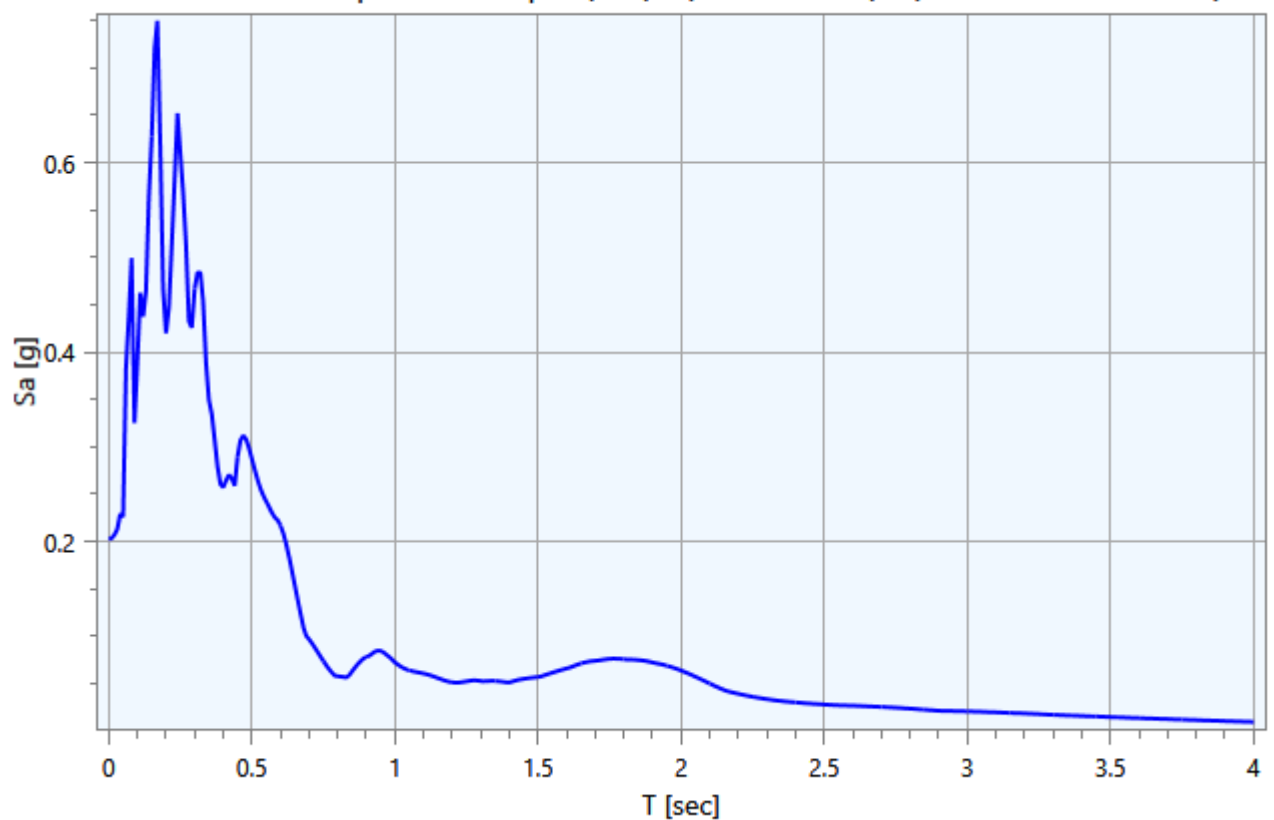




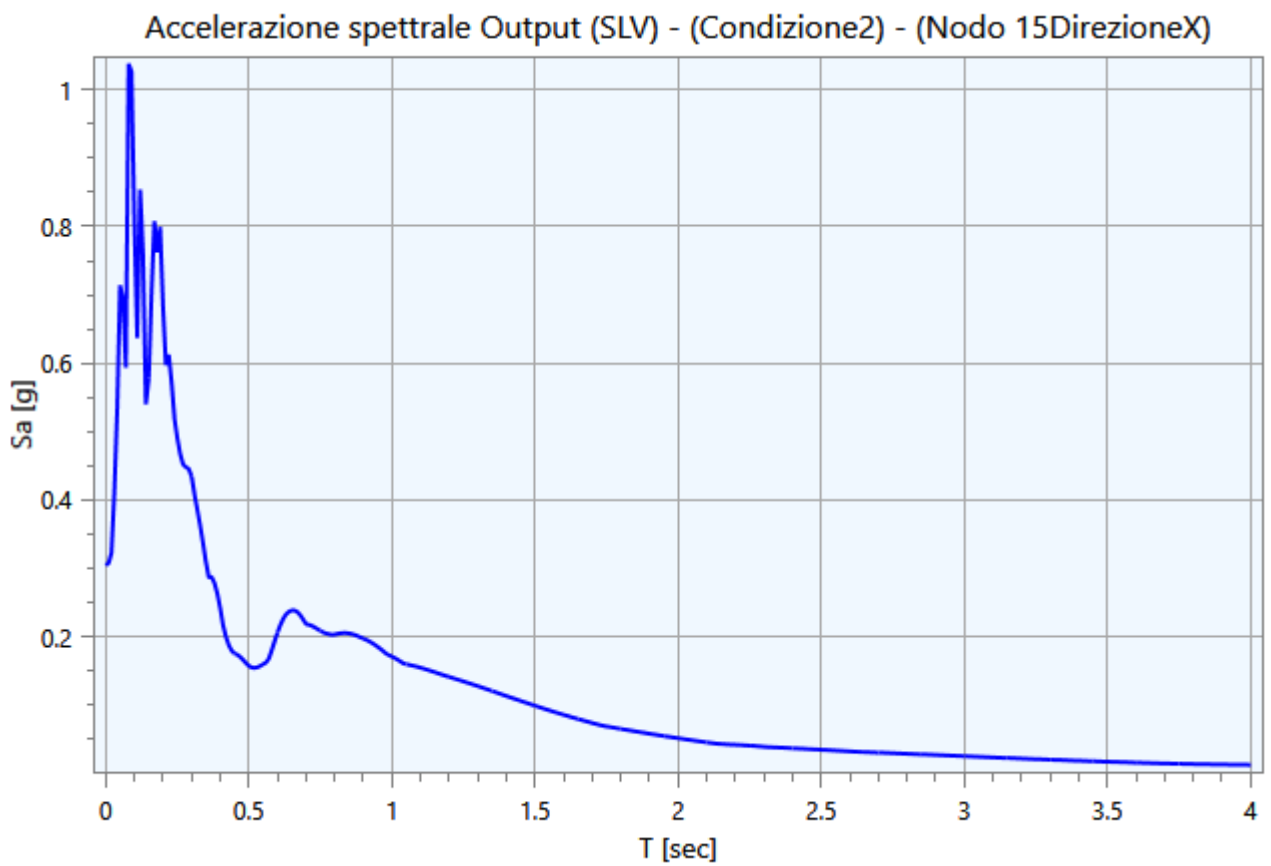
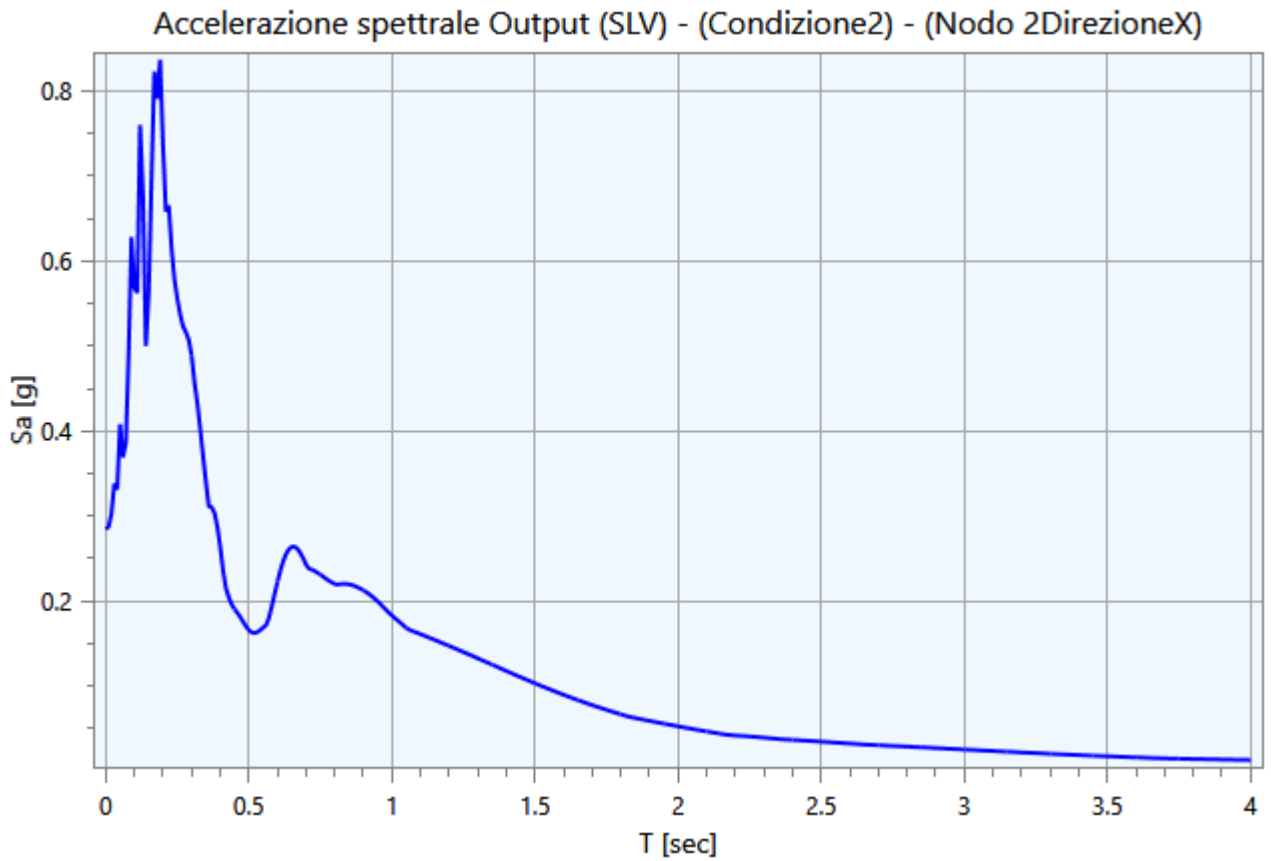
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 134DirezioneX)



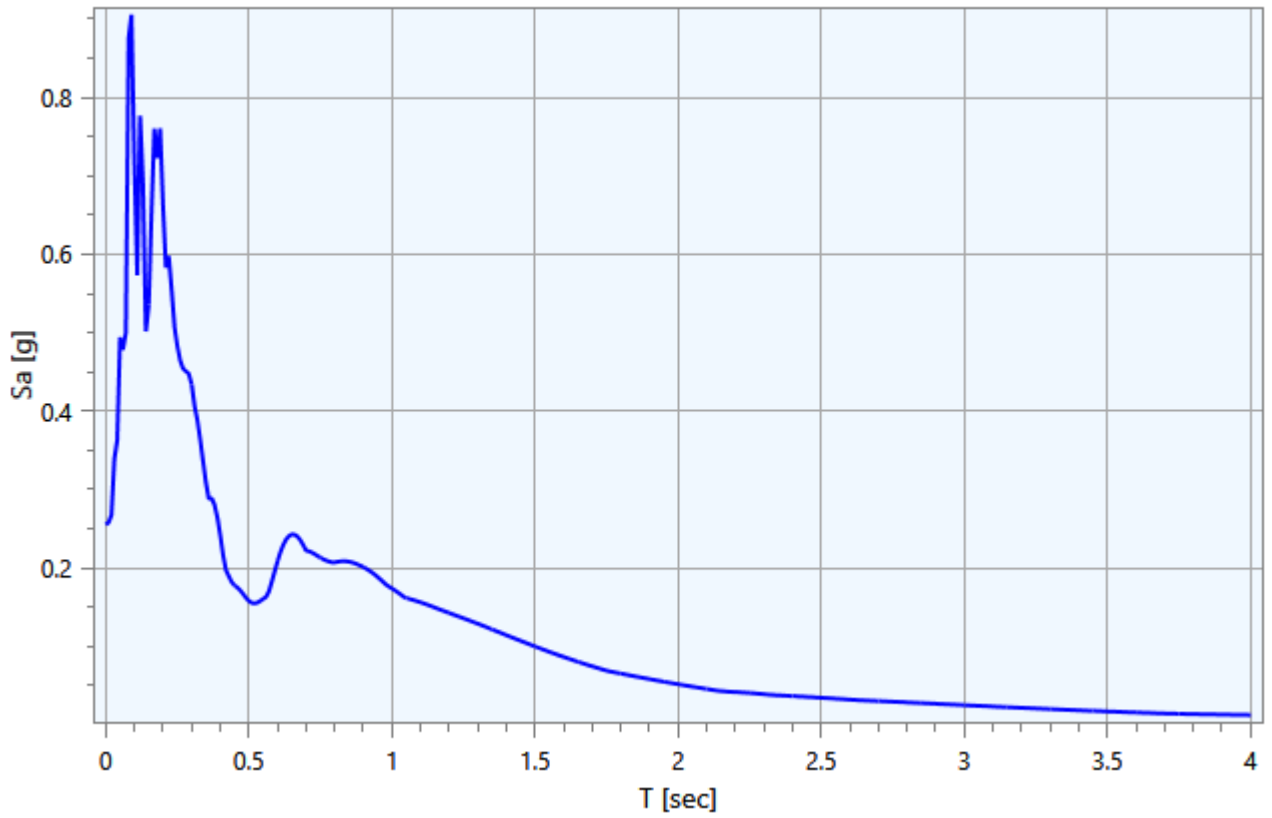
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione1) - (Nodo 140DirezioneX)



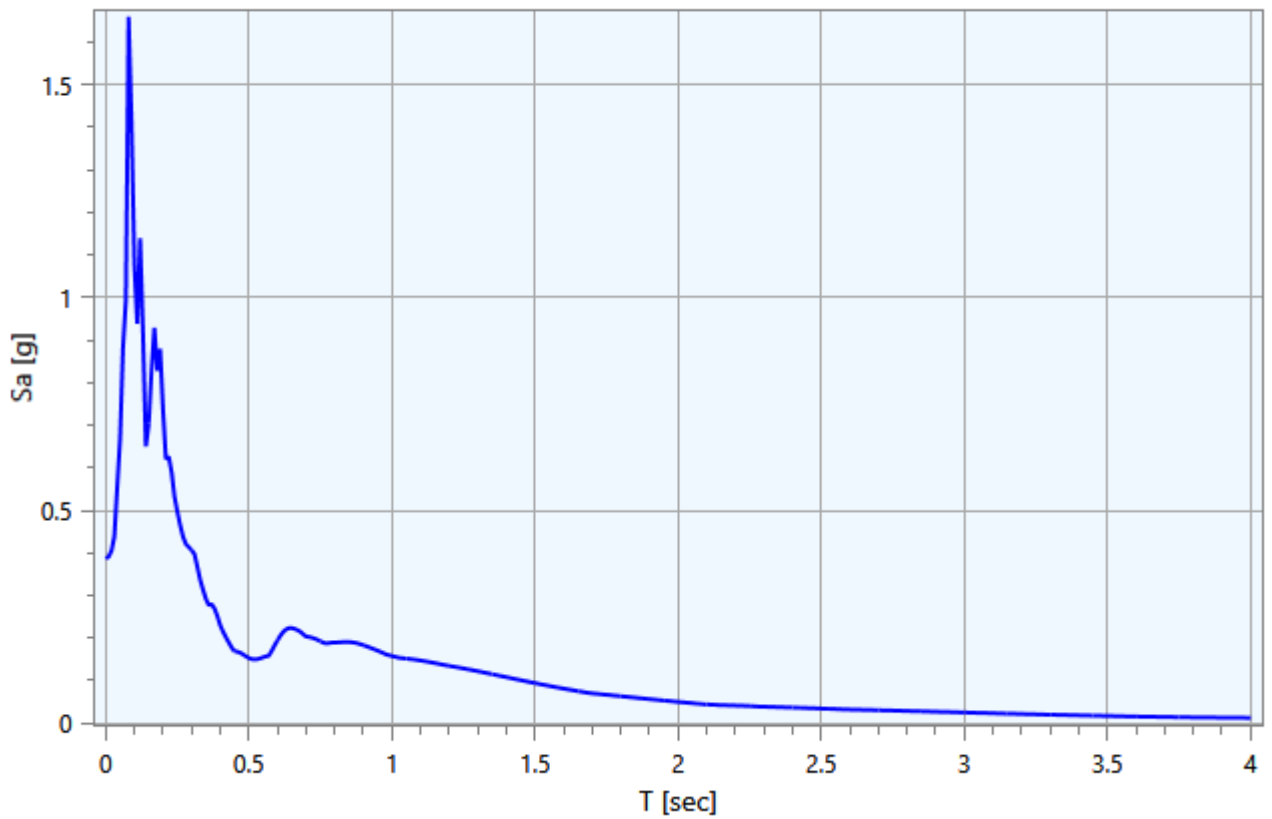




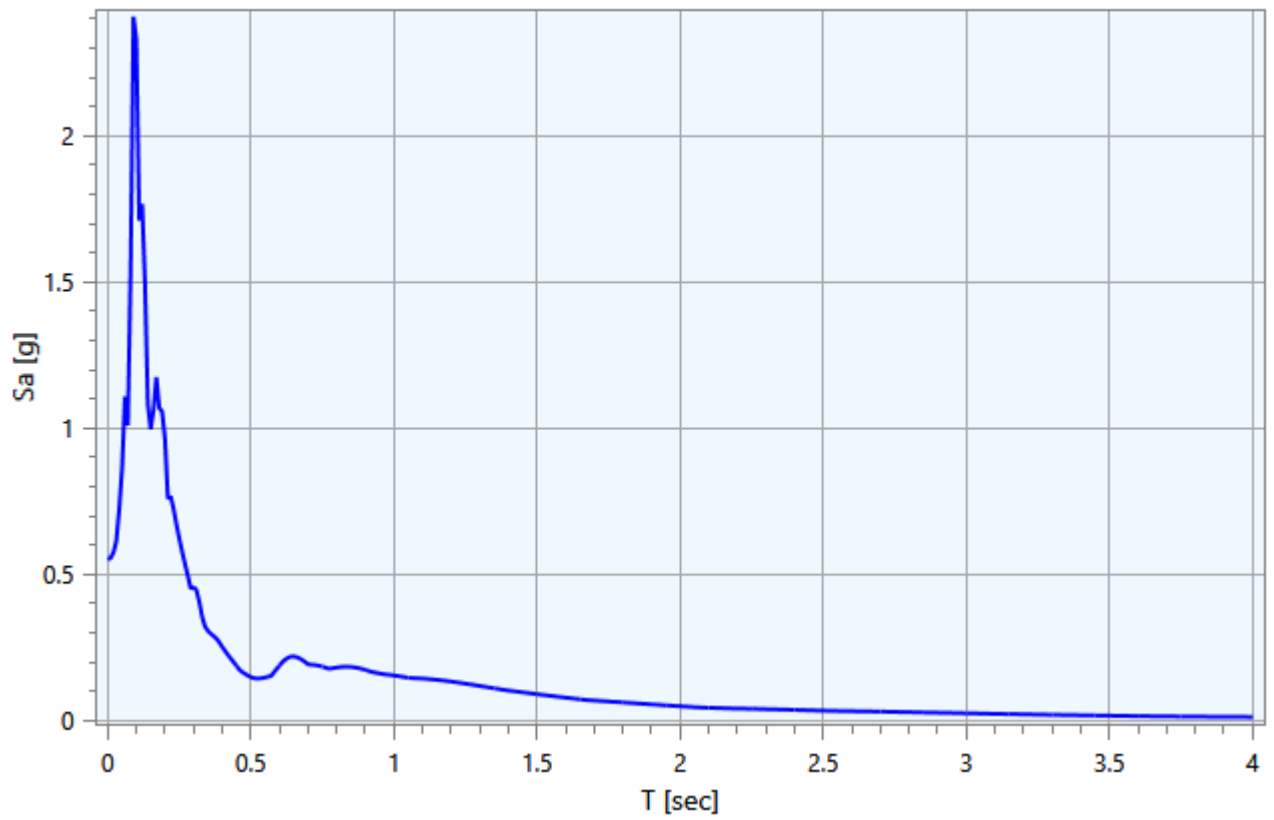
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 16DirezioneX)



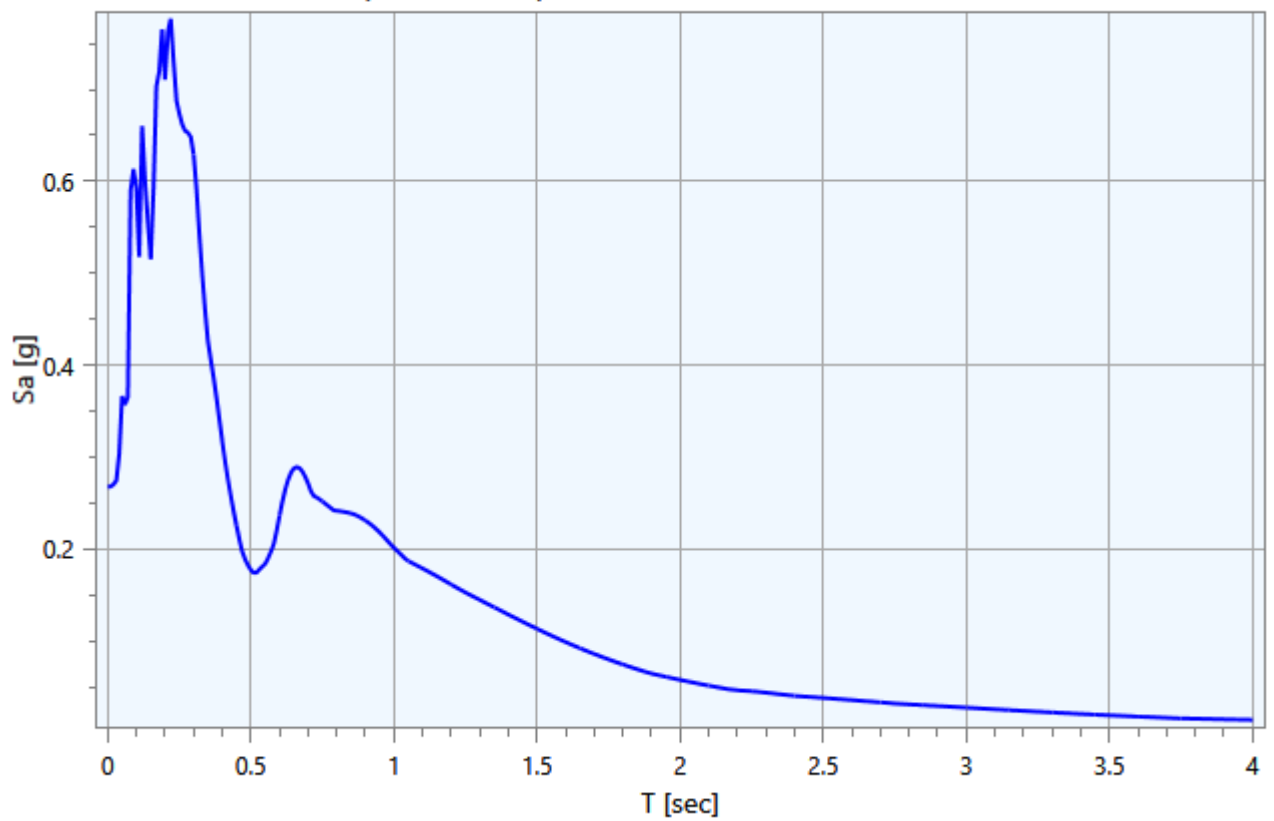
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 34DirezioneX)



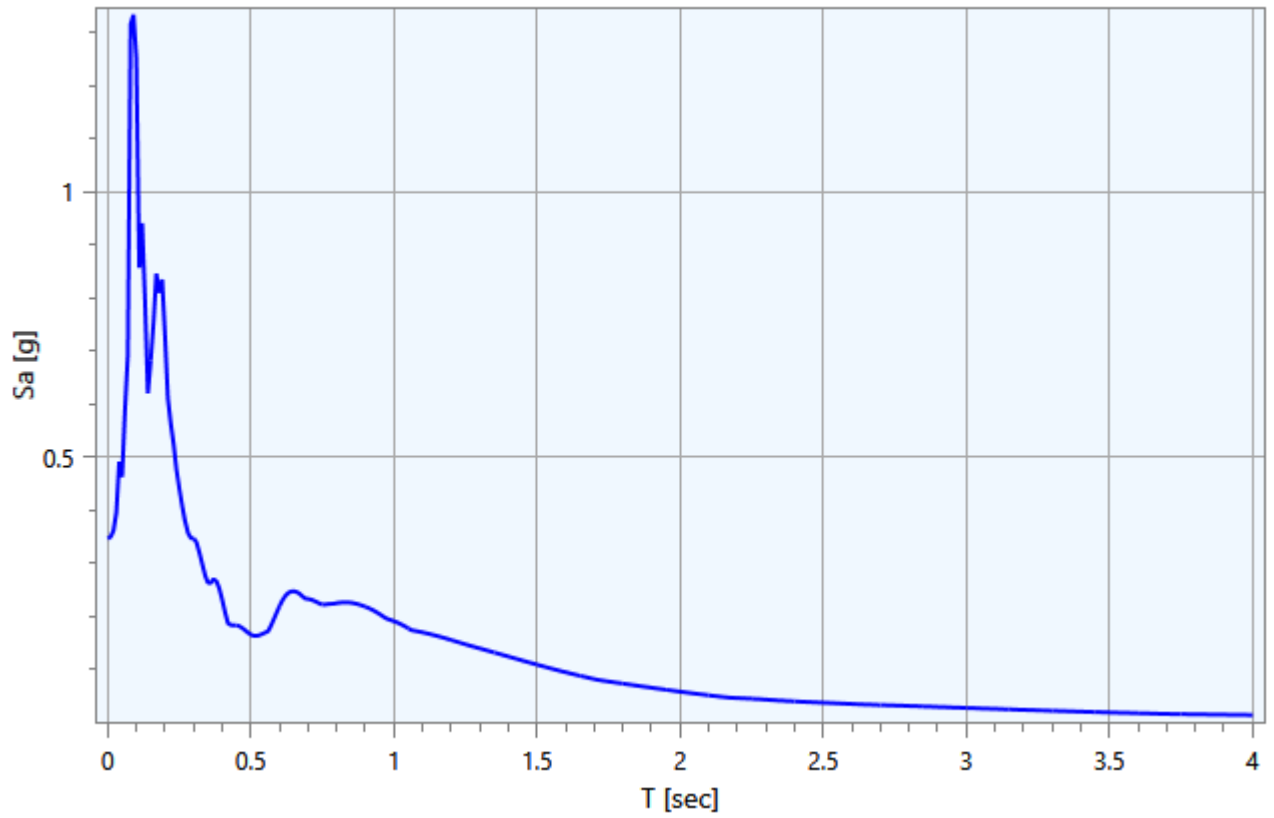
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 40DirezioneX)



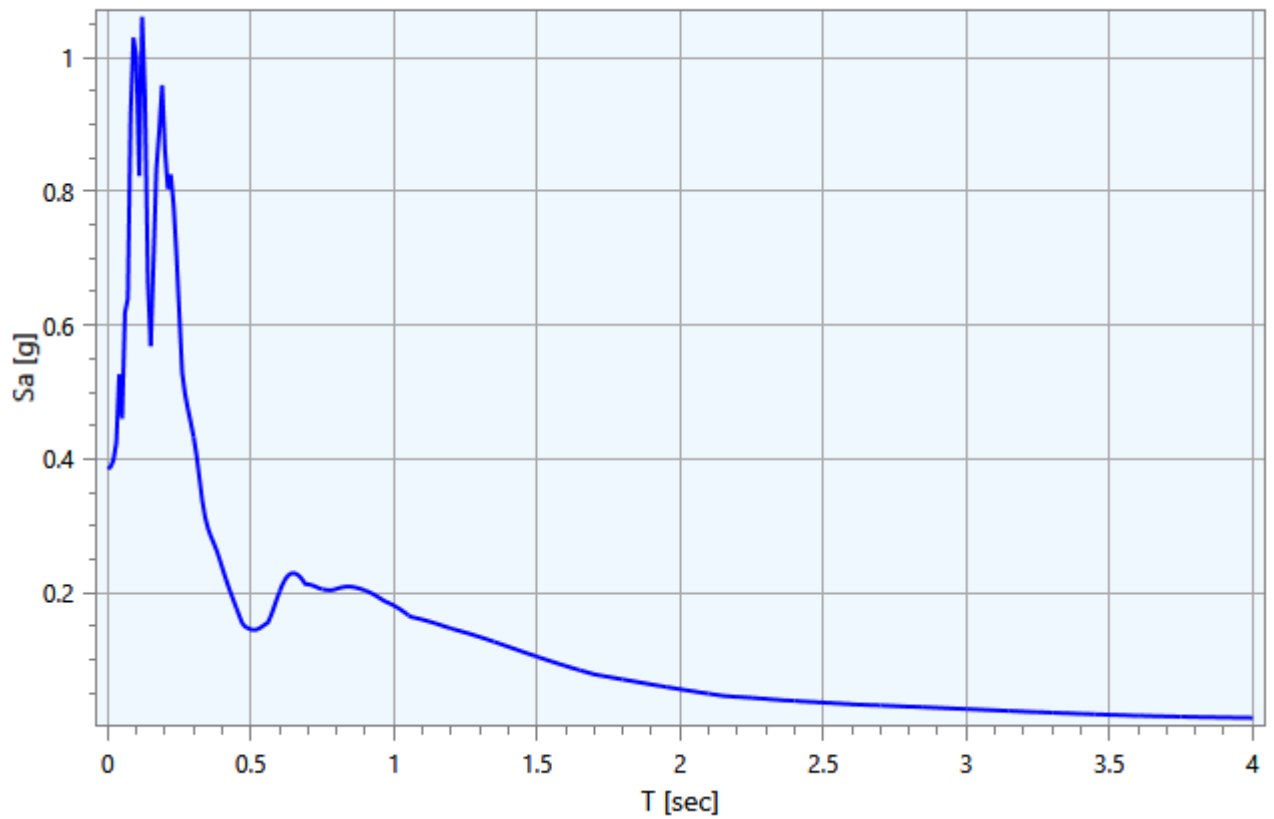
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 81DirezioneX)

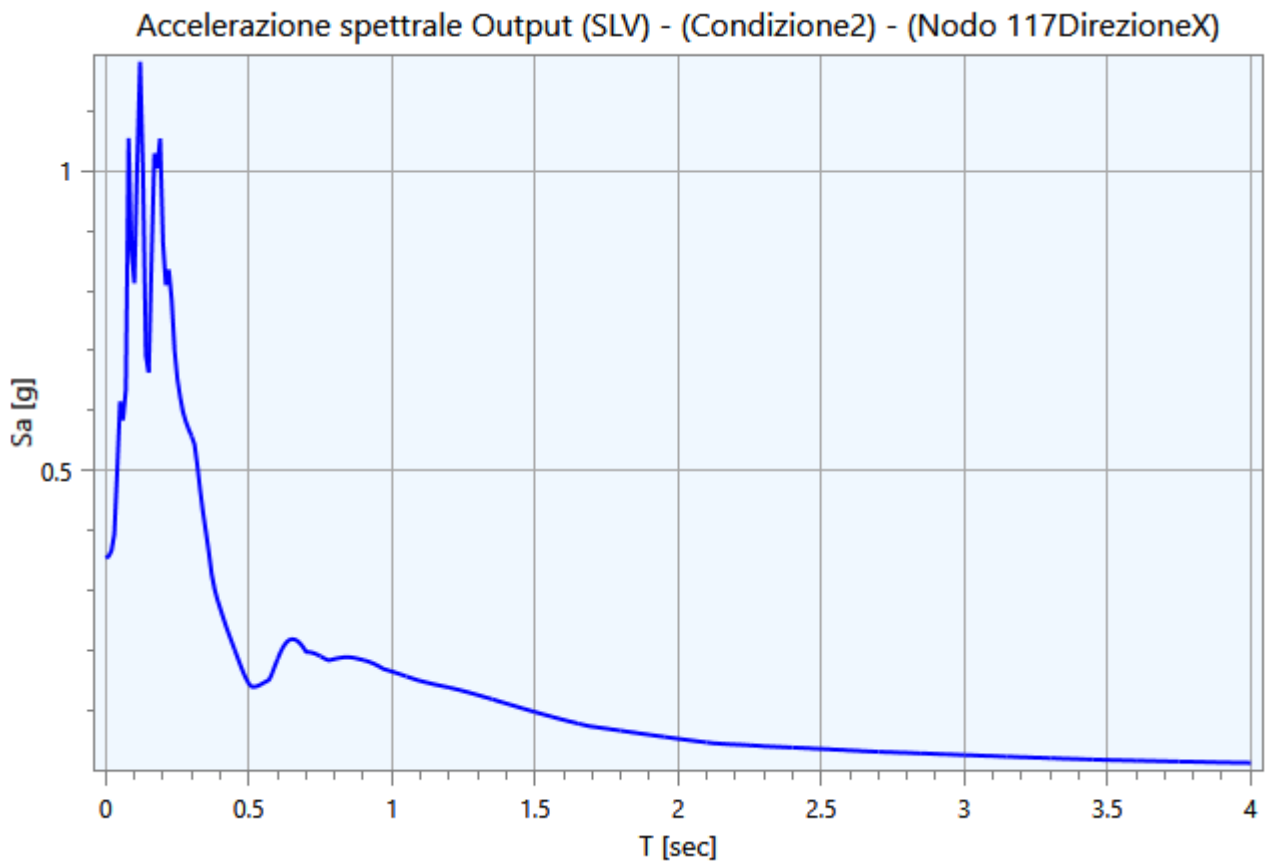
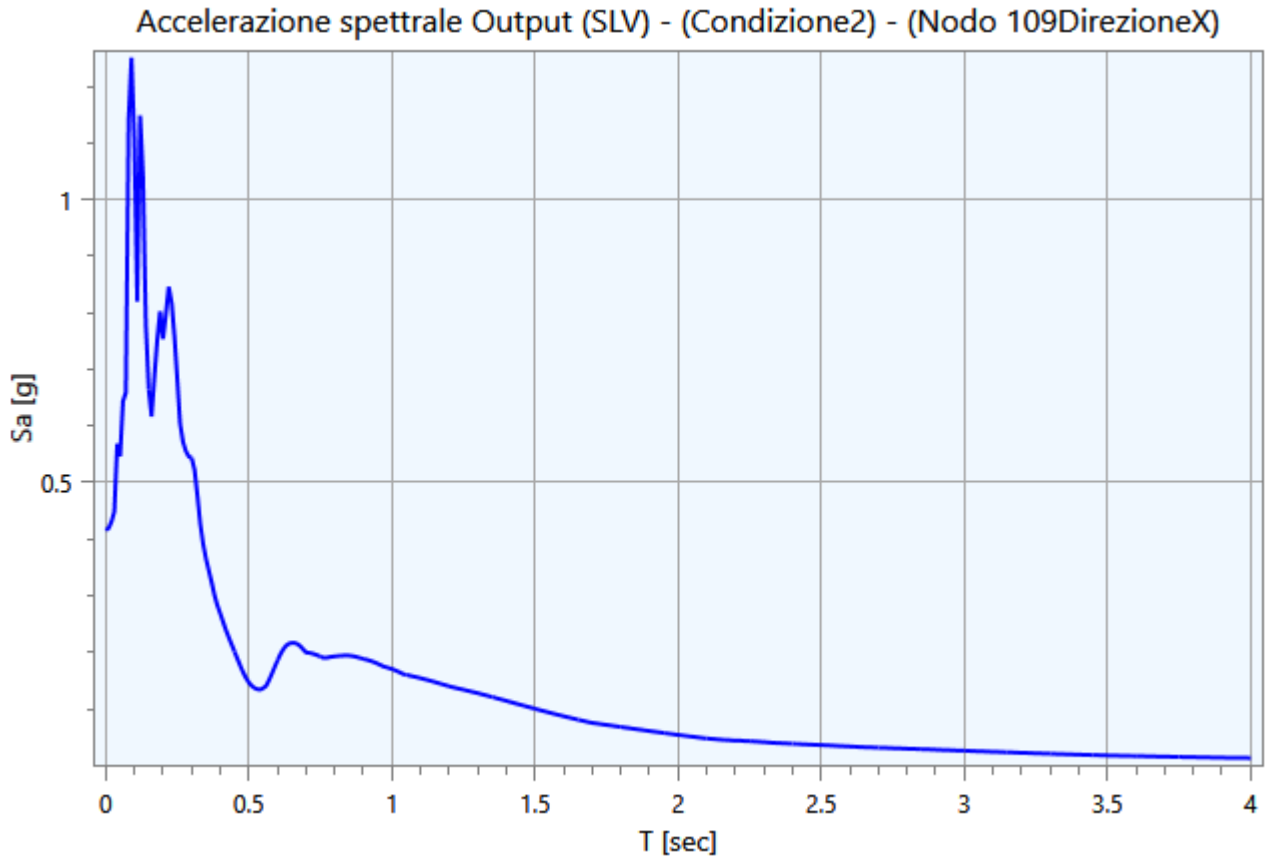


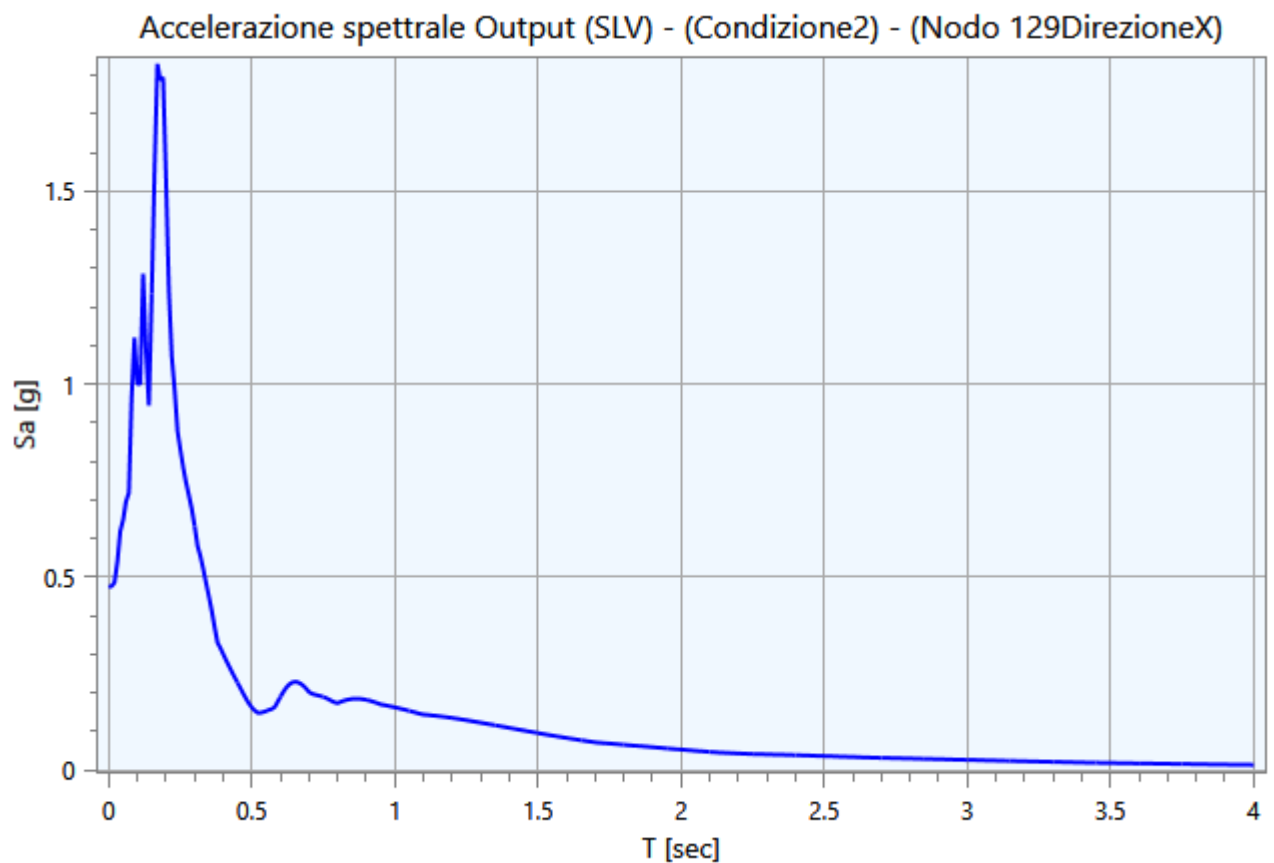
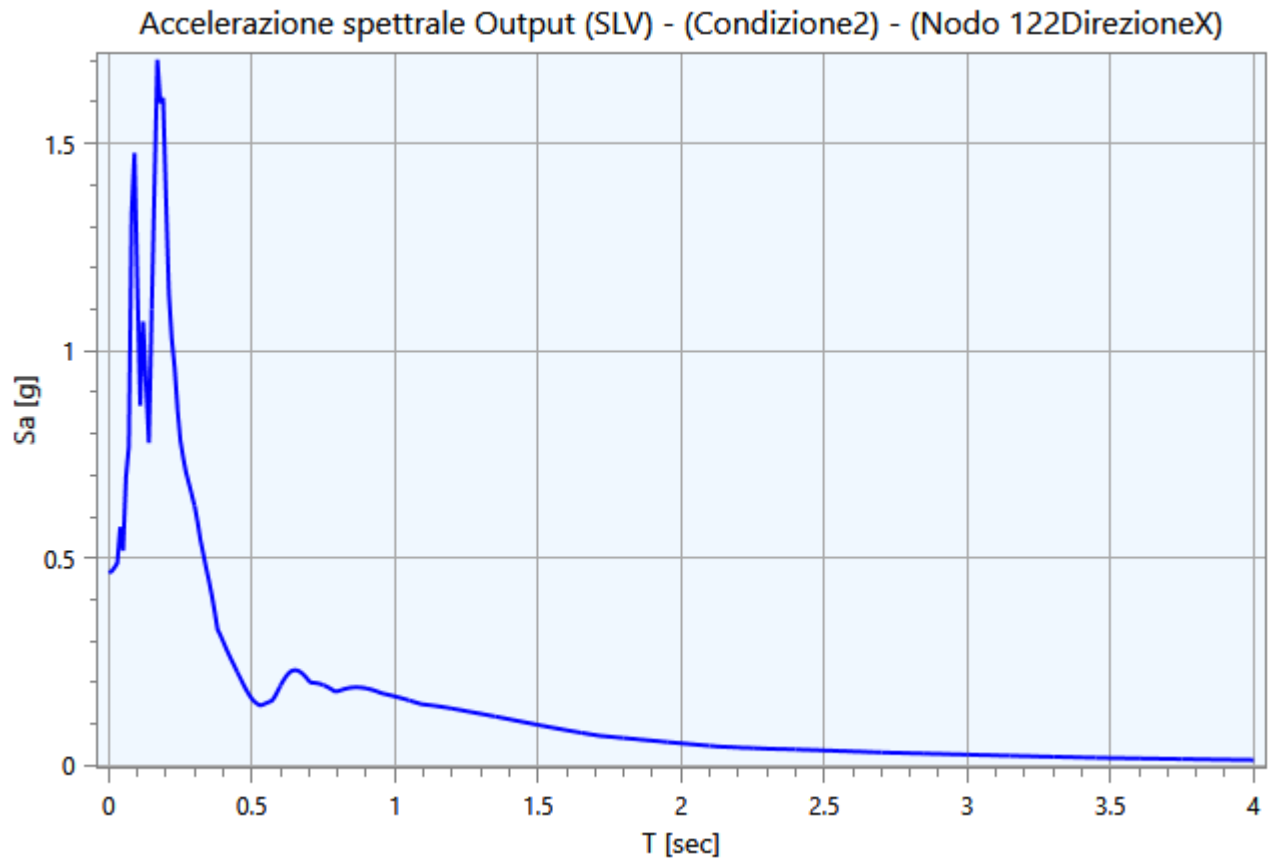
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 96DirezioneX)

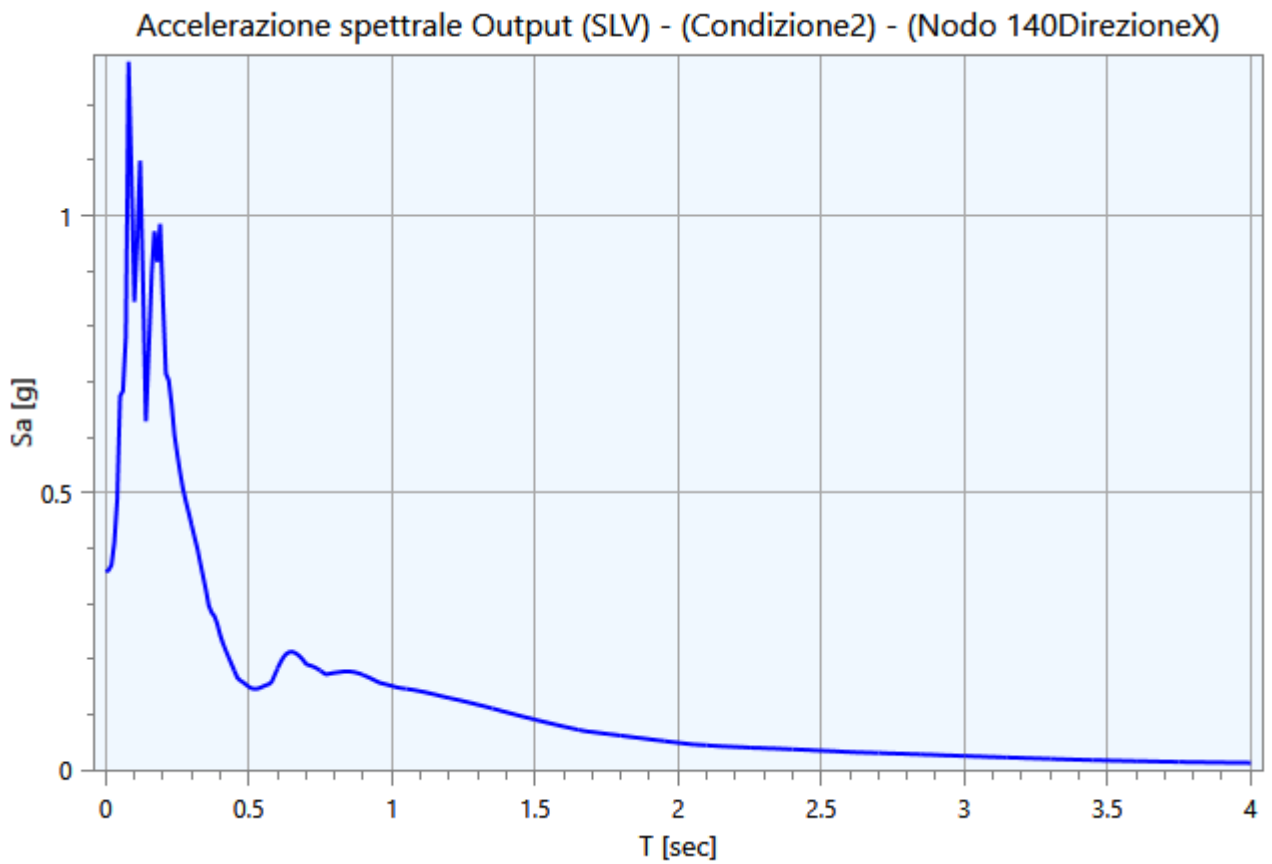
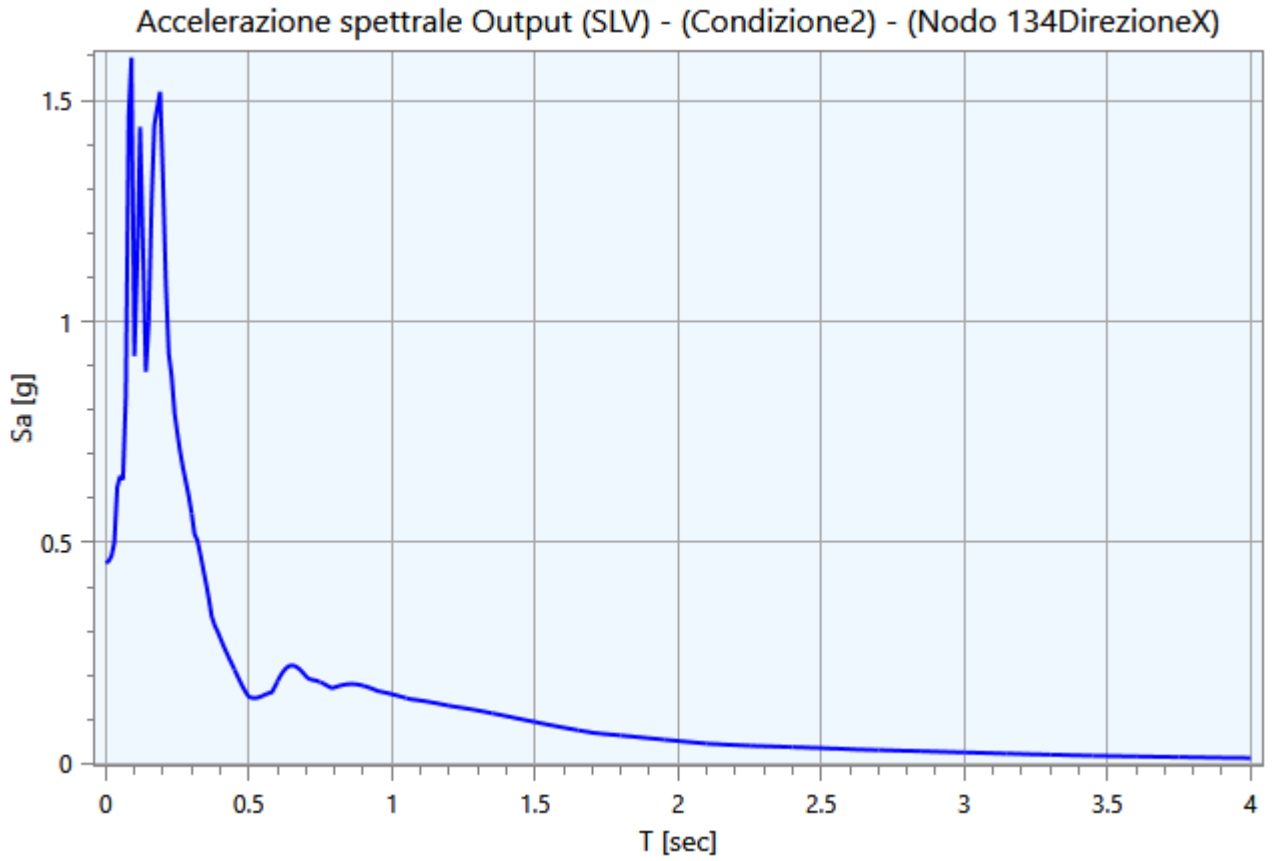


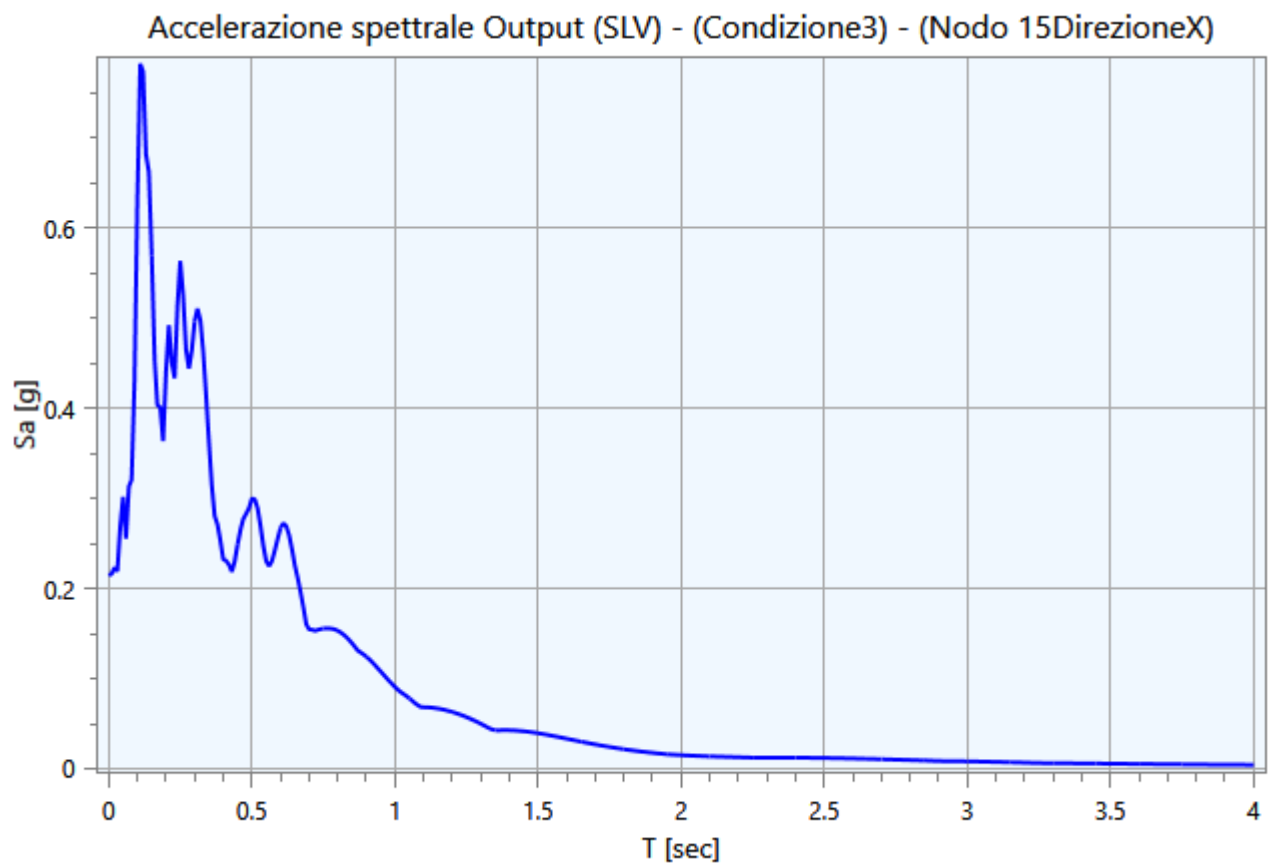
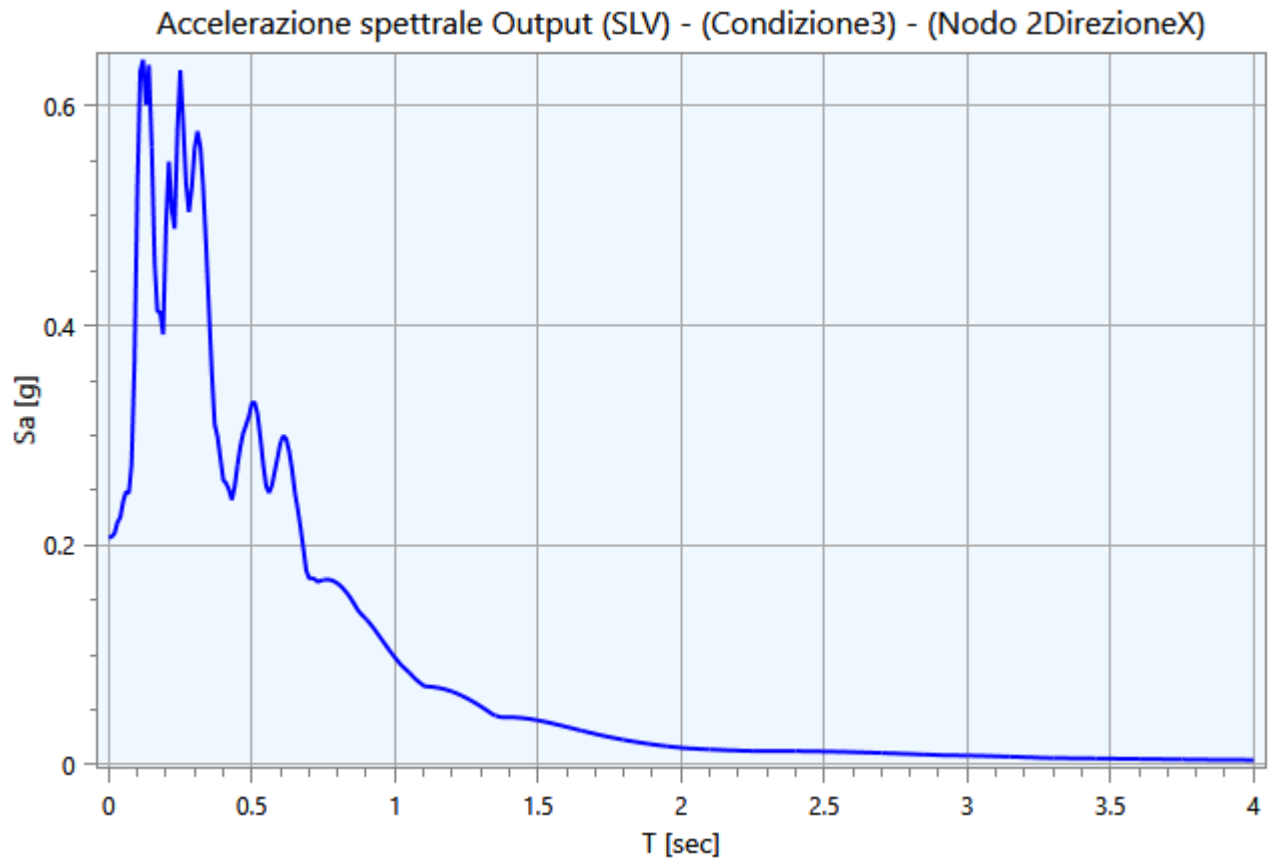
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione2) - (Nodo 102DirezioneX)



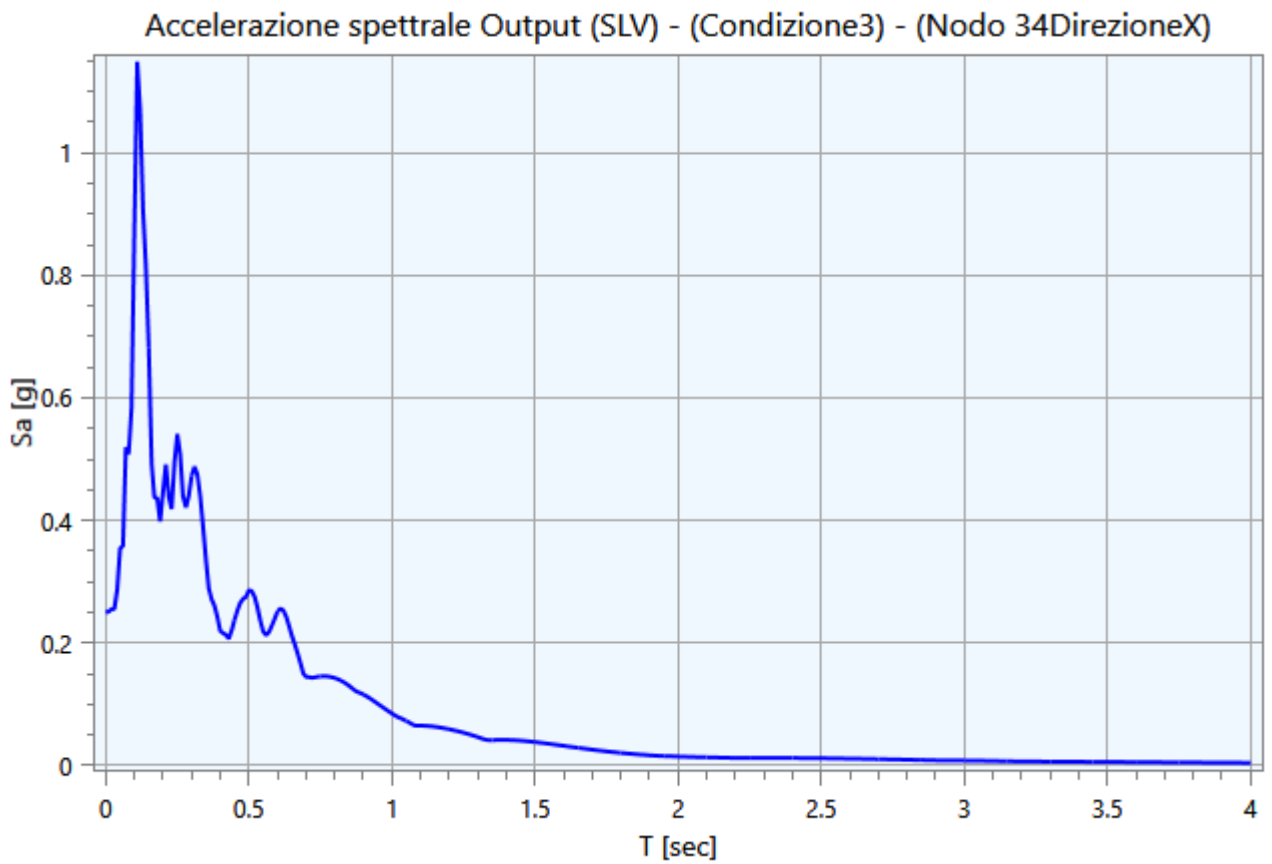
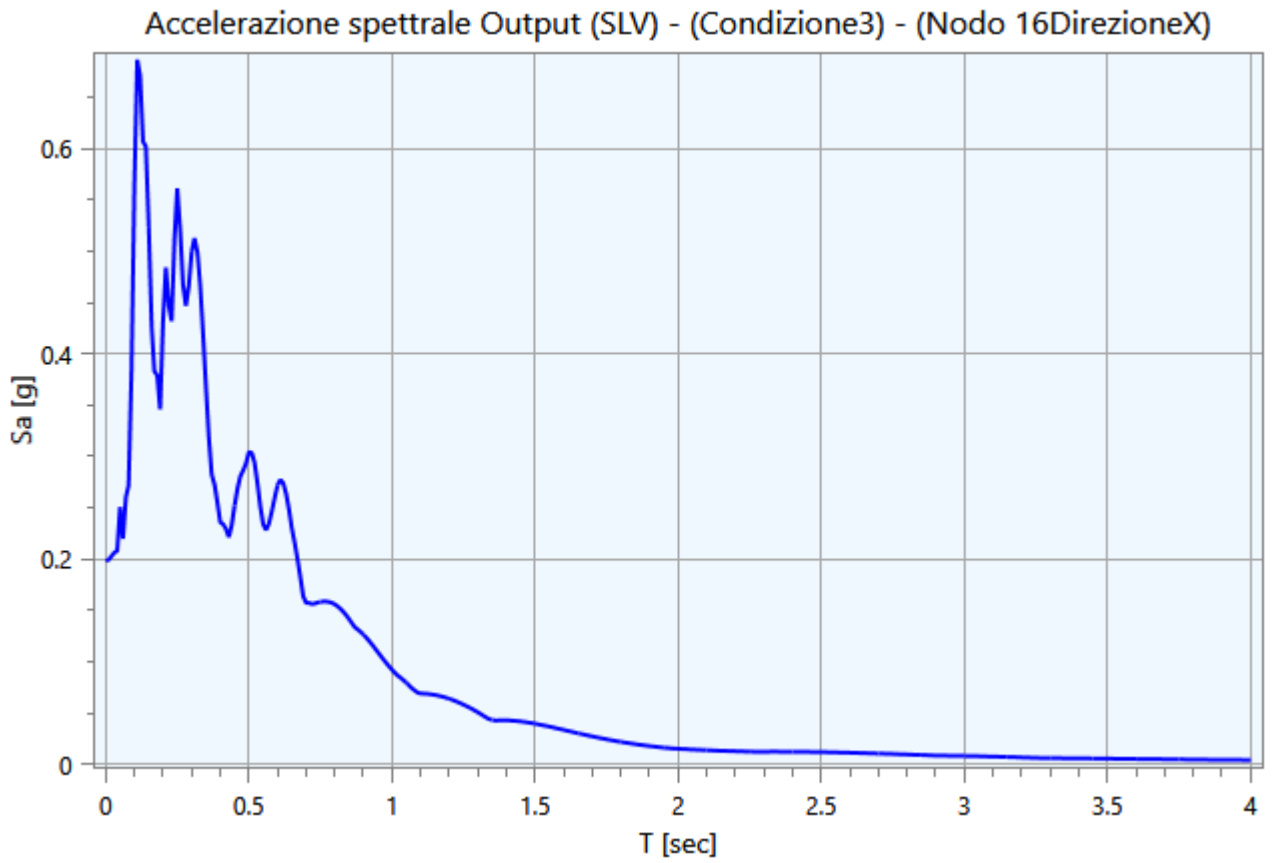


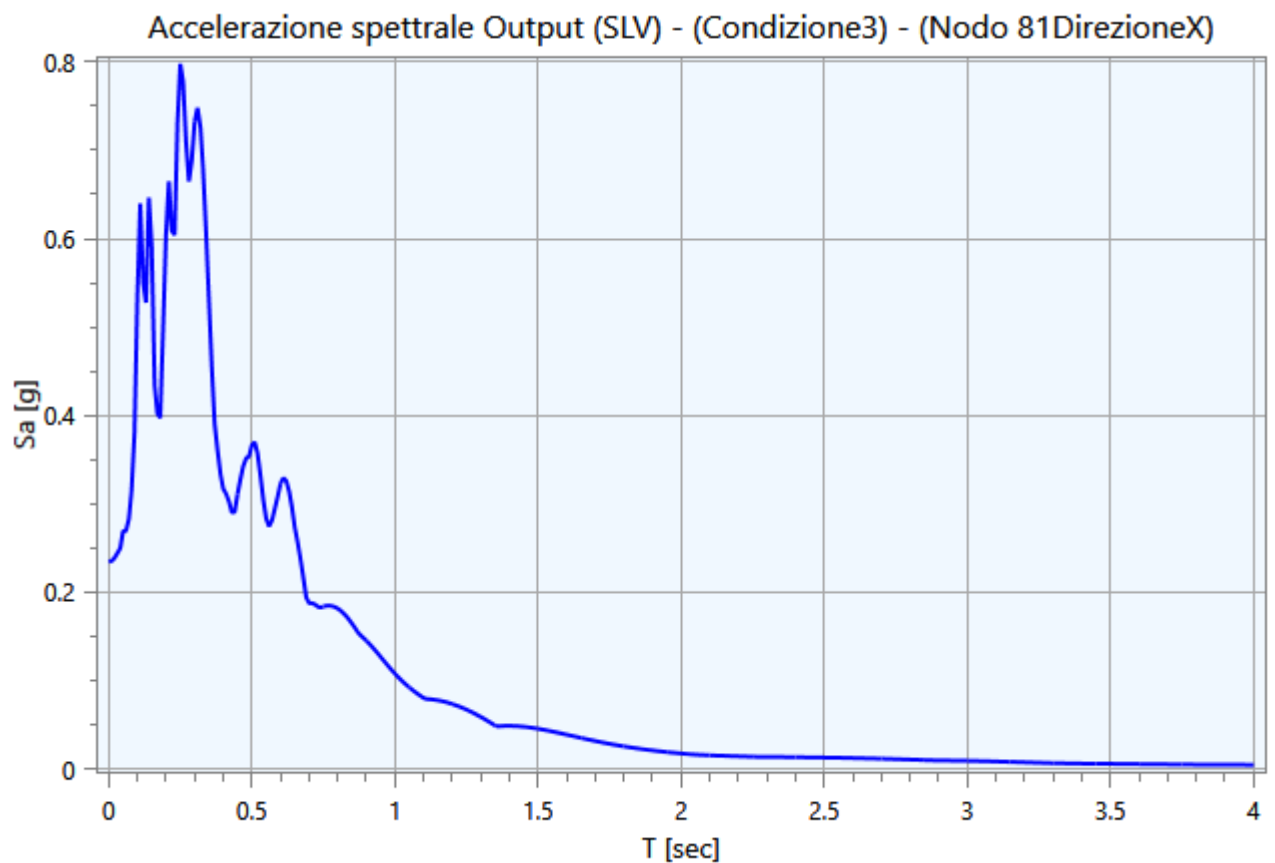
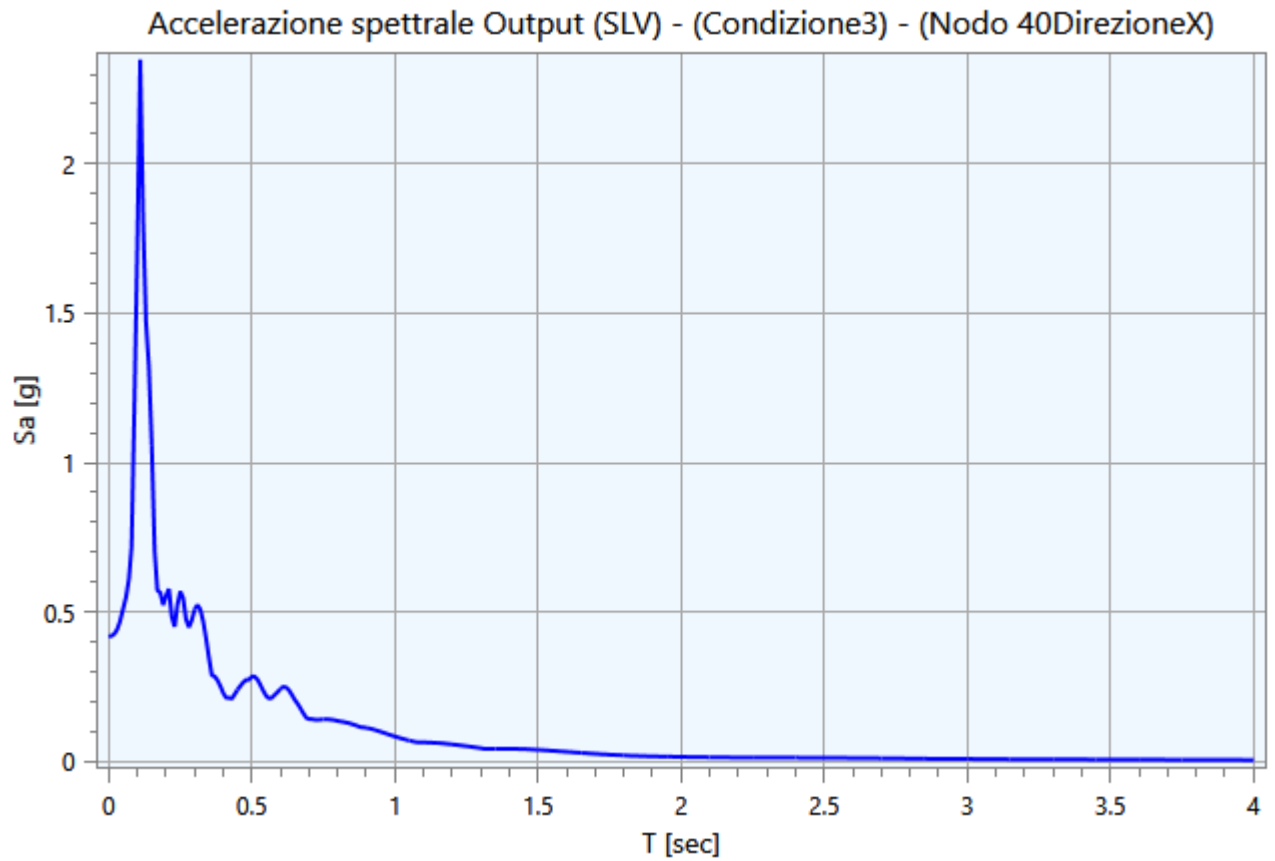


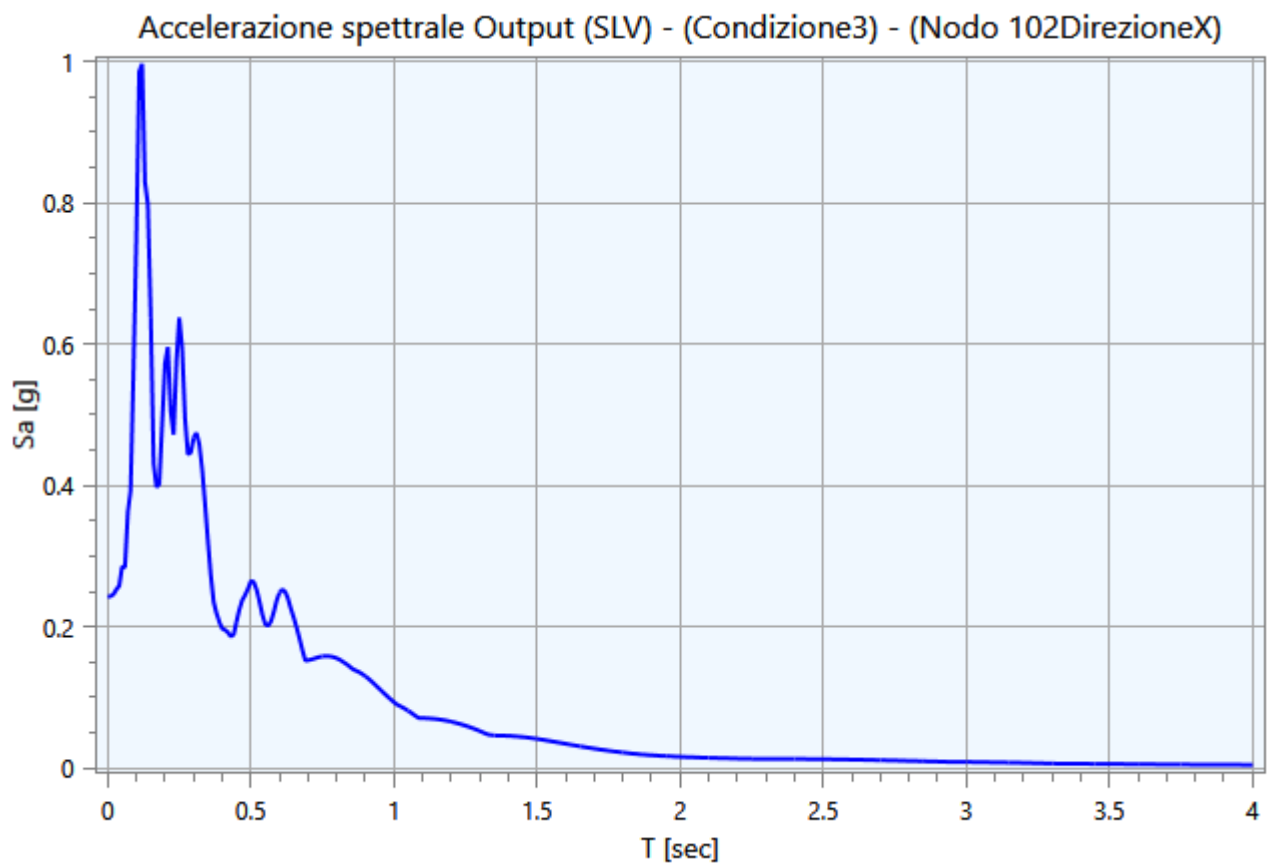
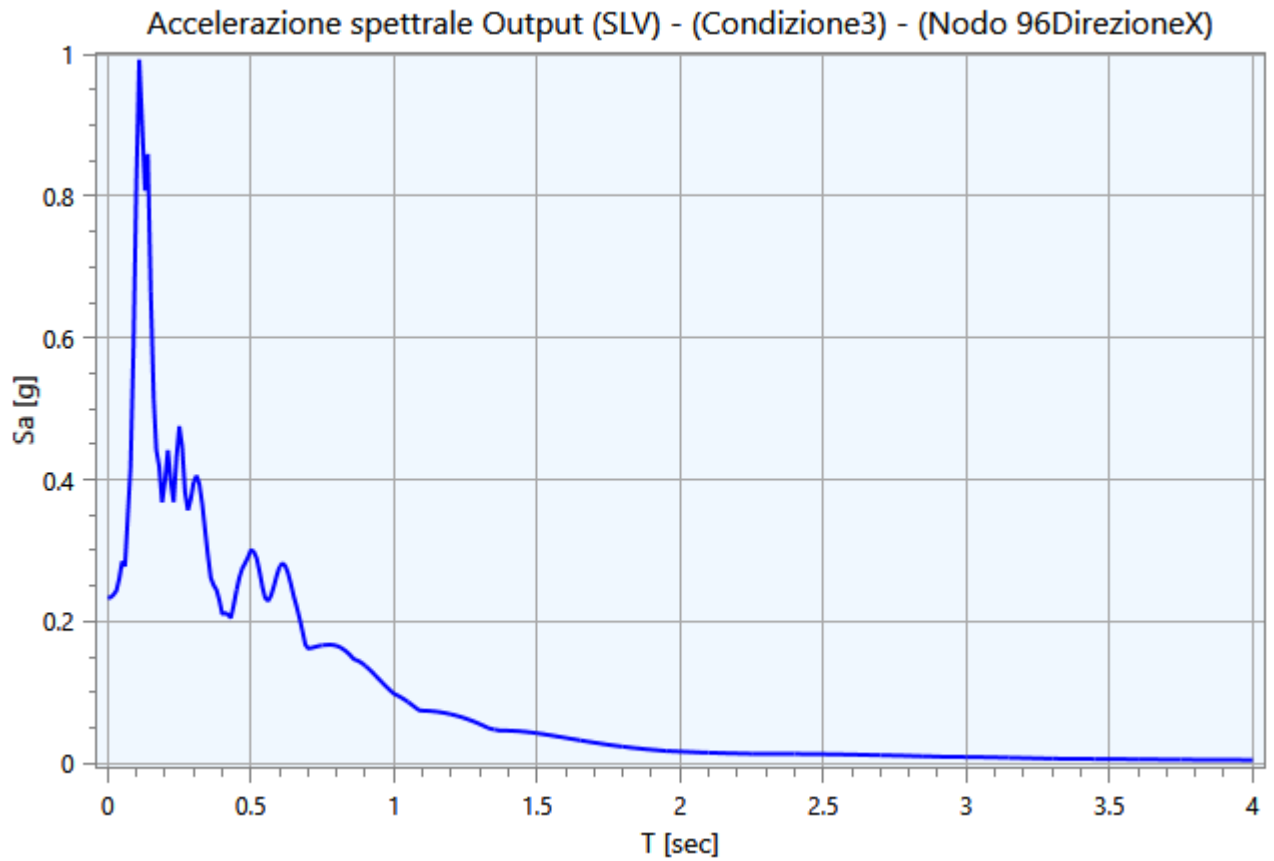




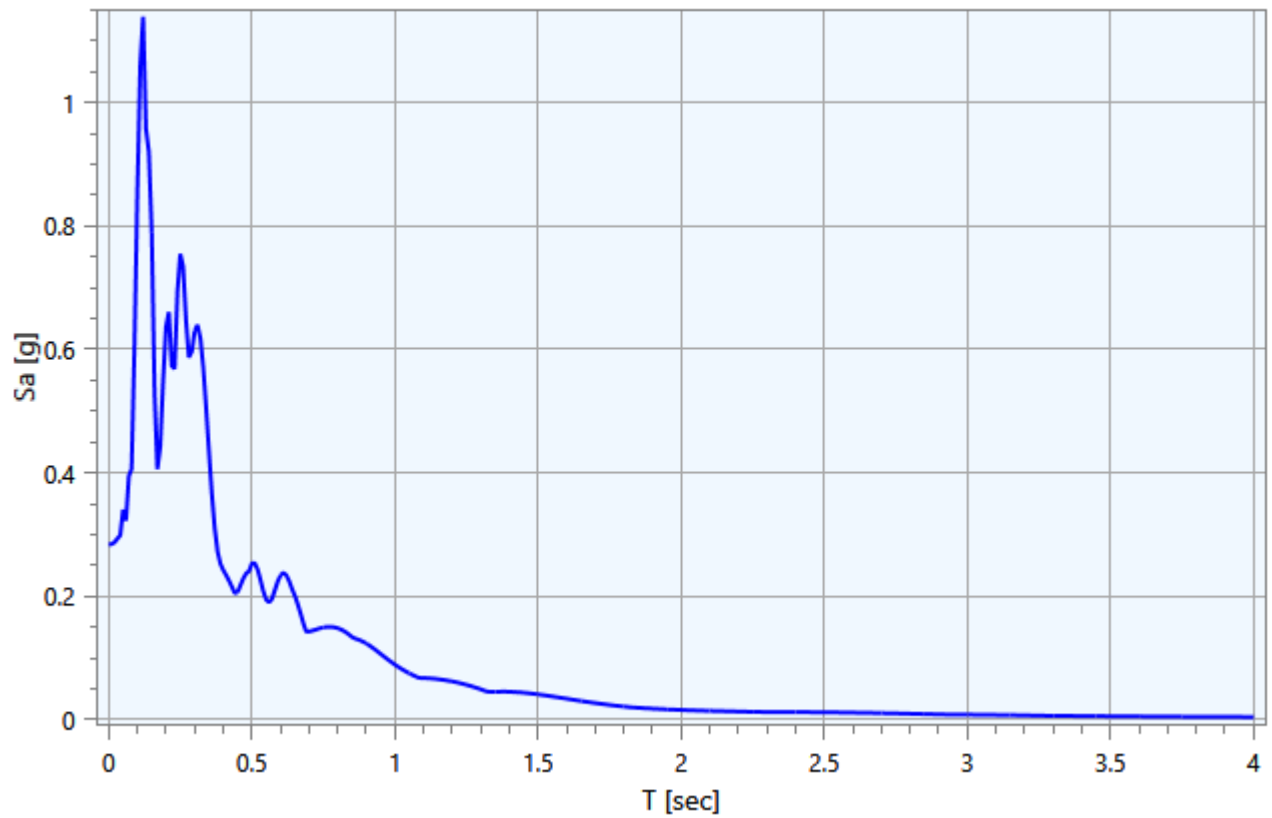




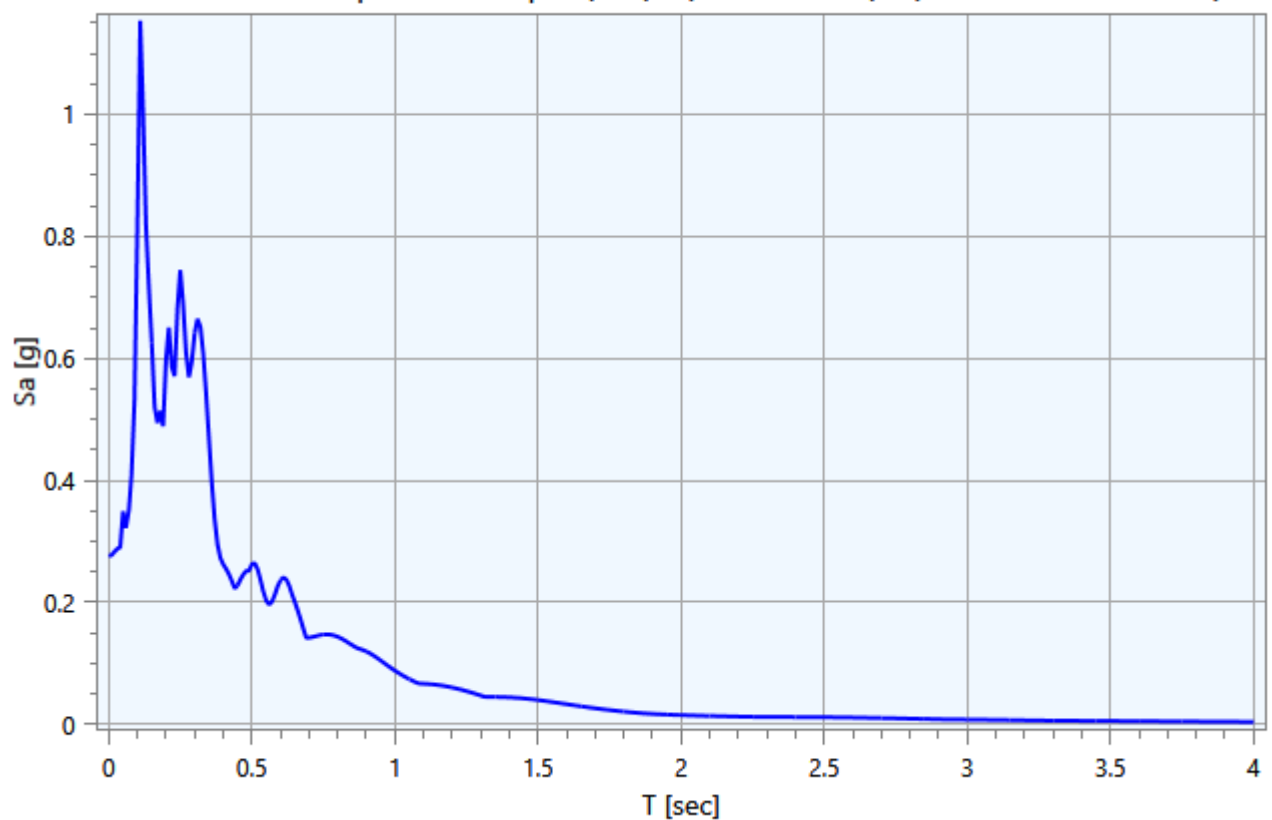


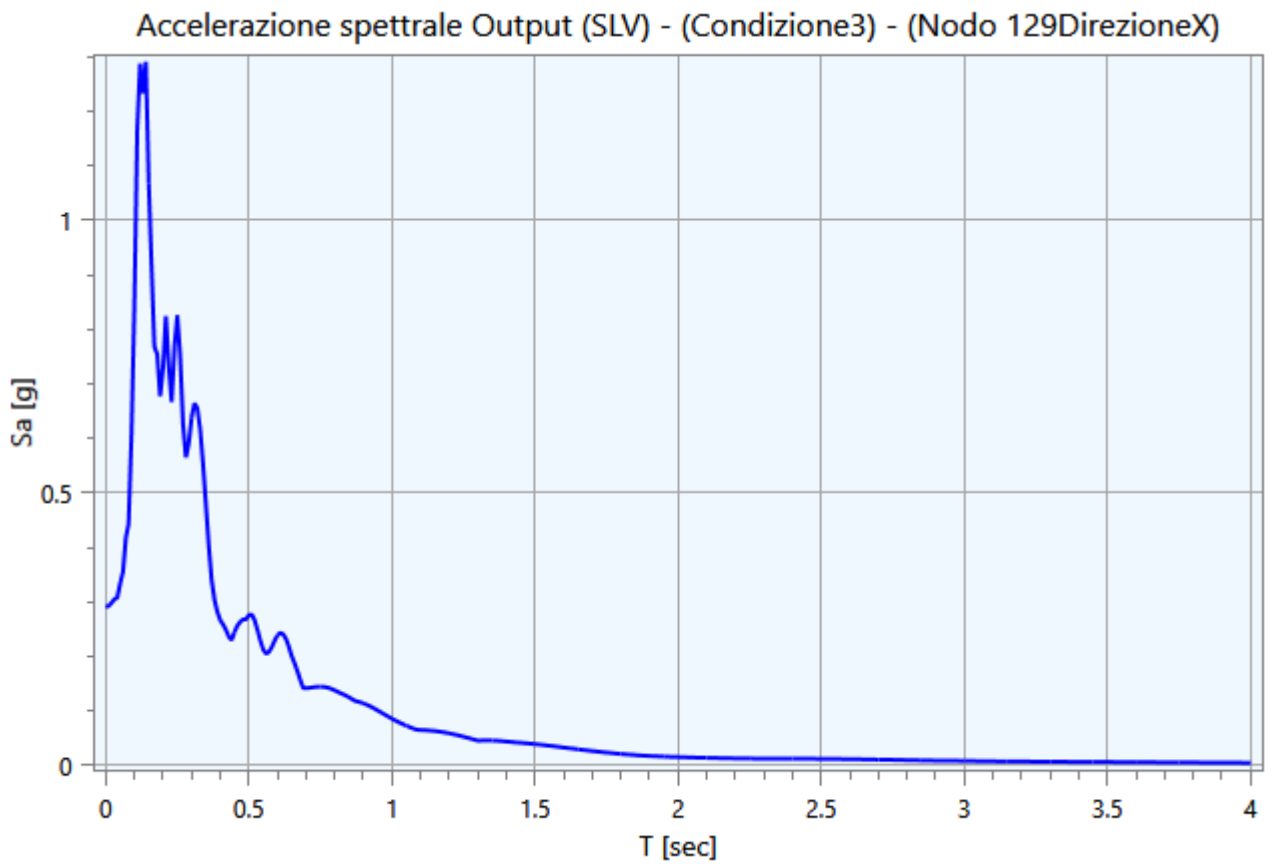
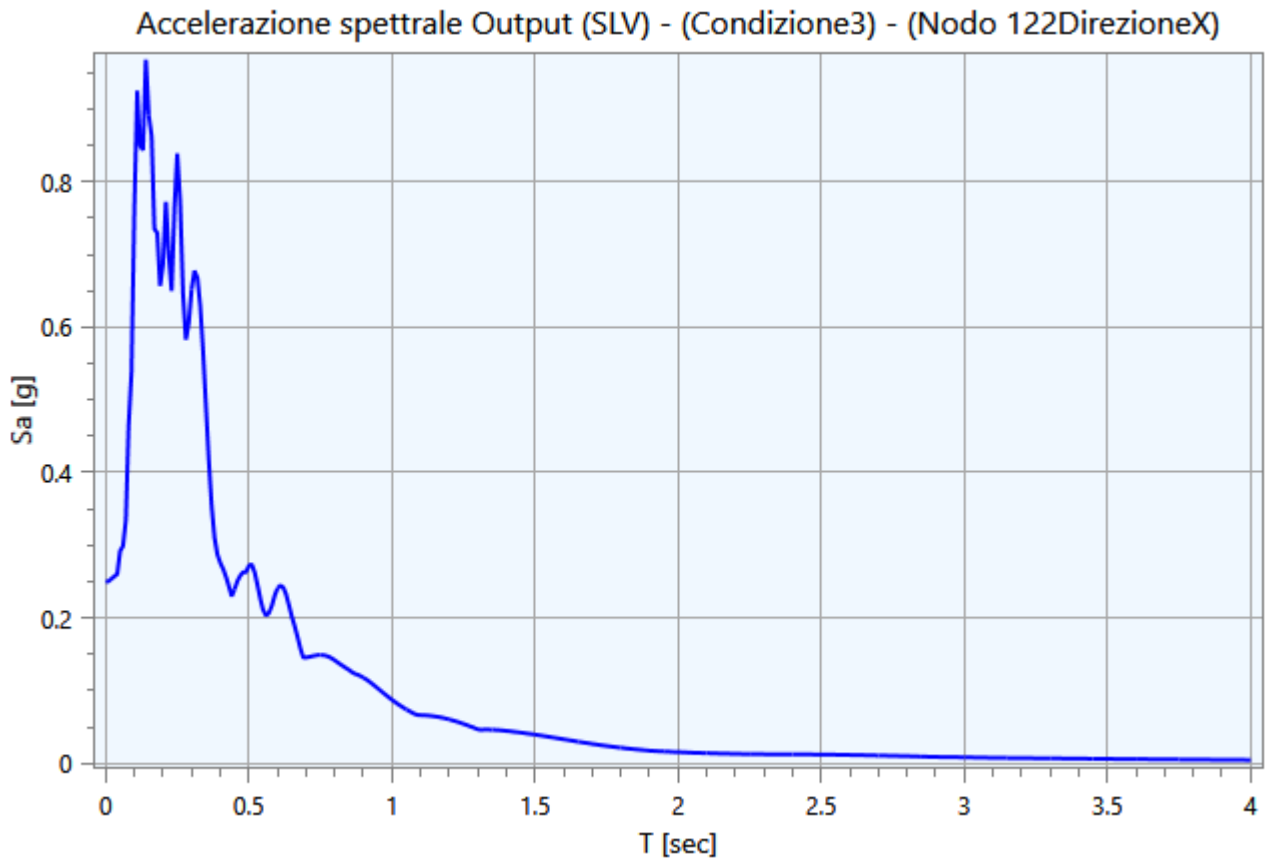


Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione3) - (Nodo 109DirezioneX)

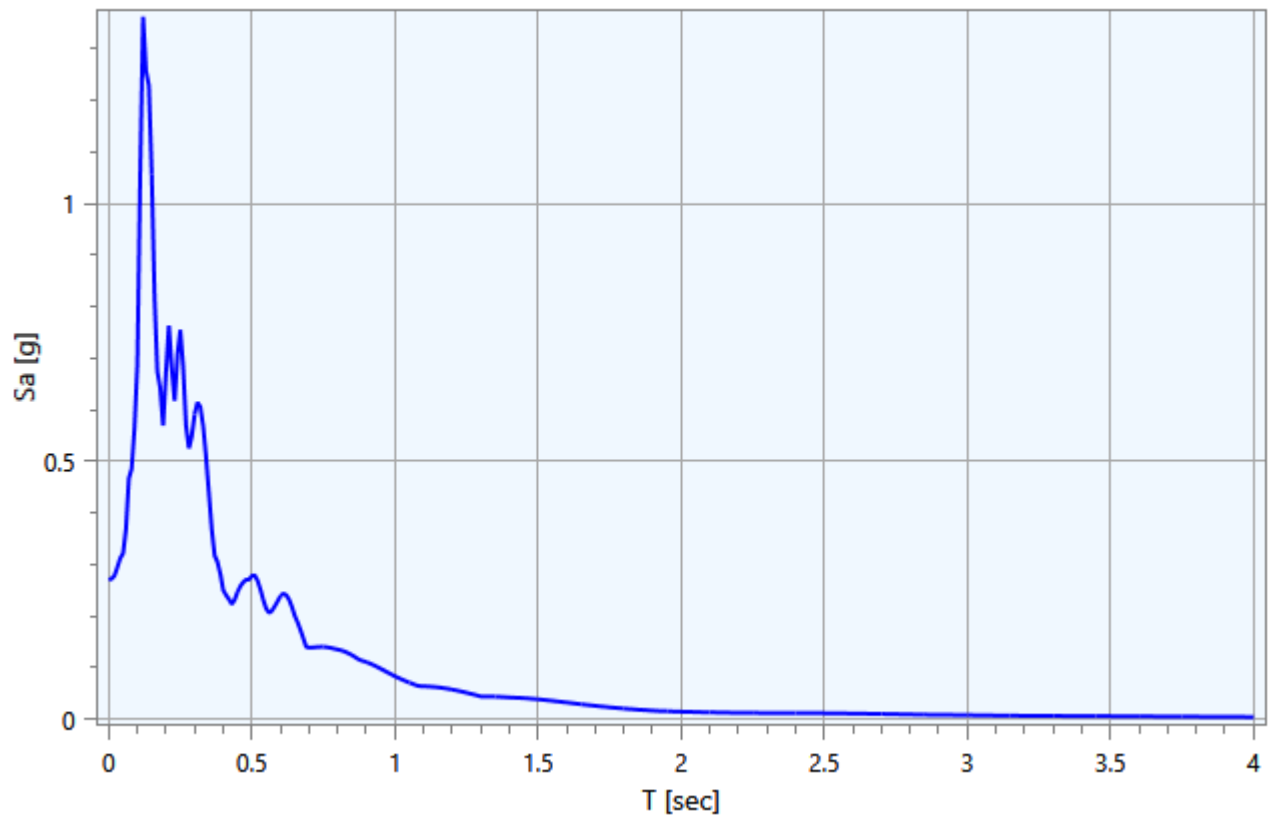


Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione3) - (Nodo 117DirezioneX)

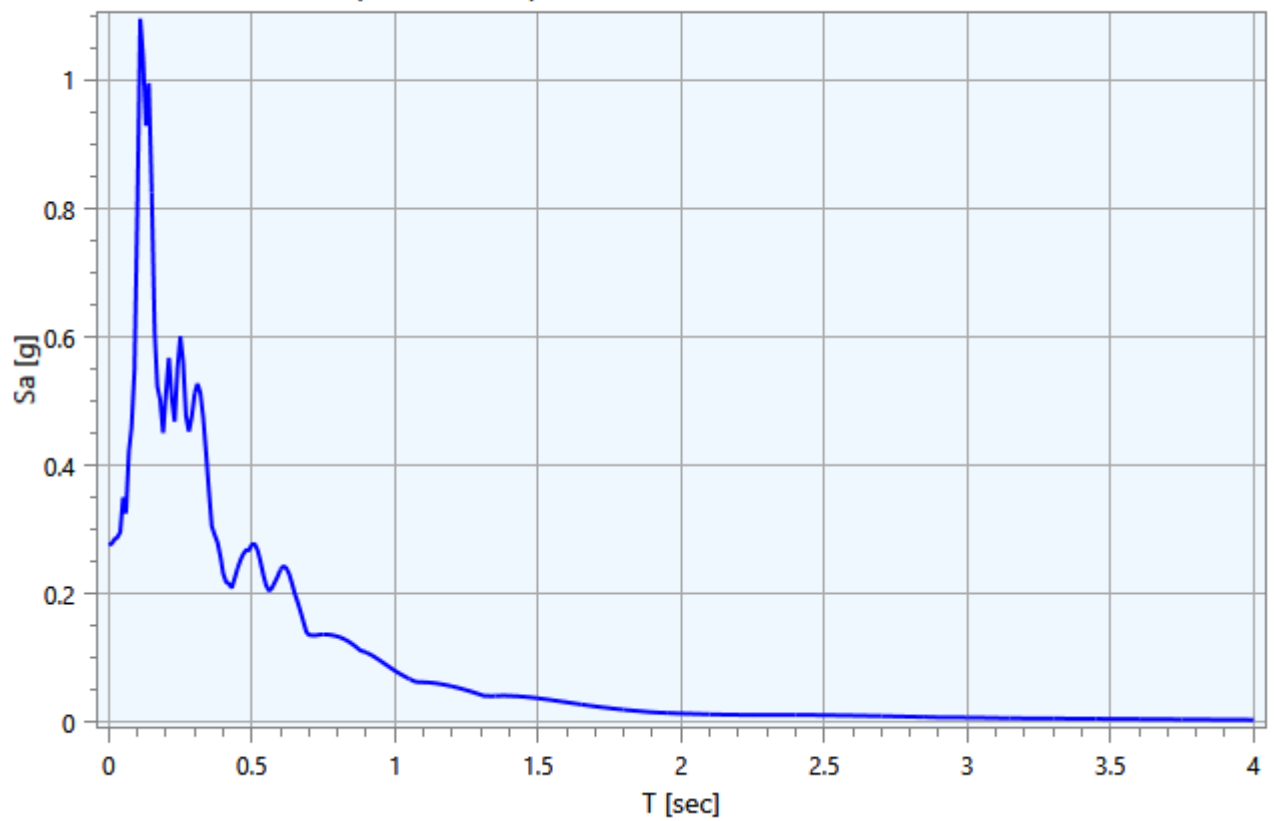


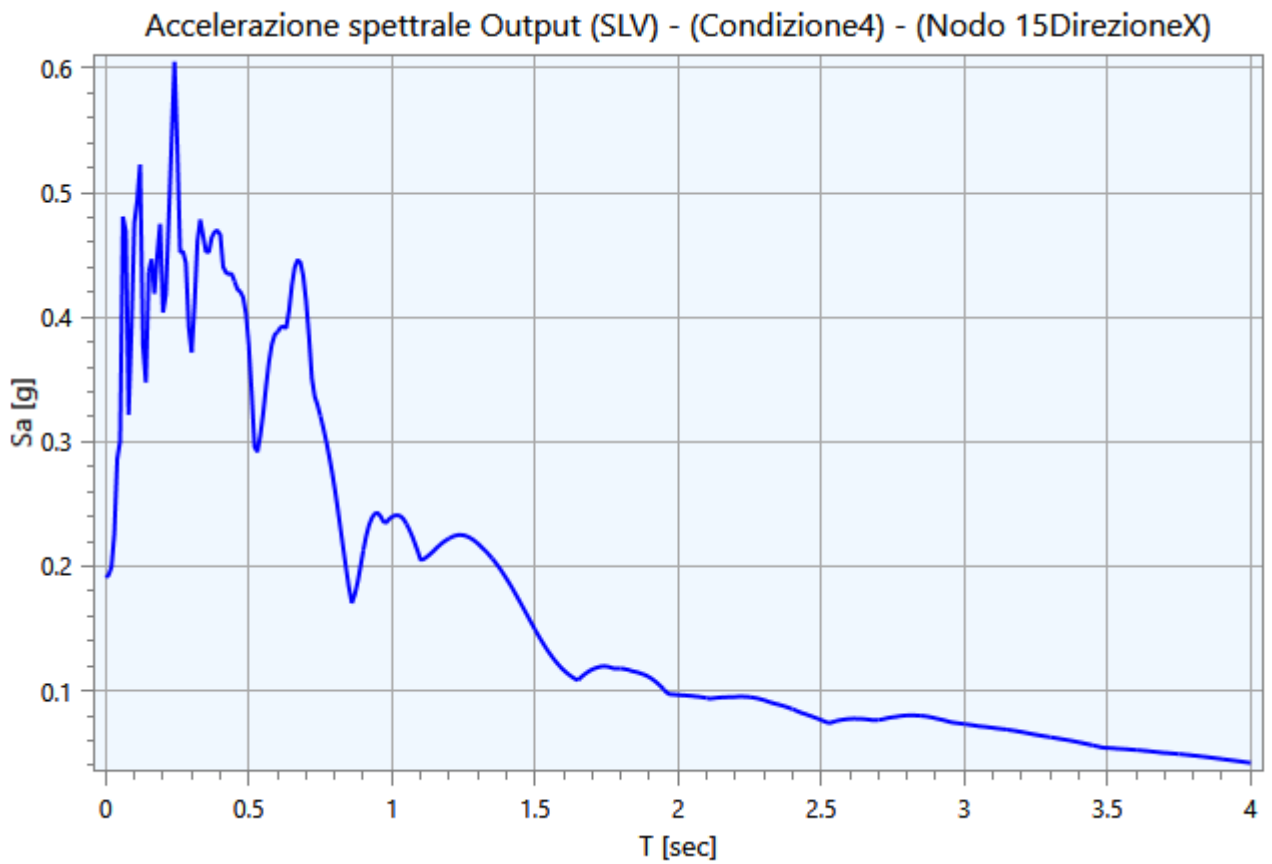
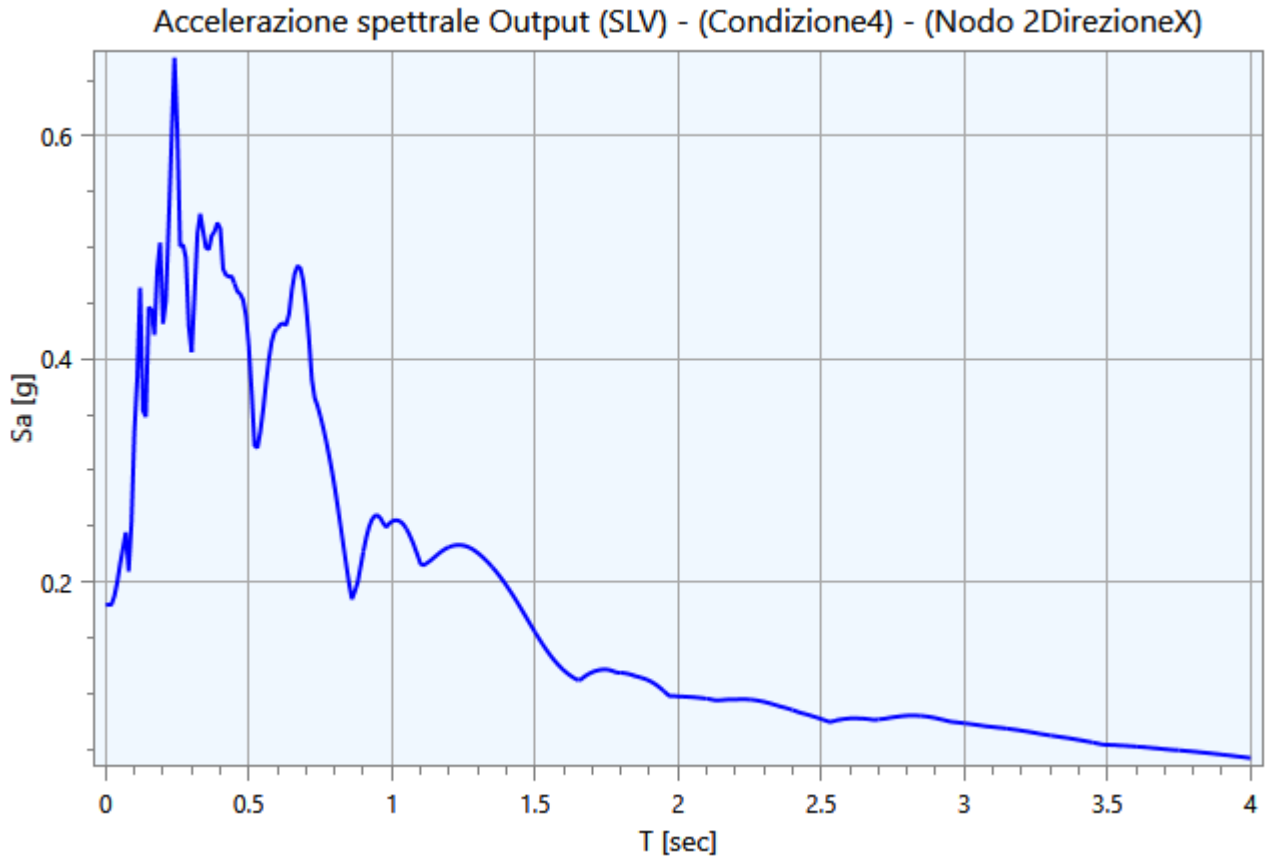


Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione3) - (Nodo 134DirezioneX)



Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione3) - (Nodo 140DirezioneX)

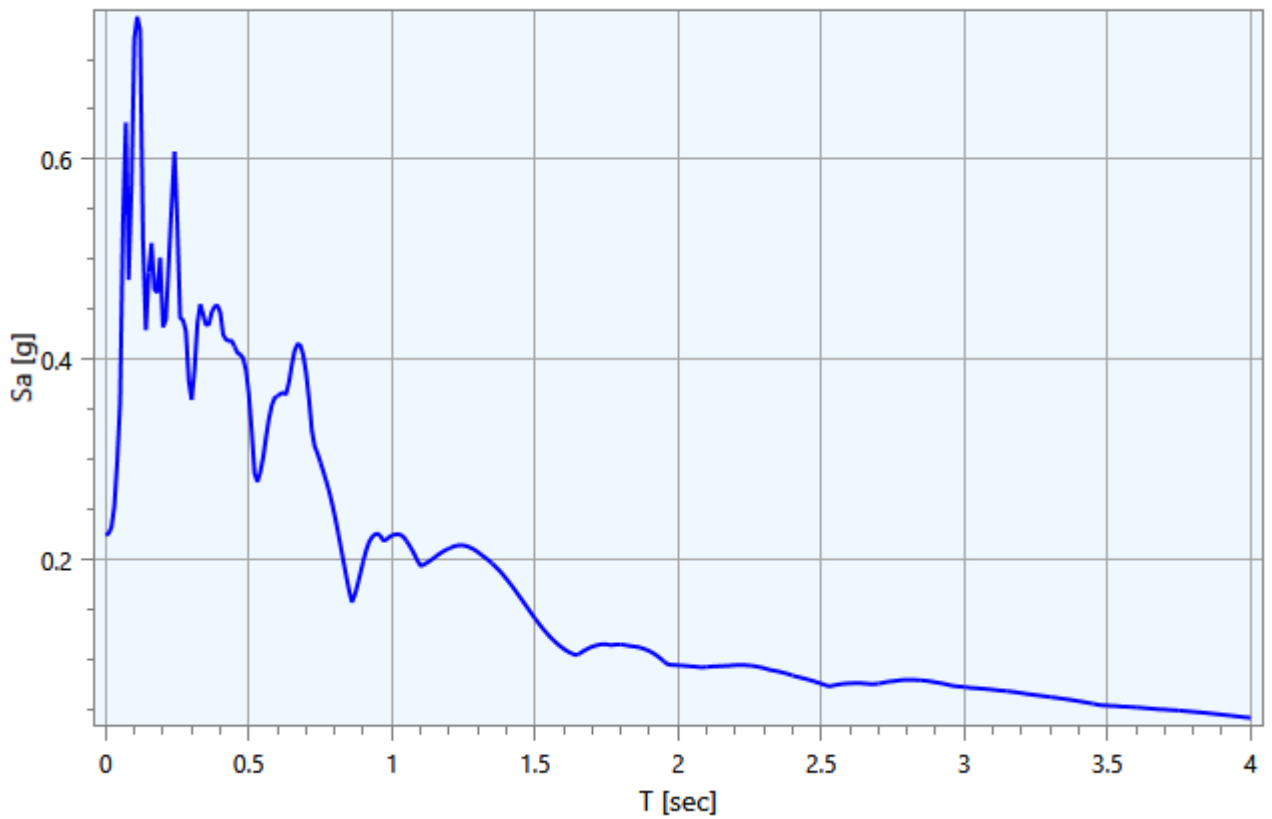




Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 16DirezioneX)

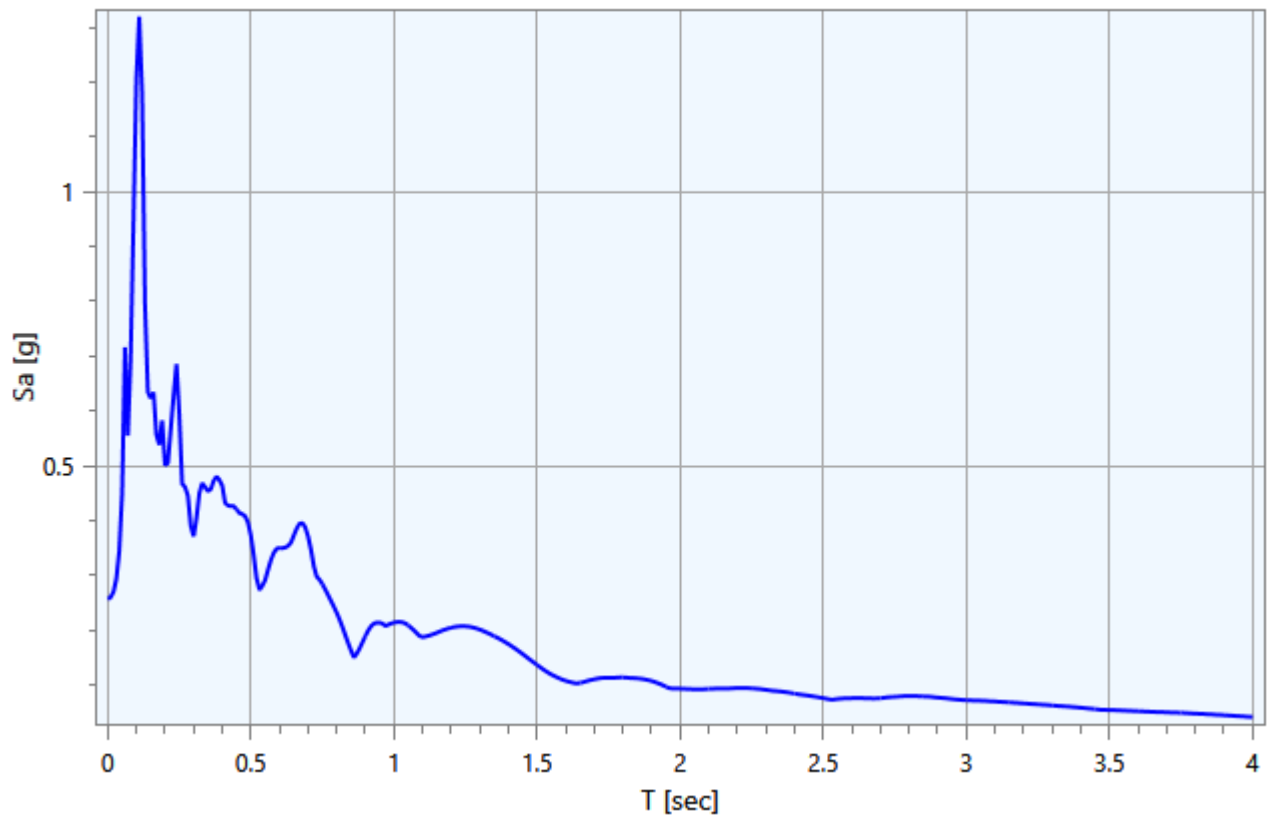


Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 34DirezioneX)

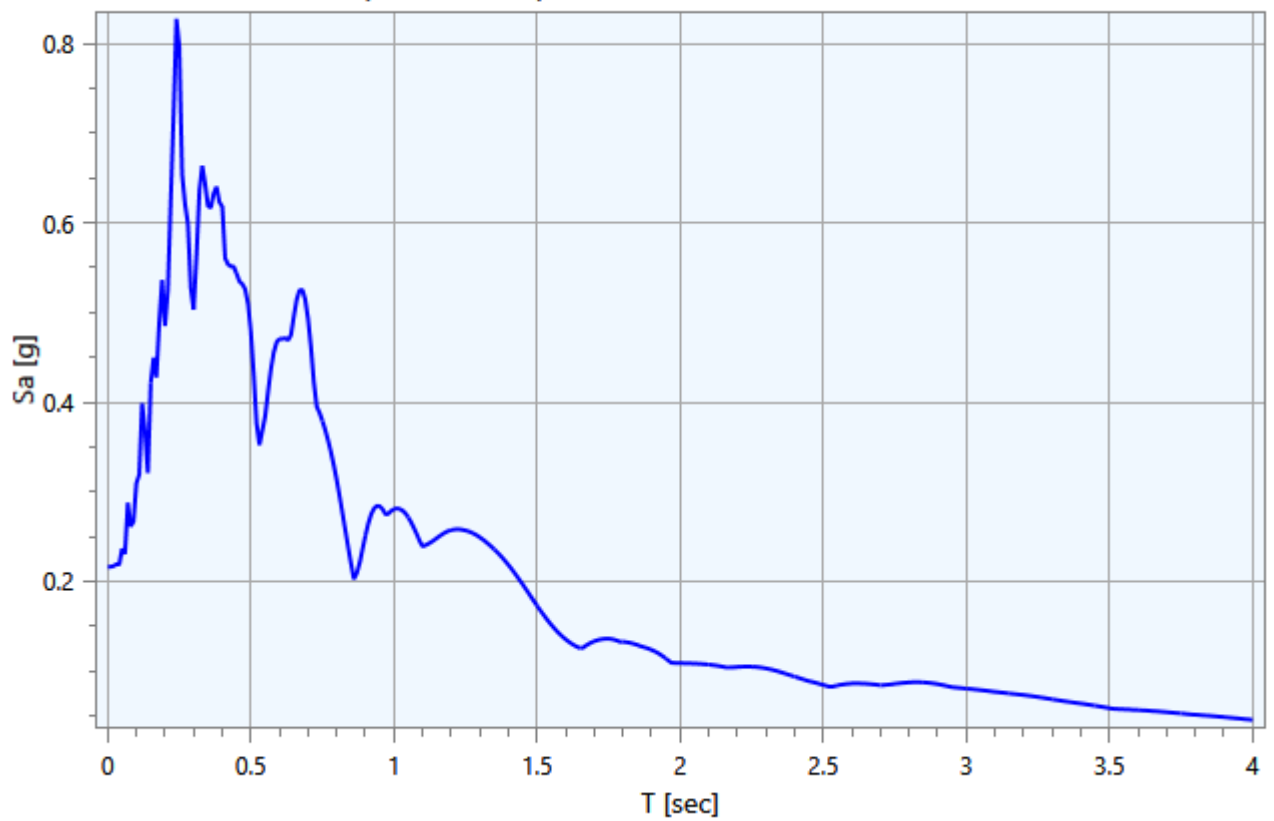


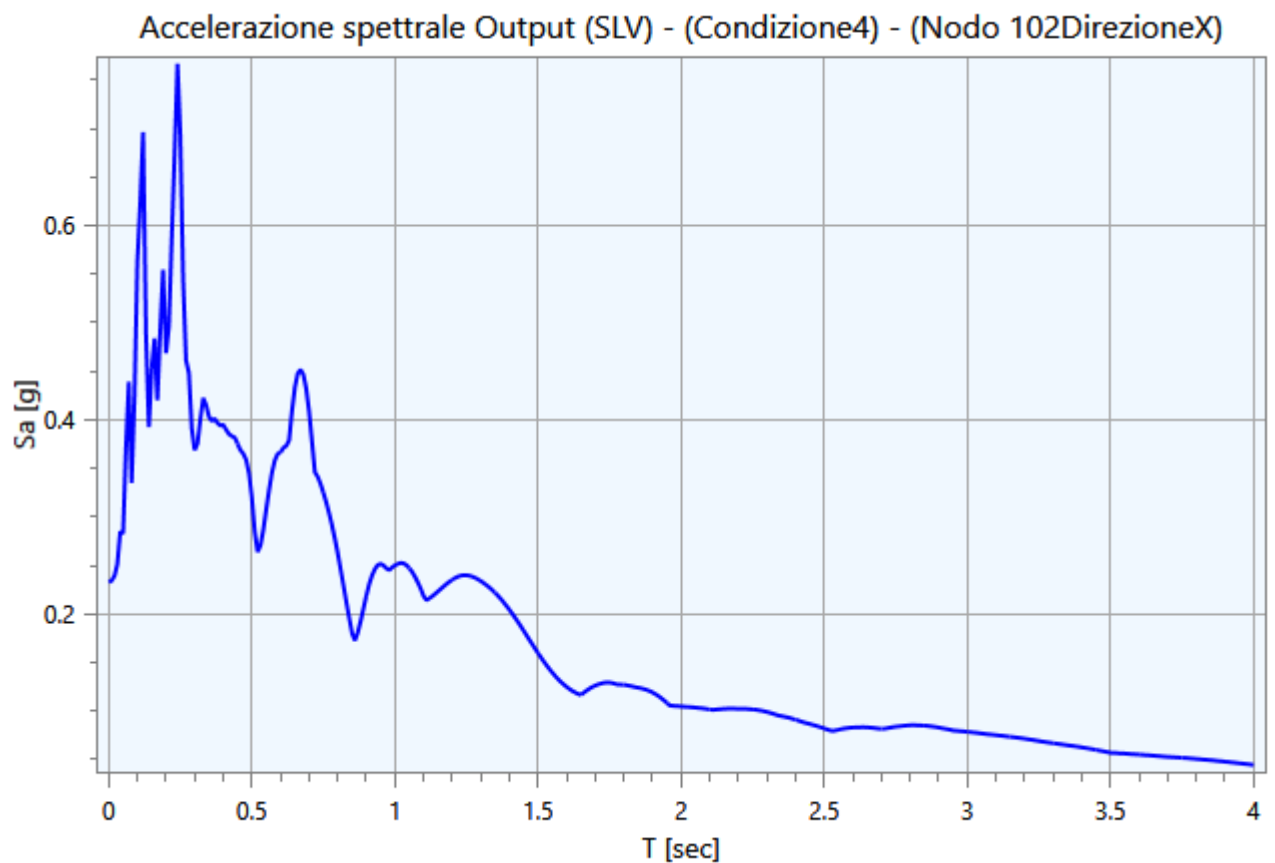
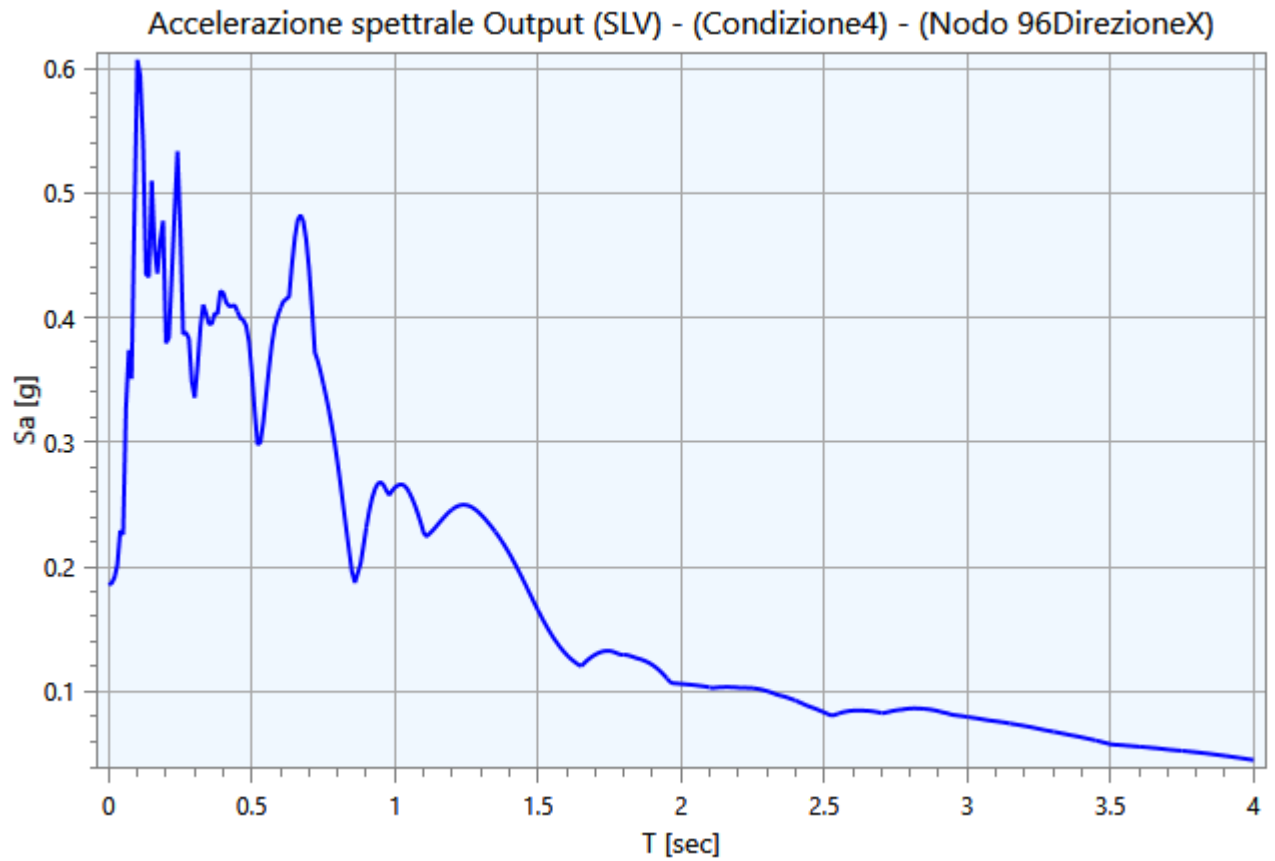


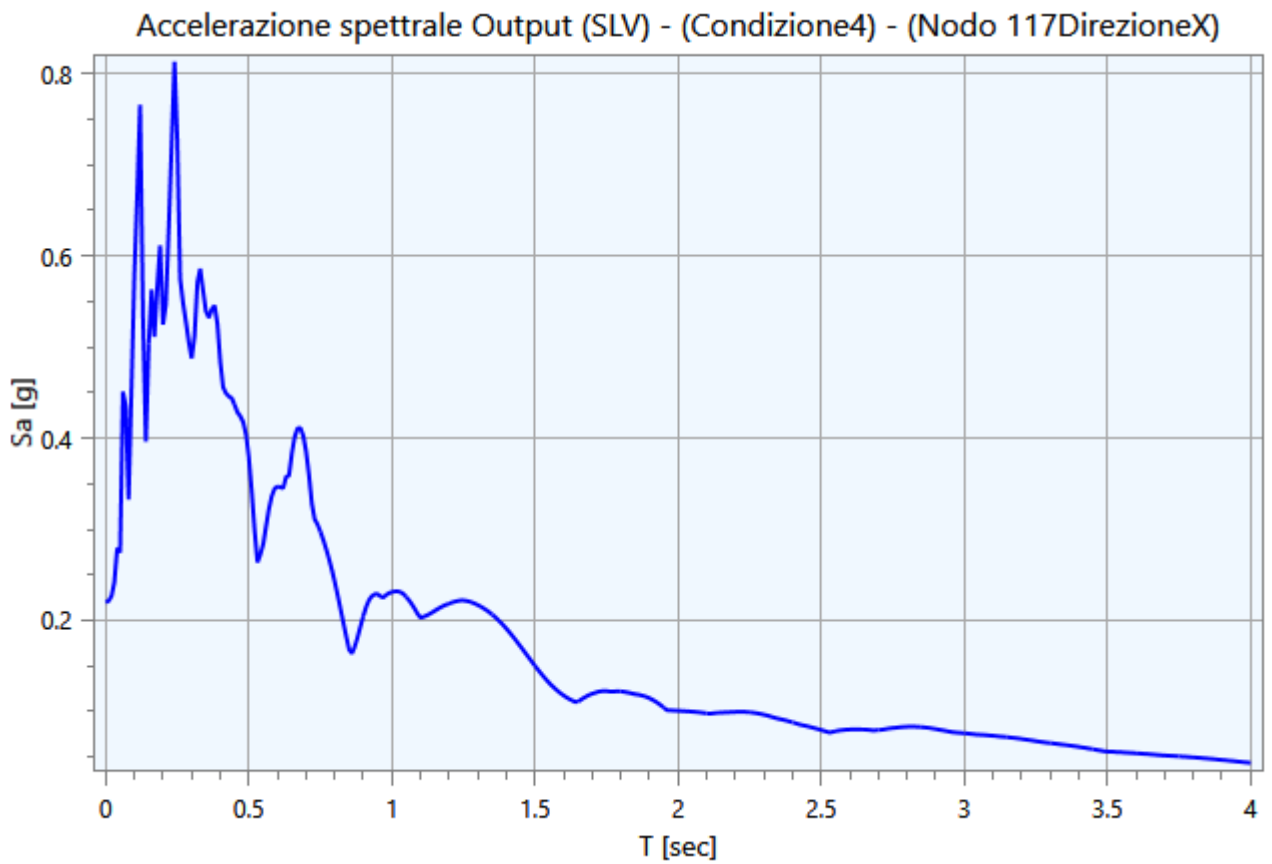
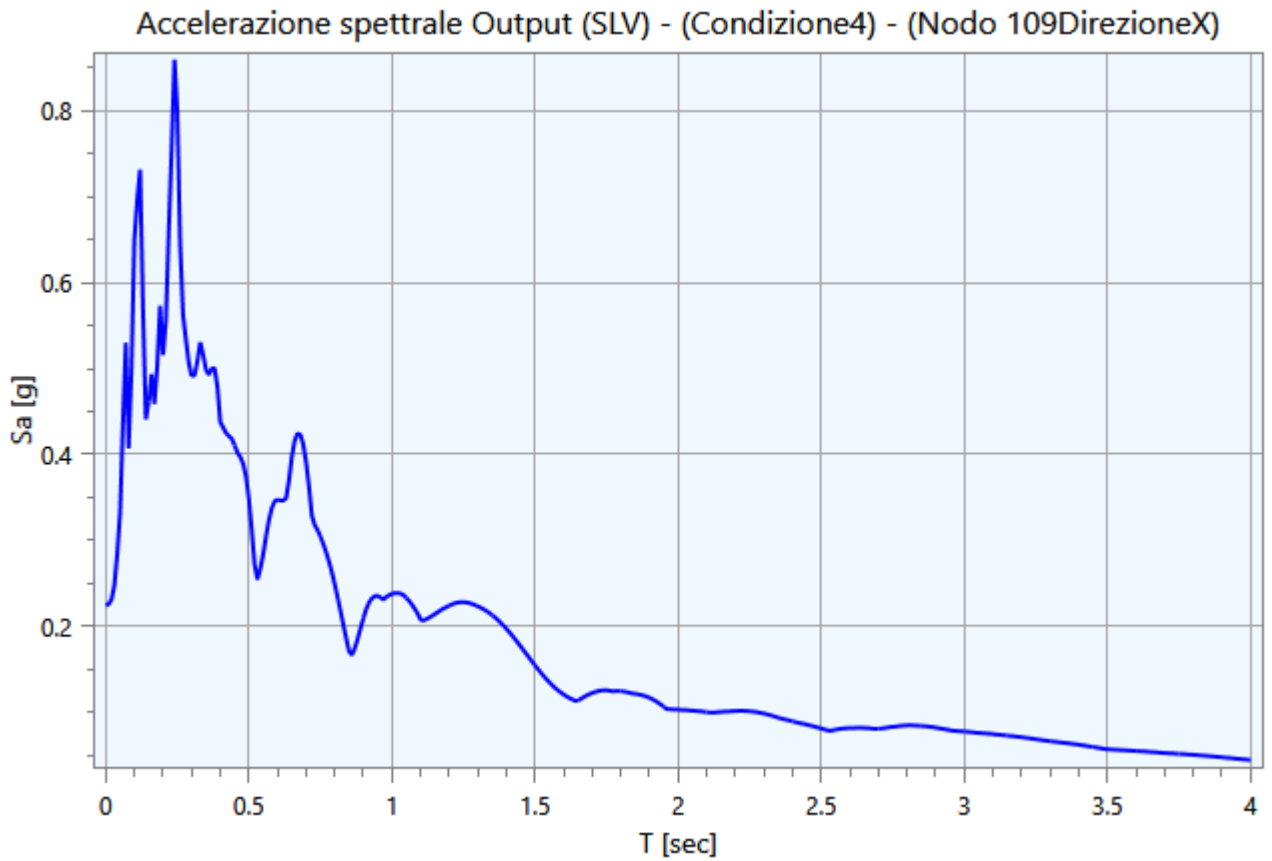
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 40DirezioneX)



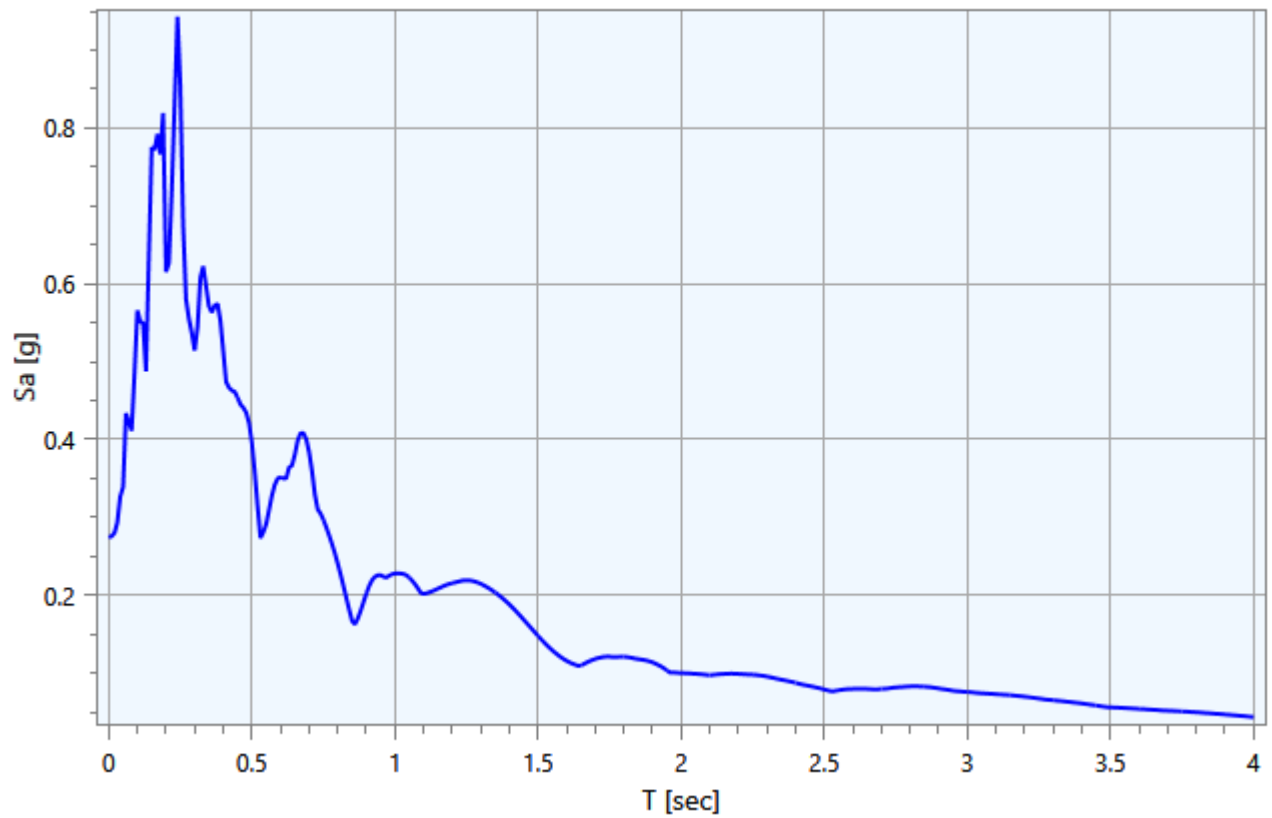
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 81DirezioneX)



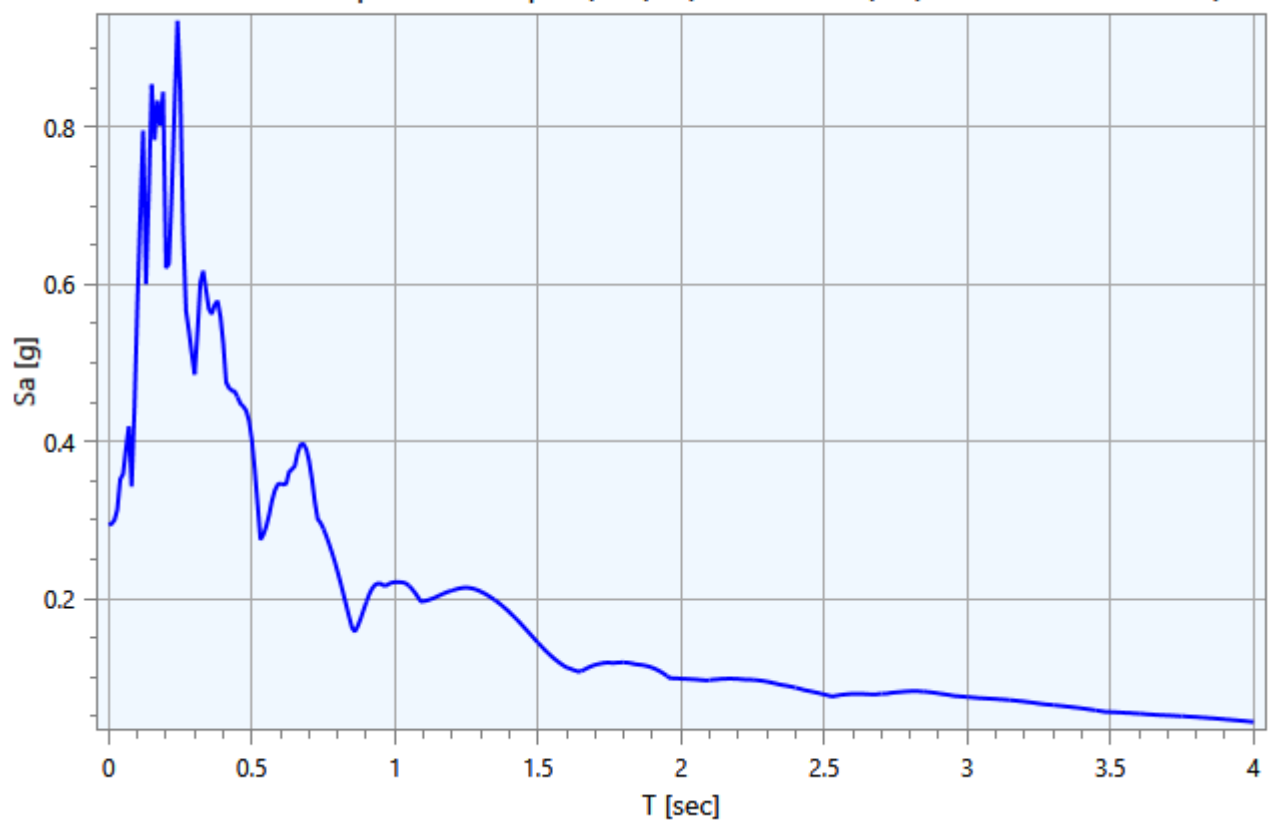


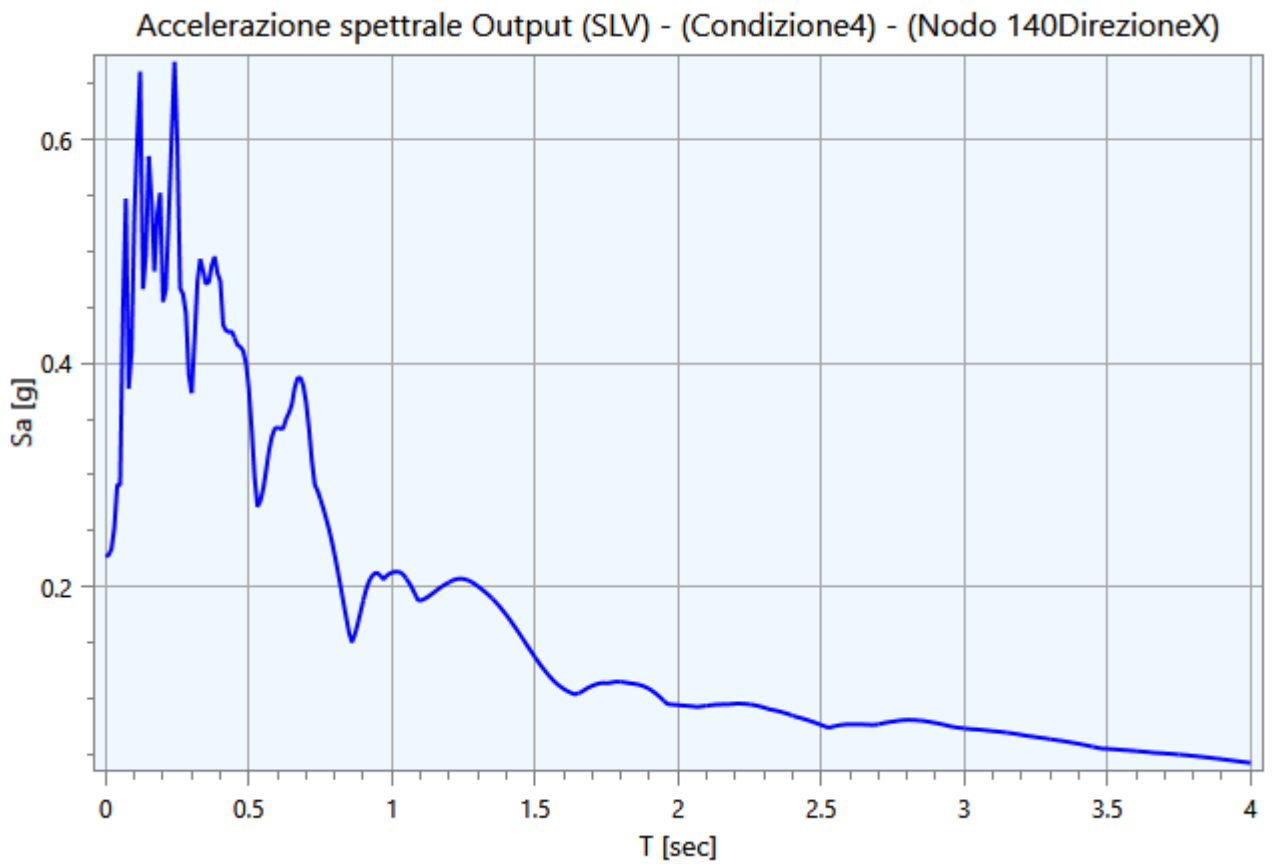
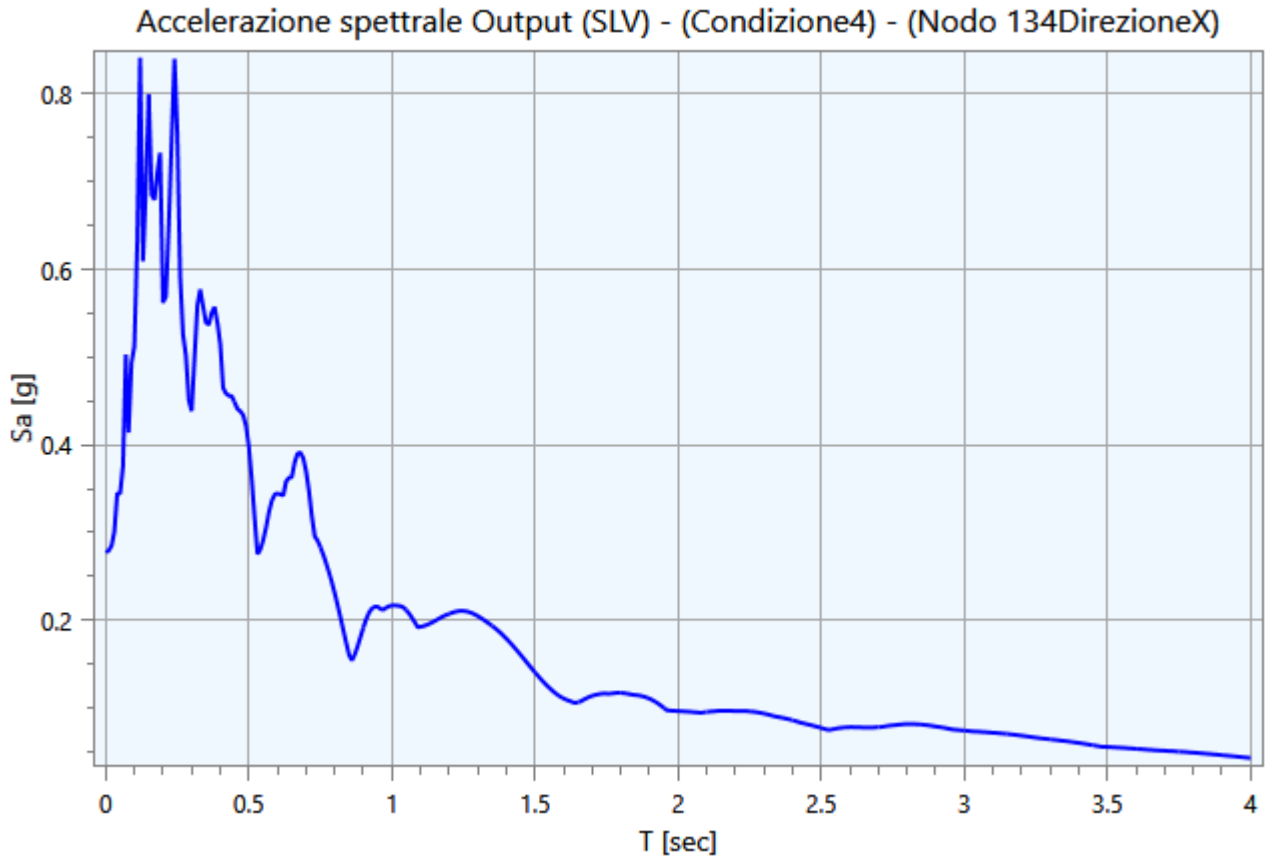


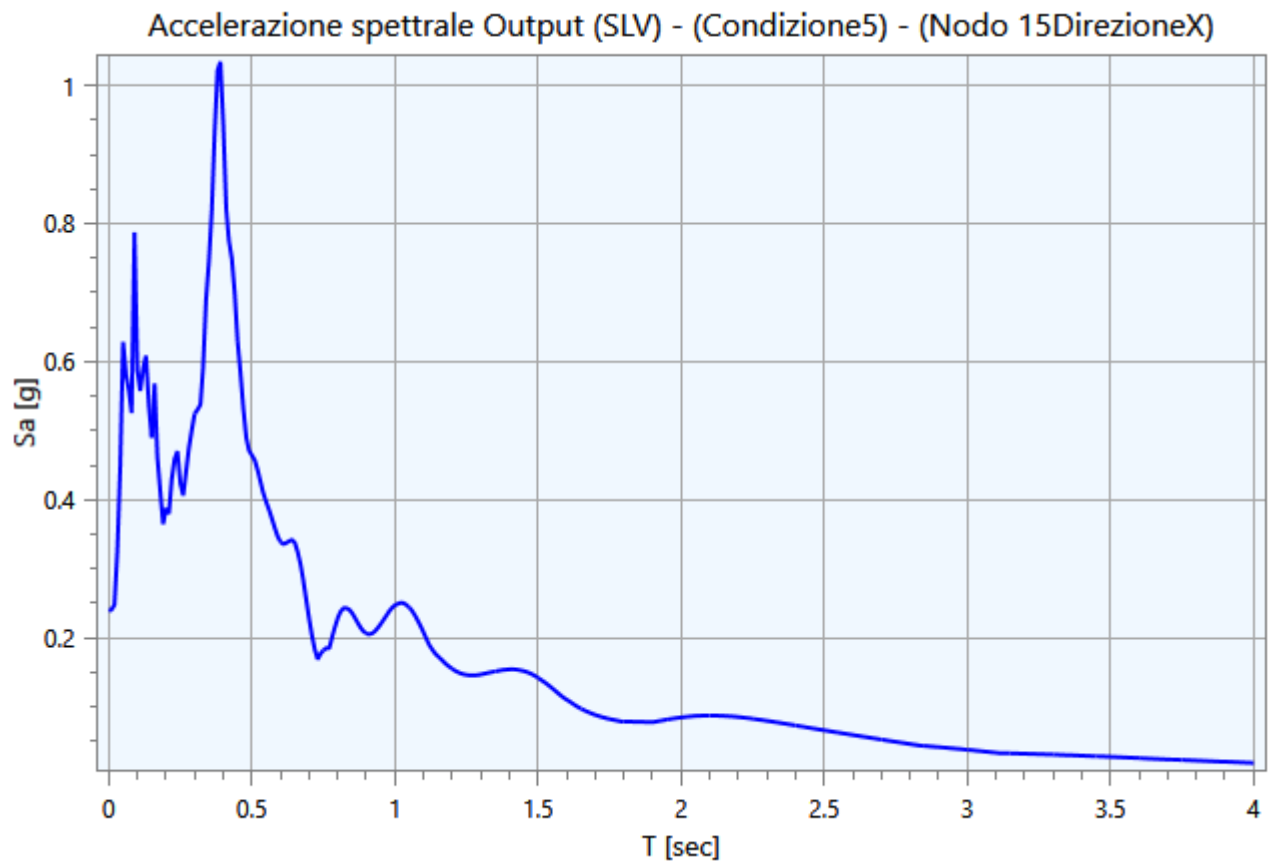
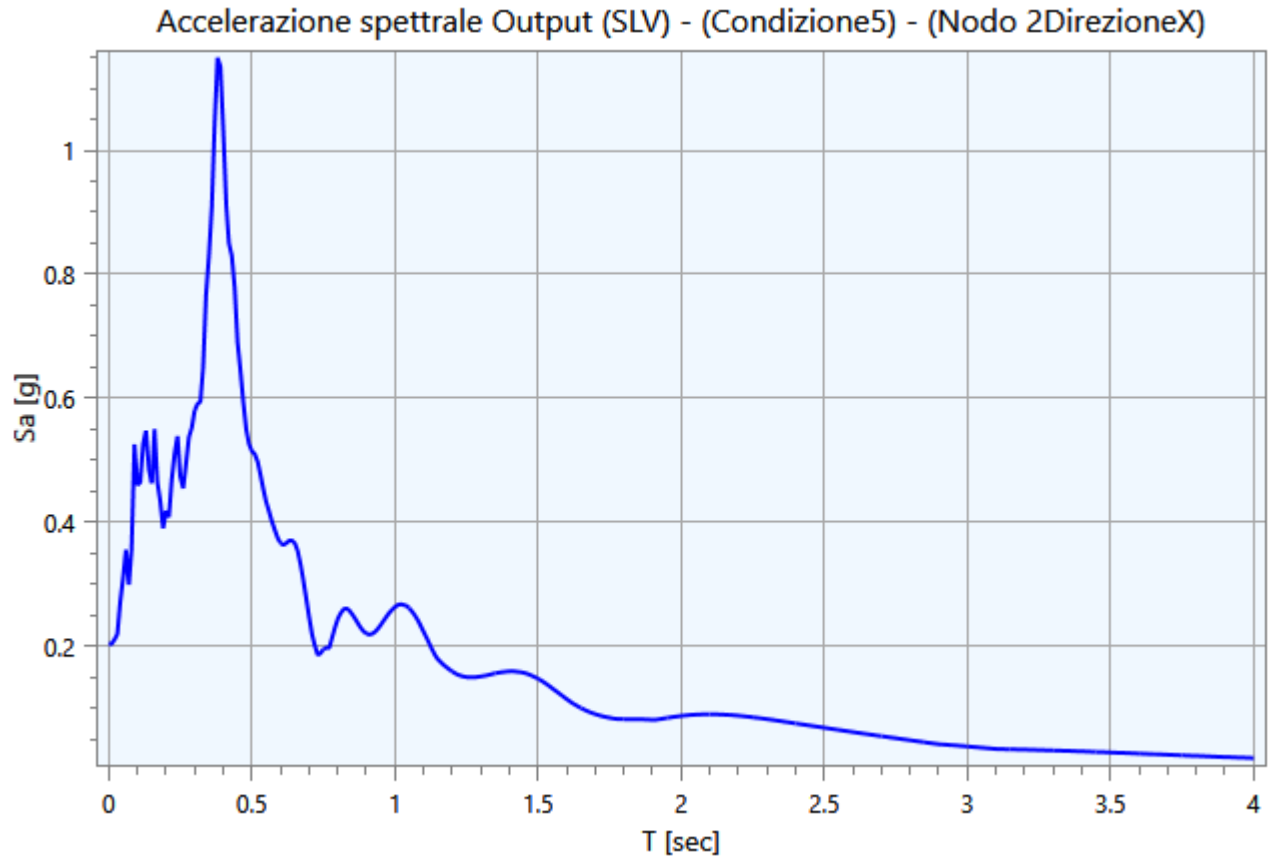
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 122DirezioneX)

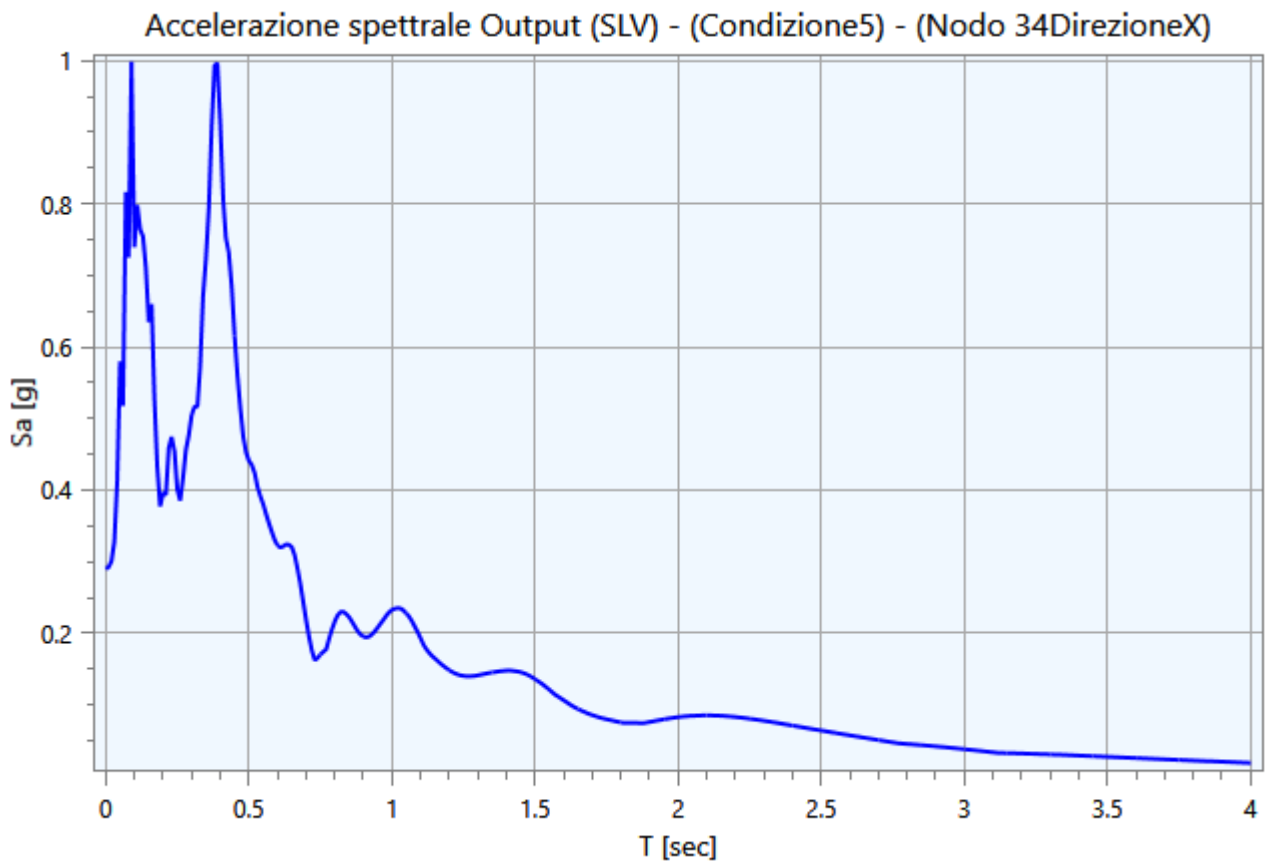
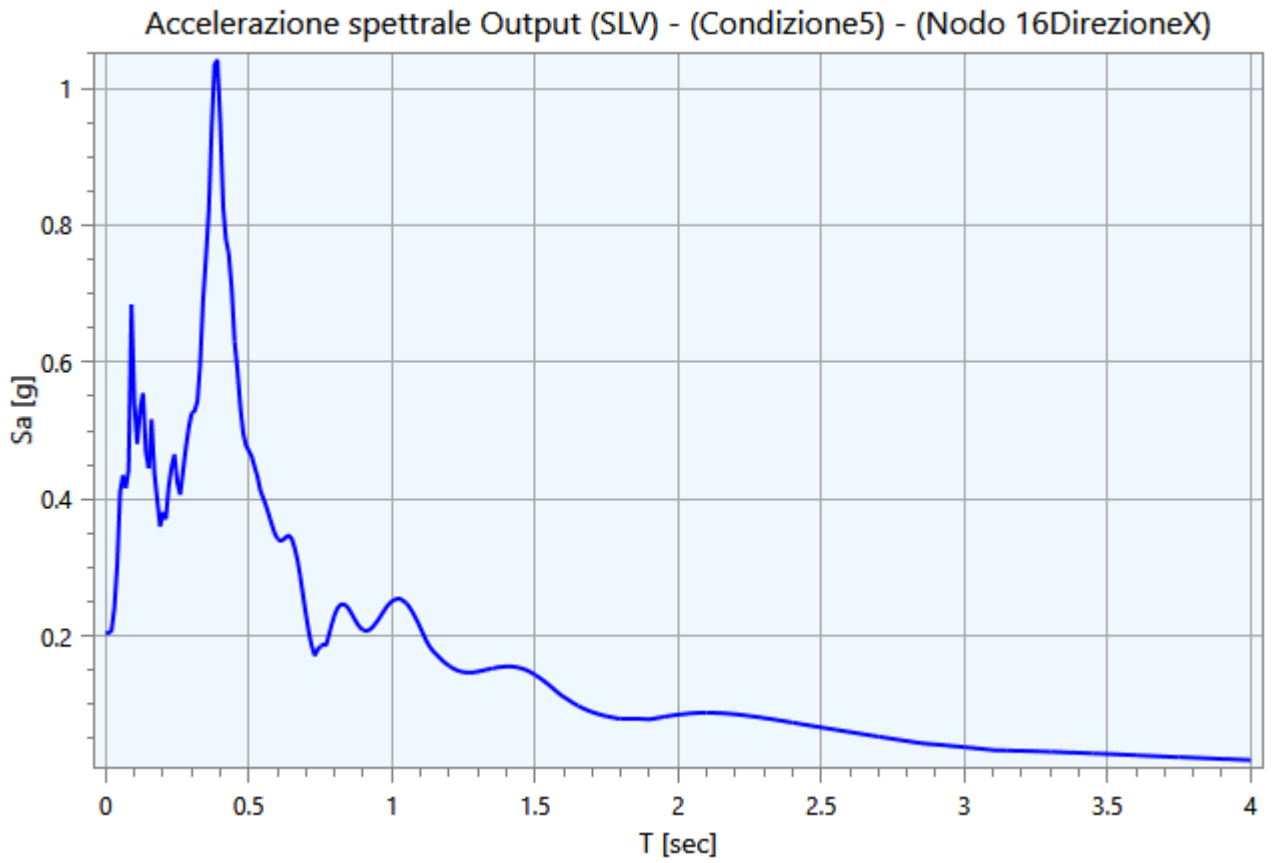


Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione4) - (Nodo 129DirezioneX)

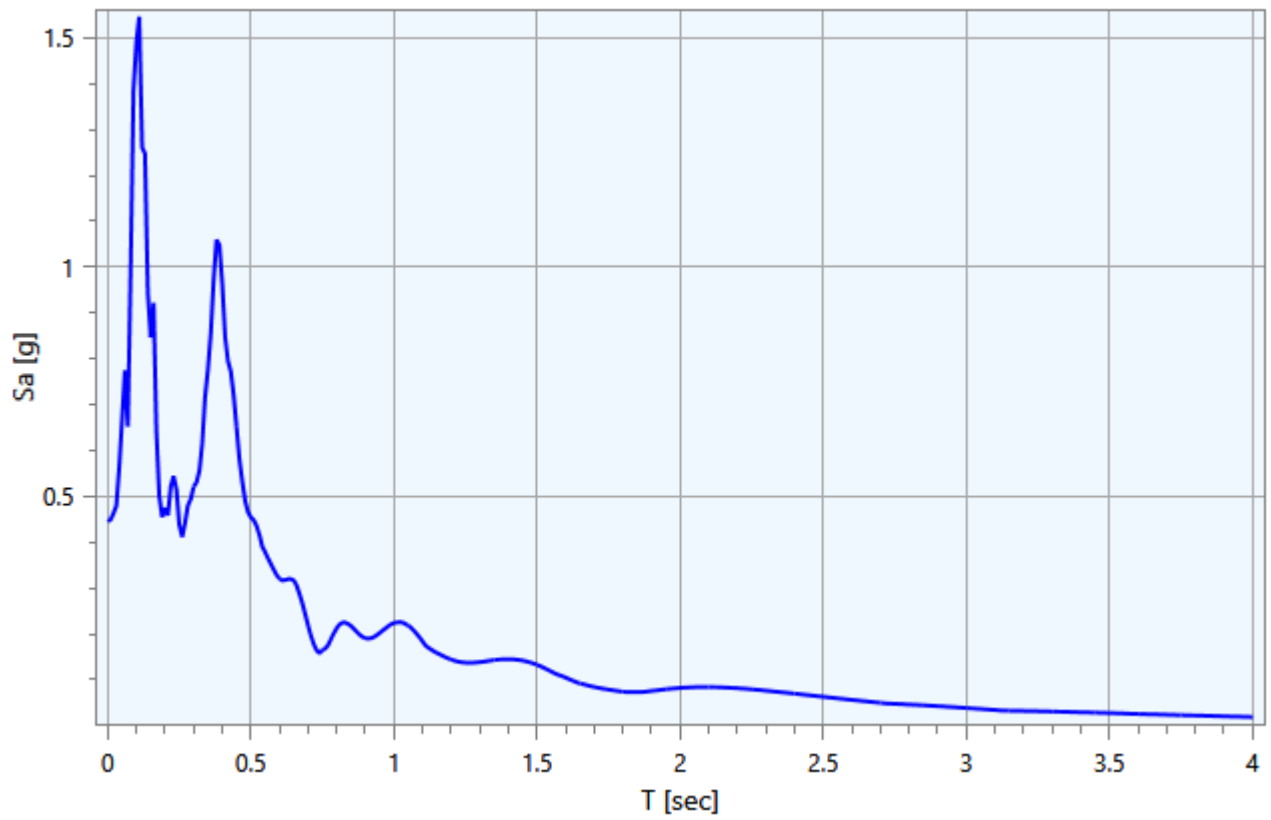




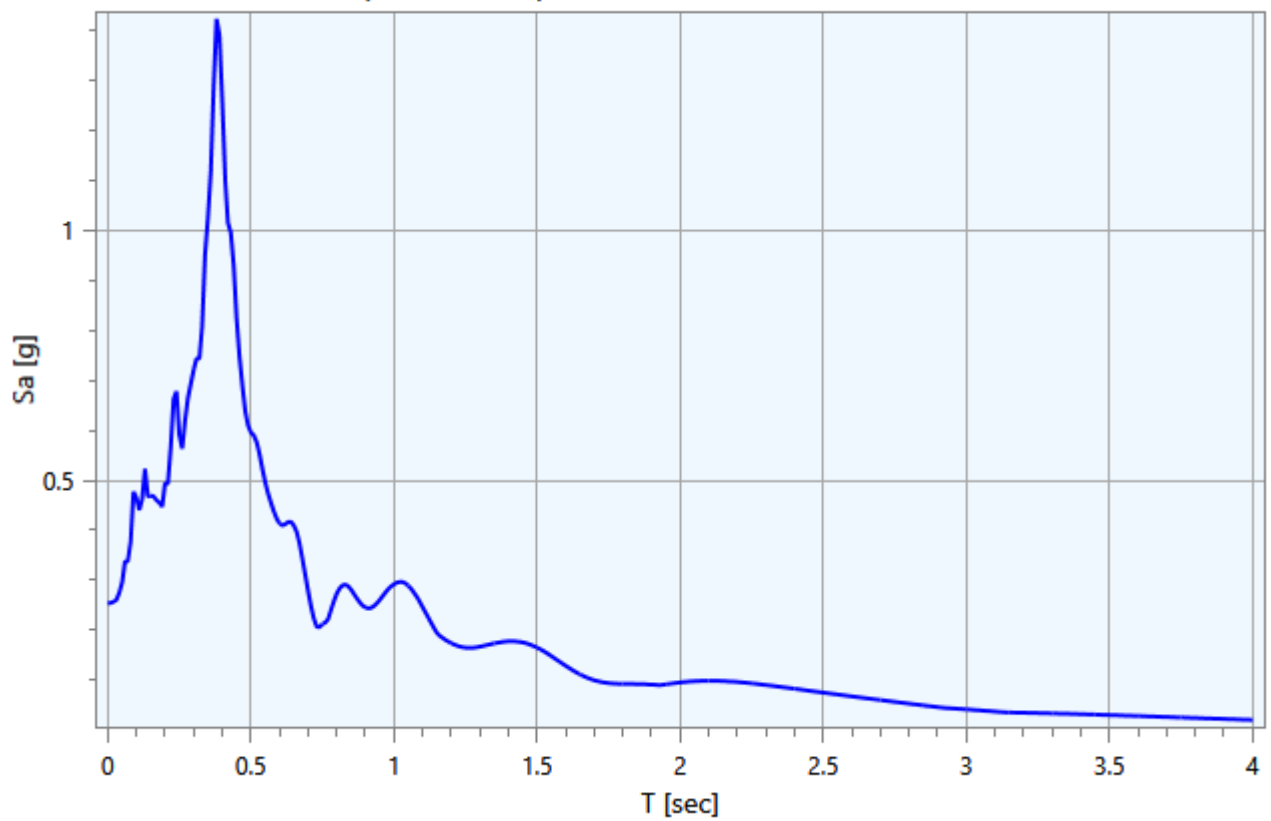




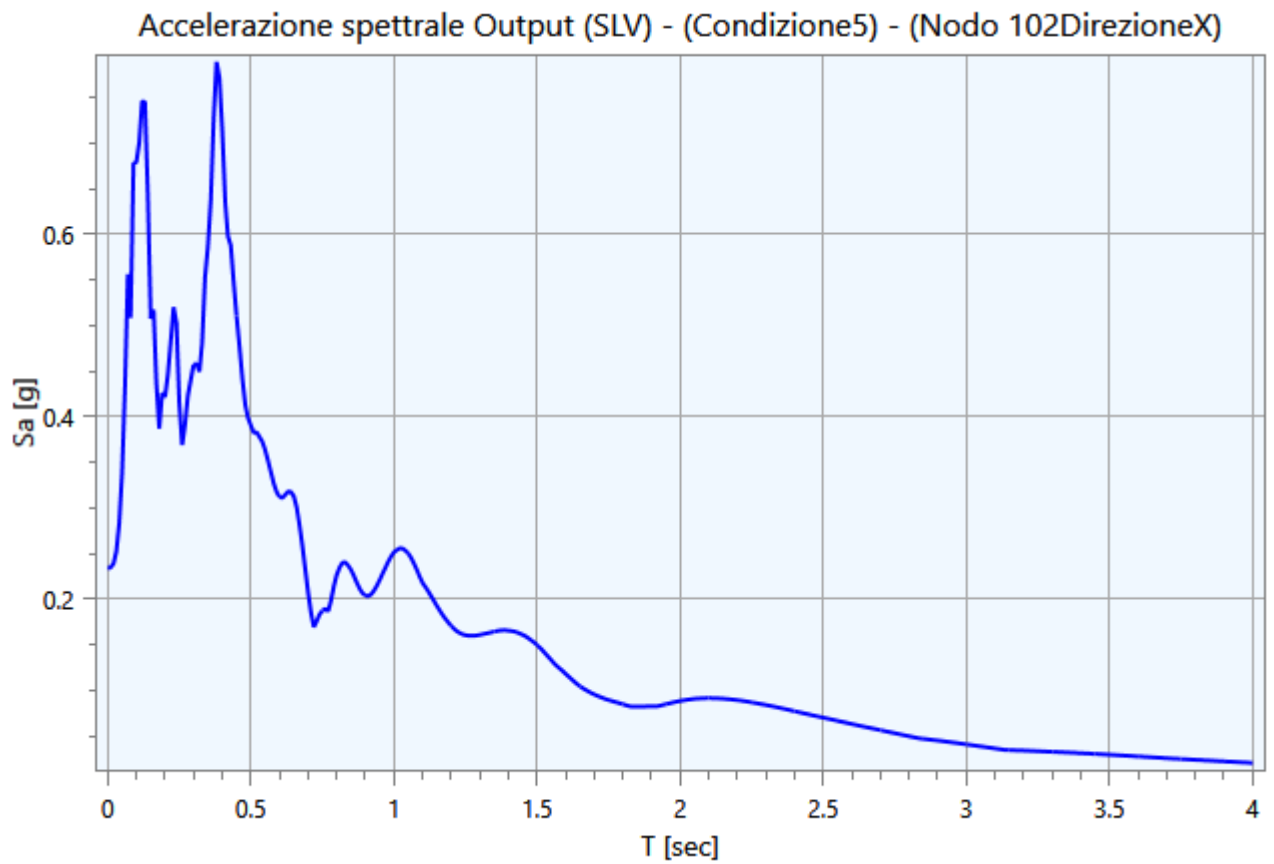
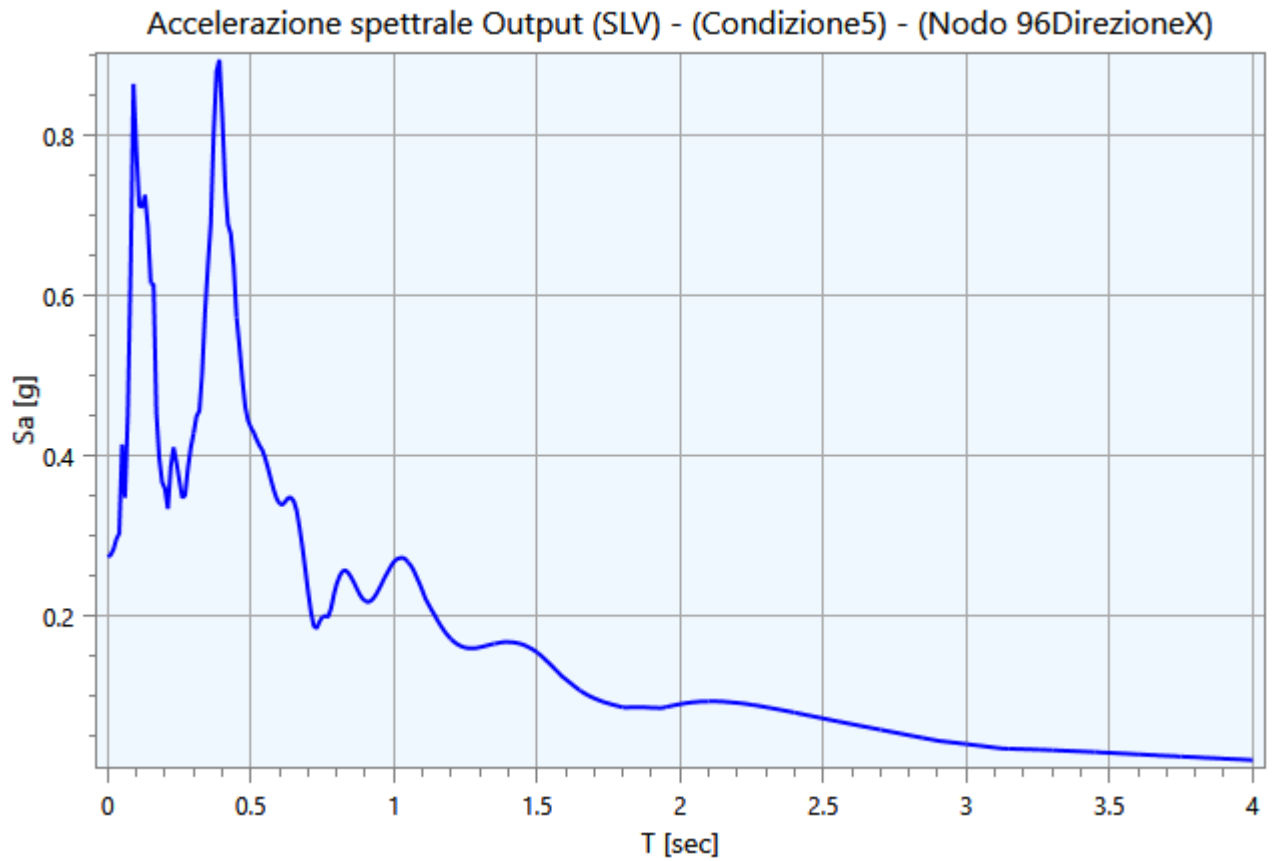
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 40DirezioneX)

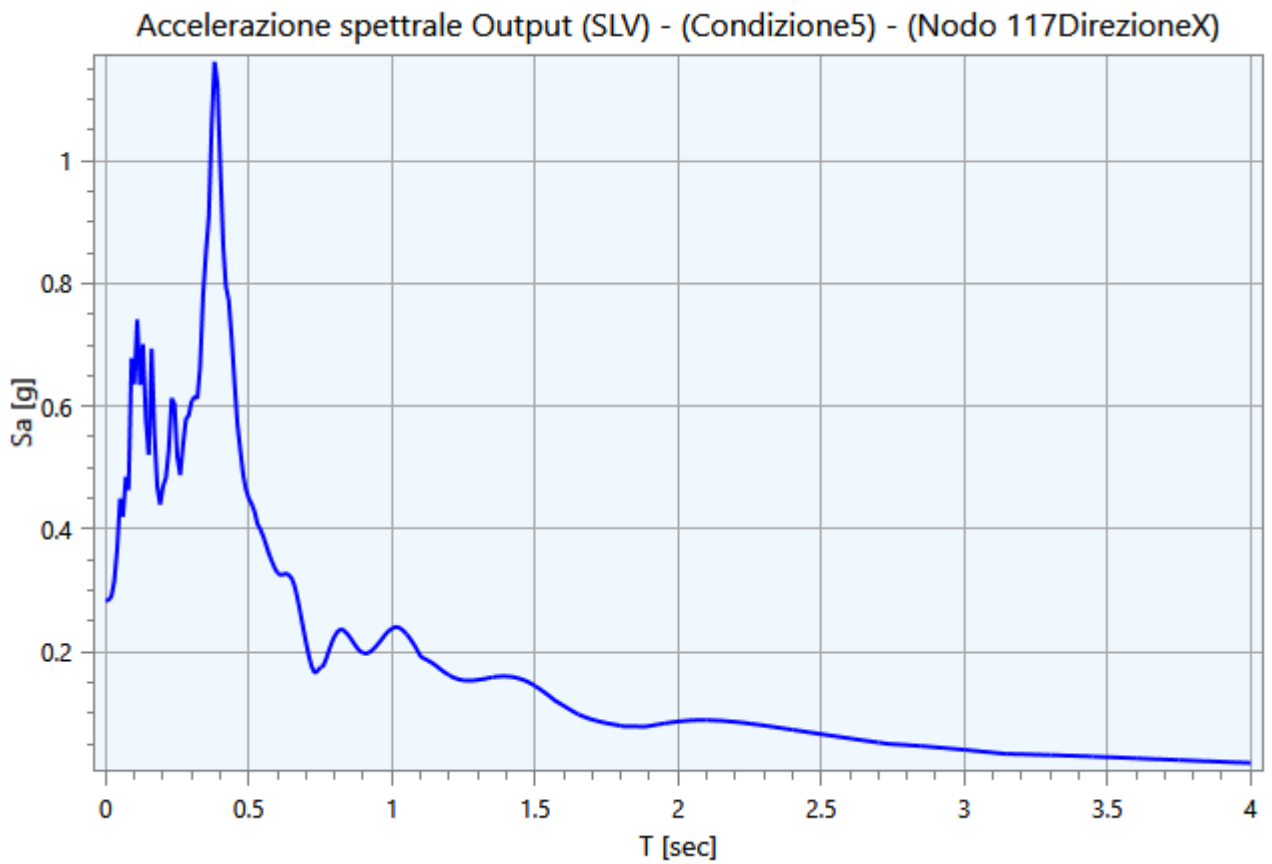
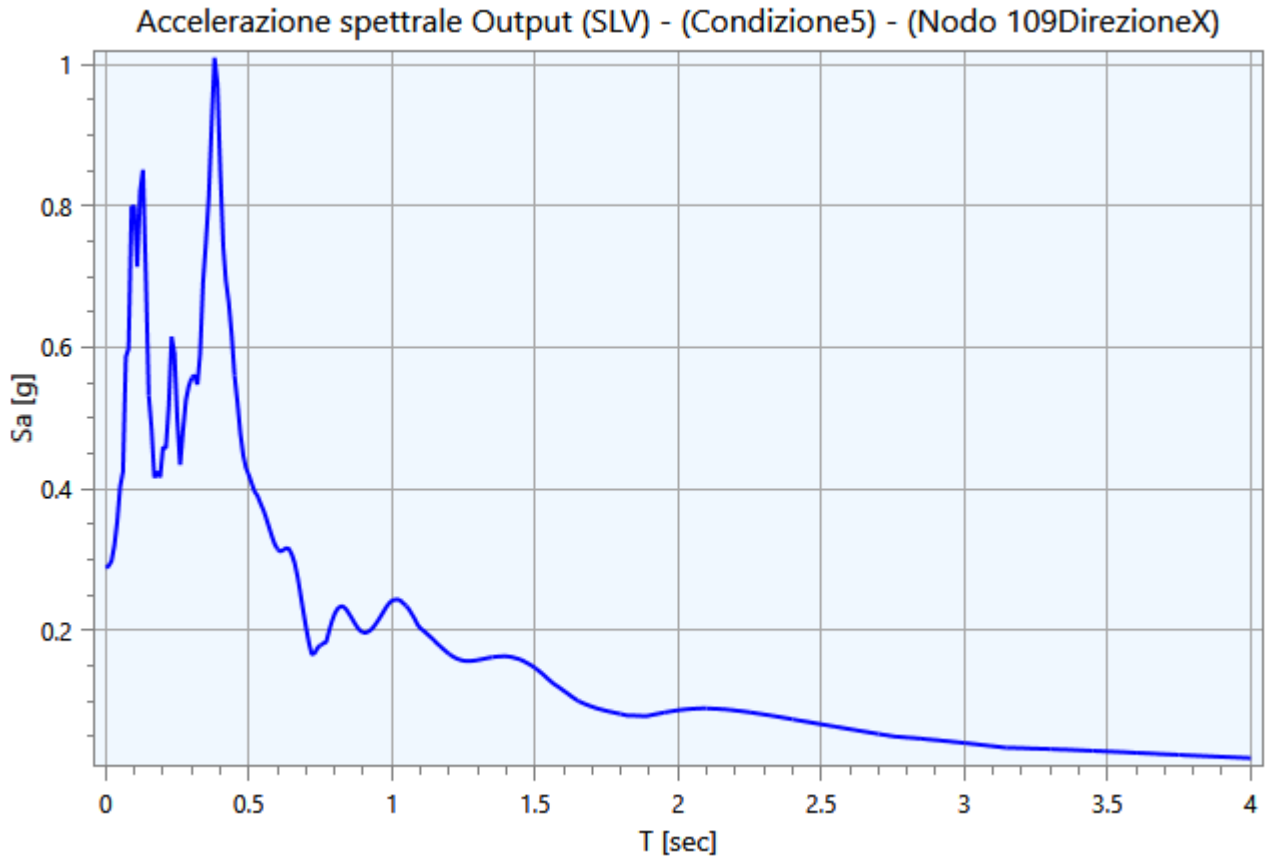


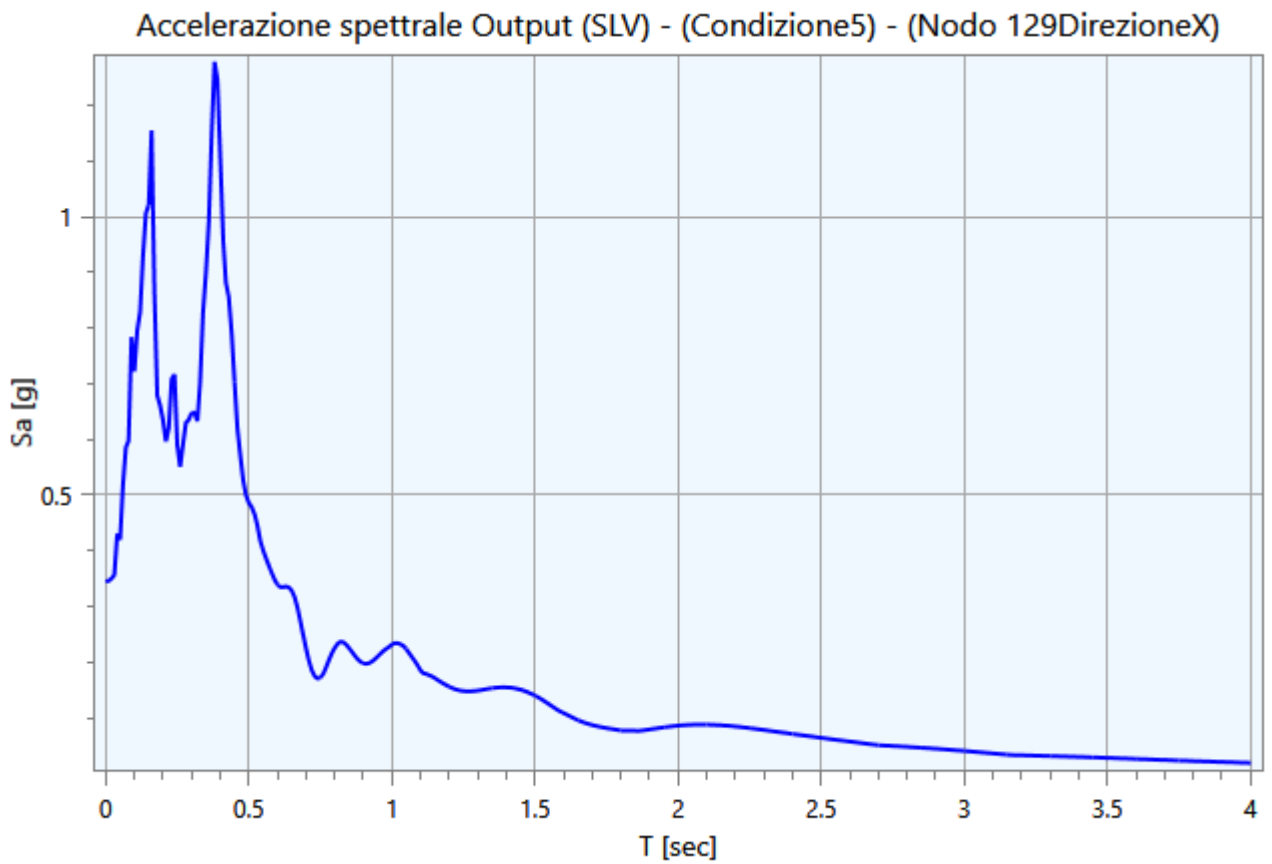
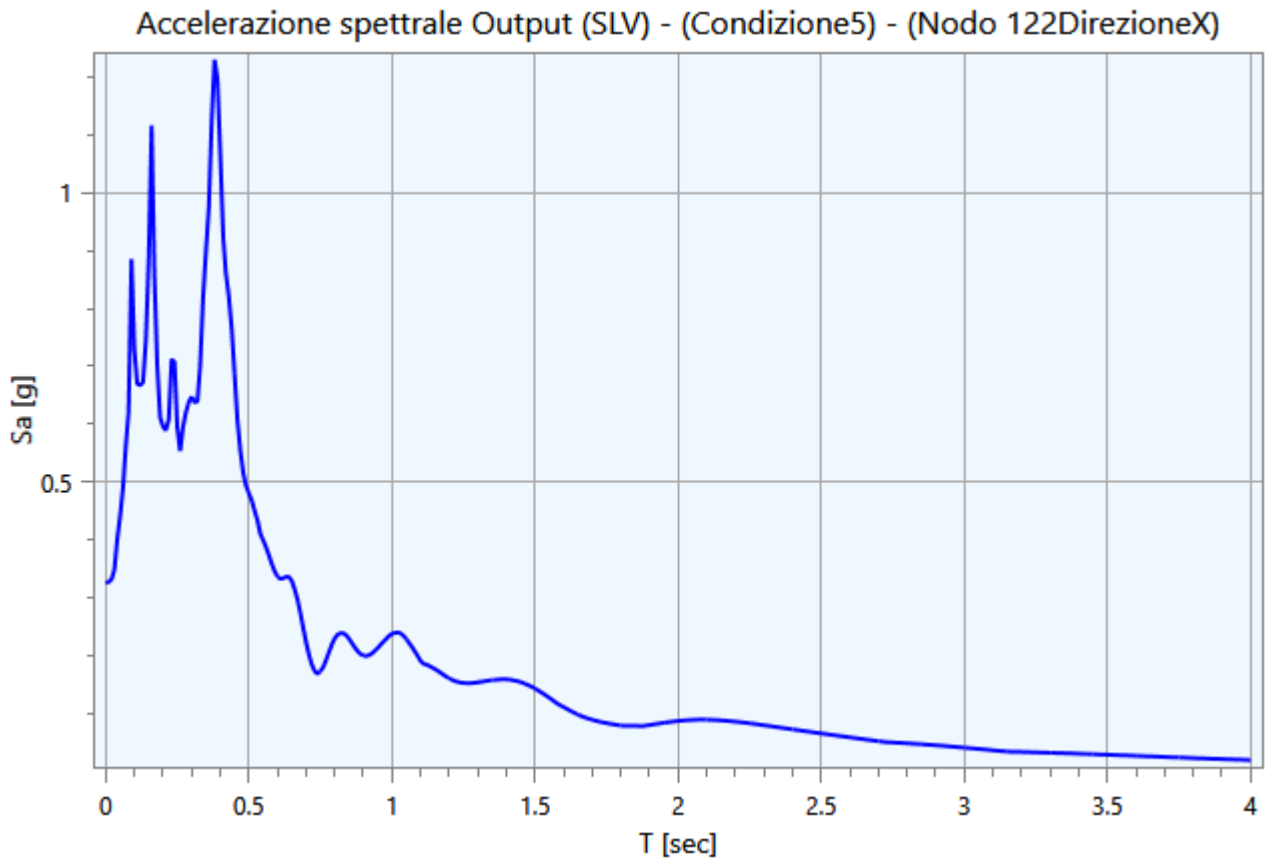
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione5) - (Nodo 81DirezioneX)

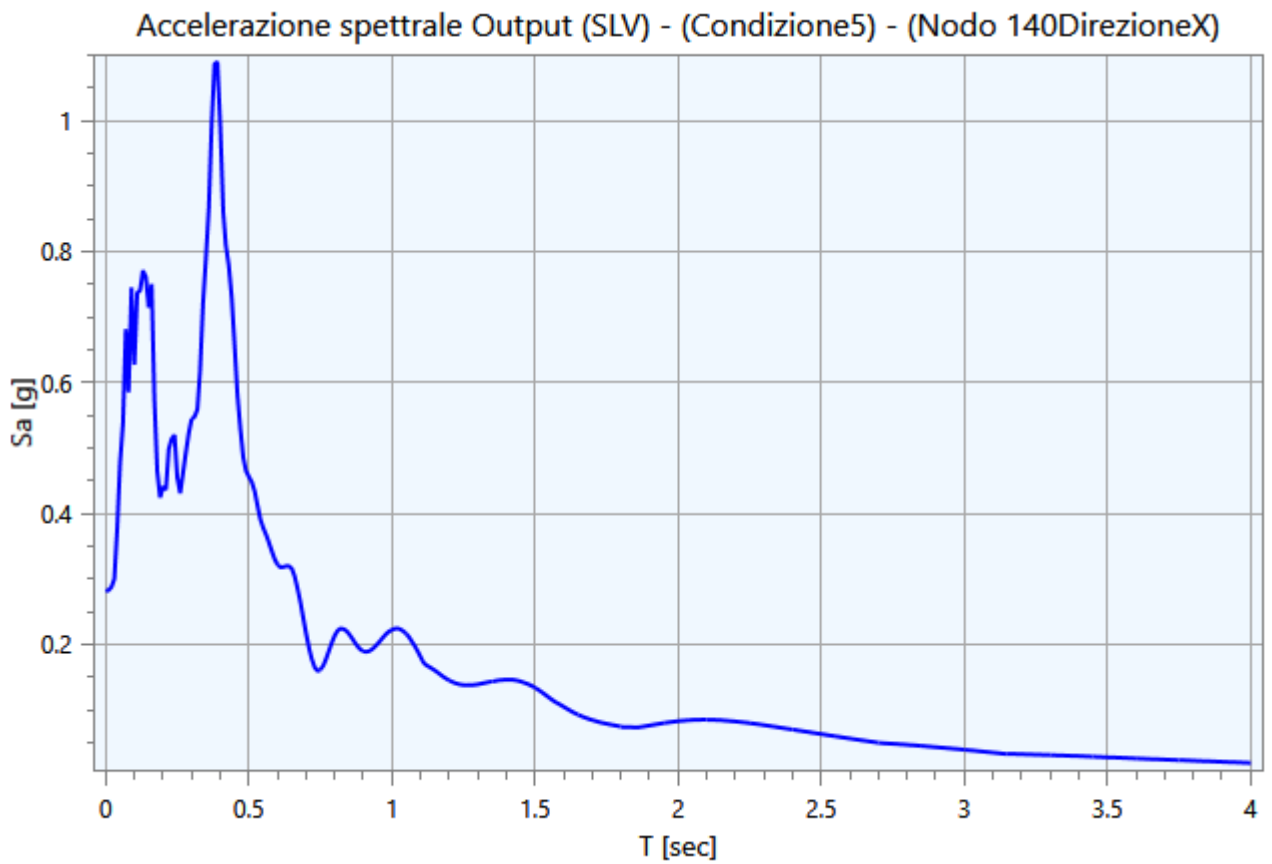
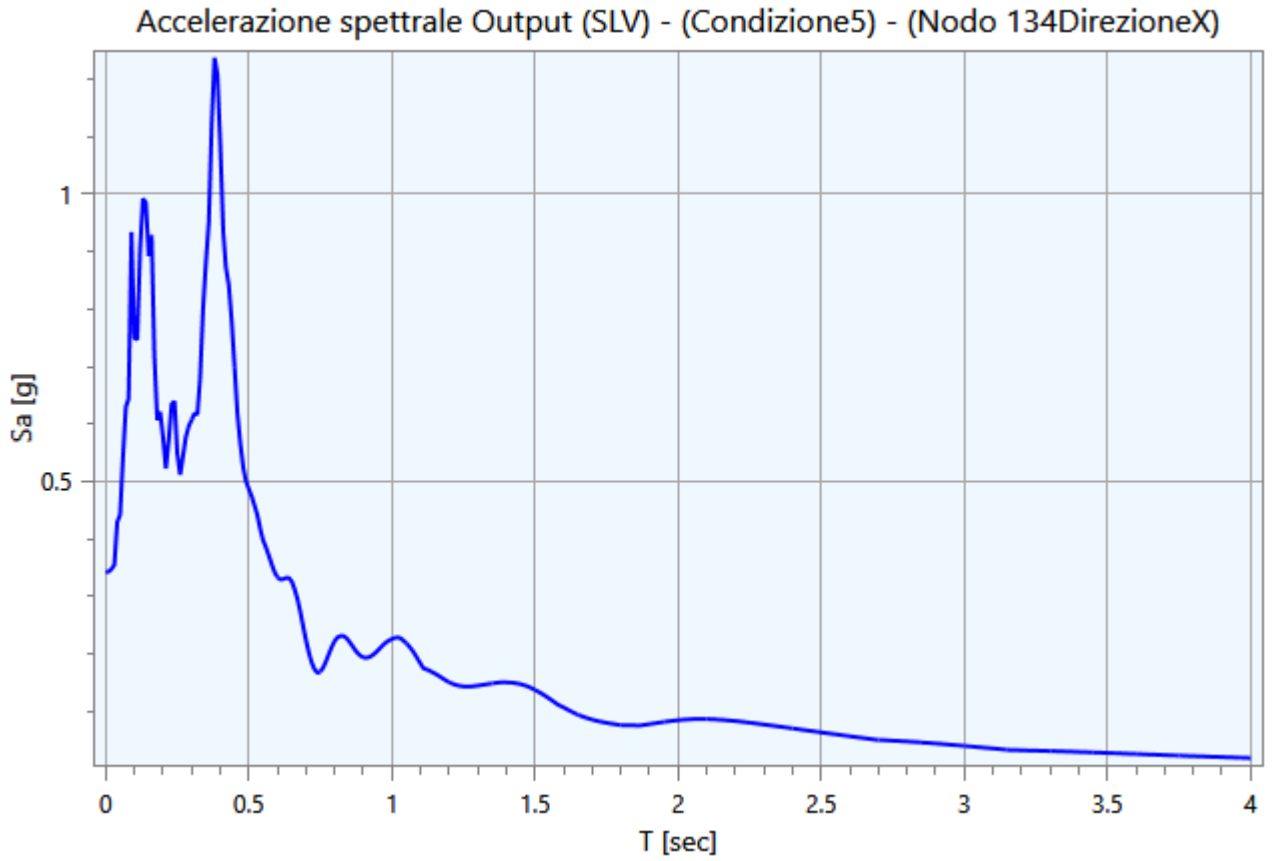


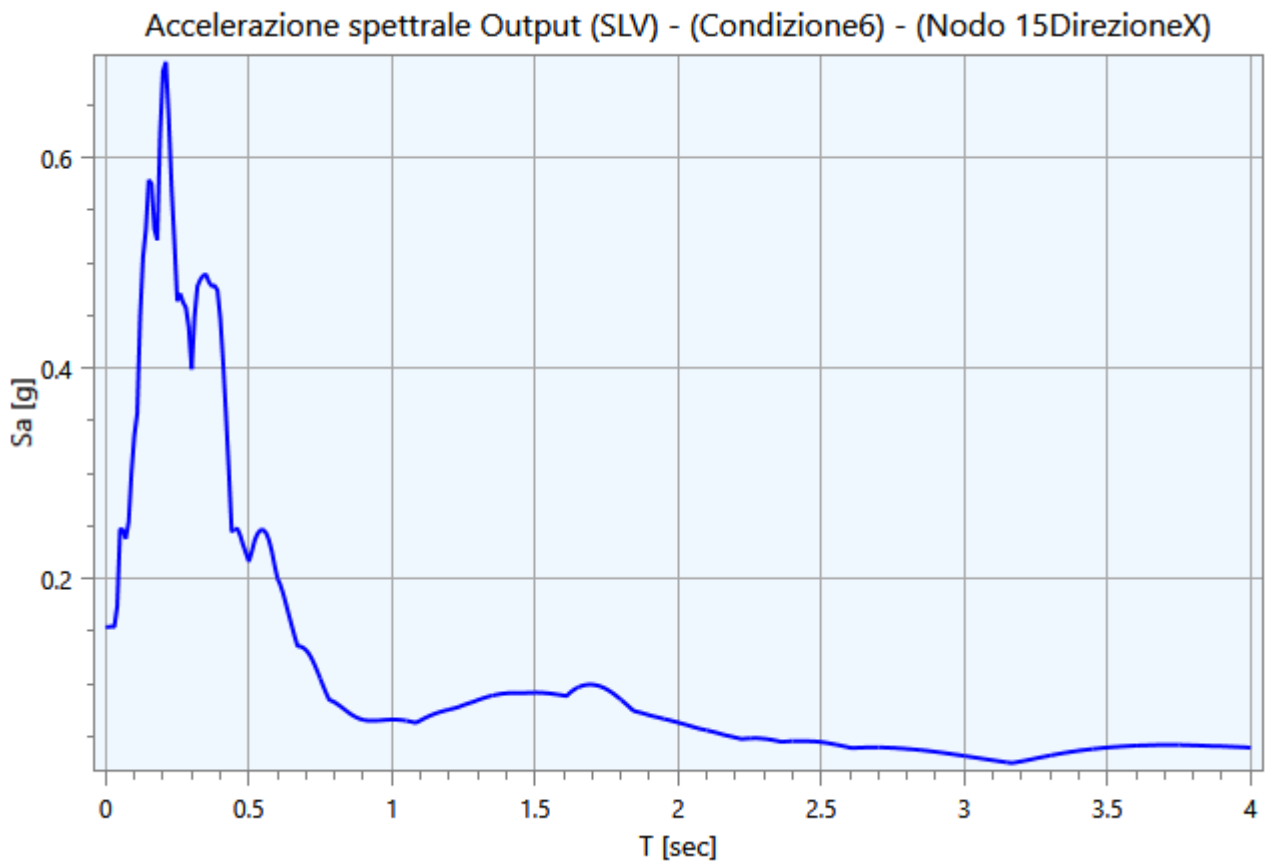
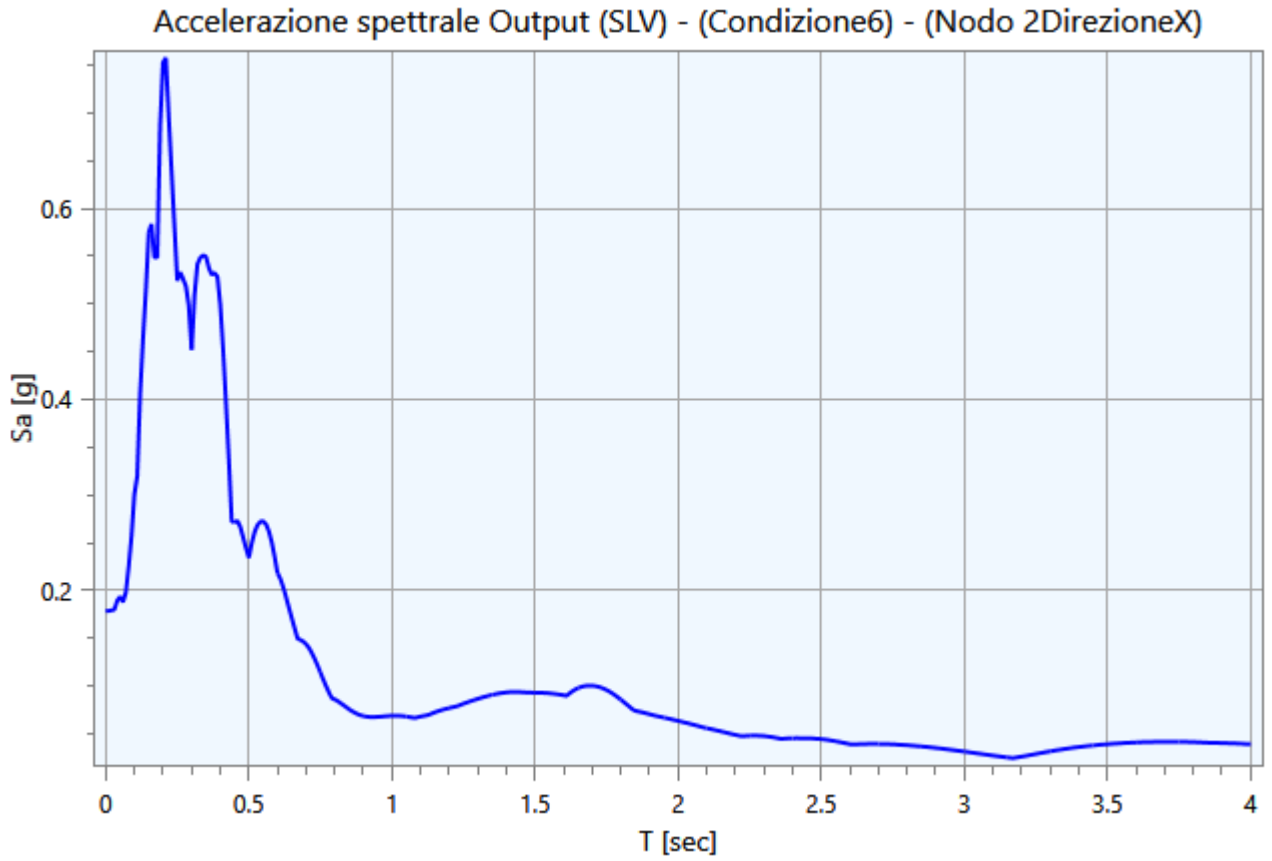




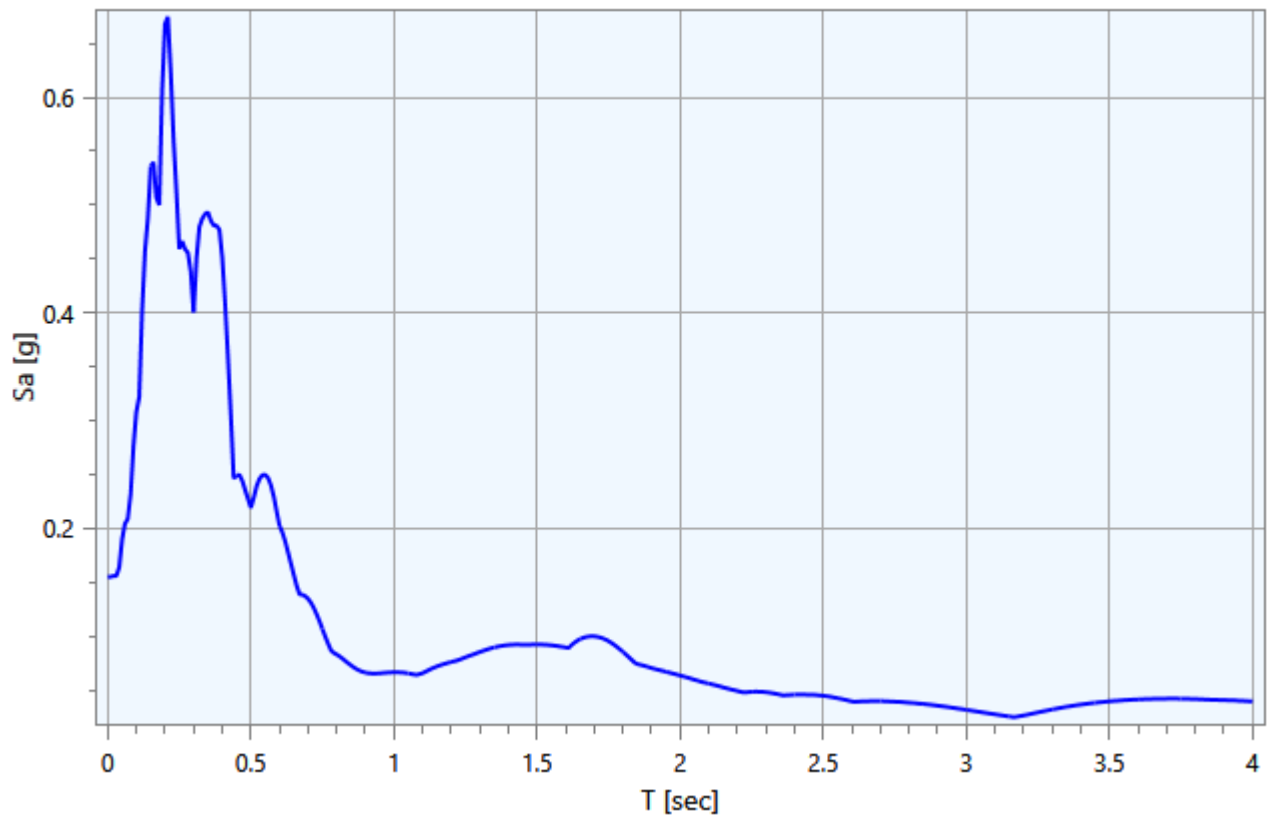




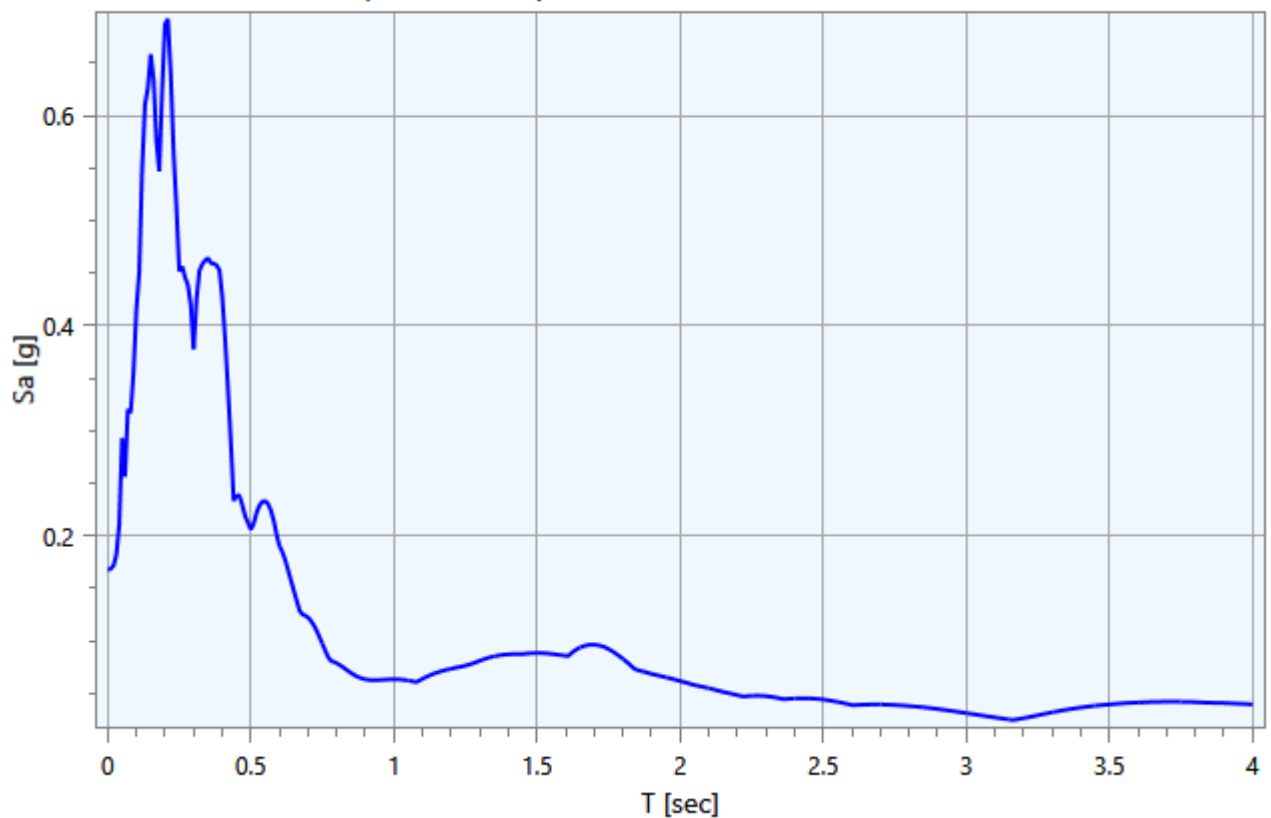


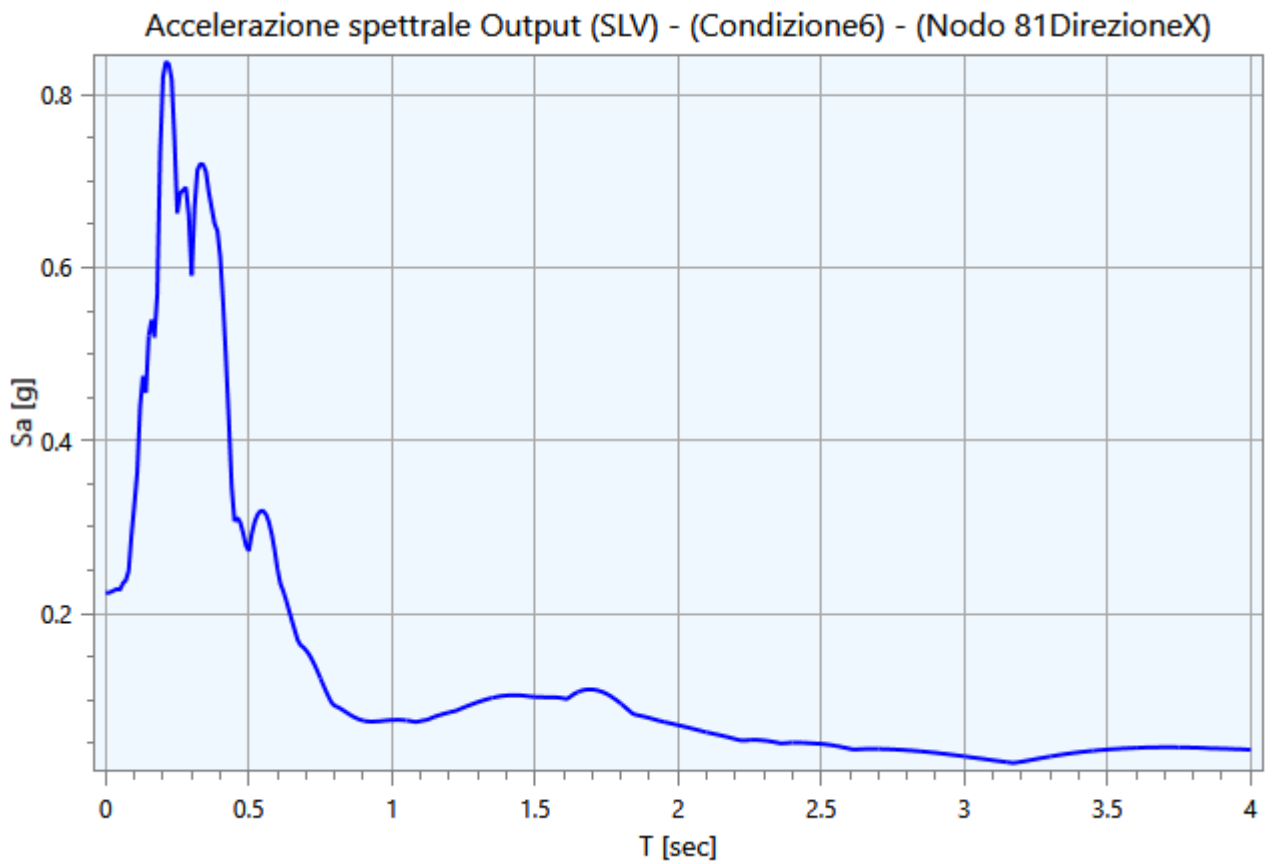
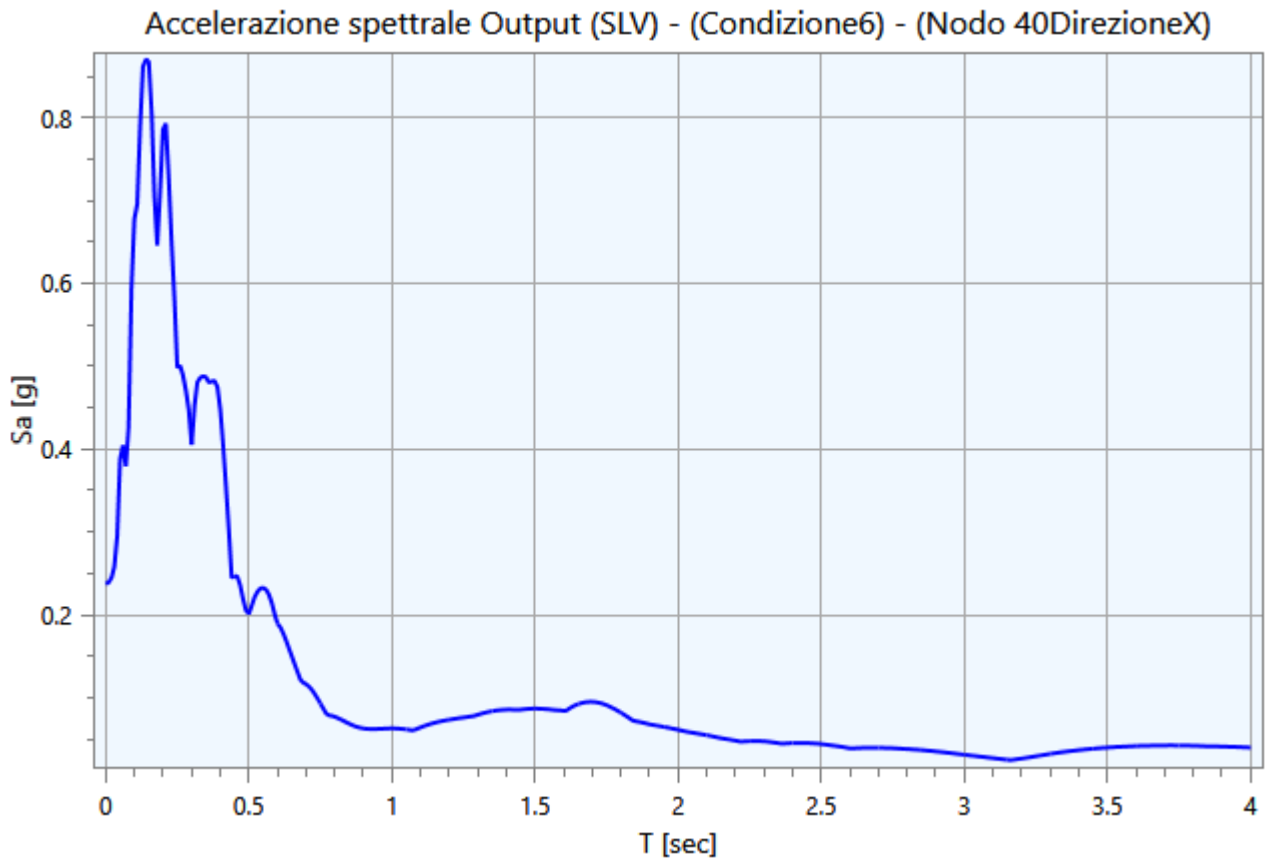


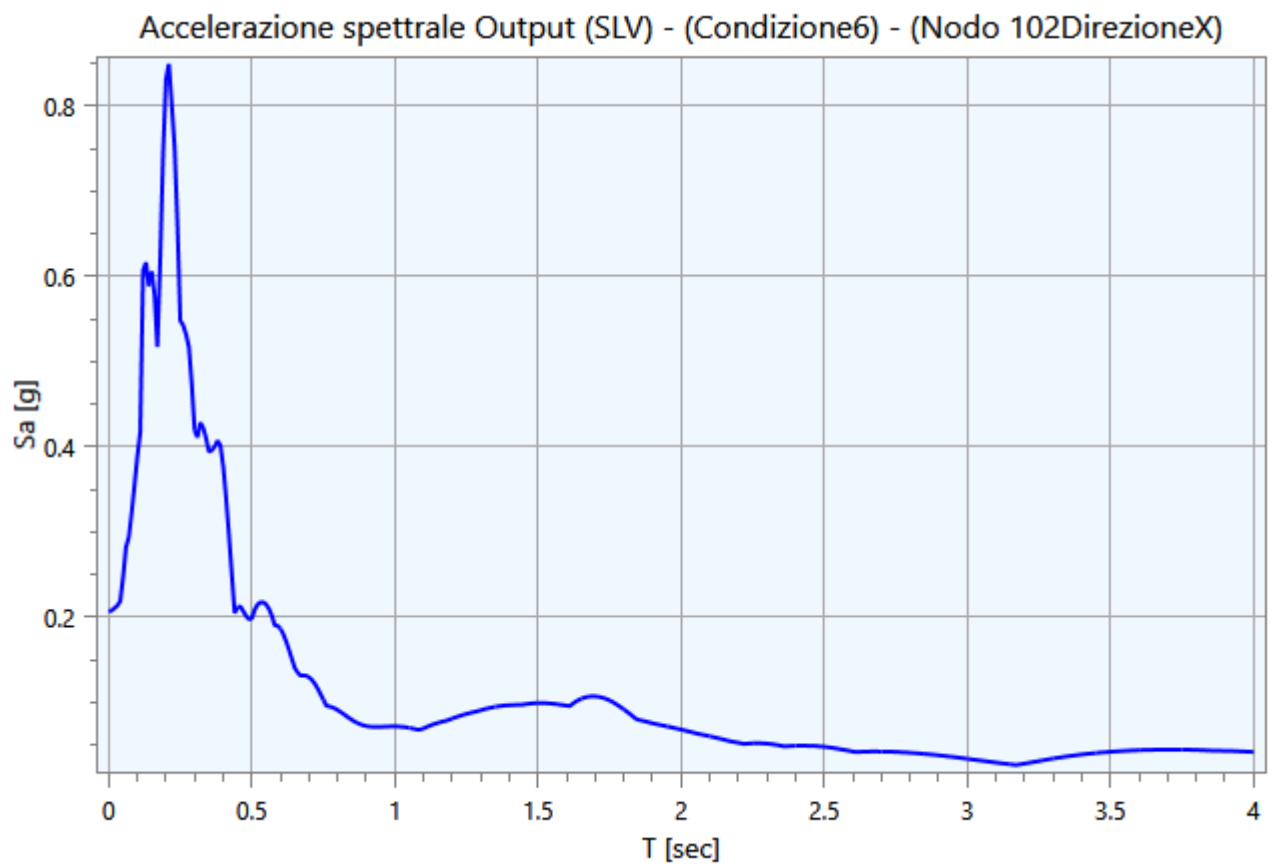
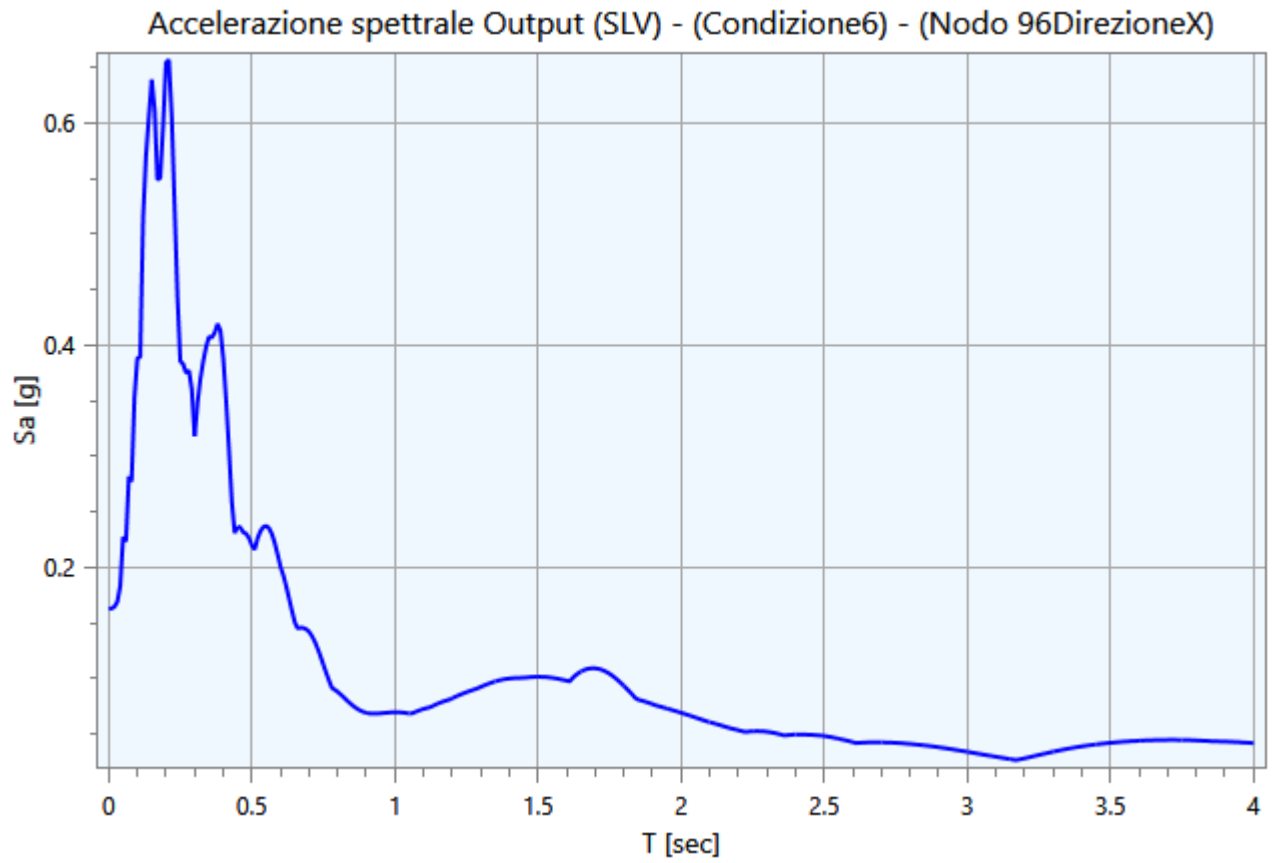
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 16DirezioneX)



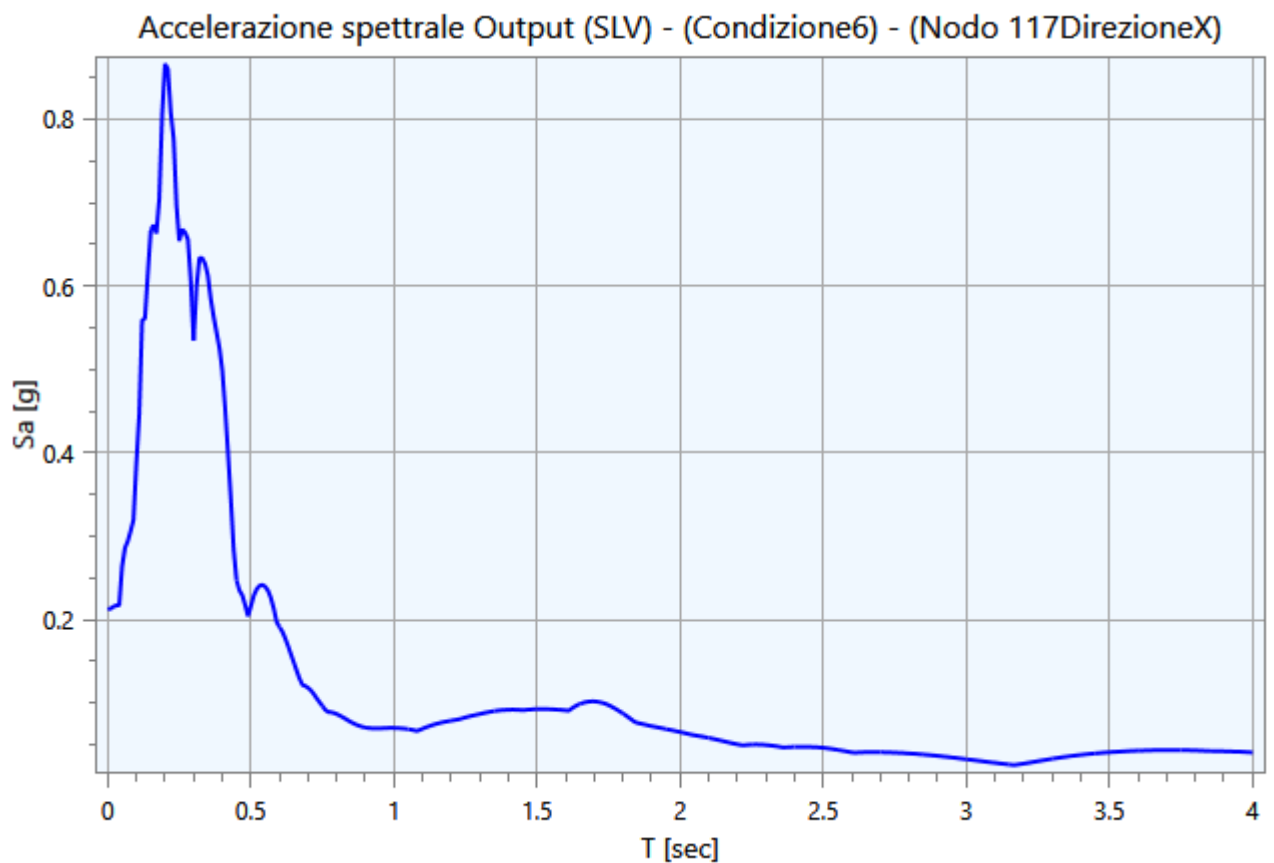
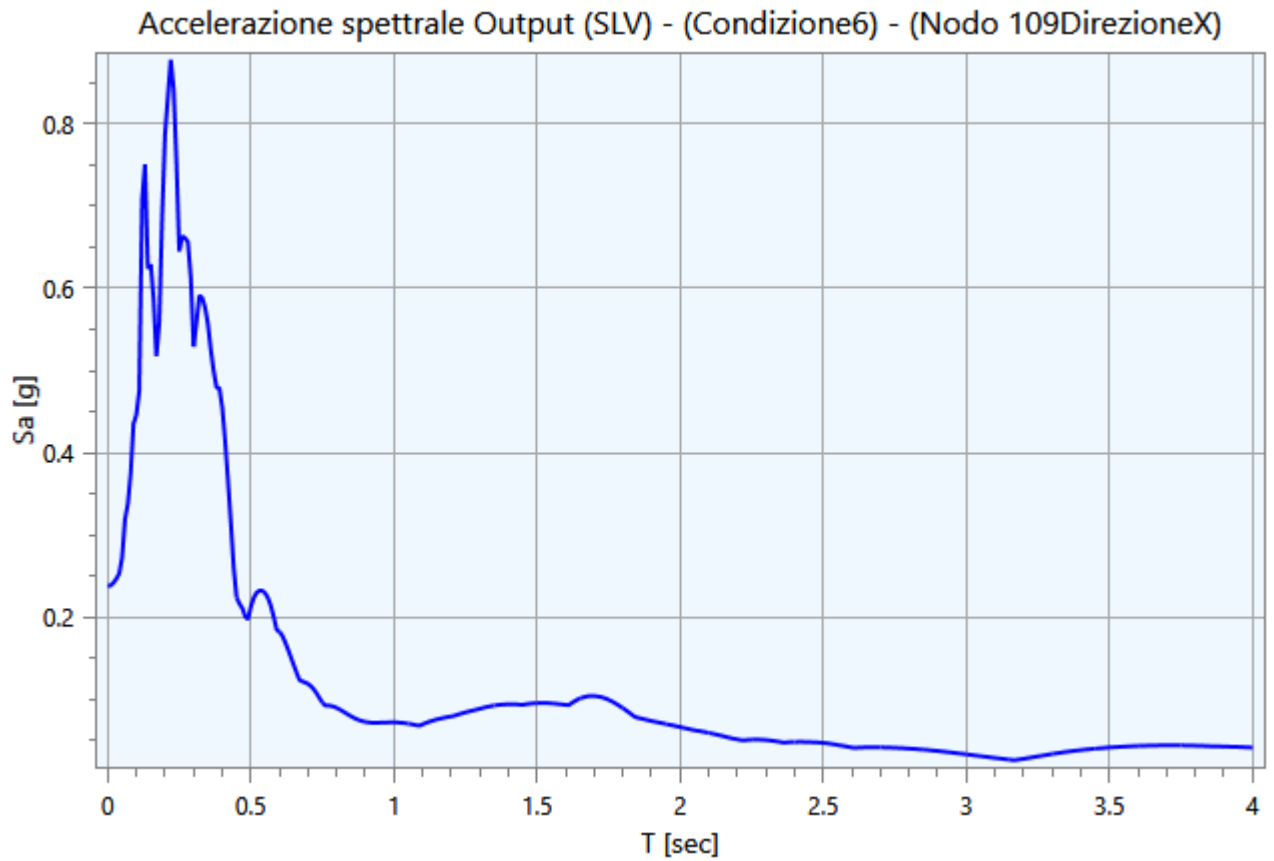
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione6) - (Nodo 34DirezioneX)

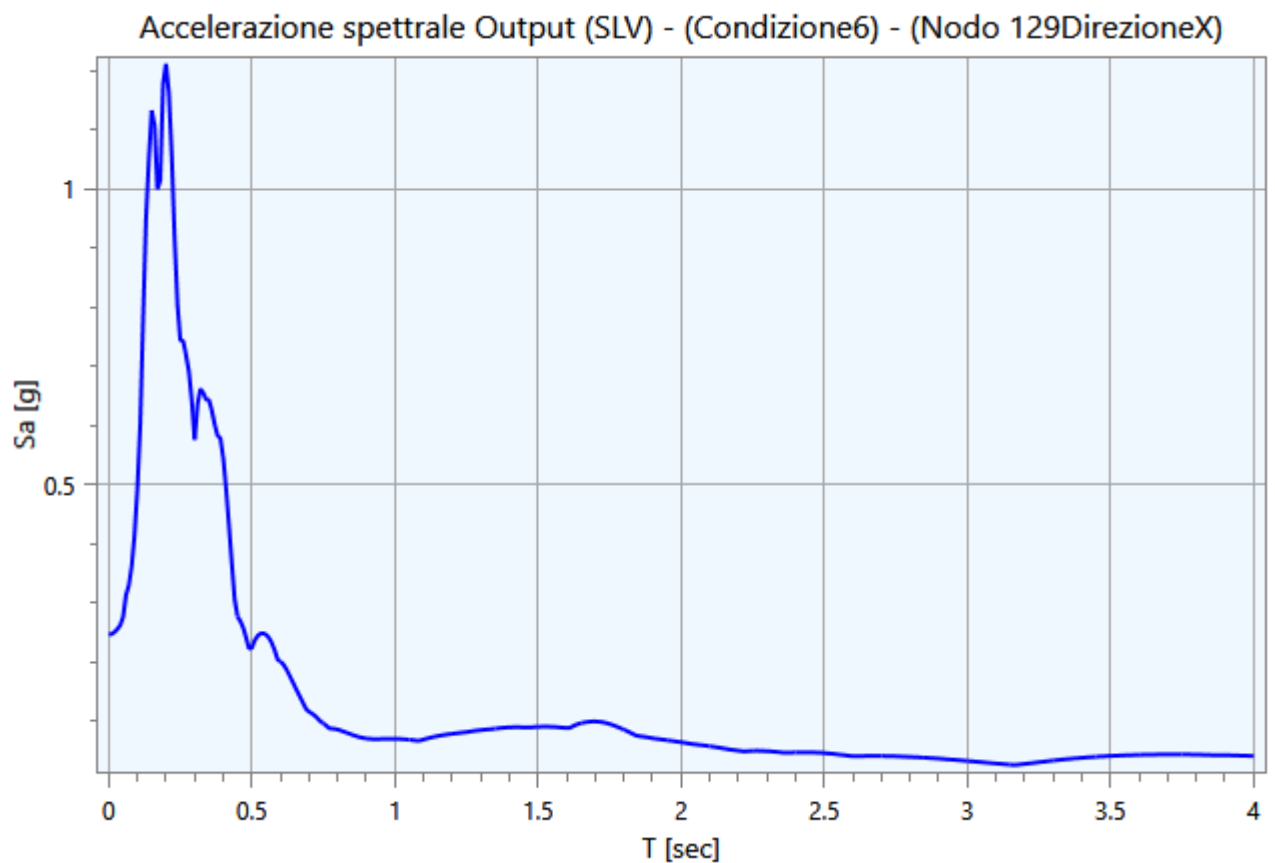
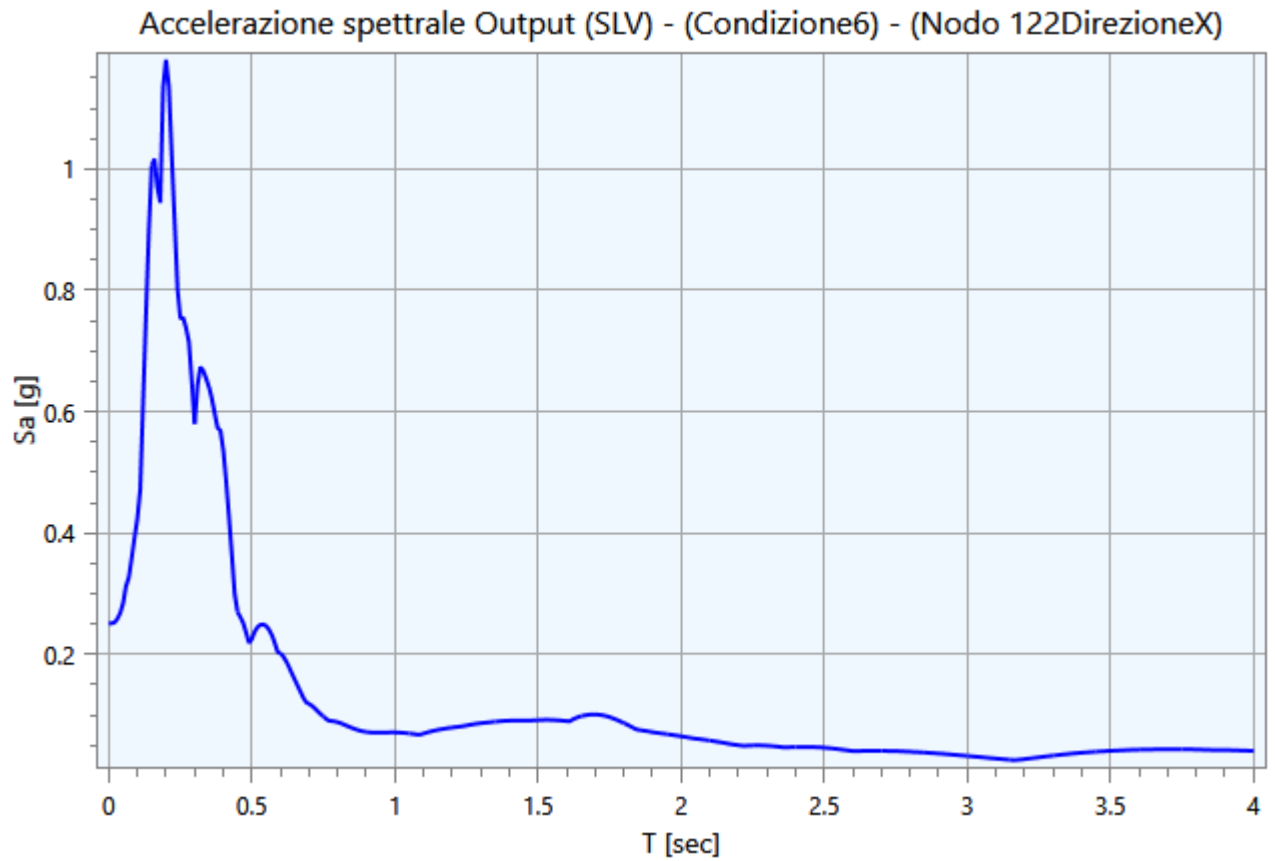


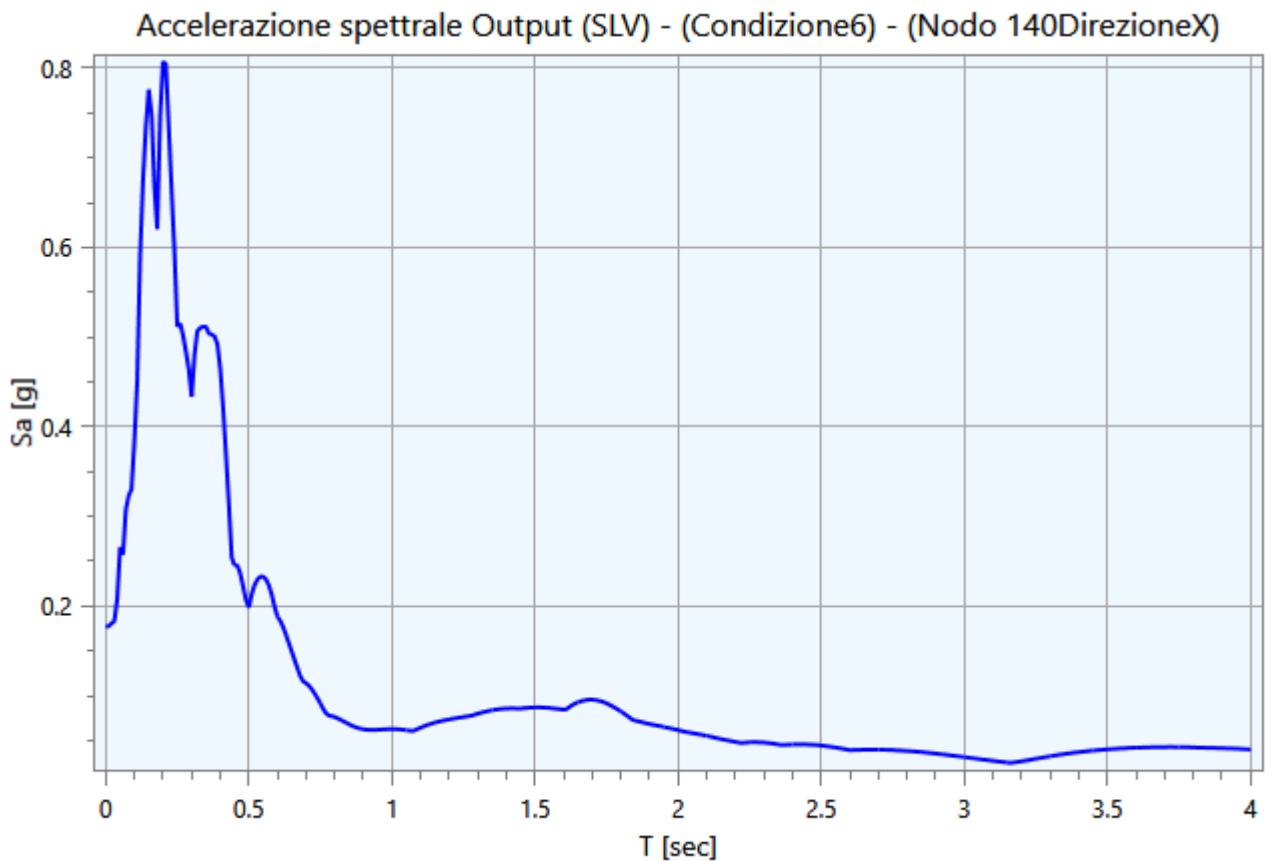
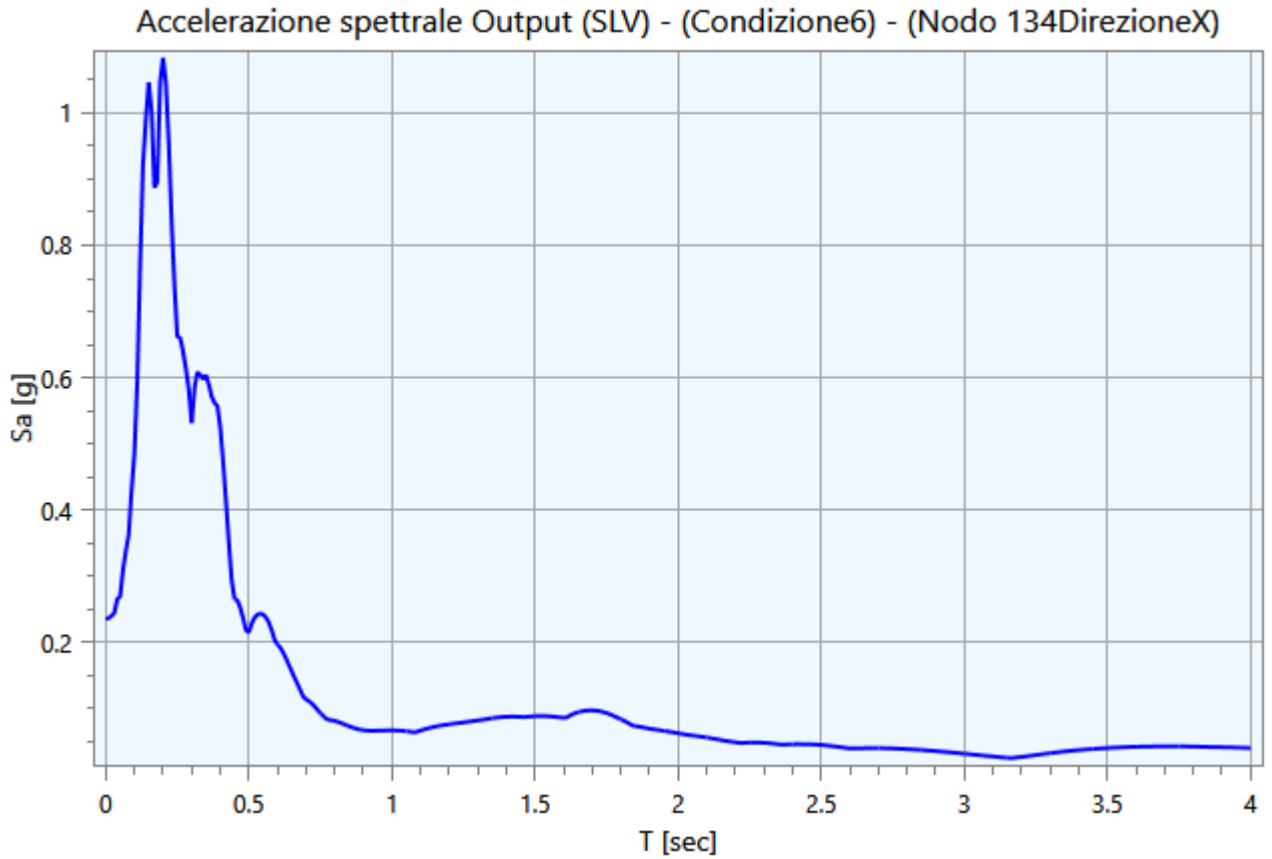


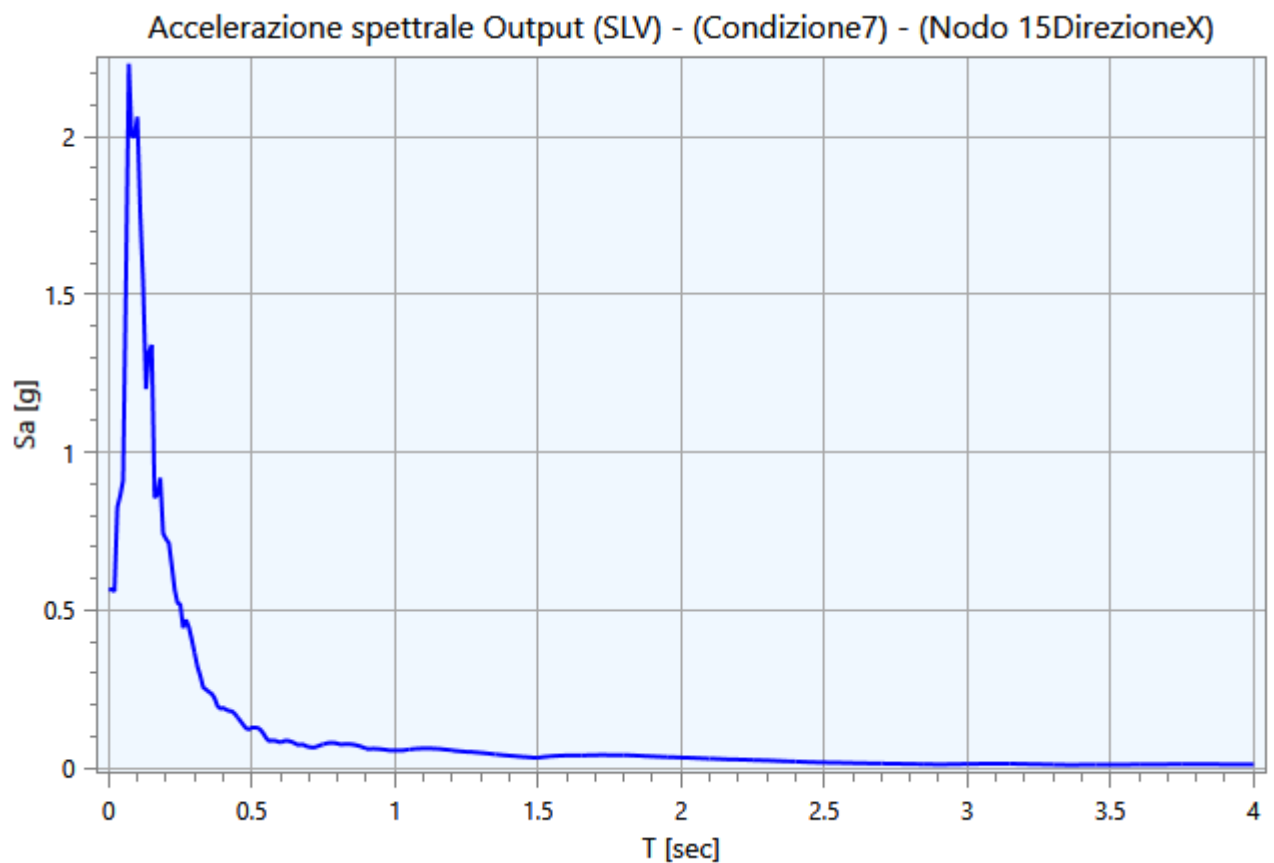
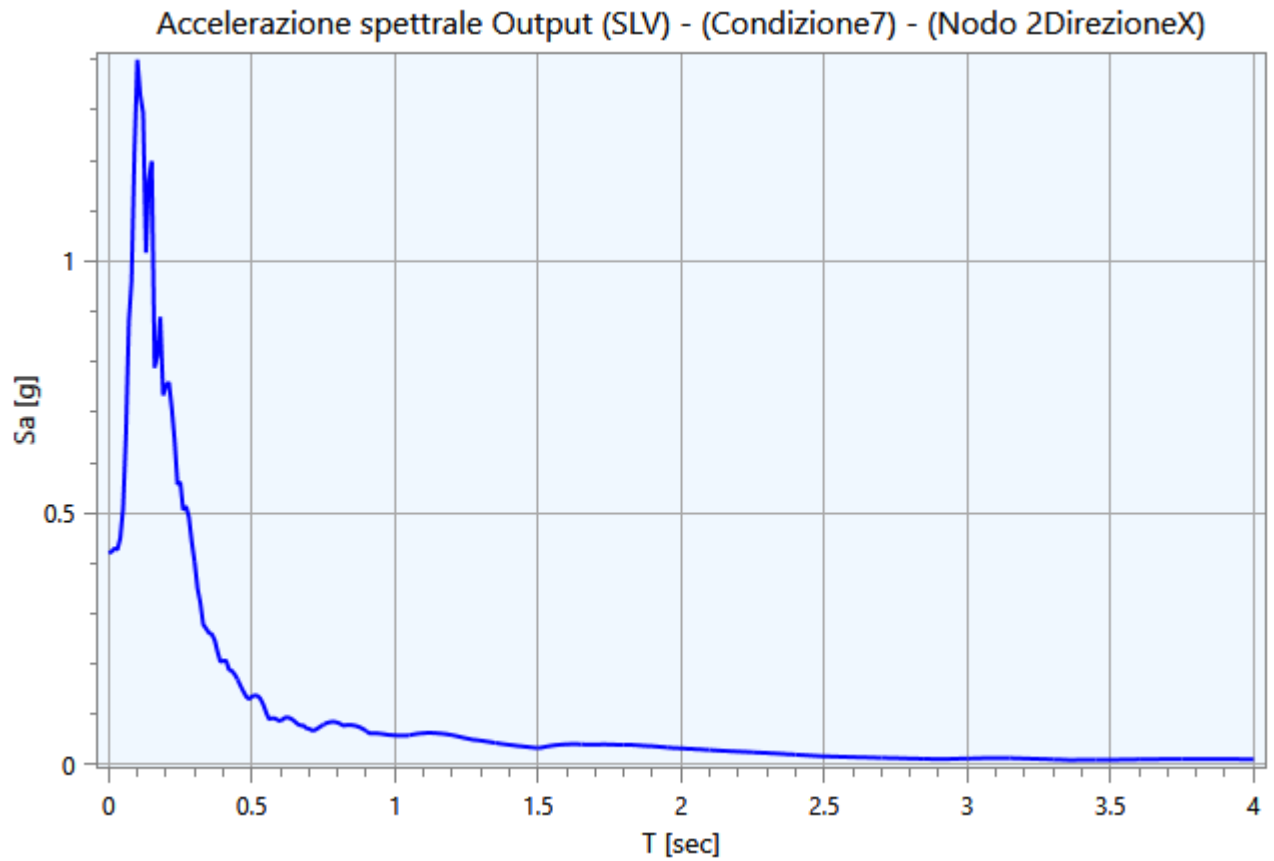


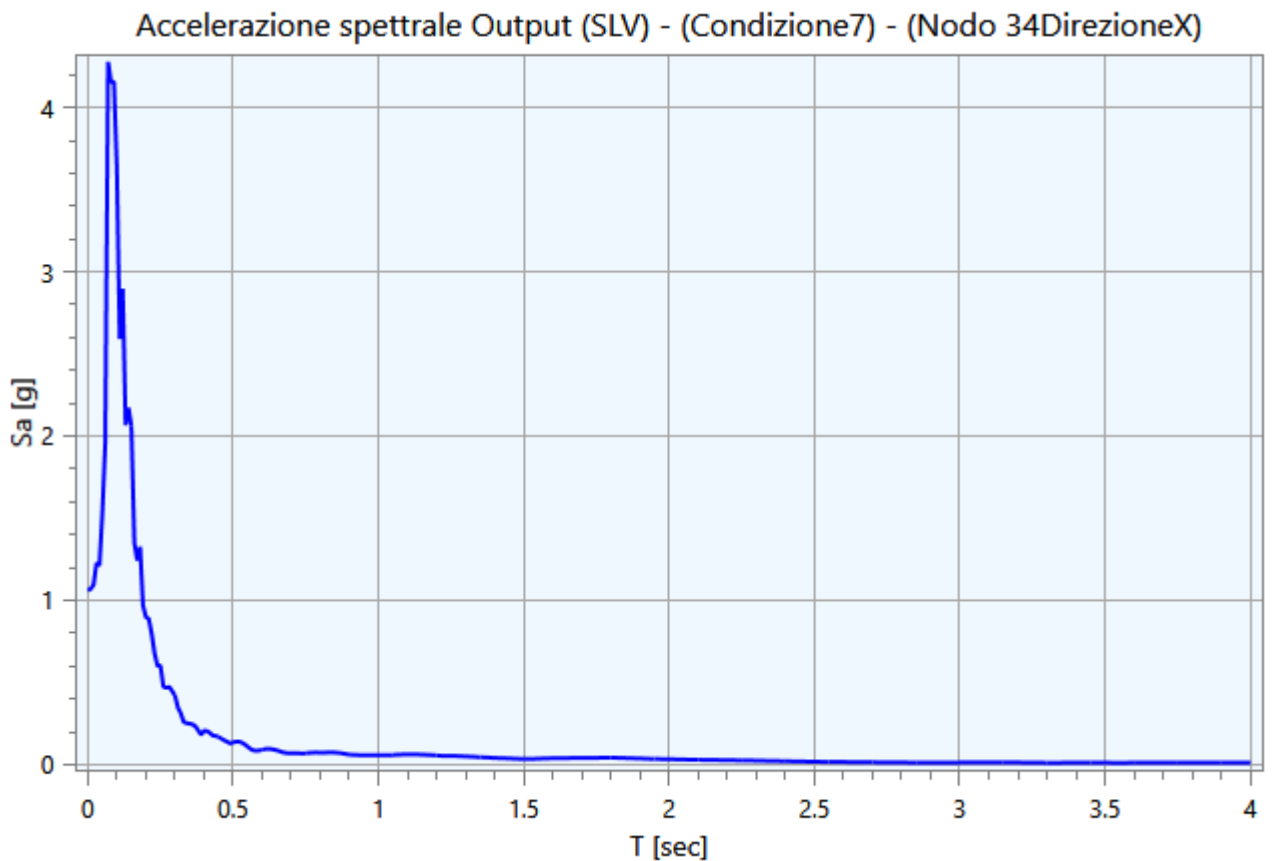
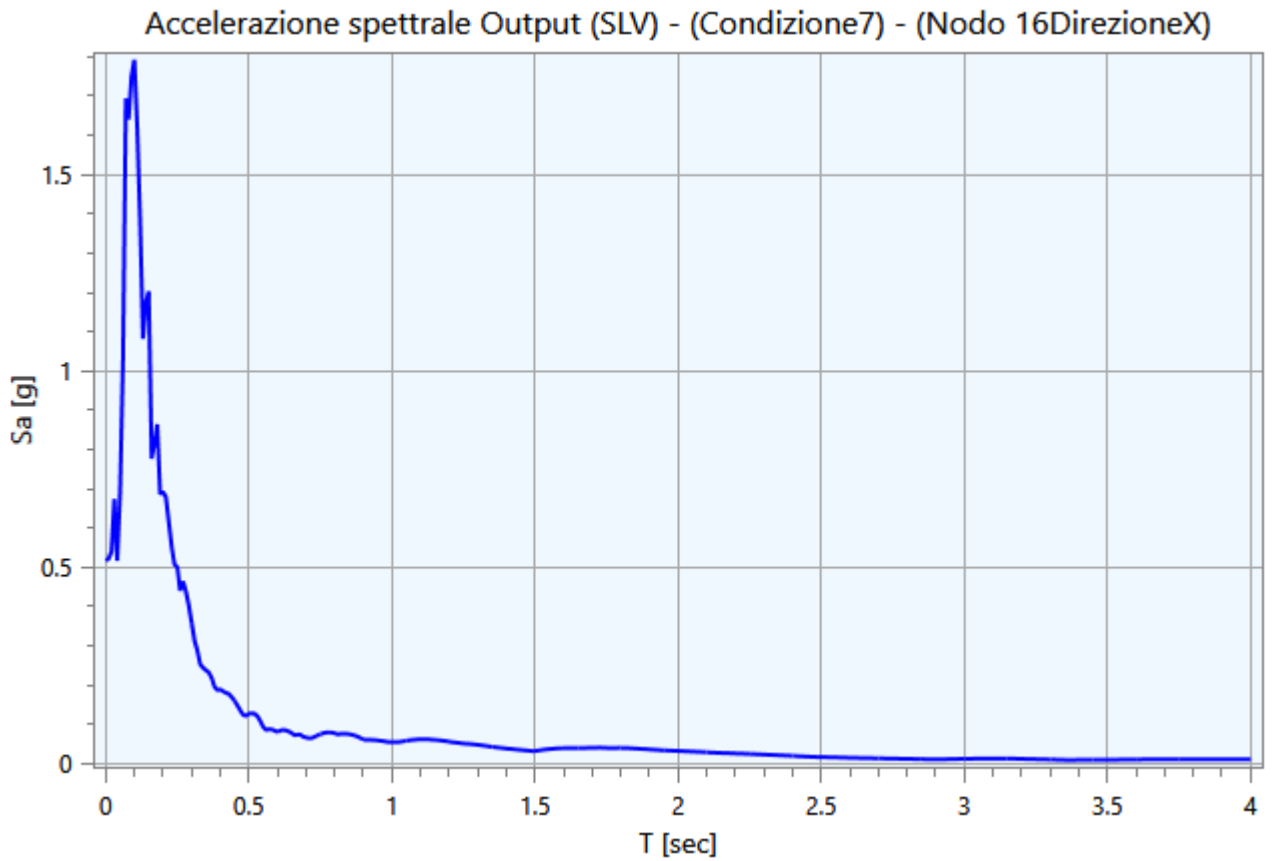


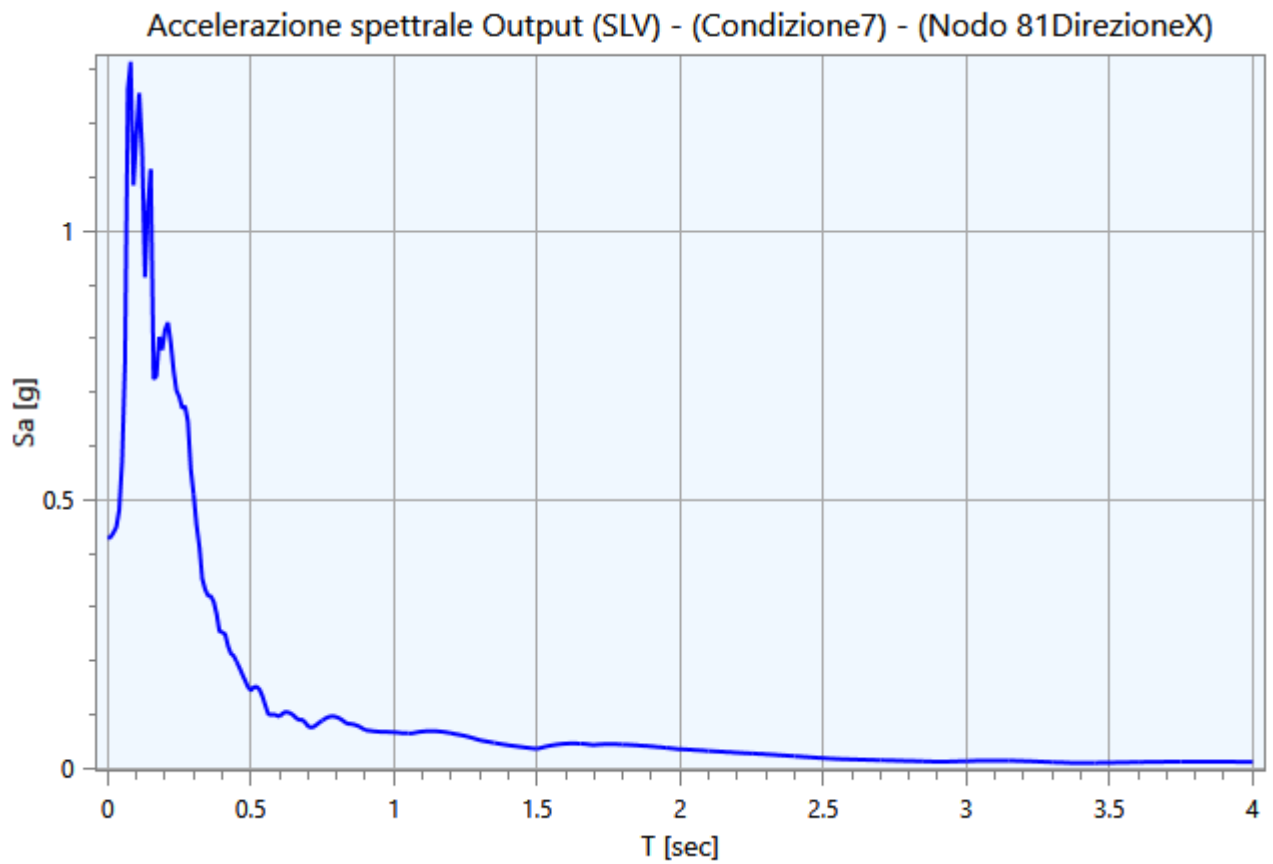
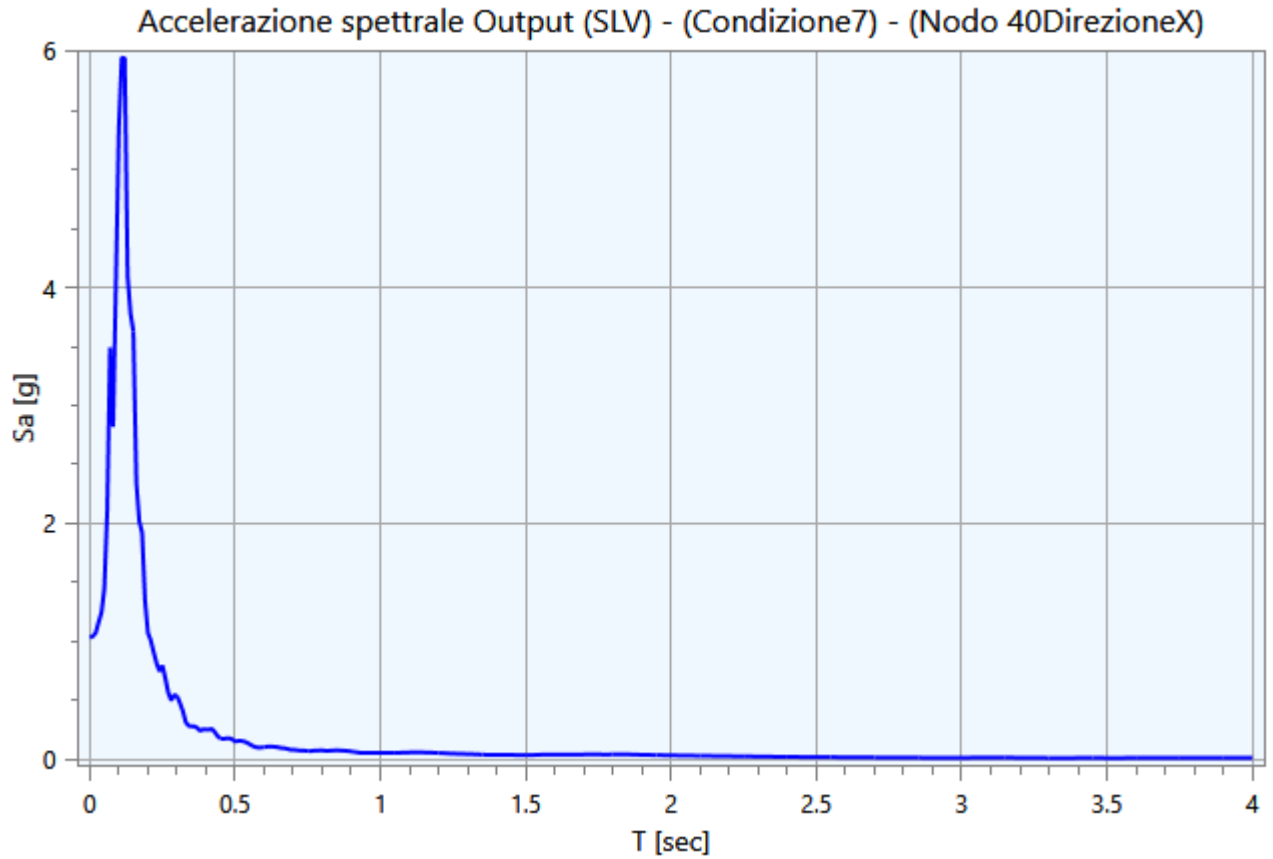


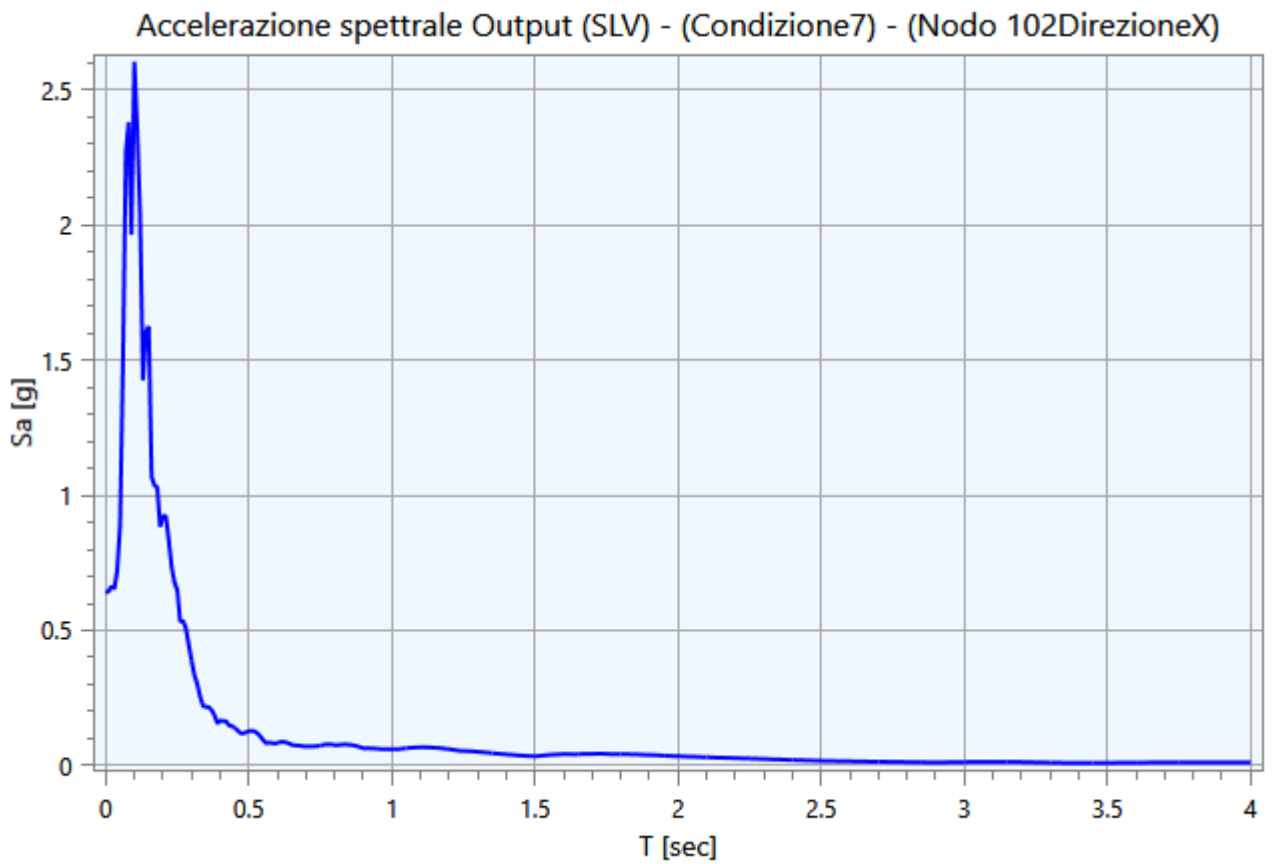
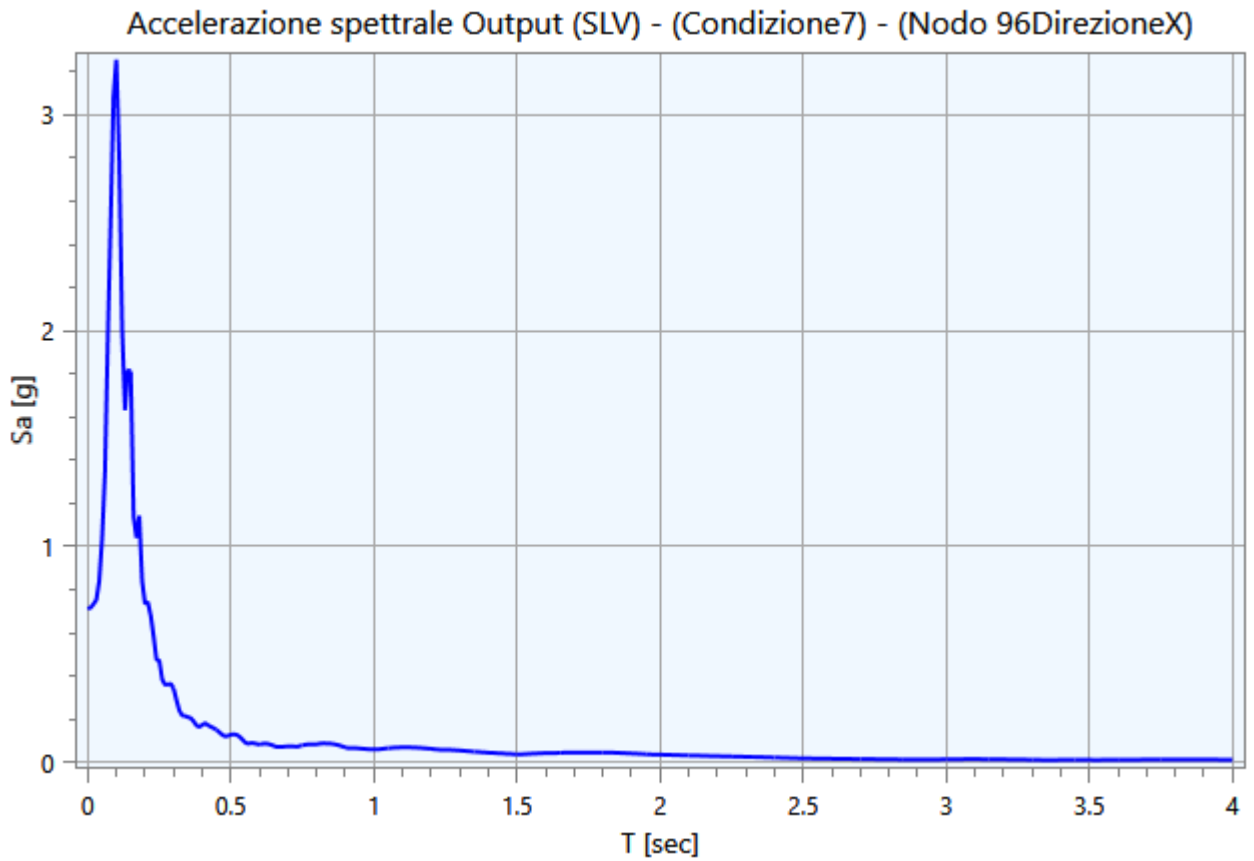




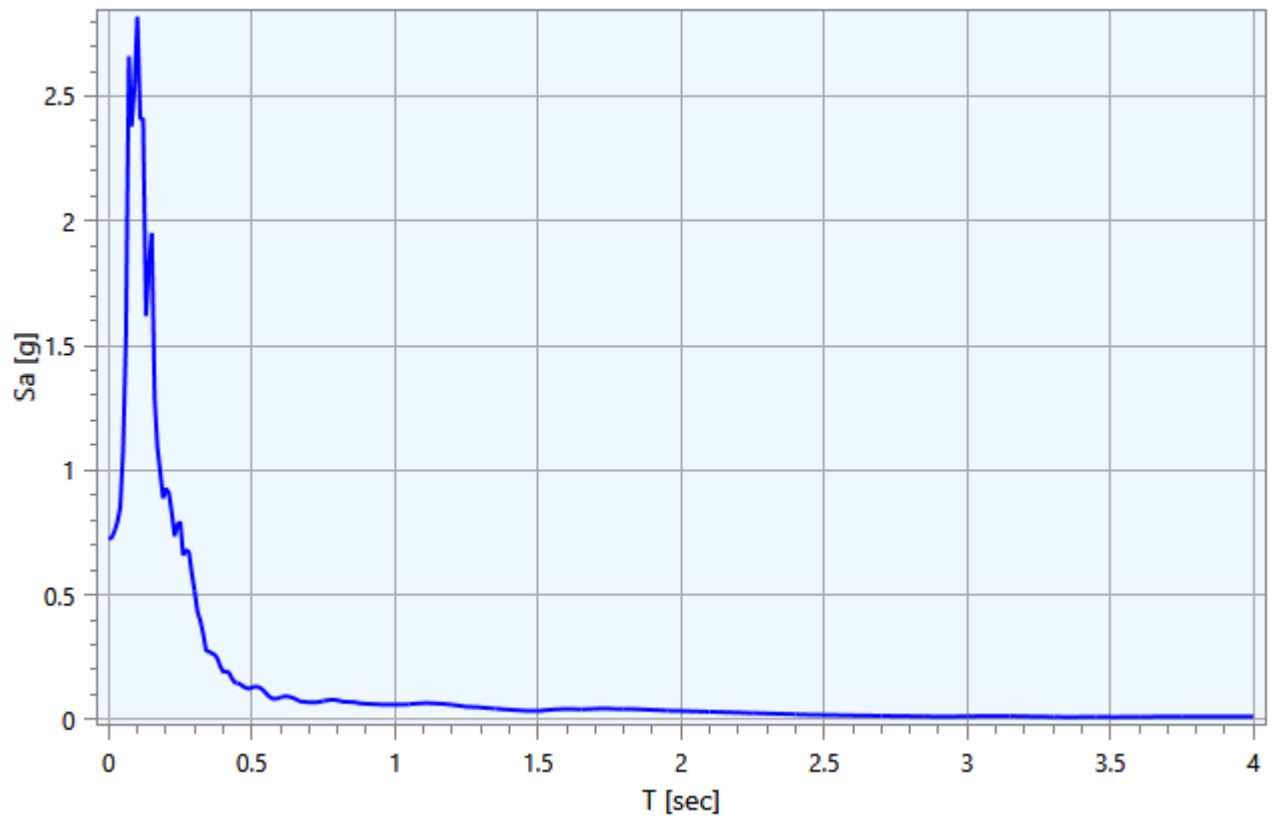




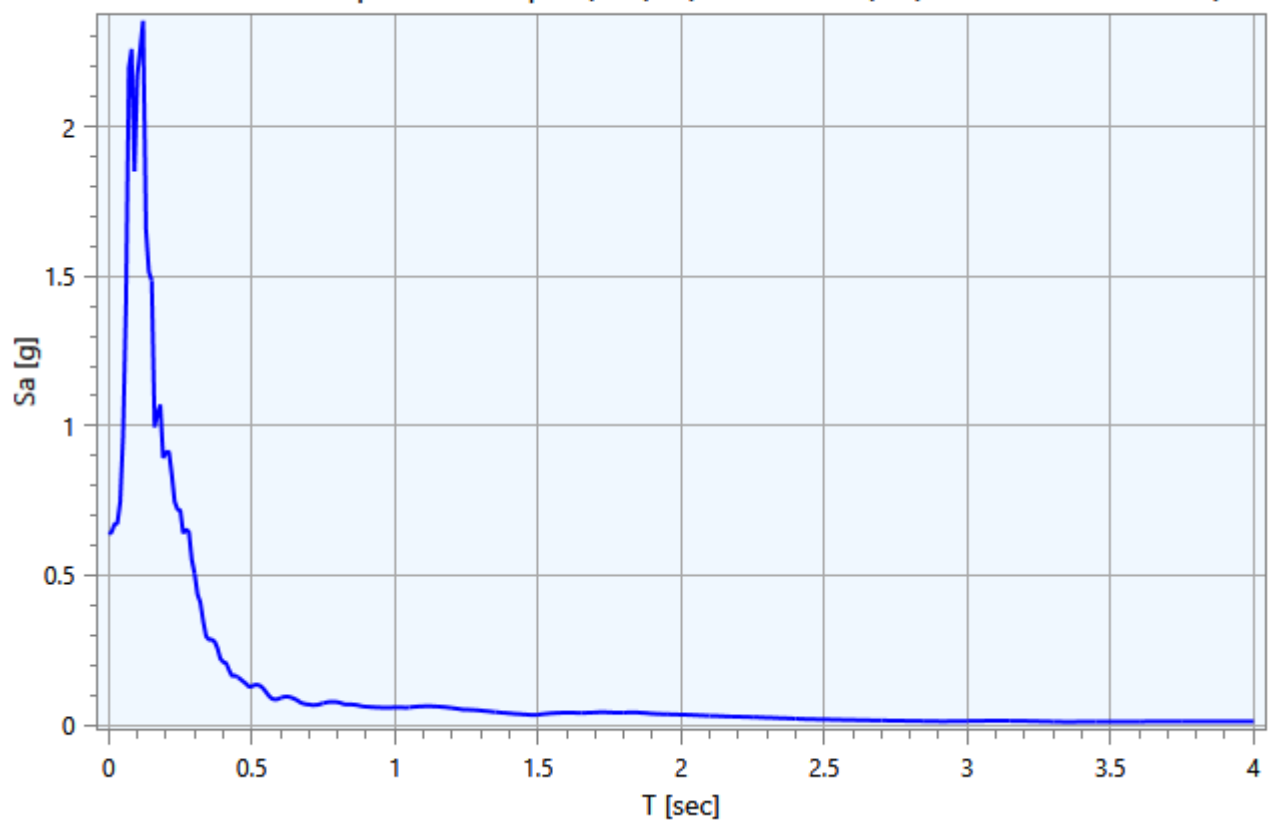




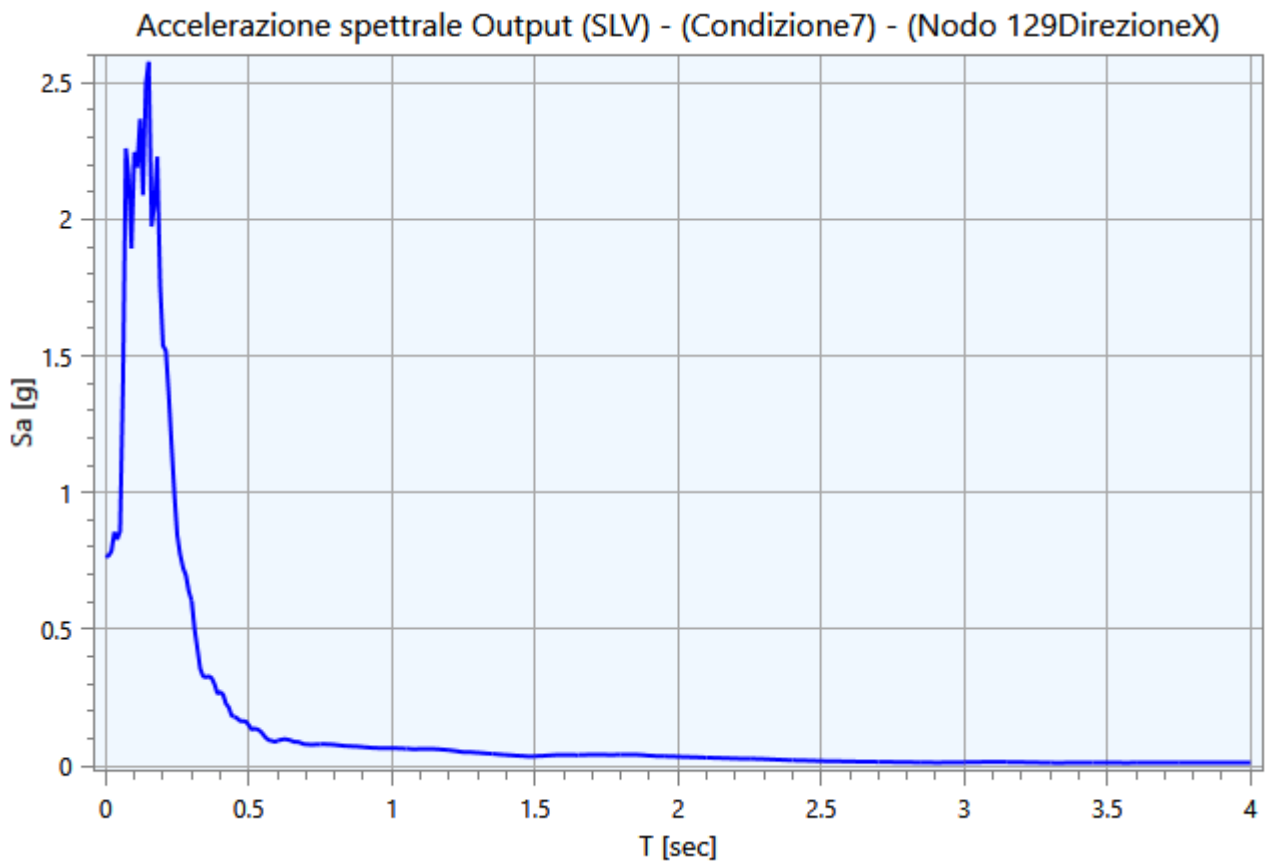
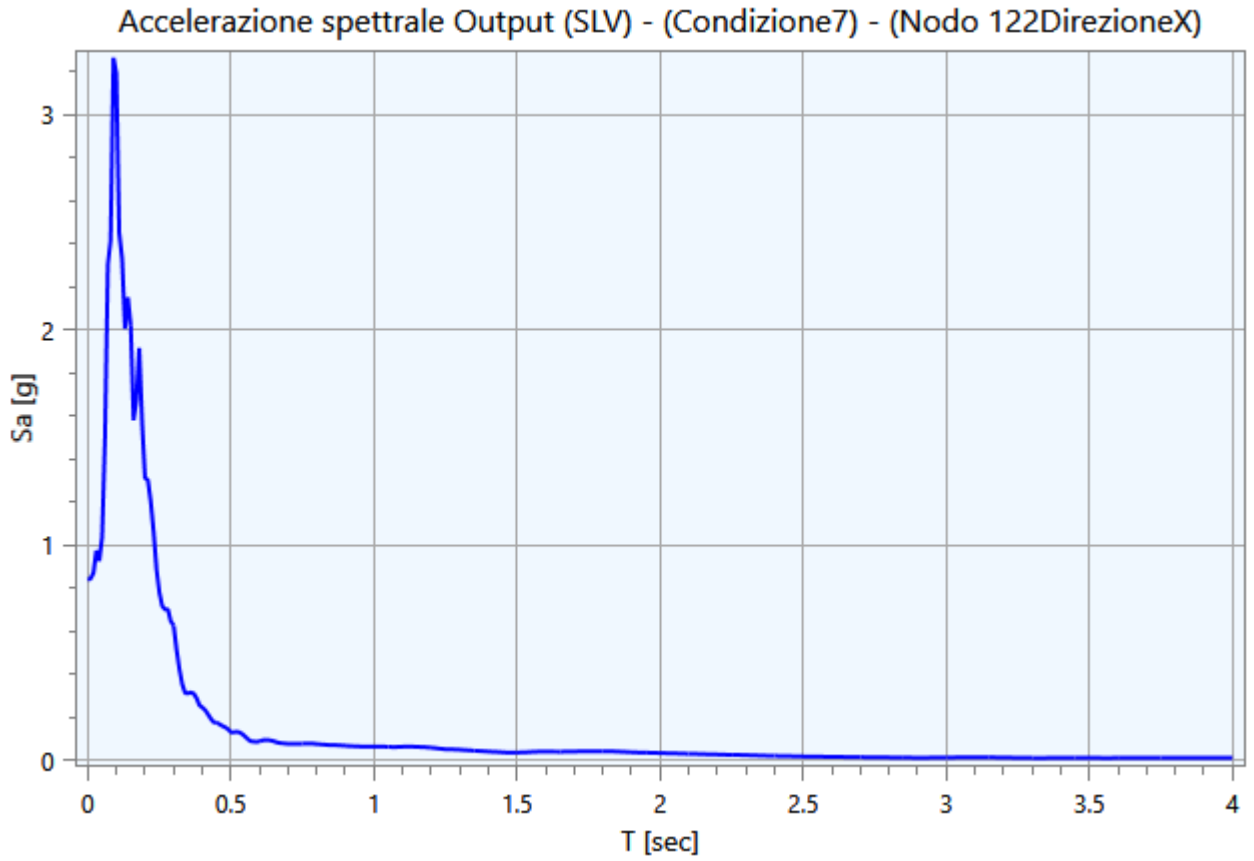
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione7) - (Nodo 109DirezioneX)



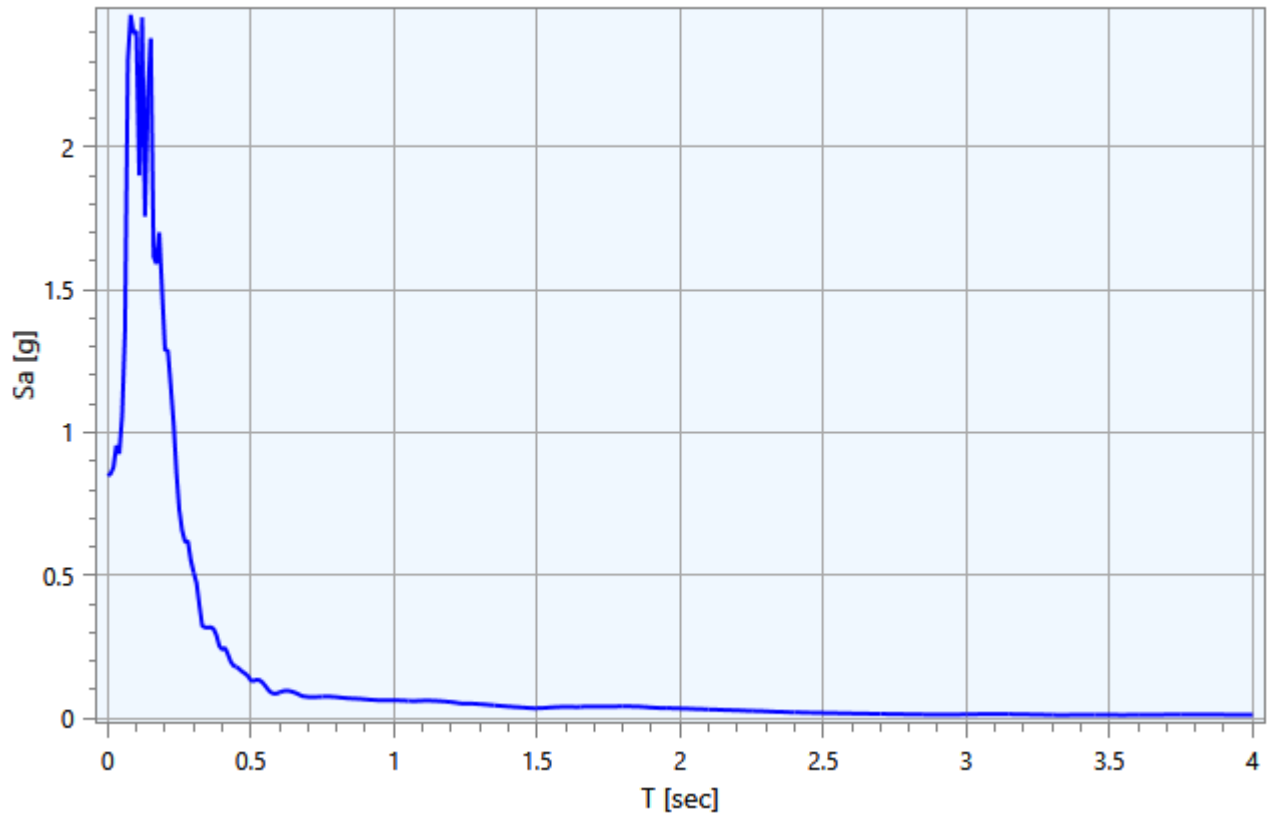
Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione7) - (Nodo 117DirezioneX)



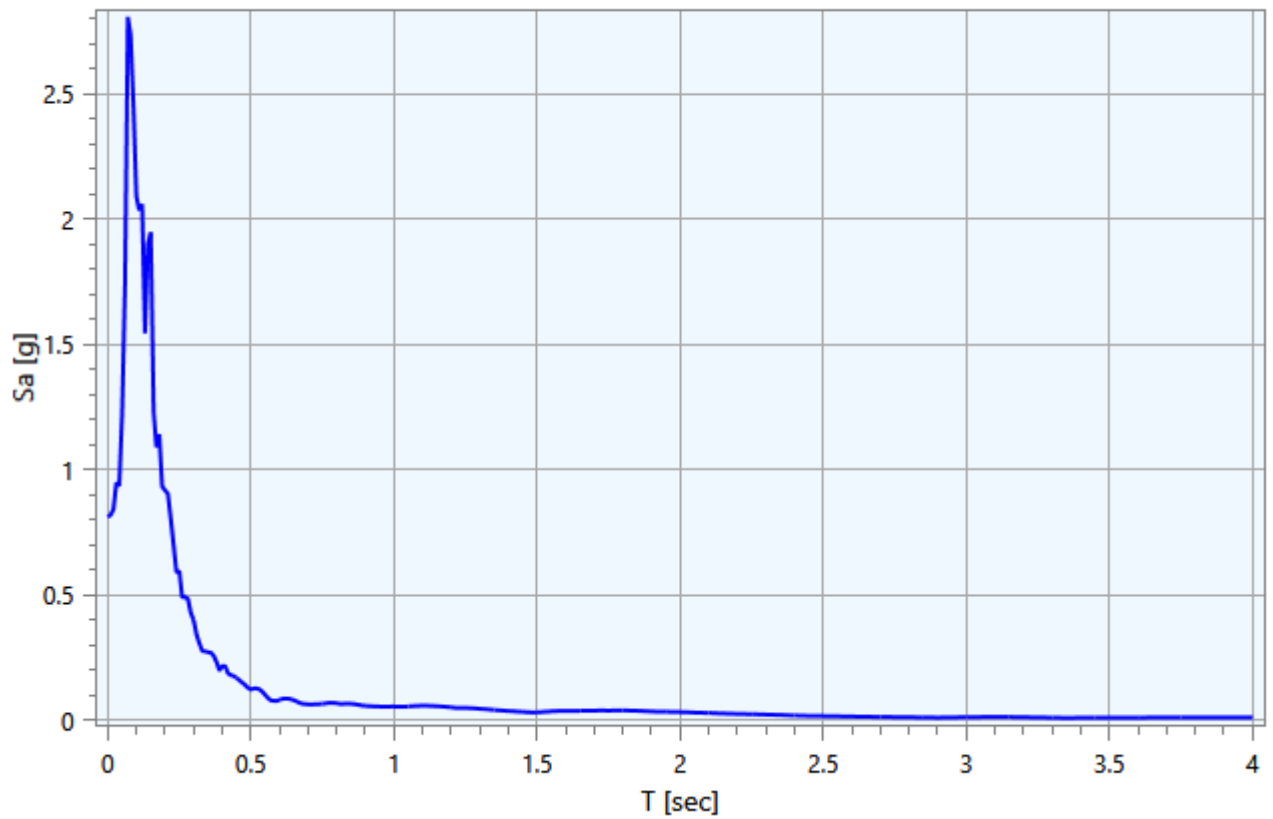




Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione7) - (Nodo 134DirezioneX)

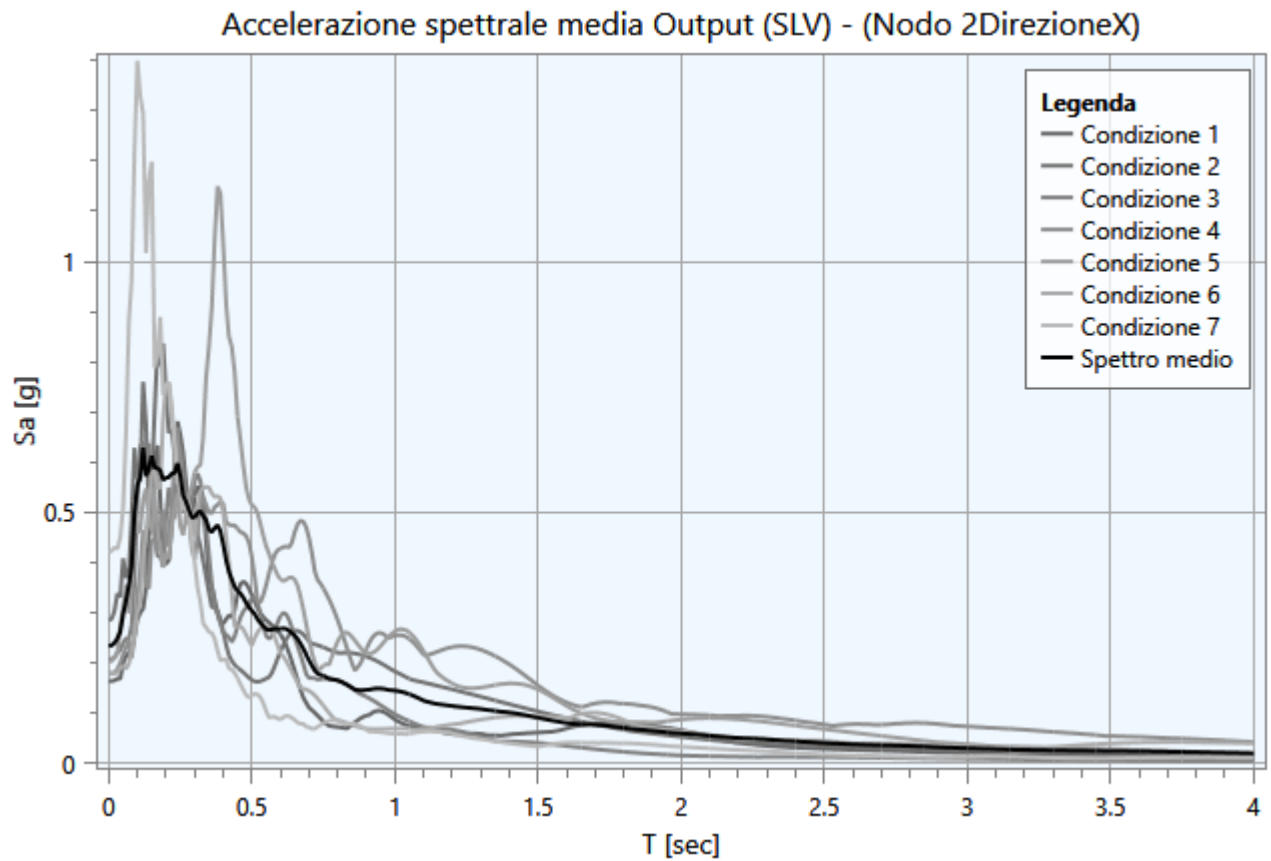


Accelerazione spettrale Output (SLV) - (Condizione7) - (Nodo 140DirezioneX)

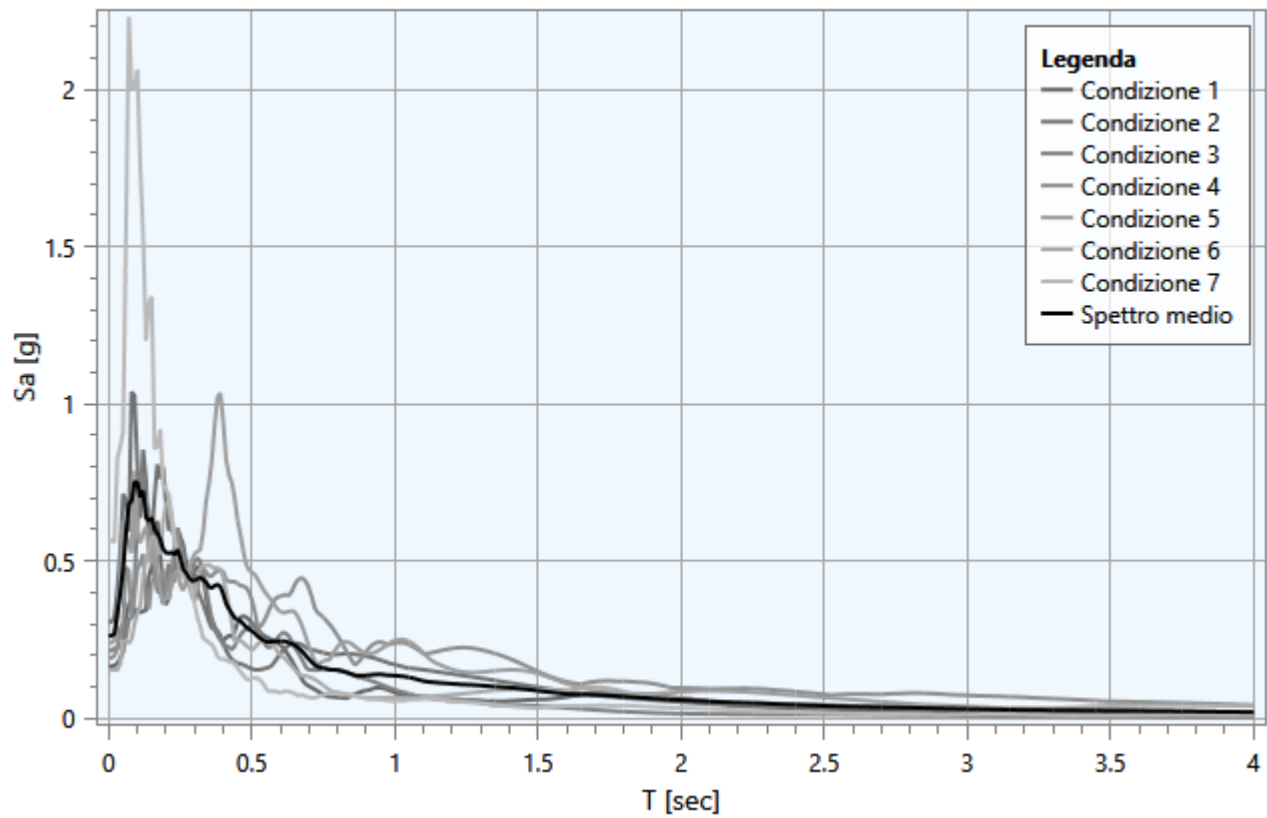


### 5.3 - Interpretazione dei risultati

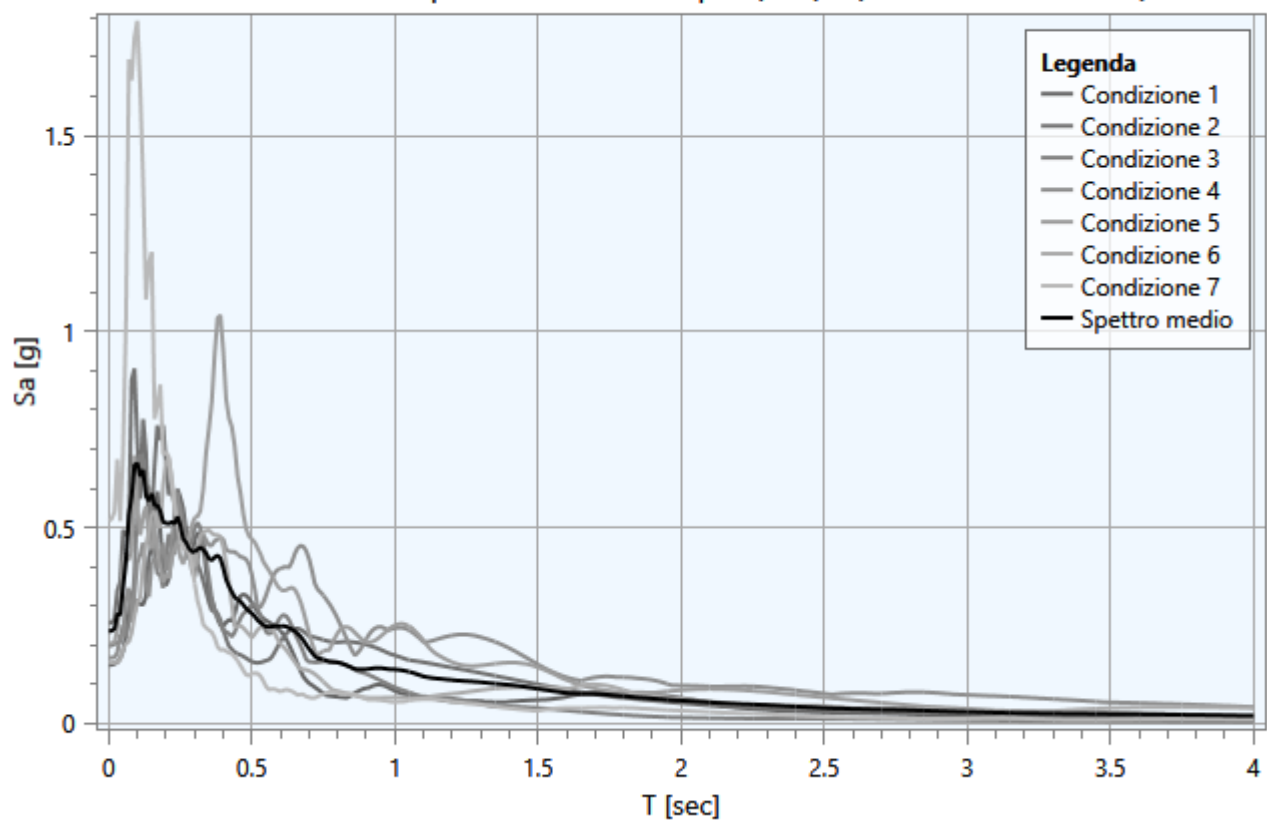
Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:



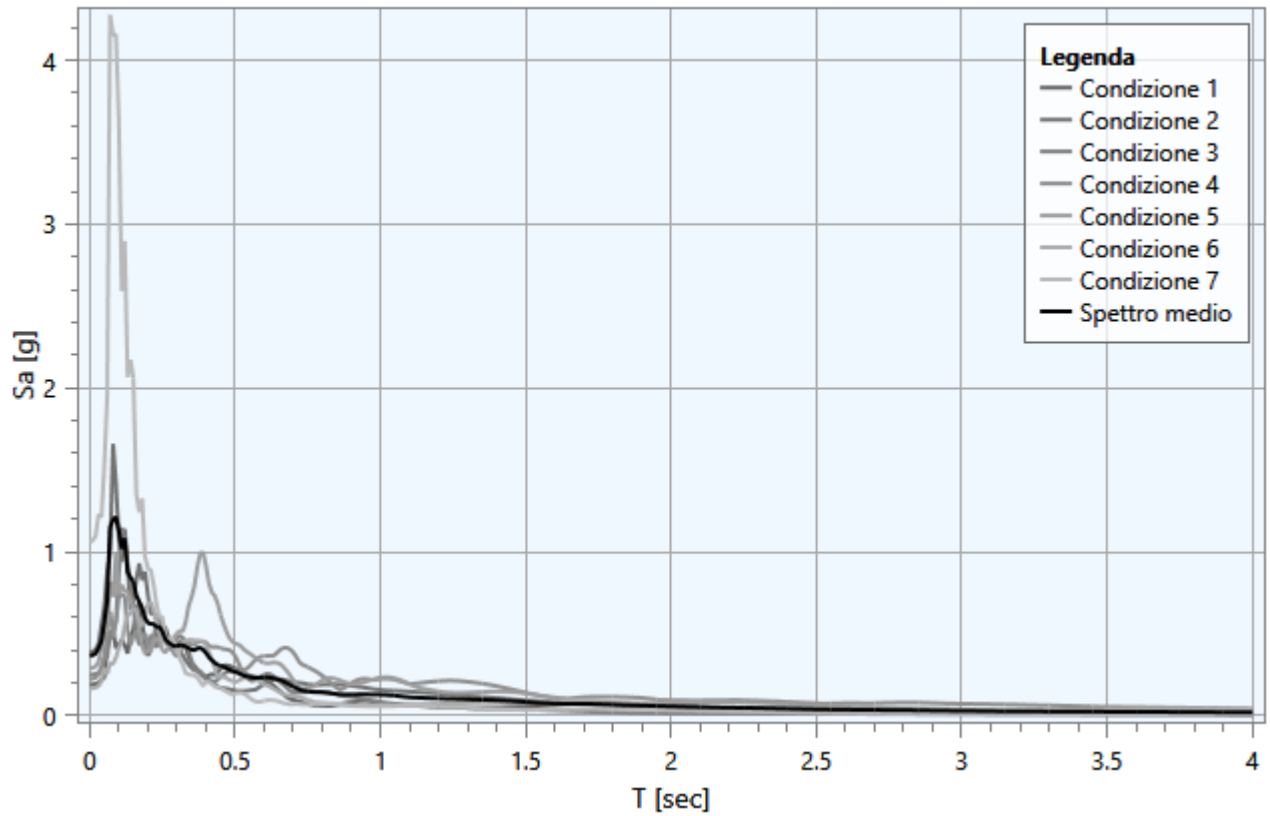
Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 15 Direzione X)



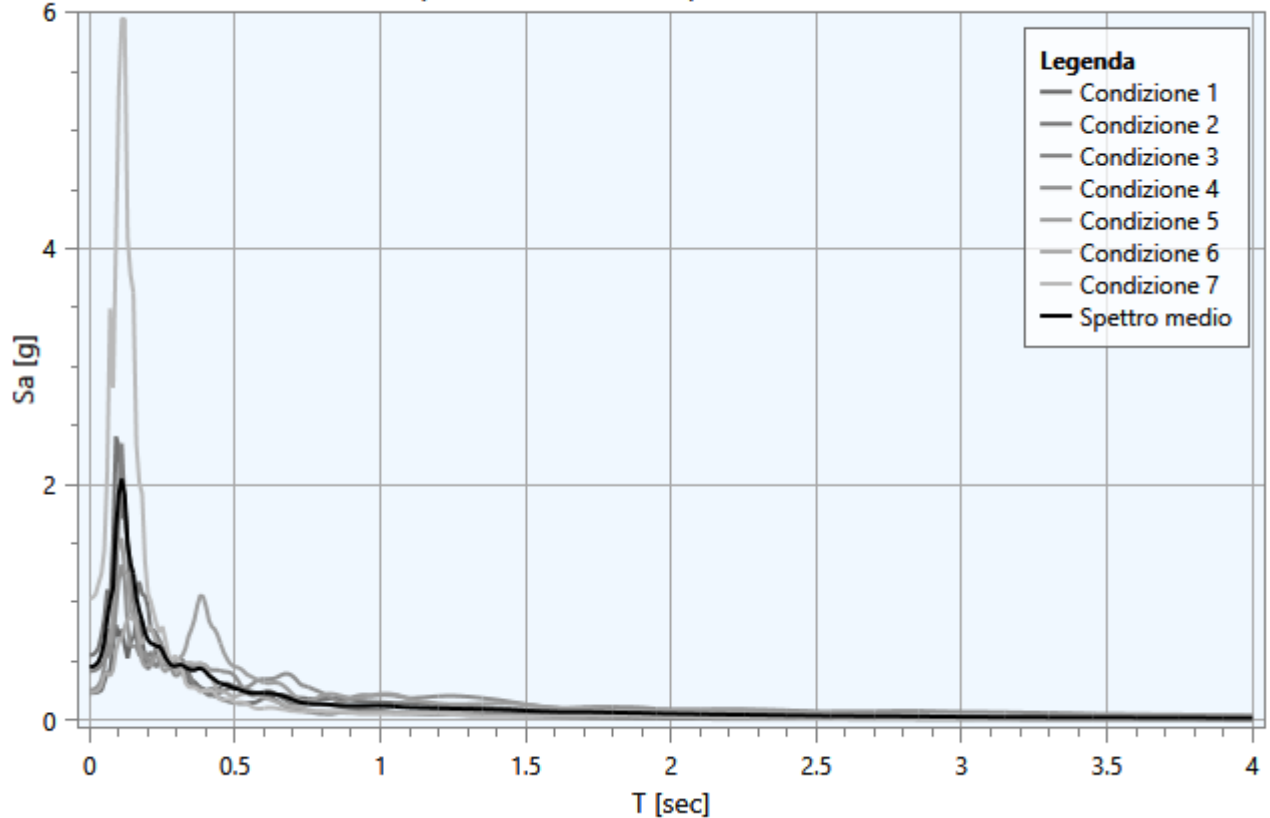
Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 16 Direzione X)



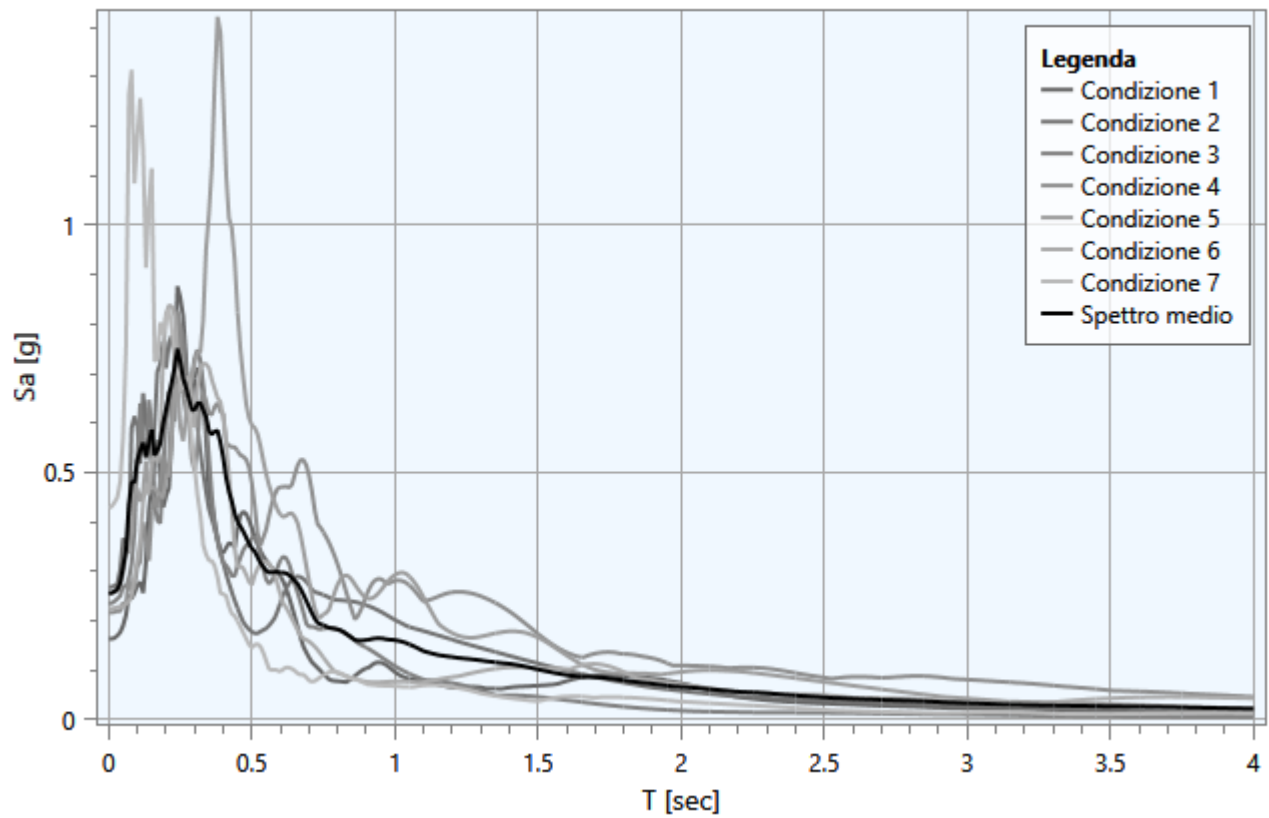
Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 34DirezioneX)



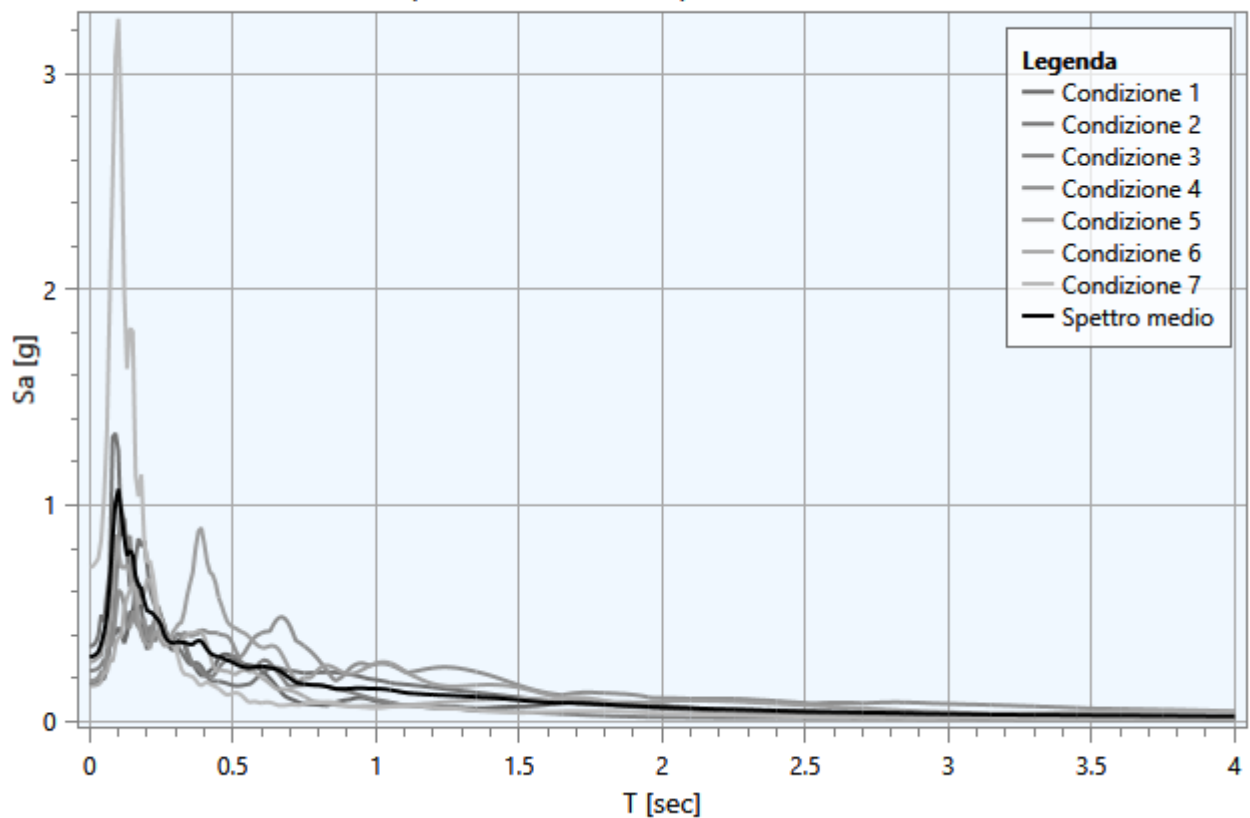
Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 40DirezioneX)



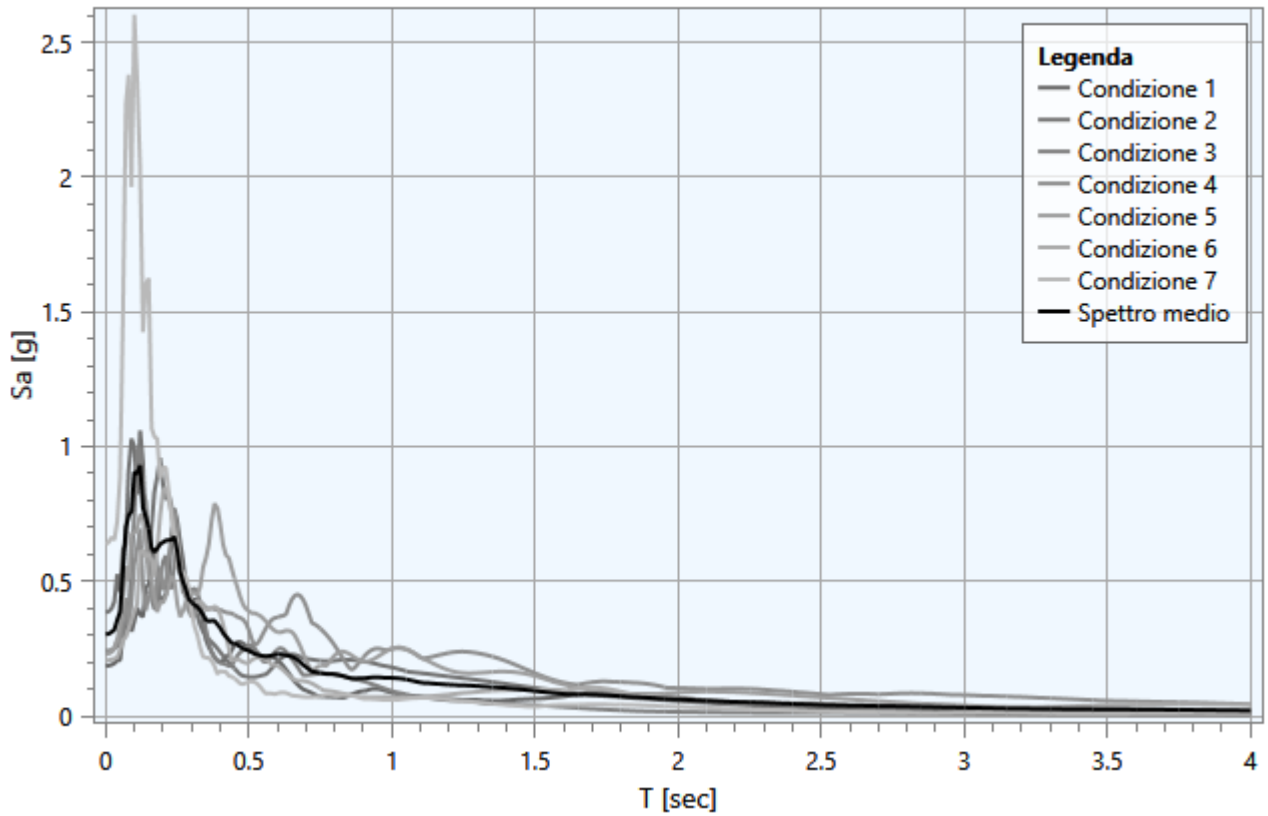
Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 81DirezioneX)



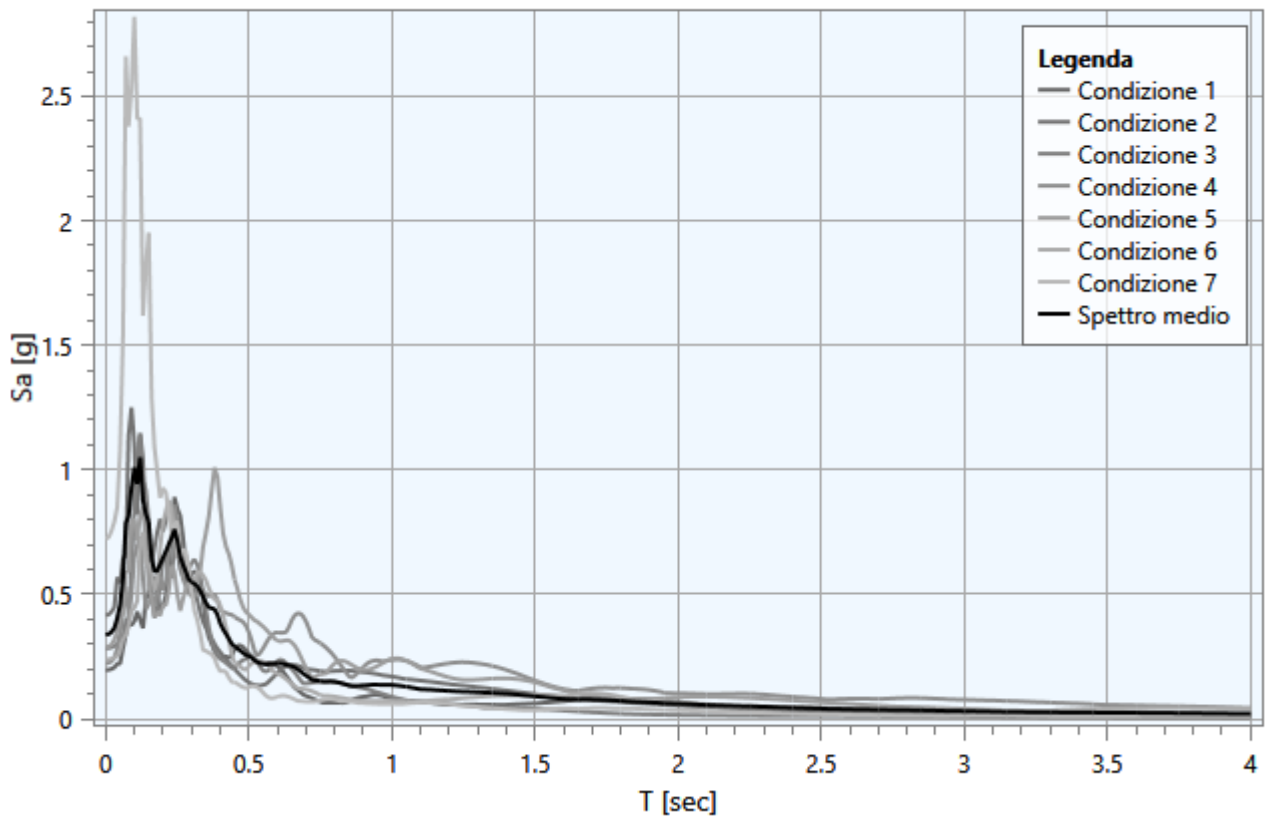
Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 96DirezioneX)



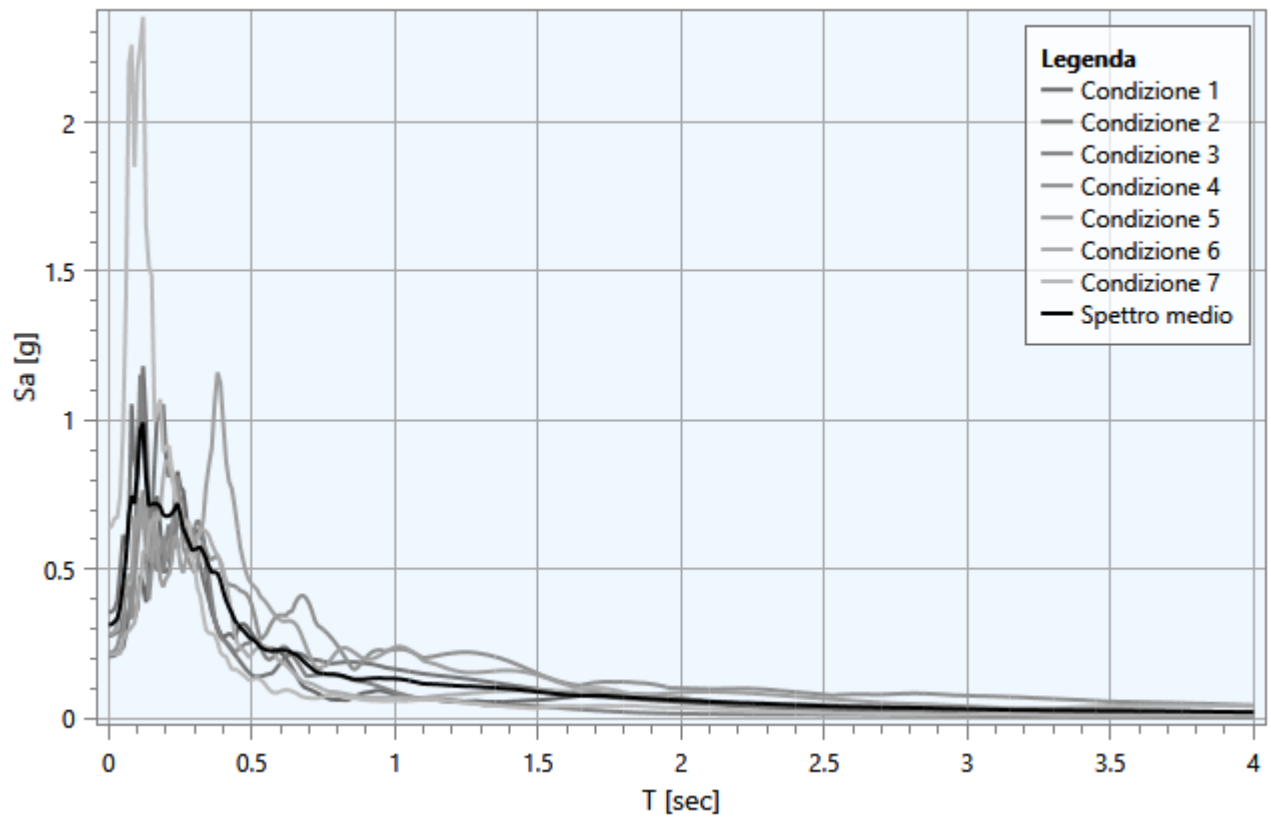
Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 102DirezioneX)



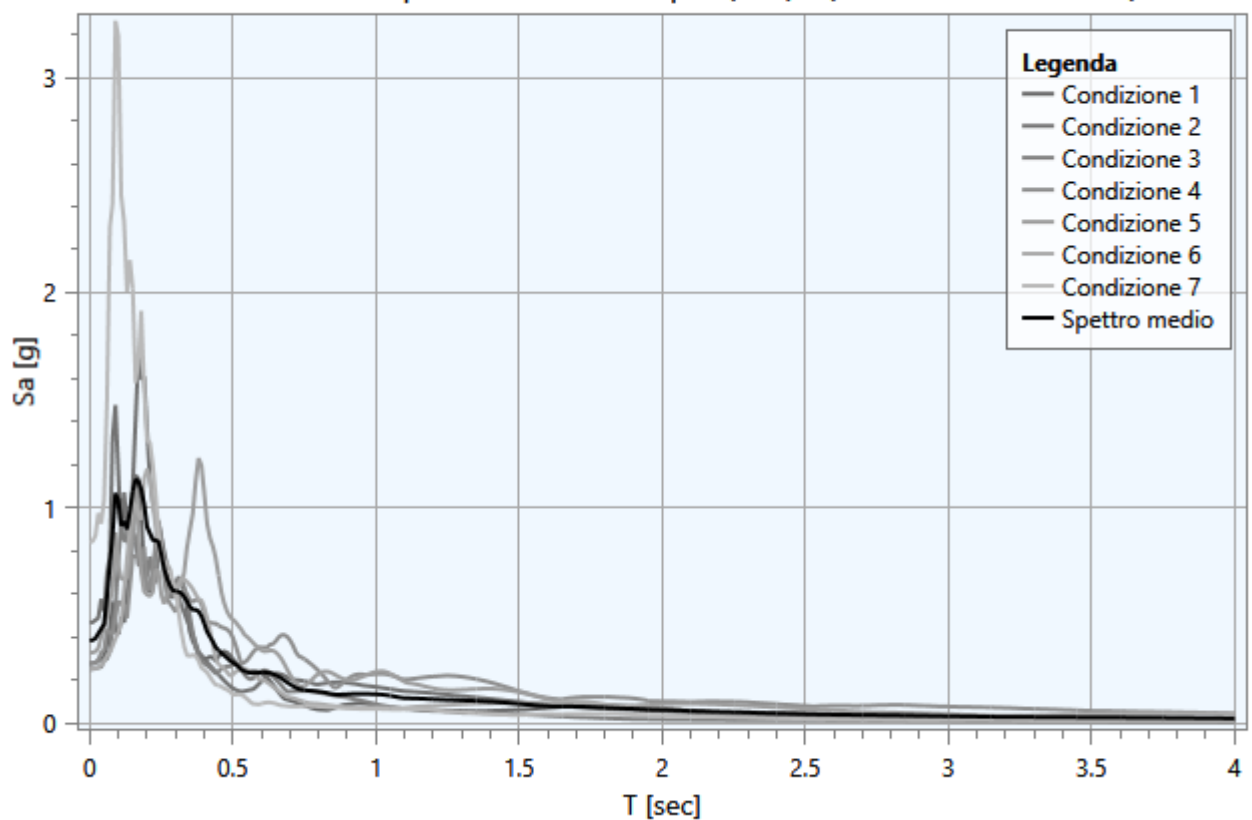
Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 109DirezioneX)



Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 117DirezioneX)

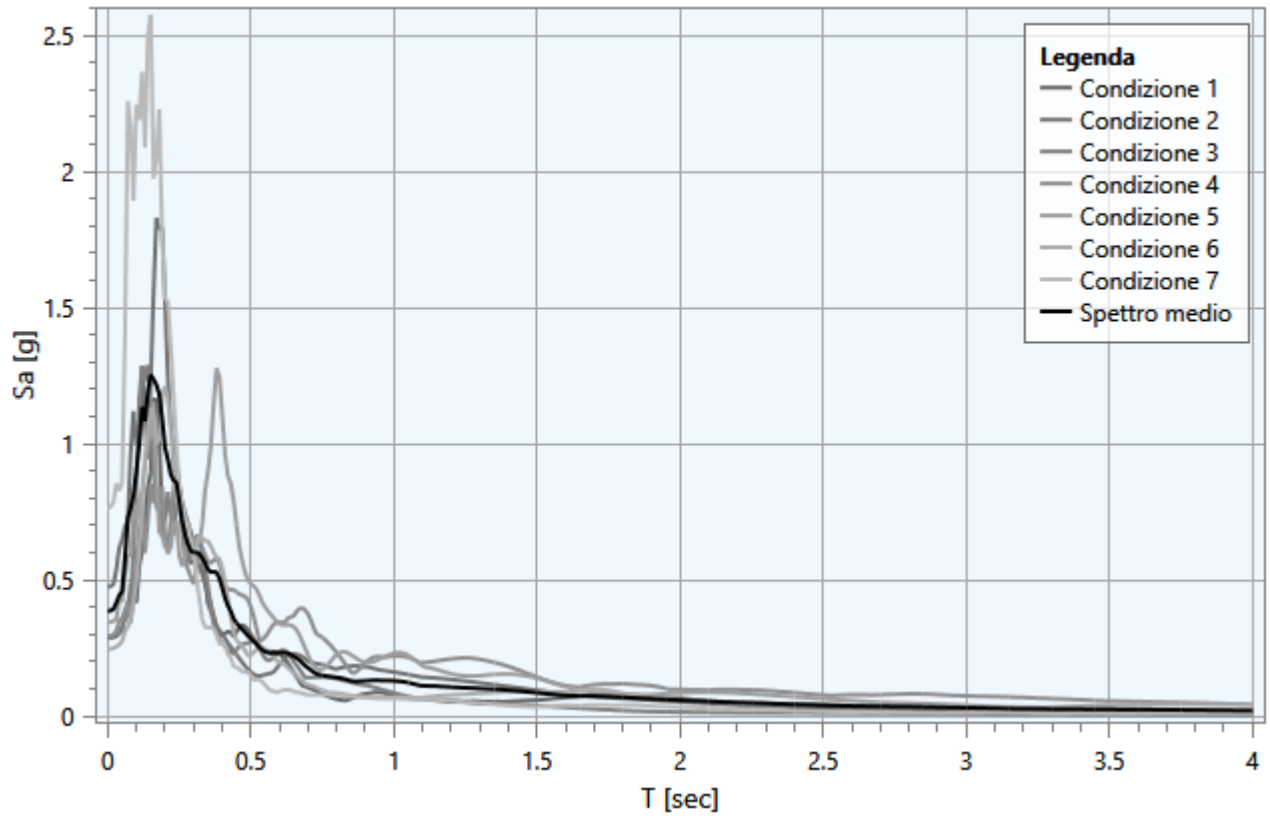


Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 122DirezioneX)

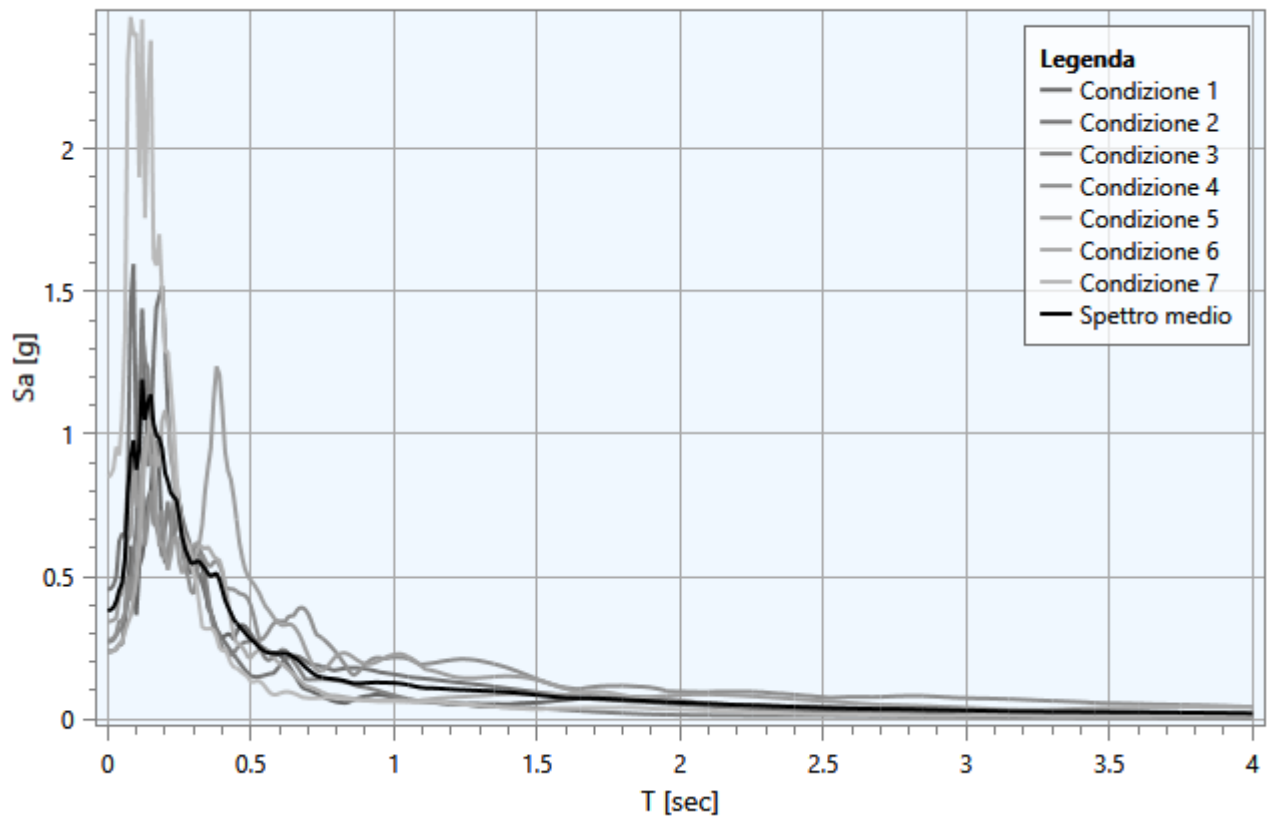


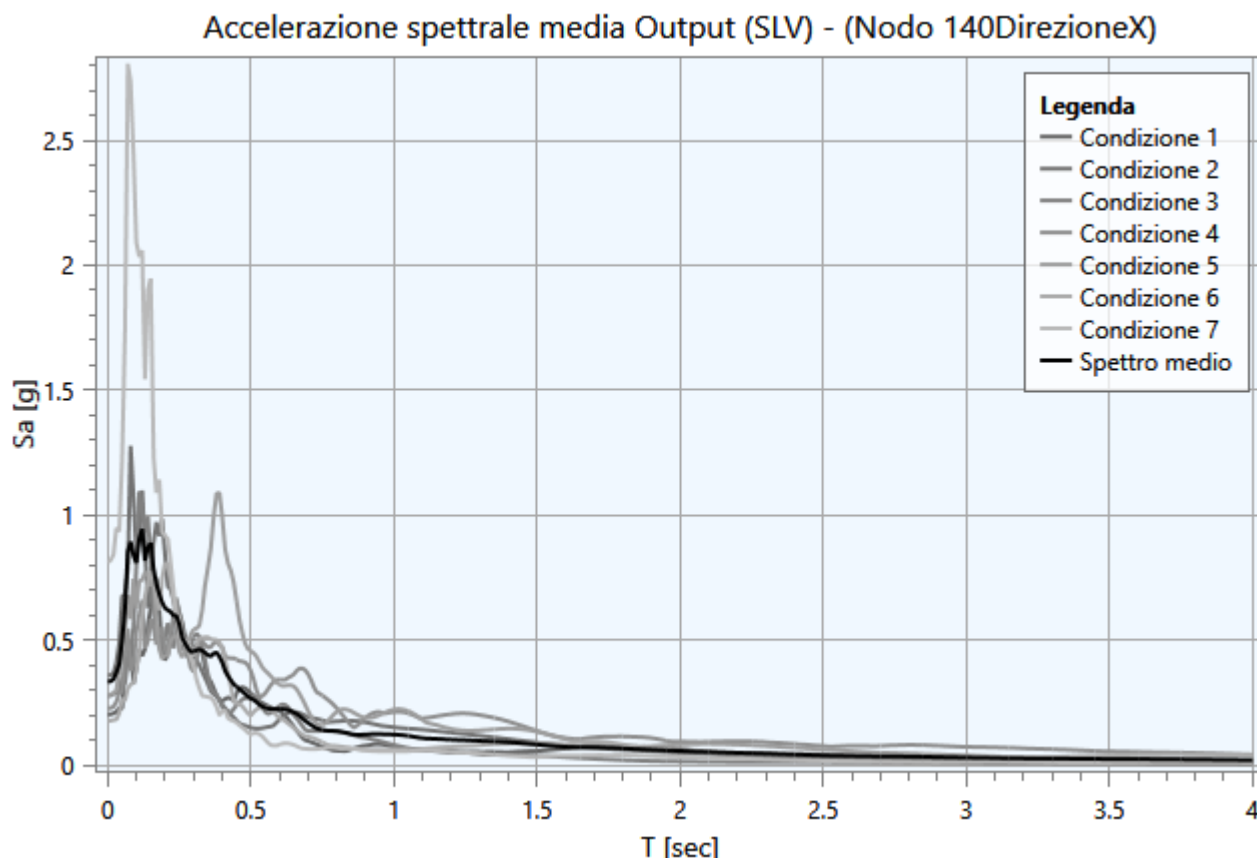


Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 129DirezioneX)



Accelerazione spettrale media Output (SLV) - (Nodo 134DirezioneX)





## 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.

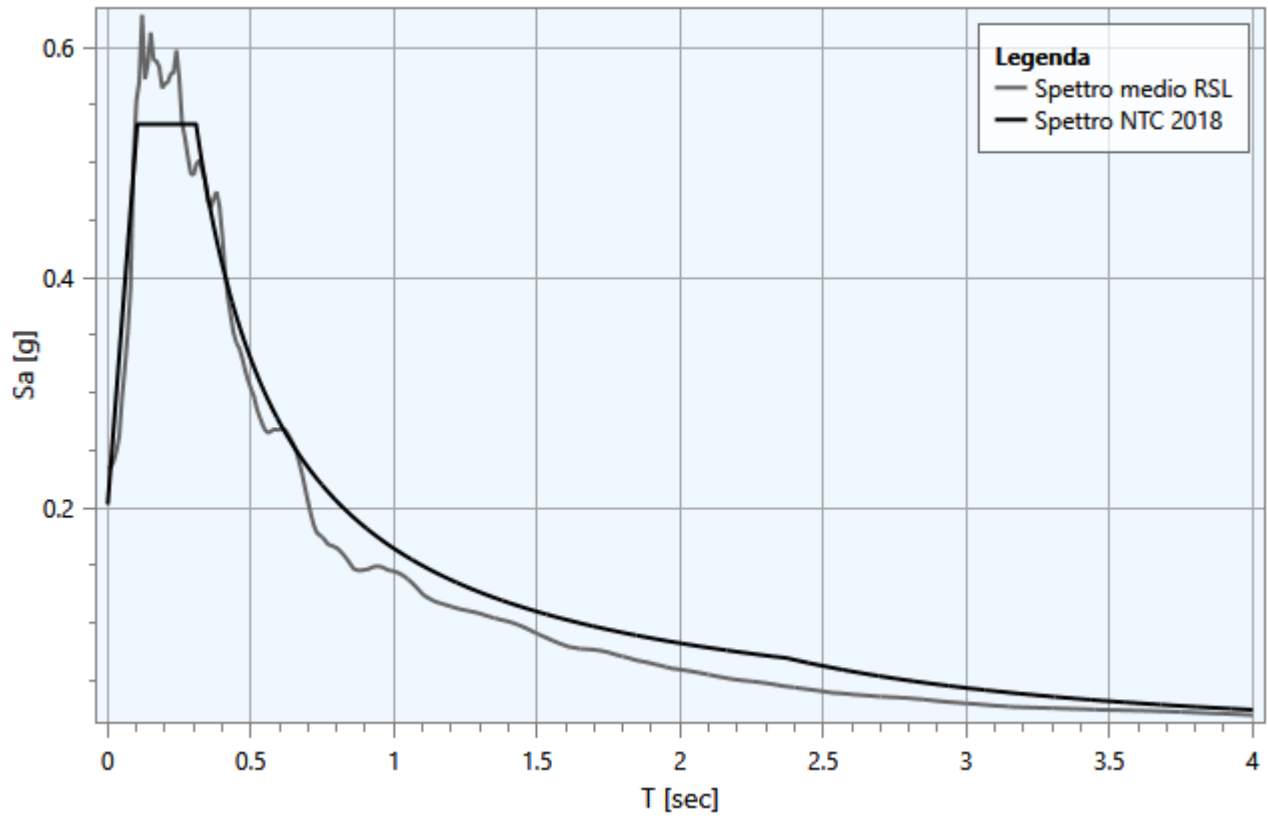
## SLV

<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 (2)	0.193	2.630	1.051	0.203	0.103	0.309	2.372
P (15)	0.193	3.311	1.042	0.201	0.074	0.223	2.372
P (16)	0.193	2.979	0.999	0.193	0.087	0.260	2.372
P (34)	0.193	4.772	1.077	0.208	0.048	0.145	2.372
P (40)	0.193	6.865	1.071	0.207	0.048	0.145	2.372
P (81)	0.193	2.858	1.133	0.219	0.108	0.324	2.372
P (96)	0.193	4.085	1.019	0.197	0.059	0.177	2.372
P (102)	0.193	3.359	1.153	0.222	0.063	0.189	2.372
P (109)	0.193	3.232	1.316	0.254	0.065	0.195	2.372
P (117)	0.193	3.150	1.266	0.244	0.074	0.221	2.372
P (122)	0.193	3.543	1.429	0.276	0.064	0.193	2.372
P (129)	0.193	3.935	1.377	0.266	0.064	0.192	2.372
P (134)	0.193	3.762	1.354	0.261	0.059	0.178	2.372
P (140)	0.193	3.475	1.242	0.240	0.062	0.185	2.372

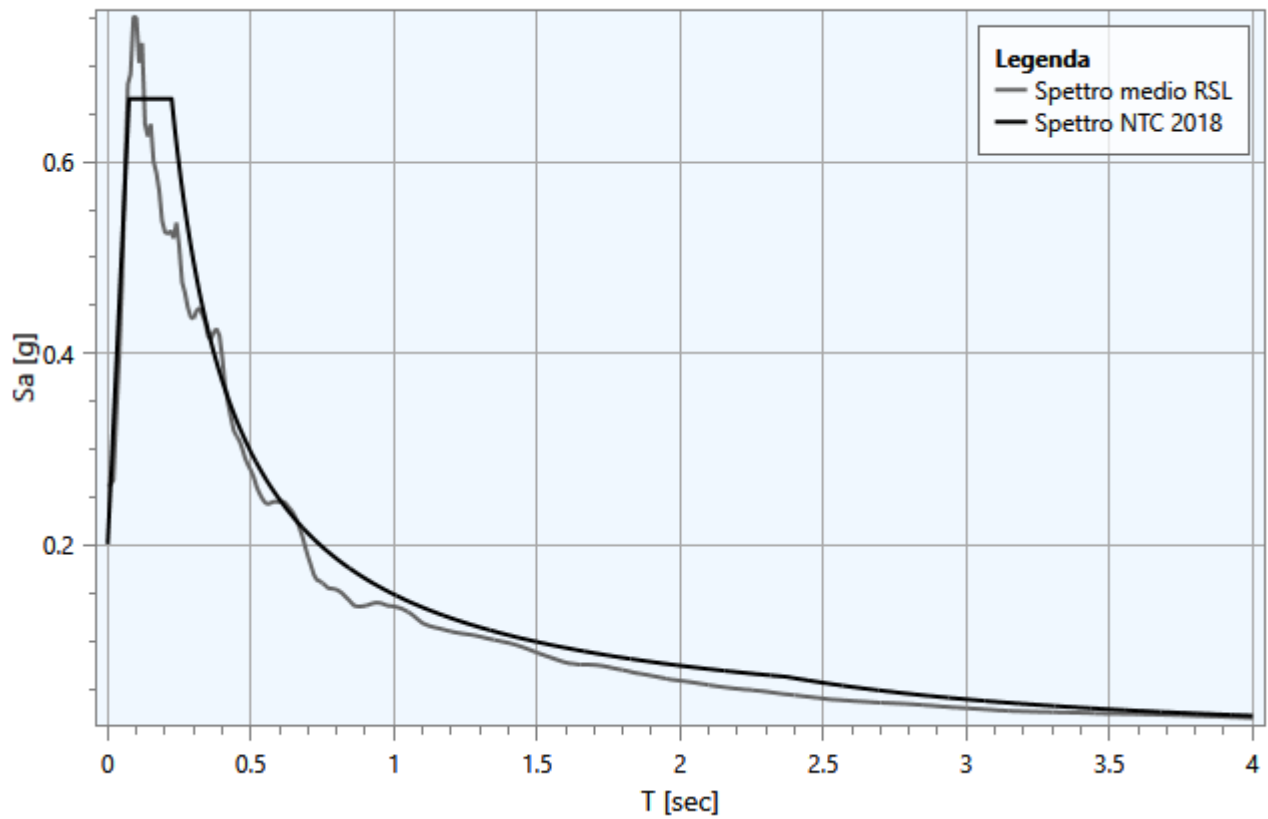
dove:

- $A_g$  : 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.

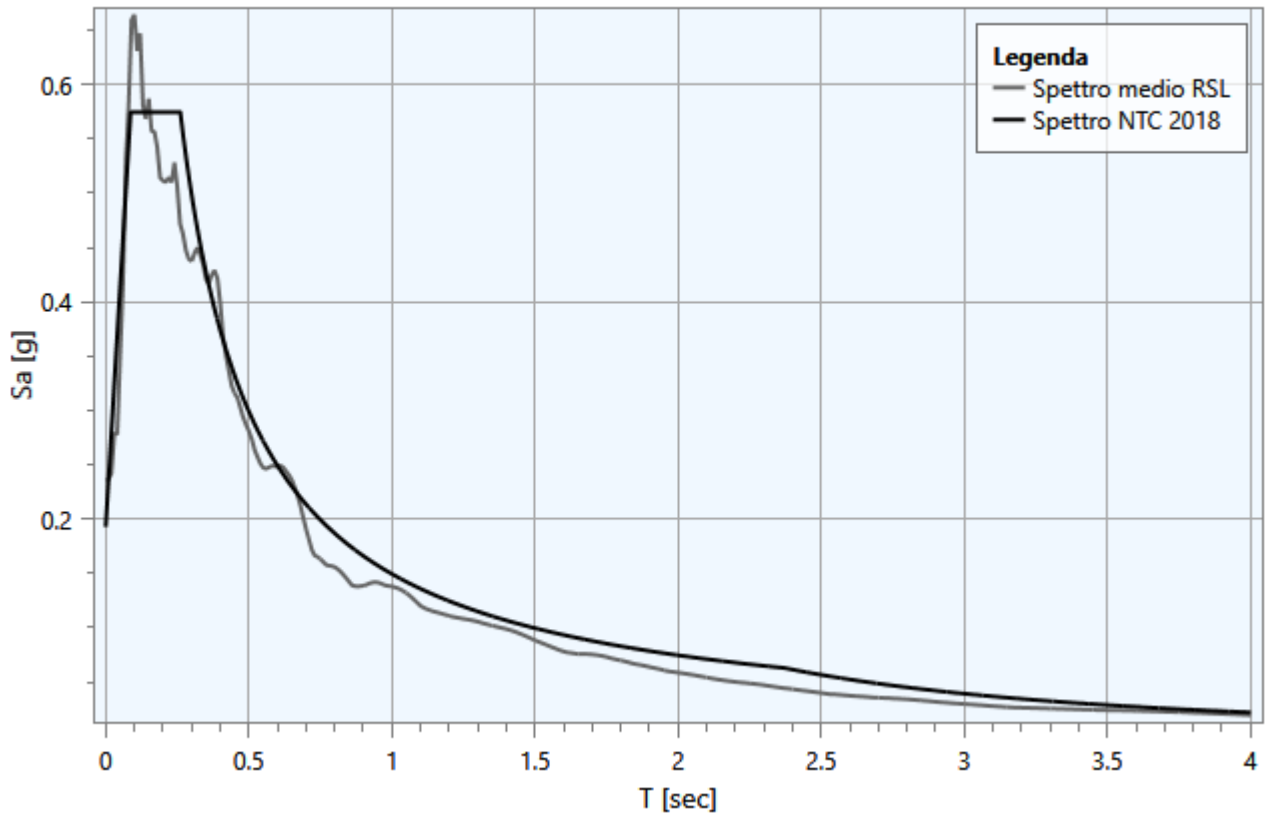
Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (2))



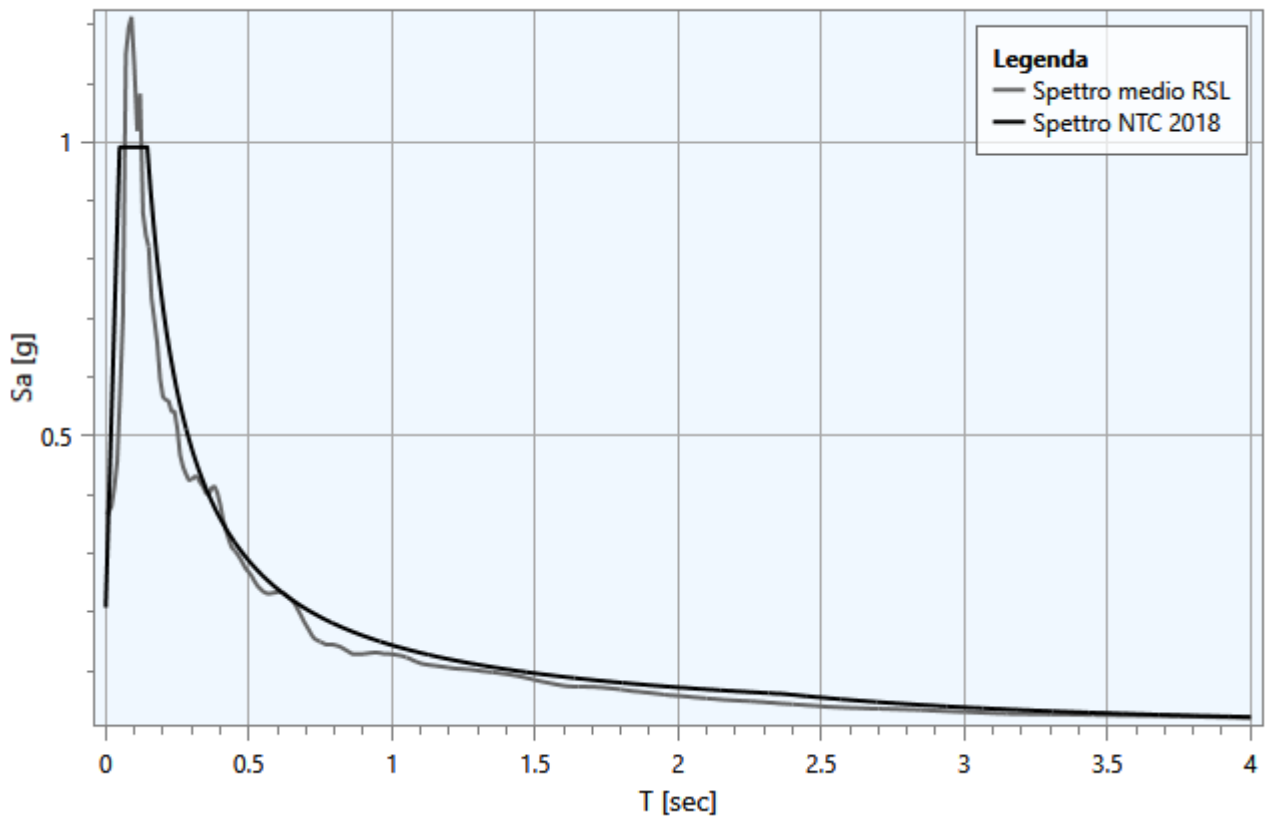
Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (15))



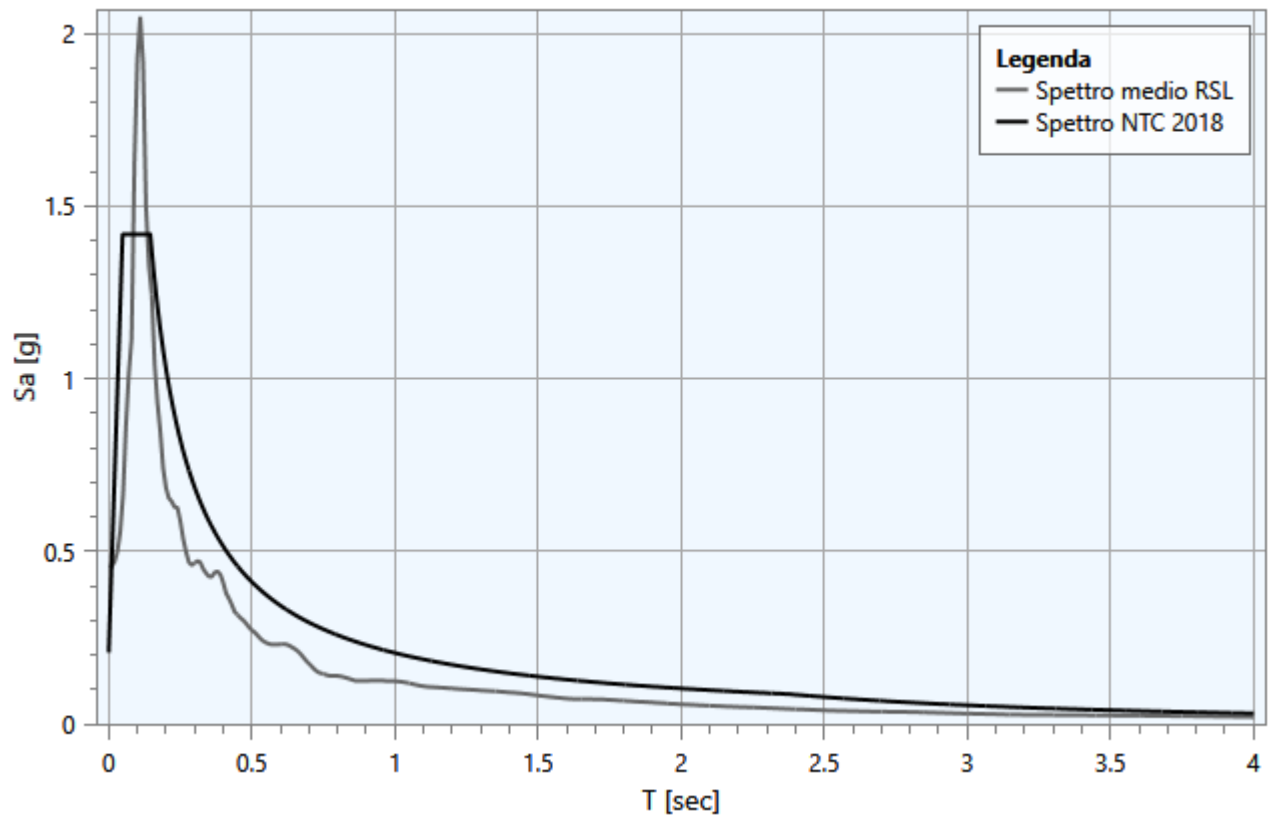
Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (16))



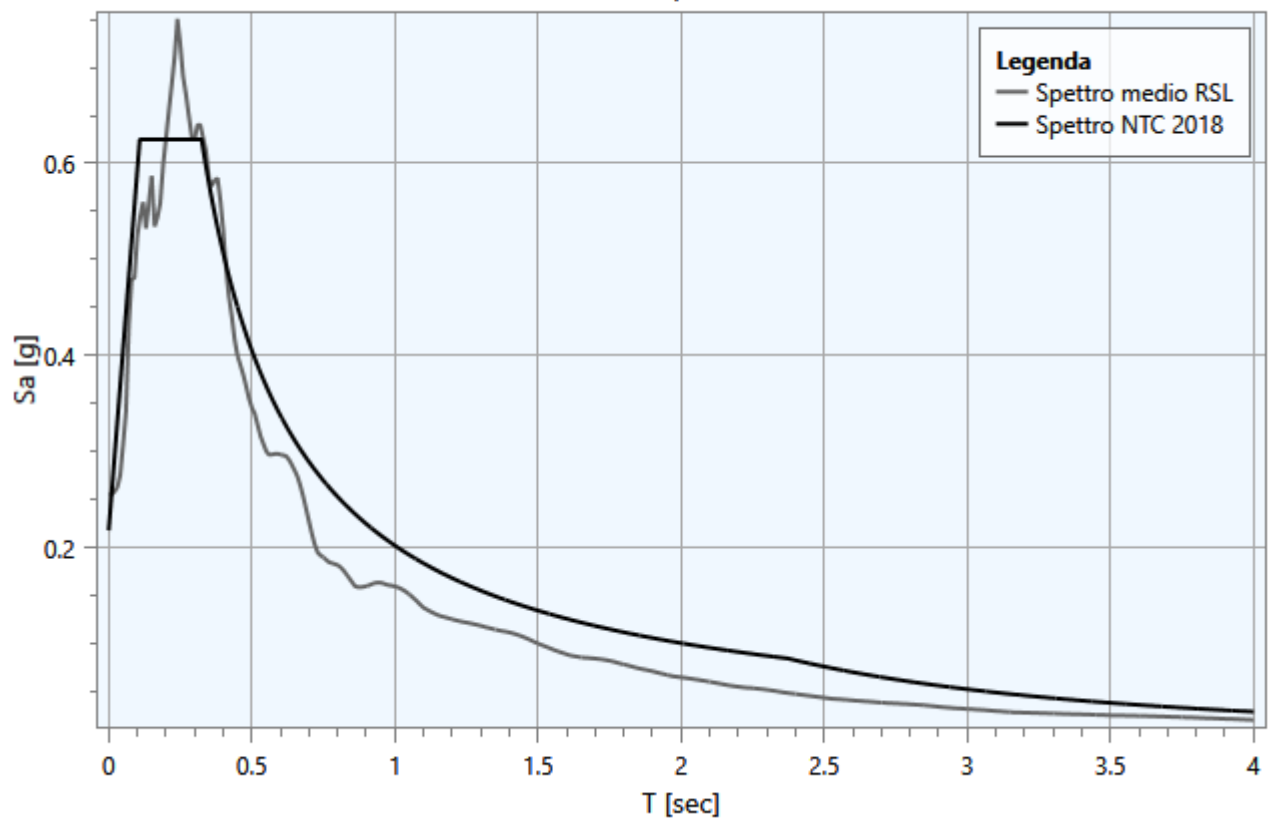
Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (34))



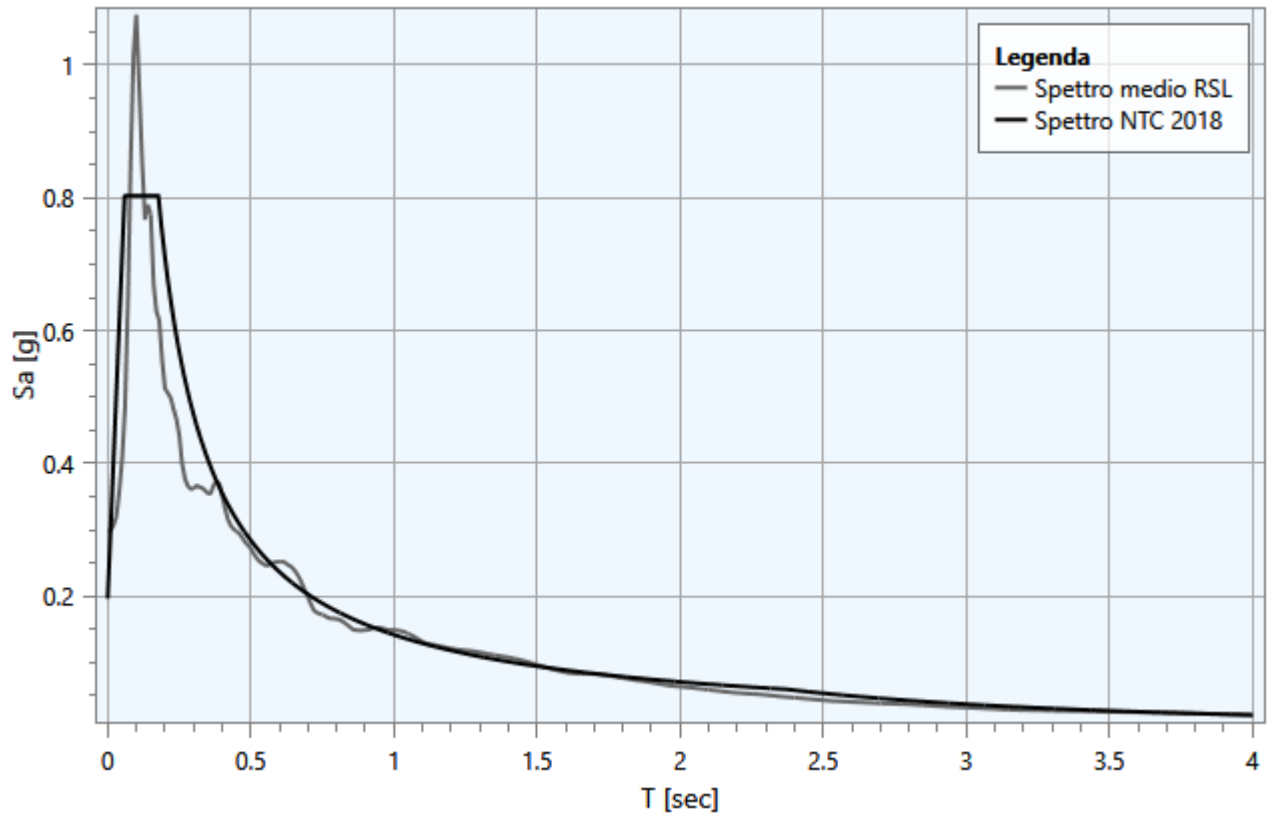
Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (40))



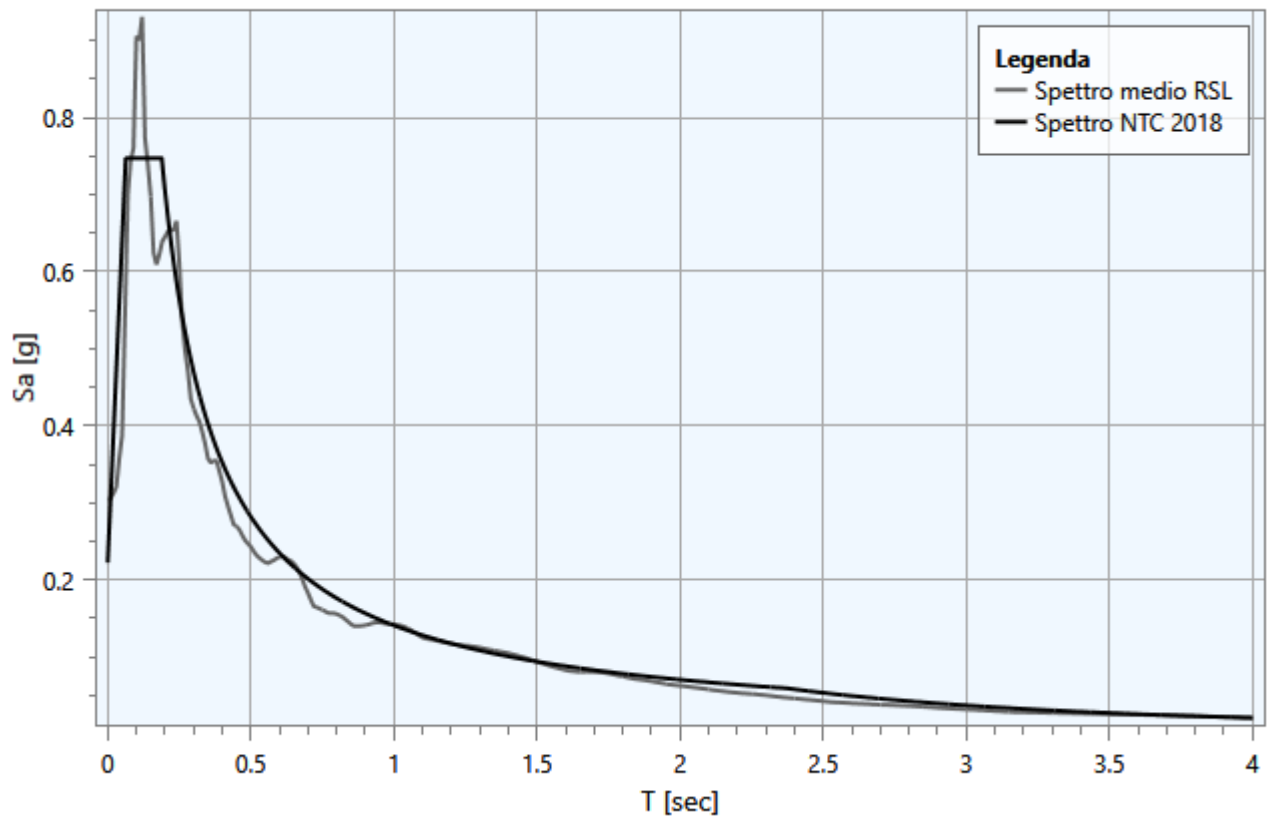
Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (81))



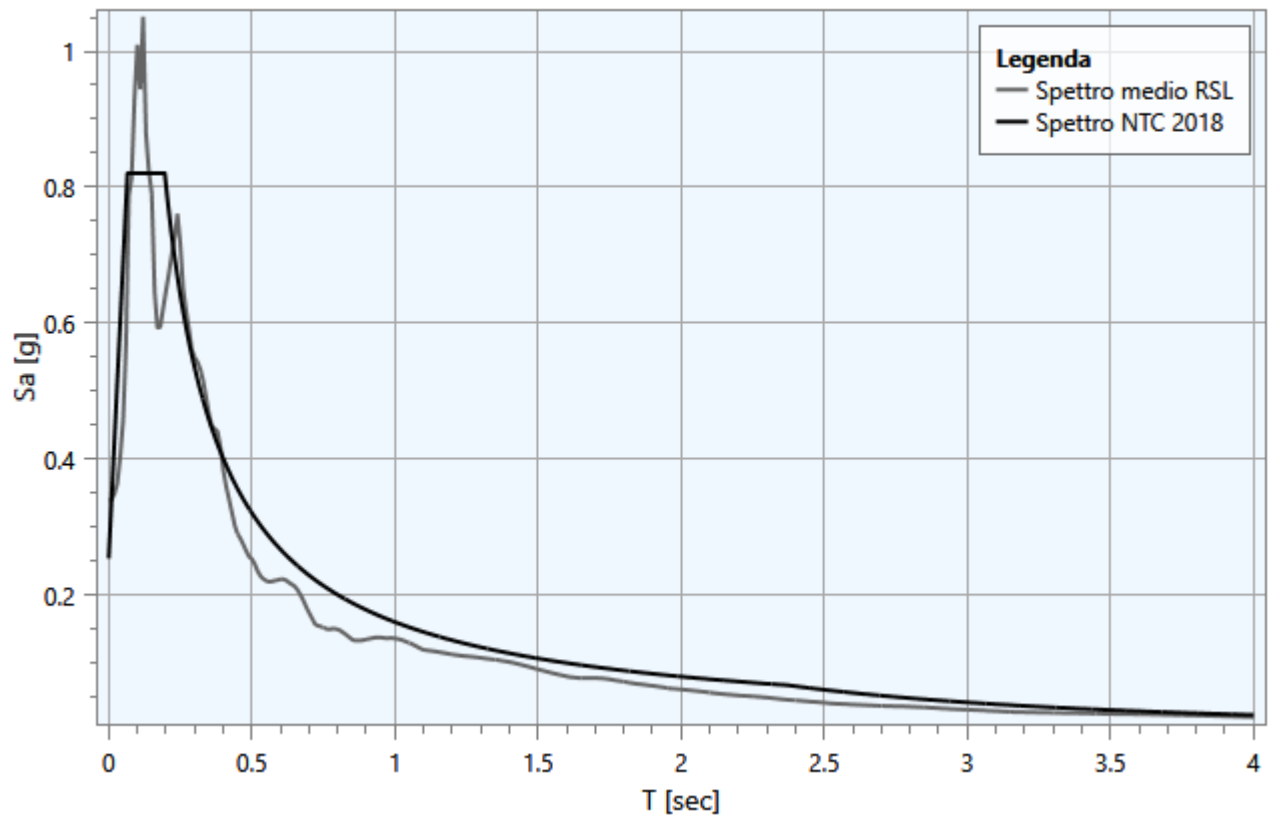
Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (96))



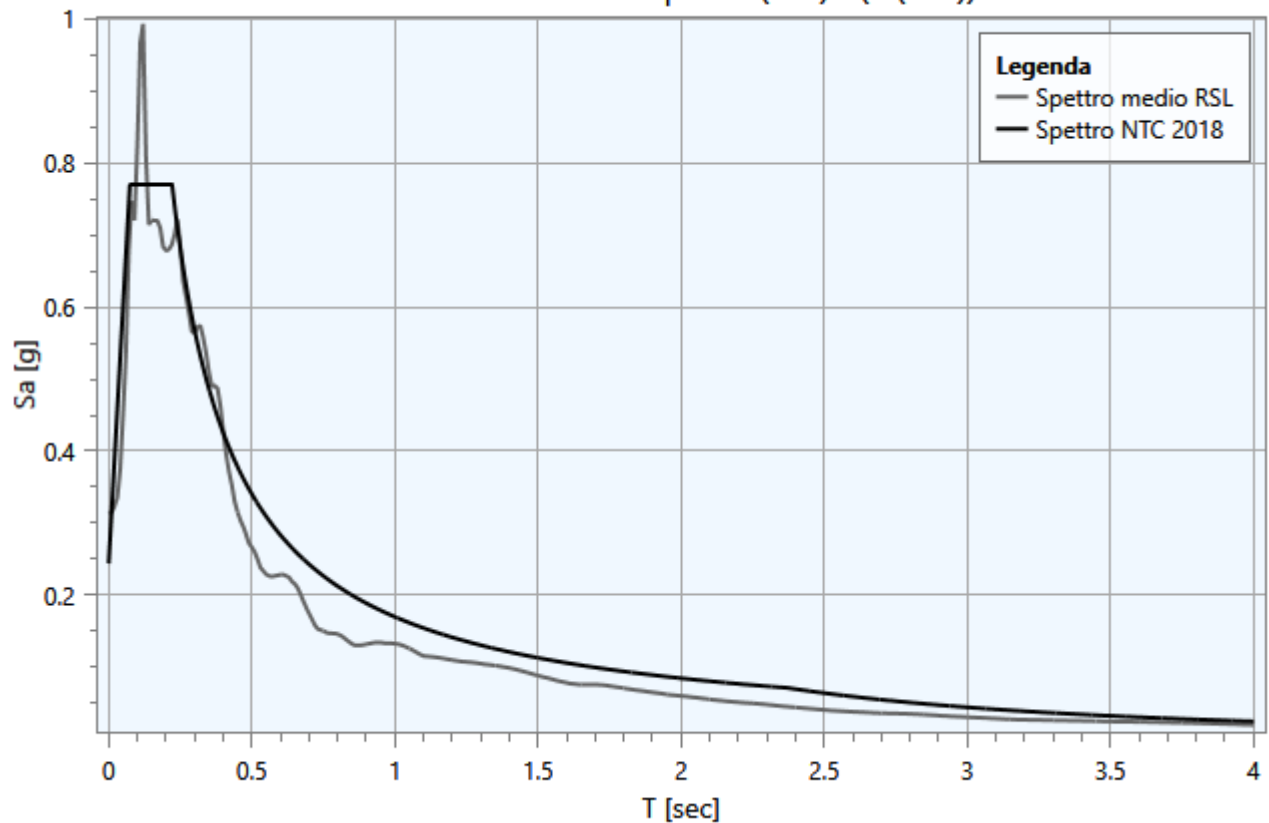
Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (102))



Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (109))

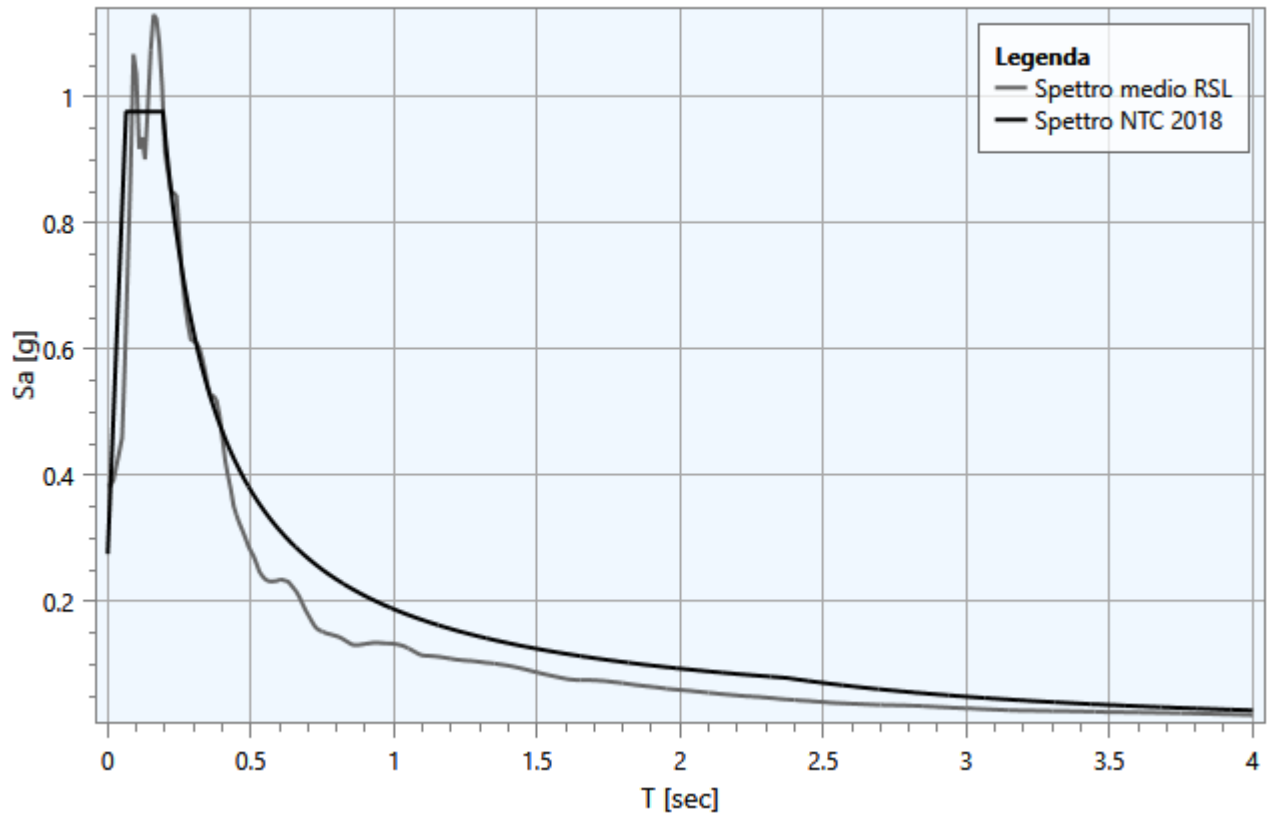


Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (117))

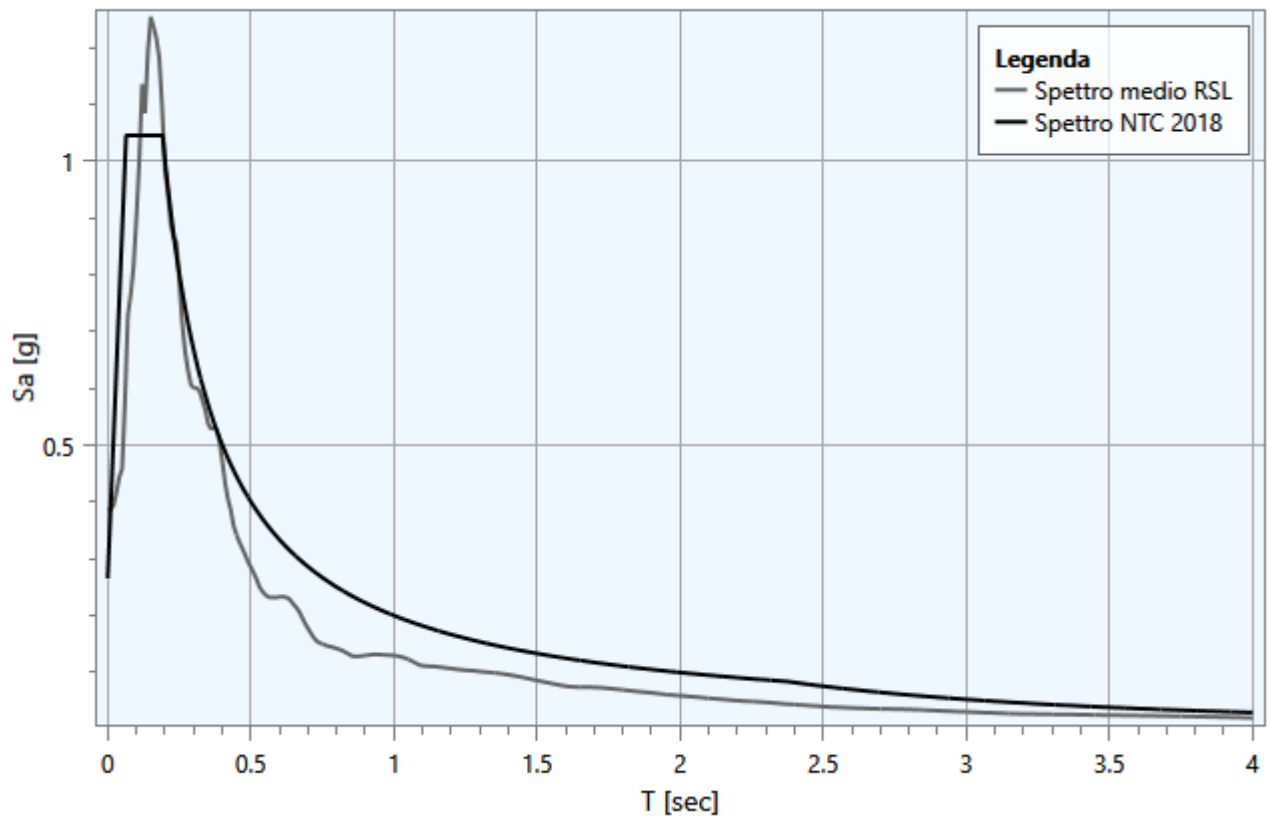




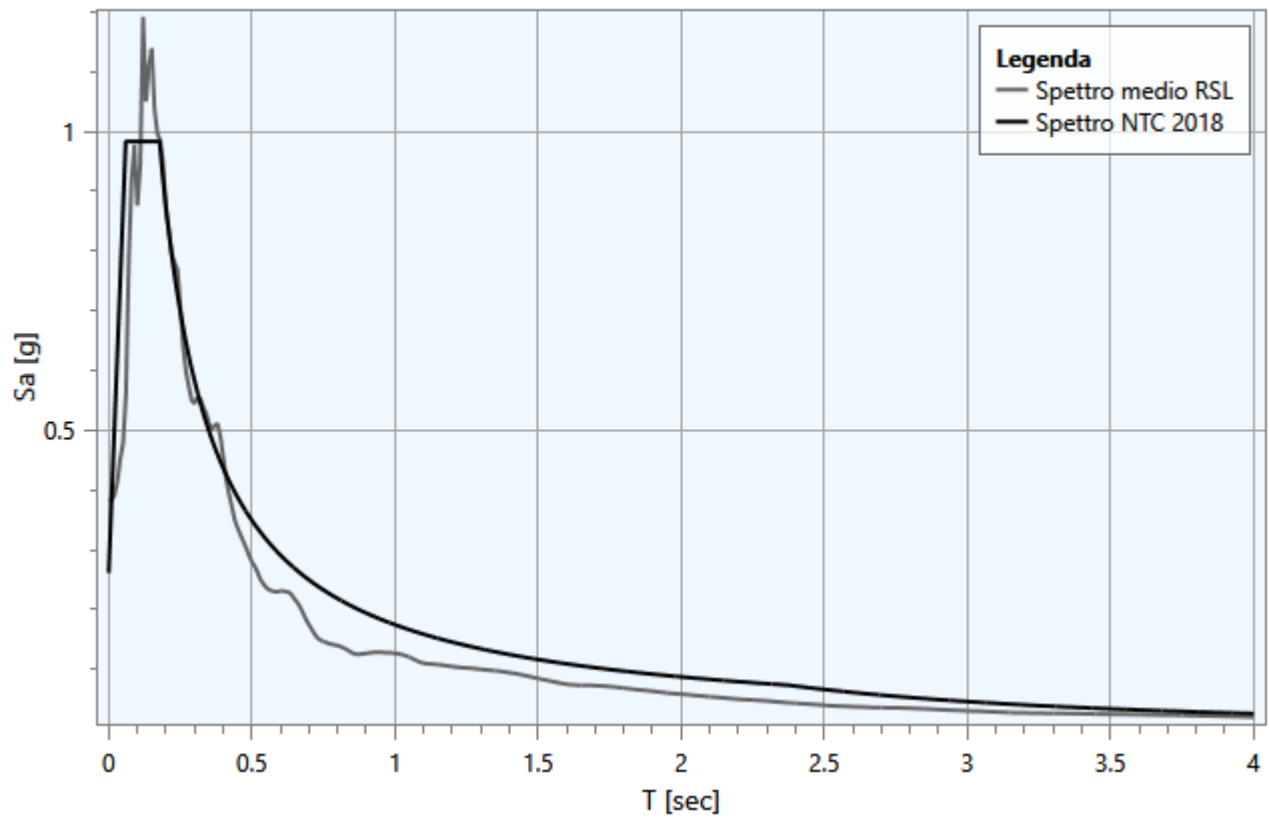
Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (122))



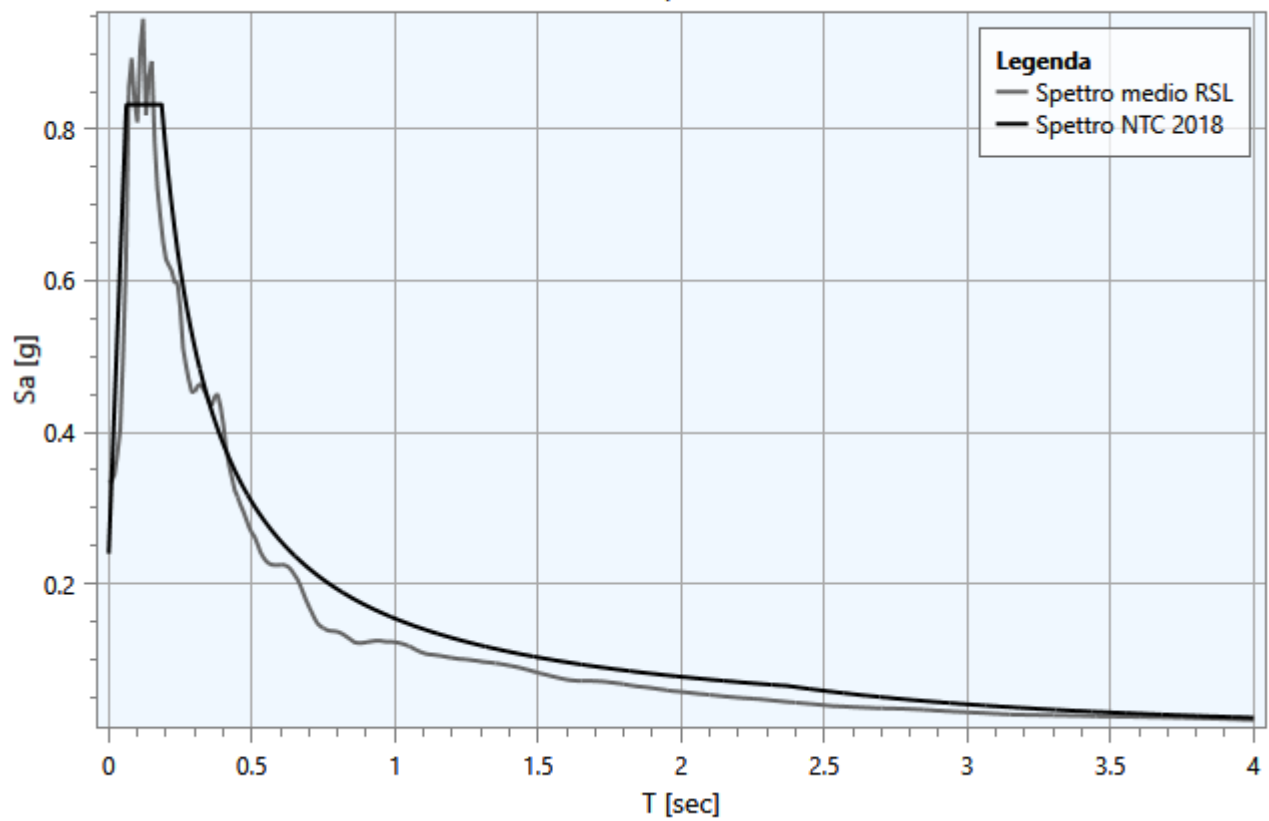
Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (129))



Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (134))



Parametrizzazione spettro (SLV) - (P (140))



---

**Analisi di stabilità dei pendii con: JANBU (1967) – Frana Sezione EE' - Condizioni statiche**

---

Lat./Long.	43.861615/11.56557
Calcolo eseguito secondo	NTC 2018
Numero di strati	3.0
Numero dei conci	10.0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1.1
Coefficiente parziale resistenza	1.1
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	Picco
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma generica	

---

**Coefficienti sismici [N.T.C.]**

---

**Dati generali**

Tipo opera:	2 - Opere ordinarie
Classe d'uso:	Classe II
Vita nominale:	50.0 [anni]
Vita di riferimento:	50.0 [anni]

**Parametri sismici su sito di riferimento**

Categoria sottosuolo:	B
Categoria topografica:	T2

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30.0	0.6	2.47	0.26
S.L.D.	50.0	0.65	2.45	0.26
S.L.V.	475.0	1.67	2.4	0.29
S.L.C.	975.0	2.16	2.39	0.29

**Coefficienti sismici orizzontali e verticali**

Opera:	Opere di sostegno
--------	-------------------

S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.864	0.18	0.0159	0.0079
S.L.D.	0.936	0.18	0.0172	0.0086
S.L.V.	2.4048	0.24	0.0589	0.0294
S.L.C.	3.083	0.31	0.0975	0.0487

---

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	2758.55	1565.17
2	2761.07	1565.67
3	2765.93	1569.67
4	2767.55	1571.67
5	2773.72	1573.67
6	2777.47	1574.47
7	2783.06	1575.67
8	2786.84	1577.67
9	2803.3	1581.67
10	2826.03	1591.67
11	2834.84	1593.67
12	2840.58	1595.67
13	2849.27	1599.67
14	2860.37	1601.67
15	2875.29	1603.67
16	2877.51	1605.67
17	2883.61	1607.67
18	2891.71	1609.67
19	2902.7	1613.67
20	2910.81	1615.67
21	2923.09	1617.67
22	2926.75	1619.67
23	2938.2	1621.67
24	2949.42	1623.67
25	2970.6	1627.17
26	2973.76	1627.17
27	2974.33	1627.67
28	2978.95	1629.67
29	2987.97	1631.67
30	3002.25	1633.67
31	3007.76	1635.0
32	3010.66	1637.67
33	3020.04	1639.67
34	3029.18	1641.67
35	3038.51	1644.95
36	3048.49	1647.67
37	3059.47	1649.67
38	3066.3	1651.67
39	3075.91	1653.67
40	3079.45	1655.67
41	3082.17	1657.67
42	3088.59	1659.67
43	3092.47	1661.67
44	3101.61	1663.67
45	3113.0	1665.67
46	3114.55	1667.67
47	3119.32	1669.67
48	3123.63	1671.67
49	3129.69	1673.67
50	3134.91	1675.67
51	3139.31	1677.67
52	3141.55	1679.67
53	3146.07	1681.67
54	3148.99	1683.67
55	3150.76	1685.67
56	3152.95	1687.67

---

57	3158.3	1689.82
58	3166.17	1690.67

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

N	X (m)	y (m)
1	2758.55	1565.11
2	2771.68	1568.04
3	2777.02	1567.94
4	2784.41	1568.8
5	2789.88	1569.7
6	2812.86	1574.6
7	2815.55	1574.8
8	2837.2	1581.17
9	2846.89	1585.72
10	2869.64	1591.66
11	2928.82	1612.67
12	2953.53	1619.67
13	3007.76	1627.97
14	3063.72	1642.13
15	3097.52	1652.78
16	3127.32	1664.25
17	3141.29	1672.93
18	3150.58	1679.69
19	3157.59	1686.78
20	3158.3	1689.82
21	3158.3	1689.82
22	3166.17	1690.67

**Vertici strato .....2**

N	X (m)	y (m)
1	2758.55	1549.83
2	2813.18	1565.3
3	2847.51	1573.04
4	2877.13	1580.1
5	2929.06	1592.49
6	2948.6	1597.16
7	2973.01	1605.19
8	3007.48	1619.6
9	3046.9	1629.95
10	3085.1	1640.81
11	3119.24	1653.64
12	3140.25	1659.17
13	3166.17	1674.72

**Vertici superficie Nr...1**

N	X m	y m
1	2821.25	1589.67
2	2830.08	1589.58
3	2844.56	1594.52
4	2852.45	1597.81
5	2857.23	1601.14

### 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
Coazione efficace	1.25
Coazione non drenata	1.4
Riduzione parametri geotecnici terreno	Si

### Stratigrafia

Strato	Coazione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coazione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (kN/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (kN/m <sup>3</sup> )	Litologia
1	0.05		20	1800	1950	Frana
2	0.4		26	1950	2100	Strato pelitico
3	0.65		33.5	2100	2250	Substrato Roccioso

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: coazione.

Superficie Nr...1 Fattore di sicurezza=0.84

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)	Kh•Wi (Kg)	Kv•Wi (Kg)	c (kg/cm <sup>2</sup> )	Fi (°)	Ui (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)
1	3.57	-0.7	3.57527448.3	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0529442.9	168384.2		
2	3.57	-0.6	3.571467647.0	0.0	0.0	0.04	16.2	0.01472388.0465520.1			
3	3.57	11.1	3.641781047.0	0.0	0.0	0.04	16.2	0.01709086.0550380.0			
4	3.57	18.8	3.771684573.0	0.0	0.0	0.04	16.2	0.01606629.0536575.9			
5	3.57	18.8	3.771633579.0	0.0	0.0	0.04	16.2	0.01557979.0520380.1			
6	3.57	18.8	3.771689769.0	0.0	0.0	0.04	16.2	0.01611586.0538226.0			
7	3.57	20.9	3.821920682.0	0.0	0.0	0.04	16.2	0.01834550.0620492.6			
8	3.57	22.7	3.872061916.0	0.0	0.0	0.04	16.2	0.01974045.0675923.8			
9	3.57	26.9	4.01590897.0	0.0	0.0	0.04	16.2	0.01537353.0545207.4			
10	3.57	34.9	4.35604339.4	0.0	0.0	0.04	16.2	0.0603017.2	233990.5		



---

**Analisi di stabilità dei pendii con: JANBU (1967) – Frana Sezione EE' - Condizioni sismiche**

---

Lat./Long.	43.861615/11.56557
Calcolo eseguito secondo	NTC 2018
Numero di strati	3.0
Numero dei conci	10.0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1.1
Coefficiente parziale resistenza	1.2
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	Picco
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma generica	

---

**Coefficienti sismici [N.T.C.]**

---

**Dati generali**

Tipo opera:	2 - Opere ordinarie
Classe d'uso:	Classe II
Vita nominale:	50.0 [anni]
Vita di riferimento:	50.0 [anni]

**Parametri sismici su sito di riferimento**

Categoria sottosuolo:	B
Categoria topografica:	T2

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30.0	0.6	2.47	0.26
S.L.D.	50.0	0.65	2.45	0.26
S.L.V.	475.0	1.67	2.4	0.29
S.L.C.	975.0	2.16	2.39	0.29

**Coefficienti sismici orizzontali e verticali**

Opera: Opere di sostegno

S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.864	0.18	0.0159	0.0079
S.L.D.	0.936	0.18	0.0172	0.0086
S.L.V.	2.4048	0.24	0.0589	0.0294
S.L.C.	3.083	0.31	0.0975	0.0487

Coefficiente azione sismica orizzontale	0.0589
Coefficiente azione sismica verticale	0.0294



---

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	2758.55	1565.17
2	2761.07	1565.67
3	2765.93	1569.67
4	2767.55	1571.67
5	2773.72	1573.67
6	2777.47	1574.47
7	2783.06	1575.67
8	2786.84	1577.67
9	2803.3	1581.67
10	2826.03	1591.67
11	2834.84	1593.67
12	2840.58	1595.67
13	2849.27	1599.67
14	2860.37	1601.67
15	2875.29	1603.67
16	2877.51	1605.67
17	2883.61	1607.67
18	2891.71	1609.67
19	2902.7	1613.67
20	2910.81	1615.67
21	2923.09	1617.67
22	2926.75	1619.67
23	2938.2	1621.67
24	2949.42	1623.67
25	2970.6	1627.17
26	2973.76	1627.17
27	2974.33	1627.67
28	2978.95	1629.67
29	2987.97	1631.67
30	3002.25	1633.67
31	3007.76	1635.0
32	3010.66	1637.67
33	3020.04	1639.67
34	3029.18	1641.67
35	3038.51	1644.95
36	3048.49	1647.67
37	3059.47	1649.67
38	3066.3	1651.67
39	3075.91	1653.67
40	3079.45	1655.67
41	3082.17	1657.67
42	3088.59	1659.67
43	3092.47	1661.67
44	3101.61	1663.67
45	3113.0	1665.67
46	3114.55	1667.67
47	3119.32	1669.67
48	3123.63	1671.67
49	3129.69	1673.67
50	3134.91	1675.67
51	3139.31	1677.67
52	3141.55	1679.67
53	3146.07	1681.67
54	3148.99	1683.67
55	3150.76	1685.67
56	3152.95	1687.67

---

57	3158.3	1689.82
58	3166.17	1690.67

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

N	X (m)	y (m)
1	2758.55	1565.11
2	2771.68	1568.04
3	2777.02	1567.94
4	2784.41	1568.8
5	2789.88	1569.7
6	2812.86	1574.6
7	2815.55	1574.8
8	2837.2	1581.17
9	2846.89	1585.72
10	2869.64	1591.66
11	2928.82	1612.67
12	2953.53	1619.67
13	3007.76	1627.97
14	3063.72	1642.13
15	3097.52	1652.78
16	3127.32	1664.25
17	3141.29	1672.93
18	3150.58	1679.69
19	3157.59	1686.78
20	3158.3	1689.82
21	3158.3	1689.82
22	3166.17	1690.67

**Vertici strato .....2**

N	X (m)	y (m)
1	2758.55	1549.83
2	2813.18	1565.3
3	2847.51	1573.04
4	2877.13	1580.1
5	2929.06	1592.49
6	2948.6	1597.16
7	2973.01	1605.19
8	3007.48	1619.6
9	3046.9	1629.95
10	3085.1	1640.81
11	3119.24	1653.64
12	3140.25	1659.17
13	3166.17	1674.72

**Vertici superficie Nr...1**

N	X m	y m
1	2821.25	1589.67
2	2830.08	1589.58
3	2844.56	1594.52
4	2852.45	1597.81
5	2857.23	1601.14

### 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
Coazione efficace	1.25
Coazione non drenata	1.4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

### Stratigrafia

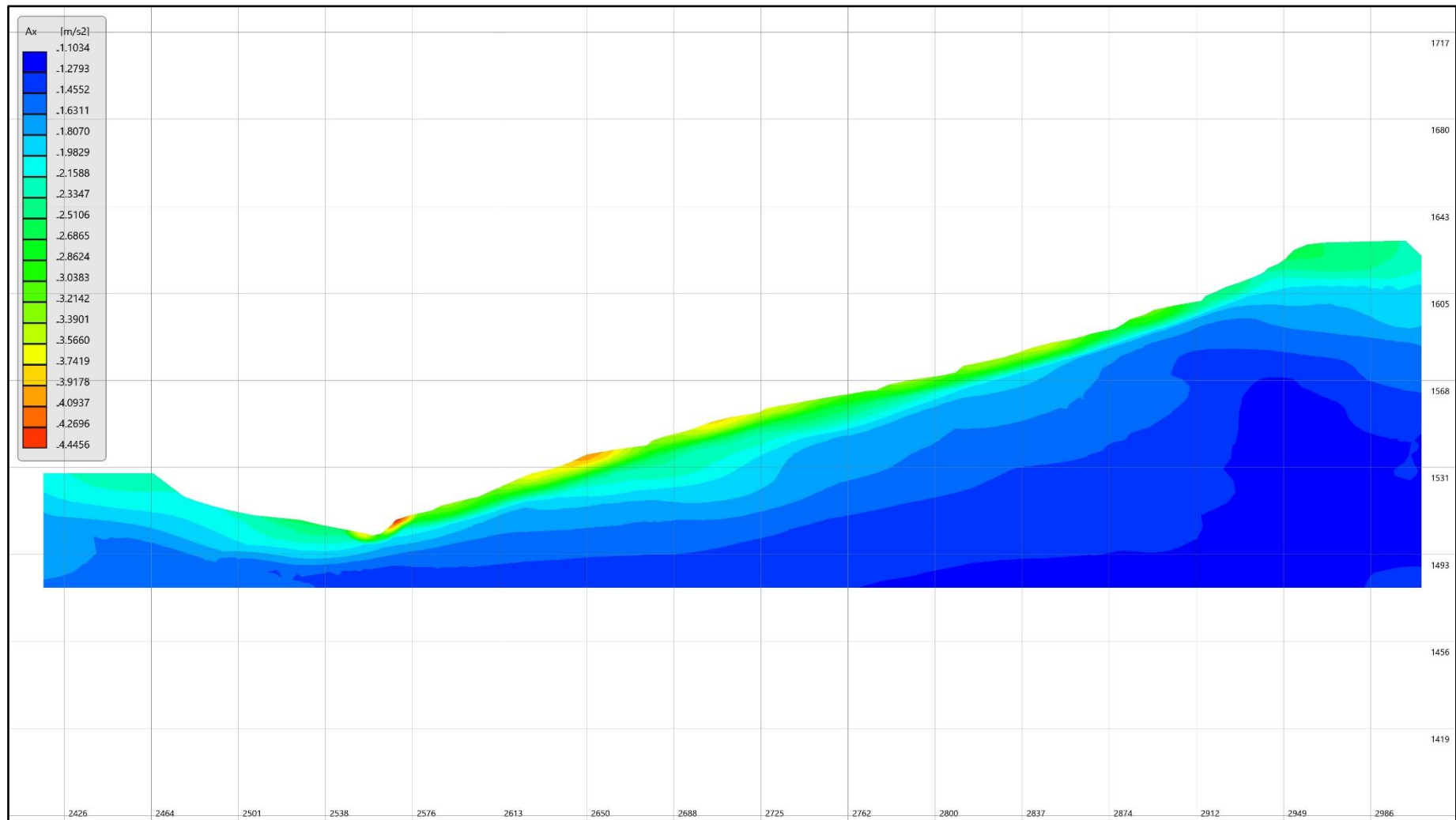
Strato	Coazione (kg/cm <sup>2</sup> )	Coazione non drenata (kg/cm <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (kN/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (kN/m <sup>3</sup> )	Litologia
1	0.05		20	1800	1950	Frana
2	0.4		26	1950	2100	Strato pelitico
3	0.65		33.5	2100	2250	Substrato Roccioso

Superficie Nr...1 Fattore di sicurezza=0.78

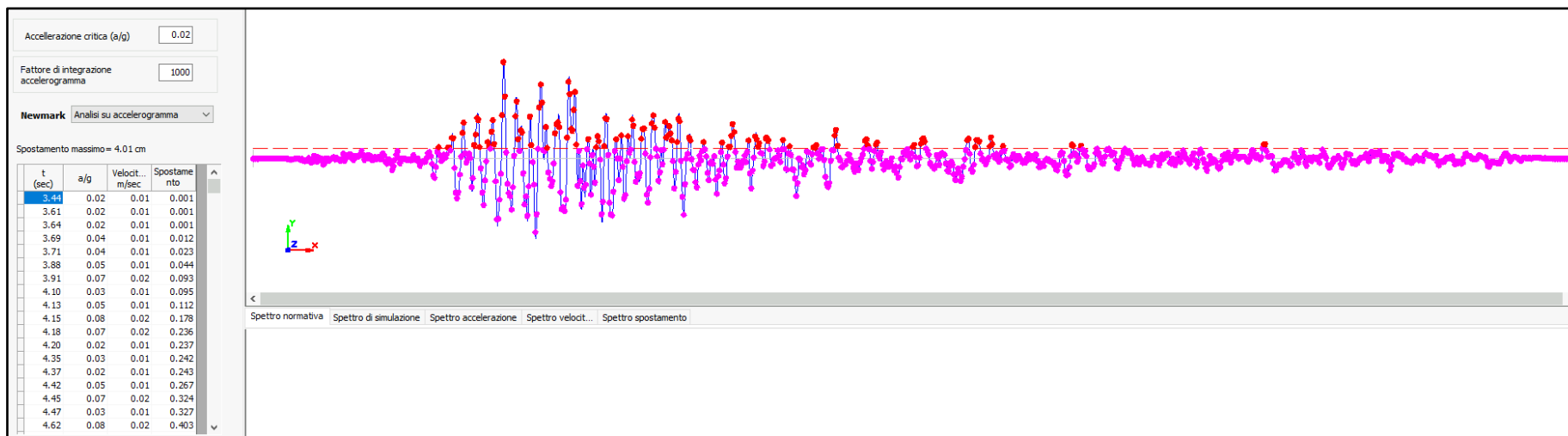
Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)	Kh•Wi (Kg)	Kv•Wi (Kg)	c (kg/cm <sup>2</sup> )	Fi (°)	Ui (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)
1	3.57	-0.7	3.57527448.3	31066.7	15506.98	0.05	20.0	0.0529911.0	208623.0		
2	3.57	-0.6	3.571467647.0	86444.43	43148.83	0.05	20.0	0.01473503.0576695.6			
3	3.57	11.1	3.641781047.0	104903.7	52362.78	0.05	20.0	0.01685699.0672011.7			
4	3.57	18.8	3.771684573.0	99221.36	49526.45	0.05	20.0	0.01570281.0649240.6			
5	3.57	18.8	3.771633579.0	96217.8	48027.22	0.05	20.0	0.01522728.0629644.3			
6	3.57	18.8	3.771689769.0	99527.38	49679.2	0.05	20.0	0.01575125.0651237.1			
7	3.57	20.9	3.821920682.0	113128.2	56468.05	0.05	20.0	0.01788745.0748975.9			
8	3.57	22.7	3.872061916.0	121446.8	60620.33	0.05	20.0	0.01920753.0814188.8			
9	3.57	26.9	4.01590897.0	93703.84	46772.38	0.05	20.0	0.01488349.0653468.0			
10	3.57	34.9	4.35604339.4	35595.59	17767.58	0.05	20.0	0.0577979.8	277745.1		



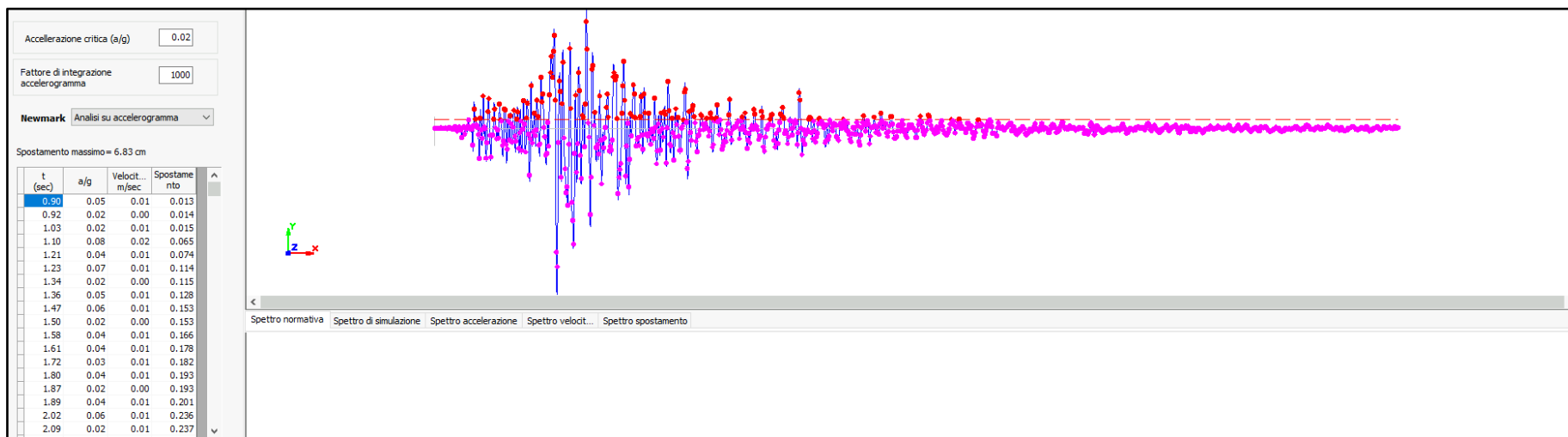
**Accelerazione massima calcolata da analisi bidimensionale (RSL2D) – Sezione EE'**



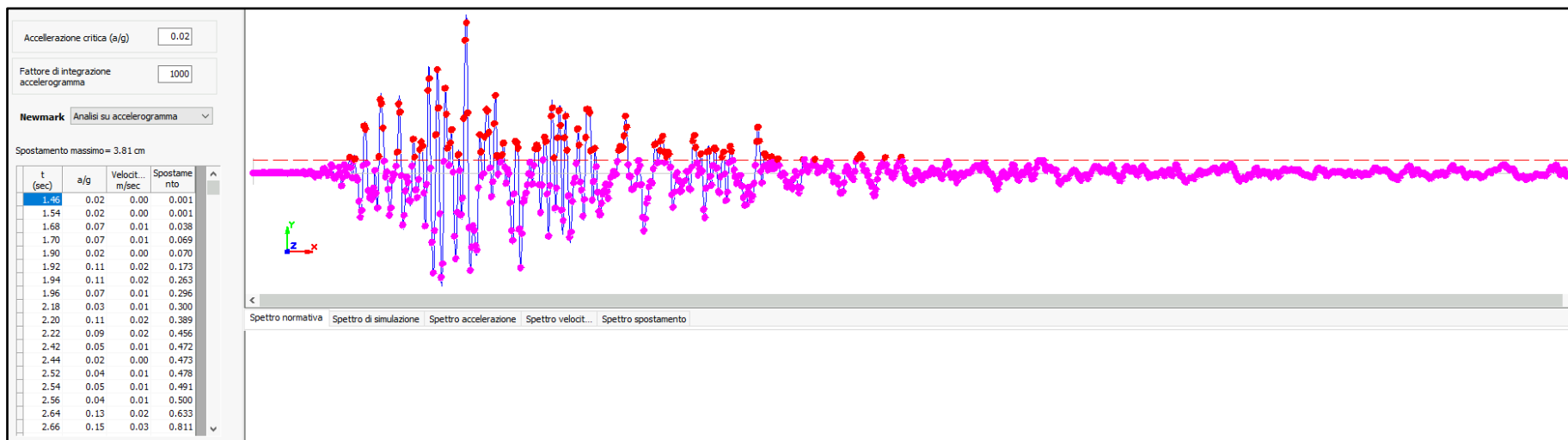
## Analisi su accelerogramma 1 e spostamento risultante



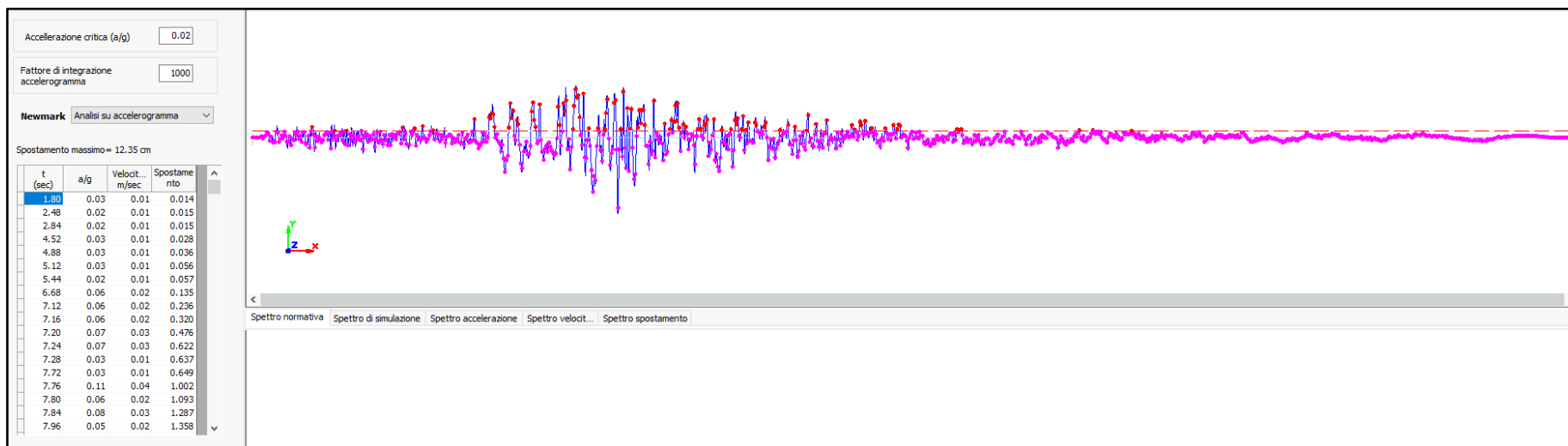
## Analisi su accelerogramma 2 e spostamento risultante



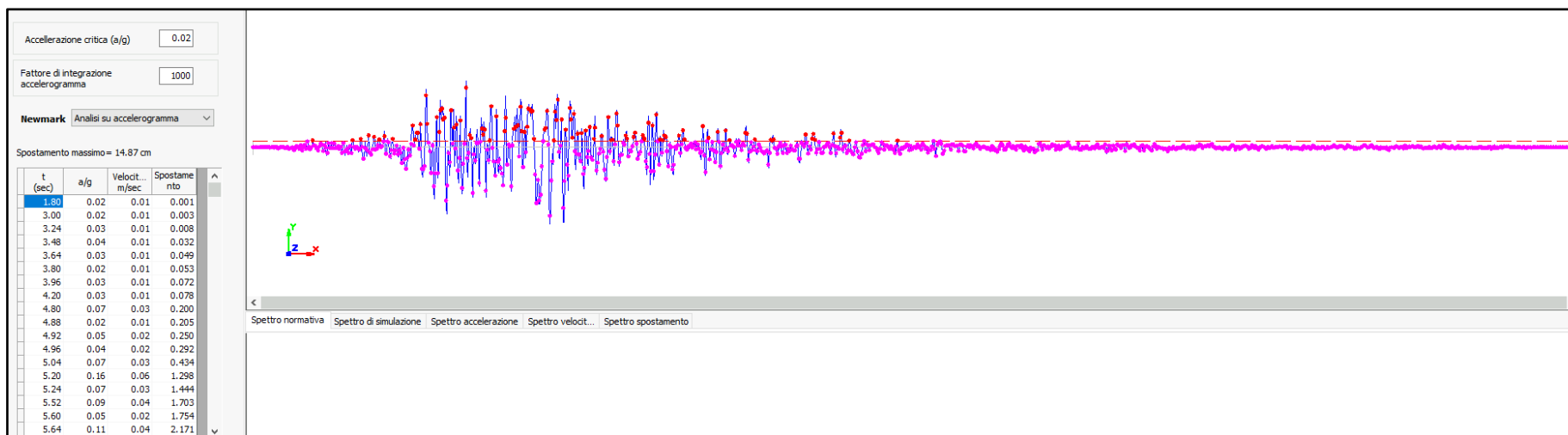
### Analisi su accelerogramma 3 e spostamento risultante



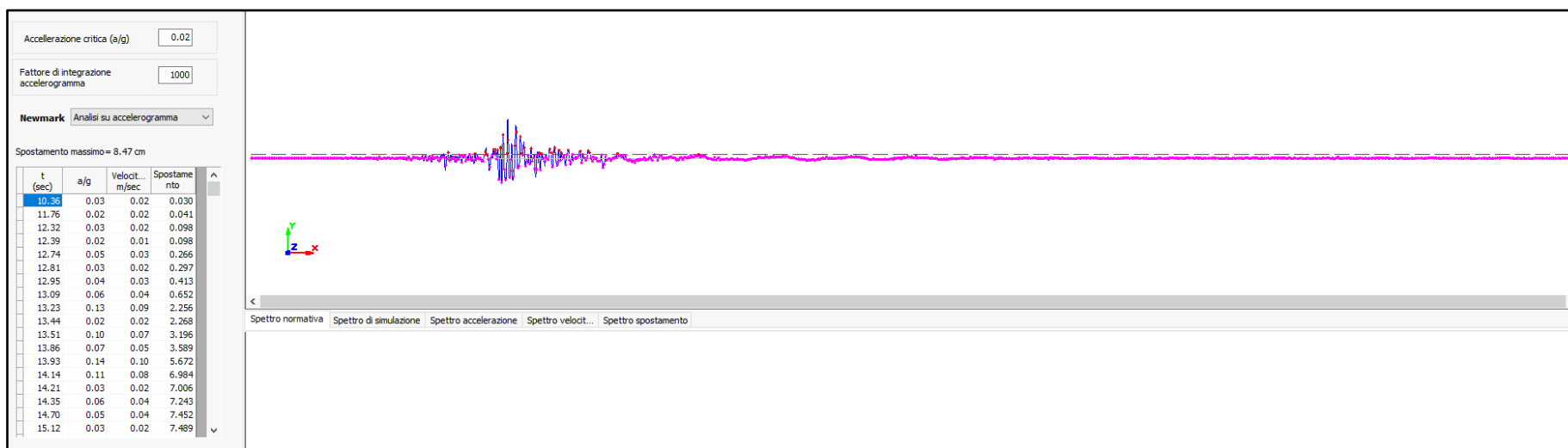
### Analisi su accelerogramma 4 e spostamento risultante



## Analisi su accelerogramma 5 e spostamento risultante



## Analisi su accelerogramma 6 e spostamento risultante





## Analisi su accelerogramma 7 e spostamento risultante

