

Committente

Client / Fornitore / Supplier

**A2A Ambiente S.p.A.**

Ingegneria Ambiente  
Via Olgettina 25 - 20132 Milano  
T [+39] 02 2729 81  
[ingegneria.ambiente@a2a.eu](mailto:ingegneria.ambiente@a2a.eu)  
[www.a2aambiente.eu](http://www.a2aambiente.eu)



Titolo progetto <i>Project title</i>	<b>Impianto per la produzione di energia elettrica e termica mediante combustione di rifiuti speciali non pericolosi sito in Comune di Cavaglià (BI)</b>
Titolo documento <i>Document title</i>	<b>Relazione di Risposta Sismica Locale</b>
Progettista <i>Design engineer</i>	<b>G. Anselmi</b>
Verifica <i>Checked by</i>	<b>P. Bottani</b>
Approvazione <i>Approved by</i>	<b>M. Mazzarella</b>
Proponente – Legale rappresentante	<b>F. Roncari</b>
Numero documento <i>Document number</i>	CAVP09O10000CER1200103
Numero documento fornitore <i>Supplier code</i>	-

**Tabella delle revisioni / Table of revisions**

Revisione <i>Revision</i>	Data <i>Date</i>	Descrizione <i>Description</i>	Pagina <i>Page</i>	Redazione <i>Created by</i>
<b>00</b>	<b>Novembre 2022</b>	<b>Prima emissione</b>	<b>81</b>	<b>G. Anselmi</b>

Versione per Fornitore / Supplier version

## **SOMMARIO**

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>INQUADRAMENTO COROGRAFICO.....</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>SOFTWARE .....</b>	<b>6</b>
<b>7</b>	<b>CAMPAGNA DI INDAGINE GEOGNOSTICA .....</b>	<b>7</b>
<b>8</b>	<b>STRATIGRAFIA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>9</b>
<b>9</b>	<b>SISMICITA' .....</b>	<b>10</b>
<b>9.1</b>	<b>ZONA SISMICA .....</b>	<b>10</b>
<b>9.2</b>	<b>CPTI15-DBMI15 V 2.0 .....</b>	<b>19</b>
<b>9.1</b>	<b>INDAGINI SISMICHE.....</b>	<b>22</b>
<b>9.1.1</b>	<b>PROVA SISMICA MASW .....</b>	<b>22</b>
<b>9.1.1.1</b>	<b>RISULTATI DELL'INDAGINE SISMICA.....</b>	<b>24</b>
<b>9.2</b>	<b>CATEGORIA DI SOTTOSUOLO.....</b>	<b>34</b>
<b>9.3</b>	<b>CATEGORIA TOPOGRAFICO.....</b>	<b>36</b>
<b>10</b>	<b>RISPOSTA SISMICA LOCALE DI TERZO LIVELLO.....</b>	<b>54</b>
<b>10.1</b>	<b>CALCOLO DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE.....</b>	<b>54</b>
<b>10.1.1</b>	<b>ESTRAZIONE ACCELEROGRAMMI DI INPUT .....</b>	<b>54</b>
<b>10.1.2</b>	<b>PROCEDURA DI CALCOLO .....</b>	<b>54</b>
<b>10.1.3</b>	<b>VALUTAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE.....</b>	<b>61</b>
<b>10.2</b>	<b>MODELLO REALIZZATO CON GLI 7ACCELEROGRAMMI.....</b>	<b>65</b>
<b>10.2.1</b>	<b>ACCELEROGRAMMI TRASPORTATI .....</b>	<b>65</b>
<b>10.2.2</b>	<b>RISULTATO DEL MODELLO .....</b>	<b>69</b>
<b>11</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>79</b>

## 1 **PREMESSA**

Il presente documento costituisce la valutazione della risposta sismica locale del terreno di fondazione di uno nuovo impianto di produzione di energia elettrica e termica mediante combustione rifiuti speciali non pericolosi nel Comune di Cavaglià (BI) ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto.

Il sito di ubicazione dell'ampliamento proposto si trova in Comune di Cavaglià (BI), località Gerbido, a sud dell'abitato, in prossimità dei confini amministrativi dei Comuni di Santhià (VC) ed Alice Castello (VC)

L'area dista circa 800 m dalla SS 143 che collega Biella a Santhià. Di seguito viene riportata l'inquadramento dell'area su base BDTRE Regione Piemonte.

La Risposta Sismica Locale è la valutazione dell'azione sismica di progetto deve essere svolta in maniera rigorosa in accordo con quanto riportato anche dalle NTC2018 al cap.3.2.2, dove viene esplicitamente detto che: *“Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3...”*.

In assenza di tali analisi, per determinati assetti sismostratigrafici, è possibile stimare l'azione sismica con l'approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento.

Visto il carattere strategico dell'opera in progetto si è proceduto ad effettuare delle specifiche analisi sismiche e alla valutazione della Risposta Sismica Locale.

L'esecuzione di una Risposta Sismica Locale consente di ottenere una valutazione dell'amplificazione locale più rigorosa dell'approccio semplificato.

I punti fondamentali nella stima dell'azione sismica, sulla base di specifiche analisi di RSL, possono essere così schematizzati:

- definizione dell'input sismico rappresentativo dell'azione sismica al tetto del bedrock sismico, da dove si presume che inizi l'amplificazione locale;
- determinazione di un adeguato modello geologico e parametrizzazione degli strati individuati;
- analisi;
- scelta e rappresentazione dei parametri di output.

Nei capitoli seguenti si riportano le risultanze delle analisi eseguite e l'analisi della risposta sismica locale per il sito in oggetto.



*Figura 1: area di studio evidenziata in rosso.*

Tale relazione ottempera a quanto richiesto dal D.M. 17.01.2018 “Norme Tecniche per le Costruzioni”.

## **2** **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

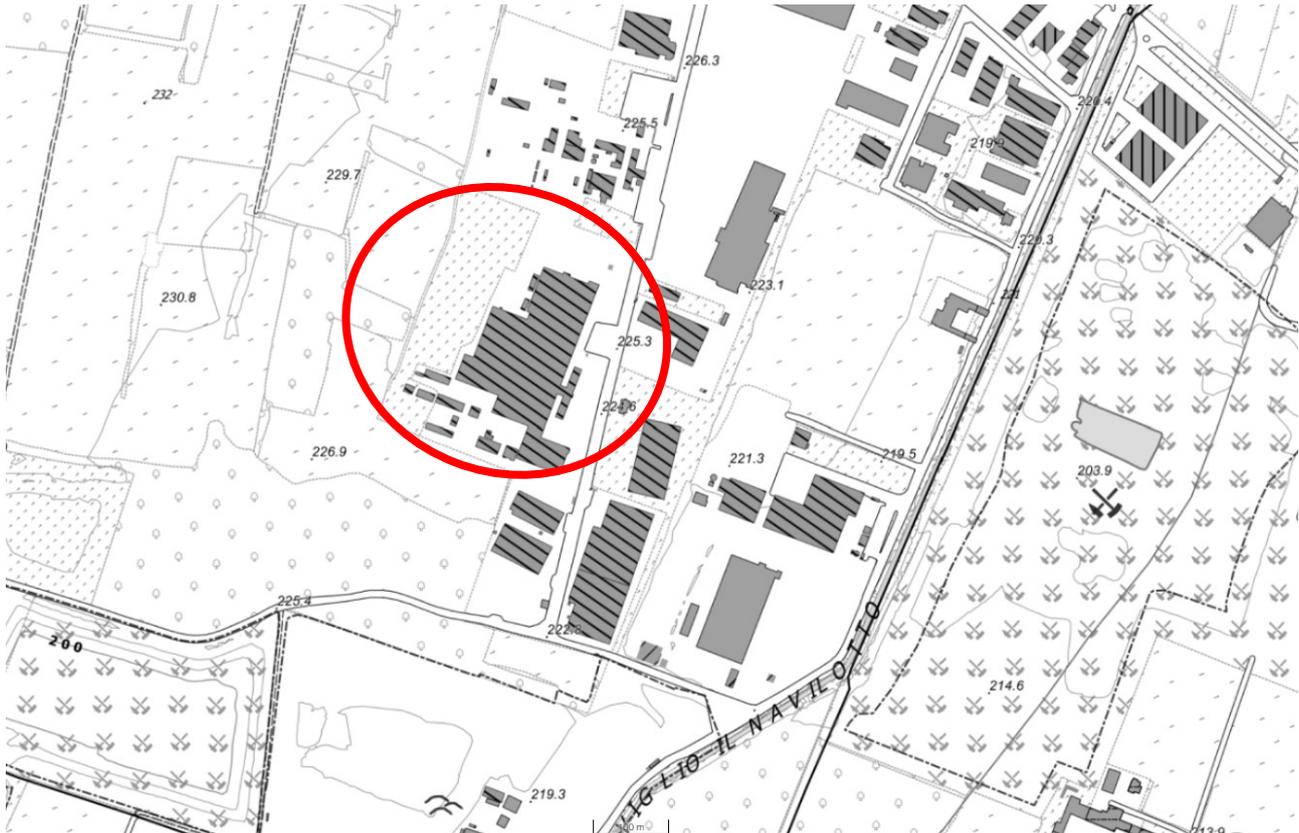
- OPCM n. 3274 del 20 marzo 2003 “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”.
- Deliberazione della Giunta Regionale 30 dicembre 2019, n. 6-887 OPCM 3519/2006. Presa d'atto e approvazione dell'aggiornamento della classificazione sismica del territorio della Regione Piemonte, di cui alla D.G.R. del 21 maggio 2014, n. 65- 7656.
- D.M.17/01/2018 Contenente le Nuove Norme Tecniche per le costruzioni (NTC 2018)

### 3 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- “Polo Tecnologico per lo smaltimento dei Rifiuti da realizzare nel Comune di Cavaglià-Località Gerbido – Relazione geologica e Geotecnica” Dott. Geol. Elio Vanoni – Dott. Geol. Guido Bruno – Febbraio 1999
- “Discarica Rifiuti Località Gerbido – Comune di Cavaglià – Studio per l’ubicazione dei pozzi di spurgo e la realizzazione della rete di monitoraggio” Dott. Geol. Domenico De Luca - Marzo 1999 – Maggio 2000;
- “Ecodeco S.p.A. – Comune di Cavaglià – Nuovo impianto trattamento rifiuti – Indagine Geognostica – Prove di laboratorio” RCT (Radaelli Castellotti) - Marzo 2001
- “Ecodeco- Cavaglià (Biella) – Nuovo impianto di smaltimento rifiuti – Relazione Geotecnica” Ingegneri Consulenti associati – Ing. Pietro Romani – Giugno 2001- “Cavaglià S.p.A. - Fase di completamento e ripristino ambientale discarica 2B –
- Relazione Idrogeologica” Dott. Geol. Fulvio Epifani – Aprile 2002;
- “D.M. 25.10.1999 n° 471 - Cavaglià S.p.A. - Fase di completamento e ripristino ambientale- Discarica 2B – Relazione Idrogeologica” Dott. Geol. Fulvio Epifani – Maggio 2002;
- Progetto di ampliamento discariche ASRAB SpA e A2A Ambiente SpA in loc. Gerbido - Cavaglià (BI) - Relazione geologica idrogeologica e geotecnica – Dott. Geol. Paolo Bottani – Febbraio 2016
- Report tecnico – Indagine sismica – Loc. Via della Mandria, Cavaglià (BI) – S.G.M Geologia e Ambiente s.r.l. – Novembre 2020

## 4 INQUADRAMENTO COROGRAFICO

Il sito oggetto d'interesse si trova in un settore a sud nel Comune di Cavaglià (BI) in via Bertone in località Gerbido, a sud dell'abitato, in prossimità dei confini amministrativi dei Comuni di Santhià (VC) ed Alice Castello (VC). L'area dista circa 800 m dalla SS 143 che collega Biella a Santhià. Di seguito viene riportata l'inquadratura dell'area su base BDTRE Regione Piemonte.



*Figura 2: Area d'intervento su CTR della Regione Piemonte in scala 1:10.000 (BDTRE Regione Piemonte). In rosso l'area d'interesse*

L'area d'interesse si trova a una quota compresa tra 225 e 228 m s.l.m

## 5 BIBLIOGRAFIA

- Idriss I.M. and Sun J.I., 1992. SHAKE91 – a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soils deposits. University of California, Davis.
- Sabetta F. and Pugliese A, 1996. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. Bull. Seism. Soc. Am., 86, 337-352.

## 6 SOFTWARE

Per la definizione dell'azione sismica di progetto è stata svolta la valutazione della risposta sismica locale riferita al terreno di fondazione del nuovo impianto per la produzione di energia elettrica e termica.

I software usati sono:

- Rexel V.3.5 – REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis - Iunio Iervolino · Carmine Galasso · Edoardo Cosenza
- RSL III- Geostru

## 7 CAMPAGNA DI INDAGINE GEOGNOSTICA

Nel 2022 è stata effettuata una campagna di indagine al fine della caratterizzazione geologica e geotecnica, composta dalle seguenti indagini:

- n.1 sondaggio a carotaggio continuo con esecuzione di prove SPT in foro spinto fino a -40 m da p.c. attuale (ZC1)
- n.2 sondaggi a carotaggio continuo con esecuzione di prove SPT in foro spinti fino a -20 m da p.c. attuale (ZC2 e ZC3)
- Analisi granulometriche in laboratorio (setacciatura-sedimentazione)



Figura 3: Ubicazione delle prove in situ nell'area di studio

Per la definizione dal punto di vista sismico dell'area oggetto di studio, vista l'omogeneità dei depositi presenti sono state prese di riferimento n.2 indagini sismiche MASW eseguite nel 2021 sempre da A2A Ambiente S.p.a. in un'area che dista circa 450 metri dall'area oggetto del presente studio.

Queste indagini erano state condotte in occasione della precedente istanza autorizzativa per la costruzione dello stesso impianto, localizzato però nei terreni adiacenti quelli degli esistenti impianti di A2A.

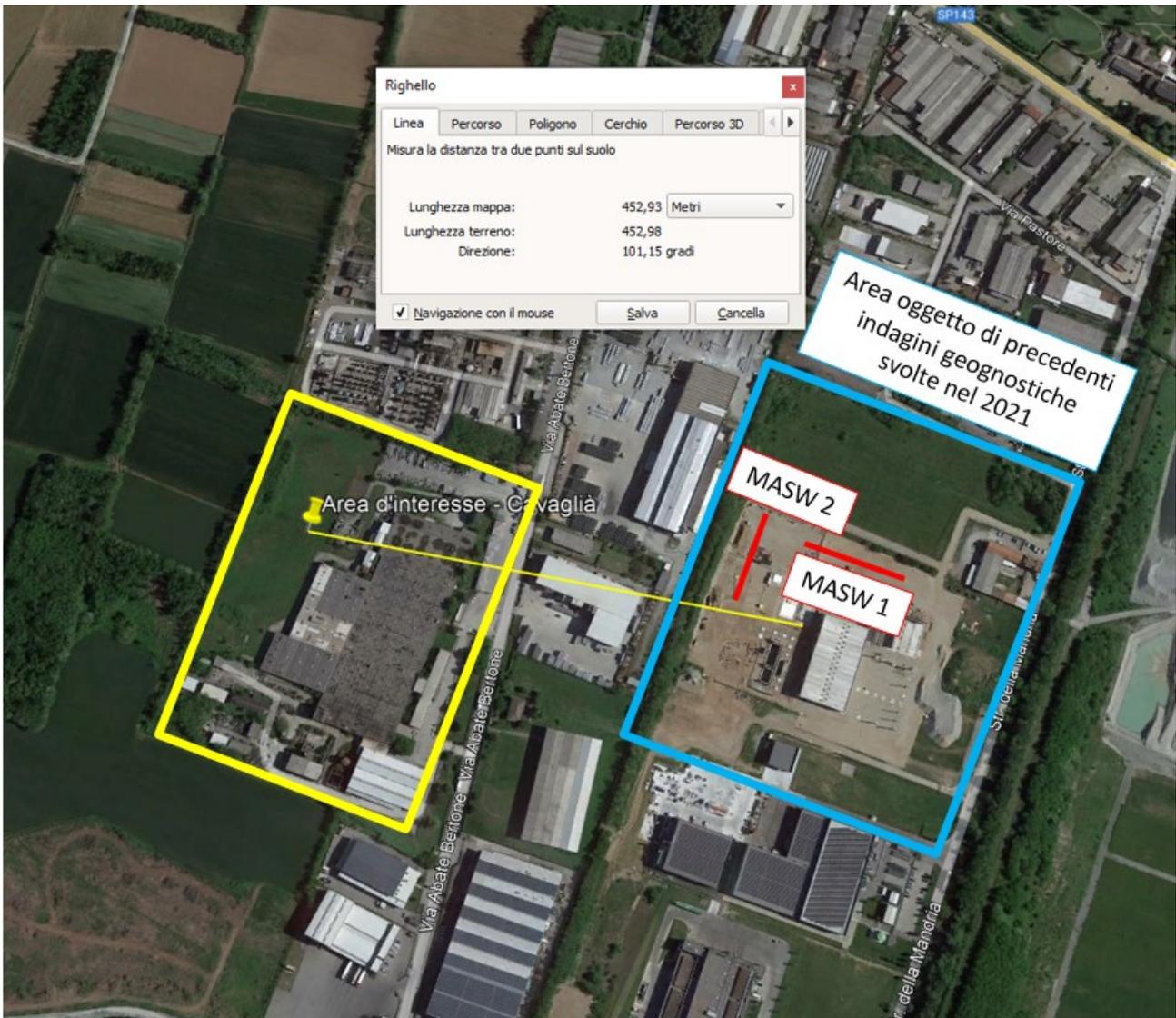


Figura 4: Stralcio Google Earth con distanza MASW di riferimento

## 8 STRATIGRAFIA DI RIFERIMENTO

Si riporta nella tabella seguente la stratigrafia del terreno.

Suolo	Profondità [m]
Ghiaia sabbie con ciottoli centimetrici in matrice sabbiosa grigia	0m-40m

*Tabella 1 – Stratigrafia di riferimento*

La soggiacenza della falda è variabile tra 30 e 36 m da p.c.

## 9 SISMICITA'

### 9.1 ZONA SISMICA

Le zone sismiche assegnate al territorio comunale di Cavaglià per le normative edilizie. Zone sismiche. Fenomeni riscontrati. Accelerazione al suolo (ag max).

La classificazione sismica del territorio nazionale ha introdotto normative tecniche specifiche per le costruzioni di edifici, ponti ed altre opere in aree geografiche caratterizzate dal medesimo rischio sismico.

In basso è riportata la zona sismica per il territorio di Cavaglià, indicata nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003, aggiornata con la Delibera della Giunta Regionale del Piemonte n. 4-3084 del 12.12.2011 ed in seguito modificate con la D.G.R. n. 65-7656 del 21 maggio 2014 e con la D.G.R. n.6-887 del 30 dicembre 2019.

<b>Zona sismica</b> <b>4</b>	Zona con pericolosità sismica molto bassa. E' la zona meno pericolosa dove le possibilità di danni sismici sono basse.
---------------------------------	---

Il comune di Cavaglià è classificato in **sottozona sismica 4**

I criteri per l'aggiornamento della mappa di pericolosità sismica sono stati definiti nell'Ordinanza del PCM n. 3519/2006, che ha suddiviso l'intero territorio nazionale in quattro zone sismiche sulla base del valore dell'accelerazione orizzontale massima (ag) su suolo rigido o pianeggiante, che ha una probabilità del 10% di essere superata in 50 anni.

Zona sismica	Descrizione	accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni [ag]	accelerazione orizzontale massima convenzionale (Norme Tecniche) [ag]	numero comuni con territori ricadenti nella zona (*)
1	Indica la zona più pericolosa, dove possono verificarsi fortissimi terremoti.	$a_g > 0,25 \text{ g}$	0,35 g	703
2	Zona dove possono verificarsi forti terremoti.	$0,15 < a_g \leq 0,25 \text{ g}$	0,25 g	2.224
3	Zona che può essere soggetta a forti terremoti ma rari.	$0,05 < a_g \leq 0,15 \text{ g}$	0,15 g	3.002
4	E' la zona meno pericolosa, dove i terremoti sono rari ed è facoltà delle Regioni prescrivere l'obbligo della progettazione antisismica.	$a_g \leq 0,05 \text{ g}$	0,05 g	1.982

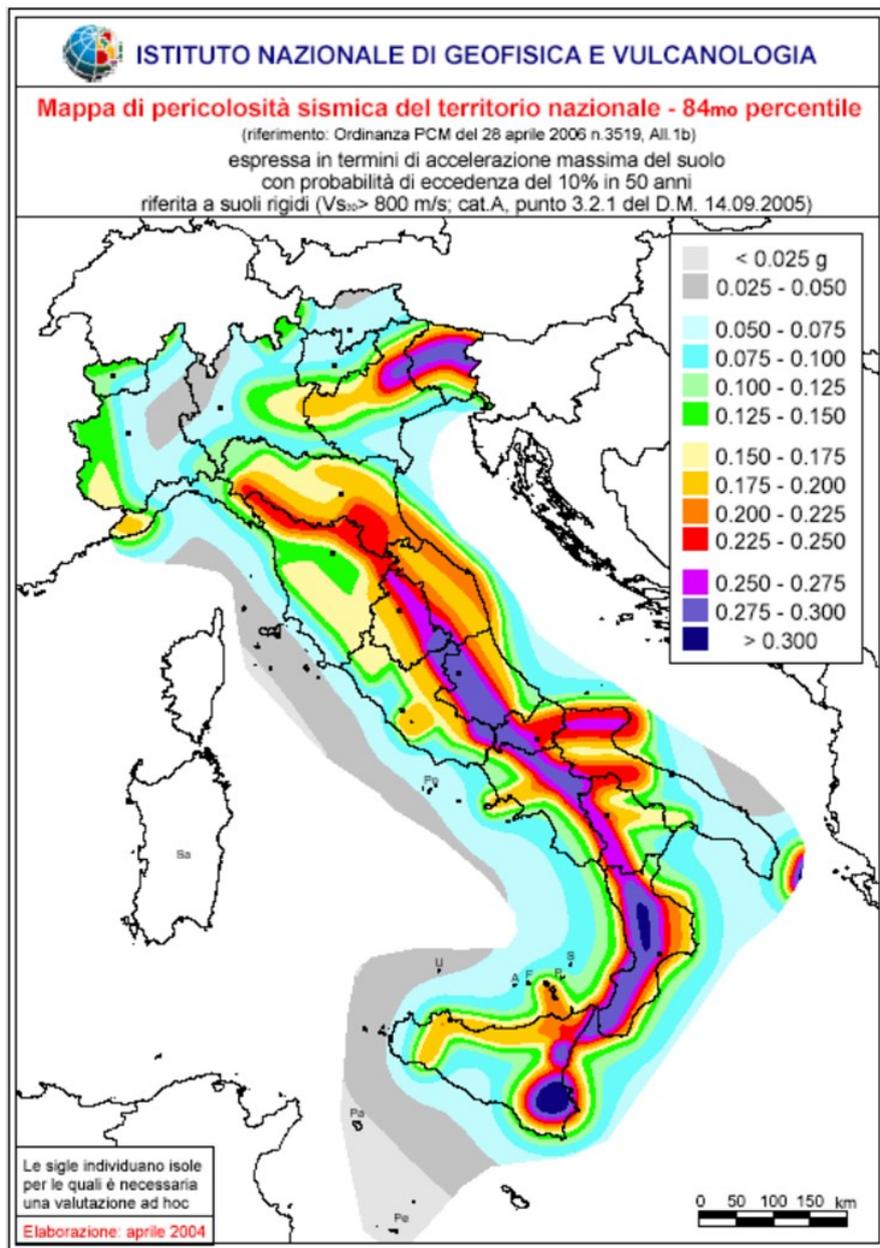


Figura 1- All.1b dell'Ordinanza PCM 3598 del 28/04/2006 - Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale in cui l'accelerazione massima del suolo viene espressa con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

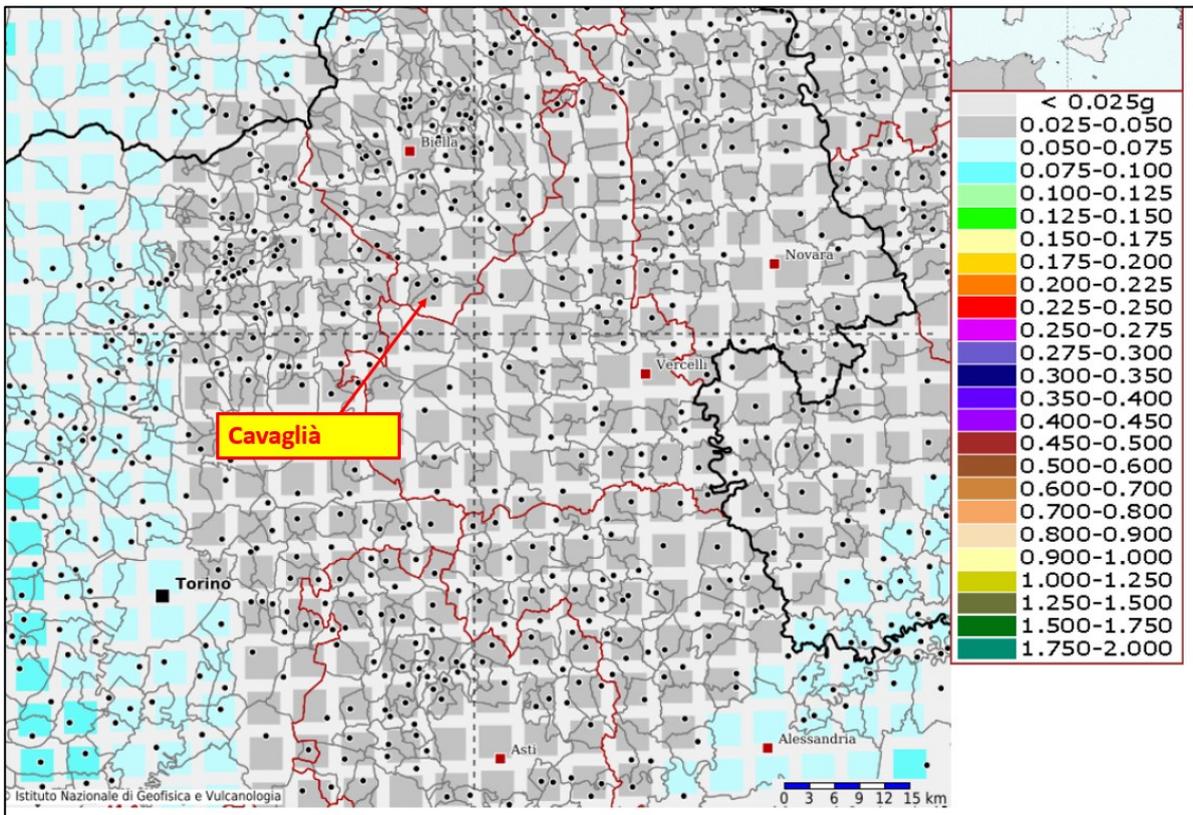


Figura 2- INGV - Mappa della pericolosità sismica del territorio nazionale – Comune di Cavaglià

In base all'Ordinanza PCM del 28 aprile 2006, sono state definite sulla base di più approfonditi studi, le zone di pericolosità sismica per il territorio nazionale ed è stata definita la mappa di pericolosità sismica MPSO4, espressa in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi ( $V_{s30} > 800$  m/s e  $TR = 475$  anni).

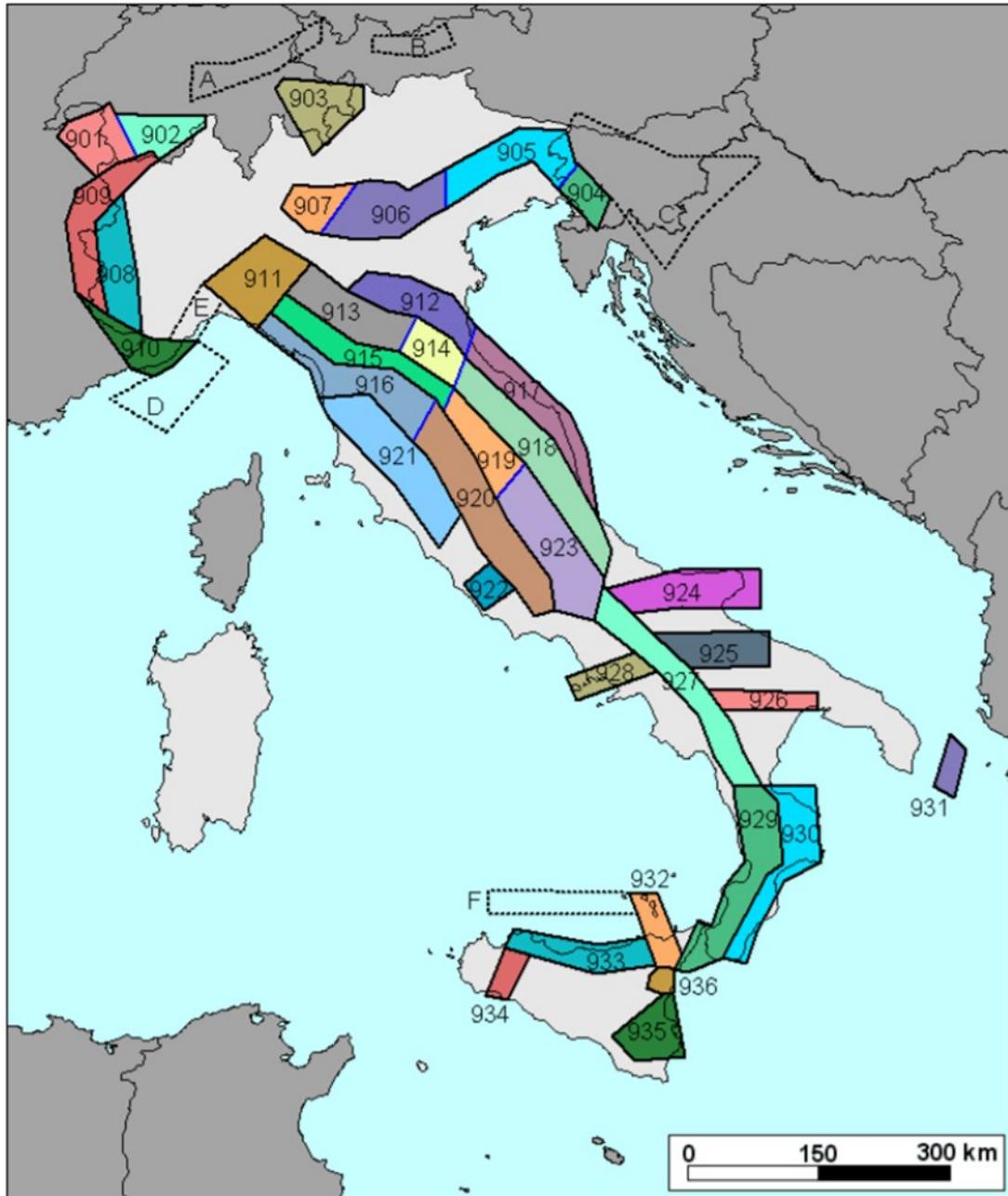
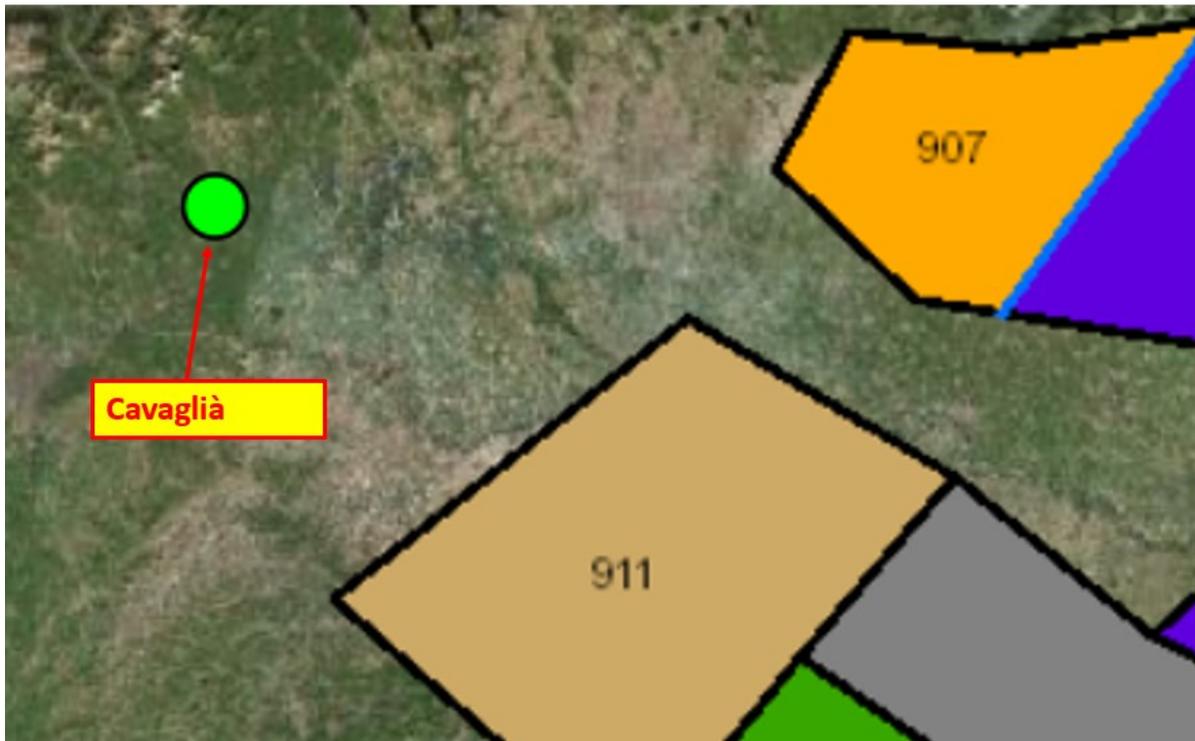


Figura 3 - sismogenetica ZS9



*Figura 4 - zonazione sismogenetica ZS9, dove l'area d'interesse è evidenziata da un cerchio verde.*

Come è possibile vedere alla figura precedente, l'area oggetto d'interesse non ricade all'interno di alcuna zona della zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti et al. 2008), utilizzata per la compilazione della mappa di pericolosità sismica MPS04.

Le figure seguenti mostrano la disaggregazione per l'area oggetto di studio della stima di PGA (Peak Ground Acceleration) con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 475 anni. Il grafico è una elaborazione che mostra il contributo delle sorgenti sismogenetiche alla pericolosità sismica di un certo sito: le sorgenti vengono discretizzate per intervalli di spazio e magnitudo.

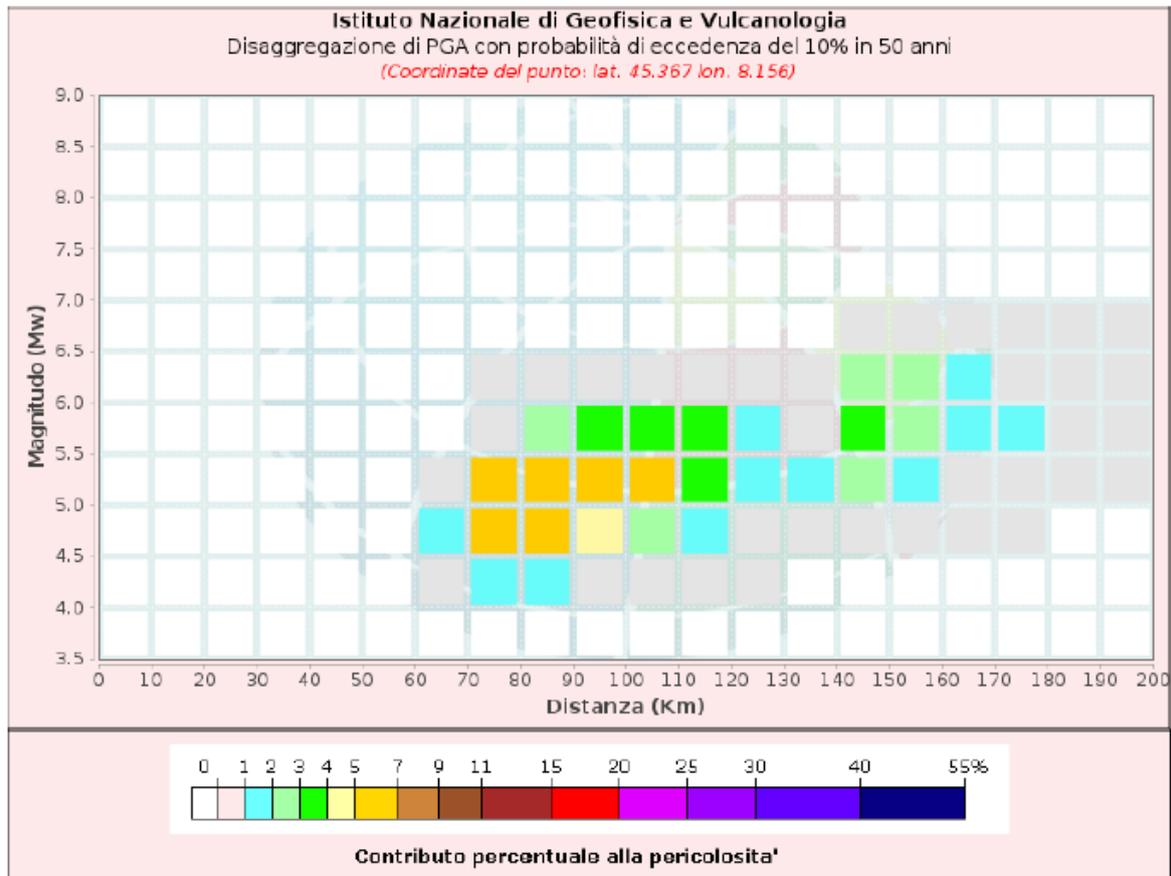
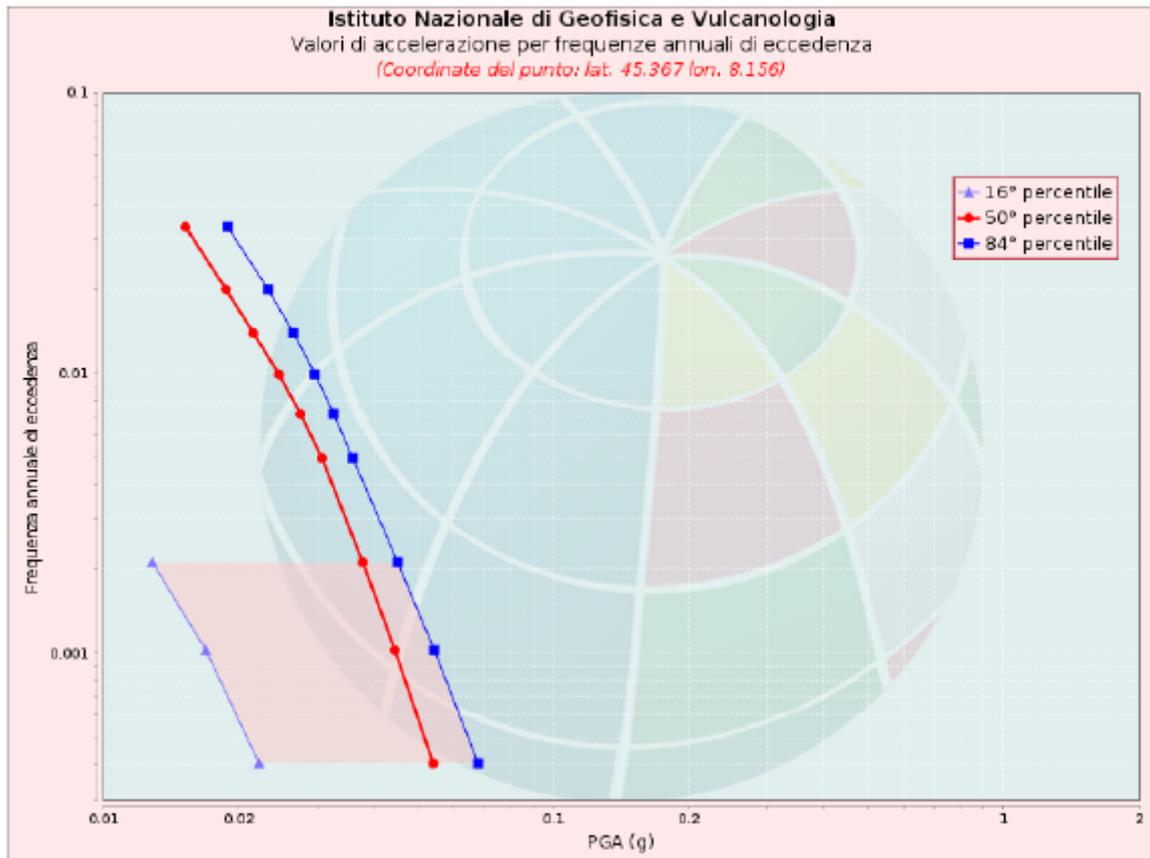


Figura 5 - Disaggregazione del valore  $a(g)$  con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (INGV).

Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni											
Distanza in Km	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.4570	1.0900	0.7440	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	1.9600	5.9000	5.1700	0.6640	0.1120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	1.3700	6.0600	6.9000	2.7700	0.4890	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.5040	4.5600	6.5100	3.9800	0.7180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0702	2.6700	5.0600	3.7600	0.6830	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0247	1.4700	3.7000	3.0700	0.5380	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
120-130	0.0000	0.0038	0.5950	1.8400	1.2200	0.1610	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
130-140	0.0000	0.0000	0.2590	1.0600	0.6720	0.0799	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
140-150	0.0000	0.0000	0.3830	2.2200	3.4000	2.9100	0.0420	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
150-160	0.0000	0.0000	0.1390	1.4300	2.4900	2.1800	0.0436	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
160-170	0.0000	0.0000	0.0287	0.7690	1.5600	1.3500	0.0505	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
170-180	0.0000	0.0000	0.0018	0.4070	1.0200	0.8430	0.0538	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
180-190	0.0000	0.0000	0.0000	0.1510	0.5070	0.3580	0.0543	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
190-200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0698	0.3410	0.2660	0.0531	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

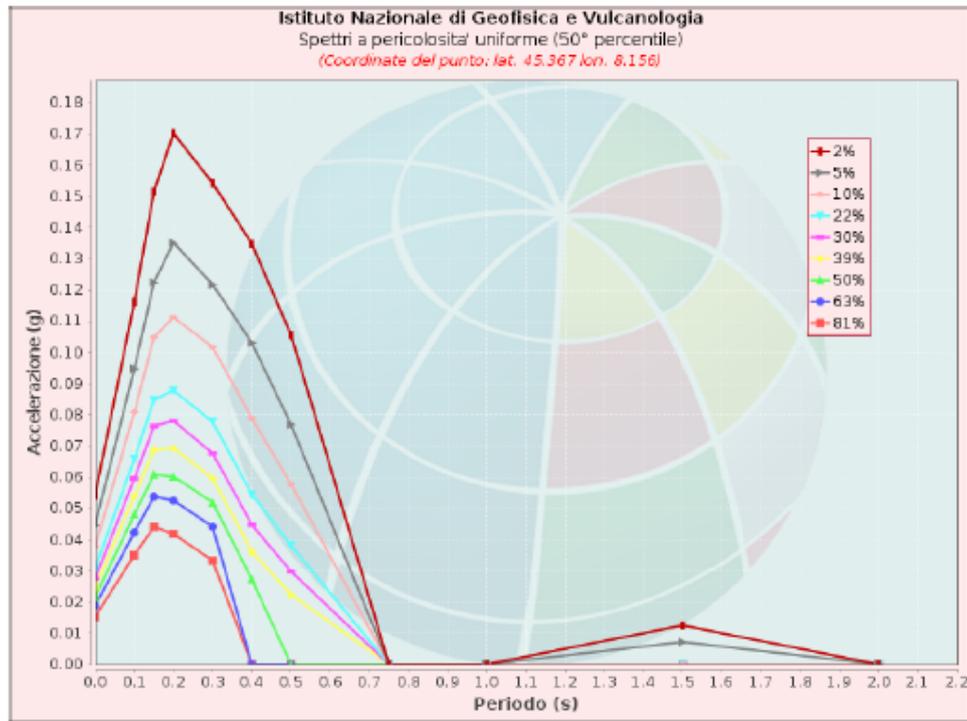
Valori Medi: magnitudo = 5.34 ; distanza = 109.0 ; epsilon = 2.02

Figura 6 - Disaggregazione del valore a(g) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (INGV).



Valori di accelerazione per frequenze annuali di eccedenza			
Frequenza annuale di ecc.	PGA (g)		
	16° percentile	50° percentile	84° percentile
0.0004	0.022	0.054	0.068
0.0010	0.017	0.045	0.055
0.0021	0.013	0.038	0.045
0.0050	0.000	0.031	0.036
0.0071	0.000	0.027	0.033
0.0099	0.000	0.025	0.030
0.0139	0.000	0.022	0.027
0.0199	0.000	0.019	0.023
0.0332	0.000	0.015	0.019

Figura 7 - Curve di pericolosità



Spettri a pericolosità uniforme (50° percentile)											
PoE in 50 anni	Accelerazione (g)										
	Periodo (s)										
	0.0	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0
2%	0.054	0.116	0.152	0.170	0.154	0.135	0.106	0.000	0.000	0.013	0.000
5%	0.045	0.095	0.122	0.135	0.122	0.103	0.077	0.000	0.000	0.007	0.000
10%	0.038	0.081	0.105	0.111	0.102	0.079	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000
22%	0.031	0.066	0.085	0.088	0.078	0.054	0.038	0.000	0.000	0.000	0.000
30%	0.027	0.060	0.076	0.078	0.068	0.045	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000
39%	0.025	0.054	0.069	0.069	0.060	0.036	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000
50%	0.022	0.048	0.061	0.060	0.052	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
63%	0.019	0.042	0.054	0.053	0.044	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
81%	0.015	0.035	0.044	0.042	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Figura 8: Spettri a pericolosità uniforme

## 9.2 CPTI15-DBMI15 V 2.0

Il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15) fornisce dati parametrici omogenei, sia macrosismici, sia strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  o magnitudo  $\geq 4.0$

d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2017. I dati macrosismici a supporto di CPTI15 costituiscono il Database Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15 release 2.0; Locati et al., 2019). CPTI15 è consultabile e all'indirizzo <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15> e attraverso il “web service” dell'Archivio Storico Macrosismico Italiano (ASMI) all'indirizzo <https://emidius.mi.ingv.it/ASMI/services/>. I parametri derivano dall'analisi, dal trattamento e dall'armonizzazione, secondo le più avanzate procedure, di dati provenienti da 189 studi storico-macrosismici pubblicati fino a tutto il 2019 e da 48 cataloghi strumentali, sia italiani, sia internazionali (Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli, B., Gasperini P., 2019. *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)*).

Il Database Macrosismico Italiano (DBMI15) fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2017.

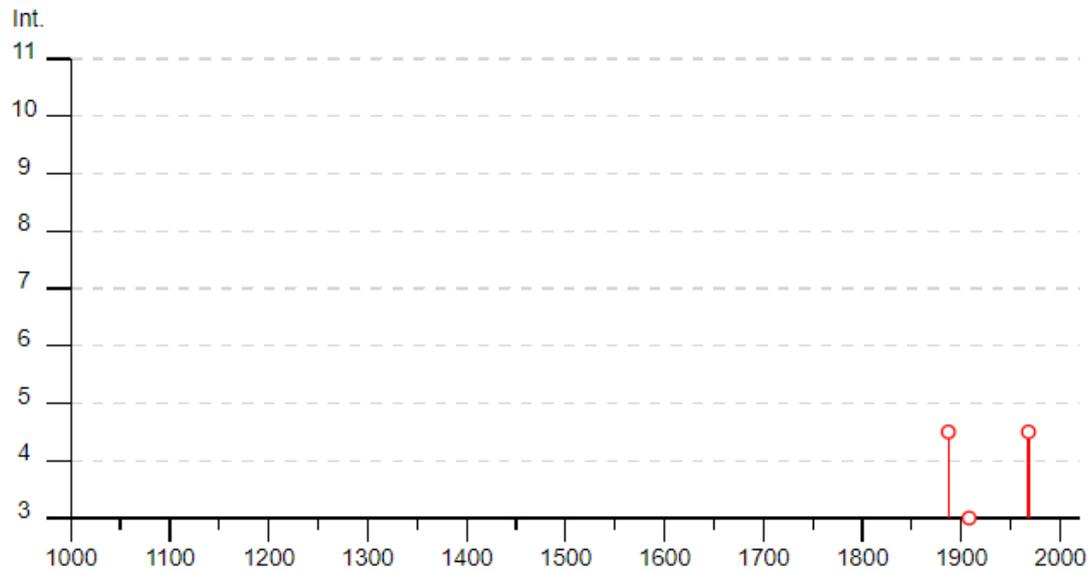
Il DBMI v2.0 fornisce un set di dati di intensità macrosismica relativo ai terremoti italiani aggiornato alla finestra temporale 1000-2017. I dati provengono da studi di autori ed enti diversi, sia italiani che di paesi confinanti (Francia, Svizzera, Austria, Slovenia e Croazia).

I dati di intensità macrosismica (MDP, Macroseismic Data Point) sono raccolti e organizzati da DBMI per fornire una base di dati per la determinazione dei parametri epicentrali dei terremoti (localizzazione e stima della magnitudo) per la compilazione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI).

Dato il loro stretto legame, DBMI e CPTI sono stati pubblicati insieme e usano una stessa numerazione (DBMI04-CPTI04, DBMI11-CPTI11), ma in due diversi siti web. Di seguito viene riportata la mappa del catalogo CPTI15 desunta dal sito [https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query\\_eq/](https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_eq/).

## Cavaglià

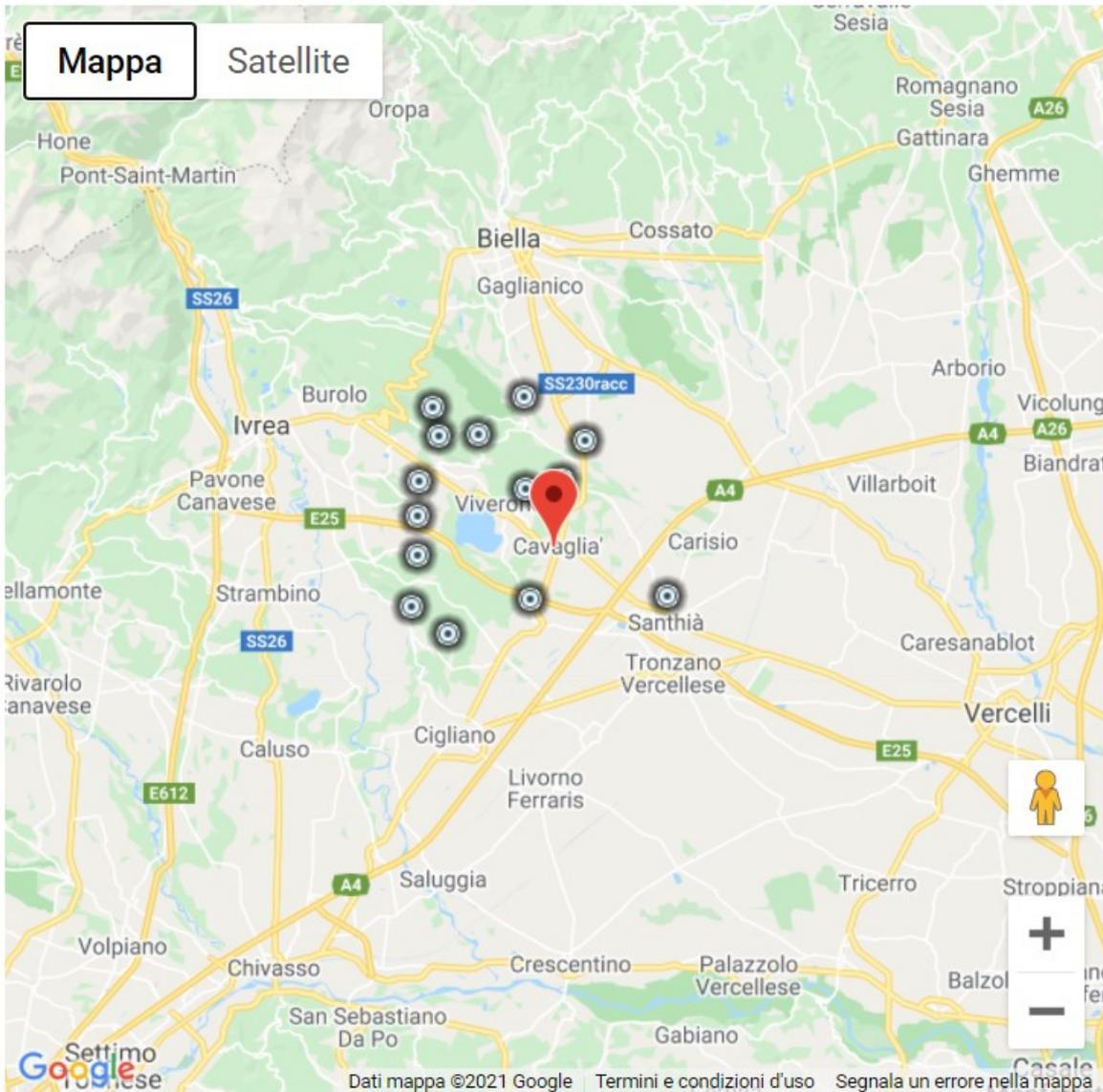
PlaceID	IT_02947
Coordinate (lat, lon)	45.404, 8.092
Comune (ISTAT 2015)	Cavaglià
Provincia	Biella
Regione	Piemonte
Numero di eventi riportati	5



Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
4-5	1887	02	23	05	21	50	Liguria occidentale	1511	9	6.27
3	1908	05	24	08	37		Piemonte centro-settentrionale	36	4	4.10
2-3	1960	03	23	23	10		Vallese	178	7	5.00
4-5	1968	06	18	05	27		Valle d'Aosta	60	6	4.86
NF	2005	09	08	11	27	0	Massif du Mont-Blanc	281		4.44

Località vicine (entro 10km)

Località	EQs	Distanza (km)
Dorzano	1	2
Roppolo	1	3
Alice Castello	2	5
Salussola	1	5
Zimone	1	7
Cerrione	2	7
Santhià	2	8
Settimo Rottaro	1	8
Cossano Canavese	2	8
Azeglio	6	8
Piverone	2	8
Maglione	3	9
Borgomasino	2	9
Magnano	3	9



[Visualizza Cavaglia' in [Google Maps](#), [Bing Maps](#)]

Figura 9 - Dati desunti dalla consultazione del CPTI15 e DBMI15 per l'area di Cavaglia'

### 9.3 INDAGINI SISMICHE

#### 9.3.1 PROVA SISMICA MASW

Lo studio è consistito nell'esecuzione di n°2 stendimenti sismici con metodologia MASW, per la determinazione del profilo verticale delle onde di taglio e del valore  $V_{s,eq}$ , necessario per la classificazione dei terreni di fondazione degli interventi in progetto nelle categorie di suolo descritte al paragrafo 3.2.2 delle N.T.C. 2018 "D.M. 17 del 17/01/2018".

L'acquisizione dei dati sismici è così avvenuta:

- **metodo attivo**: è stata effettuata 2 stese sismiche con passo intergeofonico di 3 metri e 16

geofoni utilizzando la tecnica dell'interlaccio, ottenendo un profilo sismico equivalente ad una stesa di 32 geofoni e passo 1,5 metri ubicata come dalla planimetria riportata di seguito.

Si sono acquisiti vari shot ad entrambi gli estremi del profilo in modo da avere un maggior set di dati e poter scegliere quelli più adatti alla successiva elaborazione. La frequenza propria dei sensori è la classica e raccomandata per tale tipologia di indagini (4,5 Hz).

- **metodo passivo:** sulle stesse stese utilizzate per il metodo attivo si sono realizzate 2 acquisizioni di sismica passiva, di 1 minuto ciascuna, concatenate, in fase di pre-processing, in un unico file di 2 minuti, in modo da colmare il “vuoto” alle basse frequenze della sismica attiva.

L'indagine sismica, considerando la sismostratigrafia fino alla profondità di -30,00 metri da p.c., ha permesso la determinazione della velocità delle  $V_{seq}$ , ricavata dalla formula riportata nel D.M. 17 del 17 Gennaio 2018 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove  $h_i$  e  $V_{S,i}$  rappresentano rispettivamente lo spessore e la velocità di propagazione delle onde di taglio attraverso lo strato  $i$ -esimo entro 30 metri di profondità.  $H$  rappresenta la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzato da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

### 9.3.1.1 RISULTATI DELL'INDAGINE SISMICA

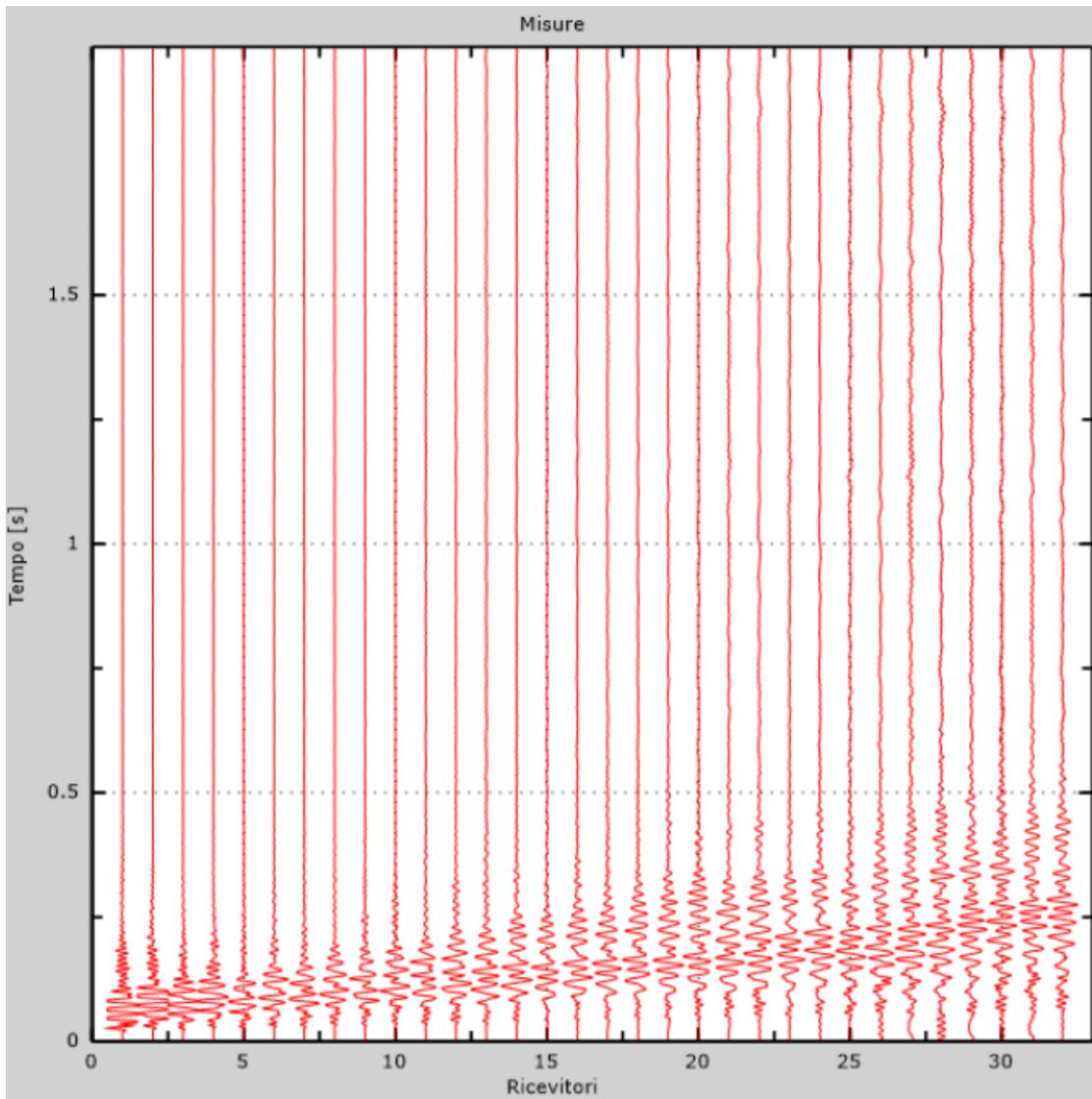
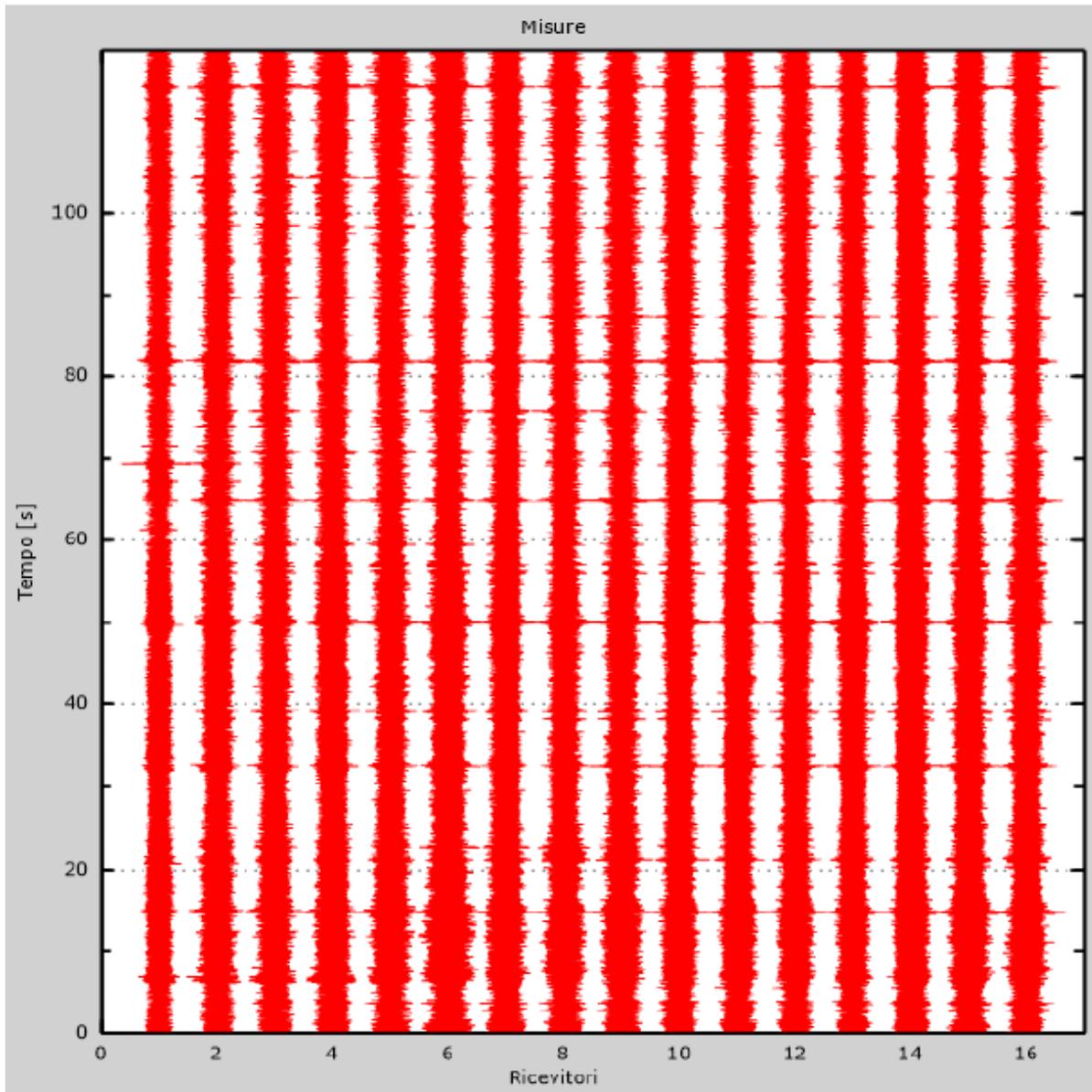


Figura 10 - Tracce sperimentali indagine attiva



*Figura 11- Tracce sperimentali indagine passiva*

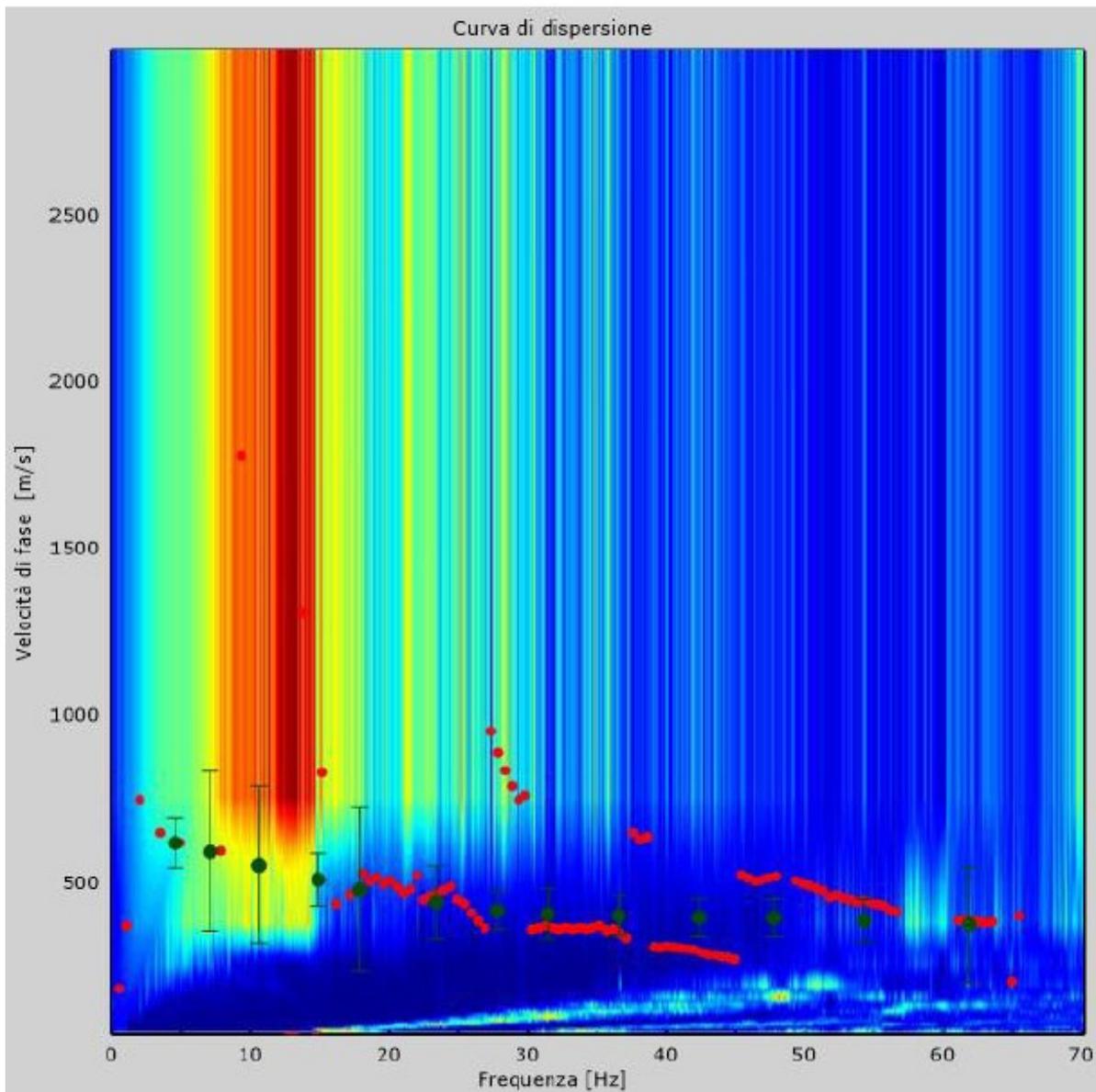


Figura 12- Curva di dispersione sperimentale

Dall'esecuzione dell'indagine sismica è emersa la seguente successione della velocità delle onde sismiche.

Strato	h [m]	z [m]	Vs fin. [m/s]
Strato 1	2,0	-2,0	425
Strato 2	3,0	-5,0	404
Strato 3	3,0	-8,0	459
Strato 4	4,0	-12,0	536
Strato 5	4,0	-16,0	591
Strato 6	10,0	-26,0	623
Strato 7	6,0	-32,0	665
Strato 8	/	-∞	702

Di seguito si riportano le immagini relative alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh e del modello che ne deriva previa inversione dei dati.

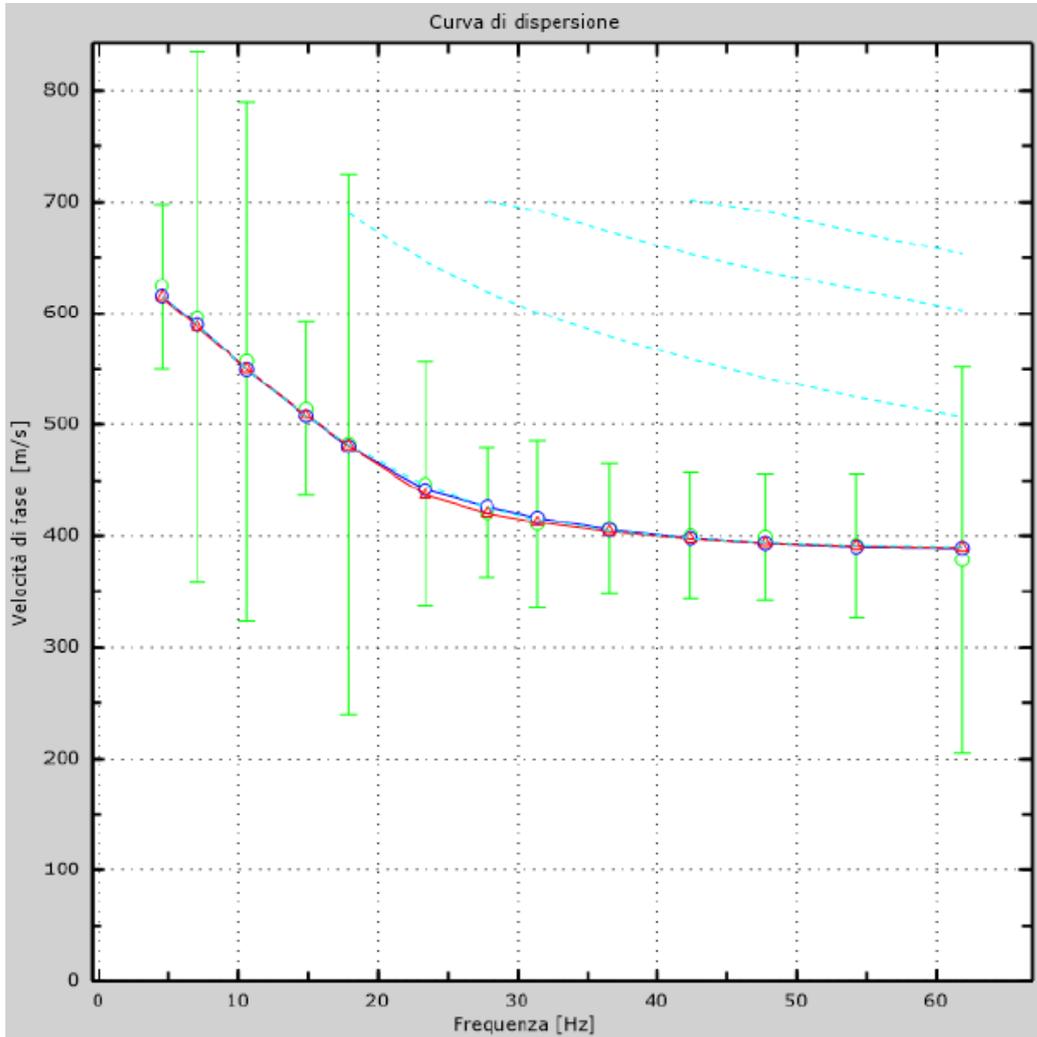


Figura 13 - Velocità numeriche (Punti sperimentali - verde, modi di Rayleigh - ciano, curva apparente - blu, curva numerica – rosso)

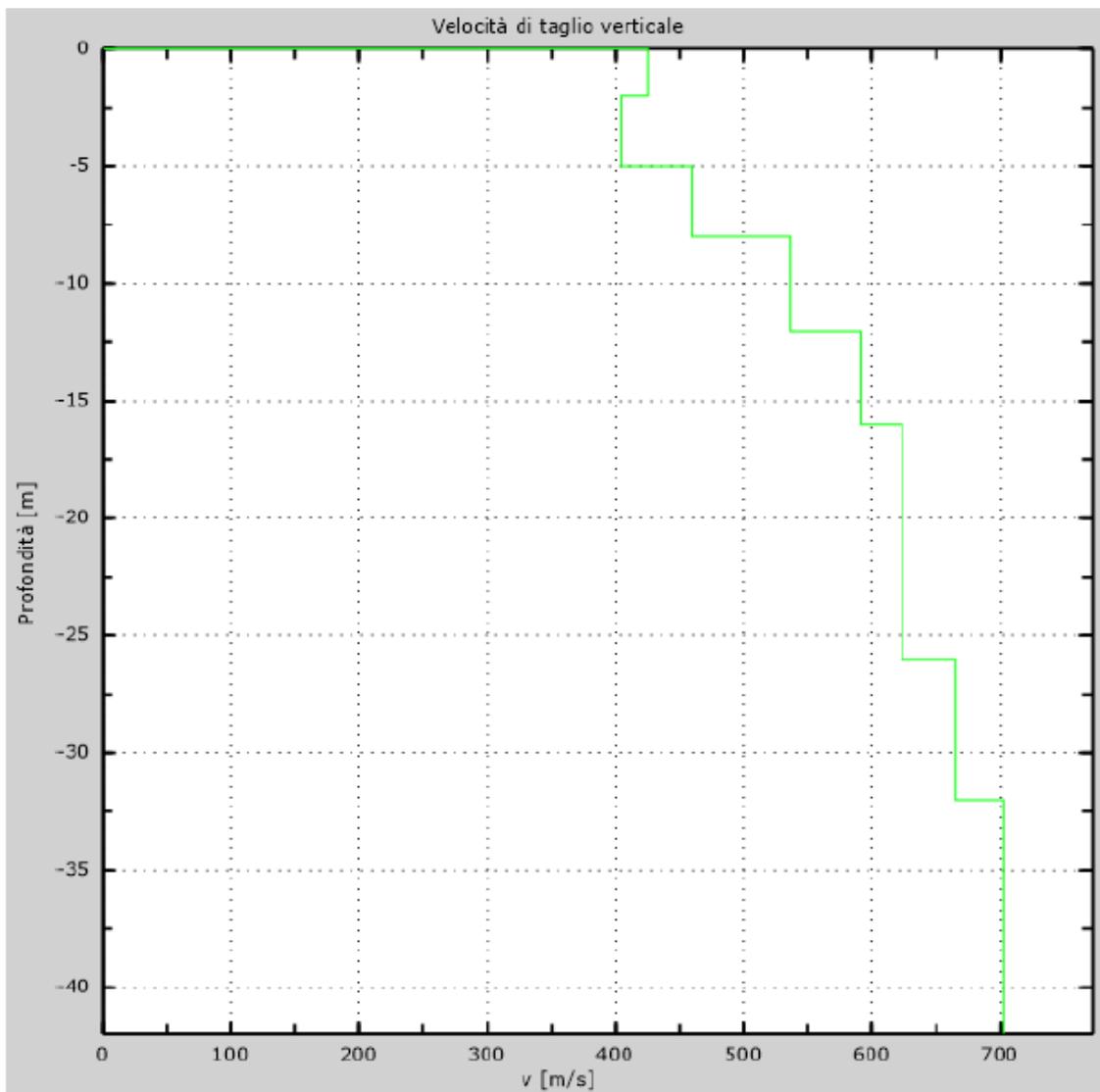


Figura 14- Profilo verticale di velocità delle Vs

$$V_{seq} = 545 \text{ m/s}$$

I terreni di fondazione interessati dalla progettazione sismica, come prescritto al paragrafo 3.2.2 dal D.M. 17 Gennaio 2018, appartengono a:

**Suolo di fondazione di tipo B**

ovvero, come definito in Tabella 3.2.II (Categorie di sottosuolo): Tipo B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

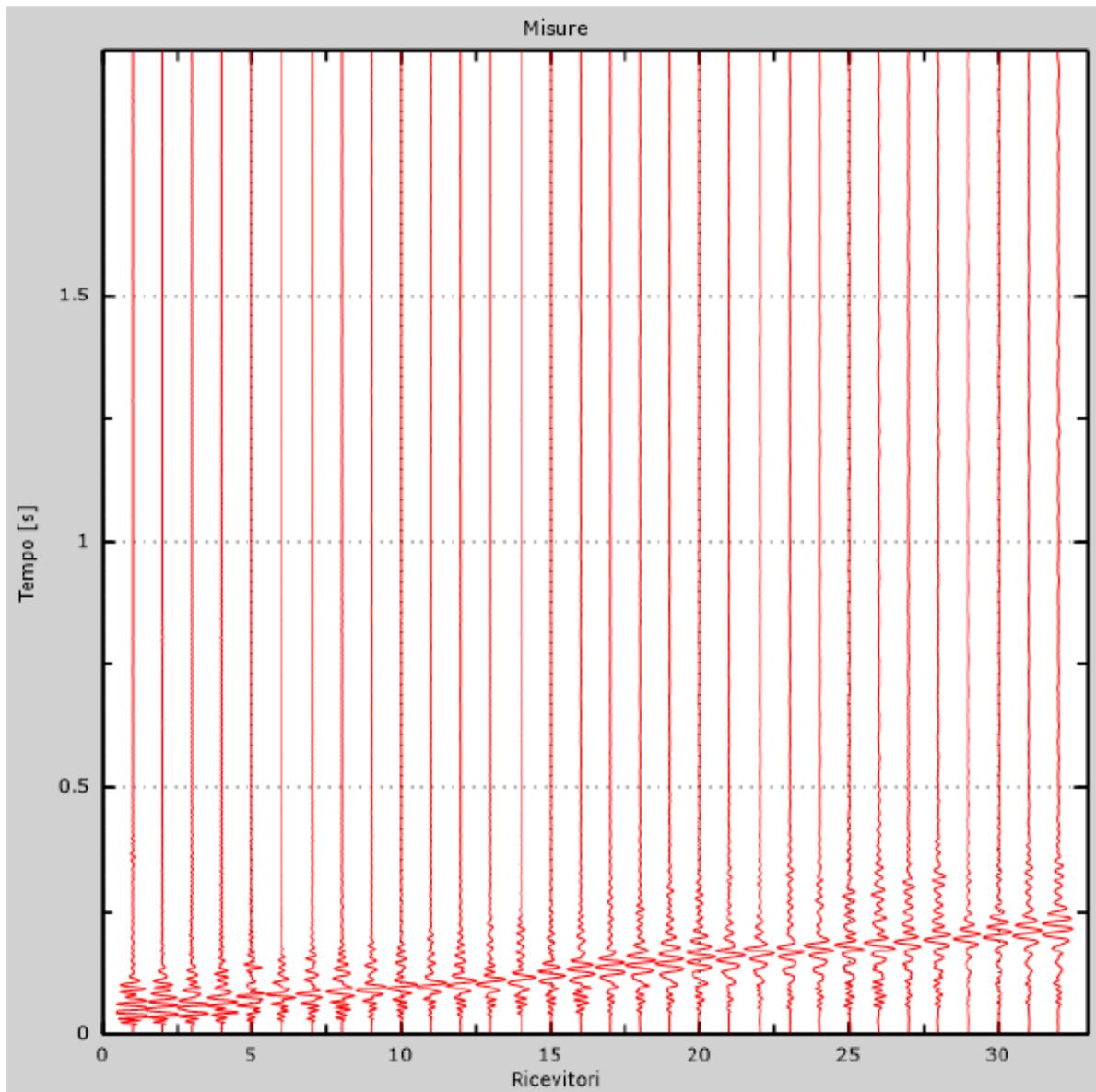
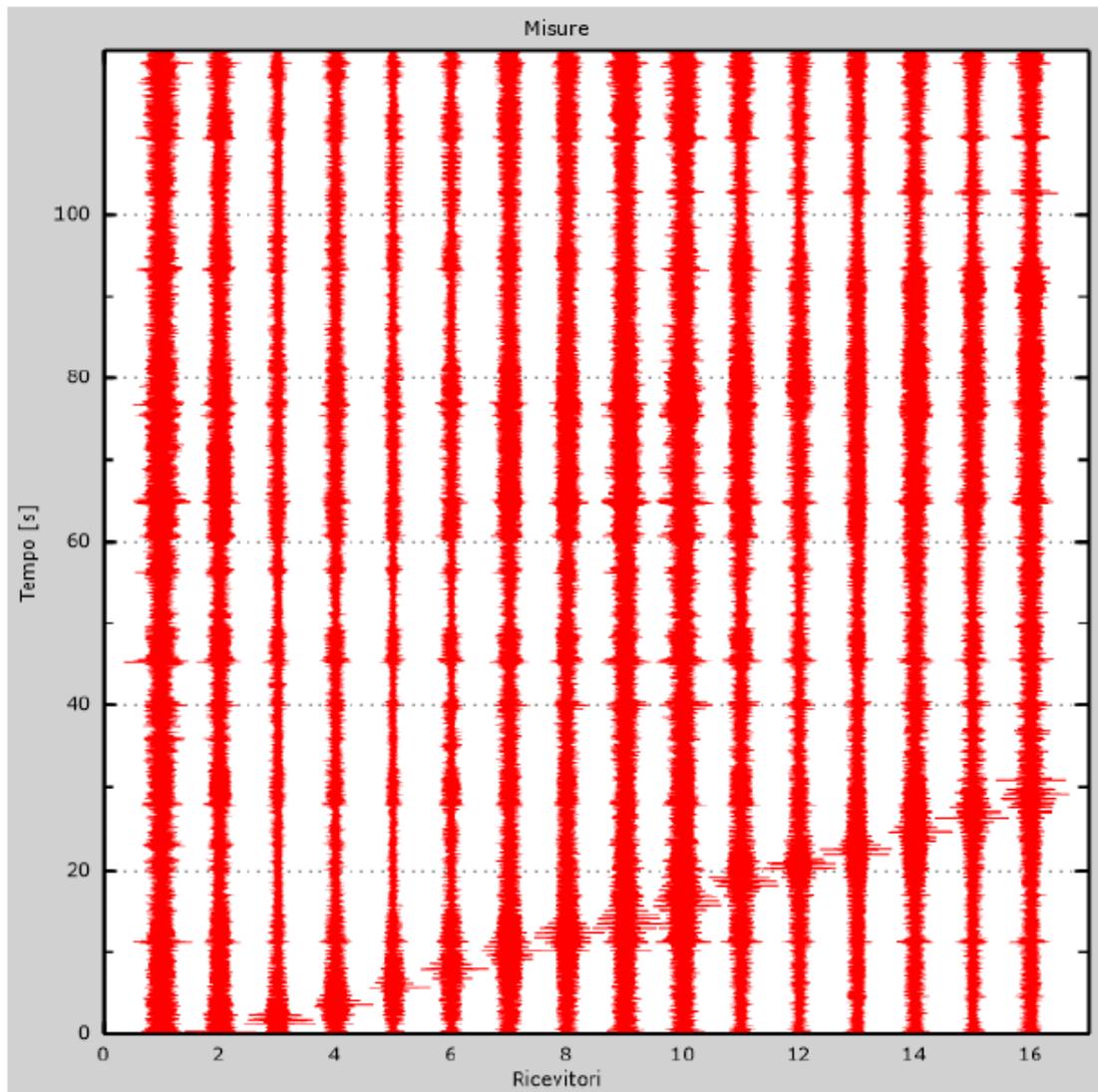


Figura 15 - Tracce sperimentali indagine attiva



*Figura 16 - Tracce sperimentali indagine passiva*

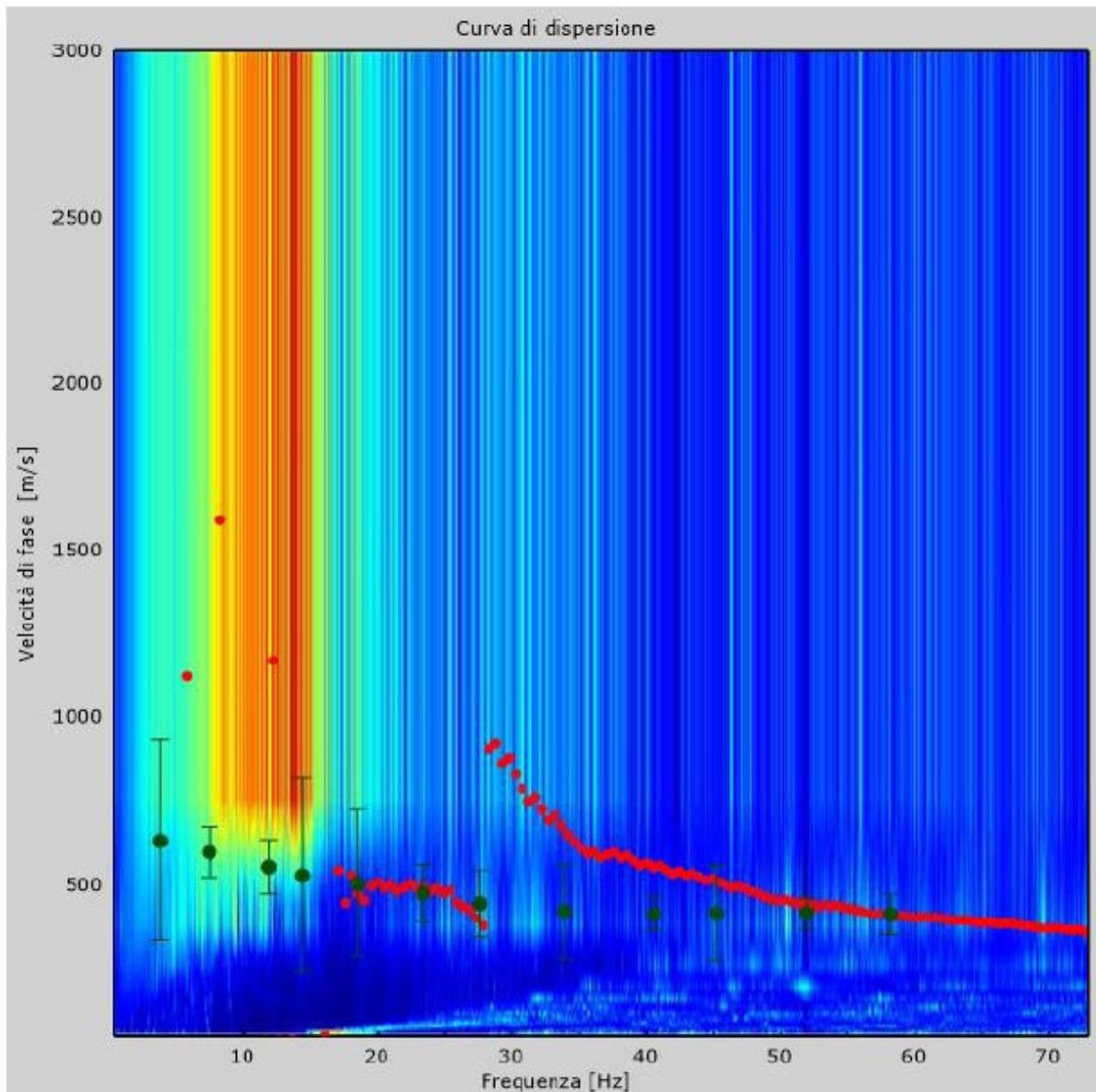


Figura 17 - Curva di dispersione sperimentale

Dall'esecuzione dell'indagine sismica è emersa la seguente successione della velocità delle onde sismiche.

Strato	h [m]	z [m]	Vs fin. [m/s]
Strato 1	2,0	-2,0	470
Strato 2	3,0	-5,0	400
Strato 3	3,0	-8,0	487
Strato 4	4,0	-12,0	561
Strato 5	4,0	-16,0	588
Strato 6	10,0	-26,0	627
Strato 7	6,0	-32,0	679
Strato 8	/	-∞	706

Di seguito si riportano le immagini relative alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh e del modello che ne deriva previa inversione dei dati.

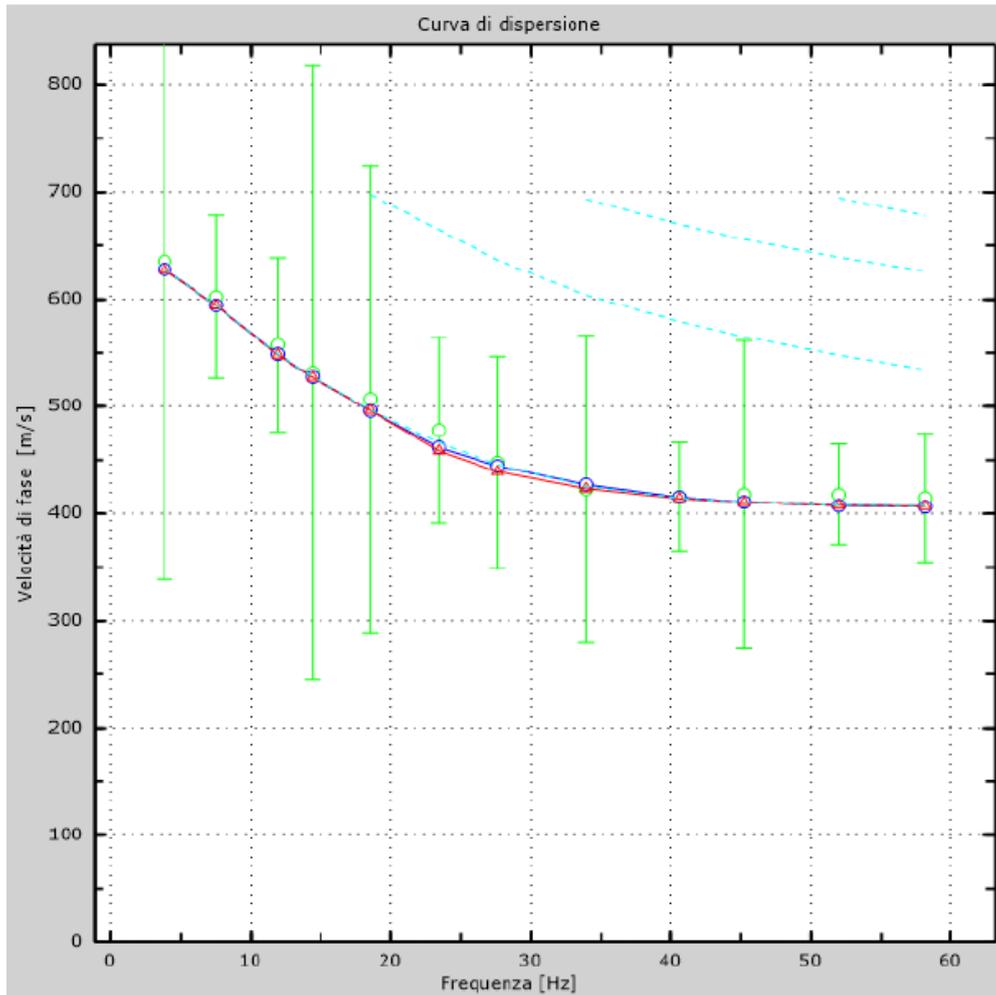


Figura 18 - Velocità numeriche (Punti sperimentali - verde, modi di Rayleigh - ciano, curva apparente - blu, curva numerica - rosso)

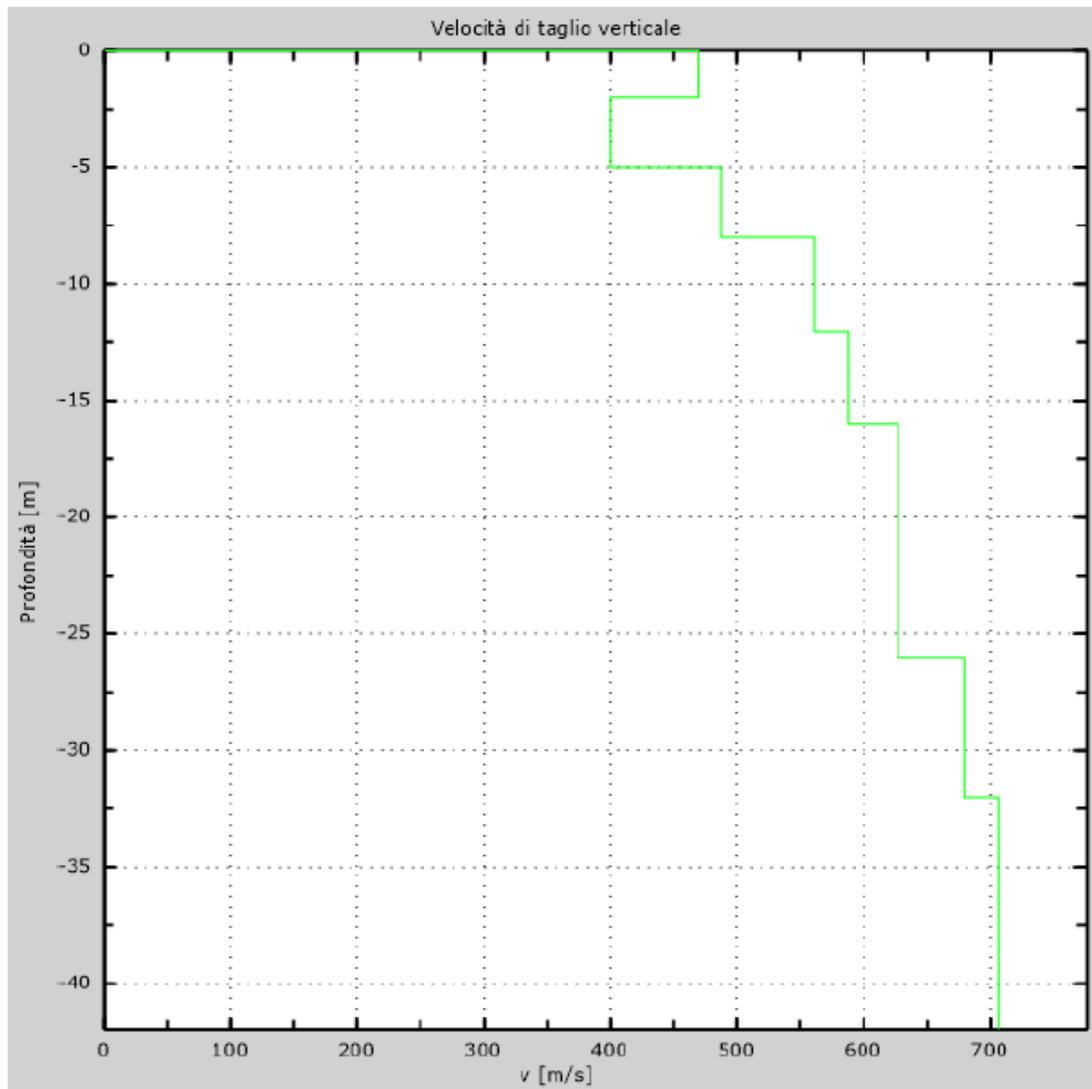


Figura 19 - Profilo verticale di velocità delle Vs

**Vseq = 558 m/s**

I terreni di fondazione interessati dalla progettazione sismica, come prescritto al paragrafo 3.2.2 dal D.M. 17 Gennaio 2018, appartengono a:

**Suolo di fondazione di tipo B**

ovvero, come definito in Tabella 3.2.II (Categorie di sottosuolo): Tipo B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

## 9.4 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO

Per quanto riguarda la determinazione della categoria di sottosuolo il D.M. 17.01.2018 prevede una classificazione in cinque categorie principali riportate nella tabella 3.2. Il (fig. definite in base ai valori della velocità equivalente  $V_{s,eq}$  corrispondente alla velocità media di propagazione delle onde sismiche di taglio fino alla profondità del substrato sismico, definito come quella formazione caratterizzata da VS non inferiore a 800 m/s. Per depositi con profondità di tale substrato superiore a 30m la velocità equivalente  $V_{s,eq}$  è definita dal parametro  $V_{s,30}$ , considerando le proprietà degli strati di terreno fino alla profondità di 30m.

L'espressione per la determinazione della velocità equivalente  $V_{s,eq}$  è la seguente:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_i^N \frac{h_i}{V_i}}$$

$h_i$  = Spessore in metri dello strato i-esimo

$V_i$  = Velocità dell'onda di taglio i-esima

$N$  = Numero di strati

$H$  = Profondità del substrato sismico con  $V_s > 800$  m/s

Per il sito in esame la categoria di sottosuolo è stata determinata tramite i dati ottenuti dagli stendimenti sismica con metodologia M.A.S.W e HVSR eseguite in corrispondenza dell'area di indagine.

Dall'elaborazione di tali dati il terreno presenta per la linea eseguita, valori delle  $V_{s30}$  pari a **545.0 m/s** per la prova MASW 1 e  $V_{s30}$  pari a **558.0 m/s** per la prova MASW 1 riferita all'attuale piano campagna per quello che riguarda l'area.

Per la classificazione del suolo si è ritenuto più attendibile adottare le risultanze provenienti dalle prove eseguite in sito per cui il terreno è pertanto classificabile in **categoria B**: *“Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360m/s e 800m/s”*.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Figura 5: Tabella 3.2. Il “Categoria di sottosuolo” – D.M. 17.10.2018

## 9.5 CATEGORIA TOPOGRAFICA

Secondo la più recente revisione delle Norme Tecniche in vigore, per configurazioni superficiali semplici si può adottare la seguente classificazione (categorie topografiche da NTC2018):

- T1 Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$
- T2 Pendii con inclinazione media  $i > 15^\circ$
- T3 Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media  $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
- T4 Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media  $i > 30^\circ$

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $\leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15 \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

La categoria topografica è T1

**9.6 PERICOLOSITÀ SISMICA**

**9.6.1 VITA NOMINALE, CLASSI D'USO E PERIODO DI RIFERIMENTO**

Nel DM 17 gennaio 2018-Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» il periodo di riferimento, che non può essere inferiore a 35 anni, è dato dalla seguente relazione:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

dove:

VR = periodo di riferimento

VN = vita nominale

CU = coefficiente d'uso

La vita nominale di un'opera strutturale VN, secondo le NTC 2018, è definita come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata e viene definita attraverso tre diversi valori, a seconda dell'importanza dell'opera e perciò delle esigenze di durabilità.

I valori minimi di VN da adottare per i diversi tipi di costruzione sono riportati nella Tabella 2 Tali valori possono essere anche impiegati per definire le azioni dipendenti dal tempo.

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di VN (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

*Tabella 2 - Valori minimi della Vita nominale VN di progetto per i diversi tipi di costruzioni*

Nel caso specifico VN = 50 anni.

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. Le NTC 2018 prevedono quattro classi d'uso a ciascuna delle quali è associato un valore del coefficiente d'uso:

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.  $CU = 0.7$ ;

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.  $CU = 1.0$ ;

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.  $CU = 1.5$ ;

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.  $CU = 2.0$ ;

#### **9.6.2 STATI LIMITE, PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO E PERIODO DI RITORNO**

Le NTC 2018 prendono in considerazione 4 possibili stati limite (SL) individuati facendo riferimento alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti: due sono stati limite di esercizio (SLE) e due sono stati limite ultimi (SLU). Uno stato limite è una condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per la quale è stata progettata.

Più in particolare le opere e le varie tipologie strutturali devono essere dotate di capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio (sicurezza nei confronti di SLE) e di capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e di dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere

l'incolumità delle persone o comportare la perdita di beni, oppure provocare gravi danni ambientali e sociali, oppure mettere fuori servizio l'opera (sicurezza nei confronti di SLU).

Gli stati limite di esercizio sono:

Stato Limite di Operatività (SLO): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;

Stato Limite di Danno (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi sono:

Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;

Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Ad ogni stato limite è associata una probabilità di superamento PVR (Tabella 3), ovvero la probabilità che, nel periodo di riferimento VR, si verifichi almeno un evento sismico ( $n \geq 1$ ) di ag prefissata (ag = accelerazione orizzontale massima del suolo) avente frequenza media annua di ricorrenza  $\lambda = 1/TR$  (TR = periodo di ritorno).

Stato limite di esercizio: operatività	SLO	PVR = 81%
Stato limite di esercizio: danno	SLD	PVR = 63%
Stati limite ultimo: salvaguardia della vita	SLV	PVR = 10%
Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso	SLC	PVR = 5%

*Tabella 3 Stati limite e rispettive probabilità di superamento, nel periodo di riferimento VR*

Fissati VR e PVR associata ad ogni stato limite, è possibile calcolare il periodo di ritorno dell'azione sismica TR, espresso in anni, mediante l'espressione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

Tale relazione tra PVR (probabilità) e TR (statistica) risulta biunivoca poiché utilizza la distribuzione discreta Poissoniana.

Poiché è VR = 50 anni, il tempo di ritorno TR sarà:

Stato limite di esercizio: operatività	SLO	TR = 30
Stato limite di esercizio: danno	SLD	TR = 50
Stati limite ultimo: salvaguardia della vita	SLV	TR = 475
Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso	SLC	TR = 975

*Tabella 4 Stati limite e rispettivi tempi di ritorno, nel periodo di riferimento VR*

### **9.6.3 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE**

La pericolosità sismica di base, cioè le caratteristiche del moto sismico atteso al sito di interesse, nelle NTC 2018, per una determinata probabilità di superamento, si può ritenere definita quando vengono designati un'accelerazione orizzontale massima (ag) ed il corrispondente spettro di risposta elastico in accelerazione, riferiti ad un suolo rigido e ad una superficie topografica orizzontale.

Per poter definire la pericolosità sismica di base le NTC 2018 si rifanno ad una procedura basata sui risultati disponibili anche sul sito web dell'INGV <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>, nella sezione “Mappe interattive della pericolosità sismica”.

Secondo le NTC 2018 le forme spettrali sono definite per 9 differenti periodi di ritorno TR (30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 e 2475 anni) a partire dai valori dei seguenti parametri riferiti a terreno rigido orizzontale, cioè valutati in condizioni ideali di sito, definiti nell'Allegato A alle NTC 2018:

$a_g$  = accelerazione orizzontale massima;

$F_0$  = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

$T_C^*$  = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I tre parametri si ricavano per il 50° percentile ed attribuendo a:

$a_g$ , il valore previsto dalla pericolosità sismica S1

$F_0$  e  $T_C^*$  i valori ottenuti imponendo che le forme spettrali in accelerazione, velocità e spostamento previste dalle NTC08 scartino al minimo dalle corrispondenti forme spettrali previste dalla pericolosità sismica S1 (il minimo è ottenuto ai minimi quadrati, su valori normalizzati).

I valori di questi parametri vengono forniti in tabella (Tabella 4.1), contenuta nell'Allegato B delle NTC 2018, per i 10751 punti di un reticolo di riferimento in cui è suddiviso il territorio nazionale, identificati dalle coordinate geografiche longitudine e latitudine.

ID	LON	LAT	TR = 30			TR = 50			TR = 72			TR = 101		
			ag	F0	T*c	ag	F0	T*c	ag	F0	T*c	ag	F0	T*c
13111	6.5448	45.1340	0.263	2.500	0.180	0.340	2.510	0.210	0.394	2.550	0.220	0.469	2.490	0.240
13333	6.5506	45.0850	0.264	2.490	0.180	0.341	2.510	0.210	0.395	2.550	0.220	0.469	2.490	0.240
13555	6.5564	45.0350	0.264	2.500	0.180	0.340	2.510	0.200	0.393	2.550	0.220	0.466	2.500	0.240
13777	6.5621	44.9850	0.263	2.500	0.180	0.338	2.520	0.200	0.391	2.550	0.220	0.462	2.510	0.240
12890	6.6096	45.1880	0.284	2.460	0.190	0.364	2.510	0.210	0.431	2.500	0.220	0.509	2.480	0.240
13112	6.6153	45.1390	0.286	2.460	0.190	0.366	2.510	0.210	0.433	2.500	0.220	0.511	2.480	0.240
13334	6.6210	45.0890	0.288	2.460	0.190	0.367	2.510	0.210	0.434	2.500	0.220	0.511	2.490	0.240
13556	6.6268	45.0390	0.288	2.460	0.190	0.367	2.510	0.210	0.433	2.510	0.220	0.510	2.490	0.240
13778	6.6325	44.9890	0.288	2.460	0.190	0.366	2.520	0.210	0.430	2.510	0.220	0.507	2.500	0.240
14000	6.6383	44.9390	0.286	2.470	0.190	0.363	2.520	0.210	0.426	2.520	0.220	0.502	2.500	0.240
14222	6.6439	44.8890	0.284	2.470	0.190	0.360	2.530	0.210	0.421	2.530	0.220	0.497	2.500	0.240
12891	6.6803	45.1920	0.306	2.430	0.200	0.389	2.500	0.210	0.467	2.470	0.230	0.544	2.490	0.230
10228	6.6826	45.7940	0.283	2.420	0.200	0.364	2.460	0.220	0.430	2.460	0.240	0.505	2.440	0.250
13113	6.6860	45.1430	0.309	2.430	0.200	0.391	2.510	0.210	0.470	2.470	0.230	0.546	2.490	0.230
10450	6.6885	45.7450	0.278	2.440	0.200	0.356	2.480	0.220	0.415	2.500	0.230	0.485	2.470	0.250
13335	6.6915	45.0930	0.310	2.430	0.200	0.392	2.510	0.210	0.470	2.480	0.230	0.546	2.500	0.230
10672	6.6942	45.6950	0.275	2.450	0.200	0.351	2.490	0.210	0.406	2.520	0.230	0.475	2.490	0.250
13557	6.6973	45.0430	0.311	2.440	0.200	0.392	2.520	0.210	0.469	2.480	0.230	0.545	2.500	0.230
13779	6.7029	44.9930	0.310	2.440	0.200	0.391	2.520	0.210	0.467	2.480	0.230	0.543	2.500	0.230

*Tabella 5- Stralcio della tabella contenuta nell'Allegato B delle NTC2018, che fornisce i 3 parametri di pericolosità sismica, per diversi periodi di ritorno e per ogni nodo del reticolo che viene identificato da un ID e dalle coordinate geografiche.*

Questi ID e relative coordinate fanno riferimento ad un reticolo di riferimento in cui è suddiviso il territorio nazionale, identificati dalle coordinate geografiche longitudine e latitudine.

Qualora la pericolosità sismica del sito sul reticolo di riferimento non consideri il periodo di ritorno TR corrispondente alla VR e PVR fissate, il valore del generico parametro p ad esso corrispondente potrà essere ricavato per interpolazione (Figura 20) a partire dai dati relativi ai tempi di ritorno previsti nella pericolosità di base, utilizzando la seguente espressione dell'Allegato A alle NTC08:

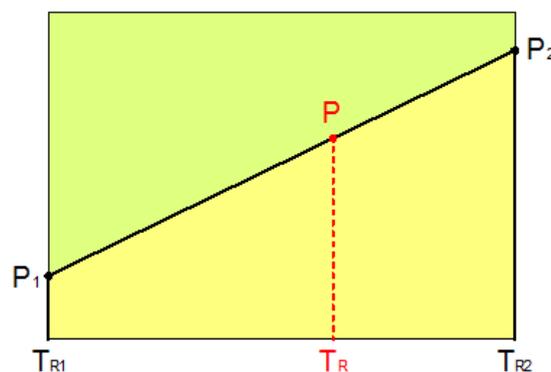
$$\log(p) = \log(p_1) + \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \left[\log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right)\right]^{-1}$$

nella quale  $p$  è il valore del parametro di interesse ( $ag$ ,  $Fo$ ,  $TC^*$ ) corrispondente al periodo di ritorno  $TR$  desiderato, mentre  $p_1$ ,  $2$  è il valore di tale parametro corrispondente al periodo di ritorno  $TR_1$ ,  $2$ .

Per un qualunque punto del territorio non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri  $p$  possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando l'espressione dell'Allegato A alle NTC 2018:

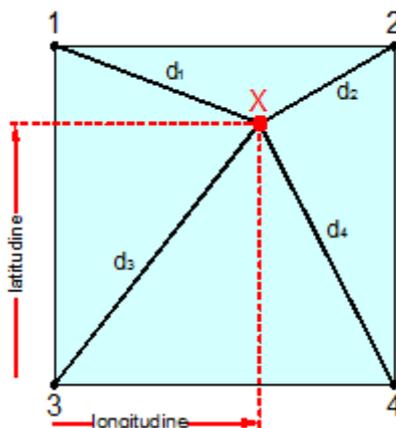
$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

nella quale  $p$  è il valore del parametro di interesse ( $ag$ ,  $Fo$ ,  $TC^*$ ) corrispondente al punto considerato,  $p_i$  è il valore di tale parametro nell' $i$ -esimo vertice della maglia elementare contenente il punto in esame e  $d_i$  è la distanza del punto in esame dall' $i$ -esimo vertice della suddetta maglia.



*Figura 20- Interpolazione dei periodi di ritorno, per ottenere i parametri di pericolosità sismica, in accordo alla procedura delle NTC 2018.*

La procedura per interpolare le coordinate geografiche è schematizzata nella Figura 21



*Figura 21- Interpolazione delle coordinate geografiche, per ottenere i parametri di pericolosità sismica, in accordo alla procedura delle NTC 2018.*

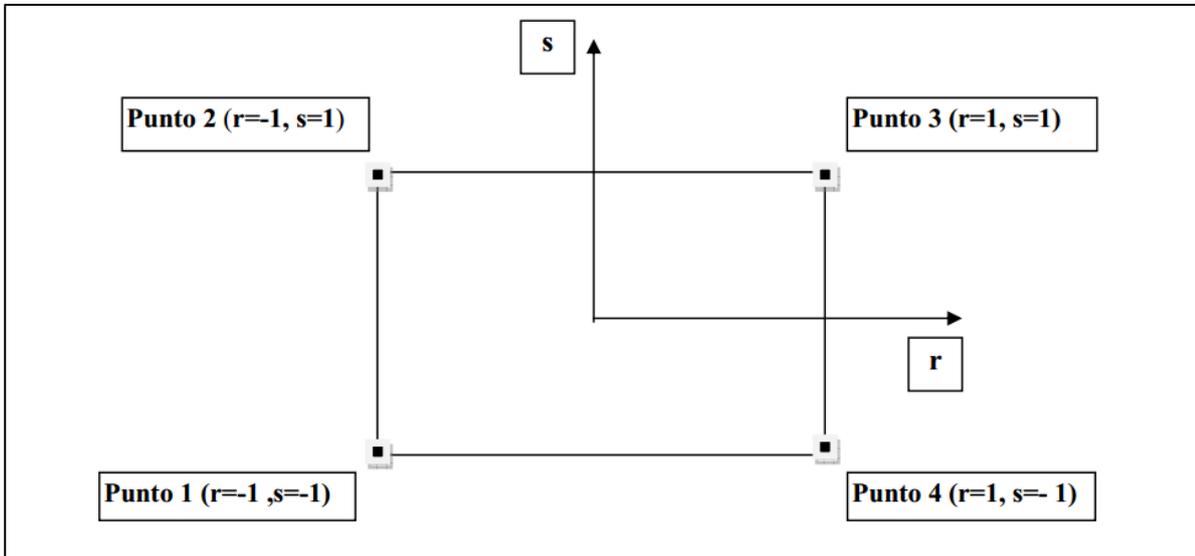
Pertanto, per poter procedere all'interpolazione delle coordinate geografiche, in accordo alla procedura delle NTC08, bisogna calcolare le distanze che intercorrono tra i 4 punti del reticolo e il punto di interesse. Questo calcolo può essere eseguito approssimativamente utilizzando le formule della trigonometria sferica, che danno la distanza geodetica tra due punti, di cui siano note le coordinate geografiche. Utilizzando quindi il teorema di Eulero, la distanza  $d$  tra due punti, di cui siano note latitudine e longitudine, espresse però in radianti, si ottiene dall'espressione seguente:

$$d = R \cdot \arccos[\sin(\text{lat}\beta) \cdot \sin(\text{lat}\alpha) + \cos(\text{lat}\beta) \cdot \cos(\text{lat}\alpha) \cdot \cos(\text{lon}\alpha - \text{lon}\beta)]$$

dove  $R = 6371$  è il raggio medio terrestre in km, mentre  $\text{lat}\alpha$ ,  $\text{lon}\alpha$ ,  $\text{lat}\beta$  e  $\text{lon}\beta$  sono la latitudine e la longitudine, espresse in radianti, di due punti A e B di cui si vuole calcolare la distanza.

La formula di interpolazione sopra proposta, semplice da usare, presenta però l'inconveniente di condurre a valori di pericolosità lievemente diversi per punti affacciati ma appartenenti a maglie contigue. La modestia delle differenze (scostamenti in termini di PGA dell'ordine di  $\pm 0,01g$  ossia della precisione dei dati) a fronte della semplicità d'uso, rende tale stato di cose assolutamente accettabile.

Qualora si vogliono rappresentazioni continue della funzione interpolata, si dovrà ricorrere a metodi di interpolazione più complessi, ad esempio i polinomi di Lagrange.



*Figura 22- Applicazione dell'interpolazione bilineare.*

Definiti i 4 vertici di una generica maglia i polinomi di Lagrange sono così determinati:

$$h_1 = (1-r) \cdot (1-s)/4$$

$$h_2 = (1-r) \cdot (1+s)/4$$

$$h_3 = (1+r) \cdot (1+s)/4$$

$$h_4 = (1+r) \cdot (1-s)/4$$

Tra le coordinate  $x, y$  di un punto generico e le coordinate  $r, s$  dello stesso punto valgono le seguenti relazioni:

$$4x = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot x_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot x_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot x_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot x_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot x_4]$$

$$4y = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot y_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot y_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot y_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot y_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot y_4]$$

La soluzione del sistema di equazioni non lineari è ottenuta iterativamente e, tramite i valori di r ed s, si determinano i parametri  $ag$ ,  $F0$ ,  $Tc^*$  dall'equazione:

$$4p = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot p_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot p_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot p_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot p_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot p_4]$$

Dove p rappresenta il parametro cercato.

#### 9.6.4 PERICOLOSITÀ SISMICA DI SITO

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. Per la singola opera o per il 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 (sottosuolo di categoria A, definito al § 3.2.2 delle NTC 2018).

##### 9.6.4.1 COEFFICIENTI SISMICI

I coefficienti sismici orizzontale  $k_h$  e verticale  $k_v$  dipendono del punto in cui si trova il sito oggetto di analisi e del tipo di opera da calcolare. Il parametro di entrata per il calcolo è il tempo di ritorno ( $T_R$ ) dell'evento sismico che è valutato come segue:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

Con  $V_R$  vita di riferimento della costruzione e  $P_{VR}$  probabilità di superamento, nella vita di riferimento, associata allo stato limite considerato. La vita di riferimento dipende dalla vita nominale della costruzione e dalla classe d'uso della costruzione (in linea con quanto previsto al punto 2.4.3 delle NTC). In ogni caso  $V_R$  non può essere inferiore a 35 anni.

**9.6.4.2 STABILITÀ DEI PENDII E FONDAZIONI**

Nel caso di stabilità dei pendii i coefficienti  $k_h$  e  $k_v$  sono così determinati:

$$k_h = \beta_s \cdot \left( \frac{a_{\max}}{g} \right)$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

Con

- $\beta_s$ : coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;
- $a_{\max}$ : accelerazione orizzontale massima attesa al sito
- $g$ : accelerazione di gravità.

I valori di  $\beta_s$  sono riportati nella Tabella 6.

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0.2 < ag(g) \leq 0.4$	0.30	0.28
$0.1 < ag(g) \leq 0.2$	0.27	0.24
$ag(g) \leq 0.1$	0.20	0.20

*Tabella 6- Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.*

Tutti i fattori presenti nelle precedenti formule dipendono dall'accelerazione massima attesa al sito di riferimento rigido e dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio.

$$a_{\max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

$S_S$  (effetto di amplificazione stratigrafica) ( $0.90 \leq S_S \leq 1.80$ ) è funzione di  $F_0$  (Fattore massimo di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e della categoria di suolo (A, B, C, D, E). e del rapporto  $ag/g$ .  $S_T$  (effetto di amplificazione topografica), varia con il variare delle quattro categorie topografiche:

T1:  $S_T = 1.0$ ; T2:  $S_T = 1.20$ ; T3:  $S_T = 1.20$ ; T4:  $S_T = 1.40$ .

**9.6.4.3 PERICOLOSITÀ SISMICA**

Vita nominale (Vn): 50 [anni]  
 Classe d'uso: IV  
 Coefficiente d'uso (Cu): 2  
 Periodo di riferimento (Vr): 100 [anni]  
  
 Periodo di ritorno (Tr) SLO: 60 [anni]  
 Periodo di ritorno (Tr) SLD: 101 [anni]  
 Periodo di ritorno (Tr) SLV: 949 [anni]  
 Periodo di ritorno (Tr) SLC: 1950 [anni]

Tipo di interpolazione: Media ponderata

Coordinate geografiche del punto  
 Latitudine (WGS84): 45,3851547 [°]  
 Longitudine (WGS84): 8,1202173 [°]  
 Latitudine (ED50): 45,3861008 [°]  
 Longitudine (ED50): 8,1212988 [°]

Coordinate dei punti della maglia elementare del reticolo di riferimento che contiene il sito e valori della distanza rispetto al punto in esame.

Punto	ID	Latitudine (ED50) [°]	Longitudine (ED50) [°]	Distanza [m]
1	12467	45,363860	8,085411	3738,09
2	12468	45,367010	8,156366	3465,24
3	12246	45,416910	8,151912	4177,30
4	12245	45,413750	8,080894	4405,11

Parametri di pericolosità sismica per TR diversi da quelli previsti nelle NTC, per i nodi della maglia elementare del reticolo di riferimento

**Punto 1**

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
	30	0,016	2,595	0,163
	50	0,019	2,567	0,172
SLO	60	0,021	2,592	0,172
	72	0,022	2,618	0,173
SLD	101	0,025	2,614	0,210
	140	0,028	2,611	0,225
	201	0,031	2,609	0,239
	475	0,039	2,616	0,266
SLV	949	0,046	2,632	0,280

	975	0,046	2,633	0,281
SLC	1950	0,053	2,679	0,291
	2475	0,056	2,695	0,294

### Punto 2

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
	30	0,015	2,591	0,163
	50	0,019	2,557	0,172
SLO	60	0,020	2,580	0,172
	72	0,022	2,603	0,173
SLD	101	0,025	2,598	0,211
	140	0,027	2,594	0,225
	201	0,031	2,591	0,240
	475	0,038	2,619	0,266
SLV	949	0,044	2,633	0,282
	975	0,045	2,633	0,282
SLC	1950	0,052	2,677	0,292
	2475	0,054	2,692	0,296

### Punto 3

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
	30	0,015	2,589	0,163
	50	0,019	2,558	0,172
SLO	60	0,020	2,582	0,173
	72	0,022	2,607	0,174
SLD	101	0,025	2,605	0,211
	140	0,028	2,603	0,225
	201	0,031	2,601	0,240
	475	0,038	2,605	0,281
SLV	949	0,045	2,640	0,290
	975	0,045	2,642	0,290
SLC	1950	0,053	2,717	0,304
	2475	0,055	2,743	0,309

**Punto 4**

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
	30	0,016	2,594	0,163
	50	0,019	2,569	0,172
SLO	60	0,021	2,595	0,173
	72	0,022	2,622	0,174
SLD	101	0,025	2,621	0,211
	140	0,028	2,620	0,225
	201	0,032	2,619	0,239
	475	0,039	2,617	0,281
SLV	949	0,046	2,620	0,298
	975	0,047	2,620	0,299
SLC	1950	0,054	2,710	0,306
	2475	0,056	2,742	0,308

**Punto d'indagine**

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	60	0,021	2,587	0,173
SLD	101	0,025	2,609	0,211
SLV	949	0,045	2,632	0,287
SLC	1950	0,053	2,694	0,298

**PERICOLOSITÀ SISMICA DI SITO**

Coefficiente di smorzamento viscoso  $\xi$ : 5 %

Fattore di alterazione dello spettro elastico  $\eta = [10/(5+\xi)]^{(1/2)}$ : 1,000

Categoria sottosuolo: B

Categoria topografica:

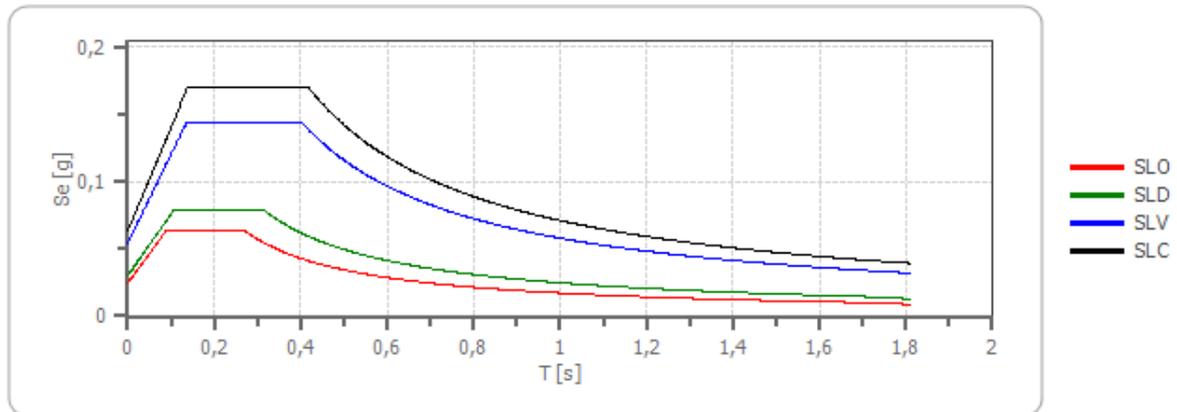
T1: Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media minore o uguale a 15°

**Stabilità di pendii e fondazioni**

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0,005	0,006	0,011	0,013
kv	0,002	0,003	0,005	0,006
amax [m/s <sup>2</sup> ]	0,241	0,294	0,533	0,619
Beta	0,200	0,200	0,200	0,200

**Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali**

### Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali



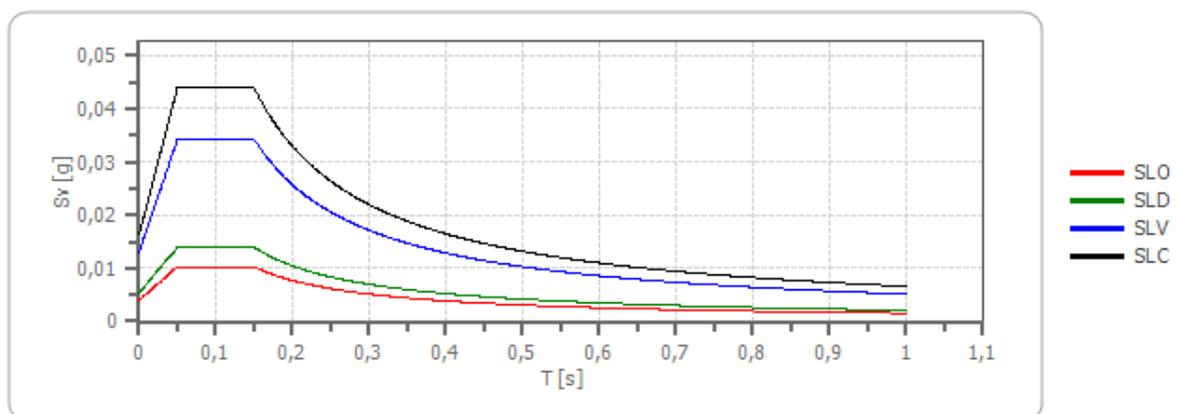
	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	η [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
SLO	2,0	0,021	2,587	0,173	1,200	1,560	1,000	1,200	1,000	0,090	0,269	1,682	0,025	0,064
SLD	2,0	0,025	2,609	0,211	1,200	1,500	1,000	1,200	1,000	0,105	0,316	1,700	0,030	0,078
SLV	2,0	0,045	2,632	0,287	1,200	1,410	1,000	1,200	1,000	0,135	0,405	1,781	0,054	0,143
SLC	2,0	0,053	2,694	0,298	1,200	1,400	1,000	1,200	1,000	0,139	0,417	1,811	0,063	0,170

### Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti verticali

Coefficiente di smorzamento viscoso  $\xi$ : 5 %

Fattore di alterazione dello spettro elastico  $\eta = [10 / (5 + \xi)]^{1/2}$ : 1,000

### Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti verticali



	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	$\eta$ [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
SLO	2,0	0,021	2,587	0,173	1	1,560	1,000	1,000	1,000	0,050	0,150	1,000	0,004	0,010
SLD	2,0	0,025	2,609	0,211	1	1,500	1,000	1,000	1,000	0,050	0,150	1,000	0,005	0,014
SLV	2,0	0,045	2,632	0,287	1	1,410	1,000	1,000	1,000	0,050	0,150	1,000	0,013	0,034
SLC	2,0	0,053	2,694	0,298	1	1,400	1,000	1,000	1,000	0,050	0,150	1,000	0,016	0,044

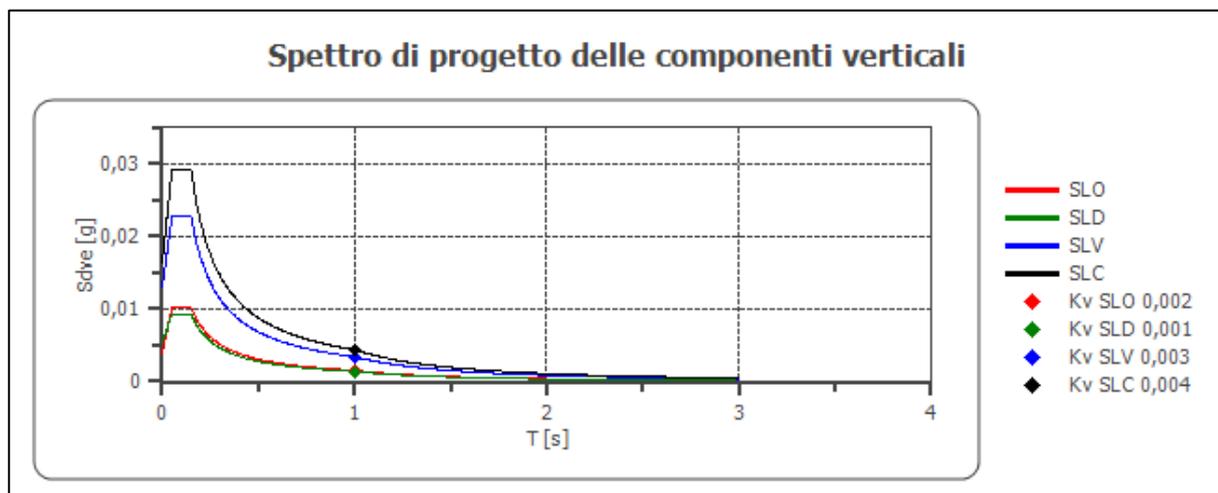
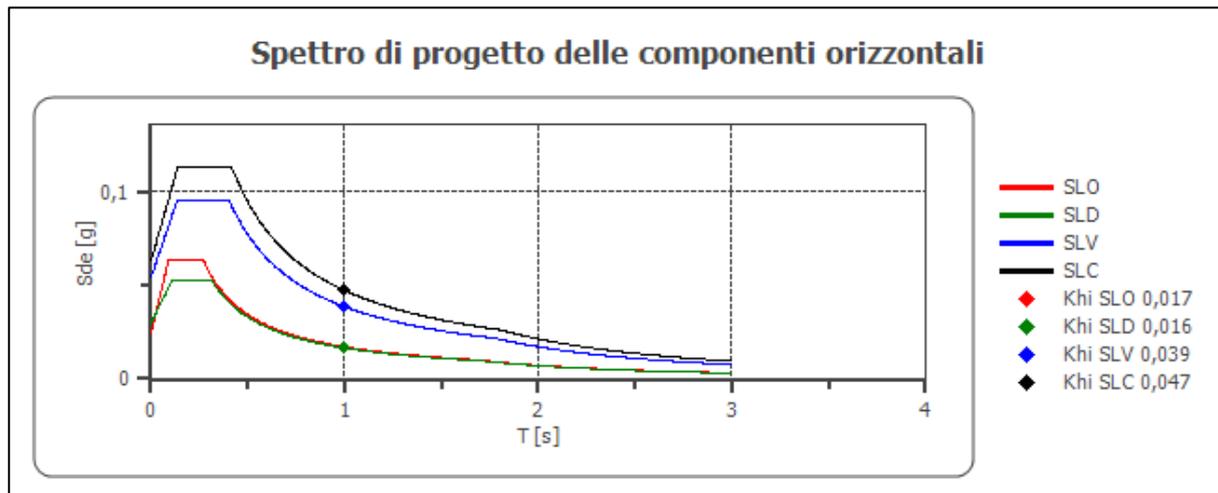
Spettro di progetto

Fattore di struttura spettro orizzontale q: 1,50

Fattore di struttura spettro verticale q: 1,50

Periodo fondamentale T: 1,00 [s]

	SLO	SLD	SLV	SLC
khi = Sde(T) Orizzontale [g]	0,017	0,016	0,039	0,047
kv = Sdve(T) Verticale [g]	0,002	0,001	0,003	0,004



	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	q [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Sd(0) [g]	Sd(TB) [g]
SLO orizzontale	2,0	0,021	2,587	0,173	1,200	1,560	1,000	1,200	1,000	0,090	0,269	1,682	0,025	0,064
SLO verticale	2,0	0,021	2,587	0,173	1,200	1,560	1,000	1,000	1,000	0,050	0,150	1,000	0,004	0,010
SLD orizzontale	2,0	0,025	2,609	0,211	1,200	1,500	1,000	1,200	1,500	0,105	0,316	1,700	0,030	0,052
SLD verticale	2,0	0,025	2,609	0,211	1,200	1,500	1,000	1,000	1,500	0,050	0,150	1,000	0,005	0,009
SLV orizzontale	2,0	0,045	2,632	0,287	1,200	1,410	1,000	1,200	1,500	0,135	0,405	1,781	0,054	0,095
SLV verticale	2,0	0,045	2,632	0,287	1,200	1,410	1,000	1,000	1,500	0,050	0,150	1,000	0,013	0,023
SLC orizzontale	2,0	0,053	2,694	0,298	1,200	1,400	1,000	1,200	1,500	0,139	0,417	1,811	0,063	0,113
SLC verticale	2,0	0,053	2,694	0,298	1,200	1,400	1,000	1,000	1,500	0,050	0,150	1,000	0,016	0,029

## 10 RISPOSTA SISMICA LOCALE DI TERZO LIVELLO

### 10.1 CALCOLO DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

Per la valutazione della risposta sismica locale si è proceduto mediante quanto indicato nelle NTC in modo da determinare l'azione sismica da inserire nell'analisi di stabilità del deposito.

La definizione dell'azione sismica è avvenuta attraverso i seguenti passaggi:

#### 10.1.1 ESTRAZIONE ACCELEROGRAMMI DI INPUT

Partendo dai dati di accelerazione di base e disaggregazione ricavati precedentemente, è stato possibile avviare l'estrazione degli accelerogrammi di input naturali. A tale scopo è stato utilizzato il software di riferimento Rexel V 3.5, messo a punto dalla ReLUIS di Napoli. Il software permette l'estrazione di accelerogrammi di input naturali per applicazioni ingegneristiche da più banche dati, tra le quali la banca dati europea ESD (Amvreseys et al., 2004), la banca dati italiana ITACA (Working Group ITACA, 2010) e la banca dati Simbad (Smerzini e Paolucci, 2011). Inseriti i dati di partenza raccolti precedentemente (accelerazione di base e disaggregazione) è stato possibile quindi ricavare 7 accelerogrammi naturali, che sono poi stati utilizzati per l'esecuzione dell'analisi della Risposta Sismica Locale.

La valutazione della risposta sismica locale è stata valutata utilizzando il programma RSLIII (Geostru). Partendo dagli accelerogrammi ricavati da Rexel V 3.5, sono stati valutati gli accelerogrammi di progetto.

Si riporta di seguito la procedura utilizzata, rimandando ai capitoli seguenti la valutazione dei risultati.

#### 10.1.2 PROCEDURA DI CALCOLO

La procedura di calcolo adoperata dal software RSL per la valutazione della funzione di trasferimento presuppone come base di partenza uno o più accelerogrammi e la conoscenza della stratigrafia del sito attraverso i seguenti parametri geotecnici per ogni strato:

- peso per unità di volume;
- velocità di propagazione delle onde di taglio;
- coefficiente di spinta laterale;
- spessore;
- indice di plasticità.

La non linearità del calcolo è introdotta dalla dipendenza del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso dalla deformazione.

Schematicamente la procedura è riassumibile nel seguente modo:

- Valutazione dello spettro di Fourier dell'accelerogramma (omessa nel caso si debba analizzare uno spettro);
- Ricerca di un errore relativo piccolo seguendo la procedura di:
  - Stima della funzione di trasferimento;
  - Valutazione della deformazione indotta in ciascuno strato;
  - Correzione del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso per ogni strato;

Le operazioni 2.1, 2.2 e 2.3 sono ripetute fino a quando la differenza di deformazione tra un'iterazione e la precedente non rimane al di sotto di una soglia ritenuta accettabile;

- Trasformazione inversa di Fourier dello spettro precedentemente calcolato ed opportunamente pesato per mezzo della funzione di trasferimento calcolata.

Attraverso questa procedura è possibile “trasferire” l'accelerogramma dal bedrock in superficie. La deformazione per ciascuno strato viene corretta sulla base del rapporto fra deformazione effettiva e massima come suggerito dalla letteratura scientifica, ovvero

$$\frac{\gamma_{eff}}{\gamma_{max}} = \frac{M - 1}{10}$$

dove  $M$  rappresenta la magnitudo del sisma.

Per la valutazione della funzione di trasferimento, RSL considera un suolo variamente stratificato composto da  $N$  strati orizzontali di cui l' $N$ -esimo è il letto di roccia (bedrock). Ponendo come ipotesi

che ciascuno strato si comporti come un solido di Kelvin-Voigt  $\left[ \tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma(z,t)}{\partial z \partial t} \right]$ , la

propagazione delle onde di taglio che attraversano gli strati verticalmente può essere definita dall'equazione dell'onda:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (1)$$

dove:  $u$  rappresenta lo spostamento;  $t$  il tempo;  $\rho$  la densità;  $G$  il modulo di deformazione al taglio;  $\eta$  la viscosità. Per onde armoniche lo spostamento può essere scritto come:

$$u(z, t) = U(z)^{i\omega t} \quad (2)$$

che sostituita nella (1) pone

$$(G + i\omega\eta) \frac{d^2U}{dz^2} = \rho\omega^2U \quad (3)$$

dove  $\omega$  rappresenta la frequenza angolare. La (3) può essere riscritta come

$$G^* \frac{d^2U}{dz^2} = \rho\omega^2U \quad (4)$$

avendo posto  $G^* = G + i\omega\eta$ , ovvero il modulo di deformazione al taglio *complesso*. Questo può essere ulteriormente riscritto come

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \quad (5)$$

avendo posto

$$\eta = \frac{2G}{\omega} \xi \quad (6)$$

dove  $\xi$  rappresenta il coefficiente di smorzamento viscoso. Ciò posto, e fatta convenzione che l'apice \* indica la natura complessa delle variabili in gioco, la soluzione dell'equazione generica dell'onda è la seguente:

$$u(z, t) = Ee^{i(\omega t + k^*z)} + Fe^{i(\omega t - k^*z)} \quad (7)$$

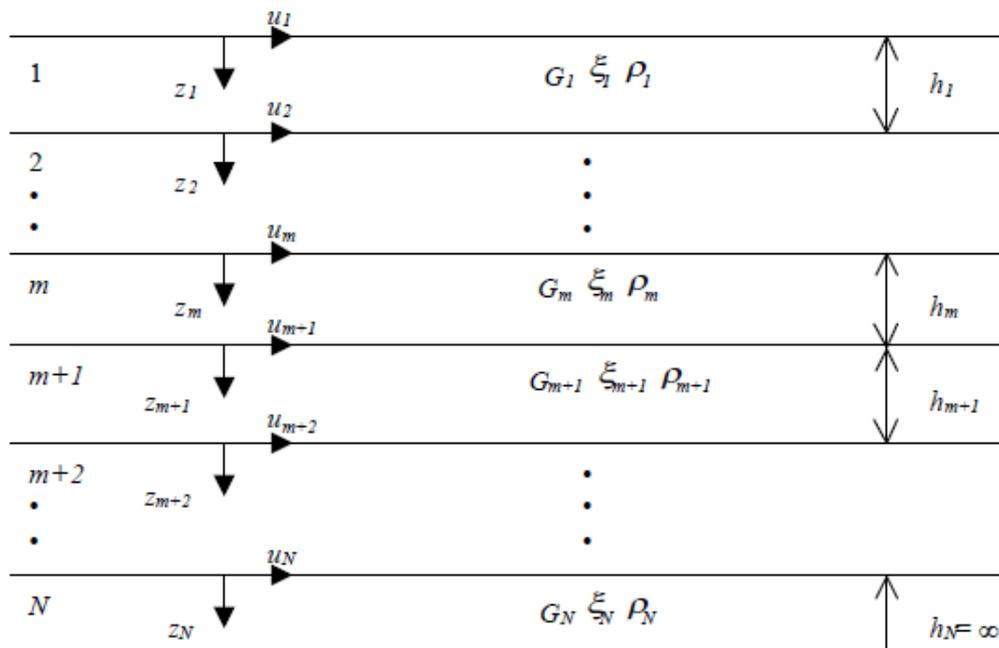


Figura 23 - Esempio di stratigrafia per riferimento.

dove E e F dipendono dalle condizioni al contorno e rappresentano l'ampiezza d'onda che viaggia rispettivamente verso l'alto (-z) e verso il basso (+z), mentre  $k^*$  rappresenta il numero d'onda complesso dato dalla seguente espressione:

$$k^* = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G^*}} \quad (8)$$

Il taglio invece è dato da:

$$\tau(z, t) = G^* \frac{dU}{dz} e^{i\omega t} = ik^* G^* \left[ E e^{i(\omega t + k^* z)} + F e^{i(\omega t - k^* z)} \right] e^{i\omega t} \quad (9)$$

Per il generico strato  $m$  di spessore  $h_m$  gli spostamenti, rispettivamente in sommità ( $z = 0$ ) ed al fondo ( $z = h_m$ ), sono:

$$u_m(0, t) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \quad (10)$$

$$u_m(h_m, t) = (E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m}) e^{i\omega t} \quad (11)$$

Poiché deve essere rispettata la congruenza sullo spostamento all'interfaccia tra gli strati, ovvero lo spostamento in sommità ad uno strato deve essere uguale allo spostamento sul fondo di quello immediatamente sopra, se ne deduce che:

$$u_m(z = h_m, t) = u_{m+1}(z = 0, t) \quad (12)$$

Usando la (10), (11) e la (12), ne consegue che

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m} \quad (13)$$

Il taglio in sommità ed al fondo dell' $m$ -esimo strato è dato da:

$$\tau_m(0, t) = ik_m^* G_m^* [E_m - F_m] e^{i\omega t} \quad (14)$$

$$\tau_m(h_m, t) = ik_m^* G_m^* [E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}] e^{i\omega t} \quad (15)$$

Poiché fra uno strato e l'altro il taglio deve essere continuo si ha

$$\tau_m(z = h_m, t) = \tau_{m+1}(z = 0, t) \quad (16)$$

ovvero

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}) \quad (17)$$

Sommando la (13) alla (17) e sottraendo la (17) alla (13) si ottiene

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (18)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (19)$$

dove  $\alpha_m^*$  rappresenta il coefficiente di impedenza complesso al contorno tra gli strati  $m$  ed  $m+1$ , ed è dato dalla seguente espressione:

$$\alpha_m^* = \frac{k_{m+1}^* G_{m+1}^*}{k_m^* G_m^*} \quad (20)$$

Poiché in superficie il taglio è nullo,

$$\tau_1(0, t) = ik_1^* G_1^* [E_1 - F_1] e^{i\omega t} = 0$$

si deduce che  $E_1 = F_1$ .

Le equazioni (18) e (19) possono essere successivamente applicate agli strati successivi da 2 al strato  $m$ . La funzione di trasferimento  $A_{mn}$  che lega gli spostamenti in sommità degli strati  $m$  ed  $n$  è definita dalla seguente espressione:

$$A_{mn} = \frac{u_m}{u_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (21)$$

$A_{mn}$  rappresenta la funzione di trasferimento, ovvero la funzione che mette in relazione il modulo della deformazione tra i punti  $m$  e  $n$ . In pratica lo stato deformativo di una stratigrafia rimane definito una volta nota la deformazione di un suo qualsiasi punto. Inoltre, poiché la velocità e l'accelerazione sono legati allo spostamento,

$$\dot{u}(z, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u(z, t) \quad \ddot{u}(z, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 u(z, t) \quad (22)$$

La funzione di trasferimento  $A_{mn}$  può essere espressa anche in funzione delle velocità e dell'accelerazione al tetto degli strati  $n$  ed  $m$ :

$$A_{mn}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{\dot{u}_m}{\dot{u}_n} = \frac{\ddot{u}_m}{\ddot{u}_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (23)$$

La deformazione tangenziale rimane definita alla profondità  $z$  e al tempo  $t$  dalla relazione:

$$\gamma(z, t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik^* (E e^{ik^* z} - F e^{-ik^* z}) e^{i\omega t} \quad (24)$$

E la corrispondente tensione tangenziale, dalla seguente espressione:

$$\tau(z, t) = G^* \gamma(z, t) \quad (25)$$

Ai fini di una corretta interpretazione del problema della risposta sismica locale, risulta utile riprodurre la rappresentazione schematica della figura seguente in cui è riportata la terminologia utilizzata per lo studio del moto sismico di un deposito che poggia su un basamento roccioso.

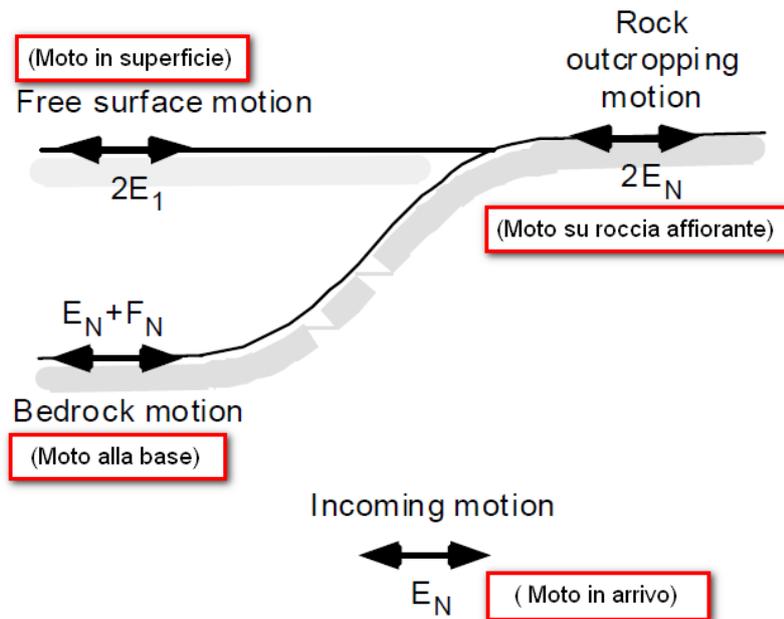


Figura 24 Schema di riferimento e terminologia utilizzata.

Le onde di taglio si propagano verticalmente attraverso il bedrock con ampiezza pari ad  $E_N$ ; al tetto del bedrock, sotto il deposito degli strati di terreno, il moto ha un'ampiezza pari a  $E_N + F_N$ . Sulla roccia affiorante, poiché le tensioni tangenziali sono nulle ( $E_N = F_N$ ), il moto avrà ampiezza pari a  $2E_N$ . La funzione di trasferimento dal bedrock al bedrock-affiorante è la seguente:

$$A_{NN}(\omega) = \frac{2E_N}{E_N + F_N} \quad (26)$$

A è non lineare poiché  $G$  è funzione di  $\gamma$ . Nella procedura di calcolo, infatti, da una stima iniziale del modulo di deformazione al taglio, si ottiene la tensione ipotizzando un legame lineare, per poi ottenere un nuovo valore di  $\gamma$ . Grazie a questo valore aggiornato si valuta un nuovo modulo  $G$  così da ripetere la procedura fino a quando la differenza tra la deformazione aggiornata e quella ottenuta dalla precedente iterazione viene ritenuta accettabile. Il modello per  $G(\gamma)$  adoperato è quello suggerito da Ishibashi e Zhang (1993) che tiene conto degli effetti della pressione di confinamento e dell'indice di plasticità:

$$G = G_{max} \cdot K(\gamma, PI) (\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_0} \quad (24)$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\} \quad (25)$$

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3}) \quad (26)$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & \text{per } PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & \text{per } 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} PI^{1.976} & \text{per } 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} PI^{1.115} & \text{per } PI > 70 \end{cases} \quad (27)$$

dove  $G_{max}$  è dato dalla relazione

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (28)$$

dove  $\rho$  è la densità del terreno e  $V_s$  la velocità di propagazione delle onde di taglio nello stesso. La (28) fornisce il valore iniziale di  $G$  per la prima iterazione.

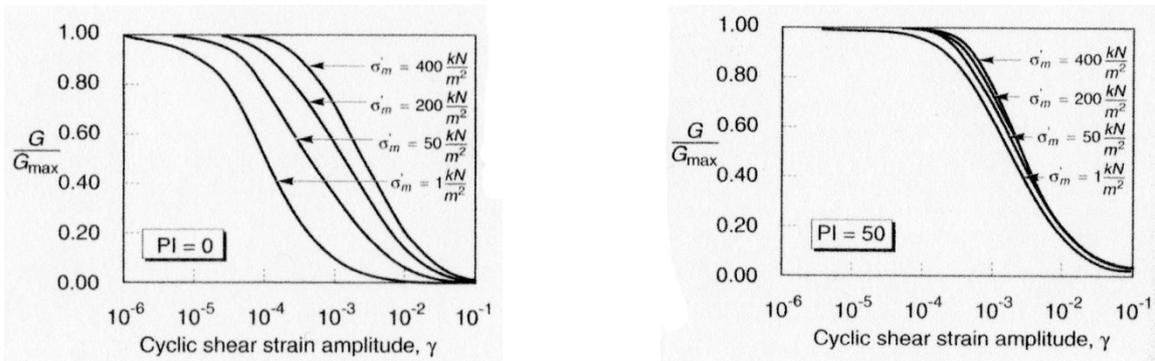


Figura 25 Influenza della pressione di confinamento e della plasticità sul modulo di deformazione al taglio.

Per quanto riguarda invece il coefficiente di smorzamento viscoso  $\xi$ , in conseguenza del modello introdotto dalla (24) si ha:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 PI^{1.3})}{2} \left[ 0.586 \left( \frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right] \quad (29)$$

da cui si deduce che anche  $\xi$  deve essere ricalcolato ad ogni iterazione.

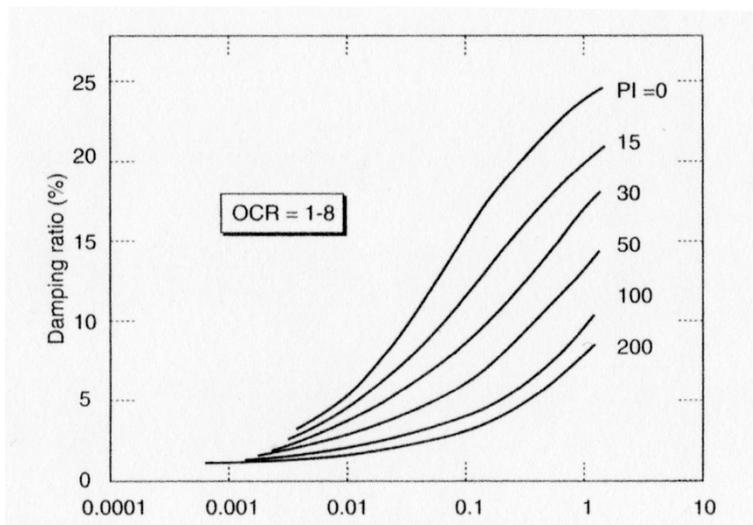


Figura 26 Influenza della plasticità sul coefficiente di smorzamento viscoso.

### 10.1.3 VALUTAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

La risposta sismica locale è stata valutata considerando la configurazione attuale del sito.

Come già anticipato ai precedenti paragrafi, le indagini geofisiche sono state effettuate in un'area precedentemente individuata come sede del futuro impianto. Tale area è adiacente al sito attuale individuato come idoneo e dista circa 450 m, pertanto, le indagini svolte sono da ritenersi attendibili anche per il nuovo sito.

La sismostratigrafia di riferimento per l'analisi della risposta sismica locale tiene conto del terreno di fondazione naturale:

- Spessore degli strati
- Tipo di materiale, selezionato da quelli presenti in archivio del programma che fanno riferimento a materiali di bibliografia
- Peso per unità di volume
- Velocità delle onde medie di taglio  $V_s$

Partendo da questi parametri, il software ricostruisce la profondità media di ogni strato, la  $G_{max}$  all'interno dello strato e la tensione verticale.

Per l'assegnazione del tipo di materiale di ogni strato si è fatto riferimento alle indagini geognostiche. È stato considerato la stratigrafia di riferimento descritta in questa specifica relazione per valutare la risposta sismica locale

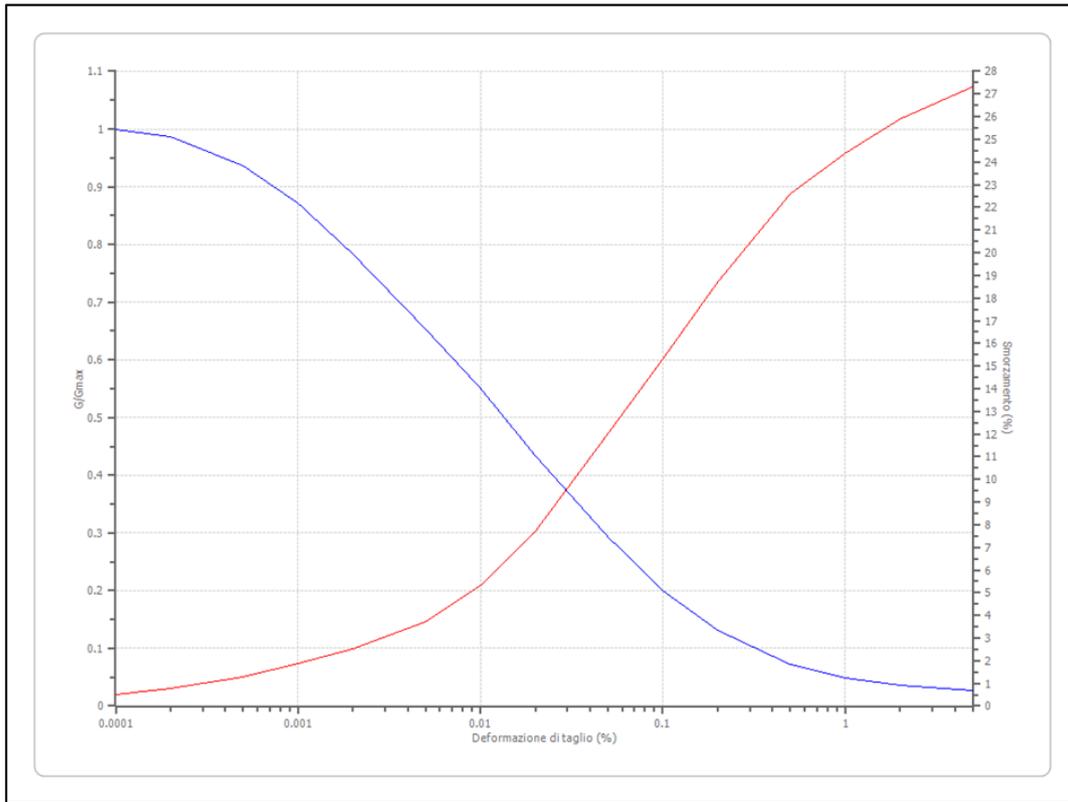
Il tipo di materiale per la determinazione delle leggi di variazione del rapporto  $G/G_{max}$  e del coefficiente di smorzamento in funzione della deformazione a taglio scelto per gli strati del terreno

risulta quello descritto da diversi autori come descritto nei paragrafi seguenti con le diversi leggi riportate nella seguente tabella e immagine:

- **Terreni**

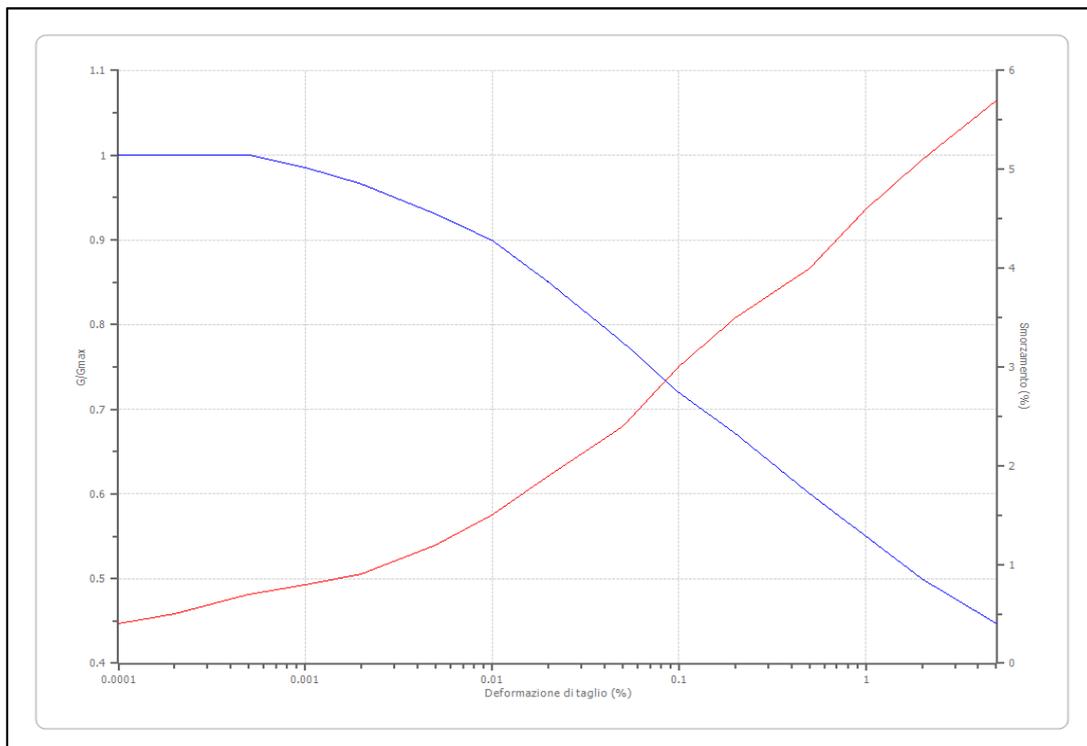
**Seed et al. (1986) Gravel**

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.500
0.0002	0.987	0.0002	0.800
0.0005	0.937	0.0005	1.300
0.001	0.872	0.001	1.900
0.002	0.783	0.002	2.500
0.005	0.653	0.005	3.700
0.010	0.550	0.010	5.300
0.020	0.434	0.020	7.700
0.050	0.293	0.050	12.000
0.100	0.200	0.100	15.300
0.200	0.132	0.200	18.700
0.500	0.072	0.500	22.600
1.000	0.049	1.000	24.400
2.000	0.036	2.000	25.900
5.000	0.027	5.000	27.300



**Idriss (1990) Rock**

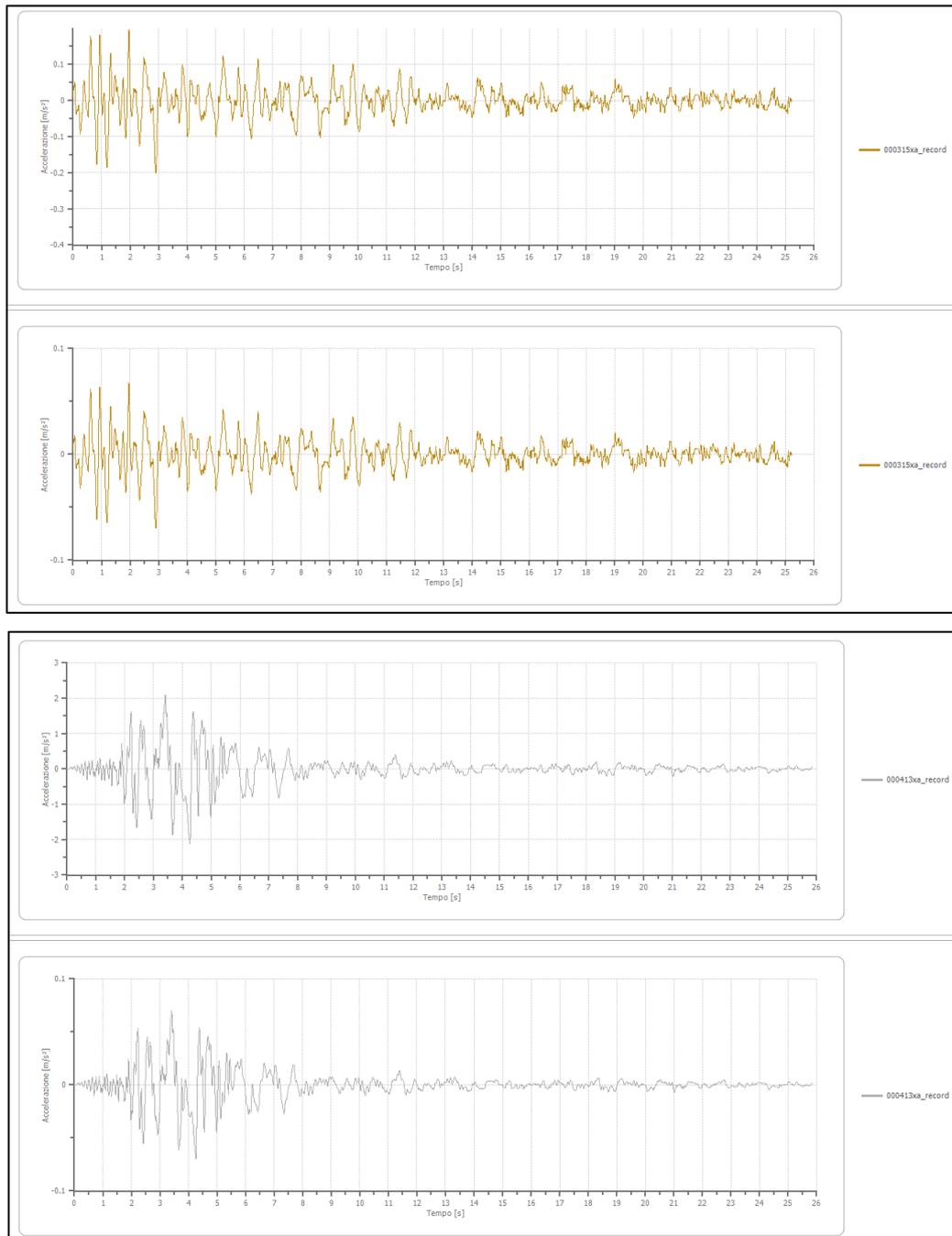
Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.400
0.0002	1.000	0.0002	0.500
0.0005	1.000	0.0005	0.700
0.001	0.986	0.001	0.800
0.002	0.966	0.002	0.900
0.005	0.931	0.005	1.200
0.010	0.900	0.010	1.500
0.020	0.850	0.020	1.900
0.050	0.779	0.050	2.400
0.100	0.720	0.100	3.000
0.200	0.671	0.200	3.500
0.500	0.600	0.500	4.000
1.000	0.550	1.000	4.600
2.000	0.500	2.000	5.100
5.000	0.447	5.000	5.700

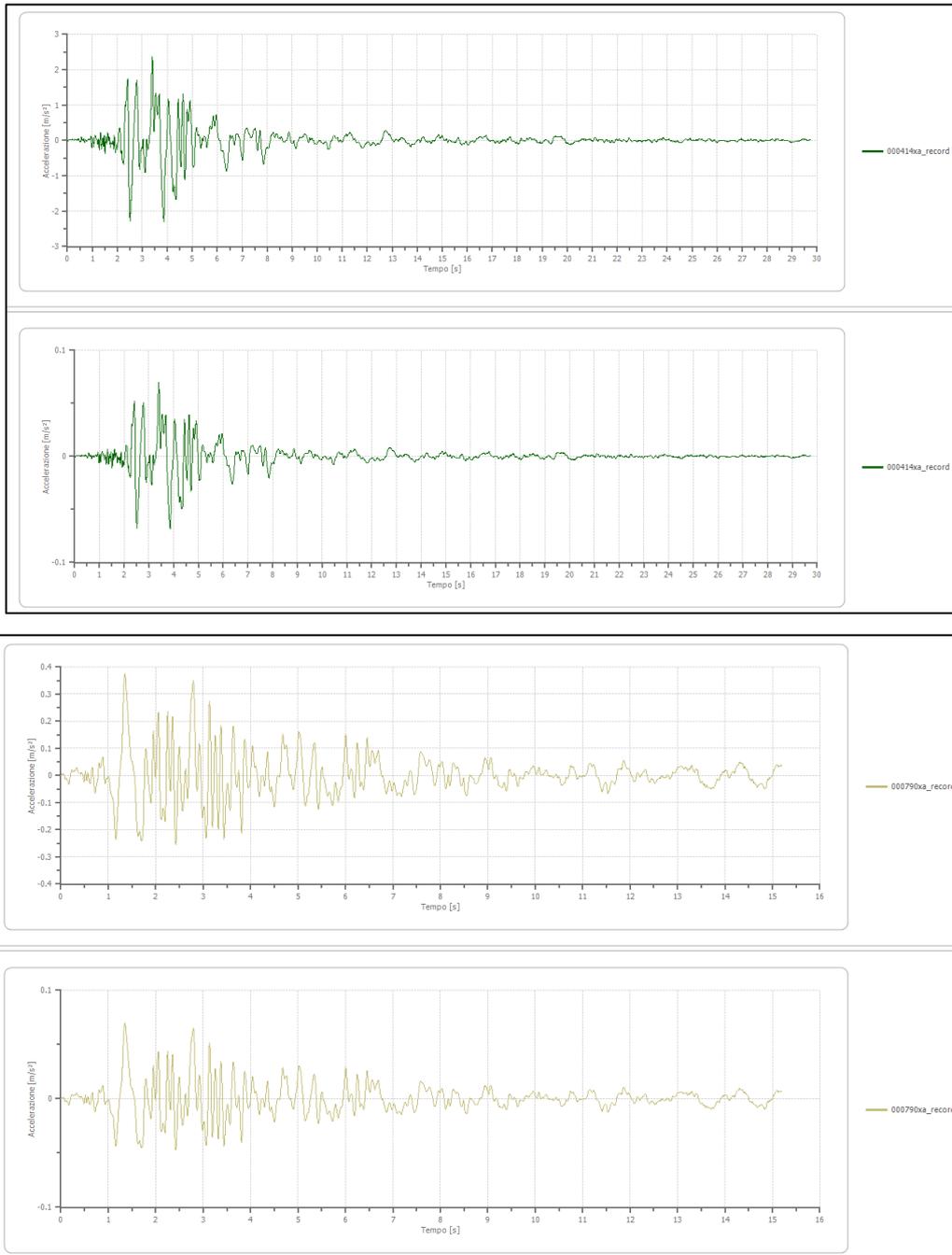


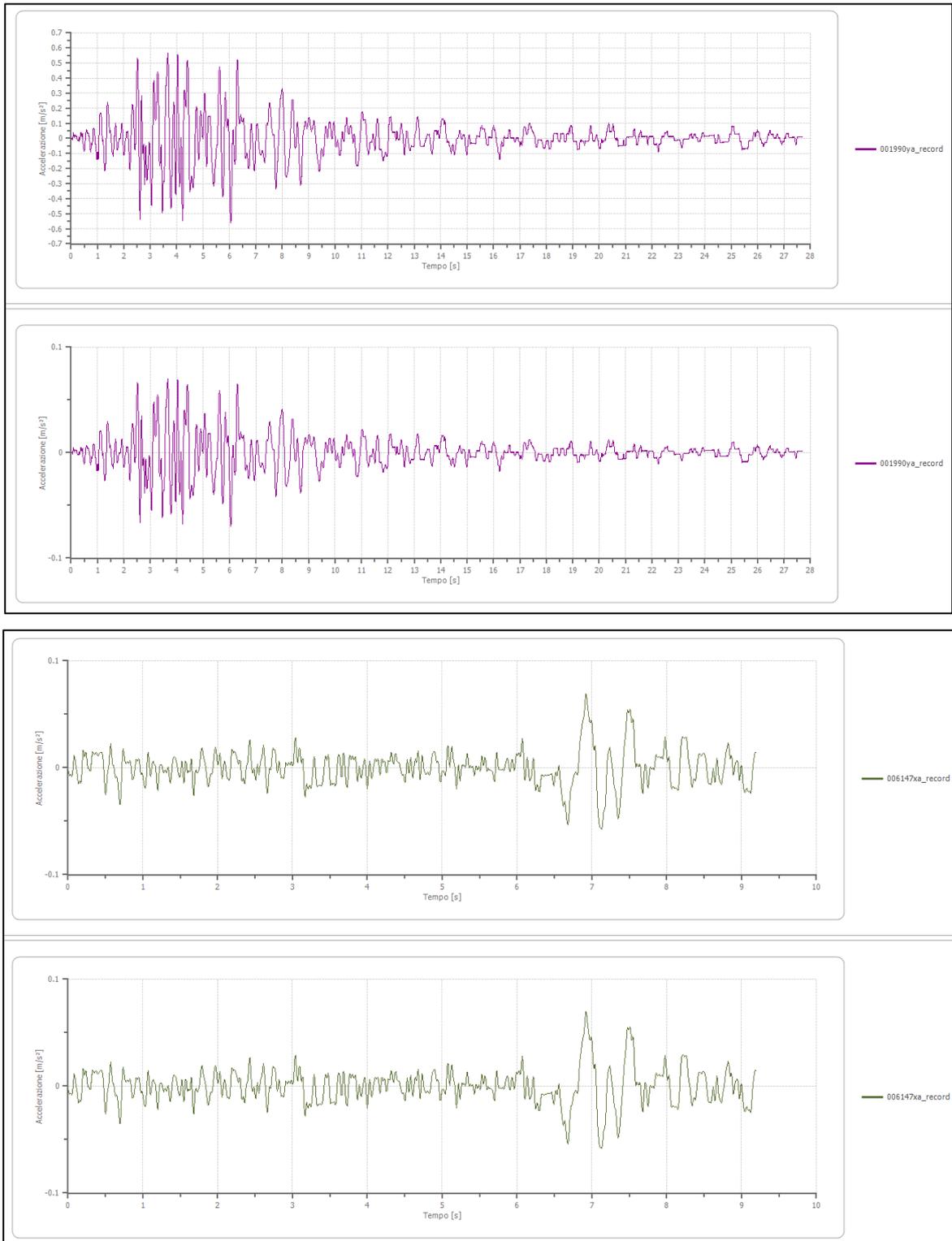
## 10.2 MODELLO REALIZZATO CON GLI 7ACCELEROGRAMMI

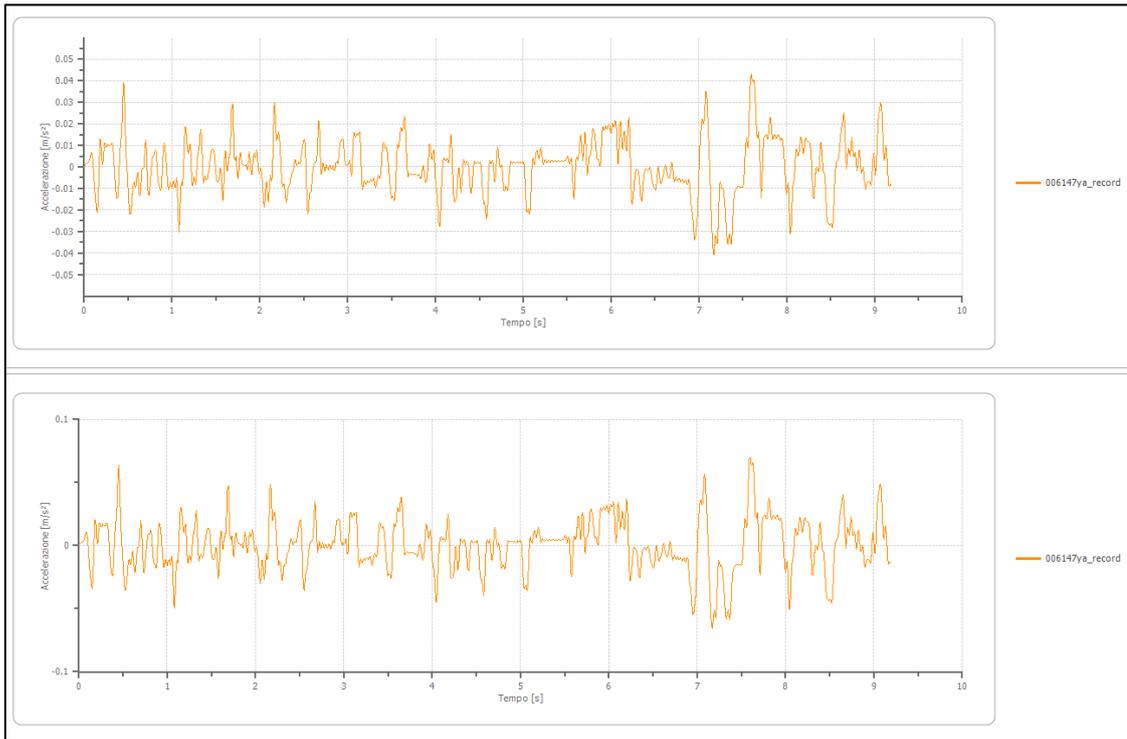
### 10.2.1 ACCELEROGRAMMI TRASPORTATI

Nelle immagini seguenti si riportano gli accelerogrammi trasportati.









**10.2.2 RISULTATO DEL MODELLO**

- Dati generali**

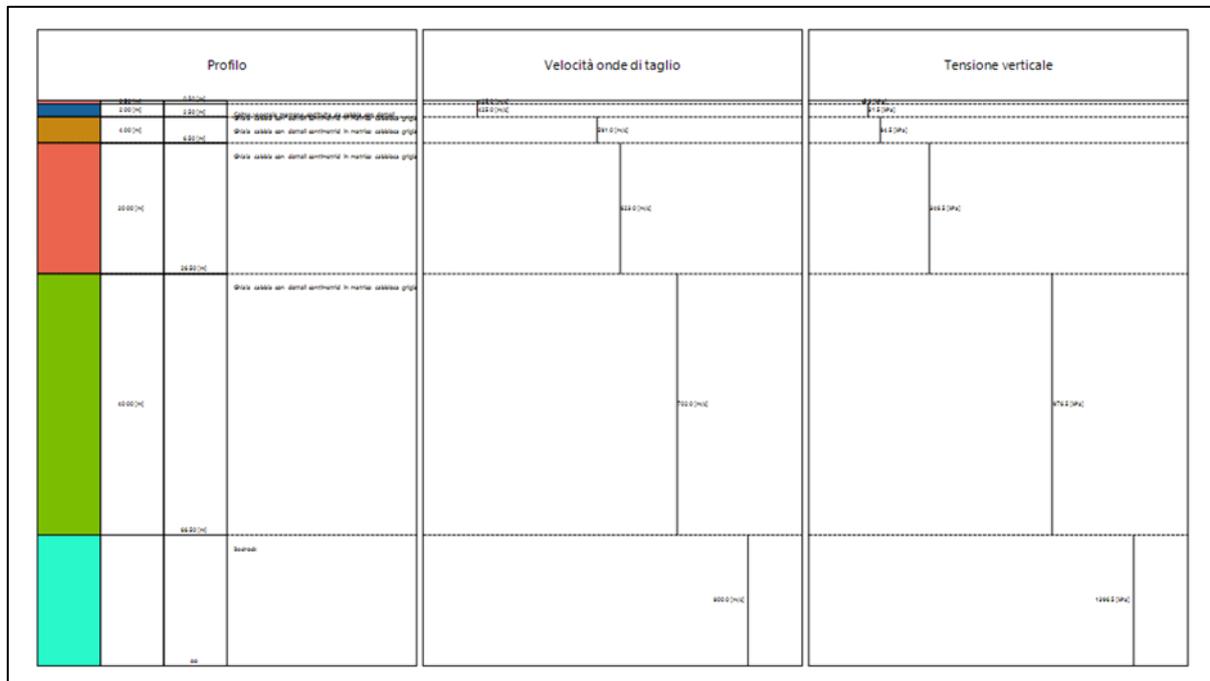
Latitudine 45,3851547[°]

Longitudine 8,120217[°]

- Stratigrafia**

n.	Descrizione	Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	Numero sottostrati	Gmax [MPa]	Smorzamento critico [%]	Peso unità vol. [kN/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	Tensione verticale [kPa]
1	Coltre vegetale marrone costituita da sabbia con ciottoli	--	0.5	Seed et al. (1986) Gravel	0	386.66	--	21.0	425.0	5.3
2	Ghiaia sabbie con ciottoli centimetrici in matrice sabbiosa grigia	0.5	2.0	Seed et al. (1986) Gravel	0	386.66	--	21.0	425.0	31.5
3	Ghiaia sabbie con ciottoli centimetrici in matrice sabbiosa grigia	2.5	4.0	Seed et al. (1986) Gravel	0	747.70	--	21.0	591.0	94.5
4	Ghiaia sabbie con ciottoli centimetrici in matrice sabbiosa grigia	6.5	20.0	Seed et al. (1986) Gravel	0	830.86	--	21.0	623.0	346.5
5	Ghiaia sabbie con ciottoli centimetrici in matrice sabbiosa grigia	26.5	40.0	Seed et al. (1986) Gravel	0	1054.93	--	21.0	702.0	780.3
6	Bedrock	oo	--	Idriss (1990) Rock	0	1435.27	--	22.0	800.0	1004.1

**Strato con falda:** 5  
**Strato rilevamento accelerogramma:** 6 Interno



- Elaborazione**

Numero di iterazioni 8  
Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima 0.5  
Tipo di modulo elastico Shake  
Massimo errore percentuale di convergenza 6.41 E00

- Fattori di amplificazione ICMS 2018**

Numero di iterazioni 8  
Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima 0.5  
Tipo di modulo elastico Shake  
Massimo errore percentuale di convergenza 5.95 E00

Tai	0.230 [s]
Tvi	0.660 [s]
Tao	0.420 [s]
Tvo	0.430 [s]
Sami	0.182 [m/s <sup>2</sup> ]

Sv <sub>mi</sub>	0.014 [m/s]
S <sub>amo</sub>	0.829 [m/s <sup>2</sup> ]
Sv <sub>mo</sub>	0.081 [m/s]
<b>F<sub>a</sub></b>	<b>4.543 [-]</b>
<b>F<sub>v</sub></b>	<b>5.804 [-]</b>
T <sub>B</sub>	0.264 [s]
T <sub>C</sub>	0.791 [s]
T <sub>D</sub>	1.780 [s]
S <sub>A(0)</sub>	0.644 [m/s <sup>2</sup> ]
S <sub>A(TB)</sub>	1.695 [m/s <sup>2</sup> ]

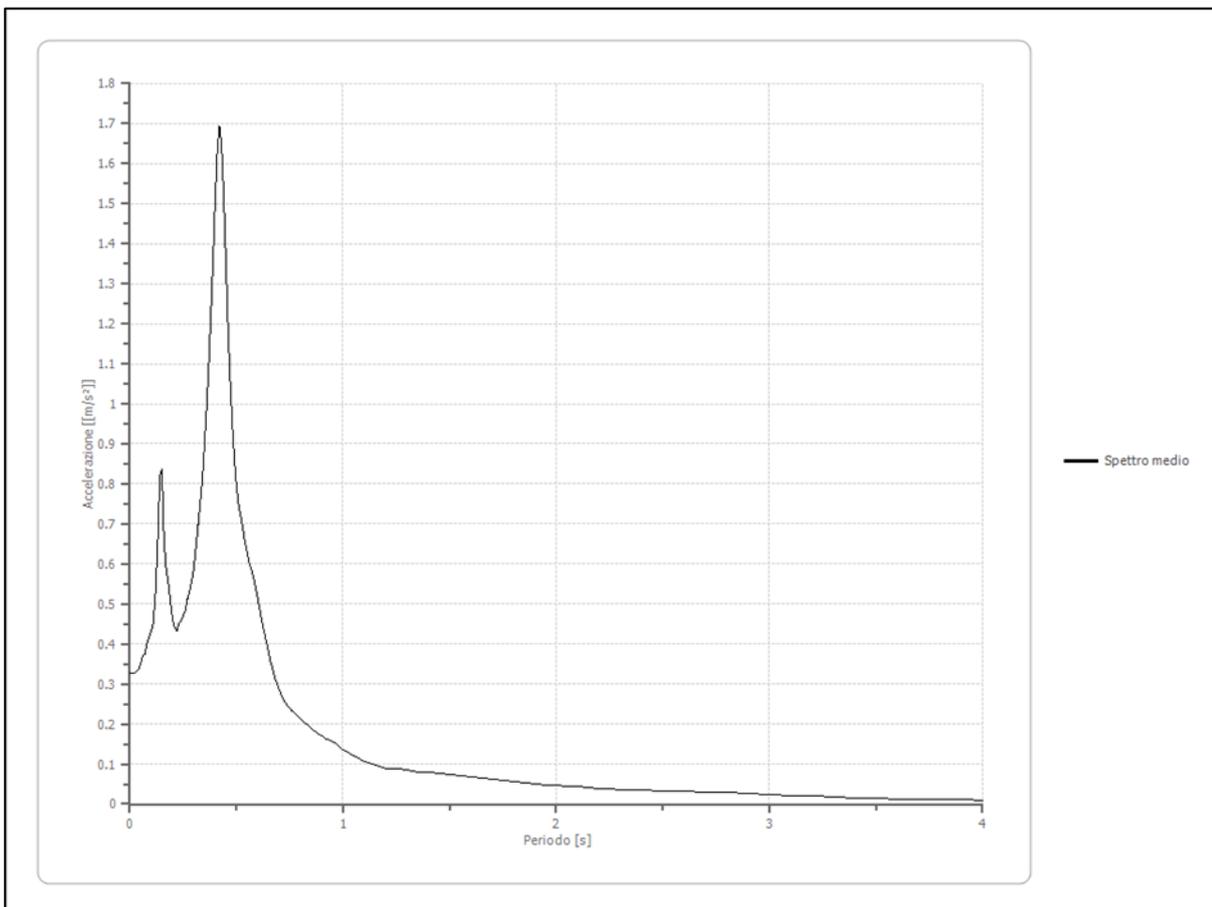
• **Fattori di amplificazione su intensità spettrale**

Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	Int. Housner input [m]	Int. Housner output [m]	Int. Housner input/output [m]	FA
0.100	0.500	0.003	0.017	0.200	5.334
0.400	0.800	0.005	0.024	0.500	4.536
0.700	1.100	0.005	0.013	0.636	2.491
0.500	1.500	0.013	0.036	0.333	2.725

• **Spettro medio di risposta elastico**

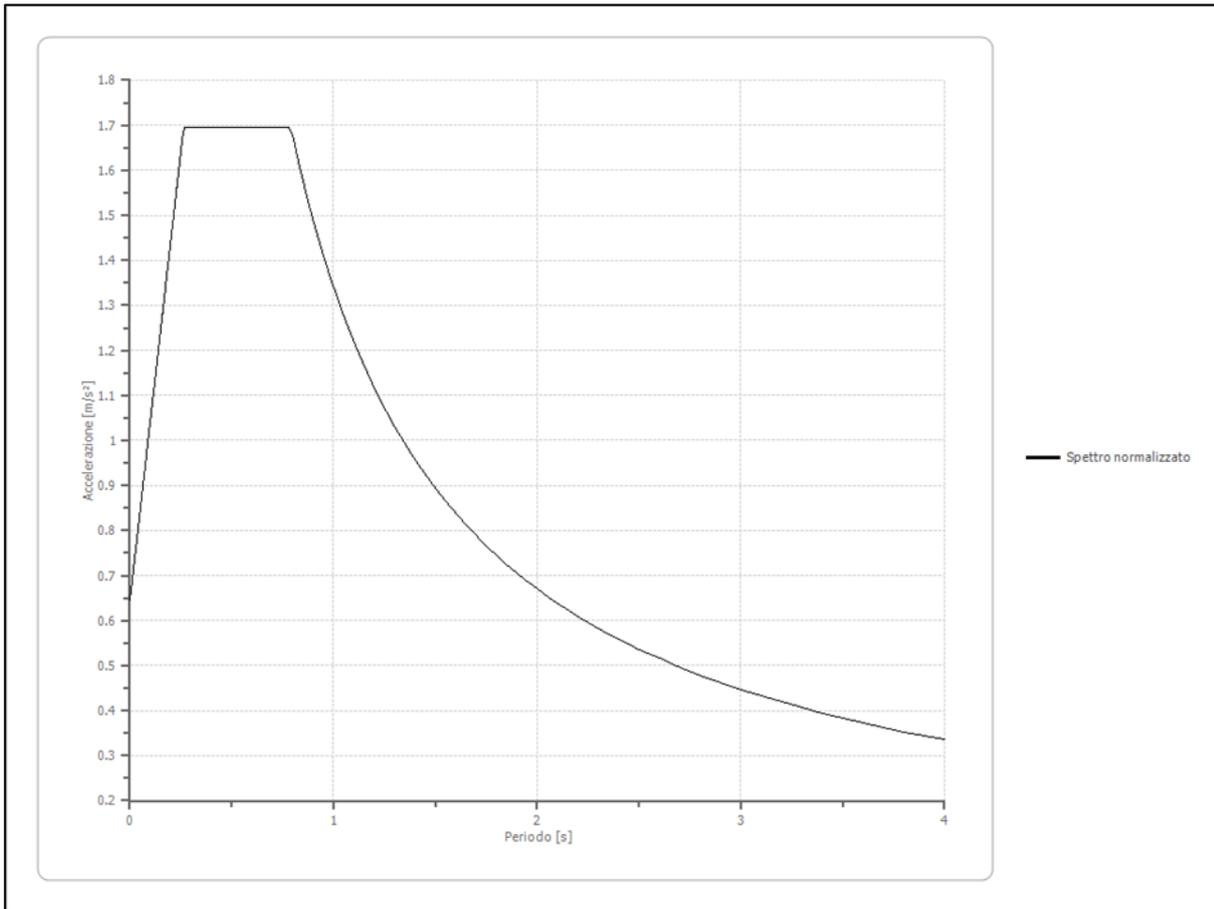
Periodo [s]	Accelerazione [m/s <sup>2</sup> ]								
0.00	0.3277	0.26	0.4844	0.52	0.7185	0.98	0.1452	2.25	0.0373
0.01	0.3277	0.27	0.5126	0.53	0.6867	1.00	0.1363	2.30	0.0360
0.02	0.3277	0.28	0.5337	0.54	0.6554	1.05	0.1210	2.35	0.0349
0.03	0.3307	0.29	0.5580	0.55	0.6283	1.10	0.1065	2.40	0.0342
0.04	0.3357	0.30	0.5892	0.56	0.6021	1.15	0.0960	2.50	0.0332
0.05	0.3511	0.31	0.6416	0.57	0.5862	1.20	0.0897	2.60	0.0320
0.06	0.3708	0.32	0.6976	0.58	0.5664	1.25	0.0892	2.70	0.0305
0.07	0.3753	0.33	0.7554	0.60	0.5124	1.30	0.0859	2.80	0.0286
0.08	0.4012	0.34	0.8121	0.62	0.4549	1.35	0.0799	2.90	0.0266
0.09	0.4155	0.35	0.8988	0.64	0.4053	1.40	0.0782	3.00	0.0243
0.10	0.4328	0.36	0.9902	0.66	0.3565	1.45	0.0761	3.10	0.0218
0.11	0.4539	0.37	1.0985	0.68	0.3140	1.50	0.0739	3.20	0.0193
0.12	0.5288	0.38	1.2253	0.70	0.2855	1.55	0.0710	3.30	0.0171
0.13	0.6510	0.39	1.3567	0.72	0.2617	1.60	0.0678	3.40	0.0155
0.14	0.8183	0.40	1.5052	0.74	0.2440	1.65	0.0641	3.50	0.0142

0.15	0.8381	0.41	1.6331	0.76	0.2316	1.70	0.0607	3.60	0.0132
0.16	0.6569	0.42	1.6949	0.78	0.2225	1.75	0.0575	3.70	0.0122
0.17	0.5893	0.43	1.6456	0.80	0.2128	1.80	0.0547	3.80	0.0114
0.18	0.5550	0.44	1.5240	0.82	0.2047	1.85	0.0518	3.90	0.0106
0.19	0.5077	0.45	1.3618	0.84	0.1951	1.90	0.0490	4.00	0.0100
0.20	0.4614	0.46	1.1930	0.86	0.1846	1.95	0.0474		
0.21	0.4407	0.47	1.0625	0.88	0.1755	2.00	0.0462		
0.22	0.4318	0.48	0.9522	0.90	0.1695	2.05	0.0448		
0.23	0.4494	0.49	0.8632	0.92	0.1634	2.10	0.0428		
0.24	0.4559	0.50	0.7949	0.94	0.1581	2.15	0.0406		
0.25	0.4718	0.51	0.7473	0.96	0.1525	2.20	0.0388		



• **Spettro normalizzato di risposta elastico**

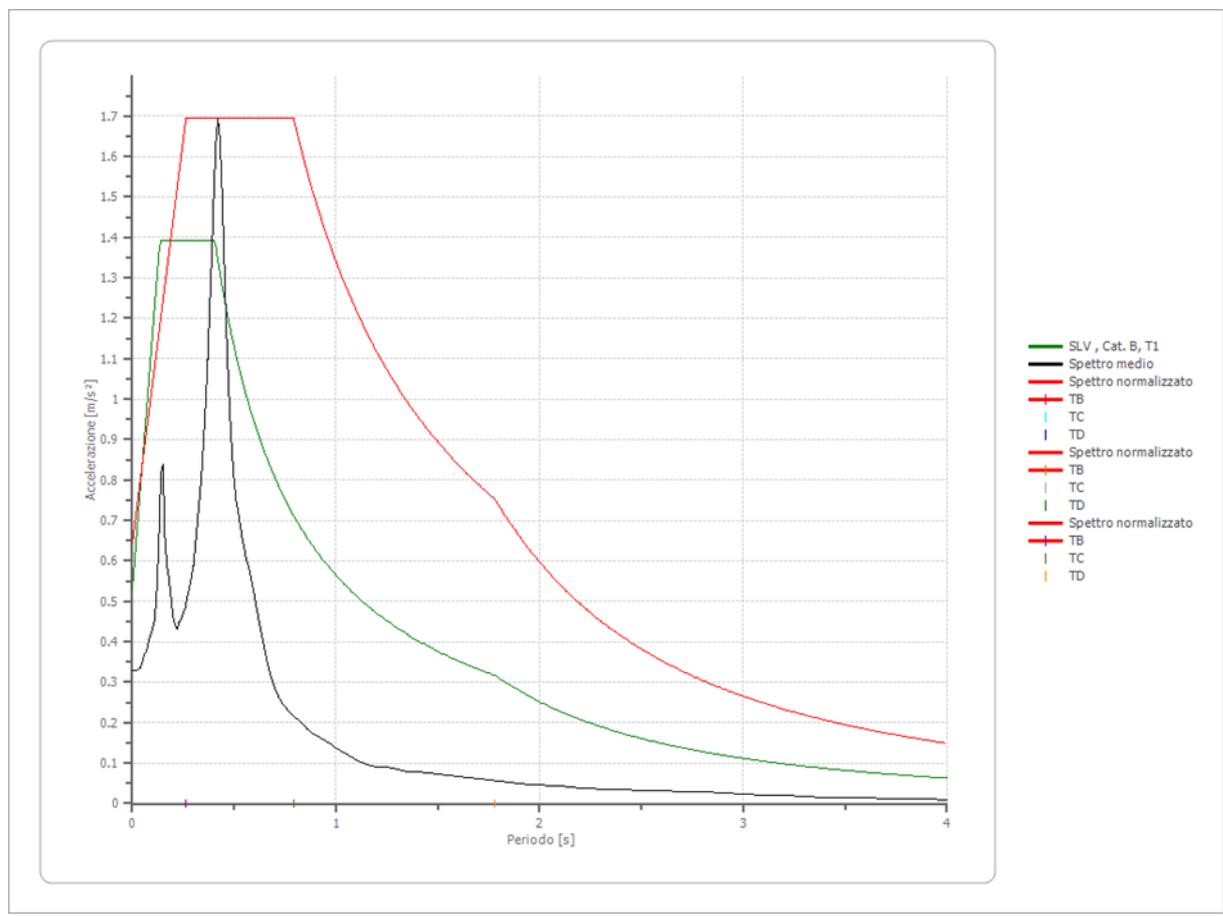
Periodo [s]	Accelerazione [m/s <sup>2</sup> ]								
0.00	0.6440	0.26	1.6804	0.52	1.6949	0.98	1.3679	2.25	0.5958
0.01	0.6838	0.27	1.6949	0.53	1.6949	1.00	1.3405	2.30	0.5828
0.02	0.7237	0.28	1.6949	0.54	1.6949	1.05	1.2767	2.35	0.5704
0.03	0.7636	0.29	1.6949	0.55	1.6949	1.10	1.2187	2.40	0.5586
0.04	0.8034	0.30	1.6949	0.56	1.6949	1.15	1.1657	2.50	0.5362
0.05	0.8433	0.31	1.6949	0.57	1.6949	1.20	1.1171	2.60	0.5156
0.06	0.8831	0.32	1.6949	0.58	1.6949	1.25	1.0724	2.70	0.4965
0.07	0.9230	0.33	1.6949	0.60	1.6949	1.30	1.0312	2.80	0.4788
0.08	0.9629	0.34	1.6949	0.62	1.6949	1.35	0.9930	2.90	0.4623
0.09	1.0027	0.35	1.6949	0.64	1.6949	1.40	0.9575	3.00	0.4468
0.10	1.0426	0.36	1.6949	0.66	1.6949	1.45	0.9245	3.10	0.4324
0.11	1.0825	0.37	1.6949	0.68	1.6949	1.50	0.8937	3.20	0.4189
0.12	1.1223	0.38	1.6949	0.70	1.6949	1.55	0.8649	3.30	0.4062
0.13	1.1622	0.39	1.6949	0.72	1.6949	1.60	0.8378	3.40	0.3943
0.14	1.2020	0.40	1.6949	0.74	1.6949	1.65	0.8124	3.50	0.3830
0.15	1.2419	0.41	1.6949	0.76	1.6949	1.70	0.7886	3.60	0.3724
0.16	1.2818	0.42	1.6949	0.78	1.6949	1.75	0.7660	3.70	0.3623
0.17	1.3216	0.43	1.6949	0.80	1.6757	1.80	0.7447	3.80	0.3528
0.18	1.3615	0.44	1.6949	0.82	1.6348	1.85	0.7246	3.90	0.3437
0.19	1.4014	0.45	1.6949	0.84	1.5959	1.90	0.7055	4.00	0.3351
0.20	1.4412	0.46	1.6949	0.86	1.5588	1.95	0.6875		
0.21	1.4811	0.47	1.6949	0.88	1.5233	2.00	0.6703		
0.22	1.5210	0.48	1.6949	0.90	1.4895	2.05	0.6539		
0.23	1.5608	0.49	1.6949	0.92	1.4571	2.10	0.6384		
0.24	1.6007	0.50	1.6949	0.94	1.4261	2.15	0.6235		
0.25	1.6405	0.51	1.6949	0.96	1.3964	2.20	0.6093		



• **Parametri spettro normalizzato**

Ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [m/s <sup>2</sup> ]	Se(TB) [m/s <sup>2</sup> ]	S
0.644	2.632	--	0.264	0.791	1.780	0.644	1.695	1.460

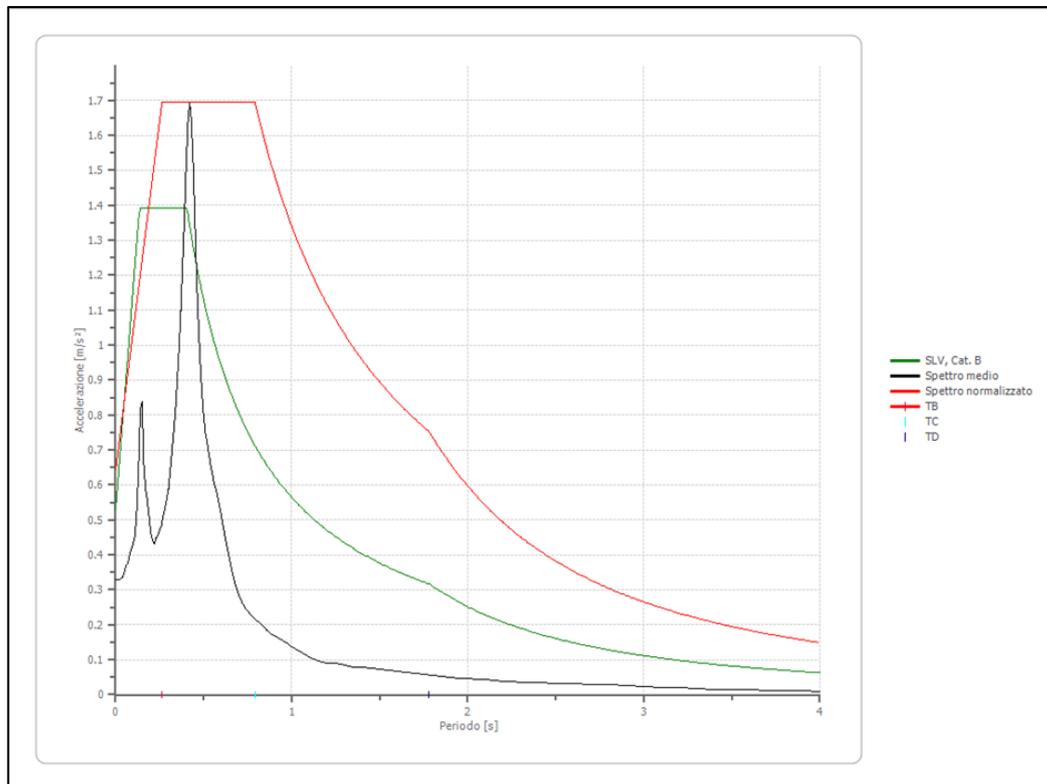
• **Confronto tra gli spettri**



- **Confronto spettro normativa**

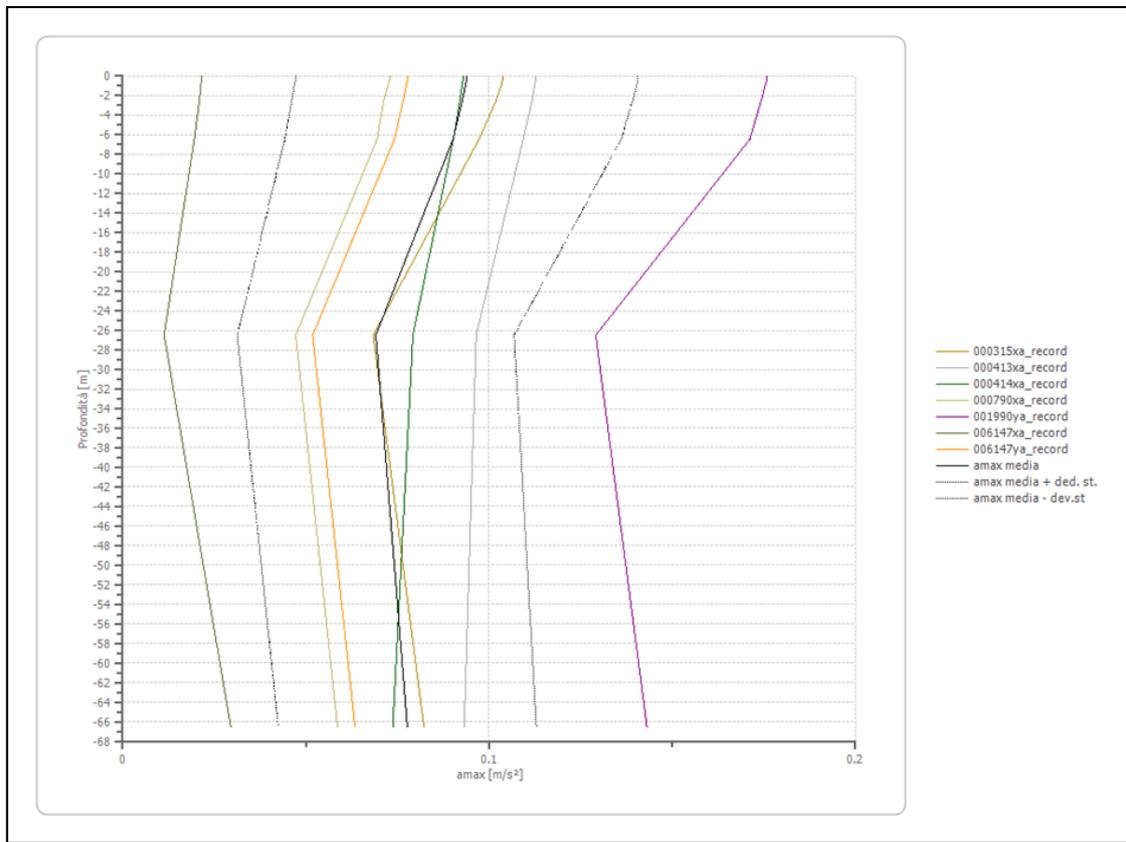
*Tipo di spettro: Spettro di risposta elastico*

	Operatività SLO	Danno SLD	Salvaguardia vita SLV	Prev. collasso SLC
Tr [anni]	60	101	949	1950
ag [m/s <sup>2</sup> ]	0.206	0.245	0.441	0.520
Fo	2.587	2.609	2.632	2.694
Tc* [s]	0.173	0.211	0.287	0.298
Ss	1.20	1.20	1.20	1.20
St	1.00	1.00	1.00	1.00
Cc	1.56	1.50	1.41	1.40
TB [s]	0.090	0.106	0.135	0.139
TC [s]	0.270	0.317	0.405	0.418
TD [s]	1.684	1.700	1.780	1.812
Se(0) [m/s <sup>2</sup> ]	0.247	0.294	0.529	0.624
Se(TB) [m/s <sup>2</sup> ]	0.640	0.767	1.393	1.681



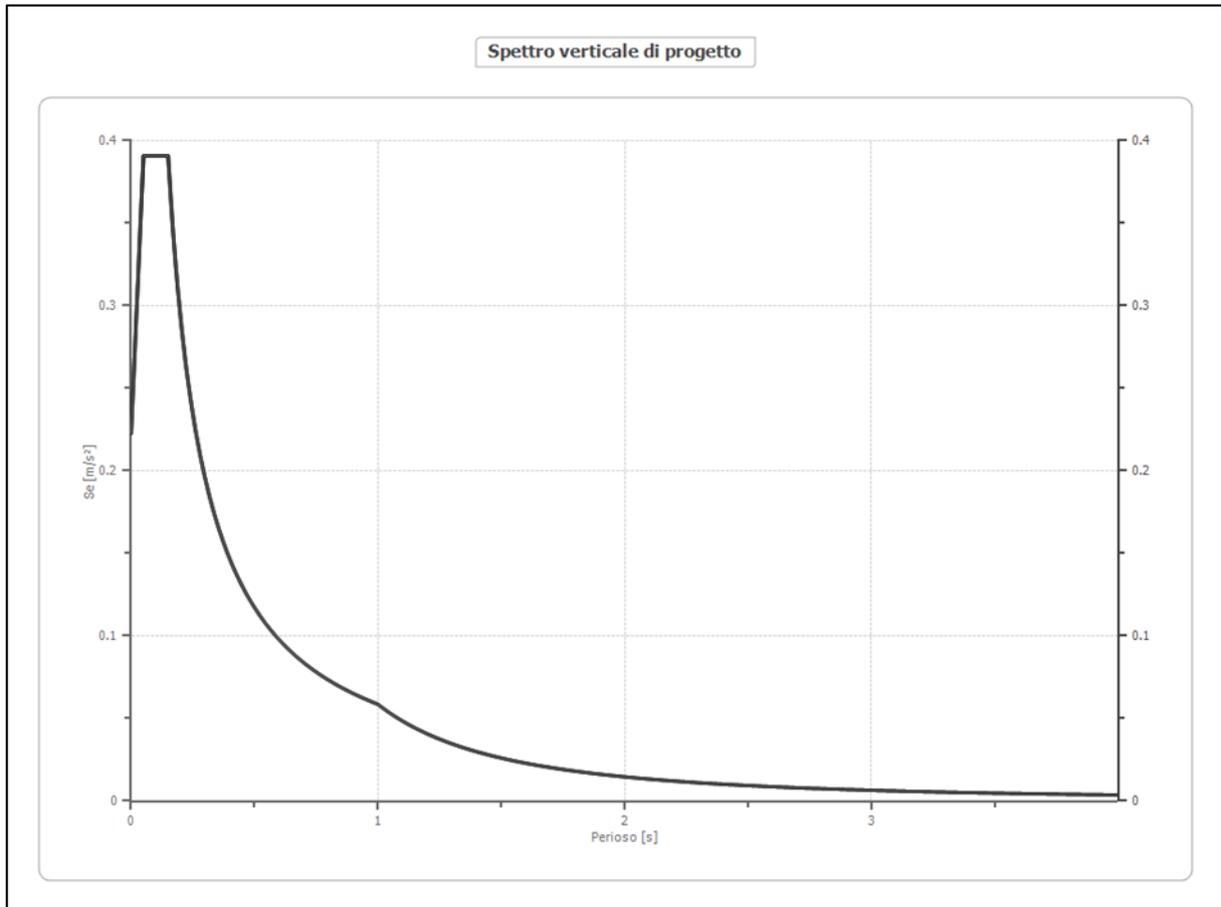
• **Profilo a max**

	0.0 [m]	0.5 [m]	2.5 [m]	6.5 [m]	26.5 [m]	66.5 [m]
000315xa_re cord [m/s <sup>2</sup> ]	0.104	0.104	0.102	0.097	0.068	0.082
000413xa_re cord [m/s <sup>2</sup> ]	0.113	0.113	0.112	0.109	0.096	0.093
000414xa_re cord [m/s <sup>2</sup> ]	0.093	0.093	0.092	0.090	0.079	0.074
000790xa_re cord [m/s <sup>2</sup> ]	0.073	0.073	0.071	0.069	0.047	0.059
001990ya_re cord [m/s <sup>2</sup> ]	0.176	0.176	0.174	0.171	0.129	0.143
006147xa_re cord [m/s <sup>2</sup> ]	0.021	0.021	0.021	0.020	0.011	0.029
006147ya_re cord [m/s <sup>2</sup> ]	0.078	0.078	0.077	0.074	0.052	0.063
media [m/s <sup>2</sup> ]	0.094	0.094	0.093	0.090	0.069	0.078
Dev. St. [m/s <sup>2</sup> ]	0.047	0.047	0.046	0.046	0.038	0.035



**Spettro verticale di progetto**

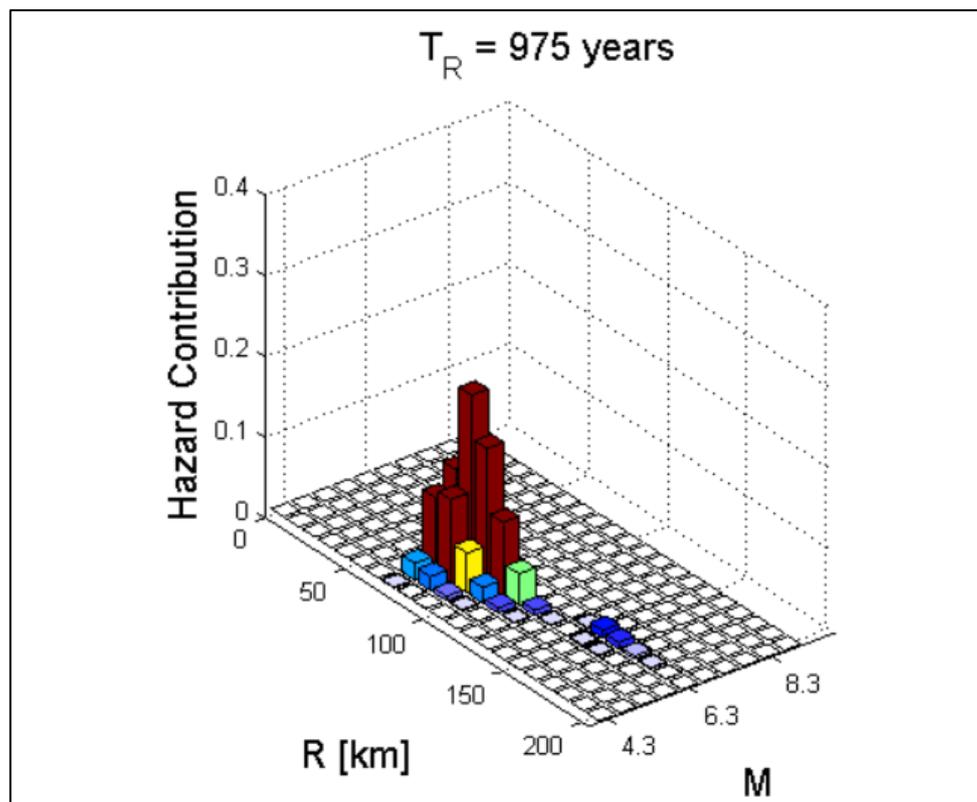
Ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0	Tc*	Fv	q	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [m/s <sup>2</sup> ]	Se(TB) [m/s <sup>2</sup> ]
0.644	2.632	0.150	0.910	1.5	0.050	0.150	1.000	0.223	0.391



## 11 CONCLUSIONI

Con riferimento a quanto sopra riportato si può affermare che:

- Vista il carattere strategico dell'opera in oggetto si è proceduto all'analisi della risposta sismica locale (RSL)
- L'esecuzione di una Risposta Sismica Locale consente di ottenere una valutazione dell'amplificazione locale più rigorosa dell'approccio semplificato.
- I punti fondamentali nella stima dell'azione sismica, sulla base di specifiche analisi di RSL, possono essere così schematizzati:
  - o definizione dell'input sismico rappresentativo dell'azione sismica al tetto del bedrock sismico, da dove si presume che inizi l'amplificazione locale;
  - o determinazione di un adeguato modello geologico e parametrizzazione degli strati individuati;
  - o analisi;
  - o scelta e rappresentazione dei parametri di output



- Come appare visibile dalla figura rappresentante nel seguente capitolo nei primi 30km non sono presenti eventi sismici di particolari importanze.

- L'area oggetto di studio si trova nel comune di Cavaglià che ha  $ag_{max} \leq 0,05g$  cioè  $ag_{max} = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$  considerando  $g$  pari a  $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$ . La definizione della pericolosità sismica del sito ha portato per lo stato limite di salvaguardia per la stabilità dei pendii e fondazioni un valore massimo di accelerazione pari a  $0,533 \text{ m}^2/\text{s}$ . Considerando gli effetti di amplificazione locali determinati dalla stratigrafia del sito e tenendo conto dei 7 accelerogrammi di riferimento utilizzati per l'analisi della risposta locale del terzo livello, si trova un'accelerazione massima pari a  $0,644 \text{ m/s}^2$  quindi si ritiene per tanto corretto dalla parte del progettista l'adozione di un valore di  $ag_{max}$  compreso tra  $0,500 \text{ m/s}^2$ –  $0,533 \text{ m/s}^2$ .