

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO**

**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO–CATANIA**

**U.O. INFRASTRUTTURE CENTRO**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**TRATTA NUOVA ENNA - DITTAINO (LOTTO 4B)**

**GEOTECNICA**

**FV01 RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA MEDIANTE METODO FEM 1D SU SET DI ACCELEROGRAMMI NATURALI**

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

RS3V 40 D 29 RH GE0005 012 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	S.Gasperoni	Febbraio 2020	M. Arcangeli	Febbraio 2020	F.Sparacino	Febbraio 2020	F. Arduini Febbraio 2020

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
n. 15502 del 4/4  
ITALFERR S.p.A.  
Direzione Tecnica  
Infrastrutture Centro  
Dott. Ing. Fabrizio Arduini



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO**  
**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA**  
 PROGETTO DEFINITIVO  
 TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO  
 DELL'AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA MEDIANTE  
 METODO FEM 1D SU SET DI ACCELEROGRAMMI NATURALI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 012	A	2 di 36

## INDICE

1.	PREMESSA .....	3
2.	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	4
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	4
2.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	4
2.3	SOFTWARE.....	4
3.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	5
3.1	INDAGINI ESEGUITE.....	5
3.2	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO .....	5
3.3	FALDA.....	7
3.4	INDAGINI SISMICHE .....	7
4.	CONDIZIONI SISMICHE .....	9
4.1	GENERALITÀ.....	9
4.2	DEFINIZIONE DELL'ACCELERAZIONE ORIZZONTALE MASSIMA ATTESA SU SITO DI RIFERIMENTO RIGIDO (AG) .....	10
4.3	ANALISI DI DISAGGREGAZIONE .....	11
4.4	ACCELEROGRAMMI NATURALI.....	14
5.	ANALISI RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	21
5.1	PREMESSA.....	21
5.2	LEGAME COSTITUTIVO .....	22
5.3	PARAMETRI GEOTECNICI.....	29
6.	RISULTATI E CONCLUSIONI .....	32
6.1	RISULTATI DELL'ANALISI.....	32
6.2	DEFINIZIONE DELLO SPETTRO NORMALIZZATO DI PROGETTO.....	34



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO  
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO  
DELL'AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA MEDIANTE  
METODO FEM 1D SU SET DI ACCELEROGRAMMI NATURALI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 012	A	3 di 36

## 1. PREMESSA

Nella presente relazione si riporta l'analisi di risposta sismica locale per la stazione di Enna nell'ambito del Progetto Definitivo lotto 4b della tratta denominata Nuova Enna - Dittaino relativa al Nuovo Collegamento ferroviario Palermo-Catania.

In corrispondenza dell'opera sono state appositamente eseguite indagini sismiche finalizzate alla definizione della categoria di sottosuolo sismica. Dalla prova geosismica MASW (MASW 6 – HVSR 090) si è ottenuto un valore di  $V_{s,eq} = 376$  m/s, definendo una categoria di sottosuolo nell'intorno del valore limite tra B e C. Dalle tomografie sismiche eseguite nell'area (vedasi stesa tomografica LS11) si definisce categoria sottosuolo tipo C.

Nel presente documento viene eseguita l'analisi di risposta sismica locale.

In particolare verranno affrontati i seguenti aspetti:

- Richiamo delle condizioni geotecniche locali;
- Definizione delle azioni sismiche e analisi dei dati di disaggregazione locale;
- Determinazione degli accelerogrammi naturali, spettro compatibili;
- Analisi di risposta sismica locale: definizione del coefficiente di amplificazione stratigrafica sulla base degli accelerogrammi ottenuti al p.c. e relativi spettri.

Tutte le analisi svolte nel seguito sono eseguite in conformità alla normativa italiana vigente sulle opere civili (DM 17/01/2018).



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO**  
**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA**  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA MEDIANTE METODO FEM 1D SU SET DI ACCELEROGRAMMI NATURALI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 012	A	4 di 36

## 2. **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

### 2.1 **Normativa di riferimento**

- [N.1]. Norme Tecniche per le Costruzioni, DM del 17/01/2018;  
[N.2]. C.M. 21/01/2019 n.7: Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni.

### 2.2 **Documenti di riferimento**

- [DC1]. RS3V 40 D09 RH GE0001 001 - Nuovo collegamento Palermo-Catania, tratta Nuova Enna - Dittaino. Progetto Definitivo. Relazione Geotecnica tratti all'aperto - Lotto 4b.  
[DC2]. RS3V 40 D09 F6 GE0001 001 ÷ RS3V 40 D09 F6 GE0001 010 - Nuovo collegamento Palermo-Catania tratta Nuova Enna - Dittaino. Progetto Definitivo. Profilo geotecnico - Lotto 4B – 10 tavole.

### 2.3 **Software**

- *REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis*. Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E. Bulletin of Earthquake Engineering, 8:339-362, 2010 DOI 10.1007/s10518-009-9146-1. Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P. and Margaris, B. Internet-Site for European Strong-Motion Data, European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme (2002). <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/>
- Plaxis 2d 2018, con autorizzazione NP811PK 854175b5 \*\*\*\*\* con 1 chiave hardware; prodotto e commercializzato dalla Plaxis bv, Delft, Olanda.

### 3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Nel presente capitolo si riporta la caratterizzazione geotecnica per l'opera in esame, valutata sulla base dell'interpretazione delle indagini geotecniche svolte in prossimità dell'opera.

La stratigrafia di riferimento è individuata sulla base delle indagini eseguite in corrispondenza dell'opera, come rappresentate nel profilo stratigrafico longitudinale.

Per maggiori dettagli sulla caratterizzazione geotecnica si rimanda alla Relazione geotecnica generale [DC1].

#### 3.1 Indagini eseguite

In corrispondenza dell'opera sono state eseguite le seguenti indagini in sito:

- sondaggi 4SD2 , 4A\_S30, 4S10;
- DPSH08;
- Masw6-HVSR90;
- Stese geofisiche LS11, LS21, LS22 con restituzione tomografica.

In corrispondenza dei sondaggi sono stati prelevati campioni indisturbati e rimaneggiati per prove di laboratorio.

Nei sondaggi sono stati installati piezometri per il rilievo della falda.

#### 3.2 Stratigrafia e parametri geotecnici di progetto

Sulla base dei risultati delle indagini (in sito ed in laboratorio) è stato intercettato a parire da p.c. cappellaccio alterato della formazione di base (unità cap-c) limoso argilloso sabbioso con spessore massimo 14.5 m ed a seguire la formazione di base argilloso marnosa **Formazione di Terravecchia** unità TRV, fino alla massima profondità investigata. In corrispondenza del sondaggio 4S10, verso monte inizia ad affiorare la Formazione di Terravecchia in facies arenarie e sabbie alternate con peliti (Unità TRVa).

Dalle stese geofisiche a restituzione tomografica, gli spessori delle coperture non sembrano variare in maniera significativa nelle sezioni tracciate, quindi la situazione stratigrafica appare sostanzialmente omogenea nell'area in esame.

Nei sondaggi sono stati installati piezometri che hanno rilevato livello massimo di falda a p.c..

Nel seguito si sintetizzano le caratteristiche geotecniche di progetto per le varie unità geotecniche, in accordo a quanto definito nella relazione geotecnica generale, a cui si rimanda per i dettagli.

Cautelativamente, considerata l'importanza dell'opera, si prende a riferimento la situazione stratigrafica più cautelativa individuata dalle indagini fino ad ora eseguite.

**Da 0.0 a 14.5 m      Unità cap – c: Cappellaccio limoso sabbioso costituente la parte alterata della formazione di base**

$\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \div 5 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 28^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c_u = 50 \div 70 \text{ kPa } z < 9.5\text{m}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$c_u = 120 \text{ kPa } z > 9.5\text{m}$	
$V_s = 150 \div 350 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$E_o = 100 \div 120 \text{ MPa } z < 9.5\text{m}$	modulo di deformazione elastico iniziale
$E_o = 250 \text{ MPa } z > 9.5\text{m}$	
Calfa = 0.0015	
$k = 6.0E^{-06} \div 7.0E^{-07} (1.0E^{-07}) \text{ m/s}$	permeabilità (valore medio)

**da 14.5 m a 50.0 m: Unità TRV– Formazione di Terravecchia: argilla da debolmente marnosa a marnosa**

$\gamma = 21.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 15 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 24^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$V_s = 400 \div 600 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$c_u = 200 \text{ kPa per } z < 25\text{m}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$c_u = 300 \div 350 \text{ kPa } z > 25\text{m}$	
$E_o = 250 \div 400 \text{ MPa per } z < 25\text{m}$	Modulo di deformazione elastico iniziale
$E_o = 800 \div 1200 \text{ MPa per } z > 25\text{m}$	modulo di deformazione elastico iniziale
$E'_{op} = E_o/10 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico operativo per analisi cedimenti rilevati
Calfa = 0.0015	
$k = 2.0E^{-08} \div 2.0E^{-06} (4.0E^{-08}) \text{ m/s}$	permeabilità(valore medio)

### 3.3 Falda

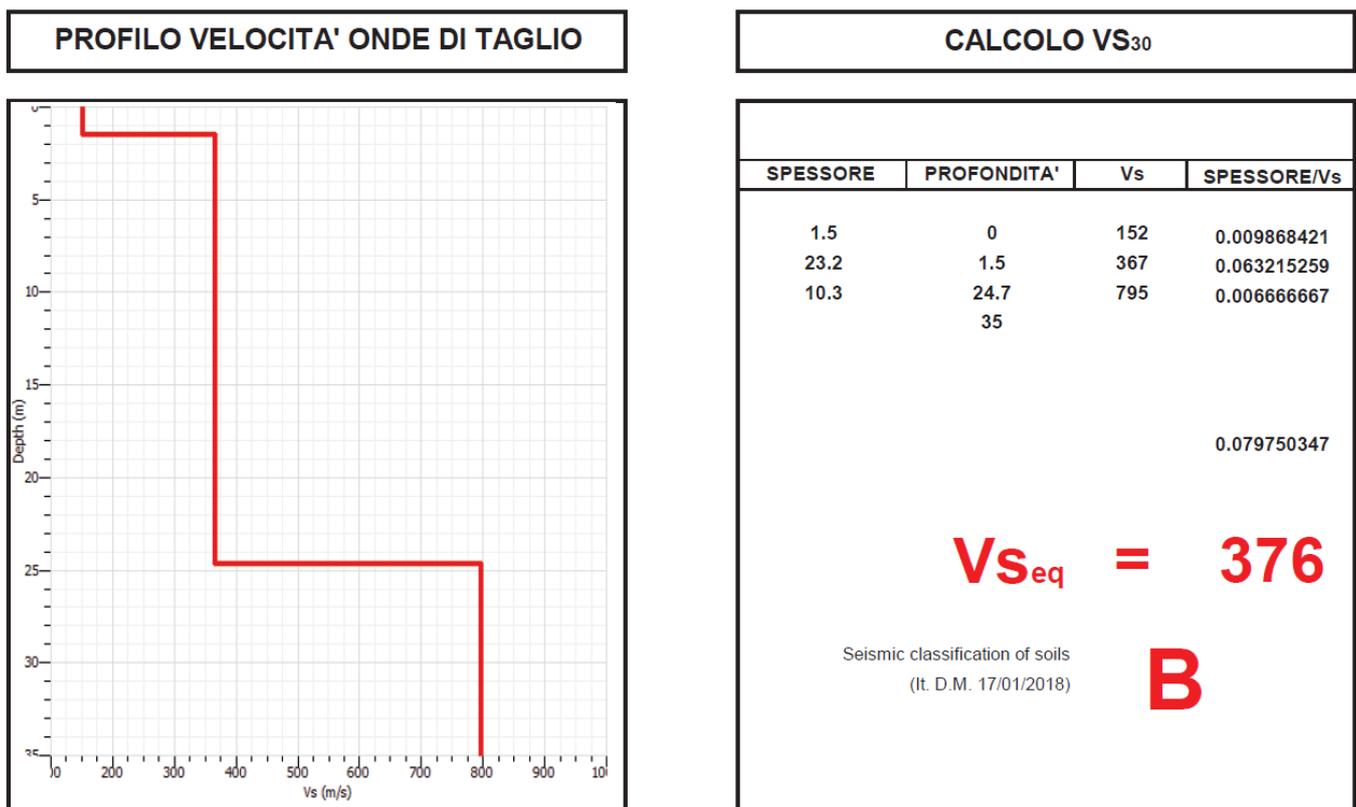
Nei sondaggi sono stati installati piezometri che hanno rilevato livello massimo di falda circa a p.c..

### 3.4 Indagini sismiche

Dalla prova geosismica MASW 6 – HVSR 090, si è ottenuto un valore di  $V_{s,eq} = 376$  m/s, definendo una categoria di sottosuolo nell'intorno del valore limite tra B e C.

Dalle tomografie sismiche (vedasi stesa tomografica LS11) si definisce categoria sottosuolo C.

Nelle figure seguenti si riportano i risultati delle indagini sismiche.



**Figura 1 –  $V_{s,eq}$  da prova sismica Masw**

Nella seguente tabella si riportano i principali risultati della prova HVSR eseguita in affiancamento alle indagini Masw6 dell'opera in esame. Si osserva che la frequenza di risonanza del deposito è compresa fra 3 e 5 Hz.



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO  
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO**

FV01 RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA MEDIANTE METODO FEM 1D SU SET DI ACCELEROGRAMMI NATURALI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 012	A	8 di 36

Tabella 1 – MASW6 - HVSr 090

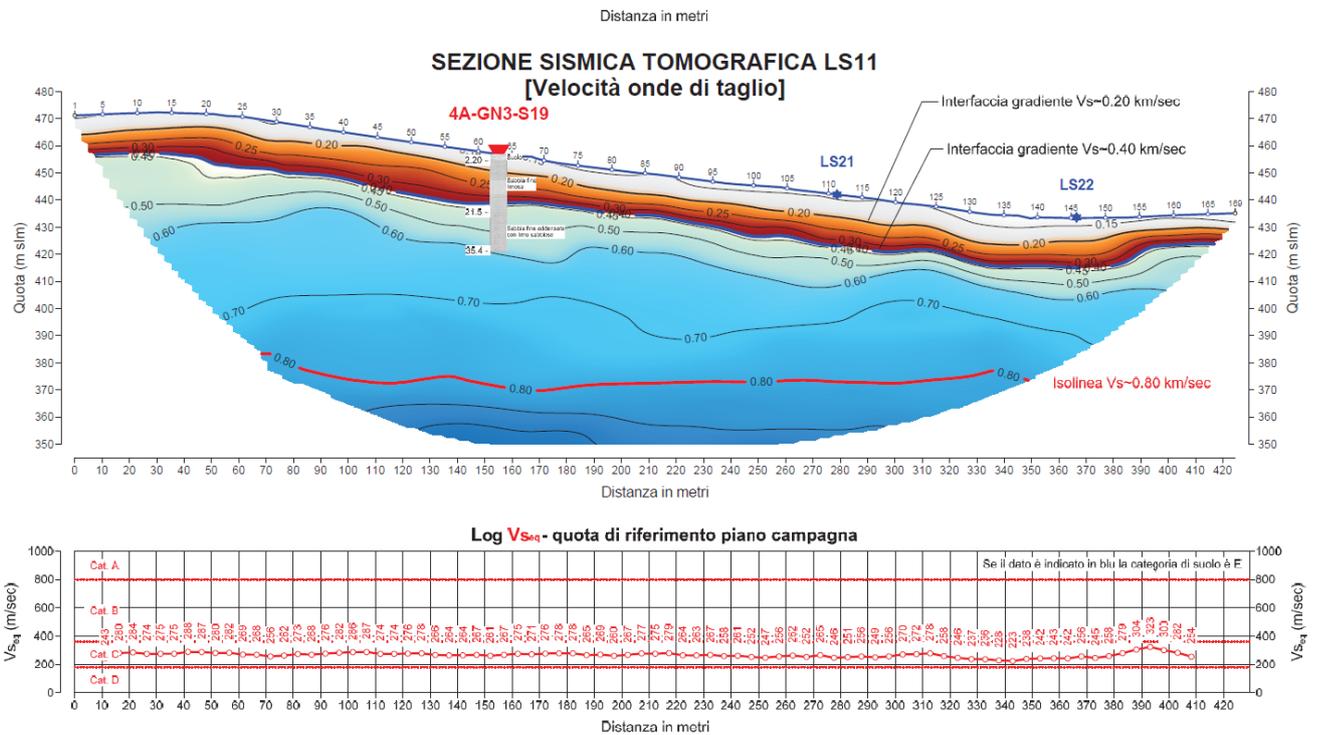
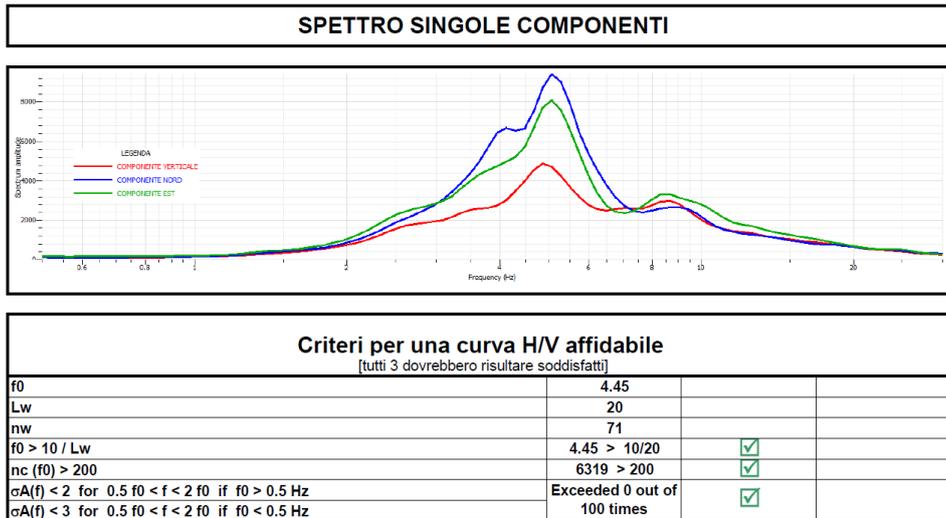


Figura 2 – Vs<sub>eq</sub> da tomografia sismica

## 4. CONDIZIONI SISMICHE

### 4.1 Generalità

L'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una "pericolosità sismica di base", in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I risultati dello studio di pericolosità sono forniti, in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non distano più di 10 km) e nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale:

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima  $a_g$ , del valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale  $F_0$ , del periodo di inizio del tratto costante dello spettro in accelerazione orizzontale  $T_c^*$ ;
- per diverse probabilità di superamento in 75 anni e/o diversi periodi di ritorno  $T_R$  ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 45 e 1462 anni, estremi inclusi.

Pertanto, per individuare, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le corrispondenti azioni sismiche occorre fissare:

- la vita di riferimento  $V_R$  della costruzione;
- le probabilità di superamento nella vita di riferimento  $P_{VR}$  associate a ciascuno degli stati limite considerati.

Infatti, fissata la vita di riferimento  $V_R$ ,  $T_R$  è esprimibile in funzione di  $P_{VR}$  mediante l'espressione:

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

La vita di riferimento è calcolata come:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

dove  $V_N$  è la vita nominale dell'opera e  $C_U$  la classe d'uso.

Per l'opera d'arte in esame si ha:  $V_N=75$  anni e  $C_U=1.5$  (classe d'uso III).



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO  
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA  
PROGETTO DEFINITIVO  
TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO

FV01 RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA MEDIANTE METODO FEM 1D SU SET DI ACCELEROGRAMMI NATURALI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 012	A	10 di 36

Nota l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido  $a_g$ , l'accelerazione di picco  $a_{max}$  è valutata sulla base della risposta sismica locale:

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

dove  $S_s$  è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione stratigrafica,  $S_T$  è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione topografica.

Nel caso in esame, dall'insieme delle indagini sismiche eseguite in corrispondenza dell'opera si è definita cautelativamente una categoria sottosuolo di tipo C. Comunque nel seguito si riporta l'analisi di risposta sismica locale per la definizione del coefficiente  $S_s$  da adottare per l'opera.

Il coefficiente di amplificazione topografica è assunto  $S_T = 1.0$ .

#### 4.2 Definizione dell'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido ( $a_g$ )

Per la definizione l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido ( $a_g$ ), si è utilizzato il foglio "Spettri del Ministero" con ricerca per coordinate (Spettri-NTCver.1.0.3).

Quindi per la definizione dell'azione sismica del presente progetto si è considerato il punto del grigliato di pericolosità sismica identificato dalle coordinate, longitudine = 14.474 e latitudine = 37.562, che costituisce il punto dell'area indagata con azione sismica più gravosa.

Nella seguente tabella si riporta l'azione sismica del sito con riferimento a SLV ( $T_r = 1068$ ) da cui:  **$a_g = 0.1336$** .

Tabella 2 – Individuazione pericolosità sismica del sito

**FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO**

Ricerca per coordinate      LONGITUDINE: 14.47394      LATITUDINE: 37.56292

Ricerca per comune      REGIONE: Sicilia      PROVINCIA: Catania      COMUNE: Ramacca

**Elaborazioni grafiche**

Grafici spettri di risposta

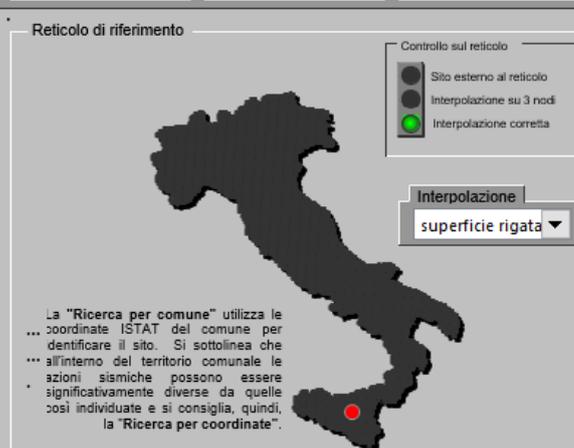
Variabilità dei parametri

---

**Elaborazioni numeriche**

Tabella parametri

**Reticolo di riferimento**



Controllo sul reticolo

- Sito esterno al reticolo
- Interpolazione su 3 nodi
- Interpolazione corretta

Interpolazione: superficie rigata

La "Ricerca per comune" utilizza le ... coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che ... all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

INTRO

FASE 1

FASE 2

FASE 3

SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T_C^*$ [s]
SLO	68	0.048	2.484	0.298
SLD	113	0.058	2.538	0.335
SLV	1068	0.133	2.622	0.538
SLC	2193	0.178	2.627	0.569

### 4.3 Analisi di disaggregazione

L'analisi di disaggregazione è stata svolta utilizzando il sito dell'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, "esse1-gis.mi.ingv.it").

Poichè i dati dell'INGV sono riferiti esclusivamente ad un periodo di riferimento ( $V_R=50$  anni), differente da quello dell'opera in oggetto, l'analisi di disaggregazione è stata eseguita considerando la PVR disponibile dalla fonte dell'INGV più simile a quella del sito, che è pari al 5%.

Nelle seguenti figure sono riportati i principali risultati della ricerca dei dati di disaggregazione sismica da cui si evince:

- Magnitudo  $M = 5.0 \div 7.5$
- Distanza dalla sorgente =  $30 \div 70$  km

Tabella 3 – Mappa di pericolosità sismica

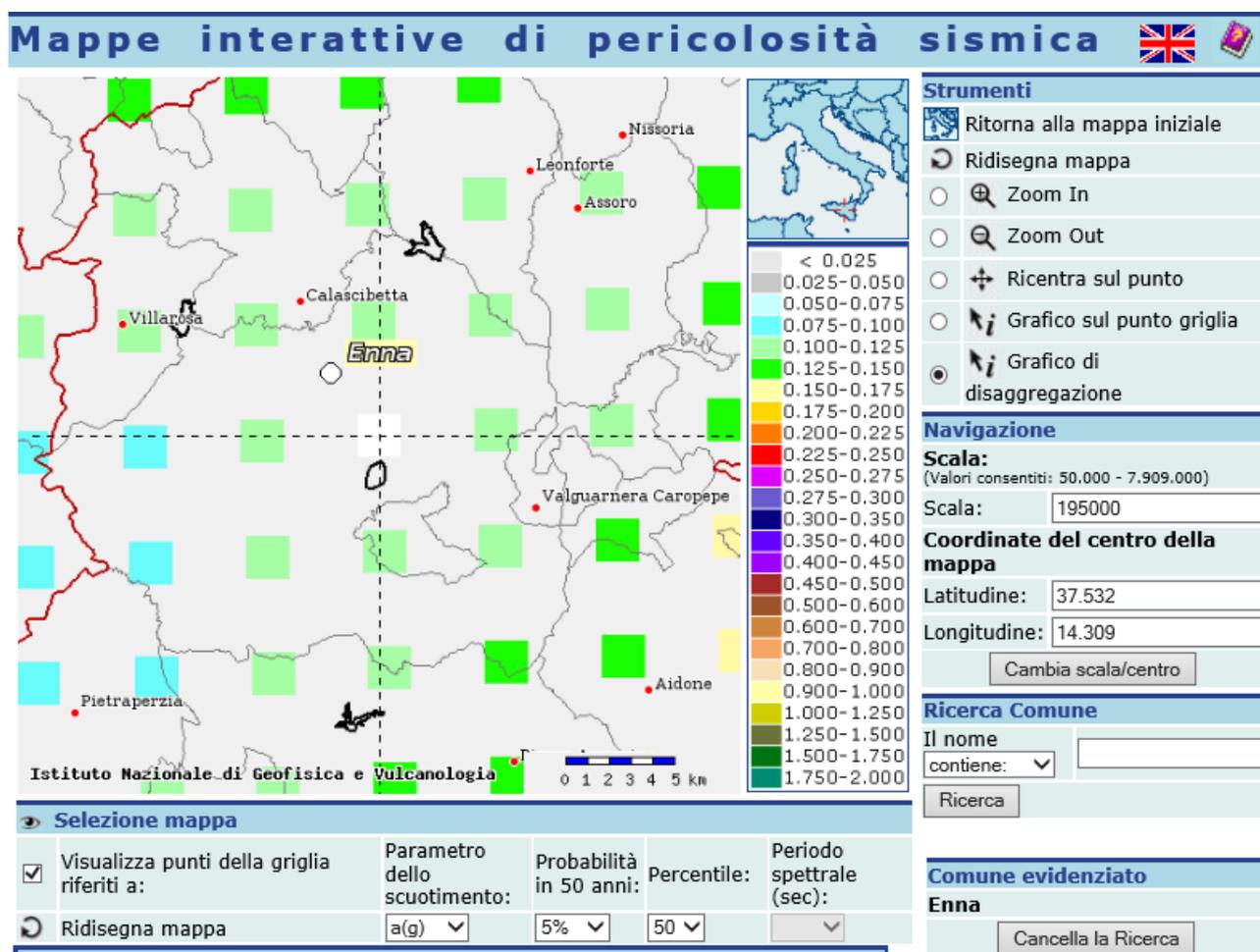
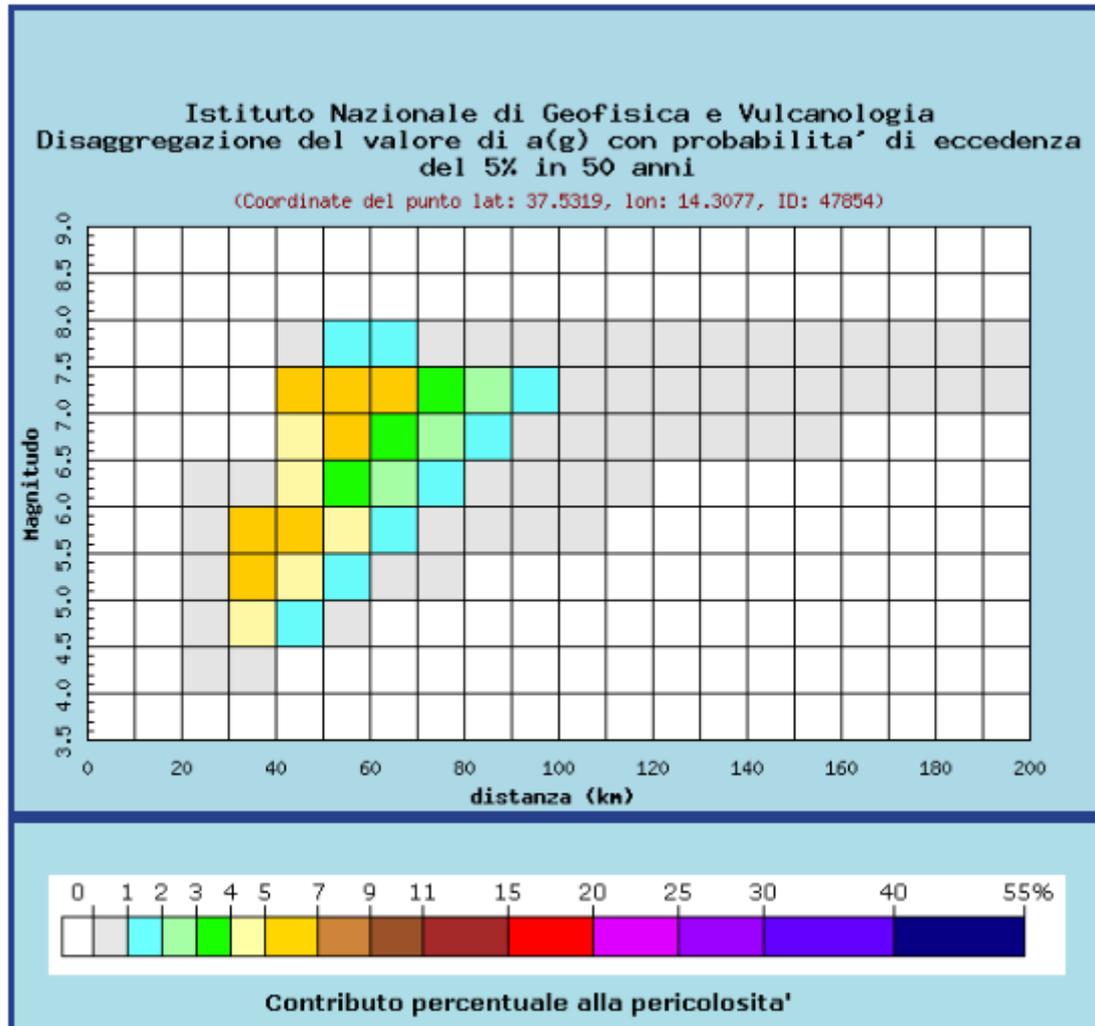


Tabella 4 – Magnitudo e distanza



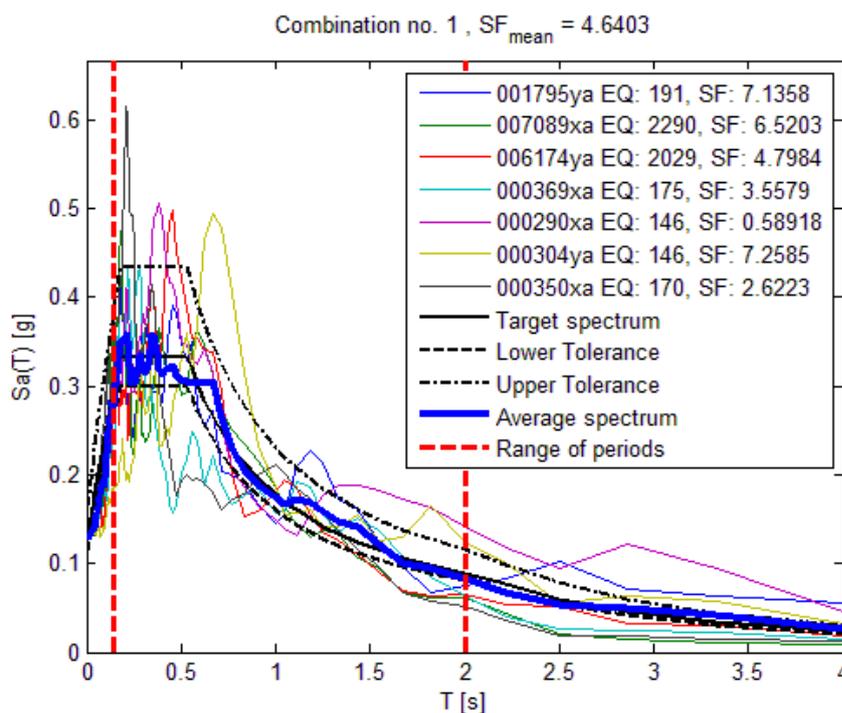
#### 4.4 Accelerogrammi naturali

La ricerca degli accelerogrammi naturali compatibili con un dato spettro di riferimento è stata eseguita mediante il programma REXEL con riferimento alla registrazione di dati europei “Strong Motion Data” (Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E. Bulletin of Earthquake Engineering, 8:339-362, 2010 DOI 10.1007/s10518-009-9146-1, vedasi paragrafo [DC1]),

Nel programma sono stati inseriti come dati di input le coordinate geografiche del sito (longitudine e latitudine), la vita nominale e la classe d’uso. La ricerca dei dati degli accelerogrammi da considerare nelle analisi è stata fatta considerando una magnitudo compresa fra 6.5 e 7.5 e distanza da sorgente da 30 a 70 km, in relazione alle risultanze dell’analisi dei dati di disaggregazione.

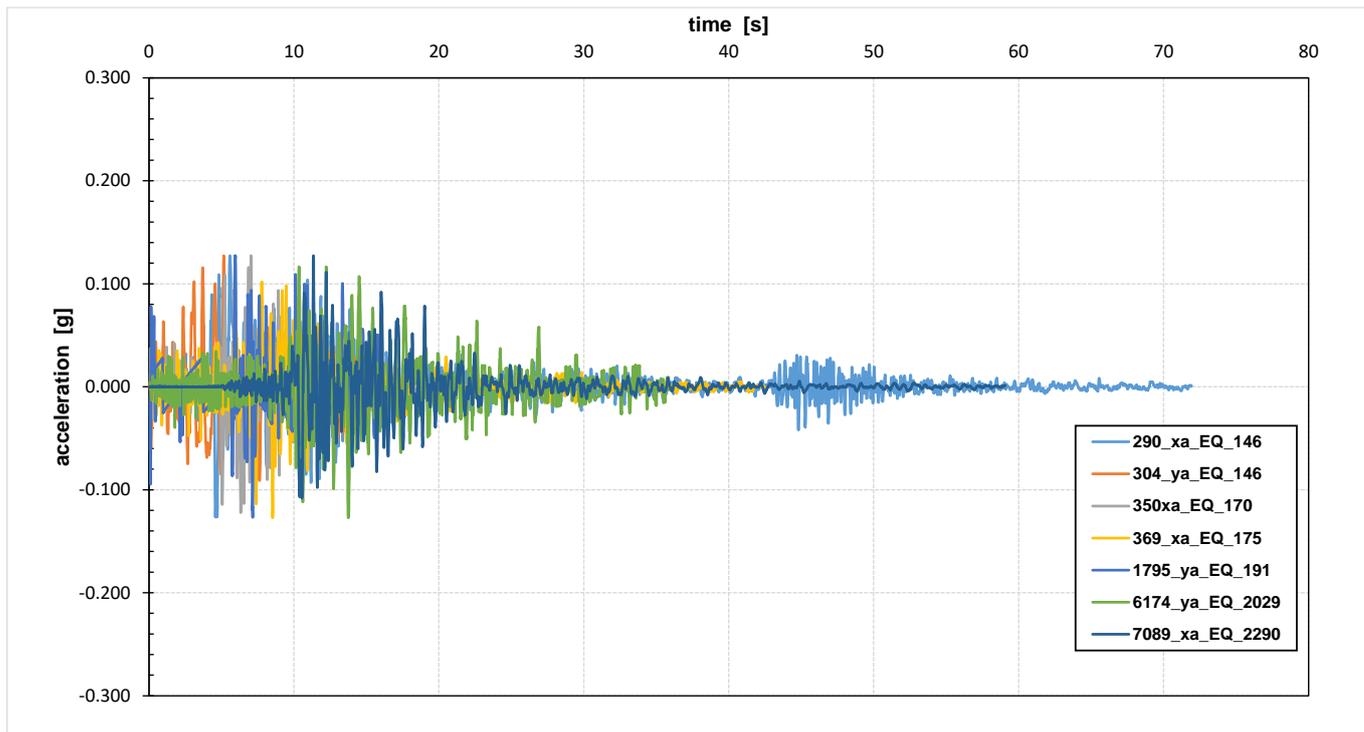
Gli accelerogrammi naturali così individuati sono sintetizzati nella seguente tabella e rappresentati nella seguente Figura 3, tutti insieme a confronto, e separatamente da Figura 4 a Figura 10:

- sono in numero di n.7 su suolo di tipo A,
- sono scalati con un fattore scala medio di 4.64,
- sono compatibili con lo spettro elastico (5%), valutati con range di tolleranza del 10% ÷ 30%;
- la spettro compatibilità è stata estesa fino ad un tempo di 2 sec.



FV01 RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA MEDIANTE METODO FEM 1D SU SET DI ACCELEROGRAMMI NATURALI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 012	A	15 di 36



Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance [km]	PGA_X [m/s <sup>2</sup> ]	PGA_Y [m/s <sup>2</sup> ]	PGV_X [m/s]	PGV_Y [m/s]	ID_X	ID_Y	Np_X	Np_Y	EC8 Site class
1795	191	ST587	Golbasi	06/06/1986	5.8	strike slip	52	0.1708	0.1751	0.0369	0.0209	5.979	9.4611	0.93068	0.68574	A
7089	2290	ST557	Pasinler	10/07/2001	5.4	strike slip	32	0.1916	0.2128	0.0239	0.0187	8.9039	12.8104	0.95398	0.82635	A
6174	2029	ST1354	Kozani	13/05/1995	6.5	normal	60	0.2933	0.2604	0.0298	0.024	15.829	15.515	1.1133	0.6449	A
369	175	ST109	Lazio Abruzzo	07/05/1984	5.9	normal	44	0.3512	0.4253	0.04	0.0462	7.9839	8.9567	0.97592	0.97882	A
290	146	ST96	Campano Lucano	23/11/1980	6.9	normal	32	2.1206	3.1662	0.3304	0.5531	11.621	5.3703	0.7377	0.82849	A
304	146	ST110	Campano Lucano	23/11/1980	6.9	normal	64	0.162	0.1721	0.0204	0.0231	10.9838	7.8214	1.0846	1.0334	A
350	170	ST129	Biga	05/07/1983	6.1	oblique	56	0.4765	0.4911	0.0558	0.0852	7.7322	3.4212	0.96706	1.113	A

Figura 3 – Accelerogrammi naturali

Gli accelerogrammi naturali sono rappresentati separatamente da Figura 4 a Figura 10, già scalati.

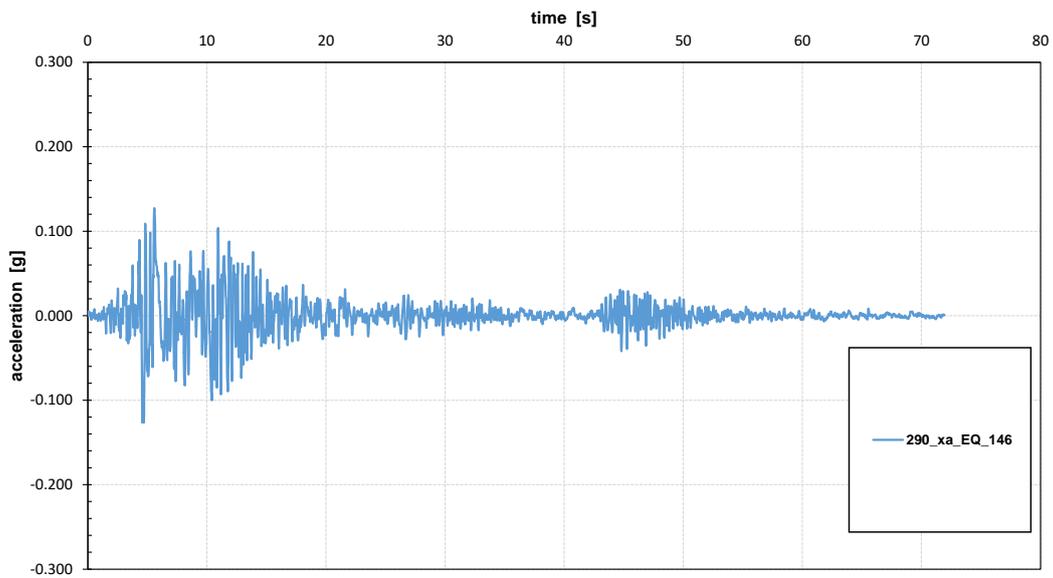


Figura 4 Accelerogramma naturale: Waveform ID=290\_xa, Earthquake ID=146

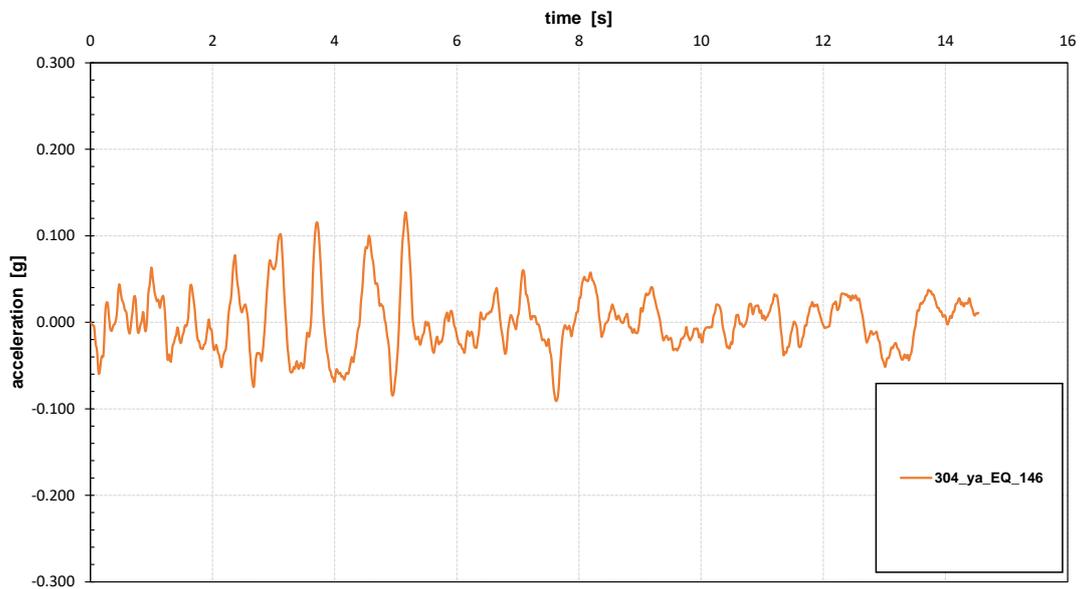


Figura 5 – Accelerogramma naturae: Waveform ID=304\_ya, Earthquake ID=146

FV01 RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA MEDIANTE METODO FEM 1D SU SET DI ACCELEROGRAMMI NATURALI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 012	A	17 di 36

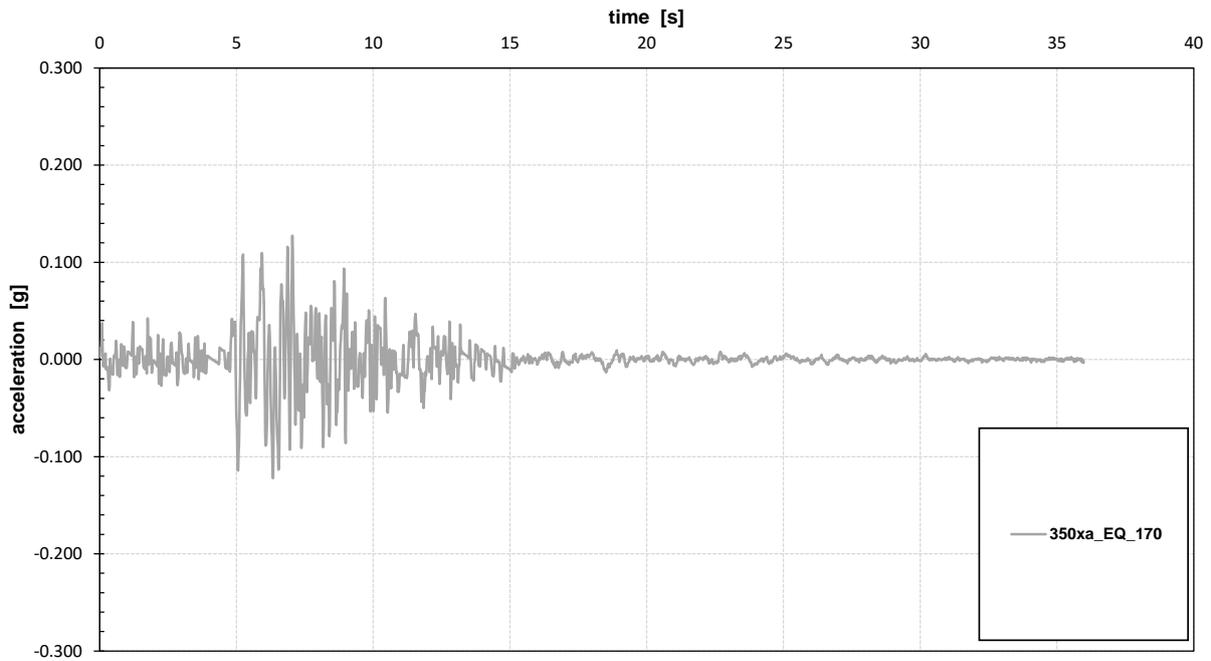


Figura 6 – Accelerogramma naturale: Waveform ID=350\_xa, Earthquake ID=170

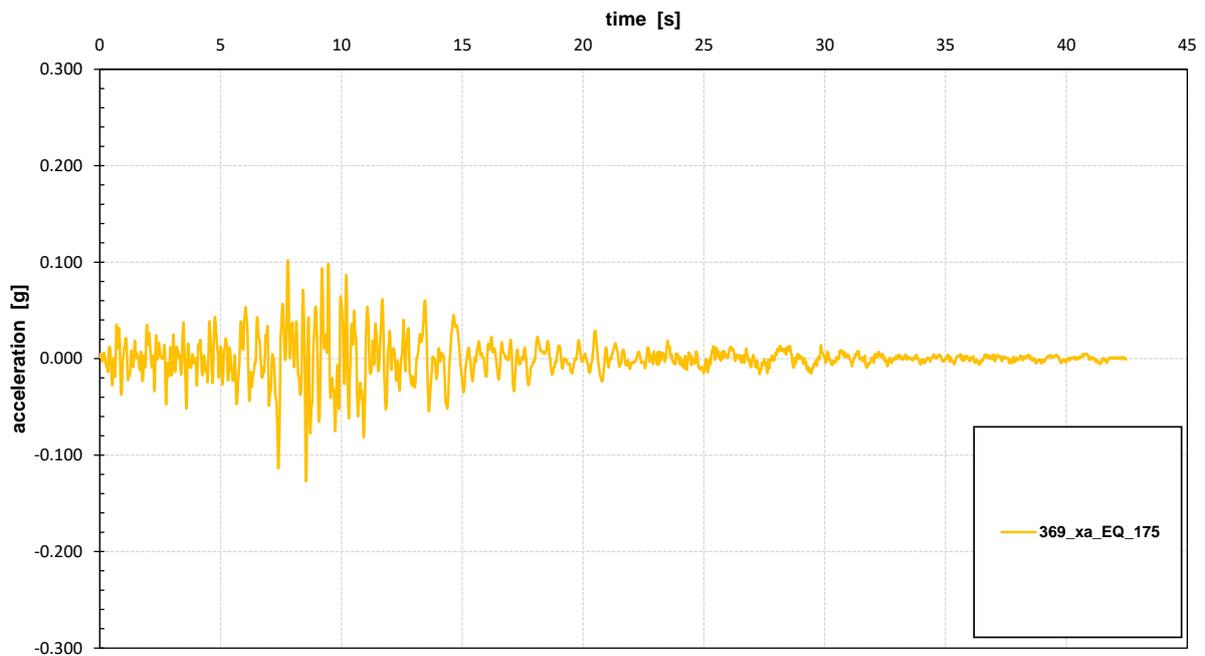


Figura 7 – Accelerogramma naturale: Waveform ID=369\_xa, Earthquake ID=175

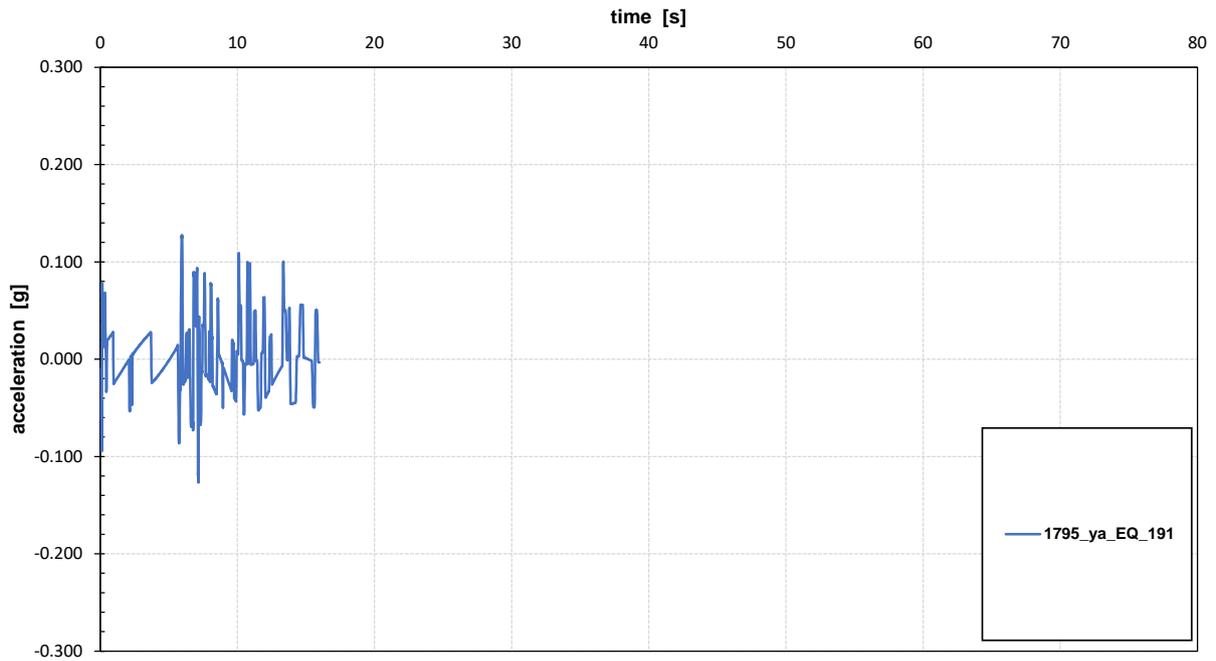


Figura 8 – Accelerogramma naturale: Waveform ID=1795\_ya, Earthquake ID=191

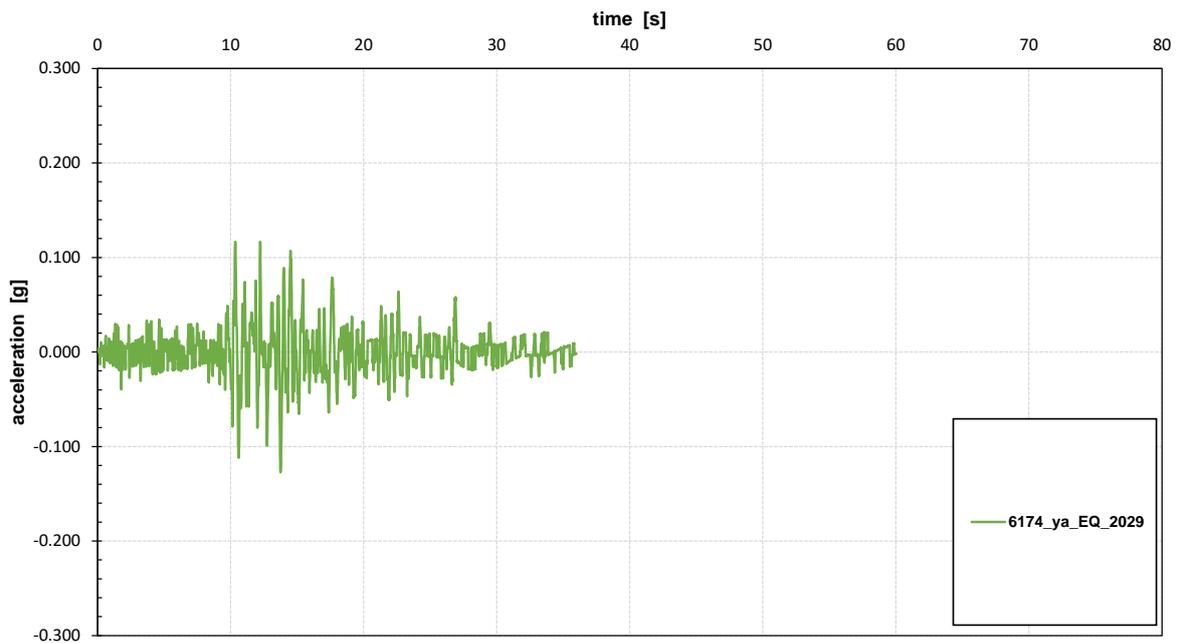


Figura 9 – Accelerogramma naturale: Waveform ID=6174\_ya, Earthquake ID=2029

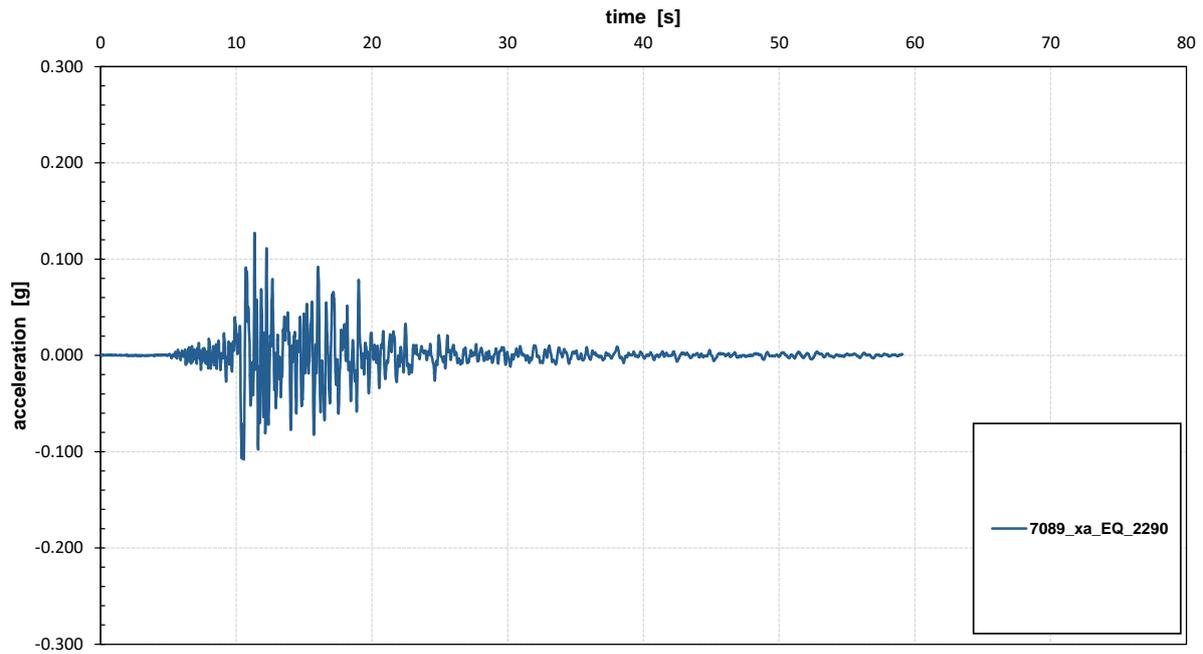


Figura 10 – Accelerogramma naturale: Waveform ID=7089\_xa, Earthquake ID=2290

Nella seguente figura sono mostrati gli spettri di input.

FV01 RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE STRATIGRAFICA MEDIANTE METODO FEM 1D SU SET DI ACCELEROGRAMMI NATURALI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 012	A	20 di 36

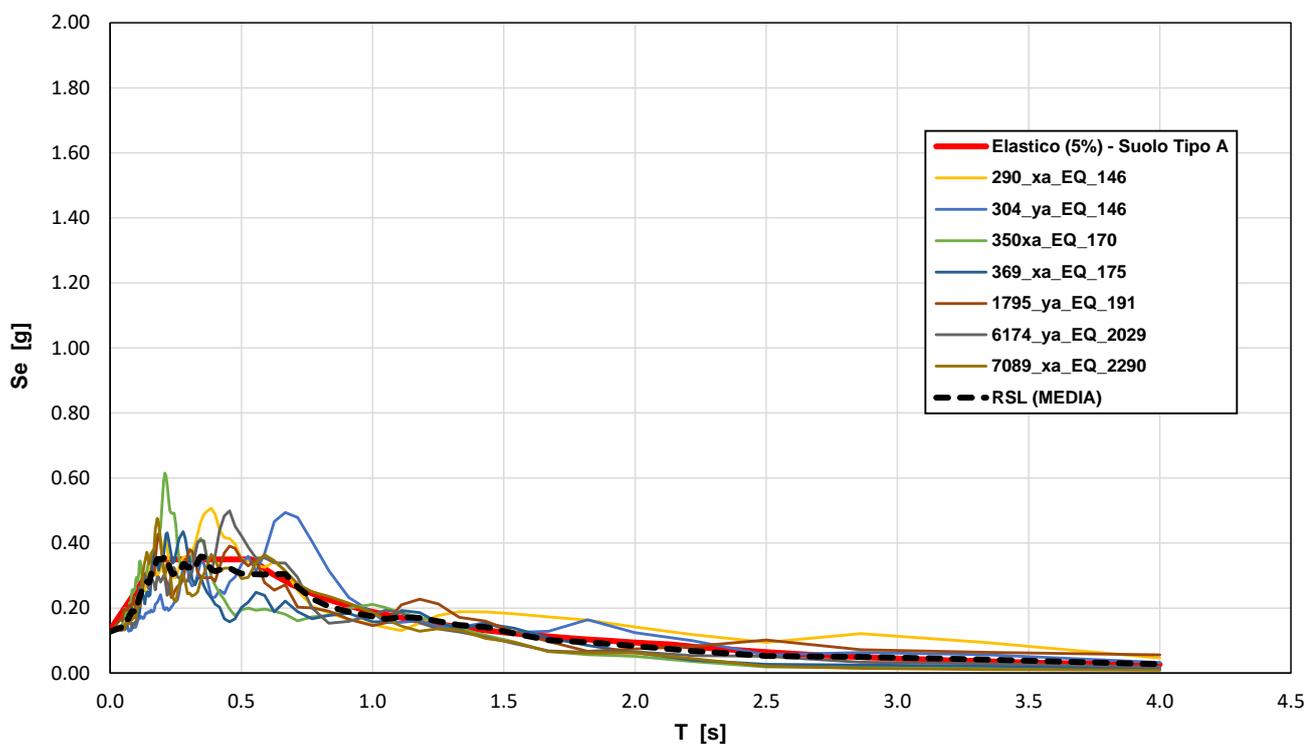


Figura 11 – Spettri di input

## 5. ANALISI RISPOSTA SISMICA LOCALE

### 5.1 Premessa

L'analisi della risposta sismica locale è stata svolta mediante programma Plaxis (2018.01) con analisi FEM 2D. PLAXIS è un codice di calcolo agli elementi finiti utilizzabile per eseguire analisi di stabilità e di deformazione nell'ambito di molteplici applicazioni geotecniche e di interazione terreno-struttura. Il programma permette di simulare situazioni reali riconducibili a condizioni di deformazione piane (plain strain).

In particolare è stato creato un modello di terreno 1D (colonna di terreno), simulando la stratigrafia locale sulla base delle indagini effettivamente eseguite nel sito. I terreni sono stati caratterizzati con Hardening Soil Small Strain Model. Le metodologie di calcolo generali sono di seguito sintetizzate ed anche i parametri geotecnici di calcolo.

Nella seguente figura è mostrata la mesh di calcolo. Si tratta di una colonna di larghezza 1.5 m libera in testa e con alla base spostamenti impressi dall'input sismico (alla base:  $S_x(t)$ : terremoto, applicazione di ciascuno dei 7 accelerogrammi naturali precedentemente determinati al paragrafo 4.4;  $S_y = 0$ ); i bordi verticali della colonna sono vincolati con "tied degrees of freedom", appositamente previsti per l'analisi dinamica piana 1D.

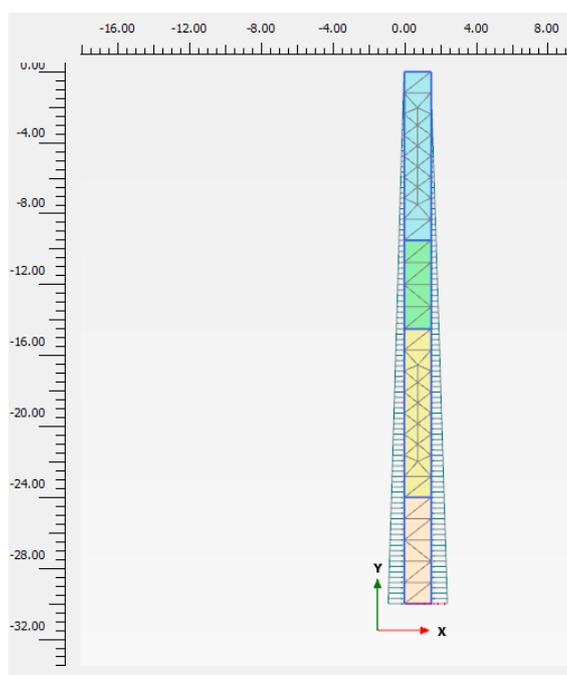


Figura 12 – Mesh

## 5.2 Legame costitutivo

Il programma Plaxis rende disponibile all'utente un legame costitutivo denominato Hardening Soil Small Strain Model, che permette di descrivere in maniera soddisfacente i principali aspetti del comportamento meccanico dei terreni da considerare nelle analisi dei problemi di scavo.

In generale nel modello costitutivo in esame, il terreno è assimilato ad un mezzo poroso continuo, caratterizzato da un legame costitutivo elastico-plastico con superficie di snervamento chiusa (vedasi Figura 13) e incrudimento isotropo regolato dalle deformazioni volumetriche plastiche (con legge flusso associato) e distorsionali plastiche (con legge di flusso non associato).

Le principali caratteristiche del modello costitutivo sono le seguenti:

- una differente rigidità per percorsi tensionali di primo carico e di scarico-ricarico;
- sviluppo di deformazioni plastiche per stati tensionali deviatorici (con legge di flusso non associata) e sferici (con legge di flusso associata);
- criterio di rottura di tipo Mohr-Coulomb;
- il modulo di rigidità secante  $E_{50}$  per percorsi tensionali di primo carico è funzione della tensione di confinamento applicata (Figura 14):

$$E_{50} = E_{50ref} \left[ \frac{(c' \cos \varphi' - \sigma'_{min} \sin \varphi')}{(c' \cos \varphi' + p_{ref} \sin \varphi')} \right]^m$$

dove:

$p_{ref} = 100$  kPa è la pressione di riferimento,

$\sigma'_{min}$  è la tensione efficace principale minore,

$E_{50ref}$  è il modulo di rigidità secante alla pressione di riferimento ( $\sigma'_{min} = p_{ref}$ ),

$m$  è un coefficiente esponenziale che regola la dipendenza della rigidità dallo stato tensionale,

$E_{50}$  è il modulo di rigidità secante (al 50% della rottura) riferito alla tensione  $\sigma'_{min}$ ;

- il modulo di rigidità Eur per percorsi tensionali di scarico-ricarico funzione della tensione di confinamento applicata (Figura 14):

$$E_{ur} = E_{urref} \left[ \frac{(c' \cos \varphi' - \sigma'_{min} \sin \varphi')}{(c' \cos \varphi' + p_{ref} \sin \varphi')} \right]^m$$

$$E_{ur} = E_{urref} \cdot k_{-1}$$

Dove:

$p_{ref} = 100 \text{ kPa}$  è la pressione di riferimento,

$\sigma'_{min}$  è la tensione efficace principale minore,

$E_{urref}$  è il modulo di rigidezza secante alla pressione di riferimento ( $\sigma'_{min} = p_{ref}$ ),

$m$  è un coefficiente esponenziale che regola la dipendenza della rigidezza dallo stato tensionale,

$E_{ur}$  è il modulo di rigidezza secante alla tensione  $\sigma'_{min}$ ;

- la rigidezza secante a taglio  $G$  funzione dell'ampiezza della deformazione a taglio  $\gamma$  (Figura 15) e della tensione di confinamento applicata:

$$G = \frac{G_0}{\left(1 + a \frac{|\gamma|}{|\gamma_{0.7}|}\right)}$$

dove:

$G_0$  è la rigidezza a taglio in campo dinamico,  $a = 3/7$ ,

$\gamma_{0.7}$  è la deformazione a taglio in corrispondenza della quale  $G_0$  si riduce al 70% del suo valore iniziale.

Il legame funzionale fra  $G_0$  e lo stato tensionale è espresso dalla seguente relazione:

$$G_0 = G_{0ref} \left[ \frac{(c' \cos \varphi' - \sigma'_{min} \sin \varphi')}{(c' \cos \varphi' + p_{ref} \sin \varphi')} \right]^m$$

$$\gamma_{0.7} = 1/(9 \cdot G_{0ref}) \cdot [(2c'(1 + \cos(2\varphi')) - \sigma'_1(1 + Ko) \sin(2\varphi'))]'$$

dove:

$p_{ref} = 100 \text{ kPa}$  è la pressione di riferimento,

$\sigma'_{min}$  è la tensione efficace principale minore,

$G_{0ref}$  è il modulo di rigidezza secante alla pressione di riferimento ( $\sigma'_{min} = p_{ref}$ ),

$m$  è un coefficiente esponenziale che regola la dipendenza della rigidezza dallo stato tensionale,

$G_0$  è il modulo di rigidezza a taglio alla tensione  $\sigma'_{min}$ .

Nel seguito saranno compiutamente definiti tutti i parametri di modello utilizzati per le varie unità geotecniche, determinati alla luce della caratterizzazione geotecnica di dettaglio esposta nel precedente capitolo 3.

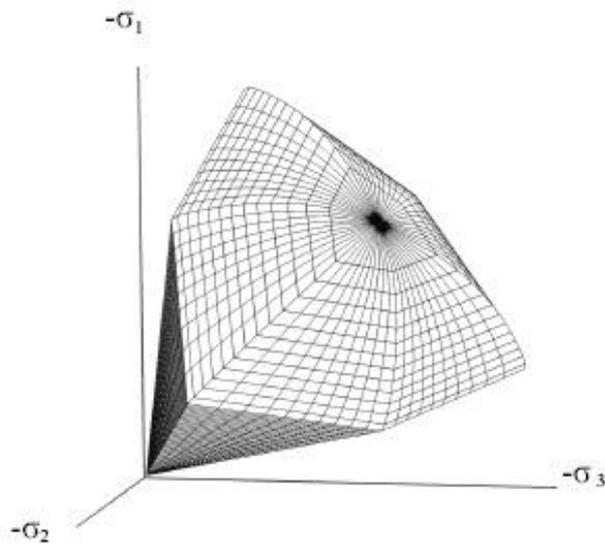


Figura 13. Superficie di snervamento chiusa (Hardening Soil model)

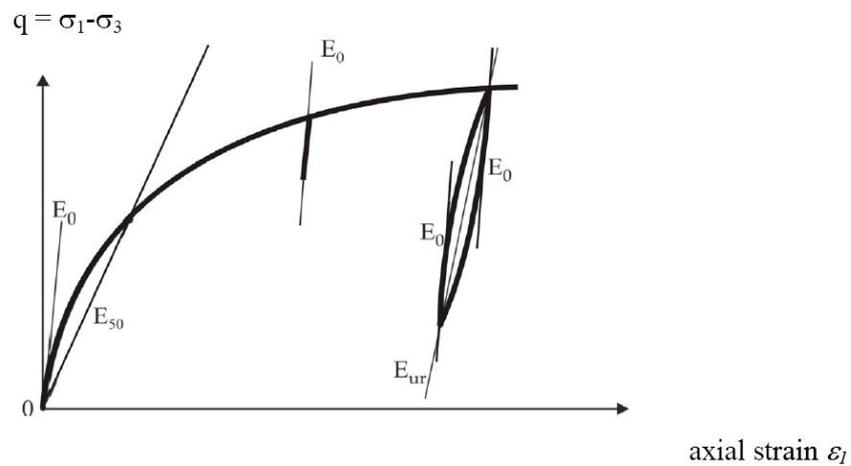


Figura 14. Definizione di  $E_0$ ,  $E_{50}$  e  $E_{ur}$  nel modello costitutivo "HSSmall"

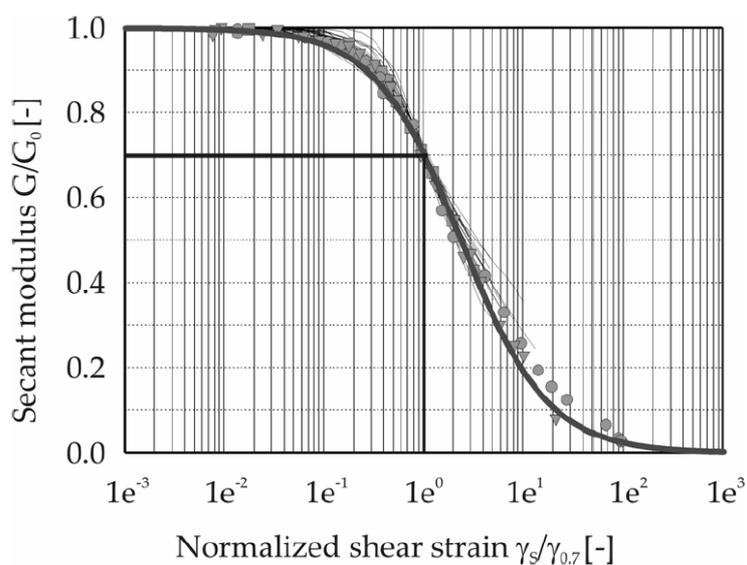


Figura 15. Riduzione del modulo  $G_0$  in funzione di  $\gamma$

In condizioni dinamiche il terreno è sottoposto a carico di taglio ciclico, mostrando non solo un comportamento non lineare ma anche dissipativo. L'isteresi generata durante il carico di taglio ciclico consiste in una sequenza di percorsi di carico e scarico, in relazione al comportamento irreversibile del terreno.

Il tipico comportamento di isteresi è mostrato in Figura 16.

La rigidezza iniziale tangente e secante della curva iniziale di carico coincide con il massimo modulo di taglio  $G_0$ . Con l'incremento dello sforzo di taglio, la rigidezza diminuisce. Quando il carico inverte la direzione, la rigidezza parte dallo stesso  $G_0$  e diminuisce fino alla prossima inversione di carico. La relazione è la seguente:

$$\tau = G_s \cdot \gamma$$

Dove:  $G_s$  rappresenta la rigidezza tangenziale.

Il rapporto di smorzamento di isteresi locale è descritto con la seguente relazione:

$$\xi = E_D / (4 \cdot \pi \cdot E_s)$$

dove:

$E_D$  = rappresenta l'energia dissipata, data dall'area del ciclo chiuso (area gialla e verde)

$E_s$  = energia accumulata al massimo sforzo di taglio ( $\gamma_c$ ) (area verde e blu)

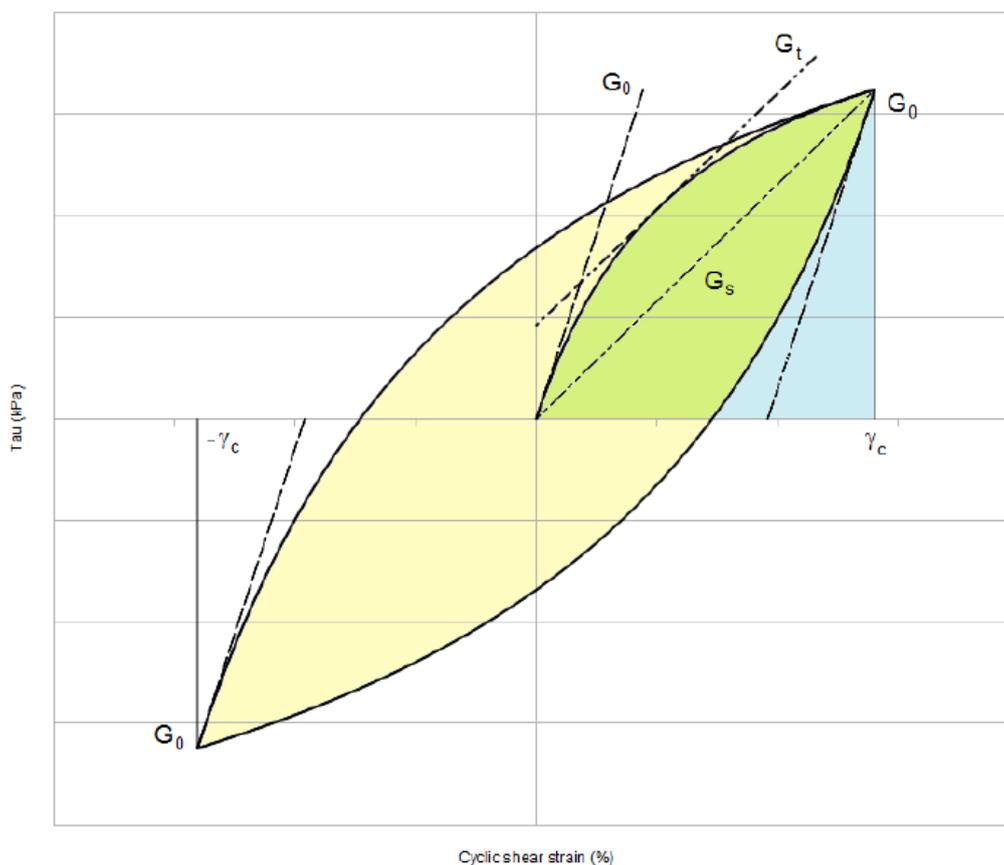


Figura 16. Comportamento di isteresi nel HS small model

Il decadimento del modulo di taglio con lo sforzo è mostrato in Figura 17 e Figura 15.

La curva  $G_s/G_0$  è descritta in letteratura da Vucetic & Dorby (1991) secondo differenti valori dell'indice di plasticità.

Lo smorzamento evolve in funzione della tensione di taglio e aumenta per valori più grandi di  $\gamma_c$ .

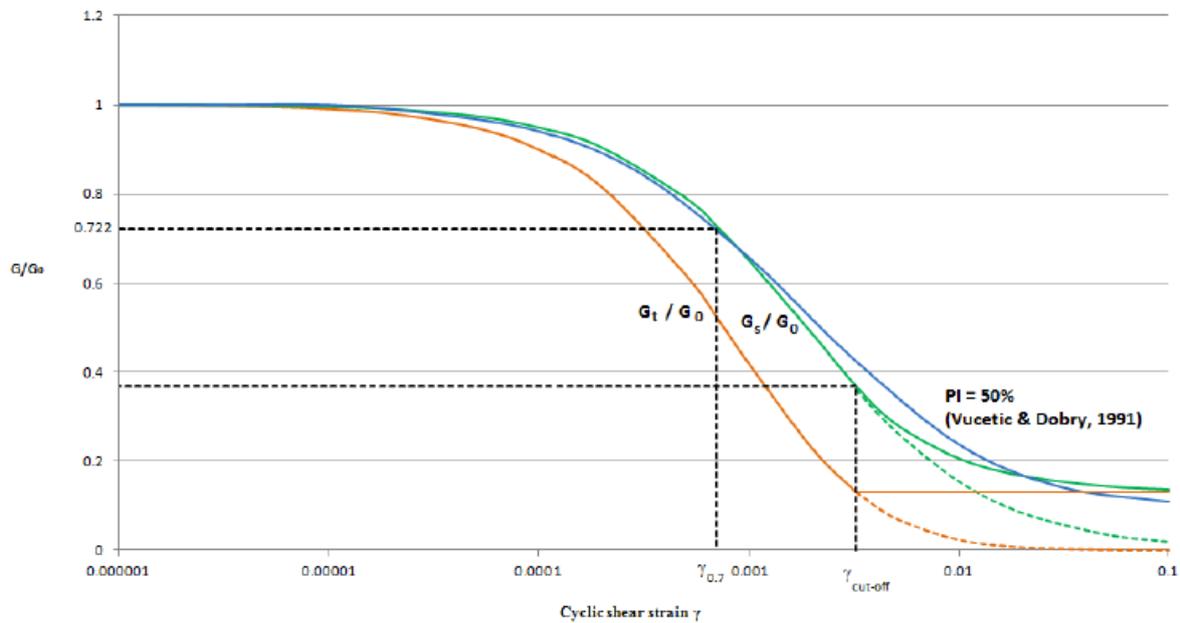


Figura 17. Curva di riduzione del modulo  $G$

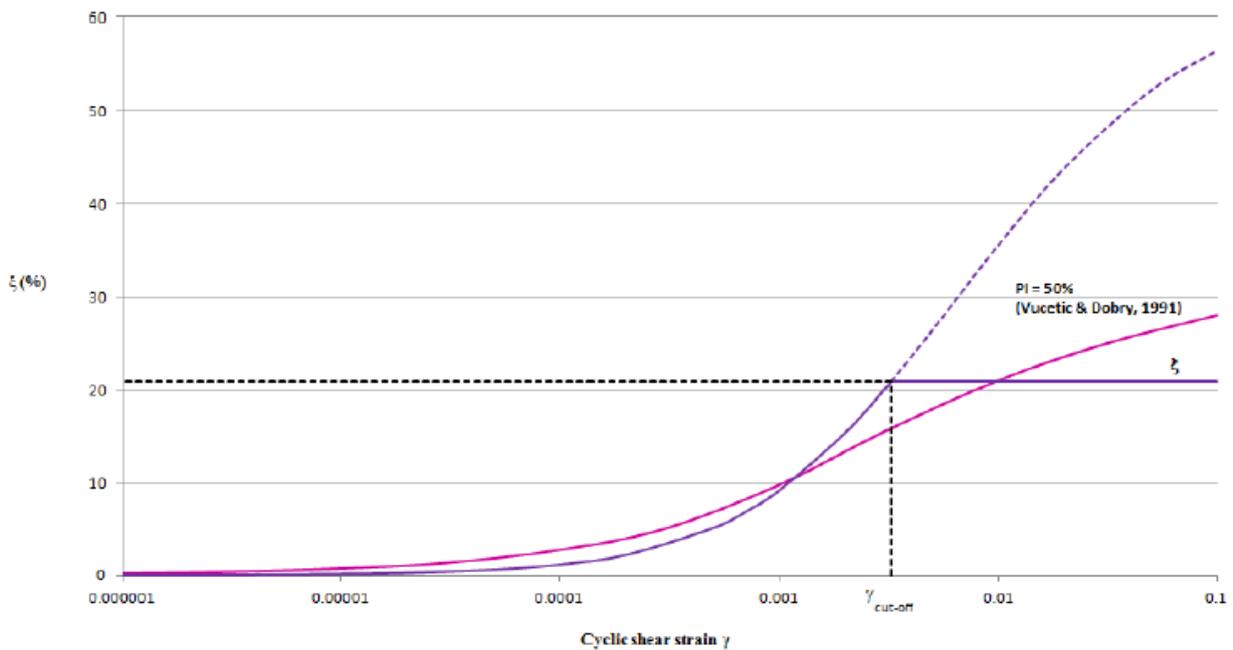
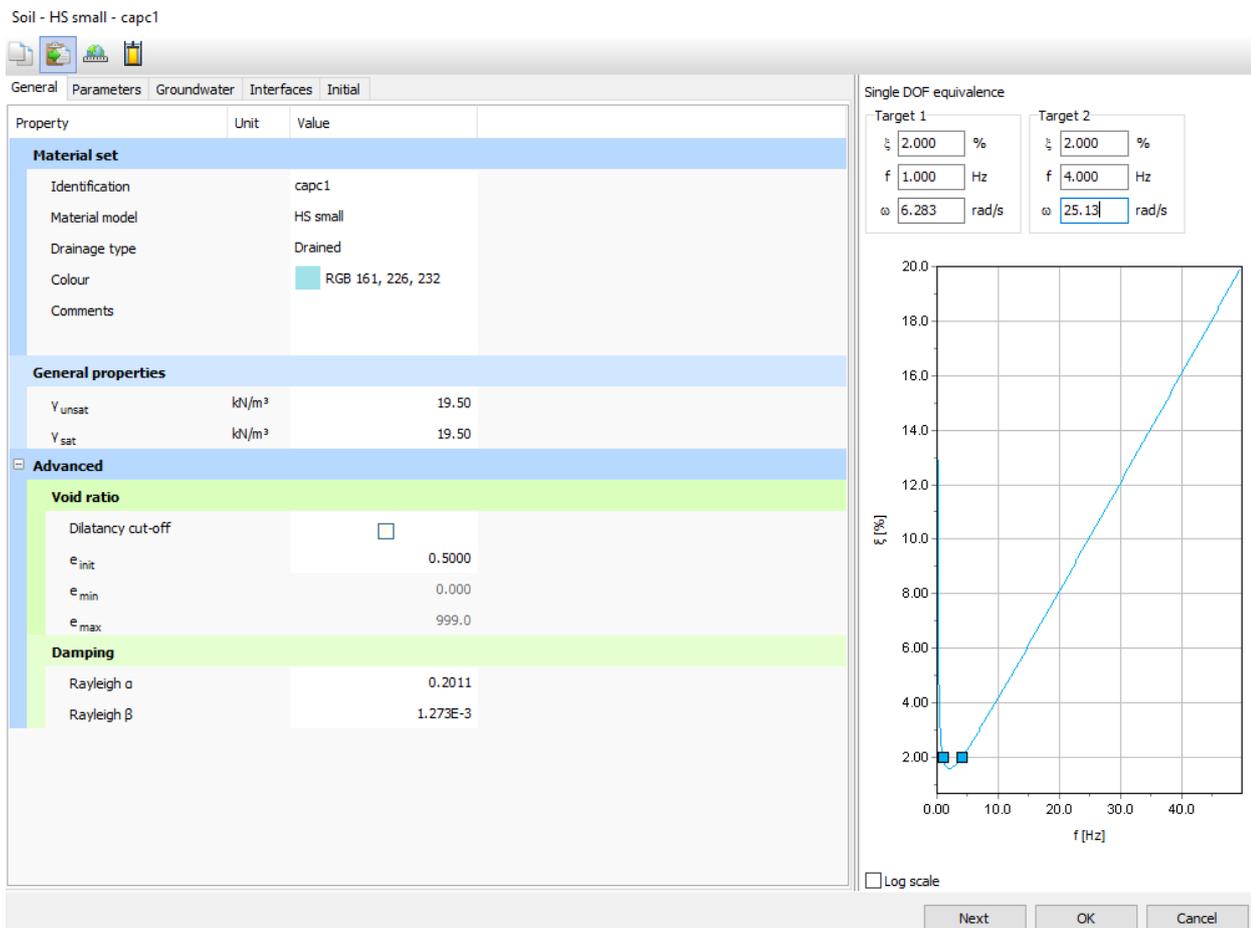


Figura 18. Curva di damping

Lo smorzamento d'isteresi del modello di terreno può descrivere le deformazioni a sforzi maggiori di  $10^{-4}$ - $10^{-2}\%$ , a seconda delle proprietà del materiale. Anche ad un basso livello di deformazione, il comportamento del terreno è irreversibile. A piccolissimi livelli di deformazioni il comportamento dissipativo è modellato mediante i coefficienti di smorzamento di Rayleigh. In accordo alla formulazione sullo smorzamento di Rayleigh, la matrice di damping  $C$  ( $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ ) è legata a due coefficienti ( $\alpha$ ,  $\beta$ ). Per calibrare questi due coefficienti, è necessario definire un target del rapporto di smorzamento ( $\xi$ ) e la relativa frequenza ( $f$ ).

Nel caso in esame si è assunto un valore del target di damping:  $\xi = 2\%$  nel range di frequenza  $f = 1$ - $4$  Hz, che include la frequenza fondamentale del deposito in quella degli input sismici (vedasi *Figura 19*).



*Figura 19. Coefficienti di Rayleigh damping*

### 5.3 Parametri geotecnici

Per le unità costituenti il terreno si è utilizzato il modello costitutivo alla Hardening-Soil-Small-Strain, precedentemente descritto.

I parametri di resistenza sono stati assunti a partire dalla caratterizzazione geotecnica esposta al capitolo 3.

I parametri di deformabilità ( $G_{0,ref}$ ,  $m$ ,  $\gamma_{07}$ ,  $E_{50,ref}$ ,  $E_{ur,ref}$ ) sono tarati in modo da riprodurre la curva di progetto delle velocità delle onde di taglio di Figura 20: la curva in colore rosso rappresenta la legge implementata nel modello, sovrapposta ai risultati della indagine sismica eseguita (MASW). Dalle  $V_s$  si ottiene il modulo di taglio alle piccole deformazioni  $G_0$  ed il corrispondente  $E_0$ , assumendo il peso di volume del terreno  $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$  per le coperture (cappellaccio alterato) e  $21 \text{ kN/m}^3$  per il substrato e  $\nu = 0.3$ . Il modulo secante  $E_{50}$  è assunto pari ad  $1/15 \cdot E_0$ , mentre il modulo per i cicli di scarico-ricarico  $E_{ur}$  è assunto pari a  $2.5 \cdot E_{50}$ . La legge di decadimento del modulo a taglio con la deformazione tangenziale, regolata dal parametro  $\gamma_{07}$ , è tarata in modo da riprodurre le curve di letteratura per il livello di plasticità determinato dalle indagini (cfr. Figura 21).

Tabella 5. Parametri geotecnici di progetto

	quota p.c.	0.0	m s.l.m.		
	quota falda	0.0	m s.l.m.		
Unità	cap-c	cap-c1	TRV	TRV1	[-]
da	0.0	-9.5	-14.5	-24.0	m s.l.m.
a	-9.5	-14.5	-24.0	-40.0	m s.l.m.
$\gamma$	19.5	19.5	21.0	21.0	kN/m <sup>3</sup>
k0 NC	0.531	0.531	0.593	0.593	[-]
OCR	1.0	1.0	1.0	1.0	[-]
k0 OC	0.531	0.531	0.593	0.593	[-]
G0,ref	250.0	300.0	300.0	1050.0	MPa
m	0.50	0.40	0.30	0.40	[-]
c'	0	5	15	15	kPa
f'	28	28	24	24	deg
E50,ref	43.3	52.0	52.0	182.0	MPa
Eur,ref	108.3	130.0	130.0	455.0	MPa
g_07	3.00E-04	3.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	[-]

**Velocità onde di taglio da prova MASW**

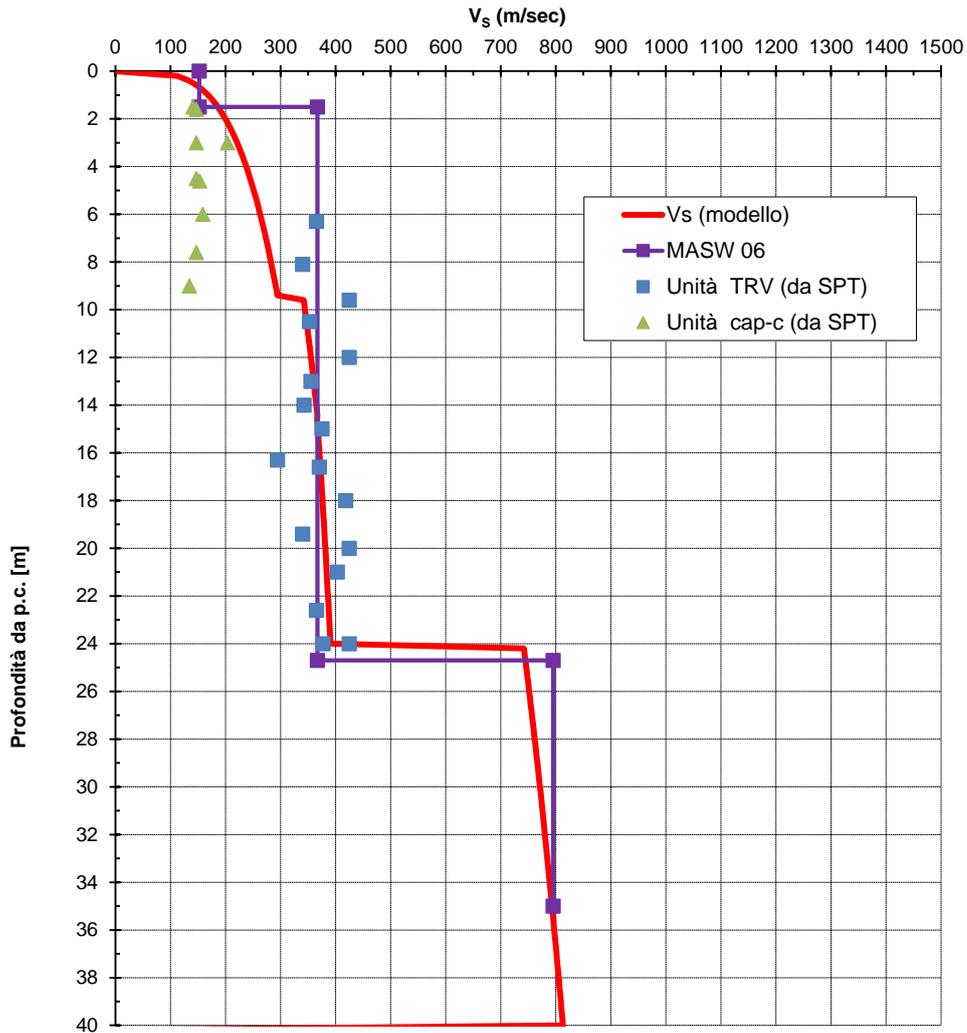


Figura 20. Velocità delle onde di taglio da prove geotecniche e legge di modello

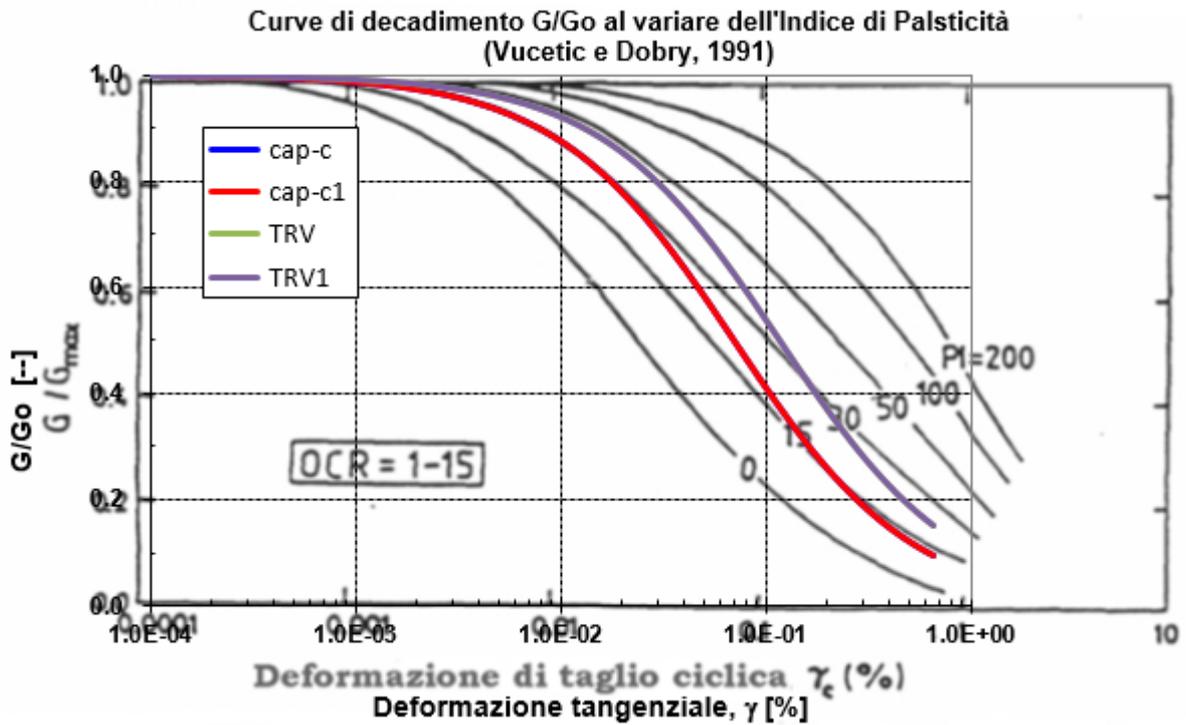


Figura 21. Riduzione del modulo di taglio con la deformazione tangenziale

## 6. RISULTATI E CONCLUSIONI

### 6.1 Risultati dell'analisi

In Figura 22 è mostrata la deformata con spostamento massimo ed in Figura 23 è mostrato il parametro  $\gamma$  (deformazione tangenziale) con rappresentazione a mappa di colori; da cui si evince che lo strato sottoposto alle maggiori deformazioni è intorno ai 9-10 m circa, al passaggio tra le coperture alterate e la formazione di base.

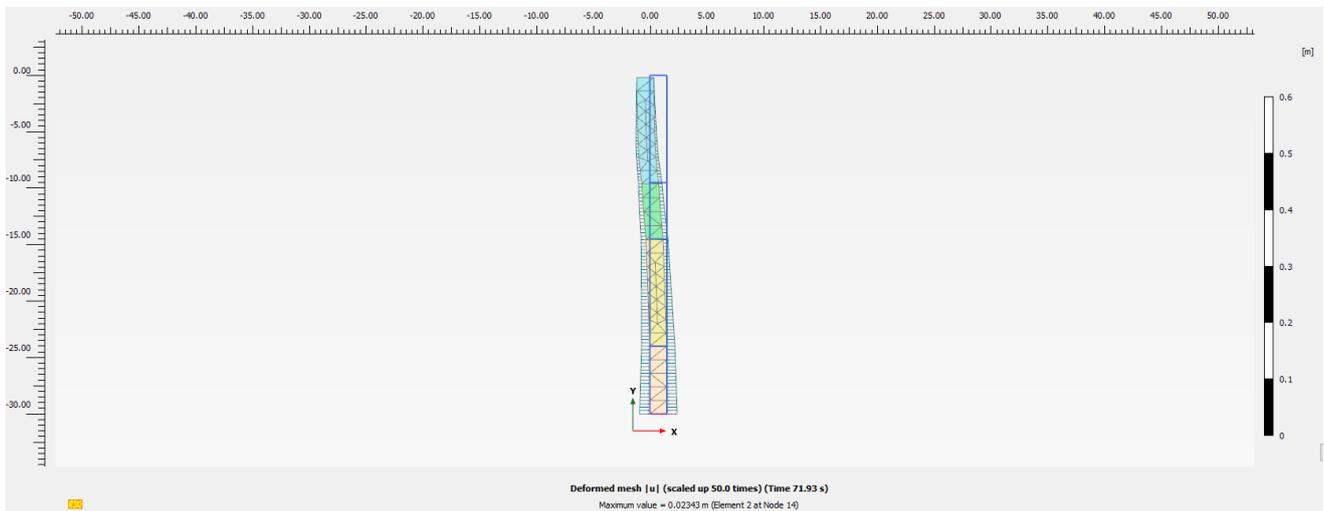


Figura 22. Spostamento massimo

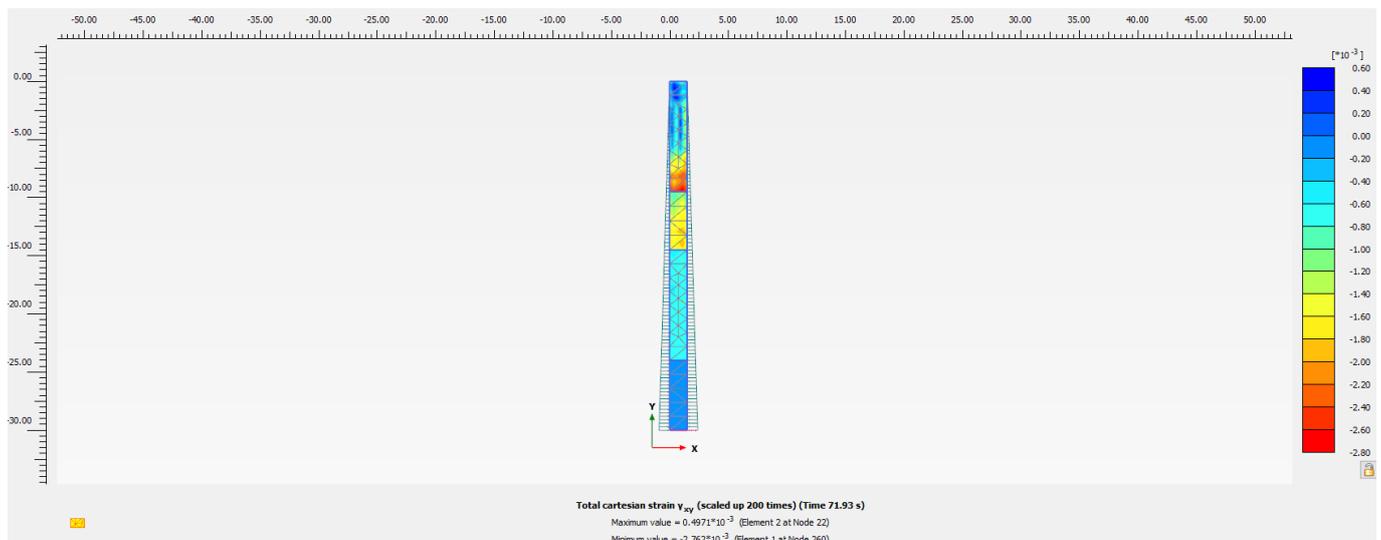


Figura 23. - Parametro deformazione tangenziale  $\gamma_{xy}$  che regola il decadimento del modulo a taglio

Dalle analisi eseguite si ottengono gli accelerogrammi mostrati nella seguente figura, valutati alla profondità di circa 1.5 m da p.c.. La linea nera tratteggiata indica l'accelerazione max di picco al suolo ( $PGA = a_{max}$ ), ottenuta come valore medio delle 7 analisi eseguite con i 7 accelerogrammi naturali di riferimento.

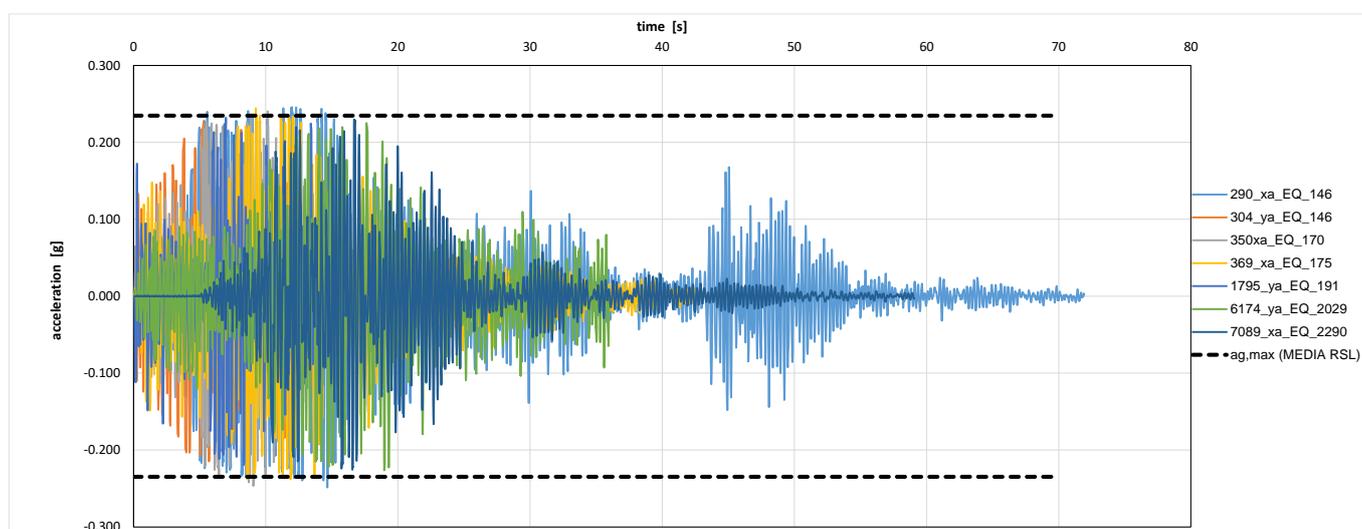


Figura 24. Accelerogrammi a p.c.

Nella figura seguente sono riportati gli spettri pseudo-accelerazione elastici risultanti dall'analisi eseguita.

Per confronto in figura sono anche inseriti lo spettro elastico (5%) per suolo tipo C (definito da normativa e quindi con  $S_s = 1.49$  con linea tratteggiata blu) e lo spettro medio risultante dall'analisi dei 7 accelerogrammi (linea nera tratteggiata).

Da questo confronto si osserva che per periodi maggiori di 0.5 sec, lo spettro derivante dalle analisi è in buon accordo con quello di normativa, e generalmente cautelativo. Invece per periodi bassi, intorno a 0.2-0.3 secondi (che corrispondono alla frequenza propria del deposito in esame, come confermato dalle prove HVSR eseguite, vedasi paragrafo 3.4), si ha un effetto "risonanza" con incremento dei valori di pseudo-accelerazione. In corrispondenza di questo range (ramo iniziale e successivo "plateau"), lo spettro di normativa sottostima i risultati della risposta sismica locale.

Quindi nel seguente paragrafo si definisce lo spettro normalizzato di progetto.

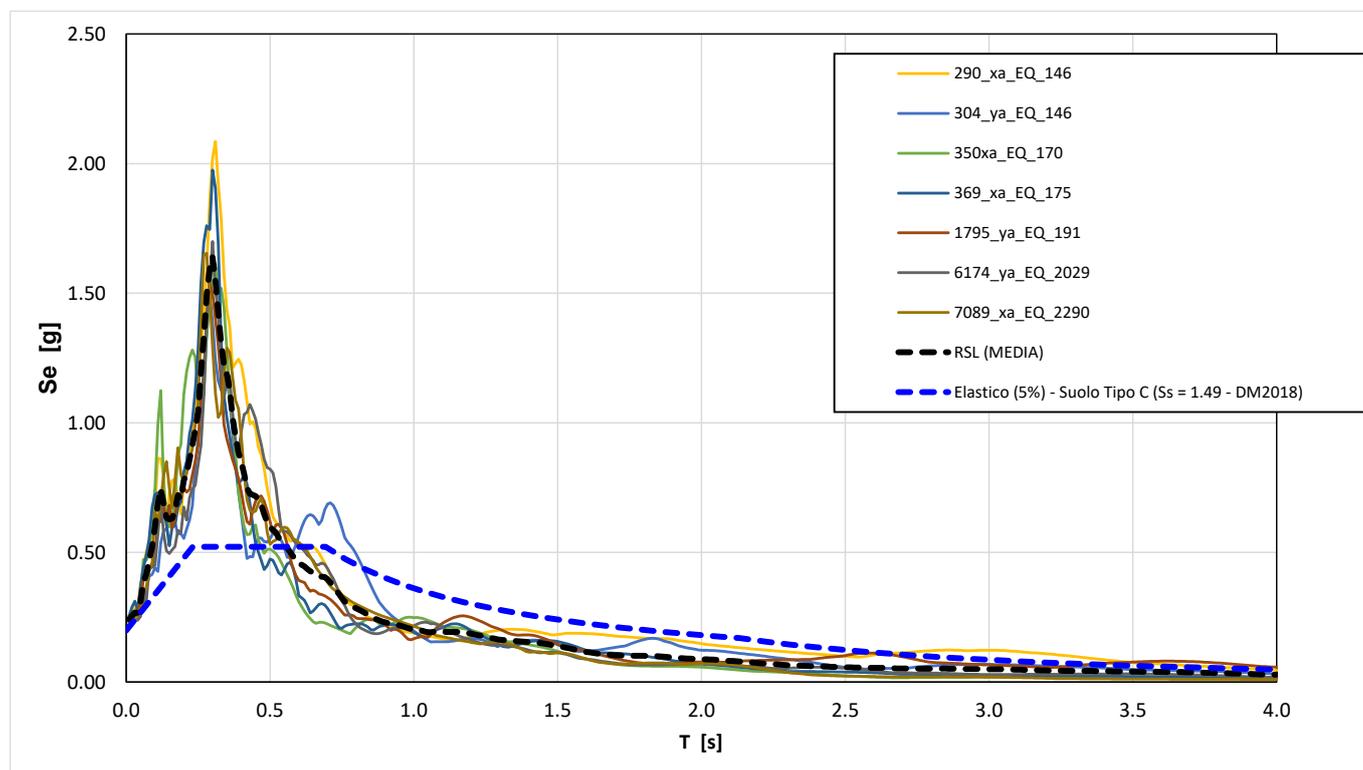


Figura 25. Spettri elastici

## 6.2 Definizione dello spettro normalizzato di progetto

Nel presente paragrafo si riporta la normalizzazione dello spettro medio ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale, da utilizzare per il progetto dell'opera.

La procedura di regolarizzazione (Newmark e Hall, 19823, Romeo, 20074, Liberatore e Pagliaroli, 20145) permette di trasformare lo spettro di risposta, risultato delle simulazioni numeriche del precedente paragrafo, in uno spettro con forma standard (secondo le vigenti norme tecniche per le costruzioni), costituita da un ramo con accelerazione crescente lineare, un ramo ad accelerazione costante, un ramo in cui l'accelerazione decresce con  $1/T$  e, quindi, a velocità costante.

Verranno quindi definiti tutti i parametri per l'inserimento dello spettro elastico in codici di calcolo per la progettazione e la verifica delle strutture ( $a_g$ ,  $a_{max}$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$ ,  $F_0$ ).

Indicando con SA lo spettro di risposta elastico in pseudo-accelerazione e SV lo spettro di risposta elastico in pseudo-velocità, ottenuti dalle simulazioni numeriche, i passi della procedura di regolarizzazione sono i seguenti:

- a) Si calcola lo spettro di pseudo-accelerazione (SA) e si determina il periodo proprio (TA) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudo-accelerazione.
- b) Si calcola il valore medio dello spettro (SA<sub>m</sub>) nell'intorno di TA tra 0.5TA e 1.5TA, questo valore sarà assunto come valore costante del tratto ad accelerazione costante dello spettro standard:

$$SA_m = \frac{1}{TA} \int_{0.5*TA}^{1.5*TA} SA(T) dT$$

- c) Si determina lo spettro di pseudo-velocità (SV) a partire da quello di accelerazione, moltiplicando le ordinate spettrali di quest'ultimo per l'inverso della corrispondente frequenza circolare  $\omega = 2\pi / T$ :

$$SV(T) = SA(T) * \frac{T}{2\pi}$$

e quindi si individua il periodo (TV) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudovelocità.

- d) Si calcola il valore medio dello spettro (SV<sub>m</sub>) nell'intorno di TV tra 0.8TV e 1.2TV:

$$SV_m = \frac{1}{0.4 * TV} \int_{0.8*TV}^{1.2*TV} SV(T) dT$$

- e) Si determina il periodo in corrispondenza del quale si incontrano i due rami dello spettro ad accelerazione costante e velocità costante:

$$T_c = 2\pi \frac{SV_m}{SA_m}$$

- f) Si determina T<sub>B</sub> = 1/3 \* T<sub>c</sub> e T<sub>D</sub> = 4.0 \* ag/g + 1.6 (secondo quanto indicato dalla normativa), con a<sub>max</sub> punto di ancoraggio a T = 0 dello spettro di output. Il valore di a<sub>max</sub> è ricavato dallo spettro delle simulazioni numeriche per estrapolazione lineare, secondo la seguente equazione:

$$a_{max} = \left( \frac{S_e(T = 0.01s)}{SA_m} - \frac{0.01}{T_B} \right) \left( \frac{SA_m}{1 - \frac{0.01}{T_B}} \right)$$

con S<sub>e</sub> (T= 0.01 s) ordinata dello spettro di accelerazione per T=0.01 s, primo valore del periodo nello spettro elastico delle simulazioni numeriche.

- g) Si applicano le equazioni riportate in NTC (2018) per la determinazione dei tratti dello spettro tra  $T_A=0$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$ , fino a un massimo  $T$  di interesse.
- h) Si termina il parametro  $F_0$  come rapporto  $S_{Am} / a_{max}$ .

Con la procedura si perviene allo spettro normalizzato di figura seguente (linea rossa).

Nella seguente tabella si sintetizzano i parametri sismici di riferimento. Si osserva che l'accelerazione massima ottenuta dalla linearizzazione dello spettro ( $a_{max}=0.178$ ) è inferiore al valore di  $a_{max}$  definito per suolo tipo C ( $a_{max}=0.199$ ); cautelativamente si assume  $a_{max}=0.199$ .

$ag [g] =$	<b>0.1336</b>
$ag,max [g] =$	0.178
$F_0 [--] =$	5.647
$\eta [--] =$	1.000
$T_B [s] =$	0.131
$T_C [s] =$	0.393
$T_D [s] =$	2.134

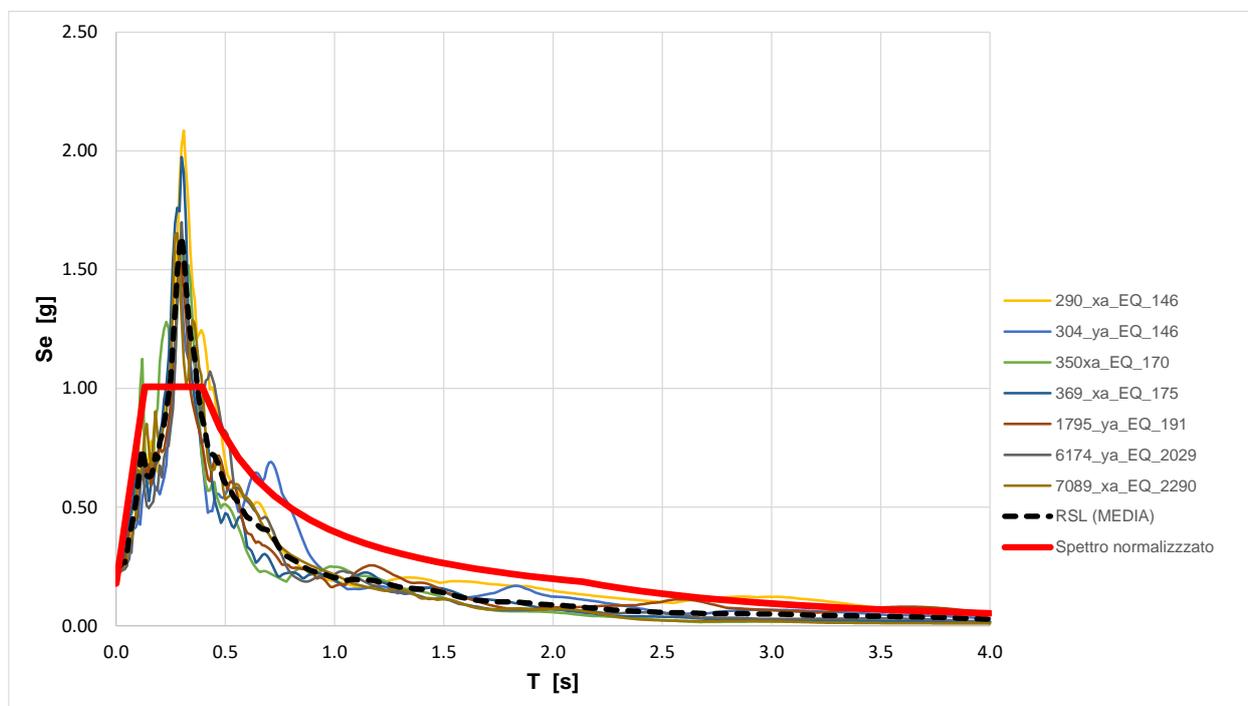


Figura 26. Spettro normalizzato