

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO**

**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO–CATANIA**

**U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA**

OPERE PRINCIPALI – PONTI E VIADOTTI

VI11 - Viadotto ferroviario a Doppio Binario - Ltot=100 m

Analisi risposta sismica locale

SCALA:

-

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

RS3E 50 D 09 RB VI1103 002 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autore	Autozzato	Data
A	Emissione esecutiva	S.Gasperoni	Novembre 2019	A.Ferri	Novembre 2019	F.Sparacino	Novembre 2019	Vittozzi		Novembre 2019

ITALFERR S.p.A.  
U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti  
Dott. Ing. Angelo Vittozzi  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Palermo  
N° A20783

## 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 GEOTECNICHE ESEGUITE.....	5
3.2	STRATIGRAFIA .....	5
3.3	PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO .....	5
4.	CONDIZIONI SISMICHE .....	8
4.1	GENERALITÀ.....	8
4.2	DEFINIZIONE DELL'ACCELERAZIONE ORIZZONTALE MASSIMA ATTESA SU SITO DI RIFERIMENTO RIGIDO (AG) .....	9
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.....	30
5.4	RISULTATI.....	33

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  PROGETTO DEFINITIVO					
VI11 – Analisi risposta sismica locale	COMMESSA RS3E	LOTTO 50	CODIFICA D 09 RB	DOCUMENTO VI1103 001	REV. A	FOGLIO 3 di 35

## 1. PREMESSA

Nella presente relazione si riporta l'analisi di risposta sismica locale per il Viadotto VI11 nell'ambito del Progetto Definitivo lotto 5 della tratta denominata Dittaino – Catenanuova relativa al Nuovo Collegamento ferroviario Palermo-Catania.

Nel caso in esame, l'indagine sismica, appositamente eseguita in corrispondenza dell'opera d'arte (MASW-VI11), ha evidenziato un'andamento delle velocità ( $V_s$ ) con la profondità non sempre crescente e con inversioni delle velocità; quindi è stata richiesta una apposita valutazione del coefficiente di amplificazione stratigrafica considerando le effettive condizioni geotecniche locali. 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 14/01/2008).

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  PROGETTO DEFINITIVO					
VI11 – Analisi risposta sismica locale	COMMESSA RS3E	LOTTO 50	CODIFICA D 09 RB	DOCUMENTO VI1103 001	REV. A	FOGLIO 4 di 35

## 2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Normativa di riferimento

- [N.1]. Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 14-01-2008 (NTC-2008).
- [N.2]. DM 6/5/2008 – Integrazione al D.M. 14-01-2008 di approvazione delle nuove Norme tecniche per le costruzioni.
- [N.3]. Specifica RFI del 21/12/11 per la progettazione geotecnica delle opere civili ferroviarie.

### 2.2 Documenti di riferimento

- [DC1]. RS0L 00 D78 RH GE0005 001B - Nuovo collegamento Palermo-Catania tratta Catenanuova-Raddusa. Progetto Definitivo. Relazione geotecnica generale.
- [DC2]. Nuovo collegamento Palermo-Catania tratta Catenanuova-Raddusa. Progetto Definitivo. Profilo longitudinale geotecnico.
- [DC3]. RS3E50D69RGGE0001001A - Nuovo collegamento Palermo-Catania tratta Catenanuova-Raddusa. Progetto Definitivo. Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica e sismica.

### 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.

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  PROGETTO DEFINITIVO					
	VI11 – Analisi risposta sismica locale	COMMESSA RS3E	LOTTO 50	CODIFICA D 09 RB	DOCUMENTO VI1103 001	REV. A

### 3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Nel presente capitolo si riporta la caratterizzazione geotecnica per il viadotto 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 [DC2].

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

#### 3.1 Indagini geotecniche eseguite

L'opera in esame è ubicata tra le progressive km 1+747.490 e km 1+845.310. Le indagini più prossime all'opera sono le seguenti:

Sondaggi / pozzetti	Profondità [m]	Quota boccaforo [m] s.l.m.	n. campioni indisturbati	n. campioni rimaneggiati	n. campioni litoidi	N. prove SPT	n. prove Lefranc /Lugeon	n. prove pressiometriche	Piezometro TA; CC / Prova DH
5_S10vi	40.0	201.1	1	2	-	6	2	-	CC [25]
TA [m]: piezometro a tubo aperto [profondità tratto filtrante]									
CC [m]: piezometro del tipo a cella di Casagrande [quota cella]									

Inoltre è disponibile l'indagine sismica MASW-VI11 (ex VI03).

Dalle misure piezometriche disponibili il livello massimo di falda è a quota +193.4 m s.l.m..

#### 3.2 Stratigrafia

In corrispondenza dell'opera, le indagini hanno evidenziato la presenza di terreno alluvionale, prevalentemente coesivo nei primi 12÷14m circa (unità bbc – alluvioni recenti argilloso limose), intercalata da uno strato incoerente di spessore variabile (unità bbis – alluvioni recenti sabbiose) a profondità comprese tra 9 e 13m. A seguire si trova la Formazione di base di Terravecchia, costituita dall'unità TRVa fino a 20÷22m circa da p.c. e da TRV a profondità maggiori.

#### 3.3 Parametri geotecnici di progetto

Nel seguito si riassumono i parametri geotecnici di progetto per le unità intercettate.

Tabella 1 – VI11 – Parametri geotecnici

	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c_u$ [kPa]	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [°]	$V_s$ [m/s]	$G_o$ [MPa]	$E_o$ [MPa]	$E'_{op,1}$ [MPa]	$E'_{op,2}$ [MPa]
bbc	19.5	100 (z<9m) 50 (9<z<10.5m) 75 (11.5<z<13m)	0	25	150÷400	20÷300	100÷250	$E_o / 3$	$E_o / 10$
bbis	19.5	-	0	31	220	100	250	$E_o / 3$	$E_o / 10$
TRVa	20.5	200 ÷ 250	5	24	300÷700(*)	170÷900	450-800	$E_o / 3$	$E_o / 10$
TRV	20.5	250 ÷ 300	5	24	300÷700(*)	170÷900	450-800	$E_o / 3$	$E_o / 10$

Dove:

$\gamma$  = peso di volume naturale

$c_u$  = resistenza al taglio in condizioni non drenate

$c'$  = coesione drenata

$\phi'$  = angolo di resistenza al taglio

$V_s$  = velocità delle onde di taglio

$G_o$  = modulo di deformazione a taglio iniziale, ovvero a piccole deformazioni

$E_o$  = modulo di deformazione elastico iniziale, ovvero a piccole deformazioni

$E'_{op,1}$  = modulo di deformazione operativo per il calcolo dei cedimenti delle opere di sostegno e delle fondazioni dirette

$E'_{op,2}$  = modulo di deformazione operativo per il calcolo dei cedimenti dei rilevati.

(\*) dalle prova MASW -VI11(ex VI03)

Nella seguente figura si riporta l'andamento delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  della indagine sismica Masw-VI11 (ex VI03).

**MASW VI-3**

$V_{seq} = V_s 30 = 351 \text{ m/s}$  (suolo C ma con importante  
inversione di velocità)

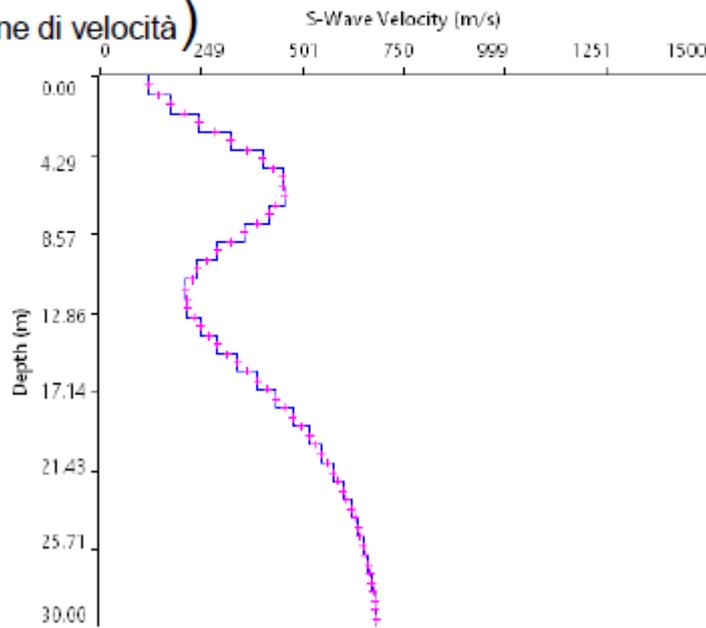


Figura 1 – Masw – VI11(ex VI03)

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  PROGETTO DEFINITIVO					
	VI11 – Analisi risposta sismica locale	COMMESSA RS3E	LOTTO 50	CODIFICA D 09 RB	DOCUMENTO VI1103 001	REV. A

## 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).**

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  PROGETTO DEFINITIVO					
	VI11 – Analisi risposta sismica locale	COMMESSA RS3E	LOTTO 50	CODIFICA D 09 RB	DOCUMENTO VI1103 001	REV. A

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, l'indagine sismica appositamente eseguita in corrispondenza dell'opera d'arte (MASW-VI11) ha evidenziato un'andamento delle velocità ( $V_s$ ) con la profondità non sempre crescente ma con inversioni delle velocità; quindi è stata richiesta una apposita valutazione del coefficiente di amplificazione stratigrafica considerando le effettive condizioni geotecniche locali. Quindi nel seguito si riporta l'analisi di risposta sismica locale per la definizione del coefficiente  $S_s$  da adottare per l'opera.

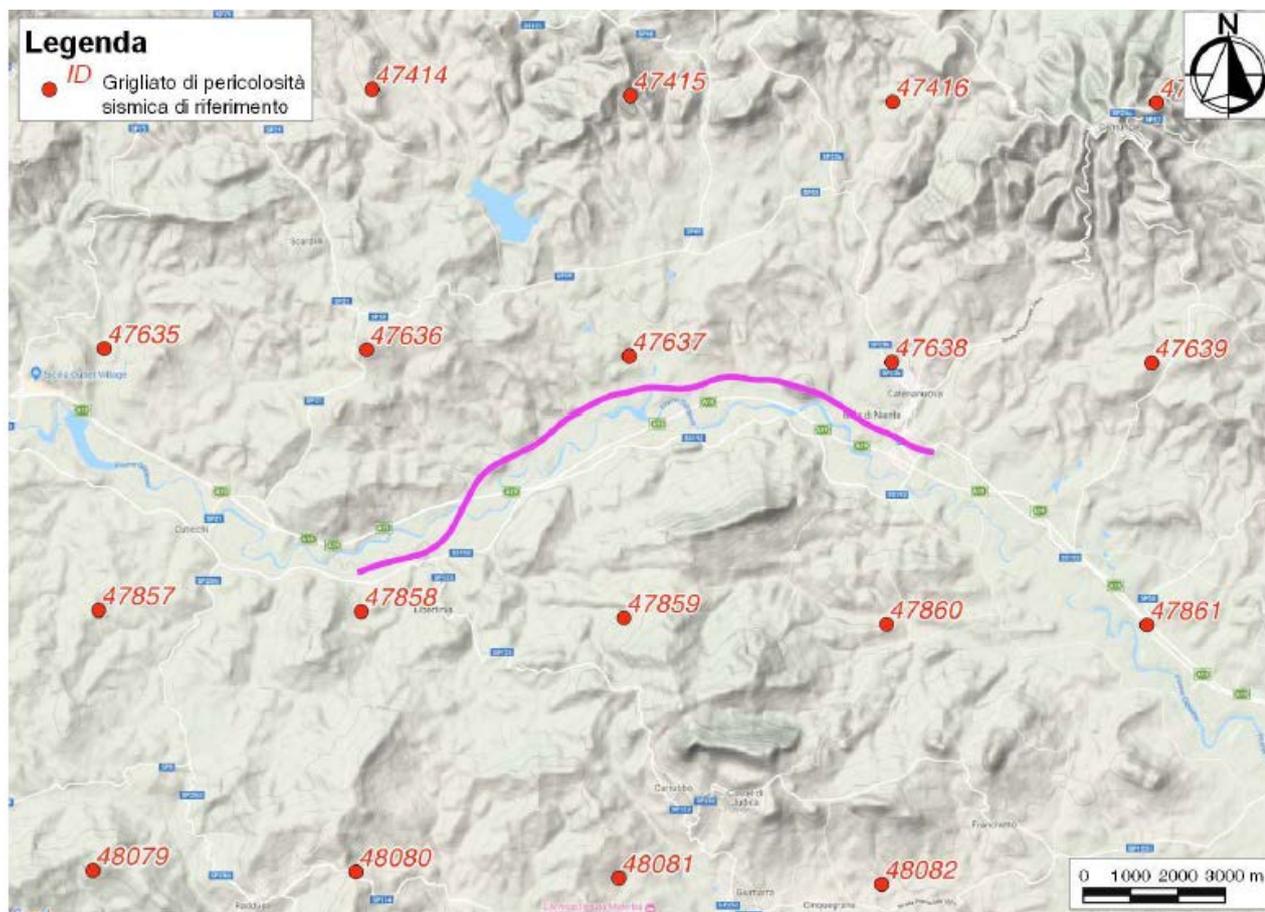
Il coefficiente di amplificazione topografica è assunto  $S_T = 1.0$ .

#### 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).

Sulla base della ricerca di pericolosità sismica eseguita nella relazione geologica di riferimento [DC1], si individuano i punti del grigliato mostrati nella seguente figura (con relative coordinate); da cui si evince che l'azione sismica più gravosa si ha procedendo in direzione Catenanuova ed in particolare nel punto del grigliato 47861.

Quindi per la definizione dell'azione sismica del presente progetto si è considerato il punto del grigliato di pericolosità sismica n. 47861 (longitudine = 14.747 e latitudine = 37.528). Nella Tabella 2 si riporta l'azione sismica del sito con riferimento a SLV ( $T_r = 1068$ ) da cui:  $a_g = 0.204$ .



ID	Longitudine	Latitudine	$a_g$
47636	14.56	37.58	0.1018
47639	14.748	37.578	0.1305
47860	14.685	37.528	0.1286
47857	14.496	37.53	0.1014
47638	14.686	37.578	0.1189
47635	14.497	37.58	0.0963
47859	14.622	37.529	0.1151
47637	14.623	37.579	0.1118
47858	14.559	37.53	0.107
47861	14.747	37.528	0.1428

*$a_g$  valutata con  $Tr=475$  anni*

Figura 2 – Griglia di riferimento del tracciato in progetto (in colore magenta) e dei punti del grigliato più vicini al tracciato (in colore rosso)

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  PROGETTO DEFINITIVO					
	VI11 – Analisi risposta sismica locale	COMMESSA RS3E	LOTTO 50	CODIFICA D 09 RB	DOCUMENTO VI1103 001	REV. A

Tabella 2 – VI11 – Individuazione pericolosità sismica del sito

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

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE:  LATITUDINE:

Ricerca per comune

REGIONE:  PROVINCIA:  COMUNE:

Elaborazioni grafiche

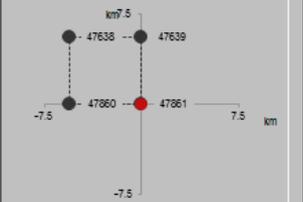
Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

Elaborazioni numeriche

Tabella parametri

Nodi del reticolo intorno al sito



Reticolo di riferimento



Controllo sul reticolo

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

Interpolazione:

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	0.060	2.615	0.291
SLD	113	0.077	2.482	0.320
SLV	1068	0.204	2.455	0.515
SLC	2193	0.271	2.544	0.542

### 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  $M = 5.5 \div 7.5$

- Distanza dalla sorgente = 20 ÷ 50 km

Tabella 3 – Mappa di pericolosità sismica

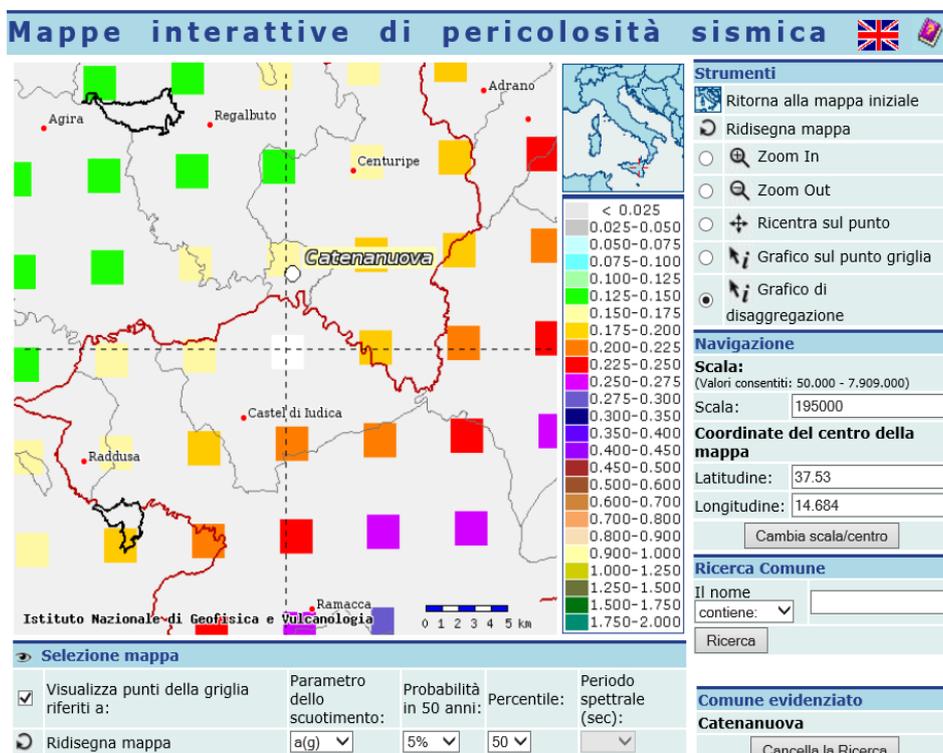
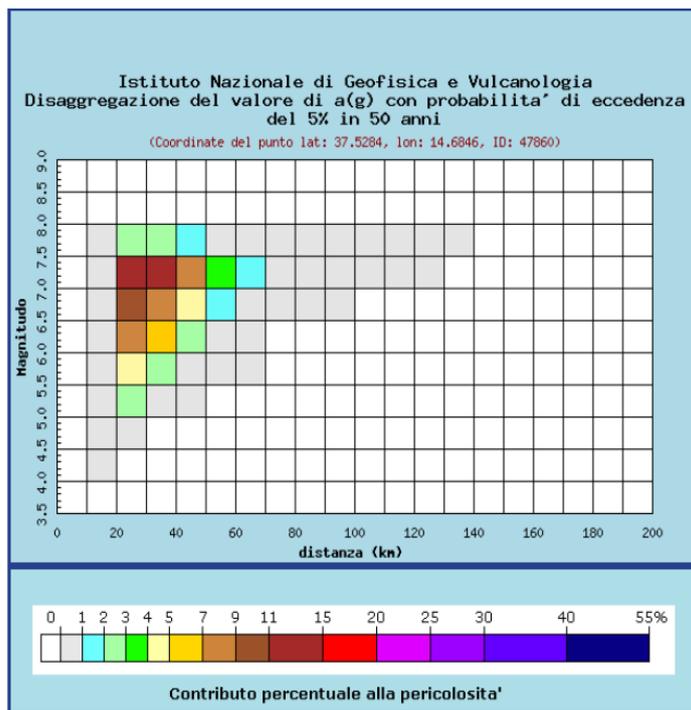


Tabella 4 – Magnitudo e distanza



Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilita' di eccedenza del 5% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 37.5284, lon: 14.6846, ID: 47860)									
	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
0-10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10-20	0,000	0,001	0,062	0,107	0,154	0,215	0,238	0,208	0,035	0,000
20-30	0,000	0,000	0,473	2,240	4,760	8,210	10,700	11,100	2,070	0,000
30-40	0,000	0,000	0,000	0,249	2,390	5,290	8,790	11,400	2,390	0,000
40-50	0,000	0,000	0,000	0,017	0,743	2,220	4,810	7,600	1,770	0,000
50-60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,073	0,493	1,840	3,580	0,915	0,000
60-70	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,046	0,691	1,780	0,499	0,000
70-80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,190	0,797	0,245	0,000
80-90	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,240	0,085	0,000
90-100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,095	0,044	0,000
100-110	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,043	0,030	0,000
110-120	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,017	0,000
120-130	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,005	0,000
130-140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
140-150	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
150-160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
160-170	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
170-180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
180-190	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
190-200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
6,800	35,400	1,470

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  PROGETTO DEFINITIVO					
VI11 – Analisi risposta sismica locale	COMMESSA RS3E	LOTTO 50	CODIFICA D 09 RB	DOCUMENTO VI1103 001	REV. A	FOGLIO 14 di 35

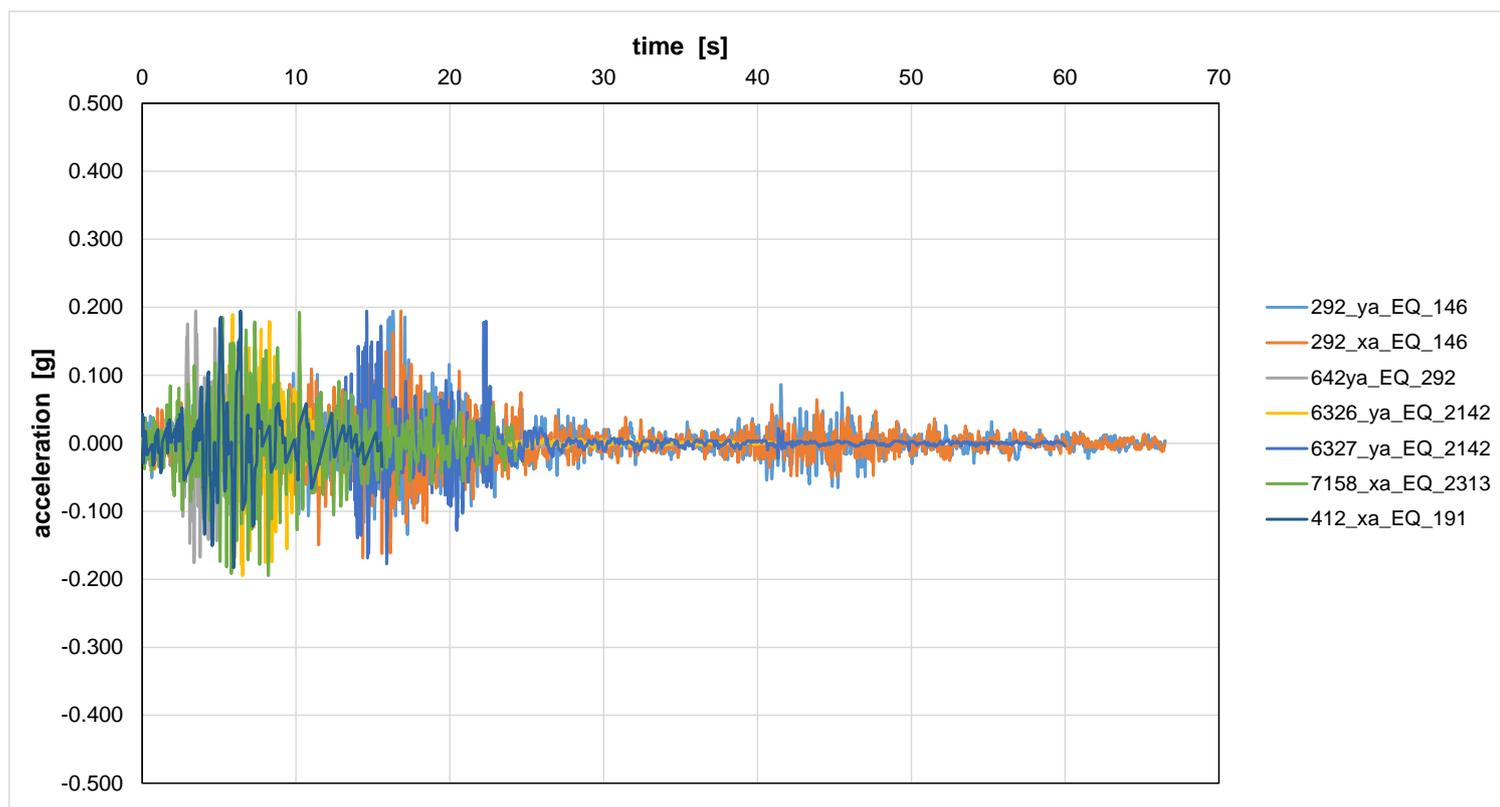
#### 4.4 Accelerogrammi naturali

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 2.3),

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 0 a 50 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 4.9,
- 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.



Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	It Mechan	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
292	146	ST98	Campano Lucano	23/11/1980	6.9	normal	25	0.5878	0.5876	0.0436	0.0585	16.351	13.7949	0.65537	1.162	A
292	146	ST98	Campano Lucano	23/11/1980	6.9	normal	25	0.5878	0.5876	0.0436	0.0585	16.351	13.7949	0.65537	1.162	A
642	292	ST225	Umbria Marche (aftershock)	14/10/1997	5.6	normal	23	0.524	0.618	0.0507	0.0522	7.2443	7.7156	0.60762	0.64572	A
6326	2142	ST2496	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	strike slip	14	1.7476	1.1423	0.0966	0.1765	4.2231	5.5569	0.50963	0.59964	A
6327	2142	ST2552	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4	strike slip	24	1.2466	0.5814	0.083	0.0713	4.2339	6.5454	1.0673	0.90209	A
7158	2313	ST3293	Firuzabad	20/06/1994	5.9	strike slip	39	0.2155	0.1928	0.0148	0.0132	24.5196	16.6959	0.72574	0.5958	A
412	191	ST161	Golbasi	06/06/1986	5.8	strike slip	34	0.1667	0.3089	0.025	0.0382	6.2595	5.3698	0.86518	1.0273	A

Figura 3 – Accelerogrammi naturali

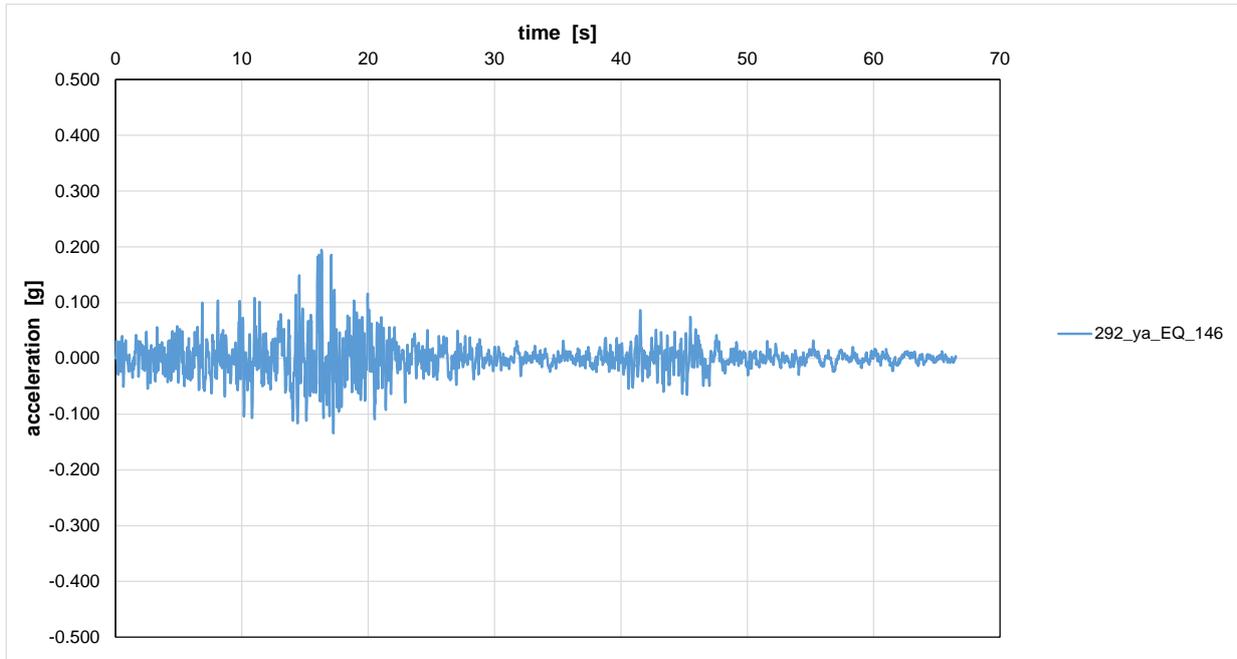


Figura 4 Accelerogramma naturale: Waveform ID=292 Ya, Earthquake ID=146

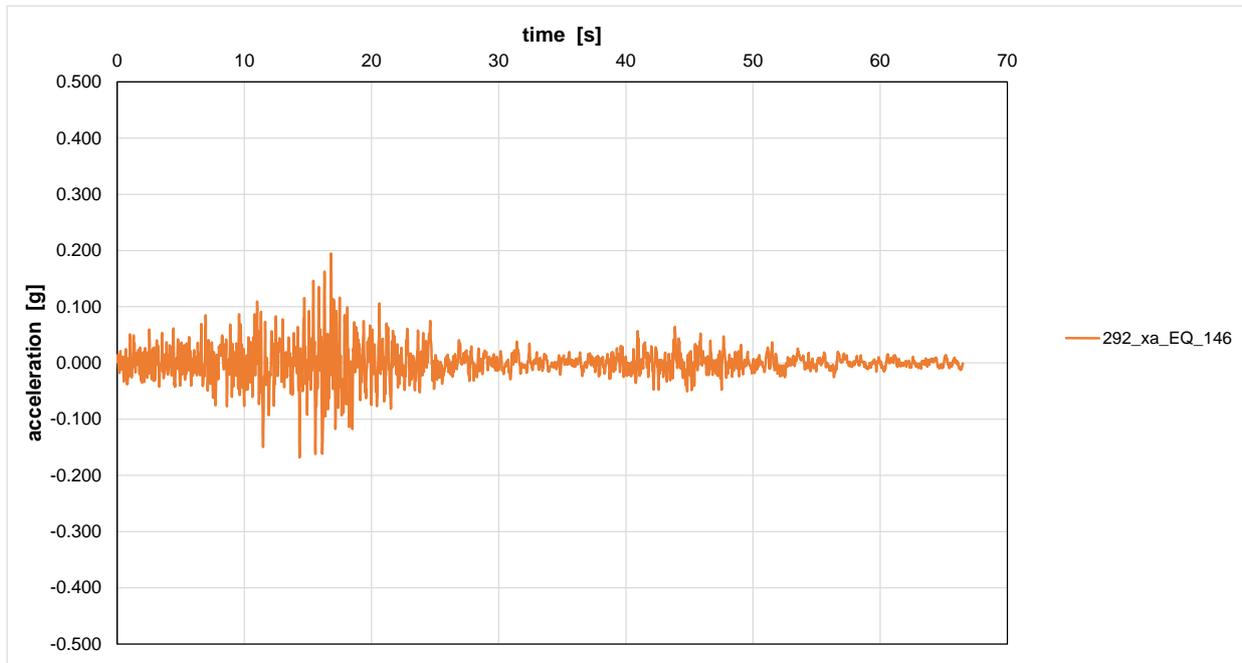


Figura 5 – Accelerogramma naturae: Waveform ID=292 Xa, Earthquake ID=146

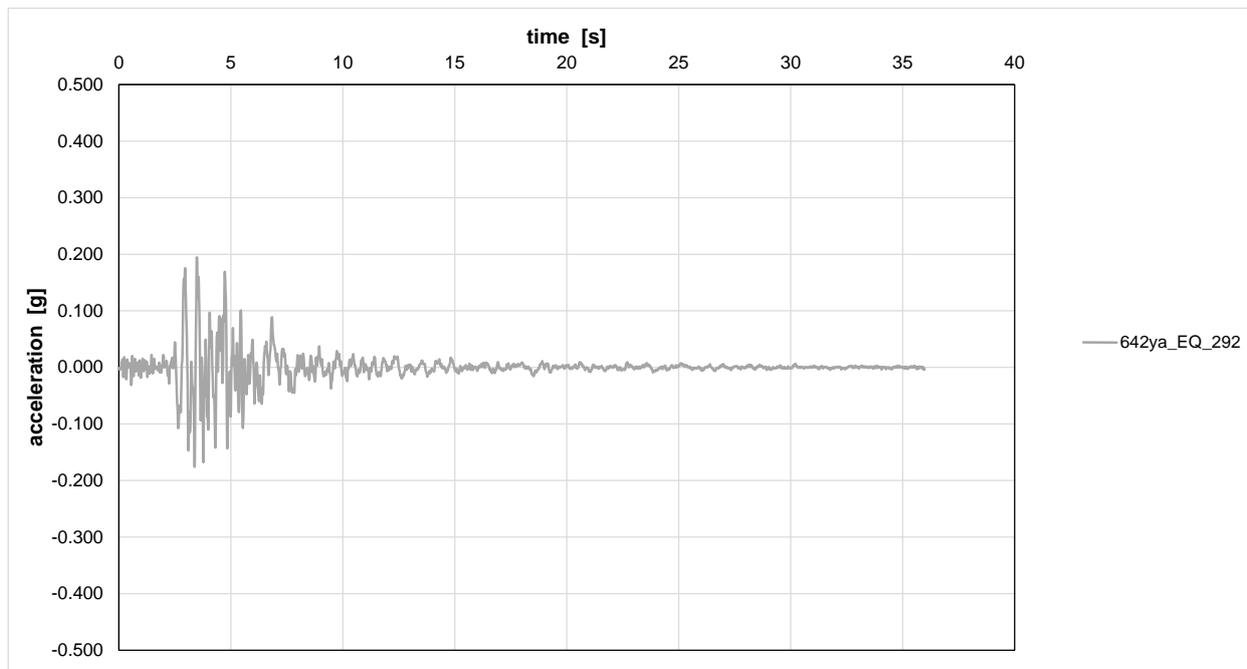


Figura 6 – Accelerogramma naturale: Waveform ID=292, Earthquake ID=642

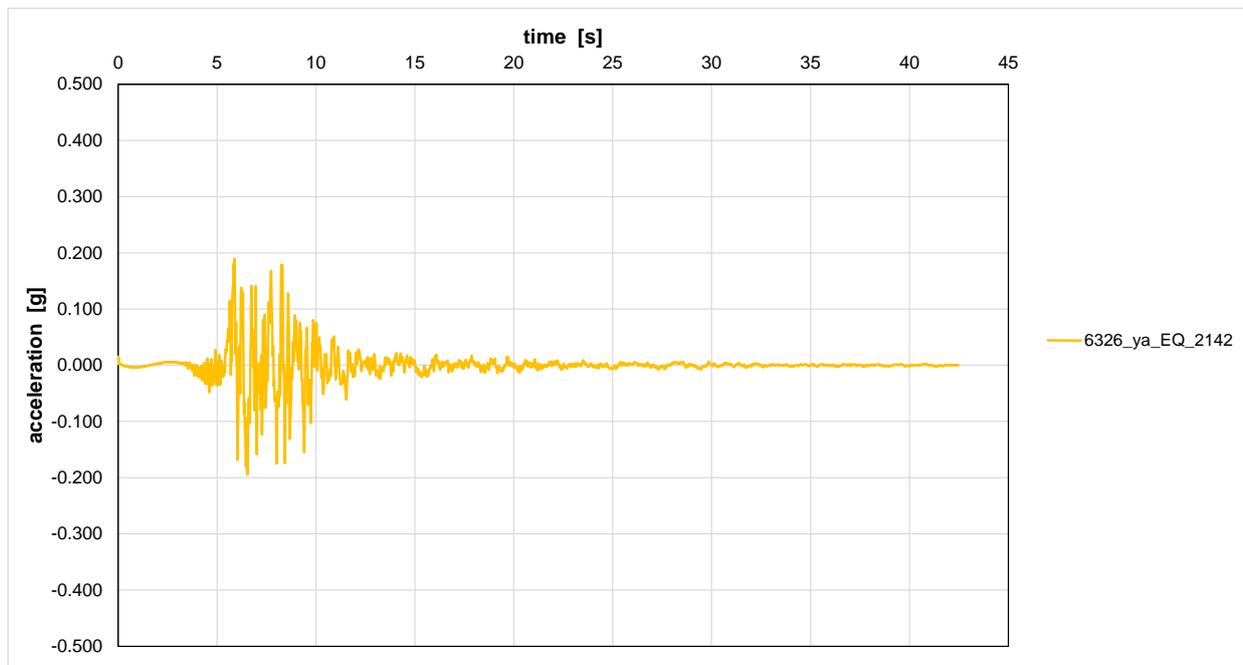


Figura 7 – Accelerogramma naturale: Waveform ID=6323, Earthquake ID=2142



NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA  
TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  
PROGETTO DEFINITIVO

VI11 – Analisi risposta sismica locale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3E	50	D 09 RB	VI1103 001	A	18 di 35

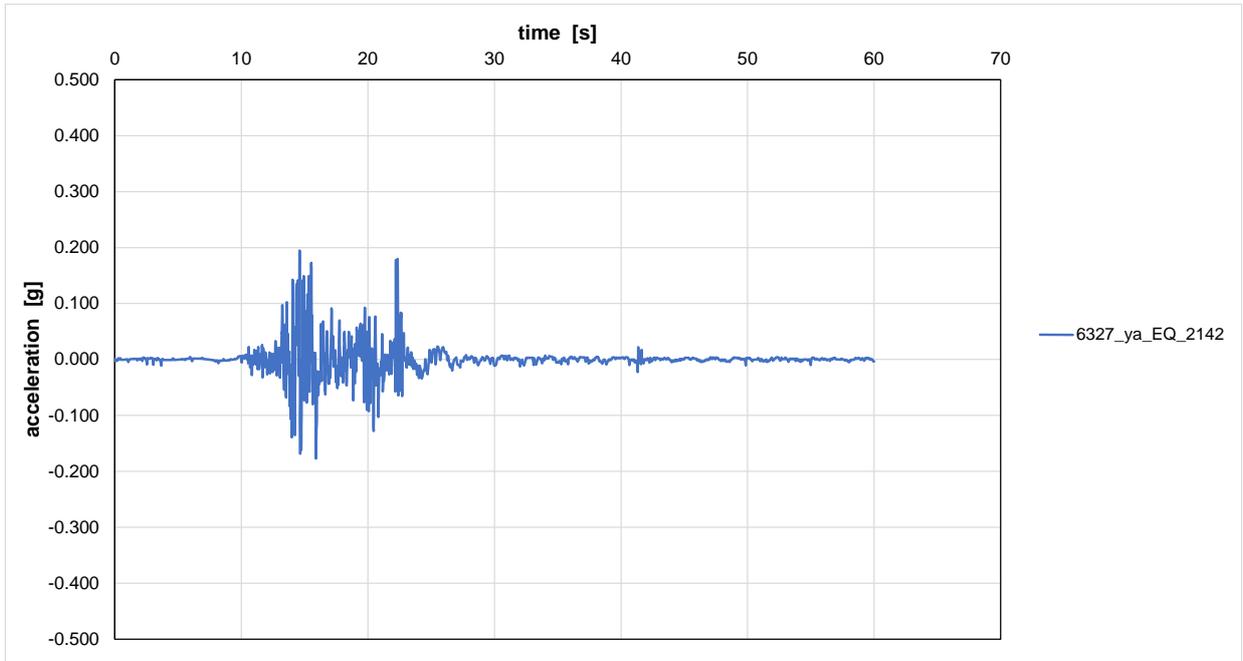


Figura 8 – Accelerogramma naturale: Waveform ID=6327, Earthquake ID=2142

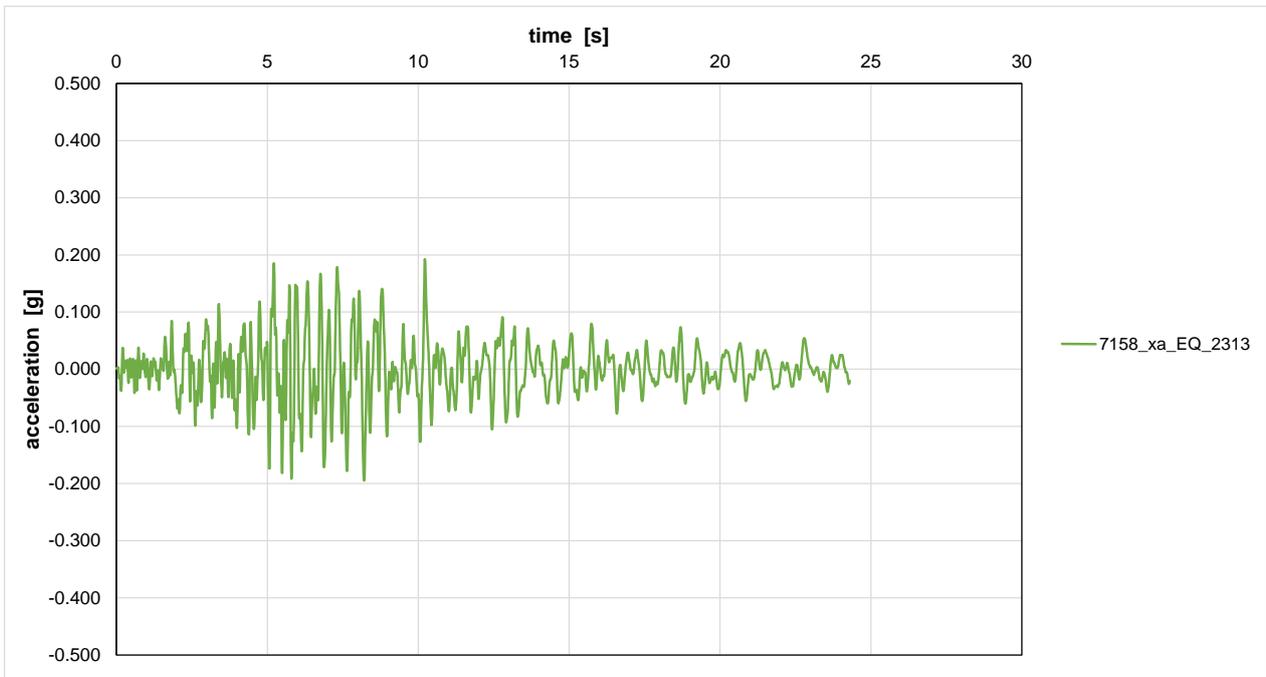


Figura 9 – Accelerogramma naturale: Waveform ID=7158, Earthquake ID=2313



NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA  
TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  
PROGETTO DEFINITIVO

VI11 – Analisi risposta sismica locale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3E	50	D 09 RB	VI1103 001	A	19 di 35

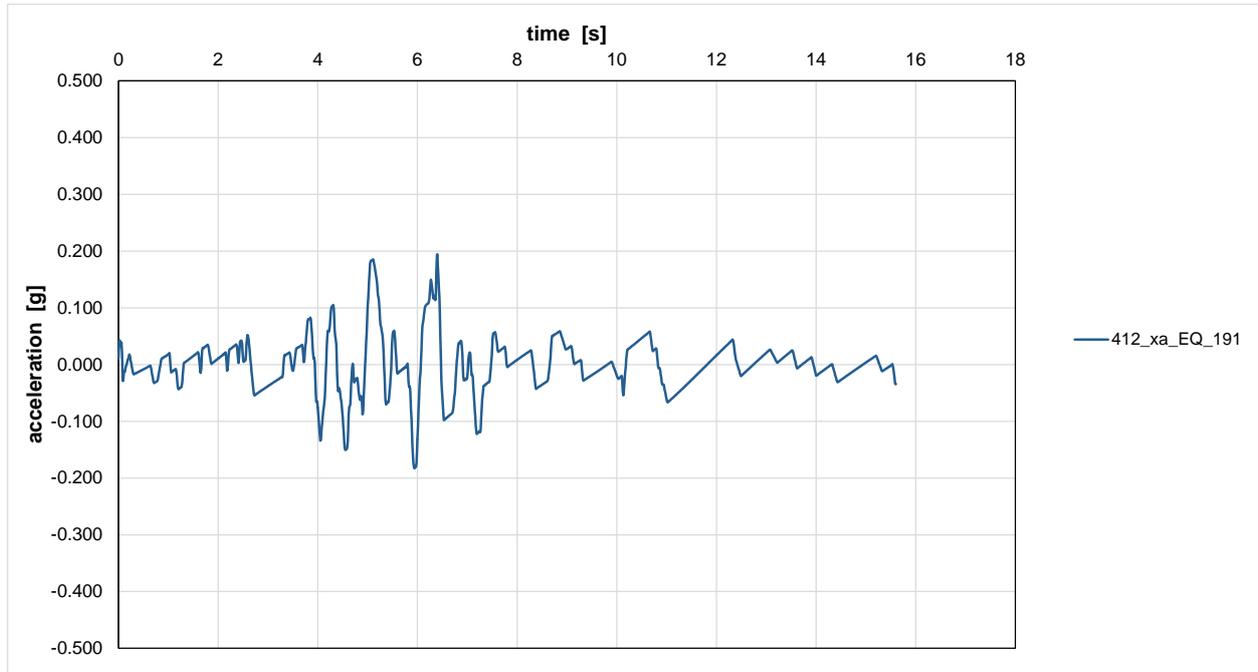


Figura 10 – Accelerogramma naturale: Waveform ID=412, Earthquake ID=191

Nella seguente figura sono mostrati gli spettri di input.



NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA  
TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  
PROGETTO DEFINITIVO

VI11 – Analisi risposta sismica locale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3E	50	D 09 RB	VI1103 001	A	20 di 35

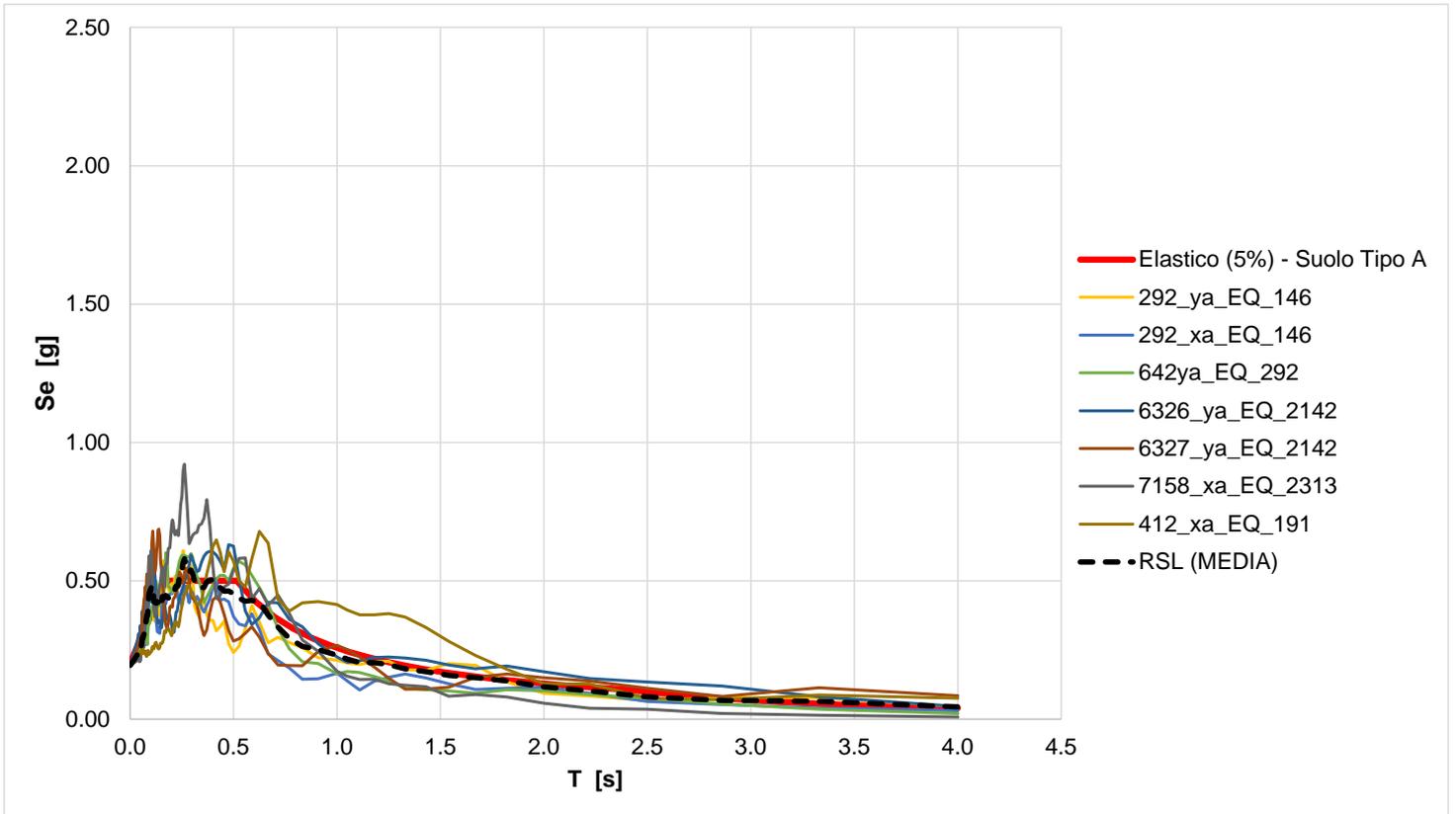


Figura 11 – Spettri di input



NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA  
TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  
PROGETTO DEFINITIVO

VI11 – Analisi risposta sismica locale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3E	50	D 09 RB	VI1103 001	A	21 di 35

## 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.

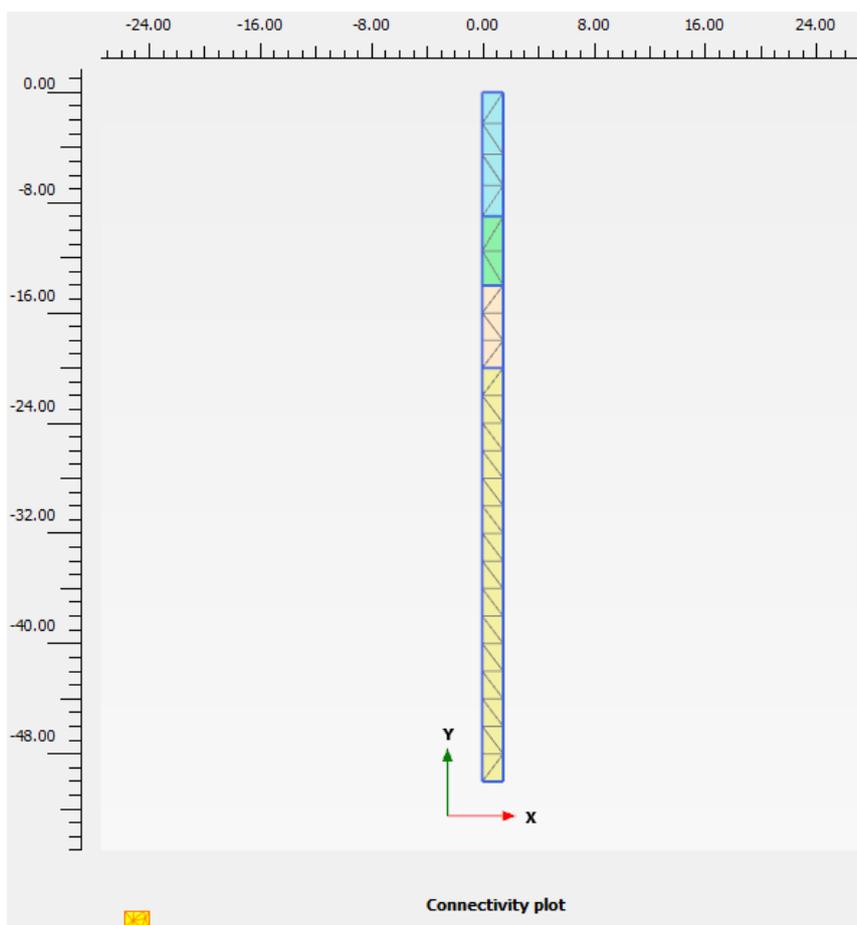


Figura 12 – Mesh

## 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 rigidezza 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 rigidezza secante alla pressione di riferimento ( $\sigma'_{min} = p_{ref}$ ),

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

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

- il modulo di rigidezza  $E_{ur}$  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:

$p_{ref} = 100$  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:

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

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

dove:

$p_{ref} = 100$  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.

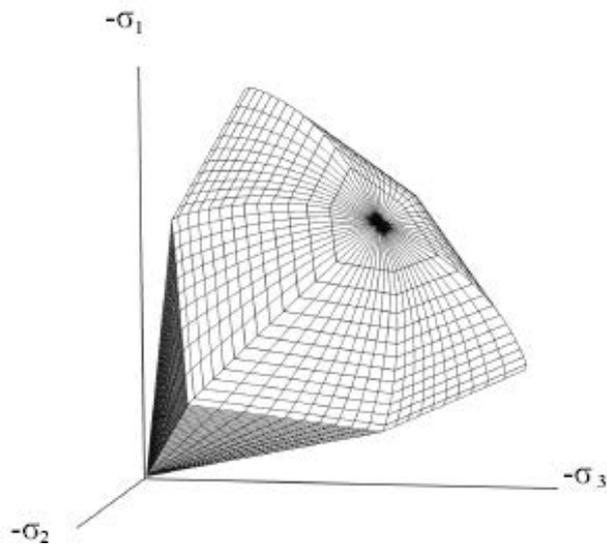


Figura 13. Superficie di snervamento chiusa (Hardening Soil model)

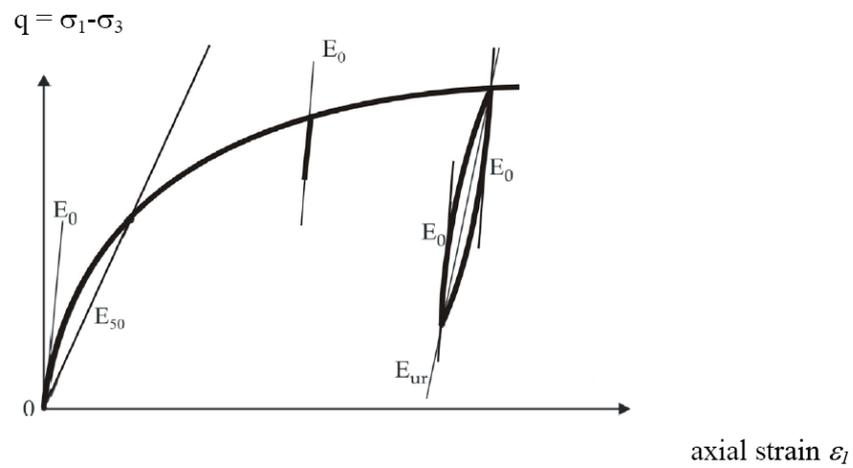


Figura 14. Definizione di  $E_0$ ,  $E_{50}$  e  $E_{ur}$  nel modello costitutivo "HSSmall"

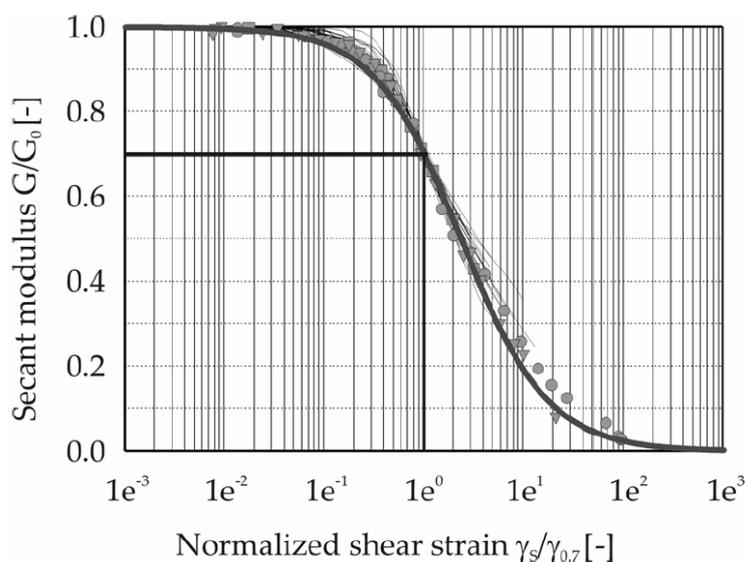


Figura 15. Riduzione del modulo  $G_0$  in funzione di  $\gamma$

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)

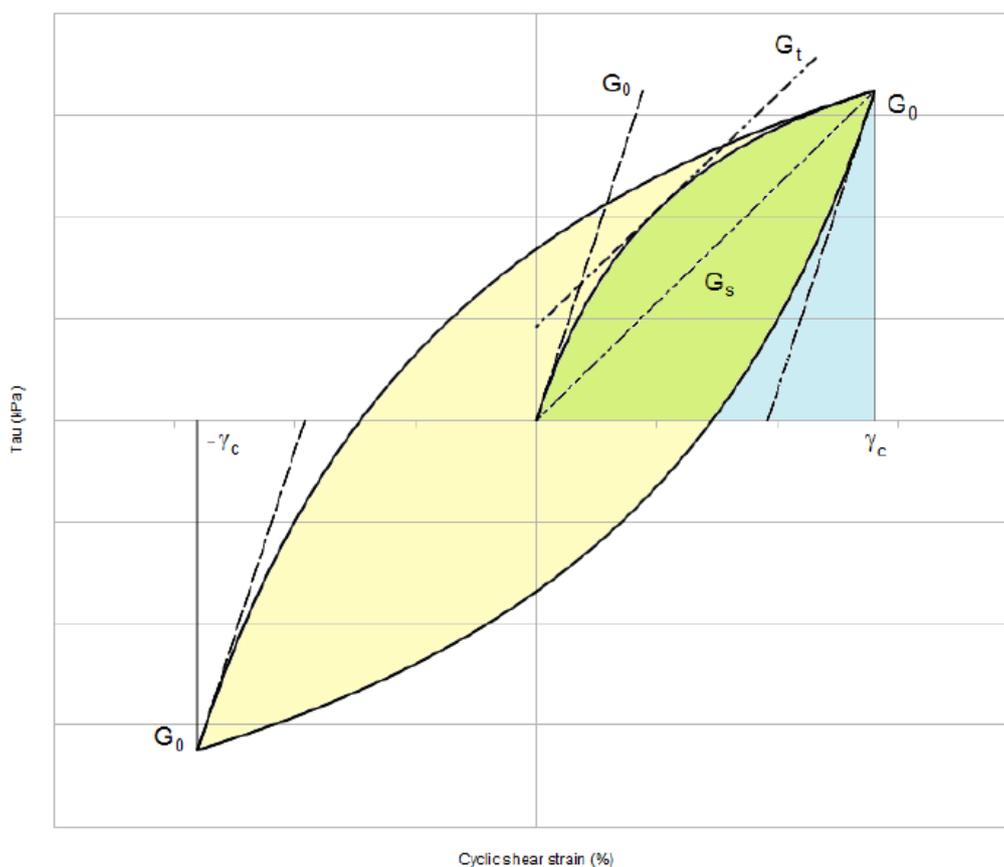


Figura 16. Comportamento di isteresi nel HS small model

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  $\gamma$ .

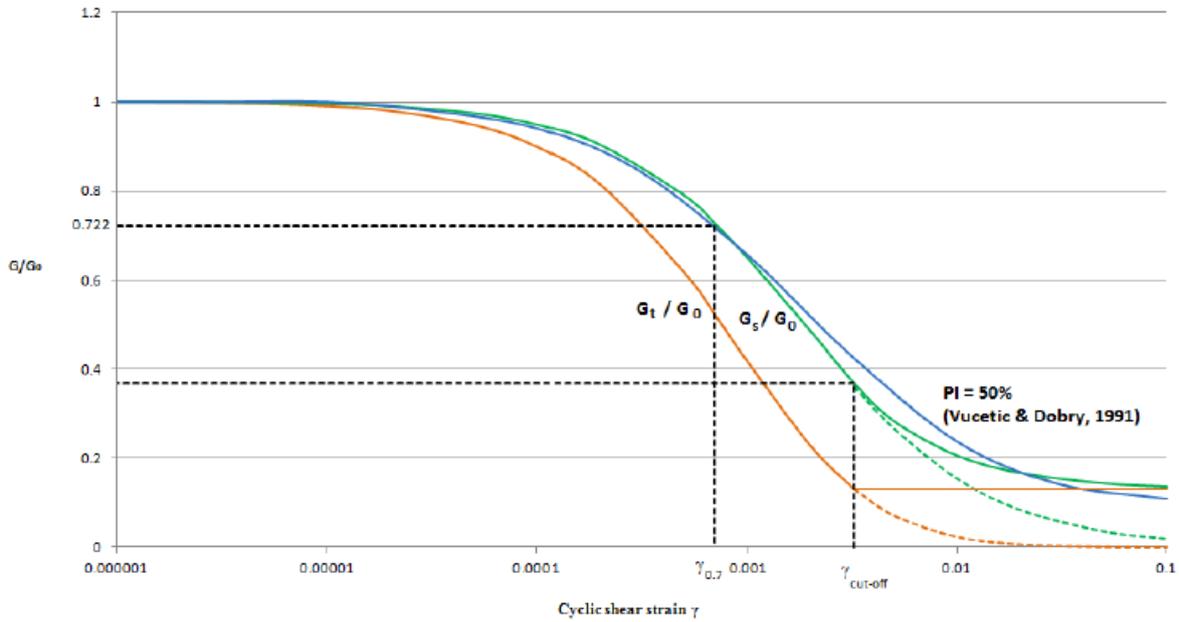


Figura 17. Curva di riduzione del modulo  $G$

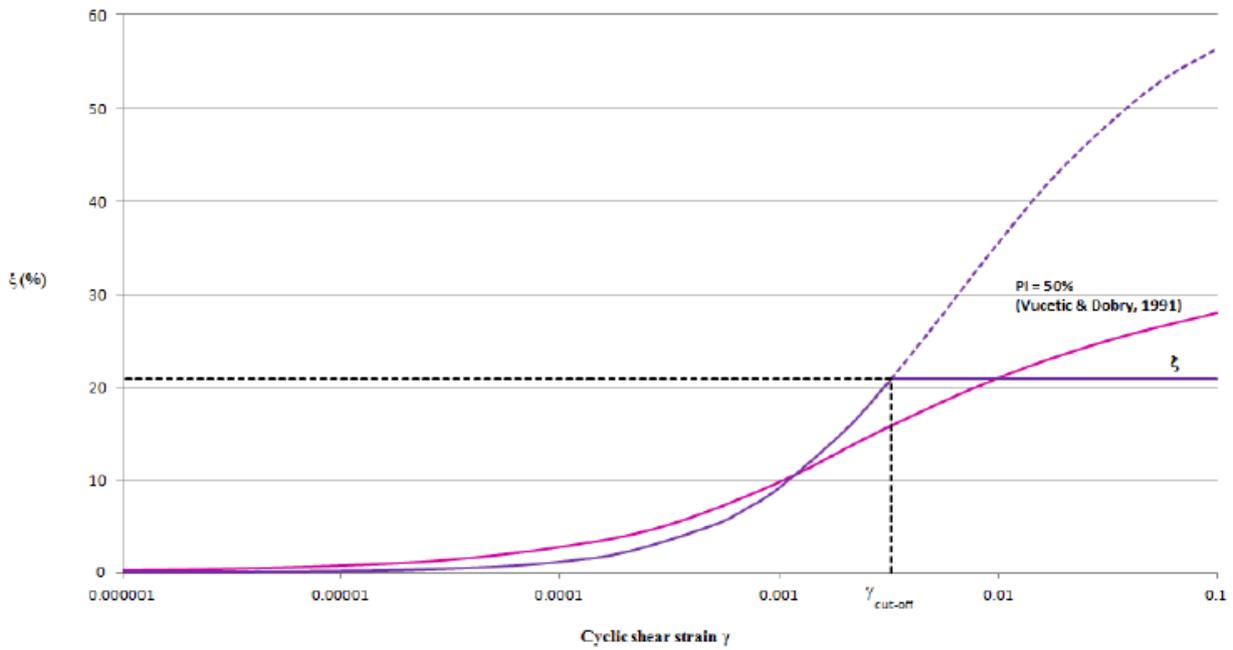


Figura 18. Curva di damping

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*).

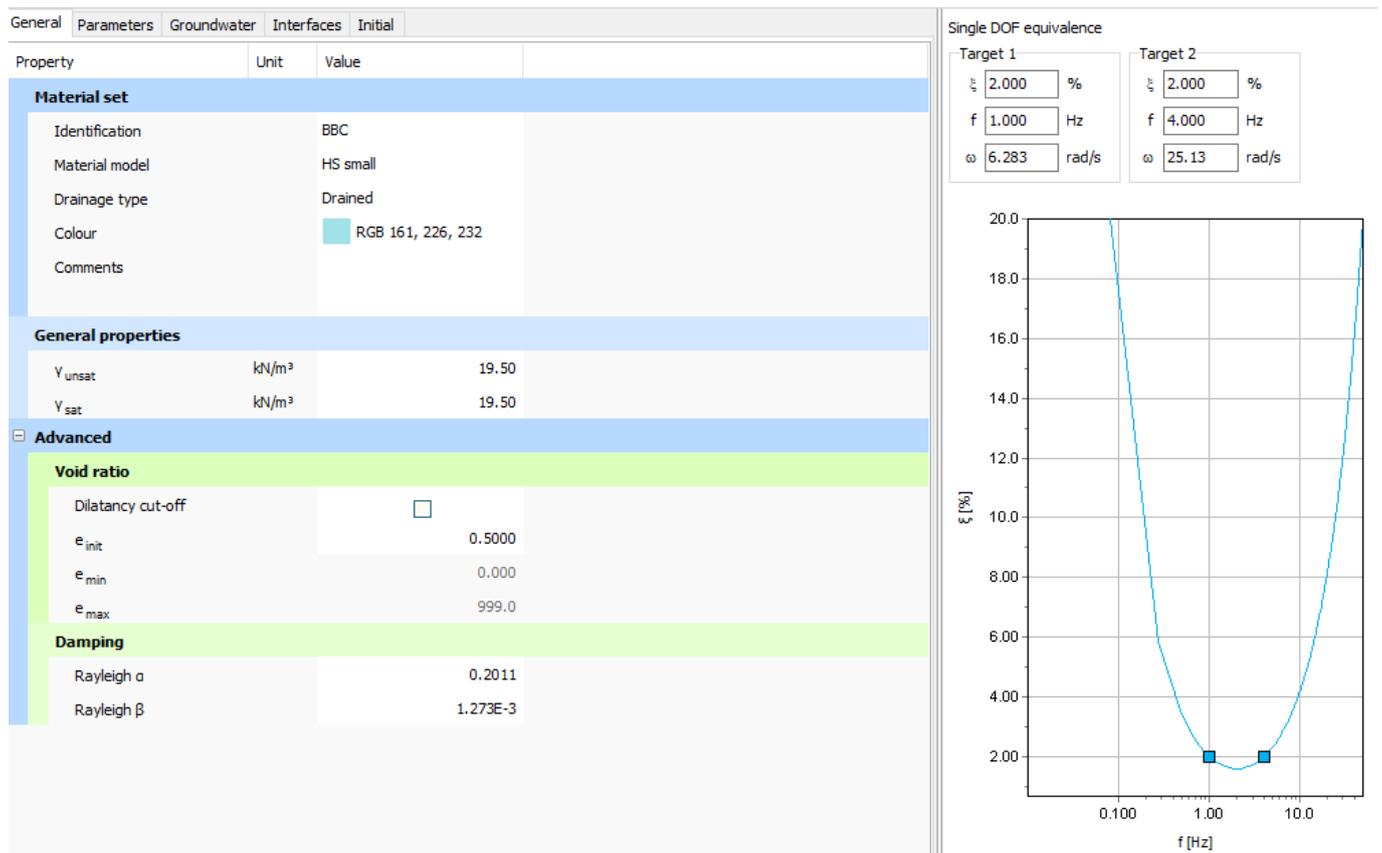


Figura 19. Coefficienti di Rayleigh damping

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA  PROGETTO DEFINITIVO					
VI11 – Analisi risposta sismica locale	COMMESSA RS3E	LOTTO 50	CODIFICA D 09 RB	DOCUMENTO VI1103 001	REV. A	FOGLIO 30 di 35

### 5.3 Parametri geotecnici

Per le unità costituenti il terreno esistente 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 alluvioni 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

	<b>quota p.c.</b>	<b>0.0</b>	<b>m s.l.m.</b>		
	<b>quota falda</b>	<b>-8.0</b>	<b>m s.l.m.</b>		
<b>Unit</b>	<b>BBC</b>	<b>BBI</b>	<b>TRVa</b>	<b>TRV</b>	<b>[--]</b>
<b>da</b>	0.0	-9.0	-14.0	-20.0	<b>m s.l.m.</b>
<b>a</b>	<b>-9.0</b>	<b>-14.0</b>	<b>-20.0</b>	<b>-50.0</b>	<b>m s.l.m.</b>
<b>γ</b>	<b>19.5</b>	<b>19.5</b>	<b>20.5</b>	<b>20.5</b>	<b>kN/m3</b>
<b>k0 NC</b>	<b>0.577</b>	<b>0.485</b>	<b>0.593</b>	<b>0.593</b>	<b>[--]</b>
<b>OCR</b>	<b>1.0</b>	<b>1.0</b>	<b>1.0</b>	<b>1.0</b>	<b>[--]</b>
<b>k0 OC</b>	0.577	0.485	0.593	0.593	<b>[--]</b>
<b>G0,ref</b>	<b>400.0</b>	<b>120.0</b>	<b>275.0</b>	<b>475.0</b>	<b>MPa</b>
<b>m</b>	<b>0.80</b>	<b>0.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>[--]</b>
<b>c'</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>kPa</b>
<b>f'</b>	<b>25</b>	<b>31</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>deg</b>
<b>E50,ref</b>	69.3	20.8	47.7	82.3	<b>MPa</b>
<b>Eur,ref</b>	173.3	52.0	119.2	205.8	<b>MPa</b>
<b>g_07</b>	3.00E-04	9.00E-05	4.00E-04	4.50E-04	<b>[--]</b>

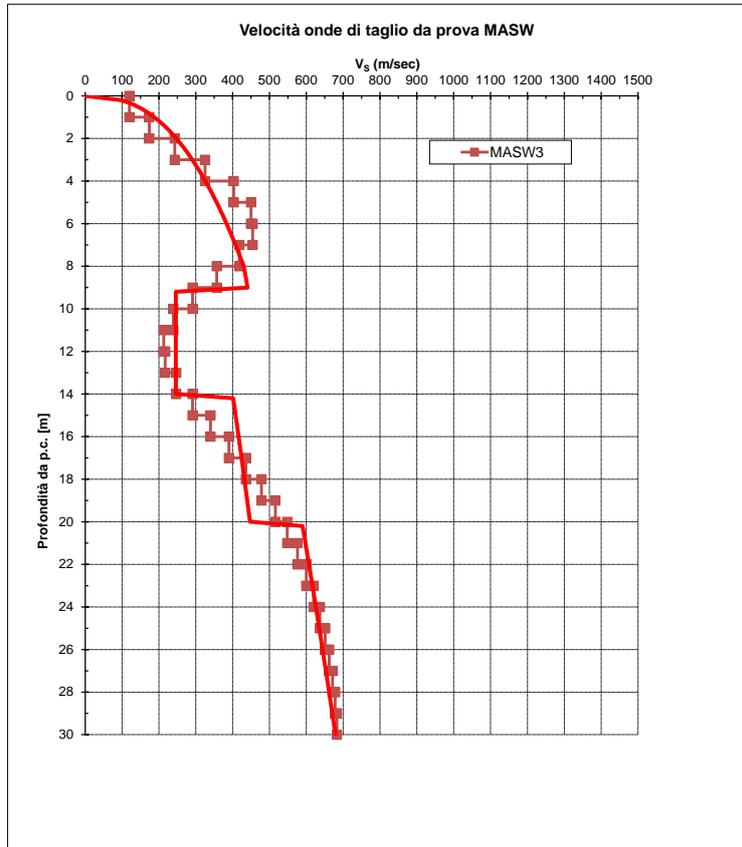


Figura 20. Velocità delle onde di taglio da prove geotecniche e legge di modello

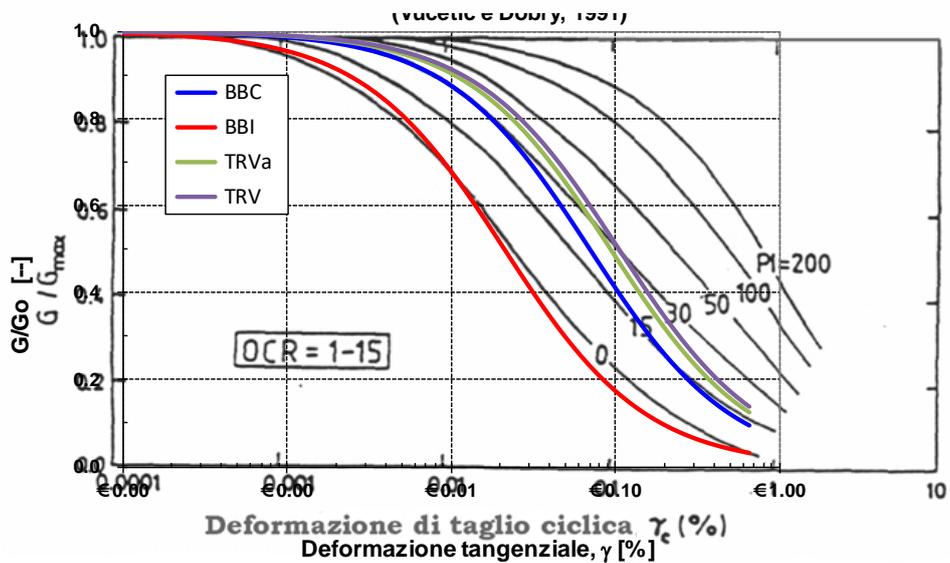


Figura 21. Riduzione del modulo di taglio con la deformazione tangenziale

## 5.4 Risultati

Nel presente paragrafo si riportano i risultati dell'analisi di risposta sismica locale.

In Figura 22 è mostrata la deformata con spostamento massimo ed in Figura 23 è mostrato il parametro  $\gamma$  con mappa di colori da cui si evince che lo strato più “debole” è rappresentato dallo strato di sabbia alluvionale collocato tra le coperture alluvionali coesive e la formazione di base, dove l'indagine sismica Masw ha evidenziato inversione di velocità.

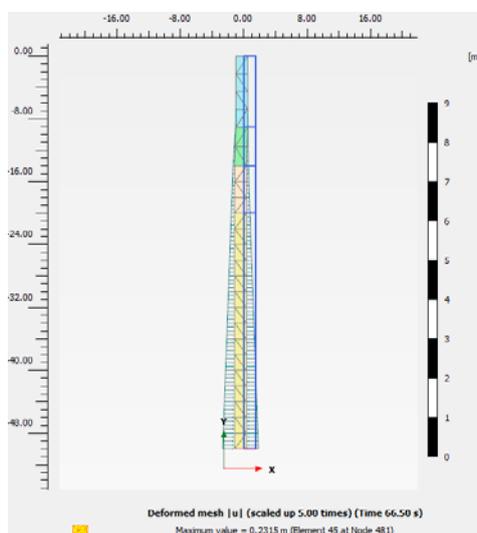


Figura 22. Spostamento massimo

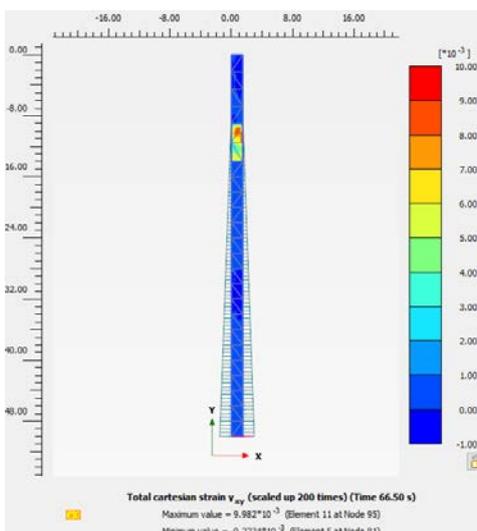


Figura 23. - Parametro  $\gamma_{07}$  che regola il decadimento del modulo a taglio con la deformazione tangenziale

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 il valore medio ottenuto dall'analisi dei 7 accelerogrammi, da cui si ottiene:

$$S_s = 1.68$$

$$\text{Quindi, } a_{\max} = S_s \cdot S_T \cdot a_g = 1.68 \cdot 1.0 \cdot 0.204 = 0.34.$$

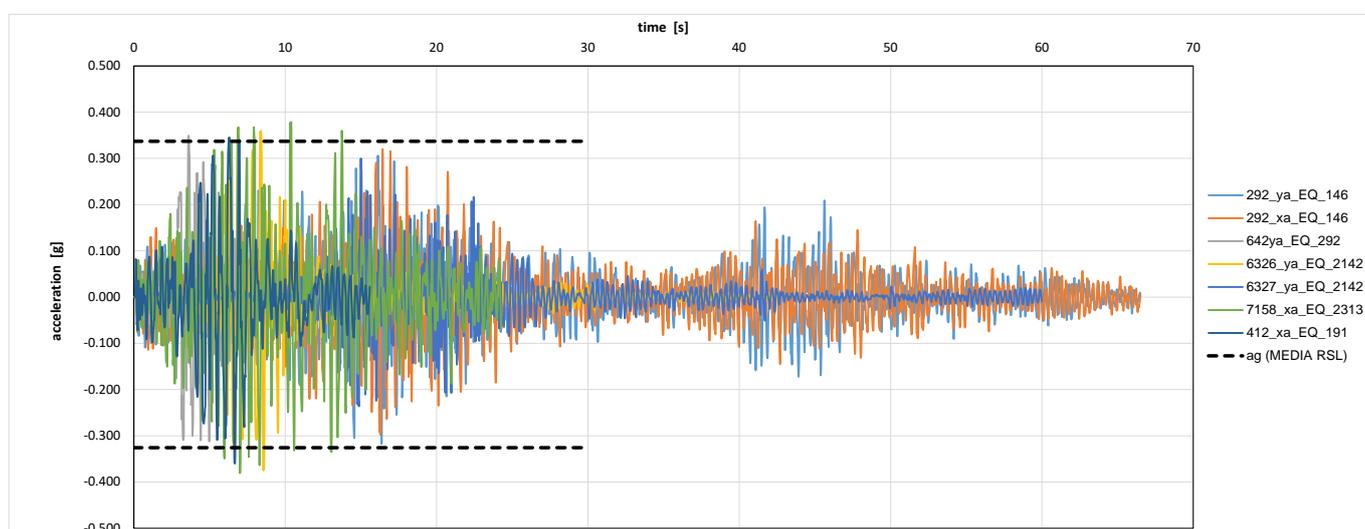


Figura 24. Accelerogrammi a p.c.

Nella figura seguente sono riportati gli spettri 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  $S_s = 1.40$  con linea tratteggiata blu) e quello per suolo tipo C considerando il valore di  $S_s$  individuato dalla analisi di risposta sismica locale ( $S_s = 1.68$ , linea blu).

Nel grafico è inserito il confronto tra i risultati della risposta sismica locale e gli spettri di normativa con categoria C, solo a titolo esemplificativo. Rimane compito del Progettista Strutturale la scelta dello spettro di progetto maggiormente idoneo anche in funzione del tipo di struttura da realizzare.

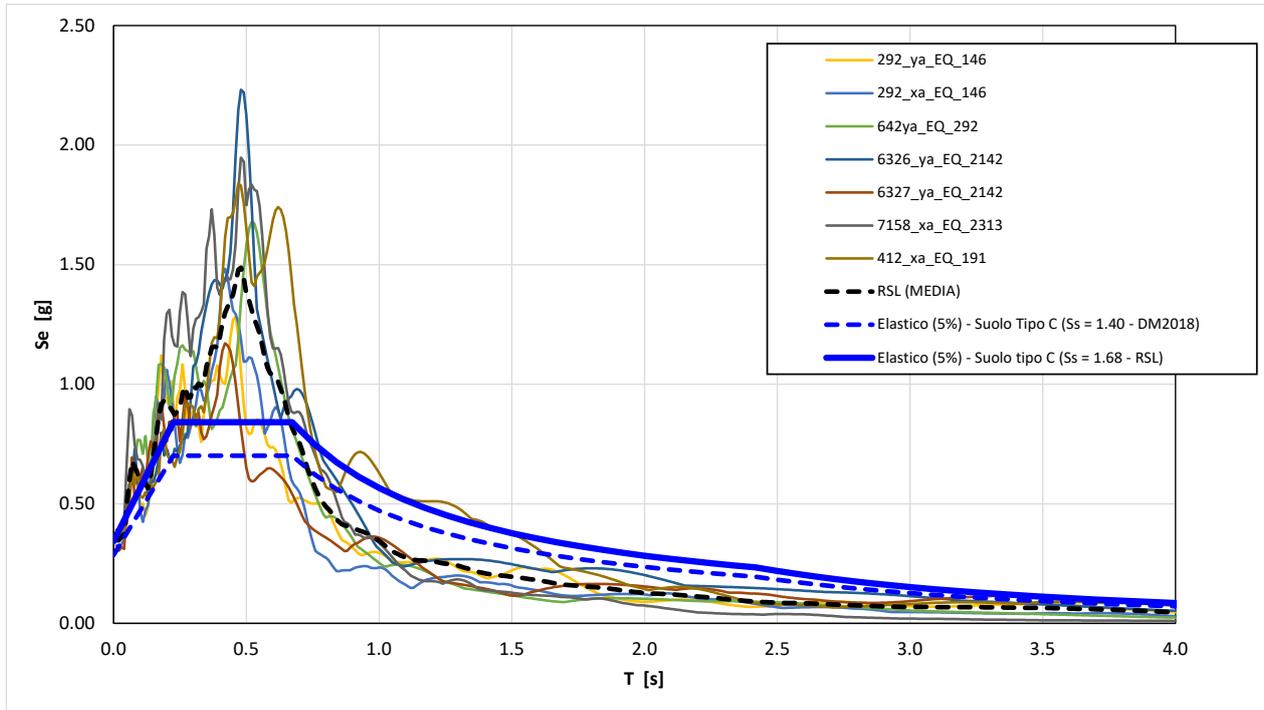


Figura 25. Spettri elastici