

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 TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

SCALA:

-

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

RS3V 40 D 29 RH GE0005 013 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	G.Furlani	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

RS3V40D29RHGE0005013A

n. Etab.: 185_4

INDICE

1.	PREMESSA	4
2.	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
2.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
2.3	SOFTWARE.....	5
3.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	6
3.1	INDAGINI ESEGUITE.....	6
3.2	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO	6
3.3	FALDA.....	8
3.4	INDAGINI SISMICHE	8
4.	CONDIZIONI SISMICHE	10
4.1	GENERALITÀ.....	10
4.2	DEFINIZIONE DELL'ACCELERAZIONE ORIZZONTALE MASSIMA ATTESA SU SITO DI RIFERIMENTO RIGIDO (AG)	11
4.3	ANALISI DI DISAGGREGAZIONE	12
4.4	ACCELEROGRAMMI NATURALI.....	15
5.	ANALISI RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	20
5.1	DESCRIZIONE GENERALE DEL MODELLO FEM 2D	20
5.2	LEGAME COSTITUTIVO	24
5.3	PARAMETRI GEOTECNICI.....	31
6.	RISULTATI	35
6.1	ACCELEROGRAMMA EQ01 (ID=290_XA_EQ_146).....	35
6.2	ACCELEROGRAMMA EQ03 (ID=350_XA_EQ_170).....	39
6.3	ACCELEROGRAMMA EQ06 (ID=6174_XA_EQ_2029).....	42
6.4	CONSIDERAZIONI FINALI	46



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

FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO
DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D
SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	3 di 46



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

FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	4 di 46

1. PREMESSA

Nella presente relazione si riporta l'analisi di risposta sismica locale FEM 2d 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.

Tale analisi viene svolta ad integrazione dell'analisi svolta mediante modellazione FEM 1d, con il principale scopo di indagare gli aspetti di amplificazione topografica del sistema geotecnico costituito dal pendio, colonne di consolidamento e rilevato.

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, che corrisponde ad una categoria di sottosuolo nell'intorno del valore limite tra B e C. Le tomografie sismiche eseguite nell'area (vedasi stesa tomografica LS11) portano a definire categoria sottosuolo tipo C.

Nel presente documento, appositamente dedicato all'analisi RSL FEM 2d, vengono 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;
- Definizione del modello FEM 2d ed analisi di risposta sismica locale per gli accelerogrammi maggiormente critici: determinazioni degli accelerogrammi di output su punti significativi (sommità rilevato, ciglio superiore e inferiore del rilevato, scarpata rilevato e p.c. pendio di valle. Analisi dei relativi spettri elastici di pseudo-accelerazioni. Conclusioni di interesse progettuale.

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 TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	5 di 46

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.
[DC3]. RS3V40D29RHGE0005012A – Nuovo collegamento Palermo-Catania, tratta Nuova Enna - Dittaino. Progetto Definitivo. Geotecnica. FV01. Risposta sismica locale del sito: studio dell'amplificazione stratigrafica mediante metodo FEM 1D su set di accelerogrammi naturali.
[DC4]. RS3V40D29RHGE0005001B – Nuovo collegamento Palermo-Catania, tratta Nuova Enna - Dittaino. Progetto Definitivo. Geotecnica. FV01. Relazione di calcolo e stabilità rilevato (1 di 3).
[DC5]. RS3V40D29RHGE0005010A – Nuovo collegamento Palermo-Catania, tratta Nuova Enna - Dittaino. Progetto Definitivo. Geotecnica. FV01. Relazione di calcolo e stabilità rilevato (2 di 3).
[DC6]. RS3V40D29RHGE0005011A – Nuovo collegamento Palermo-Catania, tratta Nuova Enna - Dittaino. Progetto Definitivo. Geotecnica. FV01. Relazione di calcolo e stabilità rilevato (3 di 3).

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 2019, con autorizzazione NP811PK 854175b5 ***** con 1 chiave hardware; prodotto e commercializzato dalla Plaxis bv, Delft, Olanda.



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

FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	6 di 46

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.



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

FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	7 di 46

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.

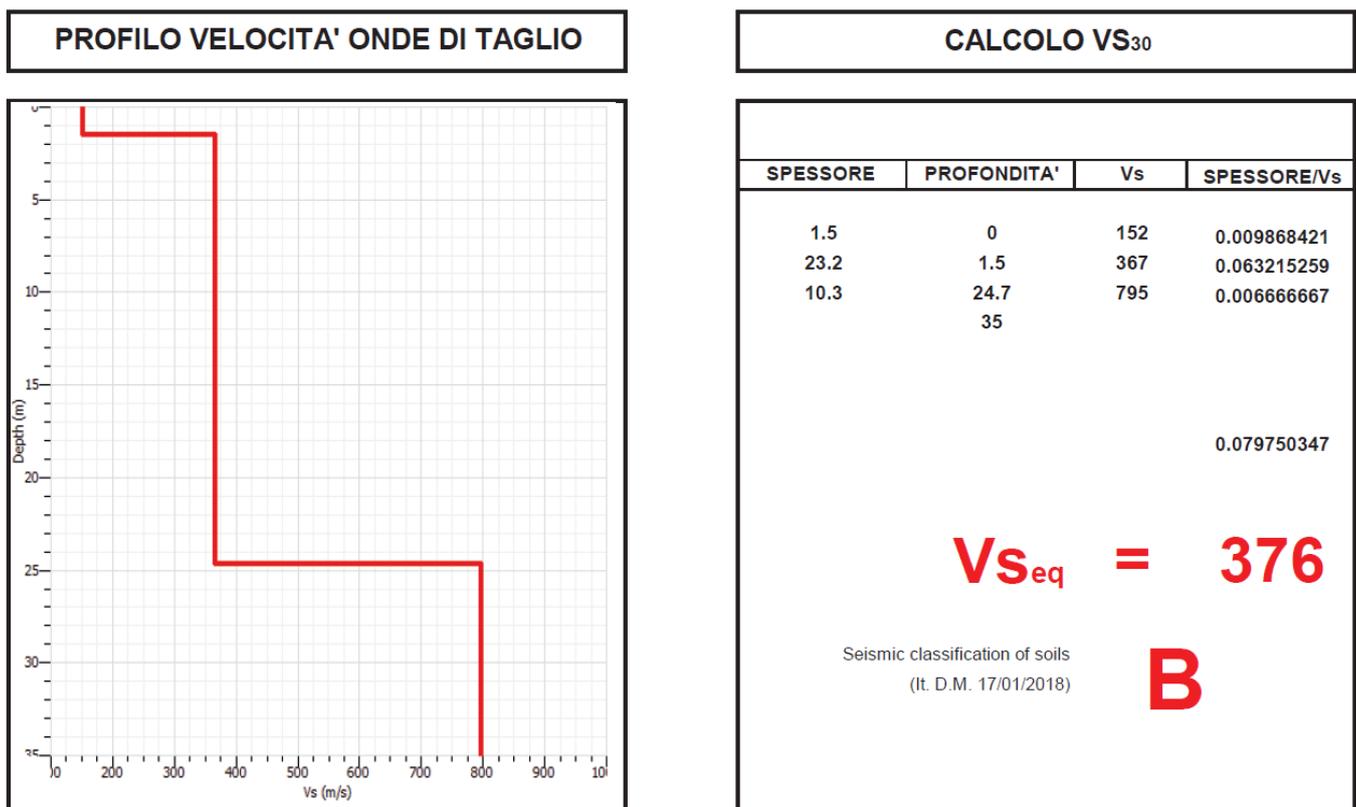


Figura 1 – $V_{s,eq}$ da prova sismica Masw

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.

Tabella 1 – MASW6 - HVSr 090

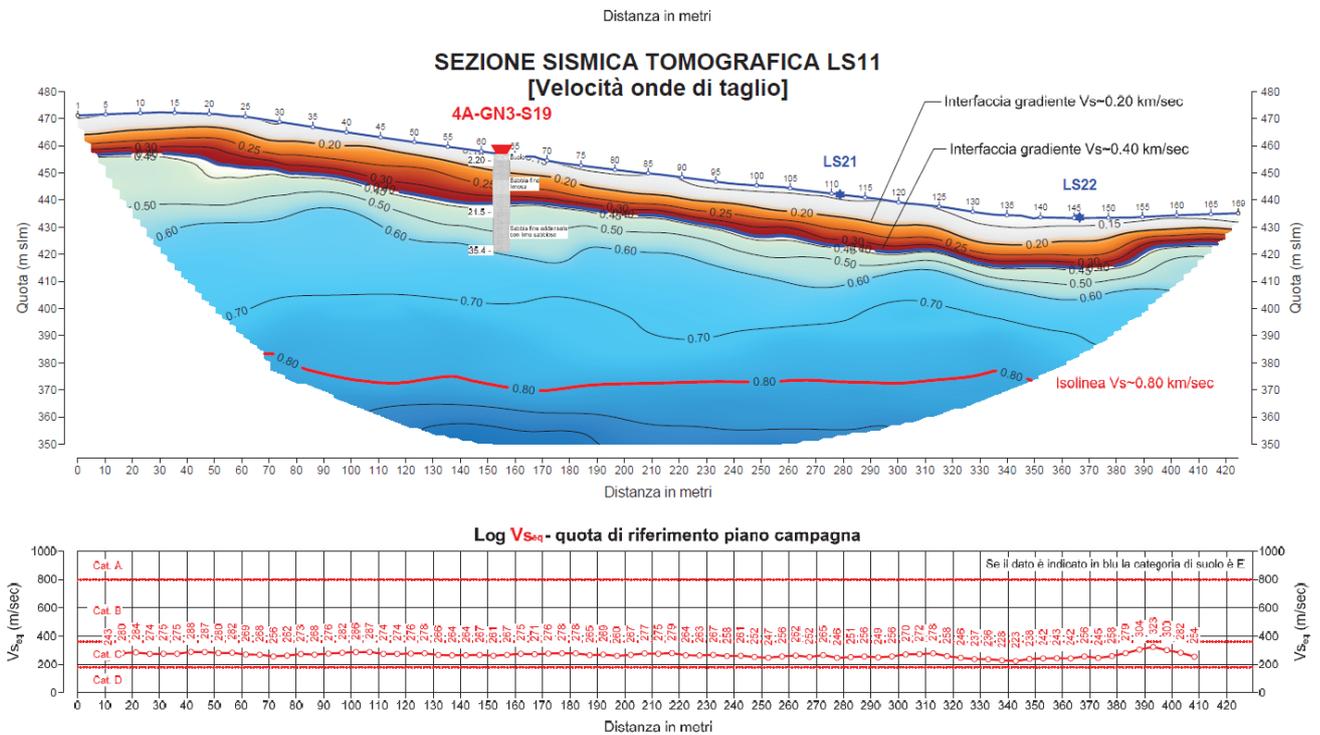
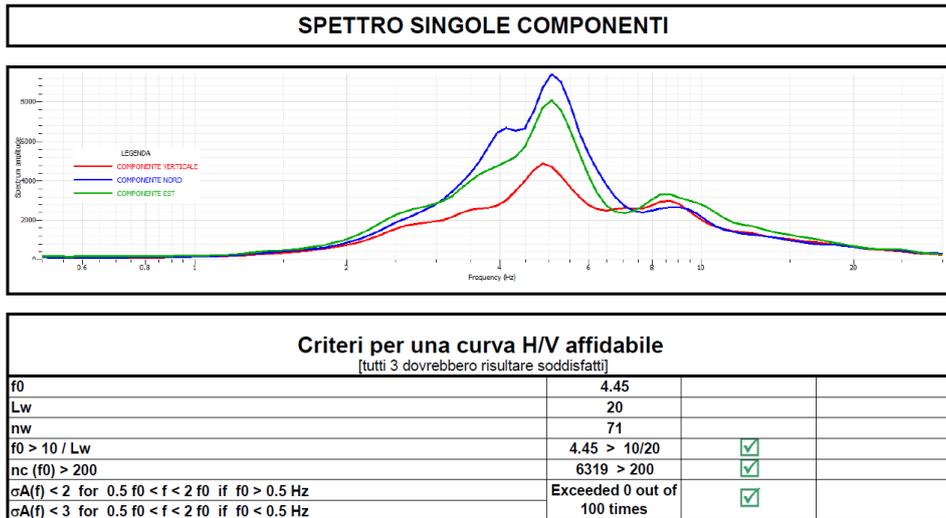


Figura 2 – Vs_{eq} da tomografia sismica

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 TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	11 di 46

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: LATITUDINE:

Ricerca per comune

REGIONE: PROVINCIA: COMUNE:

Elaborazioni grafiche

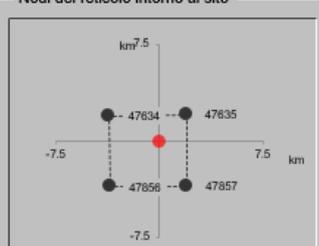
Grafici spettri di risposta

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	0.048	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

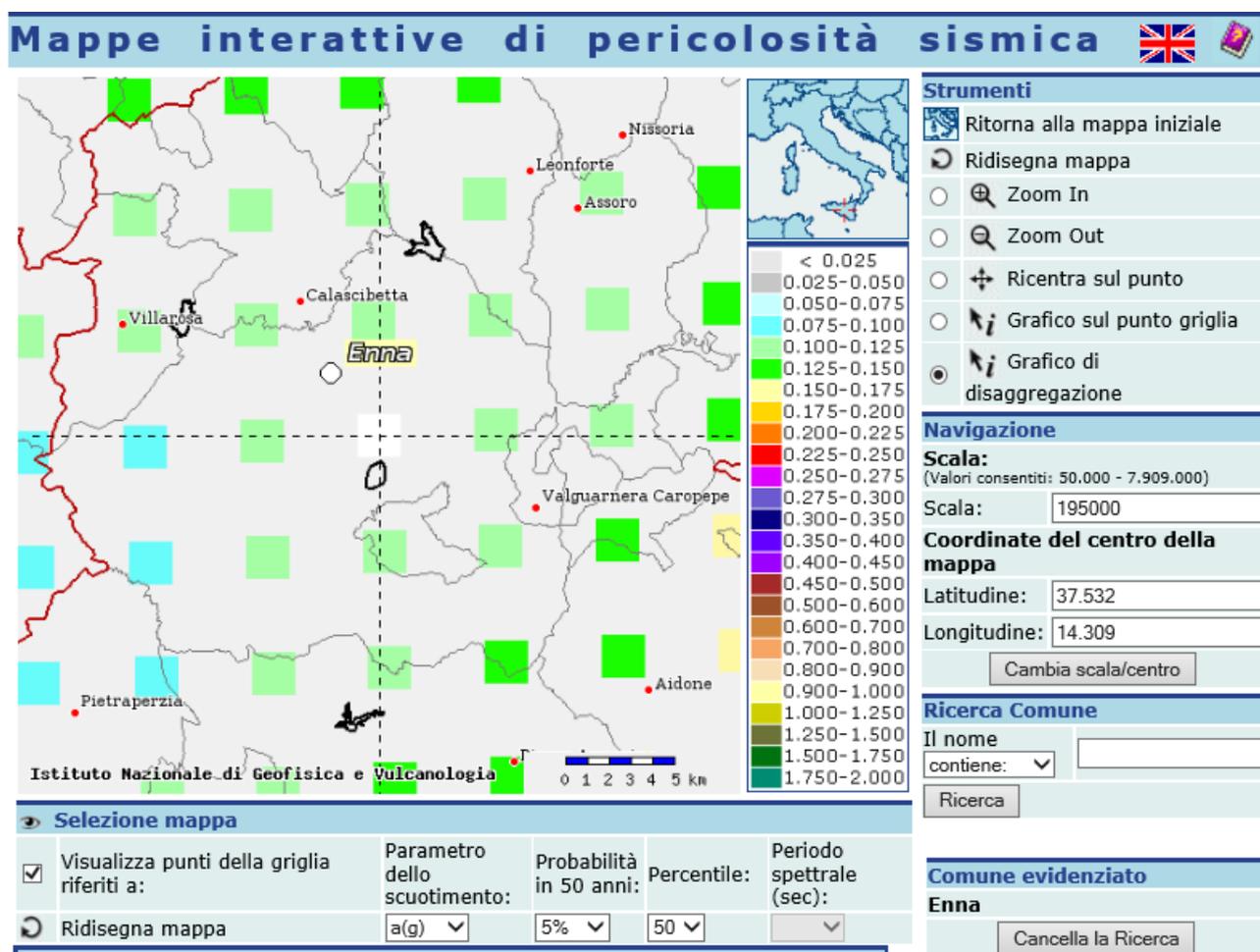
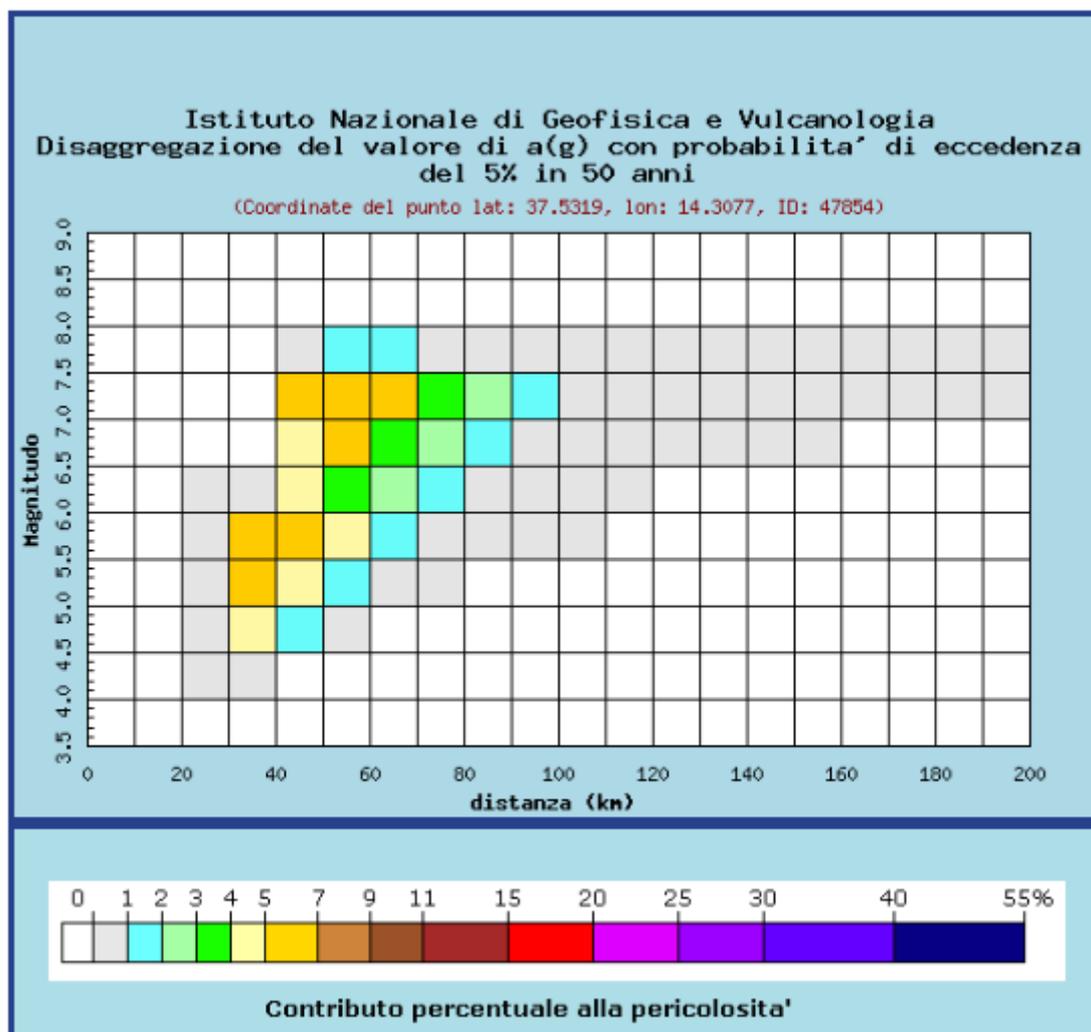


Tabella 4 – Magnitudo e distanza



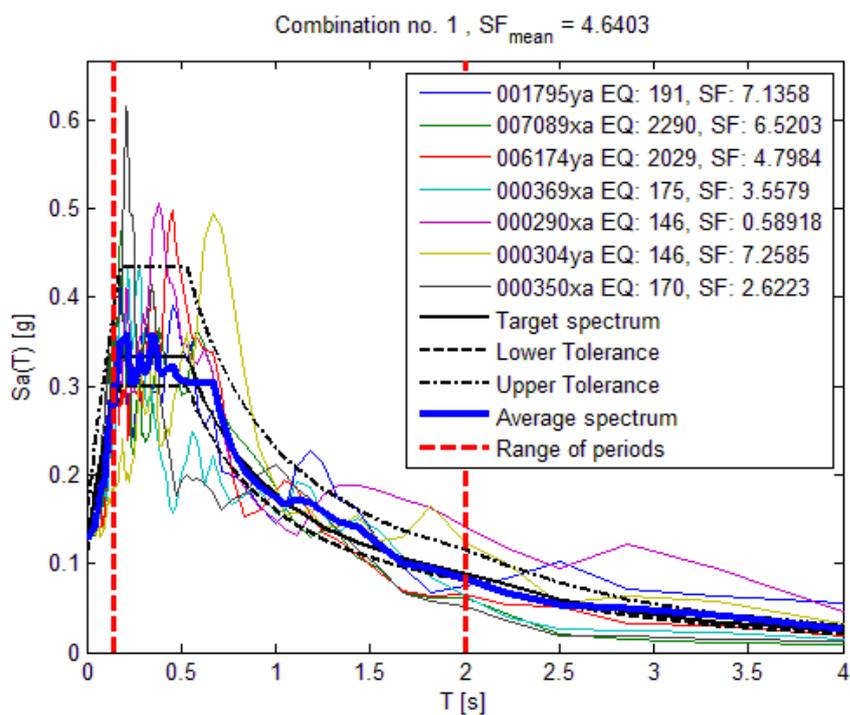
4.4 Accelerogrammi naturali

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.

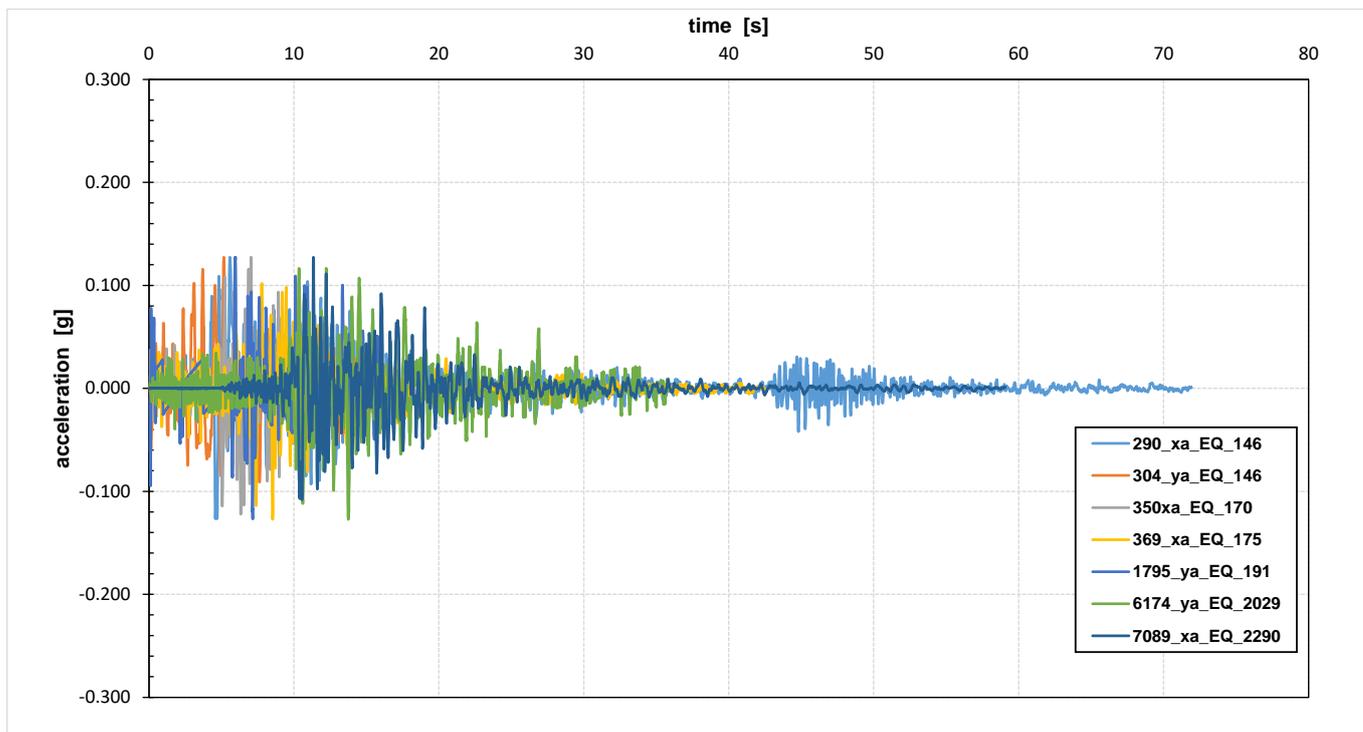
Gli accelerogrammi naturali così individuati sono sintetizzati nella seguente tabella e rappresentati nella seguente Figura 3, tutti insieme a confronto, e separatamente da Figura 4 a **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**:

- 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% e +30%;
- la spettro compatibilità è stata estesa fino ad un tempo di 2 sec.



FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	17 di 46



Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance [km]	PGA_X [m/s ²]	PGA_Y [m/s ²]	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

Le analisi RSL 1D hanno consentito di analizzare tutti e 7 gli accelerogrammi. E' stato quindi possibile identificare all'interno del gruppo i due accelerogrammi maggiormente critici, che corrispondono anche ai valori massimi del parametri Intensità di Arias. Gli accelerogrammi naturali selezionati sono rappresentati separatamente nelle seguenti figure, già scalati.

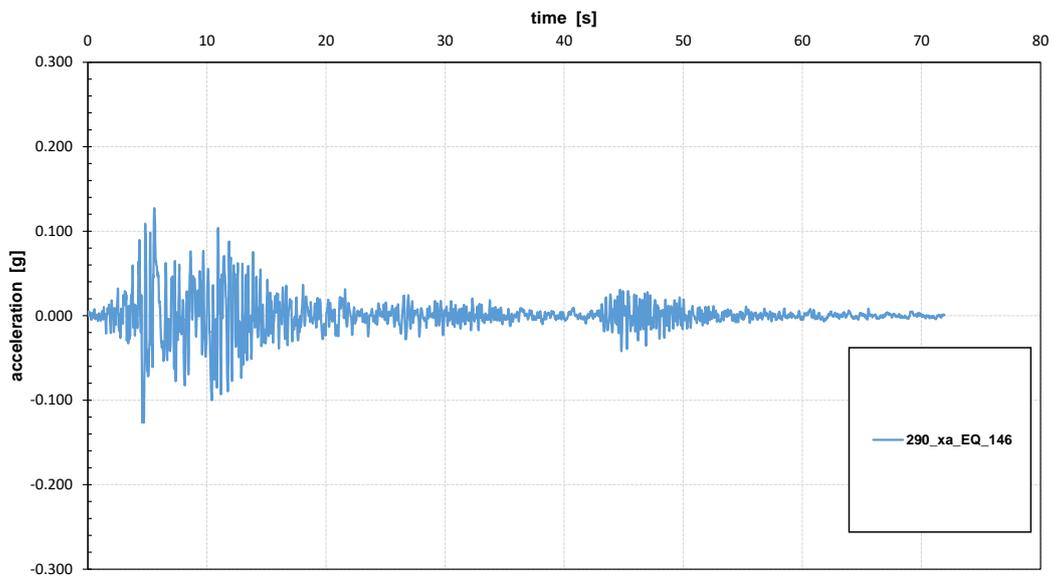


Figura 4 Accelerogramma naturale EQ01: Waveform ID=290_xa, Earthquake ID=146

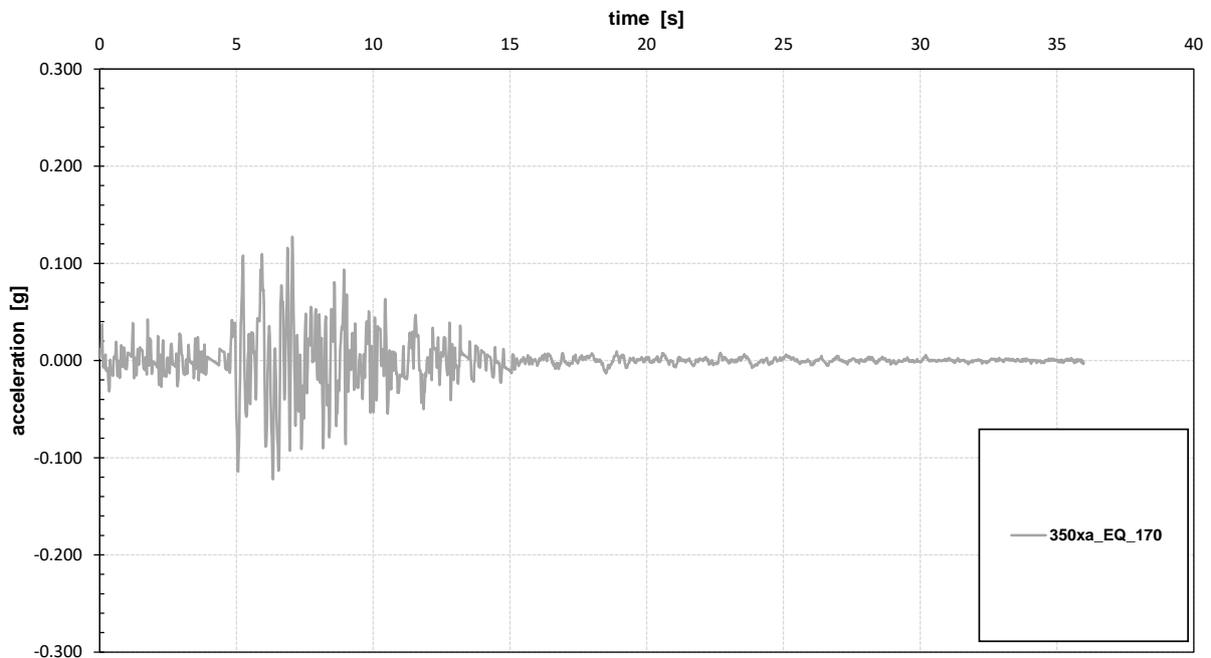


Figura 5 – Accelerogramma naturale EQ03: Waveform ID=350_xa, Earthquake ID=170

FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	19 di 46

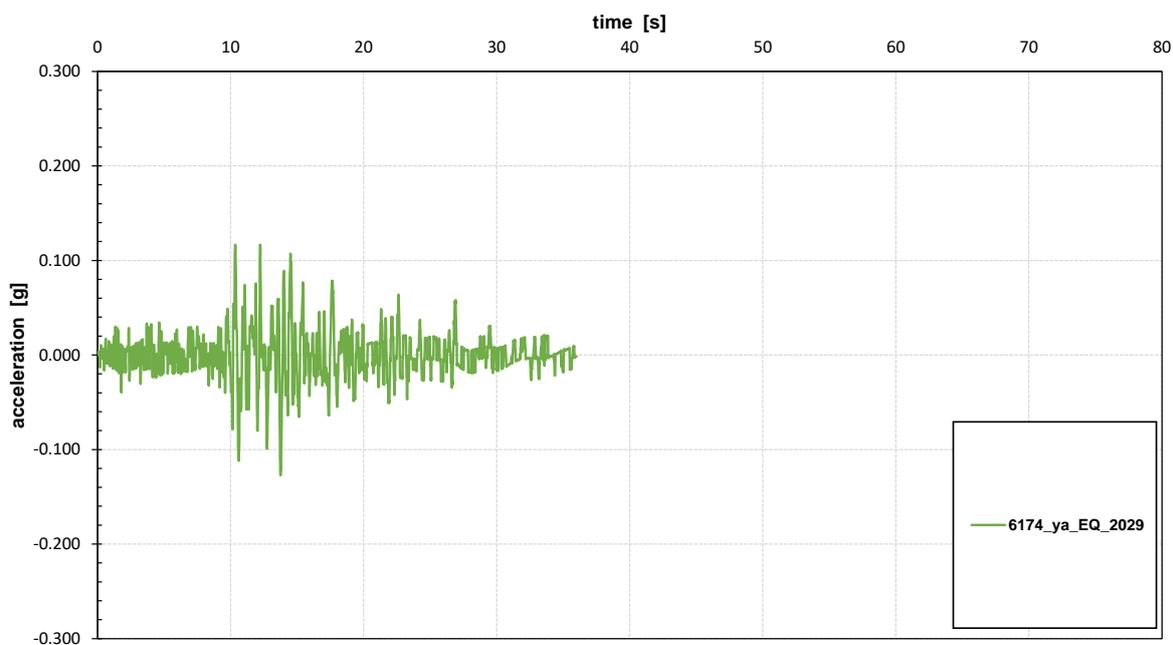


Figura 6 – Accelerogramma naturale EQ06: Waveform ID=6174_ya, Earthquake ID=2029



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

FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	20 di 46

5. ANALISI RISPOSTA SISMICA LOCALE

5.1 Descrizione generale del modello FEM 2d

La risposta sismica locale è definita come l'insieme delle variazioni che il moto sismico subisce in relazione alle proprietà meccaniche e geometriche dei depositi prossimi alla superficie del sito di interesse. Le onde sismiche, durante il loro percorso di propagazione dall'ipocentro alla superficie, subiscono diverse modifiche dovute alle condizioni geologiche, geomorfologiche e geotecniche che modificano anche in modo considerevole il moto sismico. Tali modifiche dipendono principalmente da due fenomeni, l'amplificazione stratigrafica e l'amplificazione topografica.

Le variazioni di moto che comportano un aumento dell'ampiezza degli spostamenti sono associate alla variazione di impedenza del terreno, fenomeno usualmente chiamato amplificazione stratigrafica. L'amplificazione topografica, invece, è dovuta alla focalizzazione dell'energia nel terreno a causa della conformazione geometrica della superficie terrestre.

In un modello agli elementi finiti deve essere verificata la corretta propagazione dell'onda in modo che i risultati delle analisi rispecchino le soluzioni teoriche di risposta sismica locale. La calibrazione permette, quindi, di capire se il modello ha dimensioni appropriate tali da eliminare gli effetti di bordo, se le condizioni al contorno sono correttamente ipotizzate e se la mesh è sufficientemente densa per la trasmissione dell'onda.

Il dimensionamento della mesh ha un ruolo fondamentale per la corretta trasmissione delle onde. Per descrivere correttamente la propagazione sismica delle onde V_s occorre avere almeno 3 nodi numerici nell'ambito della semi-lunghezza d'onda, ovvero almeno 6 nodi nell'ambito dell'intera lunghezza d'onda $\lambda = V_s \cdot T = V_s / f$. Pertanto per una discretizzazione a maglia triangolare occorre una dimensione dell'elemento minore o uguale di un sesto della lunghezza d'onda associata alla massima frequenza (f_{max}) e alla minima velocità ($V_{s,min}$) dell'input considerato.

$$\Delta h \leq V_{s,min} / (6 \cdot f_{max})$$

dove $V_{s,min}$ è la minore velocità delle onde di taglio ed f_{max} la frequenza alla quale è associata il maggior quantitativo di energia. Nel caso in esame ($f_{max} \approx 5$ Hz e $V_{s,min} \approx 200$ m/s, vedasi successivo capitolo) si ottiene una dimensione massima degli elementi triangolari di circa 6 m.

Nella seguente Figura 7 si mostra la mesh generata in corrispondenza della sezione maggiormente rappresentativa della stazione (massima altezza del rilevato); La mesh è costituita da circa 3600 elementi con dimensione media

degli elementi triangolari è di 3-4 m, inferiore alla dimensione massima sopra determinata. I nodi di calcolo sono circa 31'000.

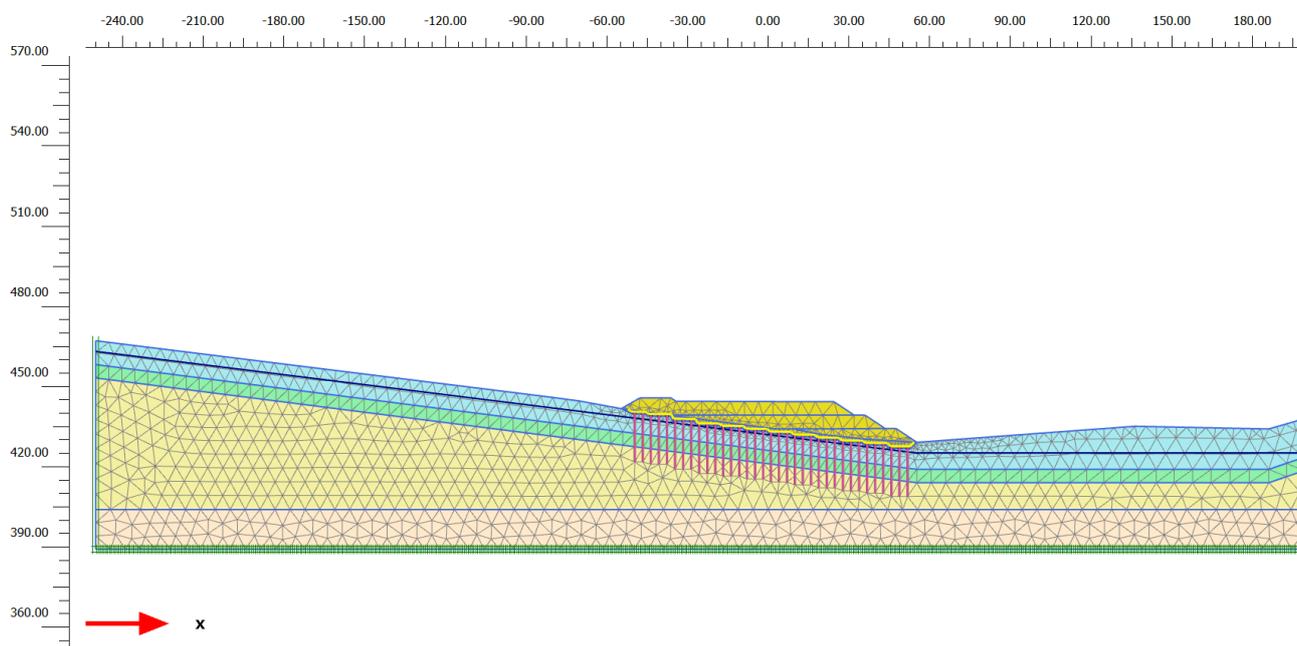


Figura 7 – Mesh di calcolo della sezione

L'analisi della risposta sismica locale è stata svolta mediante programma Plaxis 2d 2019.

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).

La mesh è stata generata con una larghezza di circa 550 m al fine di posizionare i bordi verticali sufficientemente lontano dal volume di interesse progettuale (rilevato e pendio circostante). Infatti, nonostante gli accorgimenti numerici disponibili ed adottati, i bordi verticali costituiscono inevitabile fonte di possibili disturbi numerici sugli elementi vicini al bordo.

I bordi verticali sono stati vincolate con la condizione "Free field". L'opzione simula la propagazione delle onde in campo lontano con riflessione minima al contorno e gli elementi che lo compongono hanno le stesse proprietà del suolo in cui sono posizionati. L'assorbimento delle onde è garantito dagli smorzatori posizionati nei punti esterni della discretizzazione in direzione perpendicolare e ortogonale al dominio (Figura 8). La condizione "Free field"

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA PROGETTO DEFINITIVO TRATTA NUOVA ENNA-DITTAINO					
FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI	COMMESSA RS3V	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0005 013	REV. A	FOGLIO 22 di 46

necessita della creazione di elementi interfaccia in modo da avere il collegamento tra le informazioni calcolate nella mesh e l'effetto indotto dagli smorzatori.

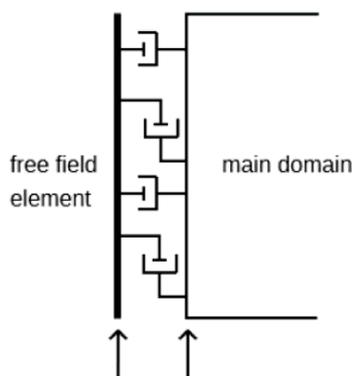


Figura 8 – Schema di funzionamento dei bordi Free-Field (dal Manuale Plaxis)

Le analisi FEM 2d sono state condotte ipotizzando stratigrafia e caratteristiche geotecniche uguali alla colonna analizzata in condizioni monodimensionali (vedasi cfr. doc. [DC3] e successivo paragrafo 5.3), con il bedrock, che viene modellato tramite l'imposizione della condizione “Compliant Base” al bordo inferiore. In questo caso va considerata la sola propagazione diretta verso l'alto. Pertanto il segnale in input deve essere scalato di un fattore 0.5 in modo da tenere conto che le onde registrate dalle stazioni in superficie (outcrop) subiscono la riflessione sulla superficie libera e quindi hanno un'ampiezza doppia rispetto all'onda incidente.

Nella seguente figura è mostrata la geometria della sezione analizzata e le caratteristiche degli elementi strutturali (colonne di consolidamento, cappellotti, geogriglia, platea di fondazione) modellati nel calcolo (cfr. doc. rif. [DC4]-[DC6]).

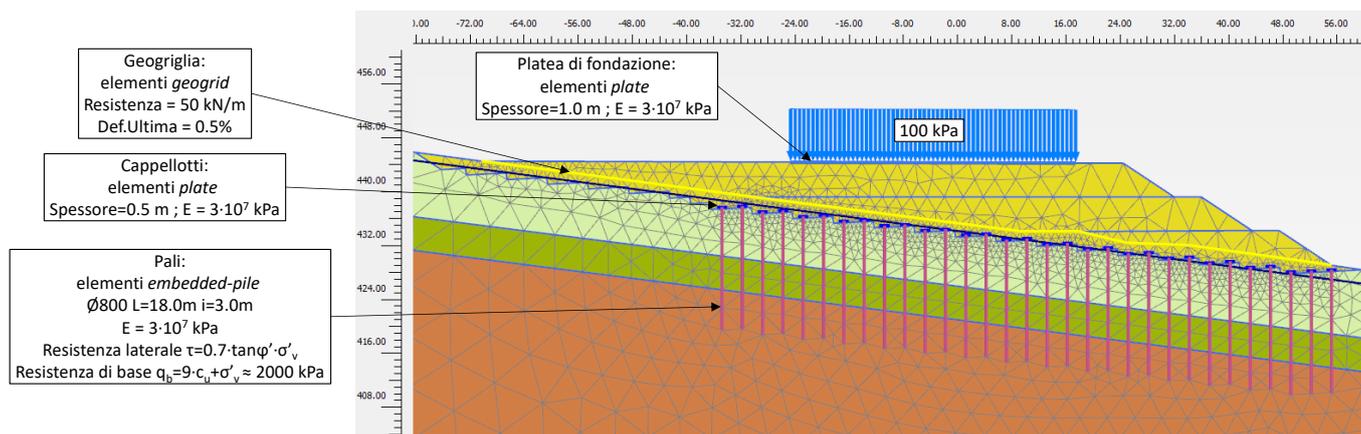


Figura 9. Schema modello

L'analisi si articola in due fasi, la prima statica dove sono applicati i carrelli in corrispondenza dei bordi laterali e cerniere sul fondo del modello e si definiscono le fasi realizzative del rilevato in conformità alle fasi realizzative previste in progetto:

- Inizializzazione geostatica del modello.
- Realizzazione della gradonatura, delle colonne di consolidamento e dello strato di bonifica sul piano di posa del rilevato.
- Realizzazione del rilevato (opportunamente suddivisa in 3 sotto-fasi al fine di evitare eccessivi squilibri numerici).

Si procede quindi con la seconda fase dinamica dove sono applicate le boundary conditions sopra descritte. Per l'analisi dinamica è stato scelto di usare un tempo di analisi tale da coprire la durata significativa degli accelerogrammi selezionati, con step temporale principale pari al passo di campionamento degli accelerogrammi naturali (0.01 s) e 10 sub-step; quindi il passo di calcolo è pari a 1 ms (0.001 s). Il segnale dinamico è stato assegnato al bordo inferiore del modello tramite il "line prescribed displacement" a cui è stata imposta la storia in termini di accelerazione. I punti di controllo a cui si riferiscono i risultati sono situati in corrispondenza della sommità del rilevato (A in mezzeria, B in prossimità del ciglio superiore), lungo la scarpata di valle del rilevato (punto C), in prossimità del ciglio inferiore del rilevato (punto D) e nel p.c. di valle (punto E). In Figura 10 sono mostrati i punti di controllo numerico scelti per capire quanto e dove il segnale viene amplificato.

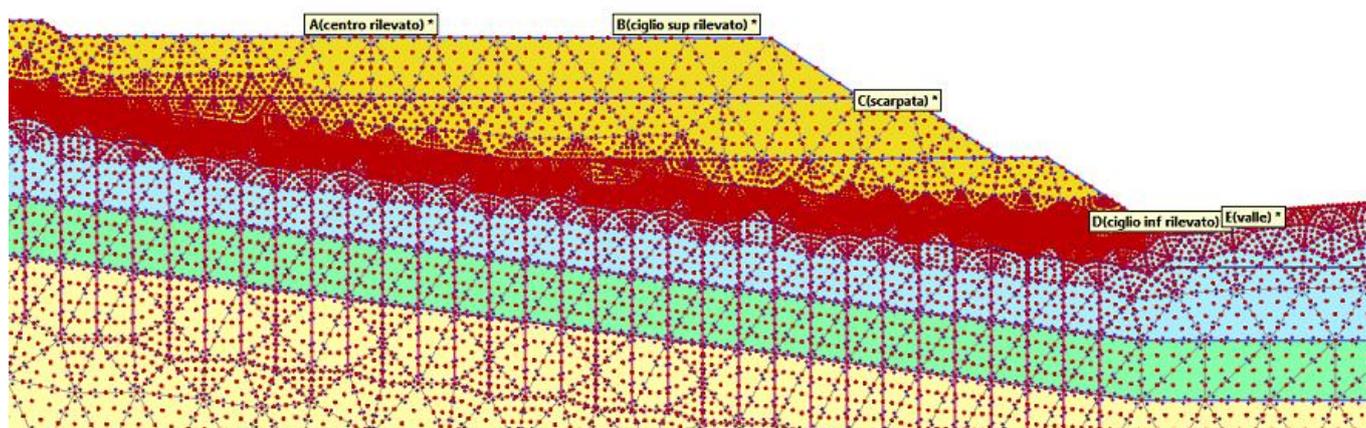


Figura 10 – Mesh di calcolo con posizione dei punti di controllo numerico

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 11) 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 12):

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

dove:

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

σ'_{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 σ'_{min} ;

- il modulo di rigidità Eur per percorsi tensionali di scarico-ricarico funzione della tensione di confinamento applicata (Figura 12):

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

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

Dove:

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

σ'_{min} è la tensione efficace principale minore,

E_{urref} 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_{ur} è il modulo di rigidità secante alla tensione σ'_{min} ;

- la rigidità secante a taglio G funzione dell'ampiezza della deformazione a taglio γ (Figura 13) e della tensione di confinamento applicata:

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

dove:

G_0 è la rigidità 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:

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

$$\gamma_{07} = 1 / (9 \cdot G_{0ref}) \cdot [(2c'(1 + \cos(2\varphi')) - \sigma'_1(1 + Ko) \sin(2\varphi'))]$$

dove:

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

σ'_{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 σ'_{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.

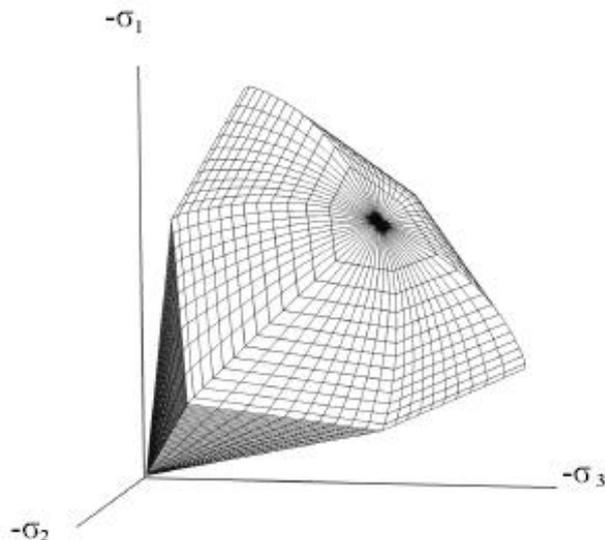


Figura 11. Superficie di snervamento chiusa (Hardening Soil model)

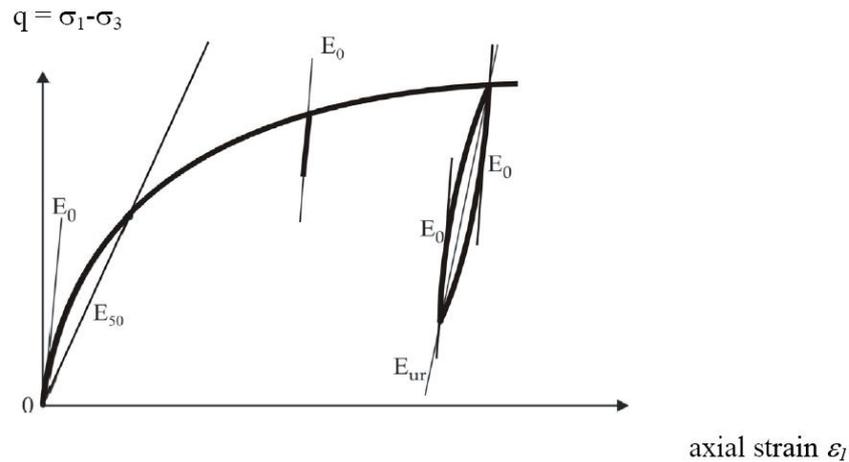


Figura 12. Definizione di E0, E50 e Eur nel modello costitutivo “HSSmall”

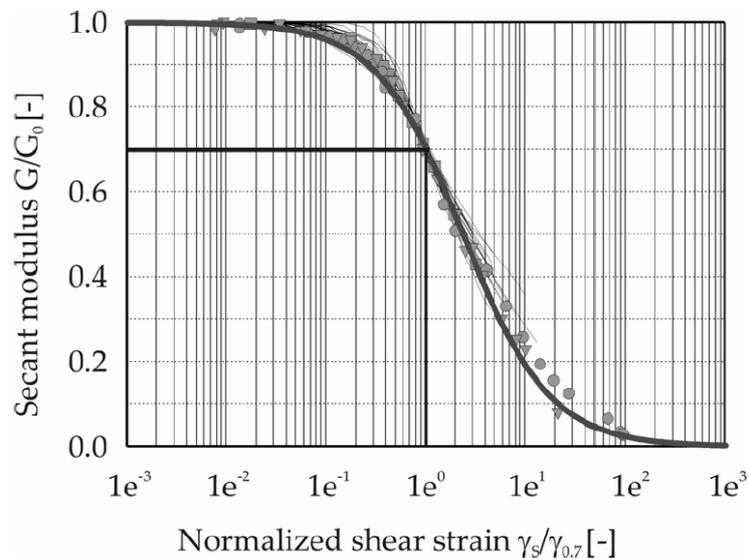


Figura 13. Riduzione del modulo G0 in funzione di γ

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 14.

La rigidità 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 (γ_c) (area verde e blu)

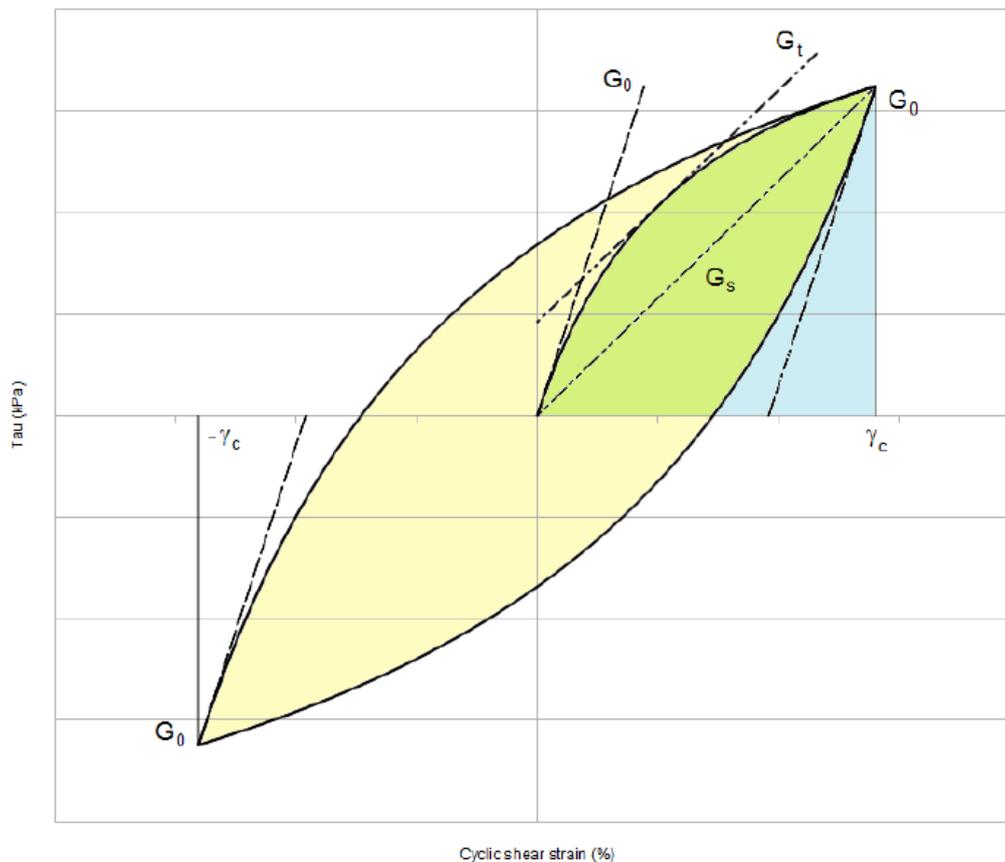


Figura 14. Comportamento di isteresi nel HS small model

Il decadimento del modulo di taglio con lo sforzo è mostrato in Figura 15 e Figura 13.

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

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

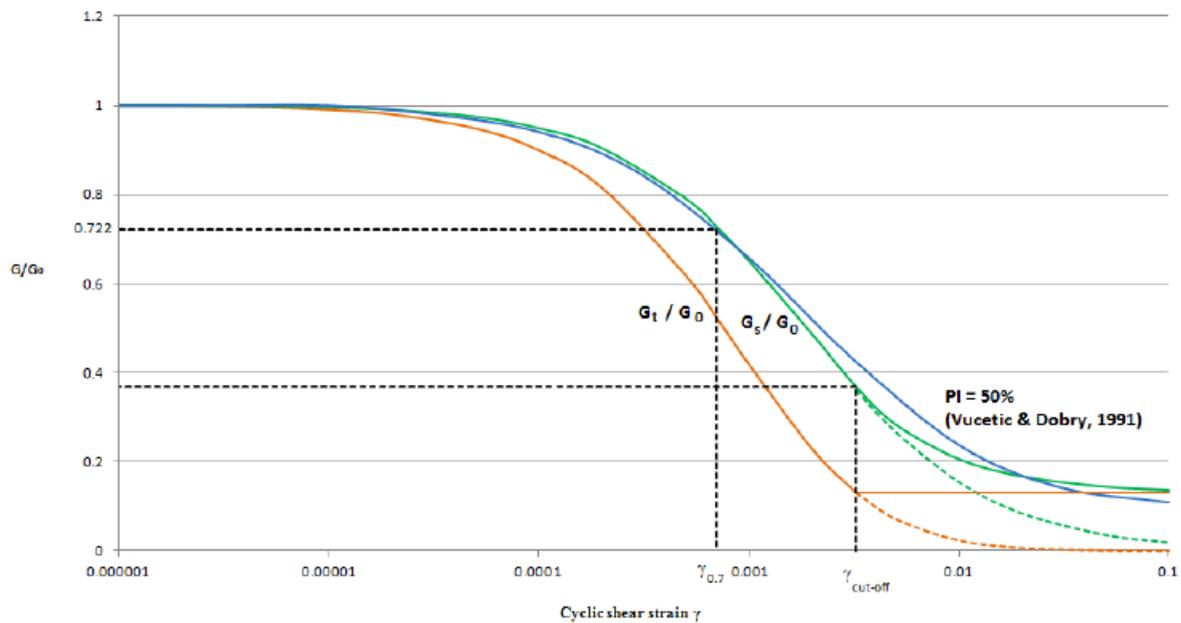


Figura 15. Curva di riduzione del modulo G

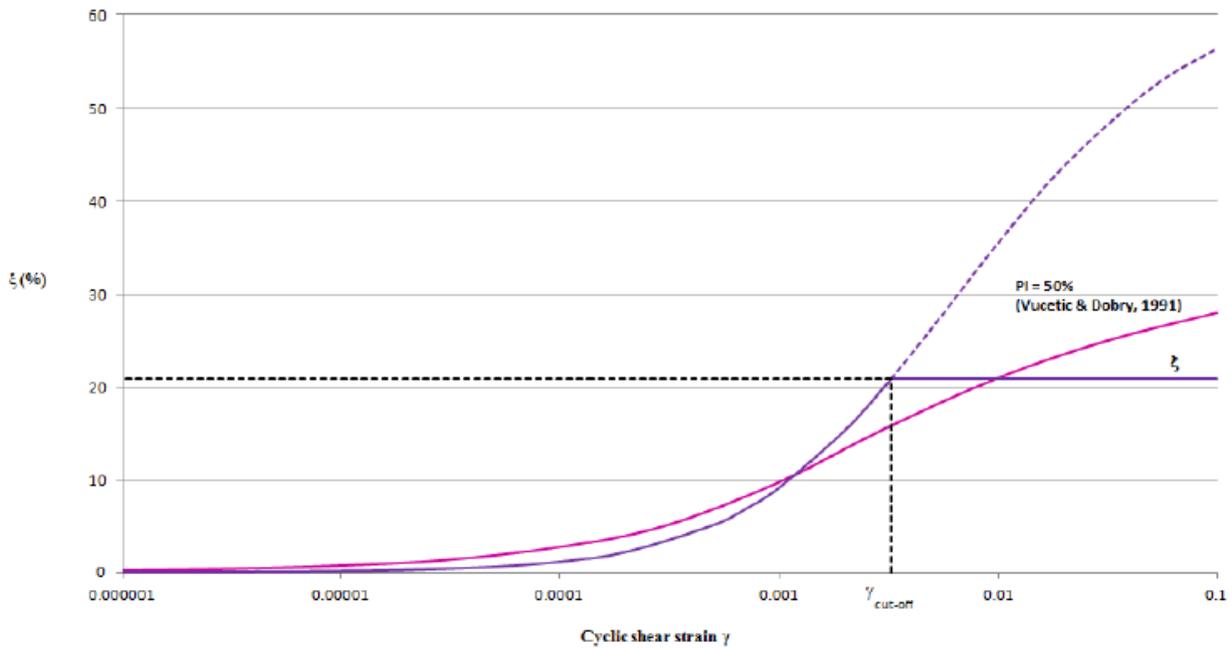


Figura 16. Curva di damping

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 (α , β). Per calibrare questi due coefficienti, è necessario definire un target del rapporto di smorzamento (ξ) 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 17*).

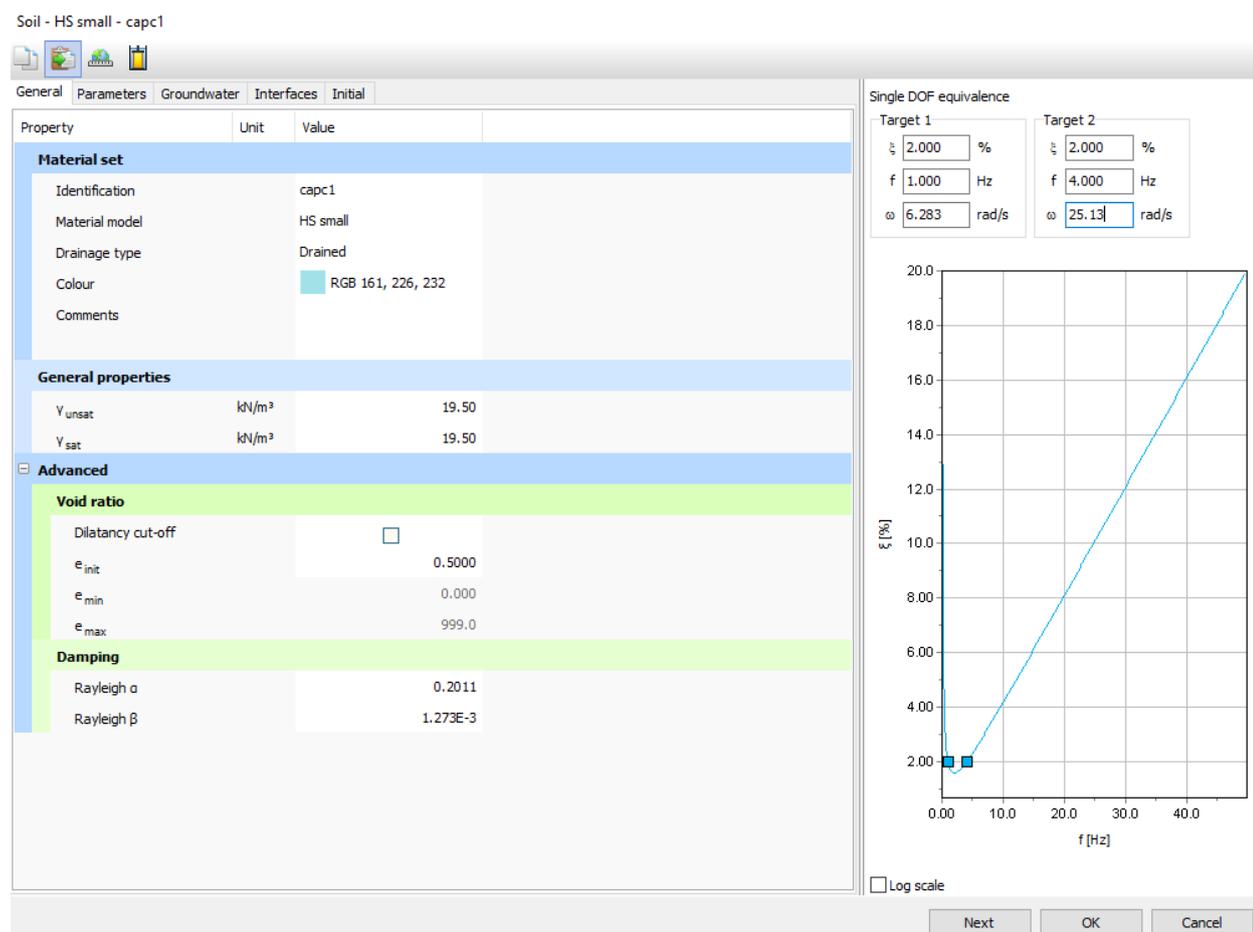


Figura 17. Coefficienti di Rayleigh damping

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 , γ_{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 18: 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 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 γ_{07} , è tarata in modo da riprodurre le curve di letteratura per il livello di plasticità determinato dalle indagini (cfr. Figura 19).

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.
γ	19.5	19.5	21.0	21.0	kN/m3
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	[-]

Lo stesso legame costitutivo HSS_{small} è stato utilizzato per il corpo del rilevato, $E_o = 500$ MPa ($G_o = 192$ MPa), $E_{50} = 50$ MPa, $E_{ur} = 150$ MPa, $m = 0$ (modulo costante con la profondità), e $\gamma_{0.7} = 0.001$.

Velocità onde di taglio da prova MASW

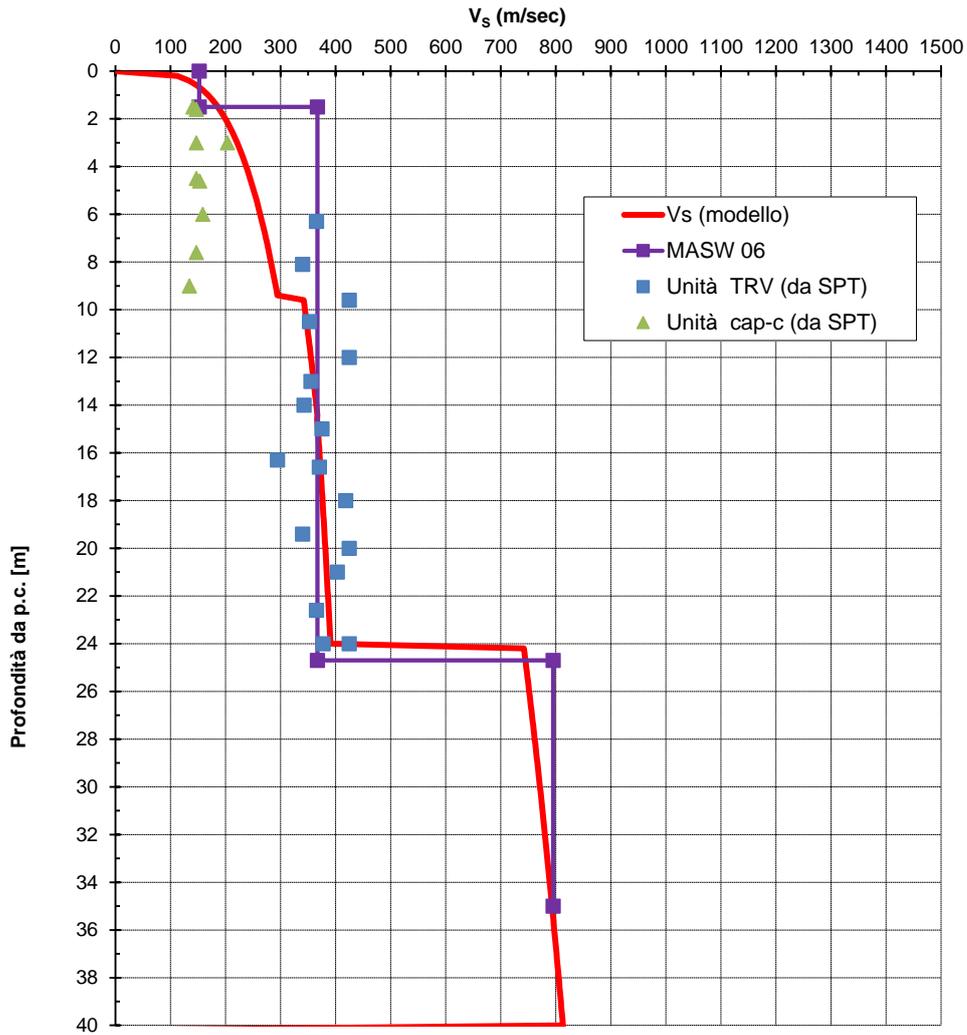


Figura 18. Velocità delle onde di taglio da prove geotecniche e legge di modello

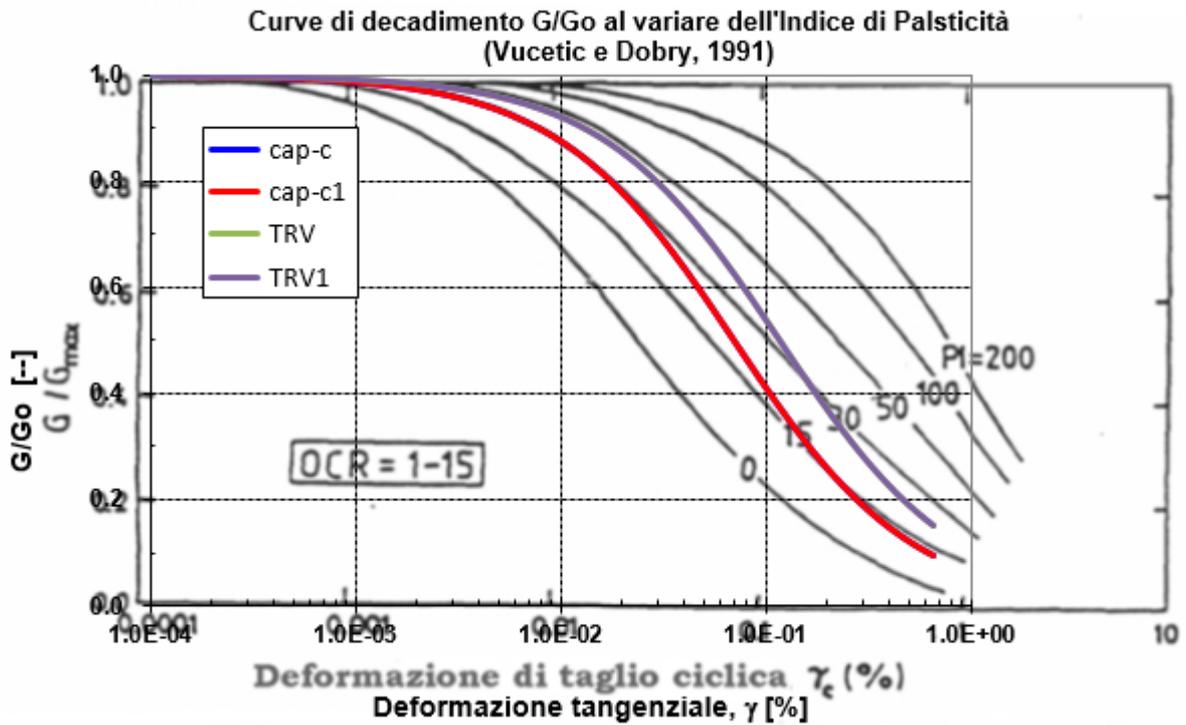


Figura 19. Riduzione del modulo di taglio con la deformazione tangenziale

6. RISULTATI

Esulano dalla presente i risultati delle fasi statiche, dettagliatamente analizzate in apposita relazione alla quale si rimanda per gli approfondimenti del caso (cfr. doc. rif. [DC4], [DC5] e [DC6]).

L'analisi dinamica è stata svolta applicando come segnali in input le tre storie accelerometriche maggiormente critiche, tra quelle spettro-compatibili che sono state selezionate nei capitoli precedenti. A partire dall'ultima fase statica drenata (ultimazione del rilevato), sono state aggiunte le fasi di calcolo dinamico con accelerogramma EQ01 (ID=290_xa_EQ_146), EQ03 (ID=350_xa_EQ_170) e EQ06 (ID=6174_xa_EQ_2029). Nel seguito si espongono e si commentano i risultati.

6.1 Accelerogramma EQ01 (ID=290_xa_EQ_146)

Tra quelli selezionati è l'accelerogramma maggiormente critico, come evidenziato anche dalle analisi RSL 1D (cfr. doc. rif. [DC3]).

Nelle seguenti figure si riportano le storie di accelerazione registrate sui vari punti significativi del rilevato e dell'intorno, separatamente per consentire un confronto con la storia di input imposta al bedrock ($a_{g,max} = 0.134$ g). Nelle stesse figure è mostrata la $PGA = 0.235$ g determinata mediante le analisi di RSL 1D (cfr. doc. rif. [DC3]), che risulta essere in accordo con i valori di accelerazione massima ottenuti mediante le analisi 2D. Il punto A, ubicato al centro del rilevato, subisce un'amplificazione di 1.80 volte rispetto al bedrock (Figura 20). In Figura 24 si confrontano i due punti posti ai limiti della scarpata di valle del rilevato: ciglio superiore (punto B) e ciglio inferiore (punto D). Il ciglio superiore subisce un'amplificazione leggermente superiore pari a 1.84 volte, mentre per il ciglio inferiore l'amplificazione si riduce a 1.31 volte. Il punto collocato sul p.c. di valle a circa 5 m dal rilevato, subisce un'amplificazione di 1.41 volte rispetto al segnale registrato al bedrock. Questo risultato è qualitativamente noto in letteratura ed evidenzia una focalizzazione delle onde in corrispondenza della cresta dei rilievi (punto di massima amplificazione) che si attenuano gradualmente lungo la scarpata fino a raggiungere un minimo in prossimità del piede inferiore (dove si può osservare anche una riduzione rispetto al p.c. circostante).

Trattandosi di un'analisi 2d, tali amplificazioni sono da considerarsi inclusive sia del contributo stratigrafico che di quello topografico. La media dei valori di amplificazione ottenuti numericamente sono in buon accordo con il coefficiente $S_s = 1.49$ che si ottiene con il metodo semplificato di normativa per suolo di tipo C.

Nella Figura 23 sono riportati gli spettri pseudo-accelerazione elastici risultanti dall'analisi 2d eseguita. Per confronto in figura è anche inserito lo spettro elastico di normativa per suolo di tipo C, e quello normalizzato ottenuto dalle analisi di risposta sismica locale 1d (cfr. doc. rif. [DC3]).

Le analisi 2d confermano che per periodi maggiori di 0.4-0.5 sec, lo spettro derivante dalle analisi è in buon accordo con quello di normativa, e generalmente cautelativo. Invece per periodi inferiori (che includono le frequenze propria del sito, 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.

Lo spettro normalizzato ottenuto dalle analisi numeriche 1d è sicuramente cautelativo e viene pertanto confermato come spettro di riferimento per il progetto.

Nella seguente Figura 24 è riportato l'andamento degli spostamenti dei punti di monitoraggio durante l'evento sismico. Il risultato è stato troncato dopo i primi 20 secondi (fase strong-motion), per eliminare la deriva di spostamenti dovuta agli errori di misura propri del record accelerometrico. Gli spostamenti massimi dovuti allo scuotimento sismico sono dell'ordine di 6-7 cm, senza variazioni sostanziali tra i diversi punti di controllo (sommità rilevato, scarpata, piede e p.c. di valle).

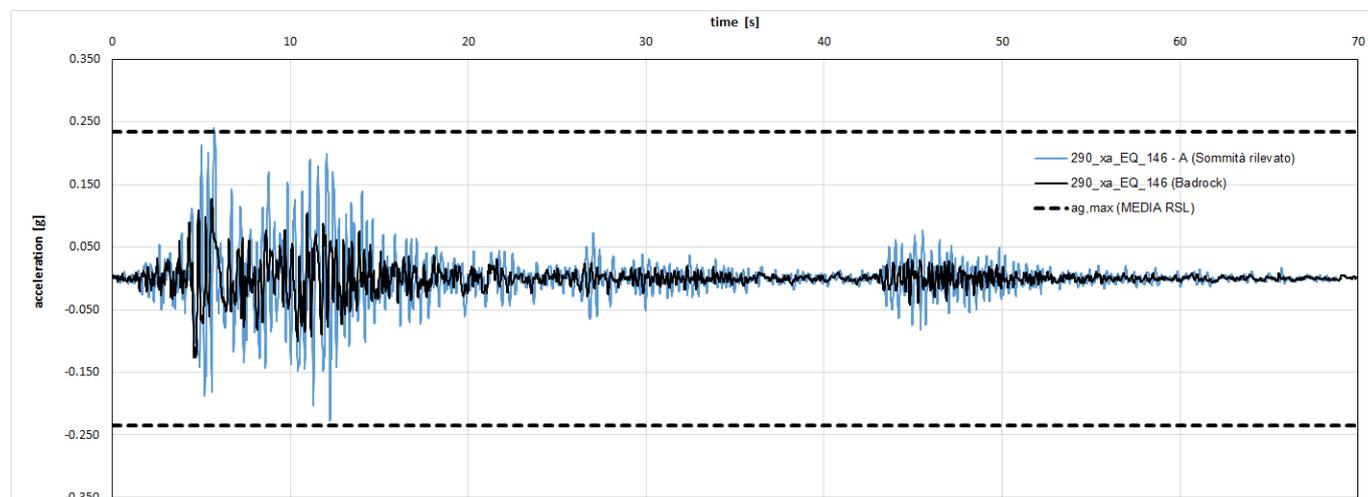


Figura 20. EQ01. Accelerogramma al bed-rock e al centro sommità rilevato (A)

FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	37 di 46

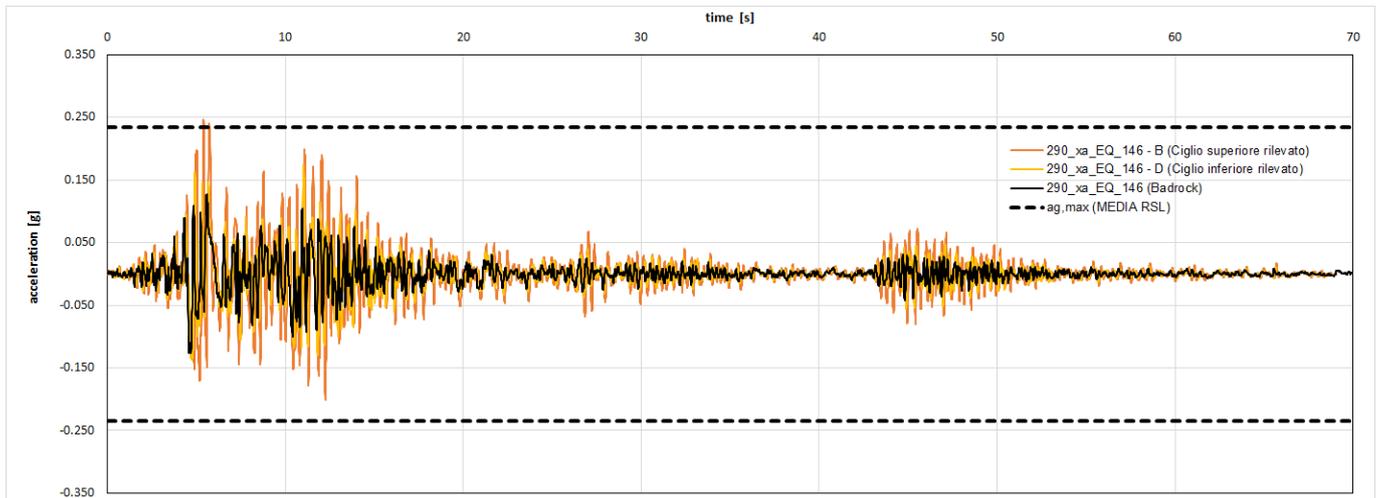


Figura 21. EQ01. Accelerogramma al bed-rock, ciglio superiore (B) e ciglio inferiore (D)

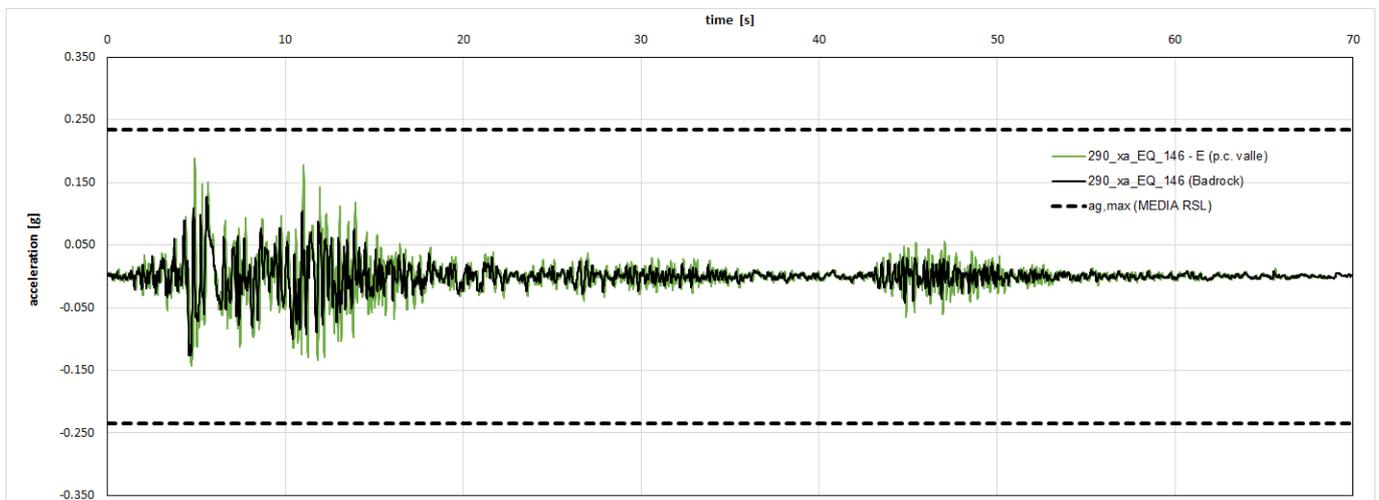


Figura 22. EQ01. Accelerogramma al bed-rock e p.c. di valle (E)

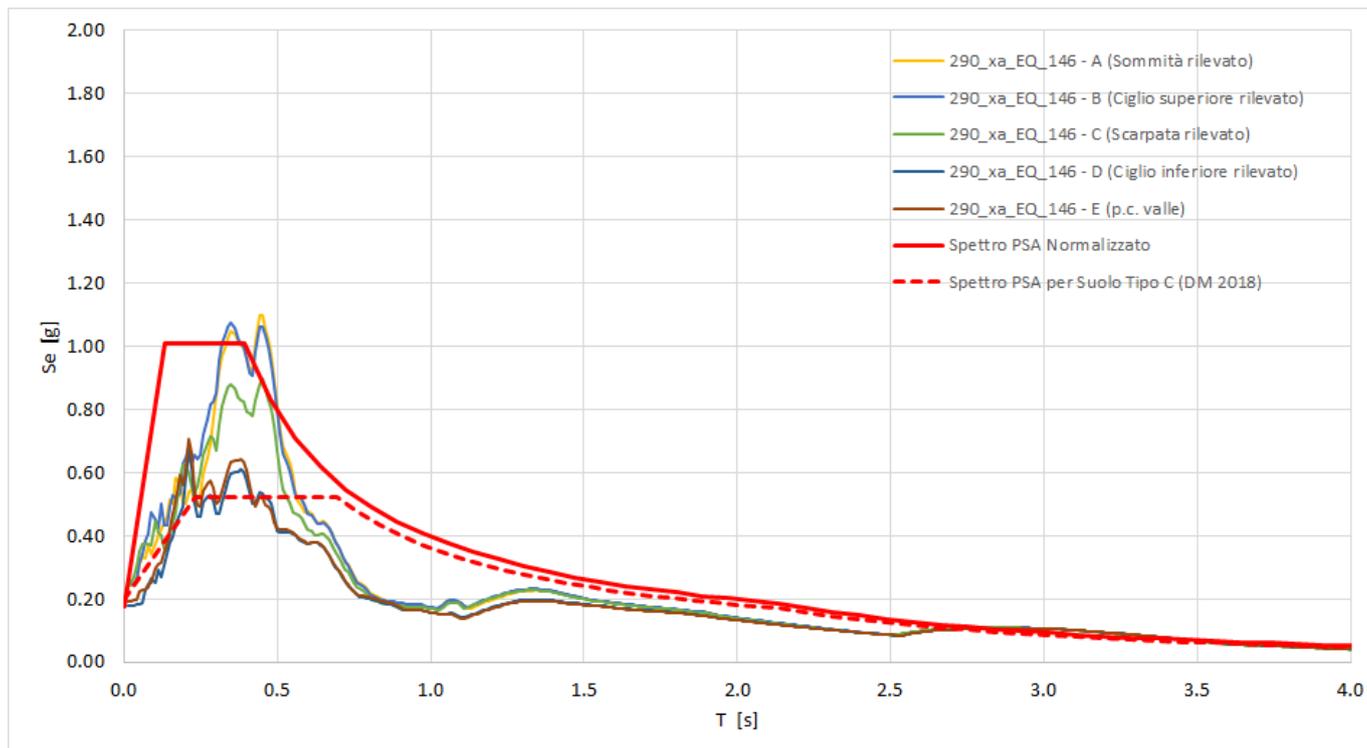


Figura 23. EQ01. Spettri elastici PSA al centro sup. rilevato (A), ciglio sup. (B), ciglio inf. (D) e p.c. di valle (E)

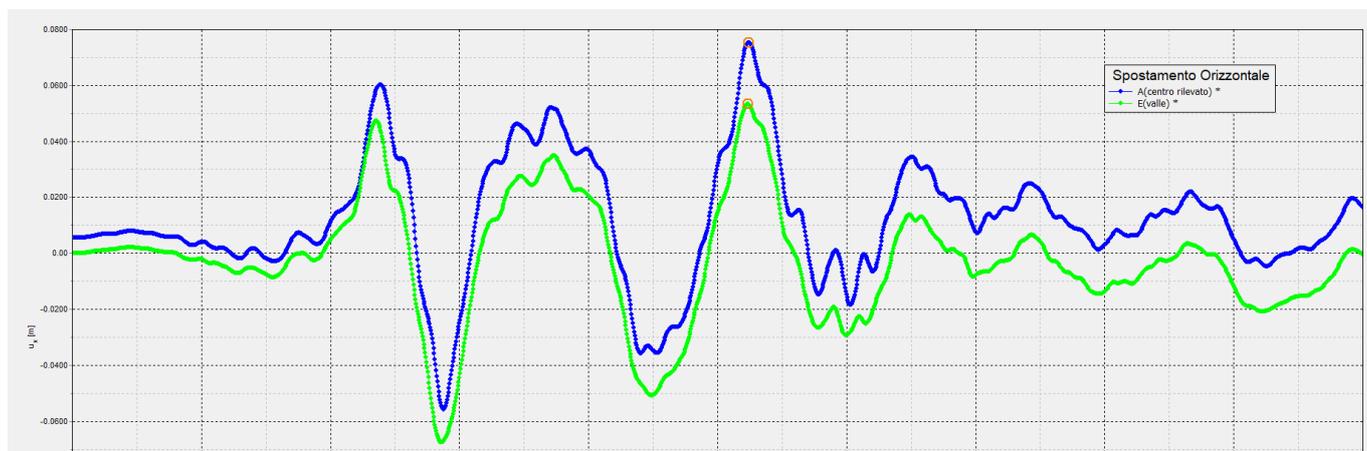


Figura 24. EQ01. Storie di spostamento al centro superiore rilevato (A) e p.c. di valle (E)



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

FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	39 di 46

6.2 Accelerogramma EQ03 (ID=350_xa_EQ_170)

Nelle seguenti figure si riportano le storie di accelerazione registrate sui vari punti significativi del rilevato e dell'intorno, separatamente per consentire un confronto con la storia di input imposta al bedrock ($a_{g,max} = 0.134$ g). Nelle stesse figure è mostrata la $PGA = 0.235$ g determinata mediante le analisi di RSL 1D (cfr. doc. rif. [DC3]), che risulta essere di poco superiore ai valori di accelerazione massima ottenuti mediante le analisi 2D ($PGA = 0.203$ g, punto A).

In questo caso non si osserva una amplificazione topografica sulla sommità del rilevato. I vari punti hanno amplificazioni assimilabili di 1.4-1.6 volte rispetto al bedrock (vedasi Figura 25, Figura 26 e Figura 27).

Trattandosi di un'analisi 2d, tali amplificazioni sono da considerarsi inclusive sia del contributo stratigrafico che di quello topografico, quest'ultimo di entità trascurabile considerando l'omogeneità di risposta dei vari punti. La media dei valori di amplificazione ottenuti numericamente sono in buon accordo con il coefficiente $S_s = 1.49$ che si ottiene con il metodo semplificato di normativa per suolo di tipo C ($S_T = 1.0$).

Nella Figura 28 sono riportati gli spettri pseudo-accelerazione elastici risultanti dall'analisi 2d eseguita. Per confronto in figura è anche inserito lo spettro elastico di normativa per suolo di tipo C, e quello normalizzato ottenuto dalle analisi di risposta sismica locale 1d (cfr. doc. rif. [DC3]).

Le analisi 2d confermano che per periodi maggiori di 0.4-0.5 sec, lo spettro derivante dalle analisi è in buon accordo con quello di normativa, e generalmente cautelativo. Invece per periodi inferiori (che includono le frequenze propria del sito, 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.

Lo spettro normalizzato ottenuto dalle analisi numeriche 1d è sicuramente cautelativo e viene pertanto confermato come spettro di riferimento per il progetto.

Nella seguente Figura 24 è riportato l'andamento degli spostamenti dei punti di monitoraggio durante l'evento sismico. Il risultato è stato troncato dopo i primi 15 secondi (fase strong-motion), per eliminare la deriva di spostamenti dovuta agli errori di misura propri del record accelerometrico. Gli spostamenti massimi dovuti allo scuotimento sismico sono dell'ordine di 2-3 cm, con differenze contenute di circa 0.5 cm tra la sommità e la base del rilevato.

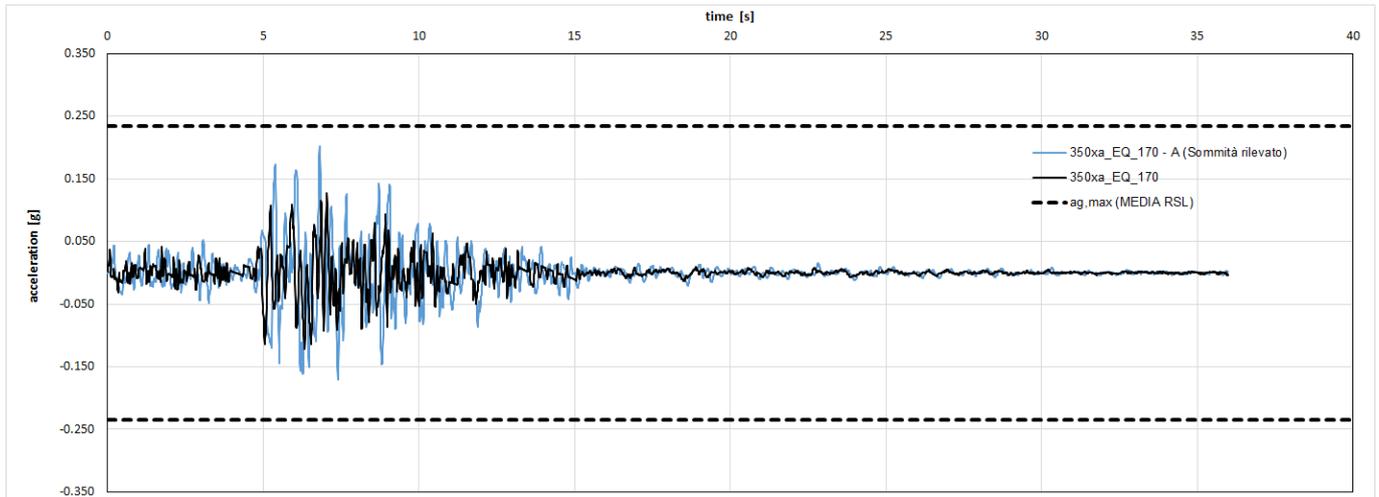


Figura 25. EQ03. Accelerogramma al bed-rock e al centro sommità rilevato (A)

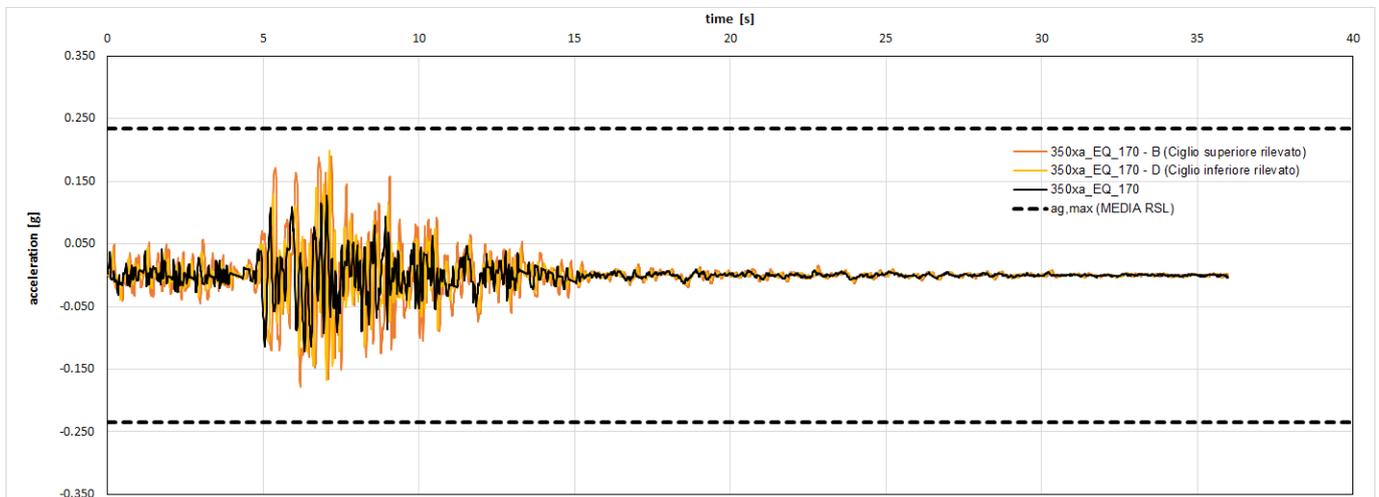


Figura 26. EQ03. Accelerogramma al bed-rock, ciglio superiore (B) e ciglio inferiore (D)

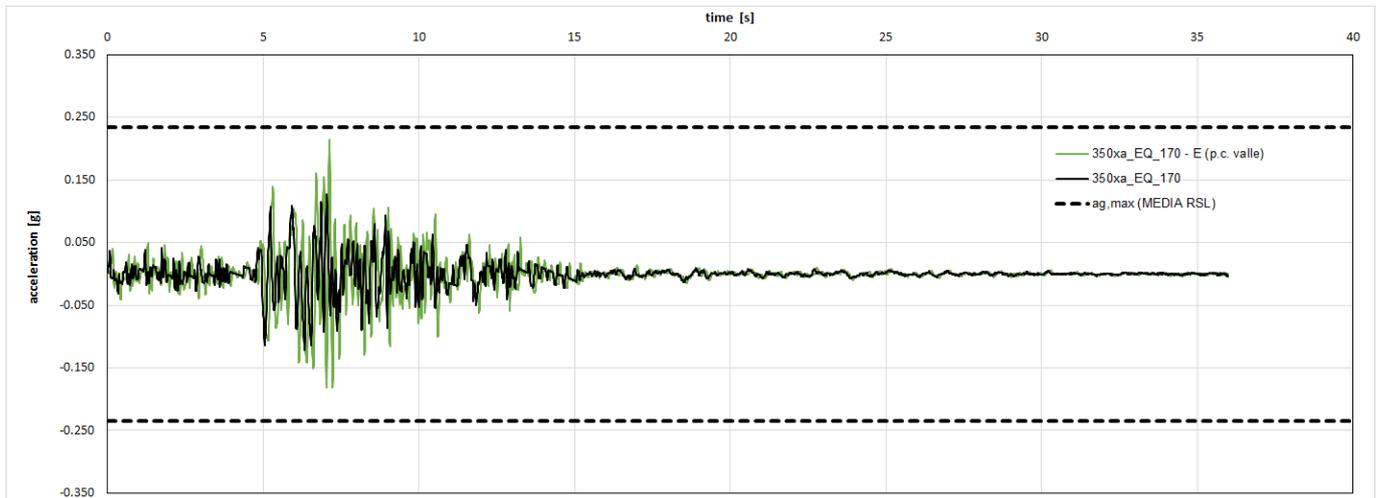


Figura 27. EQ03. Accelerogramma al bed-rock e p.c. di valle (E)

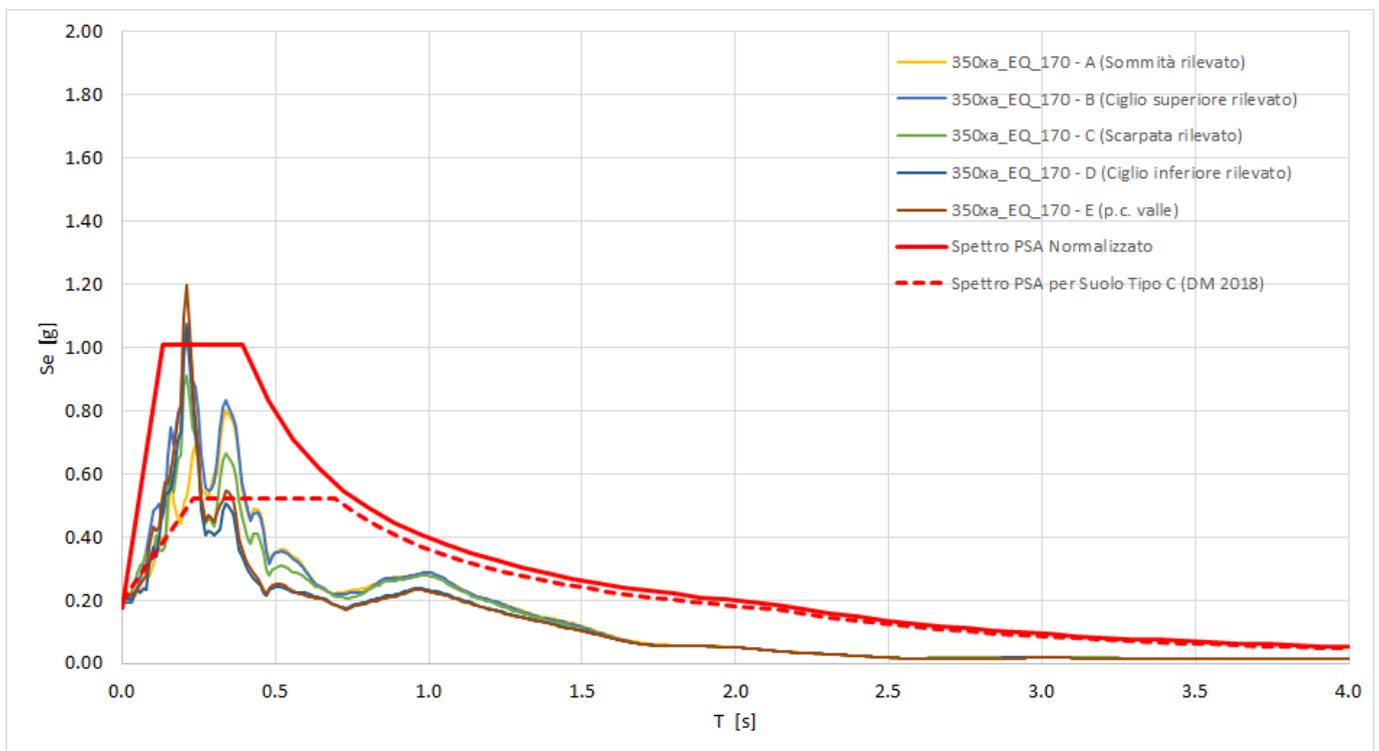


Figura 28. EQ03. Spettri elastici PSA al centro sup. rilevato (A), ciglio sup. (B), ciglio inf. (D) e p.c. di valle (D)

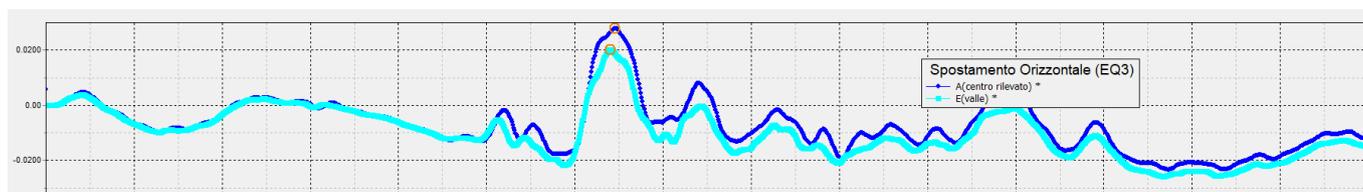


Figura 29. EQ03. Storie di spostamento al centro superiore rilevato (A) e p.c. di valle (E)

6.3 Accelerogramma EQ06 (ID=6174_xa_EQ_2029)

Nelle seguenti figure si riportano le storie di accelerazione registrate sui vari punti significativi del rilevato e dell'intorno, separatamente per consentire un confronto con la storia di input imposta al bedrock ($a_{g,max} = 0.134 \text{ g}$). Nelle stesse figure è mostrata la $PGA = 0.235 \text{ g}$ determinata mediante le analisi di RSL 1D (cfr. doc. rif. [DC3]), che risulta essere di poco superiore ai valori di accelerazione massima ottenuti mediante le analisi 2D ($PGA = 0.211 \text{ g}$, punto A).

Il punto A, ubicato al centro del rilevato, subisce un'amplificazione di 1.58 volte rispetto al bedrock (Figura 30). In Figura 31 si confrontano i due punti posti ai limiti della scarpata di valle del rilevato: ciglio superiore (punto B) e ciglio inferiore (punto D). Il ciglio superiore subisce un'amplificazione superiore pari a 1.65 volte, mentre per il ciglio inferiore l'amplificazione si riduce a 1.04 volte. Il punto collocato sul p.c. di valle a circa 5 m dal rilevato, subisce un'amplificazione di 1.08 volte rispetto al segnale registrato al bedrock.

Questo risultato è qualitativamente noto in letteratura ed evidenzia una focalizzazione delle onde in corrispondenza della cresta dei rilievi (punto di massima amplificazione sulla cuspide del ciglio) che si attenuano gradualmente lungo la scarpata fino a raggiungere un minimo in prossimità del piede inferiore (dove si può osservare anche una riduzione rispetto al p.c. circostante).

Trattandosi di un'analisi 2d, tali amplificazioni sono da considerarsi inclusive sia del contributo stratigrafico che di quello topografico. La media dei valori di amplificazione ottenuti numericamente sono in buon accordo con il coefficiente $S_s = 1.49$ che si ottiene con il metodo semplificato di normativa per suolo di tipo C ($S_T = 1.0$).

Nella Figura 33 sono riportati gli spettri pseudo-accelerazione elastici risultanti dall'analisi 2d eseguita. Per confronto in figura è anche inserito lo spettro elastico di normativa per suolo di tipo C, e quello normalizzato ottenuto dalle analisi di risposta sismica locale 1d (cfr. doc. rif. [DC3]).

Le analisi 2d confermano 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 inferiori (che includono le frequenze propria del sito, 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.

Lo spettro normalizzato ottenuto dalle analisi numeriche 1d è cautelativo e può essere pertanto confermato come spettro di riferimento per il progetto.

Nella seguente Figura 34 è riportato l'andamento degli spostamenti dei punti di monitoraggio durante l'evento sismico. Gli spostamenti massimi dovuti allo scuotimento sismico sono dell'ordine di 4 cm, con differenze contenute di circa 2 cm tra la sommità e la base del rilevato.

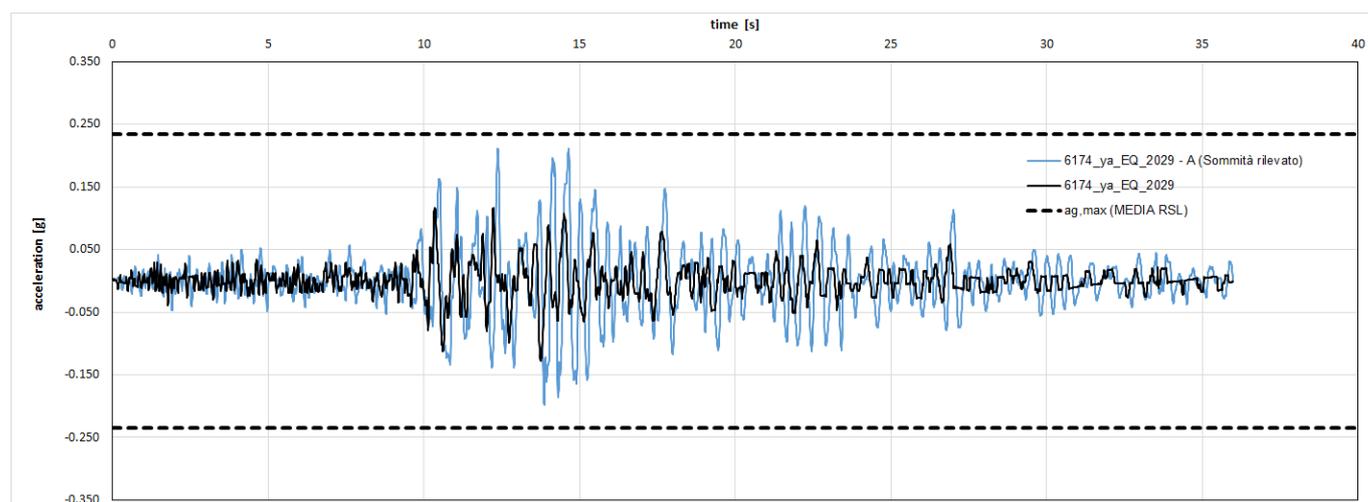


Figura 30. EQ06. Accelerogramma al bed-rock e al centro sommità rilevato (A)

FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	44 di 46

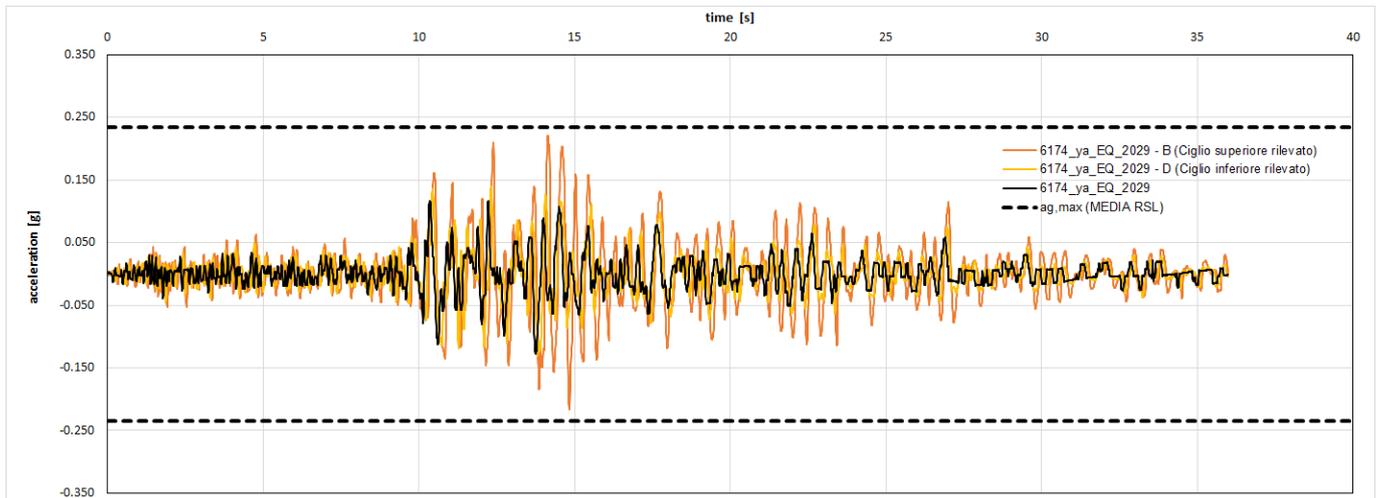


Figura 31. EQ06. Accelerogramma al bed-rock, ciglio superiore (B) e ciglio inferiore (D)

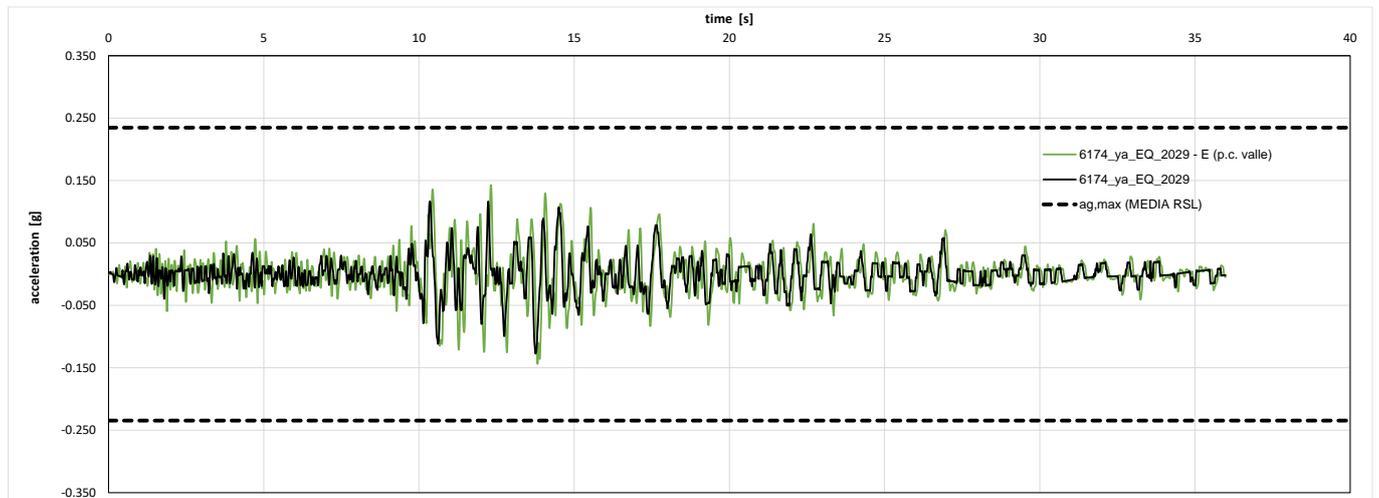


Figura 32. EQ06. Accelerogramma al bed-rock e p.c. di valle (E)

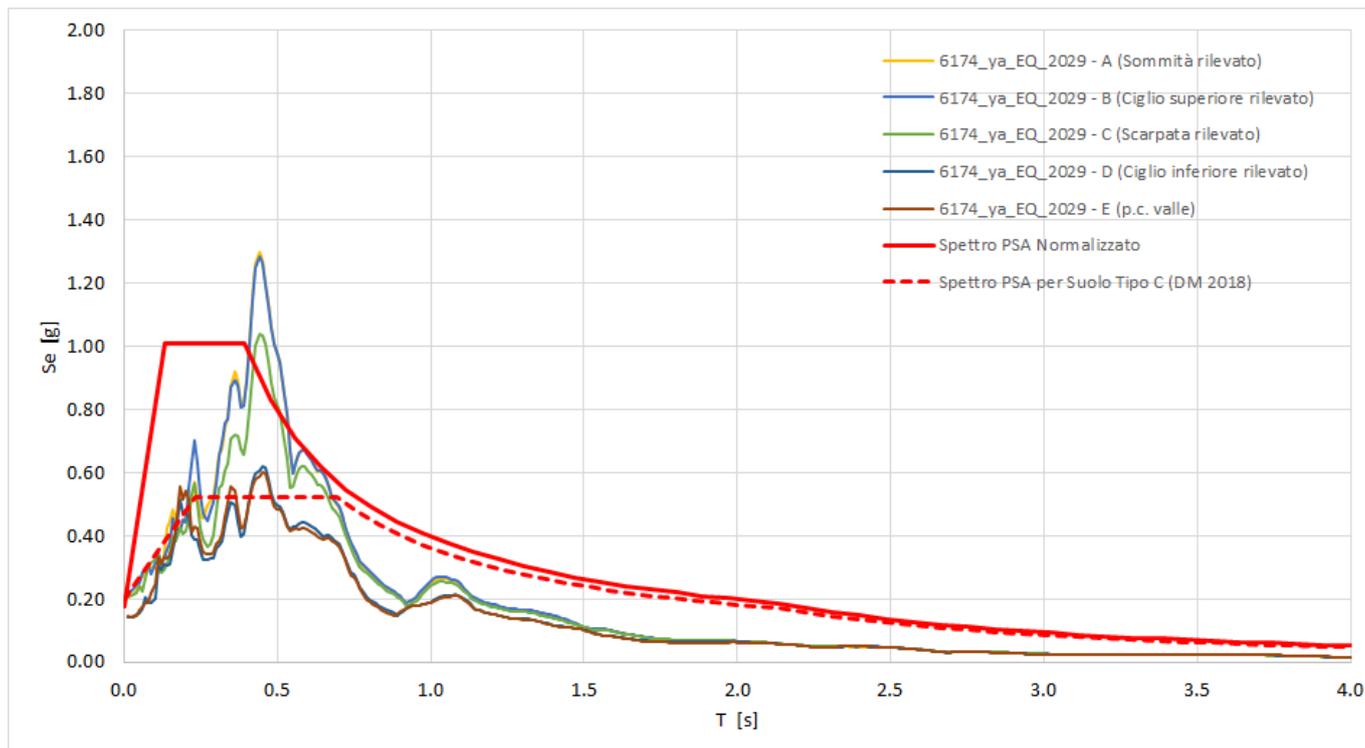


Figura 33. EQ06. Spettri elastici PSA al centro sup. rilevato (A), ciglio sup. (B), ciglio inf. (D) e p.c. di valle (E)

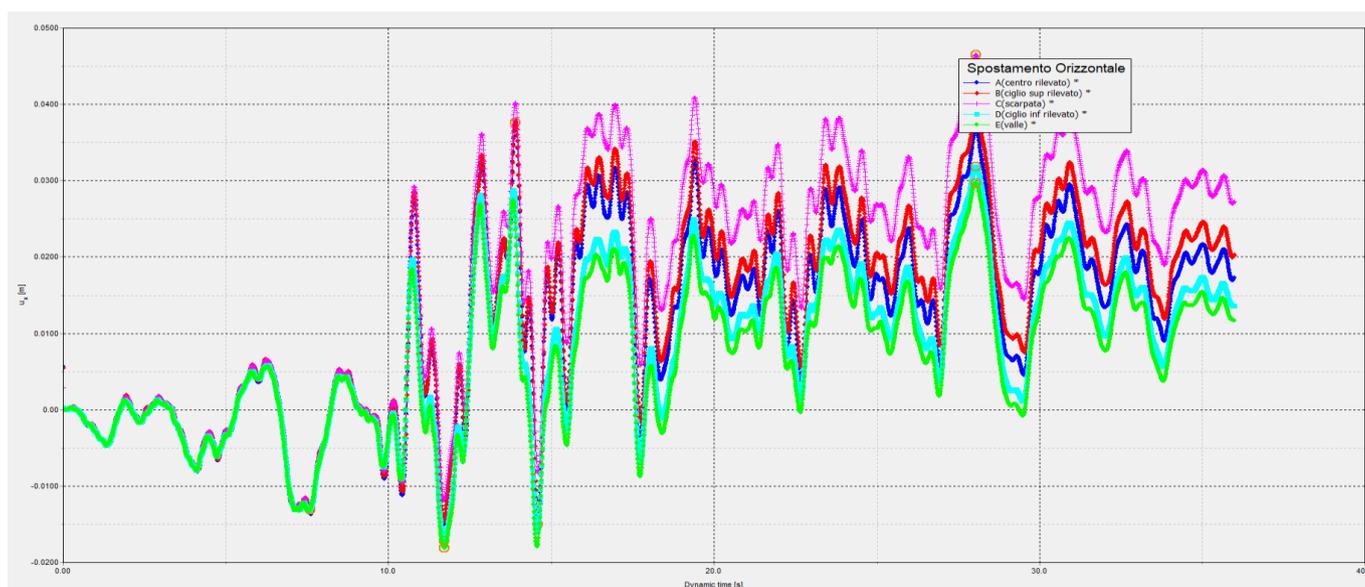


Figura 34. EQ03. Storie di spostamento al centro superiore rilevato (A) e p.c. di valle (E)



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

FV01 - RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL SITO: STUDIO DELL'AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA, MEDIANTE FEM2D SU ACCELEROGRAMMI MAGGIORMENTE CRITICI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40	D 29 RH	GE0005 013	A	46 di 46

6.4 Considerazioni finali

Le analisi RSL 2d effettuate hanno fornito risultati in buon accordo con le analisi RSL 1d (cfr. doc. rif. [DC3]). In particolare i coefficienti di amplificazione massimi in sommità al rilevato sono assimilabili ai valori massimi ottenuti dalle analisi 1d (questi valori sono anche quelli di rilevanza progettuale per le opere civili); si osservano invece amplificazioni leggermente inferiori per le zone prossime al piede del rilevato e sul p.c. di valle circostante. Analoghe considerazioni valgono anche per i risultati espressi in termini di Spettri PSA (pseudo-accelerazione). Gli spettri di progetto normalizzati, come determinati nelle analisi di RSL 1d e sopra richiamati, vengono confermati come cautelativamente rappresentativi per il progetto delle opere civili.