

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

PROGETTO DEFINITIVO

**TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3)
ELABORATI GENERALI**

RISPOSTA SISMICA LOCALE: RELAZIONE VIADOTTO V10 – Lotto 3B

SCALA:

-

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

RS3T 30 D 09 RB V11003 012 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	ATI Sintagma ROCKSOIL-Edin	Giugno 2020	G. Menghini <i>[Signature]</i>	Giugno 2020	A. Baleca <i>[Signature]</i>	Giugno 2020	Vizzizzi Giugno 2020

n. Elab: 09_224_1

ITALFERR S.p.A.
 U.O. Opere Civili e Gestione delle Varianti
 P.zza. Imp. Alpide 10/100
 Ordine degli Ingegneri della Provincia di Palermo
 N° 42018

INDICE

1.	PREMESSA	3
2.	SCOPO DEL DOCUMENTO	4
3.	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
3.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
3.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
3.3	SOFTWARE.....	6
4.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	7
4.1	STRATIGRAFIA	7
4.2	PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO	8
5.	CONDIZIONI SISMICHE	9
5.1	DEFINIZIONE DELL'ACCELERAZIONE ORIZZONTALE MASSIMA ATTESA SU SITO DI RIFERIMENTO RIGIDO (A_G)	9
5.2	ANALISI DI DISAGGREGAZIONE	10
5.3	ACCELEROGRAMMI NATURALI.....	11
6.	RISPOSTA SISMICA LOCALE	17
6.1	IL MODELLO DI TERRENO ADOTTATO	17
6.2	SOLLECITAZIONE SISMICA E MODALITÀ DI PROPAGAZIONE	17
6.3	ANALISI LINEARE EQUIVALENTE.....	17
6.4	PROGRAMMA DI CALCOLO: STRATA.....	21
6.5	RISULTATI.....	23
7.	CONCLUSIONI	25

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI						
Risposta Sismica Locale: Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RS3T	30 D 09	RB	VI 10 03 012	A	3 di 25

1. PREMESSA

All'interno del presente elaborato vengono analizzate le tematiche progettuali e gli aspetti tecnici relativi alla valutazione della risposta sismica locale necessaria alla fase di progettazione definitiva dei viadotti del nuovo collegamento Palermo-Catania della Diretrice ferroviaria Messina-Palermo-Catania, tratta Lercara – Caltanissetta Xirbi.

La tratta citata ha un'estensione di 46703.290 km, compresa tra le stazioni di Lercara Diramazione, sita al km 0+000 (coincidente con la pk 76+730 circa della linea storica Palermo Catania), e Caltanissetta Xirbi, sita al km 46+703.290 (coincidente con la pk 126+412 circa della linea storica Palermo Catania).

La tratta Lercara – Caltanissetta Xirbi si divide in due lotti funzionali:

- Lotto 3A: dal km 0+000 (coincidente con la pk 76+730 della linea storica Palermo Catania) al km 18+636
- Lotto 3B: dal km 18+636 al km 46+703.29 (coincidente con la pk 126+412 della linea storica Palermo Catania).

La presente relazione è da considerare come documento di riferimento per l'analisi di Risposta Sismica Locale del Viadotto di Linea VI10 del lotto 3B.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI						
Risposta Sismica Locale:	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	RS3T	30 D 09	RB	VI 10 03 012	A	4 di 25

2. SCOPO DEL DOCUMENTO

L'analisi di risposta sismica locale, per come dettato dalle Norme Tecniche sulle Costruzioni, è un tipo di studio approfondito che deve essere applicato qualora le costruzioni ricadano in classe d'uso III o IV, quando si riscontrano delle significative inversioni nel profilo di velocità delle onde di taglio o quando la morfologia di superficie e/o della stratigrafia non è considerata semplice. Attraverso questa metodologia si valutano le variazioni in termini di ampiezza e frequenza, che subisce il moto sismica (accelerogramma spettro-compatibile) nella sua propagazione dal substrato sismico (velocità delle onde di taglio almeno 800 m/s) fino alla superficie, a seconda delle caratteristiche fisico-meccaniche degli strati attraversati.

Le fasi per eseguire la risposta sismica locale sono le seguenti:

- Scelta dell'input sismico spettro-compatibile con quello del sito in esame, riferito ad un suolo rigido attraverso un'analisi di disaggregazione per gli stati limite richiesti (nello specifico SLV)
- Definizione della stratigrafia compresa nell'intervallo bedrock sismico-superficie e caratterizzazione fisico-meccanica
- Calcolo dell'output sismico alla superficie tramite la funzione di trasferimento e di amplificazione che tiene conto delle eventuali modificazioni del segnale di input derivanti dalle differenti caratteristiche elastiche e meccaniche degli strati attraversati nella propagazione
- Estrapolazione dei parametri dipendenti di output per la progettazione per gli stati limite richiesti (nello specifico SLV)

Il presente documento ha lo scopo di descrivere l'analisi di risposta sismica locale eseguita per il viadotto di Linea VI10 del Lotto 3B.

L'analisi è stata svolta in quanto l'indagine sismica, appositamente eseguita in corrispondenza dell'opera d'arte (MASW 3AS38, DH3AS39), ha evidenziato un'andamento delle velocità (V_s) con la profondità non sempre crescente; motivo per cui si è resa necessaria una apposita analisi di risposta sismica locale considerando le effettive condizioni geotecniche del sito oggetto di studio.

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: valutazione dell'amplificazione del segnale al piano delle fondazioni dei viadotti (-4.00m) e calcolo dei relativi spettri in pseudo-accelerazione.

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI						
Risposta Sismica Locale: Relazione Viadotto V110 – Lotto 3B	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RS3T	30 D 09	RB	VI 10 03 012	A	5 di 25

3. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

3.1 Normativa di riferimento

- [N.1]. Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17-01-2018 (NTC-2018).
- [N.2]. Specifica RFI del 21/12/11 per la progettazione geotecnica delle opere civili ferroviarie.
- [N.3]. Ordinanza n. 55 del 24 aprile 2018. Disciplina per la delocalizzazione temporanea delle attività economiche o produttive e dei servizi pubblici danneggiati dal sisma eseguiti e conclusi in data anteriore a quella di entrata in vigore del decreto legge n. 189 del 2016. Modifiche alle ordinanze n. 24 del 12 maggio 2017, n. 39 dell'8 settembre 2017 e n. 51 del 29 marzo 2018. Proroga del termine di cui all'articolo 8, comma 4, del decreto-legge 17 ottobre 2016, n. 189, convertito con modificazioni dalla legge 15 dicembre 2016, n. 229, e s.m.i. Termine per il deposito delle schede AeDES.

3.2 Documenti di riferimento

- [DC1]. RS3T 30 D78 GE GE0000 002D - Direttrice ferroviaria Messina-Catania-Palermo. Nuovo Collegamento Palermo-Catania tratta Lercara dir. - Caltanissetta Xirbi (Lotto 3). Progetto Definitivo. Elaborati generali. Relazione geotecnica generale - opere all'aperto - Lotto 3B
- [DC2]. RS3T 30 D78 GE GE0000 006D - Direttrice ferroviaria Messina-Catania-Palermo. Nuovo Collegamento Palermo-Catania tratta Lercara dir. - Caltanissetta Xirbi (Lotto 3). Progetto Definitivo. Profilo geotecnico linea - Tav. 4 di 8
- [DC3]. RS3T 30 D78 GE GE0000 007D - Direttrice ferroviaria Messina-Catania-Palermo. Nuovo Collegamento Palermo-Catania tratta Lercara dir. - Caltanissetta Xirbi (Lotto 3). Progetto Definitivo. Profilo geotecnico linea - Tav. 5 di 8
- [DC4]. RS3T 30 D78 GE GE0000 008D - Direttrice ferroviaria Messina-Catania-Palermo. Nuovo Collegamento Palermo-Catania tratta Lercara dir. - Caltanissetta Xirbi (Lotto 3). Progetto Definitivo. Profilo geotecnico linea - Tav. 6 di 8
- [DC5]. RS3T 30 D78 GE GE0000 009D - Direttrice ferroviaria Messina-Catania-Palermo. Nuovo Collegamento Palermo-Catania tratta Lercara dir. - Caltanissetta Xirbi (Lotto 3). Progetto Definitivo. Profilo geotecnico linea - Tav. 7 di 8
- [DC6]. RS3T 30 D78 GE GE0000 010D - Direttrice ferroviaria Messina-Catania-Palermo. Nuovo Collegamento Palermo-Catania tratta Lercara dir. - Caltanissetta Xirbi (Lotto 3). Progetto Definitivo. Profilo geotecnico linea - Tav. 8 di 8
- [DC7]. RS3T 30 D69 IG GE0005 001A - Direttrice ferroviaria Messina-Catania-Palermo. Nuovo Collegamento Palermo-Catania tratta Lercara dir. - Caltanissetta Xirbi (Lotto 3). Progetto Definitivo. Indagini geofisiche. Prove MASW ed HVSR
- [DC8]. RS3T 30 D69 IG GE0005 002A - Direttrice ferroviaria Messina-Catania-Palermo. Nuovo Collegamento Palermo-Catania tratta Lercara dir. - Caltanissetta Xirbi (Lotto 3). Progetto Definitivo. Indagini geofisiche. Prove Down Hole

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI						
Risposta Sismica Locale:	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	RS3T	30 D 09	RB	VI 10 03 012	A	6 di 25

[DC9]. RS3T 30 D09 RB VI0003 008A - Direttrice ferroviaria Messina-Catania-Palermo. Nuovo Collegamento Palermo-Catania tratta Lercara dir. - Caltanissetta Xirbi (Lotto 3). Progetto Definitivo. Risposta Sismica Locale: Relazione Generale Viadotti - Lotto 3B

3.3 Software

[ST1]. *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.

[ST2]. *STRATA*. E. Rathje & A. Kottle, University of Texas at Austin. <https://sites.google.com/site/ellenrathje/software-and-data>. Strata is distributed under the GNU General Public License v3 (<https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0-standalone.html>)

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
	TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI					
Risposta Sismica Locale: Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30 D 09	CODIFICA RB	DOCUMENTO VI 10 03 012	REV. A	FOGLIO 7 di 25

4. 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][DC2][DC3][DC4][DC5][DC6]. Per maggiori dettagli sulla caratterizzazione geotecnica si rimanda alla Relazione geotecnica generale del Lotto 3B [DC1].

4.1 Stratigrafia

L'opera in esame è ubicata tra le progressive km 22+586 e km 23+178, il viadotto ricade in un'area di fondovalle caratterizzata da depositi di natura alluvionale poggianti sulla formazione di Torrevecchia (Figura 1: Profilo stratigrafico relativo al viadotto VI).

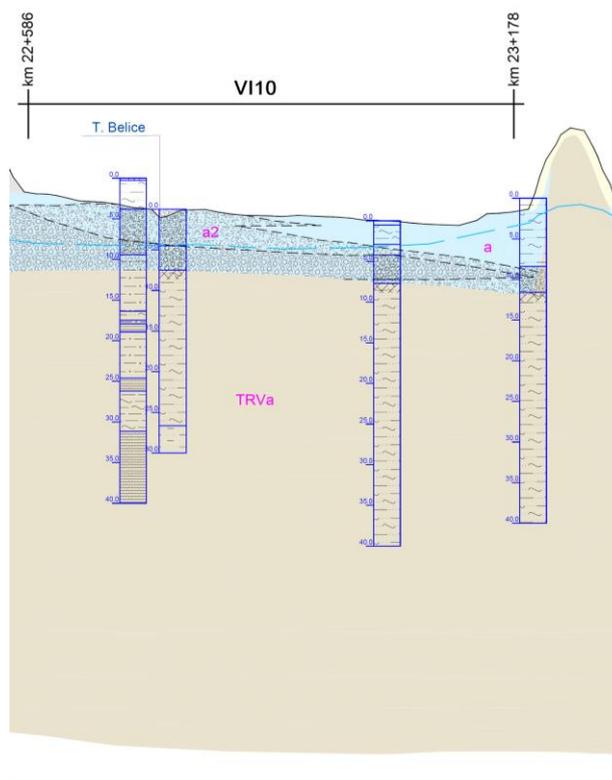


Figura 1: Profilo stratigrafico relativo al viadotto VI10

Il deposito alluvionale presente, caratterizzato da uno spessore medio di circa 7.0 m, è riconducibile ad un deposito alluvionale recente (*unità a2*) in corrispondenza della spalla sinistra, il quale spostandosi verso la spalla destra lascia sempre più spazio a depositi alluvionali antichi (*unità a*). Il deposito alluvionale si poggia sulla formazione di Torrevecchia qui identificata dal membro sabbioso–conglomeratico (*unità TRVa*) costituito da sabbie e arenarie con intercalazioni di conglomerati.

4.2 Parametri geotecnici di progetto

La Tabella 1 riassume i parametri geotecnici relativi alle unità intercettate, e la Figura 2 presenta la Masw 3AS38 ($V_{s,q} = 314$ m/s - Suolo tipo C) e la Down Hole 3AS39 ($V_{s,q} = 377$ m/s - Suolo tipo B al limite con C), che costituiscono l'indagine sismica di riferimento per il viadotto VI10, con sovrapposta la relativa stratigrafia. L'indagine evidenzia inversione delle onde di taglio, da cui discende la necessità dell'analisi di risposta sismica locale.

Tabella 1 – VI10: Parametri geotecnici unità intercettate

	γ [kN/m ³]	ϕ' [gradi]	c' [kPa]	E_o [MPa]
a2	19.5	25	25	70 ÷ 3000
a	20.0	30	0	50
TRV	21.0	25	33	100 ÷ 3000

Dove:
 γ = peso di volume naturale
 ϕ' = angolo di attrito di picco
 c' = coesione
 E_o = modulo di deformazione dinamico

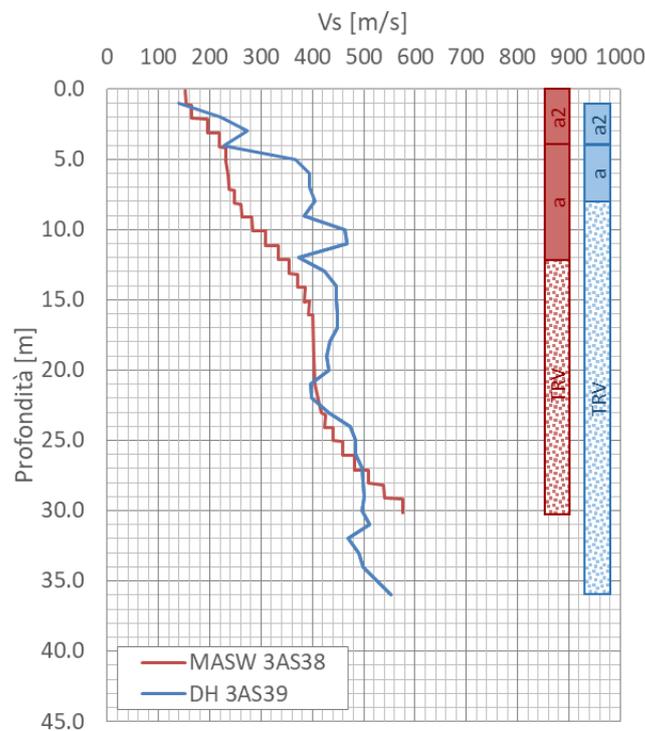


Figura 2 – Prova sismica in foro eseguita per il viadotto VI10 con relativa stratigrafia: MASW 3AS38 ($V_{s,q} = 314$ m/s - Suolo tipo C) e la DOWN HOLE 3AS39 ($V_{s,q} = 377$ m/s - Suolo tipo B al limite con C)

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI					
	Risposta Sismica Locale: Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30 D 09	CODIFICA RB	DOCUMENTO VI 10 03 012	REV. A

5. CONDIZIONI SISMICHE

5.1 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).

Il sito ricade nel Comune di Villalba ed in base alle coordinate geografiche del viadotto si prenderà a riferimento il punto del grigliato 47181 (Figura 3), da cui si estrapola per lo stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) lo spettro di risposta rappresentativo della componente orizzontale delle azioni sismiche di progetto per lo specifico sito, per una classe di sottosuolo A, categoria topografica T₁, V_N = 75 anni e C_U di tipo III, rappresentato in, in cui sono riassunti anche i parametri caratterizzanti lo spettro stesso.

FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE

LATITUDINE

Ricerca per comune

REGIONE

PROVINCIA

COMUNE

Elaborazioni grafiche

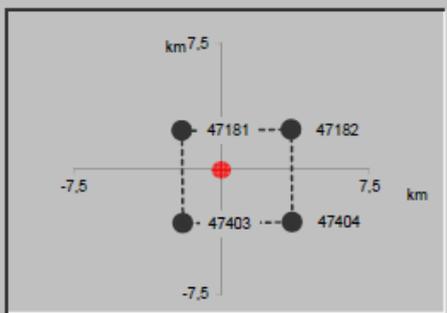
Grafici spettri di risposta →

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

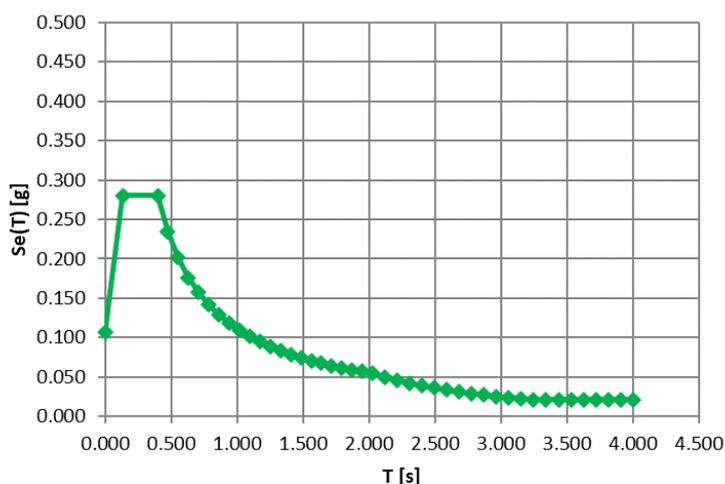
La "Ricerca per comune" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

Figura 3 - individuazione della pericolosità sismica del sito

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI					
	Risposta Sismica Locale: Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30 D 09	CODIFICA RB	DOCUMENTO VI 10 03 012	REV. A

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_C^* [s]
SLO	68	0,044	2,466	0,282
SLD	113	0,053	2,488	0,306
SLV	1068	0,106	2,636	0,395
SLC	2193	0,128	2,687	0,421



Parametri Indipendenti

STATO LIMITE SLV

a_g	0.106 g
F_o	2.636
T_C^*	0.395 s
S_S	1.000
C_C	1.000
S_T	1.000
q	1.000

Parametri Dipendenti

S	1.000
η	1.000
T_B	0.132 s
T_C	0.395 s
T_D	2.026 s

Figura 4 - VII10 Stato Limite di Salvaguardia della Vita: Spettro di risposta elastico in accelerazione, classe di sottosuolo A, categoria topografica T_1 , $V_N = 75$ anni e C_U di tipo III (NTC 2018)

5.2 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 P_{VR} disponibile dalla fonte dell'INGV più simile a quella del sito, che è pari al 5%.

In Figura 5 e in Figura 6 sono riportati i principali risultati della ricerca dei dati di disaggregazione sismica da cui si evince:

- Magnitudo $M = 4.0 \div 6.0$
- Distanza dalla sorgente = $20 \div 40$ km

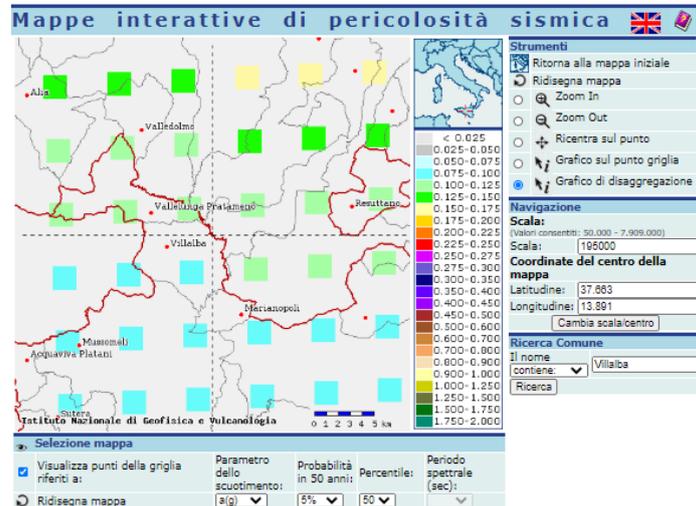


Figura 5 – VII0: Mappa di pericolosità sismica

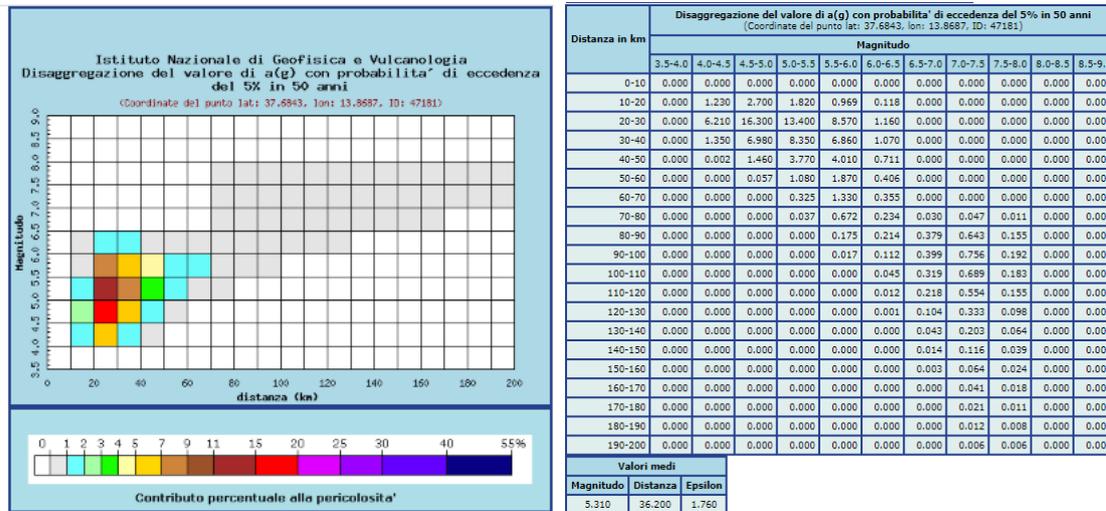


Figura 6 – VII0: Magnitudo e distanza

5.3 Accelerogrammi naturali

La ricerca degli accelerogrammi naturali compatibili con un dato spettro di riferimento viene eseguita mediante il programma REXEL con riferimento alla registrazione di dati europei “Strong Motion Data” [ST1]

Nel programma si carica tramite l’opzione “user defined spectrum”, lo spettro di normativa ricavato tramite il foglio “Spettri del Ministero” con ricerca per coordinate (Spettri-NTCver.1.0.3) ricavato per suolo rigido tipo A, e categoria topografica T_1 , imponendo la vita nominale (V_N) di 75 anni e la classe d’uso (C_U) di 1,5 (parametri relativi al VI10), opportunamente scalato per avere l’accelerazione in ms^{-2} . Si considera il solo stato limite di salvaguardia della vita (SLV). La ricerca dei dati degli accelerogrammi da considerare nelle analisi è stata fatta

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI						
Risposta Sismica Locale: Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RS3T	30 D 09	RB	VI 10 03 012	A	12 di 25

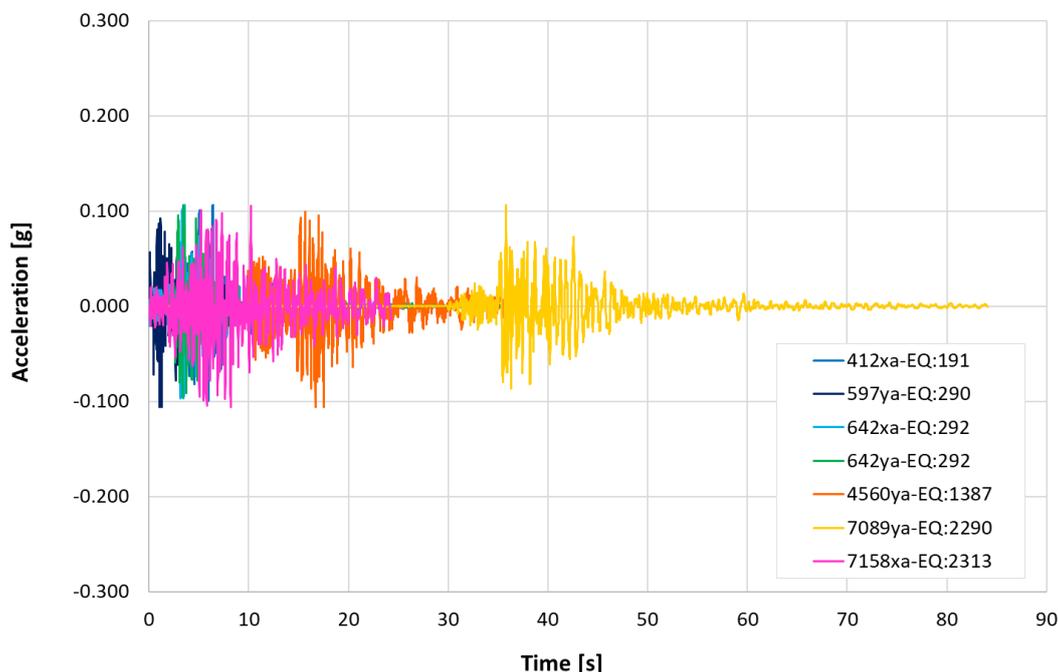
considerando una magnitudo e distanza da sorgente, in relazione alle risultanze dell'analisi dei dati di disaggregazione.

Gli accelerogrammi naturali così individuati ed i relativi dati identificativi sono sintetizzati in un'unica rappresentazione (Figura 7), per agevolarne il confronto, e singolarmente da Figura 8 a Figura 14:

- sono in numero di n.7 su suolo di tipo A e categoria topografica T₁
- sono scalati con un fattore scala medio 4.9475
- 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.

In Figura 15 sono mostrati gli spettri relativi agli accelerogrammi naturali selezionati. Nella legenda del grafico per ogni spettro, relativo ad un accelerogramma specifico, è indicato il corrispondente fattore di scala. Inoltre si precisa che: *Target Spectrum* è lo spettro di normativa, *Lower Tollerance* è -10% rispetto allo spettro di normativa, *Upper Tollerance* è +30% rispetto allo spettro di normativa e *Average Spectrum* è lo spettro medio. Tutti i dati costituiscono l'output di *Rexel*.

Accelerogrammi e spettri costituiranno i dati di input che verranno utilizzati nella successiva Analisi Lineare Equivalente



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]	EC8 Site class
642	292	ST225	Umbria Marche (aftershock)	14/10/1997	5.6	normal	23	0.524	0.618	A
4560	1387	ST727	Bovec	12/04/1998	5.6	strike slip	38	0.0802	0.097	A
7089	2290	ST557	Pasinler	10/07/2001	5.4	strike slip	32	0.1916	0.2128	A
642	292	ST225	Umbria Marche (aftershock)	14/10/1997	5.6	normal	23	0.524	0.618	A
7158	2313	ST3293	Firuzabad	20/06/1994	5.9	strike slip	39	0.2155	0.1928	A
597	290	ST222	Umbria Marche	26/09/1997	5.7	normal	24	0.2402	0.2494	A
412	191	ST161	Golbasi	06/06/1986	5.8	strike slip	34	0.1667	0.3089	A

Figura 7 - Accelerogrammi naturali

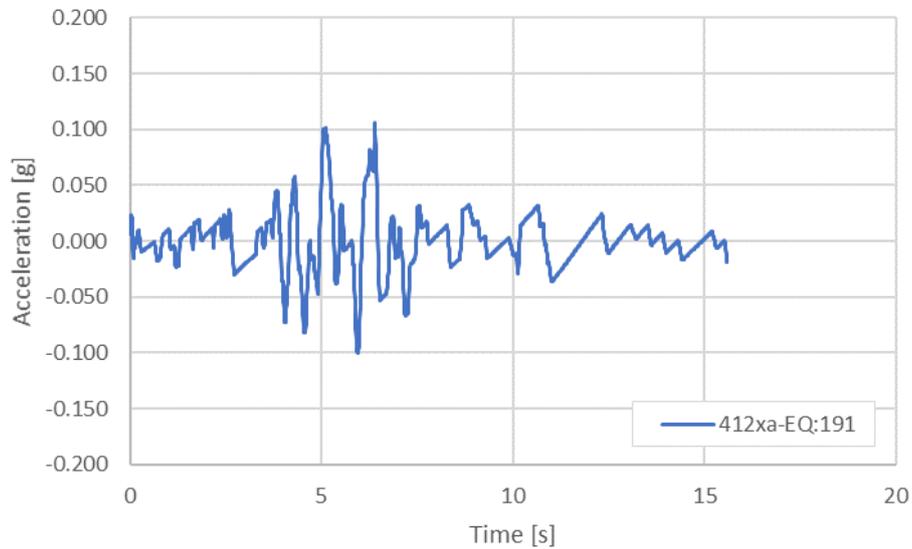


Figura 8 – Accelerogramma naturale: Waveform 412xa – Earthquake 191

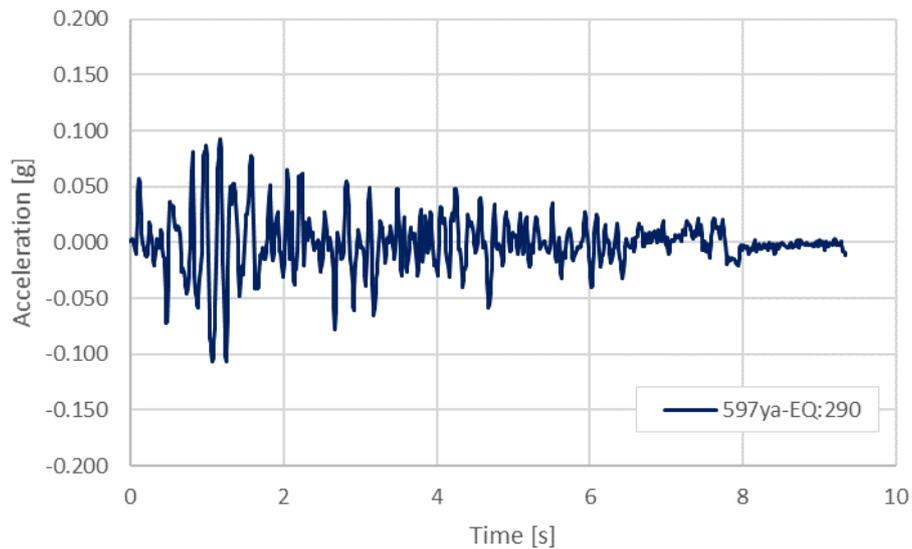


Figura 9 – Accelerogramma naturale: Waveform 597ya – Earthquake 290

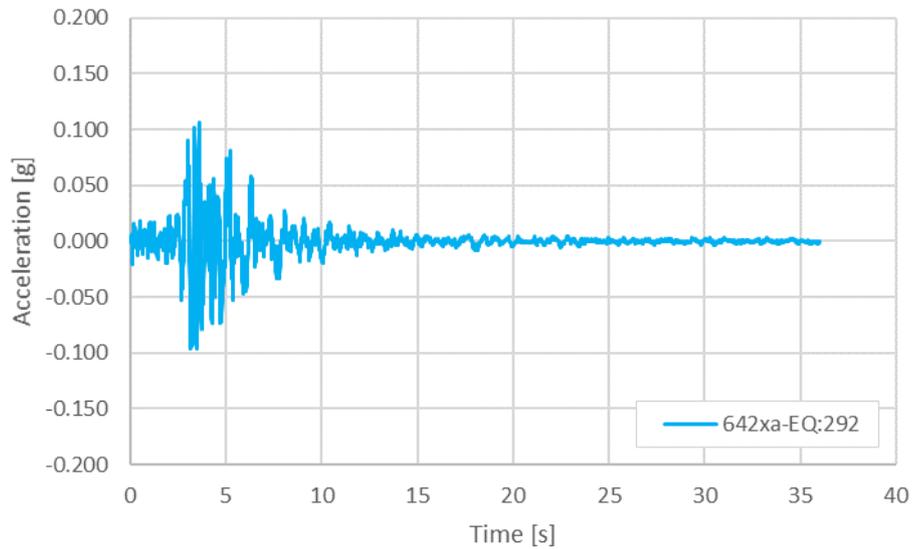


Figura 10 – Accelerogramma naturale: Waveform 642xa – Eartquake 292

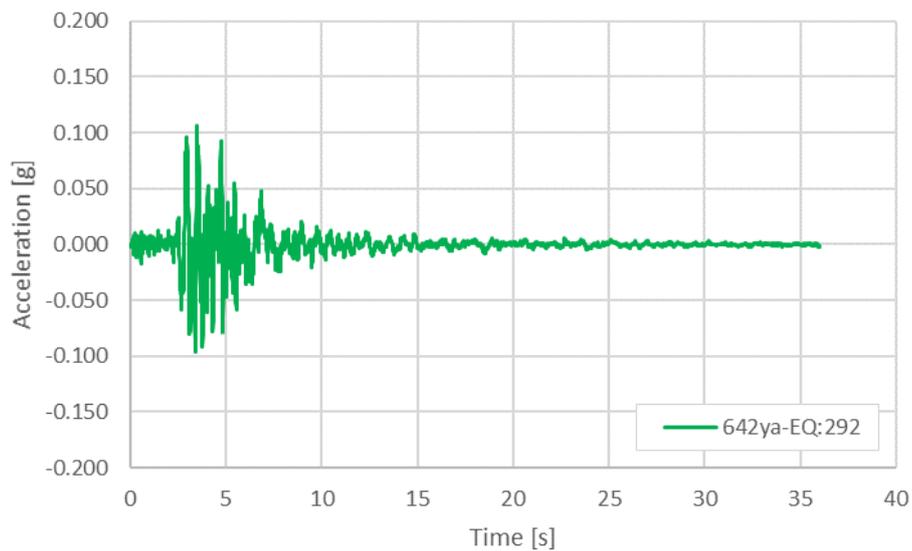


Figura 11 – Accelerogramma naturale: Waveform 642ya – Eartquake 292

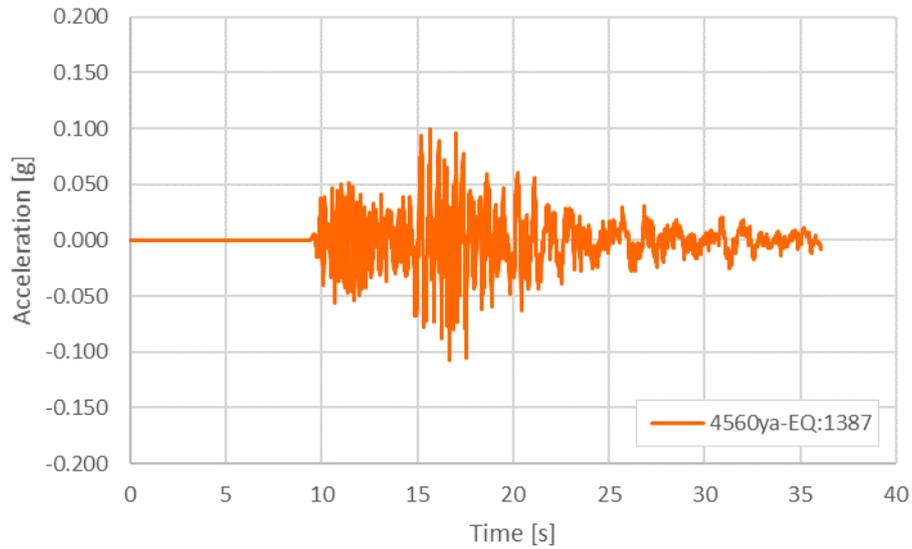


Figura 12 – Accelerogramma naturale: Waveform 4560ya – Eartquake 1387

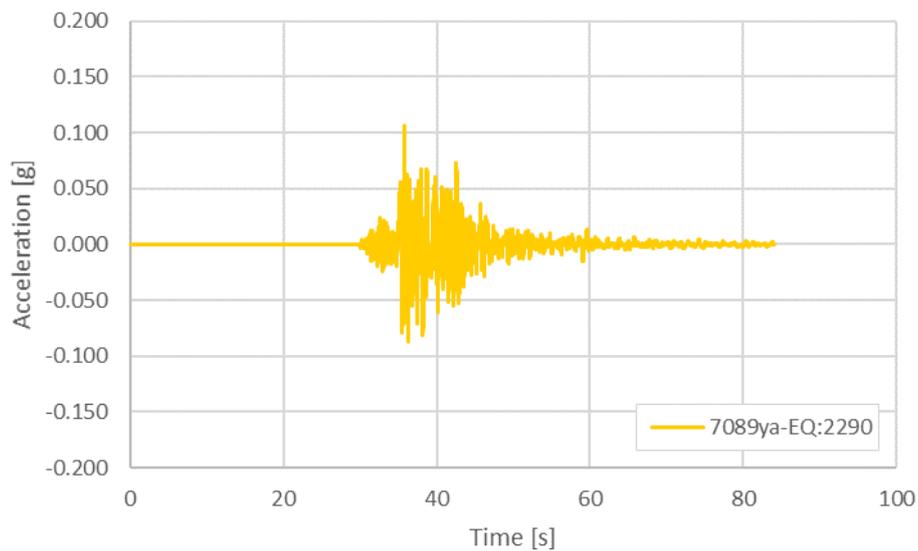


Figura 13 – Accelerogramma naturale: Waveform 7089ya – Eartquake 2290

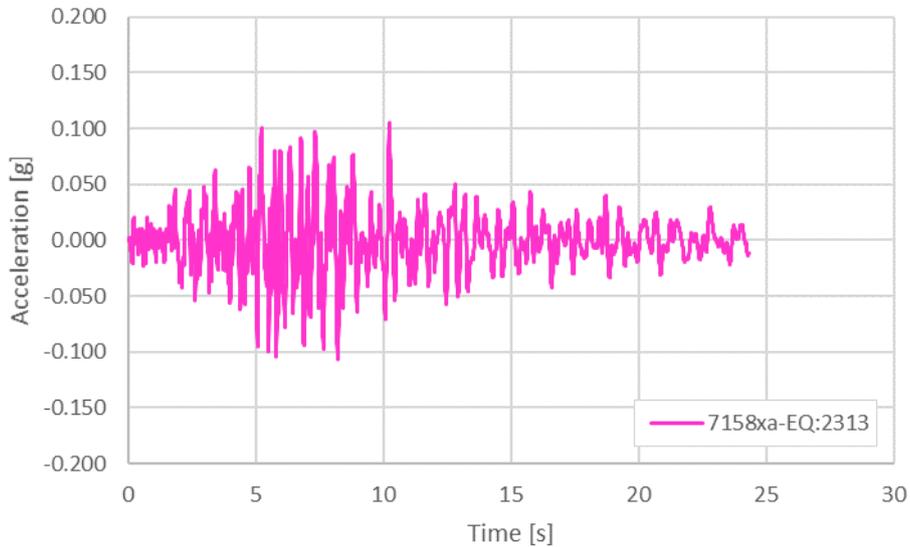


Figura 14 – Accelerogramma naturale: Waveform 7158xa – Eartquake 2313

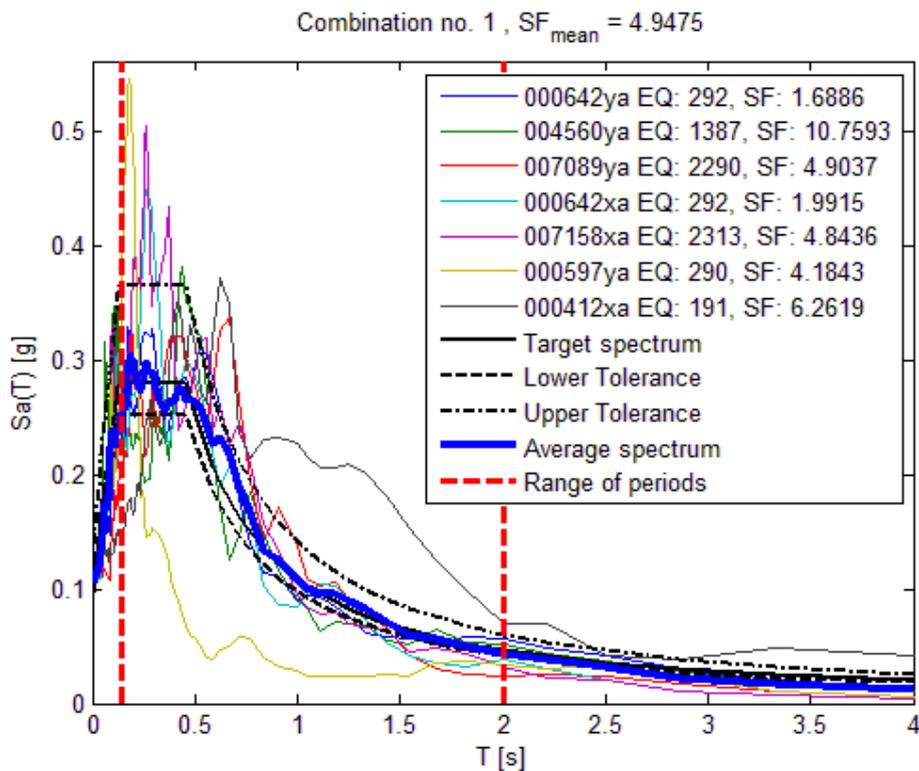


Figura 15 – Spettri di input per l'analisi lineare equivalente (output di Rexel)

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI						
Risposta Sismica Locale:	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	RS3T	30 D 09	RB	VI 10 03 012	A	17 di 25

6. RISPOSTA SISMICA LOCALE

Nel presente capitolo viene illustrata la risposta sismica locale del viadotto VI10 del Lotto 3B, valutata su un modello monodimensionale tramite un'analisi lineare equivalente. Dato che questo tipo di analisi è stata adottata solo per questo viadotto nel seguito verrà dettagliato anche l'approccio teorico utilizzato per eseguire l'analisi.

6.1 Il modello di terreno adottato

Nell'analisi si utilizza un modello monodimensionale (1D), per il quale si assume che:

- il bedrock sia orizzontale e indefinitamente esteso;
- il deposito sia stratificato orizzontalmente;
- la sollecitazione sismica sia costituita da sole onde di taglio polarizzate sul piano orizzontale (SH) incidenti il bedrock con direzione di propagazione verticale.

I parametri richiesti per la modellazione numerica sono:

- spessore degli strati
- velocità delle onde di taglio nei singoli sismostrati identificati
- peso di volume
- parametri dinamici dei terreni (Smorzamento e modulo di taglio in funzione della deformazione)

Nella presente relazione di calcolo si fa riferimento ad un modello monodimensionale sul quale sono state eseguite analisi lineari equivalenti.

6.2 Sollecitazione sismica e modalità di propagazione

Le ipotesi riguardanti la sollecitazione sismica e le sue modalità di propagazione all'interno del deposito sono così giustificate:

- per quanto riguarda la direzione di propagazione assunta verticale, dal fatto che le onde sismiche subiscono, nell'attraversare il terreno e le relative discontinuità stratigrafiche, numerosi fenomeni di riflessione e rifrazione secondo angoli legati alla velocità di propagazione all'interno di ciascuno degli strati attraversati dalla legge di Snell; essendo le velocità degli strati più superficiali mediamente più basse, le onde sismiche tendono ad assumere una direzione di propagazione verticale in prossimità della superficie;
- per quanto riguarda la predominanza di onde SH, dal fatto che, dal punto di vista ingegneristico, le sollecitazioni sismiche più significative ai fini della sicurezza sono quelle di taglio orizzontali.

6.3 Analisi lineare Equivalente

Nell'analisi lineare equivalente, nella propagazione monodimensionale delle onde, il suolo è considerato come un solido di Kelvin-Voigt, in cui viene descritta la risposta dinamica utilizzando una molla puramente elastica in un mezzo puramente viscoso.

La soluzione dell'equazione dell'onda monodimensionale, per una singola frequenza d'onda che provoca spostamento, è funzione della profondità e del tempo.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI						
Risposta Sismica Locale: Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30 D 09	CODIFICA RB	DOCUMENTO VI 10 03 012	REV. A	FOGLIO 18 di 25

$$U(z,t) = A \exp [I (\omega t + k^*z)] + B \exp [I (\omega t - k^*z)]$$

Questa equazione è applicata ad ogni singolo strato con proprietà uniformi e l'ampiezza d'onda (A e B) è calcolata al contorno dello strato. Nell'equazione A e B rappresentano rispettivamente l'ampiezza dell'onda ascendente e discendente (Figura 16).

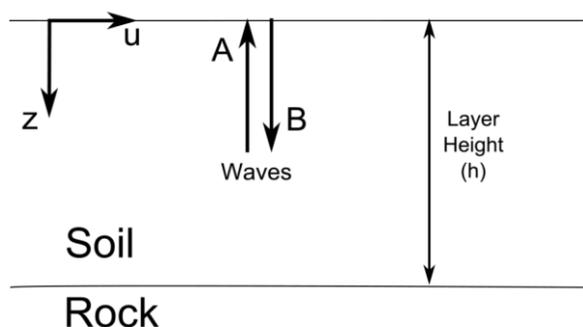


Figura 16 – Notazioni dell'equazione d'onda

Il numero complesso k^* è funzione del modulo di taglio G, dello smorzamento D e del peso di volume secondo le seguenti equazioni:

$$k^* = \frac{\omega}{v_s^*}$$

$$v_s^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}}$$

$$G^* = G \left(1 - 2D^2 + i2D\sqrt{1 - D^2} \right) \cong G(1 + i2D)$$

Per un sistema stratificato, le ampiezze d'onda vengono calcolate utilizzando delle formule sviluppate mantenendo la compatibilità dello spostamento e degli sforzi di taglio al contorno dello strato:

$$A_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha_m^*) \exp\left(\frac{ik_m^* h_m}{2}\right) + \frac{1}{2} B_m (1 - \alpha_m^*) \exp\left(-\frac{ik_m^* h_m}{2}\right)$$

$$B_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 - \alpha_m^*) \exp\left(\frac{ik_m^* h_m}{2}\right) + \frac{1}{2} B_m (1 + \alpha_m^*) \exp\left(-\frac{ik_m^* h_m}{2}\right)$$

Dove m rappresenta il numero dello strato, h_m lo spessore e α_m il rapporto di impedenza complesso, che a sua volta è definito da:

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} = \frac{\rho_m v_{s,m}^*}{\rho_{m+1} v_{s,m+1}^*}$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI						
Risposta Sismica Locale: Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30 D 09	CODIFICA RB	DOCUMENTO VI 10 03 012	REV. A	FOGLIO 19 di 25

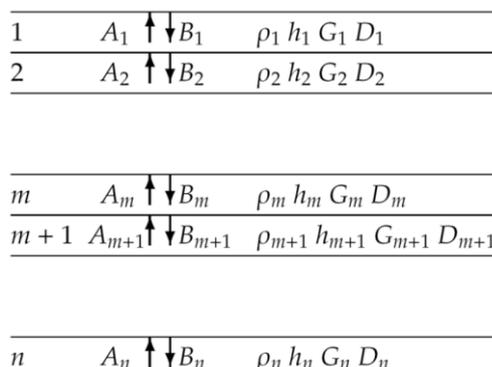


Figura 17 – Notazioni della propagazione teorica dell'onda

La funzione di trasferimento tra il moto dello strato di interesse (m) e nella roccia (n) alla base del deposito è definita da:

$$TF_{(m,n)}(\omega) = \frac{u_m(\omega)}{u_n(\omega)} = \frac{A_m + B_m}{A_n + B_n}$$

Dove ω è la frequenza dell'onda armonica. La funzione di trasferimento è il rapporto tra l'ampiezza del moto armonico (spostamento, velocità o accelerazione) tra i due livelli di interesse e che variano in frequenza. L'ubicazione dei picchi nella funzione di trasferimento, sono controllati dal modo di vibrare dei depositi. Un picco a basse frequenze rappresenta il modo di vibrare fondamentale e produce la maggior amplificazione.

La risposta ad un determinato livello di interesse viene calcolata moltiplicando lo spettro di ampiezza di Fourier del moto di ingresso al bedrock per la funzione di trasferimento:

$$Y_m(\omega) = TF_{m,n}(\omega)Y_n(\omega)$$

Dove Y_n è lo spettro di ampiezza di Fourier di ingresso allo strato n e Y_m è lo spettro di ampiezza di Fourier nella parte superiore dello strato di interesse. Un problema da considerare è che lo spettro di Fourier di input rappresenta in genere un movimento registrato sulla roccia su una superficie libera dove le ampiezza d'onda in salita e in discesa sono uguali ($A_1 = B_1$) piuttosto che su roccia alla base di un deposito di terreno, dove le ampiezze d'onda non sono uguali. La modifica delle condizioni al contorno ($A_n = B_n$ per una superficie libera, $A_n \neq B_n$ alla base di un deposito) deve essere preso in considerazione. I moti a qualsiasi superficie libera sono indicati come movimenti di outcrop e le loro ampiezze sono descritte da due volte l'ampiezza dell'onda verso l'alto. E' possibile definire una funzione di trasferimento che converte un movimento di outcrop in un movimento interno e questa funzione di trasferimento può essere combinata con la funzione di trasferimento che può essere applicata a movimenti registrati su roccia.

$$TF_{m,n}(\omega) = \underbrace{\frac{A_n + B_n}{2A_n}}_{\substack{\text{outcrop} \\ \text{to within}}} \cdot \underbrace{\frac{A_m + B_m}{A_n + B_n}}_{\substack{\text{within} \\ \text{to layer}_n}}$$

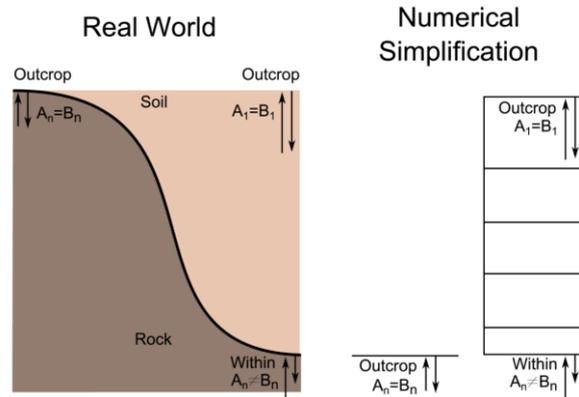


Figura 18 – Outcrop Motion: descrive un'onda ascendente uguale a quella discendente; Within Motion: utilizzato quando l'onda ascendente è diversa da quella discendente

Nell'analisi di risposta lineare equivalente, la risposta non lineare del suolo viene approssimata modificando le proprietà elastiche lineari del terreno in base al livello di tensione indotto. Poiché le deformazioni indotte dipendono dalle proprietà del terreno, il modulo di taglio compatibile con la deformazione ed i valori del rapporto di smorzamento sono calcolati iterativamente sulla base della deformazione calcolata. Una funzione di trasferimento è utilizzata per calcolare la deformazione di taglio nello strato in base al movimento di ingresso. Nel calcolo della funzione di trasferimento della deformazione, la deformazione di taglio viene calcolata al centro dello strato ($z = h_m/2$) e utilizzata per selezionare le proprietà di deformazione del terreno compatibili.

A differenza delle precedenti funzioni di trasferimento che hanno semplicemente amplificato lo spettro di ampiezza di Fourier, la funzione di trasferimento della deformazione amplifica il movimento e converte l'accelerazione in deformazione. La funzione di trasferimento di deformazione basata su un moto di input affiorante è data da:

$$TF_{m,n}^{strain}(\omega) = \frac{\gamma\left(\omega, z = \frac{h_m}{2}\right)}{\ddot{u}_{n,outcrop}(\omega)}$$

$$= \frac{i k_m^* \left(A_m \exp\left(\frac{i k_m^* h_m}{2}\right) - B_m \exp\left(-\frac{i k_m^* h_m}{2}\right) \right)}{-\omega^2 (2A_n)}$$

Lo spettro di ampiezza di deformazione di Fourier all'interno di uno strato viene calcolato applicando la funzione di trasferimento della deformazione allo spettro di ampiezza di Fourier del moto di ingresso.

Nel metodo di risposta nel dominio del tempo, viene fornita una serie temporale di input e la FAS di input (Funzione di trasferimento) viene calcolata da quella serie temporale utilizzando la trasformata di Fourier per calcolare la trasformazione discreta di Fourier sulla serie temporale fornita. La funzione di trasferimento calcolata è complessa e può essere convertita in informazione sulla fase e sull'ampiezza.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI						
Risposta Sismica Locale:	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	RS3T	30 D 09	RB	VI 10 03 012	A	21 di 25

6.4 Programma di Calcolo: STRATA

Il set di 7 di accelerogrammi spettro compatibili (estratto per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita tramite il software Rexel v. 3.5), viene utilizzato per l'analisi di risposta sismica locale, sfruttando il software STRATA (Kottke & Rathje, 2008).

Il software STRATA, sviluppato presso il Geotechnical Engineering Center, University of Texas, si basa sul codice SHAKE, e computa la risposta dinamica unidimensionale del sito utilizzando l'approccio di analisi lineare equivalente nel dominio delle frequenze, come descritta la paragrafo precedente (6.3).

STRATA consente di utilizzare due differenti tipologie di analisi: quella lineare equivalente, utilizzando serie temporali come input sismico, oppure quella basata sulla teoria della Random Vibration, alla base delle cui computazioni è necessario inserire come input lo spettro di ampiezza di Fourier (FAS). Per le finalità della presente relazione si è scelto di effettuare l'analisi lineare equivalente.

Nel caso di analisi lineari equivalenti occorre specificare la deformazione equivalente γ_{eq} sulla base della quale aggiornare i parametri dinamici, quale l'effective strain ratio calcolato mediante la formula di Idriss and Sun, (1992):

$$Effective\ strain\ ratio = \gamma_{eq} / \gamma_{max} = (M-1)/10$$

Con M = magnitudo evento di riferimento

STRATA permette di computare in un'unica sessione di calcolo i dati provenienti da più accelerogrammi, nei casi oggetto di studio il valore della magnitudo immesso nella formula deriva dalla media delle magnitudo relative ai sette accelerogrammi di inquadramento sismico del sito estratti da Rexel. Dato che la magnitudo é sempre variabile tra 5 e 6, si è optato per la definizione univoca di Effective strain ratio = 0,5.

Definito l'input in termini di eventi sismici da sottoporre a simulazione, bisogna determinare le caratteristiche sismostratigrafiche del volume di terreno d'indagine ed oggetto della probabile amplificazione nella sezione "Soil Profile". Bisognerà ovvero riportare nel software il profilo sismostratigrafico del terreno, ovvero i differenti sismostratistrati in cui la campagna di esplorazione geologica (geofisica e geotecnica) del sottosuolo ha discretizzato il sottosuolo dell'area in esame. Si assume, trattandosi di indagini monodimensionali, che gli strati siano piani e paralleli e che la propagazione del sisma sia verticale.

Ogni strato è descritto per mezzo della sua profondità, dello spessore, dalla velocità massima $V_{s,max}$, dal peso dell'unità di volume e del "Soil type"; quest'ultima opzione richiama le curve di decadimento del modulo di rigidezza a taglio normalizzato ($G/G_0 - \gamma$), le corrispondenti curve dello smorzamento ($D-\gamma$) con la deformazione di taglio γ (opportunamente scelte dall'elenco disponibile o implementate manualmente) e il peso dell'unità di volume associate a quel terreno. Nel caso oggetto di studio dall'elenco disponibile sono state scelte le curve di Vucetic & Dorby (1991) secondo diversi valori dell'indice di plasticità. Quelli di riferimento per il viadotto VI10 sono rispettivamente rappresentati in Figura 19

Il "Soil profile" è stato definito tramite la prova sismica di riferimento e per ogni metro di profondità, sono state specificate tipologia di terreno (Rif. Profilo geotecnico) e velocità delle onde di taglio misurate. La Figura 20 mostra il confronto tra i dati della DH 3aS39 e le caratteristiche del Soil Profile implementato in STRATA. Per quanto riguarda il bedrock sismico, per cui non risulta necessario indicare curve dinamiche ma solo il valore

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI					
	Risposta Sismica Locale: Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30 D 09	CODIFICA RB	DOCUMENTO VI 10 03 012	REV. A

iniziale del damping ed il peso di volume, è stata ipotizzata un V_s pari a 800 ms^{-1} , la cui posizione è stata desunta interpolando i dati della prova sismica di riferimento.

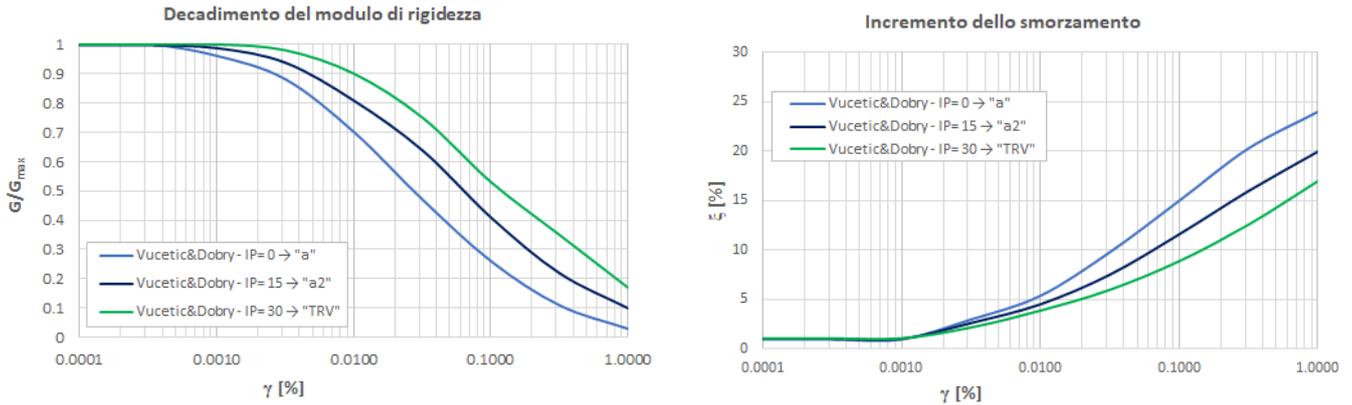


Figura 19. Decadimento del modulo di rigidezza in funzione delle deformazioni a taglio e incremento dello smorzamento con le deformazioni a taglio adottate

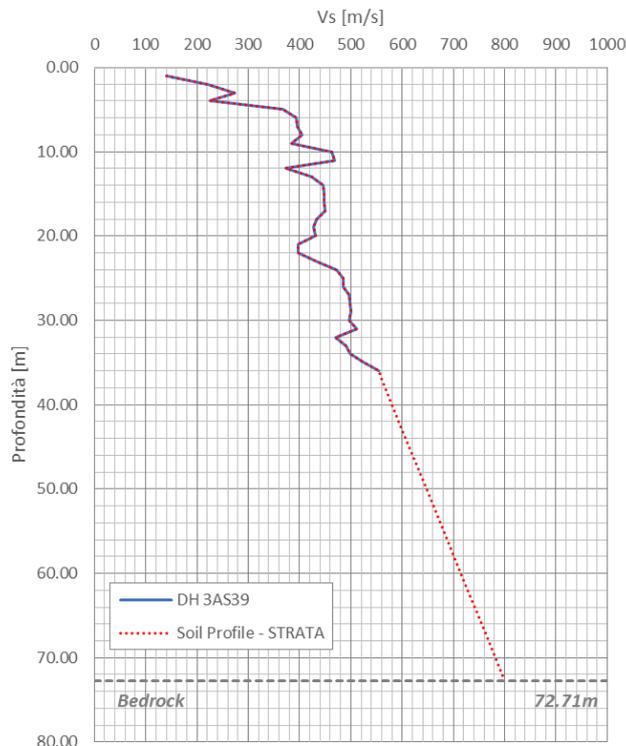


Figura 20. Sovrapposizione dei risultati delle prove sismiche con le caratteristiche del Soil Profile implementate in STRATA (linea tratteggiata rossa): Down Hole 3AS39

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI						
Risposta Sismica Locale: Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RS3T	30 D 09	RB	VI 10 03 012	A	23 di 25

La struttura del codice di calcolo prevede innanzitutto l’inserimento dell’accelerogramma da applicare al bedrock con P.G.A. in [g], quindi i files di output di Rexel (in ms^{-2}) andranno opportunamente modificati.

In aggiunta, l’accelerogramma deve essere:

- Scalato in ampiezza per la massima accelerazione prevista in sito (PGA) (utilizzando il fattore di scala di Rexel cfr.5.3);
- Filtrato in frequenza, cioè è necessario introdurre come dato di input la massima frequenza di cut off del filtro “passa basso” utilizzato, nel nostro caso posta pari a 20 Hz, che rappresenta un valore compatibile con la storia sismica italiana.

Una volta definiti tutti i dati necessari in input, STRATA mette a disposizione una vasta gamma di specifiche in output. Nella sezione Profile è possibile richiedere in output i profili di variazione dei parametri dinamici e le time series degli spostamenti, delle deformazioni di taglio, degli sforzi di taglio, delle velocità e delle accelerazioni. Nei casi in esame con questa funzione si è eseguita ed esplicitata la deconvoluzione degli accelerogrammi registrati all’outcrop, riportando così il segnale al bedrock. E’ inoltre stata impostata la baseline correction, ovvero la correzione della linea base nel dominio nel tempo, utilizzata per correggere alcuni tipi di disturbi di lungo periodo sui segnali accelerometrici.

6.5 Risultati

Dall’analisi lineare equivalente di Risposta Simica Locale si ottengono gli accelerogrammi amplificati secondo le condizioni locali (Figura 21) e gli spettri di riferimento, da cui si calcola lo spettro medio di RSL. Dato che l’interesse progettuale risiede al piano delle fondazioni dei viadotti, i risultati vengono ricercati a 4,00 m di profondità.

Lo spettro medio così ottenuto va regolarizzato per ottenere uno spettro con forma standard (NTC, 2018), costituita da un ramo con accelerazione crescente lineare, un ramo ad accelerazione costante, ed un ramo in cui l’accelerazione decresce con $1/T$ e quindi con velocità costante (Figura 22).

Rimane compito del Progettista Strutturale la scelta dello spettro di progetto maggiormente idoneo anche in funzione del tipo di struttura da realizzare.

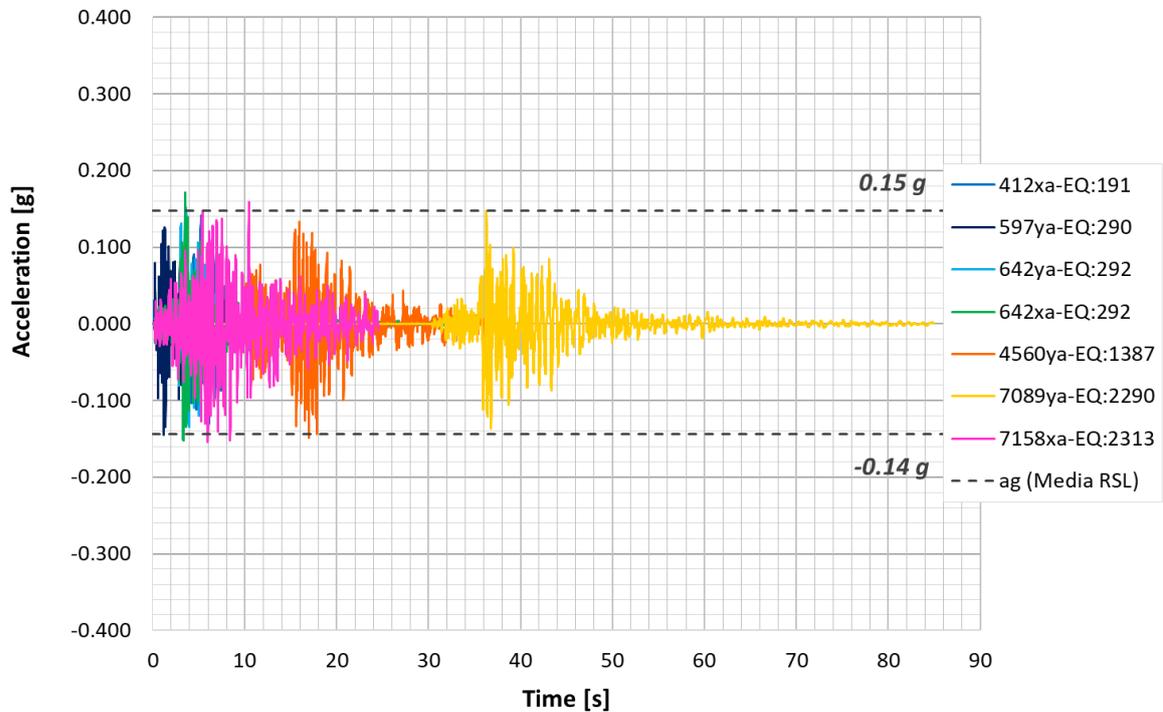


Figura 21 – Risposta Sismica Locale per SLV di L3B – VI10: Accelerogrammi al piano delle fondazioni (- 4.0 m)

VI10 - prova: DH3AS39

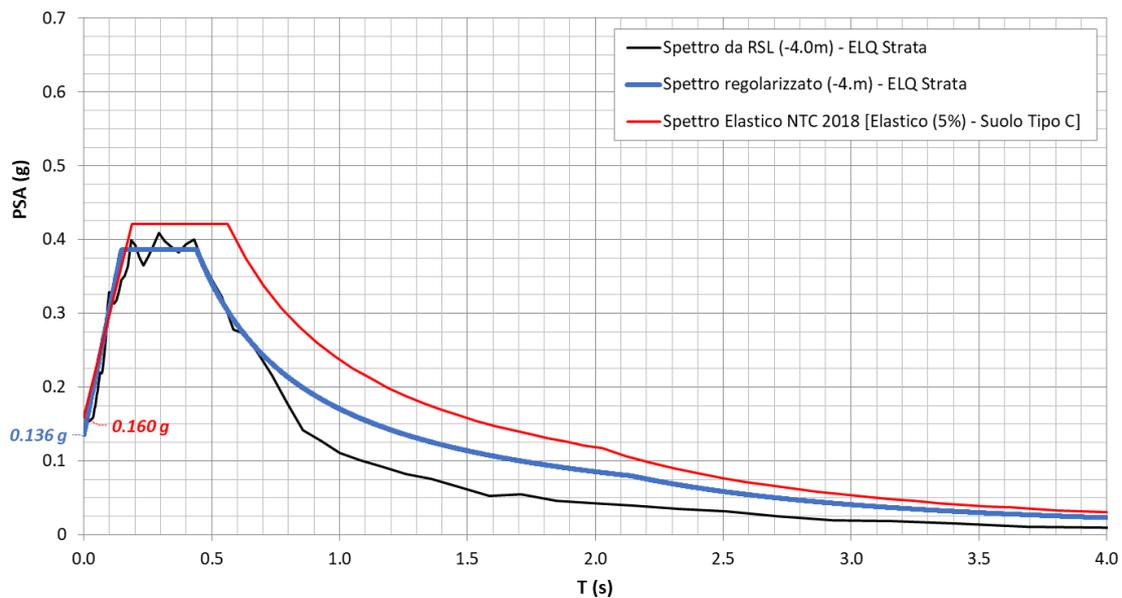


Figura 22 – Risposta Sismica Locale per SLV di L3B – VI10: confronto tra spettro di RSL e spettro di normativa calcolati al piano delle fondazioni (- 4.0m)

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO					
	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA					
TRATTA LERCARA – CALTANISSETTA XIRBI						
Risposta Sismica Locale: Relazione Viadotto VI10 – Lotto 3B	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RS3T	30 D 09	RB	VI 10 03 012	A	25 di 25

7. CONCLUSIONI

La Risposta Sismica Locale deriva dalla pericolosità sismica di base e tiene conto delle amplificazioni di origine stratigrafica e topografica. Per determinare la risposta sismica locale sono disponibili due approcci:

- un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo e l'individuazione, mediante apposite tabelle fornite dalla normativa, del coefficiente di amplificazione stratigrafica S_s , del coefficiente di amplificazione topografica S_T nonché del coefficiente C_C che modifica il periodo T_C e di conseguenza gli altri periodi notevoli dello spettro (NTC 2018, §3.2.2-3)
- un approccio rigoroso che per mezzo di un'analisi della risposta sismica locale fornisce in modo più accurato i valori dei parametri necessari per definire gli spettri di risposta in accelerazione per il sito della costruzione.

La presente relazione illustra l'Analisi di Risposta Sismica Locale eseguita per il viadotto VI10 del Lotto 3B.

In particolare sono stati analizzati 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: valutazione dell'amplificazione del segnale al piano delle fondazioni dei viadotti (-4.00m) e calcolo dei relativi spettri in pseudo-accelerazione mediante l'utilizzo di codice di calcolo STRATA.

L'intero studio è stato effettuato ai sensi della normativa che disciplina questo tipo di valutazioni (D.M. 17.01.2018).

La sintesi del lavoro svolto è rappresentata dal grafico riepilogativo (Figura 22) che mette a confronto:

- lo spettro calcolato mediante l'approccio semplificato indicato dalle NTC 2018 [N.1] e calcolato mediante il foglio Spettri-NTCver.1.0.3
- lo spettro di risposta sismica locale calcolato mediante Analisi Lineare Equivalente con il software Strata
- lo spettro regolarizzato di risposta sismica locale calcolato mediante l'approccio prescritto in [N.3].

Che permette l'identificazione dello spettro elastico da adottare come riferimento per la progettazione dell'opera in esame.

L'analisi è da ritenersi valida per l'intero viadotto VI10.