

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**COLLEGAMENTO DIRETTO CON LE LINEE
METAPONTO-REGGIO CALABRIA E COSENZA – SIBARI**

S.O. OPERE GEOTECNICHE

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

BRETELLA DI SIBARI

Analisi di risposta sismica locale

SCALA:

-

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

RC2V 00 R 11 RH GE0006 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	F. Conte <i>Francesco Conte</i>	31/03/2023	L. Giannini <i>L. Giannini</i>	31/03/2023	I. D'Amore <i>I. D'Amore</i>	31/03/2023	L. Berardi 31/03/2023 

File: RC2V00R11RHGE0006001A

n. Elab.:

INDICE

1	PREMESSA	4
2	RIFERIMENTI.....	6
2.1	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	6
2.2	SOFTWARE.....	6
2.3	NORMATIVA DI RIFERIMENTO E STANDARD DI RIFERIMENTO	6
3	INQUADRAMENTO GENERALE DELL' AREA	7
3.1	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	7
3.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	7
4	INQUADRAMENTO SISMICO.....	11
4.1	PREMESSA	11
4.2	AREE SISMOGENETICHE DI INTERESSE	11
4.3	PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE	14
4.4	CARATTERIZZAZIONE SISMICA	17
4.4.1	<i>Categorie di sottosuolo.....</i>	<i>18</i>
4.4.2	<i>Amplificazione stratigrafica e topografica.....</i>	<i>18</i>
4.4.3	<i>Azione sismica di progetto.....</i>	<i>19</i>
5	CENNI TEORICI SULL' ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE	20
5.1	GENERALITÀ	20
5.2	ANALISI LINEARE EQUIVALENTE	20
5.3	ANALISI NON-LINEARE	21
6	ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE	24
6.1	DEFINIZIONE INPUT SISMICO.....	24
6.2	DISAGGREGAZIONE DEL RISCHIO SISMICO	26
6.3	INDIVIDUAZIONE DEGLI ACCELEROGRAMMI SPETTROCOMPATIBILI	27

Analisi di risposta sismica locale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC2V	00	R 11 RH	GE 00 06 001	A	3 di 48

6.4	DEFINIZIONE DEL MODELLO STRATIGRAFICO DI SOTTOSUOLO	35
6.5	RISULTATI	38
6.6	CONFRONTO CON RISULTATI DA ANALISI NON LINEARE.....	43
7	CONCLUSIONI E SINTESI ACCELERAZIONI DI PROGETTO	48

1 PREMESSA

Nell'ambito delle risorse previste nel PNRR per gli interventi sulla linea ferroviaria jonica nel territorio della Regione Calabria, è prevista la realizzazione della bretella di Sibari tenendo conto anche della richiesta avanzata formalmente dalla Regione Calabria nell'ambito del Tavolo Tecnico di Ascolto 2021.

La stazione di Sibari costituisce il punto di confluenza delle linee Sibari – Crotono – Catanzaro Lido (cosiddetta linea jonica) e Sibari – Cosenza – Paola. Attualmente non esiste un collegamento diretto fra le linee afferenti a Sibari, pertanto il passaggio da una linea all'altra prevede un'inversione del senso di marcia sui binari di ricevimento della stazione, con conseguente aumento dei tempi di percorrenza.



Figura 1.1 – Inquadramento Territoriale.

La realizzazione di un binario esterno che colleghi direttamente le due linee diramate consente di creare le condizioni per un nuovo modello di servizio in grado di collegare i versanti jonico e tirrenico della Calabria senza soluzione di continuità.

Per quanto sopra, l'intervento di realizzazione del binario esterno ha una forte valenza commerciale in termini di nuove opportunità di collegamento, principalmente per effetto della riduzione dei tempi di percorrenza nel collegamento fra i maggiori centri interessati.

	COLLEGAMENTO DIRETTO CON LE LINEE METAPONTO-REGGIO CALABRIA E COSENZA - SIBARI					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA BRETTELLA DI SIBARI (CS)					
Analisi di risposta sismica locale	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC2V	00	R 11 RH	GE 00 06 001	A	5 di 48

L'intervento si pone l'obiettivo di creare le condizioni infrastrutturali per un'estensione dei servizi ferroviari dalla linea jonica alla linea tirrenica. In particolare, l'intervento consentirà di:

- ❖ *Collegare efficacemente il bacino crotonese con Cosenza, Paola e la linea tirrenica senza perditempo correlati alle inversioni di marcia in stazione di Sibari;*
- ❖ *Estendere i servizi a mercato, attualmente attestati nella stazione di Sibari, verso Crotona, previa elettrificazione della linea jonica;*
- ❖ *Favorire l'accessibilità ai servizi ferroviari per un bacino d'utenza delle provincie di Cosenza e Crotona (circa 750.000 abitanti) e lo spostamento di una quota modale da gomma a ferro in modo da decongestionare le principali arterie stradali calabresi;*
- ❖ *Ridurre i tempi di percorrenza rispetto a servizi che prevedano l'inversione di marcia a Sibari.*

Al fine di calibrare la risposta del modello geotecnico di sottosuolo agli input sismici, è stata effettuata una specifica analisi di risposta sismica locale i cui risultati, visto l'assetto morfologico e litostratigrafico dell'area, potranno essere utilizzati per il predimensionamento delle opere e degli interventi ivi in progetto.

La presente Relazione è così suddivisa:

- Al capitolo 2 si riportano i riferimenti bibliografici, normativi e i software impiegati.
- Al capitolo 3 si riporta un breve inquadramento geografico e geologico del sito in esame.
- Al capitolo 4 si riporta l'inquadramento sismico del sito in esame.
- Al capitolo 5 viene quindi illustrata la caratterizzazione sismica.
- Al capitolo 6 vengono riportati dei richiami teorici circa l'analisi di risposta sismica locale sito specifica.
- Al capitolo 7 si riportano i dati di input e i risultati ottenuti dall'analisi di risposta sismica locale.
- Al capitolo 8 vengono infine espone le conclusioni del presente studio e richiamati i parametri, in termini di accelerazione, che saranno impiegati nel predimensionamento delle opere ricadenti nel sito di progetto.

2 RIFERIMENTI

2.1 Riferimenti bibliografici

- [1] Spallarossa D., Barani S., 2007. Disaggregazione della pericolosità sismica in termini di M-R-ε. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D14, <http://esse1.mi.ingv.it/d14.html>
- [2] Convenzione INGV-DPC 2004 – 2006, Progetto S1, Proseguimento della assistenza al DPC per il completamento e la gestione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 e progettazione di ulteriori sviluppi, Coordinatore: Carlo Meletti (INGV). Sito web: <http://esse1.mi.ingv.it/>.
- [3] Stafford, P. J., Berrill, J. B., & Pettinga, J. R. (2009). New predictive equations for Arias intensity from crustal earthquakes in New Zealand. *Journal of Seismology*, 13(1), 31-52.
- [4] Housner, G. W. (1952). Intensity of ground motion during strong earthquakes.
- [5] Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotech. Engng* 117, No. 1, 89–107.
- [6] Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970) "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses." Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 40p.
- [7] AGI. (2005). Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Linee Guida AGI. Associazione Geotecnica Italiana. Pàtron, Bologna.
- [8] Phillips, C., & Hashash, Y. M. (2009). Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(7), 1143-1158.

2.2 Software

- [9] Sgobba, S., Puglia, R., Pacor F., Luzi, L., Russo, E., Felicetta, C., Lanzano, G., D'Amico, M., Baraschino, R., Baltzopoulos, G., Iervolino, I. REXELweb: a tool for selection of ground-motion records from the Engineering Strong Motion database (ESM). 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE) 17 - 20 June 2019, Roma, Italy.
- [10] Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2020). "DEEPSOIL 7". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.

2.3 Normativa di riferimento e standard di riferimento

- [11] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: "Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni", G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30.
- [12] Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018".
- [13] Regolamento Regionale del 10 agosto 2017: "procedure per la denuncia, il deposito e l'autorizzazione di interventi di carattere strutturale e per la pianificazione territoriale in prospettiva "sismica" di cui alla legge regionale 28 dicembre 2015, n. 37".

3 INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA

3.1 Inquadramento geografico

La tratta ferroviaria in progetto è ubicata nel comune di Cassano allo Ionio (CS), nei pressi della frazione di Sibari. La tratta in progetto (Figura 3.1) si trova in corrispondenza dello scambio ferroviario tra la ferrovia Ionica e la ferrovia Sibari-Cosenza. L'area in esame è ubicata in corrispondenza della Piana di Sibari situata sul versante ionico settentrionale della regione, fa da confine tra il massiccio del Pollino e quello della Sila. È solcata al centro dai corsi del fiume Crati e del suo affluente Coscile, che sfociano nel mar Ionio.

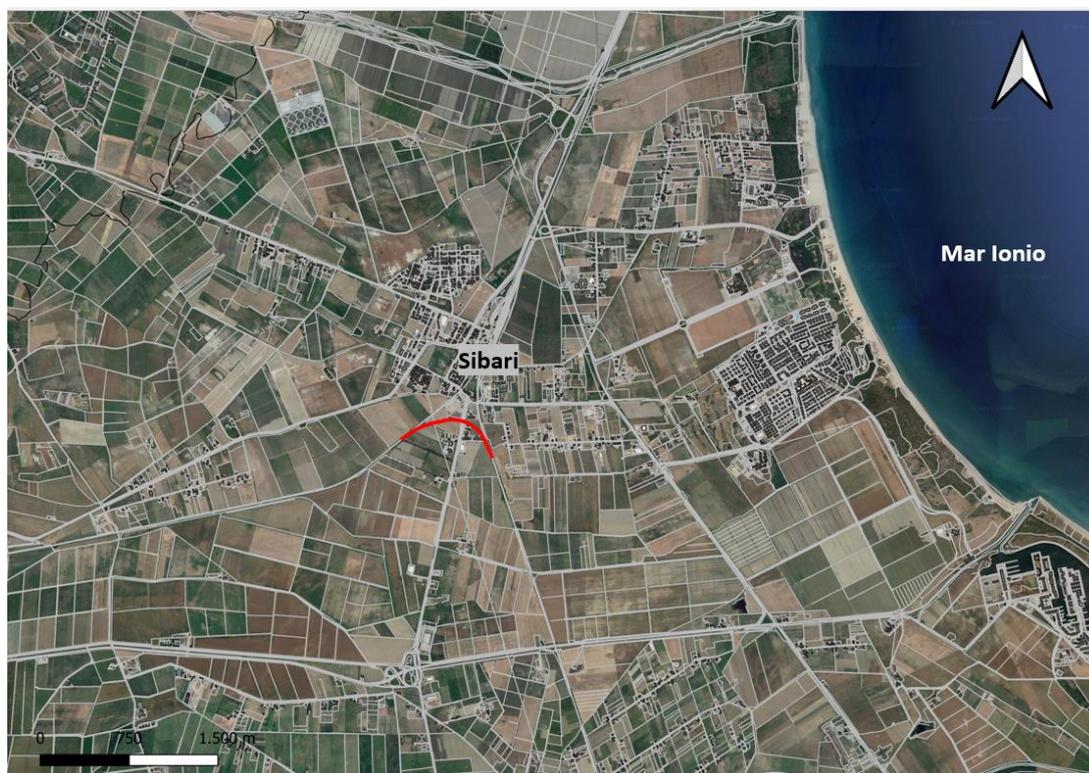


Figura 3.1 – Immagine aerea dell'area di studio, in rosso il tratto ferroviario in progetto.

3.2 Inquadramento geologico

L'Arco Calabro, ubicato lungo la catena appenninico-maghrebide, costituisce un dominio tettonico-stratigrafico distinto (Amodio-Morelli et al., 1976), caratterizzato dalla presenza di rocce plutoniche e metamorfiche pre-alpine associate a metamorfiti di derivazione continentale e oceanica e tettonicamente sovrapposte a rocce carbonatiche e flysch mesozoici (Ogniben, 1973; Amodio-Morelli et al., 1976; Dietrich, 1976). La sua evoluzione tettonica si inquadra nel fenomeno di convergenza delle placche africana ed europea. Secondo alcuni Autori (Amodio-Morelli et al., 1976; Scandone, 1982) le rocce della catena alpina presenti in Calabria (Unità Austro-Alpine) fanno parte della placca africana coinvolta in una subduzione a vergenza S-SSE, secondo altri (Ogniben, 1973; Bonardi et al., 1992; Rossetti et al., 2001), le rocce della catena alpina sono al contrario una porzione del margine europeo, sovrascorsa sulle unità africane nell'ambito di una subduzione vergente verso NW.

Lo schema tettonico-stratigrafico proposto per l'Arco Calabro consiste in un complesso appenninico, di un complesso ofiolitifero e del Complesso Calabride Auct. In particolare, molti Autori (Ogniben, 1973; Amodio-Morelli et al., 1976; Dietrich, 1976; Bonardi et al., 1992) riportano una successione tettonico-stratigrafica costituita da una serie di unità sovrimposte tra l'Oligocene e il Miocene superiore, raggruppabili in unità della catena appenninica e unità della catena alpina.

Nel Miocene medio-superiore, con il progressivo arretramento della zona di subduzione e del cuneo orogenico appenninico, ha avuto inizio, in posizione di retroarco, la distensione responsabile dell'apertura del bacino tirrenico e della migrazione della Calabria verso E-SE (Ogniben, 1973; Amodio-Morelli et al., 1976; Argentieri et al., 1998). In questo contesto, l'Arco Calabro è stato interessato da tettonica principalmente distensiva (Moretti & Guerra, 1997), responsabile della formazione di bacini subsidenti all'interno dei quali si depositava il cosiddetto Complesso Postorogeno (Ogniben, 1973).

Tra il Miocene superiore e il Pliocene inferiore, i depositi di quest'ultimo hanno subito un'evoluzione sedimentaria simile in tutta la regione (Ortolani et al., 1979). In particolare, durante il Tortoniano superiore, nei bacini distensivi si depositavano sedimenti il cui ambiente deposizionale evolveva da condizioni continentali di piana alluvionale a un quelle di mare progressivamente più profondo (Ortolani et al., 1979). Nel Tortoniano superiore-Messiniano inferiore si è sovrapposta a questi depositi una sequenza sedimentaria costituita da più cicli trasgressivi che, passavano verso l'alto a quella di un ambiente pelagico euxinico in evoluzione verso l'evaporitico (Amodio-Morelli et al., 1976; Ortolani et al., 1979).

Successivamente, nel Messiniano-Pliocene inferiore, si è deposta una nuova sequenza, caratterizzata da evaporiti intercalate a materiale detritico sabbioso e argilloso e passanti verso l'altro a depositi pelitici ricchi di microfauna planctonica (Ogniben, 1973). Nel Pliocene inferiore, la tettonica distensiva ha indotto un ulteriore approfondimento delle depressioni tettoniche già esistenti dando origine ai vasti bacini della Valle del Crati, della Valle del Mesima, di Gioia Tauro, di Sant'Eufemia e dello Stretto Messina, allungati in direzione N-S e NE-SW (Lanzafame & Tortorici, 1981; Galli & Bosi, 2002). Entro esse si sono depositate due sequenze di ingressione e regressione marina: il Ciclo infrapliocenico e il Ciclo suprapliocenico-pleistocenico (Ogniben, 1973).

Nel Pleistocene inferiore la direzione di massima espansione tirrenica ha subito un netto cambiamento passando da NW-SE a E-W (Moretti & Guerra, 1997). In questo contesto si sono prodotte le faglie longitudinali e trasversali che bordano i versanti della Sila, delle Serre e dell'Aspromonte (Galli & Bosi, 2002). Il sollevamento della Catena Costiera lungo strutture N-S (Moretti & Guerra, 1997) ha prodotto la chiusura verso Ovest del bacino del Crati, che diveniva così un golfo del Mar Ionio (Lanzafame & Tortorici, 1981).

A partire dal tardo Pleistocene inferiore, la Calabria è stata interessata da un importante sollevamento regionale tuttora attivo (Lanzafame & Tortorici, 1981; Moretti & Guerra, 1997) che ha fatto regredire il mare anche dai bacini precedentemente in subsidenza. La tettonica della Calabria controlla fortemente la morfologia a causa dell'intenso sollevamento che ha generato componenti normali lungo faglie di importanza regionale. Esso, iniziato nel Pliocene Superiore e tuttora in atto, individua morfostrutture primarie che determinano la geometria di primo ordine della regione. Esso è la causa dell'incremento dell'energia del rilievo che genera, a sua volta, un approfondimento diffuso del reticolato idrografico e mantiene alta la magnitudo dei processi di movimento e trasporto in massa e di erosione. Dalla combinazione di strutture tettoniche ereditate e blocchi sollevati, si determinano stili strutturali tipo che condizionano i caratteri geomorfologici del territorio. Inoltre, la tettonica guida lo sviluppo dei processi di degradazione fisico-chimica che si innescano in corrispondenza di anisotropie strutturali, lungo cui, specialmente in litotipi cristallino-metamorfici (Carrara et al., 1982; Matano e Tansi, 1994), si sviluppano movimenti in massa e fenomeni di incisione lineare (Sorriso-Valvo e Tansi, 1996).

I principali elementi morfostrutturali della Calabria sono stati individuati tramite la combinazione di diversi indicatori morfo-tettonici. In primo luogo, sono considerate le scarpate di faglia; le quali determinano versanti

rettilinei resi discontinui da movimenti in massa di varia entità e con grado di “freschezza” legati all'età delle dislocazioni e alle caratteristiche dei litotipi interessati. Ampi coni e falde di detrito sono presenti alla base delle scarpate strutturali, essi sono in gran parte rivegetati; pertanto, la loro attività è limitata o addirittura nulla.

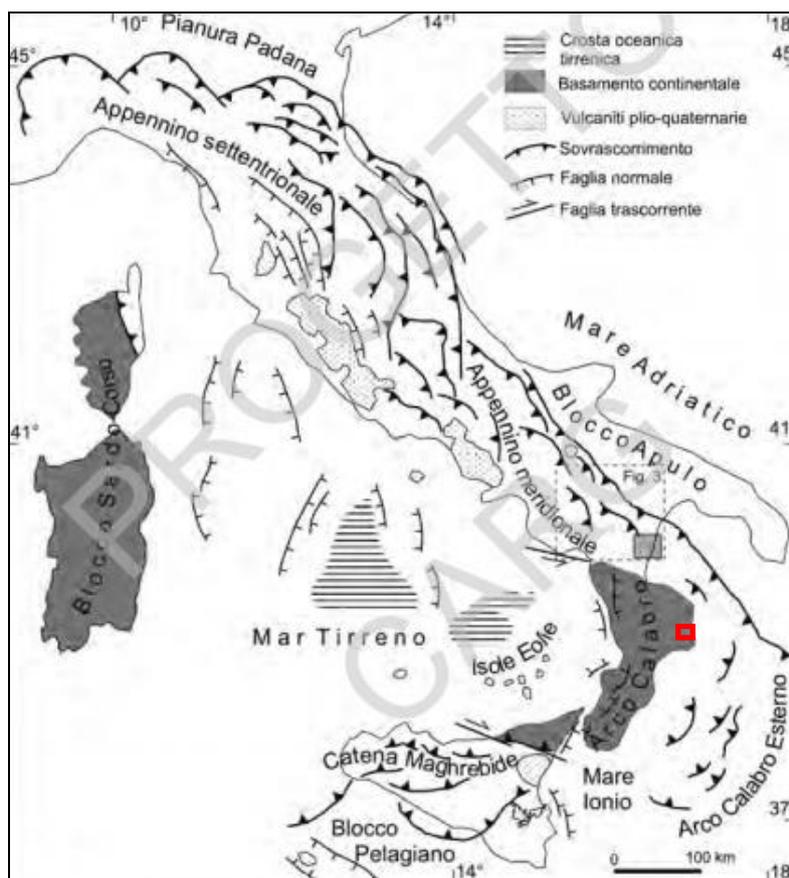


Figura 3.2 – Schema tettonico dell'orogene appenninico-maghrebide (da Catalano et alii, 2004). Nel riquadro rosso è evidenziata l'area in esame.

L'impostazione complessiva dell'area di studio, localizzata in Calabria nord-occidentale, è caratterizzata da unità di spinta a falde. I terreni affioranti in questa zona appartengono al Complesso delle Unità Appenniniche.

Il Complesso delle Unità Appenniniche, infatti, costituisce uno dei tre complessi principali, descritti da Ogniben, 1969 e riportati in Figura 3.3, che compongono l'ossatura della catena montuosa del settore settentrionale dell'Arco Calabro Peloritano. Di queste il complesso delle falde calabridi occupa la posizione geometricamente più elevata ed è costituito da rocce di basamento continentale di età pre-mesozoica e da una copertura sedimentaria meso-cenozoica; la posizione geometricamente intermedia è occupata dalle falde ofiolitiche del Complesso Liguride; mentre le unità carbonatiche appenniniche occupano la posizione inferiore della coltre di falde.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	COLLEGAMENTO DIRETTO CON LE LINEE METAPONTO-REGGIO CALABRIA E COSENZA - SIBARI					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA BRETELLA DI SIBARI (CS)					
Analisi di risposta sismica locale	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC2V	00	R 11 RH	GE 00 06 001	A	10 di 48

COMPLESSO CALABRIDE	Unità di Longobucco		Unità della Sila
	Unità di Stilo	Unità di Monte gariglione	
COMPLESSO LIGURIDE	Unità di Polia Copanello		
	Unità di Castagna		
	Unità Ofiolinca Superiore	Unità di Bagni (?)	
		Unità di Malvito	
Unità di Gimigliano-Monte Reventino			
COMPLESSO DELLE UNITA' APPENNINICHE	Unità Ofiolinca Inferiore	Unità di Diamante Terranova	
		Unità del Frido	
Unità di San Donato			
Unità di Verbicaro			
Sequenza tipo Monte Cocuzzo			

Figura 3.3 – Schema dei rapporti strutturali tra le unità tettoniche dell'Arco calabro (da Ogniben, 1973).

L'area di studio del presente lavoro rientra nella media Valle del Fiume Crati (Figura 3.2). La Valle del Fiume Crati occupa la porzione meridionale del Bacino del Crati, un bacino estensionale intermontano di età plio-quadernaria, situato nel settore settentrionale dell'Arco Calabro; in particolare, essa è delimitata a nord dal gruppo montuoso del Pollino, ad ovest dalla Catena Costiera, mentre ad est è bordata dal Massiccio della Sila. Il Bacino del Crati nella sua porzione meridionale si sviluppa longitudinalmente rispetto all'asse della Catena Appenninica a formare un graben delimitato da faglie normali ad andamento N-S (Crati Trough, Colella, 1988). Mentre, nella sua porzione settentrionale, il bacino si sviluppa trasversalmente all'asse della catena Appenninica, definendo la Piana di Sibari, delimitata da faglie ONO-ESE e NE-SO. In corrispondenza di quest'ultimo sistema di faglie, il graben tende ad allargarsi e con la Fossa di Corigliano descrive l'attuale piana Costiera del Fiume Crati e la parte sommersa del bacino che discende nel Mar Ionio.

La piana di Sibari è circondata da un anfiteatro montuoso costituito a Nord, da rocce calcareo-dolomitiche mesozoiche e da terreni flyschiodi mesozoico-terziari appartenenti al gruppo del Pollino, a Sud, invece, dalle rocce cristalline e metamorfiche paleozoiche della Catena costiera della Sila; ad Ovest, dai depositi plio-pleistocenici marini e continentali, argilloso-sabbiosi e conglomeratici dell'area Cassano-Doria.

Gli studi di A. Moretti (2000) sulla neotettonica dell'Italia Meridionale, condotti attraverso rilevamenti geologici e analisi delle immagini da satellite LANDSAT, hanno messo in evidenza i principali sistemi di faglie attive recenti, tra cui una serie di faglie a scalinata, che delimitano a sud la piana di Sibari con direzione compresa tra EO e NO-SE, degradanti verso N nella piana. Tale sistema sembrerebbe essere la causa principale della fratturazione della crosta terrestre, con movimenti legati ad una tettonica di tipo distensivo, a trascorrenza sinistra e con ribassamento verso NE. Questo sistema di faglie rappresenta probabilmente l'elemento che condiziona maggiormente l'instabilità degli assi fluviali superficiali, mentre i lineamenti tettonici a direzione NE-SO (Cherubini et al. 2005) spiegherebbero la tendenza al regolare allineamento dei corsi d'acqua.

4 INQUADRAMENTO SISMICO

4.1 Premessa

Nel seguito, si fornisce un inquadramento dal punto di vista della sismicità locale a partire dall'individuazione delle sorgenti sismiche di interesse nel corso di terremoti storici. Successivamente, sulla scorta delle indicazioni fornite dalle NTC 2018 [11] e dal Regolamento Regionale del 10 agosto 2017 [13], verranno mostrati i criteri per la definizione dell'azione sismica di progetto.

Per la localizzazione del tracciato, si fa riferimento alla figura sottostante (Figura 4.1).



Figura 4.1 – Immagine aerea dell'area di studio, con ubicazione delle indagini eseguite, in rosso il tratto ferroviario in progetto.

4.2 Aree sismogenetiche di interesse

La struttura dell'arco calabro, frammento alpino formato da rocce cristallino-metamorfiche, è stata soggetta ad un trasporto orogenetico verso l'area del Mediterraneo a seguito degli stress tettonici derivanti dall'avvicinamento tra la placca africana e quella europea. L'intero territorio calabro è sede di un'intensa deformazione crostale che si

manifesta attraverso sistemi attivi di faglie normali e trascorrenti, portando la regione ad essere una tra le più attive dal punto di vista sismico d'Italia e, più in generale, dell'area del Mediterraneo Centrale.

La Calabria risulta attraversata da un sistema di faglie in piena attività, che si sviluppa dalla Valle del Crati (a Nord), passa per lo Stretto di Messina, fino alla Sicilia orientale. Tali faglie rappresentano settori ad elevato rischio sismico, originando la quasi totalità dei terremoti catastrofici che hanno colpito la Calabria in epoca storica: il terremoto della Valle del Crati del 1183 (M=6.74), la crisi sismica della Calabria meridionale del 1783 (M=6.62-7.02), terremoti della Calabria centrale del 1638 (M=7.03) e del 1905 (M=7.04), i terremoti del Cosentino del 1835 (M=6.20), 1854 (M=6.21) e 1870 (M=6.10), fino al terremoto di Reggio e Messina del 1908 (M=7.10).

In termini strettamente sismologici, la **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra la distribuzione degli epicentri dei terremoti inclusi nel Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, CPTI15 v4.0 (Rovida et al., 2022). Assieme agli epicentri sono riportate le sorgenti sismiche del modello di zone sismogenetiche ZS9 (Meletti et al., 2008), alla base dell'attuale mappa di pericolosità del territorio italiano associata alle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2008 e NTC2018).

All'interno dell'area calabra si identificano due zone sismogenetiche caratterizzate da livelli di sismicità tra i più elevati: ZS929 sul lato tirrenico della regione e ZS930 sul lato del Mar Ionio. I terremoti con maggiore magnitudo hanno interessato i bacini del Crati (a Nord), del Savuto (a Centro) e del Mesima (a Sud di Calabria) fino allo Stretto di Messina (zona 929). Questi eventi comprendono la sequenza del 1783 (Calabria) ed i terremoti del 1905 (Calabria meridionale) e 1908 (Calabria meridionale-Messina). Viceversa, sul lato ionico della Calabria, solo 4 eventi hanno magnitudo superiore a 6, tra i quali il terremoto del 1638 (Calabria) appare come l'evento maggiormente energetico.

Procedendo verso nord, nell'Appennino meridionale troviamo la zona 927 ad includere l'area caratterizzata dal massimo rilascio di energia legata alla distensione che ha interessato l'Appennino meridionale (es. Patacca et al., 1990) a partire da ca. 0.7 Ma. La ZS927 è sede di alcuni tra i maggiori rilasci di energia della storia sismica italiana, come ad es. quello di Val d'Agri del 1857.

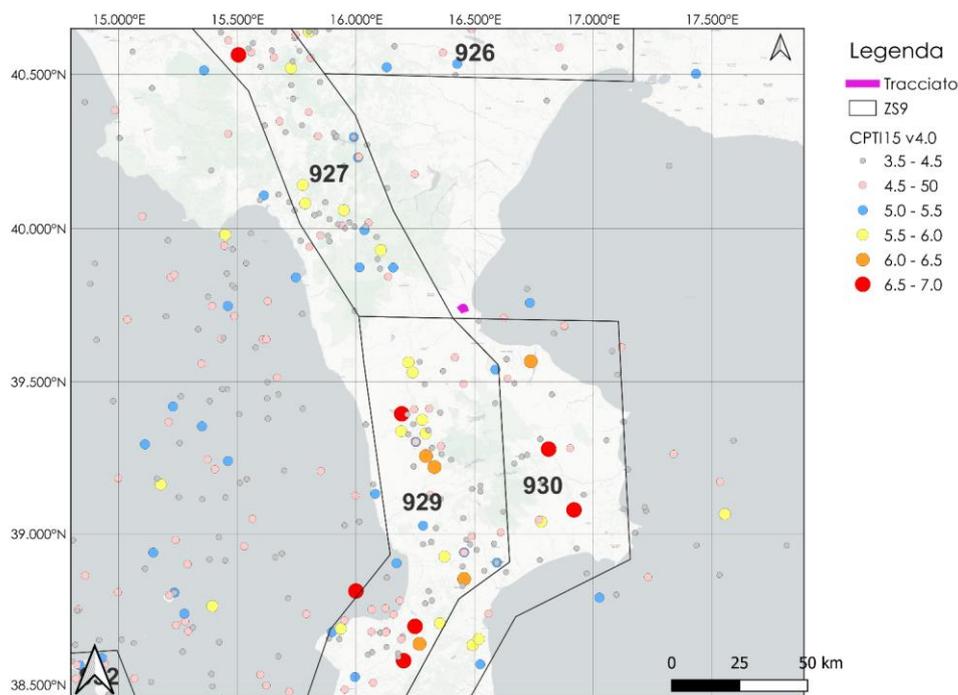


Figura 4.2 – Contesto sismo-tettonico della regione estesa nell’intorno del tracciato di progetto: i poligoni in nero rappresentano i confini delle sorgenti sismogenetiche del modello ZS9 (Meletti et al., 2008), i cerchietti colorati rappresentano gli epicentri dei terremoti inclusi nel Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15 v4.0).

I lineamenti di faglia più prossimi ai siti di progetto (vedi l’estratto dal database italiano delle zone sismogenetiche DISS3.3.0 di **Errore. L’origine riferimento non è stata trovata.**) sono costituiti da sistemi di faglie composite (CSS), all’interno dei quali si classificano alcune sorgenti individuali (ISS), e le zone di subduzione.

Si segnala in prossimità del tracciato di progetto, a nord-est, il sistema di faglie composite *ITCS104: Amendolara*, caratterizzato da una magnitudo massima di 6.7 e una profondità compresa tra 1 e 10 km. A tale sistema si associa il terremoto del 24 aprile 1836 di Mw 6.2, causa del maremoto che inondò la costa settentrionale della Calabria. Altri eventi associati a questa sorgente sono quelli del dicembre 1824 (Mw 5.4), del giugno 1917 (Mw 5.5) e dell’aprile 1988 (Mw 4.6).

A ovest del tracciato di progetto è presente il sistema *ITCS033: Pollino*, caratterizzato da una magnitudo massima di 6.4 e una profondità compresa tra 1 e 10 km. Il sistema è di tipo normale, con immersione sud-ovest. A tale sistema si associa il terremoto del gennaio 1708 (Mw 5.6). Si segnala la presenza della sorgente individuale *ITIS009: Castrovillari*.

Inoltre, è possibile evidenziare come di interesse la zona di subduzione ITSD001 “Arco Calabro”, una porzione del margine tra le placche dell’Eurasia e dell’Africa, come conseguenza della subduzione della crosta oceanica ionica sotto il margine meridionale della placca europea. Nei secoli scorsi questa zona è stata colpita da diversi terremoti con $M > 6$. Il più grande di essi è costituito dall’evento del 28 dicembre 1908 nello Stretto di Messina ($M_w=7.1$).

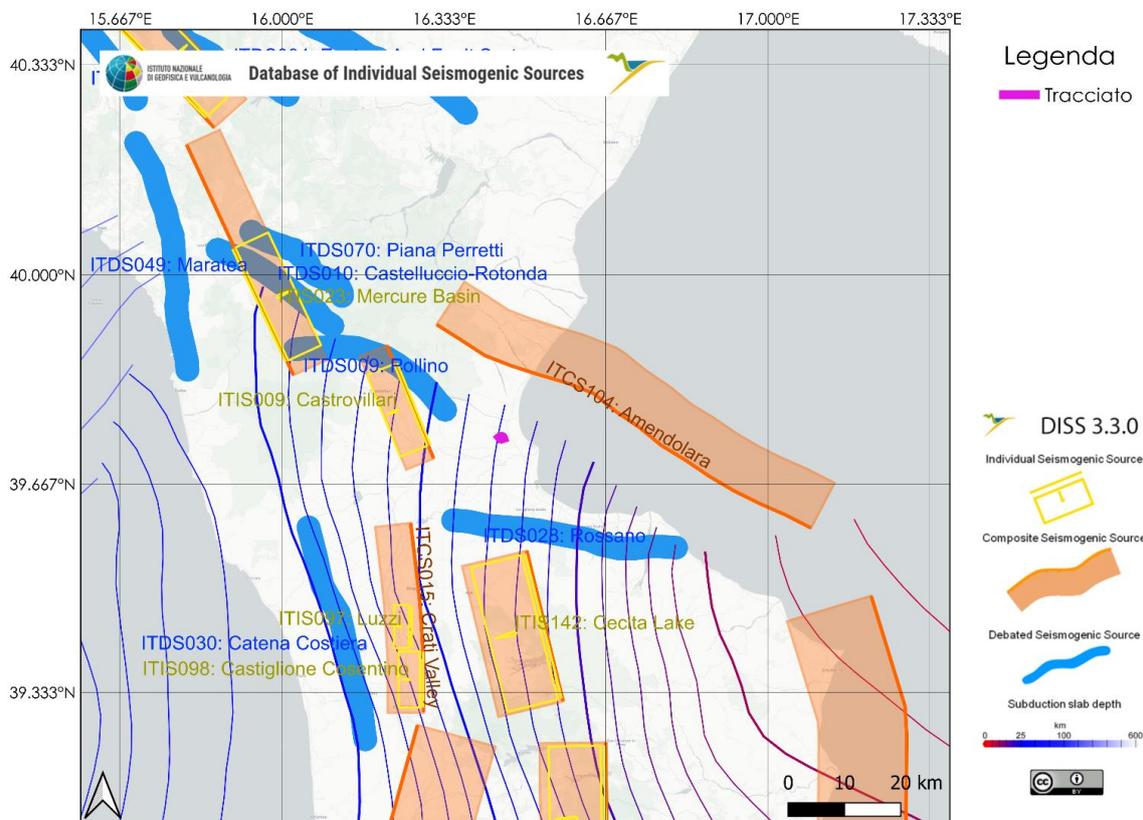


Figura 4.3 – Sorgenti sismogenetiche individuali e composite dal “Database of Individual Seismogenic Sources” (DISS 3.3.0) rilevanti per il tracciato di progetto.

4.3 Pericolosità sismica di base

La pericolosità sismica essa è intesa in senso probabilistico come lo scuotimento del suolo atteso in un dato sito con una certa probabilità di eccedenza in un dato intervallo di tempo, ovvero la probabilità che un certo valore di scuotimento si verifichi in un dato intervallo di tempo.

Questo tipo di stima si basa sulla definizione di una serie di elementi di input (quali catalogo dei terremoti, zone sorgente, relazione di attenuazione del moto del suolo, ecc.) e dei parametri di riferimento (per esempio: scuotimento in accelerazione o spostamento, tipo di suolo, finestra temporale, ecc.).

Gli studi di pericolosità sono utilizzati, tra gli altri, nelle analisi di sito, per localizzare opere critiche dal punto di vista della sicurezza, del rischio o dell'importanza strategica. Valutare la pericolosità significa, in questo caso, stabilire la probabilità di occorrenza di un terremoto di magnitudo (o PGA) superiore al valore di soglia stabilito dagli organi politici/decisionali, portando all'eventuale scelta di aree diverse.

Con l'OPCM n. 3519 del 28.04.2006 è stata approvata la “Mappa di pericolosità sismica del territorio Nazionale” espressa in termini di accelerazione massima al suolo (a_{max}).

Poiché l'INGV fornisce mappe di pericolosità sismica ricavate fissando un periodo di riferimento V_R pari a 50 anni ($V_n = 50$ anni, $C_u=1$), è stato necessario calcolare la probabilità di superamento P_{VR} in 50 anni per una costruzione di classe d'uso III ($C_u=1.5$).

Il periodo di ritorno T_R allo stato limite SLV ($P_{VR} = 10\%$), calcolato secondo le prescrizioni contenute al paragrafo 3.2.1 delle NTC18, per una costruzione avente un periodo di riferimento $V_R=112.5$ anni risulta essere:

$$T_r = 1068 \text{ anni}$$

È possibile calcolare la probabilità di superamento P_{VR} fissando un periodo di ritorno $T_R = 1068$ anni e un periodo di riferimento $V_R = 50$ anni mediante la seguente formula:

$$P_{VR} = 1 - e^{\left(-\frac{50 \text{anni}}{T_r}\right)} = 4.60\%$$

ossia una probabilità di superamento prossima al 5%.

Dall'analisi della "Mappa interattiva della pericolosità sismica" del territorio nazionale, edita dall'INGV, si evince, per il territorio di Sibari una probabilità pari al 5% di raggiungimento o superamento di un'accelerazione di picco compresa tra 0.175 e 0.200 g su terreno rigido nell'intervallo temporale di 50 anni.

Tale classificazione è basata su un'approssimazione dei valori e della distribuzione del parametro a_g secondo i limiti amministrativi (criterio "zona dipendente").

Con l'entrata in vigore del D.M. 14 gennaio 2008 la stima dei parametri spettrali necessari per la definizione dell'azione sismica di progetto (accelerazione del moto del suolo, intensità al sito, spettro di sito) viene effettuata calcolandoli direttamente per il sito in esame, utilizzando le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento (riportato nella tabella 1 dell'Allegato B del D.M. 14 gennaio 2008).

L'approccio "sito dipendente" della nuova normativa permette di riferirsi, per ogni costruzione, ad un'accelerazione di riferimento propria in relazione sia alle coordinate geografiche dell'area di progetto, sia alla vita nominale dell'opera stessa.

Modello di pericolosità sismica MPS04-S1

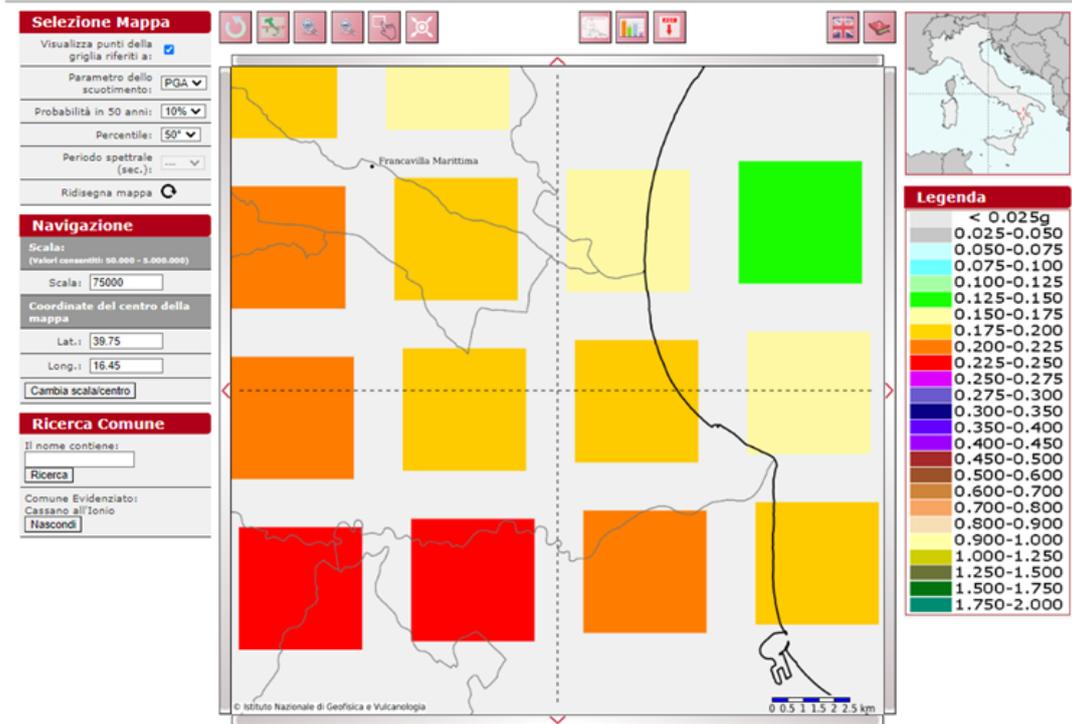


Figura 4.4 – Griglia Normativa di Pericolosità Sismica di Base.

4.4 Caratterizzazione sismica

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, la Normativa Italiana (D.M. 17/01/2018), prevede la valutazione della risposta sismica locale mediante specifiche analisi come definite al §7.11.3 del D.M. 17/01/2018, oppure in assenza di tali analisi, attraverso un approccio semplificato che si basa sulla individuazione di categorie di sottosuolo, come riportato nella Tabella 4.1.

Tabella 4-1 Categorie sismiche dei terreni per le quali è utilizzabile la procedura semplificata

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

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

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

con:

- h_i spessore dell' i -esimo strato;
- $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	COLLEGAMENTO DIRETTO CON LE LINEE METAPONTO-REGGIO CALABRIA E COSENZA - SIBARI					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA BRETELLA DI SIBARI (CS)					
Analisi di risposta sismica locale	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RC2V	00	R 11 RH	GE 00 06 001	A	18 di 48

riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

4.4.1 *Categorie di sottosuolo*

Di seguito sono riassunti i risultati delle indagini geofisiche realizzate durante la campagna di indagini a supporto della presente fase progettuale, utili ai fini della caratterizzazione sismica dell'areale di progetto. In particolare, sono state eseguite 6 prove tipo MASW e 1 prova tipo Down-Hole.

Tabella 4-2 – MASW eseguite per il PFTE – Bretella di Sibari (Italferr 2023).

PROVE GEOFISICHE					
ID	DATA ESECUZIONE	Coordinate WGS 84		V_{Seq} (m/s)	Categoria suolo (NTC 2018)
		E	N		
MASW01	Gennaio 2023	16.448317°	39.741556°	233	C
MASW02	Gennaio 2023	16.451707°	39.742717°	223	C
MASW03	Gennaio 2023	16.451298°	39.741916°	214	C
MASW04	Gennaio 2023	16.454301°	39.742395°	189	C
MASW05	Gennaio 2023	16.455460°	39.740592°	212	C
MASW06	Gennaio 2023	16.454340°	39.740924°	204	C

I valori di $V_{s,eq}$ risultano compresi nell'intervallo 180-360 m/s. In accordo alla Tabella 3.2.II delle NTC2018, si assumerà la categoria di suolo C per l'intero tracciato di progetto.

4.4.2 *Amplificazione stratigrafica e topografica*

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, la Normativa Italiana (D.M. 17/01/2018) prevede che vengano presi in considerazione gli effetti di amplificazione stratigrafica e topografica. Per tener conto di tali effetti di sito, nei casi in cui il sottosuolo può essere classificato secondo un approccio semplificato e in mancanza di indagini accurate che permettano la definizione di un modello di sottosuolo per la realizzazione di più rigorose analisi di risposta sismica locale, la norma prescrive che la forma spettrale su suolo elastico di categoria A venga modificata attraverso il coefficiente stratigrafico S_S , il coefficiente topografico S_T e il coefficiente C_c , che modifica il valore del periodo T_c .

Il coefficiente S_S per la categoria di suolo C si ottiene dalla seguente espressione (vedi Tabella 3.2.IV del par. 3.2.3 delle NTC2018):

$$S_S = 1.00 \leq 1.70 - 0.60 \cdot F_o \cdot a_g / g \leq 1.50$$

Per ciò che concerne l'amplificazione topografica, i siti di progetto si collocano su superficie sostanzialmente pianeggiante (cat. T1 - Superficie pianeggiante e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$, in accordo alla Tabella 3.2.III al par.3.2.2. delle NTC2018), o comunque non attraversa sezioni di cresta o mezza costa. Pertanto, il fattore di amplificazione topografica risulta pari a:

$$S_T = 1$$

4.4.3 Azione sismica di progetto

Con il riferimento al regolamento regionale [13], per la definizione dell'azione sismica di progetto, nel presente studio è stata condotta una analisi di risposta sismica locale monodimensionale sito specifica.

In particolare, nell'articolo 6 dell'Allegato 1 al suddetto regolamento, "il livello di analisi richiesto per le opere appartenenti alla classe d'uso III e IV va effettuato mediante Analisi Specifica".

I dati di input e conseguenti risultati ottenuti sono riportati nel capitolo 7.

5 CENNI TEORICI SULL'ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

5.1 Generalità

Il moto generato da un evento sismico in superficie dipende da un insieme di fenomeni fisici che possono essere ragionevolmente raggruppati nelle categorie: (1) meccanismo di sorgente, (2) propagazione delle onde sismiche dalla sorgente al sito e (3) effetti di sito. Le prime due categorie afferiscono al moto sismico “in ingresso” per il sito di interesse. Tale moto può subire modifiche significative, a causa dell'interazione delle onde sismiche con le condizioni locali proprie del sito in esame. Queste ultime indicano sia l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche dei depositi di terreno sia le proprietà fisico-meccaniche dei materiali che li costituiscono. La valutazione quantitativa delle modifiche subite dal moto sismico di ingresso al sito, si indica con il termine di *effetti di sito* o *risposta sismica locale*. Il moto risultante alla superficie del deposito in condizioni di campo libero (*free-field motion*), cioè di assenza di manufatti, in generale differisce dal moto al basamento roccioso (*bedrock motion*) in termini di ampiezza, durata e contenuto in frequenza.

Le situazioni stratigrafiche e morfologiche in cui le condizioni locali possono determinare una modifica del segnale sismico sono essenzialmente tre (Figura 5.1): (i) depositi a superficie libera piana, caratterizzati da stratificazione sostanzialmente orizzontale e trascurabili variazioni laterali, in cui si propagano onde di volume in direzione sub-verticale (effetti stratigrafici 1D); (ii) depositi di valle con bordi e morfologie del substrato irregolari, dove le onde sismiche possono subire fenomeni di rifrazione e riflessione, con generazione di onde di superficie (effetti di bordo o di valle); (iii) rilievi isolati, pendii e canyons dove si verificano fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche per effetto della particolare morfologia superficiale (effetti topografici).

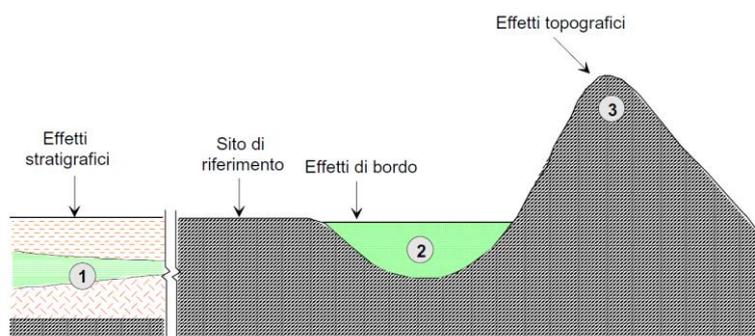


Figura 5.1 – Tipiche configurazioni responsabili di effetti di sito (stratigrafici, di bordo e topografici), rispetto ad un sito roccioso di riferimento con superficie libera orizzontale [6].

5.2 Analisi lineare equivalente

Il modello lineare equivalente consente di portare in conto, in modo semplificato, la non linearità del comportamento dei terreni. In tale metodo si continua a far riferimento ad un modello visco-elastico lineare per il terreno, in cui però i parametri di rigidezza (G) e di smorzamento (D) risultano compatibili con il livello di deformazione indotto dal sisma (γ). L'idea alla base dei modelli lineari equivalenti è quella di definire i parametri

$G(\gamma_{eq})$ e $\xi(\gamma_{eq})$, costanti durante l'analisi, note le curve di decadimento $G(\gamma)$ e di smorzamento $\xi(\gamma)$ dei materiali. Il criterio di equivalenza che si introduce al fine di definire la deformazione di scorrimento equivalente (γ_{eq}), partendo dalla storia temporale $\gamma(t)$, è quello proposto da Idriss e Sun (1992) attraverso la seguente relazione:

$$\gamma_{eq} = [(M-1)/10] \gamma_{max}$$

dove M è la magnitudo di riferimento e γ_{max} è il valore massimo della deformazione di scorrimento indotta dall'input sismico considerato. Poiché il livello di deformazione calcolato attraverso il metodo lineare equivalente dipende dai parametri di rigidità e di smorzamento, e viceversa, la procedura di risoluzione è di tipo iterativo (Figura 5.2).

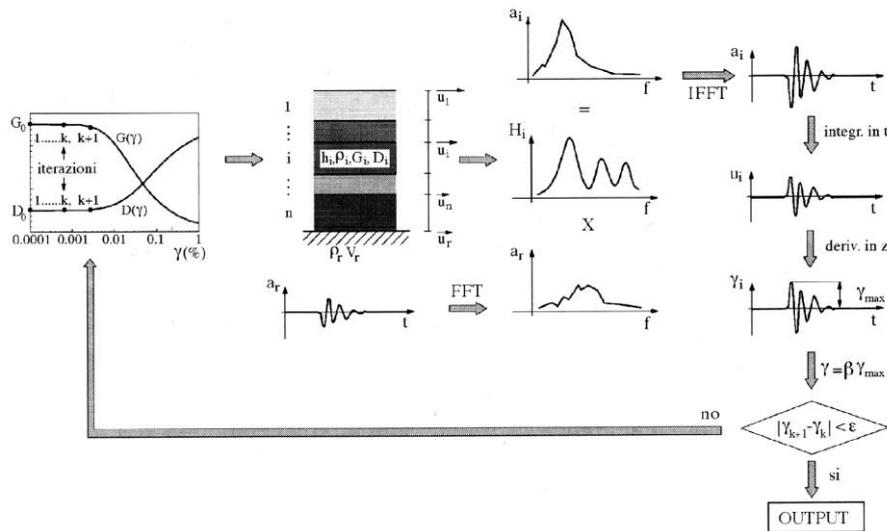


Figura 5.2 – Processo iterativo adottato nelle analisi di risposta sismica locale con modello lineare equivalente.

5.3 Analisi non-lineare

I metodi non lineari consentono una modellazione più accurata del comportamento meccanico del terreno. Tali metodi operano nel dominio del tempo integrando le equazioni del moto. Se si considera un deposito di terreno infinitamente esteso lateralmente, sollecitato da un input sismico orizzontale al bedrock (Figura 5.1), la sua risposta è governata dall'equazione indefinita di equilibrio in direzione orizzontale, che scritta in termini di velocità fornisce:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{\partial \dot{u}}{\partial t}$$

Equazione 1

dove ρ è la densità del terreno. Utilizzando il metodo alle differenze finite è possibile trasformare l'equazione differenziale che governa il problema in un sistema di equazioni algebriche. In particolare, suddividendo il deposito di terreno di spessore H in N sotto-strati di spessore Δz (Figura 5.3), ed integrando nel tempo con passo di integrazione Δt , è possibile definire i termini della Equazione 1 in maniera approssimata:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} \cong \frac{\tau_{i+1}^n - \tau_i^n}{\Delta z}$$

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} \cong \frac{\dot{u}_i^{n+1} - \dot{u}_i^n}{\Delta t}$$

Equazione 2

dove la generica variabile $x_i^n = x(z = i\Delta z, t = n\Delta t) = x(z_i, t_n)$. Sostituendo entrambe le relazioni riportate nell'Equazione 2 all'interno dell'Equazione 1 si ottiene

$$\frac{\tau_{i+1}^n - \tau_i^n}{\Delta z} = \rho \frac{\dot{u}_i^{n+1} - \dot{u}_i^n}{\Delta t}$$

Equazione 3

Dalla precedente è possibile esplicitare, per lo strato i-esimo, la velocità al tempo t_{n+1} in funzione della velocità e delle tensioni tangenziali valutati all'istante precedente t_n :

$$\dot{u}_i^{n+1} = \dot{u}_i^n + \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} (\tau_{i+1}^n - \tau_i^n)$$

Equazione 4

Risolvendo l'Equazione 4 in tutti gli N strati in cui il deposito è suddiviso, si determina il profilo di velocità al tempo t_{n+1} . Le velocità così determinate rappresenteranno le velocità iniziali del passo di integrazione successivo. Per la risoluzione della precedente mediante integrazione numerica, è necessario imporre le condizioni al contorno. In corrispondenza della superficie libera, le tensioni tangenziali devono risultare nulle per ogni istante t_n , per cui dall'Equazione 4 si ottiene

$$\dot{u}_1^{n+1} = \dot{u}_1^n + \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} \tau_2^n$$

Equazione 5

Per quanto riguarda le condizioni al contorno alla base della colonna, assumendo il bedrock infinitamente rigido, la sua velocità può essere specificata direttamente come input

$$\dot{u}_{N+1}^{n+1} = \dot{u}_{br}^{n+1}$$

Equazione 6

Il processo di integrazione, per ciascun istante temporale, parte dalla conoscenza della velocità in corrispondenza del bedrock, per poi procedere, per ogni istante temporale, verso la superficie del deposito. Il calcolo delle velocità nell'Equazione 4 richiede la conoscenza delle tensioni tangenziali. La procedura di risoluzione, a partire dalle velocità, permette quindi la risoluzione del problema in termini di spostamenti, deformazioni di scorrimento ed infine di tensioni tangenziali. Queste ultime vengono ricavate in ragione del legame costitutivo adottato in ogni strato i-esimo del modello di calcolo. La variazione degli spostamenti per ogni istante di tempo può essere determinata tramite la seguente relazione:

$$\Delta u_i^{n+1} = \dot{u}_i^{n+1} \Delta t$$

Equazione 7

Da cui si ricavano gli spostamenti orizzontali

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \Delta u_i^{n+1}$$

Equazione 8

e, dunque, anche le deformazioni di scorrimento

$$\gamma_i^{n+1} = \frac{u_{i+1}^{n+1} - u_i^{n+1}}{\Delta z}$$

Equazione 9

Le tensioni tangenziali vengono infine determinate in funzione del legame costitutivo.

I modelli non lineari, a differenza dei modelli lineari equivalenti, possono essere formulati in termini di tensioni efficaci, consentendo di tener in conto sia dell'accoppiamento volumetrico-deviatorico sia della resistenza dei materiali

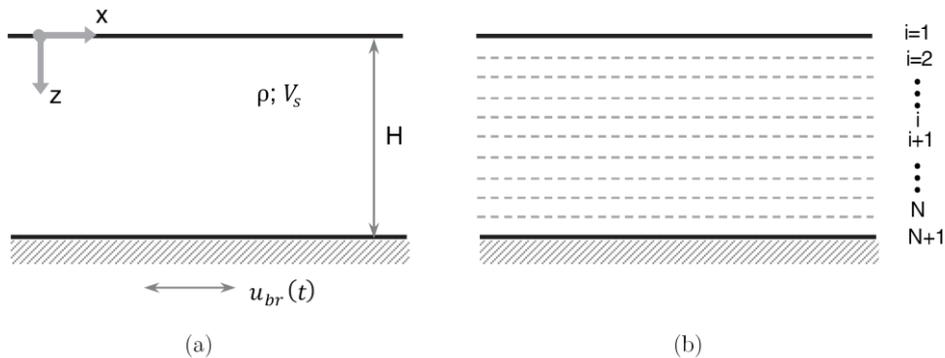


Figura 5.3 – (a) definizione geometrica del problema (b) discretizzazione del deposito in N sotto-strati.

6 ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Al fine di cogliere le modifiche del moto sismico correlabili alla stratigrafia (effetti stratigrafici 1D), nel presente capitolo si riporta l'analisi di risposta locale realizzata con riferimento alla verticale di indagine relativa al sondaggio geognostico S2-DH.

Tale approccio monodimensionale, sebbene in generale sia semplificativo, nel presente caso è pienamente coerente con la morfologia e le condizioni lito-stratigrafiche riscontrate per il sito in esame.

Le analisi di risposta sismica locale monodimensionale sono state condotte con il software **Deepsoil** [10] impiegando un **modello lineare equivalente**, considerando come input sismici i n.7 accelerogrammi selezionati applicati in corrispondenza dell'affioramento roccioso (*outcrop*). Un confronto dei risultati ottenuti è stato infine effettuato impiegando un modello non lineare, considerando come input sismici i medesimi accelerogrammi.

6.1 Definizione input sismico

Per la determinazione della pericolosità sismica di base è necessario partire dall'ubicazione dell'opera e dalle caratteristiche tipiche di vita nominale (V_N) e di Classe d'Uso. In Tabella 6.1 si riportano le coordinate che definiscono la posizione dell'opera e in Tabella 6.2 sono elencate le principali caratteristiche sismiche dell'opera in termini di vita nominale, classe d'uso e periodo di riferimento.

Tabella 6.1 – Coordinate dell'Opera.

	Coord.
Latitudine	39.74785
Longitudine	16.45322

Tabella 6.2 – Vita nominale, classe d'uso e periodo di riferimento assunti per l'opera.

Vita Nominale V_N (anni)	Classe d'Uso (-)	Coeff. D'Uso (-)	Periodo di riferimento V_R (anni)
75	III	1.5	112.5

Ai fini della definizione delle forme spettrali, per ciascuna probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento V_R , è necessario determinare i seguenti parametri:

- a_g : accelerazione orizzontale massima su sito di riferimento rigido orizzontale;
- F_0 : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_c^* : valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

La Tabella 6.3 sintetizza i valori dei parametri appena descritti per ciascuno stato limite.

Tabella 6.3 - Parametri delle forme spettrali per ogni Stato Limite

Stato Limite	Tempo di Ritorno – T_R [anni]	Accelerazione Orizzontale Massima al sito – a_g [g]	Fattore di Amplificazione Massima – F_0 [-]	Periodo di Inizio tratto a vel. costante - TC^* [s]
Operatività (SLO)	68	0.078	2.379	0.327
Danno (SLD)	113	0.100	2.395	0.347
Salvaguardia della Vita (SLV)	1068	0.254	2.505	0.429
Collasso (SLC)	2193	0.327	2.562	0.445

La Figura 6.1 riporta gli spettri di risposta elastici della componente orizzontale per ciascuno stato limite, con riferimento alla categoria di sottosuolo A e topografica T1.

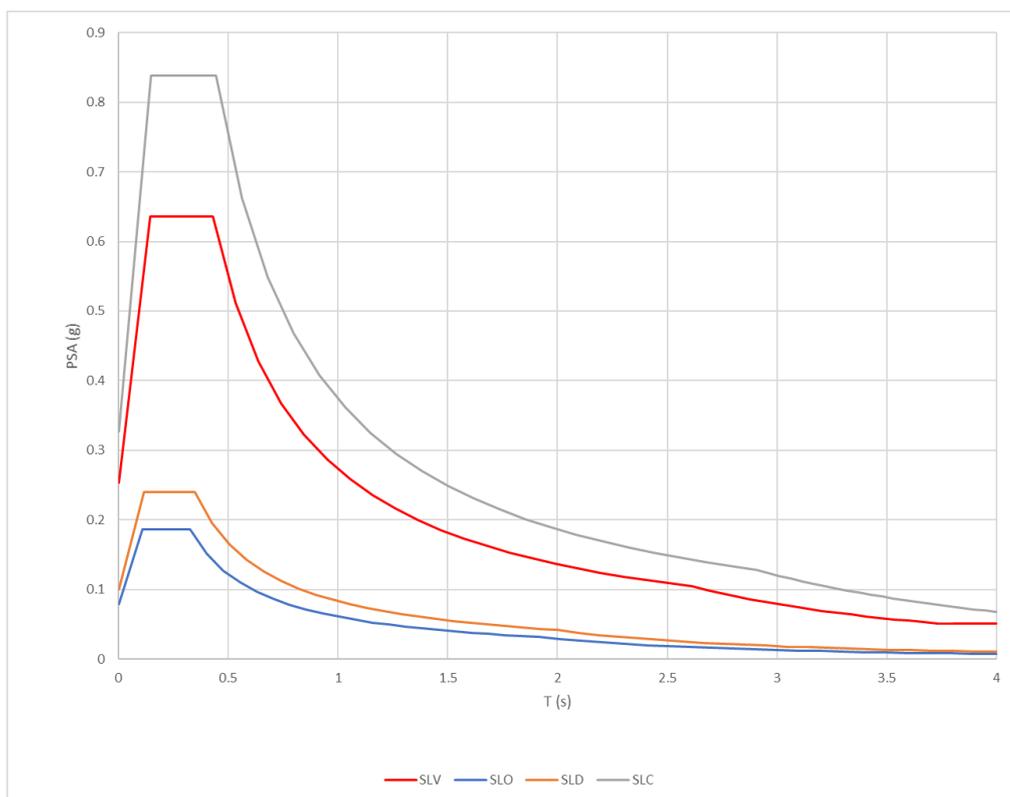


Figura 6.1 – Spettri di risposta elastici della componente orizzontale per ciascuno stato limite per categoria di sottosuolo A e topografica T1.

6.2 Disaggregazione del rischio sismico

Oltre allo spettro di risposta, per la ricerca degli accelerogrammi spettrocompatibili è necessario comprendere statisticamente quali scenari in termini di parametri magnitudo-distanza contribuiscano maggiormente alla pericolosità sismica del sito. In particolare, appoggiandosi al portale dell'INGV [1] è possibile visionare gli scenari suddetti sulla base della probabilità di eccedenza (P_{VR}) in un periodo di riferimento (V_R) pari a 50anni. La Figura 6.2 e la Figura 6.3 riportano rispettivamente la griglia di riferimento e i grafici di disaggregazione per ciascun punto della griglia che definisce il sito in esame.

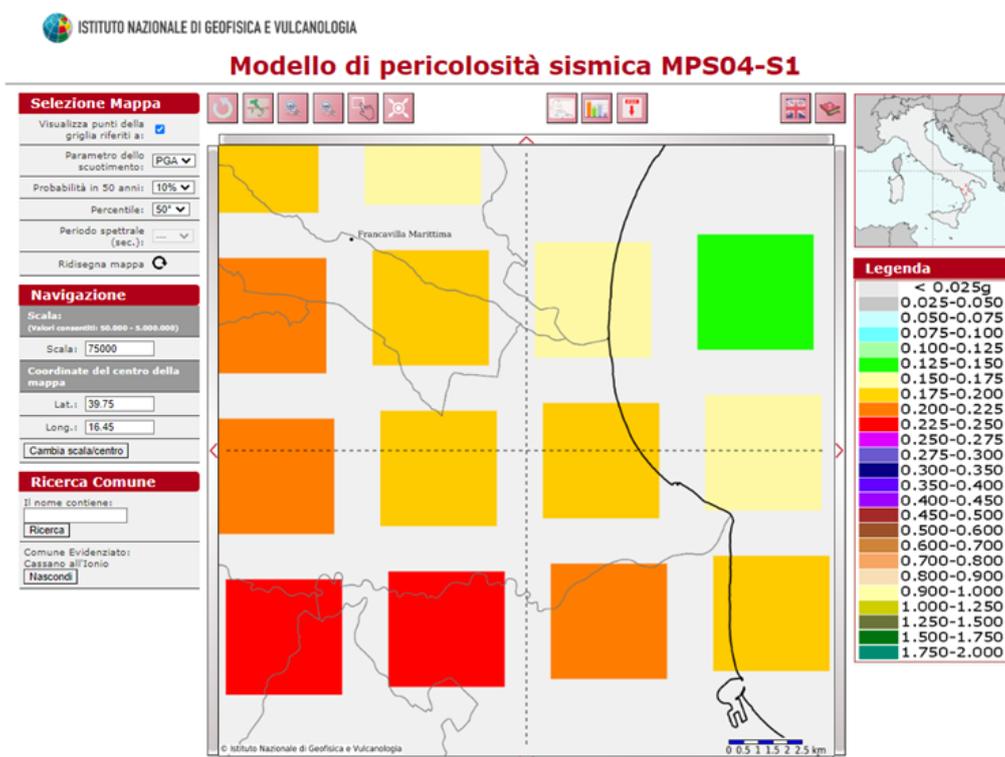


Figura 6.2 – Griglia Normativa di Pericolosità Sismica di Base.

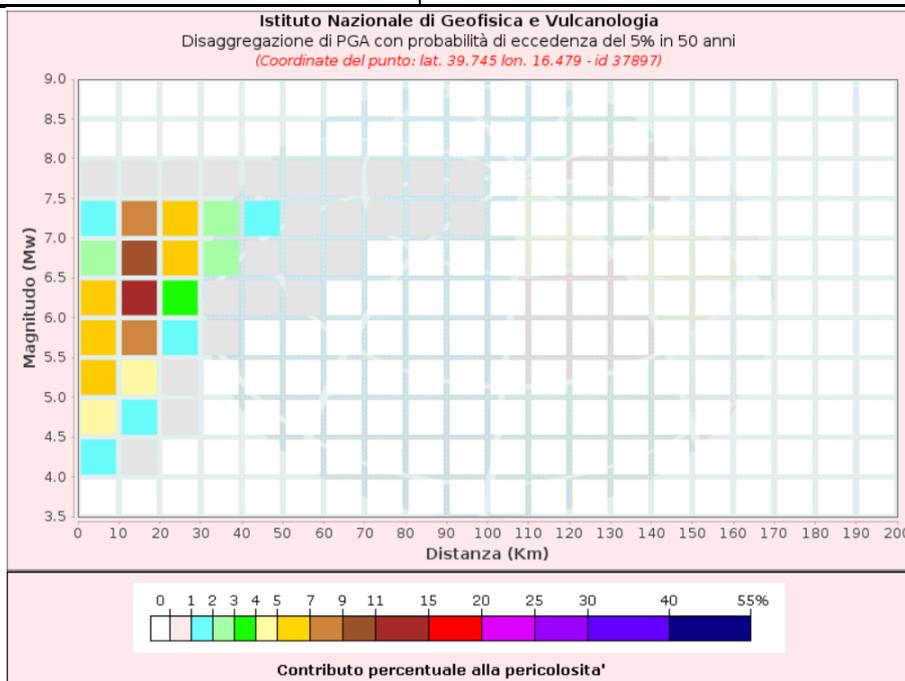


Figura 6.3 – Grafici di disaggregazione nei punti significativi della griglia, in rosso gli scenari considerati significativi.

Sulla base dei risultati dell’analisi di disaggregazione la ricerca degli accelerogrammi spettrocompatibili è stata eseguita per i campi di variabilità magnitudo-distanza riportati di seguito in Tabella 6.4.

Tabella 6.4 – Scenari Magnitudo-Distanza di Riferimento.

	Min	Max
Magnitudo	5.7	6.9
Distanza [km]	0	40

6.3 Individuazione degli accelerogrammi spettrocompatibili

Per la realizzazione di Analisi di Risposta Sismica locale si rende necessaria la selezione di un set di accelerogrammi di input che rappresentino correttamente la pericolosità sismica di base del sito, di per sé sintetizzata mediante lo spettro da normativa su suolo rigido affiorante orizzontale (Categoria di Sottosuolo A e topografica T1).

Le NTC 2018 al paragrafo §3.2.3.6 prescrivono infatti che “L’uso di storie temporali del moto del terreno naturali o registrate è ammesso a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito.” Inoltre “L’uso di storie temporali del moto del terreno artificiali non è ammesso nelle analisi dinamiche di opere o sistemi geotecnici.”

Infine “Le storie temporali del moto del terreno registrate devono essere selezionate e scalate in modo tale che i relativi spettri di risposta approssimino gli spettri di risposta elastici nel campo dei periodi propri di vibrazione di interesse per il problema in esame. Nello specifico la compatibilità con lo spettro di risposta elastico deve essere verificata in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi associati alle storie per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ del 5%. L'ordinata spettrale media non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10% ed uno scarto in eccesso superiore al 30%, rispetto alla corrispondente componente dello spettro elastico in alcun punto dell'intervallo dei periodi propri di vibrazione di interesse per l'opera in esame per i diversi stati limite.”

Verrà quindi selezionato un set di 7 accelerogrammi naturali, registrati su siti rigidi per eventi sismici di magnitudo e distanza dalla sorgente simili allo scenario di pericolosità sismica di base medio da disaggregazione, opportunamente scalati al fine di approssimare entro i limiti prescritti lo spettro da normativa su suolo rigido orizzontale.

Sulla base dello spettro di pericolosità sismica di base riferito allo SLV e degli scenari magnitudo-distanza (Tabella 3.4) è possibile procedere alla selezione di 7 accelerogrammi che siano mediamente spettrocompatibili. La spettrocompatibilità in direzione orizzontale sarà garantita per i periodi di interesse che sono valutati compresi tra **0.00 s e 0.40 s**. A tal riguardo, il periodo di interesse del viadotto VI01 risulta, in media, pari a 0.15 s.

Tale ricerca verrà effettuata utilizzando gli eventi sismici presenti nell'European Strong-motion Database (ESM) attraverso il software REXELweb [9].

In Tabella 6.5 si riportano le caratteristiche dei segnali accelerometrici spettrocompatibili selezionati. Nell'ultima colonna sono riportati i fattori di scala utilizzati al fine di scalare l'accelerazione massima registrata dal segnale con l'accelerazione al suolo secondo spettro normativo di riferimento.

Tabella 6.5 – Caratteristiche registrazioni segnali accelerometrici spettrocompatibili

	Event name	Event ID	Date (YYYYMMDD)	Event Latitude	Event Longitude	Depth (km)	Magnitude	Station Latitude	Station Longitude	PGA Scale Factor
acc1	CENTRAL_ITALY	EMSC-20161030_0000029	20161030	42.8322	13.1107	9.2	6.5	42.55	12.96	4.767
acc2	CENTRAL_ITALY	EMSC-20161030_0000029	20161030	42.8322	13.1107	9.2	6.5	42.75	13.19	0.295
acc3	CENTRAL_ITALY	EMSC-20160824_0000006	20160824	42.6983	13.2335	8.1	6	42.55	12.96	10.812
acc4	CENTRAL_ITALY	EMSC-20160824_0000006	20160824	42.6983	13.2335	8.1	6	42.96	13.05	1.028
acc5	CENTRAL_ITALY	EMSC-20161026_0000095	20161026	42.9087	13.1288	7.5	5.9	42.75	13.04	2.876
acc6	CENTRAL_ITALY	EMSC-20161026_0000095	20161026	42.9087	13.1288	7.5	5.9	42.85	13.18	0.267
acc7	CENTRAL_ITALY	EMSC-20161030_0000029	20161030	42.8322	13.1107	9.2	6.5	43	13.22	2.932

In tabella 6.6 si riportano i più significativi parametri sintetici del moto sismico per gli accelerogrammi selezionati. I simboli in tabella assumono il seguente significato: PGA è la *peak ground acceleration*; PGV è la *peak ground velocity*; PGD è il *peak ground displacement*.

Tabella 6.6 –PGA, PGV e PGD del moto sismico per gli accelerogrammi selezionati.

	PGA (g)	PGV (m/s)	PGD (m)
acc1	0.254	0.19	0.7
acc2	0.254	0.11	0.044
acc3	0.254	0.22	0.15
acc4	0.254	0.15	0.026
acc5	0.254	0.18	0.029
acc6	0.254	0.07	0.0076
acc7	0.254	0.32	0.16

Nelle figure che seguono si riportano, per i 7 accelerogrammi selezionati (già scalati rispetto alla PGA target da normativa), le storie temporali di accelerazione, velocità, spostamento, intensità di Arias [3] e di Housner [4]. Per ogni segnale vengono riportati nelle rispettive figure anche lo spettro di Fourier delle ampiezze e lo spettro di risposta elastico con smorzamento $\xi=5\%$.

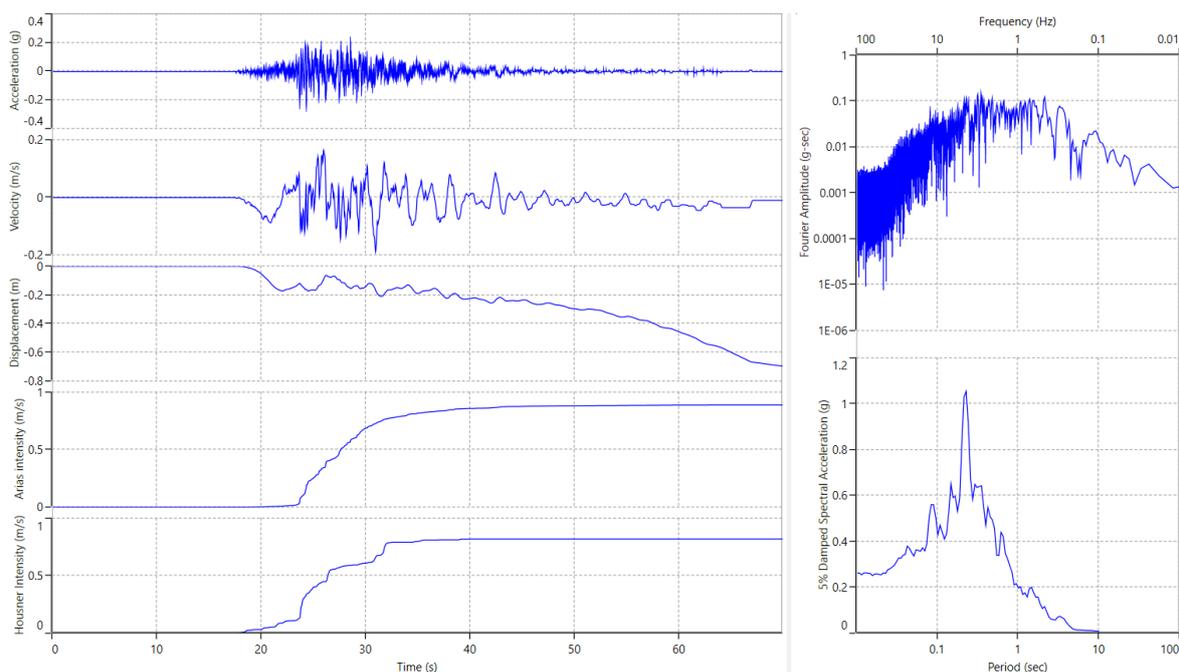


Figura 6.4 – Segnale n°1 (acc1), appartenente a set di 7 segnali spettrocompatibili con spettro normativo di riferimento.

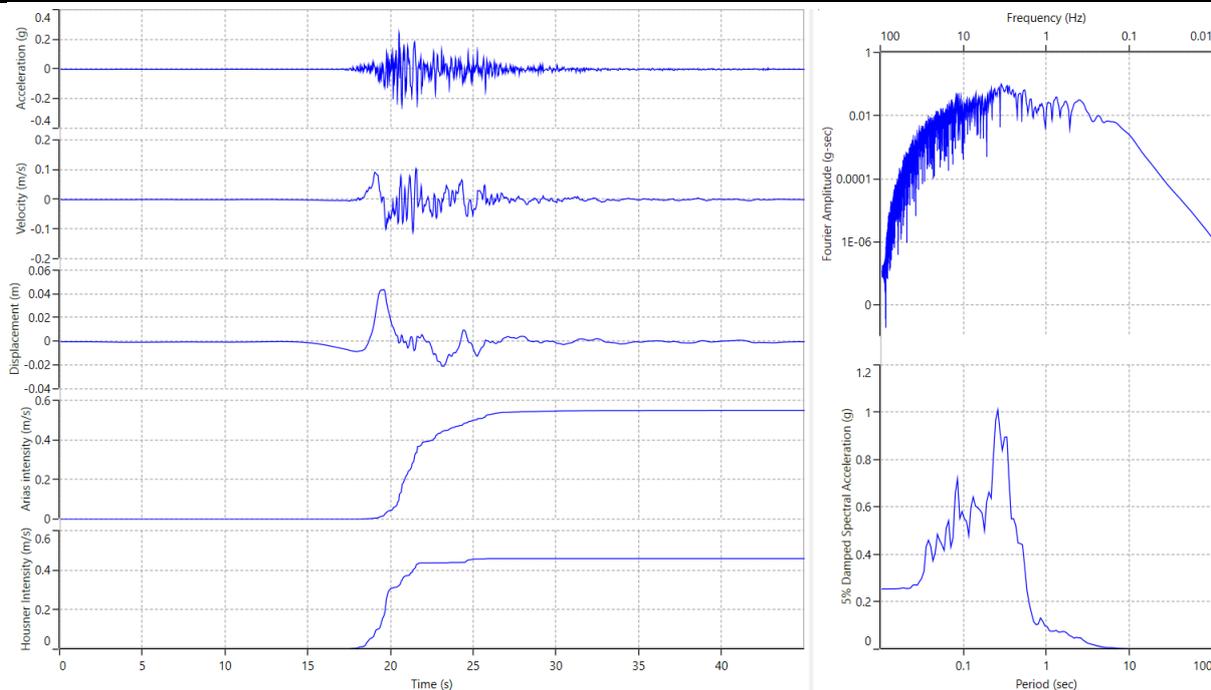


Figura 6.5 – Segnale n°2 (acc2), appartenente a set di 7 segnali spettrocompatibili con spettro normativo di riferimento.

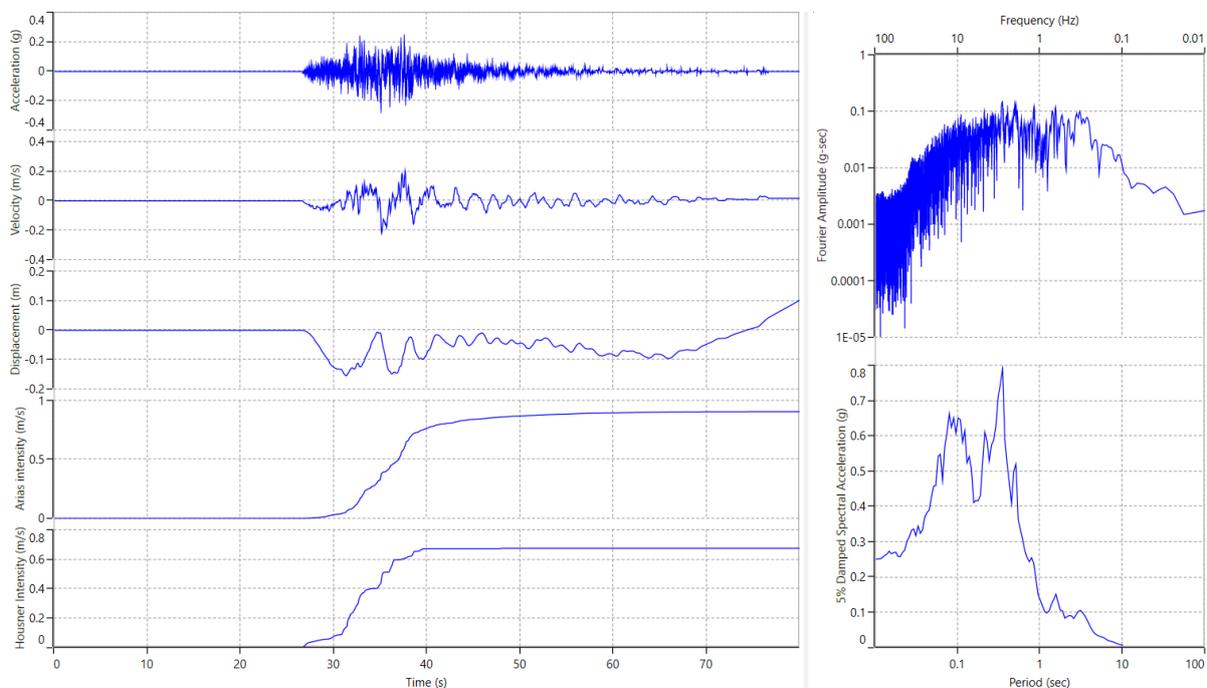


Figura 6.6 – Segnale n°3 (acc3), appartenente a set di 7 segnali spettrocompatibili con spettro normativo di riferimento.

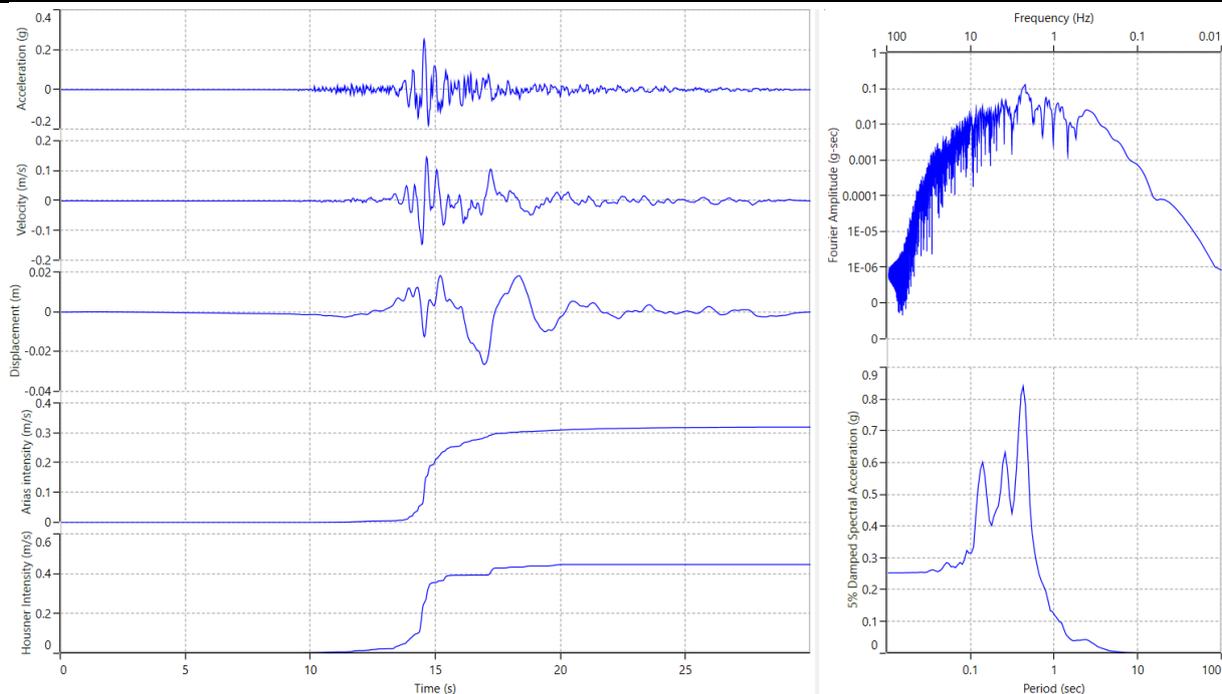


Figura 6.7 – Segnale n°4 (acc4), appartenente a set di 7 segnali spetrocompatibili con spettro normativo di riferimento.

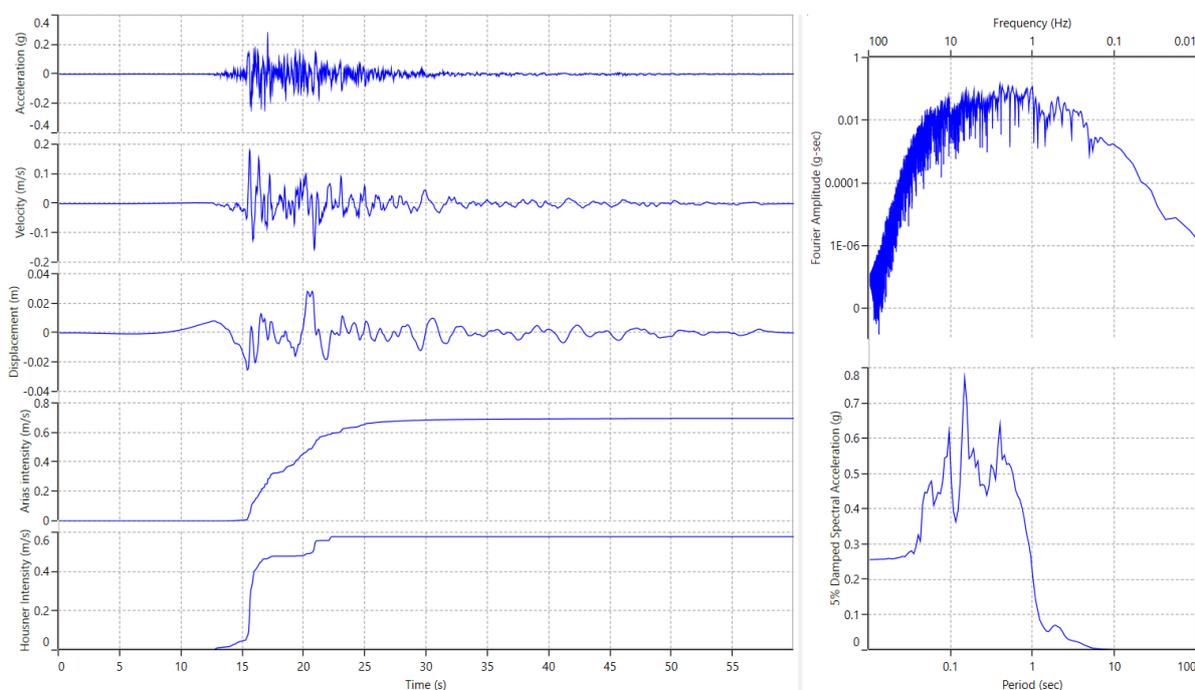


Figura 6.8 – Segnale n°5 (acc5), appartenente a set di 7 segnali spetrocompatibili con spettro normativo di riferimento.

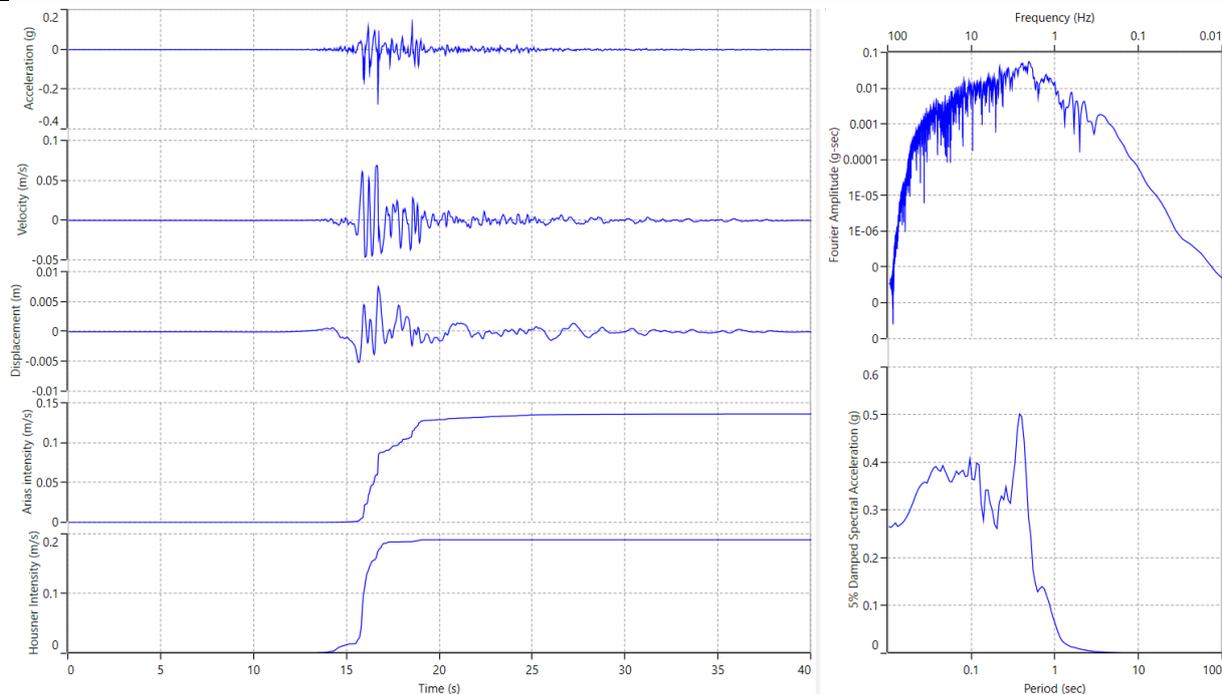


Figura 6.9 – Segnale n°6 (acc6), appartenente a set di 7 segnali spettrocompatibili con spettro normativo di riferimento.

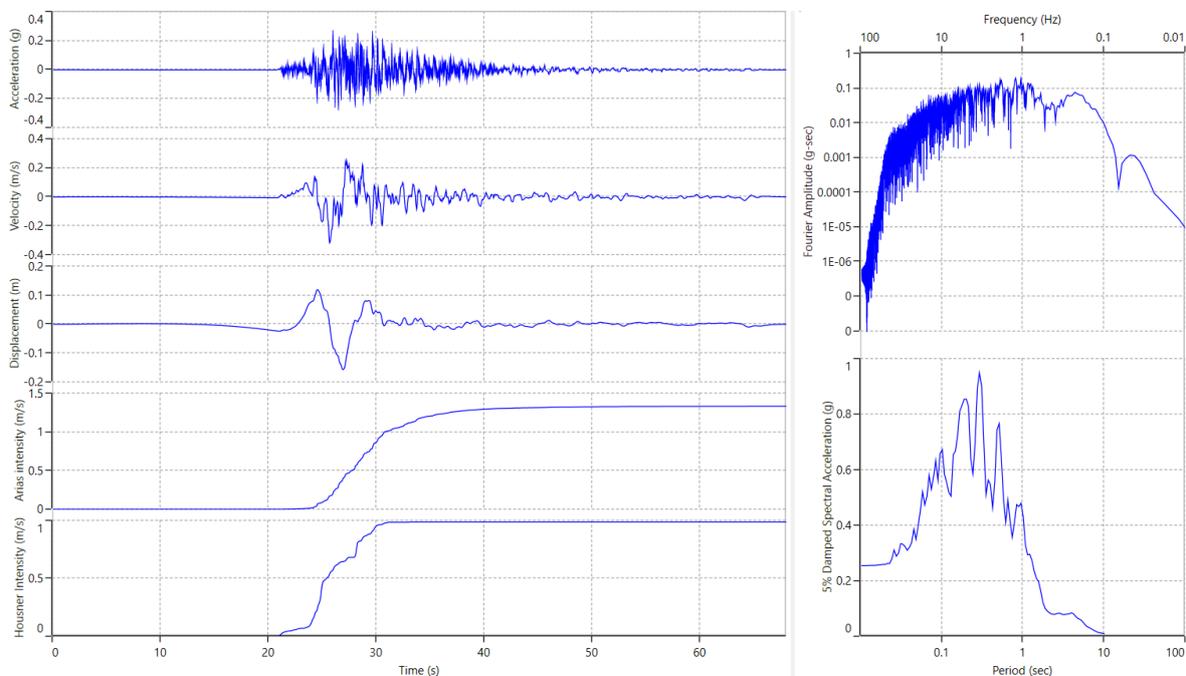


Figura 6.10 – Segnale n°7 (acc7), appartenente a set di 7 segnali spettrocompatibili con spettro normativo di riferimento.

La figura 6.11 riporta gli spettri di risposta elastici per i 7 accelerogrammi selezionati e il relativo spettro di risposta medio.

La Figura 6.12 riporta la sovrapposizione tra spettro di normativa (spettro target) e spettro medio relativo ai 7 accelerogrammi selezionati, con la rappresentazione del range di tolleranza sulle ordinate spettrali (+30% e -10% dallo spettro target) e del campo di variabilità dei periodi in cui tale tolleranza risulta garantita.

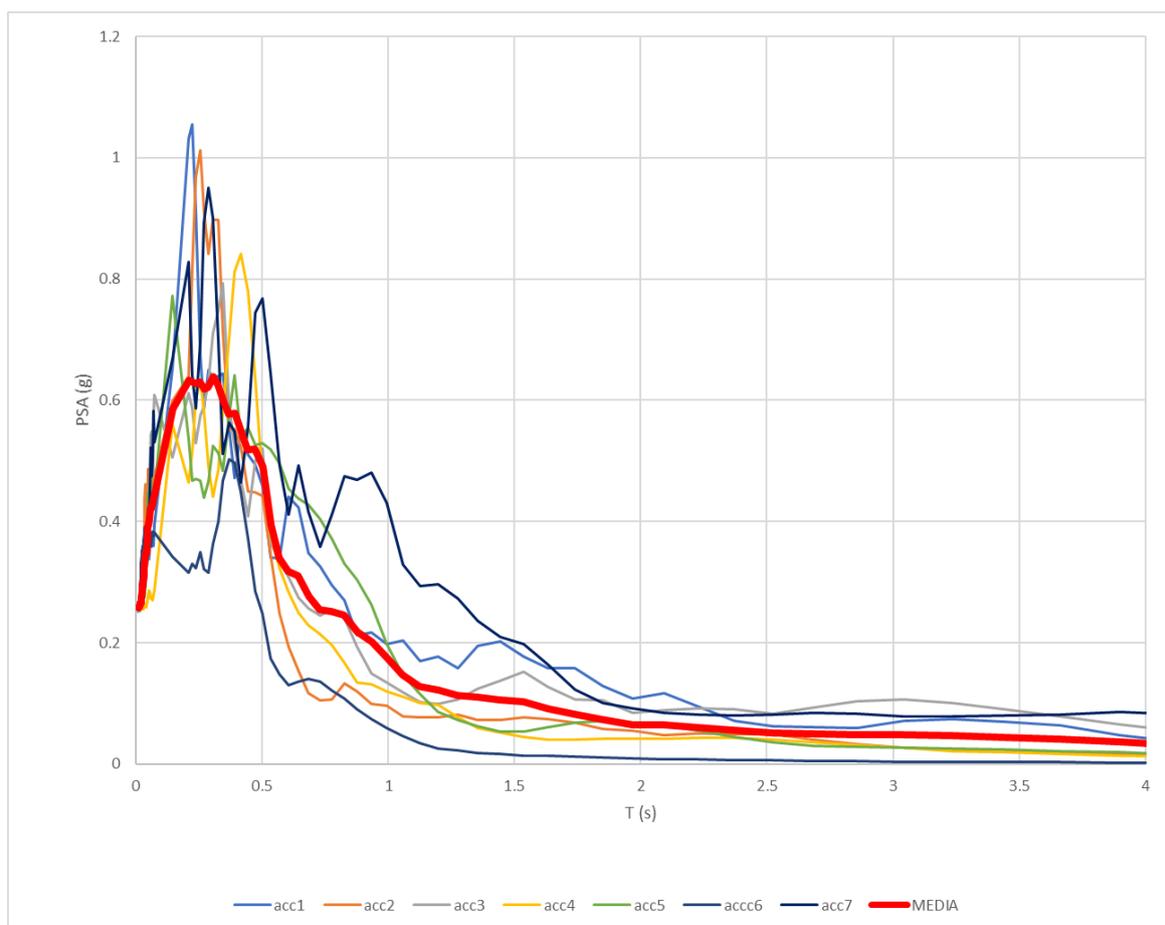


Figura 6.11 – Spettri di risposta elastici per i 7 accelerogrammi selezionati e relativo spettro di risposta medio (smorzamento $\xi=5\%$).

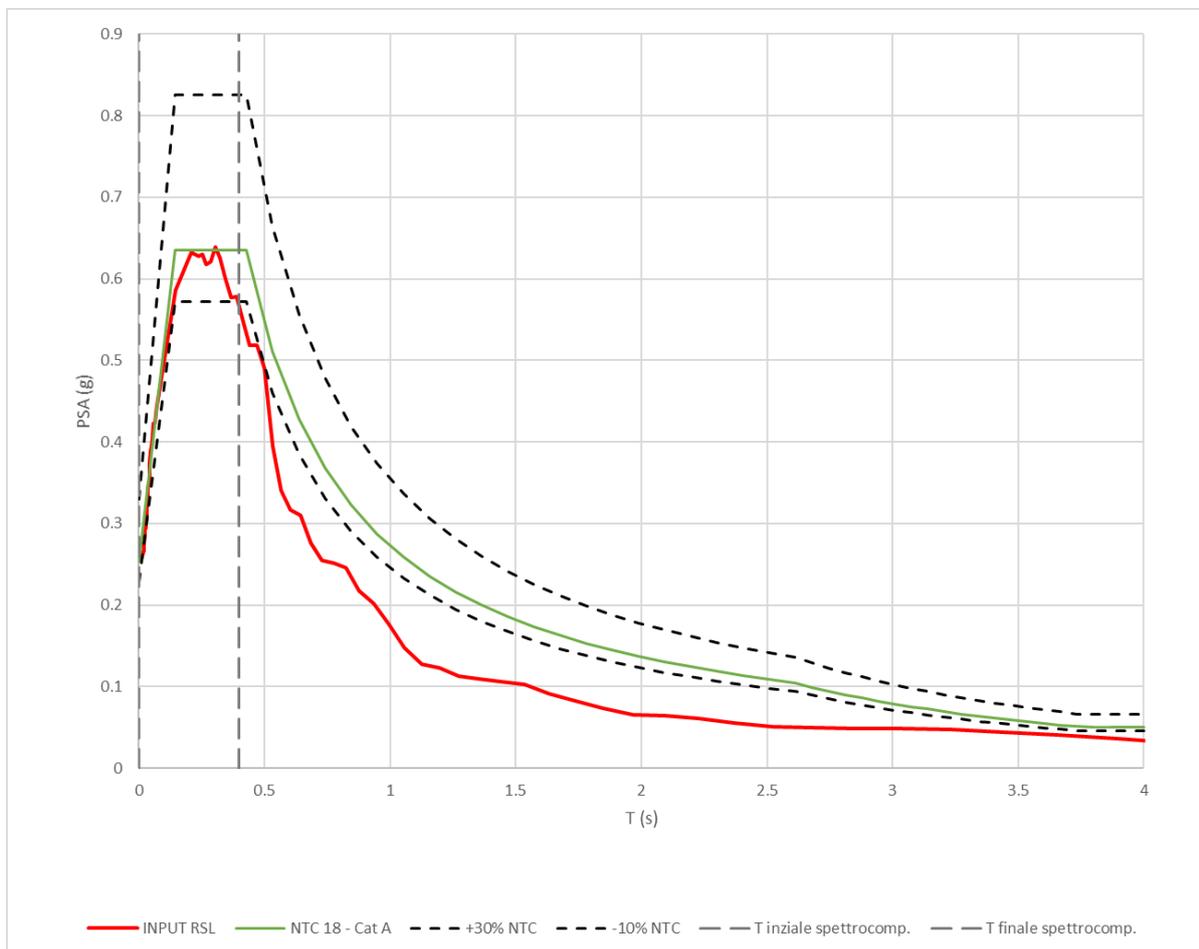


Figura 6.12 – Spettro medio relativo ai 7 accelerogrammi selezionati sovrapposto allo spettro da normativa (target).

6.4 Definizione del modello stratigrafico di sottosuolo

Il sito ricade nella categoria topografica T1, secondo quanto riportato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (NTC18) al paragrafo 3.2.2.

Il profilo di velocità delle onde di taglio con la profondità, adottato come input per l'analisi di risposta sismica locale condotta, è stato assunto con riferimento alla prova down-hole eseguita nel sondaggio geognostico S2-DH (Figura 6.13).

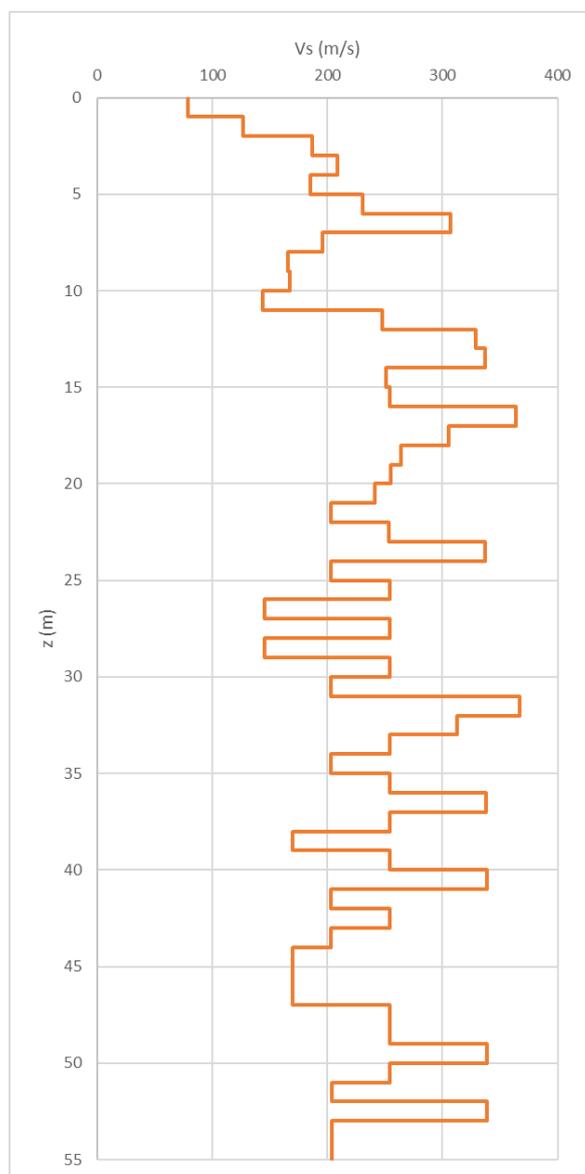


Figura 6.13 – Profilo di velocità delle onde di taglio da prova down-hole – Sondaggio S2-EV.

La profondità del bedrock sismico è stata determinata in modo implicito a partire dai risultati delle prove HVSR previste nella campagna d'indagini. I valori dei picchi di frequenza ottenuti dalle suddette prove e che risultano congruenti con l'assetto litostratigrafico del sito in esame, sono variabili tra 0.57 Hz e 0.62 Hz. Per ulteriori approfondimenti si rimanda all'elaborato RC2V00R69IGGE0000001A.

Tabella 6.7 – Picchi di frequenza da HVSR

Prova	f_r (Hz)
HVSR1	0.56
HVSR2	0.63
HVSR3	0.63
HVSR4	0.59

Al fine di rendere congruente i risultati delle prove geofisiche con le analisi di RSL, la profondità del bedrock sismico è stata assunta, ragionevolmente, pari a 130 m. Ulteriori sondaggi presenti nella banca dati ispra (http://sgi2.isprambiente.it/indagini/scheda_indagine.aspx?Codice=178131) confermano che il bedrock è ubicato a profondità >100m.

Si riporta nella figura seguente le caratteristiche meccaniche degli strati costituenti i depositi relativi alla prova down-hole eseguita nel sondaggio S2-DH. La velocità delle onde di taglio è presa sulla base di quanto misurato nella prova stessa.

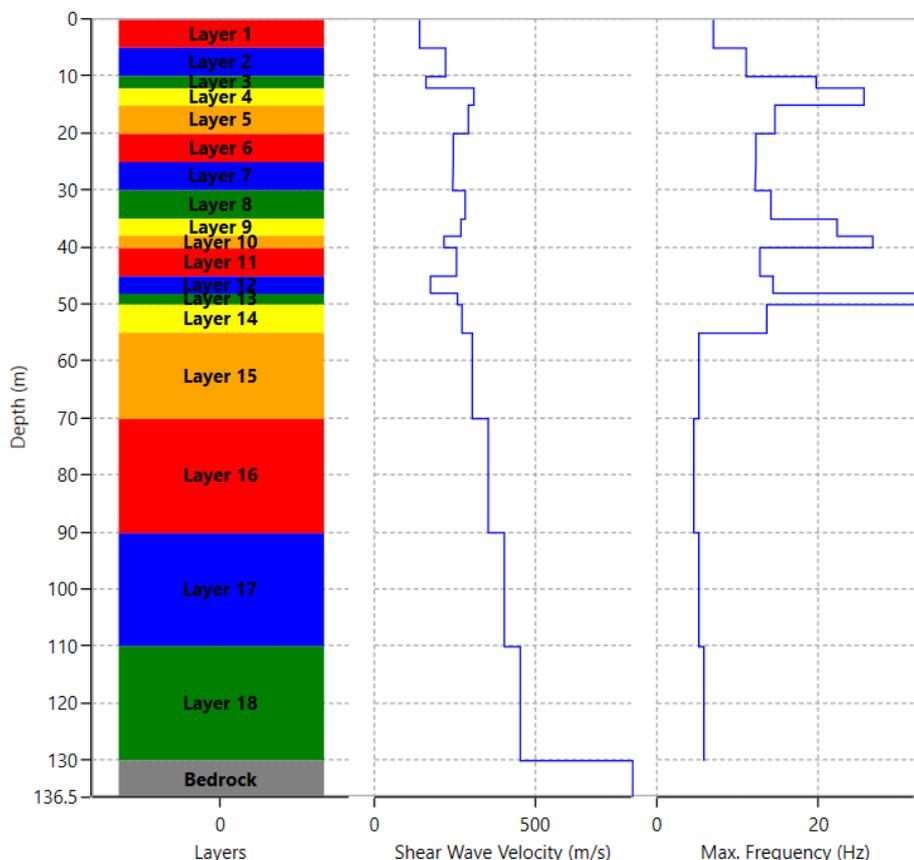


Figura 6.14 – Profilo con velocità onde di taglio imposte in input nel modello di calcolo

Si fa presente che, a partire dalla profondità di 55 m, il valore di velocità delle onde di taglio è stata incrementata ragionevolmente di circa 50 m/s ogni 20 m di profondità aggiuntive. Al bedrock è stata quindi assegnata la velocità delle onde di taglio pari a 800 m/s.

Il modulo di rigidezza a taglio a piccole deformazioni (G_0) è quindi calcolato dai valori della velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) e dal peso per unità di volume (γ) posto pari a 18 kN/m³ e 20 kN/m³ rispettivamente per i terreni a grana fine e per i terreni a grana grossa.

Le curve di decadimento ed i rapporti di smorzamento utilizzati nelle analisi fanno riferimento a curve di letteratura relative a terreni aventi proprietà e caratteristiche fisico-meccaniche analoghe a quelle riscontrabili dalle prove in sito e di laboratorio condotte.

Le curve di decadimento $G(\gamma)$ e di smorzamento $\xi(\gamma)$ prese a riferimento per gli strati argillosi, superiore e inferiore, sono quelle proposte da Vucetic e Dobry (1991) [5] per un indice di plasticità $IP=25$, assunto dalle prove di identificazione. Invece, per quanto riguarda gli strati sabbiosi e ghiaiosi, si è fatto riferimento alle curve di Seed e Idriss (1970) con il riferimento ai valori medi [6].

Nelle figure seguenti vengono dunque riportate le curve di decadimento e i relativi rapporti di smorzamento utilizzati nelle analisi numeriche.

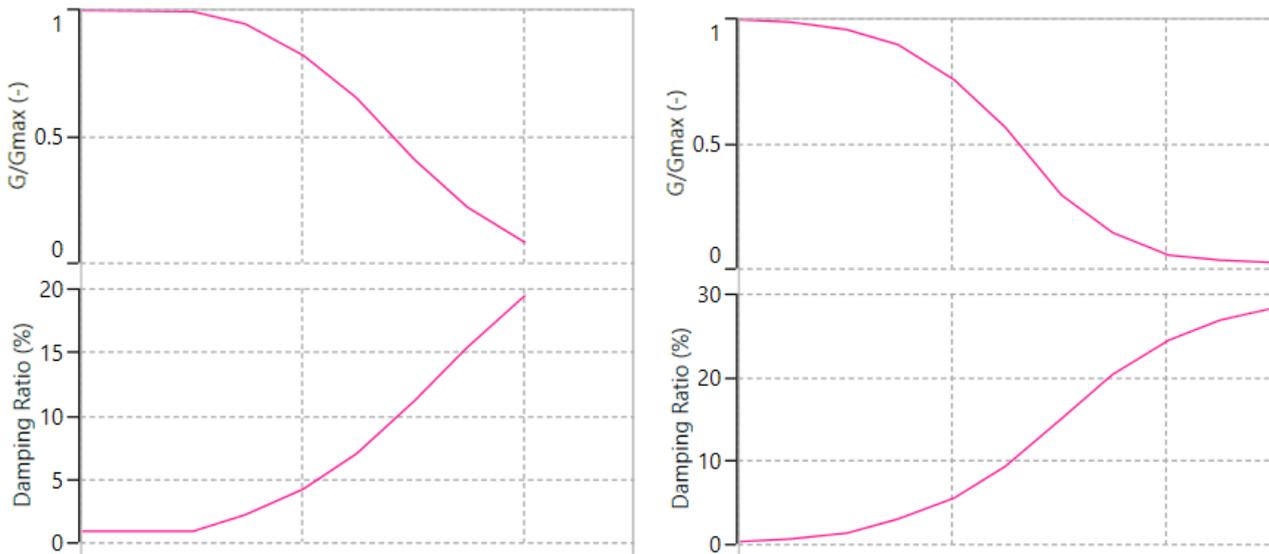


Figura 6.15 – Curve di decadimento e smorzamento: in sinistra Vucetic e Dobry (1991) IP=25 in destra Seed e Idriss (1970)

6.5 Risultati

Per ciascuna delle storie temporali di accelerazioni utilizzate come input sismico nelle analisi, si riportano a seguire i profili di accelerazione massima calcolati. Si nota come, in media, le massime accelerazioni si attingono in corrispondenza della sommità del deposito.

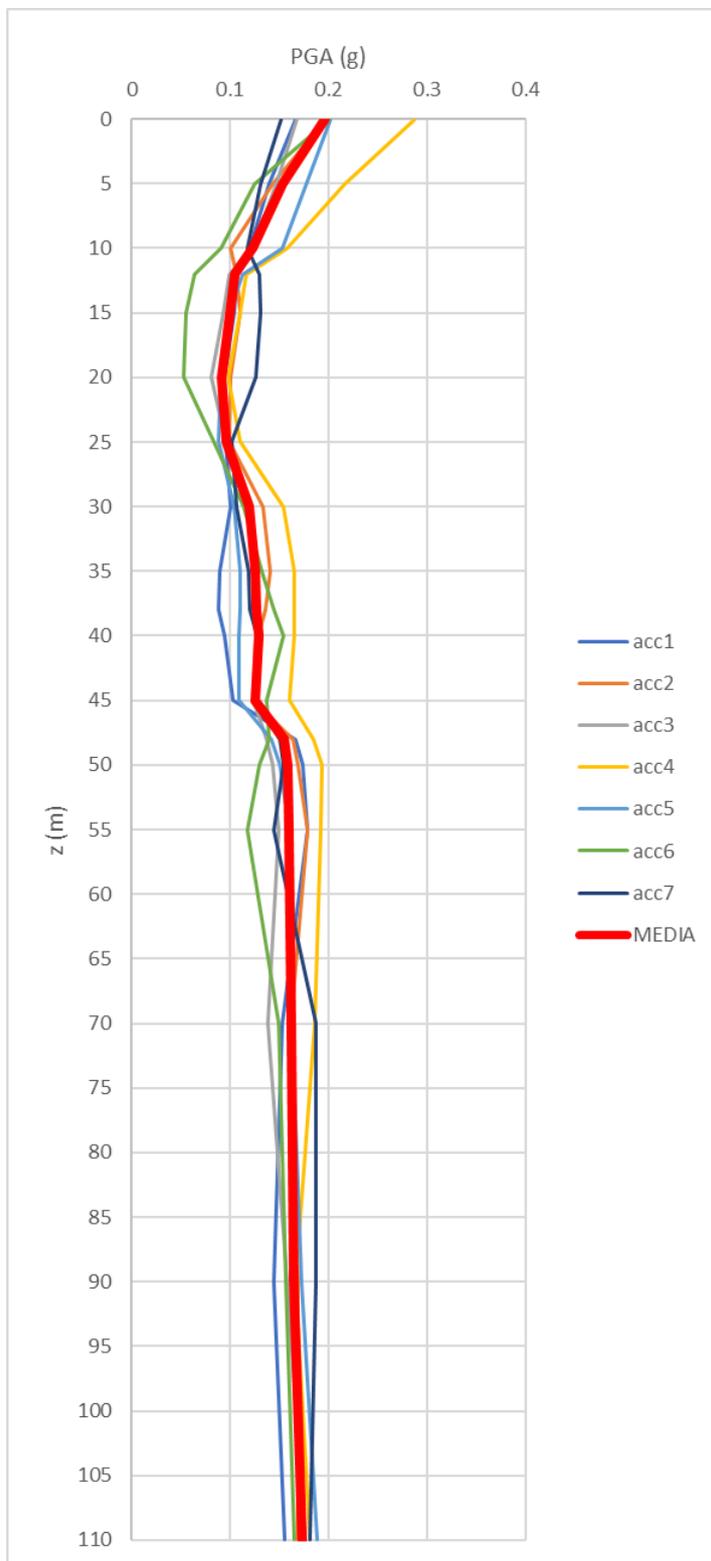


Figura 6.16 – Profilo di accelerazione massima per il set di accelerogrammi considerato.

In Figura 6.17 si riportano i profili di deformazione a taglio (a sinistra) e di tensione tangenziale mobilizzata (a destra). Si nota come i valori di deformazione a taglio siano, in media, inferiori a quelli limite di applicabilità dell'approccio lineare equivalente (Figura 6.18).

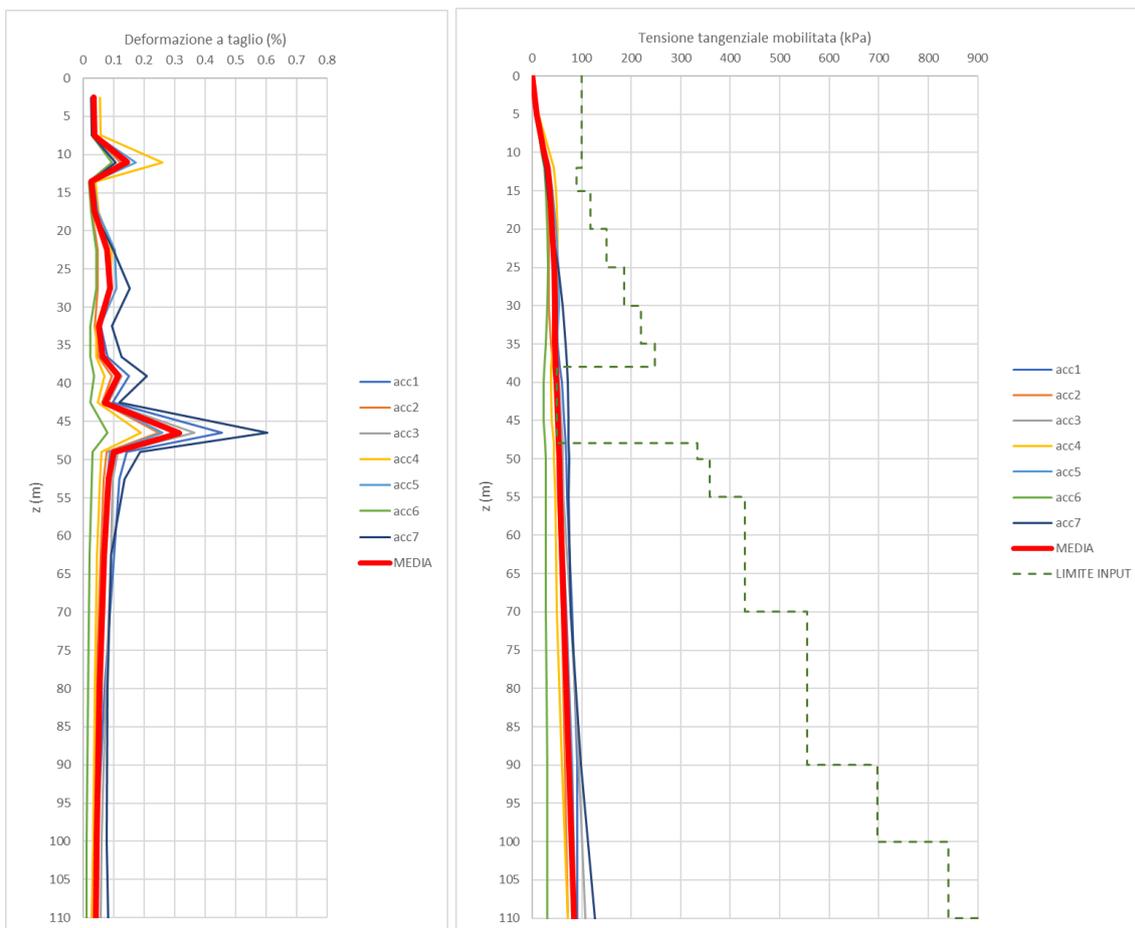


Figura 6.17 – Profilo di deformazione a taglio (a sinistra) e profilo di tensione tangenziale mobilizzata (a destra) per il set di 7 accelerogrammi in input.

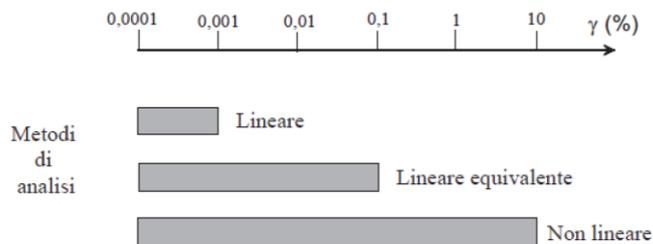


Figura 6.18 – Limiti di applicabilità degli approcci di calcolo funzione dei livelli di deformazione, linee guida AGI [7].

In Tabella 6.8 si riportano i limiti di tensione tangenziale, funzione della profondità da piano di campagna. Tali valori per i terreni a grana fine e a grana grossa sono stati ricavati rispettivamente a partire dalla coesione non drenata e dal criterio di Mohr-Coulomb.

Tabella 6.8 – Tensione tangenziale limite imposta nel modello di calcolo.

da (m) da p.c.	a (m) da p.c.	τ_{limite} (kPa)
0	12	100
12	38	90-248
38	48	50
48	130	334-983

Di seguito si riporta un confronto con l'approccio semplificato da normativa in termini di spettro di risposta (Figura 6.19). Nella stessa figura è riportato lo spettro ottenuto regolarizzando lo spettro medio da analisi RSL secondo quanto indicato nell'Ordinanza n. 55 del 24 aprile 2018 della Presidenza del Consiglio dei Ministri.

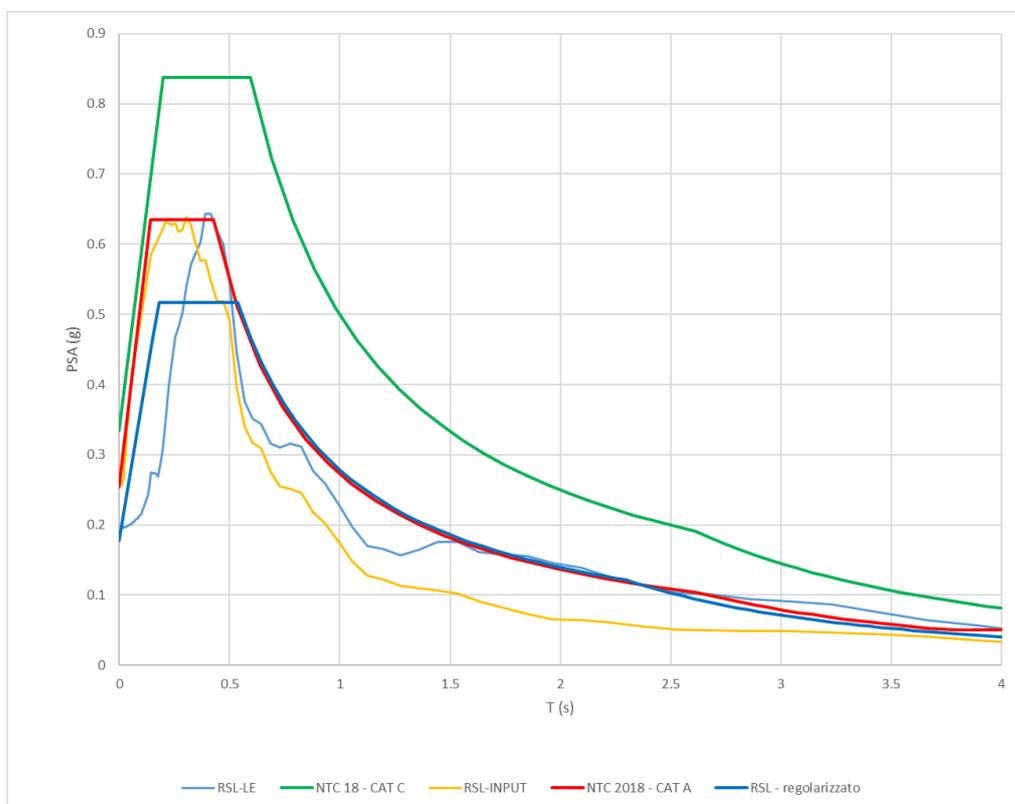


Figura 6.19 – Confronto spettro di risposta da RSL con spettro di risposta NTC.

Infine, in Tabella 6.9 si riportano, per un fissato periodo, i valori del fattore di amplificazione tra accelerazione da approccio normativo semplificato e corrispondenti valori ottenuti da analisi RSL (da spettro regolarizzato). In particolare, tale fattore è calcolato per PGA e plateau degli spettri di risposta.

Tabella 6.9 – Confronto tra approccio semplificato normativo e analisi RSL.

Categoria di Suolo	Categoria topografica	Vita nominale	Coefficiente d'Uso	Accelerazione massima attesa al sito (SLV)	Accelerazione massima da analisi RSL	Fattore di amplificazione PGA	Accelerazione plateau (SLV)	Accelerazione plateau analisi RSL	Fattore di amplificazione plateau
		[anni]		[g]	[g]	[-]	[g]	[g]	[-]
C	T1	75	1.5	0.334	0.177	0.5	0.838	0.517	0.6

Sulla base dei risultati presentati in Tabella 6.9 si osserva che sia il valore della PGA sia il valore di accelerazione al plateau sono minori dei rispettivi valori ricavati da approccio semplificato.

In accordo con il capitolo 7.2.6 delle NTC 2018, lo spettro regolarizzato ottenuto da analisi RSL, è stato confrontato con il 70% del corrispondente spettro di categoria A. **La domanda sismica utilizzata per il calcolo delle azioni nelle sovrastrutture ricadenti all'interno del sito di progetto è stata quindi considerata, per ogni periodo di interesse per le strutture ivi ricadenti, pari all'involuppo superiore (in termini di accelerazione) degli spettri.** In Figura 6.20 si riportano lo spettro da RSL con lo spettro pari al 70% del corrispondente spettro normativo.

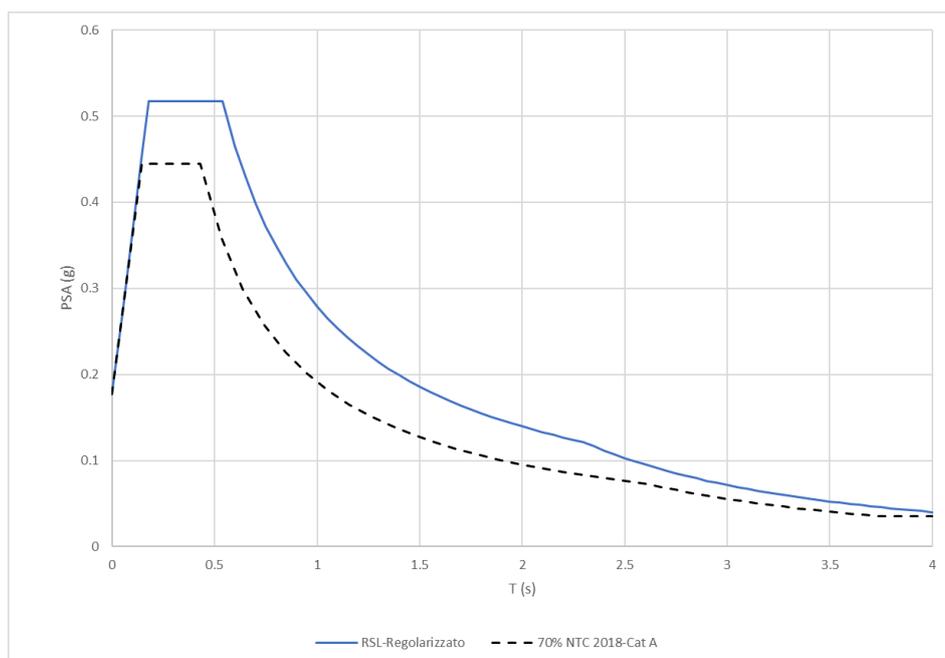


Figura 6.20 – Confronto spettro di risposta da RSL con il 70% dello spettro di risposta NTC, categoria A di sottosuolo.

Per quanto concerne lo spettro di risposta in termini di accelerazione verticale, questo è stato calcolato a partire dallo spettro regolarizzato da analisi RSL, mediante procedura riportata al capitolo 3.2.3.2.2 delle NTC 2018. Tale spettro è stato quindi stato confrontato con il 70% del corrispondente spettro di risposta verticale per categoria A secondo NTC 2018. In Figura 6.21 è riportato il confronto tra tali spettri.

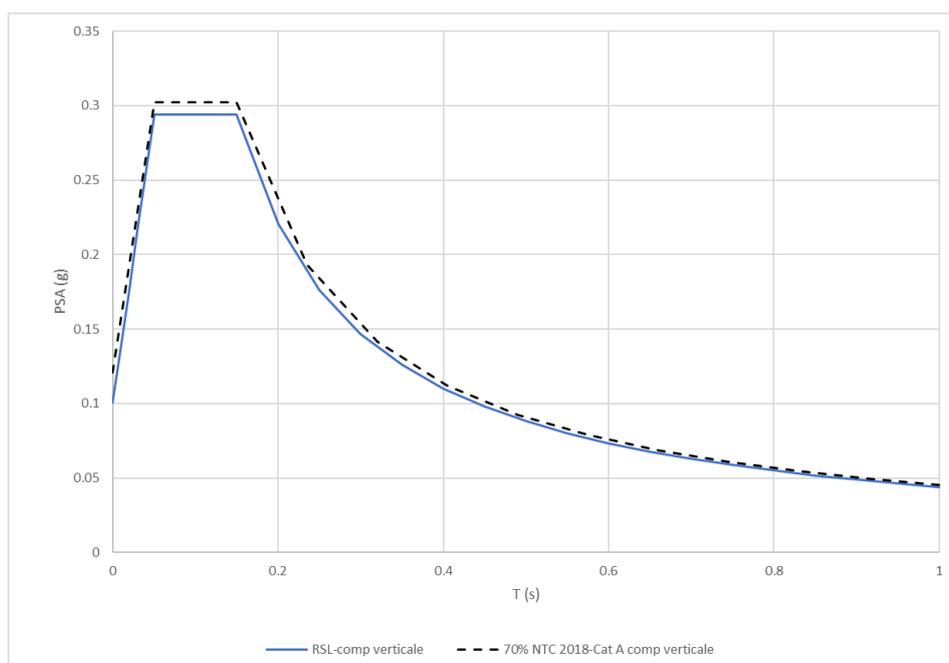


Figura 6.21 – Confronto tra spettro di risposta verticale da procedura NTC 2018 (partendo da spettro orizzontale da RSL) con il 70% dello spettro di risposta verticale NTC, categoria A di sottosuolo.

Contrariamente a quanto ottenuto per la componente orizzontale, dalla figura si nota come lo spettro pari al 70% dello spettro NTC sia superiore allo spettro ottenuto da RSL per tutte i periodi di interesse.

6.6 Confronto con risultati da analisi non lineare

Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle analisi considerando un modello non lineare.

Le curve di decadimento $G(\gamma)$ e di smorzamento $\xi(\gamma)$ prese a riferimento per l'analisi lineare equivalente, sono state calibrate mediante la procedura proposta da Phillips e Hashash (2009) [8] (*Generalized Quadratic/Hyperbolic (GQ/H) Model with Shear Strength Control*) in ragione anche della resistenza limite del terreno soggetto ad una tensione tangenziale di taglio i cui valori sono riportati in Tabella 6.8.

Nelle figure seguenti vengono dunque riportate alcune delle curve di decadimento e i relativi i rapporti di smorzamento utilizzati nelle analisi numeriche.

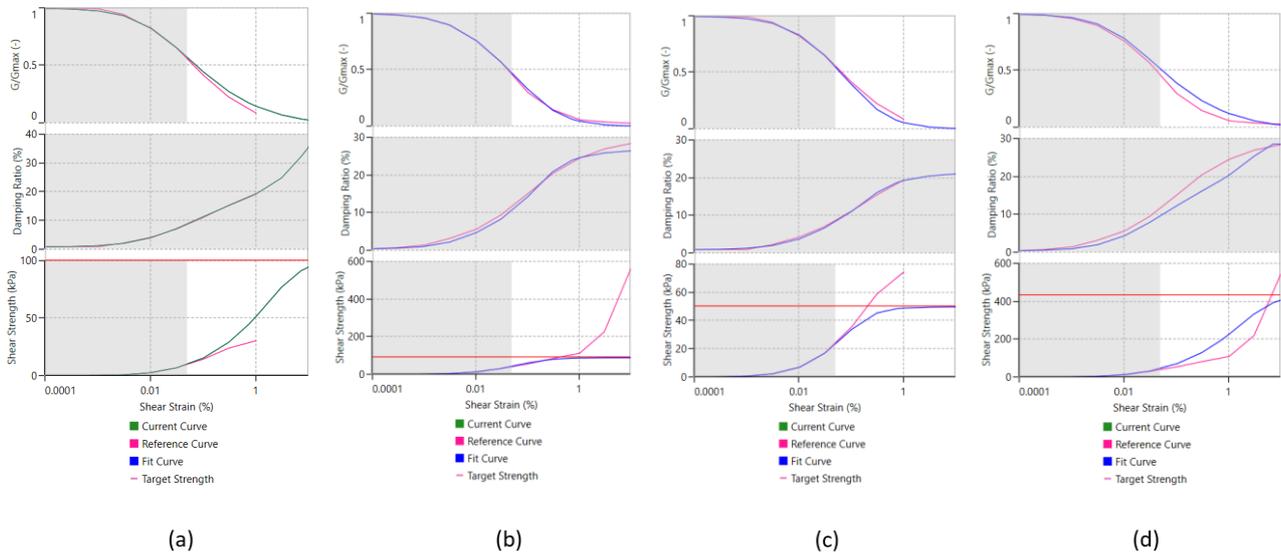


Figura 6.22 – Curve di decadimento e smorzamento calibrate su modello Vucetic e Dobry (1991) IP=25 e Seed e Idriss (1970)

Per ciascuna delle storie temporali di accelerazioni utilizzate come input sismico nelle analisi, si riportano a seguire i profili di accelerazione massima calcolati. Si nota come, in media, le accelerazioni risultano inferiori a quelle applicate in affioramento.

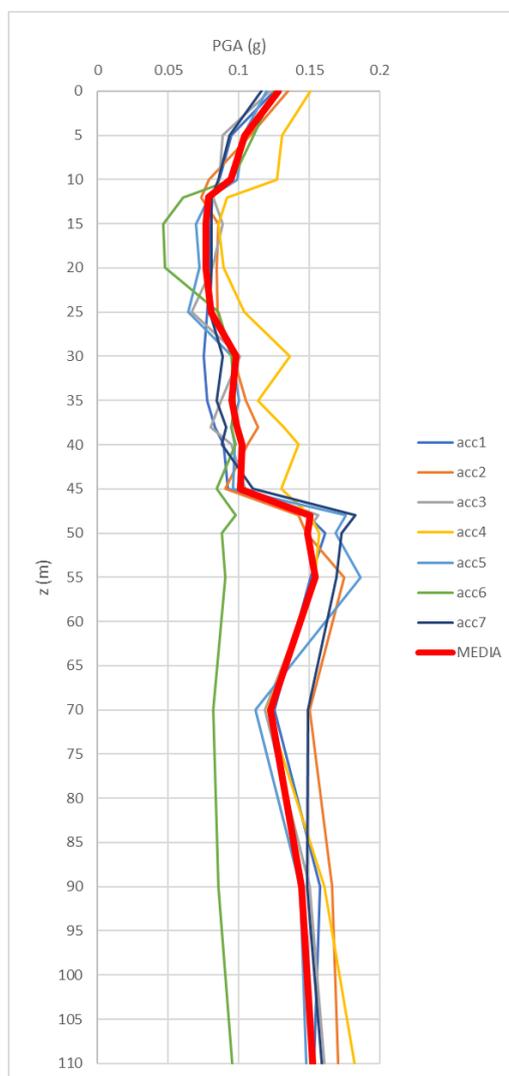


Figura 6.23 – Profilo di accelerazione massima per il set di accelerogrammi considerato.

Vengono qui riportati i risultati in termini di deformazione a taglio e tensione tangenziale mobilitata ottenuti mediante approccio non lineare. Considerando i limiti di applicabilità riportati nel precedente paragrafo (Figura 6.18), si può quindi concludere che tale approccio risulta adatto per lo studio del problema in esame.

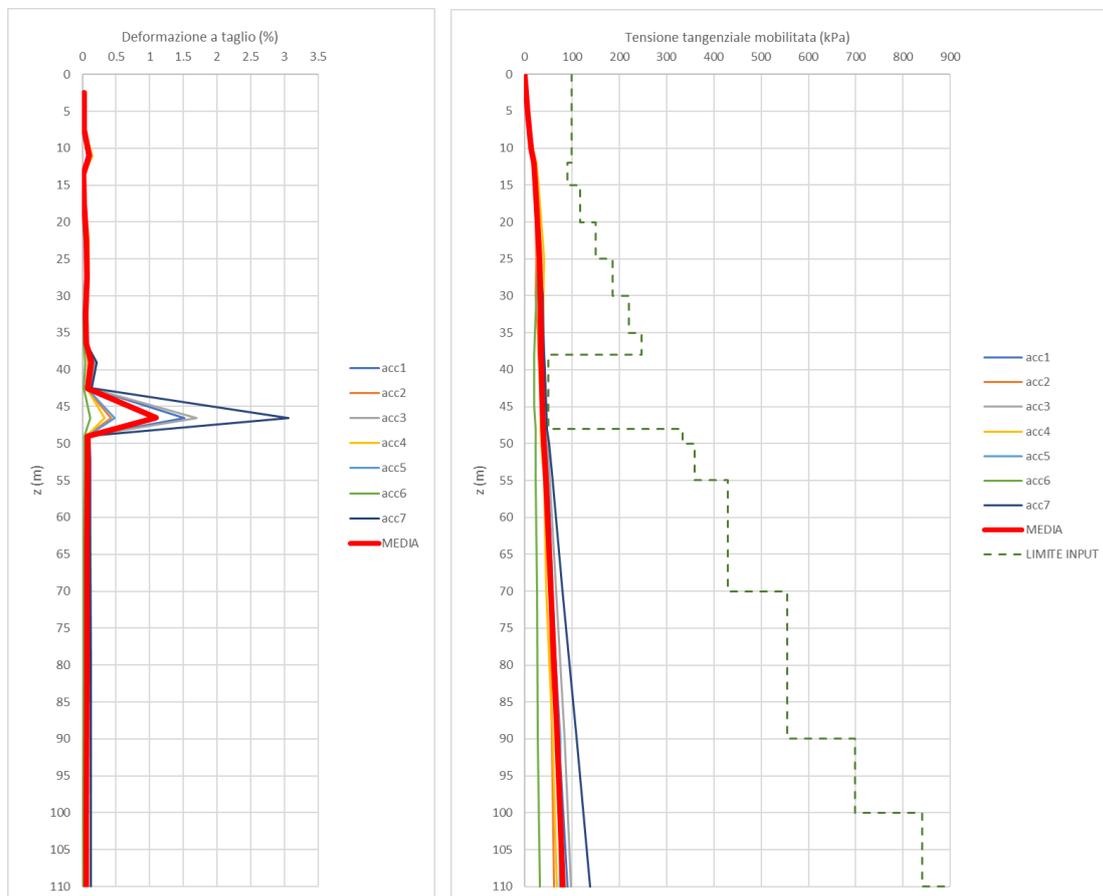


Figura 6.24 – Analisi non lineare - Profilo di deformazione a taglio (a sinistra) e profilo di tensione tangenziale mobilitata (a destra) per il set di 7 accelerogrammi in input.

Come si evince dalla seguente figura, lo spettro medio ottenuto da analisi non lineare risulta inferiore a quello ottenuto tramite approccio lineare equivalente.

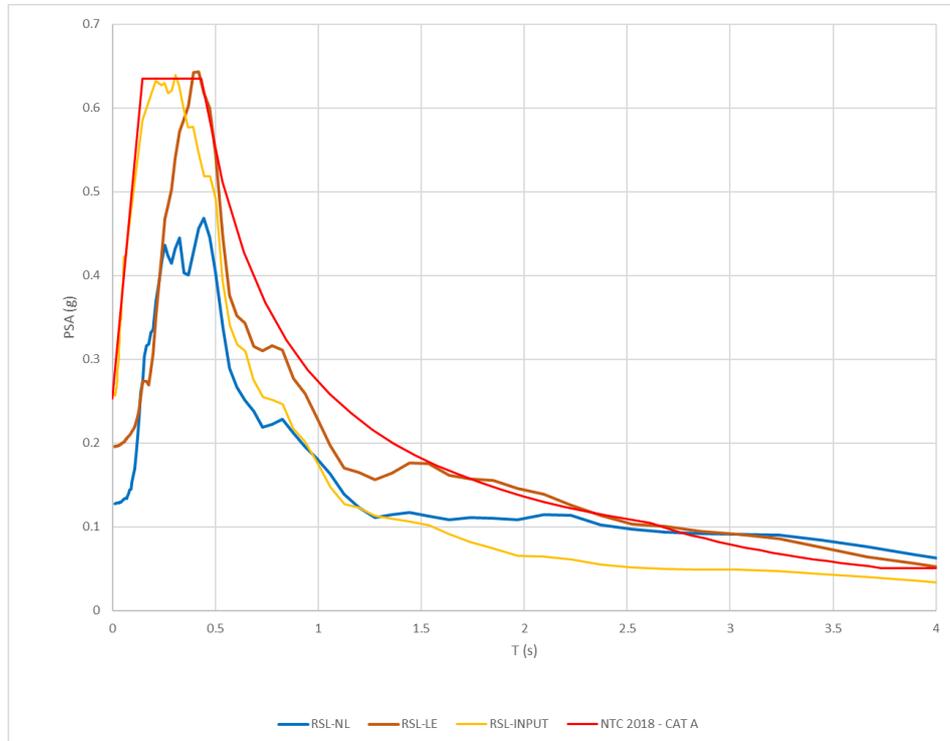


Figura 6.25 – Confronto analisi non lineare-lineare equivalente

Sebbene il metodo trattato sia adatto al caso in esame, si ritiene cautelativo prendere in considerazione, almeno in tale fase progettuale, i risultati ottenuti impiegando l'approccio lineare equivalente.

7 CONCLUSIONI E SINTESI ACCELERAZIONI DI PROGETTO

Le analisi di risposta sismica locale effettuate per il caso specifico del progetto in esame hanno permesso di calibrare la risposta del modello geotecnico di sottosuolo agli input sismici spettrocompatibili con spettro normativo di riferimento su suolo rigido affiorante. Le analisi, seppur basate su un modello di calcolo monodimensionale, sono pienamente coerenti con la morfologia e l'assetto lito-stratigrafico riscontrati nel sito in oggetto.

I risultati delle analisi mostrano chiaramente come la risposta dinamica del sistema dipenda dalle caratteristiche stratigrafiche dei depositi di terreno e dalle proprietà fisico-meccaniche che li costituiscono.

In definitiva, vengono sinteticamente riportate le accelerazioni utilizzate per il predimensionamento delle opere ricadenti all'interno dell'areolare di progetto.

Accelerazione orizzontale di progetto

- La PGA al piano di campagna è presa pari a 0.20g, coerentemente con i profili di accelerazione orizzontale massima ottenuti da analisi RSL (Figura 6.16).
- Per tutte le opere in progetto, l'accelerazione orizzontale è presa pari a quella dello spettro regolarizzato da analisi RSL.

Accelerazione verticale di progetto

- È presa sempre pari al 70% dello spettro normativo di categoria A (condizioni topografiche T1).