

RTI Progettisti:

SYSTRA

SOTECNI
SYSTRA GROUP

architector
engineering

AEGIS
CANTARELLI + PARTNERS

STUDIO MATTIOLI
Ambiente - Ingegneria - Energia

cooperativa archeologia

PROGETTO DEFINITIVO DELLA SECONDA LINEA TRANVIARIA DI BOLOGNA (TRATTO NORD LINEA VERDE)

STUDI SPECIALISTICI GEOLOGIA - GEOTECNICA - IDRAULICA Relazione Sismica

COMUNE DI BOLOGNA
SETTORE MOBILITA' SOSTENIBILE E INFRASTRUTTURE

IL DIRETTORE DEL SETTORE
ING. CLETO CARLINI

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO
ING. GIANCARLO SGUBBI

IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO
ING. MIRKA RIVOLA

SEGRETERIA TECNICA

ing. Barbara Baraldi
arch. Virginia Borrello
ing. Giulio Cimbali
geom. Agnese Fero
ing. Stefania Guadagnini
geom. Luciano Notte
ing. Lisa Ombra
ing. Marco Pesare

GRUPPO DI PROGETTAZIONE

RESPONSABILE DI COMMESSA
ING. PAOLO MARCHETTI

COORDINATORE TECNICO
ING. ALESSANDRO PIAZZA

SISTEMA TRANVIARIO
ING. SANTI CAMINITI

ARCHITETTURA E INSERIMENTO URBANISTICO
ARCH. SEBASTIANO FULCI DE SARNO

OPERE A VERDE
ARCH. NICOLA CANTARELLI

OPERE STRUTTURALI
ING. STEFANO TORTELLA

SEGNALAMENTO E TELECOMUNICAZIONI
ING. ANGELA TORTORELLA

AMBIENTE
PROF. MATTEO MATTIOLI

SICUREZZA
ARCH. SERGIO MOSCHEO

ARCHEOLOGIA
DOTT. CRISTINA BIGAZZI

BIM MANAGER
GEOM. MIRKO CASAROLI

RESP. INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE
ING. SANTI CAMINITI

IMPIANTI TECNOLOGICI
ING. SIMONE VILLA

STUDI TRASPORTISTICI
ING. ANDREA SPINOSA

VIABILITA' INTERFERENTE E SOTTOSERVIZI
ING. PIETRO CAMINITI

IDRAULICA E IDROLOGIA
ING. ANDREA BENVENUTI

DEPOSITO
ING. GIORGIO COLETTI

ARMAMENTO
ING. MAURIZIO FALZEA

GEOLOGIA E GEOTECNICA
DOTT. GEOL. ANTONIO PAONE

TRAZIONE ELETTRICA
ING. DOMENICO D'APOLLONIO

IMPIANTI MECCANICI
ING. SALVATORE GIUA

COMMESSA		FASE		LOTTO		WBS		DISCIPLINA		TIPO		NUMERO		REV.	SCALA	NOME FILE					
B	3	8	1	C	D	X	0	0	G	G	I	S	I	S	R	T	0	1	A	-	B381CDX00GGISISRT01A

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
A	Ago. 2023	PRIMA EMISSIONE	F. TASSINARI	A. PAONE	S. CAMINITI
B					
C					
D					

INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. REFERENZE.....	6
2.1 DOCUMENTI NORMATIVI	6
2.2 BIBLIOGRAFIA	7
3. QUADRO DI RIFERIMENTO PROGRAMMATICO	9
3.1 PTM - PIANO TERRITORIALE METROPOLITANO.....	9
3.2 RIFERIMENTI PER L'AREA DI STUDIO	11
4. INPUT SISMICO	13
4.1 STIMA DELL'ACCELERAZIONE DI BASE DALLA DGR 476/2021 (TR=475)	13
4.2 STIMA ACCELERAZIONE DI BASE DELL'OPERA (TR949)	14
4.3 NOTE SUGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT	14
4.4 DATI DI DISAGGREGAZIONE	18
4.5 ACCELEROGRAMMI DI INPUT	20
4.5.1 Segnali di riferimento regionali.....	20
4.5.2 Estrazione di accelerogrammi naturali	20
5. STRATIGRAFIA E SISMOSTRATIGRAFIA	23
6. CURVE DI DEGRADO E DI SMORZAMENTO	27
6.1.1 ARGILLA	28
6.1.2 SABBIA	29
6.1.3 GHIAIA	30
7. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	31
7.1 RSL SECONDO DGR 476/2021 RER (TR = 475 ANNI).....	31
7.1.1 DA PK 0+000 A PK 0+140	31
7.1.2 DA PK 0+140 A PK 1+050	35

7.1.3	DA PK 1+050 A PK 1+670.....	39
7.1.4	DA PK 1+670 A PK 1+890.....	43
7.1.5	DA PK 1+890 A PK 5+290.....	47
7.1.6	DA PK 5+290 A PK 5+525.....	51
7.2	RSL SECONDO NTC-2018 (TR=949 ANNI)	55
7.2.1	DA PK 0+000 A PK 0+140.....	55
7.2.2	DA PK 0+140 A PK 1+050.....	57
7.2.3	DA PK 1+050 A PK 1+670.....	59
7.2.4	DA PK 1+670 A PK 1+890.....	61
7.2.5	DA PK 1+890 A PK 5+290.....	63
7.2.6	DA PK 5+290 A PK 5+525.....	65
8.	VERIFICA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE.....	68
8.1	VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE.....	72

1. PREMESSA

La presente Relazione Sismica è inquadrata nell'ambito dell'incarico di progettazione definitiva della tratta nord della Seconda linea tranviaria della città di Bologna (Linea Verde).

Il tracciato della Linea Verde, dal capolinea su via dei Mille al capolinea Nord di Corticella è lungo poco più di 6.70 km e si sviluppa quasi interamente sull'asse sud-nord costituito da via Indipendenza, via Matteotti, via Corticella, via Bentini, per poi deviare leggermente e percorrere via S. Anna, via Byron e via Shakespeare per il tratto finale.

Lungo il tracciato, oltre ai suddetti capolinea, sono collocate 15 fermate, di cui 3 in comune con la realizzanda Linea Rossa.

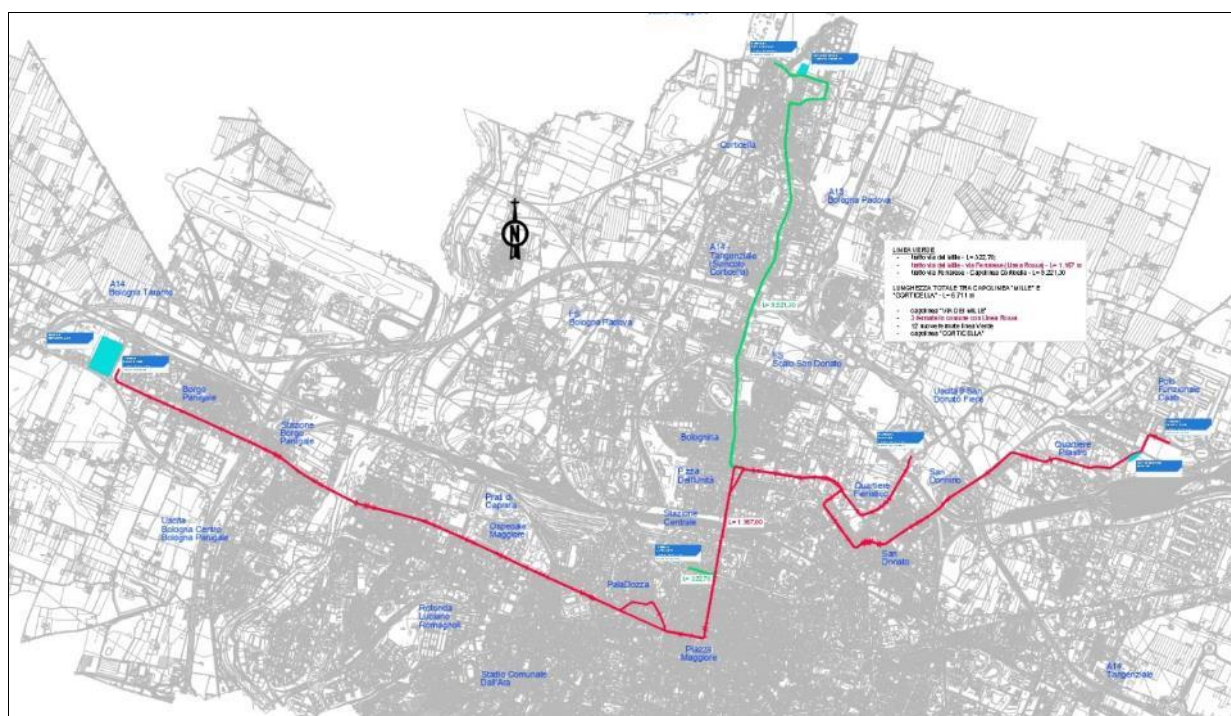


Figura 1-1 – Planimetria generale Linea rossa + Tratta nord Linea Verde

Ai fini del presente studio si sono utilizzati i dati pregressi esistenti (sondaggi a carotaggio continuo e a distruzione disponibili all'interno del database di pubblico accesso del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna) integrati alla luce dei risultati delle

indagini geognostiche e geofisiche integrative esperite nella presente fase di progettazione definitiva.

Il quadro delle conoscenze geologiche, stratigrafiche, ma soprattutto sismiche ha consigliato di eseguire una suddivisione del tracciato in sei aree principali per le analisi di RSL, anche in funzione delle perimetrazioni della tavola tavola 4 (Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali) del PTM:

- Dalla pk 0+000 alla pk 0+140;
- Dalla pk 0+140 alla pk 1+050;
- Dalla pk 1+050 alla pk 1+670;
- Dalla pk 1+670 alla pk 1+890;
- Dalla pk 1+890 alla pk 5+290;
- Dalla pk 5+290 alla pk 5+525.

È evidente che la finalità di un lavoro di questo tipo è duplice: da un a parte si vogliono approfondire gli aspetti di amplificazione locale RSL, tenendo conto delle direttive e delle normative regionali (DGR_476_2021) ad uso soprattutto della pianificazione territoriale, dall'altra si vuole verificare se il metodo semplificato (DM 2018), utilizzato per la progettazione dell'opera, possa rispondere in modo adeguato alla risposta sismica del sito.

A questo punto bisogna chiarire che gli input sismici messi a disposizione dalla regione sono stati creati allo scopo della pianificazione territoriale (PSC-RUE-POC) e sono stati costruiti con tempi di ritorno 475 anni, mentre per la progettazione dell'opera sono previsti tempi di ritorno di 949 anni.

Appare ovvio che, per la completezza del lavoro, si rende necessario prendere in considerazione gli input sismici costruiti su entrambi i periodi di ritorno.

Nel presente studio da un lato si vuole ottenere risultati confrontabili con gli strumenti di pianificazione territoriale forniti dalla regione ($T_r=475$ anni), dall'altro si vuole verificare lo spettro normalizzato dalla procedura semplificata (classe d'uso e vita nominale) sia confrontabile con quello ricavato dal sito con la RSL. Tutto ciò comporta che per ogni tratta si sono effettuate RSL distinte con entrambi i tempi di ritorno.

2. REFERENZE

2.1 DOCUMENTI NORMATIVI

D.M. 17 Gennaio 2018. "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»" (G.U. n. 42 del 20 Febbraio 2018).

Circolare 21 Gennaio 2019, n. 7 "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018." (Suppl. Ordinario alla G.U. n. 35 del 11 Febbraio 2019).

RER - Deliberazione della Giunta Regionale dell'Emilia Romagna nr. 1661 del 2 novembre 2009 - Approvazione elenco categorie di edifici di interesse strategico e opere infrastrutturale la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile ed elenco categorie di edifici e opere infrastrutturali che possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso.

RER - ALLEGATO A3 - Delibera dell'Assemblea Legislativa progr. n°112 oggetto n°3121 del 2 maggio 2007 - Procedure di riferimento per le analisi di terzo livello di approfondimento

RER - Deliberazione della Giunta Regionale N. 1435 del 21/07/03 Allegato A "Classificazione sismica dei Comuni dell'Emilia Romagna"

RER - Deliberazione della Giunta Regionale dell'Emilia Romagna nr. 476 del 12 aprile 2021 - Aggiornamento dell'"atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, l.r. n. 24/2017)" di cui alla deliberazione della giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630

RER - Deliberazione della Giunta Regionale dell'Emilia Romagna nr. 564 del 26 aprile 2021 - Integrazione della propria deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'allegato a, "atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, l.r. n. 24/2017)"

2.2 BIBLIOGRAFIA

Albarello Dario La Risposta Sismica Locale – Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'QAmbiente Università degli Studi di Siena

Ambraseys N., Smit P., Berardi R., Rinaldis D., Cotton F., Berge C. Dissemination of European strongmotion data (Cd-Rom collection). European Commission, Dgxi, Science, Research and Development, Bruxelles - 2000

Ambraseys N., Douglas J., Rinaldis D., Berge-Thierry C., Suhadolc P., Costa G., Sigbjornsson R. Smit Dissemination of European strong-motion data, vol 2, Cd-Rom. Collection. Engineering and Physical Sciences Research Council, United Kingdom - 2004

Bardet J.P., Ichii K. & Linn C.H. EERA, A computer program for Equivalent Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California - 2000

Castellaro S., Negri N., Rovere M., Vigliotti L. Interazione Suolo-Struttura e Struttura-Struttura: una lezione dal terremoto di Mirandola del 20.05.2012. Il Geologo dell'Emilia Romagna

CRESPELLANI T. Effetti di sito e fenomeni di instabilità indotti dai terremoti nei depositi e nei pendii – Dipartimento di Ingegneria Civile (DICEA). Università di Firenze

Dintinosante Vittorio Esercitazione pratica per l'utilizzo di codici di calcolo monodimensionali ai fini progettuali (valutazione dell'azione sismica ai sensi delle NTC2008

Gruppo di Lavoro MSAQ Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana. Regione Abruzzo – Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 3 vol. e Cd-rom; - 2010

Hashash Y.M.A., Hook J.J., Schmidt B., Yao J.I., Seismic design and analysis of underground structures. Tunnelling and Space Technology, 16: 247-293 - 2001

Hashash Y.M.A., Park D., Yao J.I. Ovaling deformations of circular tunnels under seismic loading, an update on seismic design and analysis of underground structures. Tunnelling and Space Technology, 20: 435-441 - 2005

Idriss I.M. Response of soft soil sites during earthquakes. Proceedings of H. Bolton Seed Memorial Symposium, vol. 2: 273-289 -1990

Idriss I.M. & Sun J.I. SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. User's Guide, University of California, Davis, California - 1992

Iervolino I., Galasso C. & Cosenza E. REXEL: computer aided record selection for codebased seismic structural analysis. Bulletin of Earthquake Engineering - 2010

Kottke Albert R. & Rathje Ellen M. Technical Manual for Strata – PEER 2008/10 - 2008

Kramer S.L. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, pp. 652 - 1996

Lanzo G. & Silvestri F. Risposta Sismica Locale. Edizioni Hevelius - 1999

Schnabel P.B., Lysmer J. & Seed H.B. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California - 1972

Seed H.B., Sun J.H. Implication of site effects in the Mexico City earthquake of September 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California. Report No. UCB/EERC-89/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley 1989

Smerzini C. Paolucci R. SIMBAD: a database with Selected Input Motions for displacement-Based Assessment and Design – 2nd release. Research Project DPC – RELUIS 2010-2013

Working Group ITACA Data Base of the Italian strong motion records: <http://itaca.mi.ingv.it> - 2010

3. QUADRO DI RIFERIMENTO PROGRAMMATICO

Nel presente capitolo verrà verificata la conformità della proposta progettuale con le previsioni in materia urbanistica ed ambientale coerenti all'intervento, che corrisponde a quello che nella legislazione nazionale viene definito "Quadro di riferimento Programmatico".

In particolare si analizzerà la coerenza con il Piano Territoriale Metropolitano, principale strumento pianificatore di rilevanza locale che raccoglie l'eredità del PTCP e disegna gli scenari di sviluppo della Città Metropolitana di Bologna per quanto concerne gli aspetti sismici dell'area di progetto.

3.1 PTM - PIANO TERRITORIALE METROPOLITANO

Il PTM costituisce l'atto di pianificazione territoriale generale della Città metropolitana di Bologna attraverso cui, nel rispetto in particolare degli artt. 24, 25, 41 e 48 della legge regionale Emilia-Romagna n. 24/2017, sono definite per l'intero territorio di competenza le scelte strategiche e strutturali di assetto del territorio, segnatamente ai fini del contenimento del consumo di suolo, sussunto espressamente quale bene comune, della valorizzazione dei servizi ecosistemici, della tutela della salute, della sostenibilità sociale, economica e ambientale degli interventi di trasformazione del territorio, dell'equità e razionalità allocativa degli insediamenti nonché della competitività e attrattività del sistema metropolitano, in conformità ai principi, agli obiettivi e alle finalità di cui all'art. 1, comma 2 della legge regionale Emilia-Romagna n. 24/2017.

Il PTM è altresì elaborato, formato e redatto in armonia con la Carta di Bologna per l'Ambiente, con l'Agenda Metropolitana per lo Sviluppo Sostenibile e con il Piano Urbano della Mobilità Sostenibile (PUMS) di cui assume espressamente tutti i corrispondenti obiettivi e contenuti ai fini della conseguente, compiuta e armonica territorializzazione delle scelte ivi compiute.

Il percorso di formazione del PTM, avviato a seguito dell'Orientamento della Conferenza metropolitana n. 1 del 29 gennaio 2020, è proseguito con l'approvazione, da parte del Consiglio metropolitano, con delibera n. 3 del 12.02.2020, del "Documento di Obiettivi Strategici per il PTM di Bologna" e con l'approvazione, da parte del Dirigente dell'Area Pianificazione territoriale, con

determinazione n. 143 del 14.02.2020, dell'ulteriore documentazione tecnica per l'avvio della Consultazione preliminare, ai sensi dell'art. 44 della L.R. n. 24/2017.

Gli obiettivi strategici del PTM sono stati approvati in via definitiva con delibera del Consiglio della Città Metropolitana di Bologna in data 12/05/2021.

Gli elaborati costitutivi del Piano Territoriale Metropolitano (PTM) sono i seguenti:

- Relazione illustrativa
 - Strategie
- Norme e relativi allegati
 - Regole
 - Regole - Allegato 1 "Linee guida "Pianificazione per ecosistemi"
- Cartografia
 - Tavola 1 - Carta della struttura (2 fogli scala 1:50.000)
 - Tavola 2 - Carta degli ecosistemi (7 fogli scala 1:25.000)
 - Tavola 3 - Carta di area vasta del rischio idraulico, rischio da frana e dell'assetto dei versanti (7 fogli scala 1:25.000)
 - Tavola 4 - Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali (1 foglio scala 1:65.000, 7 fogli scala 1:25.000)
 - Tavola 5 - Carta delle reti ecologiche, della fruizione e del turismo (2 tavole scala 1:50.000)
- Quadro conoscitivo diagnostico e approfondimenti conoscitivi allegati
- ValSAT e relativi allegati
- Ulteriori allegati al PTM:

- Allegato A – “Norme e cartografie del PTCP costituenti Piano Regionale di Tutela delle Acque”
- Allegato B – “Norme e cartografie del PTCP costituenti pianificazione paesaggistica regionale”

3.2 RIFERIMENTI PER L'AREA DI STUDIO

In questo paragrafo si analizzerà il sistema dei vincoli e delle tutele che interessa l'area in esame per la tavola 4 del Piano.

In riferimento alla Tavola 4, l'area in esame ricade in aree classificate come:

- Zona L - Zona di attenzione per instabilità da liquefazione/densificazione;
- Zona B – Depositi di margine appenninico-padano.

Per le zone L (art. 28) si richiedono studi geologici e sismici di terzo livello, con analisi di terzo livello, con valutazione del coefficiente di amplificazione litologico, verifica della presenza di caratteri predisponenti la liquefazione e/o la densificazione e relativa stima del potenziale di liquefazione/densificazione e dei cedimenti attesi.

Per le zone B (art. 28), invece, si richiedono studi geologici e sismici di terzo livello, con analisi degli effetti attesi e approfondimenti richiesti: aree suscettibili di amplificazione stratigrafica. È richiesta la stima dell'amplificazione.

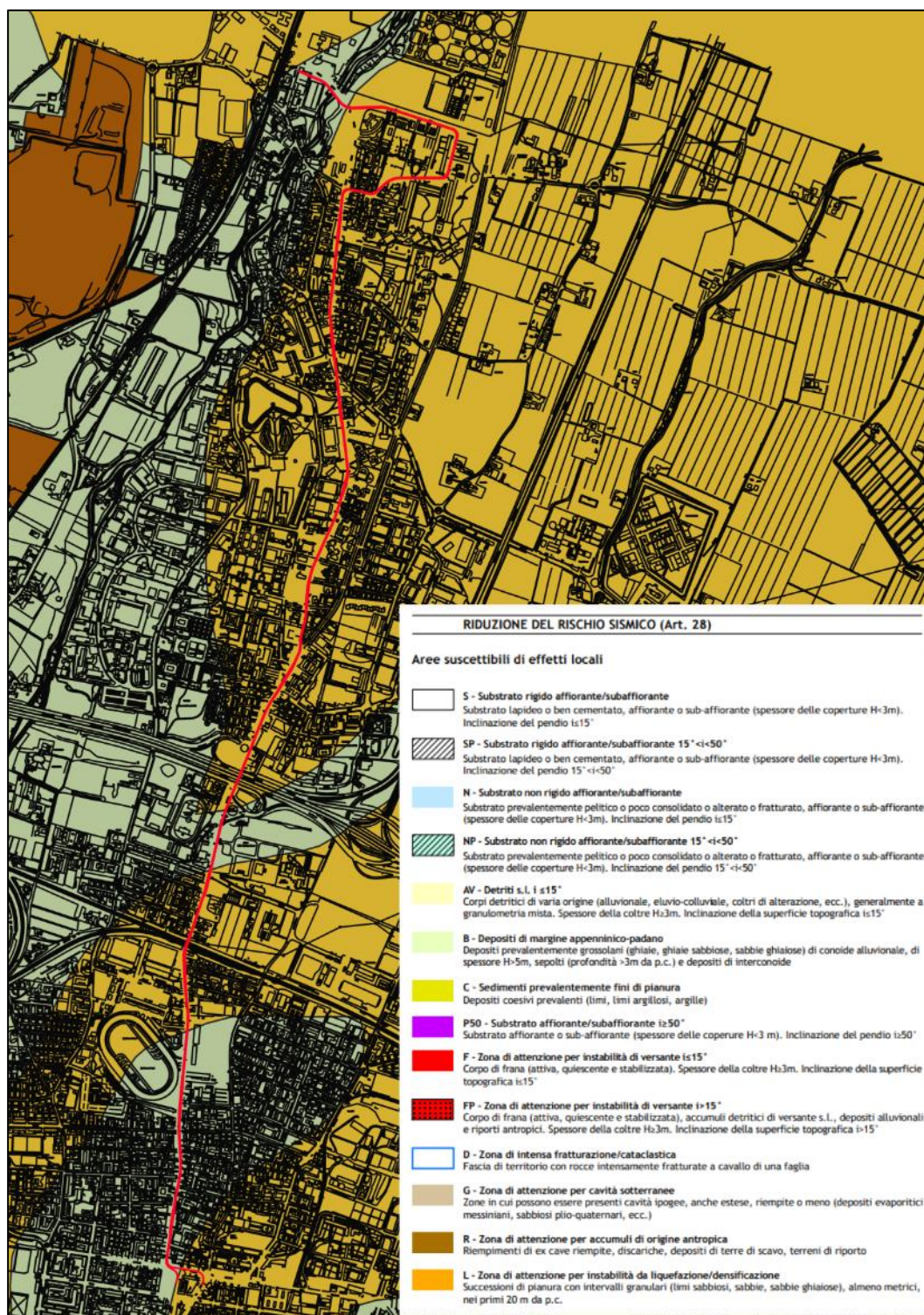


Figura 3-1 – Estratto Tavola 4 del PTM di Bologna – Carta area vasta delle aree suscettibili di effetti locali

4. INPUT SISMICO

La prima informazione necessaria per la definizione dell'input sismico è l'accelerazione di base del sito di progetto (a_g), al valore della quale bisognerà scalare gli accelerogrammi. Per la definizione di tale parametro sono necessarie alcune informazioni relative al progetto ed alla sua localizzazione spaziale.

In sintesi, i parametri necessari sono i seguenti:

- Coordinate del sito
- Vita di riferimento VR come moltiplicazione della Vita nominale (VN) e del Coefficiente d'uso (C_u) derivanti dalla scelta progettuale;
- Stato limite o stati limite del progetto, ad esempio Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e Stato Limite di Danno (SLD), a cui corrisponderanno differenti a_g in funzione dei differenti periodi di ritorno TR. In questo studio è stato preso in considerazione lo SLV.

Per calcolare l'accelerazione di base del sito e l'azione sismica di progetto si può utilizzare il sito "GEOSTRU PS" per il calcolo dei parametri sismici basati su NTC-2018. Le coordinate possono essere nel sistema di riferimento WGS84 o nel sistema di riferimento ED50. Ovviamente, vista la premessa, abbiamo la necessità di verificare per entrambi i siti studiati l'accelerazione di base con entrambi i tempi di ritorno $TR = 475$ e $TR = 949$ anni.

4.1 STIMA DELL'ACCELERAZIONE DI BASE DALLA DGR 476/2021 ($TR=475$)

La Regione Emilia Romagna fornisce, per un periodo di ritorno di 475 anni oltre all'accelerazione di base per ogni singolo comune, anche una procedura per il calcolo dello spettro di risposta a probabilità uniforme che descrive le caratteristiche del moto sismico (sempre su suolo di riferimento) atteso per ogni comune.

Dallo spettro di risposta normalizzato è possibile ottenere, moltiplicando i valori della tabella sottostante per il valore di a_g di ogni comune, lo spettro di risposta a probabilità uniforme.

Per la città di Bologna si ottiene il seguente spettro:

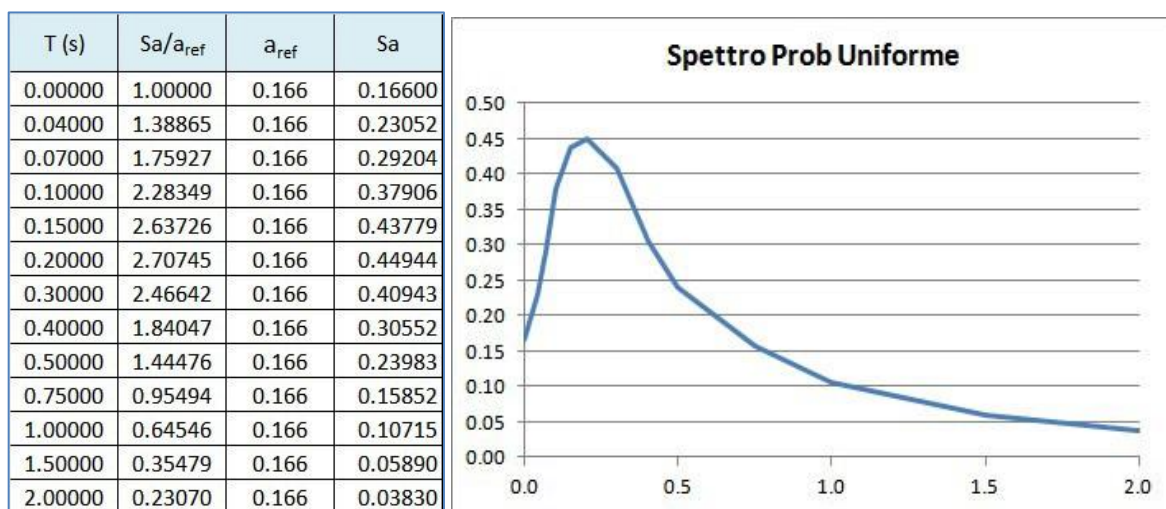


Figura 4-1 – Spettro di risposta a probabilità uniforme

Tale spettro può essere confrontato durante le analisi di RSL con lo spettro al bedrock.

4.2 STIMA ACCELERAZIONE DI BASE DELL'OPERA (TR949)

Utilizzando il sito "GEOSTRU PS" per il calcolo dei parametri sismici basati su NTC-2018 ed immettendo le coordinate del sito, quindi la vita nominale (con VN = 50 anni) ed il coefficiente d'uso della costruzione ($C_u=2$), si ottengono i valori riportati nella seguente tabella:

STATI LIMITE	TR [anni]	ag [g]	F_o	T^*c [s]
SLO	60	0.070	2.485	0.275
SLD	101	0.087	2.476	0.285
SLV	949	0.212	2.438	0.307
SLC	1950	0.269	2.436	0.312
Periodo di riferimento per l'azione sismica	100			

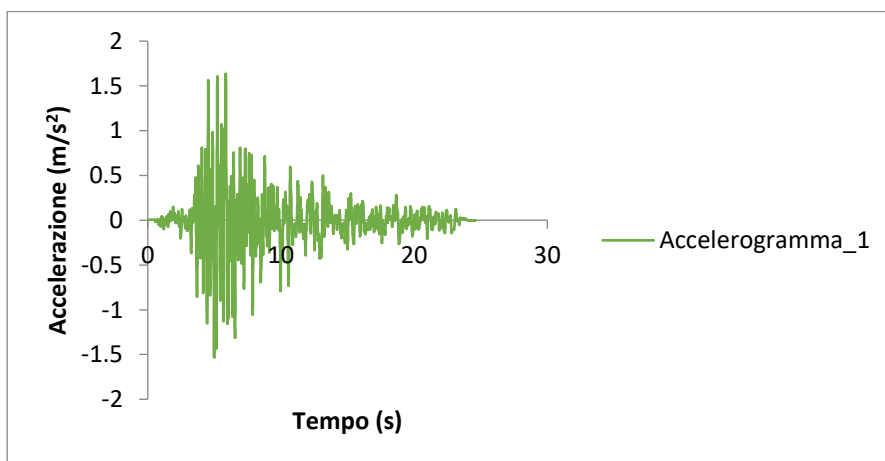
4.3 NOTE SUGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT

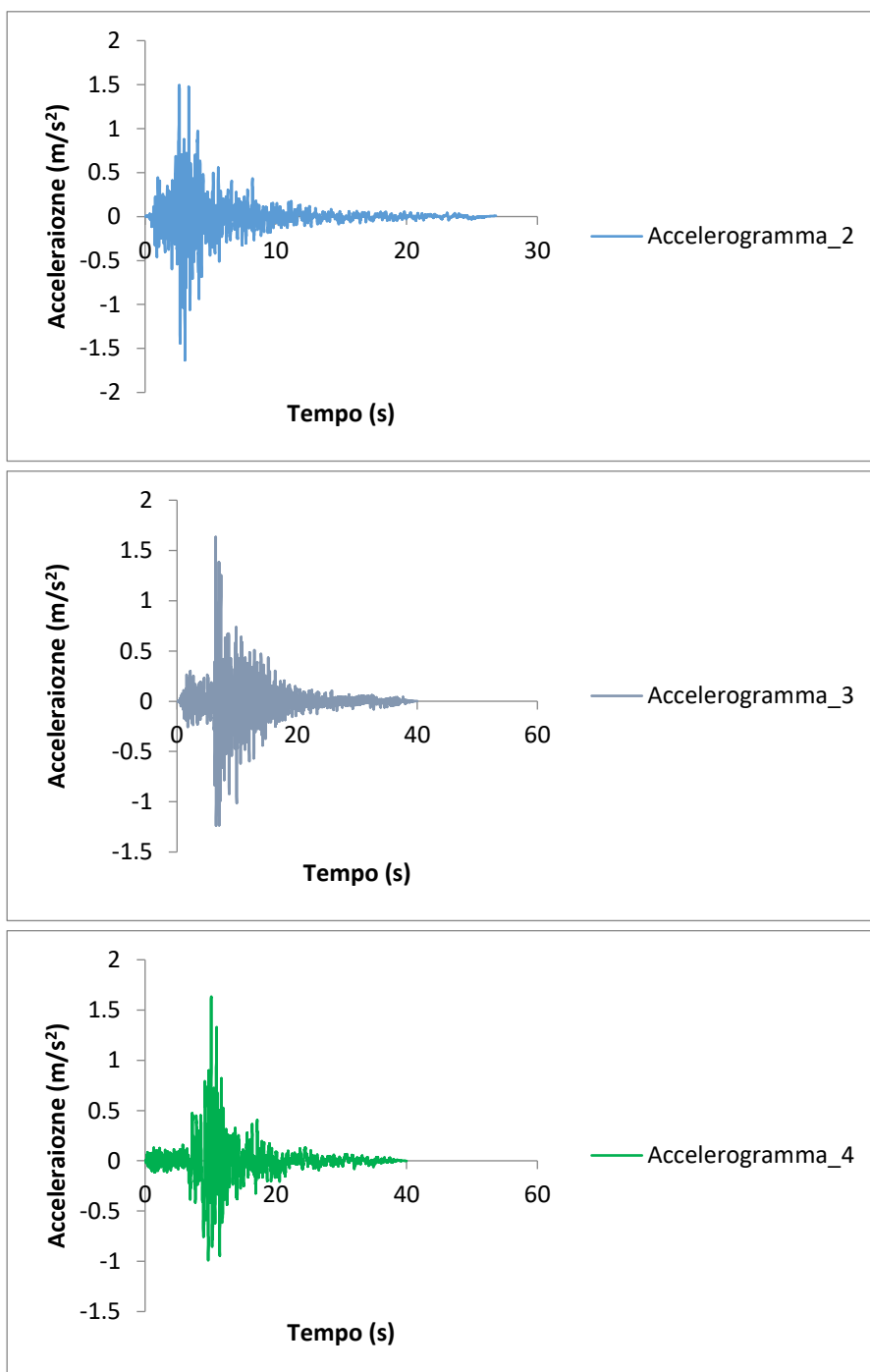
I segnali di riferimento forniti dalla RER (disponibili nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale), sono stati selezionati dalla banca dati accelerometrica "European Strong

Motion Database” attraverso una procedura che valuta la similarità tra una forma spettrale di riferimento (nel nostro caso questa forma spettrale corrisponde alla forma dello spettro di risposta isoprobabile con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni) e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nella banca dati ISESD.

Quindi se siamo in presenza di un’opera la cui vita di riferimento e lo stato limite conducono ad un periodo di ritorno $T_r \sim 475$ anni o se dobbiamo produrre materiale allo scopo della pianificazione territoriale (mappe di amplificazione, ecc.), possiamo utilizzare tranquillamente gli input sismici forniti dalla regione, altrimenti bisogna ricorrere ad una procedura un po’ più complessa e a software specifici (REXEL) per la ricerca di input sismici più appropriati.

Gli input sismici forniti dalla regione sono 7 e sono stati scalati e selezionati per ogni singolo comune:





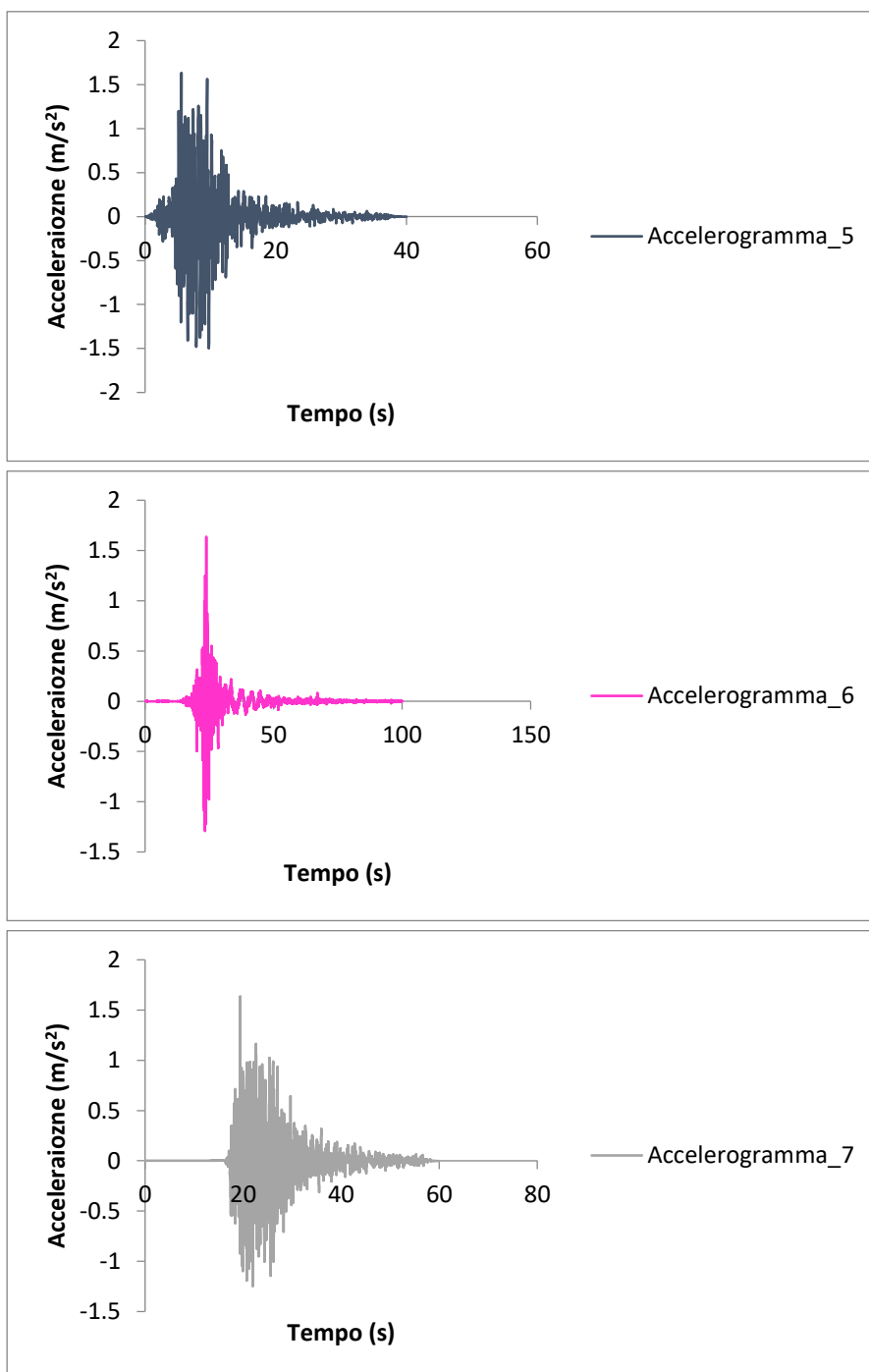


Figura 4-2 – Accelerogrammi di riferimento

Come accennato nella premessa nel nostro caso si sono utilizzati sia gli input sismici forniti dalla regione sia quelli prelevati tramite REXEL dalla banca dati italiana (Italian Accelerometric Archivie) ed europea (European Strong Motion Database).

4.4 DATI DI DISAGGREGAZIONE

L'estrazione degli accelerogrammi di input (tramite software specifici) prevede la determinazione di altri parametri oltre il valore di a_g : in particolare, bisognerà conoscere per il sito in esame i dati di disaggregazione (come ad esempio la variabilità in termini di magnitudo e distanza), reperibili nel sito dell'Istituto di Geofisica e Vulcanologia di Milano (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>) dedicata ai dati di pericolosità sismica nazionale.

Si accede ad una pagina web in cui va indicato il comune oggetto d'indagine (Bologna), la probabilità di accadimento in 50 anni ed il percentile.

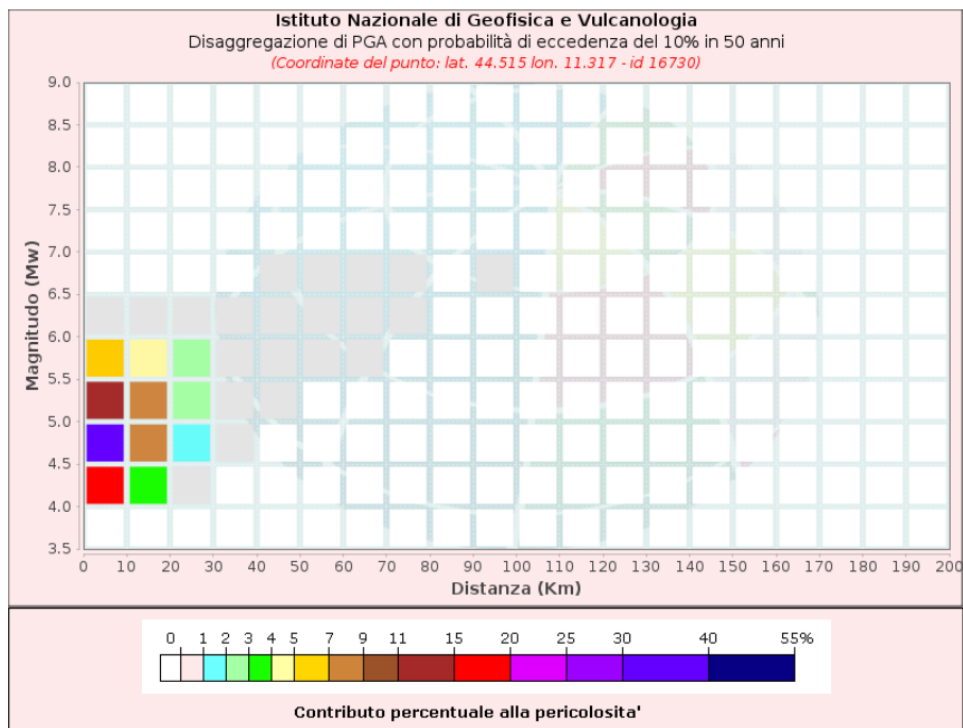
Si seleziona una probabilità la più vicina cautelativamente al periodo di ritorno relativo al progetto di cui ci dobbiamo occupare.

Si ricordi che ai sensi delle NTC2018, il periodo di ritorno (TR) è legato alla vita di riferimento (VR) ed alla probabilità di superamento della vita di riferimento (PvR) dalla seguente relazione:

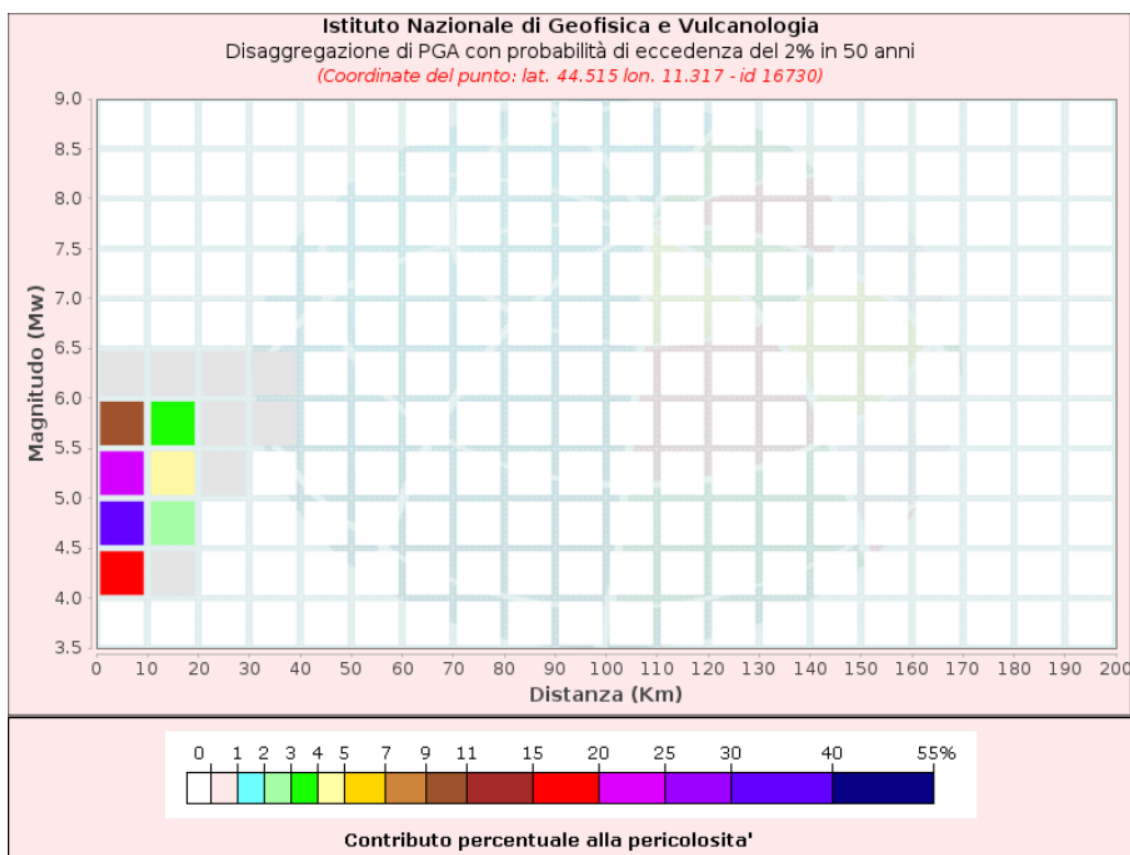
$$TR = - VR / \ln(1-PvR)$$

Pertanto, verificato il periodo di ritorno relativo alla scelta di progettazione effettuata, si cerca nel sopraccitato sito INGV qual è il valore di PvR (VR è fissa a 50anni) corrispondente al valore di TR (secondo la predetta formula) corrispondente o più simile al periodo di ritorno di progetto.

Per tempi di ritorno di 475 anni si setta 50 percentile con 10% di probabilità in 50 anni:



Per tempi di ritorno di 949 anni non si trova corrispondenza con gli intervalli proposti dalla Mappa Nazionale di Pericolosità Sismica. Pertanto, cautelativamente, per l'opera in progetto si è selezionata la probabilità di superamento del 2% in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno pari a 2475 anni.



4.5 ACCELEROGRAMMI DI INPUT

4.5.1 SEGNALI DI RIFERIMENTO REGIONALI

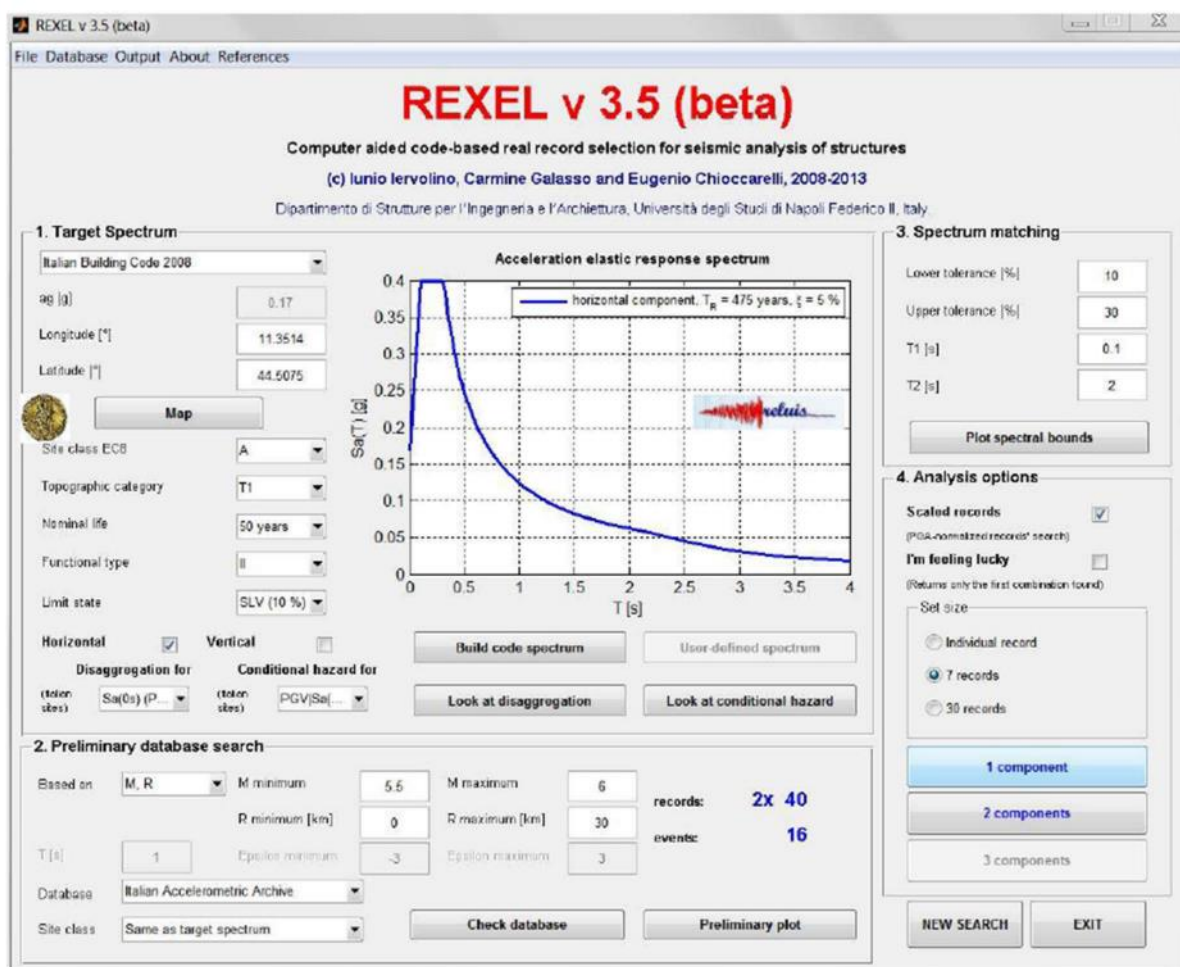
Per la Risposta sismica locale con tempi di ritorno di 475 anni si sono utilizzati i 7 accelerogrammi visti in precedenza forniti dalla regione:

Gli input sismici regionali sono stati caricati simultaneamente nel programma STRATA per una verifica della bontà dell'analisi.

4.5.2 ESTRAZIONE DI ACCELEROGRAMMI NATURALI

Il software Rexel 3.5 beta permette l'estrazione di accelerogrammi di input naturali per applicazioni ingegneristiche, ma anche di pianificazione territoriale, da più banche dati, quali la banca dati europea ESD (Ambraseys et al., 2004; http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm), la banca dati italiana ITACA (Working Group ITACA 2010; <http://itaca.mi>).

ingv.it/ItacaNet/) e la banca dati Simbad (Smerzini e Paolucci, 2011; http://wpage.unina.it/iuniervo/SIMBAD_Database_Polimi.pdf), mediante una finestra windows abbastanza semplice che si interfaccia all'ambiente MATLAB.

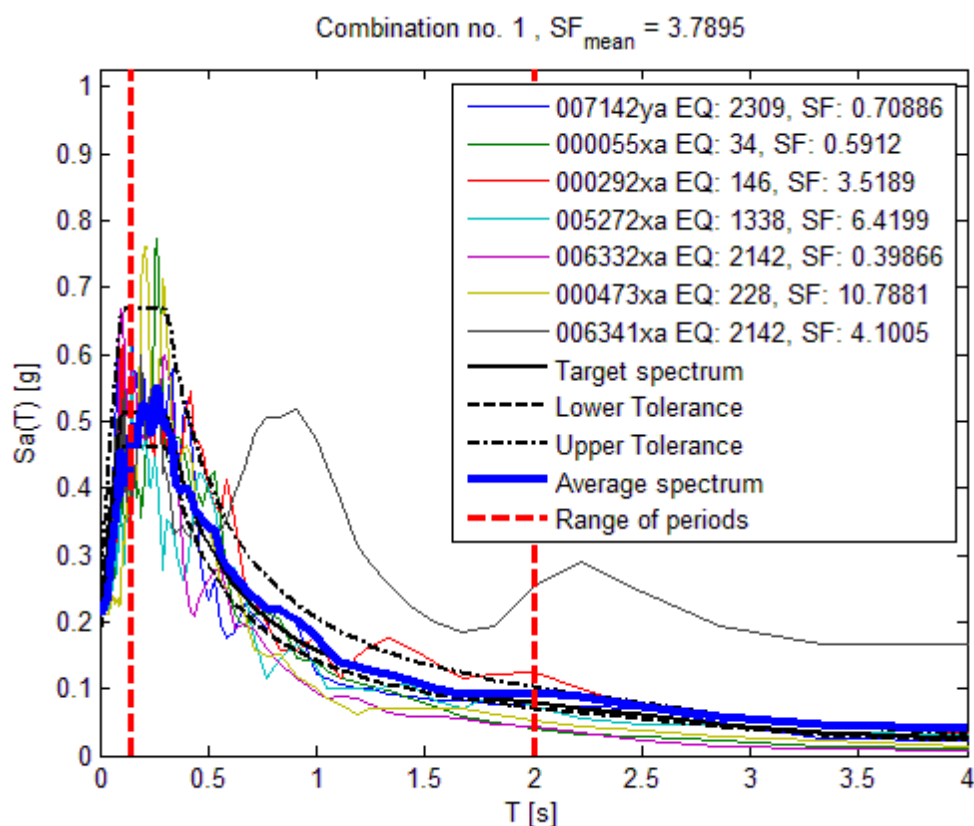


Senza entrare nei dettagli d'uso del programma è stato possibile, immettendo le coordinate del sito, la vita nominale e la classe d'uso, i dati di disaggregazione, la banca dati (nazionale o europea) ed altri parametri per lo più di tolleranze e di analisi, l'estrazione di 7 accelerogrammi naturali.

Si riportano di seguito i segnali selezionati per Bologna con tempi di ritorno di $TR = 949$ anni dalla banca europea:

Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw
7142	2309	ST539	Bingol	01/05/2003	6.3
55	34	ST20	Friuli	06/05/1976	6.5
292	146	ST98	Campano Lucano	23/11/1980	6.9
5272	1338	ST2487	Mt. Vatnafjoll	25/05/1987	6
6332	2142	ST2483	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4
473	228	ST40	Vrancea	31/05/1990	6.3
6341	2142	ST2497	South Iceland (aftershock)	21/06/2000	6.4

Si riportano di seguito i corrispondenti grafici che mostrano il set di record trovato.



5. STRATIGRAFIA E SISMOSTRATIGRAFIA

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.

Bisognerà 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 piano paralleli e che la propagazione del sisma sia verticale.

Da un punto di vista stratigrafico, tenendo conto della inevitabile eterogeneità delle caratteristiche litologiche dei terreni presenti nell'intera area è possibile distinguere diverse facies che si succedono in modo non sequenziale nel sottosuolo, con rapporti stratigrafici fortemente eteropici e conseguenti repentine variazioni e cambi di facies sia in senso orizzontale che verticale.

Tale assetto stratigrafico con l'indicazione della distribuzione delle diverse unità geologiche in profondità è rappresentato nella sezione litostratigrafica B381CDX00GGIGEOPR01A. La reale geometria delle diverse unità è accertata solo in corrispondenza delle verticali d'indagine prese in esame, mentre per le altre distribuzioni, trattandosi di estrapolazioni su base sedimentologica in funzione delle indagini, sono da tener conto possibili variazioni locali.

Le associazioni di facies individuate sono:

- **RIPORTO**

Depositi antropici di natura limoso-sabbiosa che presentano localmente inclusi di varia natura, caratterizzati da eterogeneità degli spessori e delle caratteristiche di consistenza.

- **UNITÀ A –Facies limoso-argillosa**

Limo argilloso e argilla limosa di colore grigio verdastro con presenza di calcinelli e bioclasti. Localmente si rinvencono corpi lenticolari costituenti la Facies B e C.

▪ UNITÀ B – Facies sabbiosa-limosa

Sabbia fine e media talvolta debolmente limosa di color marrone. Questa unità si rinviene in corpi lenticolari distribuiti nelle Facies A e C.

▪ UNITÀ C – Facies ghiaiosa

Ghiaia da fine a medio-grossolana in matrice sabbioso limosa. Localmente si rinvencono corpi lenticolari costituenti la Facies A e B.

Di seguito si riportano le sismostratigrafie delle tratte oggetto di RSL:

Tratta dalla pk 0+000 alla pk 0+140				
Spessore (m)	Peso (kN/mc)	vS (m/s)	Curve	Descrizione
2.00	18.0	175	Darendelli&Stokoe 2001	Terreni di riporto
7.00	18.0	190	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
3.00	18.5	220	Seed&Idriss – Sand Mean	Sabbie ghiaiose debolmente limose argillose
9.50	18.5	285	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
3.00	19.0	380	Rollins et alli 1998	Sabbie e ghiaiose debolmente limose e/o argillose
5.5	19.0	400	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
50	19.5	575	Rollins et alli 1998	Sabbie e ghiaiose debolmente limose e/o argillose
-	-	700	Bedrock-like	Bedrock-like

Tratta dalla pk 0+140 alla pk 1+050				
Spessore (m)	Peso (kN/mc)	vS (m/s)	Curve	Descrizione
2.50	18.0	175	Darendelli&Stokoe 2001	Terreni di riporto
5.00	18.0	200	Seed&Idriss – Sand Mean	Sabbie ghiaiose debolmente limose argillose

Tratta dalla pk 0+140 alla pk 1+050				
Spessore (m)	Peso (kN/mc)	vS (m/s)	Curve	Descrizione
10.00	18.5	220	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
12.50	18.5	300	Rollins et alli 1998	Sabbie e ghiaiose debolmente limose e/o argillose
10.5	19.0	350	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
50	19.5	550	Rollins et alli 1998	Sabbie e ghiaiose debolmente limose e/o argillose
-	-	700	Bedrock-like	Bedrock-like

Tratta dalla 1+050 alla pk 1+670				
Spessore (m)	Peso (kN/mc)	vS (m/s)	Curve	Descrizione
1.50	18.0	175	Darendelli&Stokoe 2001	Terreni di riporto
4.50	18.0	200	Seed&Idriss – Sand Mean	Sabbie ghiaiose debolmente limose argillose
13.00	18.5	250	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
11.00	18.5	320	Rollins et alli 1998	Sabbie ghiaiose debolmente limose argillose
10.5	19.0	400	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
50	19.5	600	Rollins et alli 1998	Sabbie e ghiaiose debolmente limose e/o argillose
-	-	700	Bedrock-like	Bedrock-like

Tratta dalla pk 1+670 alla pk 1+890				
Spessore (m)	Peso (kN/mc)	vS (m/s)	Curve	Descrizione
3.00	18.0	175	Darendelli&Stokoe 2001	Terreni di riporto
13.00	18.0	180	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
4.00	18.5	230	Rollins et alli 1998	Sabbie ghiaiose debolmente limose argillose
1.00	18.5	290	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
6.00	19.0	350	Rollins et alli 1998	Sabbie e ghiaiose debolmente limose e/o argillose

Tratta dalla pk 1+670 alla pk 1+890				
Spessore (m)	Peso (kN/mc)	vS (m/s)	Curve	Descrizione
15.5	19.0	400	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
50	19.5	575	Rollins et alli 1998	Sabbie e ghiaiose debolmente limose e/o argillose
-	-	720	Bedrock-like	Bedrock-like

Tratta dalla pk 1+890 alla pk 5+290				
Spessore (m)	Peso (kN/mc)	vS (m/s)	Curve	Descrizione
2.00	18.0	175	Darendelli&Stokoe 2001	Terreni di riporto
3.00	18.0	230	Seed&Idriss – Sand Mean	Sabbie ghiaiose debolmente limose argillose
5.00	18.5	250	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
10.00	18.5	310	Rollins et alli 1998	Sabbie e ghiaiose debolmente limose e/o argillose
15.5	19.0	425	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
50	19.5	500	Rollins et alli 1998	Sabbie e ghiaiose debolmente limose e/o argillose
-	-	650	Bedrock-like	Bedrock-like

Tratta dalla pk 5+290 alla pk 5+525				
Spessore (m)	Peso (kN/mc)	vS (m/s)	Curve	Descrizione
3.00	18.0	175	Darendelli&Stokoe 2001	Terreni di riporto
13.00	18.0	195	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
4.00	18.5	210	Rollins et alli 1998	Sabbie ghiaiose debolmente limose argillose
1.00	18.5	305	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
6.00	19.0	400	Rollins et alli 1998	Sabbie e ghiaiose debolmente limose e/o argillose
15.5	19.0	430	Darendelli&Stokoe 2001	Argille limose
50	19.5	680	Rollins et alli 1998	Sabbie e ghiaiose debolmente limose e/o argillose

Tratta dalla pk 5+290 alla pk 5+525				
Spessore (m)	Peso (kN/mc)	vS (m/s)	Curve	Descrizione
-	-	730	Bedrock-like	Bedrock-like

Le caratteristiche anelastiche dei terreni vengono considerate nei codici di calcolo, mediante l'inserimento per ogni strato di curve, relative alla variazione del modulo di taglio (G) e dello smorzamento (ξ) in funzione della deformazione sismica crescente. Tali curve sono ricavabili mediante esecuzione di analisi geotecniche di laboratorio in campo dinamico oppure desumibili da banche dati nazionali ed estere.

Nel presente lavoro sono state utilizzate curve tipiche dei materiali presenti (argille, sabbie, ghiaie), riconosciute dalla letteratura internazionale.

Le curve di degrado e di smorzamento dei materiali vengono riportate nel dettaglio nel capitolo seguente.

6. CURVE DI DEGRADO E DI SMORZAMENTO

L'analisi è stata effettuata introducendo nei software le curve di variazione del fattore di smorzamento D (damping ratio) in funzione della deformazione dei materiali. Si riportano nelle pagine seguenti le curve utilizzate, prese dalla letteratura internazionale.

6.1.1 ARGILLA

Modulus for clay (Seed and Sun, 1989) upper range and damping for clay (Idriss 1990)

Strain (%)	G/G _{max}	Strain (%)	Damping (%)
0.0001	1	0.0001	0.24
0.0003	1	0.0003	0.42
0.001	1	0.001	0.8
0.003	0.981	0.003	1.4
0.01	0.941	0.01	2.8
0.03	0.847	0.03	5.1
0.1	0.656	0.1	9.8
0.3	0.438	0.3	15.5
1	0.238	1	21
3	0.144	3.16	25
10	0.11	10	28

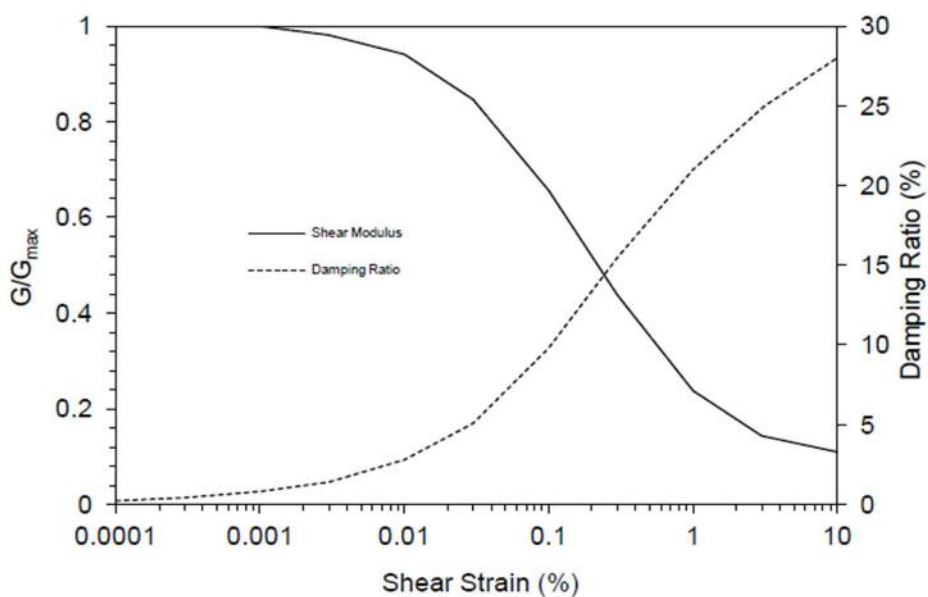


Figura 6-1 – Curve di degrado e smorzamento per l'argilla

6.1.2 SABBIA

Modulus for sand (Seed & Idriss 1970) - Upper Range and damping for sand (Idriss 1990) -
(about LRng from SI 1970)

Strain (%)	G/G _{max}	Strain (%)	Damping (%)
0.0001	1	0.0001	0.24
0.0003	1	0.0003	0.42
0.001	0.99	0.001	0.8
0.003	0.96	0.003	1.4
0.01	0.85	0.01	2.8
0.03	0.64	0.03	5.1
0.1	0.37	0.1	9.8
0.3	0.18	0.3	15.5
1	0.08	1	21
3	0.05	3	25
10	0.035	10	28

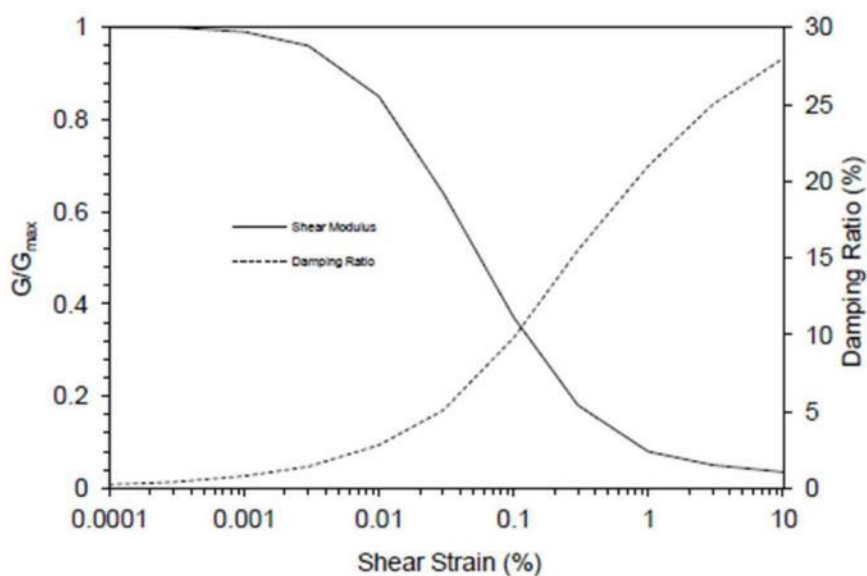


Figura 6-2 – Curve di degrado e smorzamento per la sabbia

6.1.3 GHIAIA

Abbis C.P. (1989) – Seismic amplification – Mexico city. Earthquake engineering and structural dynamics, 18, 79-88. Y

Strain (%)	G/Gmax	Strain (%)	Damping (%)
0.0001	1	0.0001	0.5
0.0002	0.987	0.0002	0.8
0.0005	0.937	0.0005	1.3
0.001	0.872	0.001	1.9
0.002	0.783	0.002	2.5
0.005	0.653	0.005	3.7
0.01	0.55	0.01	5.3
0.02	0.434	0.02	7.7
0.05	0.293	0.05	12
0.1	0.2	0.1	15.3
0.2	0.132	0.2	18.7
0.5	0.072	0.5	22.6
1	0.049	1	24.4
2	0.036	2	25.9
5	0.027	5	27.3
10	0.005	10	28

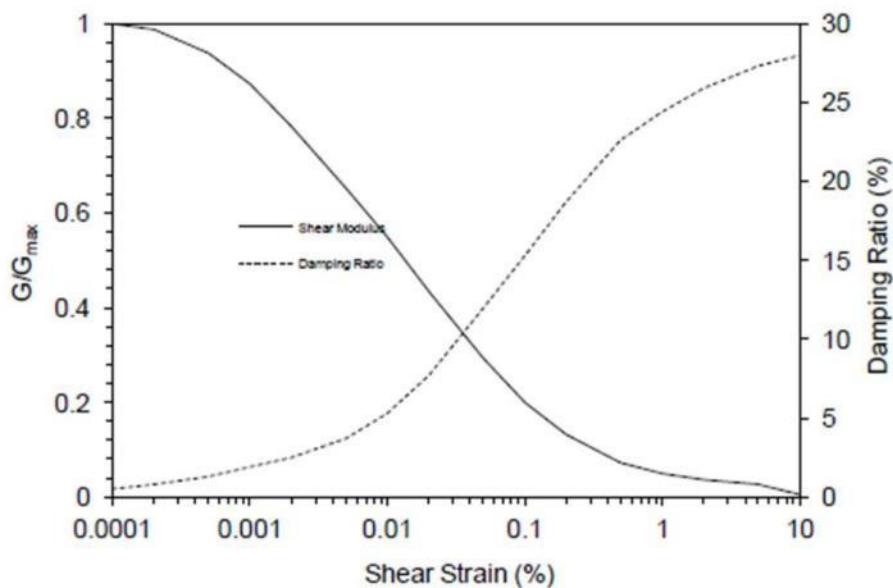


Figura 6-3 – Curve di degrado e smorzamento per la ghiaia

7. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

Come già anticipato nelle pagine precedenti si sono effettuate diverse analisi di risposta sismica locale per sei tratte lungo la linea in progetto sia attraverso la DGR476/2021 per la pianificazione della regione Emilia-Romagna, che utilizzando i criteri di progettazione indicati dalle NTC-2018, per tempi di ritorno $T_r=475$ anni e $T_r=949$ anni.

7.1 RSL SECONDO DGR 476/2021 RER (TR = 475 ANNI)

Dalla piattaforma è possibile scaricare l'input sismico per i periodi di ritorno di 101, 475 e 975 anni ed è espresso in termini di un gruppo di 7 accelerogrammi reali, registrati su roccia, spettro-compatibili in media agli spettri di normativa definiti nelle NTC-18.

Gli accelerogrammi di riferimento per il calcolo della risposta sismica locale nelle analisi di terzo livello di approfondimento sono disponibili nella piattaforma WebGIS: <http://egeos-test.eucentre.it/rer/home.html> realizzata da EUCENTRE.

7.1.1 DA PK 0+000 A PK 0+140

Come indicato nella DGR 476/2021, i 7 accelerogrammi di input resi disponibili dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale, tema "Sismica - Microzonazione Sismica" sono stati moltiplicati per il valore a_{ref} definito per il sito in esame, così identificato:

Aref	LATITUDINE	LONGITUDINE	VALORE (g)
	44°30'54.00"N	11°19'3.00"E	0.1637

Nell'impostare il calcolo di risposta sismica locale, i 7 accelerogrammi sono stati opportunamente scalati in funzione delle caratteristiche di base (A_g , T_R) relative allo stato limite in esame (SLV) rappresentativi dello scuotimento atteso sul suolo di riferimento relativo alla categoria di sottosuolo A definita nella tabella 3.2.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

Di seguito viene proposto il grafico di confronto degli spettri numerici risultanti dallo studio di RSL con smorzamento 5% e degli spettri normativi normalizzati come indicato nella DGR 476/2021.

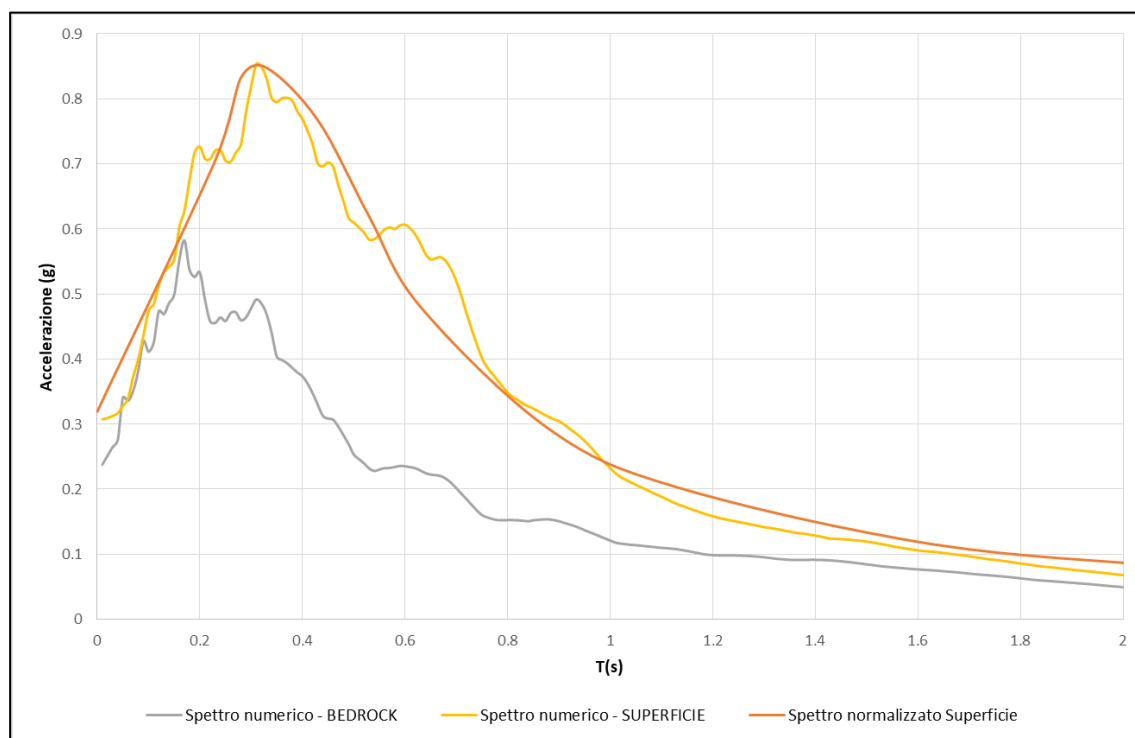


Figura 7-1 – Confronto spettri numerici

I fattori di amplificazione ed i parametri di scuotimento, risultanti dall'analisi numerica sono esposti nella seguente tabella:

FA PGA	FA SA1	FA SA2	FA SA3	FA SA4	FA SI1	FA SI2	FA SI3	HSM	H0408	H0711	H0515
1.5	1.56	2.42	2.14	2.38	1.79	2.34	2.34	1.52	2.42	2.14	2.38

Nella figura 7-2 che segue è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto per SLV.

Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione, il quale è stato calcolato in fase preliminare utilizzando un solo valore di accelerazione caratteristico della superficie. Il valore di accelerazione di superficie ottenuto da normativa NTC/2018 ha un carattere cautelativo in riferimento alle classi e alle categorie sismiche che rappresenta. Quindi considera condizioni di amplificazione massime per una determinata situazione legata a un determinato tipo di opera (stato limite e classe d'uso), una specifica categoria di suolo (amplificazione stratigrafica) e una specifica categoria topografica (amplificazione topografica). Lo studio di RSL permette di ridefinire l'azione sismica di progetto considerando la reale condizione di amplificazione stratigrafica del sito.

L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL e/o IL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito.

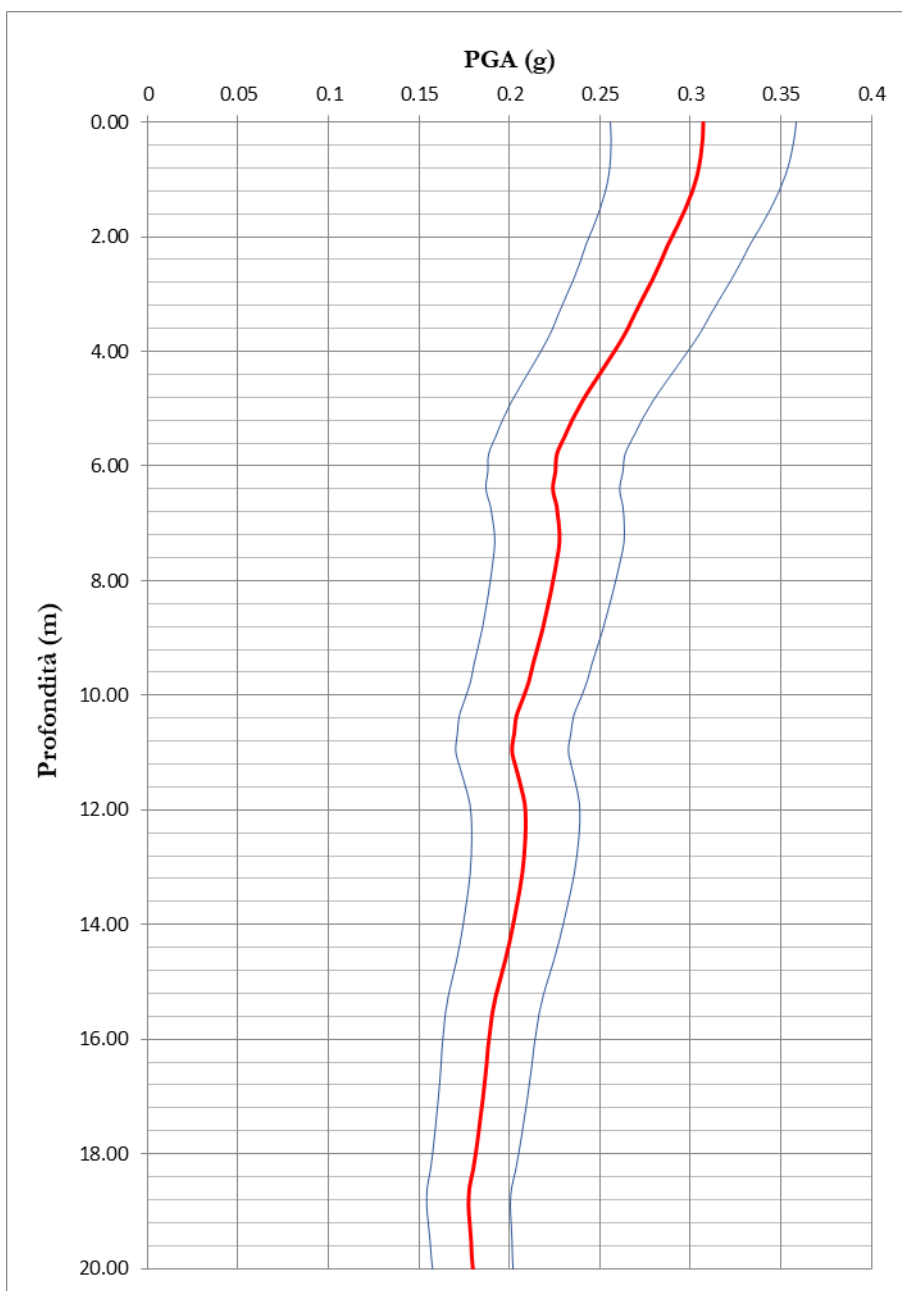


Figura 7-2 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL

7.1.2 DA PK 0+140 A PK 1+050

Come indicato nella DGR 476/2021, i 7 accelerogrammi di input resi disponibili dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale, tema “Sismica - Microzonazione Sismica” sono stati moltiplicati per il valore aref definito per il sito in esame, così identificato:

Aref	LATITUDINE	LONGITUDINE	VALORE (g)
	44°30'54.00"N	11°19'3.00"E	0.1637

Nell'impostare il calcolo di riposta sismica locale, i 7 accelerogrammi sono stati opportunamente scalati in funzione delle caratteristiche di base (A_g , T_R) relative allo stato limite in esame (SLV) rappresentativi dello scuotimento atteso sul suolo di riferimento relativo alla categoria di sottosuolo A definita nella tabella 3.2.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

Di seguito viene proposto il grafico di confronto degli spettri numerici risultanti dallo studio di RSL con smorzamento 5% e degli spettri normativi normalizzati come indicato nella DGR 476/2021.

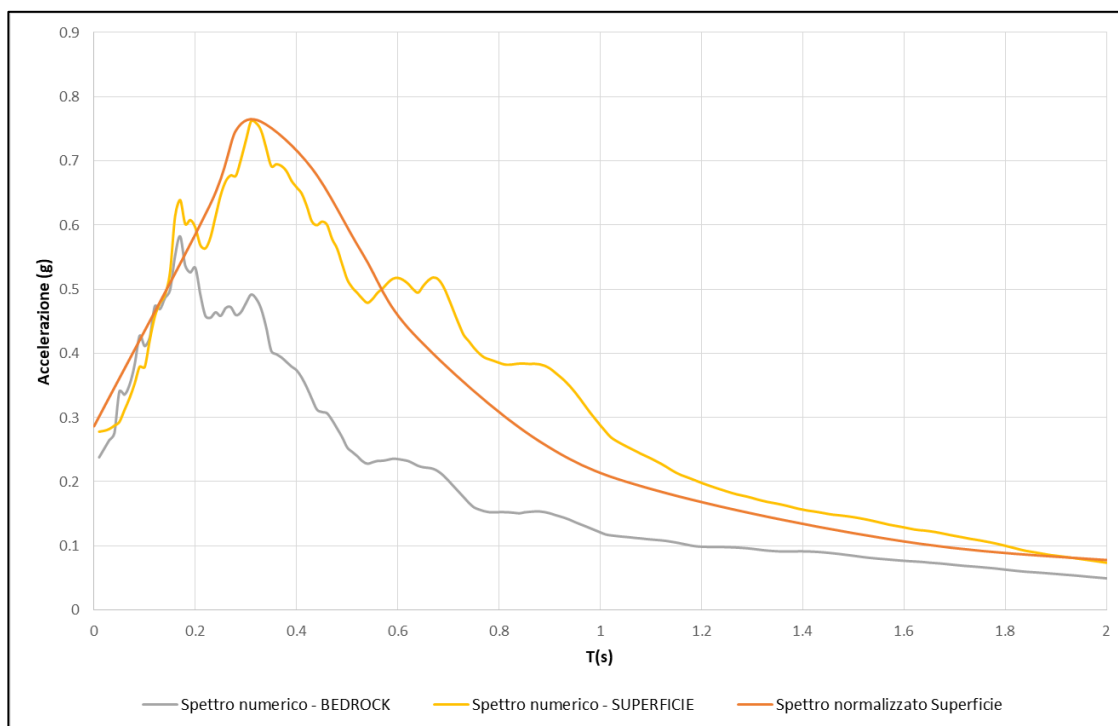


Figura 7-3 – Confronto spettri numerici

I fattori di amplificazione ed i parametri di scuotimento, risultanti dall'analisi numerica sono esposti nella seguente tabella:

FA PGA	FA SA1	FA SA2	FA SA3	FA SA4	FA SI1	FA SI2	FA SI3	HSM	H0408	H0711	H0515
1.3	1.37	2.15	2.44	2.34	1.57	2.37	2.37	1.34	2.15	2.44	2.34

Nella figura 7-4 che segue è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto per SLV.

Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione, il quale è stato calcolato in fase preliminare utilizzando un solo valore di accelerazione caratteristico della superficie. Il valore di accelerazione di superficie ottenuto da normativa NTC/2018 ha un carattere cautelativo in riferimento alle classi e alle categorie sismiche che rappresenta. Quindi considera condizioni di amplificazione massime per una determinata

situazione legata a un determinato tipo di opera (stato limite e classe d'uso), una specifica categoria di suolo (amplificazione stratigrafica) e una specifica categoria topografica (amplificazione topografica). Lo studio di RSL permette di ridefinire l'azione sismica di progetto considerando la reale condizione di amplificazione stratigrafica del sito.

L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL e/o IL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito.

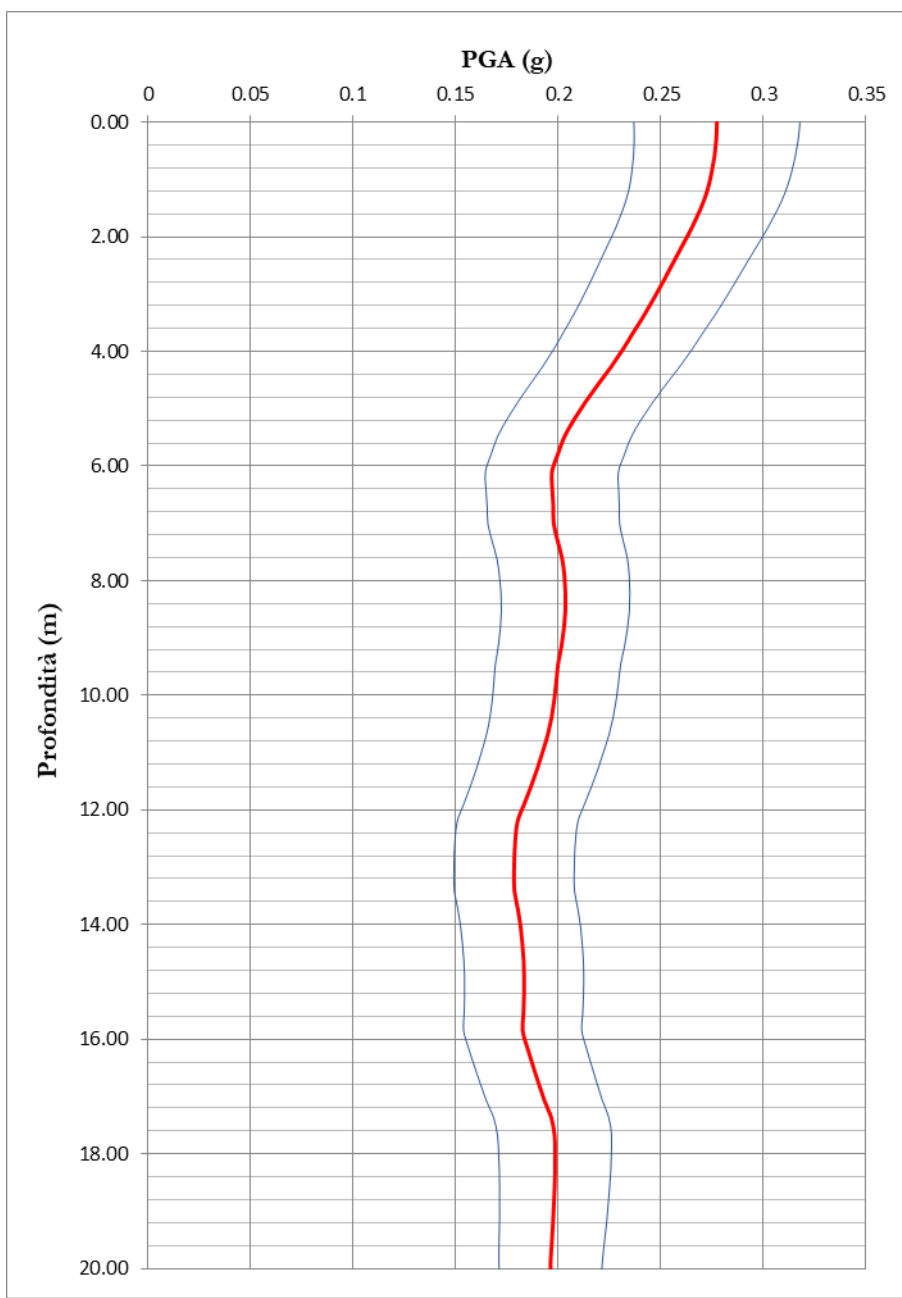


Figura 7-4 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL

7.1.3 DA PK 1+050 A PK 1+670

Come indicato nella DGR 476/2021, i 7 accelerogrammi di input resi disponibili dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale, tema “Sismica - Microzonazione Sismica” sono stati moltiplicati per il valore aref definito per il sito in esame, così identificato:

Aref	LATITUDINE	LONGITUDINE	VALORE (g)
	44°30'54.00"N	11°19'3.00"E	0.1637

Nell'impostare il calcolo di riposta sismica locale, i 7 accelerogrammi sono stati opportunamente scalati in funzione delle caratteristiche di base (A_g , T_R) relative allo stato limite in esame (SLV) rappresentativi dello scuotimento atteso sul suolo di riferimento relativo alla categoria di sottosuolo A definita nella tabella 3.2.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

Di seguito viene proposto il grafico di confronto degli spettri numerici risultanti dallo studio di RSL con smorzamento 5% e degli spettri normativi normalizzati come indicato nella DGR 476/2021.

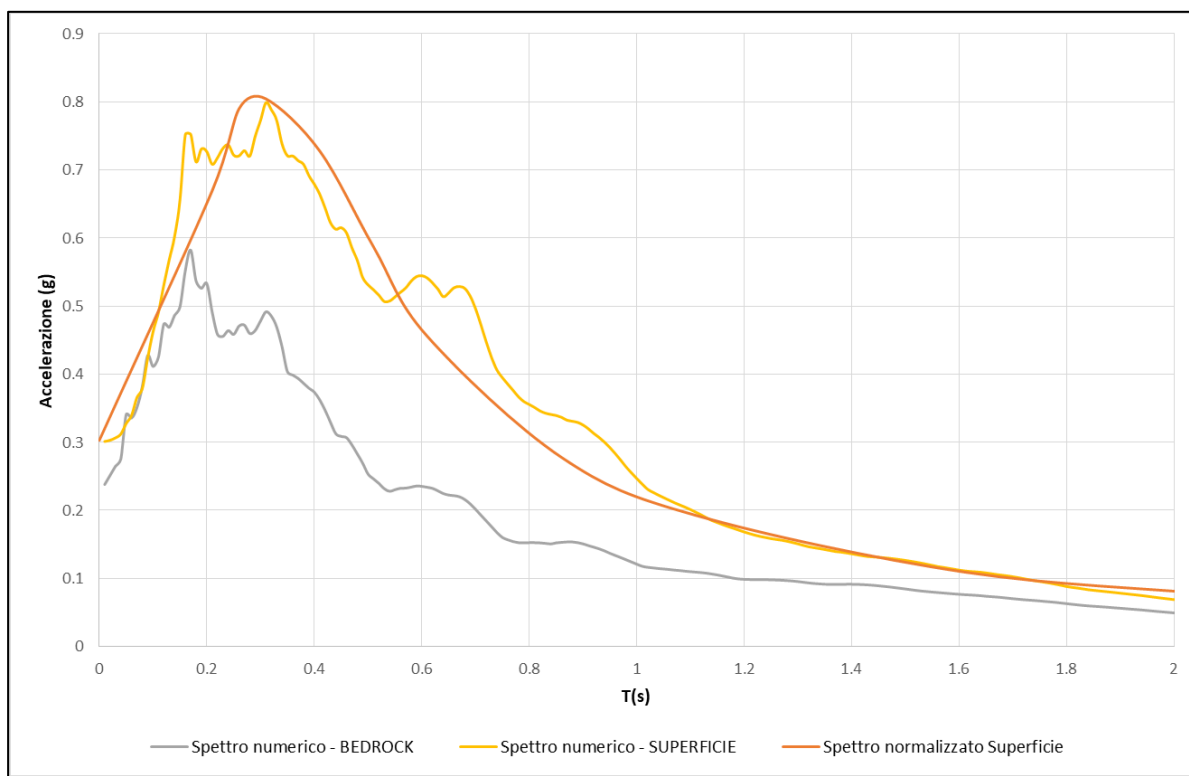


Figura 7-5 – Confronto spettri numerici

I fattori di amplificazione ed i parametri di scuotimento, risultanti dall'analisi numerica sono esposti nella seguente tabella:

FA PGA	FA SA1	FA SA2	FA SA3	FA SA4	FA SI1	FA SI2	FA SI3	HSM	H0408	H0711	H0515
1.4	1.51	2.20	2.20	2.28	1.68	2.27	2.27	1.50	2.20	2.20	2.28

Nella figura 7-6 che segue è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto per SLV.

Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione, il quale è stato calcolato in fase preliminare utilizzando un solo valore di accelerazione caratteristico della superficie. Il valore di accelerazione di superficie ottenuto da normativa NTC/2018 ha un carattere cautelativo in riferimento alle classi e alle categorie sismiche

che rappresenta. Quindi considera condizioni di amplificazione massime per una determinata situazione legata a un determinato tipo di opera (stato limite e classe d'uso), una specifica categoria di suolo (amplificazione stratigrafica) e una specifica categoria topografica (amplificazione topografica). Lo studio di RSL permette di ridefinire l'azione sismica di progetto considerando la reale condizione di amplificazione stratigrafica del sito.

L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL e/o IL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito.

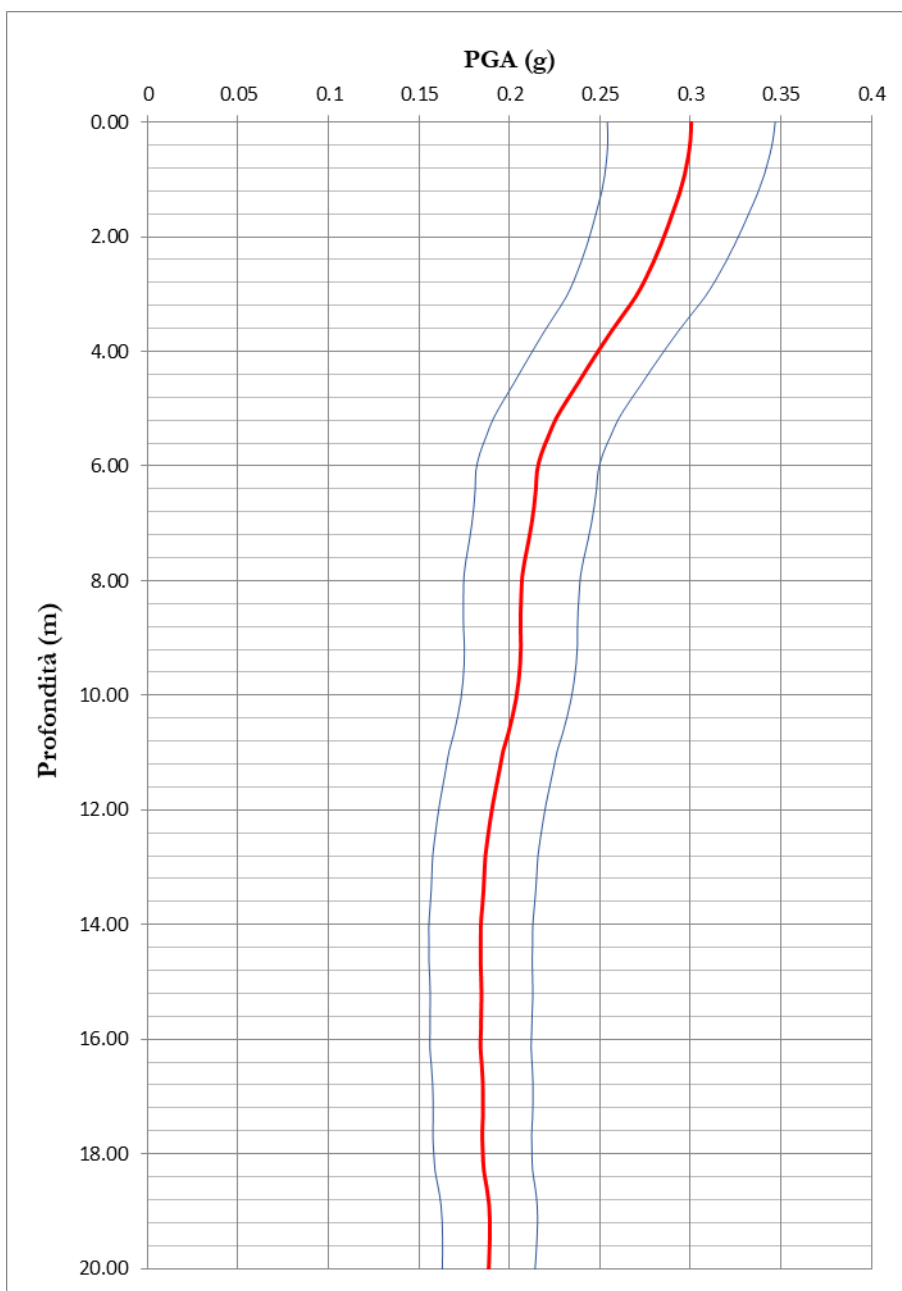


Figura 7-6 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL

7.1.4 DA PK 1+670 A PK 1+890

Come indicato nella DGR 476/2021, i 7 accelerogrammi di input resi disponibili dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale, tema “Sismica - Microzonazione Sismica” sono stati moltiplicati per il valore aref definito per il sito in esame, così identificato:

Aref	LATITUDINE	LONGITUDINE	VALORE (g)
	44°30'54.00"N	11°19'3.00"E	0.1637

Nell'impostare il calcolo di riposta sismica locale, i 7 accelerogrammi sono stati opportunamente scalati in funzione delle caratteristiche di base (A_g , T_R) relative allo stato limite in esame (SLV) rappresentativi dello scuotimento atteso sul suolo di riferimento relativo alla categoria di sottosuolo A definita nella tabella 3.2.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

Di seguito viene proposto il grafico di confronto degli spettri numerici risultanti dallo studio di RSL con smorzamento 5% e degli spettri normativi normalizzati come indicato nella DGR 476/2021.

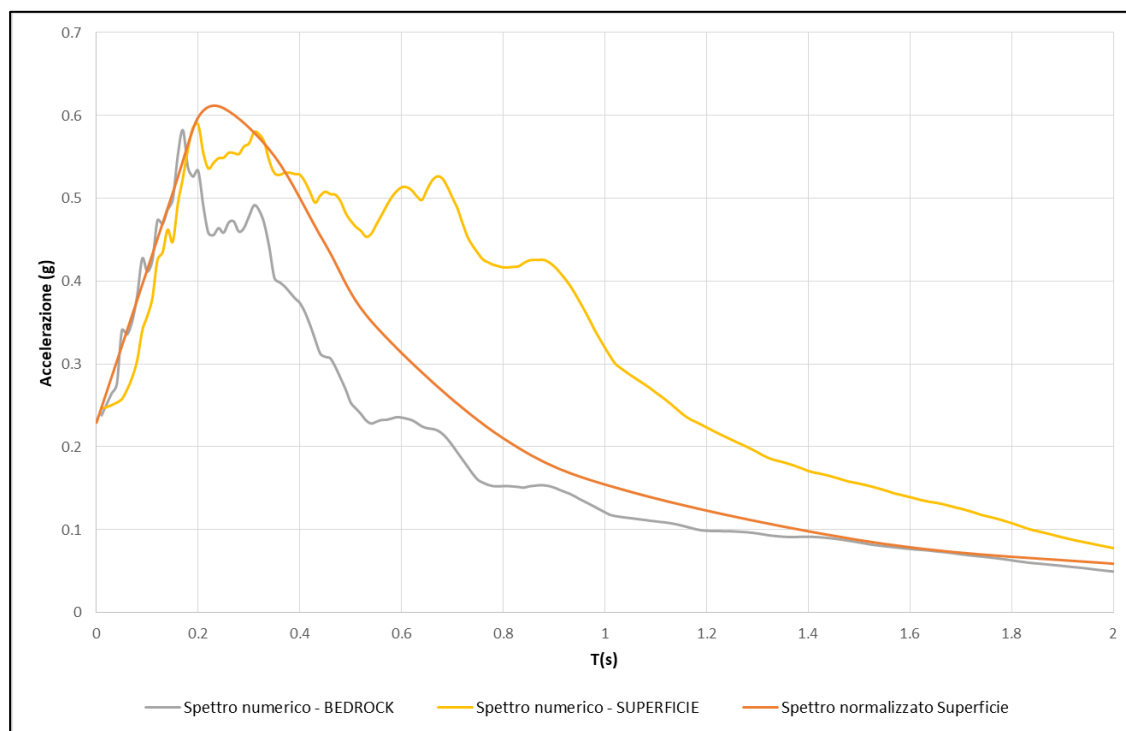


Figura 7-7 – Confronto spettri numerici

I fattori di amplificazione ed i parametri di scuotimento, risultanti dall'analisi numerica sono esposti nella seguente tabella:

FA PGA	FA SA1	FA SA2	FA SA3	FA SA4	FA SI1	FA SI2	FA SI3	HSM	H0408	H0711	H0515
1.0	1.16	2.06	2.67	2.43	1.30	2.49	2.49	1.13	2.06	2.67	2.43

Nella figura 7-8 che segue è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto per SLV.

Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione, il quale è stato calcolato in fase preliminare utilizzando un solo valore di accelerazione caratteristico della superficie. Il valore di accelerazione di superficie ottenuto da normativa NTC/2018 ha un carattere cautelativo in riferimento alle classi e alle categorie sismiche

che rappresenta. Quindi considera condizioni di amplificazione massime per una determinata situazione legata a un determinato tipo di opera (stato limite e classe d'uso), una specifica categoria di suolo (amplificazione stratigrafica) e una specifica categoria topografica (amplificazione topografica). Lo studio di RSL permette di ridefinire l'azione sismica di progetto considerando la reale condizione di amplificazione stratigrafica del sito.

L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL e/o IL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito.

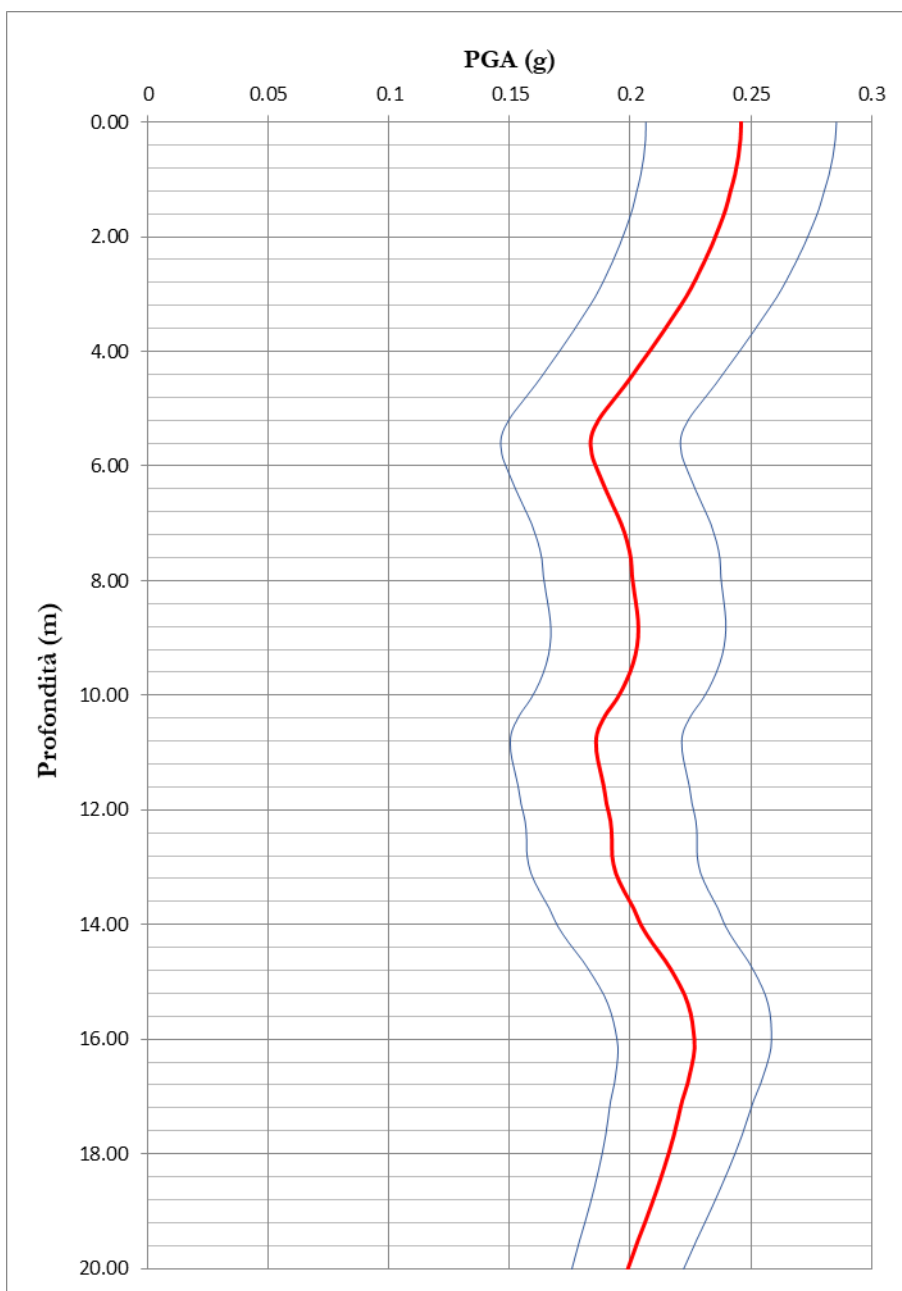


Figura 7-8 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL

7.1.5 DA PK 1+890 A PK 5+290

Come indicato nella DGR 476/2021, i 7 accelerogrammi di input resi disponibili dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale, tema “Sismica - Microzonazione Sismica” sono stati moltiplicati per il valore aref definito per il sito in esame, così identificato:

Aref	LATITUDINE	LONGITUDINE	VALORE (g)
	44°30'54.00"N	11°19'3.00"E	0.1637

Nell'impostare il calcolo di riposta sismica locale, i 7 accelerogrammi sono stati opportunamente scalati in funzione delle caratteristiche di base (A_g , T_R) relative allo stato limite in esame (SLV) rappresentativi dello scuotimento atteso sul suolo di riferimento relativo alla categoria di sottosuolo A definita nella tabella 3.2.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

Di seguito viene proposto il grafico di confronto degli spettri numerici risultanti dallo studio di RSL con smorzamento 5% e degli spettri normativi normalizzati come indicato nella DGR 476/2021.

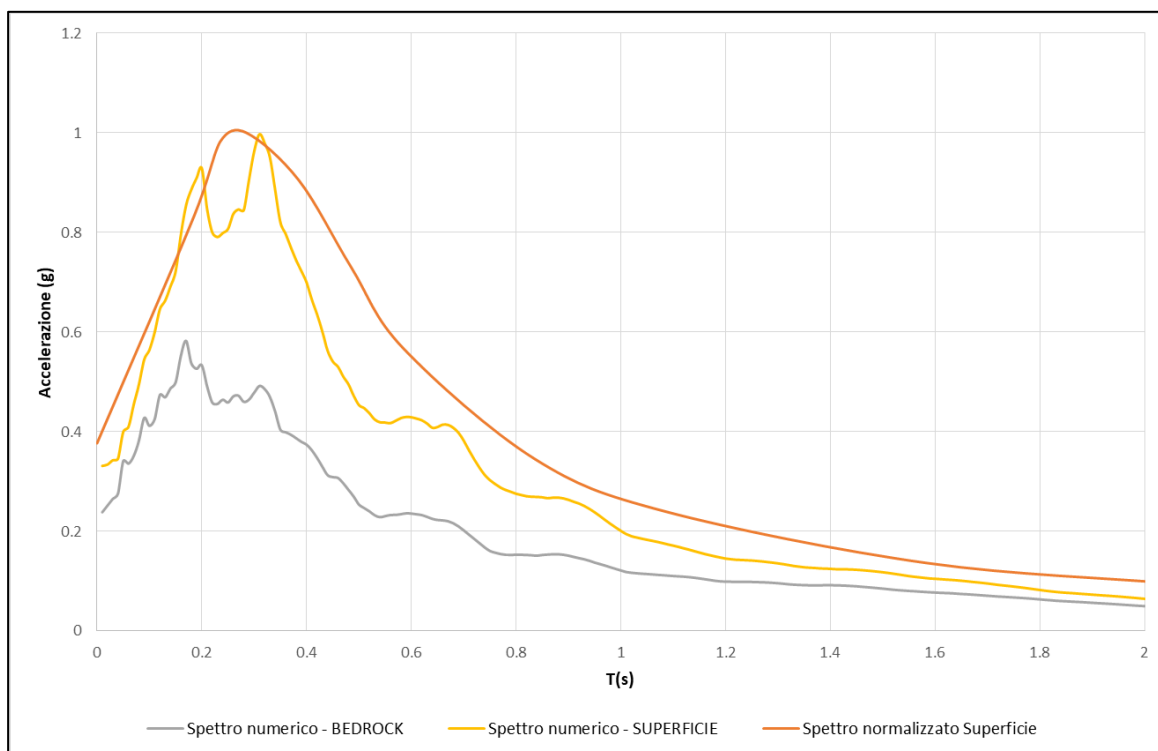


Figura 7-9 – Confronto spettri numerici

I fattori di amplificazione ed i parametri di scuotimento, risultanti dall'analisi numerica sono esposti nella seguente tabella:

FA PGA	FA SA1	FA SA2	FA SA3	FA SA4	FA SI1	FA SI2	FA SI3	HSM	H0408	H0711	H0515
1.7	1.68	1.82	1.75	1.81	1.81	1.81	1.81	1.75	1.82	1.75	1.81

Nella figura 7-10 che segue è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto per SLV.

Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione, il quale è stato calcolato in fase preliminare utilizzando un solo valore di accelerazione caratteristico della superficie. Il valore di accelerazione di superficie ottenuto da normativa NTC/2018 ha un carattere cautelativo in riferimento alle classi e alle categorie sismiche

che rappresenta. Quindi considera condizioni di amplificazione massime per una determinata situazione legata a un determinato tipo di opera (stato limite e classe d'uso), una specifica categoria di suolo (amplificazione stratigrafica) e una specifica categoria topografica (amplificazione topografica). Lo studio di RSL permette di ridefinire l'azione sismica di progetto considerando la reale condizione di amplificazione stratigrafica del sito.

L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL e/o IL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito.

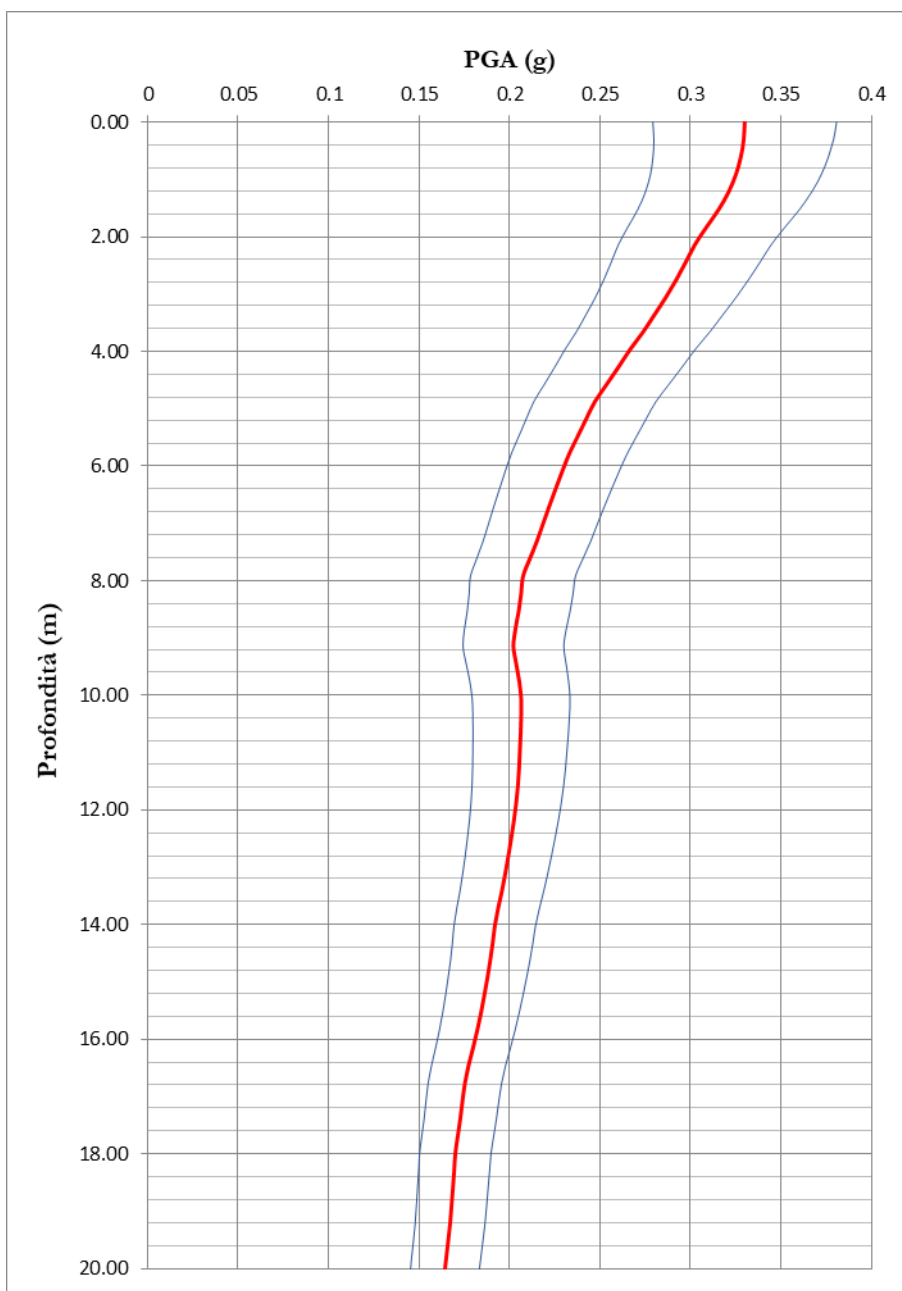


Figura 7-10 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL

7.1.6 DA PK 5+290 A PK 5+525

Come indicato nella DGR 476/2021, i 7 accelerogrammi di input resi disponibili dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale, tema “Sismica - Microzonazione Sismica” sono stati moltiplicati per il valore aref definito per il sito in esame, così identificato:

Aref	LATITUDINE	LONGITUDINE	VALORE (g)
	44°30'54.00"N	11°19'3.00"E	0.1637

Nell'impostare il calcolo di riposta sismica locale, i 7 accelerogrammi sono stati opportunamente scalati in funzione delle caratteristiche di base (A_g , T_R) relative allo stato limite in esame (SLV) rappresentativi dello scuotimento atteso sul suolo di riferimento relativo alla categoria di sottosuolo A definita nella tabella 3.2.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

Di seguito viene proposto il grafico di confronto degli spettri numerici risultanti dallo studio di RSL con smorzamento 5% e degli spettri normativi normalizzati come indicato nella DGR 476/2021.

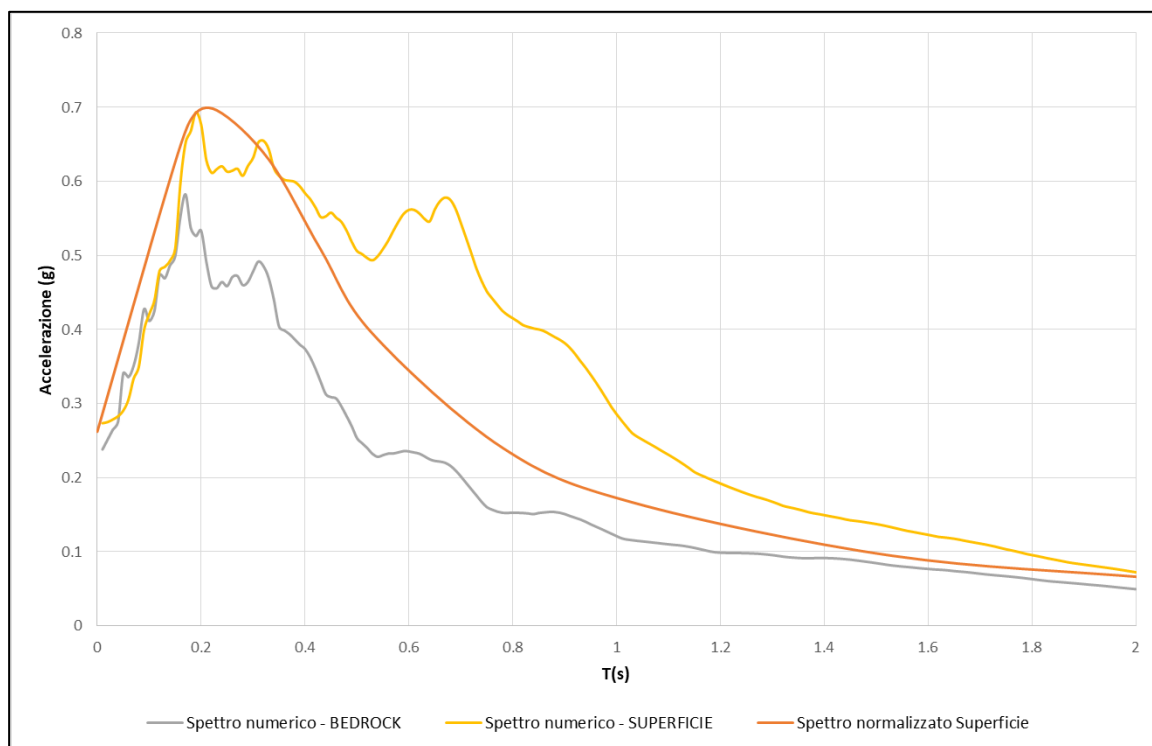


Figura 7-11 – Confronto spettri numerici

I fattori di amplificazione ed i parametri di scuotimento, risultanti dall'analisi numerica sono esposti nella seguente tabella:

FA PGA	FA SA1	FA SA2	FA SA3	FA SA4	FA SI1	FA SI2	FA SI3	HSM	H0408	H0711	H0515
1.2	1.31	2.23	2.54	2.49	1.46	2.52	2.52	1.28	2.23	2.54	2.49

Nella figura 7-12 che segue è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto per SLV.

Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione, il quale è stato calcolato in fase preliminare utilizzando un solo valore di accelerazione caratteristico della superficie. Il valore di accelerazione di superficie ottenuto da normativa NTC/2018 ha un carattere cautelativo in riferimento alle classi e alle categorie sismiche

che rappresenta. Quindi considera condizioni di amplificazione massime per una determinata situazione legata a un determinato tipo di opera (stato limite e classe d'uso), una specifica categoria di suolo (amplificazione stratigrafica) e una specifica categoria topografica (amplificazione topografica). Lo studio di RSL permette di ridefinire l'azione sismica di progetto considerando la reale condizione di amplificazione stratigrafica del sito.

L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL e/o IL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito.

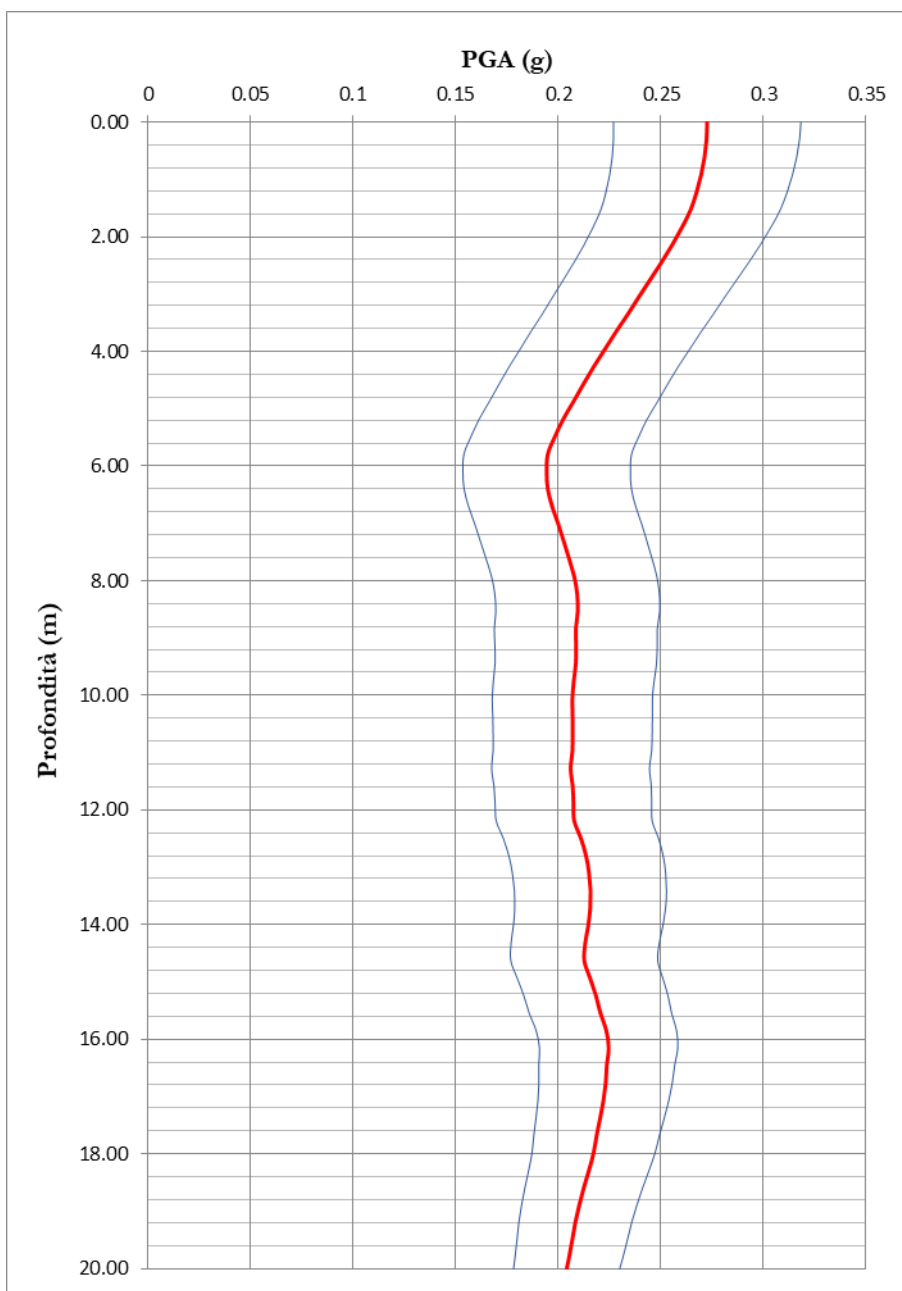


Figura 7-12 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL

7.2 RSL SECONDO NTC-2018 (TR=949 ANNI)

Dopo aver effettuato il download dei sette input sismici con il programma REXEL ed averli caricati tutti nel programma STRATA e dopo aver introdotto lo stesso modello di sottosuolo delle sei tratte da esaminare, rappresentati da strati a differente tessitura, diversi valori delle onde S e del modulo G, si ottiene in output un unico spettro che si può comparare con quello della normativa semplificata ($C_u=2$, $V_N=100$, SLV).

Per il confronto si può ricostruire attorno allo spettro ottenuto dalla RSL uno “spettro normalizzato” con il metodo delle differenze ai minimi quadrati.

7.2.1 DA PK 0+000 A PK 0+140

Di seguito è riportato il grafico dello spettro di risposta numerico ottenuto utilizzando accelerogrammi spettro-compatibili alla sismicità di base del sito per lo stato limite considerato e definito da normativa SLV).

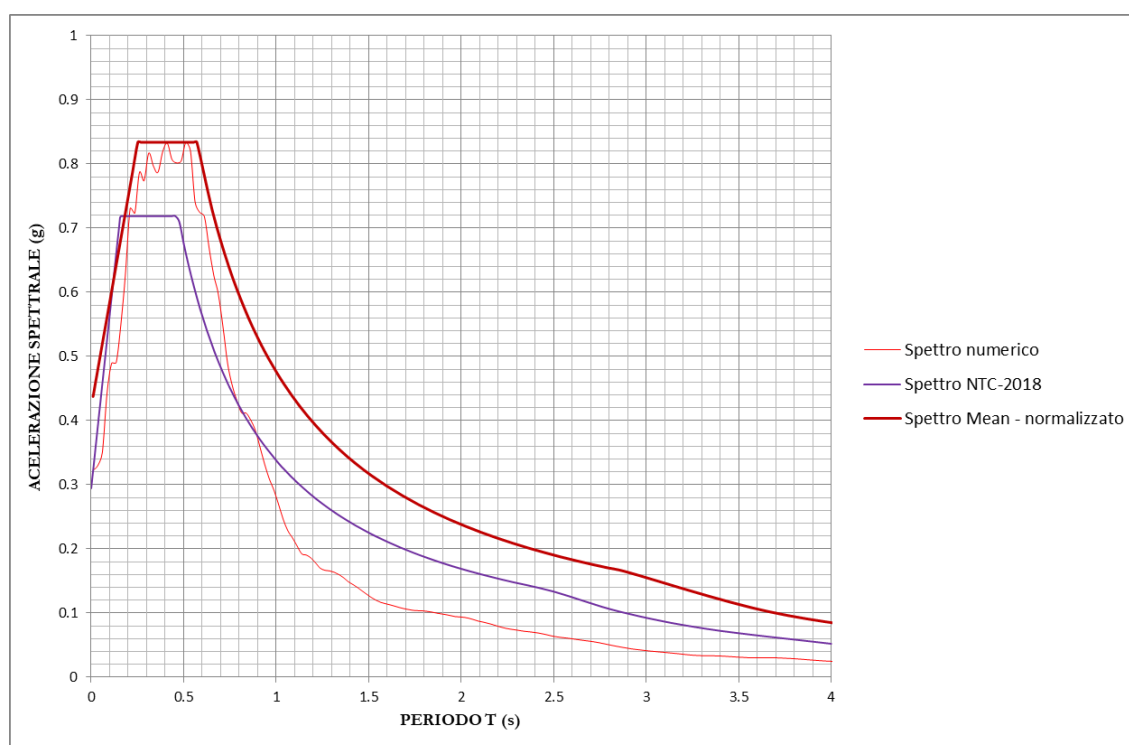


Figura 7-13 – Spettri di risposta numerici, normalizzati e semplificati da NTC-2018 per il SLV(10%).

Nella seguente figura è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto. Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione. L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito rispetto al singolo valore di accelerazione utilizzato nell'approccio semplificato secondo normativa NTC 2018.

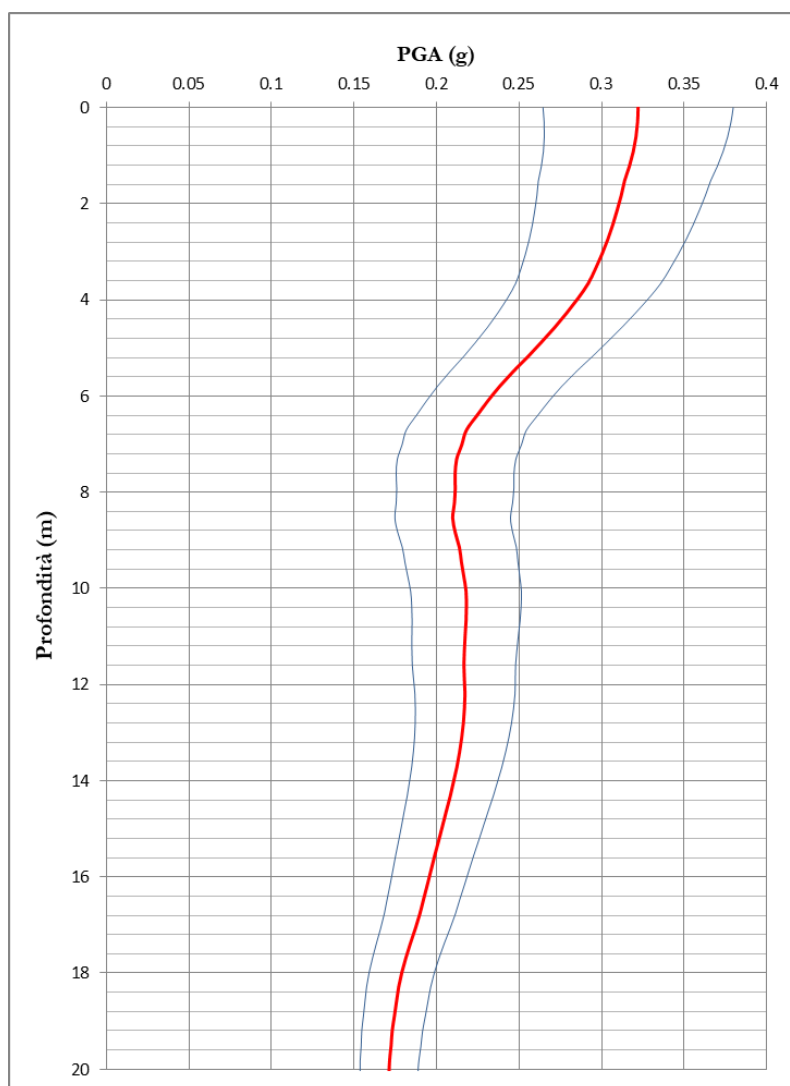


Figura 7-14 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL.

Di seguito si riportano i parametri sismici relativi agli spettri ottenuti per normalizzazione dello spettro numerico medio ottenuto da studio di risposta sismica locale per tutti gli stati limite analizzati.

	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	S [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]
SLV	0.21	1.98	0.47	1.32	0.21	0.63	2.88

7.2.2 DA PK 0+140 A PK 1+050

Di seguito è riportato il grafico dello spettro di risposta numerico ottenuto utilizzando accelerogrammi spettro-compatibili alla sismicità di base del sito per lo stato limite considerato e definito da normativa SLV).

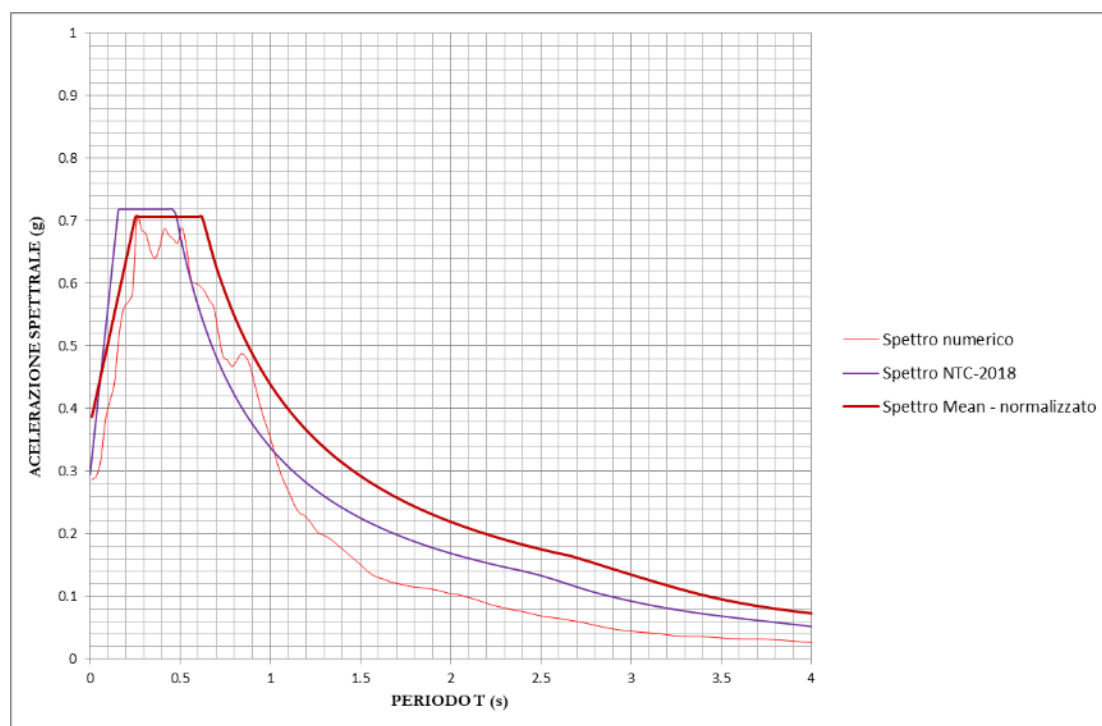


Figura 7-15 – Spettri di risposta numerici, normalizzati e semplificati da NTC-2018 per il SLV(10%).

Nella seguente figura è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto. Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione. L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito rispetto al singolo valore di accelerazione utilizzato nell'approccio semplificato secondo normativa NTC 2018.

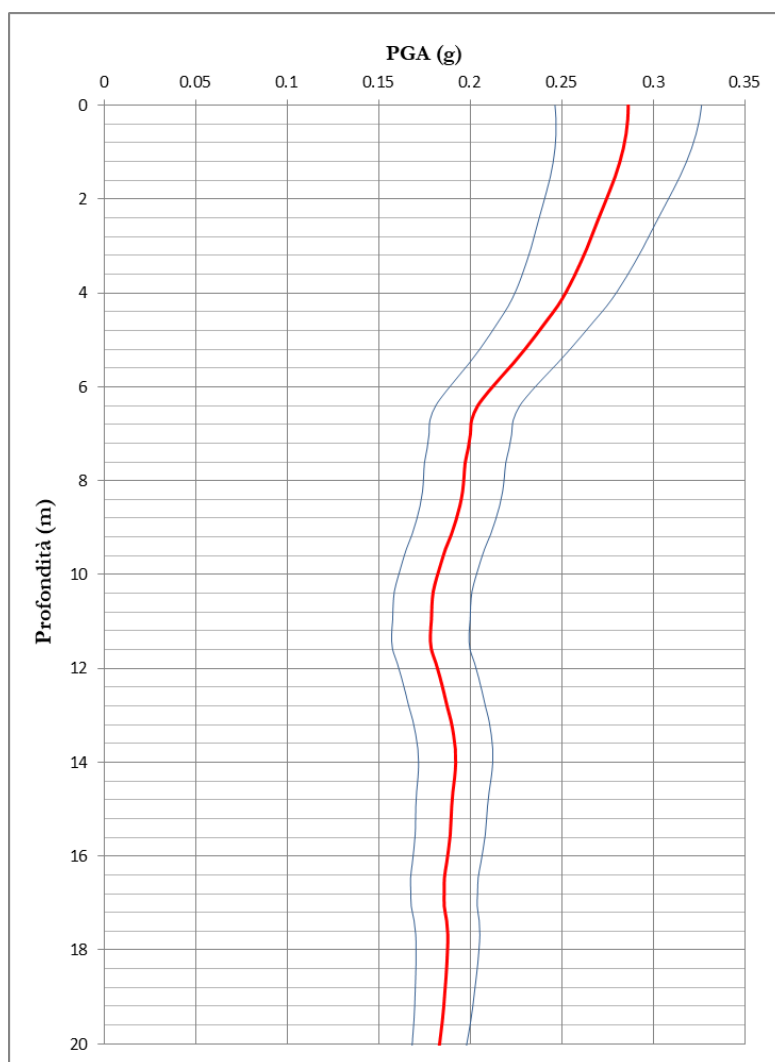


Figura 7-16 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL.

Di seguito si riportano i parametri sismici relativi agli spettri ottenuti per normalizzazione dello spettro numerico medio ottenuto da studio di risposta sismica locale per tutti gli stati limite analizzati.

	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	S [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]
SLV	0.268	1.89	0.45	1.40	0.21	0.62	2.67

7.2.3 DA PK 1+050 A PK 1+670

Di seguito è riportato il grafico dello spettro di risposta numerico ottenuto utilizzando accelerogrammi spettro-compatibili alla sismicità di base del sito per lo stato limite considerato e definito da normativa SLV).

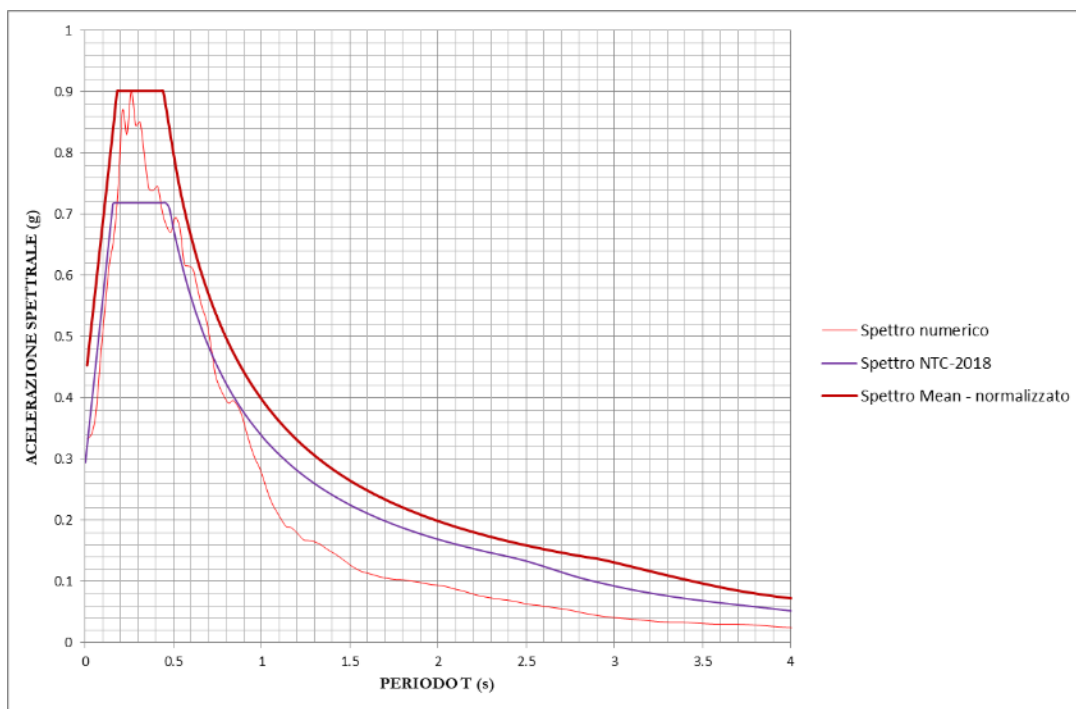


Figura 7-17 – Spettri di risposta numerici, normalizzati e semplificati da NTC-2018 per il SLV(10%).

Nella seguente figura è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto. Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione. L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito rispetto al singolo valore di accelerazione utilizzato nell'approccio semplificato secondo normativa NTC 2018.

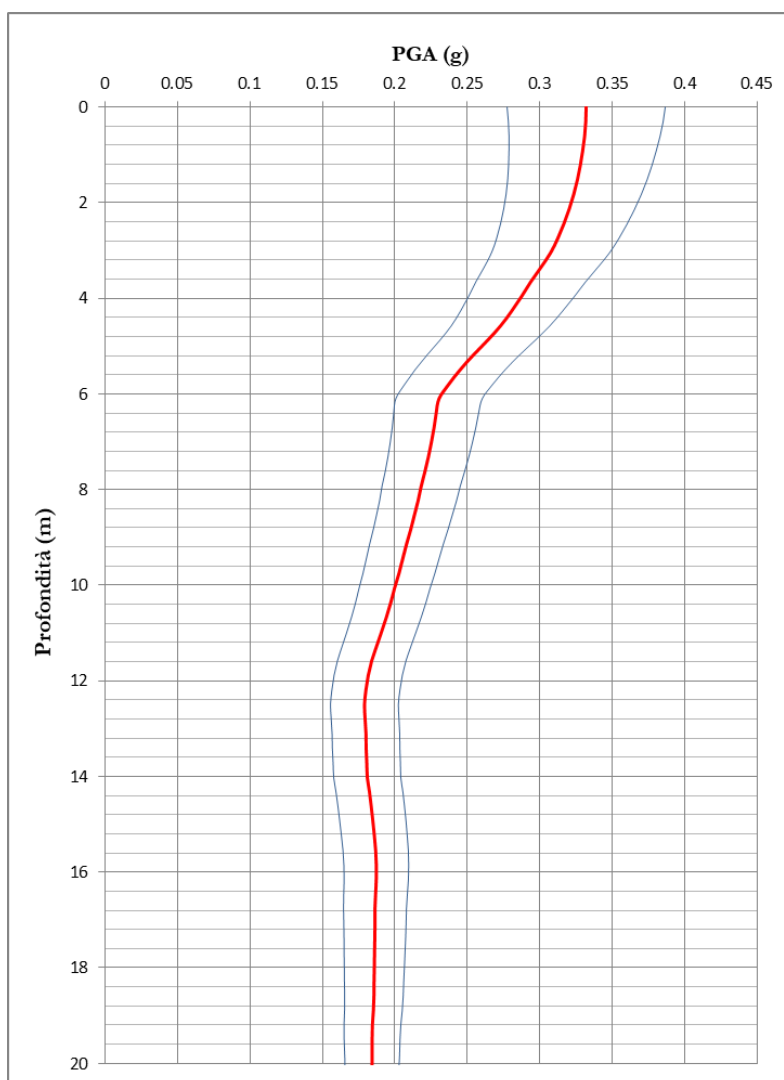


Figura 7-18 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL.

Di seguito si riportano i parametri sismici relativi agli spettri ottenuti per normalizzazione dello spettro numerico medio ottenuto da studio di risposta sismica locale per tutti gli stati limite analizzati.

	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	S [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]
SLV	0.333	2.11	0.28	1.28	0.15	0.45	2.93

7.2.4 DA PK 1+670 A PK 1+890

Di seguito è riportato il grafico dello spettro di risposta numerico ottenuto utilizzando accelerogrammi spettro-compatibili alla sismicità di base del sito per lo stato limite considerato e definito da normativa SLV).

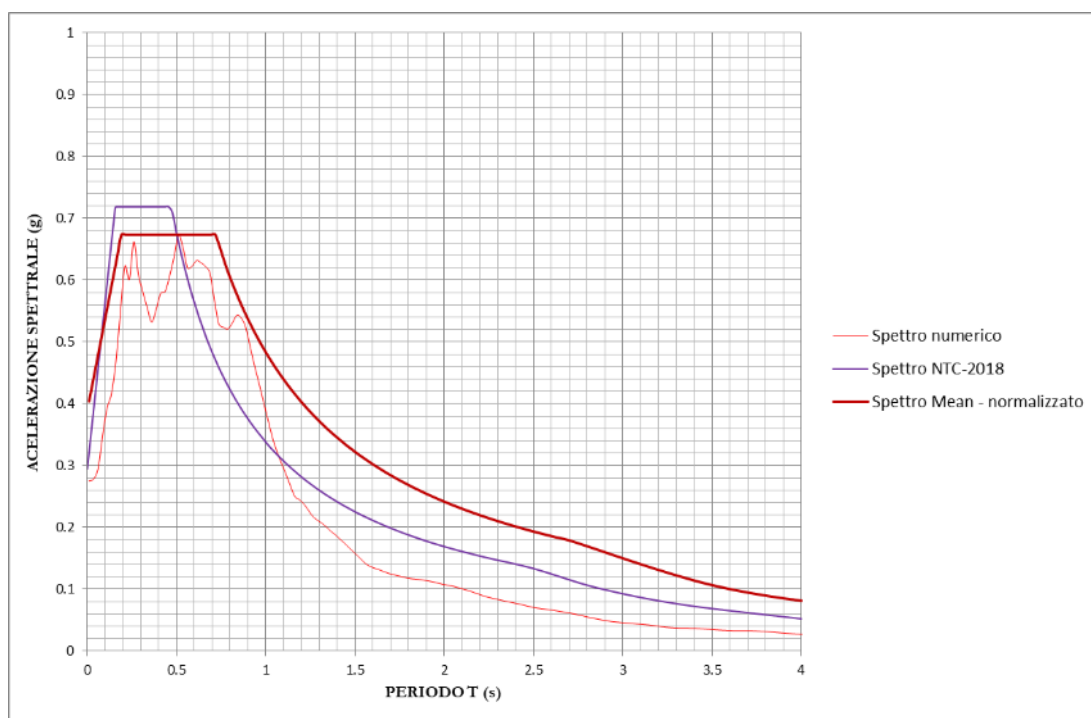


Figura 7-19 – Spettri di risposta numerici, normalizzati e semplificati da NTC-2018 per il SLV(10%).

Nella seguente figura è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto. Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione. L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito rispetto al singolo valore di accelerazione utilizzato nell'approccio semplificato secondo normativa NTC 2018.

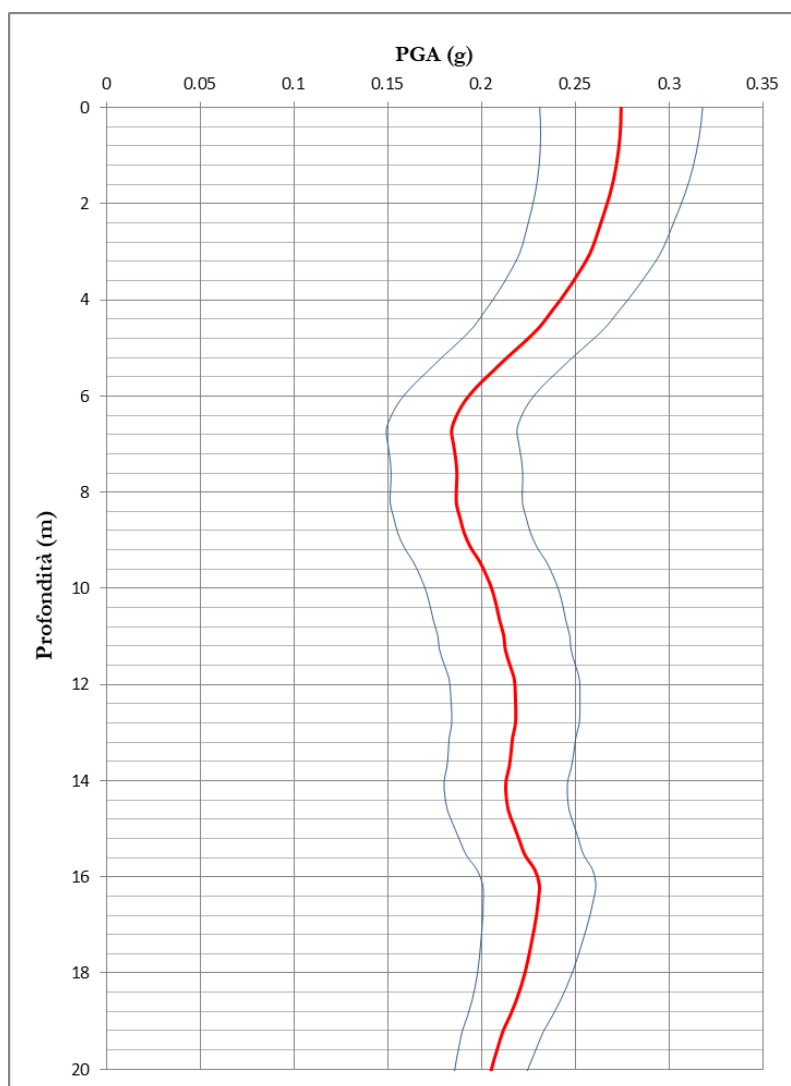


Figura 7-20 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL.

Di seguito si riportano i parametri sismici relativi agli spettri ottenuti per normalizzazione dello spettro numerico medio ottenuto da studio di risposta sismica locale per tutti gli stati limite analizzati.

	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	S [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]
SLV	0.275	1.73	0.56	1.42	0.24	0.71	2.70

7.2.5 DA PK 1+890 A PK 5+290

Di seguito è riportato il grafico dello spettro di risposta numerico ottenuto utilizzando accelerogrammi spettro-compatibili alla sismicità di base del sito per lo stato limite considerato e definito da normativa SLV).

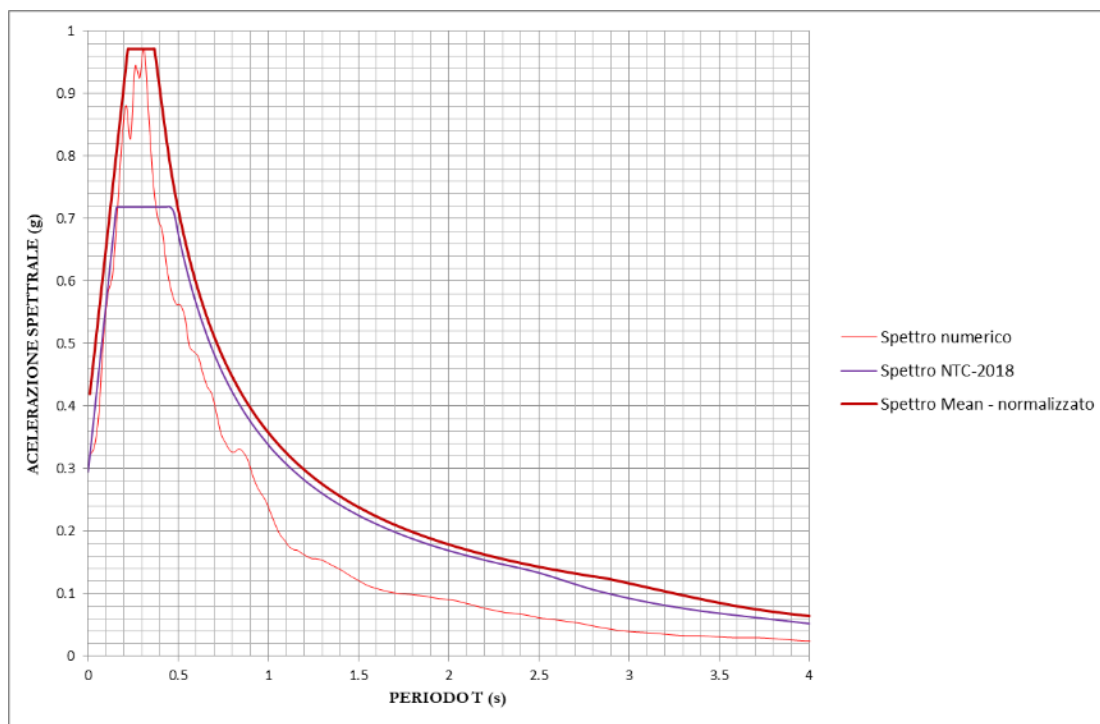


Figura 7-21 – Spettri di risposta numerici, normalizzati e semplificati da NTC-2018 per il SLV(10%).

Nella seguente figura è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto. Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione. L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito rispetto al singolo valore di accelerazione utilizzato nell'approccio semplificato secondo normativa NTC 2018.

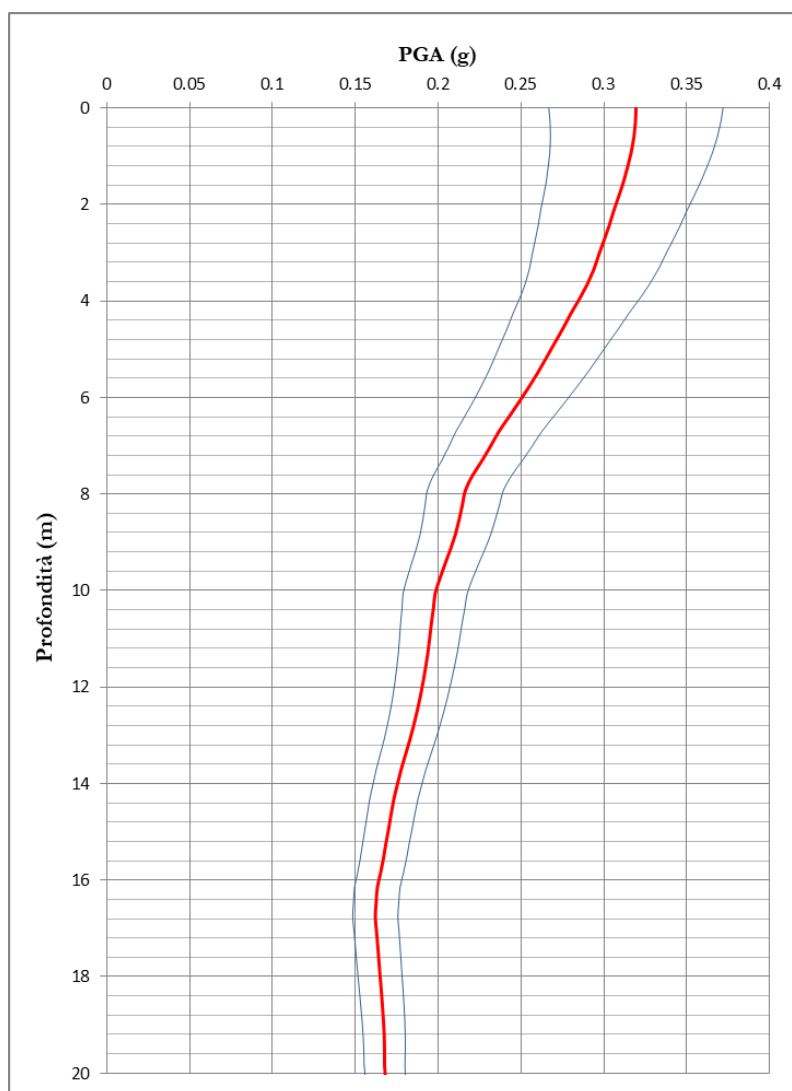


Figura 7-22 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL.

Di seguito si riportano i parametri sismici relativi agli spettri ottenuti per normalizzazione dello spettro numerico medio ottenuto da studio di risposta sismica locale per tutti gli stati limite analizzati.

	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	S [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]
SLV	0.321	2.47	0.23	1.22	0.13	0.39	2.88

7.2.6 DA PK 5+290 A PK 5+525

Di seguito è riportato il grafico dello spettro di risposta numerico ottenuto utilizzando accelerogrammi spettro-compatibili alla sismicità di base del sito per lo stato limite considerato e definito da normativa SLV).

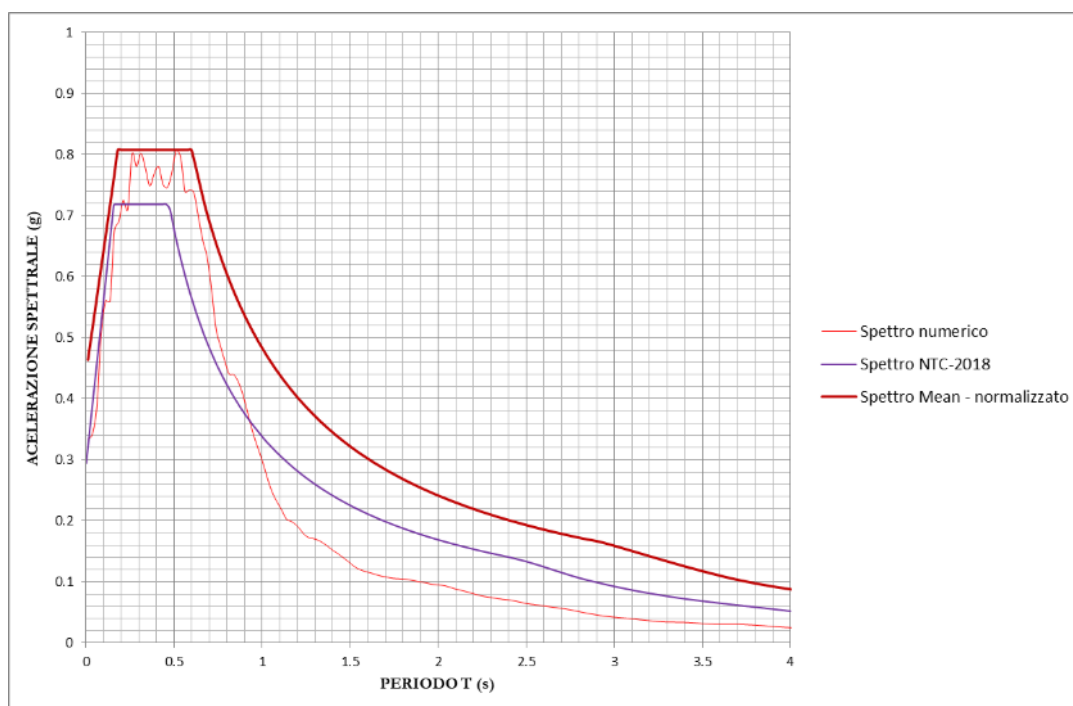


Figura 7-23 – Spettri di risposta numerici, normalizzati e semplificati da NTC-2018 per il SLV(10%).

Nella seguente figura è riportato il profilo verticale dell'accelerazione (PGA) ottenuto. Questo stesso profilo verticale sarà utilizzato per la definizione del profilo del fattore di sicurezza a liquefazione. L'accelerazione sismica nella valutazione della suscettibilità a liquefazione è un parametro che ha un grande impatto sul calcolo di FSL, per tanto lo studio di risposta sismica locale fornisce un profilo della PGA che permette di valutare uno stress ciclico indotto dal sisma (CSR) discretizzato e maggiormente rappresentativo degli effetti di amplificazione stratigrafica di sito rispetto al singolo valore di accelerazione utilizzato nell'approccio semplificato secondo normativa NTC 2018.

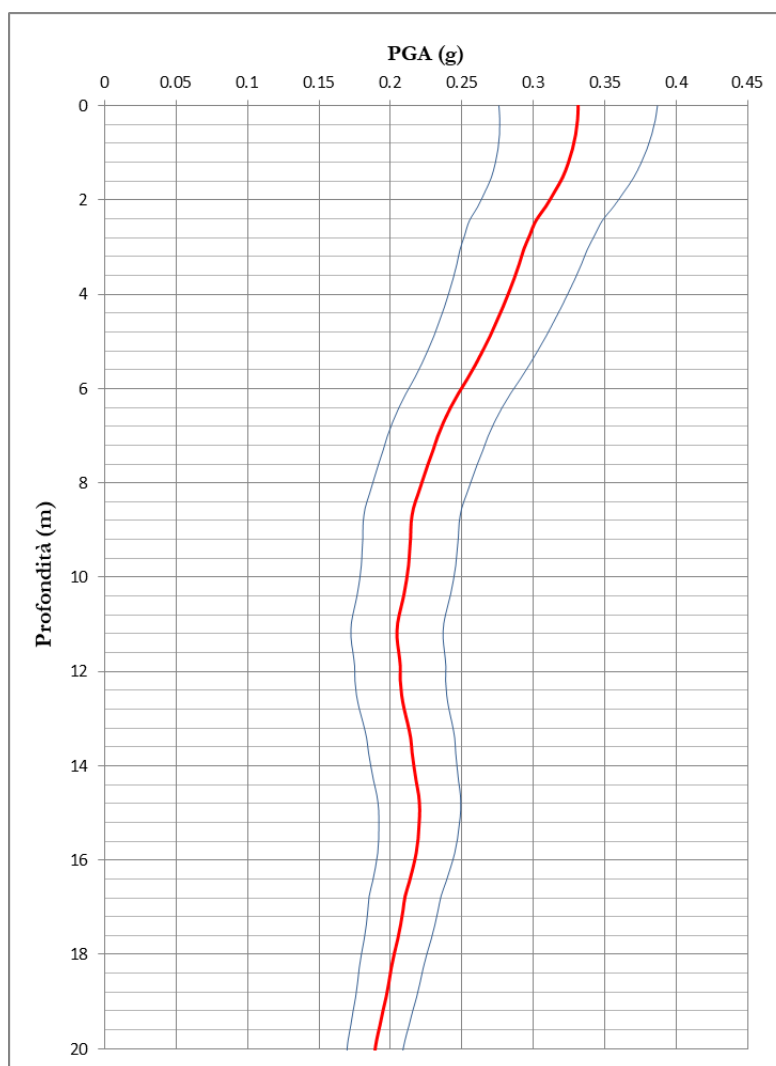


Figura 7-24 – Profilo verticale della PGA (g) ottenuto da analisi di RSL.

Di seguito si riportano i parametri sismici relativi agli spettri ottenuti per normalizzazione dello spettro numerico medio ottenuto da studio di risposta sismica locale per tutti gli stati limite analizzati.

	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	S [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]
SLV	0.333	1.82	0.43	1.35	0.20	0.60	2.93

8. VERIFICA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE

Per verificare la suscettibilità a liquefazione degli strati individuati come maggiormente inclini a liquefarsi è stato utilizzato l'approccio semplificato illustrato nel documento "Procedure di riferimento per le analisi di terzo livello di approfondimento" dalla DGR 476/2021.

Con il termine "liquefazione" si indicano vari fenomeni fisici (mobilità ciclica, liquefazione ciclica, fluidificazione) osservati durante terremoti significativi (generalmente, $M > 5.5$) nei depositi e nei pendii sabbiosi saturi; in questi sedimenti, le condizioni "non drenate" durante il sisma possono indurre un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali, che a loro volta possono provocare una drastica caduta della resistenza al taglio e quindi una perdita di capacità portante del terreno. Il meccanismo di liquefazione dei sedimenti è governato da molti fattori che si possono ricondurre principalmente:

- alle caratteristiche dell'impulso sismico (forma, durata dello scuotimento, ecc.) e la sua energia (magnitudo, accelerazioni, ecc.);
- alle caratteristiche tessiturali e meccaniche dei sedimenti (fuso granulometrico, densità relativa, coesione, limiti di consistenza, ecc.);
- alla presenza di falda superficiale e alle condizioni di confinamento dello strato liquefacibile (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15-20 metri).

La differenza fra i diversi fenomeni dipende dalle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche e dalla resistenza al taglio residua dopo il terremoto.

In condizioni di sisma, vi possono anche essere effetti di "riordino" dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi che possono coinvolgere sia i depositi granulari, sia i sedimenti fini poco coesivi.

Nell'ultimo decennio, sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni postsisma, provocate da perdite di resistenza, anche nei sedimenti fini (limi e argille a

comportamento “non drenato”). Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” (Idriss & Boulanger, 2004 e 2008).

Fenomeni di liquefazione si sono chiaramente manifestati con gli eventi sismici emiliani del maggio 2012, tuttavia non si sono riscontrati fenomeni più critici riconducibili a fluidificazione (con perdita della capacità portante del terreno dei sedimenti al di sotto delle costruzioni) e neppure scorrimenti significativi nelle scarpate degli argini; anche i cedimenti rilevati degli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica ed in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

Le verifiche della suscettibilità al fenomeno della liquefazione sismica sono eseguite secondo il metodo empirico proposto da Andrus & Stokoe (1977), che si basa sulla conoscenza della velocità di propagazione delle onde S con la profondità.

I metodi di valutazione della suscettibilità a liquefazione dei terreni considerano il rapporto tra la resistenza al taglio ciclica del terreno e lo stress ciclico indotto dal sisma e si basano generalmente su prove eseguite in sito. La resistenza del deposito alla liquefazione è quindi valutata in termini di fattore di resistenza alla liquefazione:

$$FSL = \frac{CRR}{CSR}$$

Dove CRR (Cyclic Resistance Ratio) indica la resistenza del terreno agli sforzi di taglio ciclico e CSR (Cyclic Stress Ratio) la sollecitazione di taglio massima indotta dal sisma.

Seed e Idriss (1971) per poter determinare gli sforzi di taglio indotti dal sisma propongono una semplice procedura basata sull'ipotesi di terreno omogeneo. Essi ipotizzano la propagazione verticale di onde sismiche di taglio, una colonna di terreno di altezza z si muove rigidamente in direzione orizzontale e pertanto lo sforzo di taglio massimo alla profondità z è dato da:

$$\tau_{\max} = \frac{a_g}{g} \cdot \gamma z$$

dove a_g è l'accelerazione massima in superficie, g l'accelerazione di gravità e γ il peso di volume secco del terreno. Poiché nella realtà il terreno è deformabile, lo sforzo di taglio è minore che nell'ipotesi di corpo rigido e quindi bisogna introdurre un coefficiente riduttivo r_d . Normalizzando con la pressione verticale effettiva e riferendosi ad un valore medio τ_{av} anziché ad un valore massimo τ_{\max} si ottiene:

$$\frac{\tau_{av}}{\sigma_{v0}} = CSR_{7,5} = 0,65 \frac{a_g}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

espressione valida per sismi di magnitudo 7.5. Per magnitudo diverse bisogna dividere per il fattore correttivo MSF (Magnitudo Scaling Factor).

$$CSR = \frac{CSR_{7,5}}{MSF}$$

Il metodo di Andrus e Stokoe è basato su dati provenienti da prove sismiche a rifrazione (V_s). La velocità delle onde di taglio è corretta con la formula (Robertson et al., 1992):

$$v_{s1} = v_s \left(\frac{100}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,25}$$

La resistenza alla liquefazione è valutata mediante la formula di Andrus e Stokoe (1998):

$$CRR = 0,03 \left(\frac{v_{s1}}{100} \right)^2 + 0,9 \left[\frac{1}{(v_{s1})_{CS} - v_{s1}} - \frac{1}{(v_{s1})_{CS}} \right]$$

dove la presenza di fini FC (%) è tenuta in conto mediante la seguente procedura:

$$(v_{s1})_{CS} = 220 \quad \text{per FC} < 5\%$$

$$220 < (v_{s1})_{CS} < 200 \quad \text{per } 5\% < \text{FC} < 35\%$$

$$(v_{s1})_{CS} = 200 \quad \text{per } FC > 35\%$$

In ottemperanza alla DGR 476/2021, nel presente studio la valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei terreni è stata eseguita, a fronte degli studi di RSL, anche mediante la stima dell'Indice di Liquefazione IL per ciascuna indagine sismica integrativa realizzata.

Attraverso la definizione del parametro IL è possibile discriminare le seguenti classi di pericolosità (Sonmez, 2003):

$IL = 0 \rightarrow$ non liquefacibile

$0 < IL \leq 2 \rightarrow$ potenziale basso

$2 < IL \leq 5 \rightarrow$ potenziale moderato

$5 < IL \leq 15 \rightarrow$ potenziale alto

$IL > 15 \rightarrow$ potenziale molto alto

L'indice di liquefazione, IL, è definito dalla seguente relazione:

$$I_L = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

Dove

$$w(z) = \frac{200}{z_{crit}} \cdot \left(1 - \frac{z}{z_{crit}} \right)$$

zcrit è la profondità critica, ovvero la profondità massima entro la quale può verificarsi la liquefazione, che di norma si assuma pari a 20 m.

La variabile F(z) vale (Sonmez, 2003):

$$F(z) = 0 \quad \text{per } FL \geq 1.2$$

$$F(z) = 2 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-18.427 \cdot FL) \quad \text{per } 1.2 > FL \geq 0.95$$

$$F(z) = 1 - FL$$

$$\text{per } FL \leq 0.95$$

8.1 VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE

Nel presente paragrafo vengono riassunti gli esiti delle verifiche alla liquefazione mediante la stima del parametro IL (Indice di Liquefazione) per ciascuna tratta identificata precedentemente.

Tratta da pk a pk	IL
Da pk 0+000 a pk 0+140	0
Dalla pk 0+140 alla pk 1+050	0
Dalla pk 1+050 alla pk 1+670	0
Dalla pk 1+670 alla pk 1+890	0
Dalla pk 1+890 alla pk 5+290	0
Dalla pk 5+290 alla pk 5+525	0

A valle dei risultati conseguiti, lungo le tratte prese in considerazione, non sono state riscontrate particolari situazioni di criticità, con i valori di IL sempre pari a zero e classificati come terreni "Non liquefacibili" (Sonmez, 2003).

È pertanto possibile escludere la valutazione degli effetti sismici in termini di cedimenti permanenti post-sismici (DGR 476/2021 – Allegato A3).



Matteo Mattioli