

AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO – PARMA

Strada Giuseppe Garibaldi 75, I-43121 Parma

MO-E-1357 – ADEGUAMENTO DEI MANUFATTI DI REGOLAZIONE E SFIORO DELLA CASSA DI ESPANSIONE DEL FIUME SECCHIA COMPRESIVO DELLA PREDISPOSIZIONE DELLA POSSIBILITÀ DI REGOLAZIONE IN SITUAZIONI EMERGENZIALI ANCHE PER PIENE ORDINARIE IN RELAZIONE ALLA CAPACITÀ DI DEFLUSSO DEL TRATTO ARGINATO (EX CODICE 10969) E AVVIO DELL’ADEGUAMENTO IN QUOTA E POTENZIAMENTO STRUTTURALE DEI RILEVATI ARGINALI DEL SISTEMA CASSA ESPANSIONE ESISTENTE

**MO-E-1273 – LAVORI DI AMPLIAMENTO E ADEGUAMENTO DELLA CASSA DI ESPANSIONE DEL FIUME SECCHIA NEL COMUNE DI RUBIERA (RE)
(ACCORDO DI PROGRAMMA MINISTERO – RER – PARTE A)**

PROGETTO DEFINITIVO

R.06 – RELAZIONE SISMOTETTONICA E SISMICA

IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:

CAPOGRUPPO MANDATARIA
PROGETTAZIONE GENERALE – INGEGNERIA IDRAULICA E STRUTTURALE



DIZETA INGEGNERIA
STUDIO ASSOCIATO
Via Bressini, 19 – 20133 MILANO Tel. 02-70600125
server@dezetaingegneristi.it Fax. 02-70600014

ING. FULVIO BERNABEI
ING. STEFANO ADAMI
ING. LAURA GRILLI
ING. GIANLUIGI SEVNI
ING. PAOLO SANAVIA

MANDANTE
RAPPORTI CON ENTI TERZI – MODELLISTICA IDROLOGICA E
IDRAULICA – IDROGEOLOGIA



ING. DENIS CERLINI
ING. MARCO BELICCHI
ING. NICOLA PESSARELLI (CSP)
ING. MICHELE FERRARI

MANDANTE
INGEGNERIA STRUTTURALE



ING. MARCO G. P. BRAGHINI
ING. DANIELE L. GIOMETTI

MANDANTE
GEOLOGIA



EN GEO S.r.l.
ENGINEERING GEOLOGIST
www.engeo.it

GEOL. CARLO CALEFFI
GEOL. FRANCESCO CERUTTI

MANDANTE
ASPETTI AMBIENTALI



ING. MASSIMO SARTORELLI
ING. BENIAMINO BARENGHI
DOTT. AGR. ALESSIA MANICONE
DOTT.SSA CHIARA LUVIE'

MANDANTE
ASPETTI PAESAGGISTICI



ARCH. ANGELO DAL SASSO

PER IL R.T.P.:

IL PROGETTISTA GENERALE
DOTT. ING. FULVIO BERNABEI

IL RUP:

DOTT. ING.
FEDERICA PELLEGRINI

CONSULENTE
INGEGNERIA GEOTECNICA



PROF. ING. FRANCESCO COLLESELLI
ING. GIUSEPPE COLLESELLI

CONSULENTE
PIANO PARTICELLARE DI ESPROPRIO

GEOM. MARCO SOZZE'

CONSULENTE
VALUTAZIONI ARCHEOLOGICHE

DOTT.SSA IVANA VENTURINI

DATA: LUGLIO 2019

Mod.7.3 F - Rev.01

REV.	DATA	DESCRIZIONE MODIFICA	REDATTO	CONTR.	APPR.
01					
02					

INDICE

1	Premesse	4
1.1	Normativa di riferimento	5
1.2	Interventi in progetto	7
2	Indagini ed analisi	9
2.1	Campagna di indagine Socotec 2018-2019	9
2.1.1	<i>Prova Down - hole</i>	9
2.1.2	<i>Prova di colonna risonante</i>	13
2.2	Progetto Stabilità all'Input Sismico dei Manufatti Arginali	13
3	Studio sismotettonico	15
3.1	Inquadramento geologico regionale	15
3.2	Caratteristiche sismotettoniche	18
3.2.1	<i>Studio sismotettonico della Regione Emilia Romagna</i>	18
3.2.2	<i>Sorgenti sismogenetiche dal DISS 3.2.1</i>	23
3.2.2.1	Sorgenti sismogenetiche individuali	26
3.2.2.2	Sorgenti sismogenetiche composite	29
3.3	Zonazione sismogenetica ZS9	30
3.4	Faglie attive e capaci	32
3.4.1	<i>Considerazioni conclusive</i>	40
3.5	Storia sismica	40
3.5.1	<i>La sequenza sismica del 2012 in Emilia</i>	46
3.6	Pericolosità sismica	51
4	Sismicità	54
4.1	Classificazione sismica del territorio	54

4.2	Categoria di sottosuolo	58
4.3	Coefficienti sismici di progetto	59
4.4	Disaggregazione e magnitudo	61
5	Analisi della risposta sismica locale 2D	63
5.1	Procedura di analisi RSL	64
5.1.1	Metodo lineare equivalente	64
5.1.2	Soluzione alla singola iterazione mediante FEM	66
5.1.2.1	Smorzamento	68
5.1.2.2	Free-field boundaries	69
5.1.3	Procedimento iterativo	70
5.1.4	Interpretazione dei risultati	70
5.2	Manufatto regolatore	71
5.2.1	Modello geofisico del sottosuolo	71
5.2.1.1	Litologia, Vs e bedrock sismico	71
5.2.1.2	Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G) in funzione della deformazione	74
5.2.2	Descrizione del modello	75
5.2.3	Azioni sismiche in ingresso	77
5.2.4	Analisi dei risultati	79
5.2.4.1	Serie temporali	79
5.2.4.2	Profilo della PGA in funzione della profondità	86
5.2.4.3	Spettri di risposta elastici in superficie	90
5.3	Manufatto sfioratore	93
5.3.1	Modello geofisico del sottosuolo	93
5.3.1.1	Litologia,	93
5.3.1.2	Determinazione della Vs e bedrock sismico	95

5.3.1.3	Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G) in funzione della deformazione	97
5.3.2	Descrizione del modello	99
5.3.3	Azioni sismiche in ingresso	101
5.3.4	Analisi dei risultati	101
5.3.4.1	Serie temporali	101
5.3.4.2	Profilo della PGA in funzione della profondità	107
5.3.4.3	Spettri di risposta elastici in superficie	111

1 Premesse

La presente relazione descrive lo studio geologico effettuato a supporto della progettazione definitiva relativa agli interventi di adeguamento del sistema di laminazione delle piene della Cassa di espansione del fiume Secchia, in provincia di Modena.

Detto studio è stato effettuato nel rispetto della normativa vigente, richiamata nel paragrafo 1.1, e, in particolare alle “Norme tecniche per le costruzioni”, di cui al Decreto ministeriale 17 gennaio 2018, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20 febbraio 2018.

Il presente studio sismotettonico e sismico è stato basato, oltre che sui dati disponibili nelle banche dati che verranno illustrate nei Cap. 3 e 4, anche su indagini dirette di campagna, che hanno consentito di definire il complesso assetto sismostratigrafico dell'area.

Per l'illustrazione degli studi e delle indagini e di carattere geologico che soggiacciono allo studio sismico si rimanda all'elaborato R.06 Relazione geologica ed ai relativi allegati.

Per la determinazione della velocità delle onde sismiche V_s nei depositi della Cassa, sono state utilizzate indagini dirette, descritte nel Cap. 2 ed i cui report sono riportati nell'Allegato RS.01.

La Cassa di espansione del fiume Secchia, come rappresentato nell'immagine aerea di Fig. 1, nella porzione occidentale ricade in provincia di Reggio Emilia, interessando il comune di Rubiera; mentre, ad est ricade nei comuni di Modena e Campogalliano, in provincia di Modena. I confini comunali sono evidenziati in rosso.

È racchiusa tra la via Emilia, poco più a sud, e l'autostrada del Sole A1, a nord.

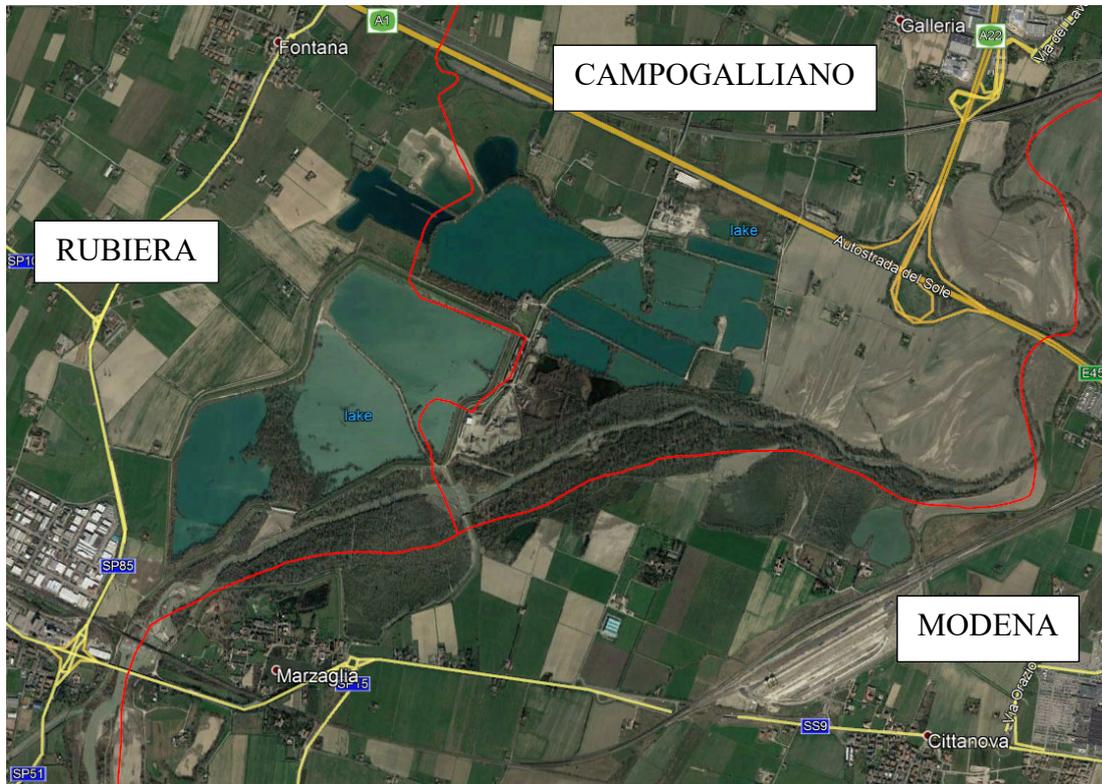


Fig. 1 – Immagine aerea della Cassa di espansione del fiume Secchia (da Google Earth)

1.1 Normativa di riferimento

- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Istruzioni per l'applicazione delle “Norme Tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 17-01-2018, Circolare 11 febbraio 2019;
- “Linee-guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe”, prodotte da INGV e diffuse ai Concessionari/Gestori con nota MIT-D.G. Dighe n. 0021530 del 27/09/2018.
- D.G.R. 1164 (2018) – Aggiornamento della classificazione sismica di prima applicazione dei Comuni dell'Emilia Romagna;
- “Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18) . Verifiche Sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari e accessorie“, luglio 2018, a cura della D.G. Dighe del M.I.T.;

- Decreto ministeriale 17-01-2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni;
- Decreto ministeriale 26-06-2014 – Norme Tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)
- Decreto ministeriale 14-01-2008 – Testo unitario – Norme Tecniche per le Costruzioni Allegati A e B;
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale. Allegato al voto n° 36 del 27/07/2007
- Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica – Linee Guida 2005 AGI Associazione Geotecnica Italiana
- O.P.C.M. n° 3274 (2003) - "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"
- Eurocodice 7.2 (2002) – Progettazione geotecnica –Parte I: Progettazione assistita da prove di laboratorio - UNI
- Eurocodice 7.3 (2002) – Progettazione geotecnica –Parte II: Progettazione assistita da prove in sito – UNI
- Circolare P.C.M. 07-04-1999, n. DSTN/2/7311 “Legge 584/1994 Competenze del Servizio Nazionale Dighe. Precisazioni”.
- Eurocodice 8 (1998) – Indicazioni progettuali per la resistenza fisica delle strutture. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003)
- Eurocodice 7.1 (1997) – Progettazione geotecnica –Parte I: Regole Generali – UNI
- Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche. 1977 AGI Associazione Geotecnica Italiana

1.2 Interventi in progetto

Le opere in progetto riguardano una serie d'interventi d'adeguamento del sistema di laminazione delle piene della Cassa di espansione del fiume Secchia che, all'interno del presente progetto definitivo, si è proposto di suddividere l'insieme delle opere previste in tre possibili lotti funzionali, generati sulla base delle attuali disponibilità economiche, ciascuno comprendente più interventi e precisamente:

LOTTO 1 – *“Adeguamento dei manufatti di regolazione e derivazione della cassa di espansione del fiume Secchia ed avvio dell'adeguamento dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente”* (importo finanziato € 16'872'000.00).

- Intervento A: Adeguamento del manufatto di sbarramento e regolazione dell'invaso.
- Intervento B: Adeguamento del manufatto di derivazione nell'invaso laterale.
- Intervento C: Opere di svaso e ricalibratura della cassa in linea finalizzate al recupero del materiale necessario per l'adeguamento dei tratti arginali.
- Intervento D: Adeguamento dei tratti arginali contigui ai manufatti.
- Intervento E: Arginatura secondaria a valle dello sbarramento.

LOTTO 2 – *“Adeguamento in quota delle arginature della cassa di espansione esistente”*

- Intervento H: Adeguamento delle arginature della cassa di espansione.
- Intervento I: Risagomatura e rimozione sedimenti vasca in linea

LOTTO 3 – *“Lavori di ampliamento della Cassa di laminazione del fiume Secchia, comune di Rubiera (RE)”* (importo finanziato € 4.340'000.00).

- Intervento L: Soglia di sfioro tra l'invaso esistente e l'ampliamento.
- Intervento M: Arginature di contenimento dell'invaso in ampliamento.

Coerentemente con quanto disposto dalle NTC 2018 (Cap. 2.4), in accordo con i progettisti, sono stati definiti i seguenti parametri di progetto:

- VITA NOMINALE: “Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni o di importanza strategica” la cui vita nominale è $V_N \geq 100$ anni (come definito dalla Tab. 2.4.I delle N.T.C. 01/2018);
- CLASSE D’USO: Classe III: “Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività particolarmente pericolose per l’ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in classe d’uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso” (come definito dal paragrafo 2.4.2 delle N.T.C. 01/2008);
- PERIODO DI RIFERIMENTO PER L’AZIONE SISMICA: Considerata la classe d’uso III, il coefficiente d’uso è $C_u=1.50$ (cfr. Tab. 2.4.II delle N.T.C. 01/2018), e di conseguenza la Vita di riferimento è $V_R=V_N \cdot C_u=150$ anni.

2 Indagini ed analisi

Per la determinazione delle caratteristiche sismiche dei terreni di fondazione si è fatto riferimento a dati già disponibili, con particolare riferimento al “Progetto Stabilità all’Input Sismico dei Manufatti Arginali”, integrati con nuove indagini ed analisi realizzate nella campagna di indagine 2018-2019 realizzata da Socotec Italia S.r.l.. I risultati delle indagini sono riportati nell’allegato RS.01. Il certificato di laboratorio relativo alla prova in colonna risonante è riportato in All. (RGT).11.

2.1 Campagna di indagine Socotec 2018-2019

2.1.1 Prova Down - hole

Il dettaglio di tutta la campagna di indagine effettuata a corredo del Progetto Definitivo è riportato nell’elaborato R.06 Relazione geologica.

Nell’ambito di tale campagna il sondaggio BS1-DH, spinto fino alla profondità di 50 m è stato attrezzato con un tubo in PVC del diametro di 3 pollici. Tale tubo è stato reso solidale con il terreno mediante cementazione con boiaccia di cemento, iniettata mediante pompa a bassa pressione. Il sondaggio BS1 è stato realizzato in corrispondenza della spalla dell’Intervento B: Adeguamento del manufatto di derivazione nell’invaso laterale.

Una volta che il cemento ha fatto presa, si è proceduto all’esecuzione della prova sismica del tipo Down-Hole.

La prova Down-Hole è stata eseguita con cadenza delle misure pari ad un metro, dal p.c. fino a fondo sondaggio, ad una profondità di 30 metri, utilizzando un sismografo collegato ad un geofono da foro tridimensionale con almeno una terna di geofoni orientati secondo gli assi $x - y - z$.

Gli impulsi sismici sono stati originati con procedure specifiche in modo da generare, oltre alle onde di compressione (Onde P), anche onde a componente di taglio

orizzontale (onde SH), essendo queste utilizzabili per la determinazione del Modulo dinamico G_0 e del Modulo di Young E.

Le prove sismiche Down-Hole sono eseguite con lo scopo di misurare la velocità delle onde sismiche dirette, che si propagano dalla superficie nel terreno in profondità, energizzando il terreno in direzione verticale e in direzione trasversale (parallelamente al suolo).

Nel primo caso sono generate prevalentemente onde di compressione (onde P) che si propagano in profondità e vengono registrate al meglio dal geofono verticale (asse z). Nel secondo caso verranno generate prevalentemente onde di taglio (onde S) visibili principalmente sui geofoni con l'asse posto orizzontalmente (assi x e y).

Il sistema di ricezione, costituito da un geofono tridimensionale da foro ad ancoraggio elettromeccanico, viene calato nel foro, sino alla profondità massima di investigazione e progressivamente sollevato dell'interdistanza propria di ciascuna indagine (nel caso in esame 1 m).

Le onde di taglio hanno velocità inferiori rispetto a quelle di compressione e quindi raggiungono il geofono triassiale quando il primo fronte d'onda di compressione è già transitato. Questo passaggio purtroppo costituisce un disturbo per la misura delle onde trasversali, in quanto i geofoni orizzontali si trovano ancora in movimento all'arrivo dell'onda trasversale o di taglio. Per migliorare il rapporto fra l'energia dell'onda di compressione e l'energia dell'onda trasversale (di taglio) a favore di quest'ultima, si realizza una doppia energizzazione orizzontale con verso opposto.

L'analisi interpretativa dei dati prevede un sismogramma per le forme d'onda relative al geofono verticale (asse z) e in un altro sismogramma le forme d'onda relative ai geofoni orizzontali (assi x e y).

L'interpretazione dei dati così acquisiti consente di ricostruire l'andamento delle velocità delle onde sia di pressione che di taglio in funzione della profondità.

Durante lo studio dei dati a disposizione ottenuti dall'elaborazione della prova Down-Hole sono stati riscontrati disturbi circostanti, dovuti ad una posizione del sondaggio limitrofa a zone di grande traffico.

In Fig. 2 viene riportato il grafico, in funzione della profondità della velocità delle sole onde S derivate dall'elaborazione della prova, necessarie per determinare la categoria sismica del sottosuolo.

La velocità equivalente delle onde sismiche di taglio, sotto il piano di posa della fondazione e fino al substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzato da V_s non inferiore a 800 m/s. ($V_{s,eq}$), è definita come:

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

dove h_i e V_i sono lo spessore e la velocità delle onde dello strato i -esimo fondazione, N il numero degli strati e H la profondità del substrato.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, come in questo caso, 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.

Nel caso in esame, considerando cautelativamente i 30 m partendo dal piano di fondazione del manufatto (circa 8 m), si è determinata una $V_{s,30}$ pari a **304 m/s**, a cui consegue che il terreno è classificabile in **categoria C**: "Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti".

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

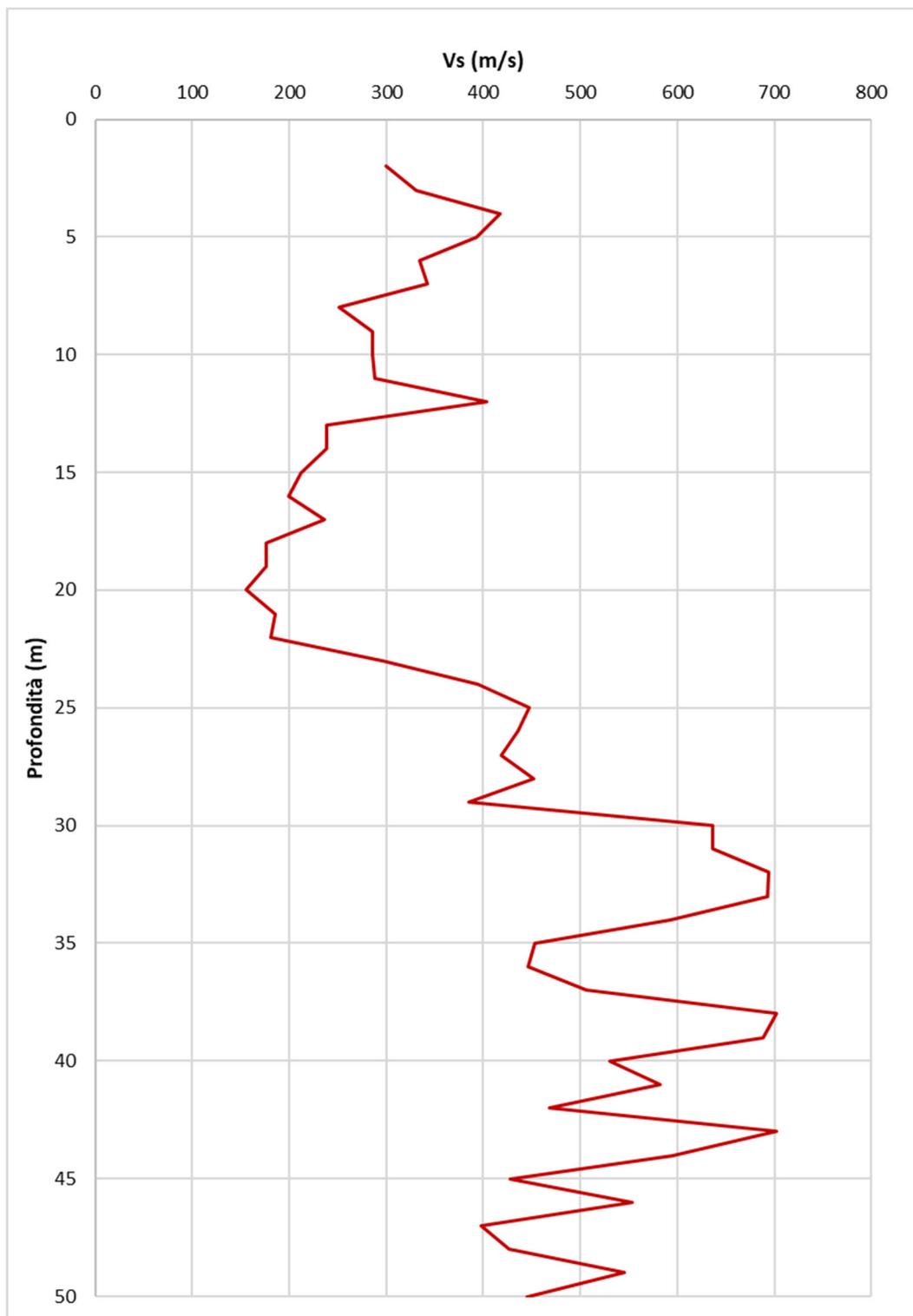


Fig. 2 – Valori di Vs in funzione della profondità misurati con la prova Down-Hole

2.1.2 Prova di colonna risonante

Ai fini della determinazione dei parametri necessari per le analisi di risposta sismica locale è stata eseguita in laboratorio una prova in colonna risonante con la determinazione dei parametri G/G_0 e D sul campione SH1 del sondaggio BS1.

I risultati della prova sono riportati graficamente in Fig. 3. I risultati della prova saranno discussi nel Cap. 5.3.1.3.

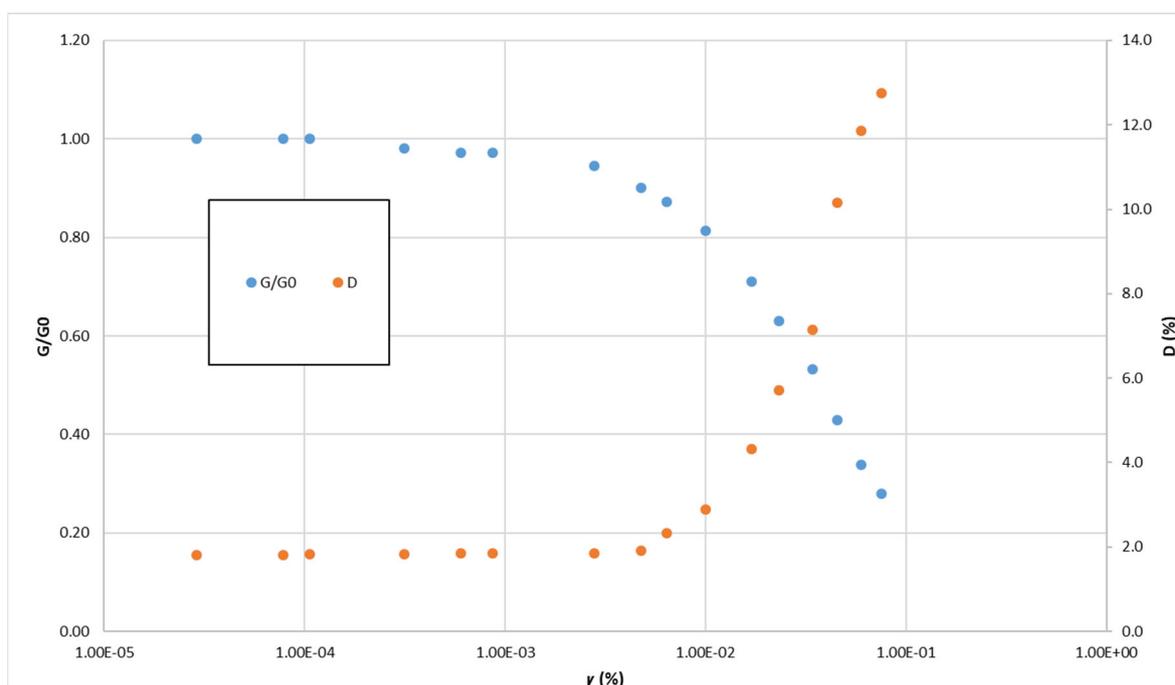


Fig. 3 – Grafico dei dati G/G_0 e D per la prova di colonna risonante sul campione BS1SH1

2.2 Progetto Stabilità all'Input Sismico dei Manufatti Arginali

Con Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 6 agosto 2005 sono state assegnate all'Autorità di bacino del fiume Po le risorse per la verifica sismica di 7 casse di laminazione delle piene, tra cui quella del fiume Secchia. Per la completa descrizione del progetto si rimanda all'elaborato R.06 Relazione geologica.

Nel presente elaborato ci si limita a evidenziare che nel sondaggio S01 spinto fino a 50 m realizzato dalla ditta Parmageo, a partire dalla sommità dell'argine settentrionale, è stata effettuata una prova Down-hole della lunghezza di 50 m.

Il sondaggio S01 è stato realizzato in corrispondenza della spalla sinistra dell'Intervento A: Adeguamento del manufatto di sbarramento e regolazione dell'invaso.

In questa prova Down-hole l'interdistanza tra le misure è stata di 1.50 m.

Nel caso in esame, considerando cautelativamente i 30 m partendo dal piano di fondazione del manufatto (circa 13 m), si è determinata una $V_{s,30}$ pari a **302 m/s**, a cui consegue che il terreno è classificabile in **categoria C**: "Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti".

3 Studio sismotettonico

3.1 Inquadramento geologico regionale

L'area di interesse è caratterizzata dalla presenza delle strutture sepolte dell'Appennino settentrionale che si incuneano sotto la Pianura Padana.

Pur essendo due ambienti geomorfologici ben distinguibili, l'Appennino settentrionale e la Pianura Padana sono strettamente correlati. Le strutture appenniniche infatti proseguono ben oltre l'attuale limite morfologico catena-pianura, il cosiddetto margine appenninico-padano, ricoperte dai sedimenti quaternari padani (Fig. 4) dando origine a dorsali sepolte note come Pieghe Emiliane e Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981). Il vero fronte appenninico è quindi dato dai fronti degli accavallamenti delle Pieghe Emiliane e Ferraresi sulla piattaforma padano-veneta ed è attualmente localizzato circa in corrispondenza del fiume Po (Fig. 4 e Fig. 5)

L'Appennino settentrionale è una catena a thrust nord-est vergenti facente parte del sistema alpino, formatosi in gran parte a spese della placca Adriatica per l'interazione fra le placche Africana ed Euroasiatica.

L'Appennino settentrionale può essere suddiviso in tre fasce parallele all'asse della catena:

- una settentrionale, o esterna, comprendente i fronti padani sepolti (Pieghe Emiliane, Ferraresi ed Adriatiche in Fig. 4), il fronte pedeappenninico (margine pedeappenninico in Fig. 4) e il basso appennino emiliano-romagnolo;
- una centrale e orientale, corrispondente alla zona assiale della catena, comprendente l'alto Appennino tosco-emiliano e tosco-romagnolo e i bacini intermontani toscani;
- una meridionale, o interna, corrispondente alla zona ligure-tirrenica.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



Fig. 4 – Schema tettonico dell'Appennino Settentrionale e della Pianura Padana (da Note illustrative della carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe)¹

¹ A cura di Luca Martelli (coord.), Marco Bonini, Lorenzo Calabrese, Giacomo Corti, Giulio Ercolessi, Fabio Carlo Molinari, Luigi Piccardi, Silvia Pondrelli, Federico Sani, Paolo Severi

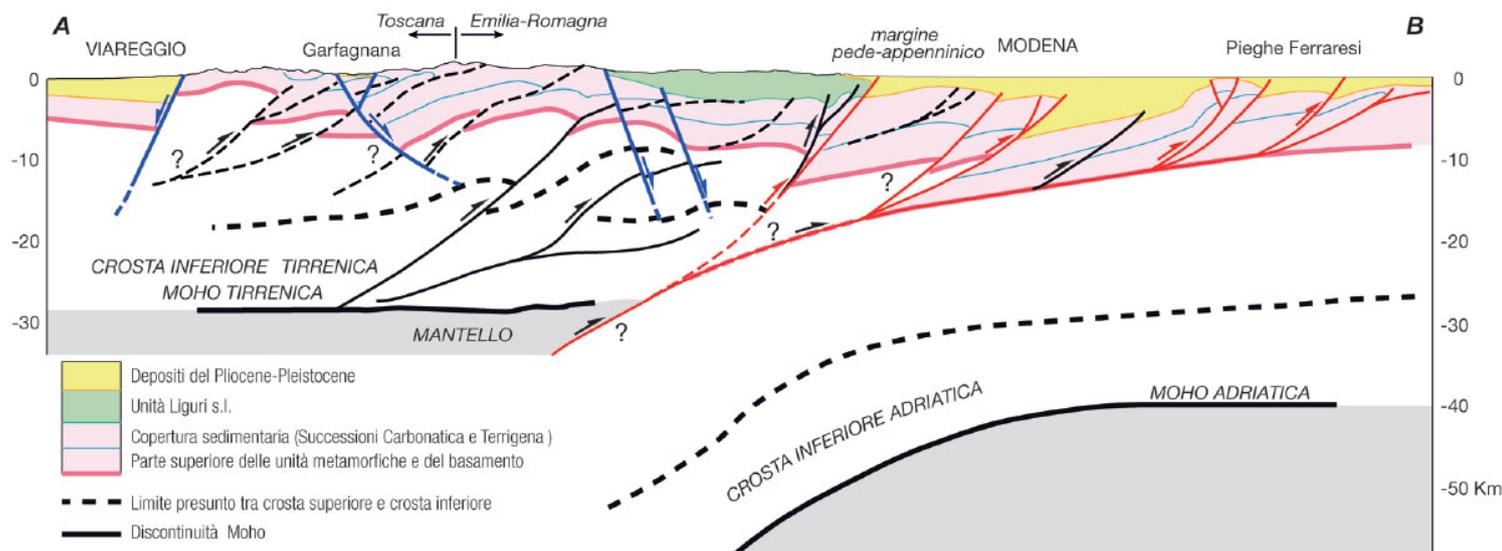


Fig. 5 – Sezione geologica dal Mar Ligure al F. Po (traccia in Fig. 4) (da Note illustrative della carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe)

La catena appenninica settentrionale è formata da una pila di unità tettoniche riferibili a due principali domini: il dominio Ligure, i cui sedimenti si sono depositi originariamente su crosta oceanica, e il dominio Tosco- Umbro-Marchigiano, rappresentato da successioni del margine continentale dell'Adria la cui deposizione inizia nel Triassico.

La strutturazione delle unità appartenenti al Dominio Ligure avviene in più fasi tettoniche durante la formazione della catena eo-alpina (Cretaceo-Eocene) Europa-vergente (Boccaletti e Guazzone, 1970). Questo processo è legato alle fasi di chiusura dell'Oceano Ligure-Piemontese con subduzione della litosfera oceanica sotto l'Adria. È a partire dall'Oligocene superiore che inizia la formazione della catena dell'Appennino settentrionale a spese della crosta dell'Adria e della sua copertura sedimentaria, attraverso un processo di deformazione continentale polifasica. In particolare, nell'ambito di tale processo, si possono riconoscere due stadi compressivi principali: durante il primo, che si sviluppa dall'Oligocene superiore al Pliocene inferiore, viene definita la strutturazione dell'arco dell'Appennino settentrionale (stadio collisionale); nel secondo stadio, a partire dal Piacenziano, viene coinvolto il settore esterno della catena, con un jumping del fronte compressivo al quale si

accompagna anche un cambiamento nella tipologia dei sedimenti che caratterizzano le avanfosse. Nel primo stadio, infatti, si sviluppa un sistema di avanfossa migrante verso est, costituito dalle note unità Macigno, Cervarola, Marnoso-Arenacea, Laga, con alimentazione principalmente di tipo alpino; nel secondo stadio si hanno sedimenti di tipo molassico, con apporto prevalentemente appenninico (Formazione di Porto Garibaldi e Sabbie di Asti). Durante quest'ultimo stadio si verificano anche importantissime riattivazioni di parti già strutturate della catena interna che possono sia coinvolgere strutture preesistenti, sia generare nuove strutture con trend anche diverso da quelle precedentemente costituite. La deformazione si manifesta pertanto in maniera più diffusa e complessa, ed ai fenomeni di sovrascorrimento si accompagnano sempre più frequentemente fenomeni di trascorrenza lungo l'asse della catena (stadio post-collisionale).

L'area di studio costituisce il raccordo fra la parte esterna della catena strutturata nel Miocene superiore-Pliocene inferiore e il settore padano-adriatico in cui le deformazioni, sepolte, sono prevalentemente di età Pliocene superiore-Quaternario, in parte tuttora attive.

3.2 Caratteristiche sismotettoniche

3.2.1 Studio sismotettonico della Regione Emilia Romagna

Per avere un quadro degli elementi che concorrono alla pericolosità sismica del territorio indagato non si può non fare riferimento agli studi che la Regione Emilia-Romagna ha condotto, a partire dalla fine degli anni '90, principalmente, in collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche, e che, nell'anno appena concluso (2018), hanno consentito di pubblicare la "Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe".

Ai fini della realizzazione di tale cartografia, sono risultate fondamentali l'identificazione e la rappresentazione delle strutture tettoniche attive; dove, per strutture tettoniche attive, in questo caso, si intendono quelle che mostrano chiare evidenze di influenza sull'evoluzione morfologica del paesaggio attuale o hanno

deformato orizzonti stratigrafici non più antichi di 450.000 anni, età attribuita al limite inferiore del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (*marker* stratigrafico più importante alla scala del territorio d'interesse).

Le strutture che presentano evidenze minori o meno certe di influenza sull'evoluzione morfologica del paesaggio attuale o di deformazione degli orizzonti stratigrafici non più antichi di 450.000 anni sono, invece, definite potenzialmente attive.

Inoltre, strutture attive e potenzialmente attive sono state suddivise in:

- affioranti, ovvero che hanno deformato la superficie topografica o, in pianura, hanno deformato la parte più superficiale del sottosuolo, vale a dire fino a profondità inferiori di 100 m dal piano campagna;
- sepolte, ovvero che mostrano evidenze di attività recenti o in atto (es. associazione con eventi sismici) ma a carico di orizzonti stratigrafici profondi almeno alcune centinaia di metri e non arrivano a deformare i livelli superficiali del sottosuolo (≥ 100 m da p.c.).

In Fig. 6 è riportata una mappa delle principali strutture attive e potenzialmente attive che, nella “Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe”, sono rappresentate, per chiarezza d'illustrazione, in forma sintetica, tracciando le proiezioni in superficie delle intersezioni dei fronti principali delle strutture tettoniche con la base dei depositi pliocenici.

Dall'analisi delle profondità dei terremoti per i quali sono state calcolate soluzioni focali, si evince che i meccanismi di tipo estensionale sono frequenti soprattutto nei primi 15÷20 km della zona assiale della catena e del versante ligure-toscano, mentre i meccanismi inversi sono più frequenti nel settore padano-adriatico; in catena i meccanismi di tipo compressivo sono localizzati per lo più a profondità maggiori di 20 km; i meccanismi di tipo trascorrente sembrano più frequenti nella parte occidentale della Regione dove sono stati localizzati anche a profondità elevate.

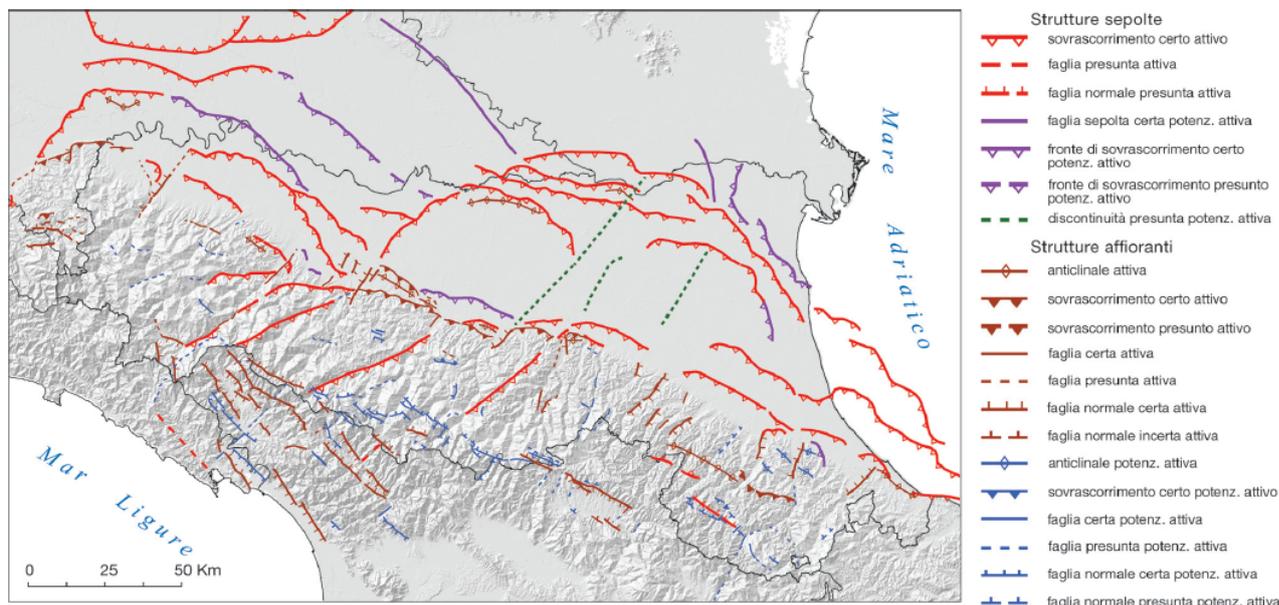


Fig. 6 – Mappa di sintesi delle strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riportate nella “Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe”

La rappresentazione di sezioni con ipocentri ricadenti all’intorno di 10 km ha, invece, evidenziato una concentrazione degli ipocentri dei terremoti strumentali che definiscono un’ampia fascia, la quale, dalla zona padano-adriatica, immerge verso sud-ovest, mentre nel versante tirrenico i terremoti sembrano meno concentrati. In alcuni casi queste fasce sembrano essere la prosecuzione in profondità delle strutture attive riconosciute nei primi 10÷15 km; tali fasce potrebbero quindi identificare zone di faglia profonde attive e sismogenetiche.

In Fig. 7 è mostrato il confronto tra le strutture attive e potenzialmente attive riconosciute nella “Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe” e le zone del catalogo DISS 3.2, il database delle sorgenti sismogenetiche italiane, potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a M 5.5 nell’area Italiana².

² DISS Working Group (2018). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.

In Fig. 8, invece, viene riportato lo stralcio della Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna relativa all'area delle Casse.

Come si può constatare la struttura di faglia attiva più vicina alle casse è localizzata a Nord di Campogalliano ed è considerata una faglia sepolta.

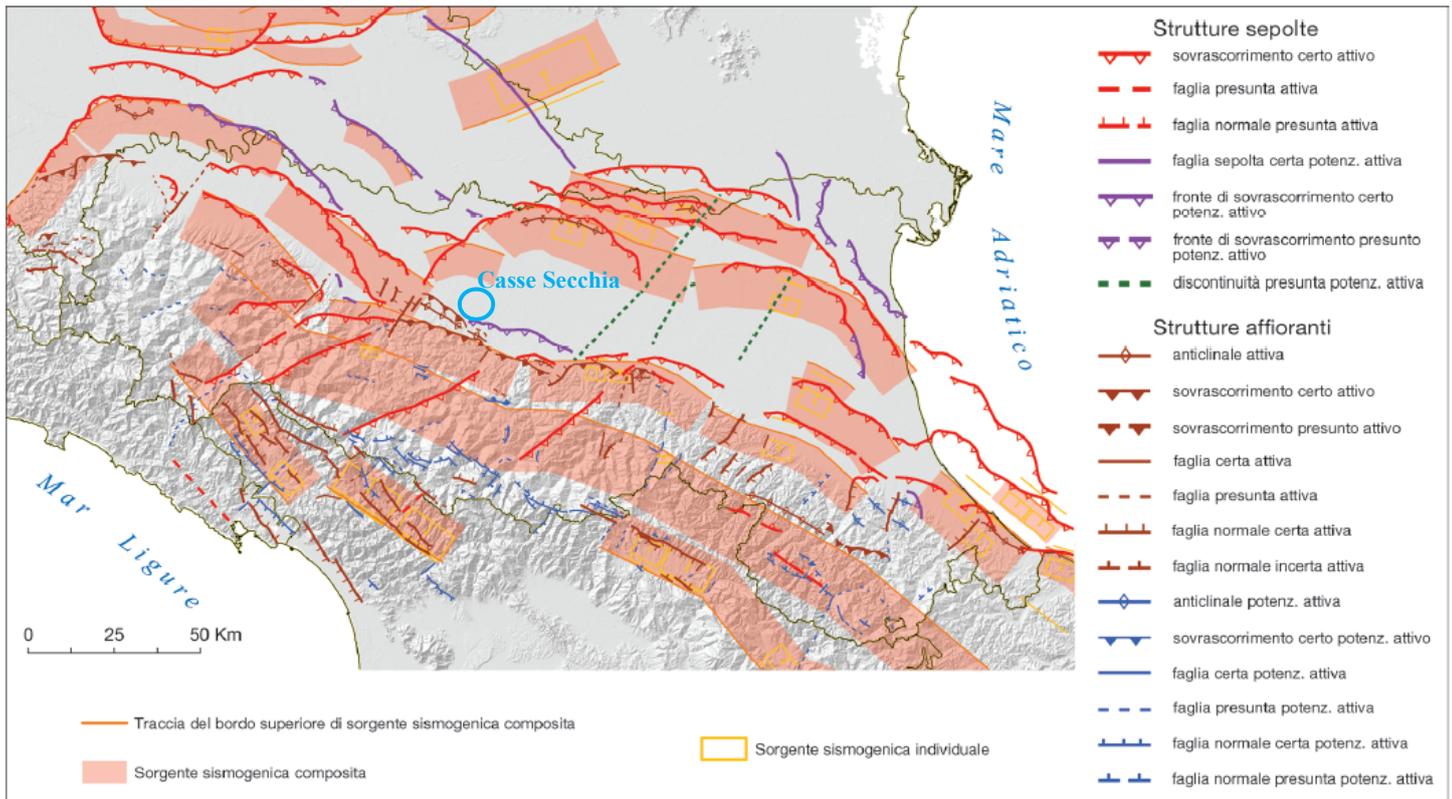
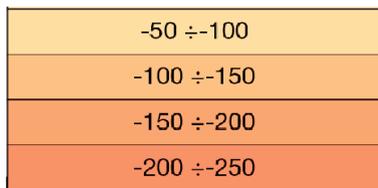
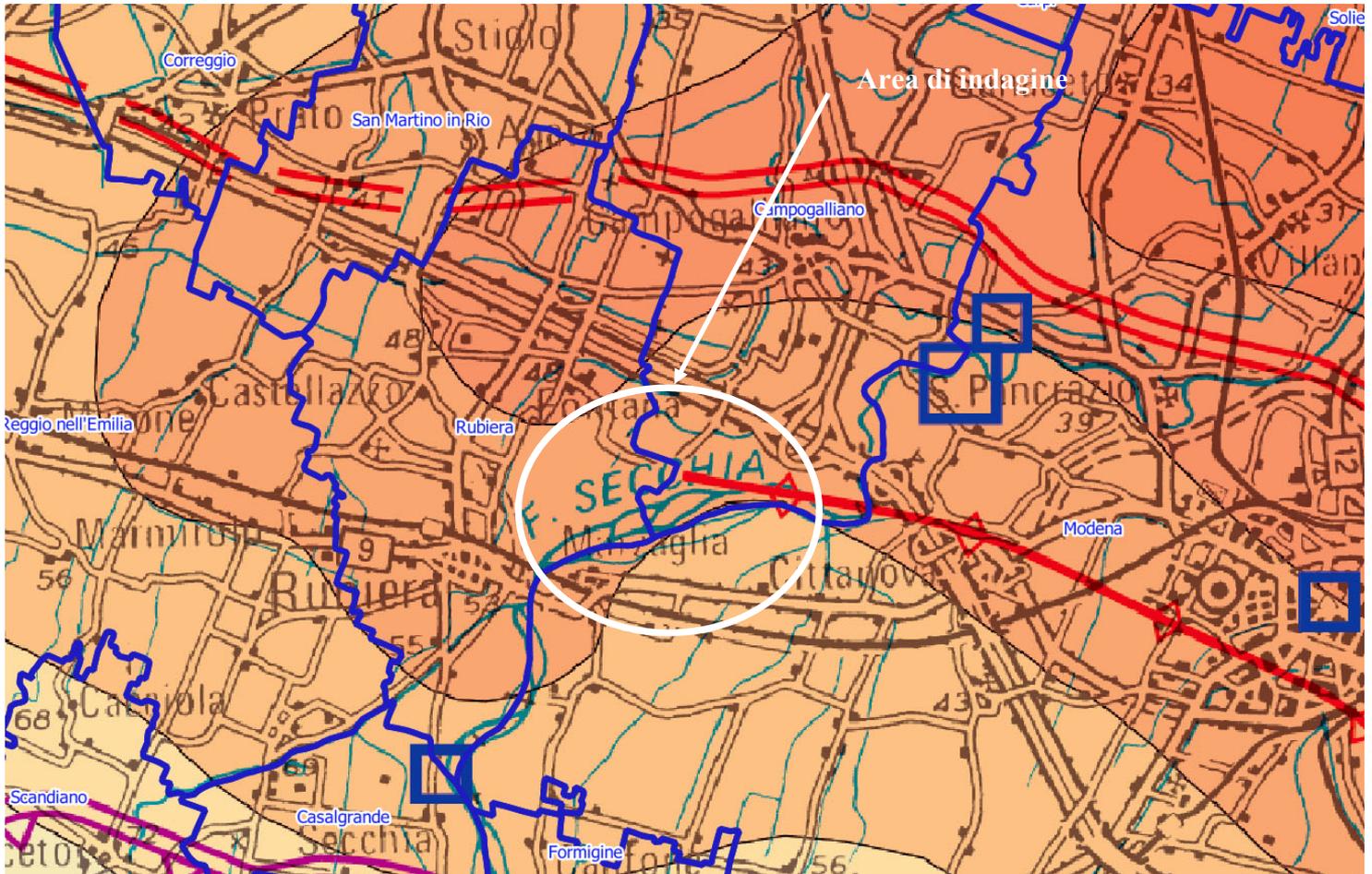


Fig. 7 – Mappa di confronto tra le strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riportate nella “Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe” e le zone sismogenetiche del DISS 3.2

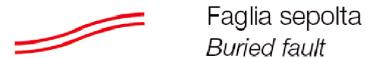
MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



Isobate della base del Sintema Emiliano Romagnolo riferito al livello del mare

Strutture tettoniche attive
Active tectonic structures



Epicentri dei terremoti (da CPT115)
Earthquake epicenters (from CPT115)

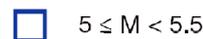
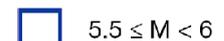
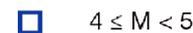


Fig. 8 – Stralcio della “Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe”

3.2.2 Sorgenti sismogenetiche dal DISS 3.2.1

Nel presente capitolo vengono presentate le sorgenti sismogenetiche limitrofe all'area di indagine catalogate del DISS 3.2.1, il database delle sorgenti sismogenetiche italiane, potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a M 5.5 nell'area Italiana³.

In Fig. 9 è riportata un'immagine con l'ubicazione dell'intervento oggetto di studio e tutte le potenziali sorgenti sismogenetiche per un intorno di oltre 40 Km.

Il DISS è costituito da sorgenti sismogenetiche rappresentate nelle tre dimensioni, ottenute parametrizzando la geometria e la cinematica di grandi faglie attive ritenute in grado di generare terremoti di magnitudo (M_w) superiore a 5.5. In altre parole le sorgenti sismogenetiche sono state definite tridimensionalmente all'interno della crosta terrestre, e descritte dal punto di vista geometrico (come la faglia è posizionata nella spazio) e cinematico (come la faglia si può muovere).

Nel DISS è stato scelto di caratterizzare esclusivamente sorgenti ritenute in grado di generare terremoti di magnitudo superiore a 5.5 per due motivi principali:

- la magnitudo 5.5 è usualmente considerata il valore “di soglia” oltre il quale la faglia responsabile dei terremoti assume dimensioni tali da poter essere identificata attraverso le metodologie geologiche;
- in Italia, per via delle tipologie costruttive prevalenti, la magnitudo 5.5 viene usualmente vista come il limite inferiore per cui un terremoto crostale può causare scuotimento tale da creare danni significativi all'edificato.

Va sottolineato inoltre come il DISS si interessi esclusivamente di censire strutture primarie, cioè di quelle faglie che, prendendo in carico la maggior parte della deformazione tettonica e muovendosi in profondità, causano i terremoti principali e il relativo scuotimento.

³ DISS Working Group (2018). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



Le sorgenti oggi presenti nel DISS sono tutte rigorosamente basate su dati geologici e geofisici e le principali appartengono a due tipologie: le Sorgenti Sismogenetiche Individuali (Individual Seismogenic Sources, ISS), ideate per descrivere nel dettaglio le faglie responsabili di specifici forti terremoti già avvenuti o che si ritiene potranno avvenire, e le Sorgenti Sismogenetiche Composite (Composite Seismogenic Sources, CSS) ideate per descrivere sistemi di faglia estesi, ancorché con un livello di dettaglio necessariamente minore. Va precisato che le Sorgenti Sismogenetiche Individuali sono sempre associate a terremoti documentati, mentre ciò non avviene per le Sorgenti Sismogenetiche Composite, che sono state ideate proprio per rappresentare un dataset di sorgenti sismogenetiche potenziali il più possibile esauriente.



MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

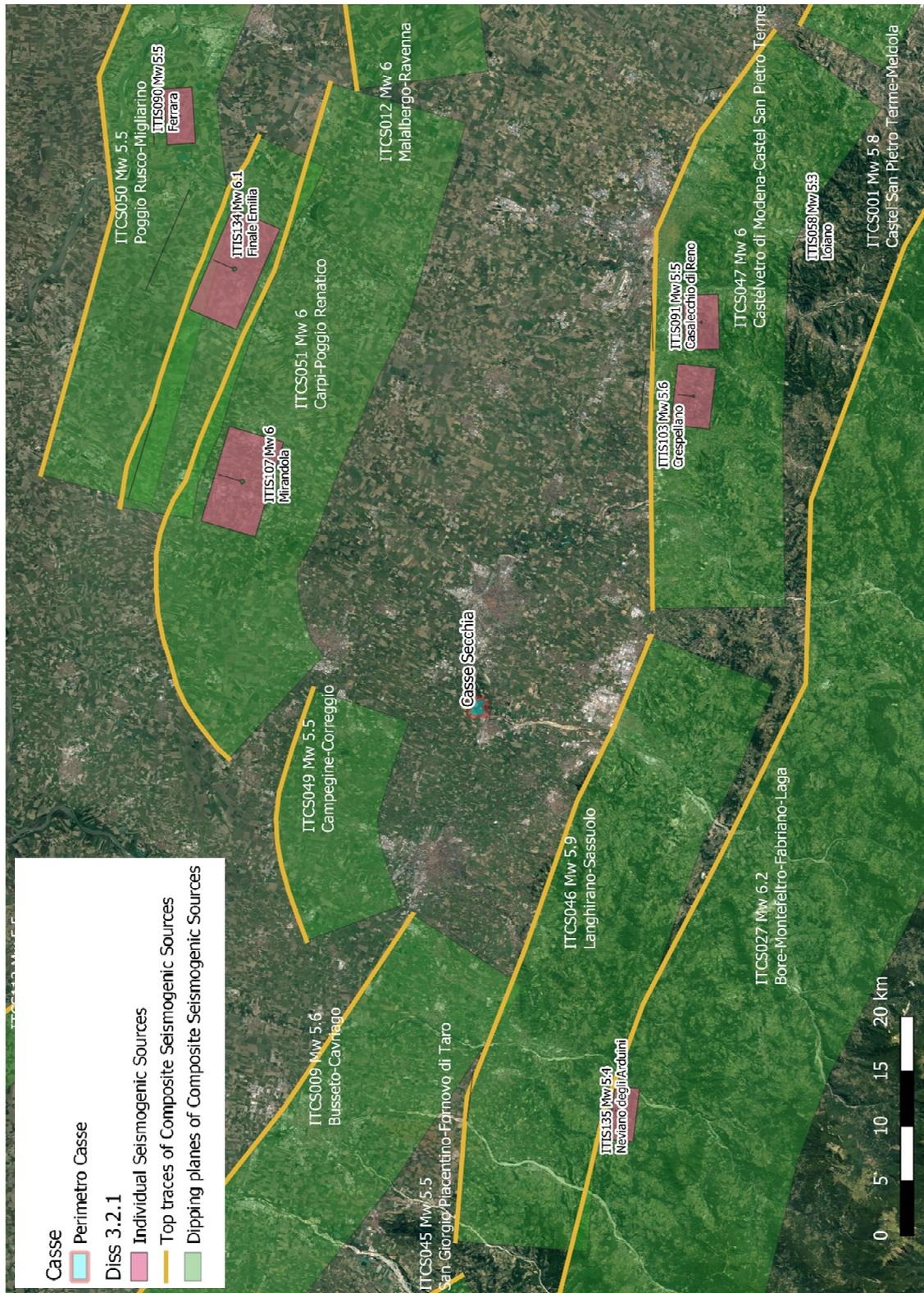


Fig. 9 – Sorgenti sismogenetiche dal Catalogo DISS 3.2.1

3.2.2.1 Sorgenti sismogenetiche individuali

Come illustrato nella figura precedente la più ISS più vicina all'area in studio è la ITIS107 Mirandola, che dista circa 25 Km, con una magnitudo massima attesa 6.0, come illustrato dalla scheda seguente (Fig. 10). A tale struttura è imputata la sequenza sismica del 29 maggio 2012.

PARAMETRIC INFORMATION

PARAMETER		QUALITY	EVIDENCE
Location [Lat/Lon]	44.85 / 11.07	LD	Based on seismological, geodetic and geological data.
Length [km]	9.0	LD	Based on geological, geodetic and seismological data.
Width [km]	5.9	ER	Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).
Min depth [km]	4.0	LD	Based on seismological, geodetic and geophysical data.
Max depth [km]	7.0	LD	Based on seismological, geodetic and geophysical data.
Strike [deg]	108	LD	Based on modelling of SAR and geological data.
Dip [deg]	30	LD	Based on seismological and geophysical data.
Rake [deg]	90	LD	Based on seismological data.
Slip Per Event [m]	0.4	LD	Based on seismological data and SAR modelling.
Slip rate [mm/y] min... max	0.5... 1.04	LD	Based on geological data from Maesano et al. (2015).
Recurrence [y] min... max	385... 800	AR	Inferred from slip rate and average displacement.
Magnitude [Mw]	6.0	LD	Based on seismological data.

LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; ER=EMPIRICAL RELATIONSHIP; AR=ANALYTICAL RELATIONSHIP; EJ=EXPERT JUDGEMENT;

Fig. 10 – Scheda della ISS ITIS107 Mirandola

La seconda struttura ISS, posta a circa 40 Km è la ITIS134 Finale Emilia, con una magnitudo massima attesa 6.1, come illustrato dalla scheda seguente (Fig. 11). A tale struttura è imputata la sequenza sismica del 20 maggio 2012.

Entrambe le strutture sono legate alla dinamica compressiva che interessa le Pieghe Ferraresi (cfr. Fig. 4)

PARAMETRIC INFORMATION

PARAMETER		QUALITY	EVIDENCE
Location [Lat/Lon]	44.85 / 11.32	LD	Based on seismological, geodetic and geological data.
Length [km]	10.0	LD	Based on geological, geodetic and seismological data.
Width [km]	6.4	ER	Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).
Min depth [km]	4.0	LD	Based on seismological, geodetic and geophysical data.
Max depth [km]	8.4	LD	Based on seismological, geodetic and geophysical data.
Strike [deg]	115	LD	Based on modelling of SAR and geological data.
Dip [deg]	43	LD	Based on seismological and geophysical data.
Rake [deg]	90	LD	Based on seismological data.
Slip Per Event [m]	0.8	LD	Based on seismological data and SAR modelling.
Slip rate [mm/y] min... max	0.25...0.5	LD	Based on geological data.
Recurrence [y] min... max	1600...3200	AR	Inferred from slip rate and average displacement.
Magnitude [Mw]	6.1	LD	Based on seismological data.

LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; ER=EMPIRICAL RELATIONSHIP; AR=ANALYTICAL RELATIONSHIP;EJ=EXPERT JUDGEMENT;

Fig. 11 – Scheda della ISS ITIS134 Finale Emilia

Le strutture ISS ITIS103 Crespellano e ITIS Casalecchio di Reno sono meno distanti (31 e 37 Km), ma meno significative dal punto di vista della magnitudo massima attesa (5.6 e 5.5 rispettivamente). Entrambe le strutture sono poste a SE dell'area di indagine ed appartengono al Margine Pedepenninico (cfr. Fig. 4) e presentano dinamica compressiva. La prima è ritenuta responsabile del terremoto del 20 aprile 1929, mentre alla seconda è associato il terremoto del 3 gennaio 1505.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

PARAMETRIC INFORMATION

PARAMETER		QUALITY	EVIDENCE
Location [Lat/Lon]	44.48 / 11.16	OD	Based on macroseismic, geological and geomorphological observations.
Length [km]	5.6	OD	Based on geological and geomorphological observations.
Width [km]	4.3	ER	Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).
Min depth [km]	2.0	OD	Based on geological and geomorphological observations.
Max depth [km]	4.5	OD	Based on geological and geomorphological observations.
Strike [deg]	98	OD	Based on geological and geomorphological observations.
Dip [deg]	35	OD	Based on geological and geomorphological observations.
Rake [deg]	90	EJ	Inferred from geological data, constrained by orientation of T axes.
Slip Per Event [m]	0.4	ER	Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979).
Slip rate [mm/y] min... max	0.1...0.5	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Recurrence [y] min... max	800...4000	EJ	Inferred from slip rate and average displacement.
Magnitude [Mw]	5.6	LD	Value adopted from the historical earthquake catalogue CPT104.

LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; ER=EMPIRICAL RELATIONSHIP; AR=ANALYTICAL RELATIONSHIP; EJ=EXPERT JUDGEMENT;

Fig. 12 – Scheda della ISS ITIS103 Crespellano

PARAMETRIC INFORMATION

PARAMETER		QUALITY	EVIDENCE
Location [Lat/Lon]	44.47 / 11.24	OD	Based on macroseismic, geological and geomorphological observations.
Length [km]	5.0	OD	Based on geological and geomorphological observations.
Width [km]	3.9	ER	Calculated using the relationships from Wells and Coppersmith (1994).
Min depth [km]	2.0	OD	Based on geological and geomorphological observations.
Max depth [km]	4.2	OD	Based on geological and geomorphological observations.
Strike [deg]	90	OD	Based on geological and geomorphological observations.
Dip [deg]	35	OD	Based on geological and geomorphological observations.
Rake [deg]	90	EJ	Inferred from geological data, constrained by orientation of T axes.
Slip Per Event [m]	0.4	ER	Calculated from Mo using the relationship from Hanks and Kanamori (1979).
Slip rate [mm/y] min... max	0.1...0.5	EJ	Unknown, values assumed from geodynamic constraints.
Recurrence [y] min... max	800...4000	EJ	Inferred from slip rate and average displacement.
Magnitude [Mw]	5.5	LD	Value adopted from the historical earthquake catalogue CPTI04.

LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; ER=EMPIRICAL RELATIONSHIP; AR=ANALYTICAL RELATIONSHIP;EJ=EXPERT JUDGEMENT;

Fig. 13 – Scheda della ISS ITIS091 Casalecchio di Reno

3.2.2.2 Sorgenti sismogenetiche composite

Analogamente alle sorgenti individuali le sorgenti sismogenetiche composte (CSS) presenti al contorno dell'area di studio appartengono al Margine Pedeappenninico o alle Pieghe Emiliane e Ferraresi e presentano dinamica compressiva. In particolare a sud (Margine Pedeappenninico) sono presenti:

- ITCS046 – Langhirano-Sassuolo con magnitudo Mw=5.9, con distanza minima di 12 Km;
- ITCS047 – Castelvetro di Modena – Castel San Pietro Terme con magnitudo Mw=6.0, con distanza minima di 18 Km;

- ITCS027 – Bore-Montefeltro-Fabriano-Laga con magnitudo $M_w=6.2$, con distanza minima di 25 Km;

Ad Est è presente una struttura riconducibile alle Pieghe Emiliane:

- ITCS009 – Busseto-Cavriago con magnitudo $M_w=5.6$, con distanza minima di 20 Km;

A Nord e Nord-Ovest sono presenti strutture delle Pieghe Ferraresi:

- ITCS049 – Campegine - Correggio con magnitudo $M_w=5.5$, con distanza minima di 6 Km;
- ITCS051 – Carpi-Poggio Renatico con magnitudo $M_w=6.0$, con distanza minima di 14 Km, a cui appartiene la ISS ITIS106 Mirandola, citata in precedenza;
- ITCS103 – Finale – Emilia Mirabello con magnitudo $M_w=6.1$, con distanza minima di 30 Km, a cui appartiene la ISS ITIS103 Finale Emilia, citata in precedenza;
- ITCS050 – Poggio Rusco – Migliarino con magnitudo $M_w=5.5$, con distanza minima di 34 Km;

3.3 Zonazione sismogenetica ZS9

Il complesso delle informazioni relative alle caratteristiche delle sorgenti sismotettoniche espone in precedenza non fa che confermare quanto esposto dalla Zonazione sismogenetica ZS9, che rappresenta l'attuale riferimento per il calcolo dell'azione sismica (NTC2008-NTC2018) e la riclassificazione sismica (OPCM 3519/2006).

Esaminando, infatti, la zonazione Sismogenetica ZS9 (a cura del gruppo di lavoro coordinato da C. Meletti e G. Valensise, 2004), di cui è riportato uno stralcio in Fig. 14) l'area in studio ricade al confine tra la zona 913, denominata "Appennino Emiliano" e la zona 914 Dorsale ferrarese.

La prima è contraddistinta da eventi sismici di magnitudo medio-bassa, originati da movimenti prevalentemente compressivi, a NW, e distensivi, a SE, con meccanismi trascorrenti nelle zone di svincolo, che dissecano la continuità longitudinale delle strutture.

La seconda è caratterizzata da movimenti prevalentemente compressivi.

Sulla base dei meccanismi focali, per entrambe le zone, sono previsti valori "cautelativi" di massima magnitudo (M_{wmax2}) pari a = 6.14.

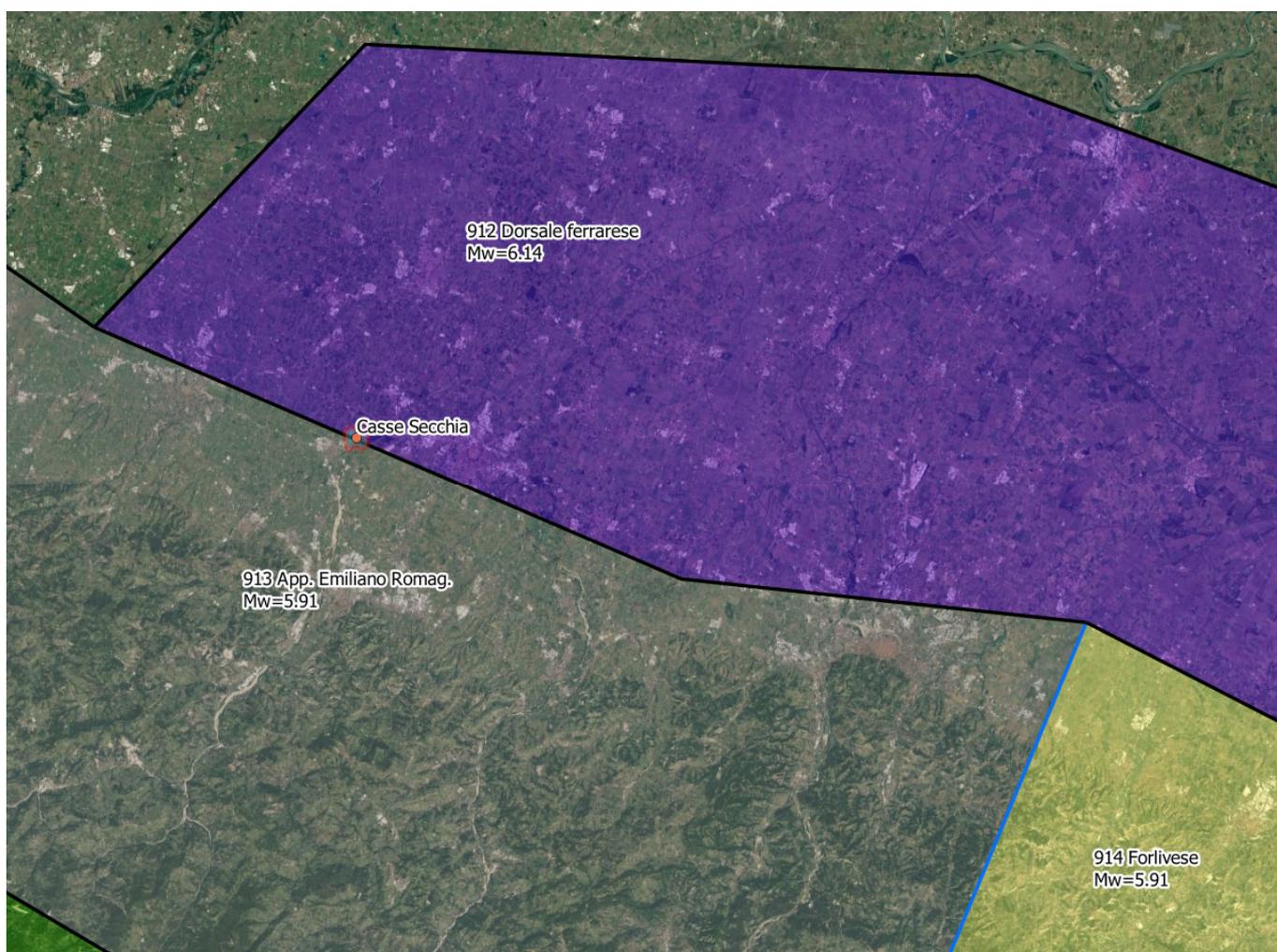


Fig. 14 - Zonazione ZS9 (M_w = magnitudo massima osservata)

3.4 Faglie attive e capaci

Catalogo delle faglie capaci in Italia (ITHACA Italy Hazards from Capable faults), gestito da ISPRA – Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia, riporta la presenza di due faglie nella zona di interesse del progetto (Fig. 15).

A proposito della qualità del dato relativo alle faglie ISPRA precisa: *“Il dettaglio è funzione della qualità delle indagini che sono state effettuate (rilevabile dal campo “study quality”) e della scala alla quale è stato pubblicato il dato, indicata nel campo “location reliability”, presente nella Scheda descrittiva associata ad ogni faglia. A tal riguardo, la risoluzione massima a cui poter utilizzare il dato non deve essere superiore alla “location reliability”.*

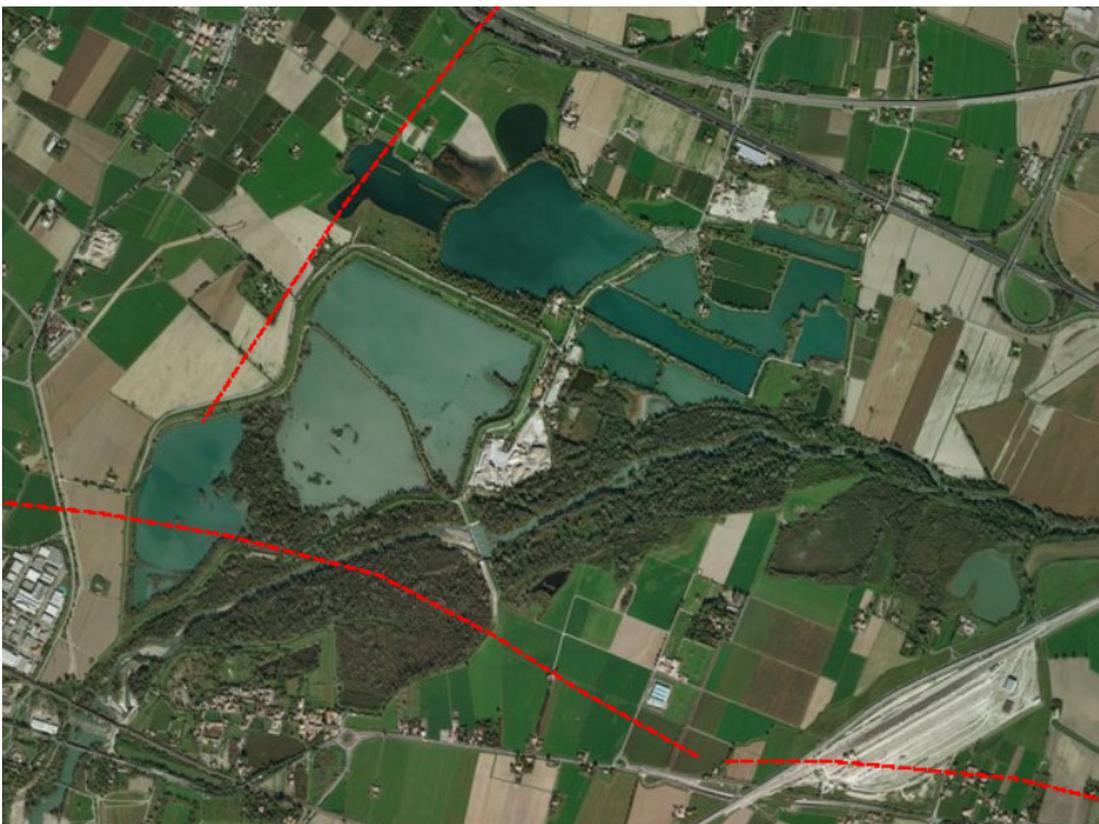


Fig. 15 - Faglie capaci in corrispondenza dell'intervento secondo il catalogo Ithaca

Nelle pagine seguenti vengono riportate le schede di dettaglio delle due faglie: la – Faglia 90508 Rubiera-Reggio Emilia (Fig. 16 e Fig. 17) e la Faglia 93764 San

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Pancrazio-Modena (Fig. 18 e Fig. 19). E' bene evidenziare immediatamente che la scala di rappresentazione delle immagini riportate nelle figure (per evidenti motivi di comprensione dell'ubicazione rispetto al progetto) è di diversi ordini di grandezza superiore a quella della di pubblicazione del dato che è di 1:250.000, come riportato nelle schede.



Fig. 16 – Faglia 90508 Rubiera-Reggio Emilia (da ITHACA)

GENERAL IDENTIFICATION	
FaultCode	90508
FaultName	Rubiera - Reggio Emilia
RegionName	Emilia Romagna
SystemName	Reggio Emilia-Modena
Synopsis	Thrust nord vergente appartenente alle strutture sepolte del sottosuolo padano. Nella parte meridionale della Pianura Padana si possono riconoscere tre archi principali chiamati, da ovest verso est: Arco del Monferrato; Arco Emiliano; Arco Romagnolo Ferrarese. Questi archi rappresentano, a grande scala, il limite esterno dell'Arco Appenninico settentrionale. L'Arco Emiliano è in parte sovrascorso sulla terminazione dei thrust subalpini e, nella parte orientale al di sopra dell'Arco Romagnolo Ferrarese. E' possibile suddividere la struttura dell'Arco Romagnolo Ferrarese in tre gruppi relativamente minori: le pieghe ferraresi, le pieghe romagnole e, più a est, le pieghe adriatiche. La presenza di questi archi denota inoltre diversi valori di raccorciamento che tendono mediamente ad aumentare da ovest verso est. Dal punto di vista sismico l'area è caratterizzata da un basso livello di sismicità di fondo con una maggior concentrazione di eventi lungo la catena appenninica e lungo i fronti dei sovrascorrimenti della Pianura Padana.
Rank	PRIMARY
GEOMETRY AND KINEMATICS	
GeologicalSetting	
TectonicEnvironment	ND
Segmentation	No
AverageStrike	100
Dip	30
DipDirection	SSW
FaultLength	18,00000000
Geometry	
LocationReliability	250000
FaultDepth	
Kinematics	REVERSE

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

QUATERNARY

GeomorphicExpression	
SurfaceEvidence	ND
Monitoring_paleoseismology	
LastActivity	Early Pleistocene
ActivityReliability	Low reliability
APPLIEDTECHNIQUE	Instrumental seismicity
EVIDENCE_FOR_CAPABILITY	Displacement of Quaternary deposits and/or land forms
LITHO_CUT	Marnoso-Arenacea Formation

SEISMIC PARAMETER

RecurrenceInterval	0
SlipRate	0,00000000
MaxCredibleRuptureLength	18,00000000
MaxCredibleSlip	0,00000000
TimeSinceLastEvent	
MaxCredibleMagnitude	6,50000000
MaxCredibleIntensity	
StudyQuality	LOW

Fig. 17 – Faglia 90508 Rubiera-Reggio Emilia (da ITHACA) – Descrizioni



Fig. 18 – Faglia 93764 San Pancrazio-Modena (da ITHACA)

GENERAL IDENTIFICATION

FaultCode	93764
FaultName	S. Pancrazio - Modena
RegionName	Emilia Romagna
SystemName	Modena arc
Synopsis	Thrust nord vergente appartenente alle strutture sepoite del sottosuolo padano. Nella parte meridionale della Pianura Padana si possono riconoscere tre archi principali chiamati, da ovest verso est: Arco del Monferrato; Arco Emiliano; Arco Romagnolo Ferrarese. Questi archi rappresentano, a grande scala, il limite esterno dell'Arco Appenninico settentrionale. L'Arco Emiliano è in parte sovrascorso sulla terminazione dei thrust subalpini e, nella parte orientale al di sopra dell'Arco Romagnolo Ferrarese. E' possibile suddividere la struttura dell'Arco Romagnolo Ferrarese in tre gruppi relativamente minori: le pieghe ferraresi, le pieghe romagnole e, più a est, le pieghe adriatiche. La presenza di questi archi denota inoltre diversi valori di raccorciamento che tendono mediamente ad aumentare da ovest verso est. Dal punto di vista sismico l'area è caratterizzata da un basso livello di sismicità di fondo con una maggior concentrazione di eventi lungo la catena appenninica e lungo i fronti dei sovrascorimenti della Pianura Padana.
Rank	PRIMARY

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

GEOMETRY AND KINEMATICS

GeologicalSetting	
TectonicEnvironment	ND
Segmentation	No
AverageStrike	180
Dip	
DipDirection	S
FaultLength	25,00000000
Geometry	
LocationReliability	250000
FaultDepth	0,00000000
Kinematics	REVERSE

QUATERNARY

GeomorphicExpression	
SurfaceEvidence	ND
Monitoring_paleoseismology	
LastActivity	Early Pleistocene
ActivityReliability	Low reliability
APPLIEDTECHNIQUE	Instrumental seismicity

LITHO_CUT	limestones units
-----------	------------------

SEISMIC PARAMETER

RecurrenceInterval	0
SlipRate	0,00000000
MaxCredibleRuptureLength	25,00000000
MaxCredibleSlip	0,00000000
TimeSinceLastEvent	0
MaxCredibleMagnitude	6,70000000
MaxCredibleIntensity	
StudyQuality	LOW
Notes	Con LS, si intende : "depositi marini post fase Pliocene Inferiore (zona a G. Puncticulata).

Fig. 19 – Faglia 93764 San Pancrazio-Modena (da ITHACA) – Descrizioni

Come risulta evidente dalle schede sopra riportate le faglie indicate da Ithaca derivano da studi di carattere regionale con un'ubicazione delle strutture assolutamente non significativa alla scala di dettaglio. Secondo Ithaca, infatti la "Study quality" è definita "LOW", cioè bassa e la "Location reliability", cioè la scala massima di lavoro è pari a 1:250.000.

Inoltre va evidenziato che le faglie sopra descritte, catalogate da Ithaca:

- Non corrispondono a nessuna delle strutture identificate dal DISS.
- Non corrispondono a nessuna delle strutture identificate dallo studio: "Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe".
- Non appare esistano correlazioni tra le faglie segnalate ed i terremoti censiti nel catalogo CPTI15 (Fig. 20).
- Non esistono sul territorio studiato evidenze morfologiche che giustifichino la presenza di faglie capaci.



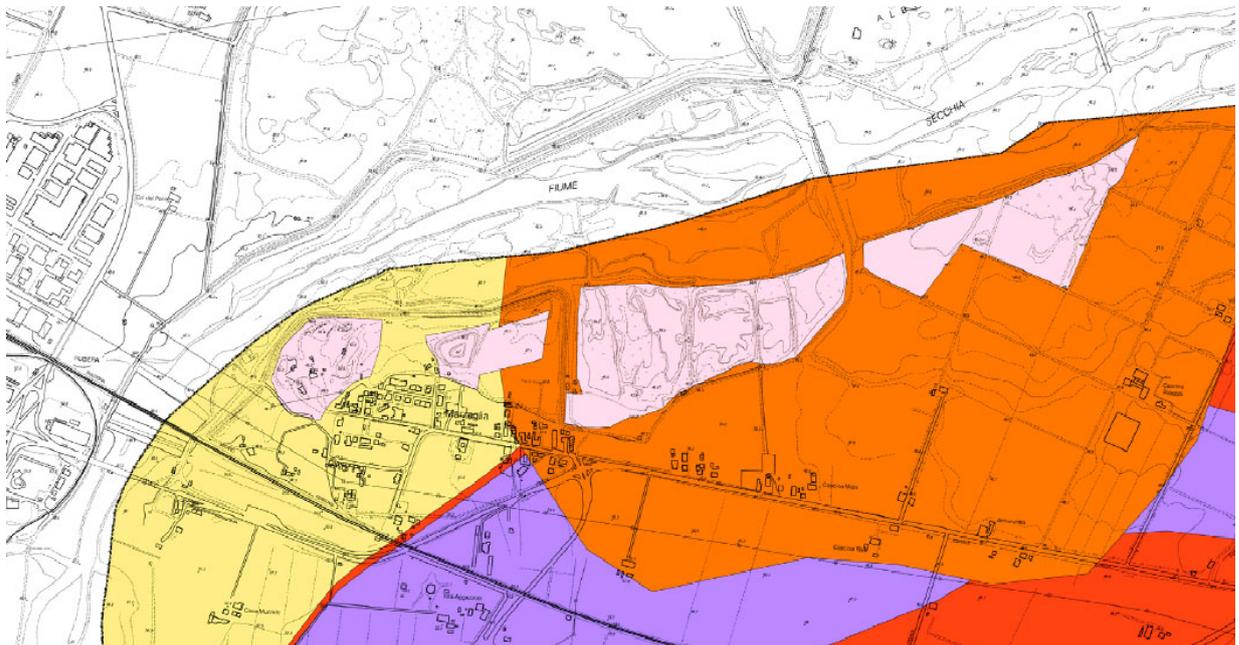
Fig. 20 – Ubicazione delle faglie censite da Ithaca e dei terremoti censiti nel CPTI15

Infine, va considerato che tali faglie non sono state inserite quali faglie attive e capaci negli studi di microzonazione sismica⁴ del Comuni di Modena, Campogalliano (MO) e Rubiera (RE) redatti da tre diversi gruppi di studio nell'ambito del "Piano nazionale per la prevenzione sismica", regolato dall'Art. 11 del Decreto legge n. 39/2009. Tali studi hanno fatto riferimento agli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" (Gruppo di Lavoro MS, 2008) ed alle "Linee-guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)" a cura della "Commissione tecnica per la microzonazione sismica".

⁴ Disponibili sul sito "Programma nazionale di soccorso per il rischio sismico dell'Emilia-Romagna"
<http://geo.regione.emilia-romagna.it/schede/pnsrs/>

Gli studi citati sono stati approvati dalla “Commissione tecnica per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica” e certificati dal Servizio Geologico, sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna.

Nella figure seguenti si riportano gli stralci delle carte di microzonazione sismica dei 3 comuni per le zone interessate dalle Casse.



Legenda

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

	Fa P.G.A. = 1.3 - 1.4
	Fa P.G.A. = 1.5 - 1.6
	Fa P.G.A. = 1.7 - 1.8
	Fa P.G.A. = 1.9 - 2.0
	Fa P.G.A. = 2.1 - 2.2
	Fa P.G.A. = 2.3 - 2.4
	Fa P.G.A. ≥ 2.5

Zone di attenzione per instabilità

	ZALQ1 - Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1
	Cedimenti differenziali
	Sovrapposizione di zone suscettibili di instabilità differenti

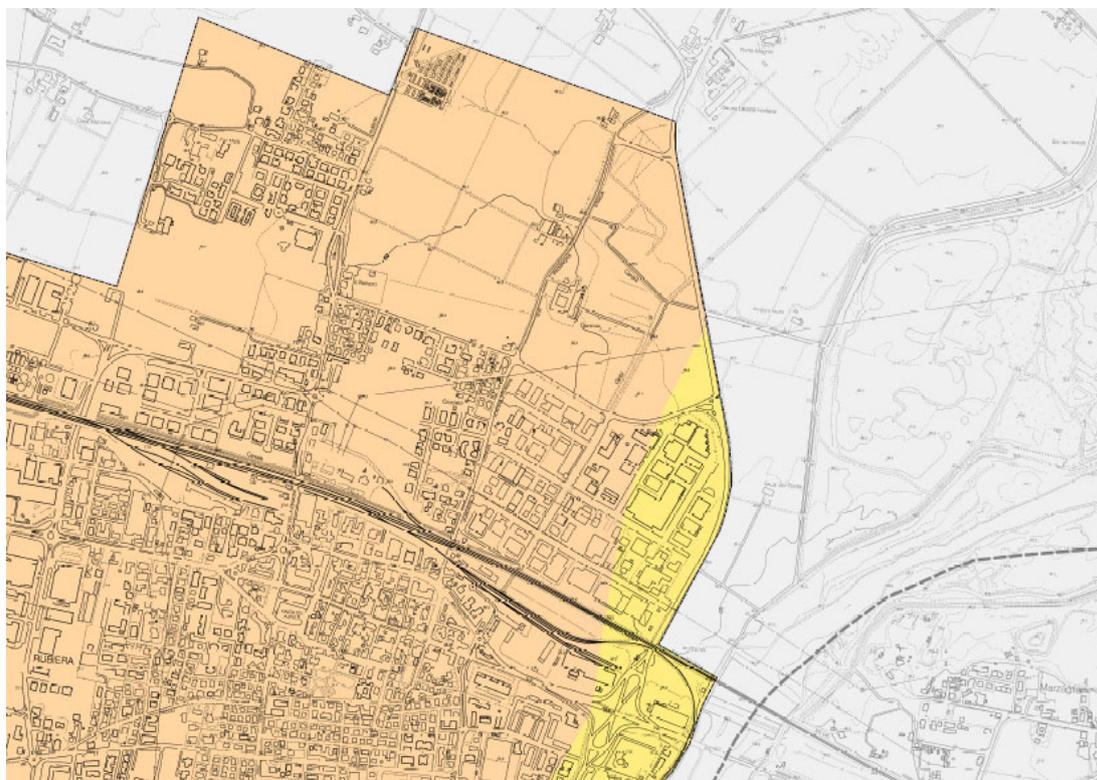
Altri elementi cartografati

	Confine comunale
---	------------------

Fig. 21 – Stralcio della Carta di microzonazione sismica di livello 2 (FPGA) del Comune di Modena

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



Legenda

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

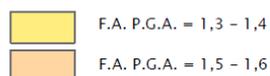
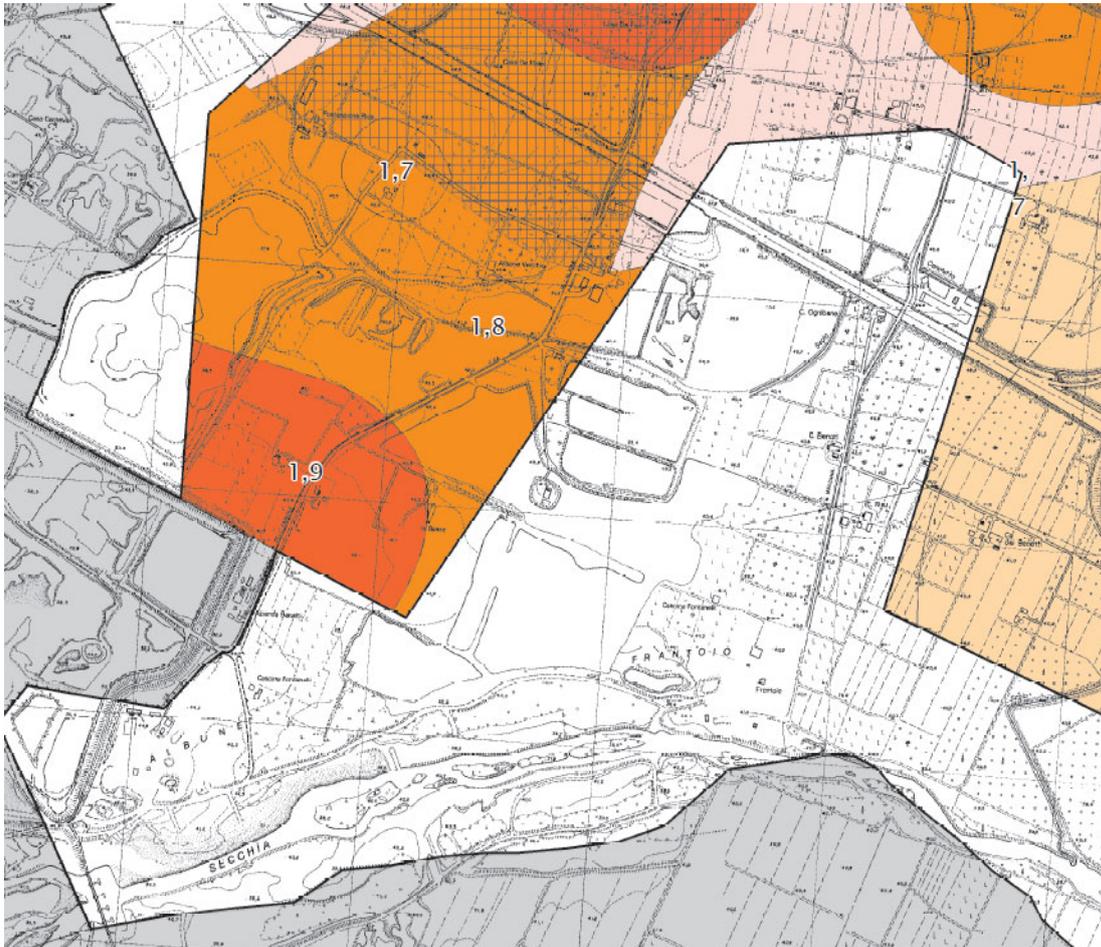


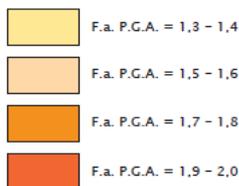
Fig. 22 – Stralcio della Carta di microzonazione sismica di livello 2 (FPGA) del Comune di Rubiera (RE)



Legenda

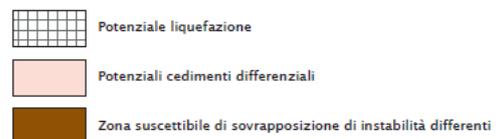
Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Fattori di amplificazione della P.G.A.



Zone suscettibili di instabilità

Aree soggette ad approfondimenti di III° livello



Altri elementi rappresentati

 Limite di Comune

Fig. 23 – Stralcio della Carta di microzonazione sismica di livello 2 (FPGA) del Comune di Campogalliano (MO)

3.4.1 Considerazioni conclusive

Alla luce delle considerazioni espresse nel capitolo precedente si ritiene che le faglie indicate nel catalogo Ithaca localizzate nella zona della Casse non siano da considerarsi attive e capaci.

3.5 Storia sismica

La storia sismica del territorio del comune di Modena è stata desunta da "DBMI15, database macrosismico italiano"⁵, database realizzato dal Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti che contiene i dati macrosismici provenienti da studi dello stesso GNDDT e di altri enti.

Secondo quanto indicato in DBMI15, la storia sismica a Modena è riassunta graficamente nel diagramma riportato in Fig. 24, mentre in Tab. 1 sono elencati gli eventi di maggiore intensità verificatisi sul territorio, indicando per ciascuno di essi, oltre alla stessa intensità al sito (I_s), l'anno, la data (comprendente mese, giorno ora ed eventualmente, minuto) in cui si è verificato, l'intensità massima epicentrale in scala MCS (I_o) e la magnitudo momento (M_w).

⁵ Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

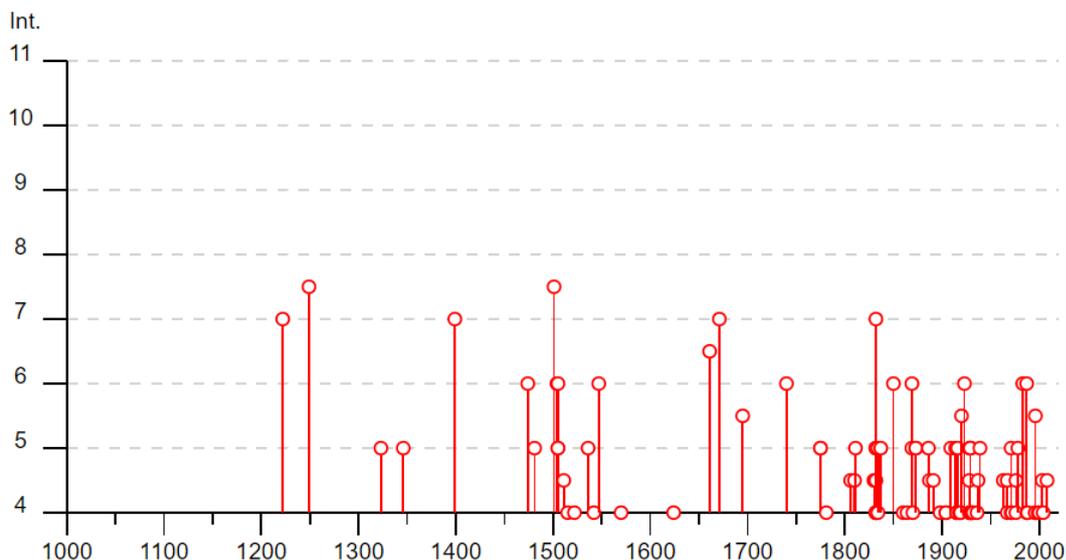


Fig. 24 - Grafico rappresentante gli eventi sismici di Modena

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	Io	Mw
7	1222 12 25 12 30	Bresciano-Veronese	7-8	5.68
7-8	1249 09	Modena	6-7	4.86
5	1323 02 25 19	Bologna	5	4.16
5	1346 02 08	Modena	5	4.16
HF	1348 01 25	Alpi Giulie	9	6.63
3	1349 09 09 08 15	Viterbese		
7	1399 07 20 23	Appennino modenese	7	5.1
6	1474 03 11 20 30	Modena	5	4.16
5	1481 02 07 22 45	Pianura emiliana	5	4.16
7-8	1501 06 05 10	Modenese	9	6.05
6	1504 12 31 04	Bolognese	6	5.02
6	1505 01 03 02	Bolognese	8	5.62
5	1505 01 20 23 50	Bolognese	5-6	4.76
5	1505 01 27 02 40	Bolognese	5	4.16
4-5	1511 03 26 15 30	Friuli-Slovenia	9	6.32
4	1515 10 25 12 35	Pianura Padana		
4	1522 10 05 00 10	Pianura Padana	5	4.71
5	1536 08 17 00 05	Appennino settentrionale	6-7	5.12
4	1542 06 13 02 15	Mugello	9	6.02
6	1547 02 10 13 20	Reggiano	7	5.1
F	1561 11 24 01 25	Ferrarese	5-6	4.4
4	1570 11 17 19 10	Ferrarese	7-8	5.44
F	1608 01 06 22 20	Reggio nell'Emilia	5-6	4.4
4	1624 03 19	Argenta	7-8	5.43
6-7	1661 03 21 23	Modenese	6-7	4.86
F	1661 03 22 12 50	Appennino forlivese	9	6.05
7	1671 06 20 10	Modenese-Reggiano	7	5.27
5-6	1695 02 25 05 30	Asolano	10	6.4
6	1740 03 06 05 40	Garfagnana	8	5.64

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente



MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	Io	Mw
5	1775 01 04 18	Appennino emiliano	4	4.43
5	1775 01 05 22 45	Appennino emiliano	5	4.55
F	1779 07 14 19 30	Bolognese		
F	1779 11 23 18 30	Bolognese	5	4.7
F	1779 12 24 17	Appennino pistoiese	5-6	4.59
4	1781 04 04 21 20	Faentino	9-10	6.12
4-5	1806 02 12	Reggiano	7	5.21
4-5	1810 12 25 00 45	Pianura emiliana	6	5.06
5	1811 07 15 22 44	Modenese-Reggiano	6-7	5.13
3	1818 12 09 18 55	Parmense	7	5.24
3	1828 10 09 02 20	Oltrepò Pavese	8	5.72
4-5	1830 01 26 04 30	Alto Reno	5	4.53
3	1831 07 14 15 30	Reggiano	5-6	4.6
4-5	1831 09 11 18 15	Pianura emiliana	7-8	5.48
4	1832 03 11 06 45	Carpi	5	4.51
4-5	1832 03 11 08 45	Parmense		
4	1832 03 12 08 45	Reggiano		
7	1832 03 13 03 30	Reggiano	7-8	5.51
5	1832 03 14 04 40	Reggiano		
5	1832 03 14 07 41	Reggiano		
4	1832 04 19 14 14	Reggiano		
4	1834 02 14 13 15	Val di Taro-Lunigiana	9	5.96
3	1834 07 04 00 45	Val di Taro-Lunigiana	6-7	5.08
5	1834 10 04 19	Bolognese	6	4.71
5	1837 04 11 17	Lunigiana	9	5.94
F	1846 08 14 12	Colline Pisane	9	6.04
6	1850 09 18 06 20	Modenese	5	4.16
F	1854 06 16 13 25	Imola	5	4.57
F	1857 02 01	Parmense-Reggiano	6-7	5.11
4	1860 07 17 13 43 31.00	Reggiano	4-5	3.93
4	1864 03 15	Zocca	6-7	4.84
6	1869 06 25 13 58	Appennino bolognese	7-8	5.43
5	1869 12 13 02 53	Sassuolo	5	4.57
4	1870 10 30 18 34	Forlivese	8	5.61
F	1871 01 22 21 30	Pianura romagnola	6	4.95
2-3	1873 03 12 20 04	Appennino marchigiano	8	5.85
5	1873 05 16 19 35	Reggiano	6-7	5.01
5	1873 06 29 03 58	Alpago Cansiglio	9-10	6.29
3-4	1873 09 17	Appennino tosco-ligure	6-7	5.26
F	1874 10 07	Imolese	7	4.96
3	1881 01 24 16 14	Bolognese	7	5.22
F	1885 02 26 20 48	Pianura Padana	6	5.01
5	1886 10 15 02 20	Collecchio	6	4.7
4-5	1887 02 23 05 21 50.00	Liguria occidentale	9	6.27
4-5	1891 06 07 01 06 14.00	Valle d'Ilasi	8-9	5.87
NF	1891 08 01 13 32 22.00	Lugo	4-5	4.36
3	1892 01 05	Garda occidentale	6-7	4.96
3	1892 05 17 03 08 15.00	Carpinetti	5	4.28
NF	1894 02 09 12 48 05.00	Valle d'Ilasi	6	4.74
3	1894 11 27 05 07	Bresciano	6	4.89
3	1895 05 18 19 55 12.00	Fiorentino	8	5.5
3	1895 08 07 19 49 32.00	Appennino tosco-emiliano	5	4.67



MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente



MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	Io	Mw
4	1898 03 04 21 05	Parmense	7-8	5.37
2	1899 06 26 23 17 22.00	Valle del Bisenzio	7	5.02
3-4	1901 10 30 14 49 58.00	Garda occidentale	7-8	5.44
F	1902 08 04 22 36 10.00	Lunigiana	6	4.78
F	1902 12 04 16 35 01.00	Lunigiana	5	4.35
NF	1903 07 27 03 46	Lunigiana	7-8	5.19
4	1904 02 25 18 47 50.00	Reggiano	6	4.81
4	1904 06 10 11 15 28.00	Frignano	6	4.82
NF	1904 11 17 05 02	Pistoiese	7	5.1
3-4	1908 06 02 22 30	Frignano	4-5	4.5
5	1909 01 13 00 45	Emilia Romagna orientale	6-7	5.36
NF	1910 03 22 23 29	Bassa modenese	5	4.16
2	1911 02 19 07 18 30.00	Forlivese	7	5.26
3	1912 09 12 21 15	Carpi	4	3.76
5	1914 10 27 09 22	Lucchesia	7	5.63
4	1915 01 13 06 52 43.00	Marsica	11	7.08
4	1915 10 10 23 10	Reggiano	6	4.87
3	1916 05 17 12 50	Riminese	8	5.82
F	1916 07 27 18 38	Garfagnana	5-6	4.56
5	1916 08 16 07 06 14.00	Riminese	8	5.82
4	1918 05 06 08 05	Reggiano	5-6	4.41
4	1918 11 10 15 12 28.00	Appennino forlivese	9	5.96
4	1919 06 29 15 06 13.00	Mugello	10	6.38
5-6	1920 09 07 05 55 40.00	Garfagnana	10	6.53
NF	1920 10 06 22 47	Mantovano	4-5	4.14
6	1923 06 28 15 12	Modenese	6	5.04
3	1926 01 01 18 04 03.00	Carniola interna	7-8	5.72
3	1927 11 20 10 24 12.00	Appennino reggiano	5	4.29
4	1928 06 13 08	Carpi	6	4.67
4-5	1928 07 25 01 25	Carpi	4-5	3.93
4	1929 04 10 05 44	Bolognese	6	5.05
NF	1929 04 12 00 32	Bolognese	4	4.82
5	1929 04 19 04 16	Bolognese	6-7	5.13
5	1929 04 20 01 10	Bolognese	7	5.36
4	1929 04 22 08 26	Bolognese	6-7	5.1
5	1929 04 29 18 36	Bolognese	6	5.2
5	1929 05 11 19 23	Bolognese	6-7	5.29
4	1930 10 24 00 52	Appennino tosco-emiliano	4	3.97
3	1930 10 26 07 14	Appennino tosco-emiliano	4	4.21
4	1930 10 26 07 31	Modenese	4	4.12
4	1931 06 10 17 02	Modenese	4	4.59
4	1932 04 19 00 17	Modenese	4	3.63
3	1934 06 13 09 06	Val di Taro-Lunigiana	6	5.14
4	1936 10 18 03 10	Alpago Cansiglio	9	6.06
4-5	1937 12 10 18 04	Frignano	6	5.3
5	1939 10 15 14 05	Garfagnana	6-7	4.96
2	1939 10 31 06 47	Lunigiana	5-6	4.85
3	1951 05 15 22 54	Lodigiano	6-7	5.17
3	1957 08 27 11 54	Appennino modenese	5	4.73
4-5	1963 11 04 15 46	Bassa modenese	5	4.16
NF	1965 11 09 15 35	Appennino reggiano	5	4.17
4-5	1967 04 03 16 36 18.00	Reggiano	5	4.44



MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	Io	Mw
4	1967 12 30 04 19	Emilia Romagna orientale	6	5.05
5	1971 07 15 01 33 23.00	Parmense	8	5.51
4	1971 09 11 23 18 12.00	Pianura emiliana	5	4.19
4	1972 10 25 21 56 11.31	Appennino settentrionale	5	4.87
4-5	1976 05 06 20	Friuli	9-10	6.45
3	1976 09 11 16 35 02.44	Friuli	7-8	5.6
4	1976 09 15 09 21 19.01	Friuli	8-9	5.95
3	1978 12 05 15 39 04.00	Romagna	4-5	4.61
5	1978 12 25 22 53 41.00	Bassa modenese	5	4.39
NF	1980 11 23 18 34 52.00	Irpina-Basilicata	10	6.81
3	1980 12 23 12 01 06.00	Piacentino	6-7	4.57
6	1983 11 09 16 29 52.00	Parmense	6-7	5.04
NF	1984 04 29 05 02 59.00	Umbria settentrionale	7	5.62
2-3	1986 12 06 17 07 19.77	Ferrarese	6	4.43
6	1987 05 02 20 43 53.32	Reggiano	6	4.71
4	1987 05 08 11 10 27.88	Bassa modenese	6	4.44
2	1988 02 08 11 24 46.14	Garfagnana	6	4.34
4	1988 03 15 12 03 16.17	Reggiano	6	4.57
3	1992 04 17 11 59 07.29	Appennino bolognese	4-5	4.11
3	1995 08 24 17 27 33.00	Appennino pistoiese	6	4.45
2-3	1995 10 10 06 54 21.72	Lunigiana	7	4.82
5-6	1996 10 15 09 55 59.95	Pianura emiliana	7	5.38
4	1996 10 26 04 56 54.10	Pianura emiliana	5-6	3.94
4	1996 12 16 09 09 53.08	Pianura emiliana	5-6	4.06
3	1997 05 12 22 13 52.50	Pianura emiliana	4-5	3.68
3	1997 09 26 09 40 26.60	Appennino umbro-marchigiano	8-9	5.97
3-4	1998 02 21 02 21 13.30	Pianura emiliana	5	3.93
3	1998 03 26 16 26 17.03	Appennino umbro-marchigiano		5.26
4	1999 07 07 17 16 12.59	Frignano	5	4.67
4	2000 06 18 07 42 07.68	Pianura emiliana	5-6	4.4
3	2002 06 08 20 13 07.10	Frignano	4	4.23
NF	2002 06 18 22 23 38.10	Frignano	4	4.3
4-5	2003 09 14 21 42 53.18	Appennino bolognese	6	5.24
4	2004 11 24 22 59 38.55	Garda occidentale	7-8	4.99
4-5	2008 12 23 15 24 21.77	Parmense	6-7	5.36
3	2011 07 17 18 30 27.31	Pianura lombardo-veneta	5	4.79

Tab. 1 – Eventi sismici di maggiore intensità i cui effetti si sono risentiti a Modena

Dalla lettura dei dati si evidenzia che il massimo evento sismico censito a Modena si è verificato il 5 Giugno 1501 con un'intensità dell'VII-VIII grado della scala MCS.

Tutti i terremoti registrati nel CPTI15 al contorno delle Casse del Secchia per una distanza di circa 50 Km sono stati rappresentati in Fig. 25.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

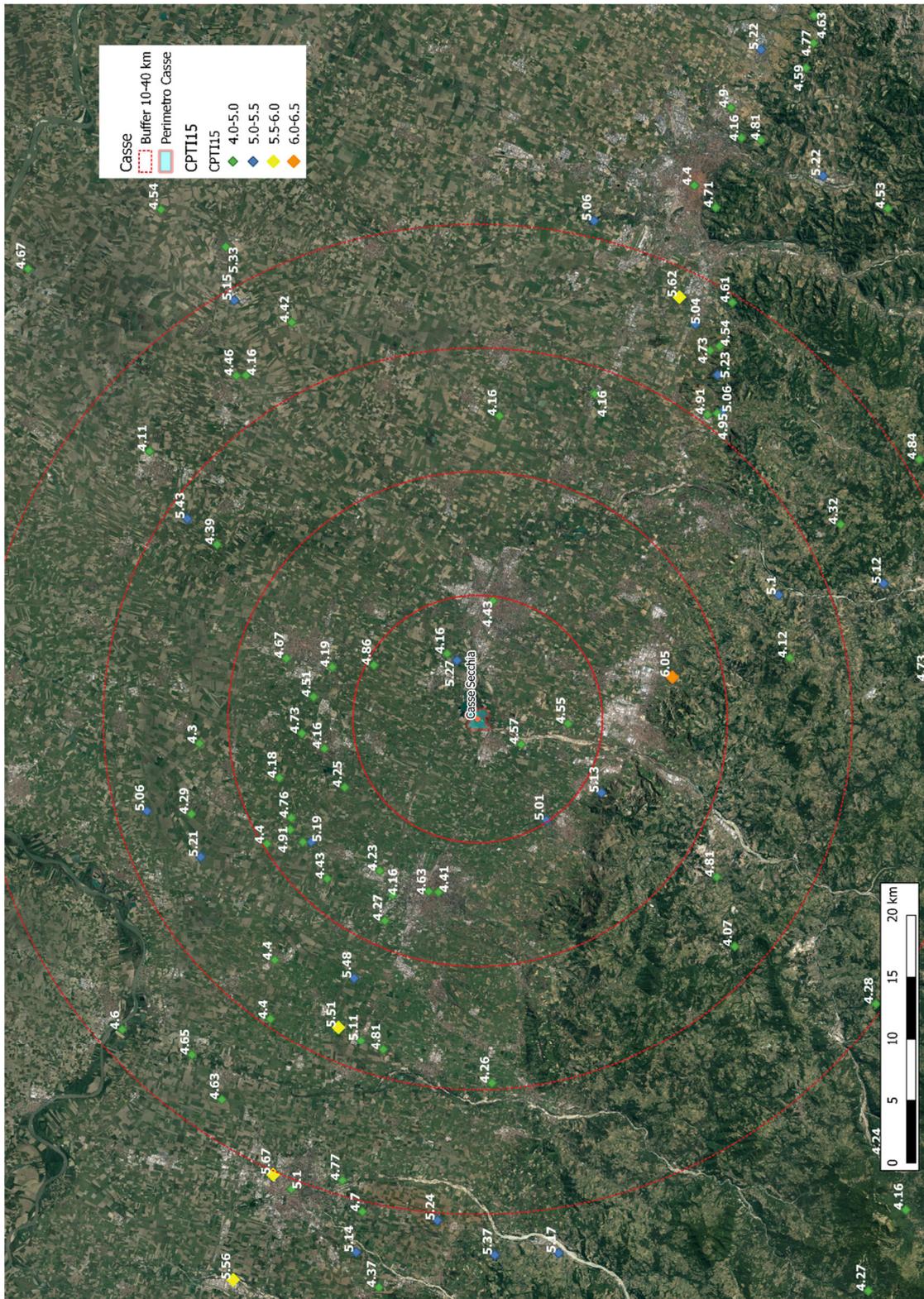


Fig. 25 – Terremoti registrati al contorno delle Casse Secchia con Mw>4 (dal Catalogo CPTI15)

3.5.1 La sequenza sismica del 2012 in Emilia

Di particolare interesse, per lo studio in oggetto, è l'analisi della sequenza sismica del 2012 iniziata il 20 maggio 2012 alle ore 4.03, con epicentro Mirandola (MO), in occasione del quale è stata registrata una magnitudo pari a 5.9 della scala Richter.

Tale sisma è stato seguito da numerosissime altre scosse, (1437 fino al 4 giugno - Fonte INGV) di cui 6 di magnitudo superiore a 5. In Fig. 26 è riportata la distribuzione temporale delle scosse sismiche nel periodo compreso tra il 20 maggio ed il 4 giugno 2012 e la relativa intensità.

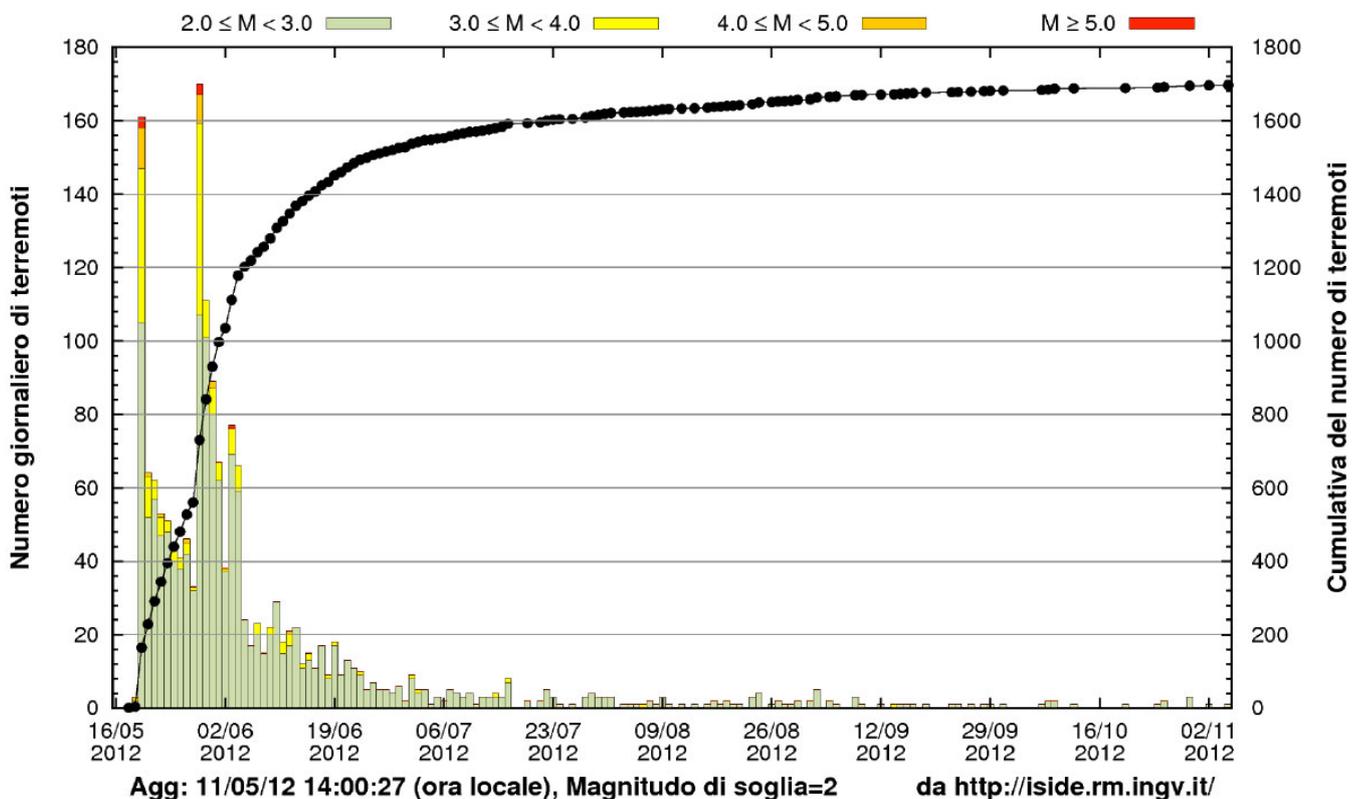


Fig. 26 – Sequenza sismica dal 20 maggio al 5 novembre 2012

In Fig. 27 è riportata la distribuzione spaziale dei sismi con magnitudo maggiore di 4. Come si può notare dalla figura la profondità degli ipocentri è quasi sempre superficiale (5-10 Km).

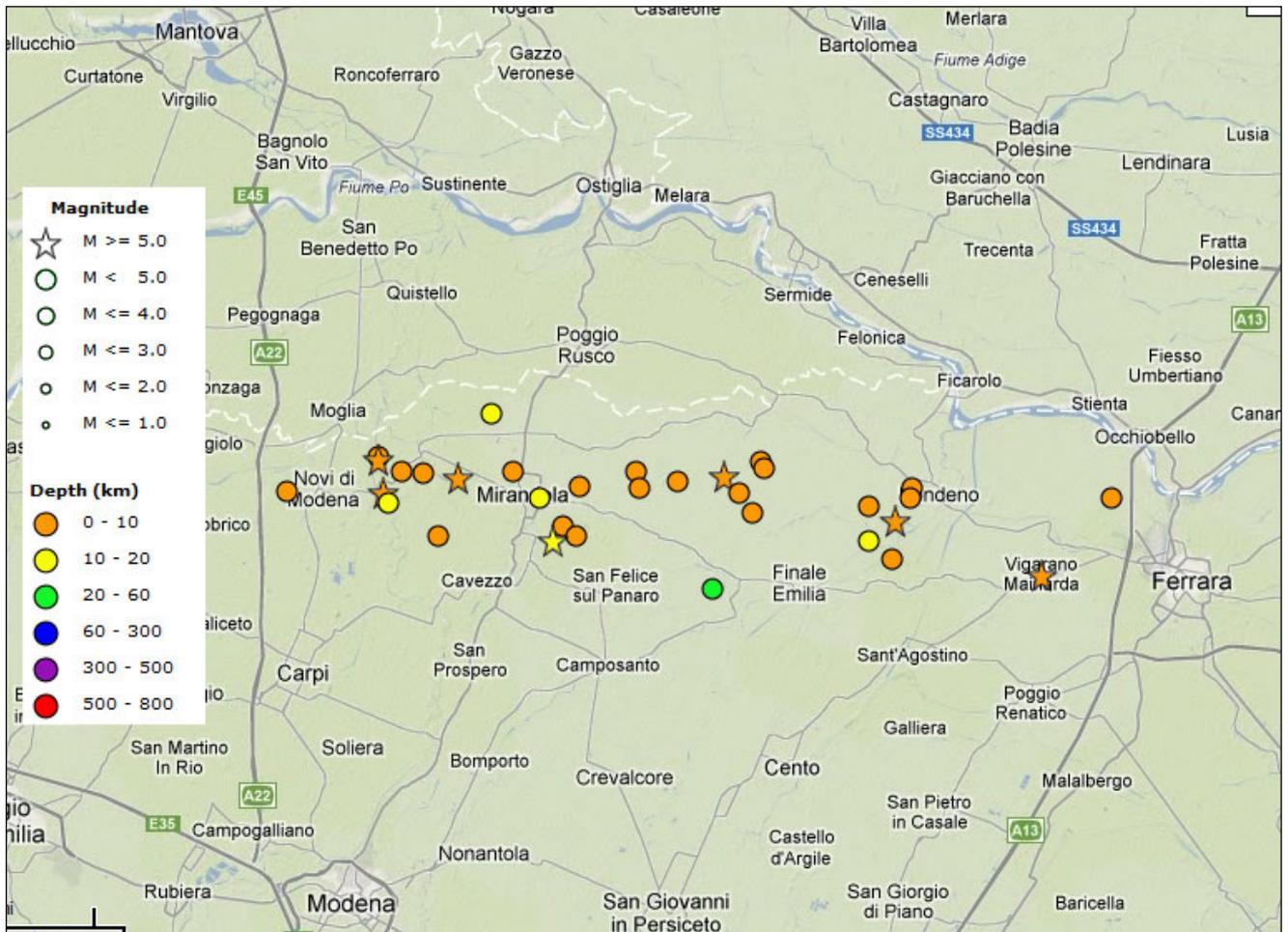


Fig. 27 – Distribuzione degli epicentri dei sismi con magnitudo > 4 (da <http://iside.rm.ingv.it>)

L'elaborazione dei dati della rete sismica nazionale ha consentito ad INGV di verificare che il sisma è legato ad un meccanismo di tipo compressivo, con direzione di massima compressione nord-sud. Tale meccanismo è compatibile con la "struttura di Mirandola", faglia già valutata come potenziale sorgente sismogenetica, con magnitudo massima attesa pari a 5.9 della scala Richter (cfr § 3.2.2.1).

In effetti il sisma, secondo le interpretazioni di INGV, è imputabile proprio al movimento della faglia di Mirandola, associata al sistema delle Pieghie Ferraresi, di cui si è già illustrato in precedenza.

In Fig. 28 è rappresentata una sezione schematica delle strutture sismogenetiche che hanno generato il terremoto.

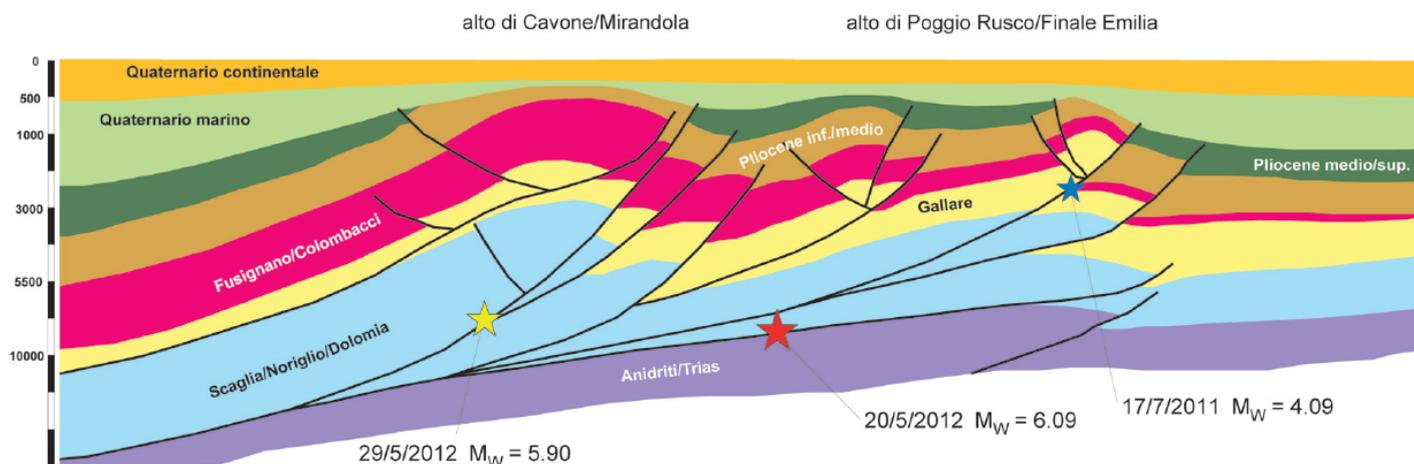


Fig. 28 – Sezione geologica attraverso le zone ipocentrali della sequenza sismica emiliana (da Note illustrative della Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna e zone limitrofe)

L'evento di magnitudo $M_w=5.9$ del 20/5/2012 è stato risentito in tutto il nord-Italia e le *shakemap* calcolate subito dopo l'evento confermano queste osservazioni. In particolare, nella zona epicentrale le accelerazioni massime (PGA) sono state stimate fino a 0.3g, ossia il 30% dell'accelerazione di gravità. Analoga accelerazione è stata calcolata per il sisma del 29/5/2012, che ha presentato una magnitudo pari a 5.8 della scala Richter.

Questi valori sono tuttavia stimati in quanto non vi sono dati da stazioni sismiche poste all'epicentro stesso o negli immediati paraggi per cui sono da ritenersi solo indicativi. La stazione di registrazione più vicina (appartenente alla Rete Accelerometrica Nazionale), ubicata a Mirandola (MRN), si trova ad una distanza di 13.3 km dall'epicentro dell'evento più significativo (20 maggio). Il picco massimo d'accelerazione registrato, in occasione dell'evento più forte (IA) è di 0.309 g, e, come mostrato in Fig. 30, corrisponde alla componente verticale (UP-DOWN). Inferiori risultano i picchi corrispondenti alle due componenti orizzontali (0.264 in direzione SUD-NORD e 0.261 in direzione OVEST-EST).

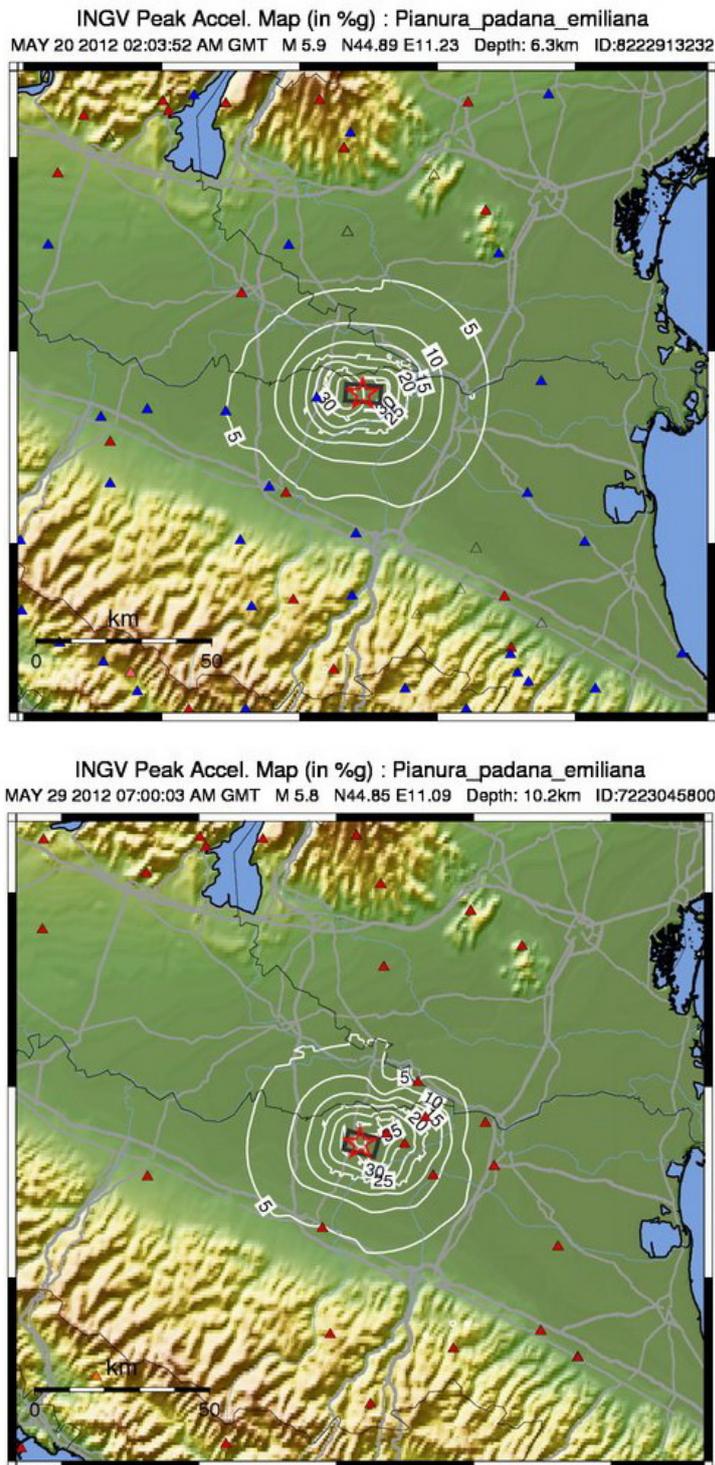


Fig. 29 – Mappe di accelerazione massima stimata al suolo (in % g) per i sismi del 20 e 29 maggio 2012

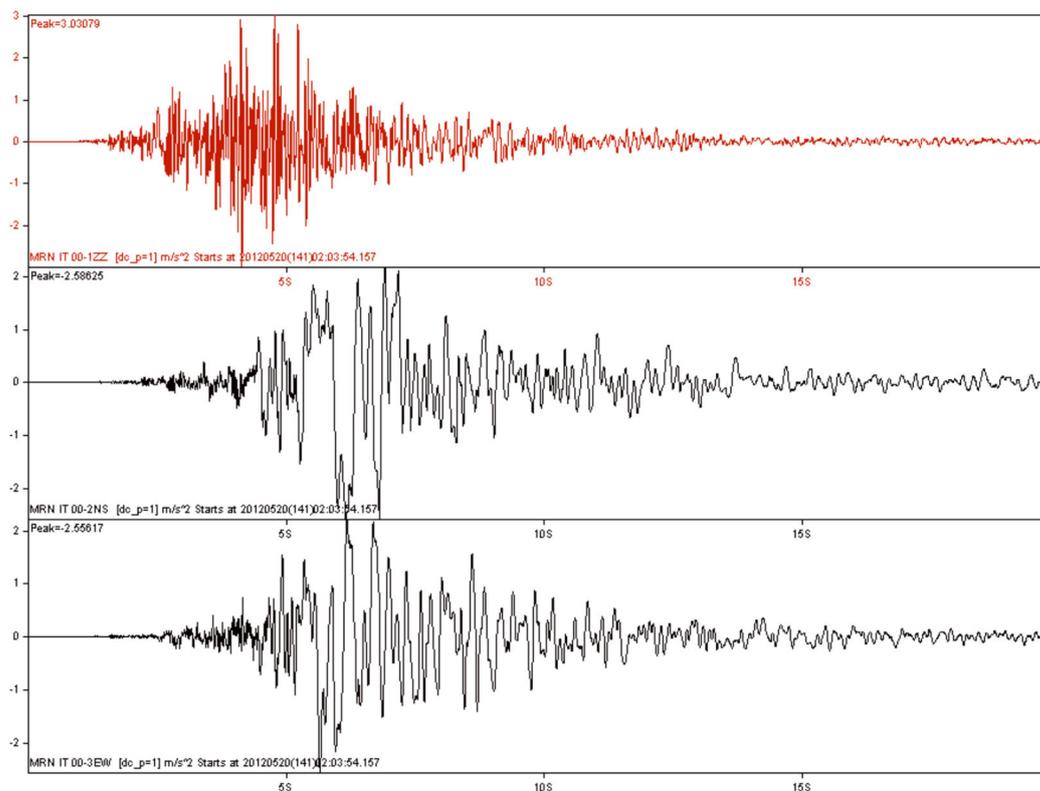


Fig. 30 - Sisma del 20/5/2012. Accelerogramma delle componenti (dall'alto in basso) Verticale, Nord-Sud ed Est-Ovest (acc. m/s/s, tempo s) registrate dalla stazione di Mirandola della Rete Accelerometrica Nazionale (www.protezionecivile.gov.it)

La sequenza sismica del 2012 ha fornito anche importanti informazioni relativamente alla deformazione del terreno in superficie. Infatti, sebbene le faglie che hanno generato i terremoti non siano capaci (vedi definizioni del Cap. 3.4) hanno comunque deformato la topografia del suolo con valori massimi prossimi ai 20 cm per il sisma del 20 maggio e di circa 12 cm per il sisma del 29.

In Fig. 31 si riporta l'interferogramma Radarsat ottenuta dall'analisi di immagini radar Cosmo-SkyMed. La tecnica utilizzata è l'interferometria differenziale DInSAR.

L'interferogramma è una rappresentazione delle deformazioni del suolo avvenute tra le date di due immagini radar. Può essere letto come una mappa dei movimenti del suolo proiettati secondo la direzione di vista del satelliti in termini di cicli di colore. Ciascun ciclo (o frangia) indica una deformazione del suolo (tra le due date) di 1.5 cm

per ottenere lo spostamento totale vanno sommate le frange con lo stesso verso del ciclo di colore.

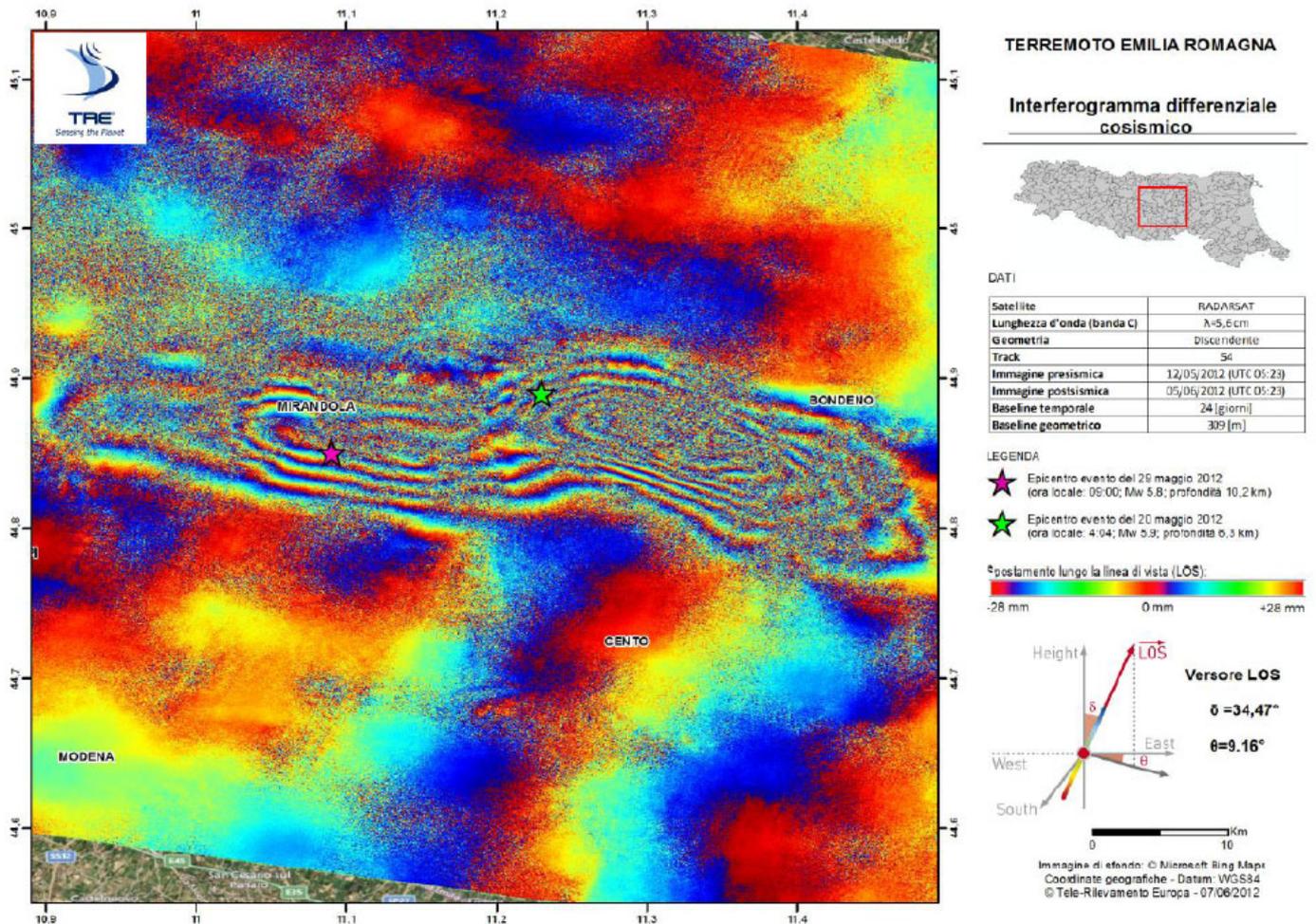


Fig. 31 – Interferogramma Radarsat comprendente i maggiori eventi della sequenza emiliana tra le date 12/5 e 5/ 2012 (da Luzi L. “La Sequenza sismica del maggio 2012 in Emilia)

3.6 Pericolosità sismica

Sulla base dei dati analizzati nei capitoli precedenti risulta evidente che la valutazione della pericolosità sismica oggi disponibile e cioè quella rappresentata nella Mappa di

pericolosità sismica redatta da INGV nel 2004⁶ (Fig. 32) costituisce tutt'ora il riferimento più valido e cautelativo per la stima delle accelerazioni da utilizzare nella progettazione.

Come illustrato in precedenza, infatti, la magnitudo delle sorgenti sismogenetiche al contorno dell'area di studio risulta inferiore a quella utilizzata nell'ambito degli studi dell'INGV.

Va ricordato che le “Linee-guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe”, stabiliscono che, in ogni caso, *“l'azione sismica di progetto, che non deve comunque risultare meno gravosa dell'azione sismica definita nelle NTC, relativamente a sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale”*.

Eventuali modelli mirati al presente studio, inoltre, non potrebbero che riprodurre, sicuramente con minore affidabilità e precisione, quanto già realizzato e validato da un board di revisori di livello internazionale.

Per tali motivi, nel presente studio si è scelto di fare riferimento alla pericolosità sismica di base indicata dall'Allegato A delle Norme Tecniche per le costruzioni del D.M. 14-01-2008, basata appunto sulla mappa di pericolosità sismica dell'INGV.

Per la descrizione di tali documenti si rimanda al Cap. 4.1.

Nel presente studio, tuttavia, come verrà illustrato diffusamente nel Cap. 5, si è scelto di implementare anche una approfondita valutazione della risposta sismica locale, che, prende in considerazione gli aspetti di amplificazione stratigrafica legati alla diffusione delle onde sismiche nei depositi quaternari.

Le analisi effettuate sui sismi più recenti, a partire dalla sequenza dell'Aquila del 2009, infatti, hanno evidenziato che la presenza di forti contrasti di impedenza del primo sottosuolo (differenza di Vs negli strati, come avviene nella zona oggetto della presente indagine), posso comportare forti amplificazioni del segnale sismico generato al bedrock.

⁶ “Gruppo di Lavoro (2004) – Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo del Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65pp. + 5 appendici”

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

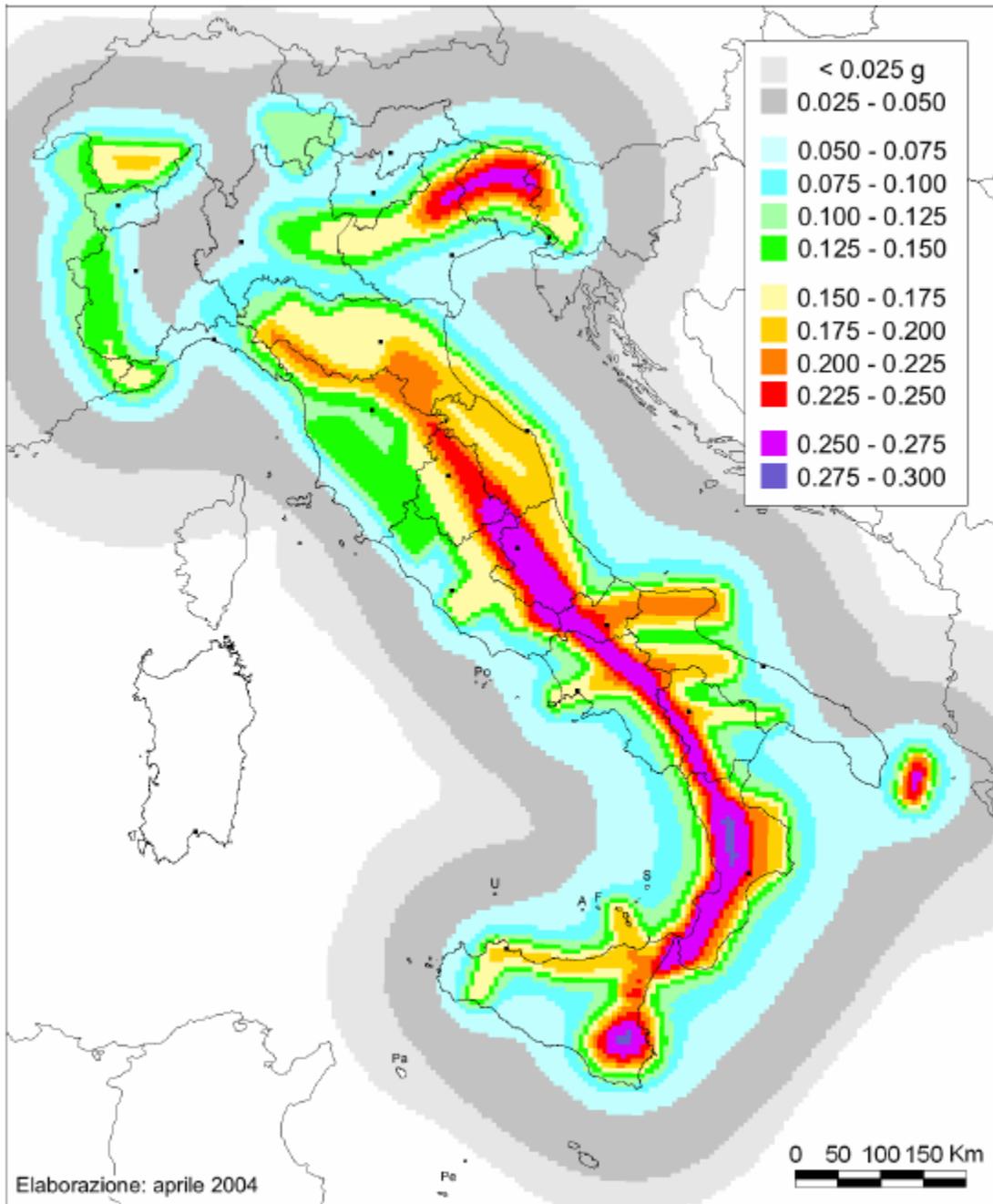


Fig. 32 - Mappa di pericolosità sismica

4 Sismicità

4.1 Classificazione sismica del territorio

L'Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003, suddivide il territorio italiano in 4 zone sismiche con diversi livelli di accelerazione sismica di progetto. La delibera della giunta regionale 23 luglio 2018 n.1164, aggiorna la classificazione sismica di prima applicazione dei comuni dell'Emilia Romagna, riclassificando il territorio. Secondo tale aggiornamento, come indicato in Fig. 33, il territorio dei comuni di Modena, Campogalliano (MO) e Rubiera (RE) sono identificati in zona 3 (a sismicità bassa), cui corrispondono valori di accelerazione di picco orizzontale del suolo (a_g), con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, inferiori a $0,15 \cdot g$ (dove g è l'accelerazione di gravità).

Tale classificazione ha tuttavia esclusivo valore amministrativo; infatti alle Norme Tecniche per le costruzioni del D.M. 14-01-2008, è allegato un documento sulla pericolosità sismica (Allegato A), in cui l'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire dalla pericolosità sismica di base, più semplicemente chiamata pericolosità sismica che costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

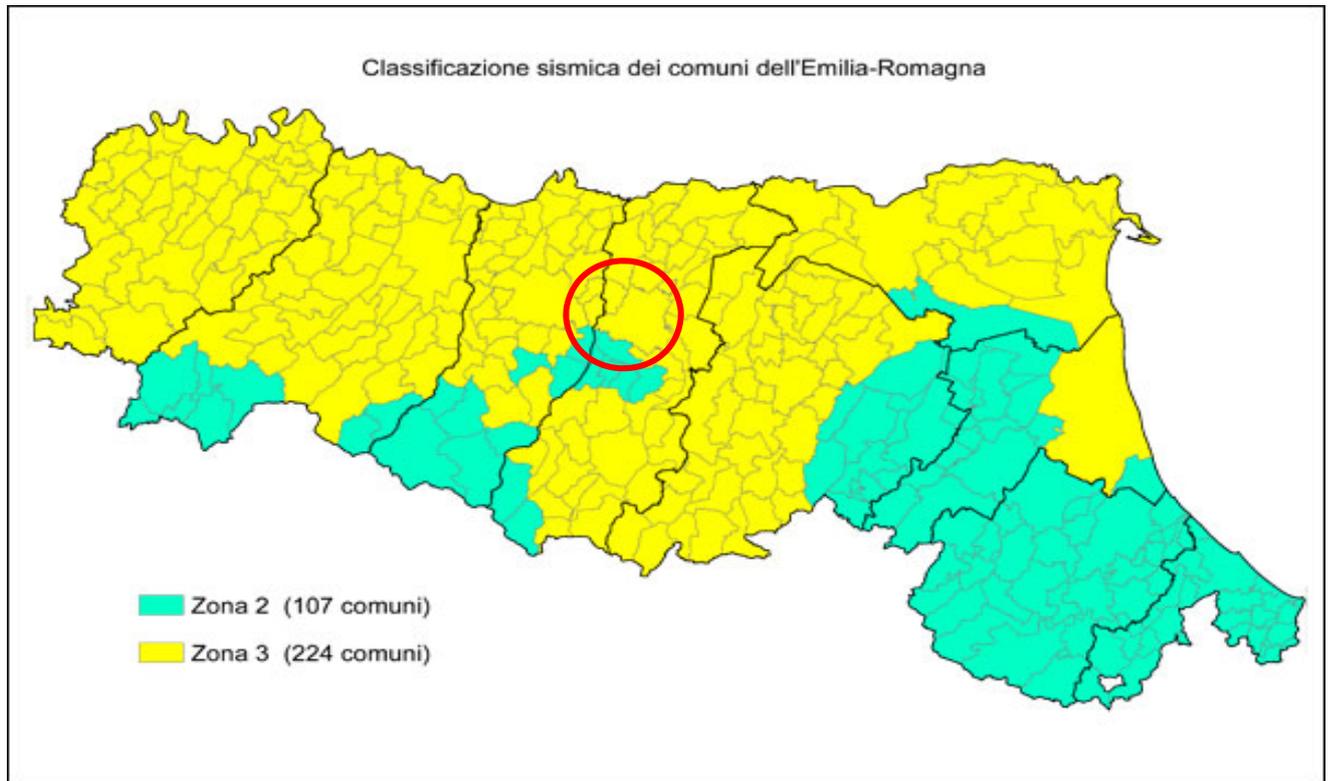


Fig. 33 - Classificazione sismica dei Comuni della Regione Emilia-Romagna

Le azioni di progetto si ricavano, ai sensi delle N.T.C., dalle accelerazioni a_g e dalle relative forme spettrali. Le forme spettrali previste sono definite, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione dei tre parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima del terreno;
 - F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
 - T_c^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Questi tre parametri sono definiti in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento; cfr. Fig. 34), i cui nodi non distano fra loro più di 10 km, per diverse probabilità di superamento in 50 anni e per diversi periodi di ritorno.

Per determinare il tempo di ritorno (T_R) si utilizza l'espressione:

$$T_R = \frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

dove V_R è il periodo di riferimento della costruzione, mentre P_{V_R} è la probabilità di superamento nel periodo di riferimento.

Per determinare il tempo di ritorno sono stati utilizzati i parametri dell'opera in progetto già indicati nel paragrafo 1.2:

- VITA NOMINALE: “Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni o di importanza strategica” la cui vita nominale è $V_n \geq 100$ anni (come definito dalla Tab. 2.4.I delle N.T.C. 01/2018);
- CLASSE D'USO: Classe III: “Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso” (come definito dal paragrafo 2.4.2 delle N.T.C. 01/2008);
- PERIODO DI RIFERIMENTO PER L'AZIONE SISMICA: Considerata la classe d'uso III, il coefficiente d'uso è $C_u=1.50$ (cfr. Tab. 2.4.II delle N.T.C. 01/2018), e di conseguenza la Vita di riferimento è $V_R=V_N \cdot C_u=150$ anni.

Inoltre, sono stati definiti gli stati limite che forniscono le probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{V_R} (vedi Tab. 3.2.I del Paragrafo 3.2.1 delle NTC 01/2018), per lo stato limite ultimo di Salvaguardia della Vita (SLV) con probabilità pari al 10% e per lo stato limite di esercizio di Danno (SLD) con probabilità pari al 63%.

Dato che il sito in esame non ricade nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri a_g , F_0 , T_c^* possono essere ricavati come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione e i quattro vertici.

Alla luce di quanto sopradescritto i valori dei tre parametri necessari per la determinazione delle azioni sismiche sono riportati nella seguente Tab. 2.

Stato Limite	Tempo di ritorno T_R (anni)	a_g (g)	F_0	T_c^* (s)
SLO	90	0.078	2.470	0.276
SLD	151	0.099	2.433	0.281
SLV	1424	0.241	2.401	0.303
SLC	2475	0.290	2.400	0.309

Tab. 2 – Valori dei parametri a_g , F_0 e T_c^* per i tempi di ritorno associati a ciascun stato limite

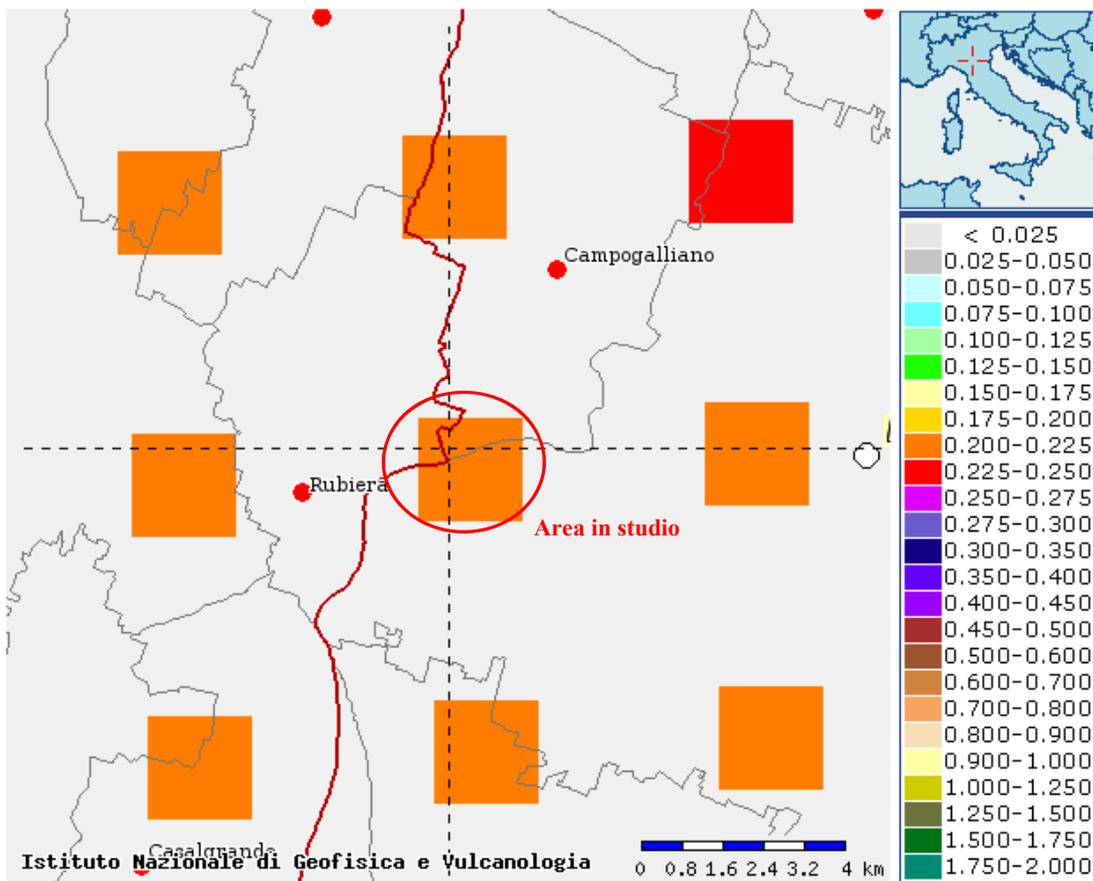


Fig. 34- Mappatura dell'accelerazione orizzontale massima del terreno (a_g) con tempi di ritorno di 1475 anni per lo stato limite SLV

4.2 Categoria di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, il D.M. 17-01-2018 definisce 5 categorie in cui suddividere i terreni d'imposta in base ai valori di velocità equivalente delle onde sismiche trasversali fino al substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzato da V_s non inferiore a 800 m/s.

La velocità equivalente delle onde sismiche di taglio, sotto il piano di posa della fondazione e fino al substrato, ($V_{s,eq}$), è definita come:

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

dove h_i e V_i sono lo spessore e la velocità delle onde dello strato i -esimo fondazione, N il numero degli strati e H la profondità del substrato.

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.

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> 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	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , 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.

Categoria	Descrizione
C	<i>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.</i>
D	<i>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.</i>
E	<i>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.</i>

Tab. 3 - Categorie sismiche dei terreni

Sulla base dei dati ottenuti dai Down-Hole disponibili per il sito, si è constatato che i terreni appartengono alla **categoria sismica C** (paragrafi 2.1.1 e 2.2).

4.3 Coefficienti sismici di progetto

Sulla base della categoria di appartenenza del terreno il D.M. 17-01-2018 introduce i coefficienti S_s (coefficiente di amplificazione stratigrafica) e C_C (coefficiente funzione della categoria di sottosuolo) per tener conto dell'amplificazione stratigrafica del valore dell'azione sismica di progetto. Per le categorie B, C, D e E, questi due parametri possono essere calcolati attraverso le espressioni riportate in Tab. 4, dove i valori di F_0 e T_C^* sono relativi al sottosuolo di categoria A, g è l'accelerazione di gravità ed il tempo è espresso in secondi.

Categoria	Ss	Cc
A	1.00	1.00
B	$1.00 \leq 1.40 - 0.40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.20$	$1.10 \cdot (T_C^*)^{-0.20}$
C	$1.00 \leq 1.70 - 0.60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.50$	$1.05 \cdot (T_C^*)^{-0.33}$
D	$0.90 \leq 2.40 - 1.50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.80$	$1.25 \cdot (T_C^*)^{-0.50}$
E	$1.00 \leq 2.00 - 1.10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.60$	$1.15 \cdot (T_C^*)^{-0.40}$

Tab. 4 - Valori dei parametri Ss e Cc

Con i valori dei parametri a_g , F_0 , T_C^* riportati in Tab. 2 e, per le diverse categorie di suolo, in riferimento ai diversi stati limite, si ottengono i parametri di amplificazione per il fabbricato oggetto di studio, riportati in

	Ss	Cc	St	Amax (m/s ²)	Beta	Kh	Kv
SLO	1.500	1.610	1.000	1.144	0.200	0.023	0.012
SLD	1.500	1.600	1.000	1.454	0.200	0.030	0.015
SLV	1.350	1.560	1.000	3.186	0.280	0.091	0.045
SLC	1.280	1.550	1.000	3.642	0.280	0.104	0.052

Tab. 5 – Coefficienti sismici di progetto

L'analisi della superficie topografica ha, invece, consentito di escludere la presenza di effetti locali legati a elementi morfologici. Il sito oggetto di indagine è ubicato in zona pianeggiante, dove il piano campagna ha un angolo di inclinazione $<15^\circ$ e di conseguenza non si ha amplificazione topografica.

I coefficienti sismici di progetto vengono utilizzati nell'analisi della pericolosità sismica per la definizione degli spettri di risposta elastica ai diversi stati limite. Nel presente studio, che prevede uno studio completo di risposta sismica locale, la definizione degli spettri di risposta "semplificati" verranno utilizzati esclusivamente per confronto con gli spettri da RSL (cfr. Cap. 5.2.4.3 e 5.3.4.3).

4.4 Disaggregazione e magnitudo

Per poter definire la magnitudo di riferimento necessaria per individuare i sismi di riferimento mediante il programma Rexel (paragrafo 5.2.3), è necessario dapprima definire le caratteristiche sismogenetiche del sito, cioè definire la coppia di dati magnitudo-distanza che meglio caratterizzano il sito stesso. Tale operazione, nota come disaggregazione, consiste nell'individuazione, a partire da uno studio di pericolosità sismica con metodo probabilistico, delle coppie di dati (appunto magnitudo e distanza) che maggiormente concorrono alla sismicità di un sito.

A tale scopo, si sono utilizzati i dati dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) che fornisce i valori disaggregati magnitudo-distanza, ovvero, il contributo percentuale delle diverse coppie di dati magnitudo-distanza alla pericolosità di base con riferimento ai nodi del reticolo di riferimento, individuato dall'Allegato A delle NTC 2008 (nel caso in esame, si è considerato il nodo 15385, in quanto è il più prossimo all'edificio oggetto di studio).

La disaggregazione per lo SLV (Fig. 35) evidenzia che il massimo contributo percentuale alla pericolosità sismica di base è fornita per terremoti di magnitudo compresa tra 4.5 e 5.0 nel range di distanza tra 0 e 10 Km. Importanti contributi sono però forniti anche da sismi con magnitudo tra 4.0 e 4.5 e 5.0-5.5 sempre nel range 0-10 Km.

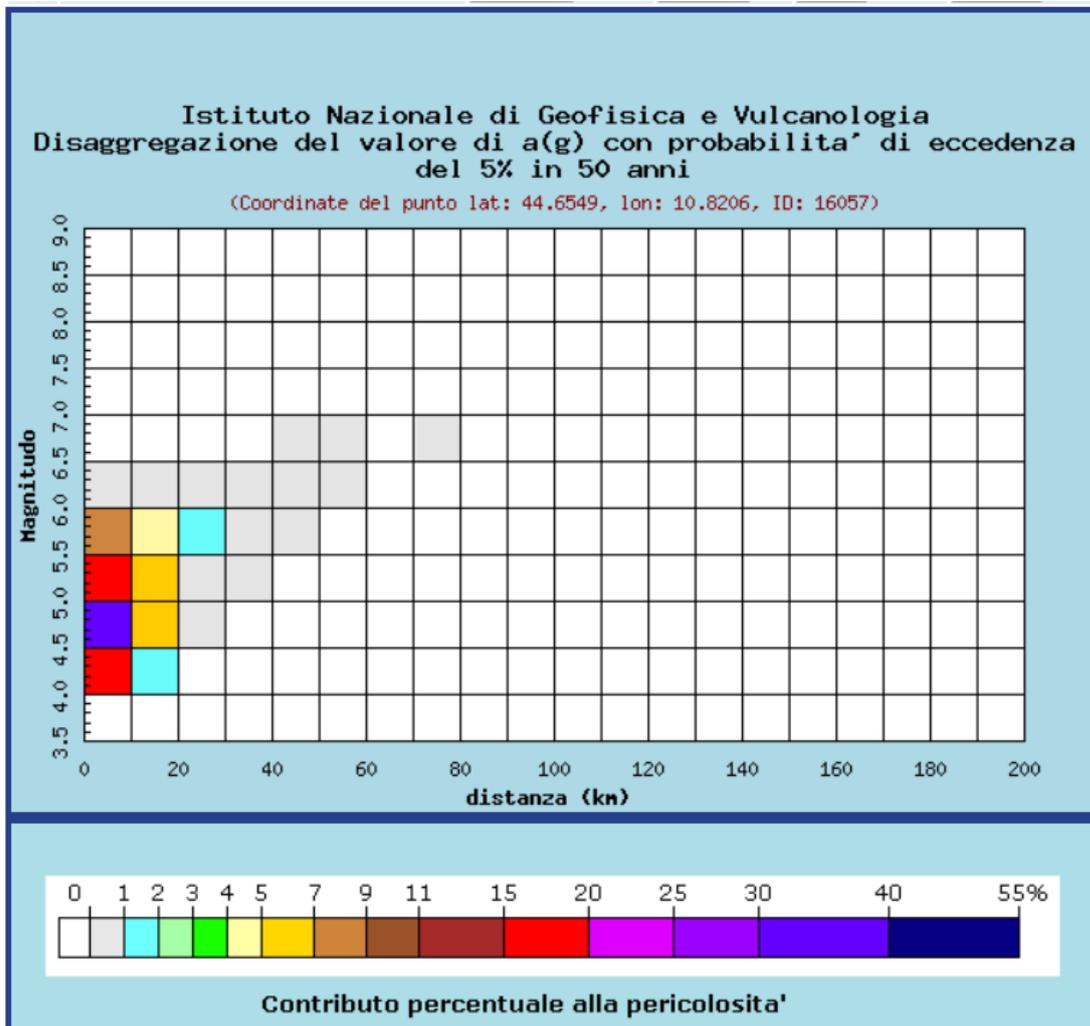


Fig. 35 – Disaggregazione magnitudo-distanza per il nodo 16057 da INGV per lo stato limite SLV

La valutazione della disaggregazione per lo stato limite SLD fornisce risultati sostanzialmente analoghi allo stato SLV, anche se il range di distanza è compreso tra 0 e 20 Km.

5 Analisi della risposta sismica locale 2D

La risposta sismica locale è il risultato di interazioni tra le onde sismiche e le condizioni locali, cioè l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno ed ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

In altre parole, le caratteristiche del sito sono le responsabili delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (terremoto di riferimento), subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo G. et al.,1999).

Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I passi da seguire nello studio del problema della risposta sismica locale sono:

1. Definizione del modello geofisico del sottosuolo;
2. Stima dell'accelerazione di base;
3. Definizione della disaggregazione magnitudo/distanza;
4. Estrazione, conversione e normalizzazione accelerogrammi di input;
5. Esecuzione dell'analisi e restituzione grafica in termini di:
 - a. Serie temporali
 - b. Spettri di risposta elastica in superficie

Nel presente studio la procedura di analisi di RSL è stata adottata per le due opere principali:

- Intervento A: manufatto di sbarramento e regolazione dell'invaso (manufatto regolatore).
- Intervento B: manufatto di derivazione nell'invaso laterale (manufatto sfioratore).

Di seguito verrà dapprima descritta la procedura di analisi di RSL e successivamente verranno illustrati i modelli adottati per i due manufatti analizzati ed i relativi risultati.

5.1 Procedura di analisi RSL

Per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 4.4 di STACEC.

Il codice di calcolo LSR2D consente di effettuare una modellazione bidimensionale del problema mediante il metodo degli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando il metodo lineare equivalente e tenendo conto della deformabilità del substrato.

Qualora la stratigrafia in esame non presenti problematiche di carattere bidimensionale è comunque possibile studiare il problema monodimensionale grazie ad una discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

5.1.1 Metodo lineare equivalente

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso e caratterizzato da marcata non linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e degradazione progressiva delle caratteristiche meccaniche per effetto del numero di cicli di carico applicati. In presenza di fluido interstiziale, alle suddette problematiche si aggiunge l'accumulo di sovrappressioni interstiziali in condizioni di drenaggio impedito o parziale, che sono comunque le più frequenti, in considerazione della velocità di applicazione del carico. La modellazione di tali fenomeni richiede l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che oltretutto difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione spesso si preferisce fare riferimento a modelli costitutivi semplificati che, pur non essendo rigorosi, riescono a riprodurre il comportamento in modo adeguato in riferimento alla specifica applicazione.

In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in Figura 5. La tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata γ' , secondo la relazione:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}$$

dove:

- G = Modulo di taglio;
- η = viscosità del mezzo;

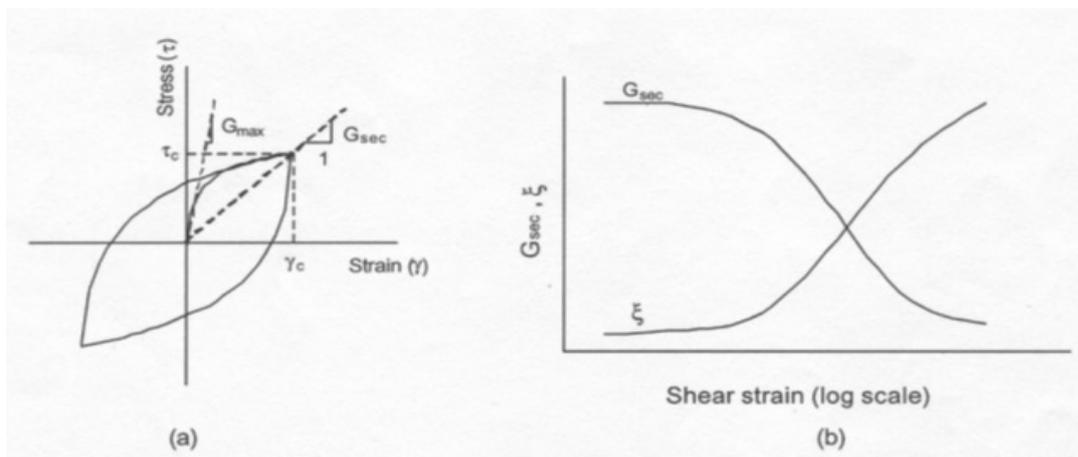


Fig. 36 - Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Fig. 36. Il modulo di taglio equivalente, G , è preso considerando il modulo di taglio secante G_s .

È possibile notare come alla fine di un ciclo controllato e simmetrico di tensioni si ha:

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

La curva $G_s - \gamma$ non può avere una forma arbitraria ma deriva dalla curva $\tau - \gamma$ e sussiste la seguente relazione:

$$\frac{dt}{d\gamma} = G_s(\gamma) + \frac{dG_s}{d\gamma} \gamma \geq 0$$

La descrizione del comportamento meccanico dei terreni nei confronti dei carichi ciclici non può peraltro prescindere dalla dissipazione intrinseca di energia che si verifica durante i cicli di carico-scarico. Il parametro di riferimento a tal riguardo è costituito dal coefficiente di smorzamento D , definito come:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W^{dissp}}{W^{max}}$$

dove:

- ΔW^{dissp} = quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;
- W^{max} = massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico;

In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento (Fig. 36b).

5.1.2 Soluzione alla singola iterazione mediante FEM

L'approccio utilizzato per la soluzione visco-elastica lineare all'interno dell' i-esimo ciclo iterativo utilizza il metodo degli elementi finiti. In particolare, il deposito di terreno viene discretizzato mediante una "mesh" di elementi finiti piani che possono avere forma quadrangolare o rettangolare a seconda dei casi (Fig. 37) e caricato mediante un'accelerazione alla base dello stesso (bedrock), la soluzione dell'equazione del moto viene poi ottenuta nel dominio del tempo utilizzando il metodo di integrazione di Newmark.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Ma_g$$

dove:

- M = matrice di massa del sistema;

- C = matrice di smorzamento del sistema;
- K = matrice di rigidità del sistema;
- \ddot{u}, \dot{u}, u = rispettivamente vettori di accelerazione, velocità e spostamento del sistema;
- a_g = vettore di accelerazione alla base;

Tale equazione vale per ogni istante di tempo tn e descrive l'equilibrio dinamico del sistema. La soluzione in termini di spostamento velocità ed accelerazione per ogni tn viene ottenuta a partire dalle seguenti relazioni:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n]$$

dove:

- Δt = incremento temporale tra l'istante di tempo tn e $tn - 1$;
- β = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25;
- γ = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50;

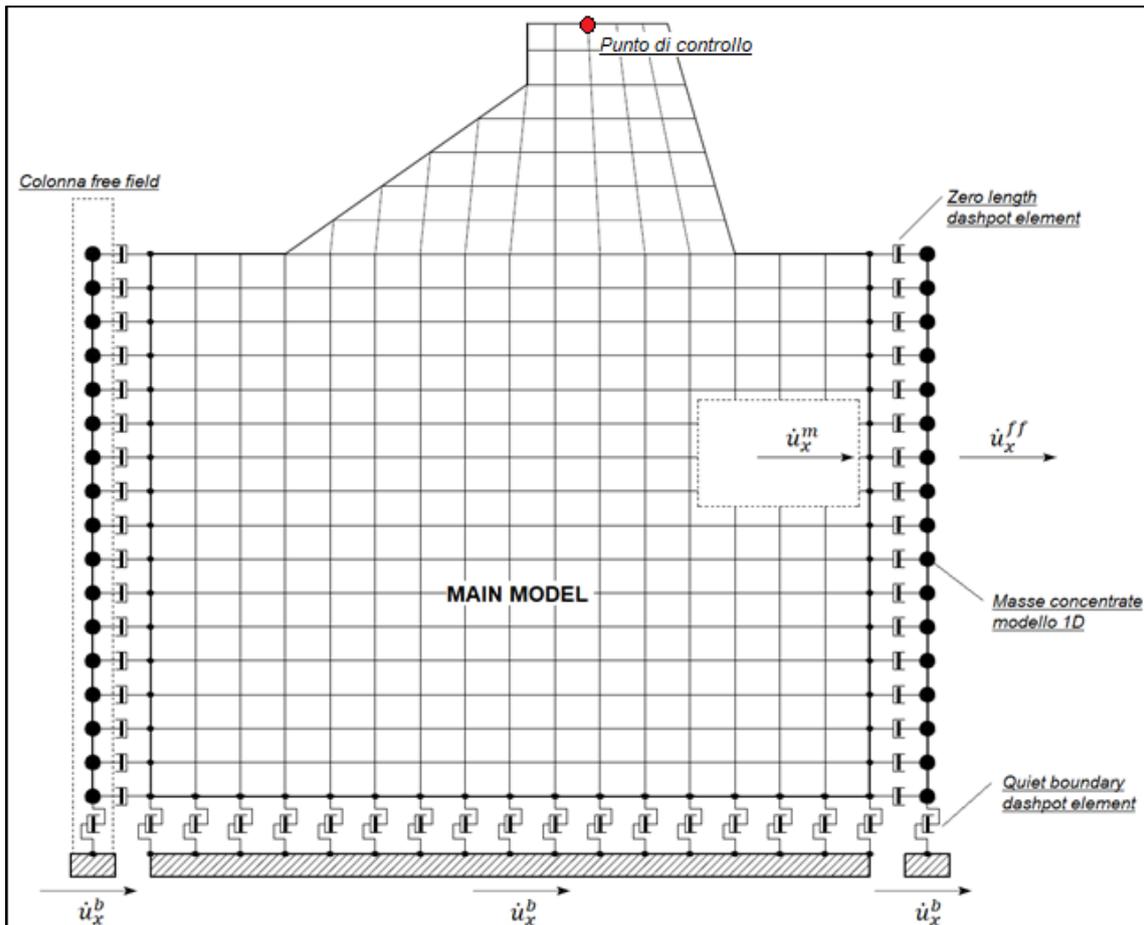


Fig. 37 - Discretizzazione FEM del terreno.

5.1.2.1 Smorzamento

La matrice di smorzamento del sistema viene ottenuta mediante l'assemblaggio delle matrici di smorzamento dei singoli elementi, queste ultime ottenute a loro volta come:

$$C_q = \alpha_q M_q + \beta_q K_q$$

dove:

- α_q e β_q = coefficienti di smorzamento alla Reyleigh;

Tali coefficienti vengono ottenuti a partire dal rapporto di smorzamento viscoso del singolo elemento e dalla relazione seguente:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n]$$

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

$$D_q = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_q}{\omega} + \beta_q \omega \right)$$

dove:

- ω_1 = frequenza naturale del primo modo del deposito;
- $\omega_2 = n * \omega_1$ con $n = \omega_i / \omega_1$ (approssimato all'intero pari più grande) e ω_i frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock;

5.1.2.2 Free-field boundaries

Le condizioni di free-field sulle frontiere laterali vengono implementate mediante l'accoppiamento di smorzatori viscosi tra i nodi delle frontiere laterali del modello e i nodi di opportune colonne di terreno monodimensionali (colonne free-field) in grado di descrivere il moto in condizioni di campo libero. Le coordinate dei nodi delle frontiere laterali del modello e delle colonne free-field possono essere uguali. È necessario, affinché tali condizioni al contorno siano applicabili, che le frontiere laterali del modello siano perfettamente verticali. Le forze interne agli smorzatori possono essere ottenute mediante le seguenti equazioni:

$$F_x = -\rho V_p (\dot{u}_x^m - \dot{u}_x^{ff}) A$$

$$F_y = -\rho V_s (\dot{u}_y^m - \dot{u}_y^{ff}) A$$

dove:

- ρ : densità di massa del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- V_p : velocità delle onde P del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- V_s : velocità delle onde S del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- A : area di influenza relativa al nodo su cui agisce lo smorzatore;
- \dot{u}_x^m : velocità del nodo del modello in direzione x;
- \dot{u}_y^m : velocità del nodo del modello in direzione y;
- \dot{u}_x^{ff} : velocità del nodo della colonna free-field in direzione x;

- \dot{u}_y^{ff} : velocità del nodo della colonna free-field in direzione y.

Le componenti della velocità dei nodi delle colonne laterali ad ogni istante di tempo vengono ottenute mediante una soluzione numerica monodimensionale a masse concentrate dell'equazione di propagazione delle onde. Tale soluzione è affidata ad un processo di calcolo che opera in parallelo rispetto a quello impiegato per la soluzione del modello principale. In altre parole, per il generico passo di integrazione temporale, vengono dapprima ottenute le componenti delle velocità delle colonne di campo libero attraverso la soluzione 1D, per poi essere convertite in carichi applicati al modello principale mediante le equazioni precedenti.

5.1.3 Procedimento iterativo

La procedura iterativa che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema consiste nell'eseguire una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidità e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico, è il seguente:

1. definizione di curve $G = G(\gamma)$ e $D = D(\gamma)$ per i diversi strati;
2. inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni (G_0 e D_0);
3. calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato (γ_1);
4. aggiornamento dei valori $G_1 = G(\gamma_1)$ e $D_1 = D(\gamma_1)$;
5. iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ($\gamma_i - 1 \sim \gamma_i$).

5.1.4 Interpretazione dei risultati

Il risultato della procedura iterativa sopradescritta non è altro che la storia temporale di accelerazione, velocità e spostamento di ogni grado di libertà del modello FEM. Tuttavia, dal punto di vista ingegneristico è interessante monitorare la risposta in termini di accelerazione in superficie in corrispondenza di uno o più punti di controllo in modo da comprendere quelli che sono gli effetti indotti dal sito sull'amplificazione della sorgente sismica.

5.2 Manufatto regolatore

Di seguito viene illustrato lo studio di risposta sismica locale per l'Intervento A: Adeguamento del manufatto di sbarramento e regolazione dell'invaso.

5.2.1 Modello geofisico del sottosuolo

La valutazione della risposta sismica locale bidimensionale richiede un'accurata modellazione delle caratteristiche geofisiche del sottosuolo, principalmente basata sui seguenti parametri:

- litologia;
- velocità delle onde sismiche di taglio (V_s);
- densità dei litotipi indagati;
- curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G/G_0) in funzione della deformazione e densità in situ,

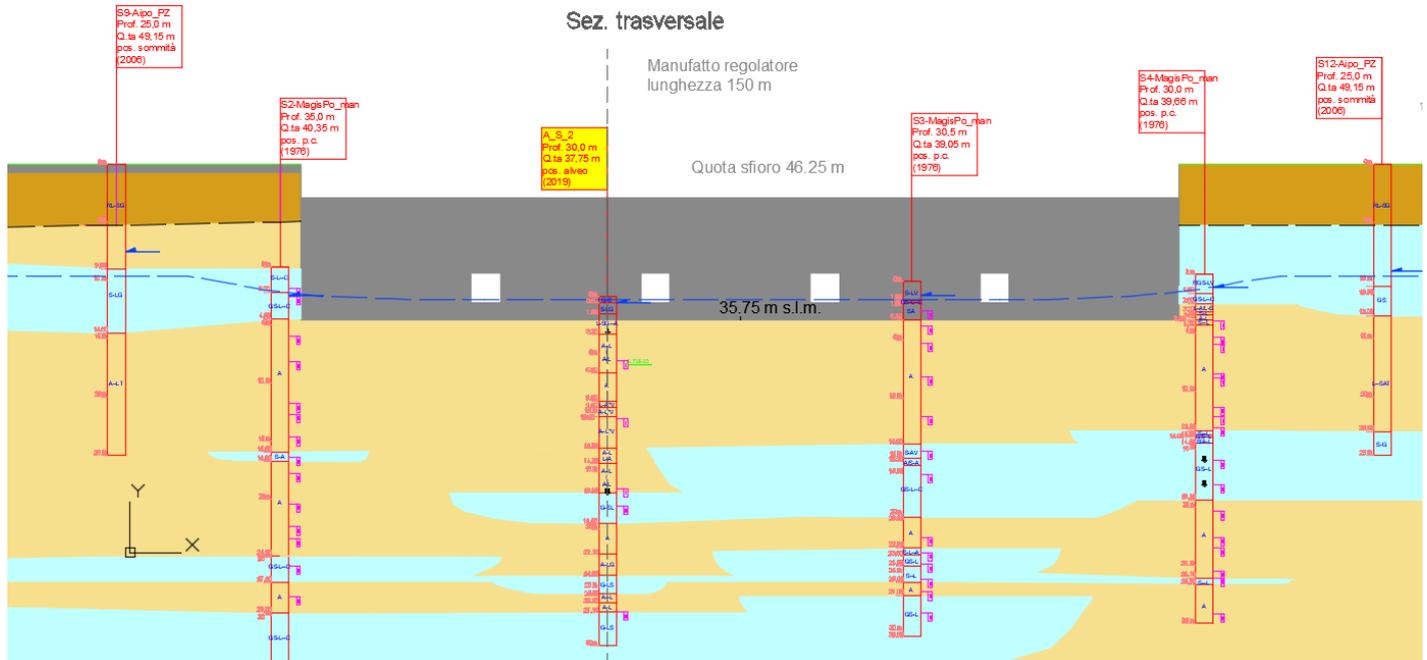
Tale modellazione va spinta in profondità fino a raggiungere il *bedrock* sismico, che teoricamente dovrebbe essere uno strato con velocità $V_s > 800$ m/s, oppure un passaggio tra due materiali caratterizzato da elevato contrasto di impedenza sismica.

5.2.1.1 Litologia, V_s e *bedrock* sismico

Per la determinazione delle caratteristiche del profilo litologico su cui effettuare l'analisi sono stati utilizzati i dati stratigrafici descritti nella Relazione Geologica (Elaborato R.04). Il profilo litostratigrafico utilizzato per lo studio di risposta sismica locale 2D è riportato di seguito in Fig. 38.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)



Terreni di fondazione

-  Depositi prevalentemente argillosi a permeabilità da bassa a molto bassa
-  Depositi prevalentemente ghiaiosi e sabbiosi a permeabilità da media a elevata

Corpo arginale

-  Pacchetto stradale
-  Terreni prevalentemente limoso-argillosi a permeabilità da bassa a molto bassa

Fig. 38 – Profilo litostratigrafico utilizzato

Come si può constatare l'assetto stratigrafico ricostruito sulla base delle indagini disponibili è decisamente complesso, con notevoli alternanze di depositi coesivi e granulari (ghiaie)

La stratigrafia del sito è nota sulla base di sondaggi che raggiungono la profondità di circa 50 m dalla sommità arginale.

Per la definizione della stratigrafia fino al bedrock, oltre i 50 m, si è fatto riferimento a quanto riportato nello studio “Verifiche tecniche delle vasche di laminazione sugli affluenti del Fiume Po” Attività 4 – Analisi sismica a cura di F. Pergalani e M. Compagnoni – Politecnico di Milano (2008)⁷. La stratigrafia utilizzata in tale studio è

⁷ Studio realizzato nell'ambito degli “Interventi di competenza statale in materia di riduzione del rischio sismico” Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri N. 3376/04

riportata nella seguente in Fig. 39. Tale stratigrafia costituisce anche il riferimento per la definizione della Vs nei diversi orizzonti.

Considerato che i dati effettivamente misurati sono quelli fino a 50 m, mentre gli altri sono stimati, e che il banco ghiaioso-sabbioso tra 29 e 50m è molto consistente, si è scelto di posizionare il bedrock alla base dello stesso.

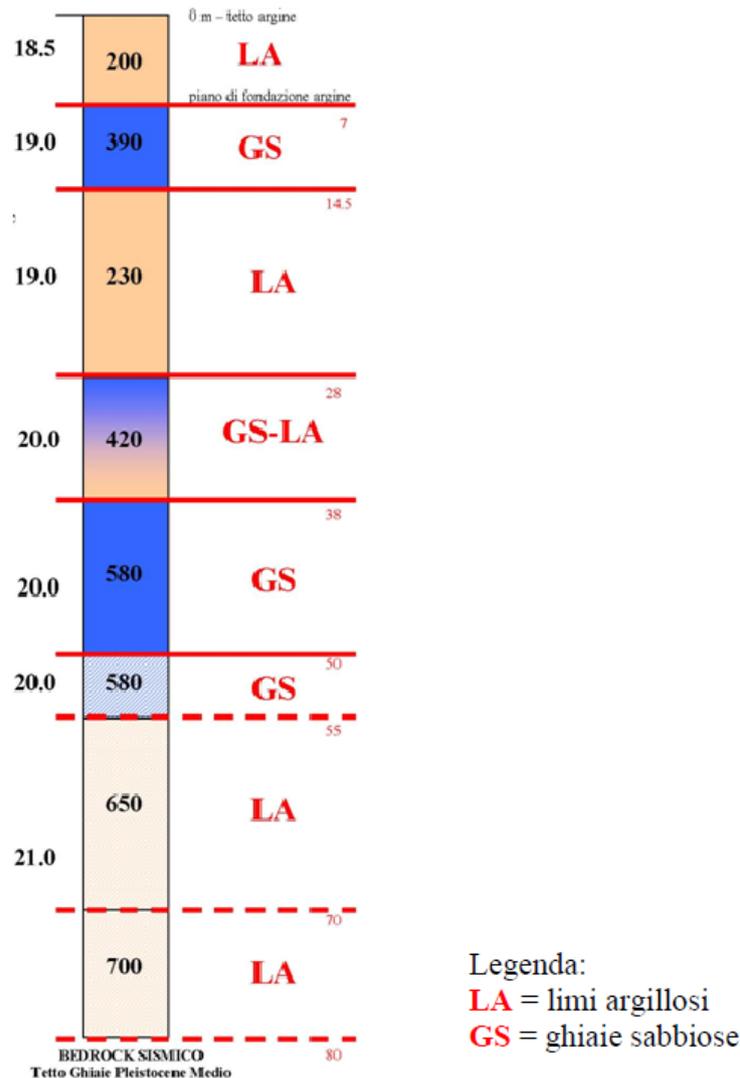


Fig. 39 - Profilo stratigrafico e geofisico di riferimento nelle analisi di RSL per la cassa di espansione sul F. Secchia (da Pergalani e Compagnoni, 2008). A sinistra della colonna stratigrafica sono indicati i valori del peso di volume (in kN/m³), all'interno i valori di VS (in m/s) e in corrispondenza dei contatti stratigrafici le profondità dal p.c. (in m)

5.2.1.2 Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G) in funzione della deformazione

Per lo studio della risposta sismica sono stati utilizzati i dati di curve da letteratura relative a depositi limoso-argillosi e ghiaiosi.

La scelta di tali curve (Vucetic & Dobry e Rollins) si è basata sulle caratteristiche litologiche e sulla plasticità.

Nella tabella seguente (Tab. 6) sono riportati i parametri relativi ai depositi limoso-argillosi e ghiaiosi. In Fig. 40 sono riportate le curve relative ai diversi depositi.

Litologia	α	β	η	λ
Ghiaia (Rollins)	17.02	0.85	18.75	2.28
Limi argillosi e argille (Vucetic & Dobry PI 15)	9.52	0.82	25.96	2.32

Tab. 6 – Parametri caratteristici delle curve utilizzate⁸

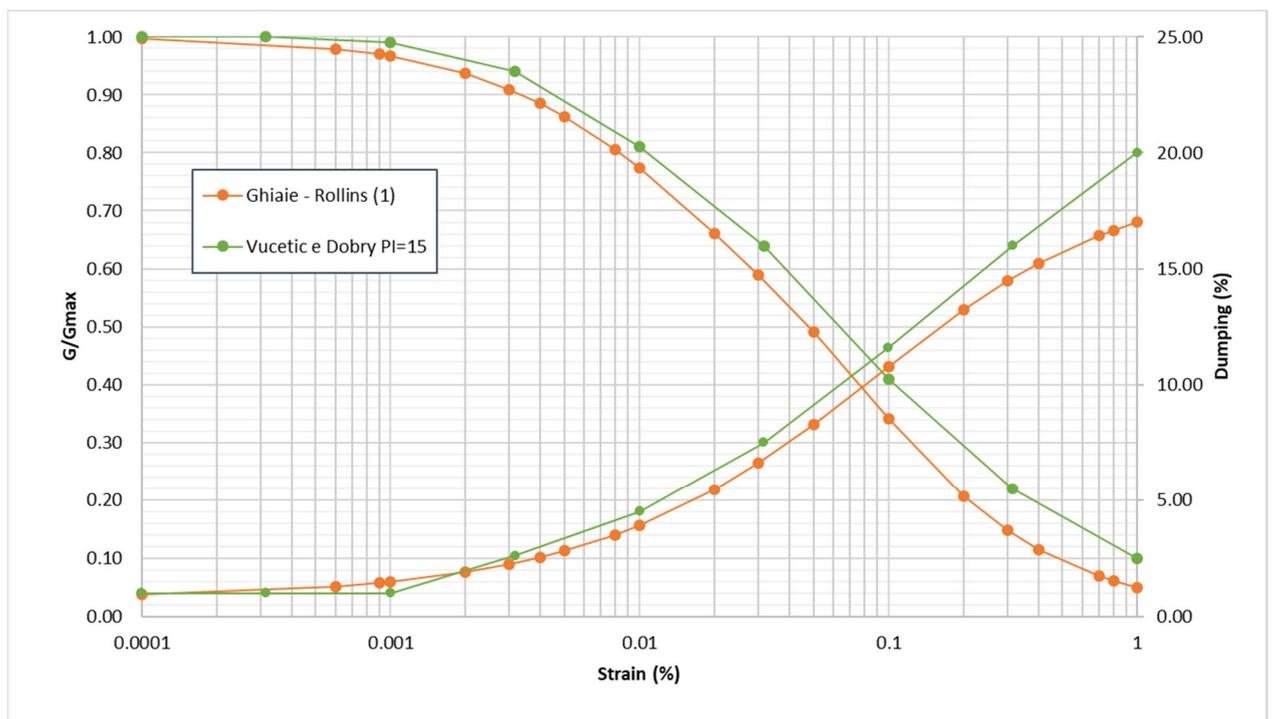


Fig. 40 – Grafico delle curve di G/G_0 e D per tutti i terreni

⁸ Parametri riferiti al modello iperbolico di Yokota (1981), cfr. § 5.3.1.3

5.2.2 Descrizione del modello

Sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche e geofisiche dei terreni descritte in precedenza è stato costruito il modello nel programma LSR2D, la cui rappresentazione è riportata in Fig. 41.

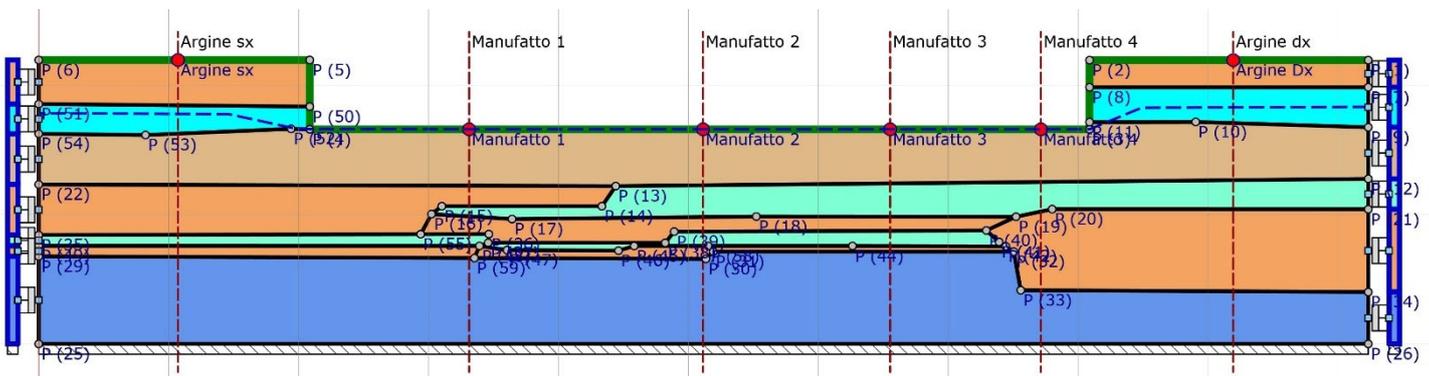


Fig. 41 – Modello sismostratigrafico

Di seguito si riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

Strato	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
Argine sx	1850.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Argine Dx	1850.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Ghiaie 1 dx	2000.00	390.00	0.35	Rollins
Ghiaie 1 sx	2000.00	390.00	0.35	Rollins
Limi e argille 1	1850.00	230.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Ghiaie 2	2000.00	410.00	0.35	Rollins
limi e argille 2	1850.00	300.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
limi e argille 2a	1850.00	300.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
limi e argille 2e	1850.00	300.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
limi e argille 2d	1850.00	300.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
limi e argille 2c	1850.00	300.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
limi e argille 2b	1850.00	300.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
ghiaie 3	2000.00	410.00	0.35	Rollins
ghiaie 3b	1800.00	410.00	0.35	Rollins
ghiaie 4	2100.00	580.00	0.35	Rollins

Tab. 7 - Caratteristiche meccaniche strati.

dove:

- ρ = densità di massa del singolo strato;
- V_s = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato;
- γ = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato;

Il modello FEM viene ottenuto mediante una discretizzazione con elementi finiti piani a tre nodi del dominio (maglia triangolare). Il passo della mesh adottato è stato di soli 2 m, per poter meglio conformarsi alla complessa stratigrafia (Fig. 42).

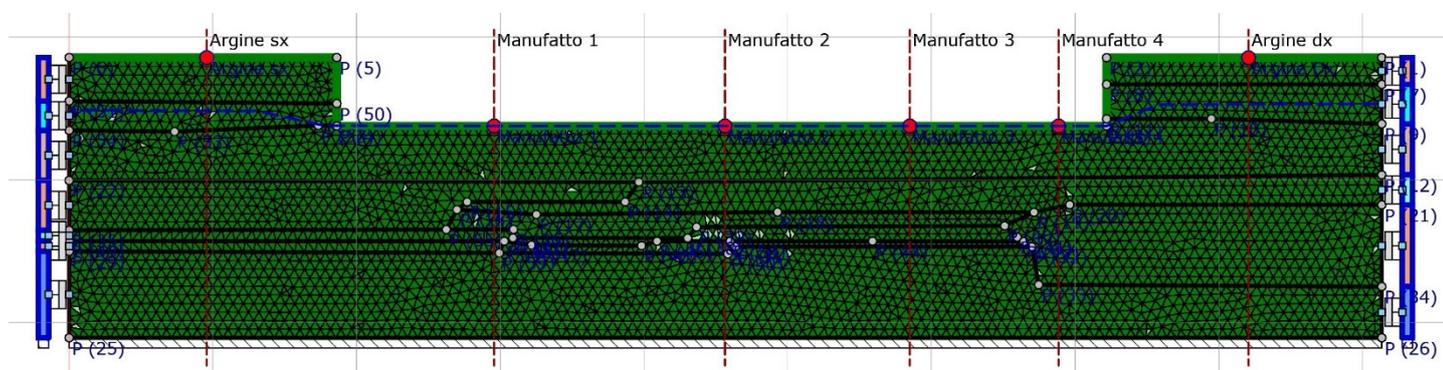


Fig. 42 – Mesh di calcolo per il manufatto regolatore

Vista la complessità del modello, la risposta sismica locale è stata valutata per 6 diversi punti ritenuti significativi ai fini ingegneristici, la cui ubicazione è riportata in Fig. 41 e Fig. 42. Due punti corrispondono alla sommità arginale destra e sinistra (Argine Dx e Sx), mentre 4 punti corrispondono alla fondazione del manufatto (manufatto 1, 2, 3, e 4).

Le analisi della risposta sismica locale sono state effettuate per 2 stati limite, lo Stato Limite per la salvaguardia della vita (SLV) e Stato Limite di Danno (SLD). Per ognuno di questi, nei paragrafi successivi, verranno riportati i risultati ottenuti.

5.2.3 Azioni sismiche in ingresso

Una volta definite le caratteristiche sismogenetiche del sito, per la scelta degli accelerogrammi naturali di riferimento si è utilizzato il programma REXEL⁹, che consente di individuare un numero a scelta di accelerogrammi spettro compatibili con il sito di riferimento.

Sebbene le NTC2018 non forniscano indicazioni per quanto riguarda il numero di accelerogrammi da utilizzare per la RSL, le indicazioni fornite per le analisi dinamiche con integrazione al passo (Cap. 7.3.5 delle NTC) indicano di utilizzare almeno 7 accelerogrammi; approccio adottato nel presente studio.

La ricerca è stata fatta mediante REXEL nel database European Strong-Motion Data¹⁰.

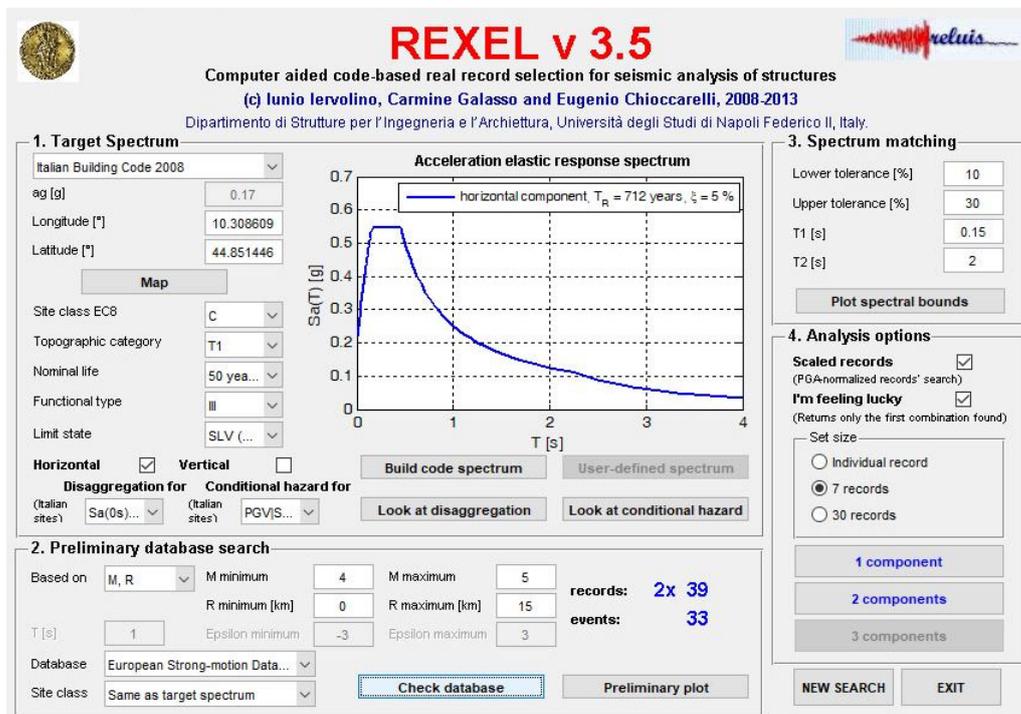


Fig. 43 – Schermata di impostazione della ricerca dei sismi con REXEL per lo stato limite SLV

⁹ Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E. (2010) "REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis". Bulletin of Earthquake Engineering, 8:339-362, 2010 DOI 10.1007/s10518-009-9146-1

¹⁰ Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P. and Margaris, B. (2002) "Internet-Site for European Strong-Motion Data", European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme

Lo studio di risposta sismica locale è stato effettuato analizzando la risposta in due stati limite: lo Stato Limite di Danno (SLD) e lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV). Rexel, sulla base delle coordinate del sito, la classe d'uso e la vita nominale dell'opera (paragrafo 1.2), nonché dei dati di magnitudo e distanza ottenuti dalla disaggregazione (paragrafo 4.4), ha fornito i sismi caratteristici per entrambi gli stati limite (Tab. 8 – SLV e Tab. 9 – SLD):

Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance [km]	PGA_X [m/s ²]	PGA_Y [m/s ²]
4674	1635	ST2486	South Iceland	17/06/2000	6.5	strike slip	5	3.1176	3.3109
4674	1635	ST2486	South Iceland	17/06/2000	6.5	strike slip	5	3.1176	3.3109
473	228	ST40	Vrancea	31/05/1990	6.3	thrust	7	0.1917	0.0863
592	286	ST221	Umbria Marche	26/09/1997	6	normal	5	1.951	2.1834
230	108	ST73	Montenegro (aftershock)	24/05/1979	6.2	thrust	8	1.1723	2.6239
879	349	ST271	Dinar	01/10/1995	6.4	normal	8	2.6739	3.1306
230	108	ST73	Montenegro (aftershock)	24/05/1979	6.2	thrust	8	1.1723	2.6239

Tab. 8 – Identificazione dei terremoti di riferimento estratti mediante Rexel – SLV

Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance [km]	PGA_X [m/s ²]	PGA_Y [m/s ²]
772	350	ST223	Umbria Marche (aftershock)	03/10/1997	5.3	normal	20	0.5673	0.405
600	286	ST223	Umbria Marche	26/09/1997	6	normal	22	1.6852	1.0406
600	286	ST223	Umbria Marche	26/09/1997	6	normal	22	1.6852	1.0406
602	286	ST224	Umbria Marche	26/09/1997	6	normal	27	1.1441	1.0666
1415	251	ST724	Pulumur	15/03/1992	5.2	strike slip	26	1.125	0.5746
386	176	ST152	Lazio Abruzzo (aftershock)	11/05/1984	5.5	normal	24	0.3654	0.3309
6975	473	ST3272	Izmit (aftershock)	13/09/1999	5.8	oblique	26	0.6464	0.512

Tab. 9 - Identificazione dei terremoti di riferimento estratti mediante Rexel - SLD

I sismi ottenuti dal software Rexel sono stati scalati in accelerazione dal programma LSR 2D, partendo dai dati di sito, per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto dalle NTC.

La verifica della spetto compatibilità, riportata a titolo di esempio per lo stato limite SLV, dei 7 accelerogrammi utilizzati è visualizzabile in Fig. 44.

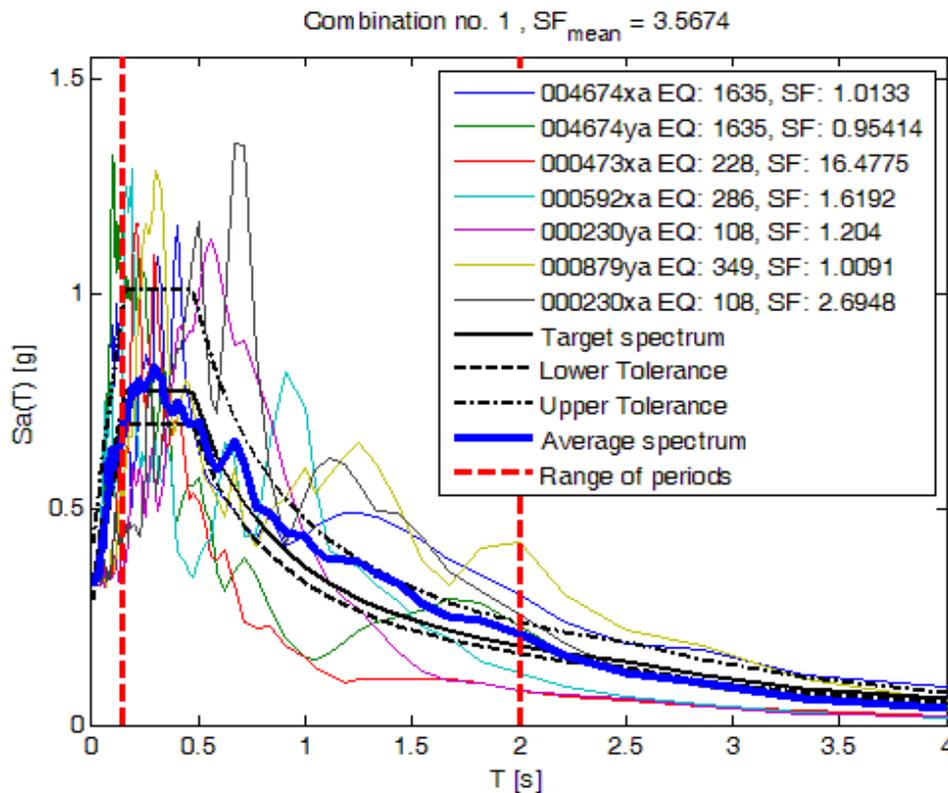


Fig. 44 – Dimostrazione della spettro-compatibilità degli accelerogrammi selezionati per lo stato limite SLV

5.2.4 Analisi dei risultati

I risultati delle modellazioni effettuate sono state espresse, per i 6 punti di controllo, in termini di:

- ✓ Serie temporali in accelerazione;
- ✓ Profilo della PGA in funzione della profondità;
- ✓ Spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione in superficie.

5.2.4.1 Serie temporali

Le serie temporali in accelerazione (accelerogrammi) in output costituiscono la modifica dei segnali originali in input in funzione delle caratteristiche del terreno.

Nelle 12 figure seguenti vengono riportati i grafici degli accelerogrammi; ciascuna

figura rappresenta tutti gli accelerogrammi restituiti per ciascun punto di controllo, nelle Fig. 45 - Fig. 50 sono rappresentati i sismi in condizioni SLV, mentre nelle Fig. 51- Fig. 56 sono rappresentati i sismi in condizioni SLD. Tutti i dati sono stati forniti ai Progettisti anche in forma tabellare.

Va chiarito che sebbene gli accelerogrammi di input fossero 7, sia nelle condizioni SLV che SLD, per uno degli accelerogrammi il programma non è riuscito a giungere a convergenza nel processo iterativo (cfr. § 5.1.3), quindi tutti i report interessano esclusivamente 6 serie temporali.

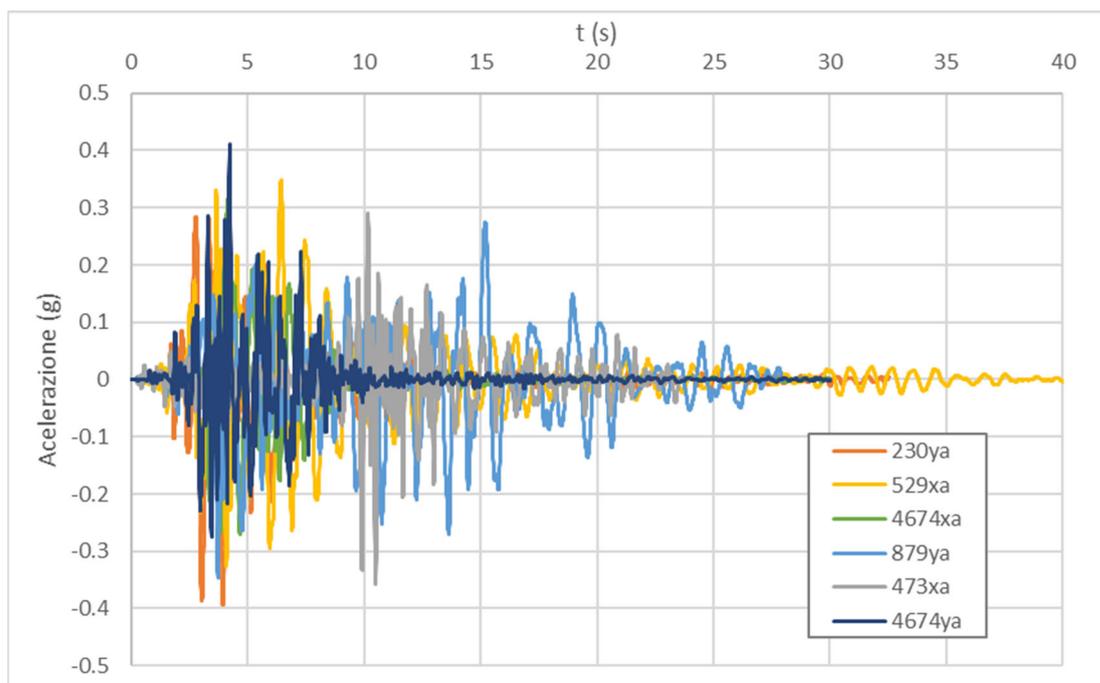


Fig. 45 - Serie temporali di output punto di controllo Argine Sx - SLV

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

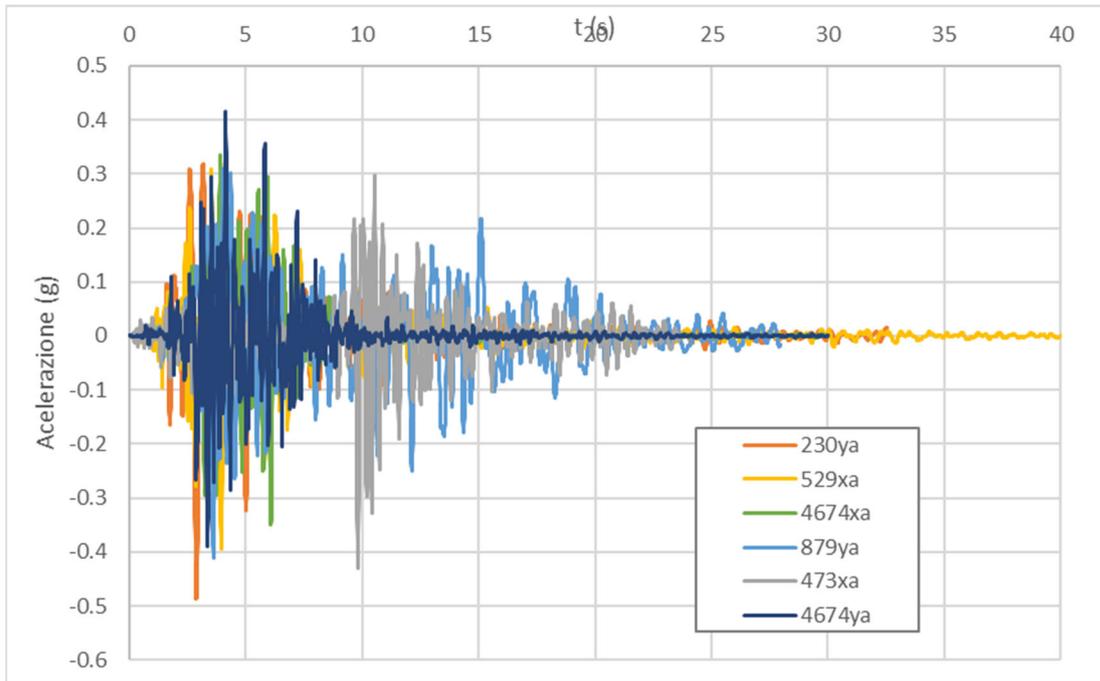


Fig. 46 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 1 - SLV

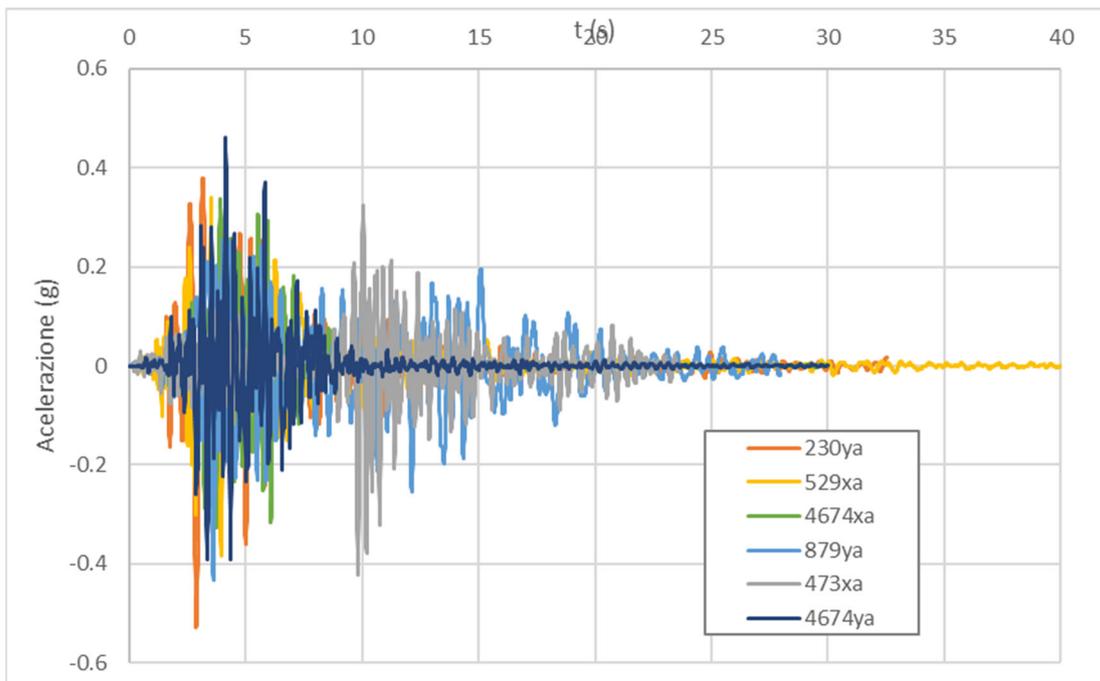


Fig. 47 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 2 - SLV

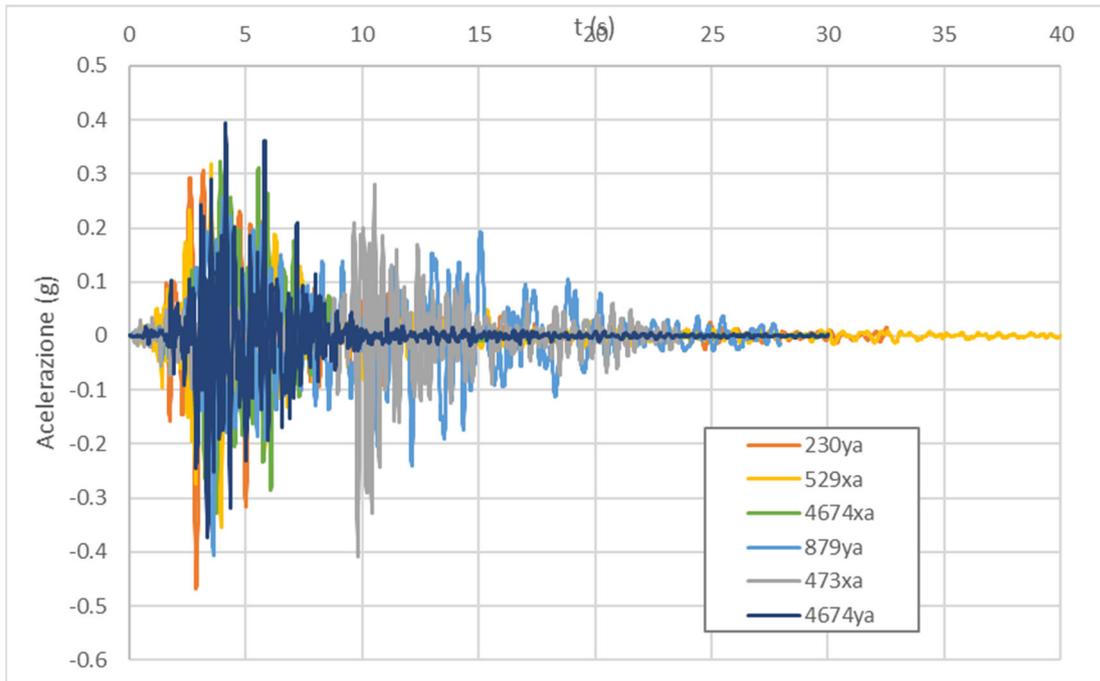


Fig. 48 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 3 - SLV

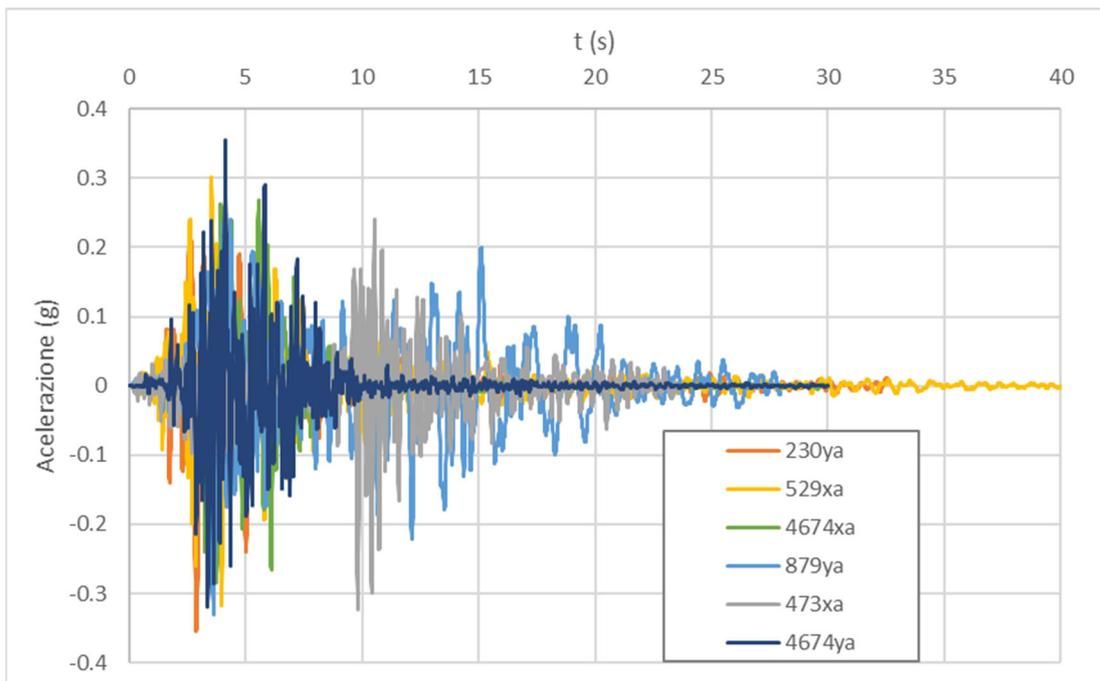


Fig. 49 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 4 - SLV

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

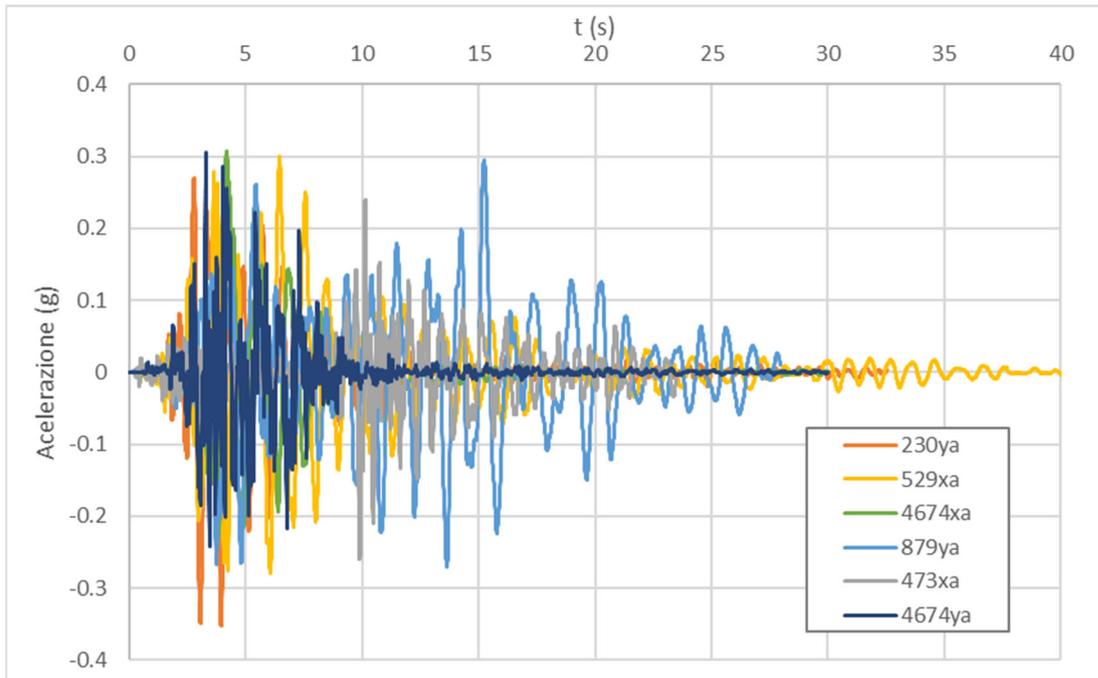


Fig. 50 - Serie temporali di output punto di controllo Argine dx - SLV

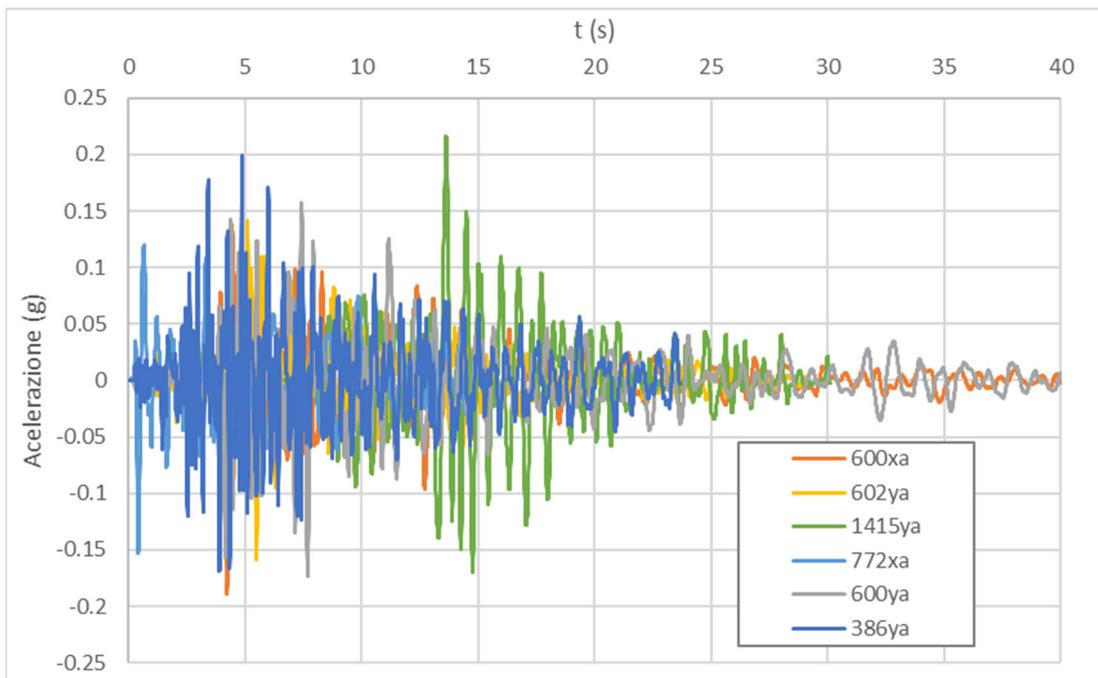


Fig. 51 - Serie temporali di output punto di controllo Argine Sx - SLD

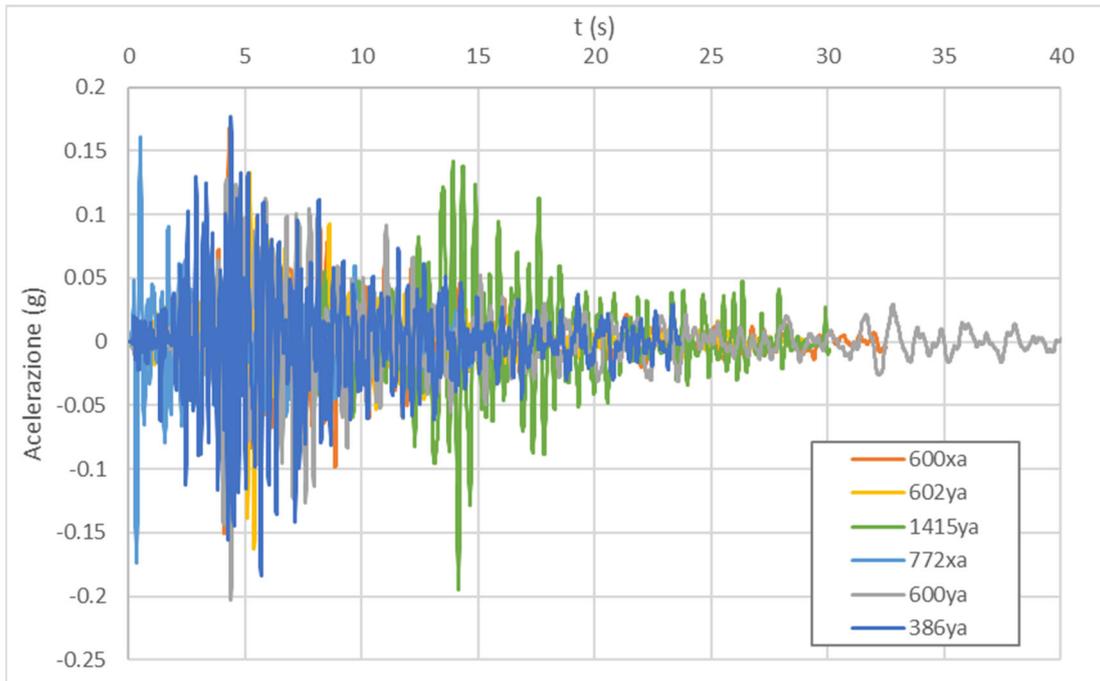


Fig. 52 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 1 - SLD

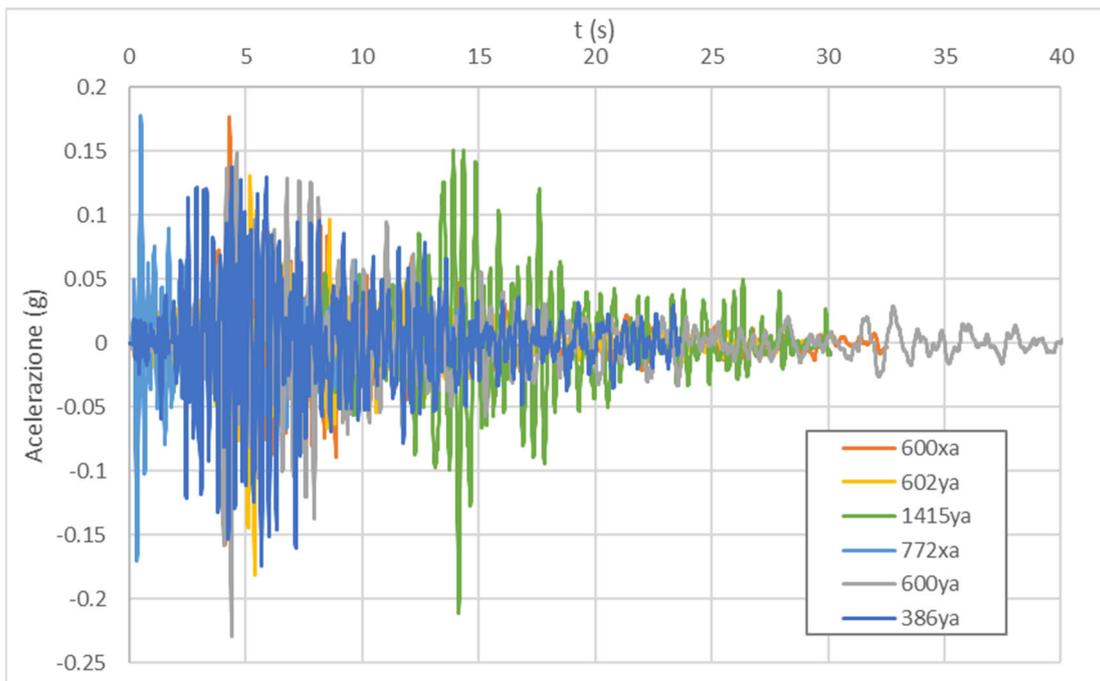


Fig. 53 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 2 - SLD

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

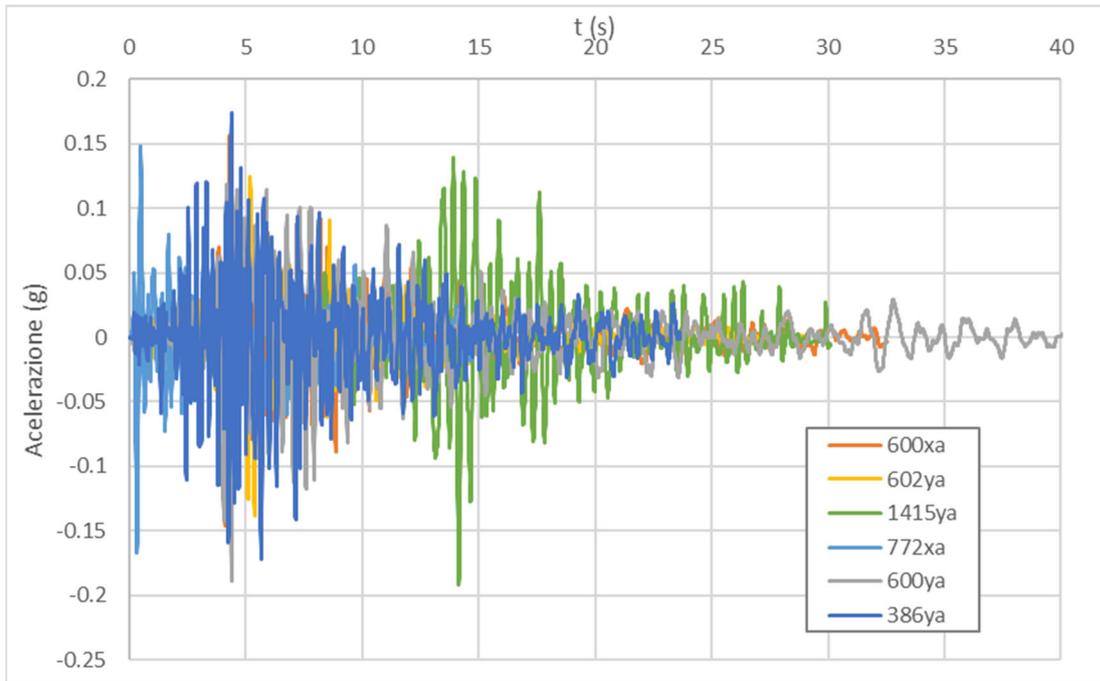


Fig. 54 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 3 - SLD

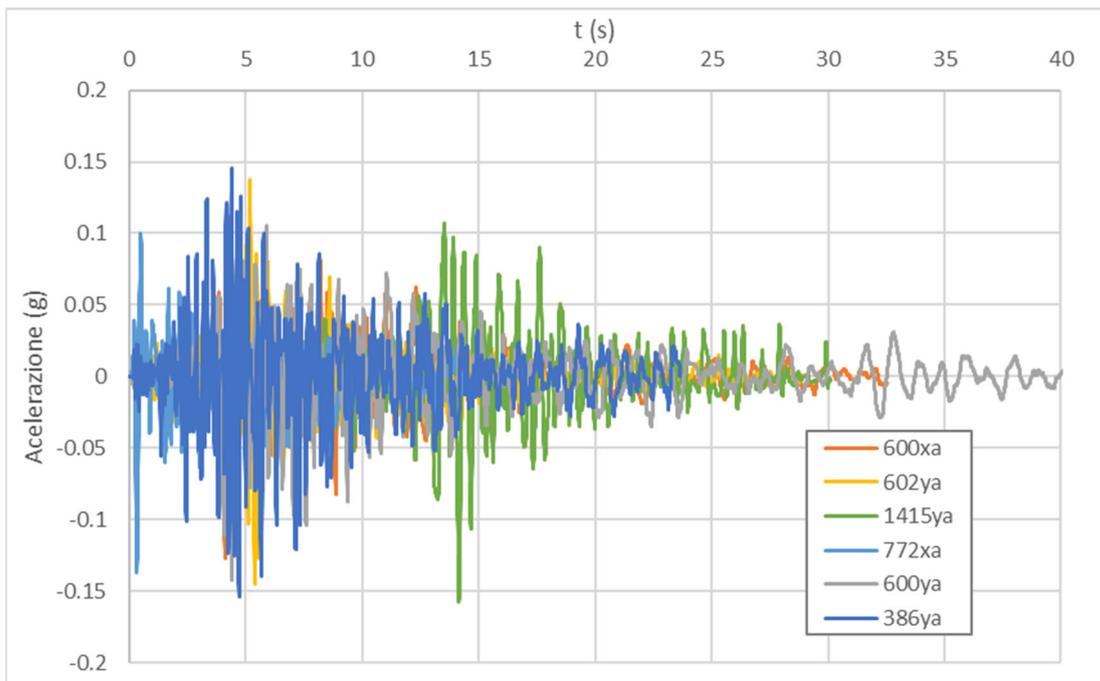


Fig. 55 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 4 - SLD

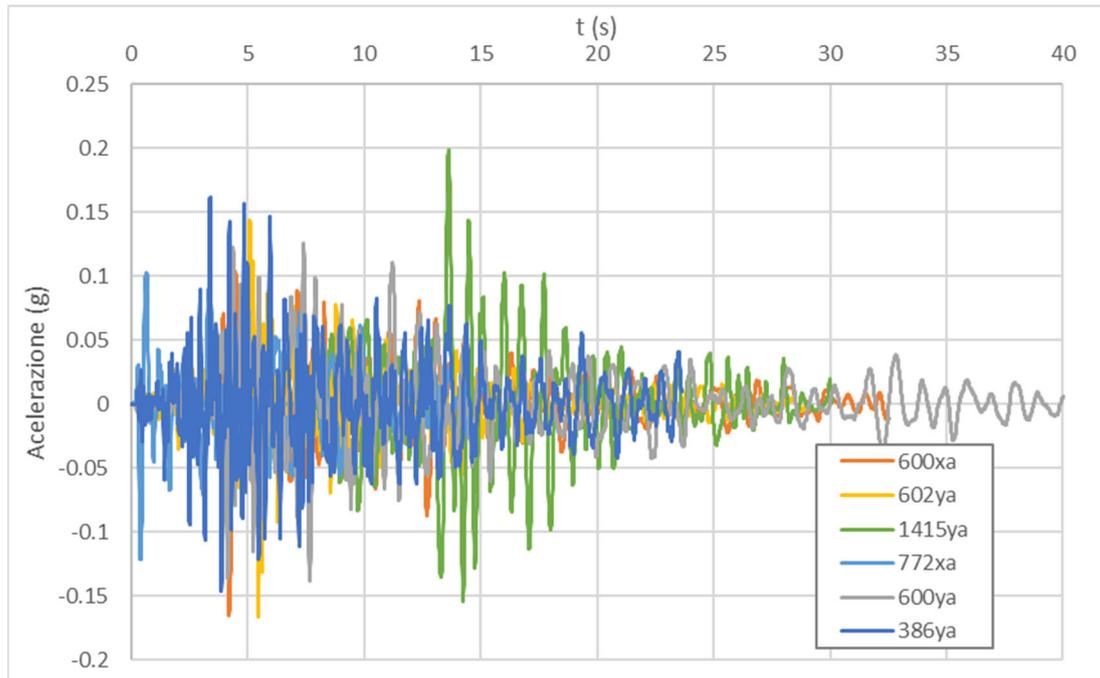


Fig. 56 - Serie temporali di output punto di controllo Argine dx - SLD

5.2.4.2 Profilo della PGA in funzione della profondità

La variazione della PGA all'interno del modello è sintetizzata in Fig. 57 nella condizione SLV ed in Fig. 58 per la condizione SLD. Tali grafici sono stati ottenuti mediando i valori di PGA per ciascuna serie temporale in funzione della profondità.

Per verificare l'andamento della PGA con la profondità lungo le verticali dei diversi punti di controllo sono stati realizzati i grafici di Fig. 59 e Fig. 60, rispettivamente per SLV e SLD. Come si può constatare il valore massimo della PGA in superficie è pari a circa 5.12 m/s^2 , per il punto di controllo "Manufatto 2" per lo SLD, mentre per quanto riguarda lo SLD, il valore massimo della PGA in superficie, sempre nello stesso punto di controllo è pari a 2.18 m/s^2 .

Ciò che è interessante, è l'andamento dell'accelerazione. In entrambi i casi l'andamento risulta molto simile e tende a diminuire con la profondità. Un importante discontinuità è presente a quota 25 m s.l.m. circa, in corrispondenza del primo importante banco ghiaioso.

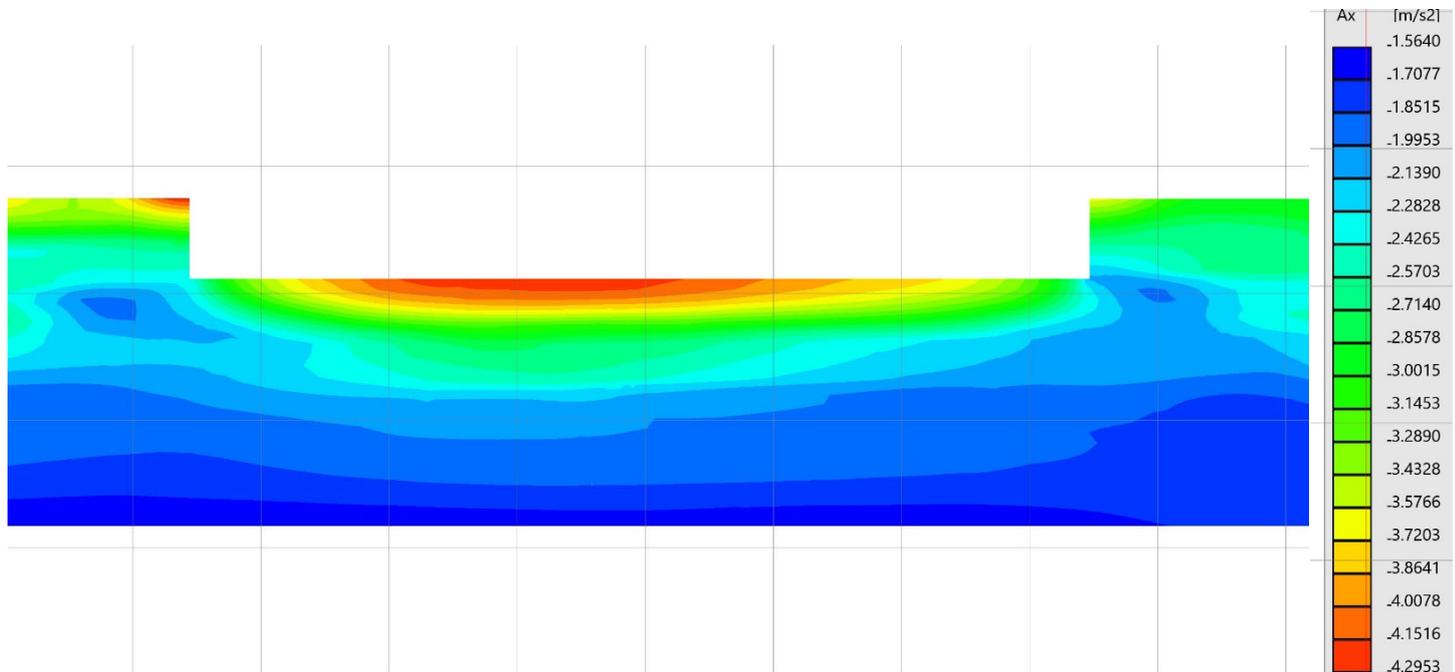


Fig. 57 – Distribuzione delle accelerazioni nel modello in condizioni SLV

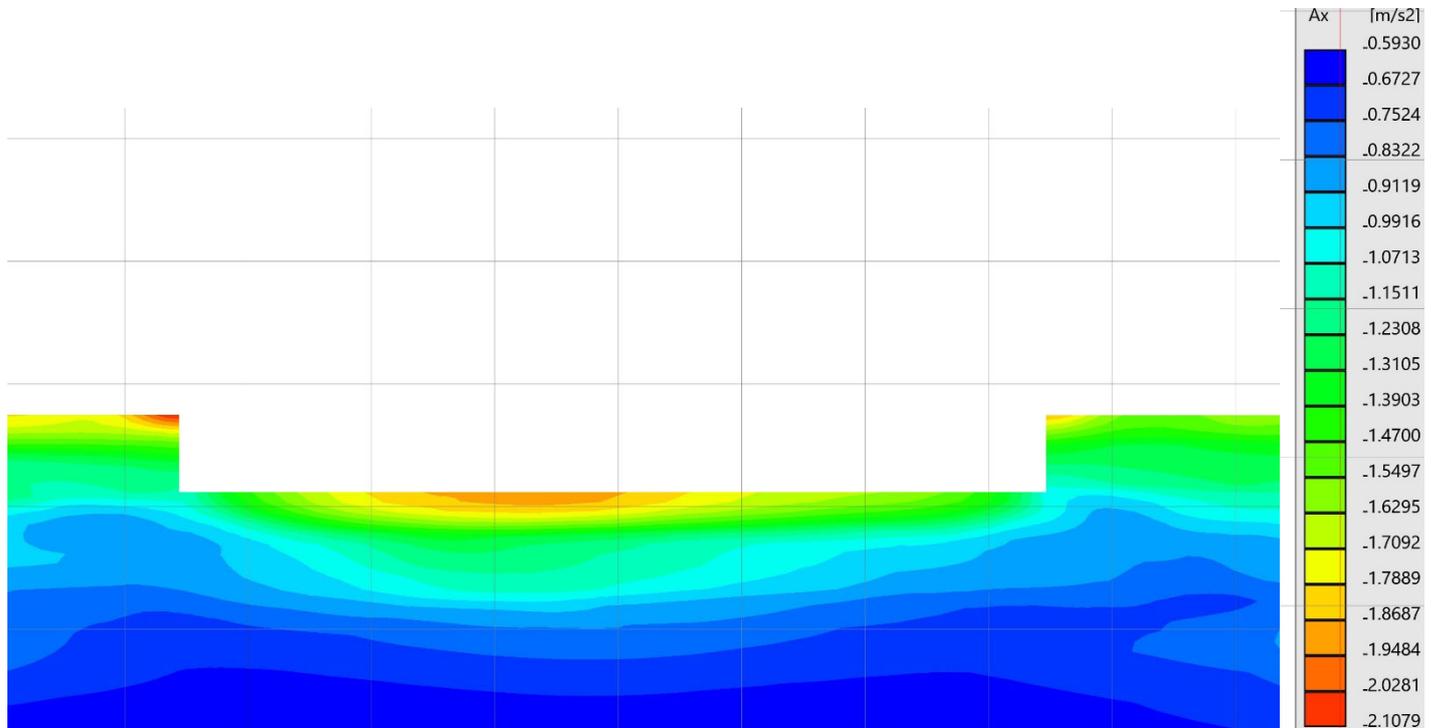


Fig. 58 – Distribuzione delle accelerazioni nel modello in condizioni SLD

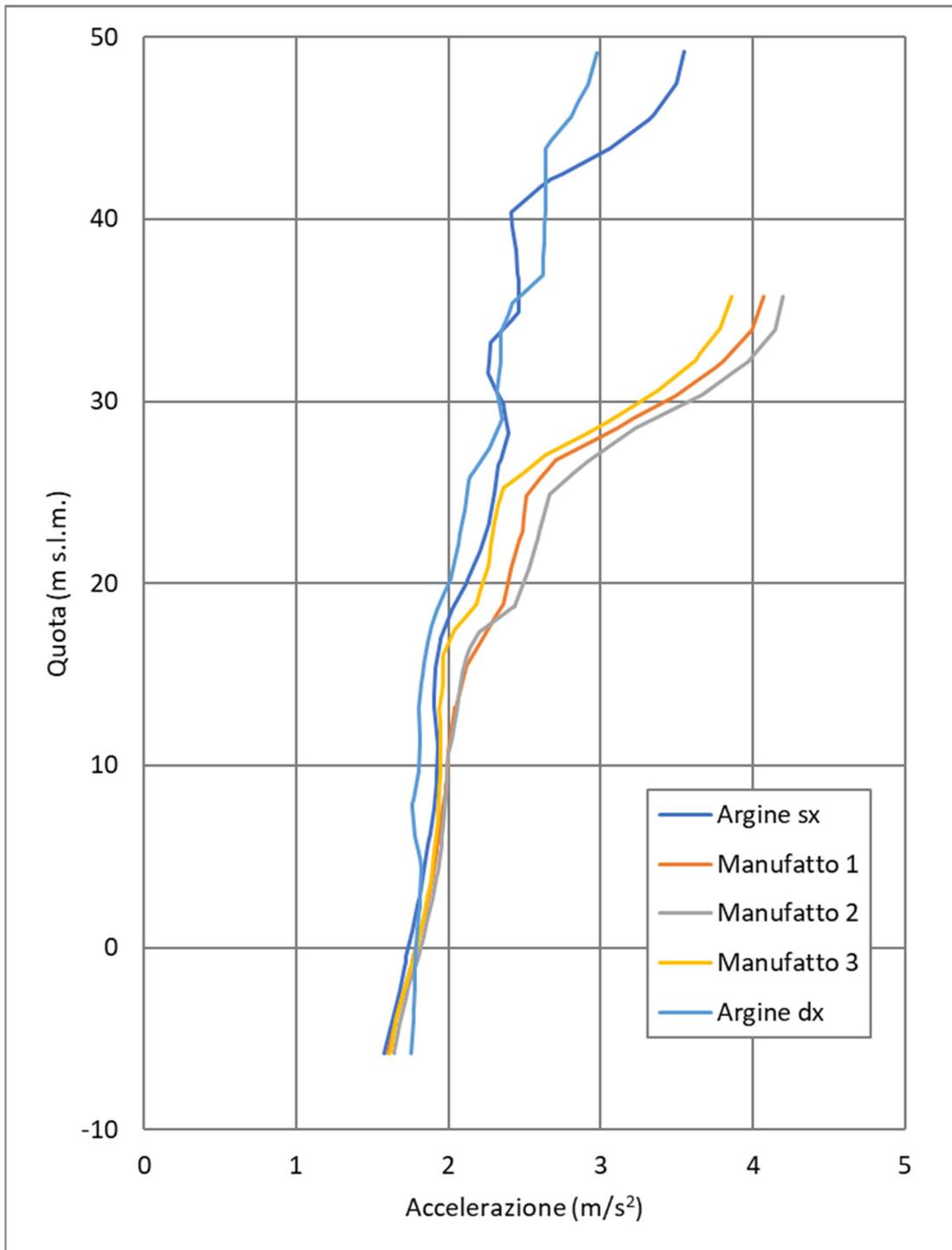


Fig. 59 – Distribuzione delle accelerazioni lungo la verticale dei punti di controllo in condizioni SLV

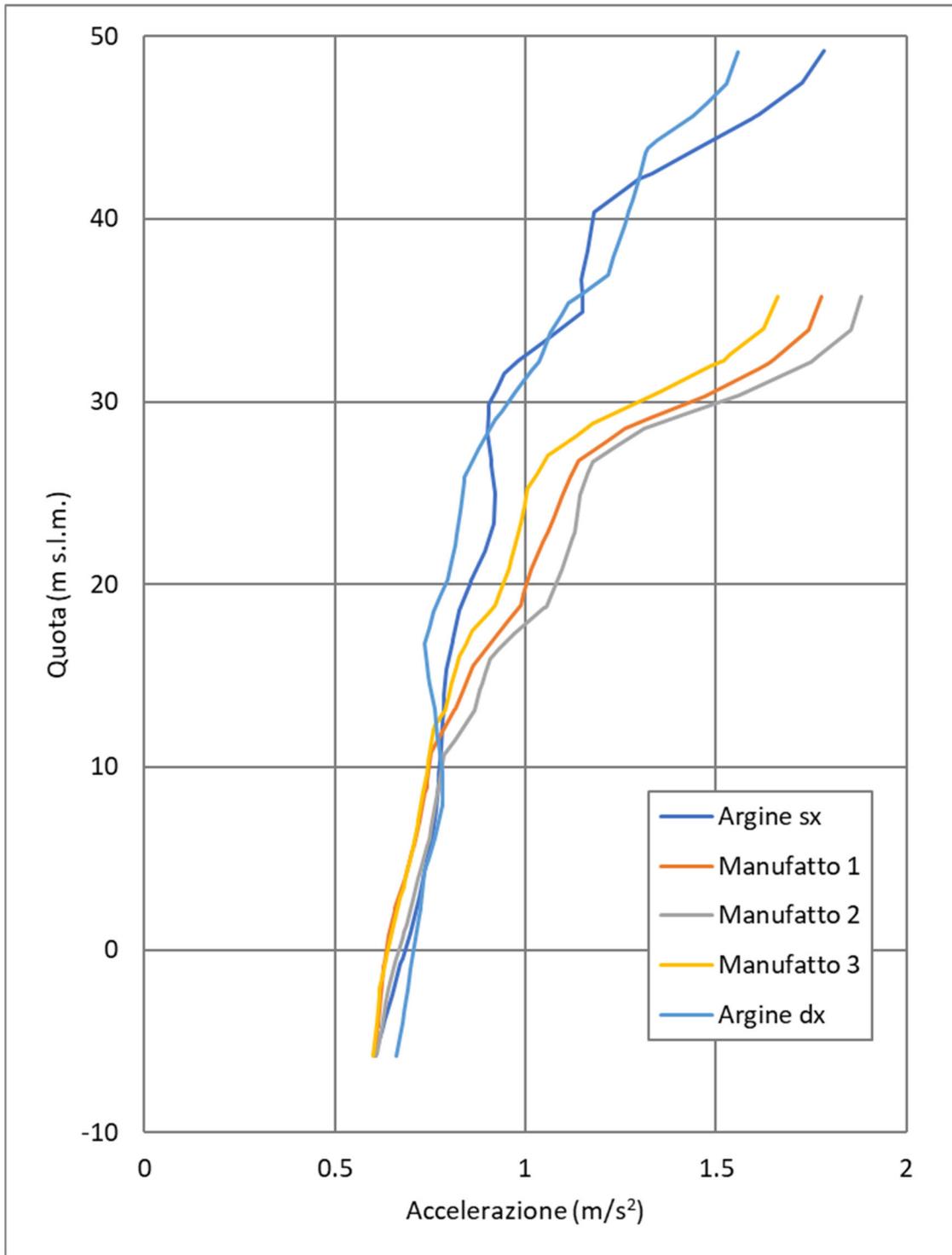


Fig. 60 – Distribuzione delle accelerazioni lungo la verticale dei punti di controllo in condizioni SLD

5.2.4.3 Spettri di risposta elastici in superficie

Altri dati di notevole interesse per la progettazione sono gli spettri di risposta elastici in pseudoaccelerazione, ricavati per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ del 5%.

Anche in questo caso gli spettri di risposta sono stati calcolati in corrispondenza dei punti di controllo indicati nel Cap. 5.2.2. Per ciascun punto di controllo lo spettro di risposta è ottenuto come media degli spettri dei singoli accelerogrammi, come illustrato, a titolo esemplificativo, in Fig. 61 per il punto “Manufatto 3” allo SLV, in cui sono rappresentati tutti i segnali utilizzati, indicati in grigio, oltre alla curva rappresentante il valore medio indicata in rosso.

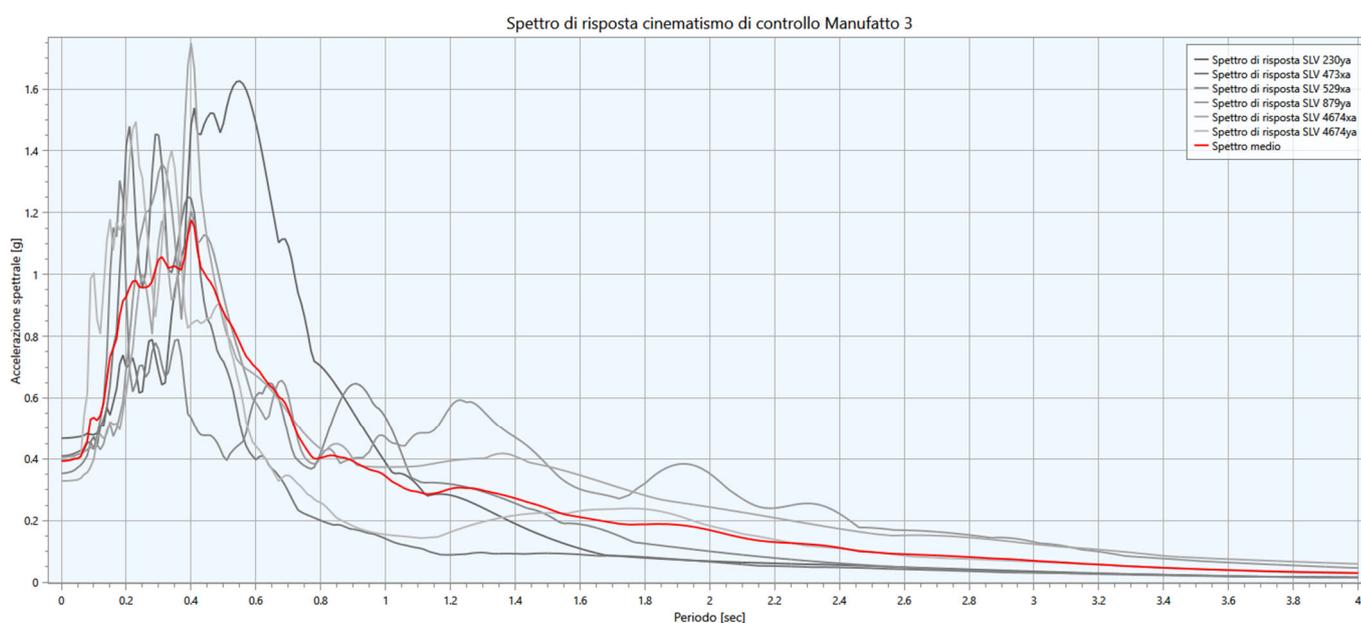


Fig. 61 – Spettri di risposta elastici in accelerazione – SLV

In Fig. 62 viene invece presentata la sovrapposizione dei valori medi degli spettri derivanti dall'analisi di risposta sismica locale 2D nei 6 punti di controllo analizzati e lo spettro semplificato da normativa per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita. Il confronto è effettuato con lo spettro calcolato per tempi di ritorno di 1424 anni per la

classe di sottosuolo C, che rappresenta lo spettro di riferimento del sito oggetto di studio in caso di analisi semplificata.

Come si può constatare lo spettro semplificato di classe C appare sempre troppo poco cautelativo.

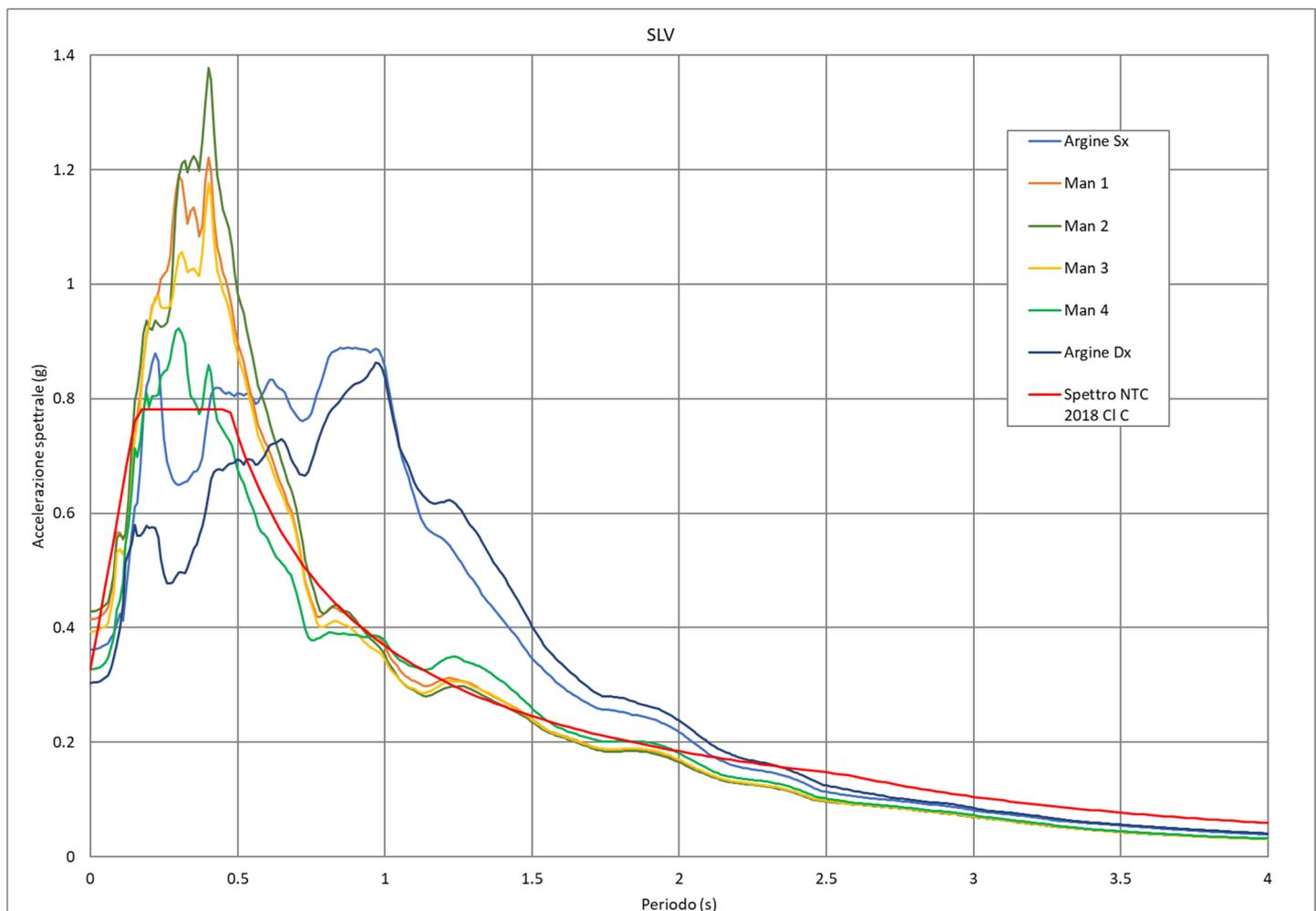


Fig. 62 – Valori medi dello spettro elastico di risposta in accelerazione per i 3 punti di controllo analizzati confrontati con lo spettro semplificato di normativa C calcolato per $T_r=1424$ anni - SLV

In Fig. 63 è invece rappresentata la sovrapposizione tra i valori medi degli spettri derivanti dall'analisi di risposta sismica locale 2D, sempre relativi ai 6 punti di

controllo analizzati, e lo spettro semplificato da normativa per lo Stato Limite di Danno. In particolare, il confronto è effettuato con lo spettro calcolato per tempi di ritorno di 151 anni per la classe di sottosuolo C (che rappresenta lo spettro di riferimento del sito oggetto di studio) in caso di analisi semplificata.

Come si può notare, esattamente come per lo spettro SLV, lo spettro semplificato appare sempre troppo poco cautelativo.

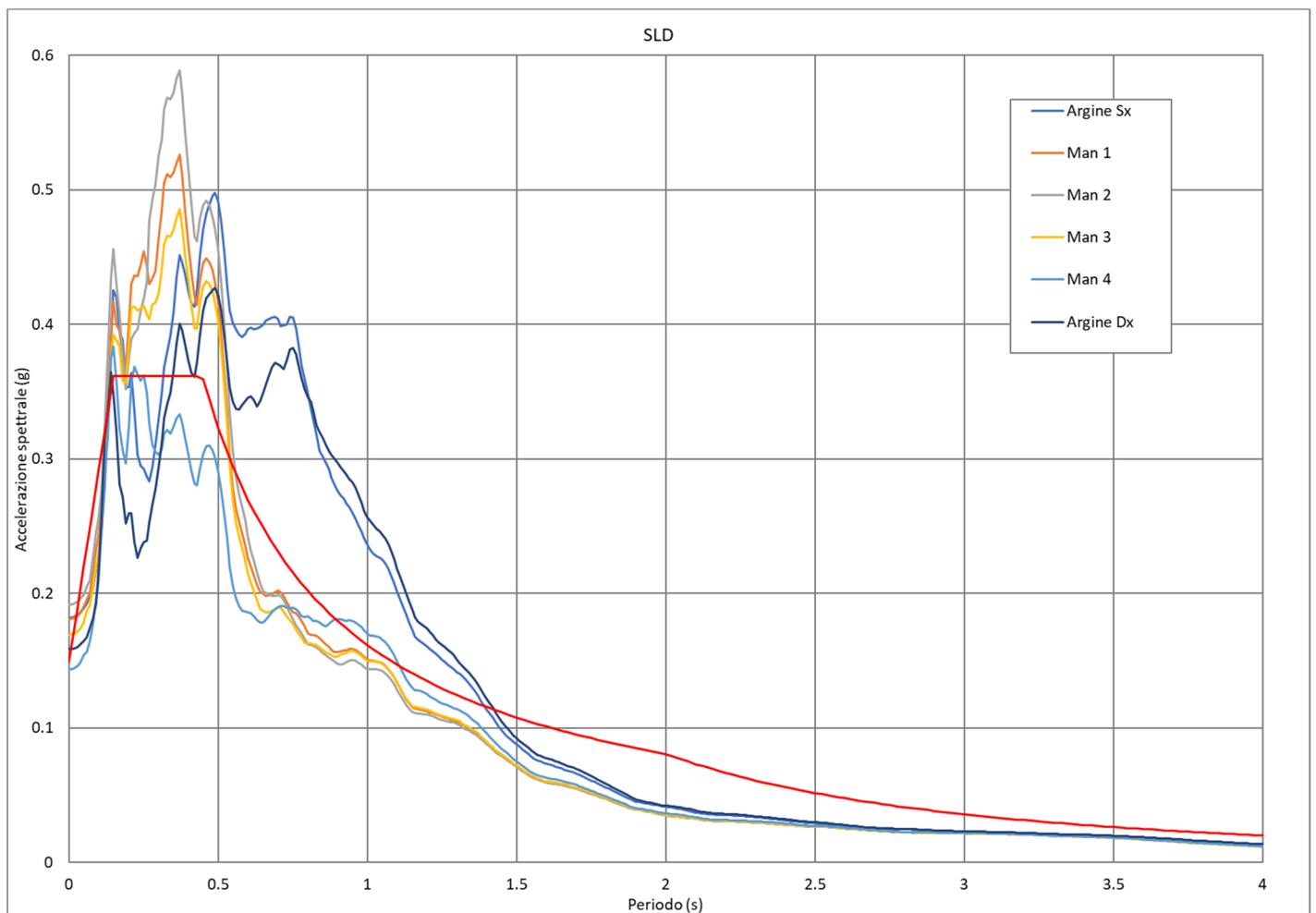


Fig. 63 – Valori medi dello spettro elastico di risposta in accelerazione per i 3 punti di controllo analizzati confrontati con lo spettro semplificato di normativa C calcolato per $T_r=151$ anni - SLD

5.3 Manufatto sfioratore

Di seguito viene illustrato lo studio di risposta sismica locale per l'Intervento B: Adeguamento del manufatto di derivazione nell'invaso laterale.

Per le considerazioni di carattere descrittivo dei metodi si rimanda al capitolo precedente

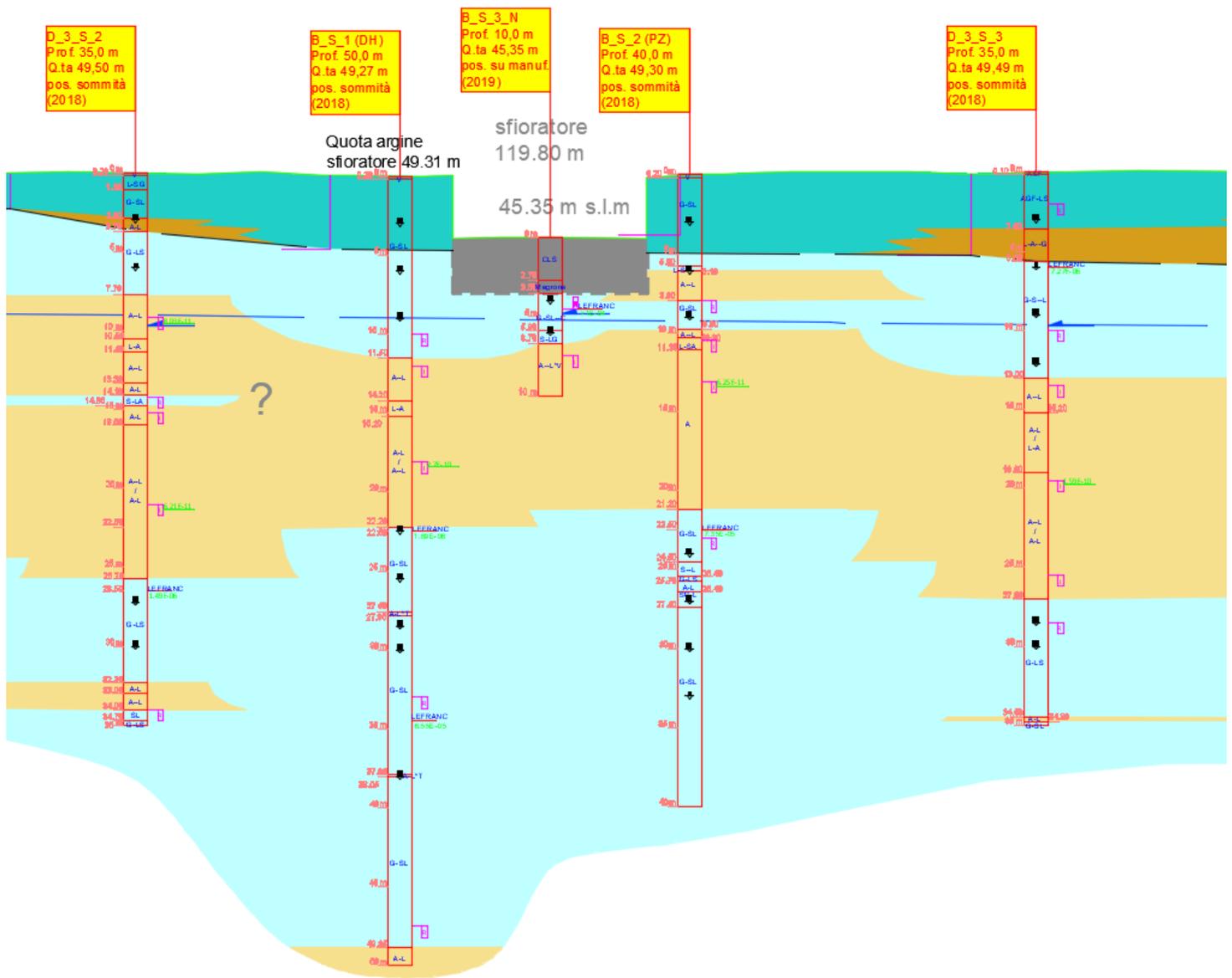
5.3.1 Modello geofisico del sottosuolo

5.3.1.1 Litologia,

Per la determinazione delle caratteristiche del profilo litologico su cui effettuare l'analisi sono stati utilizzati i dati stratigrafici descritti nella Relazione Geologica (Elaborato R.04). Il profilo litostratigrafico utilizzato per lo studio di risposta sismica locale 2D è riportato di seguito in Fig. 64.

La stratigrafia del sito è nota sulla base di sondaggi che raggiungono la profondità di circa 50 m dalla sommità arginale.

Come si può constatare l'assetto stratigrafico ricostruito sulla base delle indagini disponibili è decisamente complesso, con notevoli alternanze di depositi coesivi e granulari (ghiaie). Nel presenta caso, tuttavia, il banco ghiaioso presente oltre i 20 m di profondità risulta molto potente e continuo.



Corpo arginale

Terreni di fondazione

-  Depositi prevalentemente argillosi a permeabilità da bassa a molto bassa
-  Depositi prevalentemente ghiaiosi e sabbiosi a permeabilità da media a elevata

-  Terreni prevalentemente limoso-argillosi a permeabilità da bassa a molto bassa
-  Terreni prevalentemente ghiaiosi e sabbiosi a permeabilità da media a elevata

Fig. 64 – Profilo litostratigrafico utilizzato

5.3.1.2 Determinazione della Vs e bedrock sismico

Per quanto riguarda la velocità delle onde S fino alla massima profondità indagata si è fatto riferimento alle misure della prova Down-Hole, per l'individuazione delle caratteristiche litologiche (profondità e spessore) e per la determinazione del *bedrock* sismico.

La definizione del *bedrock* sismico, cioè del sismostrato che presenta velocità delle onde di taglio $V_s \geq 800$ m/s, costituisce un elemento di notevole importanza nell'ambito delle valutazioni di risposta sismica locale.

In realtà oggi si tende ad individuare il *bedrock* sismico, soprattutto in pianura, in corrispondenza di un elevato contrasto di impedenza sismica, cioè laddove il rapporto tra le velocità dello strato superficiale e quello più profondo supera il valore di 2-2.5, anche se il valore di V_s non supera gli 800 m/s.

La presenza di un importante banco ghiaioso, tra le profondità di 20 e 50 m da p.c., con velocità V_s di oltre 650 m/s, misurate tramite rilievo indiretto con tecnica Down-Hole, ha indotto a valutare la possibilità che tale banco potesse rappresentare il *bedrock*.

Mediante le velocità ottenute dalla prova Down-Hole, si giunge alla discretizzazione della V_s in funzione della profondità, sinteticamente illustrata in Fig. 65.

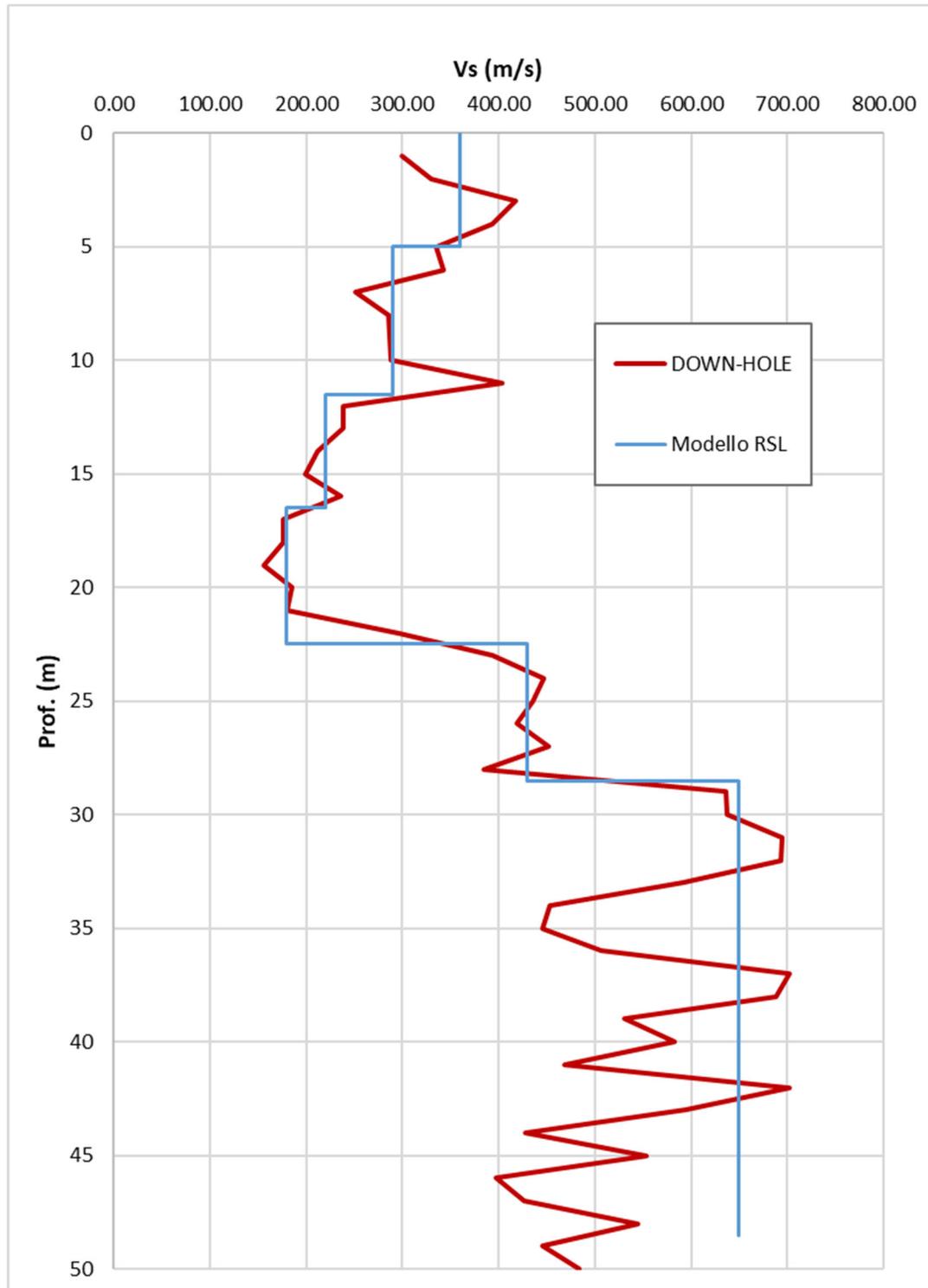


Fig. 65 - Discretizzazione della V_s per il sito in analisi

5.3.1.3 Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G) in funzione della deformazione

Per la valutazione delle curve di variazione del rapporto di smorzamento (D) e del decadimento del modulo di taglio normalizzato (rigidità, G/G_0) in funzione della deformazione di taglio γ , è stata realizzata n° 1 prova in colonna risonante (RC) sul campione (BS1SH1) prelevato durante l'esecuzione del sondaggio BS1.

Tale prova ha fornito dati sperimentali che hanno consentito di definire le leggi di variazione dei parametri D e G/G_0 mediante il modello iperbolico di Yokota (1981).

Le leggi di variazione proposte da Yokota sono le seguenti:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha\gamma^\beta}$$

$$D = \eta e^{-\lambda \frac{G}{G_0}}$$

Dove:

G/G_0 = modulo di taglio normalizzato

D = rapporto di smorzamento

γ = deformazione di taglio

$\alpha, \beta, \eta, \lambda$ = parametri sperimentali del modello

Il fit dei dati sperimentali alle funzioni sopra descritte è stato effettuato con il metodo dei minimi quadrati (X^2).

In Fig. 66 è riportato un grafico esemplificativo della procedura di normalizzazione utilizzata per il campione BS1SH1.

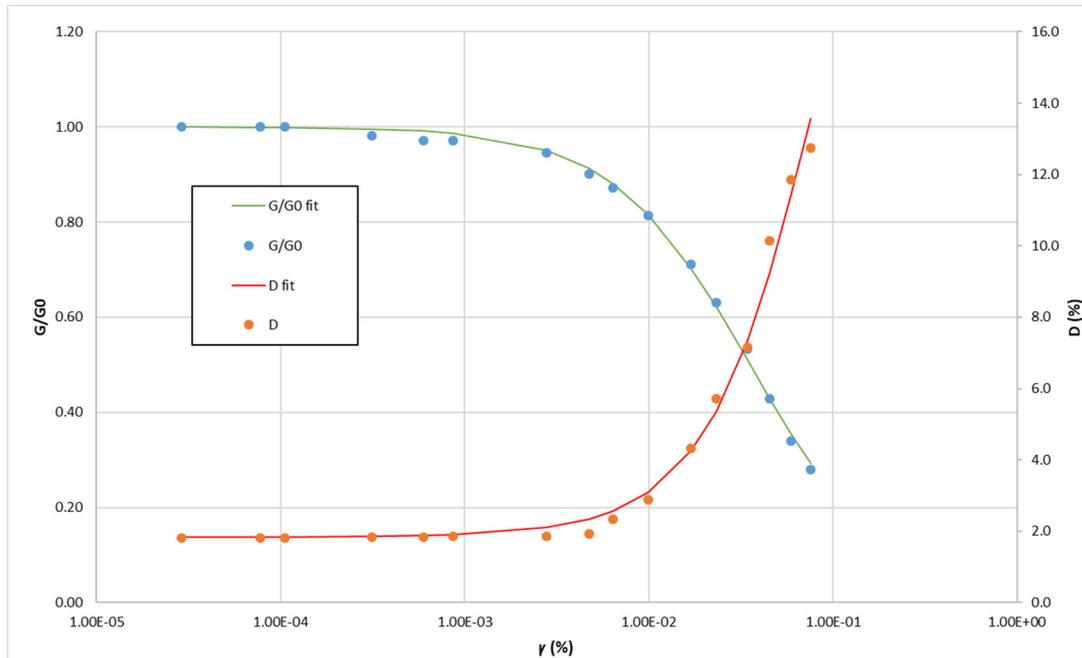


Fig. 66 – Grafico dei dati sperimentali e delle curve di interpolazione per il campione BS1SH1

Oltre ai dati del campione BS1SH1 sono stati utilizzati i dati di curve da letteratura relative a depositi limoso-argillosi e ghiaiosi.

La scelta di tali curve (Vucetic & Dobry e Rollins) si è basata sulle caratteristiche litologiche e sulla plasticità.

Nella tabella seguente (Tab. 6) sono riportati i parametri relativi alle curve. In Fig. 40 sono riportate le curve relative.

Litologia	α	β	η	λ
Ghiaia (Rollins)	17.02	0.85	18.75	2.28
Argille (Vucetic & Dobry PI 15)	9.52	0.82	25.96	2.32
Limo con argilla (BS1SH1)	49.07	1.17	31.10	2.83

Tab. 10 – Parametri caratteristici delle curve utilizzate

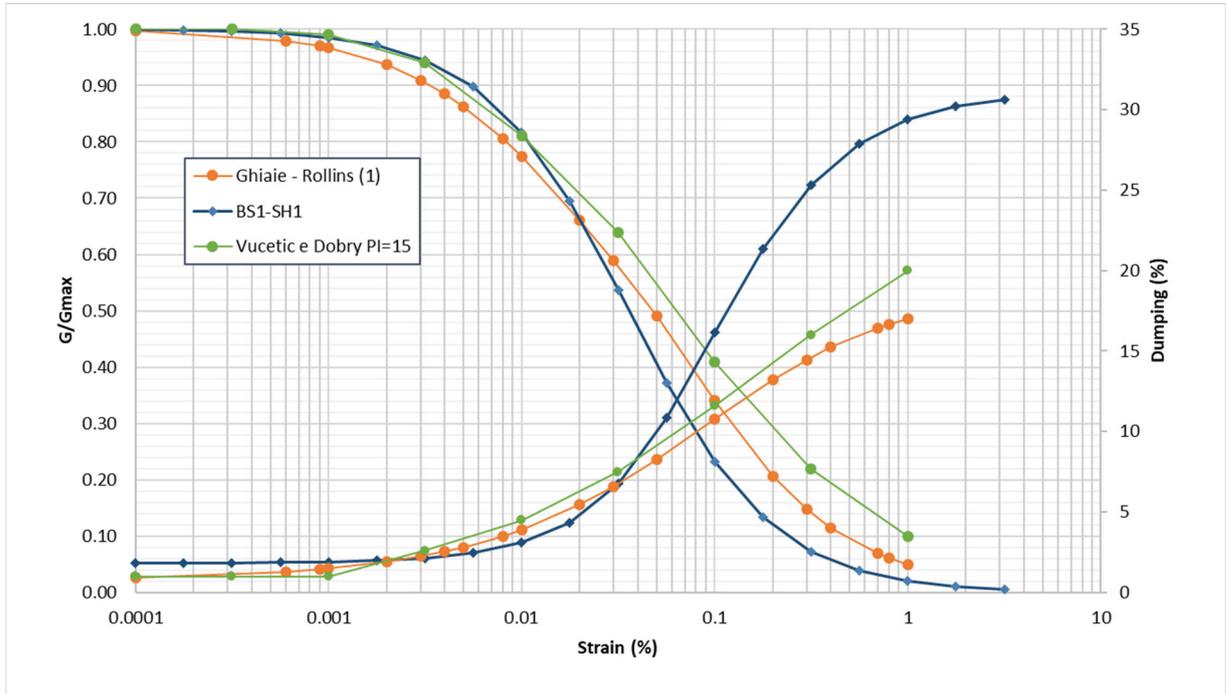


Fig. 67 – Grafico delle curve di G/G_0 e D per tutti i terreni

5.3.2 Descrizione del modello

Sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche e geofisiche dei terreni descritte in precedenza è stato costruito il modello nel programma LSR2D, la cui rappresentazione è riportata in Fig. 68.

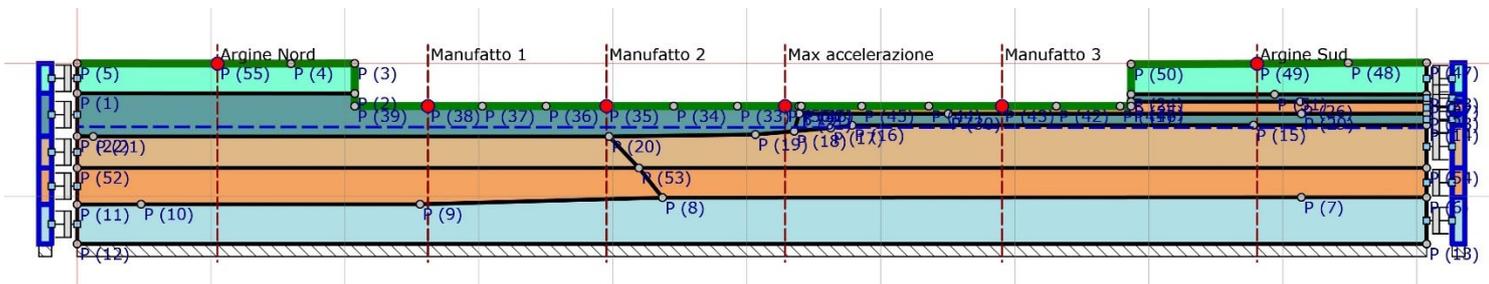


Fig. 68 – Modello sismostratigrafico

Di seguito si riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

Strato	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
Argine in ghiaia	1950.00	360.00	0.35	Rollins

Argine in ghiaia bis	1950.00	360.00	0.35	Rollins
Ghiaie superficiali 1	1950.00	290.00	0.35	Rollins
Argille superficiali	1800.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Ghiaie superficiali	1950.00	290.00	0.35	Rollins
Ghiaia superficiale	1950.00	290.00	0.35	Rollins
Ghiaie base	2000.00	430.00	0.35	Rollins
Argille 1	1850.00	220.00	0.35	BS1SH1
Argille 1b	1850.00	220.00	0.35	BS1SH1
Argille 2	1850.00	180.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Argille 2 bis	1850.00	180.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15

Tab. 11 - Caratteristiche meccaniche strati

dove:

- ρ = densità di massa del singolo strato;
- V_s = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato;
- γ = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato;

Il modello FEM viene ottenuto mediante una discretizzazione con elementi finiti piani a tre nodi del dominio (maglia triangolare). Il passo della mesh adottato è stato di soli 2 m, per poter meglio conformarsi alla complessa stratigrafia (Fig. 69).

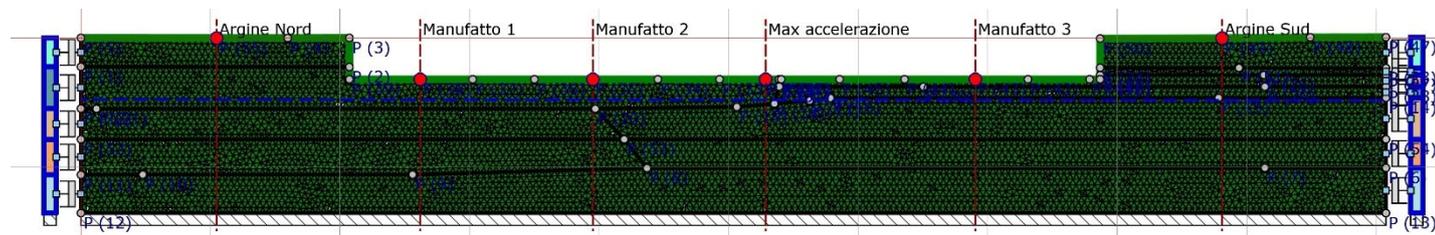


Fig. 69 – Mesh di calcolo per il manufatto regolatore

Vista la complessità del modello, la risposta sismica locale è stata valutata per 5 diversi punti ritenuti significativi ai fini ingegneristici, la cui ubicazione è riportata in Fig. 68 e Fig. 69. Due punti corrispondono alla sommità arginale destra e sinistra (Argine Nord e Sud), mentre 3 punti corrispondono alla fondazione del manufatto (manufatto 2, max accelerazione, e manufatto 3).

Le analisi della risposta sismica locale sono state effettuate per 2 stati limite, lo Stato Limite per la salvaguardia della vita (SLV) e Stato Limite di Danno (SLD). Per ognuno di questi, nei paragrafi successivi, verranno riportati i risultati ottenuti.

5.3.3 Azioni sismiche in ingresso

Vista la vicinanza al manufatto regolatore si sono utilizzati gli stessi accelerogrammi indicati al Cap. 5.2.3.

5.3.4 Analisi dei risultati

I risultati delle modellazioni effettuate sono state espresse, per i 6 punti di controllo in termini di:

- ✓ Serie temporali in accelerazione;
- ✓ Profilo della PGA in funzione della profondità;
- ✓ Spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione in superficie.

5.3.4.1 Serie temporali

Le serie temporali in accelerazione (accelerogrammi) in output costituiscono la modifica dei segnali originali in input in funzione delle caratteristiche del terreno. Nelle 10 figure seguenti vengono riportati i grafici degli accelerogrammi; ciascuna figura rappresenta tutti gli accelerogrammi restituiti per ciascun punto di controllo, nelle Fig. 70 - Fig. 74 sono rappresentati i sismi in condizioni SLV, mentre nelle Fig. 75 - Fig. 79 sono rappresentati i sismi in condizioni SLD. Tutti i dati sono stati forniti ai Progettisti anche in forma tabellare.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

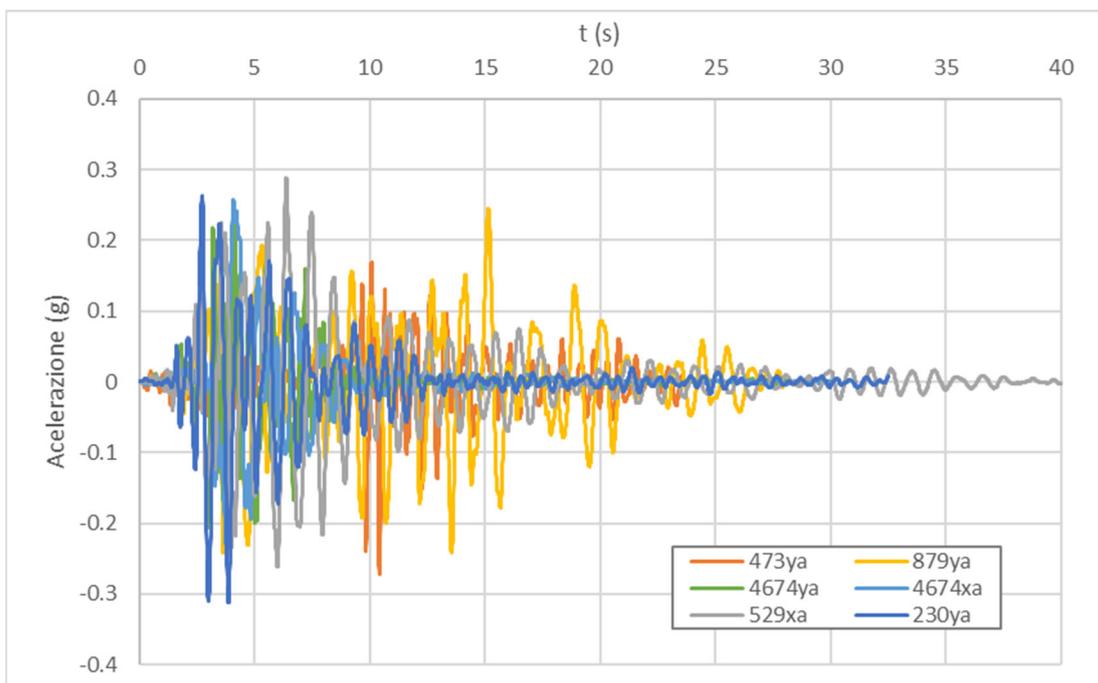


Fig. 70 - Serie temporali di output punto di controllo Argine Nord - SLV

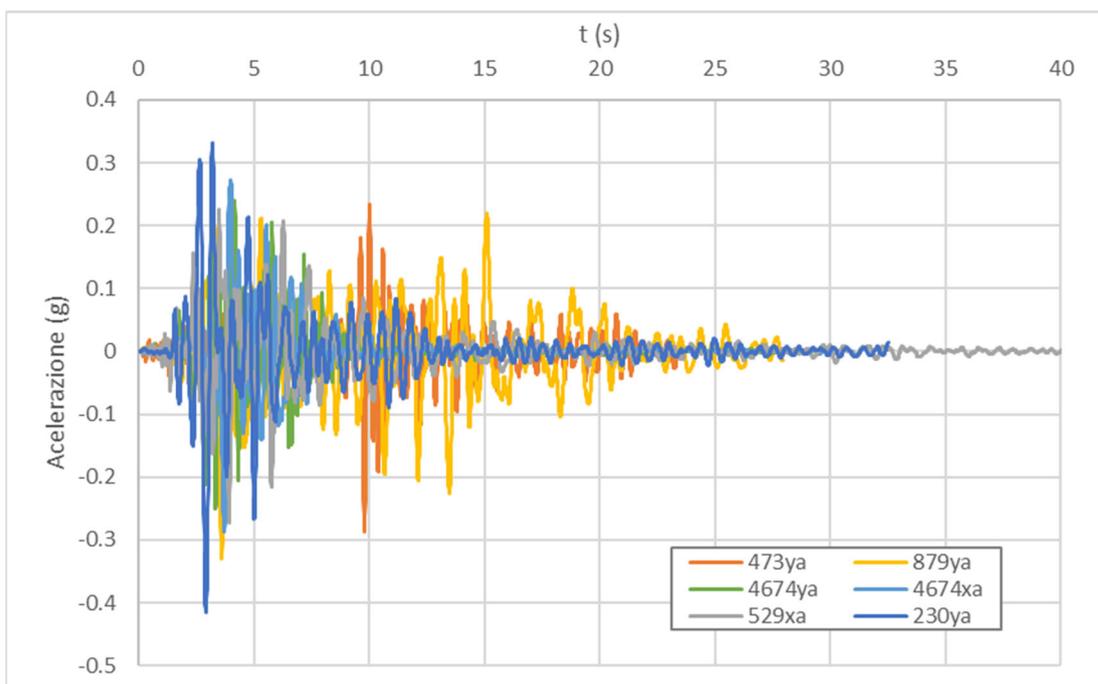


Fig. 71 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 2 - SLV

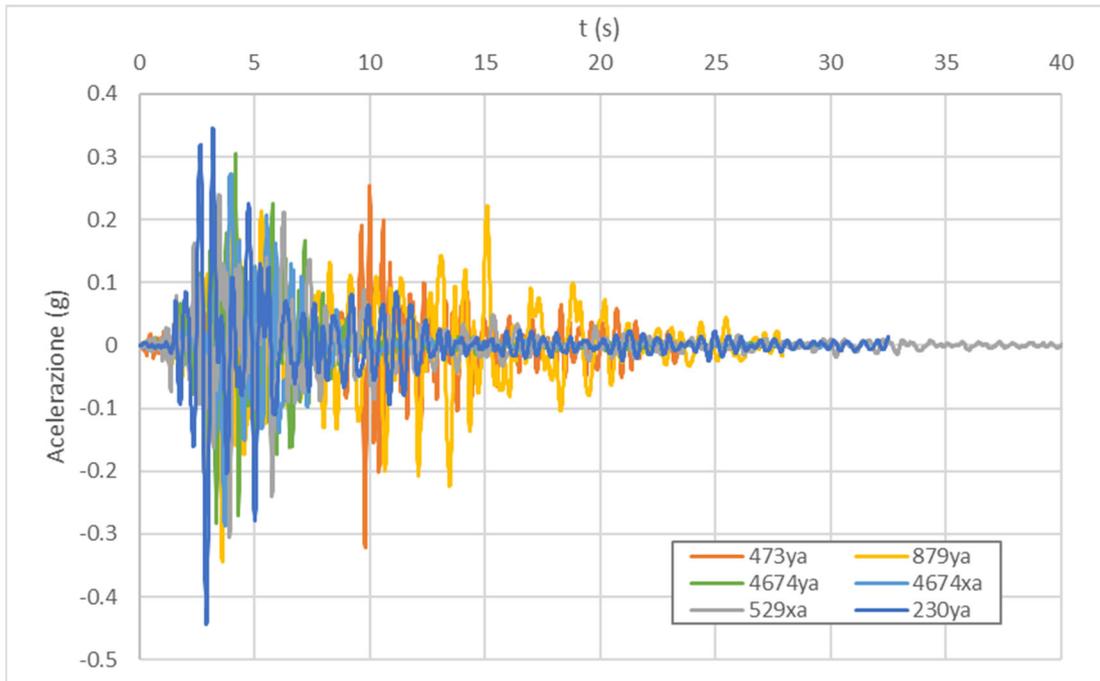


Fig. 72 - Serie temporali di output punto di controllo Max accelerazione - SLV

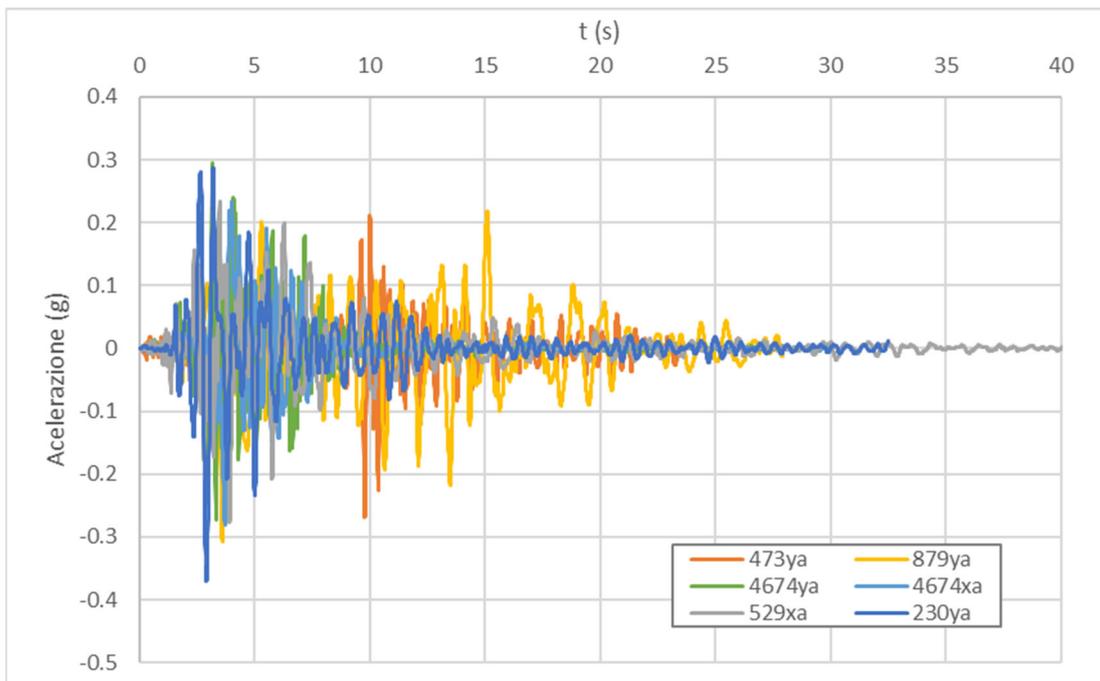


Fig. 73 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 3 - SLV

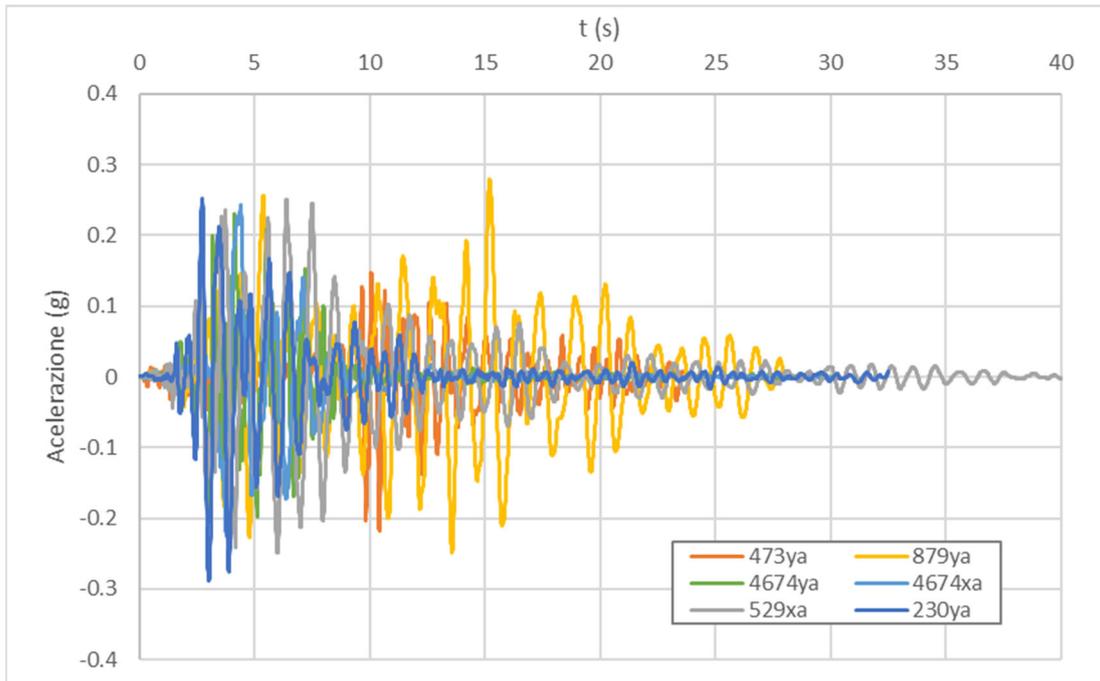


Fig. 74 - Serie temporali di output punto di controllo Argine sud - SLV

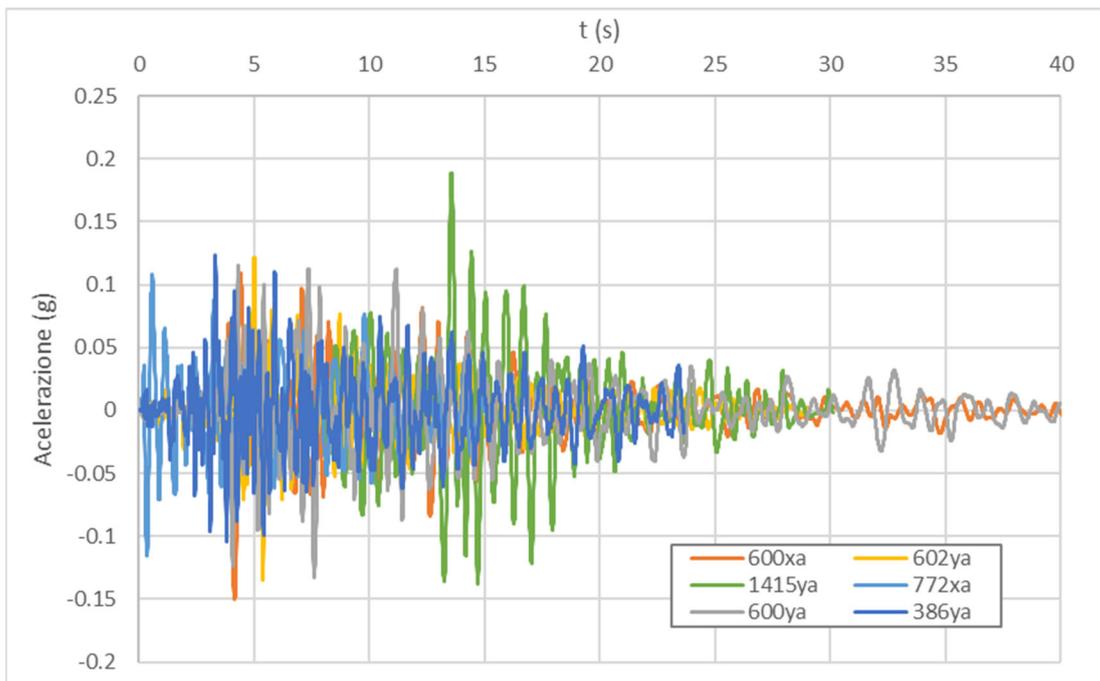


Fig. 75 - Serie temporali di output punto di controllo Argine Nord - SLD

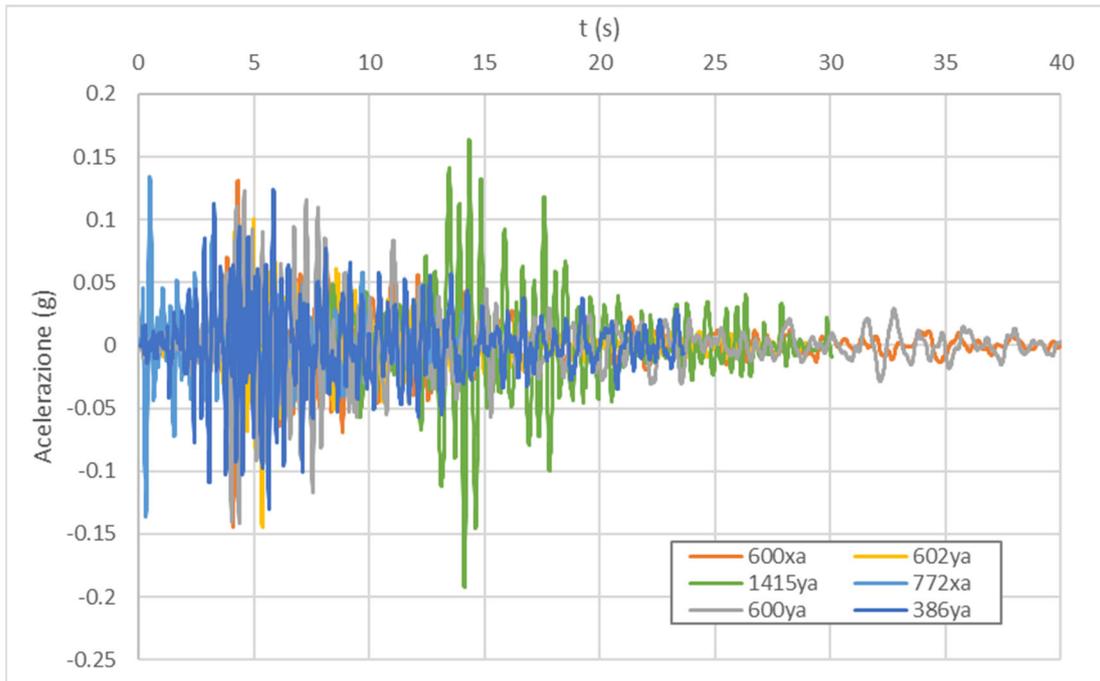


Fig. 76 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 2 - SLD

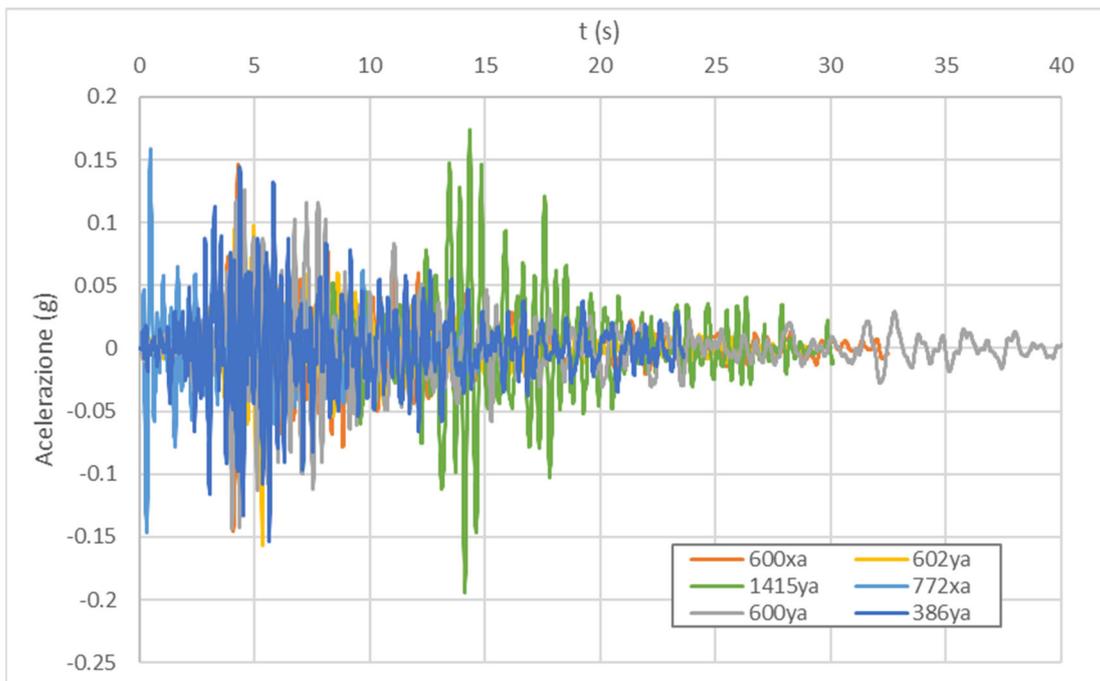


Fig. 77 - Serie temporali di output punto di controllo Max accelerazione - SLD

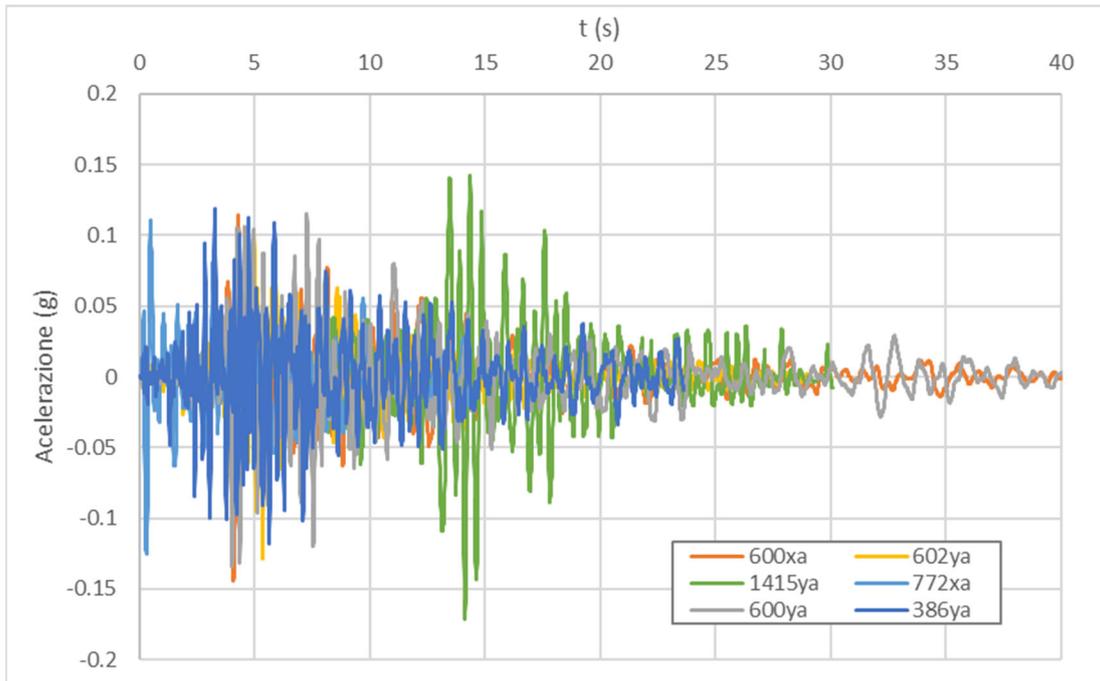


Fig. 78 - Serie temporali di output punto di controllo Manufatto 3 - SLD

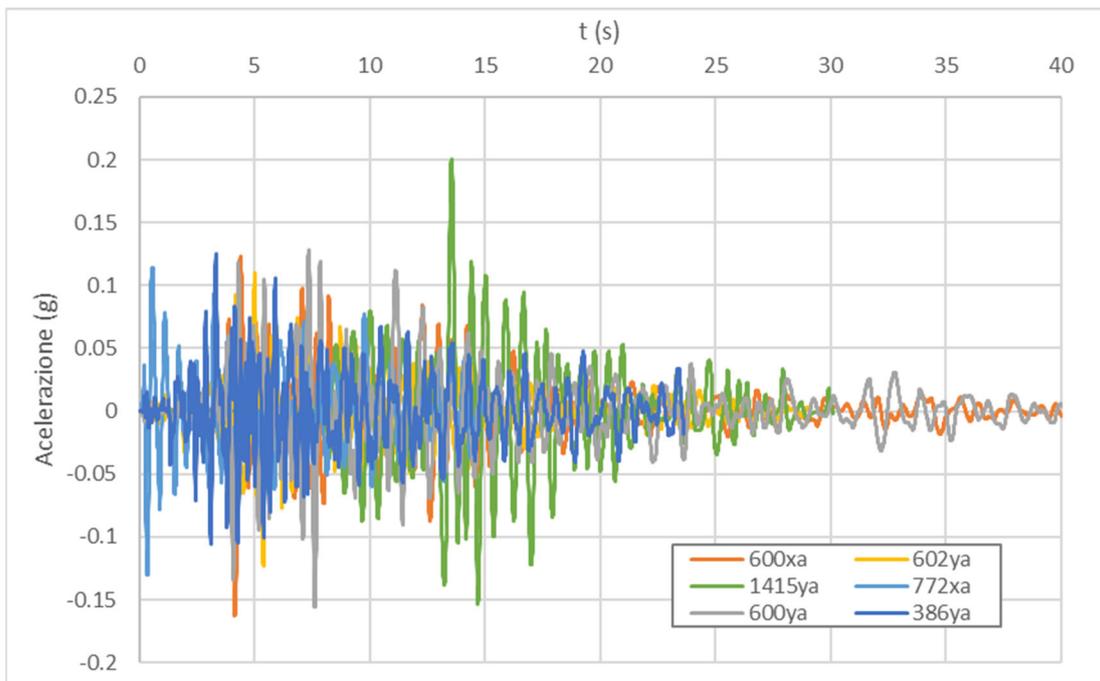


Fig. 79 - Serie temporali di output punto di controllo Argine dx - SLD

5.3.4.2 Profilo della PGA in funzione della profondità

La variazione della PGA all'interno del modello è sintetizzata in Fig. 80 nella condizione SLV ed in Fig. 81 per la condizione SLD. Tali grafici sono stati ottenuti mediando i valori di PGA per ciascuna serie temporale in funzione della profondità.

Per verificare l'andamento della PGA con la profondità lungo le verticali dei diversi punti di controllo sono stati realizzati i grafici di Fig. 82 e Fig. 83, rispettivamente per SLV e SLD. Come si può constatare il valore massimo della PGA in superficie è pari a circa 3.37 m/s^2 , per il punto di controllo "Manufatto 2" per lo SLD, mentre per quanto riguarda lo SLD, il valore massimo della PGA in superficie, sempre nello stesso punto di controllo è pari a 1.56 m/s^2 .

Ciò che è interessante, è l'andamento dell'accelerazione. In entrambi i casi l'andamento risulta molto simile e tende a diminuire con la profondità. Un importante discontinuità è presente a quota 25 m s.l.m. circa, in corrispondenza del primo importante banco ghiaioso.

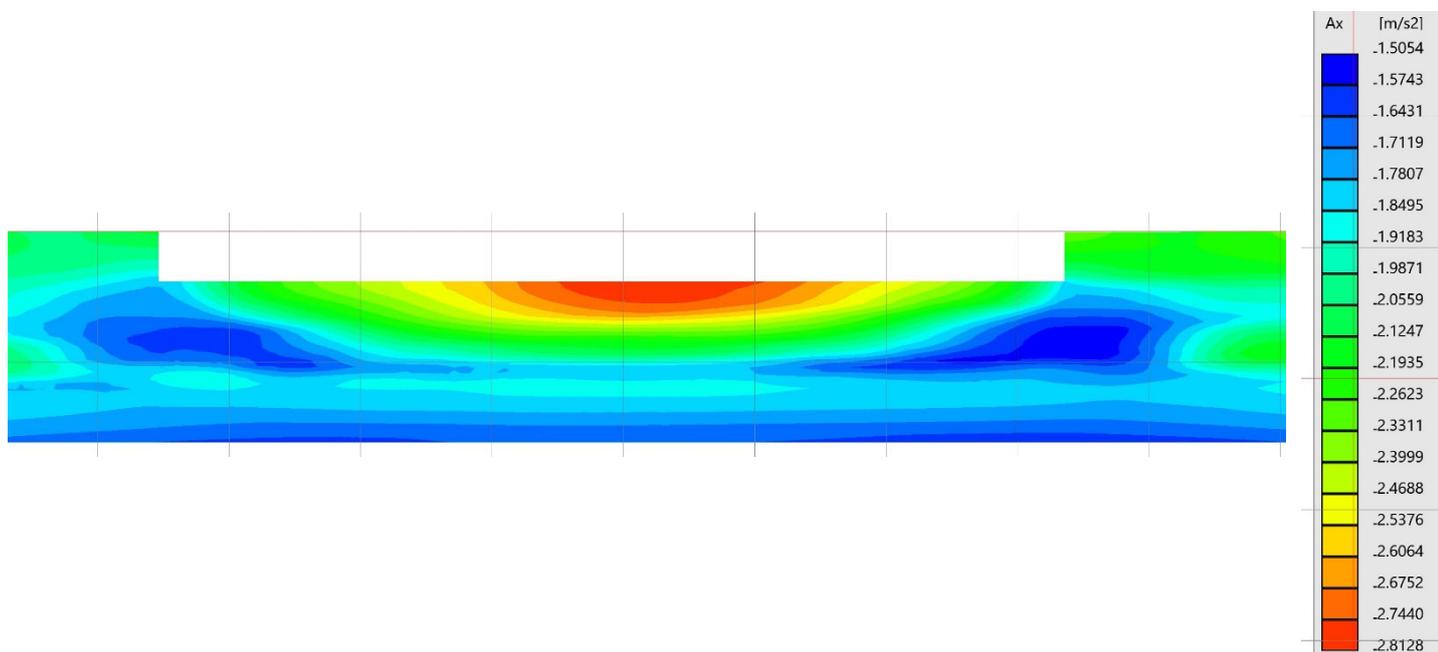


Fig. 80 – Distribuzione delle accelerazioni nel modello in condizioni SLV

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

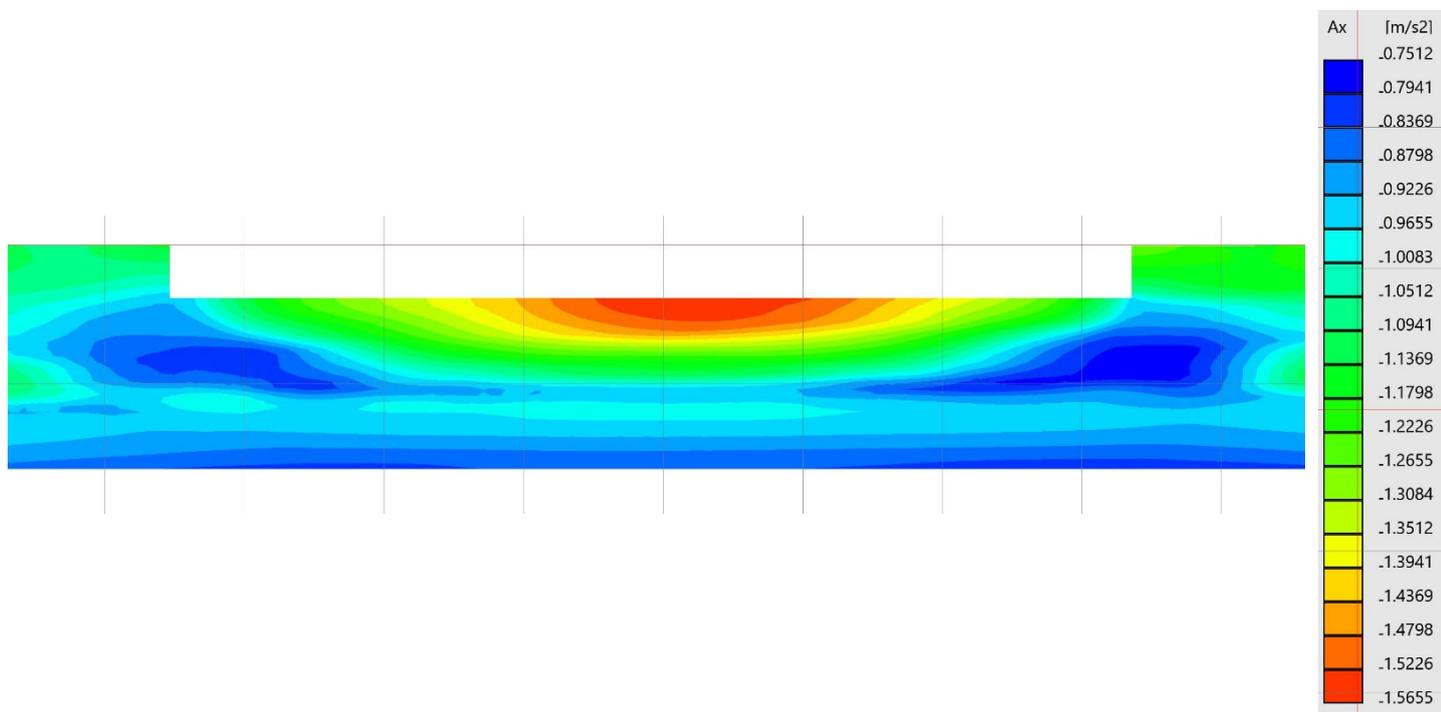


Fig. 81 – Distribuzione delle accelerazioni nel modello in condizioni SLD

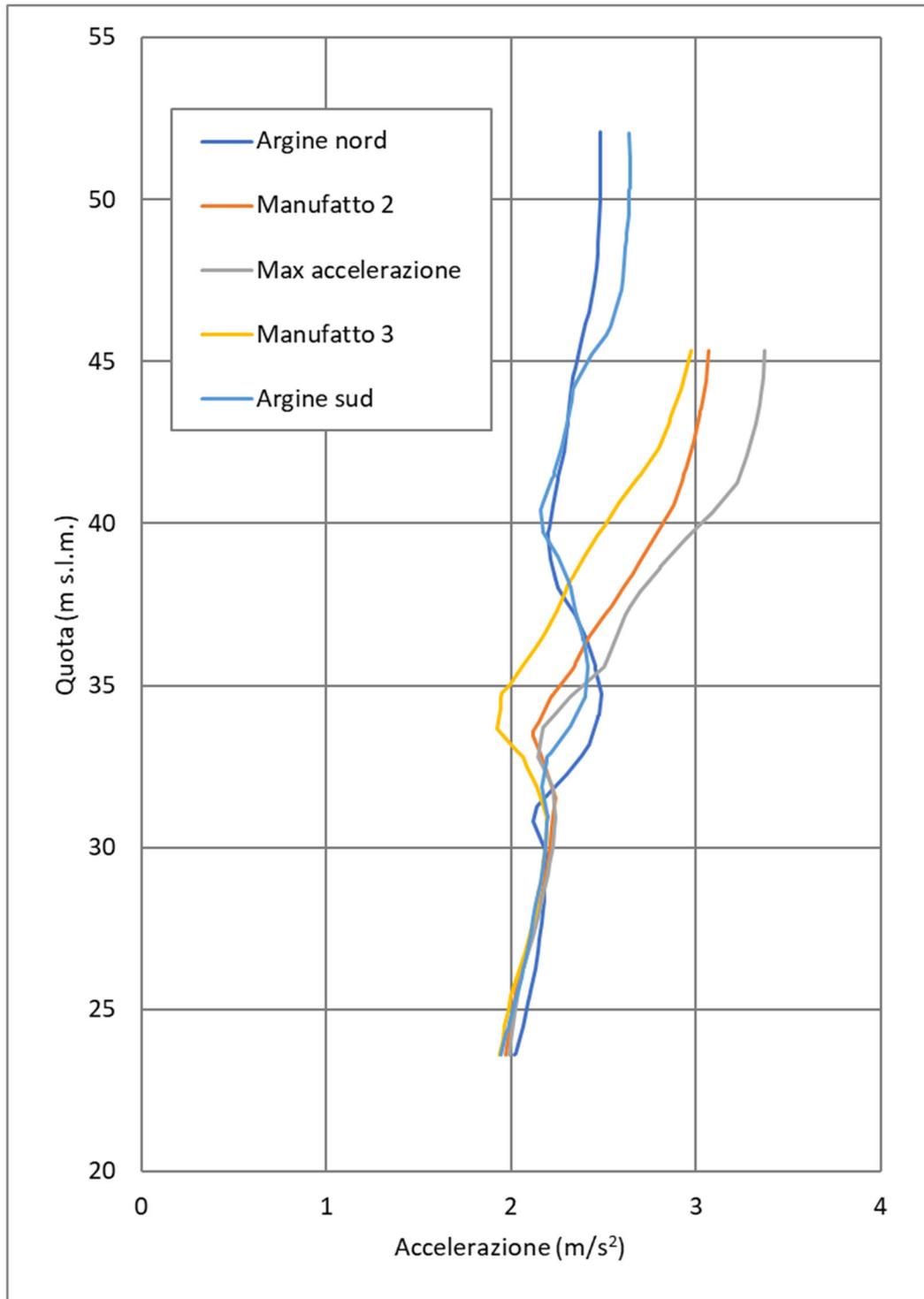


Fig. 82 – Distribuzione delle accelerazioni lungo la verticale dei punti di controllo in condizioni SLV

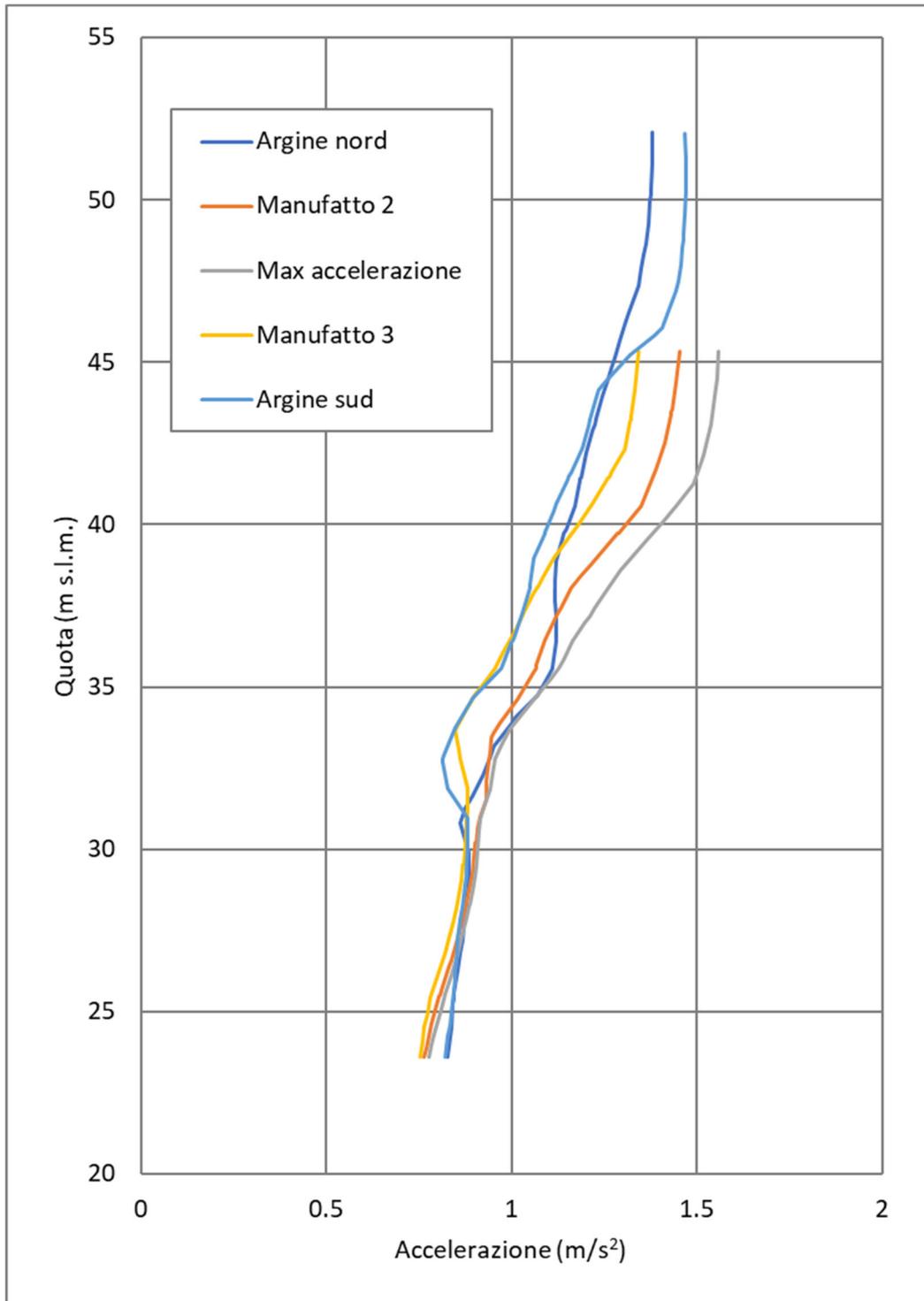


Fig. 83 – Distribuzione delle accelerazioni lungo la verticale dei punti di controllo in condizioni SLD

5.3.4.3 Spettri di risposta elastici in superficie

Altri dati di notevole interesse per la progettazione sono gli spettri di risposta elastici in pseudoaccelerazione, ricavati per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ del 5%.

Anche in questo caso gli spettri di risposta sono stati calcolati in corrispondenza dei punti di controllo indicati nel Cap. 5.2.2. Per ciascun punto di controllo lo spettro di risposta è ottenuto come media degli spettri dei singoli accelerogrammi, come illustrato, a titolo esemplificativo, in **Fig. 84** per il punto “Max accelerazione” allo SLV, in cui sono rappresentati tutti i segnali utilizzati, indicati in grigio, oltre alla curva rappresentante il valore medio indicata in rosso.

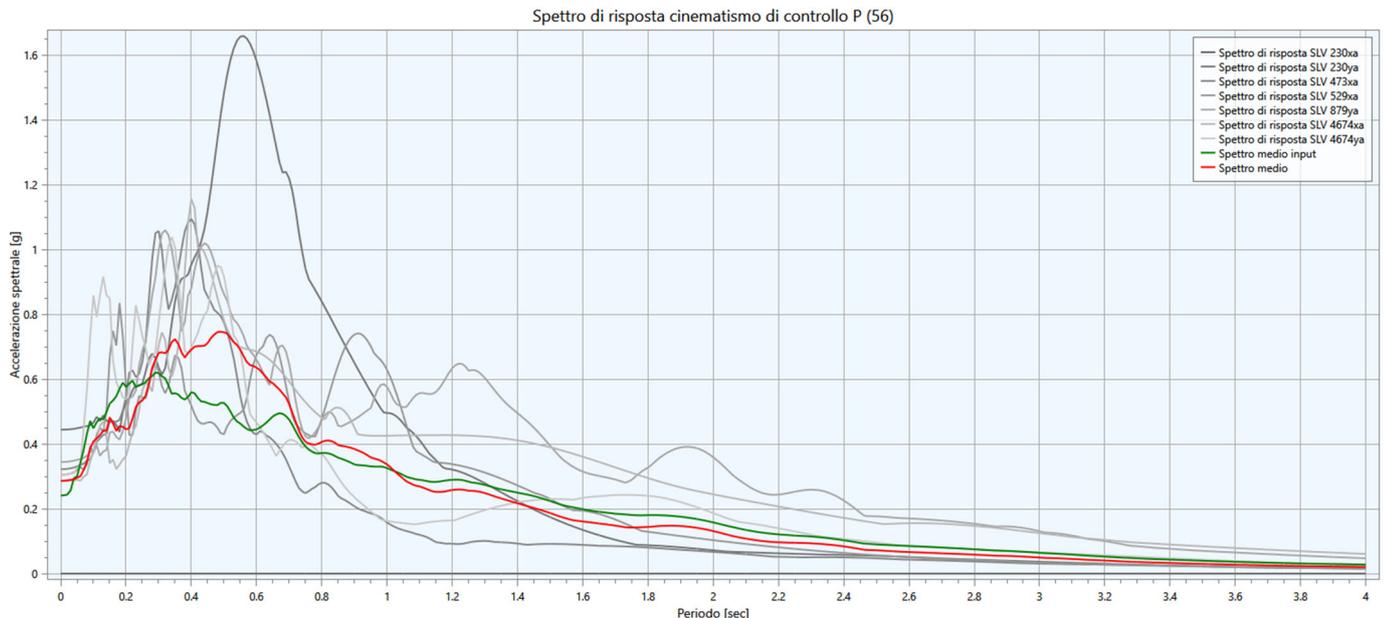


Fig. 84 – Spettri di risposta elastici in accelerazione - SLV

In Fig. 85 viene invece presentata la sovrapposizione dei valori medi degli spettri derivanti dall'analisi di risposta sismica locale 2D nei 5 punti di controllo analizzati e lo spettro semplificato da normativa per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita. Il confronto è effettuato con lo spettro calcolato per tempi di ritorno di 1424 anni per la classe di sottosuolo C, che rappresenta lo spettro di riferimento del sito oggetto di studio in caso di analisi semplificata.

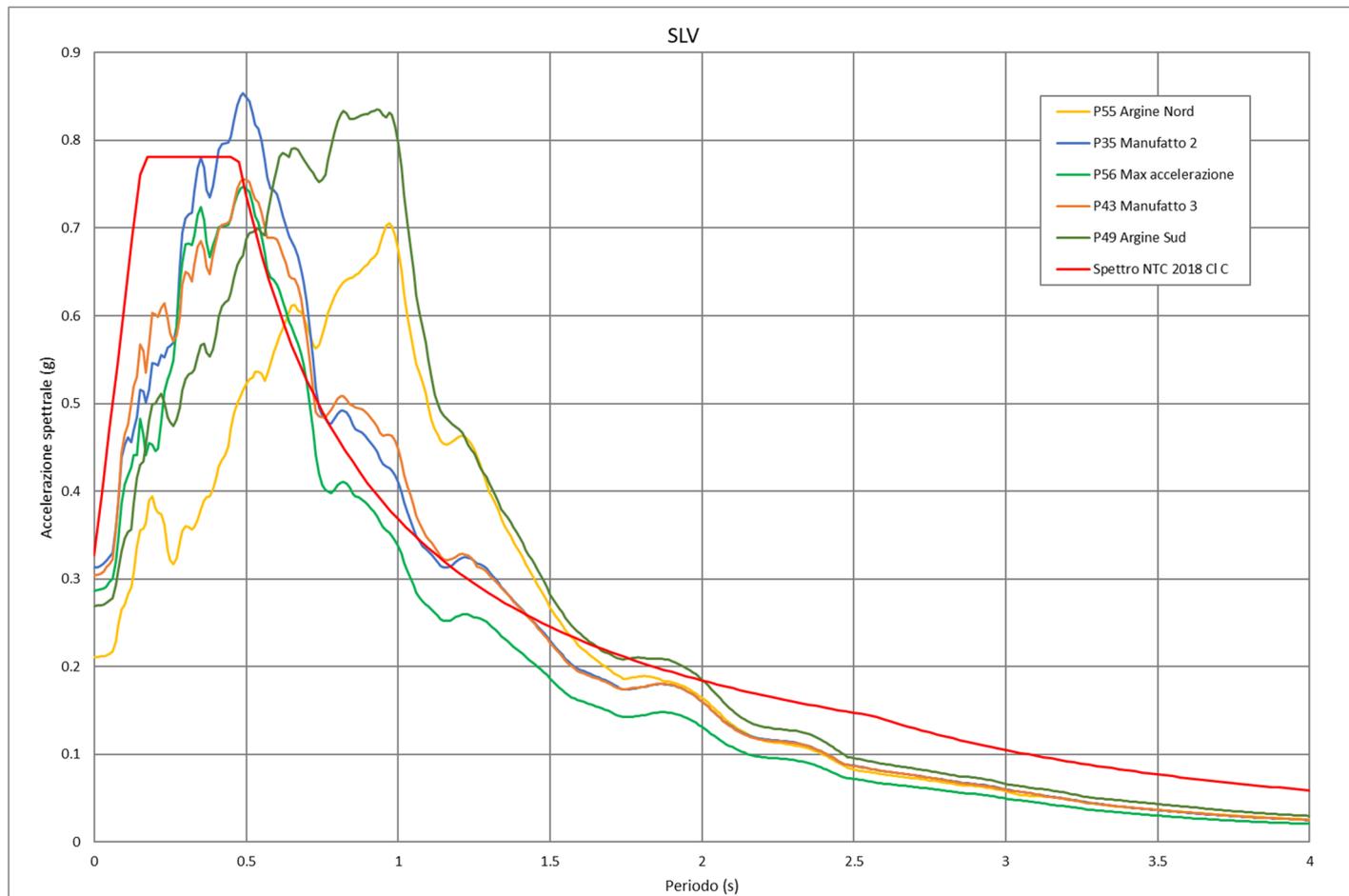


Fig. 85 – Valori medi dello spettro elastico di risposta in accelerazione per i 3 punti di controllo analizzati confrontati con lo spettro semplificato di normativa C calcolato per $T_r=1424$ anni - SLV

In Fig. 86 è invece rappresentata la sovrapposizione tra i valori medi degli spettri derivanti dall'analisi di risposta sismica locale 2D, sempre relativi ai 6 punti di controllo analizzati, e lo spettro semplificato da normativa per lo Stato Limite di Danno. In particolare, il confronto è effettuato con lo spettro calcolato per tempi di ritorno di 151 anni per la classe di sottosuolo C (che rappresenta lo spettro di riferimento del sito oggetto di studio) in caso di analisi semplificata.

MO-E-1357 - Adeguamento dei manufatti di regolazione e sfioro della cassa di espansione del fiume Secchia comprensivo della predisposizione della possibilità di regolazione in situazioni emergenziali anche per piene ordinarie in relazione alla capacità di deflusso del tratto arginato (ex codice 10969) e avvio dell'adeguamento in quota e potenziamento strutturale dei rilevati arginali del sistema cassa espansione esistente

MO-E-1273 - Lavori di ampliamento e adeguamento della cassa di espansione del Fiume Secchia nel comune di Rubiera (RE) (Accordo di programma Ministero- RER- Parte A)

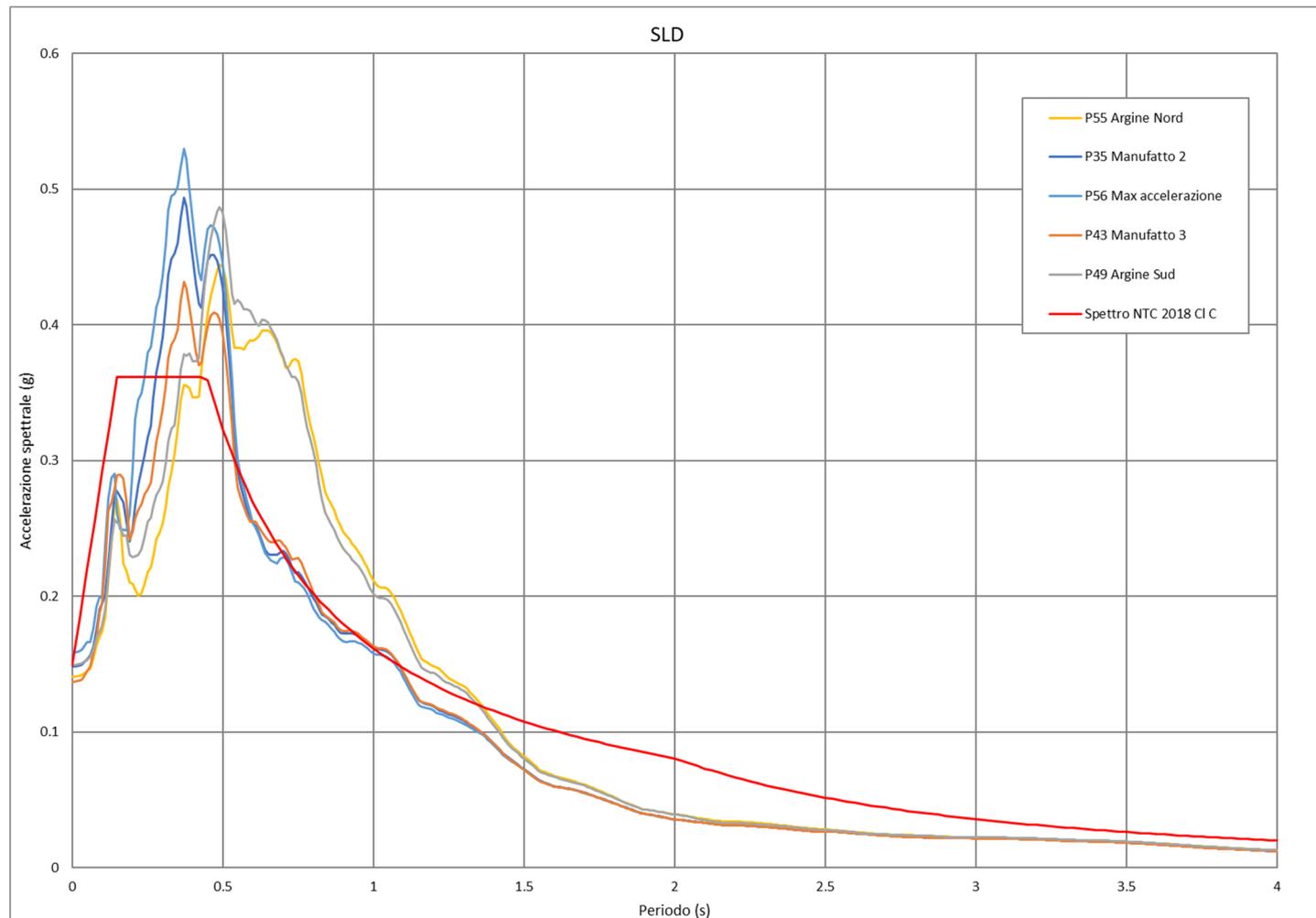


Fig. 86 – Valori medi dello spettro elastico di risposta in accelerazione per i 3 punti di controllo analizzati confrontati con lo spettro semplificato di normativa C calcolato per $T_r=151$ anni - SLD