

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

ALL(VALSAT).5 – STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO PER L'AREA DI EX CAVA IN COMUNE DI MODENA

IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:

CAPOGRUPPO MANDATARIA
PROGETTAZIONE GENERALE – INGEGNERIA IDRAULICA E STRUTTURALE



DIZETA INGEGNERIA
STUDIO ASSOCIATO
Via Boselli, 19 – 20133 MILANO Tel. 02-70600125
server@dzetaingegneria.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 GEOLOGY
www.engeo.it

GEOLOG. CARLO CALEFFI
GEOLOG. 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: AGOSTO 2021

Mod.7.3 F - Rev.01

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

INDICE

1	Premesse	2
1.1	Normativa di riferimento	2
1.2	Interventi in progetto	3
2	Indagini ed analisi	5
3	Studio di microzonazione sismica del Comune di Modena	7
4	Analisi di risposta sismica locale	9
4.1	Pericolosità sismica di base	9
4.2	Segnali in input	10
4.3	Modello geofisico del sottosuolo	11
4.4	Procedura di analisi RSL	11
4.4.1	<i>Metodo lineare equivalente</i>	12
4.4.1.1	<i>Soluzione alla singola iterazione mediante FEM</i>	14
4.4.2	<i>Smorzamento</i>	16
4.4.3	<i>Procedimento iterativo</i>	16
4.4.4	<i>Interpretazione dei risultati</i>	17
4.5	Analisi dei risultati	17
5	Conclusioni	22

1 Premesse

La presente relazione descrive lo studio di Microzonazione sismica di III° livello per l'area di ex cava in Comune di Modena, realizzato a corredo dello Studio di Incidenza. Tale studio si è reso necessario in quanto tale area è stata cartografata nelle tavole di Microzonazione sismica del Comune di Modena, ed è stata ricompresa all'interno della zona "3080" e pertanto all'interno di "Zone di attenzione per instabilità – Cedimenti differenziali". Ai sensi dell'Art.6A,3 del Testo coordinato delle Norme di PSC-POC-RUE vigente del Comune di Modena, nelle zone "3080 – Cedimenti differenziali" sono obbligatori, per gli strumenti di pianificazione urbanistica comunale, "approfondimenti di III livello come definiti agli allegati A3 e A4 della DGR 2193/2015", normativa attualmente aggiornata dalla DGR 630/2019.

Il presente studio è stato basato sugli studi di carattere sismico e sismotettonico riportati nell'elaborato RS.06 Relazione Sismotettonica e Sismica, a cui si rimanda per maggiori approfondimenti di carattere strutturale.

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 Vs nei depositi della Cassa, sono state utilizzate indagini dirette, descritte nel Cap. 2 ed i cui report sono riportati nell'Allegato RS.01.

1.1 Normativa di riferimento

- D.G.R Emilia Romagna 630 (2019) - Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (ARTT. 22 E 49, L.R. N. 24/2017)

- 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;
- D.G.R. 1164 (2018) – Aggiornamento della classificazione sismica di prima applicazione dei Comuni dell'Emilia Romagna;
- Dipartimento della Protezione Civile (2008) - Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica
- Decreto ministeriale 17-01-2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni;
- 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;
- 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";

1.2 Interventi in progetto

L'opera oggetto della presente microzonazione fa parte di una serie d'interventi d'adeguamento del sistema di laminazione delle piene della Cassa di espansione del fiume Secchia. In particolare, si tratta di parte del Lotto 2:

- Intervento H: Adeguamento delle arginature della cassa di espansione.

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)

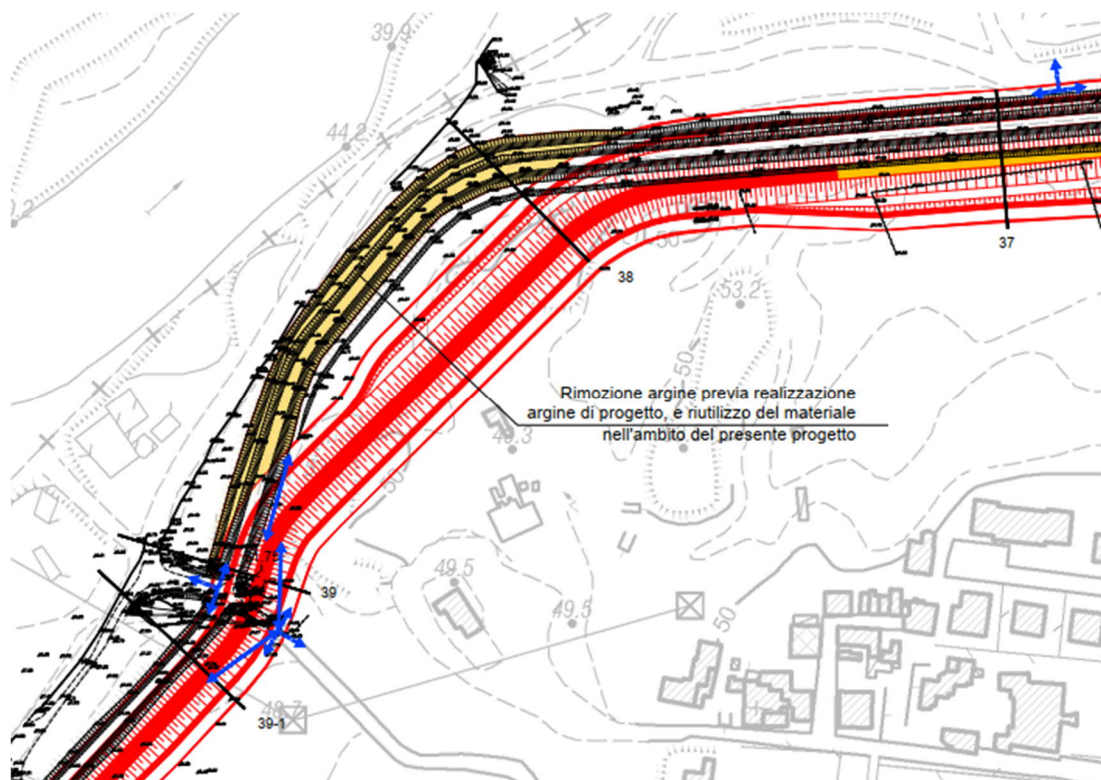


Fig. 1 – Intervento in progetto che interessa l'area di ex cava

Coerentemente con quanto disposto dalla DGR 630/2019 e dagli Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica “008) del DPC, la microzonazione sismica va riferita a sismi con tempo di ritorno pari a 475 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..

Inoltre, per la caratterizzazione dei materiali di riempimento della ex cava sono state appositamente realizzate due prove penetrometriche dinamiche, che hanno consentito di verificare che il materiale di riempimento è costituito da materiali granulari molto consistenti.

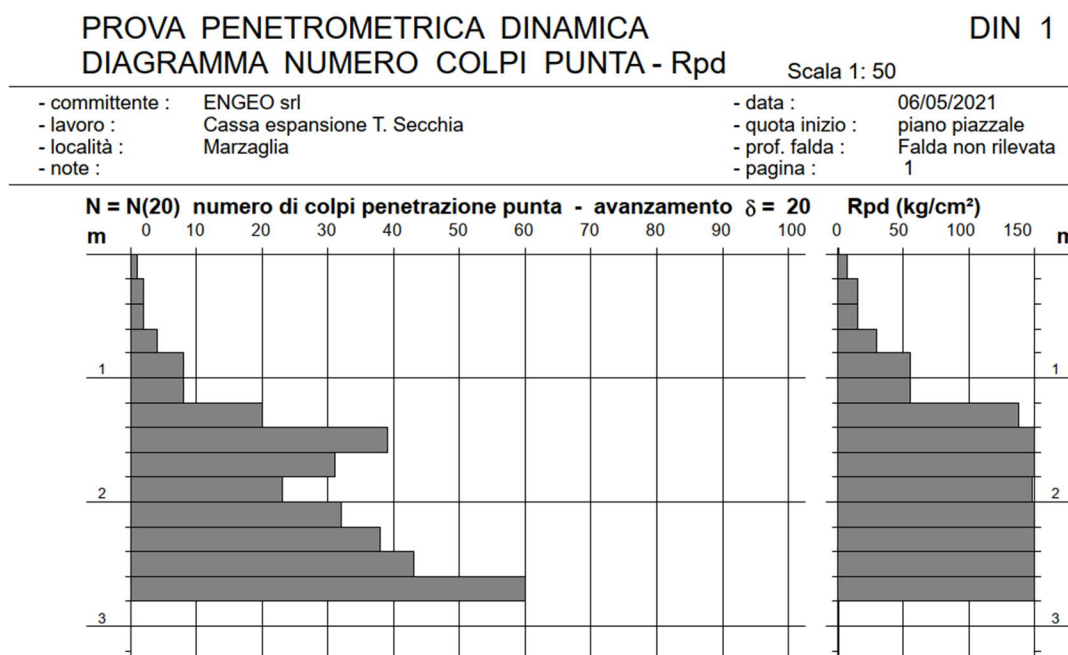


Fig. 2 – Report della prova penetrometrica DIN1

Le nuove indagini, unitamente ai dati già disponibili hanno consentito di integrare il profilo litostratigrafico nell'area della ex cava. Il profilo è riportato nell'allegato ALL.(RG).8. Nella seguente figura è riportato uno stralcio del profilo.

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)

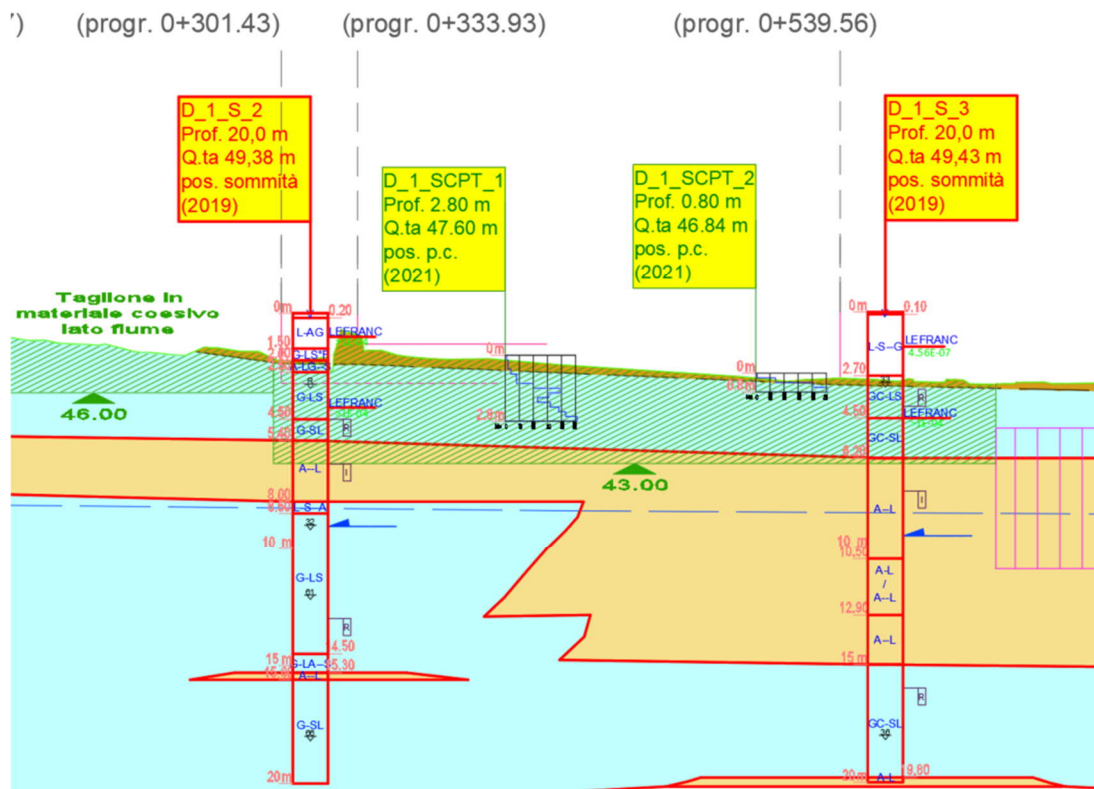


Fig. 3 - Stralcio del profilo litostratimetrico ALL.(RG).8

3 Studio di microzonazione sismica del Comune di Modena

Il Comune di Modena è dotato dello studio di microzonazione sismica¹ di secondo livello, redatto nell'ambito del "Piano nazionale per la prevenzione sismica", regolato dall'Art. 11 del Decreto legge n. 39/2009.

Nella figura seguente si riporta lo stralcio della carta di microzonazione sismica per la zona interessate dalle Casse.

Come si può constatare l'area in studio (cerchio rosso) è interessata da Zona di attenzione per instabilità – cedimenti differenziali.

¹ Disponibili sul sito "Programma nazionale di soccorso per il rischio sismico dell'Emilia-Romagna"
<http://geo.regione.emilia-romagna.it/schede/pnsrs/>

Mandataria:

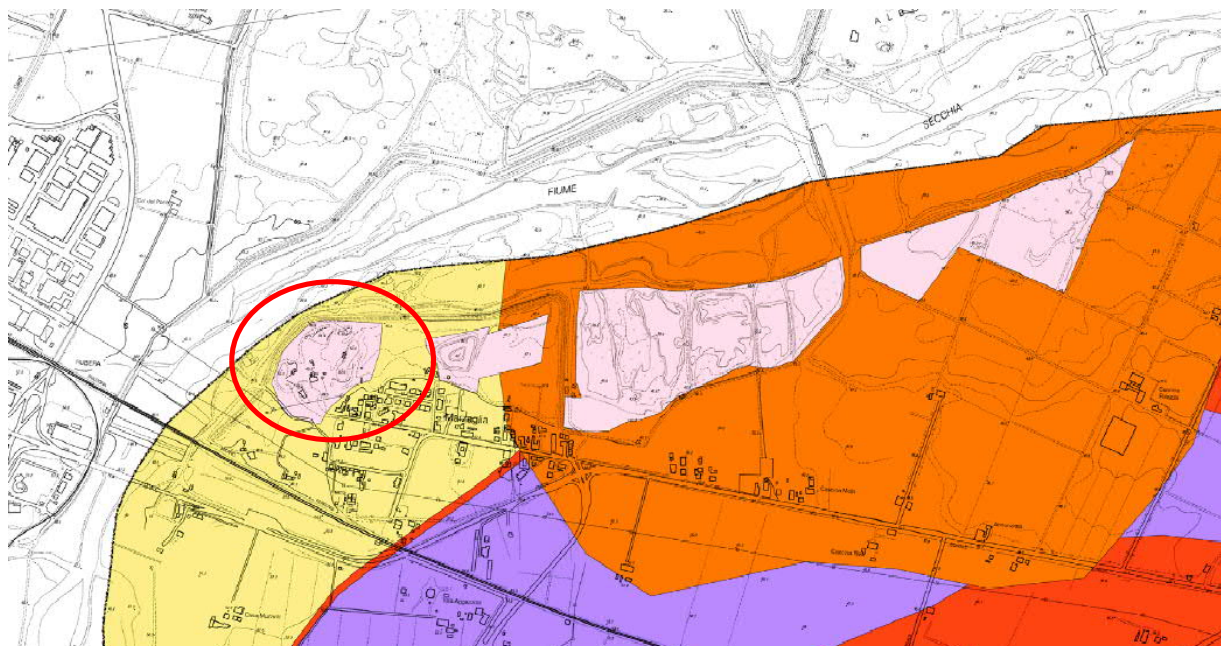


Mandanti:



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

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

4 Analisi di risposta sismica locale

4.1 Pericolosità sismica di base

Nel caso della valutazione della risposta sismica locale di 3° livello nell'ambito della microzonazione sismica, i parametri di riferimento (PGA su suolo di categoria A, spettri di risposta rappresentativi e segnali di riferimento) sono definiti dall'Allegato A4 della DGR 2193/2015 della Regione Emilia Romagna e confermati nella nuova DGR 630/2019.

In particolare, l'Allegato A4 contiene:

- la forma dello spettro di risposta normalizzato rappresentativo del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%) in Emilia-Romagna;
- le indicazioni per il reperimento e l'utilizzo dei segnali di riferimento selezionati;
- le indicazioni per il calcolo dei valori di a_{refg} (10% di probabilità di superamento in 50 anni) di ogni sito indagato;

Per le verticali d'indagine su cui è stata eseguita la risposta sismica locale, in Tab. 1 viene riportato il parametro a_{refg} , con 10% di probabilità di superamento in 50 anni ($T_r=475$ anni), utilizzato.

Sito	$a_{ref,g}(a_g/g)$
Modena	0.163

Tab. 1 – Valori a_{refg} (10% di probabilità di superamento in 50 anni)

4.2 Segnali in input

Quali segnali di input sismico sono stati utilizzati quelli forniti dal software SEISM-HOME² di Eucentre, appositamente selezionati per conto della Regione Emilia Romagna.

Tutti i segnali sono stati selezionati attraverso una procedura che valuta la similarità tra le forme spettrali di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nelle banche dati.

Il software SEISM-HOME fornisce 7 accelerogrammi per ciascun nodo del reticolo di riferimento della pericolosità sismica locale dell'Allegato A delle NTC 2008. Per il sito indagato sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo più vicino: il 16057.

Nel complesso, quindi, per ogni verticale analizzata, sono stati utilizzati 7 diversi accelerogrammi per le verifiche di risposta sismica locale (Tab. 2). Ovviamente, tutti i sismi sono stati scalati in accelerazione per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto dalla RER.

Magnitude (Mw)	Epic. Distance (km)	Scaling Factor	Source	File_Name
6.2	29.9	2.13	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.AS C
5.74	12.57	1.4	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
5.99	54.21	2.63	NGA	RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
6.93	83.53	1.55	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
6.69	38.07	1.17	NGA	RSN1091_NORTHV_VAS090.AT2
6.6	31	0.66	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
5.9	14.4	2.78	ESM	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC

Tab. 2 – Segnali in input utilizzati nelle analisi di RSL

² Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G., Penna A. [2012] "Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp. 1357-1375.

Mandatataria:



Mandanti:



4.3 Modello geofisico del sottosuolo

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

- litologia;
- velocità delle onde sismiche di taglio (V_s);
- curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G_0) in funzione della deformazione e densità in situ.

Per la caratterizzazione litologica si è fatto riferimento alle indagini ed alla ricostruzione litostratimetrica descritta nel Cap. 2.

Per la ricostruzione dell'andamento della velocità delle onde sismiche con la profondità si è fatto riferimento alle diverse prove down-hole realizzate nell'area delle casse. Per la discussione dei dati disponibili si rimanda all'elaborato R.06 – Relazione sismica a sismotettonica.

Per le caratteristiche del rapporto di smorzamento (D) e del decadimento del modulo di taglio normalizzato (rigidezza, G/G_0) in funzione della deformazione di taglio γ si è fatto riferimento a curve di letteratura (cfr. § 4.5).

4.4 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. 4.5 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, come nel caso in esame, 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.

4.4.1 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 Fig. 5. La tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata $\dot{\gamma}$, secondo la relazione:

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

dove:

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

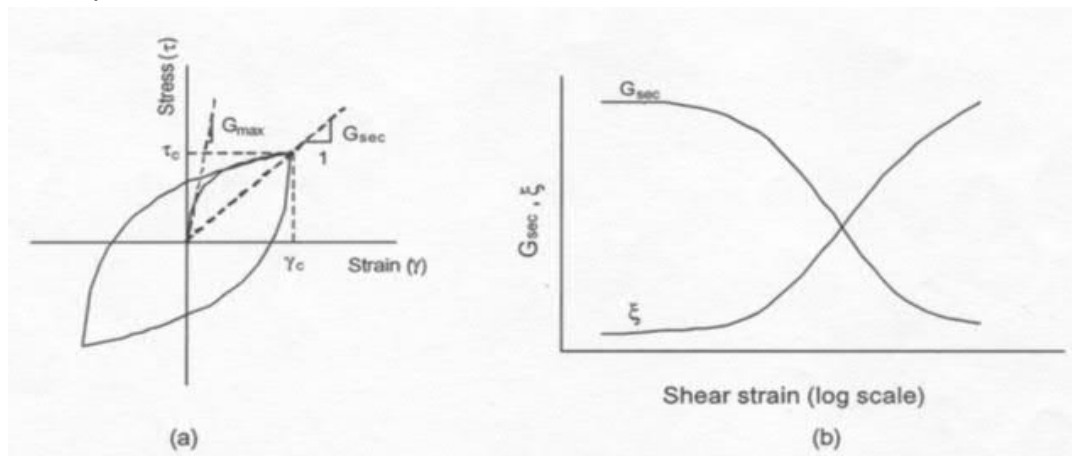


Fig. 5 - Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Fig. 5. 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:

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

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. 5b).

1.1.1 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. 6) 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.

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

dove:

M = matrice di massa del sistema;

C = matrice di smorzamento del sistema;

K = matrice di rigidezza 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 t_n e descrive l'equilibrio dinamico del sistema. La soluzione in termini di spostamento velocità ed accelerazione per ogni t_n 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

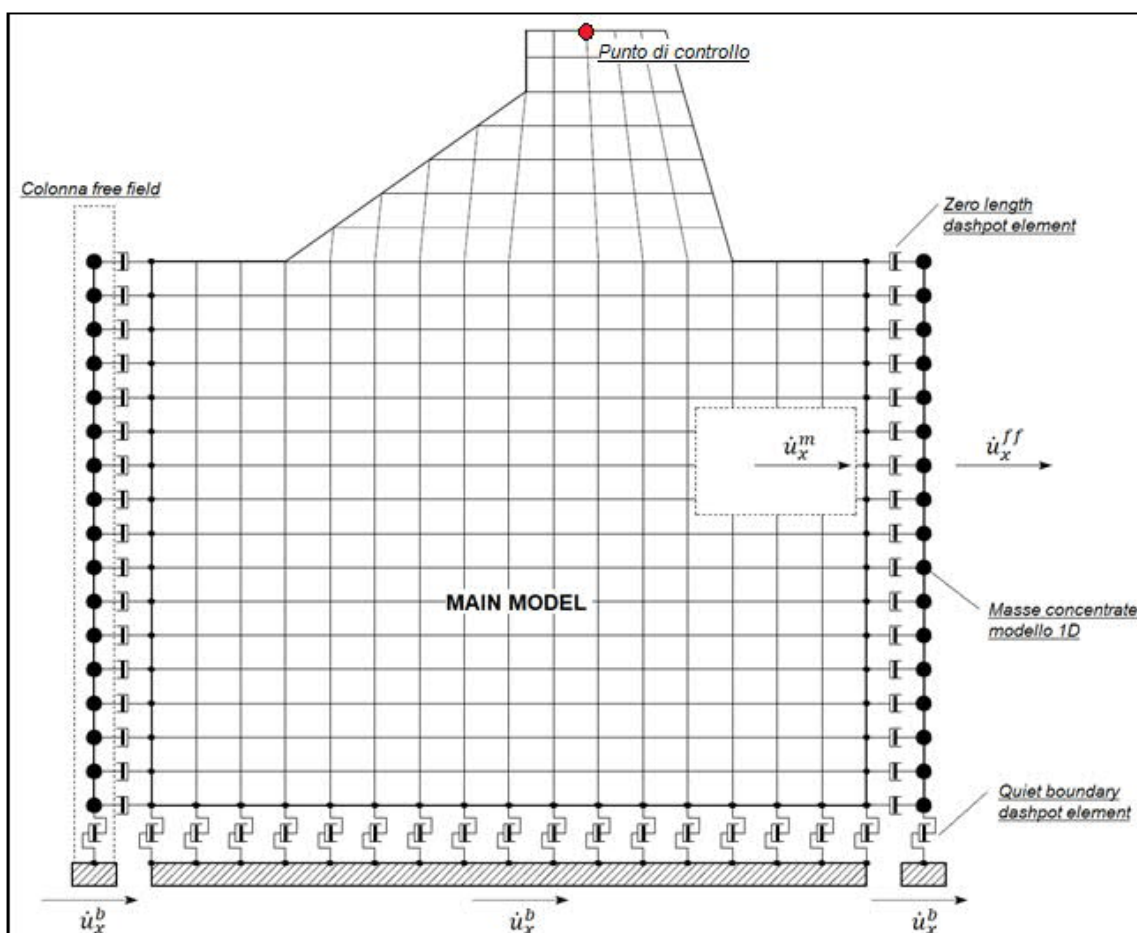


Fig. 6 - Discretizzazione FEM del terreno

4.4.2 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:

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

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;

4.4.3 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 ($\gamma_i - 1 \sim \gamma_i$).

4.4.4 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.

4.5 Analisi dei risultati

I risultati delle analisi condotte con il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 4.5 di STACEC, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire per il sito in esame:

- ✓ La funzione di trasferimento del segnale sismico dal *bedrock* alla superficie;
- ✓ Gli accelerogrammi di output;
- ✓ Lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione (PSA); gli spettri rappresentati sono ottenuti come mediana dei valori degli spettri di tutti i segnali sismici in output;
- ✓ La curva di variazione dell'accelerazione con la profondità;
- ✓ Il fattore di amplificazione in termini di picco di accelerazione (F_{PGA}), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido;

- ✓ I fattori di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in accelerazione (FA_{SA}) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s, 0.5-1.5 e 0.7-1.1 s;
- ✓ I fattori di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in velocità (FH_{SI}) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s.

Tali fattori di amplificazione in accelerazione e velocità sono ottenuti direttamente dal programma di calcolo confrontando lo spettro medio degli accelerogrammi in input con quello ottenuto dagli accelerogrammi in output (Fig. 7 e Fig. 11).

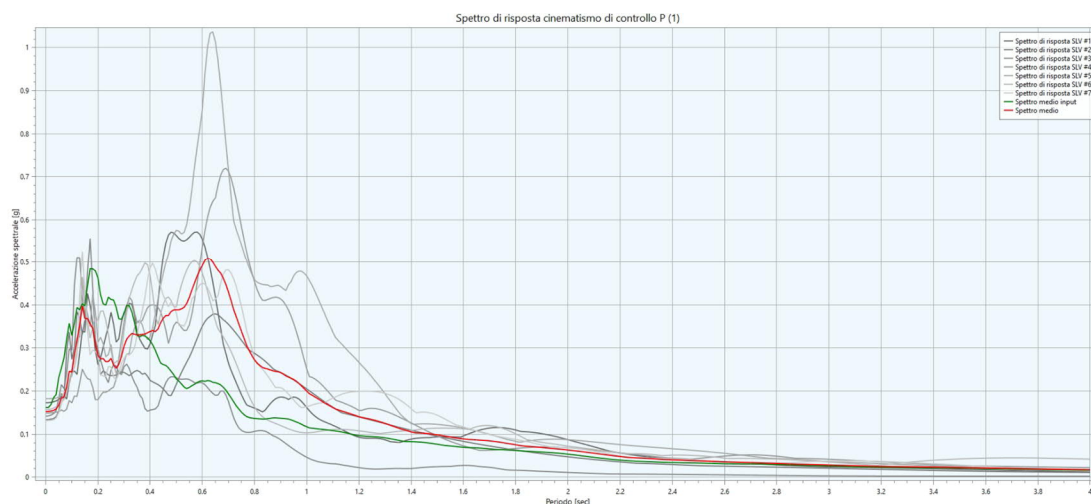


Fig. 7 – Esempio output di confronto tra lo spettro medio in accelerazione in input (verde) e lo spettro medio in accelerazione in output (rosso)

Di seguito vengono sinteticamente riportati i risultati delle analisi di risposta sismica locale per il sito indagato.

Dapprima si fornisce la rappresentazione sintetica del modello sismostratigrafico adottato e quindi vengono rappresentati:

- Il grafico dello spettro elastico in accelerazione da RSL confrontato con quello semplificato derivato dalle NTC per la categoria di sottosuolo corrispondente.

- Il grafico della variazione dell'accelerazione con la profondità.
- La tabella con i vari fattori di amplificazione calcolati.

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Strato	S [m]	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
Riporto	3.30	1900.00	360.00	0.35	Rollins (ghiaie)
Argilla	8.90	1850.00	280.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Ghiaia	4.80	2000.00	360.00	0.40	Rollins (ghiaie)
Argilla 2	5.00	1800.00	180.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Ghiaia 2	6.00	2000.00	430.00	0.40	Rollins (ghiaie)
Ghiaia 3	20.00	2050.00	650.00	0.40	Rollins (ghiaie)

Tab. 3 – Modello geofisico

Come si evince dai dati disponibili (cfr. R.06 – relazione sismica e sismotettonica), il bedrock sismico non è stato individuato. Tuttavia, facendo riferimento alle stratigrafie dei sondaggi limitrofi regionale, si discretizza il bedrock ad una profondità di 22 m, al quale viene attribuita una velocità di 650 m/s.

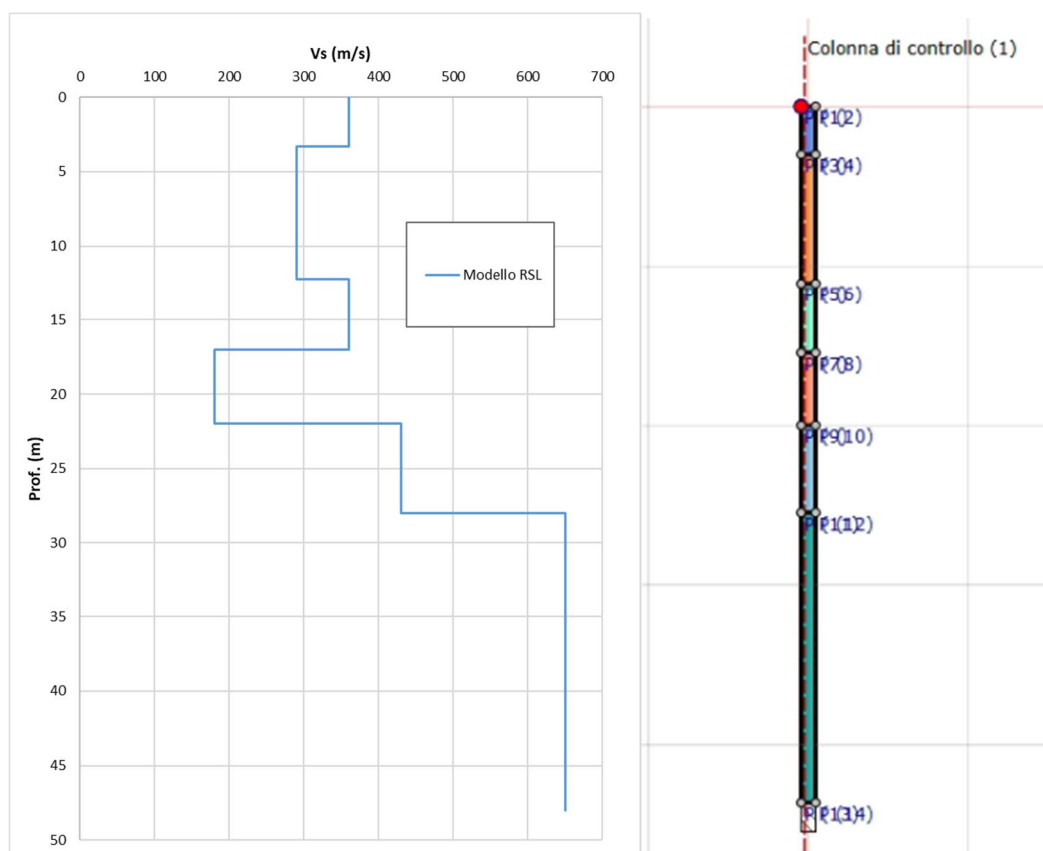


Fig. 8 – Discretizzazione della Vs e modello sismostratigrafico

Di seguito si riportano i grafici di output dell'analisi di risposta sismica locale:

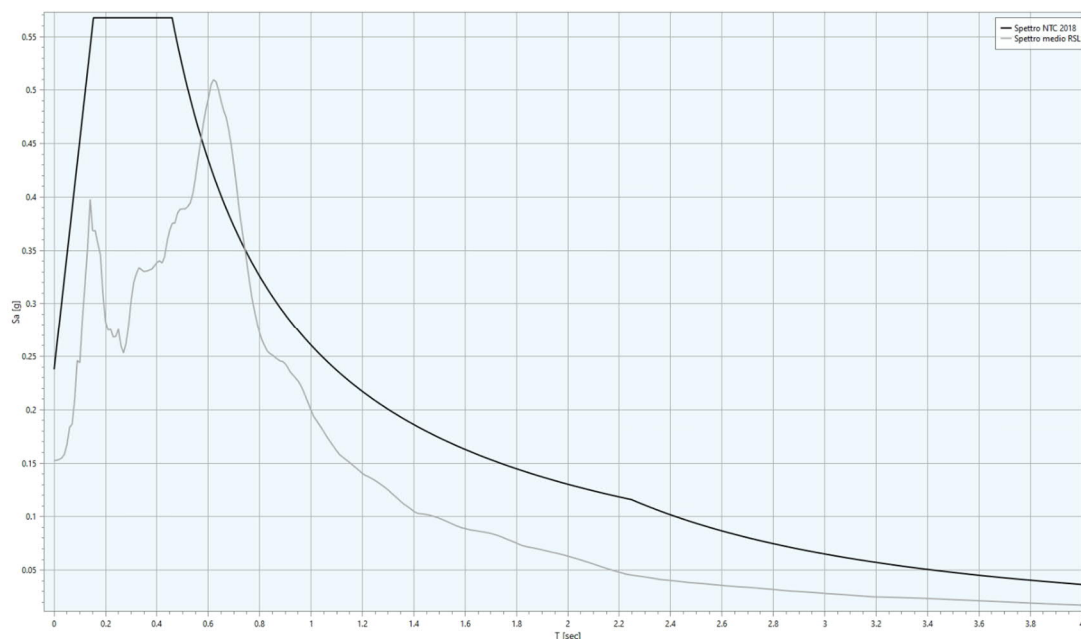


Fig. 9 – Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione per il sito e lo spettro di riferimento da normativa

Come si può constatare, lo spettro semplificato di normativa relativo alla categoria di sottosuolo C risulta sufficientemente cautelativo rispetto allo spettro di RSL.

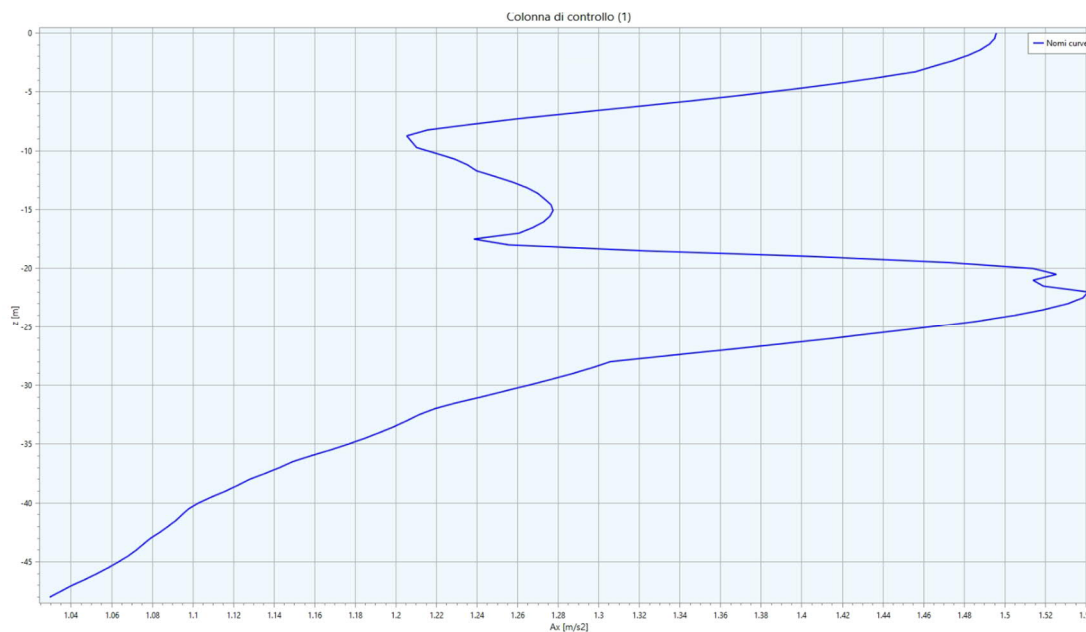


Fig. 10 – Variazione dell'accelerazione con la profondità

In Tab. 4 si riportano i fattori di amplificazione ottenuti per diversi intervalli di periodo.

	<i>RSL</i>
F_{APGA}	0.94
F_{SA1 0.1-0.5}	0.90
F_{SA2 0.4-0.8}	1.89
F_{SA3 0.7-1.1}	1.82
F_{SA4 0.5-1.5}	1.79
F_{H1 0.1-0.5}	0.86
F_{H2 0.5-1.0}	1.86
F_{H3 0.5-1.5}	1.68

Tab. 4 - Fattori di amplificazione

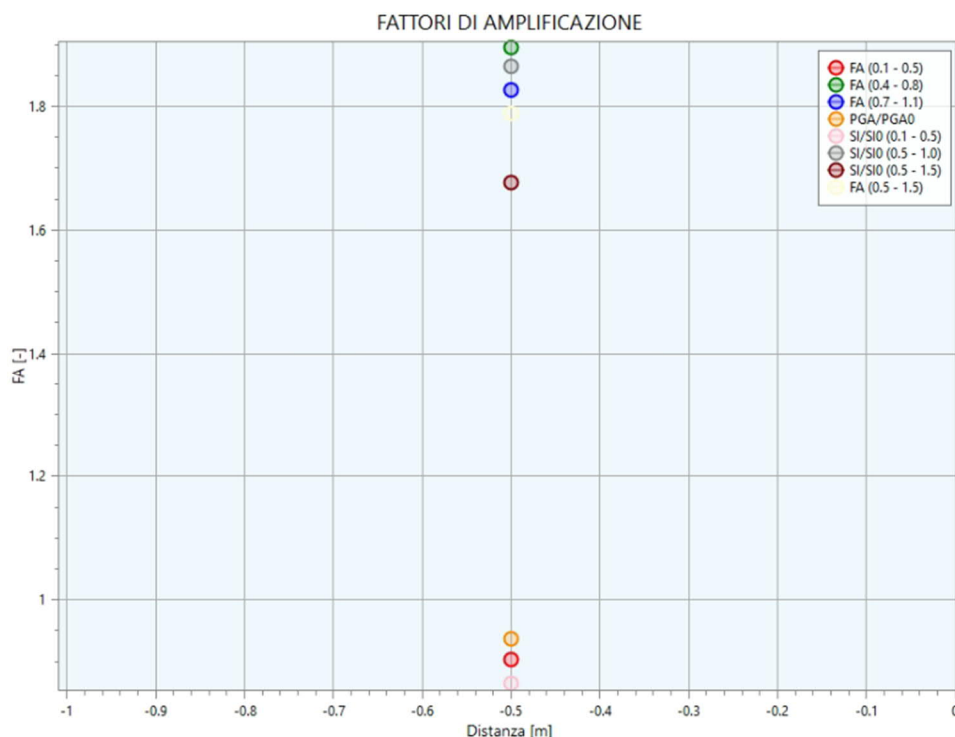


Fig. 11 – Output dei fattori di amplificazione

5 Conclusioni

L'area di ex cava cartografata nelle tavole di Microzonazione sismica del Comune di Modena, ricompresa all'interno della zona "3080" e pertanto all'interno di "Zone di attenzione per instabilità – Cedimenti differenziali", è stata indagata mediante la realizzazione di due prove penetrometriche dinamiche, che hanno consentito di verificare che il materiale di riempimento è costituito da materiali granulari molto consistenti.

Sulla base dei dati disponibili, quindi, si provveduto l'approfondimento di III livello come definito agli allegati A3 e A4 della DGR 2193/2015", normativa attualmente aggiornata dalla DGR 630/2019 e come richiesto dalle Norme di PSC-POC-RUE del Comune di Modena.

Si sono ottenuti i fattori di amplificazione per i diversi intervalli di frequenza, come richiesto dalla normativa.

Nel complesso si valuta che il rischio per cedimenti differenziali di carattere sismico legati alla presenza di depositi di riempimento sia trascurabile, viste le caratteristiche geotecniche del materiale stesso.

Anche il rischio di liquefazione è da considerare nullo, vista l'assenza di depositi granulari fini sotto falda nei primo 20 m da p.c.