

REGIONE MARCHE
PROVINCIA DI FERMO
COMUNE DI FERMO





IMPIANTO DI TRATTAMENTO ANAEROBICO DELLA FRAZIONE ORGANICA DEI
RIFIUTI SOLIDI URBANI PER LA PRODUZIONE DI BIOMETANO

CIG: 9880245C18 – CUP: F62F18000070004

PROGETTO ESECUTIVO

NOME ELABORATO	CLASSE 2.1
RELAZIONE SISMICA	PARTE GENERALE RELAZIONI
	N. TAVOLA 2.1.3
	FORMATO A4
	SCALA /
CODIFICA ELABORATO	23008-OW-C-21-RT-012-BA4-0

00	27/02/2024	PRIMA EMISSIONE	C.FERLA	C. BUTTICE'	R. MARTELLO
REV	DATA	DESCRIZIONE	ESEGUITO	VERIFICATO	APPROVATO

Committente	Progettista indicato	Mandataria
 CITTA' DI FERMO Settore IV e V Lavori Pubblici, Protezione Civile, Ambiente, Urbanistica, Patrimonio, Contratti e Appalti Via Mazzini 4 63900 – Fermo (FM) DOTT. Mauro Fortuna RUP	 Via Resuttana 360 90142 -PALERMO OWAC Engineering Company S.R.L. ING. Rocco Martello Direttore Tecnico UNI EN ISO 9001:2015 N. 30233/14/S UNI EN ISO 45001:2018 N. OHS-4849 UNI EN ISO 14001:2015 N. EMS-9477/S UNI/PDR 74 :2019 N. SGBIM-01/23 UNI/PdR 74:2019 N. 21042BIM	 Via del Cardoncello 22 70022 – Altamura (BA) EDILALTA S.R.L. DOTT. Angelantonio Disabato Socio Mandante  Via Bassa di Casalmoro 3 46041 – Asola (MN) ANAERGIA S.R.L. DOTT. Andrea Parisi Istutore



00	C.FERLA	27/02/2024	C,BUTTICE	27/02/2024	R.MARTELLO	27/02/2024
REV	ESEGUITO	DATA	VERIFICATO	DATA	APPROVATO	DATA



Sommario

1.	PREMESSA	4
2.	INQUADRAMENTO TERRITORIALE.....	5
3.	SCOPO DEL DOCUMENTO.....	6
3.1.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
3.2.	SOFTWARE UTILIZZATI	7
3.3.	CARATTERI LITOSTRATIGRAFICI LOCALI	7
4.	CARATTERISTICHE GEOMECCANICHE	9
5.	CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO.....	13
5.1.	RISULTATI INDAGINE SISMICA SUPERFICIALE MEDIANTE TECNICA MASW.....	13
5.2.	RISULTATI INDAGINE SISMICA PASSIVA HVSR.....	18
5.3.	INQUADRAMENTO MACROSISMICO DEL SITO.....	20
6.	PARAMETRI SISMICI AREA DI PROGETTO	24
6.1.	SEGNALI DI INPUT.....	27
6.2.	PROCEDURA DI CALCOLO CON IL SOFTWARE RSLIII DI GEOSTRU	37
6.3.	DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO SISMICO DI RIFERIMENTO.....	44
6.4.	CURVE DI ATTENUAZIONE DEI TERRENI	45
7.	CONCLUSIONI.....	48



1. PREMESSA

Nella presente relazione vengono analizzate le tematiche progettuali e gli aspetti tecnici relativi alla valutazione della risposta sismica locale necessaria per la caratterizzazione del sito su cui sorgerà l'impianto in progetto.

Le informazioni riguardanti la caratterizzazione sismica e geotecnica dei terreni su cui si esegue lo studio di Risposta Sismica Locale vengono estrapolate dalla relazione geologica 2.1.2-23008-OW-C-21-GE-004-BA0-0-RELAZIONE GEOLOGICA.

Il progetto si riferisce alla realizzazione di un impianto di trattamento anaerobico della FORSU per la produzione di biometano, localizzato in C.da San Biagio del Comune di Fermo, in prossimità del Centro Integrato per la Gestione dei Rifiuti Urbani (CIGRU) gestito dalla società Fermo Asite S.r.l., ed autorizzato con Determina n. 61 del 31/01/2022 e s.m.i. del Settore III della Provincia di Fermo.

In sintesi l'impianto rappresenta l'implementazione e l'efficientamento del CIGRU con particolare riferimento alla minimizzazione degli impatti legati al trattamento delle matrici organiche; l'impianto prevede infatti:

- Il pre-trattamento della FORSU conferita al fine di rendere il rifiuto compatibile con i successivi trattamenti;
- La digestione anaerobica delle matrici organiche del rifiuto per la produzione di biogas;
- Il post-trattamento del digestato prodotto, al fine di ottenere acqua depurata da un lato (tramite l'impianto di depurazione *in situ* previsto) e fertilizzanti conformi alla normativa italiana ed europea dall'altro lato;
- Il post-trattamento del biogas per la produzione di biometano, da utilizzare nel settore dei trasporti tramite compressione su carri bombolai.

L'impianto, con una potenzialità di trattamento di 35.000 t/anno di FORSU, consente la produzione di circa 3.000.000 m³/anno di biometano e circa 6.000 t/anno di fertilizzanti.

Per la modellazione geotecnica dei litotipi presenti nella porzione di sottosuolo ritenuta significativa ai fini dello studio, ci si è avvalsi delle informazioni derivanti da precedenti campagne di indagini 2013 e 2019:

Campagna 2013

- N°9 prove penetrometriche statiche, effettuate con strumento statico da 10



tonn. tipo "TG 63-100 ISM. C";

- N°4 prove di laboratorio sui campioni indisturbati prelevati nel corso dei sondaggi realizzati;

Campagna 2019

- esecuzione di n°4 sondaggi geognostici a carotaggio continuo;
- esecuzione di n°7 prove simiche passive (HVSr);
- esecuzione di n°3 prove sismiche MASW

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area oggetto di intervento ricade geograficamente nella sezione n°315050 della carta in scala 1:10000 della Regione Marche e risulta ubicata nella porzione Sud-occidentale del territorio comunale di Fermo, ad una distanza di circa 3.5 chilometri, in direzione Ovest dalla frazione di Ponte D'Ete Caldarette.

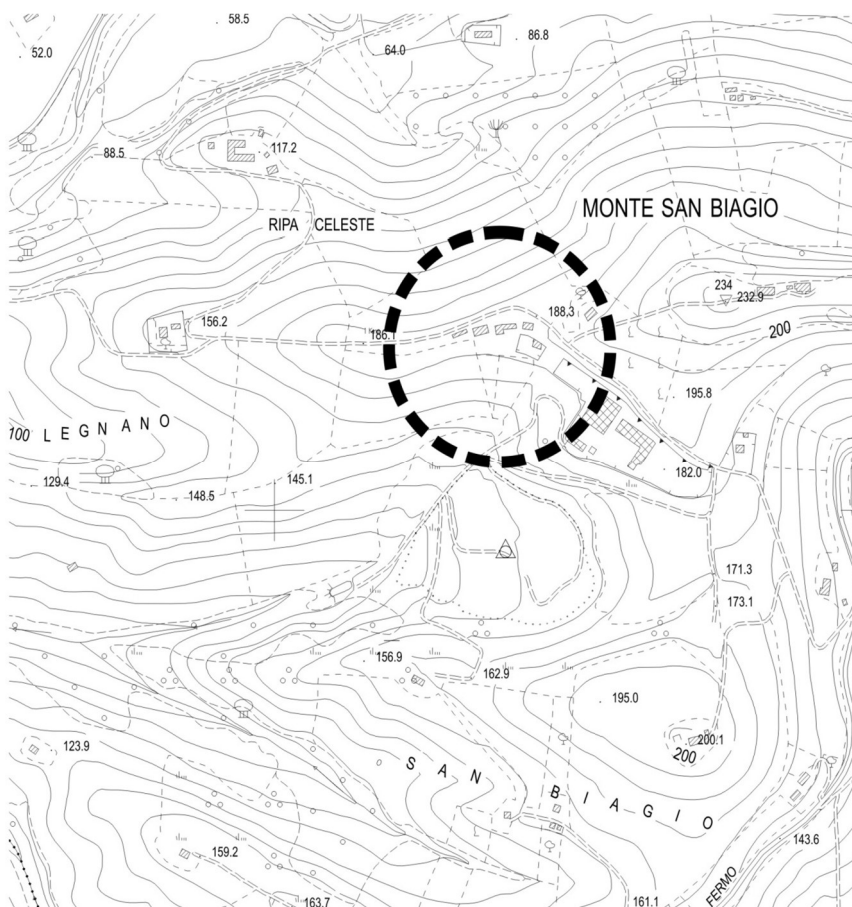


Figura 1: Ubicazione area in esame su base CTR 315050



3. SCOPO DEL DOCUMENTO

L'analisi di risposta sismica locale, per come dettato dalle Norme tecniche sulle costruzioni, è un tipo di studio approfondito che deve essere applicato qualora le costruzioni ricadano in classe d'uso III o IV, quando si riscontrano delle significative inversioni nel profilo di velocità delle onde di taglio o quando la morfologia di superficie e/o stratigrafia non è considerata semplice. Nel nostro caso si attuava uno studio di risposta sismica locale in considerazione del fatto che l'opera che si vuole realizzare rientra in classe d'uso III.

Tale studio permette di valutare le variazioni in termini di ampiezza e frequenza, che subisce il moto sismico (accelerogramma spettro-compatibile) nella sua propagazione dal bedrock sismico ($V_s > 800$ m/s) fino alla superficie a seconda delle caratteristiche fisico-meccaniche degli orizzonti attraversati.

Lo studio di risposta sismica locale si suddivide in diverse fasi:

- Scelta dell'input sismico spettro-compatibile con quello del sito in esame, riferito ad un suolo rigido attraverso un'analisi di disaggregazione per gli stati limite richiesti (nello specifico SLV-SLD-SLO);
- Definizione della stratigrafia compresa nell'intervallo bedrock sismico/superficie e caratterizzazione fisicomeccanica;
- Calcolo dell'output sismico alla profondità richiesta attraverso l'integrazione delle equazioni dinamiche del moto mediante analisi di tipo non-lineare.
- Estrapolazione dei parametri dipendenti di output per la progettazione per gli stati limite richiesti (SLV-SLD-SLO).

3.1. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

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

3.2. SOFTWARE UTILIZZATI

- **Rexel web:** computer aided record selection for code-based seismic structural analysis. Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E. Bulletin of Earthquake Engineering, 8:339-362, 2010 DOI10.1007/s10518-009-9146-1.
- **RSL III:** della GeoStru versione 2022.21.5.990

3.3. CARATTERI LITOSTRATIGRAFICI LOCALI

Attraverso lo studio dei sondaggi geognostici e delle prove penetrometriche realizzate nelle due campagne rispettivamente del 2019 (Moro-Basili) e del 2013 (Cutini) è stato possibile ricostruire il modello geologico 3D dell'area in cui sorgerà l'impianto in progetto. I dati sono stati processati con software dedicati che hanno permesso un'analisi spaziale dei punti noti portando alla ricostruzione di un modello geologico 3D dell'intera area in progetto.

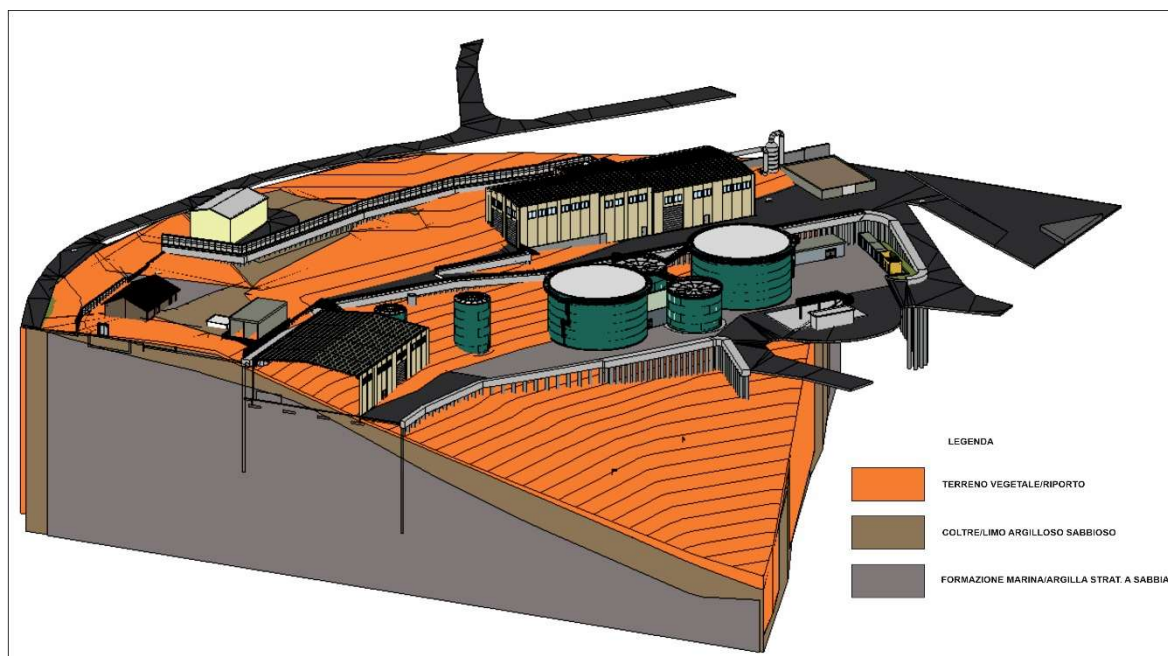


Figura 4: Modello geologico 3D con le opere in progetto

Come si può osservare in figura 4 e in dettaglio nelle sezioni geologiche riportate



nell'Allegato 7 della Relazione Geologica <<2.1.2-23008-OW-C-21-GE-001-BA0-0-RELAZIONE GEOLOGICA>>, è presente uno spessore variabile di sedimenti di genesi continentale (coltre di copertura) prevalentemente crescente da monte verso valle. Tali depositi, di genesi detritico-colluviale, sono composti prevalentemente da sedimenti limoso-argillosi e/o argilloso-sabbiosi derivanti da processi di alterazione e degradazione avvenuti in ambiente subaereo, che hanno interessato i sedimenti marini più antichi retrostanti. Alla base dei terreni di genesi detritico-colluviale suddetti è posto un sub-strato marino Plio-pleistocenico costituito superficialmente da argille sovraconsolidate leggermente marnose di colore avana-nocciola stratificate a rari livelli sabbiosi. La locale successione dei terreni presenti nell'area oggetto di intervento, può essere nel dettaglio quindi così schematizzata:

- a) LIMO ARGILLOSO SABBIOSO > deposito detritico-colluviale (coltre)**
- b) ARGILLA stratificata a SABBIA > formazione marina**

a) LIMO-ARGILLOSO-SABBIOSO (deposito detritico-colluviale): litotipo costituito da sedimenti prevalentemente limoso sabbiosi e subordinatamente argillosi di colore avana nocciola. Materiale piuttosto omogeneo all'interno del quale è presente un quantitativo variabile di tracce organiche sparse e/o in noduli che conferiscono al deposito talora una colorazione più scura, unitamente a rari livelli caratterizzati da un'alta percentuale di concrezioni carbonatiche, distribuite in corpi filamentosi e talora nodulari. Tendenzialmente nella porzione inferiore del deposito si registra una progressiva diminuzione sia del quantitativo di concrezioni carbonatiche che delle tracce organiche. Deposito piuttosto rimaneggiato dalla struttura caotica, di spessore piuttosto contenuto in quanto compreso tra 1.0 e 6.0 mt in gran parte dell'area di intervento, spessore che invece risulta progressivamente crescente sia verso il settore più a valle che verso la porzione più occidentale dell'area di intervento dove raggiunge la potenza massima rispettivamente di 13.0 (S2-2019) e 10.0 mt (S3-2019). Sedimento dal comportamento geotecnico di tipo coerente caratterizzato da proprietà geotecniche variabili e dipendenti dal contenuto naturale d'acqua del sedimento, così come quelle volumetriche dello stesso, con spiccata tendenza al rigonfiamento a seguito di assunzione idrica e conseguente ritiro per effetto di essiccazione e/o perdita di contenuto d'acqua in genere, soprattutto nella porzione superficiale dell'orizzonte dove lo stesso risulta soggetto alle variazioni esogene stagionali.



b) ARGILLA stratificata a SABBIA: (Formazione marina Plio-Pleistocenica) litotipo costituito da un'alternanza stratificata con assetto sub-orizzontale di argille marnose talora limose, di colore nocciola-grigio e sabbie giallo-rossicce disposte in sottilissimi livelli e/o strati. Litotipo decompresso e variamente fessurato nella porzione più superficiale all'interno del quale si riscontra la presenza di numerosi giunti di alterazione variamente orientati e/o sub-verticali, grado di alterazione che rende a luoghi piuttosto difficoltosa la distinzione con i sovrastanti materiali continentali. Nell'individuazione del limite stratigrafico quindi si potrebbero riscontrare delle interpretazioni leggermente differenti rispetto a quanto emerso in passato dagli studi pregressi realizzato nell'area da parte di differenti autori e reperiti nel presente lavoro. A profondità via via crescenti si registra comunque una progressiva diminuzione dello stato di alterazione del deposito e quindi un assetto stratigrafico sempre meno disturbato e quindi più visibile. Materiale piuttosto compatto, caratterizzato da una frattura di tipo concoide testimonianza della presenza di una componente marnosa. Sedimento complessivamente caratterizzato da una netta prevalenza della componente argillosa rispetto a quella sabbiosa, e quindi contraddistinto da un rapporto di stratificazione Argilla/Sabbia maggiore di 10/1, anche se talora, a varie altezze stratigrafiche, i livelli sabbiosi possono presentare degli spessori più significativi.

4. CARATTERISTICHE GEOMECCANICHE

Per la determinazione delle proprietà fisiche e meccaniche dei terreni presenti (granulometria, parametri di resistenza, limiti di consistenza, contenuto d'acqua, peso volume, ecc...) ci si avvalsi dei dati emersi nel corso delle seguenti prove sia in sito che di laboratorio effettuate nel corso dei precedenti studi ubicate come da planimetria allegata.

In particolare, nell'area, in occasione delle diverse indagini sono state realizzate: n.9 prove penetrometriche statiche (Cpt) e prove di laboratorio su un numero consistente di campioni indisturbati prelevati con campionatore tipo "Shelby" nel corso dei sondaggi realizzati, prove che hanno fornito dati in merito alla resistenza di picco e residua dei litotipi presenti (Taglio diretto CD, RS), la granulometria, il grado di plasticità ecc. (limiti di Atterberg, ecc.). I risultati ottenuti per le singole litologie sono di seguito descritte:

a) LIMO ARGILLOSO SABBIOSO: deposito contraddistinto da un contenuto di



acqua naturale variabile e da un comportamento reologico "coerente", composto prevalentemente da sedimenti ascrivibili ai limi e subordinatamente alle argille, inglobanti una discreta frazione sabbiosa. Materiale mediamente compressibile ($E_d=60-110$) classificabile, secondo la carta di Casagrande, come argille di media e alta plasticità (CL-CH). Il grado di plasticità del deposito risulta fortemente condizionato dal contenuto d'acqua. I valori di resistenza a breve termine sono compresi tra un intervallo piuttosto ampio e da cui deriva una coesione non drenata caratteristica (C_{uk}) pari a 1.2 kg/cm^2 , mentre si registra una coesione intercetta di picco (C') che va da 0.0 a 0.03 Kg/cm^2 ed un angolo di attrito compreso tra 22° e 25° . In condizioni residue si riscontra un annullamento della coesione (0.0 Kg/cm^2) e una diminuzione dell'angolo di attrito che viene compreso tra 18° e 20° . Litotipo quindi dalle caratteristiche geotecniche discrete, comunque piuttosto variabili e dipendenti dal contenuto naturale d'acqua del sedimento, così come quelle volumetriche dello stesso, con spiccata tendenza al rigonfiamento a seguito di assunzione idrica e conseguente ritiro per effetto di essiccazione e/o perdita di contenuto d'acqua in genere.

- b) ARGILLA stratificata a SABBIA: litotipo composto da sedimenti prevalentemente coesivi (argille 57,75%, limo 40,43%) mediamente consolidati, stratificati a sottili livelli e/o veli sabbiosi (sabbia 1,72%) classificabile nel complesso, secondo Casagrande, nelle categorie delle argille di bassa e medio-alta plasticità (CL-CH). Materiale fortemente alterato e decompresso nella porzione superiore, grado di alterazione che diminuisce progressivamente all'aumentare della profondità, così come la componente sabbiosa che può essere quindi considerata, da un punto di vista geotecnico, trascurabile. Deposito piuttosto consistente ($I_c=1.29$) dalle buone qualità geomeccaniche contraddistinto da una coesione non drenata (C_u) compresa tra $2.2.$ e 2.8 Kg/cm^2 da cui deriva una coesione non drenata caratteristica (C_{uk}) pari a 2.4 kg/cm^2 e da una spiccata differenza tra i valori di resistenza di picco ($C' = 0.2-0.3 \text{ Kg/cm}^2$, $\phi'=27-31^\circ$) e residui ($C'= 0.0 \text{ Kg/cm}^2$, $\phi'=17-19^\circ$). Nel dettaglio le proprietà fisiche e meccaniche dei singoli litotipi ottenute dalla elaborazione e correlazione dei dati sperimentali secondo le interpretazioni di Sanglerat, Terzaghi, D'Appollonia ed altri recenti autori delle prove penetrometriche, unitamente ai numerosi altri ricavati da prove geotecniche di laboratorio sono state schematicamente riassunte e riportate nella seguente tabella:

Tabella 1_Parametri geotecnici desunti dalle prove



PARAMETRI	Unità di misura	Litotipo "a"	Litotipo "b"
		Limo argilloso sabbioso	Argilla strat. a sabbia
Classificazione (USCS-AGI)		CH-CL	CL
γ	(g/cm ³)	1,90	2,0
γ_{sat}	(g/cm ³)	2,00	2,10
γ_d	(g/cm ³)	1,6	1,7-1,8
γ'_k	(g/cm ³)	1,90	2,00
Wn	%	18-22	17.3-19.6
WL	%	-	43,91
Wp	%	-	25,26
Ip		-	18,65
Ic		-	1,30
Il		-	-0,30
Cu	(Kg/cm ²)	0,9-1,8	2,2-2,8
Cu _k	(Kg/cm ²)	1,2	2,4
C'	(Kg/cm ²)	0,0-0,5	0,30-0,40
C' _k	(Kg/cm ²)	0,02	0,30-0,40
C' _R	(Kg/cm ²)	0	0
ϕ'	(°)	22-25°	23-27°
ϕ'_k	(°)	23°	23°
ϕ'_R	(°)	19-20°	17-10°
Ed	(Kg/cm ²)	60-110	120-250
ν		0,35	0,45
α		0,4	0,3

γ = peso di volume del terreno; γ_{sat} = peso di volume saturo; γ_d = peso di volume secco; Wn= contenuto d'acqua naturale; Wp= limite plastico; WL= limite liquido; Ip= indice plastico; Ic= indice di consistenza; Il= indice di liquidità; Cu= coesione non drenata; Ed= modulo di deformazione; C'= coesione drenata di picco; C'_R= coesione drenata residua; ϕ' = angolo di attrito di picco; ϕ'_R = angolo di attrito residuo; γ'_k , Cu_k, C'_k, ϕ'_k = parametri caratteristici del terreno (DM18); ν = coefficiente di Poisson; α = coefficiente di adesione palo-terreno.

I parametri caratteristici sono stati determinati secondo la formula semplificata di Schneider: X_k X_{med}

$$X_k = X_{med} \left(1 + \frac{COV}{2} \right)$$

dove COV è il coefficiente di variazione e Schneider raccomanda i seguenti valori:

Angolo di attrito ϕ 10%; Coesione 40%; Modulo di comprimibilità 40%.



Non sono stati forniti i parametri geotecnici dei livelli concrezionati presenti all'interno della coltre (litotipo "a"), in quanto difficilmente determinabili sia per la variabilità laterale, sia per il diverso comportamento reologico di questi materiali in base al loro contenuto naturale d'acqua, così come non sono stati riportati i parametri riferiti ai livelli sabbiosi presenti all'interno della formazione marina (litotipo "b") in quanto si ritiene che il contributo offerto dalla frazione sabbiosa nel comportamento reologico complessivo del materiale, in questo caso (rapporto di stratificazione Argilla/Sabbia $>10/1$), può praticamente essere considerato trascurabile.

5. CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO

La caratterizzazione sismica del sito è stata effettuata attraverso l'esecuzione di n.3 indagini geofisiche mediante il metodo di analisi spettrale delle onde di superficie (Rayleigh) con tecnica MASW che ha permesso di risalire alle velocità medie di propagazione delle onde di tagli Vs nei principali sismostrati individuati e quindi al valore del parametro VSeq, necessario per la definizione della categoria di suolo di fondazione (Nuove NTC -D.M. 17 gennaio 2018 s.m.i.). I dati emersi dalle prove suddette sono stati elaborati congiuntamente (fit congiunto) con le n.7 misure di sismica passiva HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) denominate in planimetria Trn, misure queste che hanno permesso tra l'altro di risalire alla frequenza fondamentale di vibrazione del sito.

5.1. RISULTATI INDAGINE SISMICA SUPERFICIALE MEDIANTE TECNICA MASW

L'indagine effettuata dalla ditta GE.CO, sempre all'interno della campagna di indagine del 2019, è stata realizzata, attraverso n°3 stese denominate in planimetria MASW1, MASW2 e MASW3 ciascuna della lunghezza complessiva di 46 mt., in cui sono stati posizionati n. 24 geofoni da 4.5 Hz ad una distanza interfonica di 2.0 mt, posizionati all'interno dell'area progetto così come rappresentato nella figura.



Figura 6: Ubicazione n.3 MASW (Campagna 2019)

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata è costituita da:

- un sistema di energizzazione per le onde P: la sorgente è costituita da una



mazza del peso di 8 Kg battente verticalmente su piastra circolare in acciaio del diametro di 25 cm posta direttamente sul p.c. per la generazione prevalentemente di onde P e secondariamente di onde SV, in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali;

- un sistema di ricezione: costituito da 24 geofoni verticali monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile a massa sospesa (peso della massa 12.2 gr) con frequenza propria 4.5 Hz (Masw), ovvero dei trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche longitudinali prodotte da una specifica sorgente;
- sistema di acquisizione dati: Sismografo Ambrogeo (modello ECHO 2010) con memoria dinamica a 32 bit, dotato di hard disk, in grado di memorizzare i dati acquisiti in formato SEG2., n° 2 cavi sismici telemetrici di 60 m ciascuno, il sistema è in grado di registrare su memoria il segnale proveniente da ciascun canale dal sistema di ricezione;
- un sistema di trigger: consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la mazza colpisce la base di battuta (piastra metallica), consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e fissare l'inizio della registrazione.

Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente parallelamente all'array) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 2- 100Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa tra i 10m ed i 50m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente e presenta una maggiore affidabilità per profondità di circa 20m. Il risultato finale del processo di elaborazione è il profilo verticale delle velocità delle onde S. I vantaggi della tecnica M.A.S.W. possono essere così riassunti:

- particolarmente indicata per terreni attenuanti ed ambienti rumorosi;
- è in grado di evidenziare inversioni di velocità nel profilo di velocità;
- buona risoluzione.

Schematicamente il processo di analisi è il seguente:

- Creazione dello spettro FK;



- Ricerca del miglior fitting fra la curva di dispersione sperimentale e la curva di dispersione teorica;
- Profilo di velocità delle onde s.

Il risultato finale del processo di elaborazione è il profilo verticale delle velocità delle onde S. I vantaggi della tecnica M.A.S.W. possono essere così riassunti: I limiti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali ed omogenei, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata sia dalla presenza di pendenze significative superiori a 20°. Nell'area indagata le condizioni sopra riportate sono quasi del tutto rispettate. Si rammenta in ogni caso che la valutazione delle velocità e degli spessori dei singoli strati viene effettuata con un margine di incertezza, insita proprio nei metodi geofisici, che si aggira generalmente attorno al 10-20 %. La "copertura" dei tiri sulla base sismica è stata tale da consentire una corretta e dettagliata ricostruzione del campo di velocità locale fino alla profondità stabilita dall'indagine. L'elaborazione è stata eseguita tramite il software MASW (Roma, 2007). L'acquisizione è stata eseguita posizionando i 24 geofoni da 4.5 Hz, secondo la seguente configurazione spaziale e temporale:

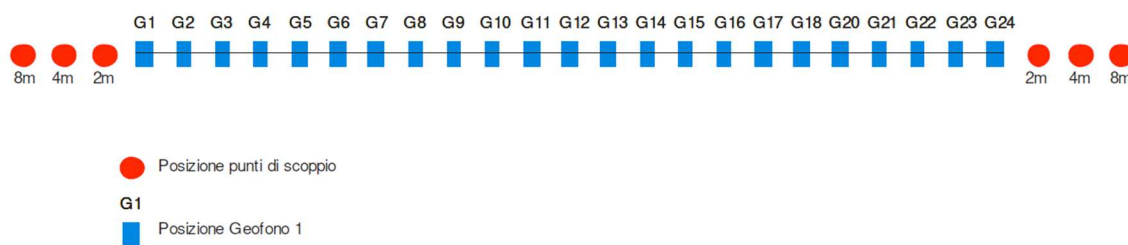


Figura 7: Geometria di acquisizione ed ubicazione punti di energizzazione.

Lunghezza stendimento ricevitori: 46,0 m; n° geofoni: 24; distanza intergeofonica: 2,0 m; n° punti di energizzazione: 6; offset sorgenti: 2 m, 4 m, 6 m; durata acquisizione 1024 ms; intervallo di campionamento 1 ms.

Attraverso l'analisi congiunta delle curve sperimentali di dispersione lungo i tre stendimenti e le misure sismiche passive realizzate in prossimità dei rispettivi stendimenti sono state determinate le velocità medie di propagazione delle onde di tagli Vs nei principali sismostrati individuati e quindi al valore del parametro VSeq nei primi 30 mt di profondità.

I risultati delle rispettive analisi congiunte possono essere così riassunti:



Masw 1+ HVSr (Tr7)

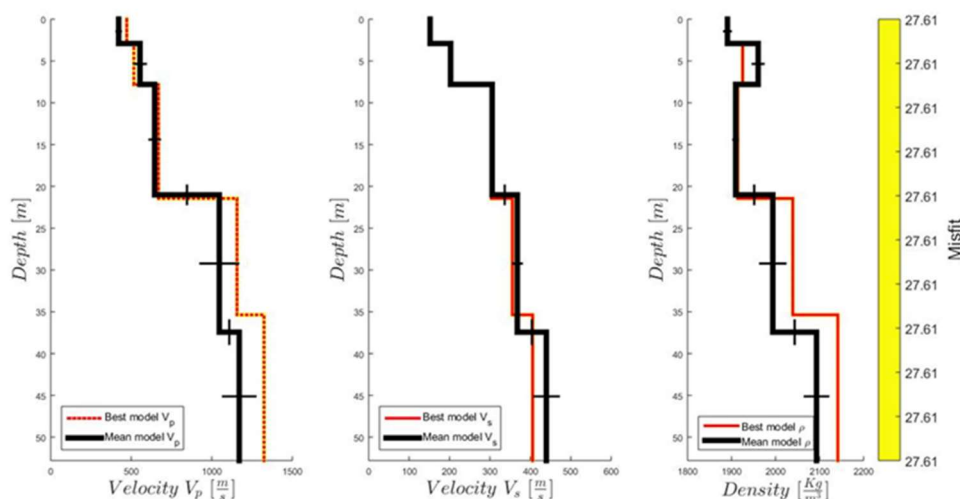
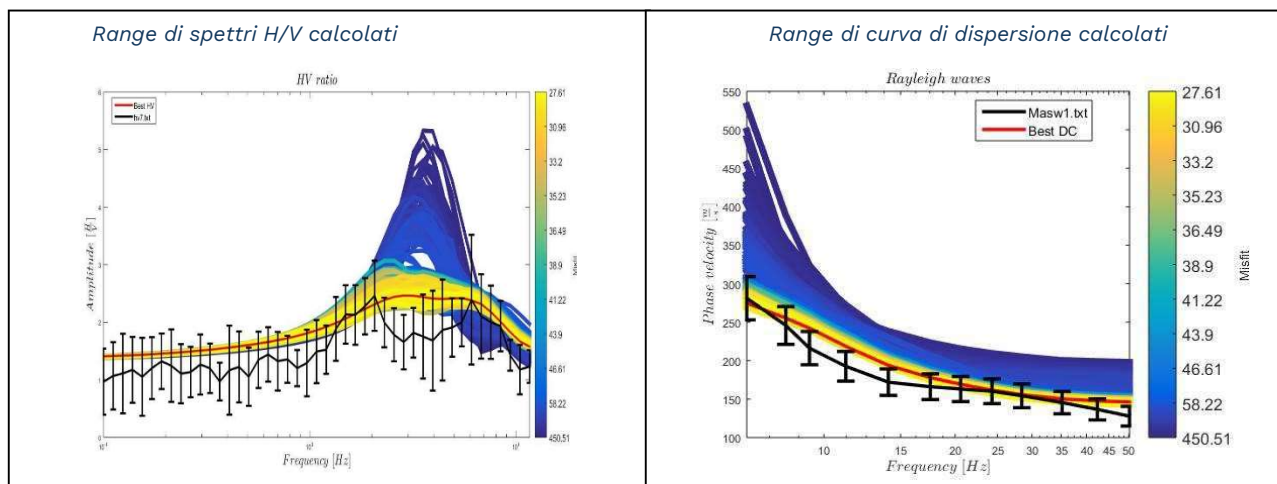
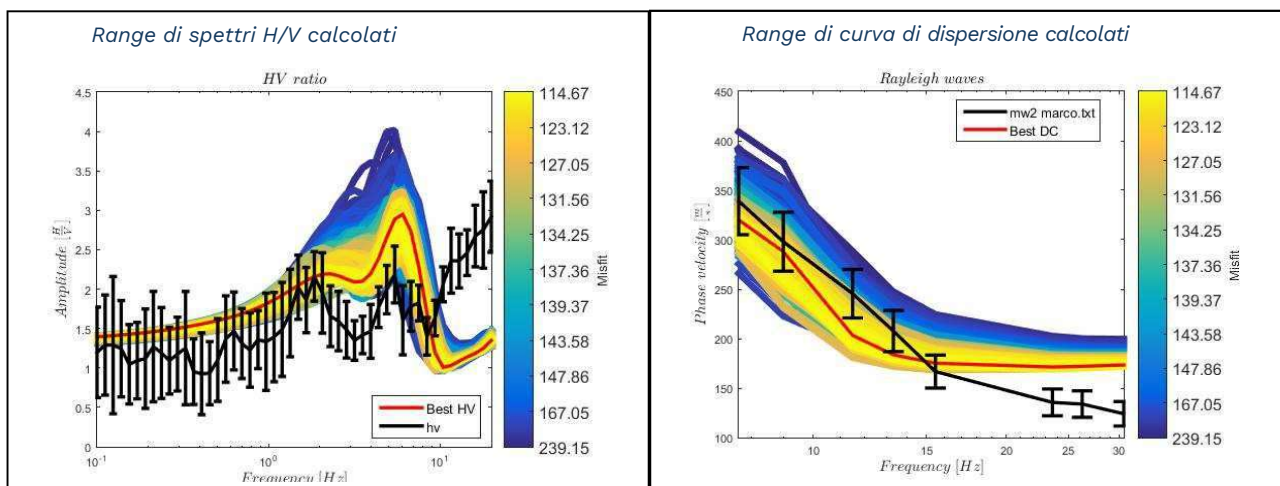


Figura 8: Masw 1, HVSr Tr7. Parametri di input per la modellazione (sopra)- Range di velocità P, S e densità calcolati (sotto)

Masw 2 + HVSr (Tr4)



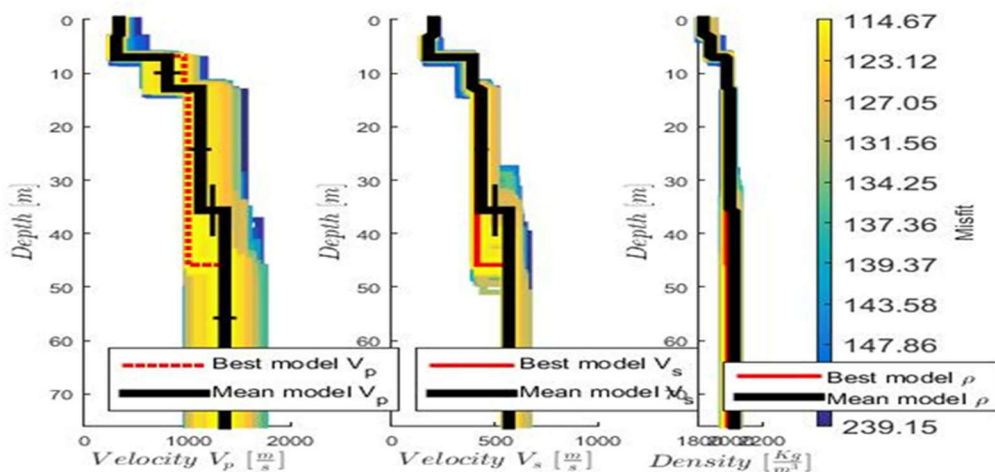


Figura 9: Masw 2, HVSR Tr4. Parametri di input per la modellazione (sopra)- Range di velocità P, S e densità calcolati (sotto)

Masw 3 + HVSR (Tr1)

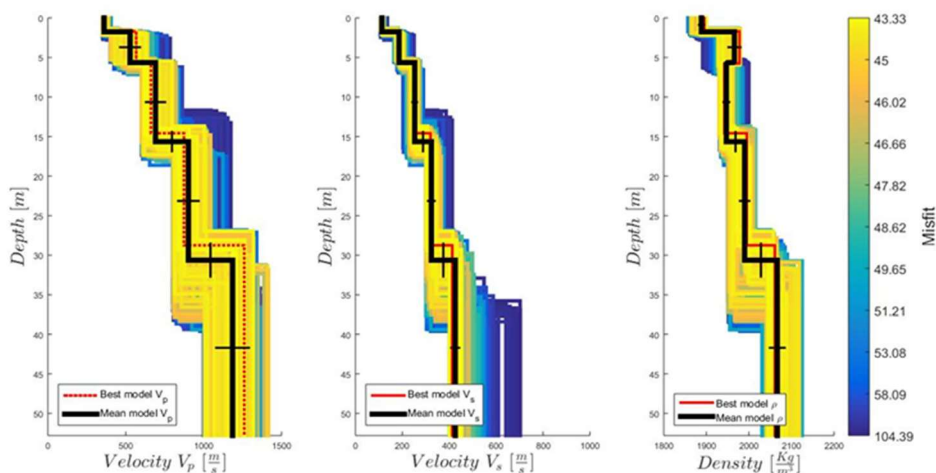
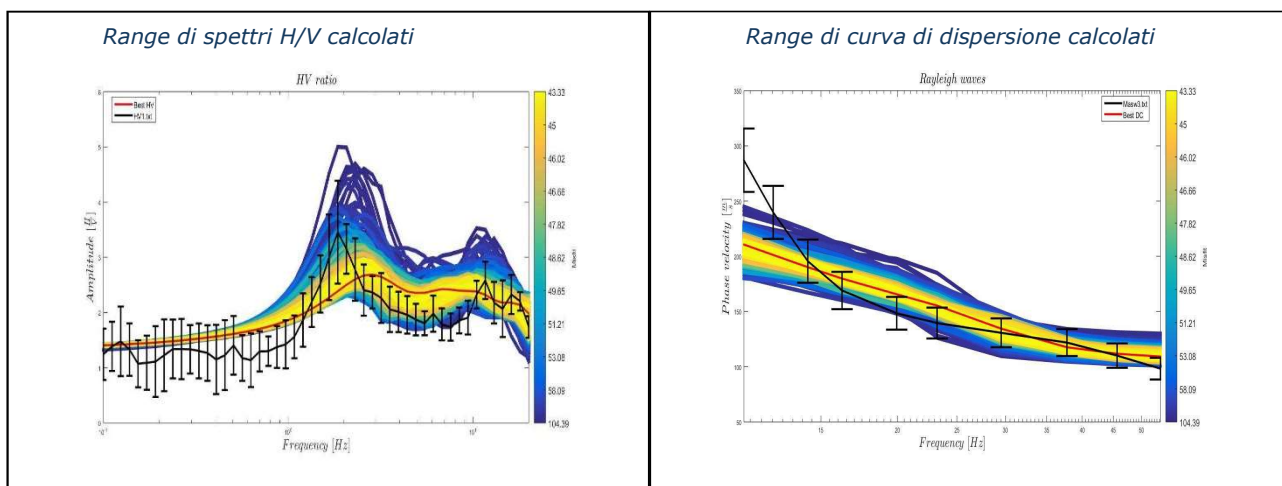


Figura 10: Masw 3, HVSR Tr1. Parametri di input per la modellazione (sopra)- Range di velocità P, S e



densità calcolati (sotto)

Tale indagine, scaturita da un'analisi comparativa su tutte le soluzioni disponibili, ha permesso di calcolare la velocità in $V_{s,eq}$:

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

con:

h_i spessore dell'i-esimo strato

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido con V_s non inferiore a 800 m/s.

Dall'indagine sono scaturite le seguenti velocità, calcolate a partire dall'attuale piano campagna.

Masw1 VSeq = 263 m/sec.

Masw2 VSeq = 317 m/sec.

Masw3 VSeq = 248 m/sec

Alla luce dei risultati ottenuti, il suolo di fondazione in oggetto può essere assimilato, facendo riferimento alla normativa vigente (DM 17/01/18) ad una "categoria di suolo di Tipo C" depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 mt, 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.

5.2. RISULTATI INDAGINE SISMICA PASSIVA HVSR

Dalla relazione indagini risulta l'esecuzione n.7 prove sismiche passive (HVSR), le quali hanno permesso di individuare le discontinuità sismiche presenti nonché la ricostruzione della profondità del locale sub-strato geologico (o meglio bedrock geofisico), parametro questo di fondamentale importanza per la redazione dello



studio Risposta Sismica Locale. Inoltre attraverso tale metodologia è stato possibile ricavare la frequenze caratteristiche di risonanza nei vari punti del sito oggetto di intervento, dove la conoscenza di tale parametro risulta fondamentale per il corretto dimensionamento delle strutture in termini di risposta sismica locale, in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare manufatti aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi in caso di sisma.

Dall'indagine eseguita, sono emerse le seguenti velocità di propagazione delle onde di taglio valutate nei primi 30 mt di terreno a partire dall'attuale piano di campagna ($V_{s,eq}$):

Tabella 3_Velocità di propagazione delle onde di taglio valutate nei primi 30 m.

	Tr1	Tr2	Tr3	Tr4	Tr5	Tr6	Tr7
$V_{s,eq}(m/s)$	323	328	309	327	341	341	352

Nel caso specifico, anche alla luce dei risultati della sismica passiva effettuata da cui sono emersi dei valori di V_s compresi tra 309 e 352 m/sec, nel caso il progettista volesse adottare la procedura semplificata per il dimensionamento dell'intervento in progetto, il suolo di fondazione del lotto in oggetto può essere assimilato, facendo riferimento alla normativa vigente (DM 17/01/18) ad una "categoria di suolo di tipo "C".

Nella valutazione della categoria di suolo e nell'approccio alla progettazione strutturale delle singole opere in progetto, non vanno comunque trascurate le informazioni acquisite con l'indagine sismica circa la frequenza di risonanza del sito.

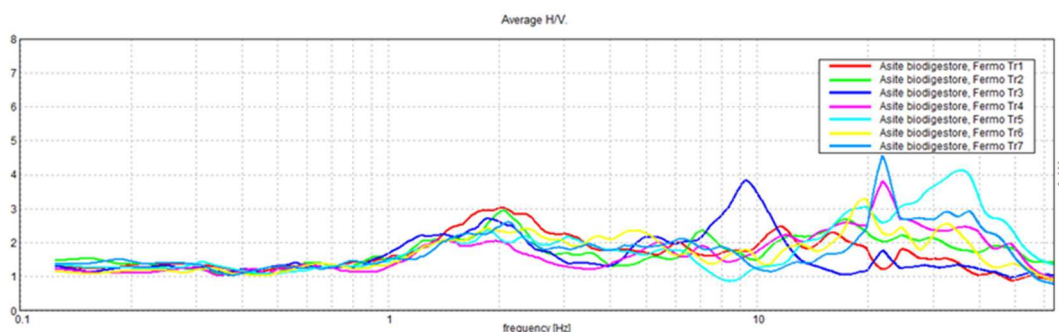


Figura 11: Confronto tra la curva H/V sperimentale delle sette stazioni misurate

Infatti nel caso specifico sono state individuate delle frequenze di risonanza, escludendo quelle maggiori di 10 Hz, ingegneristicamente non significative, comprese tra 1.5 e 2.5 comune a tutte le verticali, mentre distinguendo le singole



tracce si evidenziano delle frequenze di risonanza locali rispettivamente a:

4,5 Hz (Tr6 Tr7); 5,0 Hz (Tr1 e Tr3); 5,0-6,5 Hz (Tr4 e Tr5); 6,0-7,0 Hz (Tr2)

Ovviamente sarà cura del progettista, al fine di evitare pericolosi fenomeni di doppia risonanza in caso di sisma, progettare le strutture con frequenze fondamentali di oscillazione lontane (superiori per un fattore di moltiplicazione di almeno 1.4, o meglio, minori) da quelle tipiche del terreno nel sito specifico di edificazione.

5.3. INQUADRAMENTO MACROSISMICO DEL SITO

Nello studio di RSL è di fondamentale importanza inserire un'accurata analisi della sismicità storica dell'area in esame. La consultazione dei database resi disponibili sulla rete internet da parte dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, rende oggi questa operazione molto più semplice di un tempo. Nello specifico dall'esame del Database Macrosismico Italiano DBMI15 dei terremoti utilizzato per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15, si evince che l'area di interesse è caratterizzata da una sismicità medio-alta. Di seguito si riporta il grafico temporale della distribuzione dei terremoti e la tabella delle registrazioni disponibili per il comune di Fermo (FM), ovviamente nel catalogo non sono ancora presenti gli eventi sismici registrati nel periodo 08/16-01/2017.

Tabella 4_Storico dei terremoti area di Fermo

File downloaded from CPTI15 - DBMI15					
Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015 - Database Macrosismico Italiano 2015					
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia					
Seismic history of	Fermo				
PlaceID	IT_52485				
Coordinates (lat, lon)	43.162, 13.718				
Municipality (ISTAT 2015)	Fermo				
Province	Fermo				
Region	Marche				
No. of reported earthquakes	95				
Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Epicentral area	NMDP	Io	Mw
6-7	1540 04 08	Fermo	1	6-7	4.86
3-4	1672 04 14 15 45	Riminese	92	8	5.59
6	1741 04 24 09 20	Fabrianese	135	9	6.17
F	1743 02 20	Ionio settentrionale	84	9	6.68
F	1744 05 25	Costa pesarese	5	5	4.59
4	1747 04 17	Appennino umbro-marchigiano	63	9	6.05



4	1786 12 25 01	Riminese	90	8	5.66
6	1873 03 12 20 04	Appennino marchigiano	196	8	5.85
4-5	1875 03 17 23 51	Costa romagnola	144	8	5.74
5	1875 12 06	Gargano	97	8	5.86
F	1876 05 22 00 30	Spoletto	14	5-6	4.57
F	1877 08 24 02 45	Lazio meridionale	54	7	5.21
3	1878 09 15 07 20	Valle Umbra	34	8	5.46
3	1879 02 23 18 30	Valnerina	15	8	5.59
4	1881 03 11 22 50	Valle Umbra	15	5	4.51
4-5	1881 09 10 07	Chietino	43	7-8	5.41
F	1882 05 26 04 15	Cascia	16	5	4.45
5	1882 08 16	Costa ascolana	13	7	5.15
4-5	1884 01 10	Atri	12	5-6	4.63
F	1887 05 26	Jesi	19	5	4.44
3	1889 12 08	Gargano	122	7	5.47
3	1895 08 09 17 38 20.00	Adriatico centrale	103	6	5.11
5-6	1895 10 25 12 10	Fermo	12	5	4.16
3	1897 05 28 22 40 02.00	Ionio	132	6	5.46
5	1897 09 21	Marche settentrionali	44	7	5.4
4	1899 06 22 13 20	Corridonia	30	5	4.08
F	1901 09 25 23 40	Costa pesarese	9	5	4.23
F	1904 09 02 11 21	Maceratese	59	5-6	4.63
4	1907 01 23 00 25	Adriatico centrale	93	5	4.75
5	1908 03 17 03 59	Marche meridionali	54	5-6	4.61
4	1908 11 16 16 28	Fermo	6	4	3.7
4	1909 01 13 00 45	Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
4	1914 10 27 09 22	Lucchesia	660	7	5.63
5-6	1915 01 13 06 52 43.00	Marsica	1041	11	7.08
5	1916 05 17 12 50	Riminese	132	8	5.82
4	1916 08 16 07 06 14.00	Riminese	257	8	5.82
4	1916 11 16 06 35	Alto Reatino	40	8	5.5
4	1917 03 21 00 30	Monti Sibillini	21	5	4.44
3	1917 04 26 09 35 59.00	Alta Valtiberina	134	9-10	5.99
3	1917 11 05 22 47	Costa anconetana	26	6	5.22
2	1918 11 10 15 12 28.00	Appennino forlivese	187	9	5.96
2	1919 06 29 15 06 13.00	Mugello	565	10	6.38
4	1922 06 08 07 47	Valle del Chienti	47	6	4.73
2	1922 10 11 06 43 42.00	Costa anconetana	20	5	4.34
2-3	1922 12 29 12 22 06.00	Val Roveto	119	6-7	5.24
5	1923 07 12 20 49	Marche meridionali	20	5	4.28
2-3	1924 01 02 08 55 13.00	Senigallia	76	7-8	5.48
2-3	1925 09 24 13 33 46.00	Molise occidentale	50	7	5.26
2	1927 10 11 14 45 08.00	Marsica	81	7	5.2
3-4	1930 04 07 17 17 18.00	Monti Sibillini	28	5-6	4.5



3-4	1930 07 23 00 08	Irpinia	547	10	6.67
4	1930 08 04 15 02 23.00	Marche meridionali	24	5-6	4.44
6	1930 10 30 07 13	Senigallia	268	8	5.83
3-4	1933 09 26 03 33 29.00	Maiella	325	9	5.9
5	1934 11 30 02 58 23.00	Adriatico settentrionale	51	5	5.3
4-5	1943 01 16	Monti Sibillini	22	6-7	5.04
3	1943 01 29	Monti Sibillini	50	6-7	4.94
6	1943 10 03 08 28 29.00	Ascolano	170	8	5.67
5	1950 09 05 04 08	Gran Sasso	386	8	5.69
4	1951 08 08 19 56	Gran Sasso	94	7	5.25
6	1951 09 01	Monti Sibillini	80	7	5.25
2	1957 11 11 21 40	Costa anconetana	50	5	4.5
NF	1958 06 24 06 07	Aquilano	222	7	5.04
NF	1962 01 23 17 31	Costa pesarese	49	5	4.35
3	1969 09 26 23 40 39.00	Teramano	97	5	4.39
3	1971 02 11 18 49 21.00	Valle del Chiascio	71	6	4.61
3	1971 10 04 16 43 32.60	Valnerina	43	5-6	4.51
F	1972 06 14 18 55 52.54	Costa anconetana	17		4.68
4	1979 09 19 21 35 37.00	Valnerina	694	8-9	5.83
4	1980 11 23 18 34 52.00	Irpinia-Basilicata	1394	10	6.81
NF	1983 11 09 16 29 52.00	Parmense	850	6-7	5.04
4	1984 04 29 05 02 59.00	Umbria settentrionale	709	7	5.62
3	1984 05 11 10 41 49.27	Monti della Meta	342	7	5.47
3	1985 05 01 16 57 35.00	Ascolano	51	5	4.09
4	1986 10 13 05 10 00.31	Monti Sibillini	322	5-6	4.46
6	1987 07 03 10 21 57.64	Costa Marchigiana	359	7	5.06
5	1987 09 04 16 42 49.60	Costa Marchigiana	75	6	4.66
NF	1992 10 24 18 44 48.60	Monti della Laga	32	5	4.08
3	1995 12 30 15 22 08.73	Fermano	106	5	4.19
3	1996 01 01 12 21 41.54	Maceratese	91	5-6	4.2
3	1996 01 22 18 37 44.36	Fermano	76	5	3.96
NF	1996 01 22 23 14 00.09	Maceratese	45	5	3.66
2-3	1997 09 03 22 07 29.70	Appennino umbro-marchigiano	62	6	4.54
5	1997 09 26 00 33 12.88	Appennino umbro-marchigiano	760	7-8	5.66
5-6	1997 09 26 09 40 26.60	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5.97
5	1997 10 03 08 55 22.07	Appennino umbro-marchigiano	490		5.22
5	1997 10 06 23 24 53.29	Appennino umbro-marchigiano	437		5.47
4-5	1997 10 14 15 23 10.64	Valnerina	786		5.62
4	1998 04 05 15 52 21.01	Appennino umbro-marchigiano	395		4.78
3	2003 03 29 17 42 13.74	Adriatico centrale	68		5.43
3	2003 05 25 17 15 13.95	Ascolano	88	4-5	3.81
3	2004 12 09 02 44 25.29	Teramano	213	5	4.09
3	2005 04 12 00 31 51.61	Maceratese	131	4	3.74
4-5	2006 04 10 19 03 36.67	Maceratese	211	5	4.06
3	2006 10 21 07 04 10.01	Anconetano	287	5	4.21

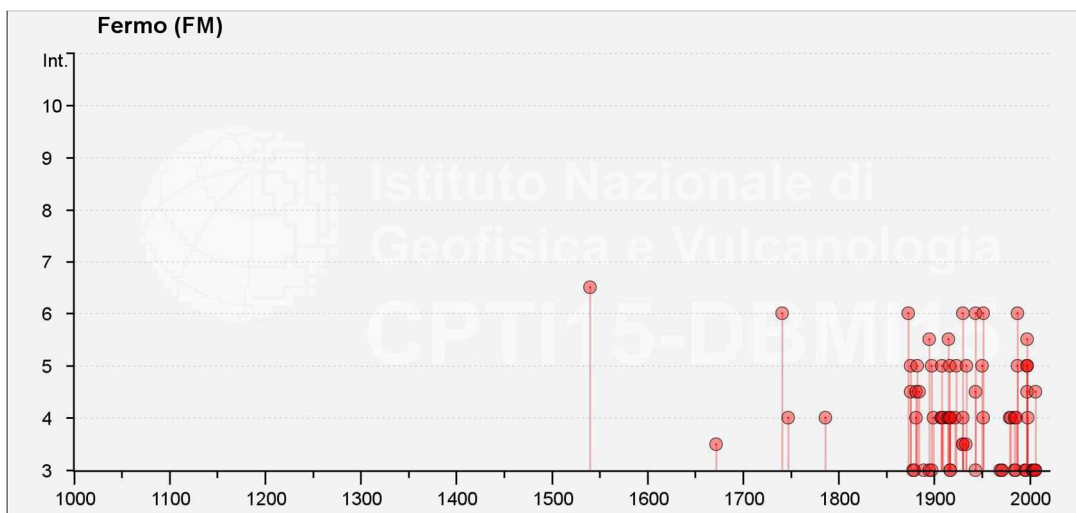
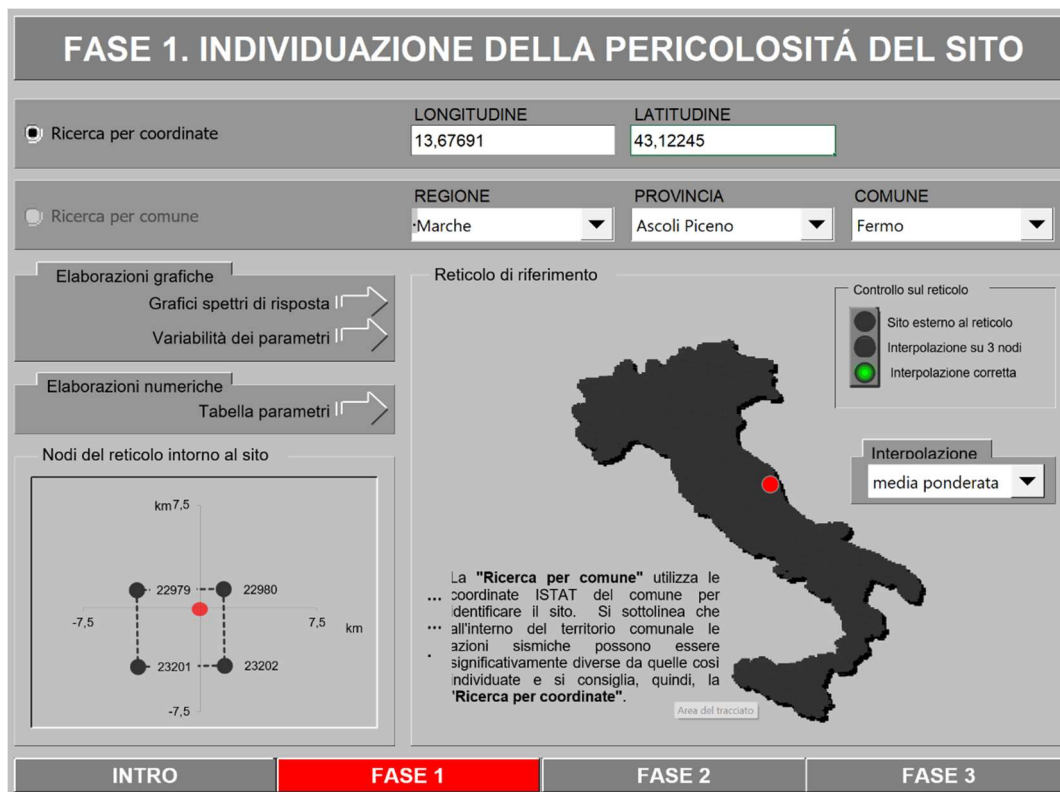


Figura 12: Distribuzione temporale eventi sismici avvenuti a Fermo

6. PARAMETRI SISMICI AREA DI PROGETTO

Per la determinazione dei parametri sismici dell'area in progetto è stato utilizzato il foglio di calcolo reso disponibile dal CSLLPP con ricerca per coordinate (Spettri-NTCver.1.0.3.).



FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

☒ Ricerca per coordinate
 LONGITUDINE: 13,67691
 LATITUDINE: 43,12245

☐ Ricerca per comune
 REGIONE: Marche
 PROVINCIA: Ascoli Piceno
 COMUNE: Fermo

Elaborazioni grafiche
 Grafici spettri di risposta
 Variabilità dei parametri

Elaborazioni numeriche
 Tabella parametri

Nodi del reticolo intorno al sito

km 7,5
 -7,5 22979 22980 7,5 km
 -7,5 23201 23202

Reticolo di riferimento

Controllo sul reticolo
☒ Sito esterno al reticolo
☐ Interpolazione su 3 nodi
☒ Interpolazione corretta

Interpolazione
 media ponderata

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

Area del tracciato

INTRO **FASE 1** FASE 2 FASE 3

Figura 13. Estratto da Spettri-NTCver.1.0.3. Localizzazione area

L'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una "pericolosità sismica di base", in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I risultati dello studio di pericolosità sono forniti, in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non distano più di 10 km) e nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale:

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima a_g , del valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale F_0 , del periodo di inizio del tratto costante dello spettro in accelerazione orizzontale T_c^* ;
- per diverse probabilità di superamento in 50/75/100 anni e/o diversi periodi di ritorno T_R .

Pertanto, per individuare, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le



corrispondenti azioni sismiche occorre fissare:

- la vita di riferimento V_R della costruzione;
- le probabilità di superamento nella vita di riferimento PVR associato a ciascuno degli stati limite considerati.

Infatti, fissata la vita di riferimento V_R , T_R è esprimibile in funzione di PVR mediante l'espressione:

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

La vita di riferimento è calcolata come:

$$V_R = V_n * C_u$$

dove V_n è la vita nominale dell'opera e C_u la classe d'uso.

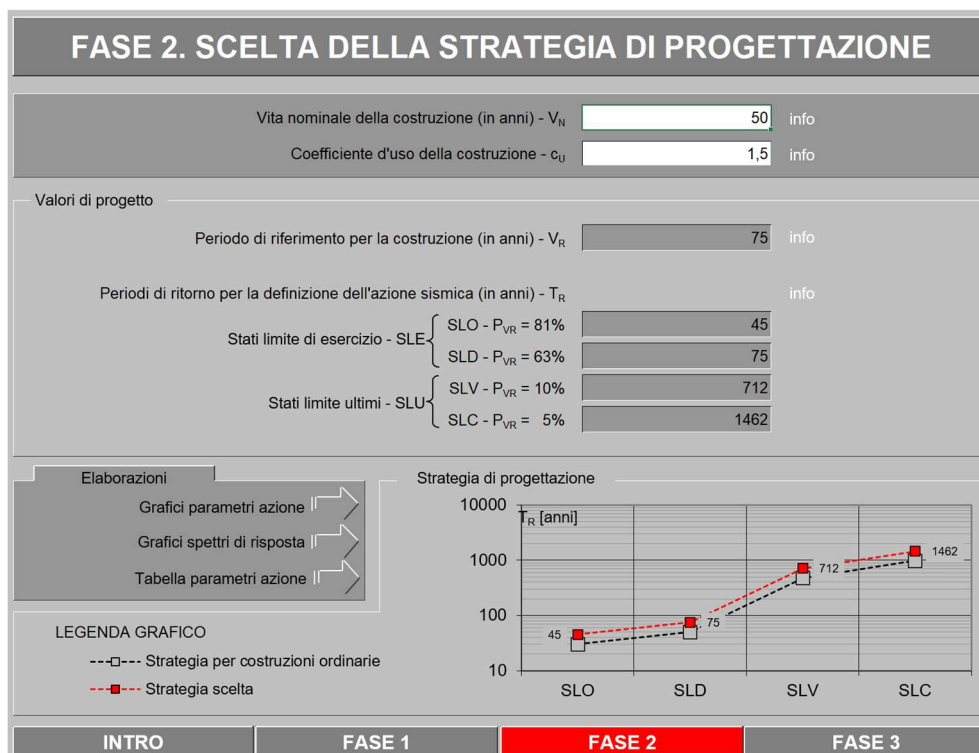


Figura 14. Estratto da Spettri-NTCver.1.0.3. Parametri struttura

Si riportano in figura 15 i parametri sismici da normativa, necessari per la



determinazione dello spettro di progetto (accelerazione orizzontale massima al sito, valore massimo di amplificazione dello spettro, ecc.) dedotti dal foglio di calcolo a seguito dell'inserimento dei dati di input:

- Categoria topografica T2, pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$ (tabella 3.2.IV- Categorie topografiche NTC.2018).
- Categoria di suolo, emersa dalle indagini, Tipo C.
- Coordinate del sito ED50- Latitudine 43.123501°N, Longitudine 13.678346°E
- **Classe d'uso III** (di cui un C_u di 1,5) per il dimensionamento delle opere
- **Vita nominale 2** per opere ordinarie (V_N 50 anni) e quindi un periodo di riferimento di 75 anni ($V_R = V_N * C_u = 75$ anni)

Valori dei parametri a_g , F_o , T_C^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascuno SL				
SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_C^* [s]
SLO	45	0,063	2,439	0,290
SLD	75	0,080	2,432	0,304
SLV	712	0,210	2,461	0,332
SLC	1462	0,273	2,475	0,341

La verifica dell'idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. L'ANIDIS non potrà essere ritenuta responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.

Figura 15. Estratto da Spettri-NTCver.1.0.3. Parametri sismici

Tabella 4_Coefficienti sismici ricavati da Spettri-NTCver.1.0.3.

	Stati limite di esercizio		Stati limite ultimi	
	SLO	SLD	SLV	SLC
Ss	1,50	1,50	1,39	1,29
Cc	1,58	1,56	1,51	1,50
St	1,20	1,20	1,20	1,10



Ss: amplificazione stratigrafica

Cc: coefficiente funzione categoria;

St: amplificazione topografica

Nota l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido a_g , l'accelerazione di picco a_{max} è valutata:

$$a_{max} = S_s * S_t * a_g$$

dove S_s è il coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica, S_t è il coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione topografica.

Nel nostro caso, visto che l'opera in progetto rientra in categoria d'uso III si rende necessario la realizzazione di uno studio di risposta sismica locale (RSL) per ricavare il valore di a_g atteso.

Per l'elaborazione di uno studio di RSL sono necessari i seguenti dati in ingresso:

- Segnali di input;
- Profilo di velocità del sottosuolo di indagine;
- Curve di decadimento del modulo di rigidezza al taglio e di variazione dello smorzamento per i diversi terreni costituenti il sottosuolo in studio, per analisi lineari-equivalenti.

6.1.SEGNALI DI INPUT

La disaggregazione della pericolosità sismica è un'operazione che permette di valutare i contributi delle diverse sorgenti sismiche alla pericolosità di un sito. La forma più comune di disaggregazione è quella bidimensionale in magnitudo e distanza (M-R) che permette di definire il contributo delle sorgenti sismogenetiche poste a distanza R capaci di generare terremoti di magnitudo M; in altre parole la disaggregazione dei valori di PGA dei terremoti occorsi in magnitudo-distanza, fornisce statisticamente il terremoto che domina lo scenario di pericolosità (terremoto scenario) inteso come l'evento di magnitudo M a distanza R dal sito oggetto di studio che contribuisce maggiormente alla pericolosità sismica del sito stesso.



Per la scelta degli accelerogrammi si è proceduto all'analisi dei dati disaggregati di pericolosità sismica di base, così da definire le coppie di dati Magnitudo/Distanza epicentrale che maggiormente concorrono a definire la sismicità dell'area.

Si procede ricorrendo alle Mappe interattive di pericolosità sismica (**esse1-gis.mi.ingv.it**) per lo stato limite preso in esame. Nelle figure successive viene riportata la Pericolosità di base del sito di progetto per la verifica allo SLO, SLD e SLV e sono mostrate le schermate del citato sito INGV per gli stati limite di operatività (SLO) di danno (SLD) e di salvaguardia della vita (SLV) e i relativi grafici dei dati disaggregati, di seguito rappresentate:

SLV

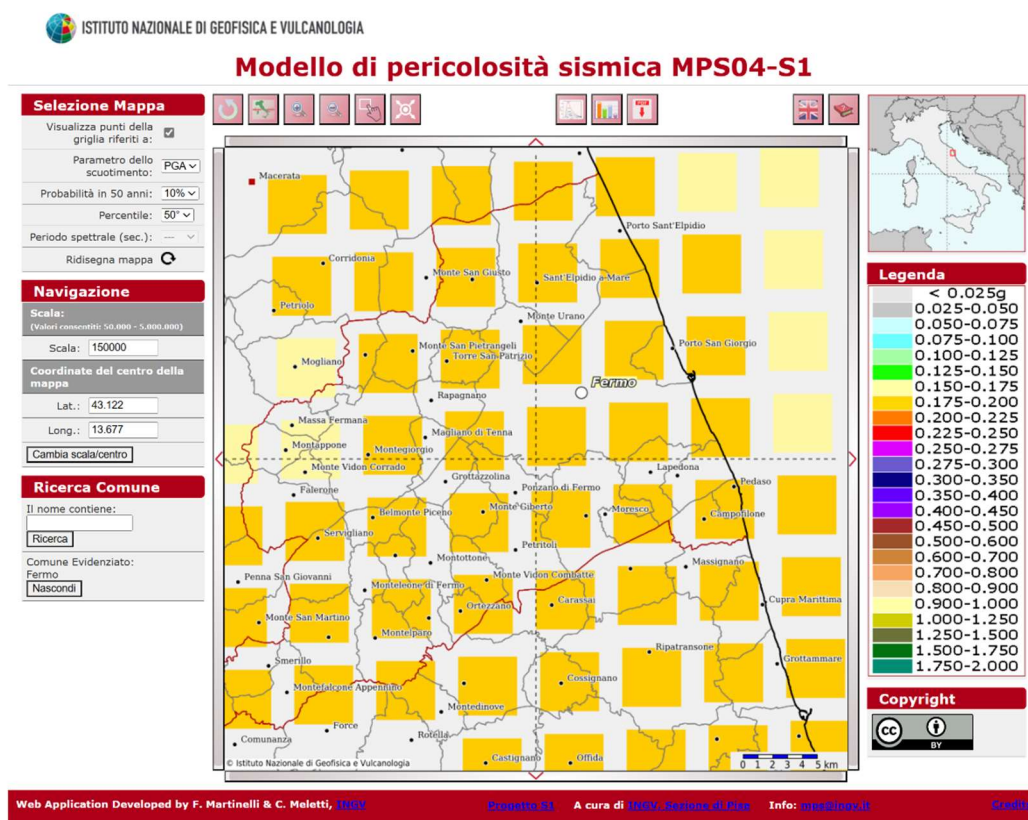


Figura 16. Estratto dal sito (esse1-gis.mi.ingv.it)

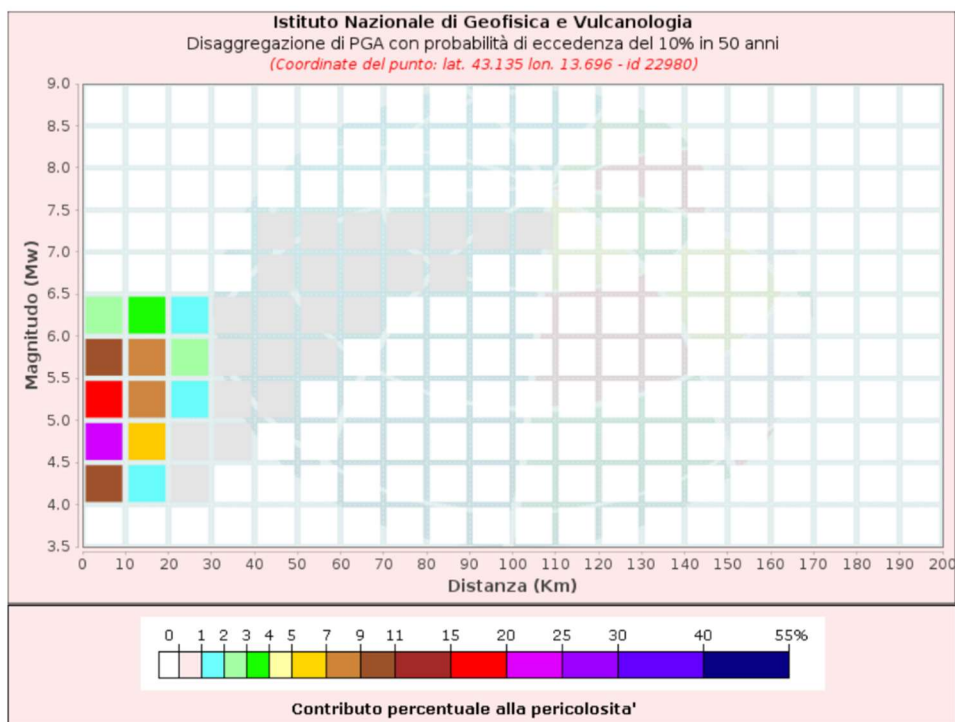


Figura 16. Estratto dal sito (esse1-gis.mi.ingv.it)

Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto: lat. 43.135 lon. 13.696 - id 22980)											
Distanza (Km)	Magnitudo (Mw)										
	3.5- 4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0- 6.5	6.5- 7.0	7.0- 7.5	7.5- 8.0	8.0- 8.5	8.5- 9.0
0-10	0.0000	10.8000	23.6000	17.0000	10.5000	2.5900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	1.6400	6.1900	8.0500	8.0600	3.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	0.0087	0.4450	1.6300	2.6700	1.3800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	0.0000	0.0005	0.1300	0.6080	0.5050	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0015	0.1080	0.2110	0.1120	0.1090	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0072	0.0580	0.1190	0.1380	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0544	0.0881	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0169	0.0514	0.0000	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0028	0.0274	0.0000	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0099	0.0000	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
120-130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
130-140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
140-150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
150-160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
160-170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
170-180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
180-190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
190-200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Valori Medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.18	9.66	0.808

Figura 17. Valori medi Stato limite SLV



SLD



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Modello di pericolosità sismica MPS04-S1

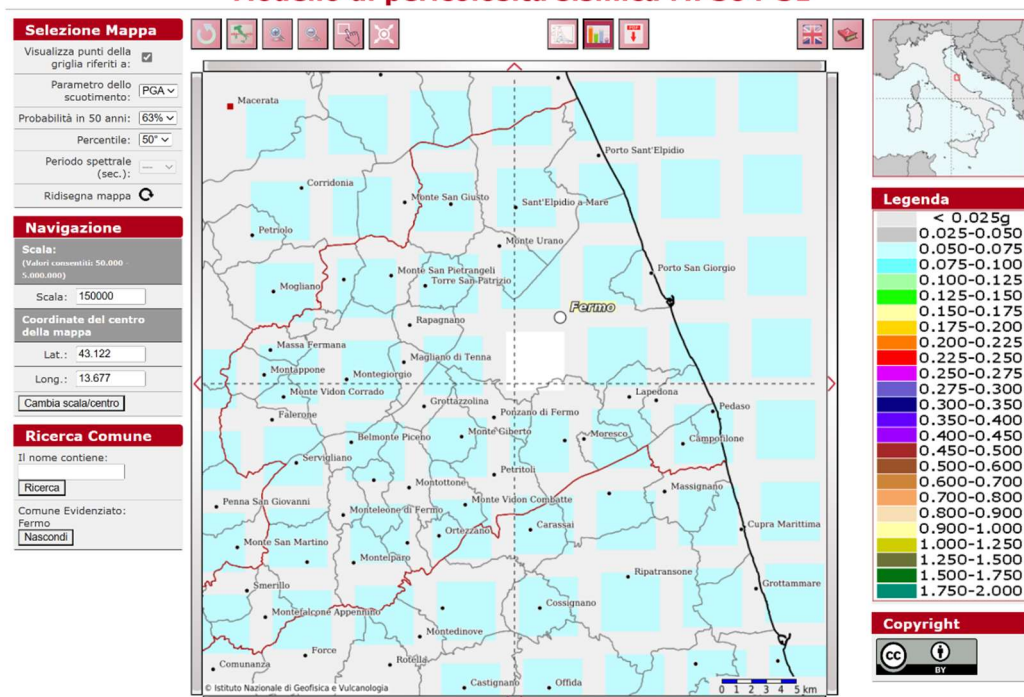


Figura 18. Estratto dal sito (esse1-gis.mi.ingv.it)

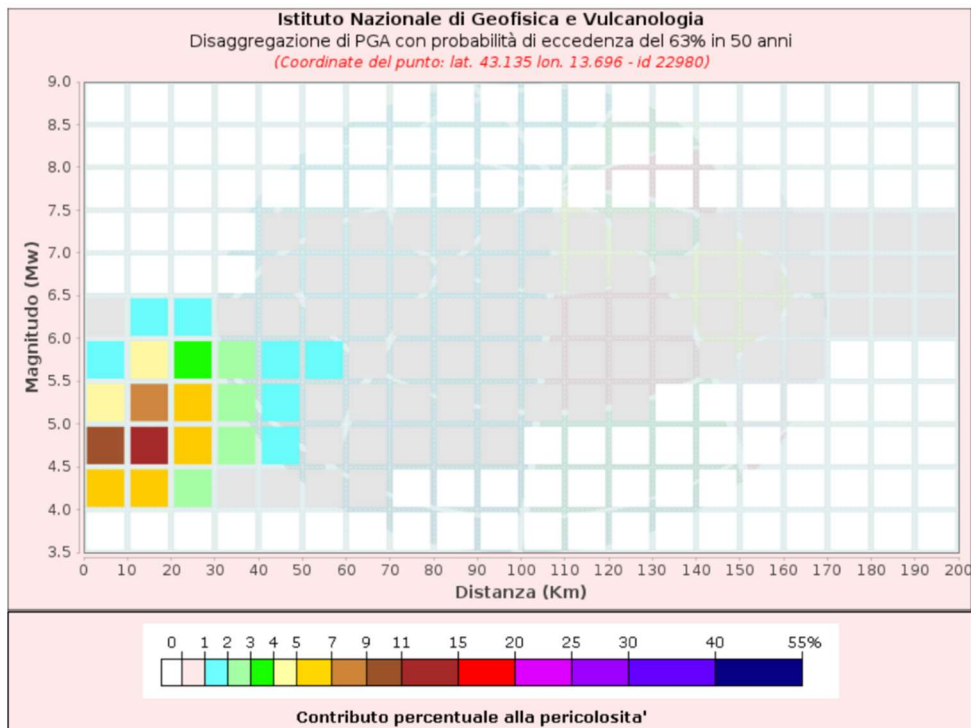


Figura 19. Disaggregazione di PGA dal sito (esse1-gis.mi.ingv.it)

Figura 20. Valori medi Stato limite SLD

Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 63% in 50 anni (Coordinate del punto: lat. 43.135 lon. 13.696 - id 22980)											
Distanza (Km)	Magnitudo (Mw)										
	3.5- 4.0	4.0- 4.5	4.5-5.0	5.0- 5.5	5.5- 6.0	6.0- 6.5	6.5- 7.0	7.0- 7.5	7.5- 8.0	8.0- 8.5	8.5- 9.0
0-10	0.0000	5.8500	9.1200	4.1900	1.7800	0.3630	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	6.1300	12.2000	7.6400	4.0700	1.0300	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	2.6200	6.6000	5.5500	3.8000	1.1800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	0.8070	2.5100	2.7200	2.3200	0.9580	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.2610	1.1300	1.6100	1.7100	0.9960	0.2640	0.1270	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0472	0.4570	0.9570	1.2500	0.9640	0.4460	0.2340	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0035	0.1290	0.5050	0.8180	0.7490	0.4050	0.2320	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0000	0.0241	0.2400	0.5240	0.5600	0.3410	0.2120	0.0000	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0000	0.0035	0.0954	0.3310	0.4150	0.2850	0.1910	0.0000	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0003	0.0291	0.1750	0.2540	0.2000	0.1430	0.0000	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0075	0.0796	0.1370	0.1180	0.0902	0.0000	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0020	0.0376	0.0820	0.0773	0.0630	0.0000	0.0000	0.0000
120-130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0170	0.0497	0.0527	0.0457	0.0000	0.0000	0.0000
130-140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0070	0.0290	0.0369	0.0340	0.0000	0.0000	0.0000
140-150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0028	0.0161	0.0269	0.0262	0.0000	0.0000	0.0000
150-160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0073	0.0198	0.0205	0.0000	0.0000	0.0000
160-170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0042	0.0185	0.0201	0.0000	0.0000	0.0000
170-180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0025	0.0179	0.0203	0.0000	0.0000	0.0000
180-190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0132	0.0164	0.0000	0.0000	0.0000
190-200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0089	0.0124	0.0000	0.0000	0.0000

Valori Medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.17	25.8	0.374



SLO



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Modello di pericolosità sismica MPS04-S1

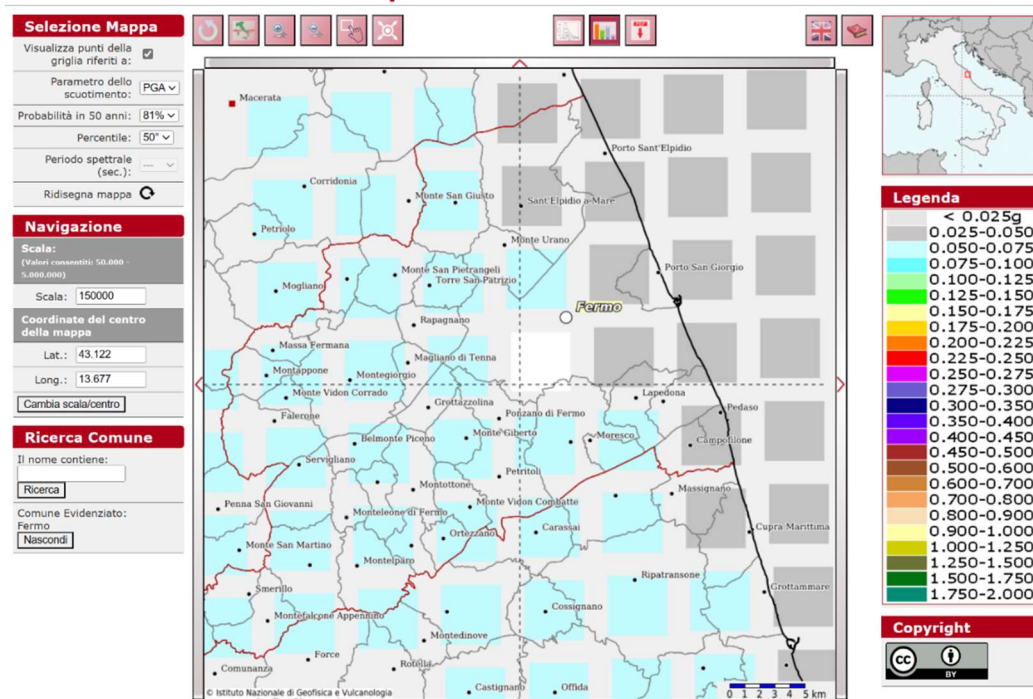


Figura 21. Estratto dal sito (esse1-gis.mi.ingv.it)

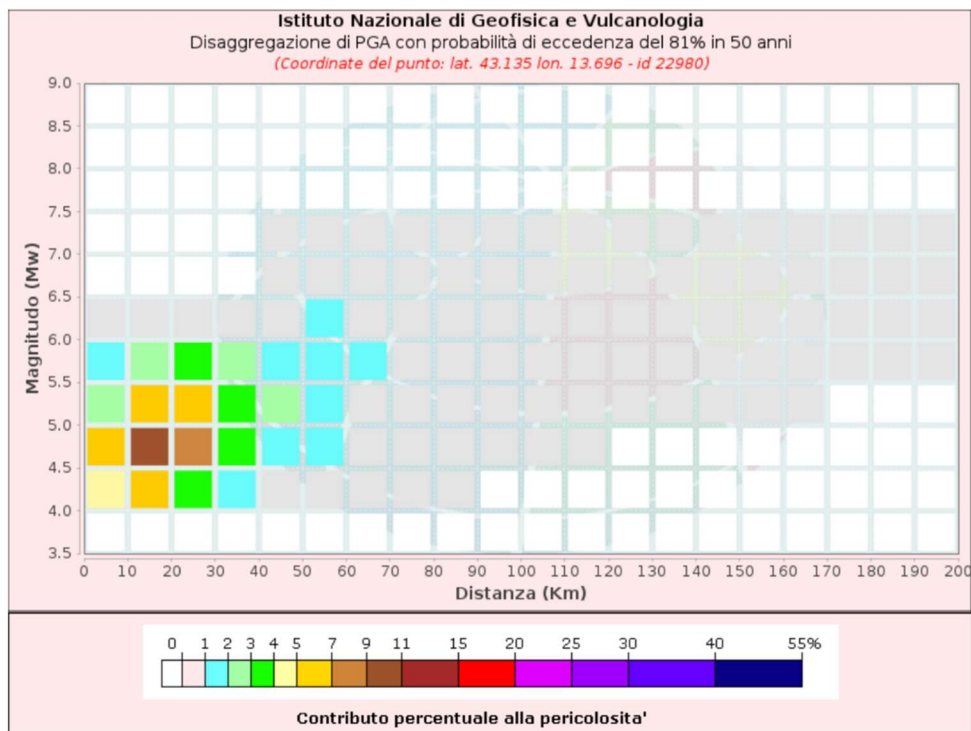


Figura 22. Disaggregazione di PGA dal sito (esse1-gis.mi.ingv.it)

Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 81% in 50 anni (Coordinate del punto: lat. 43.135 lon. 13.696 - id 22980)											
Distanza (Km)	Magnitudo (Mw)										
	3.5- 4.0	4.0- 4.5	4.5-5.0	5.0- 5.5	5.5- 6.0	6.0- 6.5	6.5- 7.0	7.0- 7.5	7.5- 8.0	8.0- 8.5	8.5- 9.0
0-10	0.0000	4.2800	6.3300	2.7300	1.1200	0.2240	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	6.0200	10.9000	6.0000	2.8900	0.6900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	3.3600	7.4500	5.3300	3.1600	0.8960	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	1.3100	3.4900	3.1300	2.2600	0.8310	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.6050	1.9500	2.1900	1.9400	0.9940	0.2360	0.1010	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.2560	1.1000	1.5400	1.6300	1.0800	0.4310	0.1980	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0692	0.5350	0.9740	1.2000	0.9250	0.4240	0.2120	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0121	0.2220	0.6000	0.8580	0.7550	0.3850	0.2070	0.0000	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0013	0.0725	0.3600	0.6130	0.6080	0.3440	0.1980	0.0000	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0177	0.1810	0.3690	0.4000	0.2570	0.1570	0.0000	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0043	0.0770	0.2010	0.2330	0.1610	0.1040	0.0000	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0008	0.0327	0.1200	0.1520	0.1120	0.0768	0.0000	0.0000	0.0000
120-130	0.0000	0.0000	0.0001	0.0127	0.0725	0.1020	0.0806	0.0584	0.0000	0.0000	0.0000
130-140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0045	0.0417	0.0677	0.0598	0.0455	0.0000	0.0000	0.0000
140-150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	0.0232	0.0446	0.0462	0.0367	0.0000	0.0000	0.0000
150-160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0122	0.0264	0.0364	0.0300	0.0000	0.0000	0.0000
160-170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0063	0.0209	0.0362	0.0306	0.0000	0.0000	0.0000
170-180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0028	0.0182	0.0375	0.0324	0.0000	0.0000	0.0000
180-190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0123	0.0301	0.0272	0.0000	0.0000	0.0000
190-200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	0.0075	0.0225	0.0216	0.0000	0.0000	0.0000

Valori Medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.17	32.0	0.309

Figura 23. Valori medi Stato limite SLO



Nella valutazione delle azioni sismiche locali è necessario definire gli accelerogrammi di input utilizzati, ricordando che l'uso di accelerogrammi artificiali non è ammesso nelle analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici (NTC18 prf.3.2.3.6). La circolare esplicativa al prf. 7.11.3.1.2.2 ammette, per le analisi di RSL e per le analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici, l'uso di accelerogrammi registrati o di accelerogrammi sintetici, generati mediante simulazione del meccanismo di sorgente. La scelta di accelerogrammi può essere effettuata da archivi nazionali o internazionali disponibili in rete. Inoltre l'uso di accelerogrammi registrati è ammesso, a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito. Le norme non riportano un numero minimo o massimo di accelerogrammi da utilizzare si limitano a dire che per i sistemi geotecnici NTC18 prf 7.11.1.5.2 gli accelerogrammi impiegati nelle analisi, devono essere in numero non inferiore a 5 e devono essere rappresentativi della sismicità del sito e la loro scelta deve essere adeguatamente giustificata.

La scelta degli accelerogrammi naturali può essere effettuata attraverso database o attraverso software dedicati. Gli accelerogrammi da utilizzare dovranno essere classificati su suolo A (bedrock sismico $V_s > 800$ m/s) o altrimenti è necessario effettuare una deconvoluzione. Gli accelerogrammi scelti dovranno essere controllati, e, se necessario, scalati linearmente rispetto alla ag di riferimento e la loro media dovrà essere spettro compatibile.

Nel caso di studio, per la selezione degli accelerogrammi è stato utilizzato il software

- REXELite, versione online semplificata del programma per computer REXEL (Iervolino et al., 2009), sviluppato da Iunio Iervolino e Carmine Galasso, dell'Università Federico II di Napoli, per la selezione di suite di motion ground per analisi strutturali sismiche basate su codice. REXELite è stato sviluppato nell'ambito del progetto INGV- DPC S4 finanziato dal Dipartimento Nazionale della Protezione Civile, coordinato da Francesca Pacor (INGV, Milano) e Roberto Paolucci (Politecnico di Milano), in collaborazione con RELUIS. L'implementazione online è stata fatta da Andrea Spinelli di IMTEAM.

REXELite restituisce una lista di combinazioni il cui spettro medio rispetta la compatibilità con un target nell'intervallo di periodi prescelti e con la tolleranza



prevista (sistema spettro compatibile).

Nello specifico come segnali di input sono stati utilizzati, in accordo con le NTC, una serie, per ogni stato limite, di n.7 registrazioni accelerometriche spettro compatibili.

I segnali in input devono essere relativi ad eventi con tempo di ritorno corrispondenti ai parametri imposti dalle vigenti NTC18 per le verifiche allo stato limite di operatività (SLO), di danno (SLD) e di salvaguardia della vita (SLV), per strutture con vita nominale di 50 anni e classe d'uso III.

I parametri di riferimento per gli stati limite sono quelli riportati sopra. I valori di Magnitudo e Distanza epicentrale individuati e riportati nelle figure precedenti sono stati inseriti in REXELite per la ricerca di eventi sismici con le medesime caratteristiche; come già detto l'ulteriore criterio di ricerca è la spettro-compatibilità dell'accelerogramma con lo spettro di risposta elastico su suolo rigido definito dalle NTC per il sito di studio. Per ogni stato limite vengono forniti n° 7 accelerogrammi utilizzati come input nel software RSLIII.

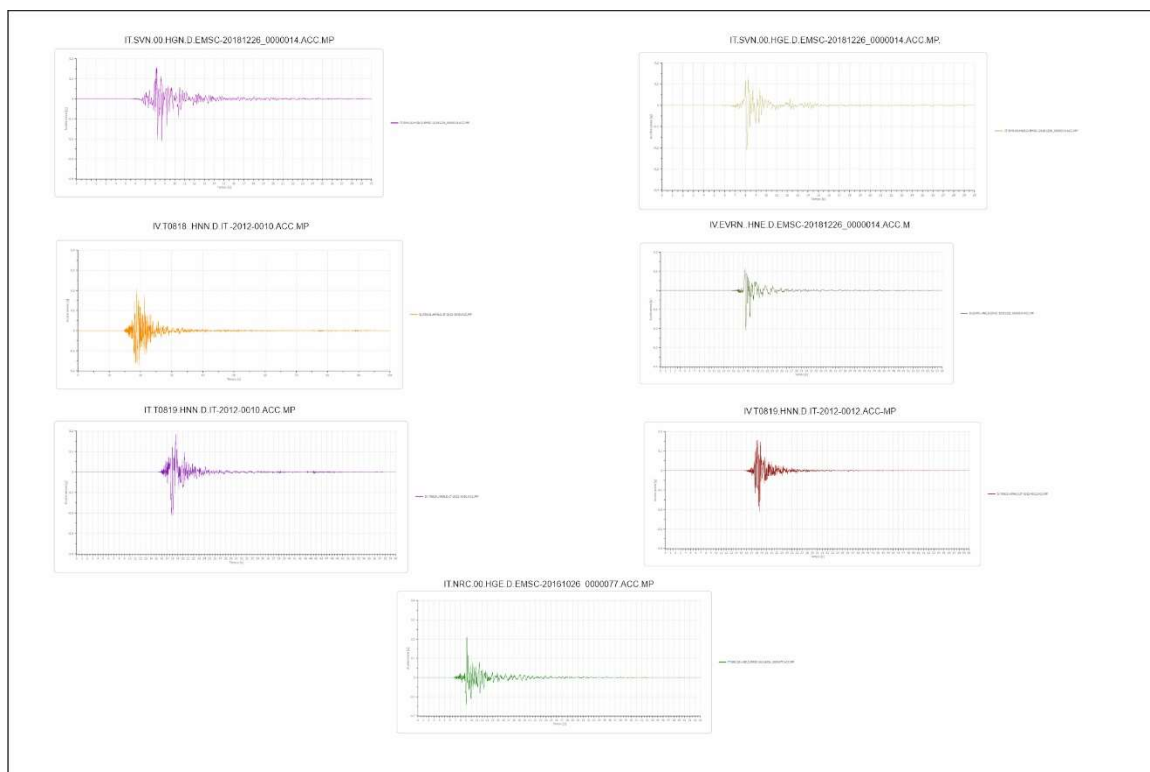


Figura 24. Accelerogrammi di input Stato limite SLV

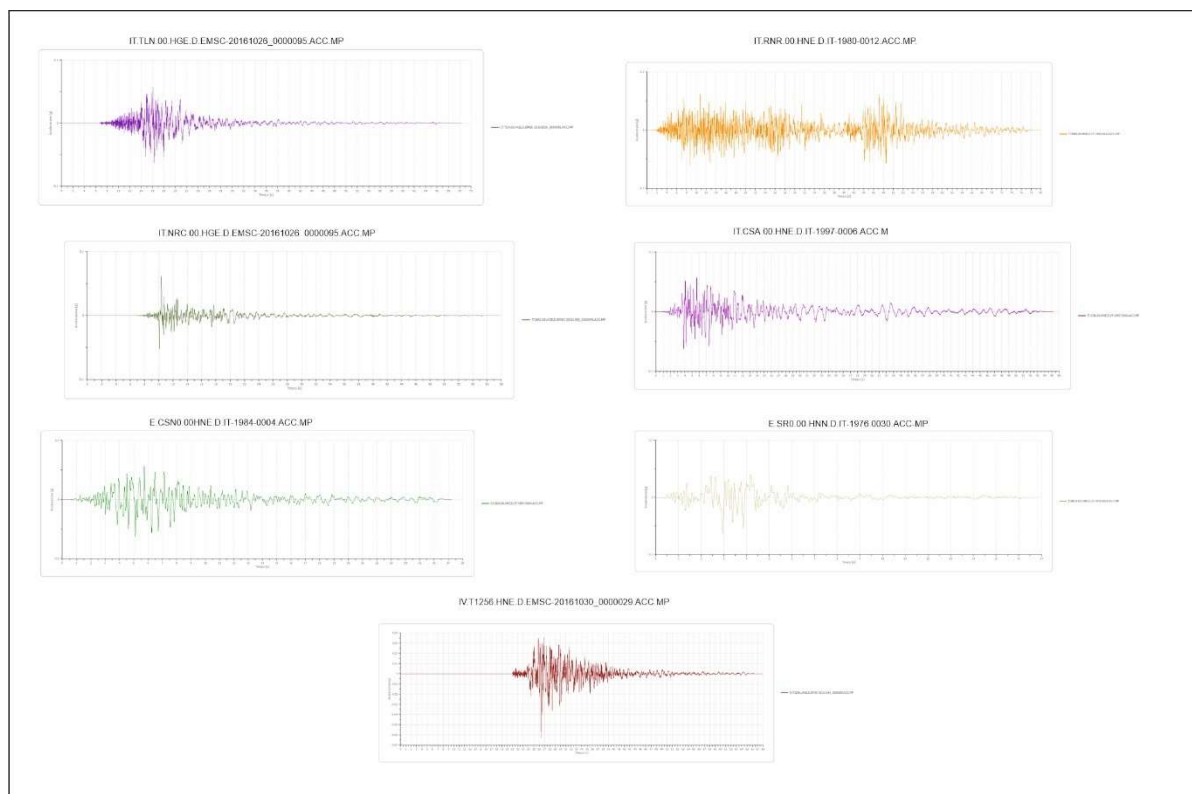


Figura 25. Accelerogrammi di input Stato limite SLD

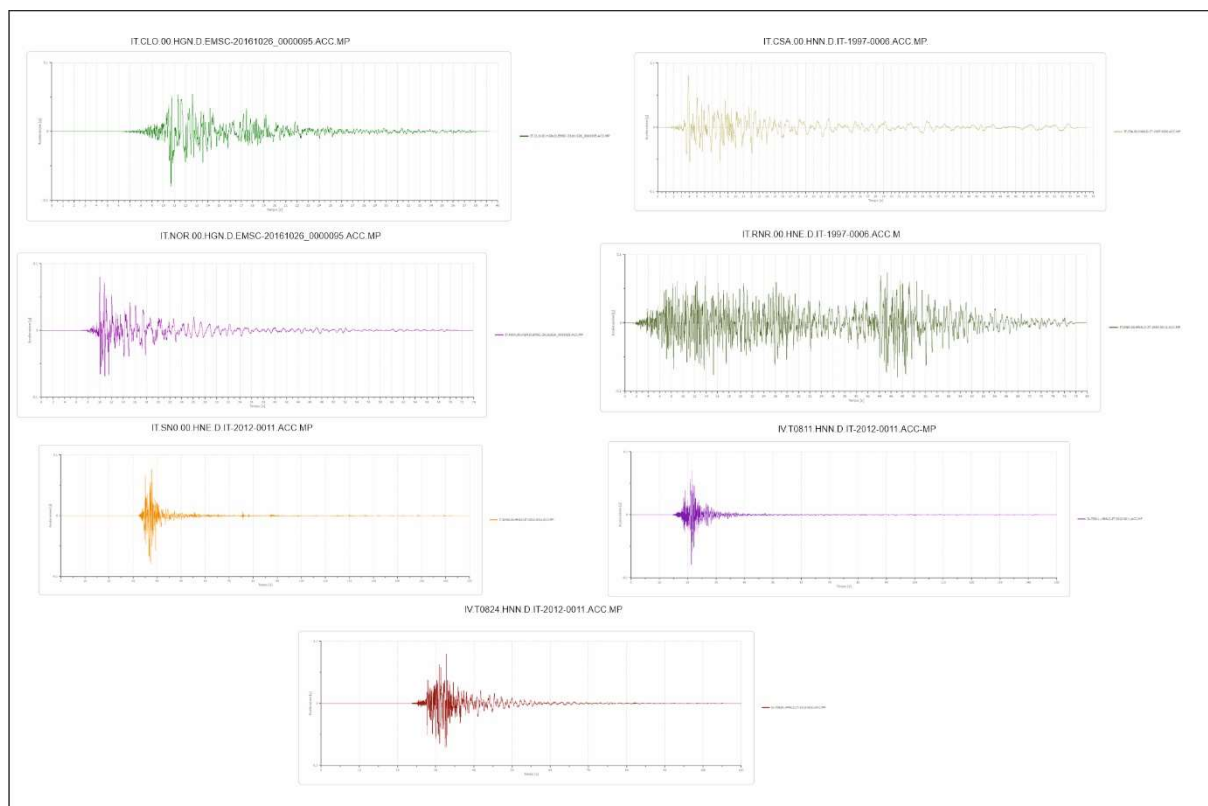


Figura 26. Accelerogrammi di input Stato limite SLO



6.2. PROCEDURA DI CALCOLO CON IL SOFTWARE RSLIII DI GEOSTRU

La procedura di calcolo adoperata da RSL per la valutazione della funzione di trasferimento presuppone come base di partenza uno o più accelerogrammi, o uno spettro di risposta in accelerazione, e la conoscenza della stratigrafia del sito attraverso i seguenti parametri geotecnici per ogni strato:

- peso per unità di volume;
- velocità di propagazione delle onde di taglio;
- coefficiente di spinta laterale;
- modulo di taglio iniziale (opzionale);
- spessore;
- indice di plasticità.

La non linearità del calcolo è introdotta dalla dipendenza del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso dalla deformazione.

Schematicamente la procedura è riassumibile nel seguente modo:

1. Valutazione dello spettro di Fourier dell'accelerogramma (omessa nel caso si debba analizzare uno spettro);
2. Ricerca di un errore relativo piccolo seguendo la procedura di:
 - 2.1 Stima della funzione di trasferimento;
 - 2.2 Valutazione della deformazione indotta in ciascuno strato;
 - 2.3 Correzione del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso per ogni strato;

Le operazioni 2.1, 2.2 e 2.3 sono ripetute fino a quando la differenza di deformazione tra un'iterazione e la precedente non rimane al di sotto di una soglia ritenuta accettabile;

3. Trasformazione inversa di Fourier dello spettro precedentemente calcolato ed opportunamente pesato per mezzo della funzione di trasferimento calcolata.

Attraverso questa procedura è possibile "trasferire" l'accelerogramma dal bedrock in superficie.

Attraverso questa procedura è possibile "trasferire" l'accelerogramma dal bedrock in superficie. La deformazione per ciascuno strato viene corretta sulla base del rapporto fra deformazione effettiva e massima come suggerito dalla letteratura scientifica, ovvero

$$\frac{\gamma_{eff}}{\gamma_{max}} = \frac{M - 1}{10}$$



dove M rappresenta la magnitudo del sisma.

Per la valutazione della funzione di trasferimento, RSL considera un suolo variamente stratificato composto da N strati orizzontali di cui l' N -esimo è il letto di roccia (bedrock). Ponendo come ipotesi che ciascuno strato si comporti come un solido di

Kelvin-Voigt $\left[\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma(z, t)}{\partial z \partial t} \right]$, la propagazione delle onde di taglio che attraversano gli strati verticalmente può essere definita dall'equazione dell'onda:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (1)$$

dove: u rappresenta lo spostamento; t il tempo; ρ la densità; G il modulo di deformazione al taglio; η la viscosità. Per onde armoniche lo spostamento può essere scritto come:

$$u(z, t) = U(z) e^{i\omega t} \quad (2)$$

che sostituita nella (1) pone

$$(G + i\omega\eta) \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho \omega^2 U \quad (3)$$

dove ω rappresenta la frequenza angolare. La (3) può essere riscritta come

$$G^* \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho \omega^2 U \quad (4)$$

avendo posto $G^* = G + i\omega\eta$, ovvero il modulo di deformazione al taglio complesso. Questo può essere ulteriormente riscritto come

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \quad (5)$$

avendo posto

$$\eta = \frac{2G}{\omega} \xi \quad (6)$$

dove ξ rappresenta il coefficiente di smorzamento viscoso. Ciò posto, e fatta convenzione che l'apice $*$ indica la natura complessa delle variabili in gioco, la soluzione dell'equazione generica dell'onda è la seguente:

$$u(z, t) = E e^{i(\omega t + k^* z)} + F e^{i(\omega t - k^* z)} \quad (7)$$

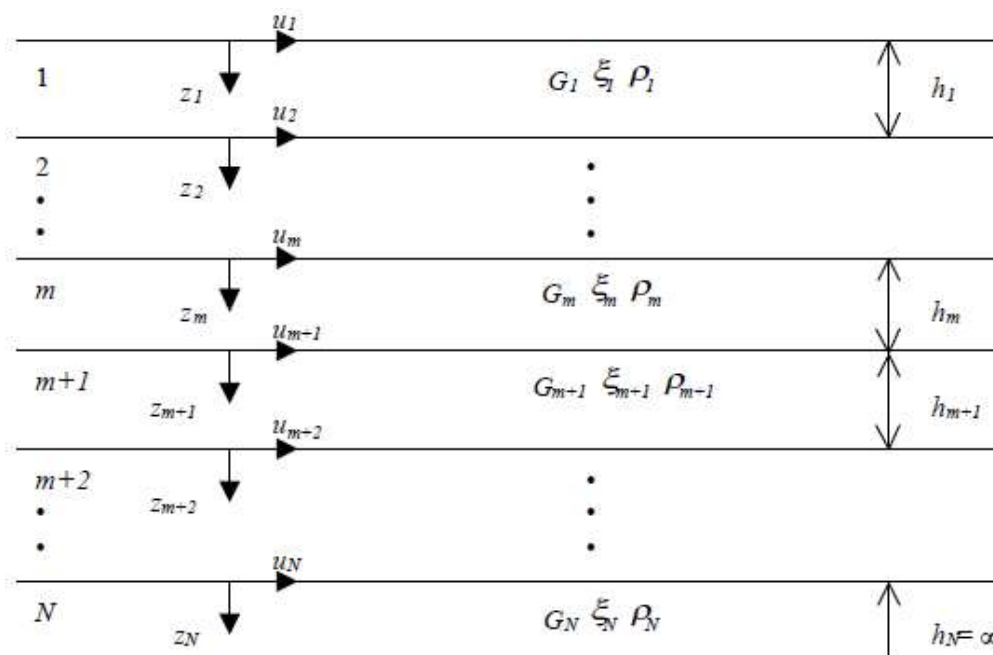


Figura 27. Esempio di stratigrafia per riferimento

dove E e F dipendono dalle condizioni al contorno e rappresentano l'ampiezza d'onda che viaggia rispettivamente verso l'alto (-z) e verso il basso (+z), mentre k^* rappresenta il numero d'onda complesso dato dalla seguente espressione:

$$k^* = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G^*}} \quad (8)$$

Il taglio invece è dato da:

$$\tau(z, t) = G^* \frac{dU}{dz} e^{i\omega t} = ik^* G^* \left[E e^{i(\omega t + k^* z)} + F e^{i(\omega t - k^* z)} \right] e^{i\omega t} \quad (9)$$

Per il generico strato m di spessore h_m gli spostamenti, rispettivamente in sommità ($z = 0$) ed al fondo ($z = h_m$), sono:

$$u_m(0, t) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \quad (10)$$

$$u_m(h_m, t) = \left(E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m} \right) e^{i\omega t} \quad (11)$$

Poiché deve essere rispettata la congruenza sullo spostamento all'interfaccia tra gli strati, ovvero lo spostamento in sommità ad uno strato deve essere uguale allo spostamento sul fondo di quello immediatamente sopra, se ne deduce che:

$$u_m(z = h_m, t) = u_{m+1}(z = 0, t) \quad (12)$$

Usando la (10), (11) e la (12), ne consegue che

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m} \quad (13)$$

Il taglio in sommità ed al fondo dell'm-esimo strato è dato da:



$$\tau_m(0, t) = ik_m^* G_m^* [E_m - F_m] e^{i\omega t} \quad (14)$$

$$\tau_m(h_m, t) = ik_m^* G_m^* [E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}] e^{i\omega t} \quad (15)$$

Poiché fra uno strato e l'altro il taglio deve essere continuo si ha

$$\tau_m(z = h_m, t) = \tau_{m+1}(z = 0, t) \quad (16)$$

ovvero

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}) \quad (17)$$

Sommando la (13) alla (17) e sottraendo la (17) alla (13) si ottiene

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (18)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (19)$$

dove α_m^* rappresenta il coefficiente di impedenza complesso al contorno tra gli strati m ed m+1, ed è dato dalla seguente espressione:

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} \quad (20)$$

Poiché in superficie il taglio è nullo,

$$\tau_1(0, t) = ik_1^* G_1^* [E_1 - F_1] e^{i\omega t} = 0$$

si deduce che $E_1 = F_1$.

Le equazioni (18) e (19) possono essere successivamente applicate agli strati successivi da 2 ad m. La funzione di trasferimento A_{mn} che lega gli spostamenti in sommità degli strati m ed n è definita dalla seguente espressione:

$$A_{mn} = \frac{u_m}{u_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (21)$$

A_{mn} rappresenta la funzione di trasferimento, ovvero la funzione che mette in relazione il modulo della deformazione tra i punti m e n.

In pratica lo stato deformativo di una stratigrafia rimane definito una volta nota la deformazione di un suo qualsiasi punto. Inoltre, poiché la velocità e l'accelerazione sono legati allo spostamento,

$$\dot{u}(z, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u(z, t) \quad \ddot{u}(z, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 u(z, t) \quad (22)$$

La funzione di trasferimento A_{mn} può essere espressa anche in funzione delle velocità e dell'accelerazione al tetto degli strati n ed m :

$$A_{mn}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{\dot{u}_m}{\dot{u}_n} = \frac{\ddot{u}_m}{\ddot{u}_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (23)$$

La deformazione tangenziale rimane definita alla profondità z e al tempo t dalla relazione:

$$\gamma(z, t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik^* \left(Ee^{ik^*z} - Fe^{-ik^*z} \right) e^{i\omega t} \quad (24)$$

E la corrispondente tensione tangenziale, dalla seguente espressione:

$$\tau(z, t) = G^* \gamma(z, t) \quad (25)$$

Ai fini di una corretta interpretazione del problema della risposta sismica locale, risulta utile riprodurre la rappresentazione schematica di Figura 2 in cui è riportata la terminologia utilizzata per lo studio del moto sismico di un deposito che poggia su un basamento roccioso.

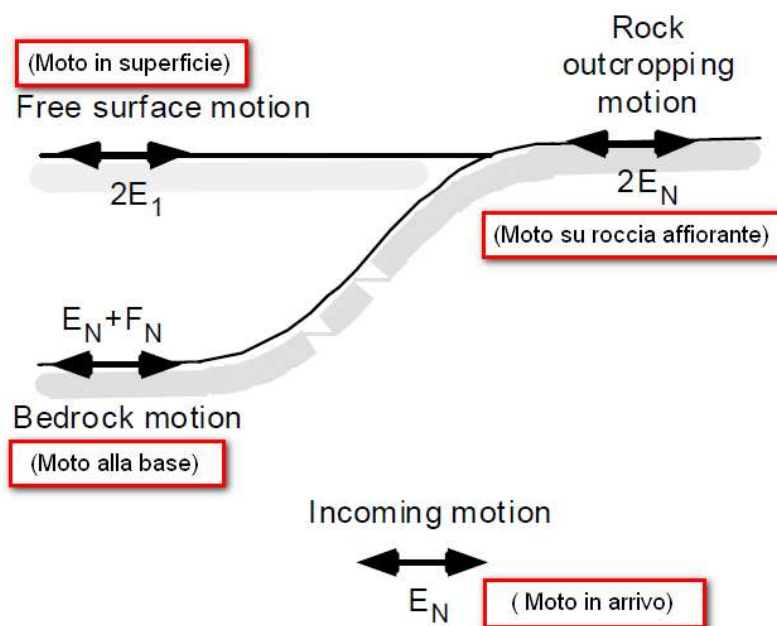


Figura 28. Schema di riferimento e terminologia utilizzata

Le onde di taglio si propagano verticalmente attraverso il bedrock con ampiezza pari ad E_N ; al tetto del bedrock, sotto il deposito degli strati di terreno, il moto ha un'ampiezza pari a $E_N + F_N$. Sulla roccia affiorante, poiché le tensioni tangenziali sono

nulle ($E_N = F_N$), il moto avrà ampiezza pari a $2E_N$. La funzione di trasferimento dal bedrock al bedrock-affiorante è la seguente:

$$A_{NN}(\omega) = \frac{2E_N}{E_N + F_N} \quad (26)$$

A è non lineare poiché G è funzione di γ .

Nella procedura di calcolo infatti, da una stima iniziale del modulo di deformazione al taglio, si ottiene la tensione ipotizzando un legame lineare, per poi ottenere un nuovo valore di γ . Grazie a questo valore aggiornato si valuta un nuovo modulo G così da ripetere la procedura fino a quando la differenza tra la deformazione aggiornata e quella ottenuta dalla precedente iterazione viene ritenuta accettabile. Il modello per $G(\gamma)$ adoperato è quello suggerito da Ishibashi e Zhang (1993) che tiene conto degli effetti della pressione di confinamento e dell'indice di plasticità:

$$G = G_{max} \cdot K(\gamma, PI) (\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_0} \quad (24)$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\} \quad (25)$$

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3}) \quad (26)$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & \text{per } PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & \text{per } 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} PI^{1.976} & \text{per } 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} PI^{1.115} & \text{per } PI > 70 \end{cases} \quad (27)$$

dove G_{max} è dato dalla relazione

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (28)$$

dove ρ è la densità del terreno e V_s la velocità di propagazione delle onde di taglio nello stesso. La (28) fornisce il valore iniziale di G per la prima iterazione.

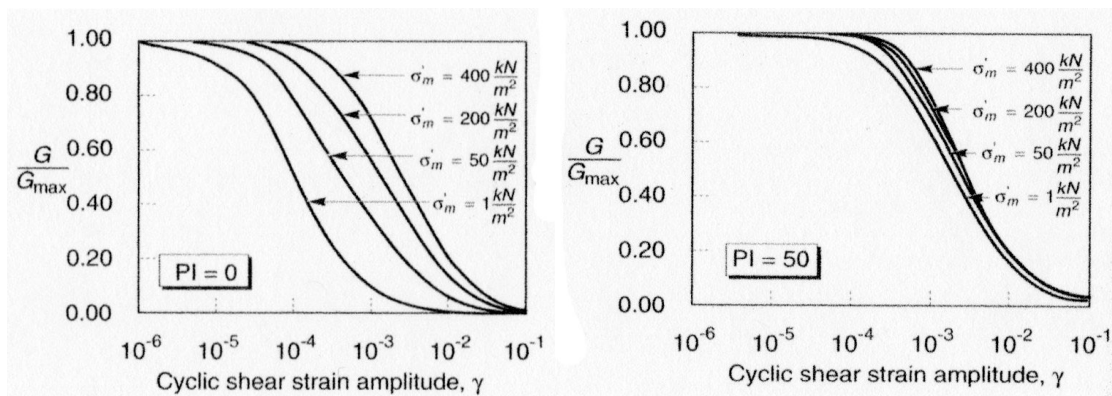


Figura 29. Influenza della pressione di confinamento e della plasticità sul modulo di deformazione al tagliosempio di stratigrafia per riferimento

Per quanto riguarda invece il coefficiente di smorzamento viscoso ξ , in conseguenza del modello introdotto dalla (24) si ha:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 PI^{1.5})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right] \quad (29)$$

da cui si deduce che anche ξ deve essere ricalcolato ad ogni iterazione.

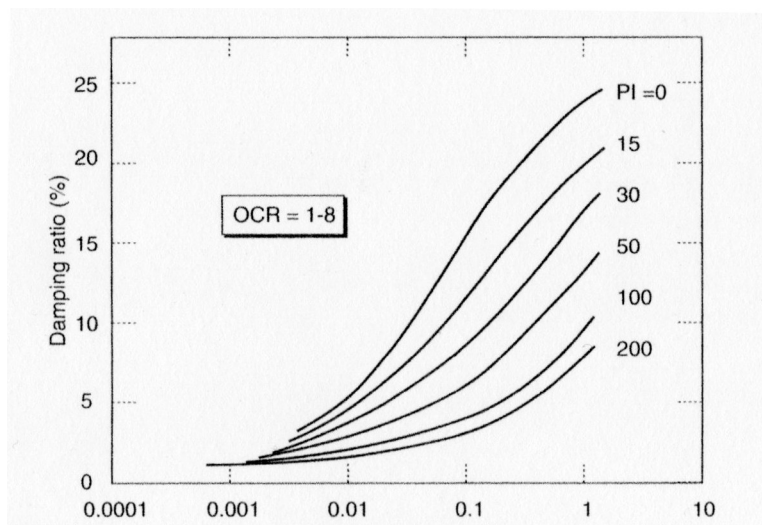


Figura 30. Influenza della plasticità sul coefficiente di smorzamento



6.3. DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO SISMICO DI RIFERIMENTO

Il modello geologico sottoposto ad analisi di RSL, è stato identificato utilizzando gli esiti delle indagini geologiche, geotecniche e geofisiche precedentemente condotte in situ (vedi documento 2.1.2-23008-OW-C-21-GE-001-BA0-0-RELAZIONE GEOLOGICA), in due campagne di indagini 2013 e 2019:

Campagna 2013

- N°9 prove penetrometriche statiche, effettuate con strumento statico da 10 tonn. tipo "TG 63-100 ISM. C";
- N°4 sondaggi a carotaggio continuo;
- N°4 prove di laboratorio sui campioni indisturbati prelevati nel corso dei sondaggi realizzati;

Campagna 2019

- esecuzione di n°4 sondaggi geognostici a carotaggio continuo;
- esecuzione di n°7 prove sismiche passive (HVSr);
- esecuzione di n°3 prove sismiche MASW

Grazie ai dati raccolti e allo studio delle sezioni stratigrafiche e sismiche associate alla modellazione 3D del terreno è stato creato un modello geologico 3D con inserita l'opera di progetto.

Analizzando i risultati delle indagini geognostiche dirette e indirette è stato possibile ricostruire una stratigrafia "tipo" del sito in progetto, discretizzando gli orizzonti anche attraverso la variazione dei valori di Vs che aumentano con la profondità

La stratigrafia utilizzata per la modellazione dello studio di RSL è la seguente:

- | | | |
|----------------|--------------------------------|------------|
| • 0,00-4,00 | Coltre/Limo argilloso sabbioso | Vs:180 m/s |
| • 4,00-12,00 | Argilla stratificata a sabbia | Vs:360 m/s |
| • 12,00-52,00 | Argilla stratificata a sabbia | Vs:420 m/s |
| • 52,00-112,00 | Argilla stratificata a sabbia | Vs:650 m/s |
| • 112,00-nd | Bedrock | Vs:800 m/s |



Profilo			Velocità onde di taglio		Tensione verticale	
4.00 [m]	4.00 [m]		180.0 [m/s]		38.0 [kPa]	
8.00 [m]	2.00 [m]	Coltre/Limo argilloso sabbioso	360.0 [m/s]		116.8 [kPa]	
		Argilla strat. a sabbia				
		Argilla strat. a sabbia				
40.00 [m]			420.0 [m/s]		361.3 [kPa]	
	52.00 [m]					
		Argilla strat. a sabbia				
60.00 [m]			650.0 [m/s]		870.8 [kPa]	
	112.00 [m]					
		Bedrock	800.0 [m/s]		1176.5 [kPa]	
	oo					

Figura 31. Stratigrafia utilizzata per lo studio di RSL con il software RSLIII di Geostru

6.4. CURVE DI ATTENUAZIONE DEI TERRENI

Il comportamento del terreno sotto sforzo ciclico non è lineare; al crescere delle deformazioni al taglio indotte dal sisma, la rigidezza del terreno decresce mentre cresce il coefficiente di smorzamento, con conseguenti variazioni degli effetti di amplificazione. Nel metodo lineare equivalente, il comportamento non lineare dei terreni viene simulato attraverso una successione temporale di comportamenti lineari:

- il codice per ogni ciclo di moto;
- la deformazione a taglio,
- dalle curve di attenuazione assegnate ai vari strati,
- dai valori corrispondenti del modulo di taglio (rigidezza);
- dal coefficiente di smorzamento;

Con questi nuovi valori viene ricalcolata la deformazione al taglio per il ciclo successivo. Il processo è interattivo e viene continuato fino a quando la deformazione tangenziale di un ciclo non sia uguale a quella del ciclo precedente a meno di un valore di tolleranza prefissato.

Nel caso specifico sono state individuate n.2 unità omogenee alle quali sono state attribuite, per ogni litotipo, una curva di decadimento del modulo di rigidezza al taglio e una curva della variazione dello smorzamento, opportunamente scelte tra quelle messe a disposizione dal centro di Microzonazione Sismica per l'area Marche



2 relativa agli studi di microzonazione di III livello effettuati per i comuni del cosiddetto "cratere" del recente terremoto del 2016/17, nello specifico sono stati utilizzati i valori di rigidezza e smorzamento, per i differenti litotipi, così come riportati nelle tabelle seguenti.

I orizzonte-Limo argilloso sabbioso- G/G_max Model e Damping Model:

MLec IP26.1

II orizzonte-Argille strat. a sabbia- G/G_max Model e Damping Model:

ALS-COS

Per quanto riguarda il bedrock sismico (considerato come semispazio elastico), è necessario indicare il peso di volume univocamente definito pari a 22 kN/m³, inoltre è stata ipotizzata un Vs pari a 800 m/s.

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.00001	1.000	0.00001	1.400
0.00185	0.990	0.00185	1.594
0.00296	0.980	0.00296	1.787
0.00481	0.960	0.00481	1.981
0.00566	0.950	0.00566	2.174
0.0077	0.925	0.0077	2.852
0.00793	0.922	0.00793	2.908
0.0081	0.920	0.0081	2.949
0.00971	0.900	0.00971	3.336
0.0185	0.800	0.0185	5.271
0.0301	0.700	0.0301	7.207
0.0731	0.500	0.0731	11.078
0.451	0.200	0.451	16.885
1.530	0.100	1.530	18.821

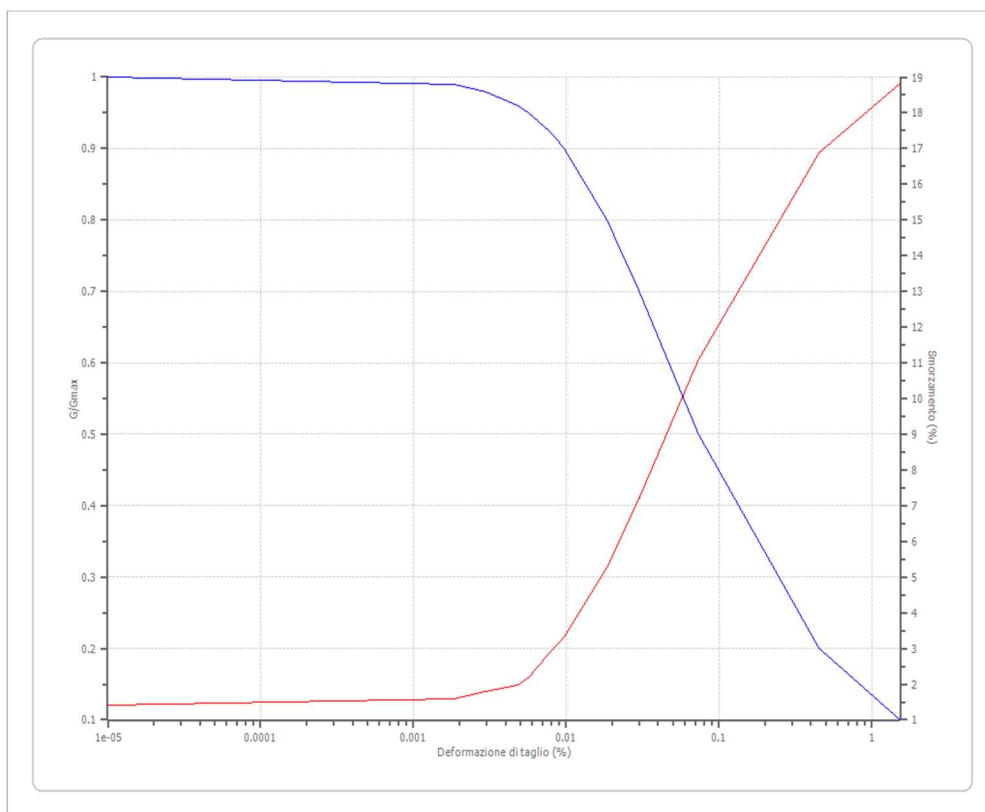


Figura 32. Curve deformazione/smorzamento Coltre superficiale MLec IP26.1

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.00001	1.000	0.00001	1.600
0.00335	0.990	0.00335	1.772
0.00488	0.980	0.00488	1.943
0.00613	0.970	0.00613	2.115
0.00723	0.960	0.00723	2.286
0.00825	0.950	0.00825	2.458
0.0106	0.925	0.0106	2.887
0.0109	0.922	0.0109	2.937
0.0111	0.920	0.0111	2.973
0.0128	0.900	0.0128	3.316
0.022	0.800	0.022	5.032
0.0333	0.700	0.0333	6.748
0.0725	0.500	0.0725	10.180
0.373	0.200	0.373	15.329
1.140	0.100	1.140	17.045

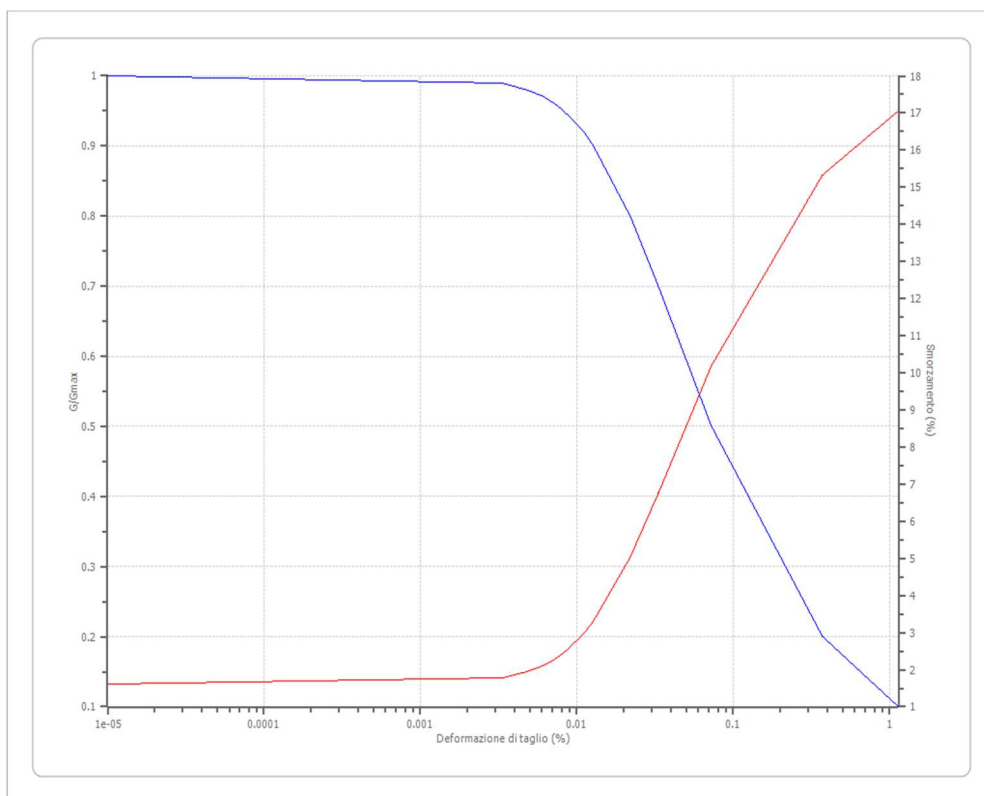


Figura 33. Curve deformazione/smorzamento Formazione di Base ALS-COS

7. CONCLUSIONI

Il risultato dello studio di RSL consiste, in una serie di valori di accelerazione spettrale (S_a) associati ai diversi valori di periodo (T), ottenuti passando dal dominio del tempo al dominio delle frequenze (o periodi), la risposta sismica viene espressa dapprima in termini di spettro di Fourier e quindi di spettro di risposta. Nelle figure seguenti sono riportate le sintesi grafiche delle funzioni di trasferimento medio calcolate tra il bedrock e la base della fondazione da realizzare, con uno smorzamento del 5% per gli stati limite presi in considerazione e, successivamente, i parametri che definiscono gli spettri normalizzati.

Per ciascun stato limite sono stati indicati lo spettro medio dei 7 accelerogrammi utilizzati come input, lo spettro medio degli output ottenuti dalle modellazioni numeriche e i relativi spettri normalizzati, (Grafico 1), inoltre a scopo comparativo sono stati riportati gli spettri normativi sia per la categoria A che per la categoria C (Grafico 2).



Elaborazione (SLV)

Numero di iterazioni 50
Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima 0.5
Tipo di modulo elastico Shake 91
Massimo errore percentuale di convergenza 2.33 E-05

Fattori di amplificazione ICMS 2018

Tai	0.210 [s]
Tvi	0.570 [s]
Tao	0.200 [s]
Tvo	0.570 [s]
Sami	4.386 [m/s ²]
Svmi	0.296 [m/s]
Samo	6.330 [m/s ²]
Svmo	0.464 [m/s]
Fa	1.443 [-]
Fv	1.569 [-]
TB	0.154 [s]
TC	0.461 [s]
TD	2.720 [s]
SA(0)	0.280 [g]
SA(TB)	0.645 [g]

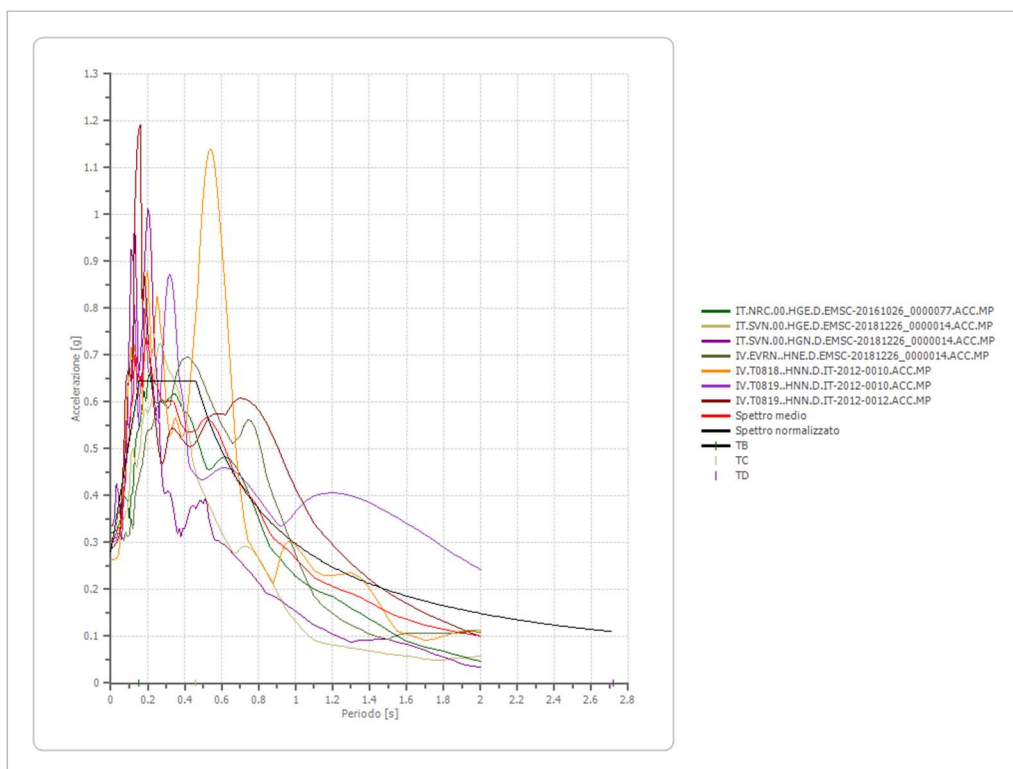


GRAFICO 1 SLV-Accelerogrammi di input-Spettro medio e spettro normalizzato

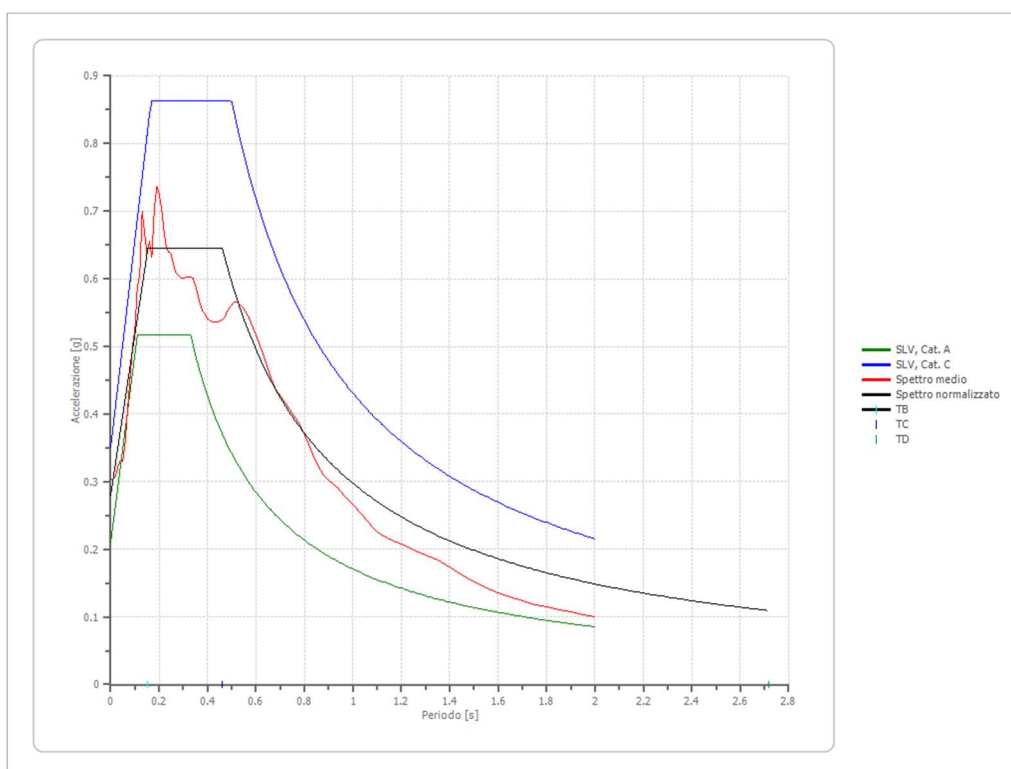


GRAFICO 2 SLV-Spettro normativa Spettro medio e spettro normalizzato

Ag [g]	F ₀	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]	S
0.280	2.314	0,463	0.154	0.461	2.720	0.280	0.645	1.333

Tabella riepilogativa parametri sismici da RSL per stato limite SLV-



Elaborazione (SLD)

Numero di iterazioni 50
Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima 0.5
Tipo di modulo elastico Shake 91
Massimo errore percentuale di convergenza --

Fattori di amplificazione ICMS 2018

Tai	0.170 [s]
Tvi	1.250 [s]
Tao	0.170 [s]
Tvo	0.640 [s]
Sami	1.874 [m/s ²]
Svmi	0.162 [m/s]
Samo	3.299 [m/s ²]
Svmo	0.229 [m/s]
Fa	1.761 [-]
Fv	1.411 [-]
TB	0.145 [s]
TC	0.435 [s]
TD	2.106 [s]
SA(0)	0.126 [g]
SA(TB)	0.336 [g]

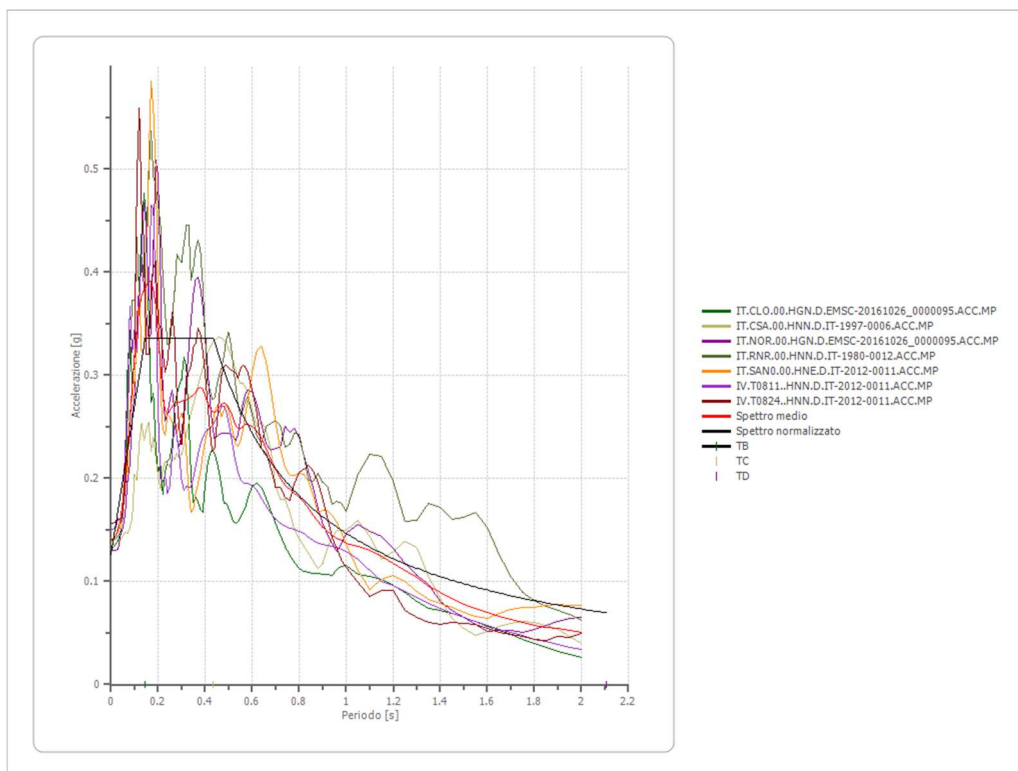


GRAFICO 1 SLD-Accelerogrammi di input-Spettro medio e spettro normalizzato

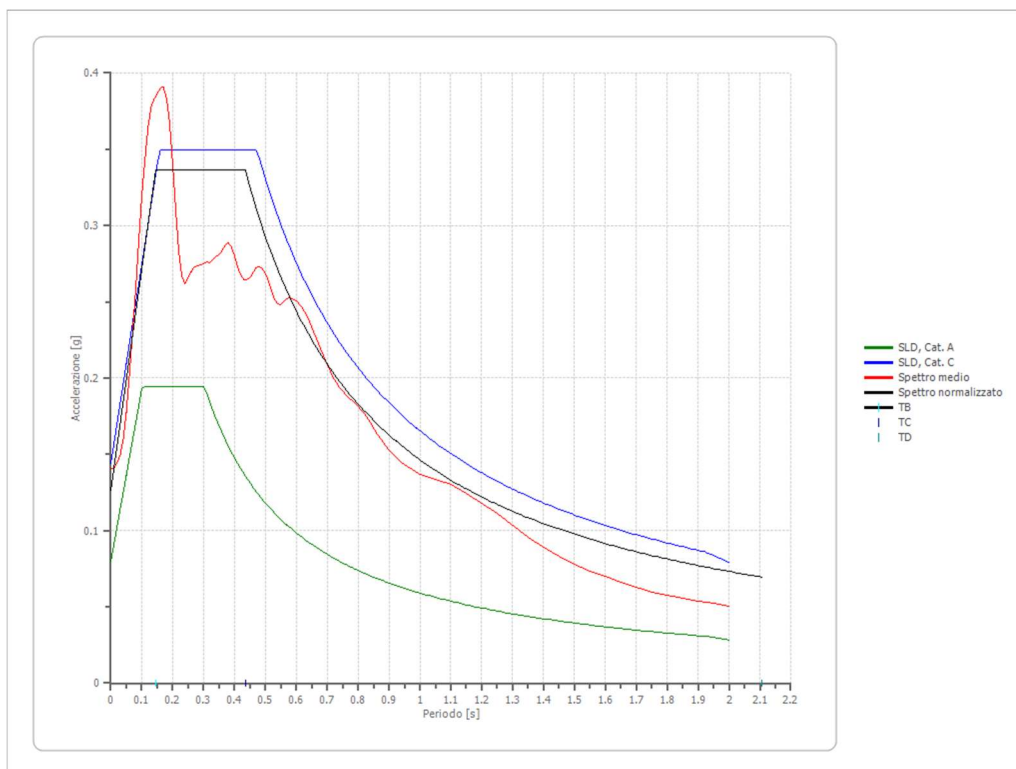


GRAFICO 2 SLD-Spettro normativa Spettro medio e spettro normalizzato

Ag [g]	F ₀	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]	S
0,126	2,658	0,435	0,145	0,435	2,106	0,126	0,336	1,581

Tabella riepilogativa parametri sismici da RSL per stato limite SLD-



Elaborazione (SLO)

Numero di iterazioni 50
Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima 0.5
Tipo di modulo elastico Shake 91
Massimo errore percentuale di convergenza --

Fattori di amplificazione ICMS 2018

Tai	0.160 [s]
Tvi	1.150 [s]
Tao	0.170 [s]
Tvo	0.880 [s]
Sami	1.361 [m/s ²]
Svmi	0.116 [m/s]
Samo	2.378 [m/s ²]
Svmo	0.179 [m/s]
Fa	1.747 [-]
Fv	1.535 [-]
TB	0.157 [s]
TC	0.472 [s]
TD	1.988 [s]
SA(0)	0.097 [g]
SA(TB)	0.242 [g]

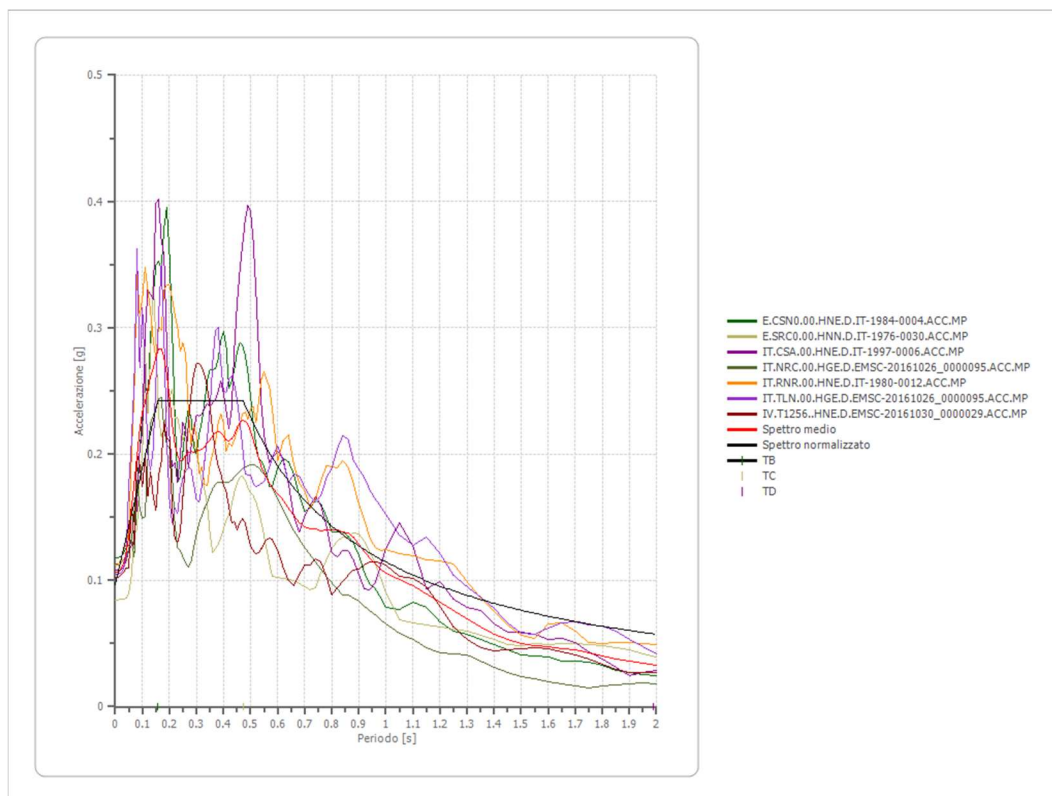


GRAFICO 1 SLO-Accelerogrammi di input-Spettro medio e spettro normalizzato

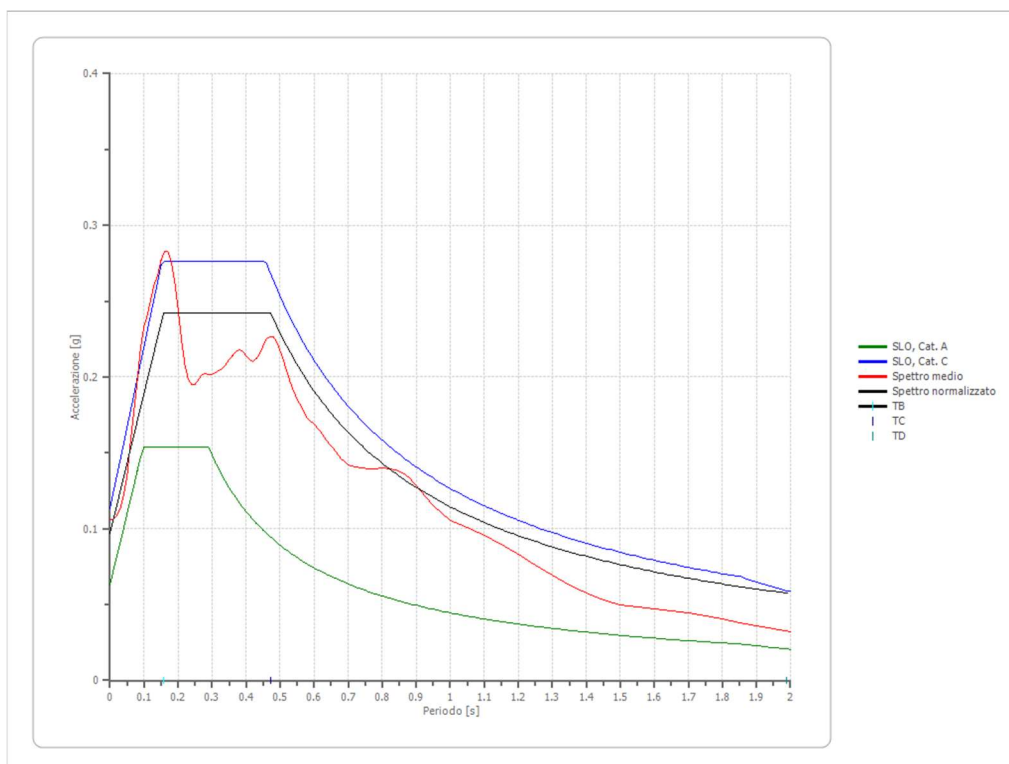


GRAFICO 2 SLO-Spettro normativa Spettro medio e spettro normalizzato

Ag [g]	F ₀	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]	S
0,097	2,502	0,472	0,157	0,472	1,988	0,097	0,242	1,538

Tabella riepilogativa parametri sismici da RSL per stato limite SLO-

Attraverso i dati ottenuti dalla RSL è possibile ricavare il valore di a_{max} (Accelerazione massima attesa al sito) per ogni stato limite, utilizzando la formula seguente:

$$a_{max_{SLV}} = Ag * Ss * St = \quad (NTC 2018-7.11.3.5.2 Metodi di analisi- [7.11.5.])$$

$$a_{max_{SLV}} = Ag * Ss * St = 0,280 * 1,311 * 1,2 = \mathbf{0,441 \text{ g}}$$

$$a_{max_{SLD}} = Ag * Ss * St = 0,126 * 1,499 * 1,2 = \mathbf{0,227 \text{ g}}$$

$$a_{max_{SLO}} = Ag * Ss * St = 0,097 * 1,554 * 1,2 = \mathbf{0,181 \text{ g}}$$



A_g = Accelerazione orizzontale massima su suolo rigido

S_s = Coefficiente di amplificazione stratigrafico emerso dalla RSL

S_t = Coefficiente che tiene conto della categoria topografica

Il valore di S_t nel nostro caso è 1,2 poiché il sito rientra nella categoria topografia T2.

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_t
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_t (NTC 2018)

Il valore di S_s , è ricavato attraverso l'equazione indicata nella tabella seguente, tenendo conto della categoria di suolo per il sito in progetto. Nel nostro caso il sito rientra in categoria C.

Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_c^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_c^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_c^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_c^*)^{-0,40}$

Tab. 3.2.IV – Espressioni di S_s e di C_c (NTC 2018)

Il Geologo

Dott. Geol. Ferla Carmelo