

**Eni SpA** **DISTRETTO  
MERIDIONALE**



Doc. AMB\_ME\_06\_447

**[ID\_VIP 9601]**  
***Realizzazione dell'area Cluster  
Sant'Elia 1 - Cerro Falcone 7***

**RISPOSTA SIMICA LOCALE  
VERIFICA A LIQUEFAZIONE**

**Comune di Marsicovetere (PZ)  
Regione Basilicata**

**MAGGIO 2024**

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Simica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 2 di 31
--	---------------------	---	------------	----------------

**Comune di Marsicovetere (PZ)**  
**Regione Basilicata**

[ID\_VIP 9601]

Istanza di proroga dei termini di validità del decreto di compatibilità  
 ambientale rilasciato dalla Regione Basilicata con DGR n. 461 del  
 10.04.2015, relativa al “Progetto per la realizzazione dell’area  
 Cluster Sant’Elia 1 - Cerro Falcone 7 in località la Civita del  
 Comune di Marsicovetere (PZ)”

**RISPOSTA SIMICA LOCALE**  
**VERIFICA A LIQUEFAZIONE**

	Commessa: P24004		Doc. n. AMB_ME_06_447		
	--	--	--	--	--
	00	Maggio 2024	Oriolo N.	Mazzone D.	Di Michele C.
	REV.	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO

00	Emissione	Proger S.p.A.	Eni S.p.A.	Eni S.p.A.	Maggio 2024
REV.	DESCRIZIONE	PREPARATO	VERIFICATO	APPROVATO	DATA

 <p>Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale</p>	<p>Data Maggio 2024</p>	<p><b>Risposta Simica Locale verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447</p>	<p>Rev. 00</p>	<p>Pagina 3 di 31</p>
---	-----------------------------	---	--------------------	---------------------------

## INDICE

1	PREMESSA.....	4
2	CONDIZIONAMENTO GEOLOGICO DELLA RSL .....	4
3	DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO .....	4
3.1	Analisi delle indagini in sito .....	4
4	ANALISI NUMERICA DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE .....	8
4.1	Disaggregazione Magnitudo di Riferimento Distanza Epicentrale .....	10
4.2	Moti sismici di input.....	16
4.3	Descrizione analisi monodimensionale .....	17
5	CODICE DI CALCOLO UTILIZZATO .....	19
6	PARAMETRI DI INPUT INSERITI IN STRATA.....	22
7	ANALISI DEI RISULTATI .....	23
7.1	RISPOSTA SISMICA LOCALE .....	25
8	CONCLUSIONI .....	28
9	VERIFICA A LIQUEFAZIONE .....	29

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Sismica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 4 di 31
---	---------------------	--	------------	-------------------

## 1 PREMESSA

Il documento di attuazione della l.r. 38/97 “criteri e modalità attuativi l.r. n. 38/1997 art. 12 comma 1” per quanto riguarda la Relazione sulla modellazione sismica prevede che “Per tutte le opere appartenenti alle classi d’uso III e IV così come definito dall’art. 2.4.2 del d.m. 17.01.2018, e nei casi in cui non è possibile utilizzare l’approccio semplificato per la caratterizzazione sismica del sito, si deve redigere una specifica analisi di RISPOSTA SISMICA LOCALE 1D/2D con le modalità indicate nel § 7.11.3.1. delle NTC vigenti.”

## 2 CONDIZIONAMENTO GEOLOGICO DELLA RSL

A parità di magnitudo e localizzazione della sorgente sismica (ipocentro), terreni a caratteristiche fisico/meccaniche diverse subiscono deformazioni di intensità differente e pertanto per la stima dell’esposizione al rischio sismico occorre valutare attentamente l’azione sismica che emerge in superficie a seguito delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza, subite dal moto di input passando dal substrato rigido al terreno di copertura.

La vigente normativa, NTC 2018 C7.11.3.1.2.1, fornisce i criteri per la corretta definizione della Risposta Sismica Locale, ed individua come base essenziale per questi studi la ricostruzione dettagliata del Modello Geologico di riferimento che tenga in conto le condizioni locali e le caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche del sottosuolo.

## 3 DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO

### 3.1 Analisi delle indagini in sito

Nel sito di riferimento sono state eseguite n°9 misura di microtremore a stazione singola e n°2 indagine geofisica di tipo MASW n° 1 indagine sismica passiva con antenna sismica ESAC.

#### MASW01 + ESAC-

Nella figura seguente sono riportati gli spessori e le velocità delle onde S di tutti i sismostrati individuati. Il passaggio dai terreni di copertura al bedrock sismico ( $V_s > 1200$  m/s) può essere collocato a circa 85 metri dal p.c., mentre i terreni di copertura mostrano velocità comprese fra 250 m/s, dello strato più superficiale fino ad arrivare, a 680 m/s degli strati più profondi. Tale modello sismostratigrafico trova perfetto accordo con il picco di circa 2 Hz individuato dalle curve H/V.

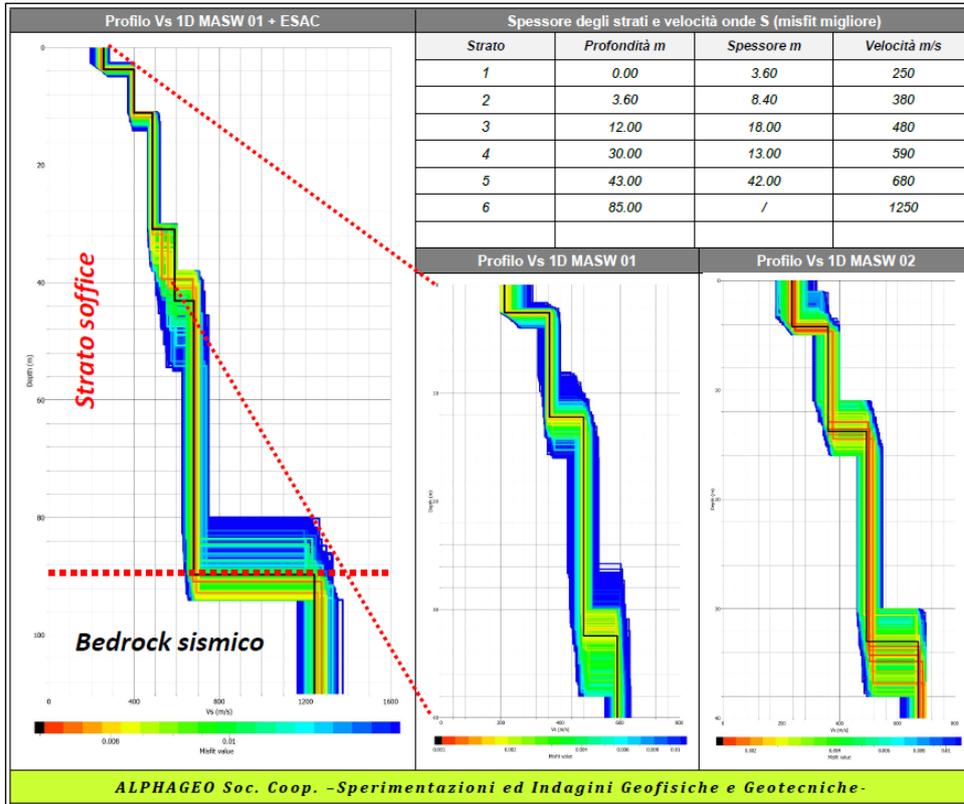
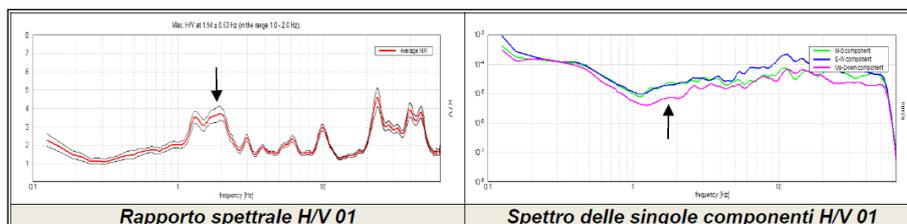


Figura 1: Profilo di velocità Vs 1D da inversione congiunta dei dati masw ed esac

## HVSR

I rapporti spettrali H/V relativi alle misure di microtremore effettuata nell'area di studio sono riportati nella figura seguente e mostrano tutte un picco alla frequenza di circa 1.94 Hz (vedi misure HVSR).



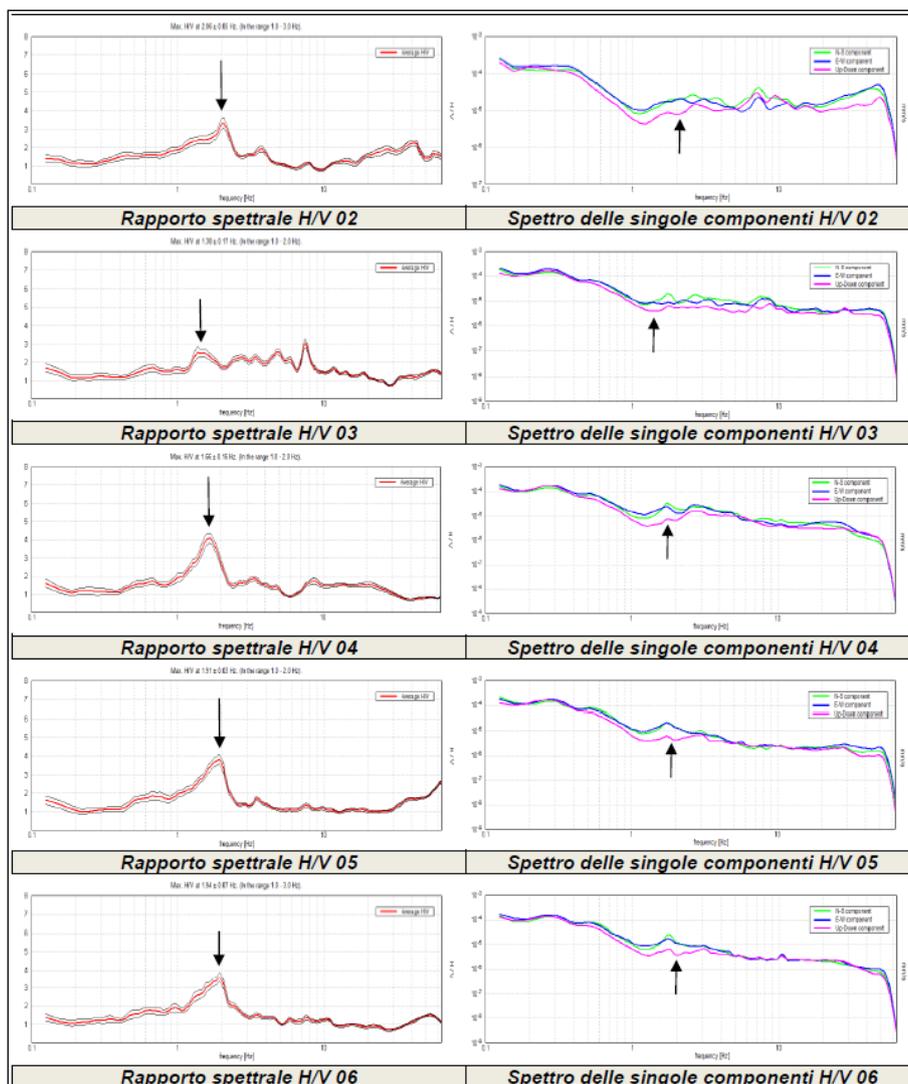


fig. 1 Grafico dei rapporti spettrali e spettro delle singole componenti H/V

Tutte le misure eseguite nell'area di interesse evidenziano un picco alla frequenza comprese fra 1.94 e 2.06 Hz ad indicare un contrasto di impedenza sismica posto alla profondità di circa 85 metri dal p.c. correlabile con il limite fra terreni dello strato "soffice e il bedrock sismico.

Di seguito viene indicato il profilo sismo-stratigrafico impiegato come modello di input per la risposta sismica locale, tale modello, come sopra spiegato, è stato ricostruito mediante un'analisi congiunta di tutte le indagini presenti nell'area di studio.

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Simica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 7 di 31
--	---------------------	---	------------	-------------------

Tabella 3.1: Profilo sismostratigrafico ai fini della RSL

Strato	Tipo suolo	Spessore [m]	Profondità [m] Top	Velocità Onde S [m/s]	Dato VS	Gamma [KN/m <sup>3</sup> ]	G/G0	Damping
1	Limi argillosi	4.00	0.00	250.00	MASW	20.90	<i>EPRI (93), PI=30</i>	<i>EPRI (93), PI=30</i>
2	Limi sabbiosi con ghiaie	8.00	4.00	380.00	MASW	20.10	<i>Idriss (1990), Sand</i>	<i>Idriss (1990), Sand</i>
3	Limi argillosi	18.00	12.00	480.00	MASW+ ESAC	20.90	<i>EPRI (93), PI=30</i>	<i>EPRI (93), PI=30</i>
4	Limi argillosi molto consistenti	13.00	30.00	590.00	MASW+ ESAC	21.00	<i>Vucetic &amp; Dobry, PI = 50</i>	<i>Vucetic &amp; Dobry, PI = 50</i>
5	Limi argillosi molto consistenti	42.00	43.00	680.00	MASW+ ESAC	21.00	<i>Vucetic &amp; Dobry, PI = 50</i>	<i>Vucetic &amp; Dobry, PI = 50</i>
6	BEDROCK	semispazio	85.00	1250.00	MASW	22.00	/	/

Come riportato in tabella, lo strato soffice poggiate sul substrato rigido è stato suddiviso in sismostrati di spessore variabile e, per ciascun sismostrato, la tabella riporta le curve di smorzamento ed il peso di volume utilizzati nel codice di calcolo.

## 4 ANALISI NUMERICA DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

La sicurezza e le prestazioni di un'opera o di una parte di essa devono essere valutate in relazione agli "stati limite" che si possono verificare durante la vita nominale ( $V_N$ ). Stato limite è una condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per le quali è stata progettata. In particolare, le opere devono possedere i seguenti requisiti:

- sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU);
- sicurezza nei confronti di stati limite di esercizio (SLE);
- robustezza nei confronti di azioni eccezionali.

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite:

CLASSE I	Costruzioni con presenza solo occasionale di persone; edifici agricoli.
CLASSE II	Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali; industrie con attività non pericolose per l'ambiente; ponti; opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV; reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza; dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.
CLASSE III	Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi (scuole, teatri, musei, centri commerciali); industrie con attività pericolose per l'ambiente; reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV; ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza; dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.
CLASSE IV	Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità; industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente; reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B; ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico; dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione sono valutate in relazione ad un periodo di riferimento ( $V_R$ ) che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale ( $V_N$ ) per il coefficiente d'uso ( $C_U$ ):

$$V_R = C_U \times V_N$$

Il valore del coefficiente d'uso ( $C_U$ ) è definito, al variare della classe d'uso, come riportato nella tabella seguente.

Classe d'uso	I	II	III	IV
Coefficiente d'uso $C_U$	0,7	1,0	1,5	2,0

Tabella 2 Corrispondenza tra classi d'uso e coefficiente d'uso.

Se  $V_R \leq 35$  anni si pone comunque  $V_R = 35$  anni.

Assumendo che la legge di ricorrenza dell'azione sismica sia un processo poissoniano, il periodo di riferimento  $V_R$  di una costruzione è utilizzato per valutare, fissata la probabilità di superamento PVR

corrispondente allo stato limite considerato, il periodo di ritorno  $T_R$  dell'azione sismica cui fare riferimento per la verifica.

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla pericolosità sismica di base del sito di costruzione. La pericolosità sismica di base è definita in termini di:

- accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale;
- ordinate dello spettro di risposta elastico in termini di accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$ , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR nel periodo di riferimento  $V_R$ .

In alternativa è ammesso l'uso di accelerogrammi, purché commisurati alla pericolosità sismica del sito. Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

**$a_g$**  - accelerazione orizzontale massima attesa al sito (fornita da INGV);

**$F_o$**  - valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in termini di accelerazione orizzontale;

**$T_{c^*}$**  - periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

In allegato alla norma sono forniti i valori di  $a_g$ ,  $F_o$  e  $T_{c^*}$  necessari per la determinazione delle azioni sismiche per tutti i siti considerati.

Nei confronti delle azioni sismiche gli stati limite, sia di esercizio che ultimi, sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.

**Stati limite di esercizio:**

Stato Limite di Operatività (SLO); Stato Limite di Danno (SLD):

**Stati limite ultimi:**

Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV); Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC).

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento, PVR, cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati sono riportati nella tabella seguente:

<i>Stati Limite</i>		<i>PVR</i>
<i>Stati limite di esercizio</i>	<i>SLO</i>	81%
	<i>SLD</i>	63%
<i>Stati limite ultimi</i>	<i>SLV</i>	10%
	<i>SLC</i>	5%

Tabella 3 Probabilità di superamento del periodo di riferimento PVR per ciascun Stato Limite.

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Simica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 10 di 31
--	---------------------	---	------------	--------------------

Questi valori valgono per tutte le classi d'uso. Per ogni stato limite, l'azione sismica di progetto è calcolata considerando tali probabilità in rapporto al periodo di riferimento  $V_R$  della costruzione considerata (che dipende dalla classe d'uso).

Calcolato il periodo di riferimento  $V_R$ , e stabilita per ogni stato limite la relativa probabilità di eccedenza  $PVR$ , si determina il periodo di ritorno  $T_R$  del sisma mediante la relazione:

$$T_R = V_R / \ln(1 - PVR) = C_U \cdot V_N / \ln(1 - PVR)$$

Stabilito  $T_R$ , si possono determinare per ogni sito i valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$  che definiscono la forma dello spettro di risposta per ciascun tipo di costruzione, classe d'uso e stato limite.

***L'opera in progetto ricade nella classe d'uso IV avente coefficiente d'uso 2.0, mentre la vita nominale presa in considerazione è di 50 anni per cui il periodo di riferimento  $V_R$  utilizzato per individuare la pericolosità di base ai diversi stati limite è di  $V_R = 100$  anni.***

#### 4.1 Disaggregazione Magnitudo di Riferimento Distanza Epicentrale

Per individuare le caratteristiche sismogenetiche del nostro sito abbiamo bisogno di reperire una coppia di dati, magnitudo e distanza epicentrale, necessaria per scegliere i terremoti naturali da un catalogo.

L'operazione da eseguire prende il nome di disaggregazione e consiste nell'individuare, a partire da uno studio di pericolosità sismica con metodo probabilistico, le coppie di dati che maggiormente concorrono alla stessa pericolosità sismica di un determinato sito.

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

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

Si seleziona una probabilità la più vicina cautelativamente al periodo di ritorno relativo al progetto di cui ci dobbiamo occupare. Si ricordi che ai sensi dell'Allegato B delle NTC 2018, il periodo di ritorno ( $T_R$ ) è legato alla vita di riferimento ( $V_R$ ) ed alla probabilità di superamento della vita di riferimento ( $PVR$ ) dalla seguente relazione:

$$T_R = - V_R / \ln(1 - PVR)$$

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

Considerato che la pericolosità di base viene indicata in termini di  $a(g)$ , valore equivalente alla PGA, e che questa non è altro che l'accelerazione a periodo zero delle NTC, è evidente che per i nostri scopi riveste maggiore interesse la disaggregazione a periodo zero, nelle due formulazioni per coppie di variabili M e R e M e Y.

Per l'analisi delle strutture è infatti possibile utilizzare direttamente degli accelerogrammi, effettuando analisi dinamiche con integrazione al passo.

Gli accelerogrammi, utilizzati in luogo degli spettri di risposta, dovranno essere a questi compatibili ed è per tanto necessario applicare i criteri di ricerca implementati nelle banche dati più accreditate. Per questo lavoro si è fatto riferimento al codice del sito PEER Ground Motion Database che permette la ricerca le combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle Norme tecniche per le costruzioni, dell'Eurocodice 8 o definiti dall'utente arbitrariamente.

Gli accelerogrammi possono anche rispecchiare caratteristiche di sorgente di interesse in termini di magnitudo e distanza epicentrale e misure d'intensità del terremoto.

Le registrazioni accelerometriche sono state ricercate nel database legato al motore di ricerca PEER Ground Motion Database.

Di seguito sono riportati i grafici e le tabelle con i dati di disaggregazione forniti dall'INGV riferiti al sito in esame e per le differenti probabilità di eccedenza in 50 anni:

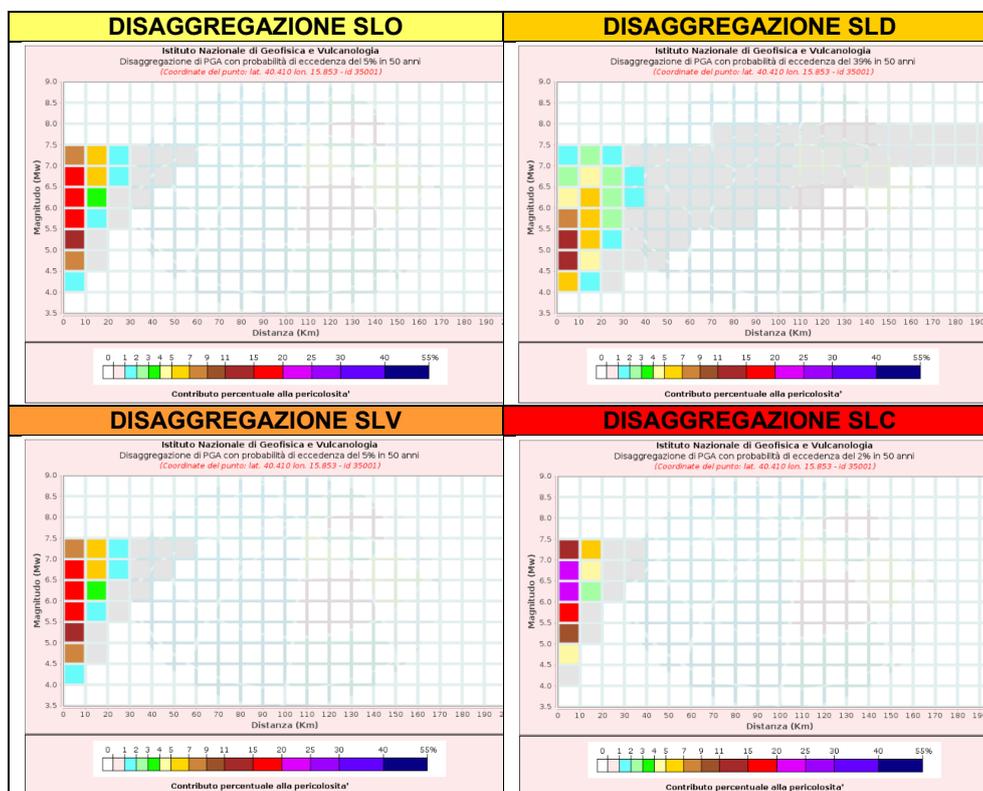


Tabella 4 Disaggregazione dei valori di  $a_g$  per i vari stati limite

**DISAGGREGAZIONE STATO LIMITE SLO Tr 60 anni**

Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni (Coordinate del punto: lat. 40.410 lon. 15.853 - id 35001)											
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	5.6800	12.6000	9.5300	6.3300	3.8100	2.1400	0.8840	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	2.0300	6.2300	7.0500	6.5500	5.1100	3.5500	1.6600	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	0.3820	1.6100	2.5100	3.0400	2.9900	2.6300	1.4500	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	0.0210	0.2660	0.6570	1.0300	1.2600	1.3800	0.8930	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.0000	0.0180	0.1670	0.3840	0.6060	0.7910	0.5840	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0362	0.1590	0.3130	0.4780	0.3860	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0057	0.0882	0.2330	0.4130	0.2550	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0370	0.1500	0.3080	0.1680	0.0001	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0105	0.0863	0.2060	0.1120	0.0071	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0016	0.0465	0.1340	0.0809	0.0099	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0174	0.0646	0.0617	0.0084	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0058	0.0314	0.0471	0.0070	0.0000	0.0000
120-130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0021	0.0183	0.0343	0.0053	0.0000	0.0000
130-140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0007	0.0127	0.0241	0.0038	0.0000	0.0000
140-150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0074	0.0172	0.0029	0.0000	0.0000
150-160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0121	0.0021	0.0000	0.0000
160-170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	0.0086	0.0016	0.0000	0.0000
170-180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0064	0.0014	0.0000	0.0000
180-190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0040	0.0010	0.0000	0.0000
190-200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0021	0.0007	0.0000	0.0000

Valori Medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.62	16.6	0.175

 <p>Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale</p>	<p>Data Maggio 2024</p>	<p><b>Risposta Simica Locale verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447</p>	<p>Rev. 00</p>	<p>Pagina 13 di 31</p>
---	-----------------------------	---	--------------------	----------------------------

DISAGGREGAZIONE STATO LIMITE SLD Tr 101 anni

Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 39% in 50 anni (Coordinate del punto: lat. 40.410 lon. 15.853 - id 35001)											
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	5.6500	13.4000	11.0000	7.8500	4.9900	2.9100	1.2200	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	1.4200	4.8600	6.2900	6.5700	5.6800	4.3000	2.1300	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	0.1500	0.9240	1.7900	2.5200	2.8200	2.7900	1.6700	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	0.0001	0.0739	0.3710	0.7240	1.0400	1.3000	0.9250	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.0000	0.0002	0.0560	0.2290	0.4430	0.6700	0.5520	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0730	0.2040	0.3710	0.3380	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0252	0.1360	0.2980	0.2070	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0749	0.2070	0.1290	0.0001	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0328	0.1280	0.0807	0.0057	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0114	0.0756	0.0555	0.0076	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0022	0.0317	0.0399	0.0061	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0120	0.0286	0.0049	0.0000	0.0000
120-130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0049	0.0193	0.0035	0.0000	0.0000
130-140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0022	0.0124	0.0024	0.0000	0.0000
140-150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0007	0.0078	0.0017	0.0000	0.0000
150-160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0046	0.0012	0.0000	0.0000
160-170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0025	0.0008	0.0000	0.0000
170-180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0014	0.0007	0.0000	0.0000
180-190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0004	0.0000	0.0000
190-200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0002	0.0000	0.0000

Valori Medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.67	14.4	0.258

DISAGGREGAZIONE STATO LIMITE SLV Tr 949 anni

Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni (Coordinate del punto: lat. 40.410 lon. 15.853 - id 35001)											
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	1.8400	7.7000	12.4000	16.0000	17.0000	15.3000	8.7100	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	0.0000	0.0158	0.4540	1.8200	3.8900	6.0900	5.1900	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0178	0.3630	1.1800	1.4400	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0027	0.1400	0.3090	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0054	0.0656	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0053	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	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
6.15	7.0	0.862

 <p>Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale</p>	<p>Data Maggio 2024</p>	<p><b>Risposta Simica Locale verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447</p>	<p>Rev. 00</p>	<p>Pagina 15 di 31</p>
---	-----------------------------	---	--------------------	----------------------------

DISAGGREGAZIONE STATO LIMITE SLC Tr 1950 anni

Disaggregazione di PGA con probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni (Coordinate del punto: lat. 40.410 lon. 15.853 - id 35001)											
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	0.7190	4.1800	9.3100	15.4000	20.3000	22.0000	14.5000	0.0000	0.0000	0.0000
10-20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0097	0.4610	2.0600	4.7200	5.0400	0.0000	0.0000	0.0000
20-30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0117	0.3890	0.8450	0.0000	0.0000	0.0000
30-40	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0013	0.0649	0.0000	0.0000	0.0000
40-50	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50-60	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
60-70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
70-80	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
80-90	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
90-100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
100-110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
110-120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	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
6.34	5.76	1.07

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Simica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 16 di 31
--	---------------------	---	------------	--------------------

Le tabelle sopra riportate mostrano il contributo percentuale delle diverse coppie di dati magnitudo/distanza alla pericolosità di base del punto d'interesse. I criteri per la scelta della coppia di dati magnitudo/distanza non sono univocamente definiti, né dall'INGV né dalle norme tecniche. Tuttavia, alcune considerazioni pratiche al proposito sono fornite da Rota et al. 2011:

*"Generalmente, poiché l'effetto della magnitudo sulla forma spettrale è più significativo dell'effetto della distanza epicentrale, si applicano minori tolleranze alla magnitudo e maggiori tolleranze alla distanza. Ovviamente, il numero di registrazioni disponibili aumenta se si aumenta la misura della finestra di ricerca. L'uso di finestre piccole spesso rende molto difficile il reperimento di un set di accelerogrammi spettro compatibili".*

Altre considerazioni vengono espresse da Corigliano et al. 2012: *"E' stato mostrato che l'effetto della magnitudo sulla forma spettrale è più significativo di quello della distanza epicentrale, il che permette di applicare una maggiore tolleranza per la distanza rispetto alla magnitudo"*.

## 4.2 Moti sismici di input

Gli accelerogrammi naturali, ossia registrazioni di eventi sismici reali, sono generalmente reperiti in specifiche banche dati disponibili in rete. Le NTC impongono precise condizioni di spettro/compatibilità degli accelerogrammi naturali: la coerenza con lo spettro elastico è da verificare in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi, per un coefficiente di smorzamento viscoso.

Attualmente il metodo più utilizzato per estrarre da una banca dati accelerometrica eventi con caratteristiche ben definite è quello di ricorrere all'uso del software gratuito PEER Ground Motion Database. Il software associato al database ed utilizzabile online permette l'estrazione di accelerogrammi di input naturali per applicazioni ingegneristiche e di pianificazione territoriale, da più banche dati, quali: la banca dati PEER Ground Motion Database.

La ricerca è stata eseguita, assegnando una tolleranza di compatibilità della media del 10% inferiore e del 20% superiore nell'intervallo di periodi  $0.15s \div 2s$  e selezionando l'opzione di ricerca rapida, le analisi sono state effettuate al fine di ottenere combinazioni di accelerogrammi compatibili con lo spettro di normativa che non necessitano di essere scalati.

Sono stati così estratti 7 accelerogrammi rientrati nei margini di tolleranza prefissati, i grafici successivi indicano gli accelerogrammi selezionati per ogni stato limite rappresentando gli spettri messi a confronto con il relativo target:

Registrazioni selezionate: 7  
 Combinazione corrente:  (Punteggio: 0,066)

[Scarica ascii](#) [Scarica hdf5](#)

Combinazione	ID registrazione	ID ITACA	Codice rete	Codice stazione	ID sensore	Strumento	Orientamento	ML	MW	Tipologia di faglia	Distanza epicentrale [km]	Classe ECB	Vs30 [m/s]	Punteggio	Fattore di scala
1	IT.AQK.00.HN.IT-2009-0102	IT-2009-0102	IT	AQK	00	HN	N	5.4	5.5	Normal faulting	8.4	B	705	N: 0.297	N: 1.000
1	IV.RA07.HN.IT-2009-0121	IT-2009-0121	IV	RA07		HN	N	5.1	5.4	Normal faulting	10.4	B		N: 0.557	N: 1.000
1	IT.AQK.00.HN.IT-2009-0102	IT-2009-0102	IT	AQK	00	HN	E	5.4	5.5	Normal faulting	8.4	B	705	E: 0.345	E: 1.000
1	E.SRCD.00.HN.IT-1976-0027	IT-1976-0027	E	SRCD	00	HN	E	6.1	5.9	Thrust faulting	17.1	A		E: 0.324	E: 1.000
1	IT.MNF.00.HG.EMSC-20161026_0000095	EMSC-20161026_0000095	IT	MNF	00	HG	N	5.9	5.9	Normal faulting	17.4	A	1062	N: 0.253	N: 1.000
1	4A.MI03.HN.IT-2009-0102	IT-2009-0102	4A	MI03		HN	E	5.4	5.5	Normal faulting	2.8	B	378	E: 0.190	E: 1.000
1	IT.NOR.00.HG.EMSC-20161026_0000095	EMSC-20161026_0000095	IT	NOR	00	HG	N	5.9	5.9	Normal faulting	13.3	B	423	N: 0.618	N: 1.000

**fig. 2** *setupla di accelerogrammi di input selezionati allo stato limite SLO*

Registrazioni selezionate: 7  
 Combinazione corrente:  (Punteggio: 0,083)

[Scarica ascii](#) [Scarica hdf5](#)

Combinazione	ID registrazione	ID ITACA	Codice rete	Codice stazione	ID sensore	Strumento	Orientamento	ML	MW	Tipologia di faglia	Distanza epicentrale [km]	Classe ECB	Vs30 [m/s]	Punteggio	Fattore di scala
1	IT.NOR.00.HG.EMSC-20161026_0000077	EMSC-20161026_0000077	IT	NOR	00	HG	N	5.4	5.4	Normal faulting	9.5	B	423	N: 0.528	N: 1.000
1	N.T1214.HN.EMSC-20161026_0000095	EMSC-20161026_0000095	IV	T1214		HN	N	5.9	5.9	Normal faulting	17.8	B		N: 0.407	N: 1.000
1	N.T1212.HN.EMSC-20161026_0000095	EMSC-20161026_0000095	IV	T1212		HN	E	5.9	5.9	Normal faulting	18.8	A		E: 0.329	E: 1.000
1	E.SRCD.00.HN.IT-1976-0027	IT-1976-0027	E	SRCD	00	HN	E	6.1	5.9	Thrust faulting	17.1	A		E: 0.324	E: 1.000
1	IT.MNF.00.HG.EMSC-20161026_0000095	EMSC-20161026_0000095	IT	MNF	00	HG	N	5.9	5.9	Normal faulting	17.4	A	1062	N: 0.253	N: 1.000
1	4A.MI03.HN.IT-2009-0102	IT-2009-0102	4A	MI03		HN	E	5.4	5.5	Normal faulting	2.8	B	378	E: 0.190	E: 1.000
1	IT.NOR.00.HG.EMSC-20161026_0000095	EMSC-20161026_0000095	IT	NOR	00	HG	N	5.9	5.9	Normal faulting	13.3	B	423	N: 0.618	N: 1.000

**fig. 3** *setupla di accelerogrammi di input selezionati allo stato limite SLD*

Registrazioni selezionate: 7  
 Combinazione corrente:  (Punteggio: 0,088)

[Scarica ascii](#) [Scarica hdf5](#)

Combinazione	ID registrazione	ID ITACA	Codice rete	Codice stazione	ID sensore	Strumento	Orientamento	ML	MW	Tipologia di faglia	Distanza epicentrale [km]	Classe ECB	Vs30 [m/s]	Punteggio	Fattore di scala
1	3A.MI2102.HN.EMSC-20161030_0000029	EMSC-20161030_0000029	3A	MI2102		HN	E	6.1	6.5	Normal faulting	17.4	B		E: 0.332	E: 1.000
1	E.FRC.00.HN.IT-1976-0030	IT-1976-0030	E	FRC	00	HN	E	6.0	6.0	Thrust faulting	16.2	B	454	E: 0.417	E: 1.000
1	IT.AQK.00.HN.IT-2009-0009	IT-2009-0009	IT	AQK	00	HN	E	5.9	6.1	Normal faulting	1.8	B	705	E: 0.389	E: 1.000
1	N.T1244.HN.EMSC-20161030_0000029	EMSC-20161030_0000029	IV	T1244		HN	E	6.1	6.5	Normal faulting	17.4	B		E: 0.366	E: 1.000
1	IT.AQK.00.HN.IT-2009-0009	IT-2009-0009	IT	AQK	00	HN	N	5.9	6.1	Normal faulting	4.9	B	474	N: 0.556	N: 1.000
1	IT.AQK.00.HN.IT-2009-0009	IT-2009-0009	IT	AQK	00	HN	N	5.9	6.1	Normal faulting	1.8	B	705	N: 0.325	N: 1.000
1	IT.AQK.00.HN.IT-2009-0009	IT-2009-0009	IT	AQK	00	HN	E	5.9	6.1	Normal faulting	5.0	B	696	E: 0.394	E: 1.000

**fig. 4** *setupla di accelerogrammi di input selezionati allo stato limite SLV*

Registrazioni selezionate: 7  
 Combinazione corrente:  (Punteggio: 0,070)

[Scarica ascii](#) [Scarica hdf5](#)

Combinazione	ID registrazione	ID ITACA	Codice rete	Codice stazione	ID sensore	Strumento	Orientamento	ML	MW	Tipologia di faglia	Distanza epicentrale [km]	Classe ECB	Vs30 [m/s]	Punteggio	Fattore di scala
1	IT.AMT.00.HG.EMSC-20160824_0000006	EMSC-20160824_0000006	IT	AMT	00	HG	N	6.0	6.0	Normal faulting	8.5	B	670	N: 0.242	N: 1.192
1	IT.ALT.00.HN.IT-1980-0012	IT-1980-0012	IT	ALT	00	HN	N	6.5	6.9	Normal faulting	23.4	A	1018	N: 0.156	N: 8.629
1	IT.NOR.00.HG.EMSC-20160824_0000006	EMSC-20160824_0000006	IT	NOR	00	HG	N	6.0	6.0	Normal faulting	15.6	B	423	N: 0.340	N: 2.486
1	IT.BSC.00.HN.IT-1980-0012	IT-1980-0012	IT	BSC	00	HN	N	6.5	6.9	Normal faulting	28.3	A	972	N: 0.968	N: 4.694
1	IT.MTR.00.HG.EMSC-20160824_0000006	EMSC-20160824_0000006	IT	MTR	00	HG	N	6.0	6.0	Normal faulting	19.4	B	689	N: 0.252	N: 5.523
1	IT.NOR.00.HG.EMSC-20161026_0000095	EMSC-20161026_0000095	IT	NOR	00	HG	E	5.9	5.9	Normal faulting	13.3	B	423	E: 0.228	E: 2.084
1	E.FRC.00.HN.IT-1976-0025	IT-1976-0025	E	FRC	00	HN	E	5.8	5.6	Thrust faulting	18.6	B	454	E: 0.648	E: 1.915

**fig. 5** *setupla di accelerogrammi di input selezionati allo stato limite SLC*

### 4.3 Descrizione analisi monodimensionale

Nell'analisi monodimensionale utilizzata ogni strato sarà definito dai propri valori di densità, modulo di taglio, rapporto di smorzamento critico e spessore; tali valori sono indipendenti dalla frequenza. Il modello utilizzato prevede una risposta del deposito causata da onde di taglio polarizzate orizzontalmente che si propagano verticalmente dal bedrock verso la superficie lungo una colonna verticale monodimensionale di terreno, superfici di stratificazione orizzontali e lateralmente omogenee, una superficie del bedrock e del terreno estesa lateralmente all'infinito e una superficie topografica priva di irregolarità.

Nel modello a strati continui ogni i-esimo strato è caratterizzato da 4 parametri: densità, spessore  $h_i$ , modulo di taglio  $G_i$  e fattore di smorzamento  $D_i$ .

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Simica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 18 di 31
--	---------------------	---	------------	--------------------

Il modulo di taglio può essere utilizzato come parametro di input nell'analisi numerica e si ottiene a partire dalla velocità delle onde di taglio tramite la seguente relazione:

$$G_i = \frac{\rho_i}{g} V_{S_i}^2$$

Dove:  $g$  = accelerazione di gravità.

Lo smorzamento  $D$  è in funzione del coefficiente di viscosità del mezzo ed è inversamente proporzionale a  $G$ , secondo la seguente relazione, valida per il  $i$ -esimo strato:

$$D_i = \frac{\eta_i \omega}{2G_i}$$

Dove:

$\omega$  = frequenza circolare  $2\pi f$ ,

$\eta$  = coefficiente di viscosità del mezzo continuo.

L'algoritmo permette di adottare un modello dove la rigidità della molla elastica e la viscosità dello smorzatore sono costanti, ossia un modello lineare elastico; con tale impostazione la rigidità  $G$  (assieme alla velocità delle onde  $S$ ) e lo smorzamento  $D$  non variano durante l'analisi.

Nel caso in esame verrà adottato un modello dove i valori di rigidità e dello smorzamento sono in funzione del campo tensionale e delle conseguenti deformazioni; in questo caso si tratta di un modello lineare equivalente o EQL.

Tale modello fa uso di curve di degradazione o decadimento del modulo di taglio  $G$  e variazione del rapporto di smorzamento, le quali rappresentano la variazione della rigidità della molla e della viscosità dello smorzatore al variare delle deformazioni imposte.

La procedura iterativa utilizzata è la seguente:

- vengono calcolate per ogni  $i$ -esimo strato le ampiezze delle onde;
- viene calcolata una funzione di trasferimento delle deformazioni per ogni  $i$ -esimo strato;
- la funzione di trasferimento delle deformazioni viene applicata allo spettro di Fourier di input, definendo così la risposta massima in deformazione per ogni strato;
- per ogni strato, dalla deformazione massima si calcola il rapporto deformativo effettivo, di default il 65% della deformazione massima;
- $G$  e  $D$  sono ricalcolati a partire dalla deformazione effettiva e dalle curve di decadimento utilizzate;
- i nuovi valori di  $G$  e  $D$  sono paragonati alla precedente iterazione e viene calcolato l'errore.

La procedura viene terminata quando l'errore per tutti gli strati è minore della soglia prescelta.

L'approccio EQL costituisce essenzialmente un modello lineare che permette l'approssimazione dei più significativi effetti di un terreno non lineare ed elastico.

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Sismica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 19 di 31
--	---------------------	--	------------	--------------------

## 5 CODICE DI CALCOLO UTILIZZATO

Il modello di risposta sismica locale è stato implementato mediante il codice di calcolo LSR2D. Tale codice consente di effettuare un'analisi di risposta sismica locale di tipo bidimensionale, lineare equivalente, con il metodo agli elementi finiti. Il deposito viene discretizzato in una mesh di elementi di forma triangolare o, preferibilmente, quadrangolare, consentendo una efficace modellazione della variazione geometrica del contatto deposito basamento, così come delle irregolarità della superficie topografica e dei contatti stratigrafici. La generazione della mesh è una delle fasi più delicate dell'analisi, dipendendo da essa sia l'accuratezza della soluzione e sia l'onere computazionale. In generale si può affermare che tanto più la mesh è fitta tanto più la soluzione è accurata e tanto maggiori sono il tempo e la memoria richiesta dall'elaborazione. L'utilizzo di una mesh eccessivamente grossolana si traduce in un filtraggio delle componenti di alta frequenza poiché le piccole lunghezze d'onda non possono essere adeguatamente modellate da nodi troppo distanti tra loro. Viene perciò generalmente raccomandato di scegliere l'altezza  $h$  di ogni elemento in modo che risulti:

$$h \leq (1/8 \div 1/5) V_s / f_{max}$$

dove:

$h$ : passo della mesh;

$V_s$ : velocità di propagazione delle onde di taglio nel mezzo discretizzato;

$f_{max}$ : frequenza massima considerata nell'analisi (generalmente pari a 20-25 Hz).

Ciò significa che avendo ad esempio a che fare con un terreno avente una  $V_s = 350 \text{ m/s}$  il passo mesh dovrebbe essere risultare  $h \leq 1.75 \text{ m}$ . L'equilibrio globale è espresso dal sistema di equazioni:

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

dove:

$u$  è il vettore degli spostamenti nodali; -  $M$  la matrice delle masse globale;

$K$  la matrice delle rigidezze globale; -  $C$  la matrice di smorzamento globale

$\ddot{u}_b$  la storia temporale dell'accelerazione di input.

Le equazioni appena descritte vengono risolte tramite integrazione diretta nel dominio del tempo con il metodo di Newmark ed in modo particolare con il metodo CAA (Constant Average Acceleration Method) che è incondizionalmente stabile e non introduce alcun damping numerico.

Il moto sismico di input  $\ddot{u}_b$  viene applicato simultaneamente a tutti i nodi della base sotto forma di onde trasversali SV e/o onde di compressione P (in plane motion) con direzione di propagazione

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Simica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 20 di 31
--	---------------------	---	------------	--------------------

verticale ed ha il significato fisico di un moto registrato su affioramento piano del basamento (outcropping bedrock).

In ogni problema di propagazione di onde sismiche, parte dell'energia si allontana indefinitamente dalla regione di interesse verso il semispazio circostante. L'estensione finita della zona discretizzata comporta necessariamente la presenza di confini che devono modellare il più accuratamente possibile questa aliquota di energia persa per radiazione. Questo è possibile attraverso l'applicazione di smorzatori viscosi anche ai lati del modello, simulando dunque le perdite per radiazione di energia appena evidenziate.

La non linearità del terreno viene tenuta in conto attraverso l'esecuzione di analisi lineari equivalenti. Il modulo di taglio  $G$  e il rapporto di smorzamento  $D$  vengono fatti dipendere dal livello della deformazione tangenziale  $\gamma$  indotta dalle sollecitazioni sismiche. A partire dai valori iniziali dei parametri di rigidezza e smorzamento, con una prima analisi si determina, per ciascun elemento, un primo valore caratteristico (o effettivo) della deformazione tangenziale  $\gamma_{eff}$ . Dalle curve  $G/G_0 - \gamma$  e  $D - \gamma$  si determinano nuovi valori dei parametri dinamici, le matrici di rigidezza e smorzamento di ciascun elemento vengono aggiornate e si esegue una nuova analisi determinando un nuovo valore caratteristico. Il procedimento viene ripetuto fino a quando lo scarto percentuale tra i valori di  $G$ ,  $D$  e  $\gamma_{eff}$  viene ritenuto arbitrariamente accettabile. In genere 5-6 iterazioni sono sufficienti per contenere gli scarti in poche unità percentuali, anche nel caso di comportamenti marcatamente non lineari. Il valore caratteristico  $\gamma_{eff}$  è un valore considerato mediamente rappresentativo della storia temporale  $\gamma(t)$  irregolare cui è soggetto il generico elemento, ed è espresso come un'aliquota  $\alpha$  costante del valore massimo di  $\gamma(t)$ .

Le proprietà dissipative del terreno sono modellate attraverso la matrice di dissipazione  $C$ . Essa deriva dall'assemblaggio delle matrici di dissipazione dei singoli elementi calcolate secondo la formulazione di Rayleigh completa:

$$C_i = \alpha R_i M_i + \beta R_i K_i$$

dove  $\alpha R_i$  e  $\beta R_i$  sono i coefficienti di Rayleigh e  $M_i$ ,  $C_i$  e  $K_i$  le matrici locali del singolo elemento. L'adozione di una formulazione alla Rayleigh comporta uno smorzamento dipendente dalla frequenza che può condizionare in maniera sensibile i risultati di un'analisi numerica. Per minimizzare tale variazione per entrambi i codici di calcolo i coefficienti di Rayleigh vengono calcolati in funzione di due frequenze naturali dell'intero deposito,  $\omega_m$  e  $\omega_n$ :

$$\alpha R_i = \xi_i \frac{2 \omega_m \omega_n}{\omega_m + \omega_n}$$

$$\beta R_i = \xi_i \frac{2 \omega_m}{\omega_m + \omega_n}$$

in cui:

 <p>Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale</p>	<p>Data Maggio 2024</p>	<p><b>Risposta Simica Locale verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447</p>	<p>Rev. 00</p>	<p>Pagina 21 di 31</p>
---	-----------------------------	---	--------------------	----------------------------

$\xi_i$  è il rapporto di smorzamento viscoso dell' $i$ -esimo elemento finito;

$\omega_m = \omega_1$  prima frequenza naturale di vibrazione del deposito di terreno;

$\omega_n = n \omega_1$  essendo  $n$  l'intero dispari che approssima per eccesso il rapporto tra la frequenza predominante dell'input sismico  $\omega_{IN}$  e la frequenza  $\omega_1$ .

In definitiva il software richiede in input, per ciascun materiale, i seguenti parametri:

peso dell'unità di volume, modulo di taglio e smorzamento a basse deformazioni, coefficiente di Poisson dei materiali;

- la curva di attenuazione con il livello di deformazione tangenziale del modulo di rigidezza, normalizzata rispetto al valore iniziale;
- la curva di variazione del rapporto di smorzamento con il livello di deformazione tangenziale;
- la costante  $\alpha$  per il calcolo del valore caratteristico della deformazione tangenziale a partire dal valore massimo di  $\gamma(t)$  (in genere pari a 0.65).

In uscita il codice fornisce:

- accelerazioni massime in tutti i nodi della mesh;
- sforzi e deformazioni tangenziali massime in ciascun elemento;
- storia temporale dell'accelerazione nei nodi selezionati (componenti verticali e orizzontali).

 <p>Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale</p>	<p>Data Maggio 2024</p>	<p><b>Risposta Simica Locale verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447</p>	<p>Rev. 00</p>	<p>Pagina 22 di 31</p>
---	-----------------------------	---	--------------------	----------------------------

## 6 PARAMETRI DI INPUT INSERITI IN STRATA

Un'apposita funzione di STRATA permette di definire le tipologie di sismostrati omogenei e le relative proprietà non lineari dei differenti livelli litotecnici.

Per ciascun livello sono state inserite le coppie di valori Deformazione-G/Gmax e Deformazione-D% per descrivere le rispettive curve di non linearità, ricavate dalla prova di colonna risonante (ASTM D 4015).

Il comportamento dinamico sotto azioni sismiche (decadimento del modulo di taglio normalizzato  $G/G_0$  e dello smorzamento  $D$  con la deformazione) dei vari strati di sottosuolo identificati è stato determinato dalle curve di decadimento del modulo di deformazione al taglio normalizzato in funzione della deformazione tangenziale  $G/G_0-\gamma$  e le curve di decadimento del fattore di smorzamento in funzione della deformazione tangenziale  $D-\gamma$ , derivanti da prove di laboratorio.

In particolare, considerando gli strati identificati sulla base di osservazioni dirette, si è scelto di utilizzare le curve di smorzamento presenti in letteratura (vedi Tabella 1).

## 7 ANALISI DEI RISULTATI

Il grafico riportato nella figura successiva mostra la funzione di trasferimento dell'accelerazione, calcolata in campo elastico, rapportata alla curva HVSR della misura in sito.

La funzione di trasferimento, che definisce quantitativamente come il moto di input viene trasferito e amplificato dal bedrock alla superficie, non viene utilizzata direttamente nelle verifiche di strutture, ma è molto utile per definire il campo di frequenze entro il quale il sottosuolo del sito amplifica il segnale sismico, oltre che per quantificare l'entità dell'amplificazione stessa. Numerosi confronti tra le tecniche di modellazione e misure dirette di microtremori, mostrano che la tecnica HVSR è generalmente efficace nella previsione della frequenza fondamentale del sito, mentre non può essere usata per stime quantitative dell'amplificazione.

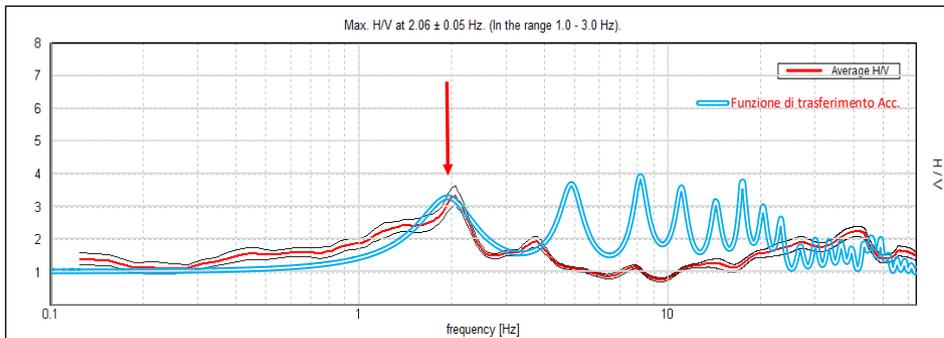
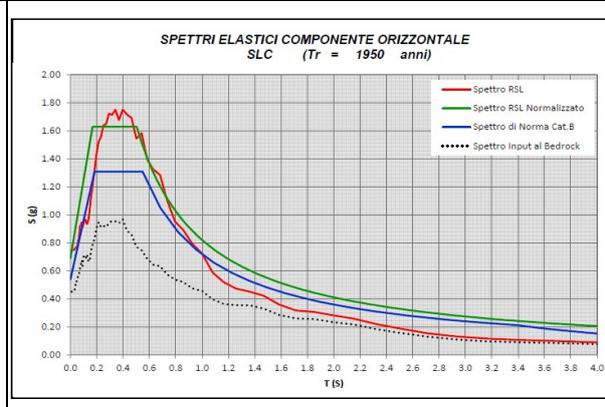
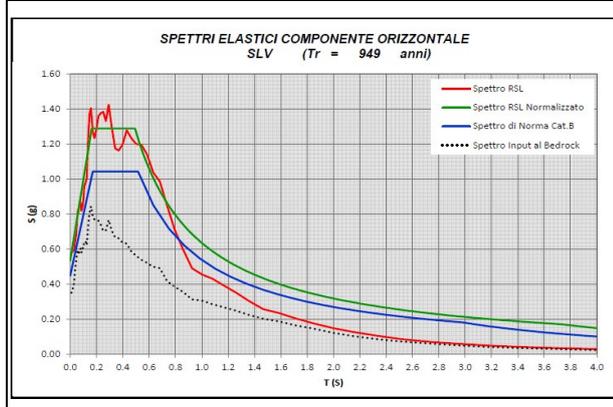
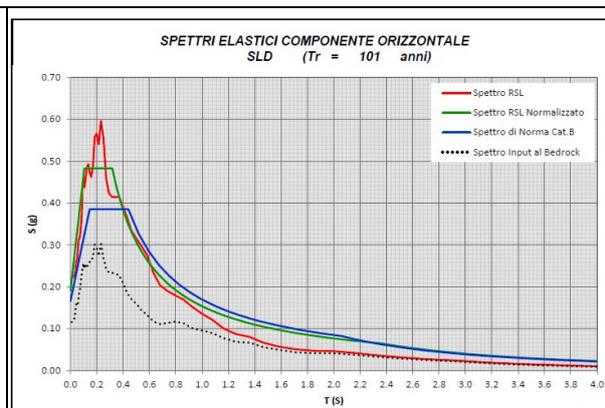
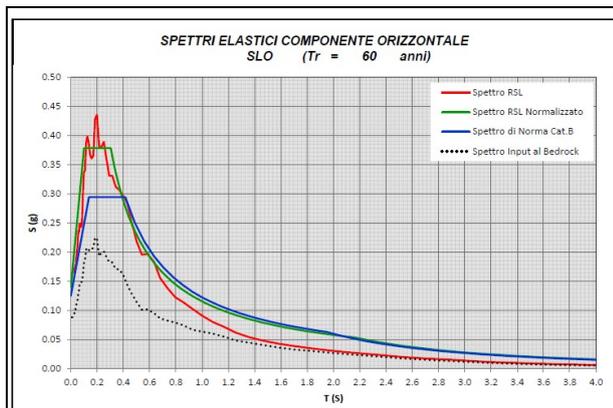


fig. 6 Confronto tra funzione di trasferimento dell'accelerazione e curva HVSR

Il confronto mostra una buona sovrapposizione, in corrispondenza del picco a circa 2.0 Hz, della curva HVSR con le F.T.A. calcolata in campo elastico.

Di seguito sono riportati gli spettri di risposta elastici nella componente orizzontale derivanti dallo studio di RSL, per tutti gli stati limite considerati (SLO, SLD, SLV, SLC). Nello stesso grafico viene indicato lo spettro medio derivante dal codice di calcolo monodimensionale e il corrispondente spettro normalizzato, a titolo di confronto per ogni stato limite è stato riportato lo spettro elastico di norma da approccio semplificato e corrispondente alla categoria di suolo del sito investigato.

Per ogni stato limite sono stati definiti i parametri dipendenti (coeff. di amplificazione locale, amplificazione sismica max locale, periodi caratteristici  $T_B$ - $T_C$ - $T_D$ ) riferiti allo spettro normalizzato, tali parametri sono indicati nelle tabelle riportate in seguito.



Per completezza di dati nelle tabelle sono altresì riportate le informazioni relative alla pericolosità di base del sito, in particolare sono riportate:

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

Per valutare l'azione sismica, in base alla **strategia progettuale** richiesta, si parte dal periodo di riferimento  $V_R$  di una costruzione che viene ottenuto moltiplicando la vita nominale  $V_N$  della costruzione (funzione del tipo di costruzione) per il coefficiente d'uso  $C_U$  (funzione della classe d'uso).

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

- $V_R$  = periodo di riferimento per l'azione sismica;
- $V_N$  = vita nominale della costruzione;
- $C_U$  = coefficiente d'uso.

I parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $TC^*$  forniti dalla Normativa Tecnica per la definizione dell'azione sismica fanno riferimento alle ipotesi citate di sito di riferimento rigido e superficie topografica orizzontale.

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Sismica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 25 di 31
--	---------------------	--	------------	--------------------

Per tener conto delle condizioni stratigrafiche e topografiche, in maniera semplificata e non esaustiva, per condizioni litostratigrafiche semplici, la Normativa Tecnica definisce un **approccio semplificato** stabilendo 5 categorie di sottosuolo denominate A, B, C, D, ed E e 4 categorie topografiche (T1, T2, T3, T4). La categoria di sottosuolo viene determinata sulla base della velocità di propagazione ( $V_s$ ) delle onde di taglio nel sottosuolo.

Le condizioni topografiche e stratigrafiche influiscono sull'entità dell'azione sismica attraverso il coefficiente S che moltiplica le ordinate dello spettro di risposta. Tale coefficiente è definito nel seguente modo:

$$S = SS \cdot ST$$

- SS = coefficiente di amplificazione stratigrafica, dipende dalla categoria di sottosuolo e dai parametri  $F_0$  e  $a_g$ ;
- ST = coefficiente di amplificazione topografica, dipende dalla categoria topografica.

Per la costruzione degli spettri la Normativa Tecnica definisce tre periodi di vibrazione:

- TB: inizio del tratto ad accelerazione costante;
- TC: inizio del tratto a velocità costante;
- TD: inizio del tratto a spostamento costante.

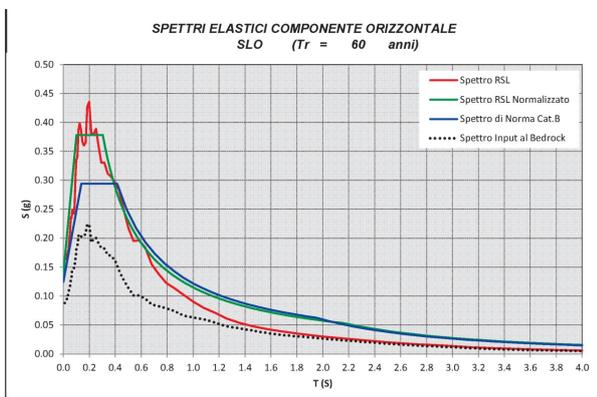
## 7.1 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Lo spettro elastico medio, con smorzamento strutturale al 5% rispetto al critico derivante dalla simulazione numerica della **Risposta Sismica Locale** è riportato in dati tabellari ed è stato calcolato ai diversi periodi di ritorno  $T_R$ . Viene indicato inoltre il valore di  $a_{max}$  che è l'accelerazione al punto di ancoraggio per  $T=0$  dello spettro medio, mentre il valore di S è dato dal rapporto  $S = a_{g \max} / a_{g \text{ Input}}$ . L'Ordinanza n. 55 del 24 aprile 2018 all'appendice 1 indica la procedura di regolarizzazione (Newmark e Hall, 1982, Romeo, 2007, Liberatore e Pagliaroli, 2014) che permette di trasformare lo spettro di risposta, risultato delle simulazioni numeriche nell'ambito degli studi di **Risposta Sismica Locale**, in uno spettro con forma standard (secondo le vigenti norme tecniche per le costruzioni), costituita da un ramo con accelerazione crescente lineare, un ramo ad accelerazione costante, un ramo in cui l'accelerazione decresce con  $1/T$  e, quindi, a velocità costante. Alla fine della procedura saranno disponibili anche tutti i parametri per l'inserimento dello spettro elastico in codici di calcolo per la progettazione e la verifica delle costruzioni ( $a_g$ ,  $a_{max}$ , TB, TC, TD,  $TC^*$ ,  $F_0$ ,  $\xi$ ,  $\eta$ , SS, ST). Secondo questa procedura:  $a_g = a_{max}$  dove  $a_{max}$  è l'accelerazione al punto di ancoraggio per  $T=0$  dello spettro normalizzato. Rispetto alla definizione delle NTC, i valori di  $a_g$ , SS e ST risultano

evidentemente fittizi in quanto non riferiti alla condizione ideale di suolo rigido e pianeggiante, questo perché gli effetti di amplificazione stratigrafica e morfologica sono già messi in conto nei risultati delle analisi della Risposta Sismica Locale.

I risultati dell'analisi della Risposta Sismica Locale sono stati calcolati per diversi valori del periodo di ritorno TR in modo analogo a quanto avviene per i parametri che definiscono la pericolosità sismica di base.

Di seguito si riportano gli spettri di Risposta Sismica Locale per i diversi stati limite:



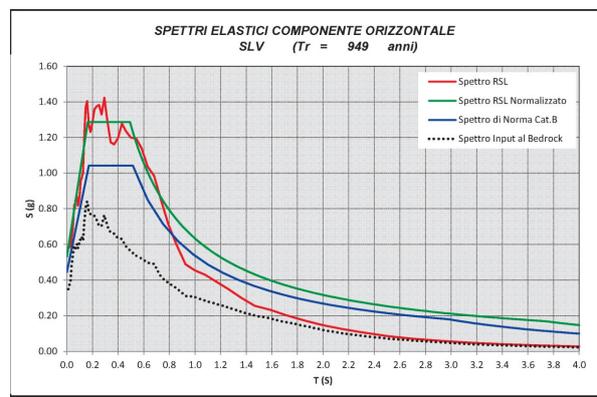
Strategia Progettuale	
V <sub>N</sub>	50 [anni]
C <sub>U</sub>	2
V <sub>R</sub>	100 [anni]
SL	SLO
T <sub>R</sub>	60 [anni]

Parametri Spettro di Norma	
CAT.	B
S <sub>B</sub>	1.200
C <sub>C</sub>	1.404
S <sub>T</sub>	1.200
S	1.440
T <sub>B</sub>	0.138 [sec]
T <sub>C</sub>	0.415 [sec]
T <sub>D</sub>	1.946 [sec]
CAT. Top.	T2
a <sub>g</sub> max	0.125 [g]

Parametri Spettro RSL Norm.	
a <sub>g</sub> max	0.139
F <sub>0</sub>	1.686
S	1.610
T <sub>B</sub>	0.101 [sec]
T <sub>C</sub>	0.304 [sec]
T <sub>D</sub>	2.157 [sec]

Pericolosità di Base	
a <sub>g</sub>	0.087 [g]
F <sub>0</sub>	2.359
T <sub>C</sub>	0.295

Parametri Spettro RSL	
a <sub>g</sub> max	0.162
S	1.84



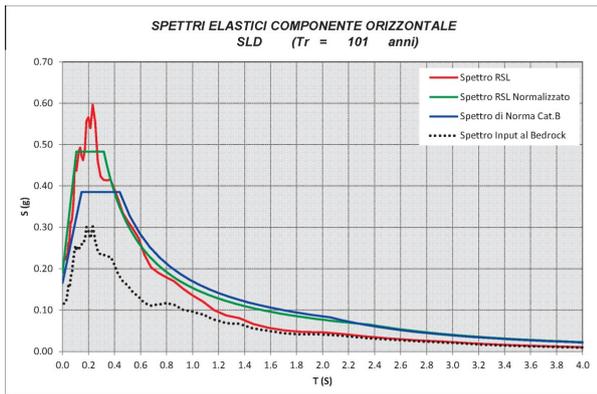
Strategia Progettuale	
V <sub>N</sub>	50 [anni]
C <sub>U</sub>	2
V <sub>R</sub>	100 [anni]
SL	SLV
T <sub>R</sub>	949 [anni]

Parametri Spettro di Norma	
CAT.	B
S <sub>B</sub>	1.078
C <sub>C</sub>	1.329
S <sub>T</sub>	1.200
S	1.294
T <sub>B</sub>	0.172 [sec]
T <sub>C</sub>	0.515 [sec]
T <sub>D</sub>	2.980 [sec]
CAT. Top.	T2
a <sub>g</sub> max	0.446 [g]

Parametri Spettro RSL Norm.	
a <sub>g</sub> max	0.531
F <sub>0</sub>	1.573
S	1.540
T <sub>B</sub>	0.164 [sec]
T <sub>C</sub>	0.493 [sec]
T <sub>D</sub>	3.725 [sec]

Pericolosità di Base	
a <sub>g</sub>	0.345 [g]
F <sub>0</sub>	2.334
T <sub>C</sub>	0.388

Parametri Spettro RSL	
a <sub>g</sub> max	0.572
S	1.64



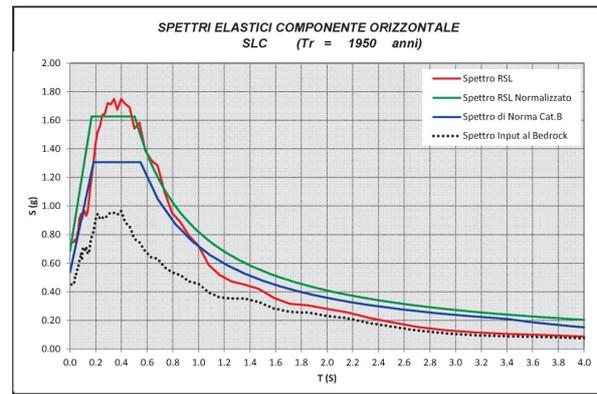
Strategia Progettuale	
V <sub>N</sub>	50 [anni]
C <sub>U</sub>	2
V <sub>R</sub>	100 [anni]
SL	SLD
T <sub>R</sub>	101 [anni]

Parametri Spettro di Norma	
CAT.	B
S <sub>B</sub>	1.200
C <sub>C</sub>	1.383
S <sub>T</sub>	1.200
S	1.440
T <sub>B</sub>	0.147 [sec]
T <sub>C</sub>	0.440 [sec]
T <sub>D</sub>	2.060 [sec]
CAT. Top.	T2
a <sub>g</sub> max	0.166 [g]

Parametri Spettro RSL Norm.	
a <sub>g</sub> max	0.190
F <sub>0</sub>	1.538
S	1.653
T <sub>B</sub>	0.106 [sec]
T <sub>C</sub>	0.318 [sec]
T <sub>D</sub>	2.360 [sec]

Pericolosità di Base	
a <sub>g</sub>	0.115 [g]
F <sub>0</sub>	2.327
T <sub>C</sub>	0.318

Parametri Spettro RSL	
a <sub>g</sub> max	0.219
S	1.89



Strategia Progettuale	
V <sub>N</sub>	50 [anni]
C <sub>U</sub>	2
V <sub>R</sub>	100 [anni]
SL	SLC
T <sub>R</sub>	1950 [anni]

Parametri Spettro di Norma	
CAT.	B
S <sub>B</sub>	1.000
C <sub>C</sub>	1.309
S <sub>T</sub>	1.200
S	1.200
T <sub>B</sub>	0.183 [sec]
T <sub>C</sub>	0.548 [sec]
T <sub>D</sub>	3.391 [sec]
CAT. Top.	T2
a <sub>g</sub> max	0.537 [g]

Parametri Spettro RSL Norm.	
a <sub>g</sub> max	0.688
F <sub>0</sub>	1.540
S	1.536
T <sub>B</sub>	0.168 [sec]
T <sub>C</sub>	0.504 [sec]
T <sub>D</sub>	4.352 [sec]

Pericolosità di Base	
a <sub>g</sub>	0.448 [g]
F <sub>0</sub>	2.431
T <sub>C</sub>	0.419

Parametri Spettro RSL	
a <sub>g</sub> max	0.742
S	1.65



Spettro RSL		Spettro RSL		Spettro RSL		Spettro RSL	
SLO		SLD		SLV		SLC	
0.00	0.162	0.00	0.219	0.00	0.572	0.00	0.742
0.01	0.163	0.01	0.220	0.01	0.577	0.01	0.744
0.01	0.163	0.01	0.221	0.01	0.578	0.01	0.744
0.01	0.163	0.01	0.221	0.01	0.578	0.01	0.744
0.01	0.163	0.01	0.221	0.01	0.579	0.01	0.744
0.01	0.163	0.01	0.221	0.01	0.579	0.01	0.745
0.01	0.164	0.01	0.221	0.01	0.580	0.01	0.745
0.02	0.164	0.02	0.222	0.02	0.581	0.02	0.745
0.02	0.164	0.02	0.222	0.02	0.582	0.02	0.745
0.02	0.165	0.02	0.222	0.02	0.583	0.02	0.746
0.02	0.165	0.02	0.223	0.02	0.585	0.02	0.746
0.02	0.166	0.02	0.223	0.02	0.588	0.02	0.747
0.02	0.166	0.02	0.224	0.02	0.588	0.02	0.748
0.03	0.168	0.03	0.225	0.03	0.591	0.03	0.749
0.03	0.170	0.03	0.226	0.03	0.594	0.03	0.750
0.03	0.171	0.03	0.227	0.03	0.598	0.03	0.751
0.03	0.173	0.03	0.229	0.03	0.602	0.03	0.750
0.03	0.176	0.03	0.232	0.03	0.615	0.03	0.754
0.04	0.178	0.04	0.236	0.04	0.639	0.04	0.760
0.04	0.180	0.04	0.238	0.04	0.650	0.04	0.765
0.04	0.190	0.04	0.252	0.04	0.668	0.04	0.765
0.05	0.198	0.05	0.262	0.05	0.680	0.05	0.766
0.05	0.208	0.05	0.263	0.05	0.734	0.05	0.773
0.05	0.222	0.05	0.273	0.05	0.785	0.05	0.781
0.06	0.236	0.06	0.296	0.06	0.823	0.06	0.818
0.06	0.234	0.06	0.313	0.06	0.802	0.06	0.820
0.07	0.248	0.07	0.313	0.07	0.851	0.07	0.862
0.07	0.248	0.07	0.322	0.07	0.847	0.07	0.916
0.08	0.242	0.08	0.341	0.08	0.870	0.08	0.923
0.09	0.255	0.09	0.368	0.09	0.817	0.09	0.945
0.09	0.302	0.09	0.441	0.09	0.836	0.09	0.910
0.10	0.336	0.10	0.462	0.10	0.873	0.10	0.934
0.11	0.340	0.11	0.437	0.11	0.956	0.11	0.967
0.12	0.387	0.12	0.462	0.12	0.977	0.12	0.959
0.13	0.398	0.13	0.485	0.13	1.001	0.13	0.933
0.14	0.387	0.14	0.493	0.14	1.213	0.14	0.958
0.15	0.367	0.15	0.472	0.15	1.368	0.15	1.030
0.16	0.360	0.16	0.462	0.16	1.404	0.16	1.133
0.17	0.365	0.17	0.487	0.17	1.273	0.17	1.227
0.18	0.427	0.18	0.557	0.18	1.232	0.18	1.321
0.20	0.435	0.20	0.566	0.20	1.282	0.20	1.440
0.22	0.382	0.22	0.540	0.22	1.357	0.22	1.521
0.23	0.379	0.23	0.596	0.23	1.375	0.23	1.556
0.25	0.389	0.25	0.554	0.25	1.382	0.25	1.638
0.27	0.360	0.27	0.460	0.27	1.329	0.27	1.646
0.29	0.330	0.29	0.423	0.29	1.423	0.29	1.721
0.32	0.331	0.32	0.415	0.32	1.296	0.32	1.711
0.34	0.312	0.34	0.413	0.34	1.174	0.34	1.748
0.37	0.306	0.37	0.415	0.37	1.161	0.37	1.674
0.40	0.297	0.40	0.393	0.40	1.195	0.40	1.749
0.43	0.283	0.43	0.366	0.43	1.277	0.43	1.714
0.46	0.250	0.46	0.334	0.46	1.232	0.46	1.690
0.50	0.218	0.50	0.316	0.50	1.199	0.50	1.542
0.54	0.195	0.54	0.297	0.54	1.195	0.54	1.582
0.58	0.196	0.58	0.275	0.58	1.138	0.58	1.391
0.63	0.184	0.63	0.233	0.63	1.036	0.63	1.322
0.68	0.155	0.68	0.203	0.68	0.984	0.68	1.283
0.74	0.138	0.74	0.190	0.74	0.850	0.74	1.100
0.79	0.122	0.79	0.180	0.79	0.708	0.79	0.951
0.86	0.113	0.86	0.170	0.86	0.597	0.86	0.890
0.93	0.102	0.93	0.152	0.93	0.489	0.93	0.792
1.00	0.090	1.00	0.136	1.00	0.454	1.00	0.722
1.08	0.080	1.08	0.121	1.08	0.430	1.08	0.587
1.17	0.071	1.17	0.100	1.17	0.391	1.17	0.517
1.26	0.061	1.26	0.087	1.26	0.351	1.26	0.472
1.36	0.053	1.36	0.081	1.36	0.302	1.36	0.451
1.47	0.047	1.47	0.066	1.47	0.256	1.47	0.421
1.58	0.042	1.58	0.057	1.58	0.235	1.58	0.359
1.71	0.038	1.71	0.051	1.71	0.203	1.71	0.316
1.85	0.034	1.85	0.047	1.85	0.175	1.85	0.306
2.00	0.030	2.00	0.046	2.00	0.148	2.00	0.281
2.15	0.027	2.15	0.042	2.15	0.125	2.15	0.257
2.33	0.024	2.33	0.036	2.33	0.105	2.33	0.218
2.51	0.020	2.51	0.031	2.51	0.085	2.51	0.186
2.71	0.017	2.71	0.027	2.71	0.071	2.71	0.153
2.93	0.015	2.93	0.024	2.93	0.059	2.93	0.131
3.16	0.011	3.16	0.019	3.16	0.048	3.16	0.116
3.41	0.009	3.41	0.016	3.41	0.040	3.41	0.105
3.69	0.007	3.69	0.013	3.69	0.033	3.69	0.098
3.98	0.006	3.98	0.010	3.98	0.028	3.98	0.088
4.30	0.005	4.30	0.008	4.30	0.023	4.30	0.078
4.64	0.004	4.64	0.006	4.64	0.019	4.64	0.069
5.01	0.003	5.01	0.005	5.01	0.017	5.01	0.061
5.41	0.003	5.41	0.004	5.41	0.014	5.41	0.050
5.84	0.002	5.84	0.003	5.84	0.012	5.84	0.042
6.31	0.002	6.31	0.003	6.31	0.010	6.31	0.035
6.81	0.002	6.81	0.002	6.81	0.009	6.81	0.030
7.36	0.001	7.36	0.002	7.36	0.007	7.36	0.025
7.94	0.001	7.94	0.002	7.94	0.006	7.94	0.020
8.58	0.001	8.58	0.001	8.58	0.005	8.58	0.017
9.26	0.001	9.26	0.001	9.26	0.004	9.26	0.014
10.00	0.001	10.00	0.001	10.00	0.004	10.00	0.012

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Sismica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 28 di 31
--	---------------------	--	------------	--------------------

## 8 CONCLUSIONI

L'azione sismica per la costruzione degli spettri elastici è stata valutata in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R = 100$  anni, tale valore è stato ricavato moltiplicando la vita nominale  $V_N = 50$  anni per il coefficiente d'uso  $C_U = 2.0$  corrispondente alla classe d'uso IV (vedi Relazione Geologica).

Il confronto fra la funzione di trasferimento dell'accelerazione, calcolata in campo elastico, con la curva HVSR della misura in sito, mostra una buona sovrapposizione in corrispondenza del picco a circa 2.0 Hz. Si può quindi affermare che il modello sismostratigrafico assunto per le analisi di RSL può essere considerato affidabile e che gli spettri calcolati definiscono con buona attendibilità l'azione sismica del sito studiato.

I grafici su riportati mostrano che gli spettri di norma (metodo semplificato Categoria B) hanno sempre ampiezza minore degli spettri normalizzati derivanti da RSL, in particolare in corrispondenza dei periodi 0.2 – 0.4 secondi gli spettri di RSL mostrano valori di accelerazione sensibilmente superiori a quelli di norma. Si può quindi dedurre che gli spettri elastici ricavati attraverso metodo semplificato non descrivono correttamente l'azione sismica del sito studiato sia in termini di ampiezza sia in termini di periodo di massima concentrazione dell'energia sismica.

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Simica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 29 di 31
--	---------------------	---	------------	--------------------

## 9 VERIFICA A LIQUEFAZIONE

Il fenomeno della liquefazione è divenuto di grande attualità in occasione di numerosi recenti eventi sismici che hanno colpito anche la Regione Basilicata (Irpinia 1980).

*La liquefazione è lo stato fisico in cui viene a trovarsi un terreno sabbioso saturo quando la sua resistenza al taglio si riduce notevolmente e rapidamente per effetto dell'accumulo di pressioni interstiziali.*

Fisicamente distinguiamo differenti fenomeni di liquefazione: ciclica, mobilità ciclica, fluidificazione. **Questi fenomeni sono osservati nei terreni granulari saturi in presenza di sollecitazioni dinamiche e cicliche non drenate** come appunto accade durante un sisma di magnitudo superiore ai 5,5° con PGA > 0,15 g e durata almeno 15 – 20 secondi. I siti più soggetti a questo rischio sono generalmente in prossimità di mari, fiumi, laghi, depositi fluviali, pianure. Durante il sisma i terreni sciolti tendono ad una diminuzione del loro volume che, essendo impedita (condizioni non drenate), genera un incremento della pressione interstiziale. Ne consegue una degradazione della rigidità con deformazioni sempre più evidenti e consistenti. Quando gli sforzi efficaci si riducono fino ad annullarsi ecco che il terreno si comporta come un fluido viscoso. Gli effetti possono essere devastanti per gli immobili costruiti su quei terreni: vulcanelli di sabbie, ribaltamenti, movimenti franosi, sprofondamenti, rotazioni e spostamenti laterali (*lateral spreading*), galleggiamenti di opere sotterranee, perdita di capacità portante delle fondazioni. Spesso gli immobili danneggiati da questi effetti risulteranno irrecuperabili **ecco perché diviene fondamentale una attività di prevenzione tecnica.**

In base alle NTC 2018 (D.M. 17/01/2018 e s.m.i., 7.11.3.4.2 *Esclusione della verifica a liquefazione*, la verifica nei confronti della liquefazione può essere omessa se si verifica almeno una delle seguenti quattro condizioni:

**Eventi sismici attesi di magnitudo  $M < 5$ ;**

**Accelerazione massima attesa in superficie in condizioni free-field  $< 0.1g$ ;**

**Accelerazione massima attesa in superficie in condizioni free-field  $< 0.15g$  e terreni con caratteristiche ricadenti in una delle tre seguenti categorie:**

frazione di fine, FC, superiore al 20%, con indice di plasticità IP > 10;

FC ≥ 35% e resistenza  $(N_1)_{60} > 20$ ;

FC ≤ 5% e resistenza  $(N_1)_{60} > 25$

dove  $(N_1)_{60}$  il valore normalizzato della resistenza penetrometrica della prova SPT, definito dalla relazione:

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} C_N$$

in cui il coefficiente  $C_N$  è ricavabile dall'espressione  $C_N = \frac{\sigma'_v}{p_a}$  essendo  $p_a$  la pressione atmosferica e  $\sigma'_v$  la pressione efficace verticale.

Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate in Figura (a) nel caso di materiale con coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$  ed in Figura (b) per coefficienti di uniformità  $U_c > 3.5$ .

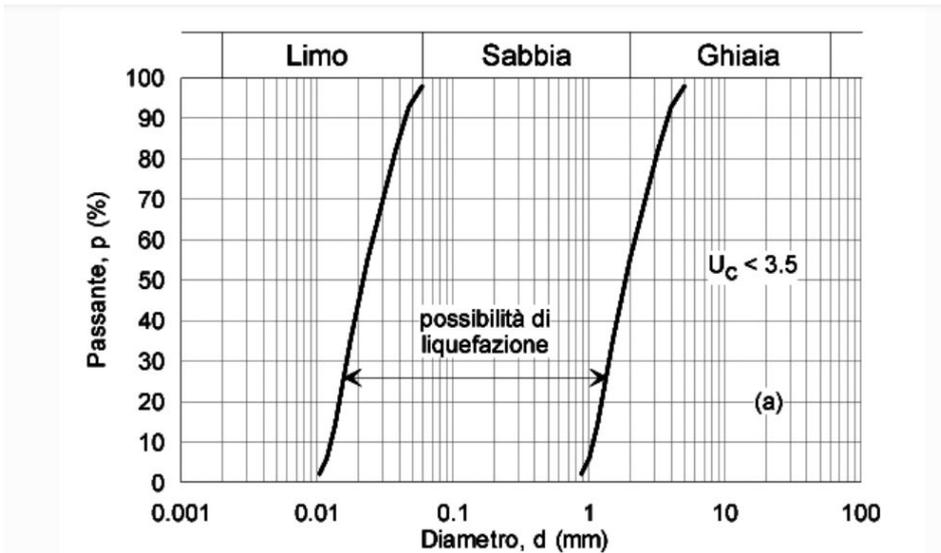


Figura (a): Intervallo granulometrico, per terreni con  $U_c < 3.5$  dentro il quale è possibile la liquefazione.

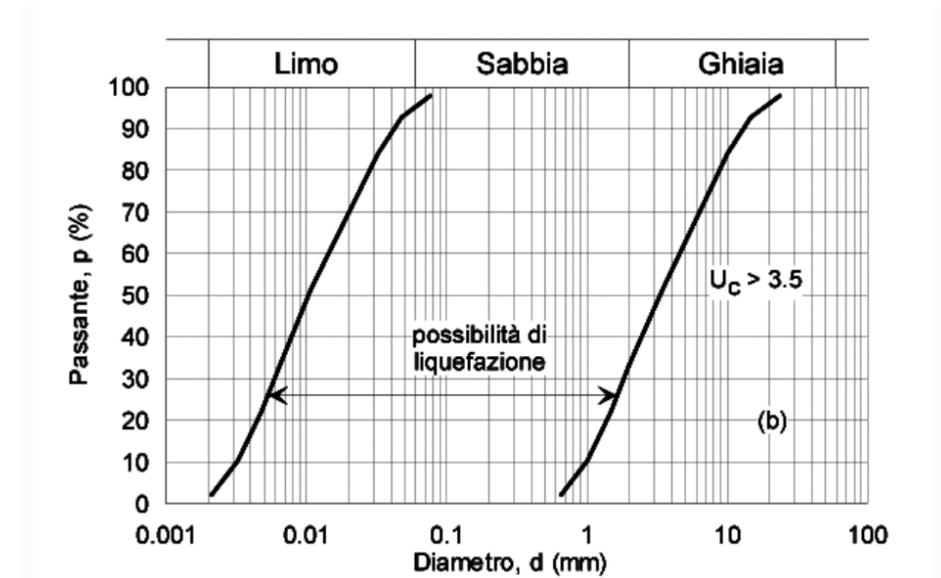


Figura (b): Intervallo granulometrico, per terreni con  $U_c > 3.5$  dentro il quale è possibile la liquefazione.

Nel nostro caso la distribuzione granulometrica è esterna alle zone indicate nel grafico figura a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3,5$  e nel grafico figura b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3,5$ .

 Eni S.p.A. Natural Resources Distretto Meridionale	Data Maggio 2024	<b>Risposta Simica Locale          verifica a liquefazione</b> Doc n. AMB-ME-06-447	Rev. 00	Pagina 31 di 31
--	---------------------	---	------------	--------------------

Profondità media stagionale della falda superiore ai 15 m dal piano campagna.

Il livello della falda misurata nei piezometri più prossimi e all'interno dell'area Cluster è:

SONDAGGIO	PROFONDITA' DELLA FALDA
SG4 PZ5	26 m
SG5 PZ6	31 m
S2 (interno area Cluster) attrezzato a pizometro	25 m

Se l'indice plastico è superiore a 10 (EC 8) o a 12 (Sancio, 2006) la verifica alla liquefazione potrà essere omessa.

SONDAGGIO	Campione	$I_p$	PROFONDITÀ
S1	C1	23%	4.5 m
S2	C1	23%	15 m
S3	C1	20%	2.5 m
S3	C2	19%	7.5 m

Per tali ragioni, i terreni presenti in sito non risultano suscettibili al fenomeno della liquefazione.