

PROVINCIA DI FERRARA

COMUNE DI VOGHIERA

RISPOSTA SISMICA LOCALE

**RELATIVA ALL' INDAGINE GEOGNOSTICA ESEGUITA PER LA
REALIZZAZIONE DI NUOVA STRUTTURA AD USO SPOIATOIO**

COMMITTENTE: La Sapienza S.r.l.

LOCALITÀ: Voghiera – FE

DATA: 16.05.2025

RIF.: 15/25

I N D I C E

1. Premessa.....	pag.	3
2. Caratteristiche e scopi dell'analisi di R.S.L.....	pag.	3
3. Ubicazione del sito.....	pag.	4
4. Inquadramento geologico.....	pag.	5
5. Modello geologico.....	pag.	6
6. Analisi sismica.....	pag.	7
6.1 moto di input.....	pag.	7
6.2 output sismico.....	pag.	8
6.3 stato limite ultimo: vita - SLV.....	pag.	9
6.4 stato limite di esercizio: danno - SLD.....	pag.	12
6.5 Profili di accelerazione.....	pag.	15
7. Cedimenti post-sismici e verifica alla liquefazione.....	pag.	16
8. Cedimenti post sismici.....	pag.	20
9. Fattori di amplificazione spettrali e intensità di scuotimento.....	pag.	21
10. Bibliografia e norme di riferimento.....	pag.	23
11. Clausola privacy.....	pag.	24

1. PREMESSA

Su richiesta del *Agriturismo La Sapienza*, si redige lo studio di Risposta Sismica Locale (RSL) per la valutazione delle accelerazioni sismiche attese in superficie presso il sito in oggetto.

Questa valutazione si rende necessaria in quanto in sito si è verificata la presenza di strati di terreno suscettibili a fenomeni di liquefazione in caso di terremoto, per i quali non è ammesso l'approccio semplificato per la definizione dell'azione sismica come prescritto delle NTC 2018 ed anche dall' "Ordinanza del Commissario delegato per la ricostruzione n. 70 del 13 novembre 2012", nelle aree in cui è verificata la presenza di condizioni predisponenti la liquefazione, e dal D.G.R. Emilia Romagna 2193/2015 l'aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico, denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica".

In altre parole non si possono valutare i coefficienti amplificativi del moto sismico dalle tabelle fornite dalla normativa, ma è necessario approfondire lo studio del sito per quantificare analiticamente le amplificazioni attese.

Detta valutazione verrà condotta sulla base di indagini geognostiche tipo prove penetrometriche statiche, geofisiche, sia appositamente eseguite allo scopo, che presenti in bibliografia o sui database pubblici della Regione Emilia Romagna.

2. CARATTERISTICHE E SCOPI DELL'ANALISI DI R.S.L.

Lo scopo di un'analisi di Risposta Sismica Locale è quello di valutare la risposta in termini di amplificazione, suscettibilità alla liquefazione e instabilità dei pendii, per un determinato sito nei confronti delle sollecitazioni trasmesse ad esso da un evento sismico che si origina in un determinato punto nel sottosuolo.

Per la valutazione del comportamento del terreno superficiale su cui andranno ad agire le opere in progetto o esistenti, ma in corso di valutazione sismica, occorre valutare:

- le caratteristiche del meccanismo sorgente;
- a propagazione delle onde dalla sorgente del sisma fino a giungere alla base dell'eventuale deposito superficiale;
- trasmissione delle onde dal bedrock (o dalla base del deposito) alla superficie.

Per soddisfare la condizione posta dal primo punto si ricorre all'analisi di dati di sismicità storica, utilizzando le registrazioni di una rete di sismografi disposti sul territorio, e applicando modelli statistici per la rappresentazione del meccanismo sorgente in una determinata area. Gli archivi contenenti le registrazioni della rete sismologica sono: per il territorio nazionale ITACA Italian ACcelerometric Archive ottenuto dalle registrazioni del National Accelerometric Network e contenente gli accelerogrammi di un migliaio di eventi strong-motion mentre per il territorio europeo è disponibile l'European Strong Motion Database (ESD). Per il territorio dell'Emilia Romagna relativamente alle condizioni di SLV verranno utilizzati gli accelerogrammi disponibili sul sito di Eucentre, come indicato nel DGR 476-21.

Il secondo punto è soddisfatto dall'osservazione e dallo studio della variazione del moto sismico con l'aumentare della distanza, e con la definizione di leggi di attenuazione, cioè di un modello che rappresenti la variazione dell'intensità macrosismica (e quindi degli effetti che si osservano) con la distanza dall'epicentro. È anche possibile utilizzare correlazioni empiriche per rappresentare le modificazioni che subiscono le onde sismiche durante il percorso tra sorgente e base del deposito; tali leggi di attenuazione così ricavate sono però difficilmente riproducibili su tutti i siti e quindi poco affidabili. L'analisi della sismicità regionale e l'applicazione delle leggi di attenuazione portano alla determinazione del moto sismico atteso alla base del deposito.

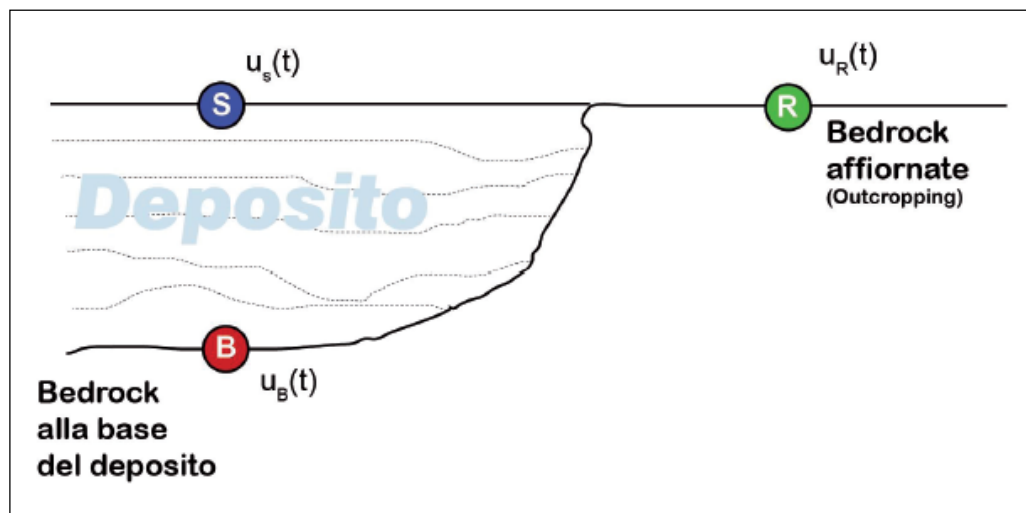


Figura 1: elementi base del moto sismico

Una volta stabilito il moto sismico atteso al bedrock $U_B(t)$ il problema della risposta sismica locale si risolve nella determinazione delle modifiche in termini di ampiezza, durata e contenuto in frequenza che il moto sismico subisce nell'attraversare gli strati di terreno che costituiscono il deposito e che si manifesta in superficie $U_s(t)$.

L'analisi della risposta sismica locale può essere effettuata sia in modalità free-field, in cui viene considerato il sito privo di ogni tipo di struttura, oppure tenendo in considerazione le strutture presenti nel sito. Quest'ultimo tipo di analisi richiede la conoscenza dei parametri dinamici della struttura e dell'interazione tra terreno e struttura, necessitando di una modellazione di grande complessità.

Per lo scopo e le dimensioni del problema in questione, si considera sufficiente l'esecuzione di un'analisi di tipo free-field, dato che l'inerzia del fabbricato viene ritenuta influente nella modificazione delle accelerazioni attese al sito.

Sinteticamente i dati necessari (dati di input) alla valutazione della Risposta Sismica Locale sono:

- Moto sismico atteso alla base del deposito o su roccia affiorante (roccia o terreno duro di riferimento) con assegnato tempo di ritorno;
- Geometria del deposito (spessori ed estensione);
- Stratigrafia (natura, alternanza e spessore degli strati);
- Caratteristiche fisiche e geotecniche (densità, coefficiente di Poisson, modulo di taglio massimo, velocità delle onde di taglio S, rapporto di smorzamento, leggi di variazione della deformazione).

I dati di output saranno:

- Andamento del moto sismico sulla superficie espresso sotto forma di parametri sismici di ampiezza, frequenza e durata oppure interamente espressi in termini di tempo (time-history) o di contenuto in frequenza (spettri di risposta).

3. UBICAZIONE DEL SITO

Il sito oggetto di indagine è rappresentato da un terreno su cui è prevista la realizzazione di un impianto sportivo, ubicato presso l'Agriturismo La Sapienza al km 92+500 della SS 16 nel territorio del comune di Argenta (FE), come mostrato nella figura 2.

Le coordinate geografiche del sito, utilizzate per estrarre i dati del moto sismico di input sono:

44.727316° N - 11.706699° E (WGS 84) = 44.728246° N – 11.707688° E (ED50)



Figura 2: ubicazione del sito

4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area oggetto di indagine si colloca nella bassa pianura ferrarese, in prossimità di un rilievo sepolto parte delle pieghe fagliate note con la denominazione di "Pieghe Ferraresi".

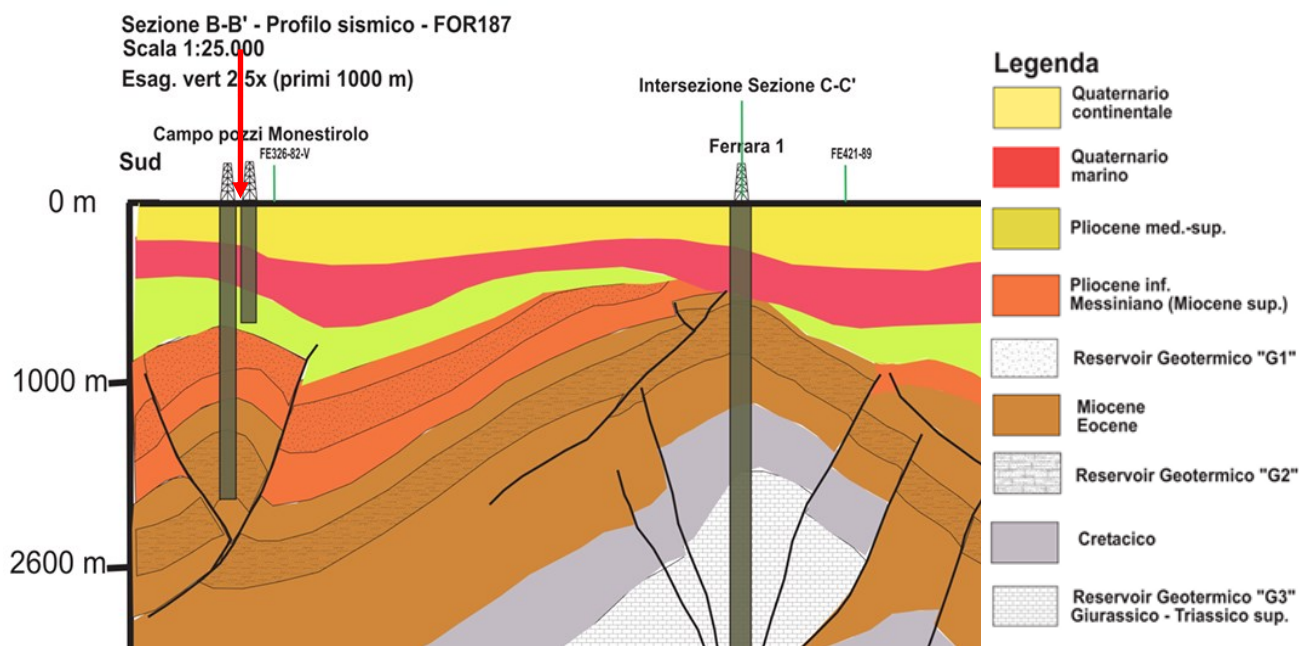


Figura 3: sezione geologica 227 Servizio Geologico dei Suoli della Regione Emilia Romagna

Questa dorsale, in pianta, costituisce un arco il cui fronte si estende verso ovest fino a oltre Reggio Emilia, dove si unisce alle “Pieghe Emiliane”, verso nord fino al Polesine e verso est fino alla costa adriatica dove, a sud-est di Ravenna, si unisce alle “Pieghe Adriatiche” (Pieri & Groppi, 1981). La coltre sedimentaria recente, olocenico – pleistocenico superiore, sottostante l’areale di Argenta è quindi particolarmente spessa, arrivando a oltre i 800 m, quota alla quale si potrebbe collocare la prima importante discontinuità deposizionale, il contatto tra la base del Pliocene ed il tetto del Miocene.

In considerazione di ciò, nella modellazione della Risposta Sismica Locale si considererà la profondità del bedrock prossima ai 800 m da piano campagna.

5. MODELLO GEOLOGICO

Il modello geologico è stato realizzato utilizzando i dati della campagna di indagine eseguita nel gennaio del 2025, che si sono articolate con l’esecuzione di una prova penetrometrica statica, prospezioni geofisiche e dati disponibili in letteratura.

Il modello geotecnico del terreno è stato ottenuto utilizzandole curve di decadimento del modulo di taglio (G/G_0) e dello smorzamento (D) ricavate da prove dinamiche presenti in letteratura.

Il profilo stratigrafico profondo è stato modellato sulla base delle stratigrafie dei sondaggi e pozzi messi a disposizione sul sito di ISPRA AMBIENTE e dei pozzi AGIP pubblicati dal progetto VIDEPI.

Nonostante le approssimazioni introdotte nella definizione del modello stratigrafico non si commettono errori particolarmente evidenti di valutazione, non essendo il sito oggetto di studio, caratterizzato da sensibili variazioni delle specie litologiche. Le curve di decadimento del modulo di taglio e dello smorzamento ottenute dalle prove di colonna risonante sono state estese alle tipologie litologiche del deposito, introducendo, dove non presenti, curve medie reperite in letteratura.

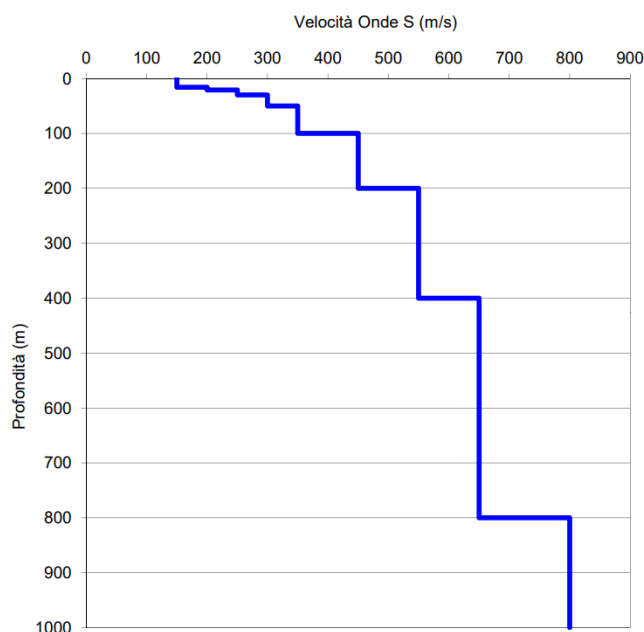


Figura 5: Profilo di Vs da indagine sismica e letteratura

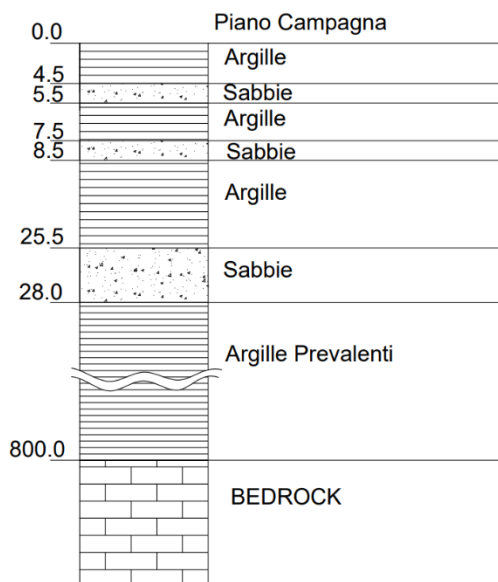


Figura 6: Profilo stratigrafico adottato nella modellazione

Anche se l'individuazione del bedrock sismico, così come la modellazione delle Vs in profondità, è affetta da un certo grado di incertezza, l'ubicazione del sismostrato di base a profondità superiori ai 100 m non è particolarmente rilevante. Infatti, a meno che nei livelli superficiali non sussistano importanti contrasti di rigidità per spessori non trascurabili, *su grandi spessori di terreni non litoidi, i fenomeni dissipativi prevalgono su quelli amplificativi.*

6. ANALISI SISMICA

6.1 Moto di Input

I moti di input utilizzati sono stati selezionati sulla base delle azioni di progetto indicate dalle NTC 2018, che rimandano al reticolo sismico dell'INGV per la definizione dei parametri sismici al bedrock (suolo di categoria A).

Nel caso oggetto di studio si sono fissate le seguenti condizioni:

- suolo di categoria T1 (morfologia pianeggiante);
- vita nominale di 50 anni;
- classe d'uso II;
- smorzamento 5%;
- periodo di ritorno 475 anni;
- stato limite di salvaguardia della vita (SLV) e di danno (SLD).

Lo spettro di progetto che si riferisce alla categoria di sottosuolo riscontrata in sito mediante la stima della Vs30 verrà utilizzato come termine di paragone dello spettro medio ottenuto dalla modellazione del deposito col metodo lineare equivalente 1D.

Gli accelerogrammi per la modellazione allo Stato Limite di Vita (SLV) e Stato Limite di Danno (SLD), sono stati estratti col software di Eucentre (<https://rer.eucentre.it/mainpage.jsp>), come indicato dal DGR 476-21 della Regione Emilia Romagna e sono stati opportunamente scalati in funzione delle accelerazioni risultanti dalla vita nominale e dalla classe d'uso considerati.

La PGA utilizzata è quella fornita dal reticolo INGV per le coordinate del sito oggetto di studio, mentre l'intervallo di confidenza inferiore è quello di normativa, e quello superiore è stato fissato arbitrariamente, come indicato dalla tabella sottostante.

PGA - Input [m/s²]: 1.481 (SLV)

PGA - Input [m/s²]: 0.520 (SLD)

SLV: File Name	ID	Mw	Epicentral Distance [km]	Source	EC8 class	Site
EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC	1	6.20	29.90	ESM	A	
RSN146_COYOTELK_G01320.AT2	2	5.74	12.57	NGA	A	
RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2	3	5.99	54.21	NGA	A	
RSN804_LOMAP_SSF205.AT2	4	6.93	83.53	NGA	A	
RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2	5	6.69	38.07	NGA	A	
SMNH100010061330.EW2	6	6.60	31.00	KiKnet	A	
IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC	7	5.90	14.40	ESM	A	

SLD: File Name	ID	Mw	Epicentral Distance [km]	Source	EC8 class	Site
RSN455_MORGAN_G01230.AT2	1	6.19	38.63	NGA	A	
RSN788_LOMAP_PJH315.AT2	2	6.93	92.21	NGA	A	
FC.ALG..HNE.D.19891029.190913.C.ACC.ASC	3	5.9	50	ESM	A	
RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2	4	6.69	38.07	NGA	A	
SAGH050503201053.NS2	5	6.6	62	KiKnet	A	
4A.MI05..HNE.D.20090409.005259.C.ACC.ASC	6	5.4	26.4	ESM	A	
IT.GNU..HGN.D.20161030.064018.C.ACC.ASC	7	6.5	44.3	ESM	A	

6.2 Output sismico

Il prodotto finale della RSL è l'output sismico derivante dall'analisi numerica eseguita sui dati di ingresso, come precedentemente determinati.

Per la modellazione sismica si è utilizzato il programma STRATA, sviluppato dalla University of Texas, Austin, e distribuito gratuitamente dal Pacific Earthquake Engineering Research Centre (PEER) dell'University of California, Berkeley.

STRATA sviluppa l'analisi della risposta sismica di sito mediante un modello monodimensionale (1D), dove non sono presenti significative variazioni laterali di impedenza sismica, con un metodo lineare equivalente nel dominio delle frequenze, utilizzando dei segnali di input nel dominio del tempo (accelerogrammi).

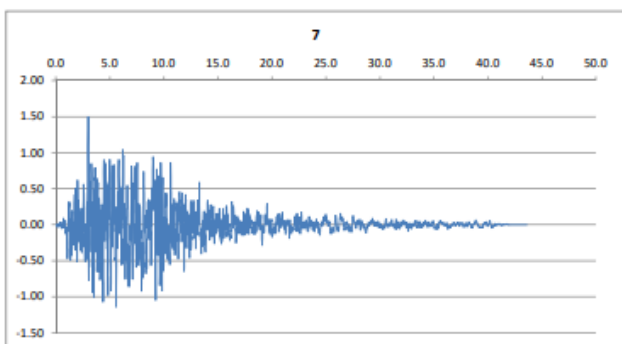
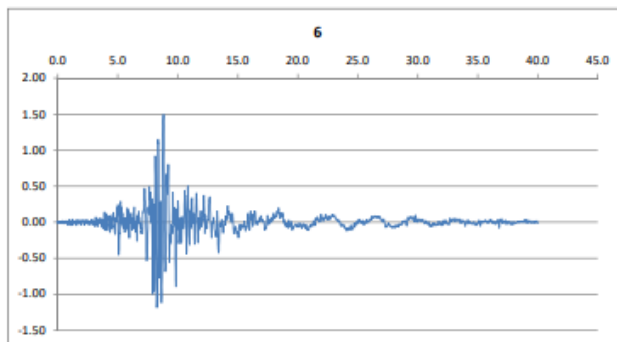
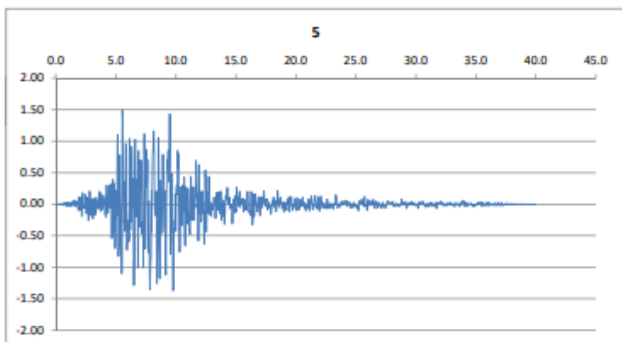
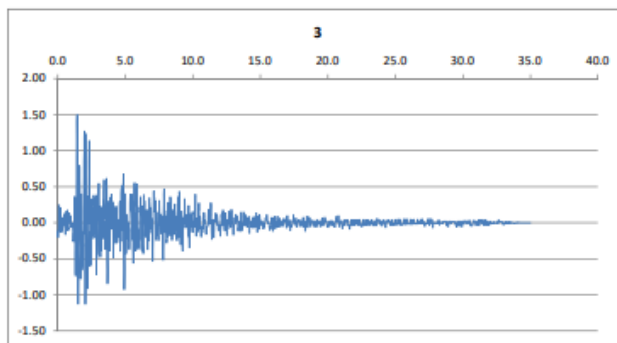
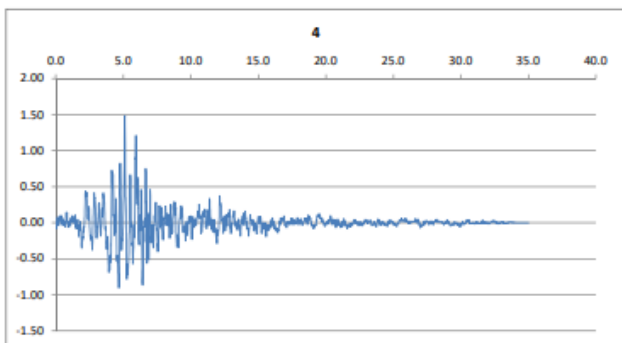
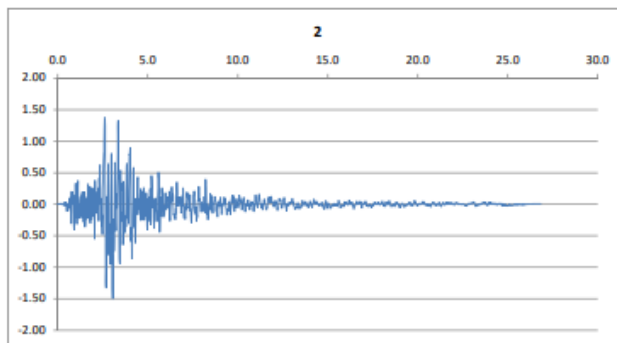
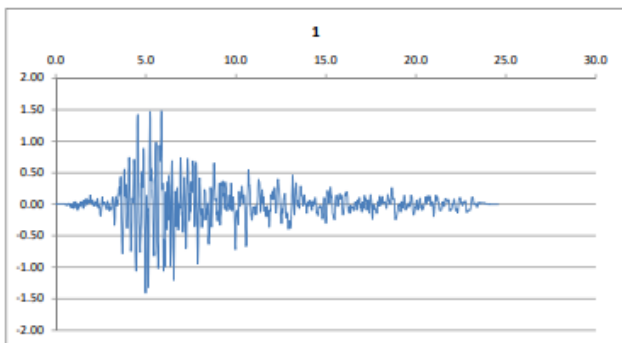
STRATA come EERA, sono modellatori che discendono dal codice di calcolo SHAKE, sviluppato già negli anni '70 da Shnabel, in California, e da allora ampiamente utilizzato.

Di seguito vengono presentati i dati di output, per gli stati limite presi in considerazione, sia come grafici che come tabellare, in forma di:

- ACCELEROGRAMMI DI OUTPUT;
- SPETTRI DI RISPOSTA ELASTICI;
- SPETTRO NORMALIZZATO.

Conoscendo il fattore di struttura "q", è possibile fornire lo spettro di progetto.

6.3 Stato Limite Ultimo: Vita - SLV



SLV Suolo A (Target)

T (s) Se (g)

0.000	0.151
0.091	0.391
0.272	0.391
0.364	0.292
0.456	0.233
0.548	0.194
0.640	0.166
0.732	0.145
0.824	0.129
0.916	0.116
1.008	0.106
1.100	0.097
1.192	0.089
1.284	0.083
1.376	0.077
1.468	0.072
1.560	0.068
1.652	0.064
1.744	0.061
1.836	0.058
1.928	0.055
2.020	0.053
2.112	0.050
2.204	0.048
2.290	0.045
2.375	0.042
2.461	0.039
2.546	0.036
2.632	0.034
2.717	0.032
2.803	0.030
2.888	0.030
2.974	0.030
3.059	0.030
3.145	0.030
3.230	0.030
3.316	0.030
3.401	0.030
3.487	0.030
3.572	0.030
3.658	0.030
3.743	0.030
3.829	0.030
3.914	0.030
4.000	0.030

SLV Suolo C

T (s) Se (g)

0.000	0.221
0.146	0.573
0.439	0.573
0.523	0.481
0.607	0.414
0.691	0.364
0.775	0.324
0.859	0.293
0.943	0.267
1.027	0.245
1.111	0.226
1.195	0.210
1.279	0.197
1.364	0.184
1.448	0.174
1.532	0.164
1.616	0.156
1.700	0.148
1.784	0.141
1.868	0.135
1.952	0.129
2.036	0.124
2.120	0.119
2.204	0.114
2.290	0.106
2.375	0.098
2.461	0.092
2.546	0.086
2.632	0.080
2.717	0.075
2.803	0.071
2.888	0.066
2.974	0.063
3.059	0.059
3.145	0.056
3.230	0.053
3.316	0.050
3.401	0.048
3.487	0.046
3.572	0.043
3.658	0.041
3.743	0.040
3.829	0.038
3.914	0.036
4.000	0.035

SLV Suolo D

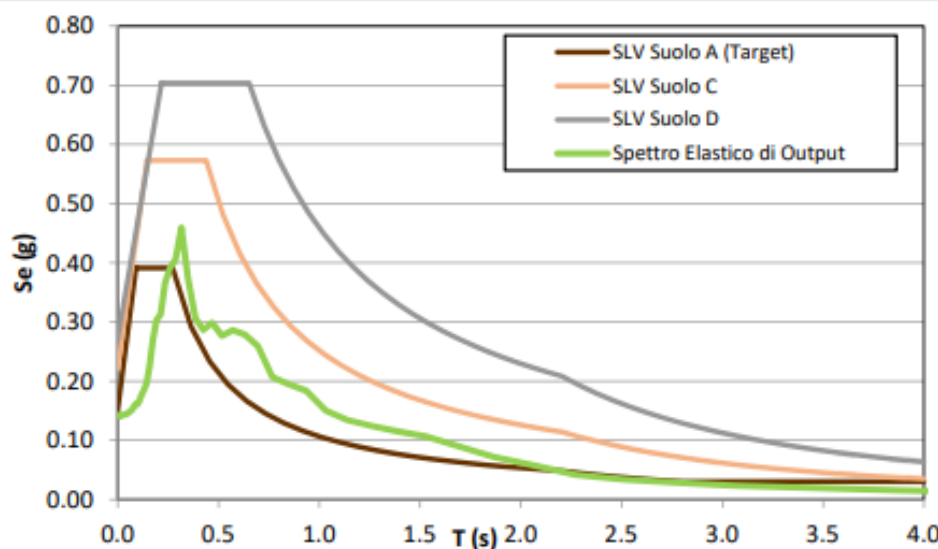
T (s) Se (g)

0.000	0.272
0.217	0.704
0.652	0.704
0.726	0.632
0.800	0.574
0.874	0.525
0.948	0.484
1.022	0.449
1.095	0.419
1.169	0.392
1.243	0.369
1.317	0.348
1.391	0.330
1.465	0.313
1.539	0.298
1.613	0.285
1.687	0.272
1.761	0.261
1.835	0.250
1.908	0.240
1.982	0.232
2.056	0.223
2.130	0.215
2.204	0.208
2.290	0.193
2.375	0.179
2.461	0.167
2.546	0.156
2.632	0.146
2.717	0.137
2.803	0.129
2.888	0.121
2.974	0.114
3.059	0.108
3.145	0.102
3.230	0.097
3.316	0.092
3.401	0.087
3.487	0.083
3.572	0.079
3.658	0.076
3.743	0.072
3.829	0.069
3.914	0.066
4.000	0.063

Spettro Elastico di Output

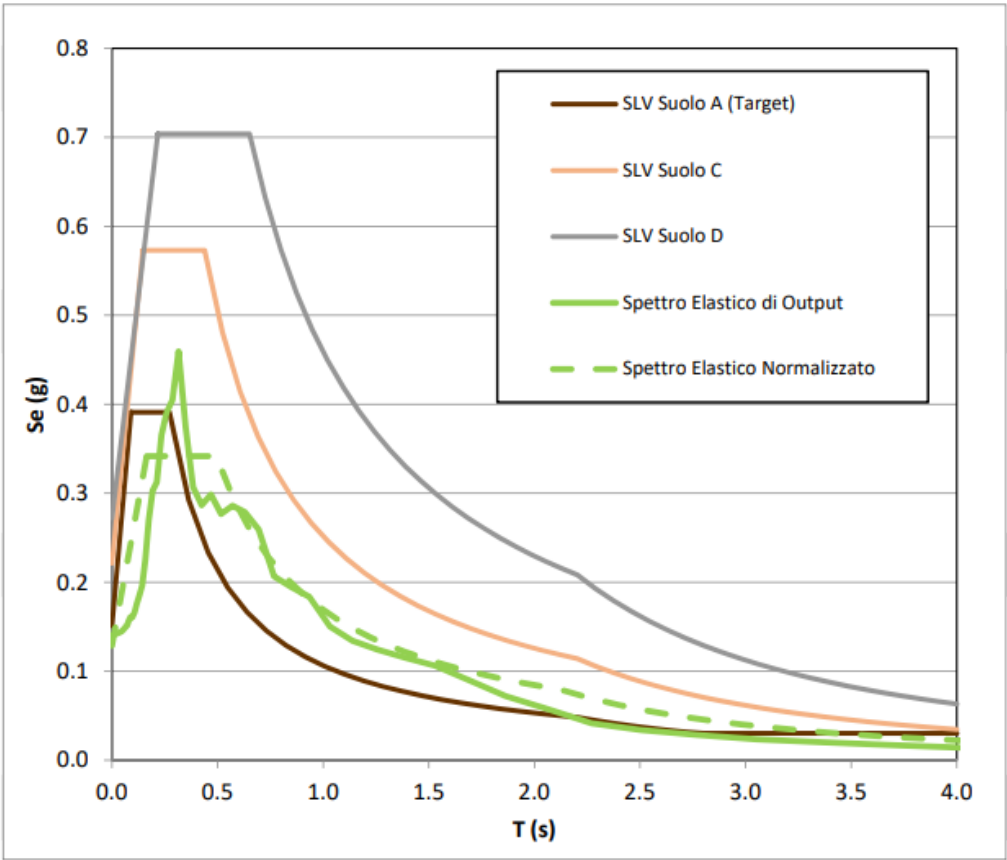
T (s) Se (g)

0.010	0.142
0.011	0.142
0.012	0.142
0.013	0.142
0.015	0.142
0.016	0.142
0.018	0.142
0.020	0.142
0.022	0.142
0.024	0.143
0.027	0.143
0.030	0.143
0.033	0.143
0.036	0.144
0.040	0.144
0.044	0.145
0.048	0.145
0.053	0.147
0.059	0.148
0.065	0.150
0.072	0.152
0.079	0.157
0.088	0.161
0.097	0.161
0.107	0.166
0.118	0.176
0.130	0.185
0.143	0.196
0.158	0.225
0.175	0.270
0.193	0.303
0.213	0.313
0.235	0.366
0.259	0.391
0.286	0.405
0.316	0.459
0.349	0.375
0.385	0.307
0.425	0.287
0.469	0.299
0.517	0.277
0.571	0.286
0.630	0.279
0.695	0.259
0.767	0.207
0.847	0.195
0.935	0.184
1.032	0.150
1.139	0.134
1.257	0.124
1.387	0.115
1.531	0.106
1.689	0.090
1.864	0.072
2.058	0.058
2.271	0.041
2.507	0.034
2.766	0.029
3.053	0.023
3.370	0.020
3.719	0.017
4.105	0.013
4.530	0.011
5.000	0.010



Spettro Elastico di Output Normalizzato (ICMS)

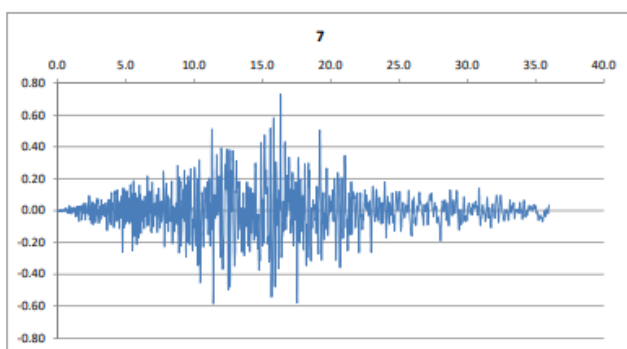
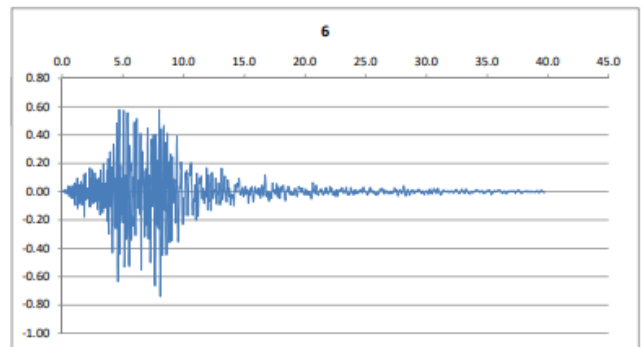
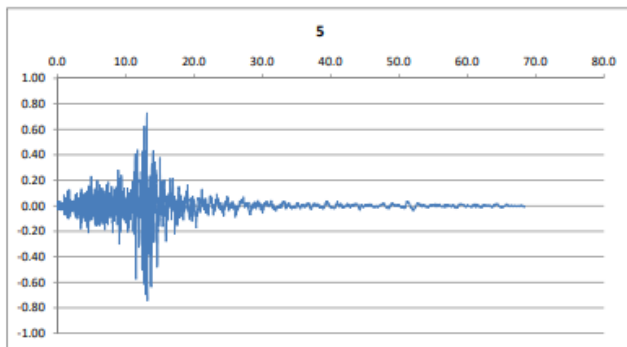
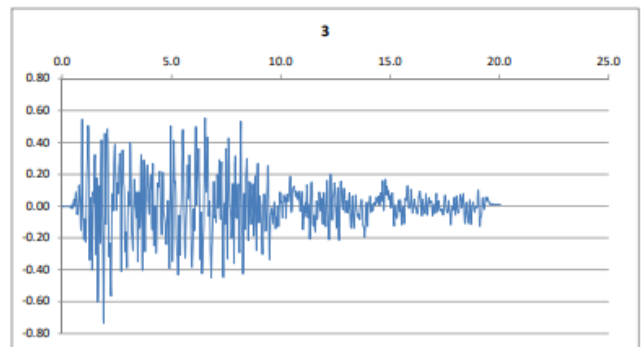
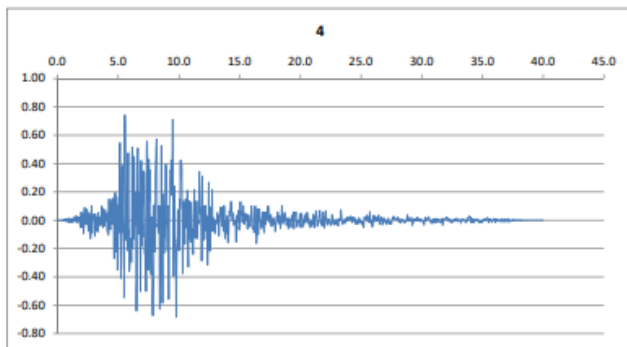
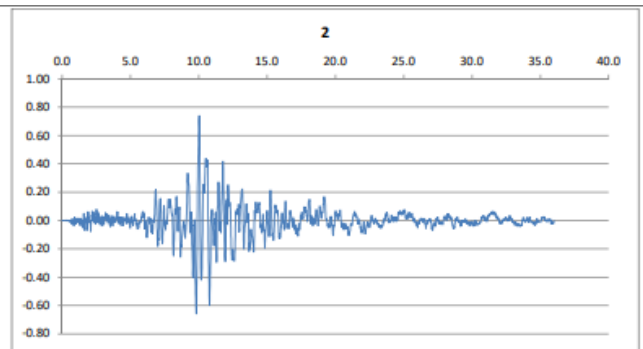
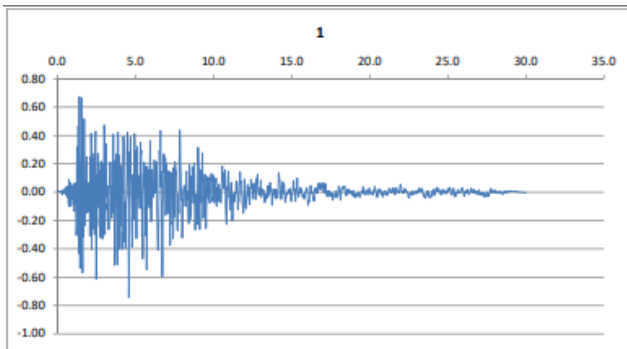
T (s)	Se (g)
0.000	0.129
0.165	0.342
0.495	0.342
0.576	0.294
0.657	0.257
0.738	0.229
0.819	0.206
0.900	0.188
0.981	0.172
1.062	0.159
1.143	0.148
1.224	0.138
1.305	0.129
1.386	0.122
1.548	0.109
1.629	0.104
1.710	0.099
1.791	0.094
1.872	0.090
1.953	0.087
2.034	0.083
2.115	0.080
2.260	0.070
2.404	0.062
2.548	0.055
2.692	0.049
2.837	0.044
2.981	0.040
3.125	0.037
3.269	0.033
3.413	0.031
3.558	0.028
3.702	0.026
3.846	0.024
3.990	0.022
4.135	0.021
4.279	0.020
4.423	0.018
4.567	0.017
4.712	0.016
4.856	0.015
5.000	0.014



RISULTATI:

$a_{max} \text{ (g)} = 0.129$
 $F_o = 2.652$
 $F_o a_{max} \text{ (g)} = 0.342$
 $T_B \text{ (s)} = 0.165$
 $T_C \text{ (s)} = 0.495$
 $T_D \text{ (s)} = 2.115$

6.4 Stato Limite di Esercizio: Danno – SLD



SLD Suolo A (Target)

T (s)	Se (g)
0.000	0.053
0.091	0.130
0.272	0.130
0.345	0.103
0.419	0.085
0.492	0.072
0.565	0.063
0.639	0.055
0.712	0.050
0.785	0.045
0.858	0.041
0.932	0.038
1.005	0.035
1.078	0.033
1.152	0.031
1.225	0.029
1.298	0.027
1.372	0.026
1.445	0.025
1.518	0.023
1.592	0.022
1.665	0.021
1.738	0.020
1.812	0.020
1.916	0.017
2.020	0.016
2.124	0.014
2.228	0.013
2.333	0.012
2.437	0.011
2.541	0.010
2.645	0.009
2.750	0.008
2.854	0.008
2.958	0.007
3.062	0.007
3.166	0.006
3.271	0.006
3.375	0.006
3.479	0.005
3.583	0.005
3.687	0.005
3.792	0.004
3.896	0.004
4.000	0.004

SLD Suolo C

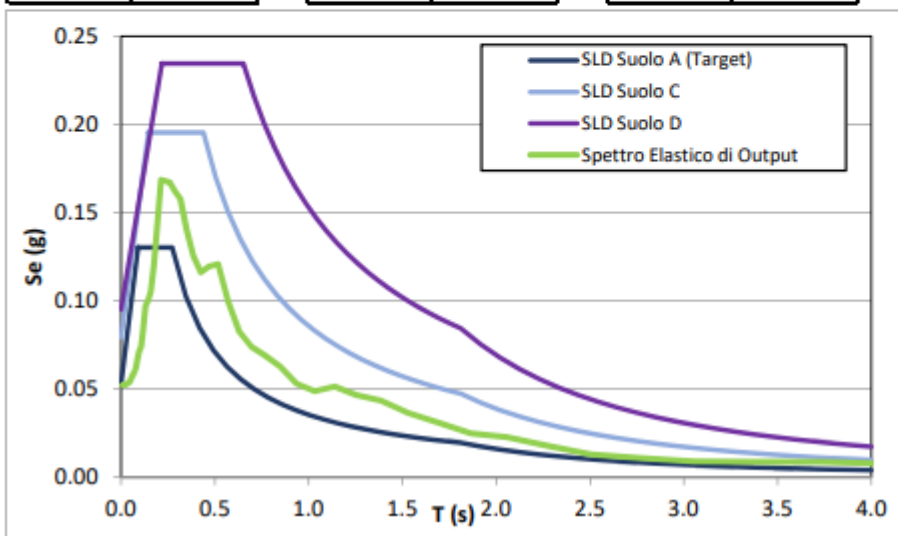
T (s)	Se (g)
0.000	0.079
0.146	0.195
0.439	0.195
0.504	0.170
0.570	0.151
0.635	0.135
0.700	0.122
0.766	0.112
0.831	0.103
0.896	0.096
0.962	0.089
1.027	0.083
1.093	0.078
1.158	0.074
1.223	0.070
1.289	0.067
1.354	0.063
1.419	0.060
1.485	0.058
1.550	0.055
1.616	0.053
1.681	0.051
1.746	0.049
1.812	0.047
1.916	0.042
2.020	0.038
2.124	0.034
2.228	0.031
2.333	0.029
2.437	0.026
2.541	0.024
2.645	0.022
2.750	0.021
2.854	0.019
2.958	0.018
3.062	0.017
3.166	0.015
3.271	0.015
3.375	0.014
3.479	0.013
3.583	0.012
3.687	0.011
3.792	0.011
3.896	0.010
4.000	0.010

SLD Suolo D

T (s)	Se (g)
0.000	0.095
0.217	0.234
0.652	0.234
0.707	0.216
0.762	0.200
0.818	0.187
0.873	0.175
0.928	0.165
0.983	0.155
1.038	0.147
1.094	0.140
1.149	0.133
1.204	0.127
1.259	0.121
1.315	0.116
1.370	0.112
1.425	0.107
1.480	0.103
1.535	0.100
1.591	0.096
1.646	0.093
1.701	0.090
1.756	0.087
1.812	0.084
1.916	0.075
2.020	0.068
2.124	0.061
2.228	0.056
2.333	0.051
2.437	0.047
2.541	0.043
2.645	0.040
2.750	0.037
2.854	0.034
2.958	0.032
3.062	0.030
3.166	0.028
3.271	0.026
3.375	0.024
3.479	0.023
3.583	0.022
3.687	0.020
3.792	0.019
3.896	0.018
4.000	0.017

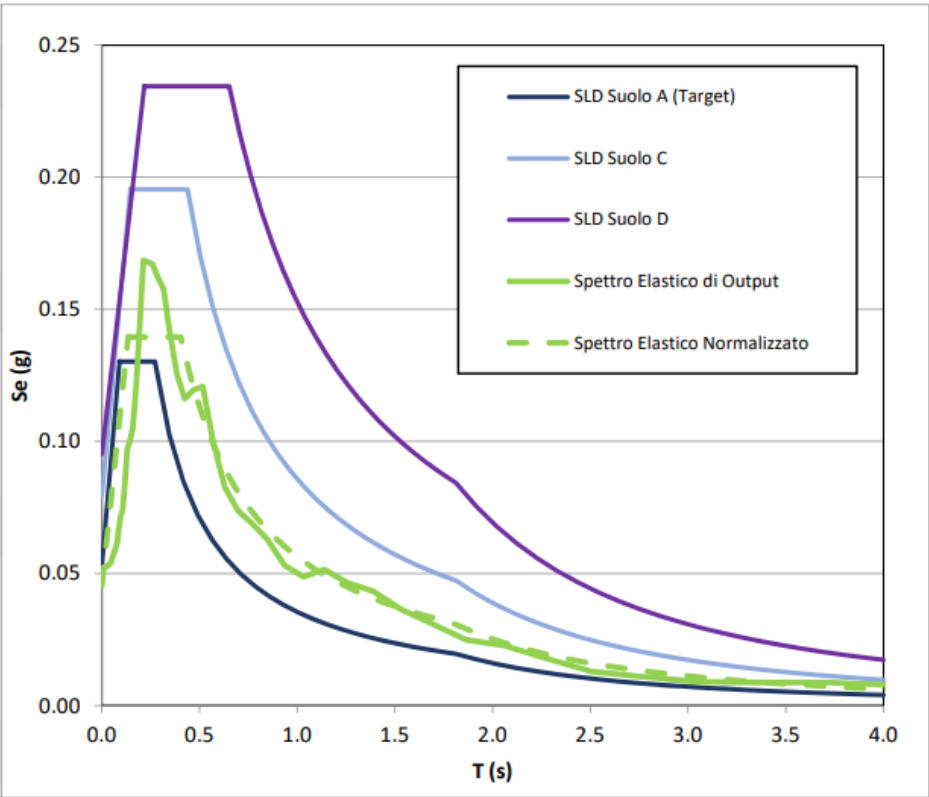
Spettro Elastico di Output

T (s)	Se (g)
0.010	0.052
0.011	0.052
0.012	0.052
0.013	0.052
0.015	0.052
0.016	0.052
0.018	0.052
0.020	0.052
0.022	0.053
0.024	0.053
0.027	0.053
0.030	0.053
0.033	0.053
0.036	0.053
0.040	0.054
0.044	0.054
0.048	0.054
0.053	0.056
0.059	0.057
0.065	0.058
0.072	0.060
0.079	0.062
0.088	0.067
0.097	0.072
0.107	0.074
0.118	0.084
0.130	0.097
0.143	0.100
0.158	0.105
0.175	0.120
0.193	0.142
0.213	0.169
0.235	0.168
0.259	0.167
0.286	0.162
0.316	0.158
0.349	0.141
0.385	0.126
0.425	0.116
0.469	0.120
0.517	0.121
0.571	0.099
0.630	0.083
0.695	0.074
0.767	0.069
0.847	0.063
0.935	0.053
1.032	0.049
1.139	0.051
1.257	0.047
1.387	0.043
1.531	0.036
1.689	0.031
1.864	0.025
2.058	0.023
2.271	0.018
2.507	0.013
2.768	0.011
3.053	0.009
3.370	0.009
3.719	0.009
4.105	0.008
4.530	0.006
5.000	0.005



Spettro Elastico di Output Normalizzato (ICMS)

T (s)	Se (g)
0.000	0.045
0.135	0.140
0.404	0.140
0.473	0.119
0.542	0.104
0.610	0.092
0.679	0.083
0.748	0.075
0.817	0.069
0.886	0.064
0.955	0.059
1.024	0.055
1.093	0.052
1.161	0.049
1.299	0.043
1.368	0.041
1.437	0.039
1.506	0.037
1.575	0.036
1.644	0.034
1.712	0.033
1.781	0.032
1.942	0.027
2.103	0.023
2.264	0.020
2.425	0.017
2.586	0.015
2.747	0.013
2.908	0.012
3.069	0.011
3.230	0.010
3.391	0.009
3.552	0.008
3.713	0.007
3.873	0.007
4.034	0.006
4.195	0.006
4.356	0.005
4.517	0.005
4.678	0.005
4.839	0.004
5.000	0.004



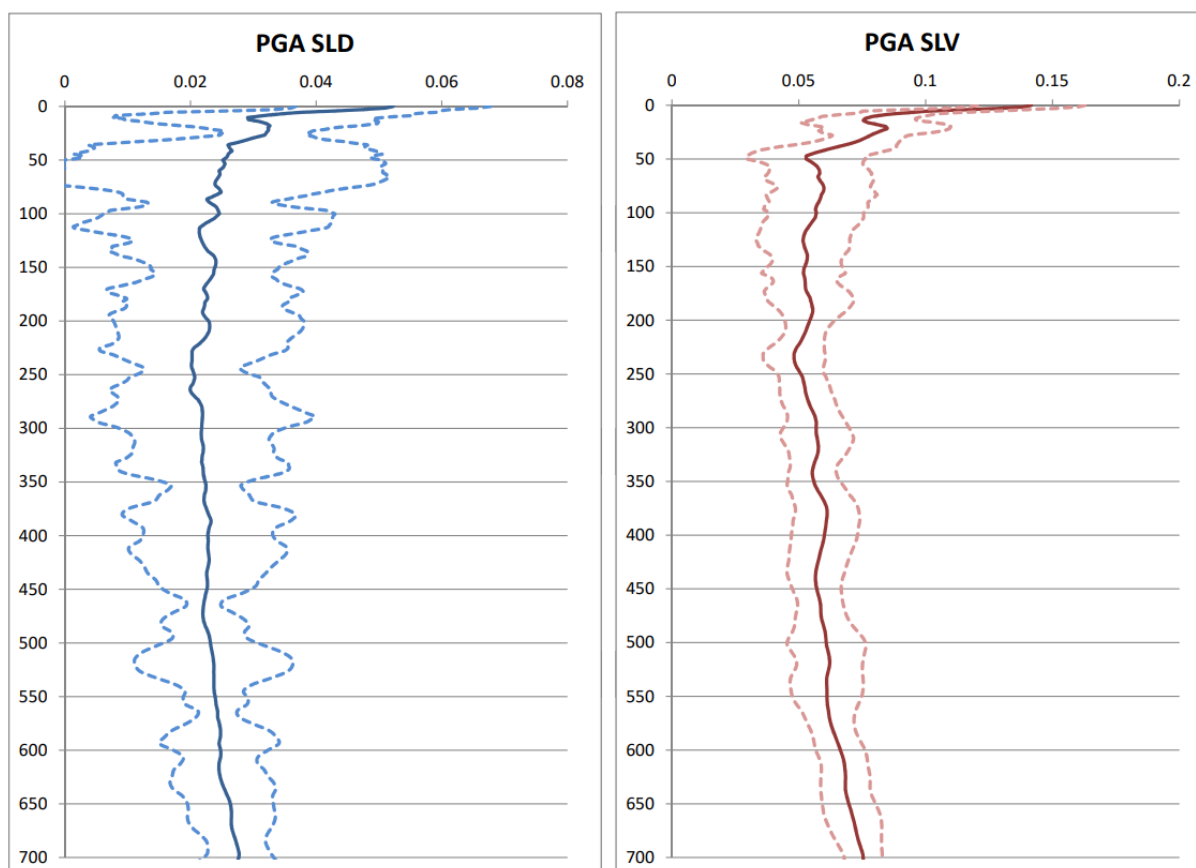
RISULTATI:

$a_{max} (g) = 0.045$
 $F_o = 3.079$
 $F_o a_{max} (g) = 0.140$
 $T_B (s) = 0.135$
 $T_C (s) = 0.404$
 $T_D (s) = 1.781$

6.5 Profili di accelerazione

Il grafico di seguito rappresentato riporta l'andamento dell'accelerazione calcolata in funzione della profondità. La linea continua centrale rappresenta la media delle accelerazioni in frazioni di "g" calcolata dai sette accelerogrammi di input, mentre le linee tratteggiate rappresentano la deviazione standard.

Il primo dato che si può ricavare dall'osservazione delle curve, è che l'amplificazione dell'accelerazione, dopo una costante e moderata diminuzione progressiva, avviene repentinamente negli ultimi 20-30 metri di terreno.



Allo SLD, in condizioni di sollecitazione medio bassa, l'amplificazione dell'accelerazione sismica aumenta con moderazione dal bedrock sismico fino agli ultimi 10 metri dalla superficie, dove si manifesta un aumento delle accelerazioni che producono un rapporto di amplificazione effettivo sensibilmente minore - $ag_{max}/ag_0 = 0.052/0.053 = 0.98$ – a quello indicato dalle norme tecniche di riferimento per terreni di categoria sismica "C", cioè 1.50 circa, producendo anzi una sensibile de-amplificazione della PGA rispetto all'accelerazione in input.

Anche allo SLV il potente spessore dei terreni sedimentari recenti produce un effetto prevalentemente dissipante sul sisma, rispetto a quello amplificante. Infatti la PGA risultante è inferiore a quella in input al bedrock, producendo di fatto una de-amplificazione degli effetti sismici. La modellazione presenta un'accelerazione al suolo di **0.141 g** rispetto a quelle previste dalle analisi semplificate, ovvero **0.151 g**, portando il rapporto di amplificazione stratigrafico calcolato sulla media - $ag_{max}/ag_0 = 0.141/0.151 = 0.93$ – notevolmente minore di quello indicato dalle norme tecniche di riferimento per terreni di categoria sismica "C" di 1.50 circa.

7. CEDIMENTI POST-SISMICI E VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE

Per la valutazione del potenziale di liquefazione, sulle prove eseguite con punta meccanica gli algoritmi comunemente impiegati con i dati ricavati dalle penetrometrie statiche (Robertson, Idriss e Boulanger, ecc.) non possono essere direttamente impiegati, in quanto questi procedimenti di calcolo, sono stati calibrati utilizzando il piezocono, che per geometrie costruttive fornisce valori di attrito laterale diversi da quelli che si ottengono con la punta meccanica. I valori di resistenza alla punta invece sono tra i due coni perfettamente comparabili.

Per valutare il potenziale di liquefazione da prove penetrometriche statiche eseguite con punta meccanica è necessario eseguire un passaggio intermedio, convertendo il valore di resistenza alla punta in N_{SPT} , per poi utilizzare quest'ultimo per le valutazioni di liquefacibilità.

Le correlazioni per i parametri derivati dalle prove con punta meccanica provengono da una consolidata ed affidabile letteratura geotecnica nord-americana ed europea che si è sviluppata dall'inizio dell'impiego del penetrometro statico fino all'inizio degli anni ottanta del secolo scorso. In questo lavoro la correlazione per convertire il dato penetrometrico statico in N_{SPT} (numero di colpi standard per una penetrazione del terreno di 30 cm) è quella suggerita da Schmertmann, pubblicata in "Guidelines for Cone Penetration Test Performance and Design", Federal Highway Administration Offices of Research and Development, U.S. Department of Transportation; 1978. Le tabelle di seguito riportate elencano i valori di N_{SPT} individuati per ciascun valore di R_p ed R_l della penetrometria statica, nella prova eseguita nell'area oggetto di indagine.

CPT 1							
PROFONDITA'	N(SPT)	PROFONDITA'	N(SPT)	PROFONDITA'	N(SPT)	PROFONDITA'	N(SPT)
0.2	6.1	5.2	6.7	10.2	6.8	15.2	13.1
0.4	6.1	5.4	7.9	10.4	7.7	15.4	6.8
0.6	9.4	5.6	7.4	10.6	6.4	15.6	10.8
0.8	8.8	5.8	6.4	10.8	6.4	15.8	19.5
1	9.5	6	10.0	11	9.8	16	19.2
1.2	8.2	6.2	7.3	11.2	6.8	16.2	24.3
1.4	7.6	6.4	14.5	11.4	7.8	16.4	17.2
1.6	8.9	6.6	14.0	11.6	7.8	16.6	14.2
1.8	11.5	6.8	15.5	11.8	4.8	16.8	11.7
2	10.2	7	16.6	12	6.9	17	15.3
2.2	10.9	7.2	11.6	12.2	7.9	17.2	8.3
2.4	10.3	7.4	7.4	12.4	7.2	17.4	9.7
2.6	10.3	7.6	18.6	12.6	9.2	17.6	13.7
2.8	10.9	7.8	11.8	12.8	9.0	17.8	10.8
3	11.7	8	13.3	13	16.0	18	12.4
3.2	9.7	8.2	10.8	13.2	13.0	18.2	9.1
3.4	9.7	8.4	18.6	13.4	14.6	18.4	9.8
3.6	9.3	8.6	5.6	13.6	12.0	18.6	9.3
3.8	7.0	8.8	4.8	13.8	15.0	18.8	9.1
4	6.7	9	7.6	14	15.1	19	9.9
4.2	9.1	9.2	6.9	14.2	13.1	19.2	9.2
4.4	9.4	9.4	8.3	14.4	17.4	19.4	14.4
4.6	7.1	9.6	7.6	14.6	14.1	19.6	20.5
4.8	7.7	9.8	6.9	14.8	14.1	19.8	18.5
5	16.4	10	7.3	15	14.1	20	6.2

Nelle prove penetrometriche dinamiche (SPT-DPSH), l'analisi del rischio del fenomeno della liquefazione può essere eseguita rapportando la sollecitazione sismica di riferimento Cyclic Strenght Ratio (CSR), con la resistenza dei vari strati di terreno considerato Cyclic Resistance Ratio (CRR).

Viene qui utilizzata la procedura proposta da Idriss e Boulanger (2008) come indicato dalle DGR Emilia Romagna 2193/2015 e 630/2019.

Il fattore di sicurezza alla liquefacibilità viene definito come:

$$FS_{liq} = CRR/CSR \cdot MSF;$$

dove FS rappresenta il fattore di sicurezza alla liquefazione.

Quando la sollecitazione sismica CSR è maggiore della resistenza del terreno CRR, si può verificare il fenomeno della liquefazione dei terreni.

Il numeratore del rapporto sopra riportato, il CRR, viene ricavato dall'interpretazione delle prove in sito. Nel caso specifico le prove S.P.T. eseguite in foro di sondaggio.

Il CRR è dipendente dalla durata del terremoto, che viene presa in considerazione con l'MSF (Fattore di Scala della Magnitudo), e dalla tensione efficace in sito, che viene espressa mediante il coefficiente K_σ .

Il CRR è inoltre influenzato dalla presenza di sforzi di taglio statico che possono essere indotti da strutture edificate in prossimità del sito indagato o dalla pendenza del sito stesso. La presenza di queste tensioni di taglio può essere quantificata mediante l'utilizzo del coefficiente K_σ . Normalmente in prossimità del piano campagna o a profondità di interesse geotecnico il coefficiente K_σ è piccolo, per cui trascurabile.

La correlazione tra CRR e $(N1)_{60}$ è anche influenzata dalla presenza di materiale fine (FC = fine content). Per cui questo viene stimato attraverso correlazioni di letteratura mediante una funzione del tipo:

$$CRRM = 7.5, s'v=1 = f [(N1)_{60}, FC]$$

Al denominatore del rapporto si trova il CSR, che dimensiona l'azione innescante la liquefazione. La funzione più utilizzata per dimensionare il CSR è quella proposta da Seed e Idriss (1971):

$$CSR_{7,5} = 0,65 (ag/g) \times (\sigma_{v0} / \sigma'_{v0}) \times r_d \times (1 / MSF)$$

dove:

σ_{v0} = pressione litostatica totale;

σ'_{v0} = pressione litostatica efficace;

r_d = coefficiente di riduzione della rigidità con l'aumentare della profondità z ;

MSF = (Magnitudo Scaling Factor) fattore di correzione per la magnitudo del sito di analisi.

L'MSF è un coefficiente empirico che riduce o aumenta il rapporto in funzione della magnitudo del terremoto di progetto, essendo state tutte le valutazioni della liquefazione studiate e calibrate su terremoti di magnitudo 7,5 della scala Richter.

Diversi autori propongono molteplici correlazioni per calcolare l'MSF.

Nel presente elaborato si fa uso della relazione presentata da Idriss e Boulanger (2008).

La magnitudo di progetto corrisponde alla magnitudo massima della Zona Sismogenetica 912, in cui ricade l'area oggetto di indagine. In questo caso la magnitudo associata al terremoto di riferimento viene considerata di **6.14** della scala Richter.

La tabella sottostante riassume la determinazione del Fattore di Sicurezza alla liquefazione, in corrispondenza delle prove S.P.T. eseguite. La percentuale di contenuto fine è stata stimata sulla base delle granulometrie eseguite.

Come si può notare dall'ultima colonna, che rappresenta il valore del Fattore di Sicurezza nei confronti della liquefazione, i dati si collocano sopra il valore di 1.25 (valore consigliato come riferimento dall'Eurocodice 8), indicando una sostanziale stabilità dei terreni nei confronti della liquefazione.

Come accelerazione al suolo di riferimento viene impiegata cautelativamente quella massima ricavata dall'analisi di Risposta Sismica Locale eseguita, corrispondente a **0.282 g**.

Parametri utilizzati:

Peak groun accel (g) = 0.141

Magnitudo terremoto = 6.14

Falda (m) = 0.30

Average γ above water table (kN/m³) = 19

Average γ below water table (kN/m³) = 20

CPT 1							
Sample number	Depth (m)	Measured N	Flag "Clay" "Unsaturated" "Unreliable"	Fines content (%)	Energy ratio, ER (%)	fattore di sicurezza	IL
CPT1	0.2	6	Unsaturated	100	75	n.a.	0
	0.4	6	Unsaturated	100	75	n.a.	0
	0.6	9	0	100	75	2.00	0
	0.8	9	0	100	75	2.00	0
	1	10	0	100	75	2.00	0
	1.2	8	0	100	75	2.00	0
	1.4	8	0	100	75	1.91	0
	1.6	9	0	100	75	2.00	0
	1.8	12	0	100	75	2.00	0
	2	10	0	100	75	2.00	0
	2.2	11	0	100	75	2.00	0
	2.4	10	0	100	75	2.00	0
	2.6	10	0	100	75	2.00	0
	2.8	11	0	100	75	2.00	0
	3	12	0	100	75	2.00	0
	3.2	10	0	100	75	2.00	0
	3.4	10	0	100	75	2.00	0
	3.6	9	0	100	75	2.00	0
	3.8	7	0	100	75	1.71	0
	4	7	0	10	75	1.30	0
	4.2	9	0	100	75	1.97	0
	4.4	9	0	10	75	1.57	0
	4.6	7	0	100	75	1.73	0
	4.8	8	0	10	75	1.43	0
	5	16	0	30	75	2.00	0
	5.2	7	0	10	75	1.28	0
	5.4	8	0	100	75	1.76	0
	5.6	7	0	100	75	1.67	0
	5.8	6	0	30	75	1.52	0
	6	10	0	100	75	2.00	0
	6.2	7	0	100	75	1.61	0
	6.4	14	0	30	75	2.00	0
	6.6	14	0	100	75	2.00	0
	6.8	15	0	30	75	2.00	0
	7	17	0	30	75	2.00	0
	7.2	12	0	30	75	2.00	0
	7.4	7	0	100	75	1.56	0
	7.6	19	0	30	75	2.00	0
	7.8	12	0	10	75	1.66	0
	8	13	0	10	75	1.84	0
	8.2	11	0	10	75	1.53	0
	8.4	19	0	30	75	2.00	0
	8.6	6	0	30	75	1.37	0
	8.8	5	0	100	75	1.30	0
	9	8	0	100	75	1.57	0
	9.2	7	0	100	75	1.50	0
	9.4	8	0	100	75	1.64	0
	9.6	8	0	100	75	1.56	0
	9.8	7	0	100	75	1.49	0
	10	7	0	100	75	1.52	0
	10.2	7	0	100	75	1.47	0
	10.4	8	0	100	75	1.56	0
	10.6	6	0	100	75	1.43	0
	10.8	6	0	100	75	1.43	0

CPT 1							
Sample number	Depth (m)	Measured N	Flag "Clay" "Unsaturated" "Unreliable"	Fines content (%)	Energy ratio, ER (%)	fattore di sicurezza	IL
	11	10	0	100	75	1.78	0
	11.2	7	0	100	75	1.48	0
	11.4	8	0	100	75	1.57	0
	11.6	8	0	100	75	1.57	0
	11.8	5	0	100	75	1.30	0
	12	7	0	100	75	1.48	0
	12.2	8	0	100	75	1.58	0
	12.4	7	0	100	75	1.51	0
	12.6	9	0	100	75	1.71	0
	12.8	9	0	10	75	1.32	0
	13	16	0	10	75	2.00	0
	13.2	13	0	100	75	2.00	0
	13.4	15	0	100	75	2.00	0
	13.6	12	0	100	75	2.00	0
	13.8	15	0	100	75	2.00	0
	14	15	0	100	75	2.00	0
	14.2	13	0	100	75	2.00	0
	14.4	17	0	100	75	2.00	0
	14.6	14	0	100	75	2.00	0
	14.8	14	0	100	75	2.00	0
	15	14	0	30	75	2.00	0
	15.2	13	0	100	75	2.00	0
	15.4	7	0	100	75	1.52	0
	15.6	11	0	100	75	1.89	0
	15.8	19	0	100	75	2.00	0
	16	19	0	100	75	2.00	0
	16.2	24	0	100	75	2.00	0
	16.4	17	0	100	75	2.00	0
	16.6	14	0	100	75	2.00	0
	16.8	12	0	100	75	1.99	0
	17	15	0	30	75	2.00	0
	17.2	8	0	100	75	1.67	0
	17.4	10	0	100	75	1.80	0
	17.6	14	0	100	75	2.00	0
	17.8	11	0	100	75	1.91	0
	18	12	0	100	75	2.00	0
	18.2	9	0	100	75	1.77	0
	18.4	10	0	100	75	1.83	0
	18.6	9	0	100	75	1.80	0
	18.8	9	0	100	75	1.78	0
	19	10	0	100	75	1.85	0
	19.2	9	0	100	75	1.80	0
	19.4	14	0	100	75	2.00	0
	19.6	21	0	100	75	2.00	0
	19.8	19	0	100	75	2.00	0
	20	6	0	100	75	1.57	0
Indice del potenziale di liquefazione IL							0.000

l'indice del potenziale di liquefazione determinato sulla penetrometria eseguita nell'area in oggetto è riassunto nella tabella sottostante;

PROVA	CPT 1
I _{PL}	0.000

che corrisponde ad una pericolosità del rischio di liquefazione **NULLA**.

8. CEDIMENTI POST SISMICI

Dalle interpretazioni delle prove penetrometriche si individuano come orizzonti suscettibili di cedimenti post-sismici significativi, gli strati di terreno caratterizzati da terreni argillosi con C_u inferiore ai 70 KPa, e da sabbie con N_{SPT} equivalente stimato inferiore a 15 colpi.

Il cedimento di consolidazione post-sismica è dato dall'espressione:

$$\Delta H = \varepsilon_{vr} H$$

dove:

H = altezza dello strato omogeneo;

ε_{vr} = deformazione volumetrica post-ciclica percentuale, dove:

$$\varepsilon_{vr} = (\alpha C_r / (1 + e_0)) \log(1 / (1 - \Delta u / \sigma'_0))$$

α = costante sperimentale variabile da 1 a 1,5;

e_0 = indice dei vuoti iniziale;

C_r = indice di riconsolidazione, che può essere ipotizzato pari a $0,225 \cdot C_c$ (indice di consolidazione);

$\Delta u / \sigma'_0$ = rapporto di pressione interstiziale (aumento di pressione neutra indotta dal sisma di progetto).

Per il calcolo dei cedimenti verranno adottati i seguenti parametri:

α = compreso tra 1 e 1,5;

$e_0 = 1$: indice dei vuoti medio per terreni argilloso limosi con sostanza organica sparsa;

$e_0 = 0.6$: indice dei vuoti medio per terreni sabbioso limosi;

Indici di consolidazione calcolati dal modulo edometrico stimato dalle penetrometrie ($C_c = (1 + e_0) \sigma_{va} / 0,435 M$).

Il calcolo di $\Delta u / \sigma'_0$ (r_u) richiede l'esecuzione di alcuni passaggi intermedi.

Determinazione ampiezza della deformazione di taglio massima indotta dal sisma:

$$\gamma_{\max} = 0,65 a_{\max,s} / g \sigma_v \text{ rd } 1/G$$

dove:

$a_{\max,s}$ = picco di accelerazione al piano campagna del sisma di riferimento;

g = accelerazione di gravità;

σ_v = tensione totale verticale;

rd = coefficiente riduttivo dell'azione sismica = $1 - 0,015 z$;

G = modulo di taglio corrispondente alla deformazione $\gamma_{\max}$.

$a_{\max,s}$ = accelerazione RSL = 1.383 m/s^2

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

CPT 1

$rd = 0.970$

$G/G_0 = 0.665$

essendo G_0 (medio) = 16.9 MPa

Inserendo le grandezze determinate precedentemente, l'ampiezza delle deformazioni ricavate dalle prove penetrometriche è:

$$\gamma_{\max} = 1.50 \cdot 10^{-3}$$

Inserendo i valori di deformazione ricavati nella tabella ru - $\gamma\%$ di si ricava un rapporto di incremento della pressione di circa 0.51.

Utilizzando i parametri sopra riportati, i massimi cedimenti post sismici attesi sulla verticale indagata, per lo spessore di terreno comprimibile, sono quindi stimati in:

$$\Delta H = \varepsilon_{vr} H = 0.009 \text{ m}$$

9. FATTORI DI AMPLIFICAZIONE SPETTRALI E INTENSITA' DI SCUOTIMENTO

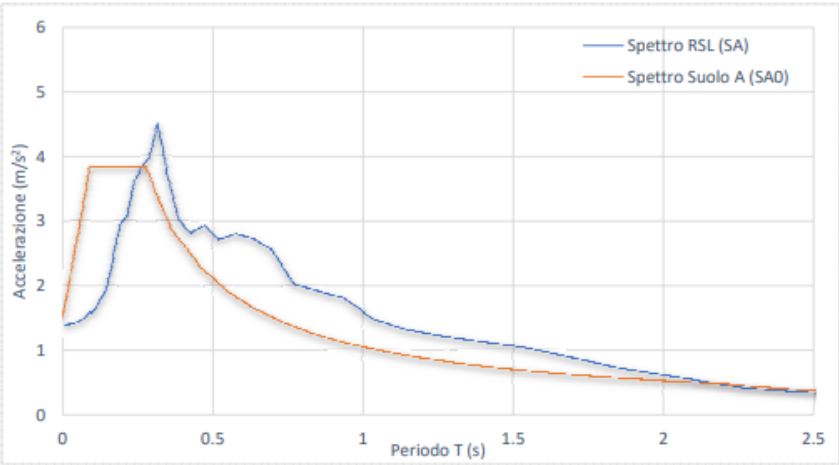
A completamento del presente studio di risposta sismica locale (RSL) si riportano qui di seguito i fattori di amplificazione e dell'intensità di scuotimento così come indicato dai DGR Emilia Romagna 476/2021 e 564/2021.

I fattori di amplificazione vengono calcolati rapportando l'integrale calcolato sui vari tratti degli spettri in accelerazione (SA1, SA2, SA3 e SA4) e velocità (SI1, SI2 e SI3) ricavati dalla RSL, con gli spettri di riferimento al bedrock (suolo A) relativi al sito oggetto di studio.

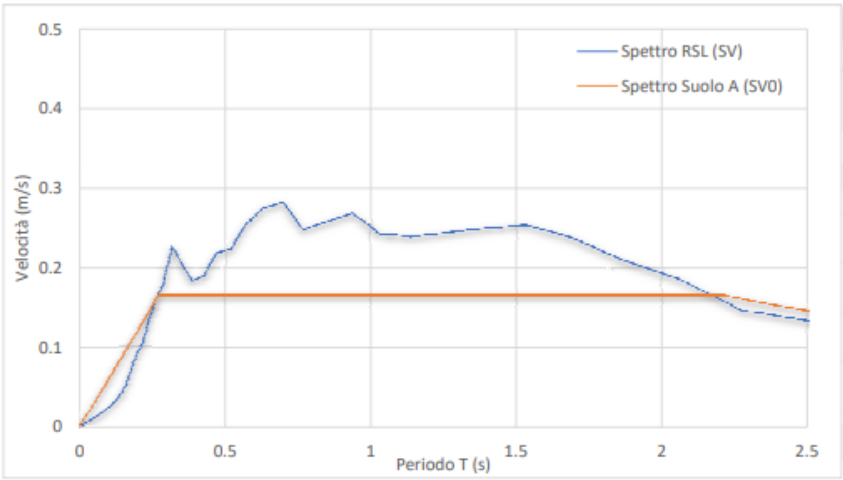
L'intensità di scuotimento viene espressa in accelerazione (cm/s^2) moltiplicando la pericolosità di base del sito oggetto di studio, ricavata dalla ponderazione dei nodi della maglia INGV, e rappresentata dal parametro $ASl_{0.105/0.4}$, per i rispettivi fattori di amplificazione dello spettro di accelerazione (H_{SM} , H_{0408} , H_{0711} e H_{0515}).



Nodi per il calcolo della pericolosità di base utilizzati. Regione Emilia Romagna



SA1	$0.1 \leq T \leq 0.5$	0.952
SA2	$0.4 \leq T \leq 0.8$	1.442
SA3	$0.7 \leq T \leq 1.1$	1.542
SA4	$0.5 \leq T \leq 1.5$	1.523



SI1	$0.1 \leq T \leq 0.5$	1.062
SI2	$0.5 \leq T \leq 1.0$	1.561
SI3	$0.5 \leq T \leq 1.5$	1.518

$ASl_{0105}/0.4 \text{ RSL (cm/s}^2\text{)}$		332.13
H_{5M}	$0.1 \leq T \leq 0.5$	316.18
H_{0408}	$0.4 \leq T \leq 0.8$	478.87
H_{0711}	$0.7 \leq T \leq 1.1$	512.08
H_{0515}	$0.5 \leq T \leq 1.5$	505.93

Ferrara, 16 maggio 2025

Dott. geol. Mastellari Matteo

10. Bibliografia e norme di riferimento

- Eurocodice 8 - UNI ENV 1998-1-3 - Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture;
- O.P.C.M. 20.03.2003 n°3274 “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica” e O.P.C.M. 2.10.2003 n° 3316, “Modifiche ed integrazioni all’ n°3274 O.P.C.M. del 20.03.2003”;
- D.M. 14.01.2008 “Nuove norme tecniche per le costruzioni”;
- Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell’art. 16 c. 1, della L.R. 20/2000 per “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica”;
- Ordinanza del Commissario delegato per la ricostruzione n. 70 del 13 novembre 2012;
- Associazione Geotecnica Italiana: “Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche - 1977”;
- Associazione Geotecnica Italiana: “Raccomandazioni sull’esecuzione delle prove di laboratorio geotecnico – 1994”;
- Associazione Geotecnica Italiana: “Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica, Linee Guida – 2005”;
- Varie norme di prova ASTM, UNI, CNR, DIN e BS, richiamate nei relativi certificati di prova allegati;
- Régnier, J.1, Bonilla, L.F.2, Bertrand, E.1, Semblat, J.F. - Empirical Evidence Of Nonlinear Site Response At Several Kiknet Stations; 2011;
- Takaji Kokusho - Nonlinear site response and strain-dependent soil properties; 2004;
- Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E. - REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis;
- Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P. and Margaris, B. - Internet-Site for European Strong-Motion Data; European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme (2002);
- Kottke Albert R. & Rathier Ellen M. (2008) – Technical manual for Strata - PEER 2008/10.

11. CLAUSOLA "PRIVACY"

Ai sensi e per gli effetti della Legge 30.06.2003 n. 196 le parti dichiarano di essersi reciprocamente informate e di acconsentire che i dati personali raccolti siano oggetto di trattamento nell'archivio clienti/fornitori per gli adempimenti di natura civilistica e fiscale e per finalità gestionali, statistiche, commerciali e di marketing. Le parti, titolari dei rispettivi dati, dichiarano espressamente di essere a conoscenza del contenuto dell'art. 23 della Legge 196/03.