

RELAZIONE GEOLOGICA-SISMICA

AI SENSI DELLA DGR XI/2616 - D.M. 17 GENNAIO 2018

**INDAGINI GEOGNOSTICHE FINALIZZATE ALLA
RISPOSTA SISMICA LOCALE
SEDE MUNICIPALE
COMUNE DI GUIDIZZOLO
PROVINCIA DI MANTOVA**

COMMITTENTE: COMUNE DI GUIDIZZOLO

IL TECNICO: DOTT. GEOL. ROSARIO SPAGNOLO

IL PROGETTISTA GENERALE
Per presa visione



REV. 1

San Giorgio Bigarello, 09.02.2023

Dott. Geol. Rosario Spagnolo - GEOLOGIA TECNICA-IDROGEOLOGIA

Via Stradella,35 – San Giorgio Bigarello (MN) 46051 Tel.Fax. 0376.262759 – 338.2949637 – e-mail ro.spagnolo@tiscali.it

SOMMARIO

PREMESSA.....	0
1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	4
2 ANALISI HVSR.....	5
Cenni sulla metodologia HVSR	5
Acquisizione dei dati.....	6
Analisi ed elaborazione dei segnali acquisiti	6
.....	7
Descrizione dei risultati.....	9
3 INDAGINE SISMICA MASW.....	10
Cenni sulla metodologia MASW	10
Acquisizione dei dati.....	12
Analisi ed elaborazione dei segnali acquisiti	12
.....	14
4 PROFILO SISMOSTRATIGRAFICO.....	14
.....	16
5 STUDIO DI RISPOSTA SISMICA LOCALE	17
Inquadramento sismotettonico	17
Sismicità locale.....	18
Normativa sismica vigente.....	20
Azione sismica di progetto	21
Pericolosità Sismica del Sito (parametri di riferimento)	21
Studio di Risposta Sismica Locale	22
Dati di input	23
Processamento della RSL mediante software STRATA	27
1.1 - Output Analisi di Risposta Sismica Locale.....	33

PREMESSA

Su incarico dell'Amministrazione comunale, con determinazione n°311 del 06.06.2022, lo scrivente ha redatto una relazione geologica-sismica per accertare le caratteristiche degli orizzonti stratigrafici, finalizzata alla risposta sismica locale relativa alla sede municipale.

In data 14 Giugno 2022 è stata effettuata una prospezione geofisica finalizzata alla ricostruzione stratigrafica e sismica dei terreni, nell'ambito di uno Studio Geologico eseguito presso la sede municipale di Guidizzolo (MN), in Via Filzi.

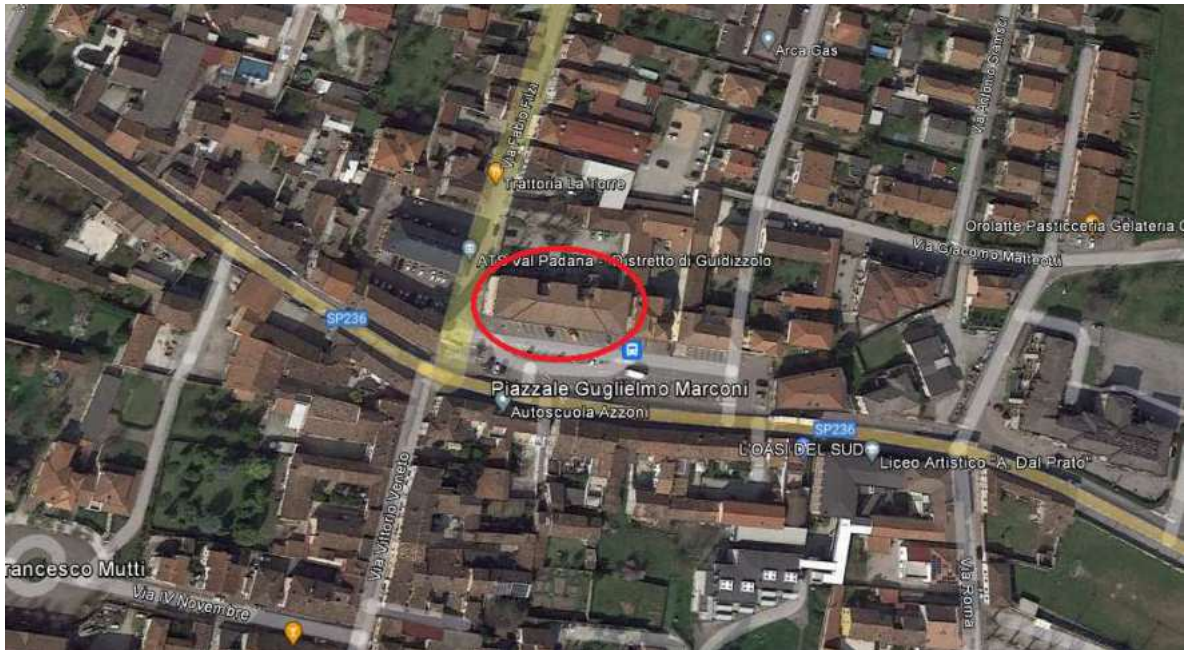
Le indagini in sito sono consistite nell'esecuzione di **n° 1 profilo di sismica multicanale** con acquisizione delle onde di superficie ed elaborazione dati **mediante metodologia MASW**, e **n° 1 indagine sismica passiva con metodo HVSr**.

Mediante tali metodologie è stato possibile ricostruire l'**andamento medio delle onde di taglio S** in profondità ed eseguire la valutazione del parametro **$V_{s,eq}$** di sito, al fine di classificare il terreno di fondazione secondo quanto previsto dal *D.M. 17/01/2018*, misurando eventualmente il periodo proprio di vibrazione di sito.

Il profilo sismostratigrafico è stato quindi utilizzato per l'**analisi di Risposta Sismica Locale**, richiesta dai progettisti incaricati, per la valutazione dell'**azione sismica** del sito indagato, secondo gli Stati Limite previsti dal *D.M. 17/01/2018*.

All'interno del presente lavoro verranno analizzate le caratteristiche geologiche-sismiche dell'area su cui insistono le fondazioni della sede municipale, valutata la compatibilità geologica dell'intervento con l'azzonamento di fattibilità geologica e con il rischio sismico.

L'area in oggetto del presente lavoro è situata nel comune di Guidizzolo ed è contraddistinta nel catasto con foglio 10 e mappale 143 e nella sezione E7a1 della Carta Tecnica Regionale.



Stralcio della tavola catastale



1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le indagini effettuate nell'area interessata sono state eseguite in ottemperanza a quanto previsto dalle seguenti normative:

- Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14 gennaio 2008 NTC 2008;
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - Istruzione per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008;
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Pericolosità sismica e criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale;
- Norma Tecnica UNI EN 1997 -1:2005 (Eurocodice 7 – Progettazione Geotecnica);
- Eurocodice 8 – Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici;
- Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17 gennaio 2018 NTC 2018;
- CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018;

- DM 30 aprile 2020 - DECRETO DEL MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI - Approvazione delle linee guida per l'individuazione, dal punto di vista strutturale, degli interventi di cui all'articolo 94-bis, comma 1, del d.P.R. 6 giugno 2001, n. 380, nonché delle varianti di carattere non sostanziale per le quali non occorre il preavviso di cui all'articolo 93;
- LR 20/2020;
- DGR 4317/2021 - Indirizzi per l'uniforme applicazione del decreto del ministro delle infrastrutture e dei trasporti 30 aprile 2020, "approvazione delle linee guida per l'individuazione, dal punto di vista strutturale, degli interventi di cui all'articolo 94 bis, comma 1, del decreto del presidente della repubblica 6 giugno 2001, n. 380, nonché delle varianti di carattere non sostanziale per le quali non occorre il preavviso di cui all'articolo 93".

2 ANALISI HVSR

Allo scopo di migliorare la definizione del profilo verticale V_s nelle porzioni più profonde e di calcolare la possibile frequenza di risonanza di sito, si è scelto di eseguire, in corrispondenza dello stendimento sismico MASW, una misurazione dei microtrempi sismici ambientali per la definizione e l'analisi del rapporto spettrale H/V.

CENNI SULLA METODOLOGIA HVSR

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è basata sulla misura dei rapporti medi fra le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali e verticale del rumore sismico ambientale. La prova a stazione singola consiste nella valutazione sperimentale dei rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali (H) e la componente verticale (V) delle vibrazioni ambientali sulla superficie del terreno misurati in un punto con un apposito sismometro a tre componenti. Il risultato di questa prova è una curva sperimentale, che rappresenta il valore del rapporto fra le ampiezze spettrali medie delle vibrazioni in funzione della frequenza di vibrazione. Le frequenze alla quali la curva H/V mostra dei massimi, sono legate alle frequenze di risonanza del terreno al di sotto del punto di misura. L'ampiezza di questi massimi è proporzionale (anche se non linearmente) all'entità del contrasto di impedenza sismica esistente alla base della copertura.

In particolare, in presenza di forti variazioni nel profilo di velocità delle onde *S* nel sottosuolo (legate per esempio alla transizione fra sedimenti soffici e basamento rigido), la funzione *H/V* mostra dei massimi marcati in corrispondenza della frequenza di risonanza *fr* relativa alla configurazione stratigrafica del sito (con *fr* circa uguale al rapporto fra la velocità media delle onde *S* fino alla profondità del salto di velocità e il quadruplo di questa profondità). Pertanto, questa prova ha lo scopo principale di mettere in luce la presenza di fenomeni di risonanza sismica e consentire una stima delle frequenze alle quali il moto del terreno può risultare amplificato a causa di questi fenomeni.

ACQUISIZIONE DEI DATI

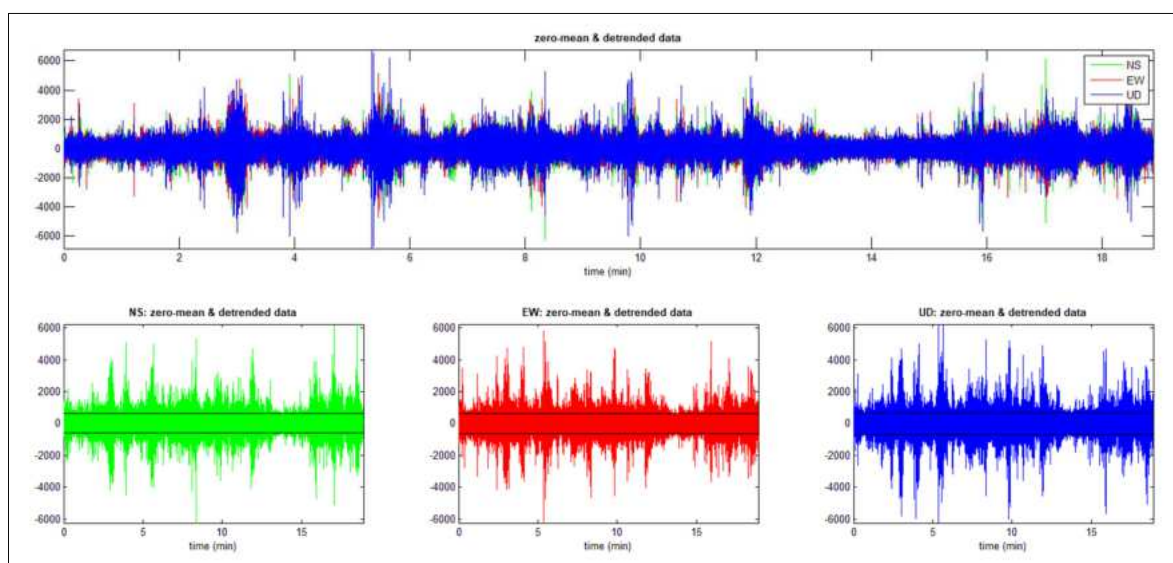
Nell'area d'indagine è stata eseguita, mediante stazione singola o tromometro, una misura di rumore sismico ambientale per un tempo di registrazione massimo di 20 minuti.

La strumentazione utilizzata si compone nello specifico di:

- un sistema di ricezione costituito da un tromometro CGE a 3 componenti geofoniche con frequenza propria di 2 Hz per acquisizioni del microtremore lungo la direzione verticale e le due direzioni orizzontali ortogonali.
- un sistema di acquisizione e memorizzazione costituito da un sismografo modulare in grado di registrare in modo digitale le forme d'onda generate (*Geode Geometrics Mod. 3-1000*); il sismografo A/D è in grado di campionare segnali tra 0.025 ms e 16 ms (campionamento eseguito a 4 ms). Il sistema di acquisizione è completato da un computer per l'analisi e la memorizzazione del segnale e appositi cavi di collegamento.

ANALISI ED ELABORAZIONE DEI SEGNALE ACQUISITI

I risultati delle analisi presentati in questo lavoro sono stati ottenuti con il software *winMASW* versione *Acd 7.2*, che permette di determinare i rapporti medi fra le componenti spettrali del rumore, misurate sul piano orizzontale e verticale. A questo scopo, l'acquisizione del rumore ambientale è stata suddivisa in una serie di finestre temporali di uguale durata (finestre di 20 ms), per ciascuna delle quali è stato determinato lo spettro del moto.



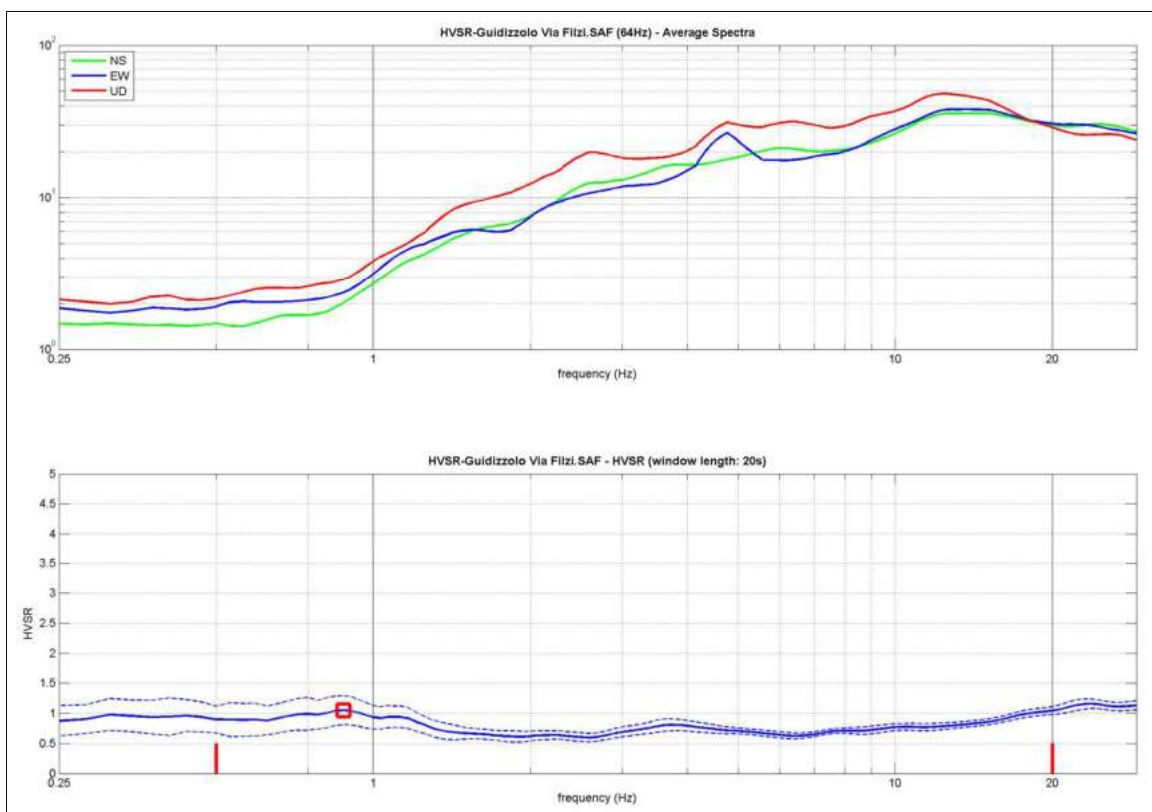
Visualizzazione dei dati dopo la rimozione di eventi transienti

La determinazione della curva HVSR ha previsto in sintesi i seguenti steps:

- 1) Eliminazione manuale da parte dell'utente delle parti di segnale costituite dal disturbo arrecato da eventi non conformi al rumore ambientale (transienti). Questa operazione produce una diminuzione della lunghezza del segnale analizzato (vedi figura precedente).
- 2) Definizione della lunghezza degli intervalli entro cui calcolare le curve HVSR (20 ms).
- 3) Calcolo delle trasformate di Fourier delle tre componenti x, y, z del moto.
- 4) Operazione di smoothing degli spettri di Fourier.
- 5) Somma delle due componenti orizzontali x e y.
- 6) Calcolo delle curve HVSR come rapporto spettrale tra la componente orizzontale H e la componente verticale V negli N intervalli temporali stazionari.
- 7) Calcolo della curva HVSR media tra le n curve HVSR.

I risultati parziali ottenuti, durante le fasi di elaborazione delle curve H/V, sono stati iterativamente controllati andando a valutare la direttività e la stabilità nel tempo della curva HVSR.





Visualizzazione HVSr e spettro medio di ampiezza del sito indagato.

La curva HVSr calcolata, indica un picco principale a circa 0,9 Hz; la sua validità viene verificata, mediante software *winMASW*, secondo i criteri di ammissibilità del progetto *SESAME* (che definiscono la robustezza statistica della curva HVSr e degli eventuali picchi presenti).

Criteria for a reliable H/V curve (Criteri per una curva affidabile)

- #1. $[f_0 > 10/Lw]$: $0.876 > 0.5$ (OK)
 - #2. $[nc > 200]$: $1366 > 200$ (OK)
 - #3. $[f_0 > 0.5\text{Hz}; \sigma_A(f) < 2 \text{ for } 0.5f_0 < f < 2f_0]$ (OK)
-

Criteria for a clear H/V peak (Criteri per un picco H/V chiaro)

- #1. [exists f- in the range $[f_0/4, f_0]$ | $AH/V(f-) < A_0/2$]: (NO)
- #2. [exists f+ in the range $[f_0, 4f_0]$ | $AH/V(f+) < A_0/2$]: yes (considering standard deviations), at frequency Hz (OK)
- #3. [$A_0 > 2$]: $1.1 < 2$ (NO)
- #4. [$f_{peak}[Ah/v(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$]: (NO)
- #5. [$\sigma_{maf} < \epsilon(f_0)$]: $6.687 > 0.131$ (NO)
- #6. [$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$]: $0.240 < 2$ (OK)

DESCRIZIONE DEI RISULTATI

Il picco a 0,9 Hz con ampiezza pari a 1,1 rispetta tutti i criteri *SESAME* per una curva affidabile; tuttavia, non è rispettata la condizione che prevede la verifica di un minimo di 5 criteri su 6 per un picco chiaro, nonostante siano stati modificati, in diverso modo, i parametri di elaborazione affinché essi fossero tutti verificati.

Dall'analisi della curva HVSR, eseguita tra 0,5 Hz e 20 Hz (frequenze di interesse ingegneristico) è quindi risultata una possibile frequenza principale di risonanza attorno a 0,9 Hz.

Questa non può essere definita come certamente significativa ai fini dell'individuazione di una possibile frequenza di risonanza di sito.

In generale, l'assenza di un picco di frequenza significativo è correlabile alla mancanza di forti contrasti di impedenza sismica a profondità di interesse sismostratigrafico, all'interno della sequenza deposizionale indagata e/o all'aumento graduale, con la profondità, delle caratteristiche di addensamento dei terreni stessi.

Alla luce dei risultati ottenuti si è pertanto opportunamente scelto di non modellare la curva HVSR per trarre informazioni di tipo sismostratigrafico desunte invece dall'analisi MASW di seguito riportata.

3 INDAGINE SISMICA MASW

CENNI SULLA METODOLOGIA MASW

Con una prospezione sismica *MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves)* si analizza il fenomeno della dispersione che le onde di superficie subiscono in un mezzo stratificato. La velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda (λ), quindi frequenza è, infatti, influenzata dalle proprietà che il sottosuolo attraversato possiede ed è detta *velocità di fase*.

Le *MASW* attive sono realizzate tramite analisi delle onde di Rayleigh o di Love oppure, congiuntamente Rayleigh + Love. Queste rappresentano le onde di superficie prodotte dall'iterazione delle onde di corpo (P e S) con una superficie di discontinuità fisica. Le onde di Rayleigh, e più precisamente le loro componenti verticali, vengono registrate tramite i comuni geofoni verticali a bassa frequenza e generate da una sorgente ad impatto verticale, la classica martellata. Le onde di Love invece vengono acquisite mediante geofoni a componente orizzontale e generate applicando una sorgente di taglio al terreno, questo perché le loro componenti si muovono solamente sul piano orizzontale, con oscillazione perpendicolare rispetto alla direzione di propagazione dell'onda. Durante l'indagine in oggetto lungo lo stendimento sismico sono state registrate per motivi operativi solo le componenti verticali delle onde di Rayleigh.

Il principio della tecnica MASW prevede che, poiché la dispersione delle onde di superficie dipende dalle caratteristiche del sottosuolo e dalle sue variazioni verticali, dalla determinazione delle curve di dispersione del segnale è possibile ricavare le caratteristiche fondamentali del mezzo quali ad esempio la velocità delle onde di taglio V_s e lo spessore degli strati. La velocità delle onde di Rayleigh (V_R) infatti è correlabile alla V_s , essendo pari a circa il 90% della velocità delle onde di taglio. L'analisi del fenomeno della dispersione, che avviene attraverso la *curva di dispersione*, permette quindi di determinare le caratteristiche del sottosuolo. La curva di dispersione del *dataset* è ottenuta mediante il passaggio dal dominio *spazio-tempo* (sismogramma) al dominio *velocità di fase/frequenza* (spettro di velocità) effettuato mediante specifica operazione con software dedicato.

Tenuto conto di quanto richiesto per l'applicazione della normativa relativa alla progettazione geotecnica, si ritiene che la metodologia di analisi MASW, risulti idonea alla definizione dei dati richiesti. Tale scelta risulta avvalorata dalle seguenti considerazioni:

1. La percentuale di energia convertita in onde Rayleigh o di Love è di gran lunga predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione e propagazione delle onde P (7%) ed S (26%).
2. La propagazione e dispersione delle onde di Rayleigh o di Love si verifica senza problemi anche in caso di inversioni di velocità. Rispetto alla sismica a rifrazione, infatti, il metodo MASW non presenta problemi legati alla presenza di strati soffici compresi tra strati più rigidi.
3. La propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla V_p e dalla densità, è funzione innanzitutto della V_s , parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito (categoria di suolo in base al Testo Unico).

ACQUISIZIONE DEI DATI

L'ubicazione e la lunghezza dello stendimento sono state scelte in funzione della logistica dei luoghi e dell'ingombro delle strutture esistenti. L'allineamento sismico per l'acquisizione delle onde di Rayleigh ha previsto una distanza tra i geofoni pari a 1,0 m ed una serie di scoppi esterni e coniugati rispetto all'ultimo geofono con offset variabili (2-4-6-8-10-12 m) a diversa intensità di energizzazione.

L'acquisizione della componente verticale delle onde di Rayleigh è avvenuta mediante registrazione della propagazione del segnale sismico generato da una sorgente ad impatto verticale (martellata), tramite uno stendimento sismico di 24 geofoni a componente verticale.

La strumentazione utilizzata si compone nello specifico di:

- una sorgente meccanica in grado di generare onde elastiche direzionali e ricche di energia realizzata mediante la battuta verticale e orizzontale di una mazza battente di 10 kg su piastra;
- un sistema di ricezione costituito alternativamente da uno stendimento di 24 geofoni (onde di Rayleigh) a movimento verticale (*Geospace GS11D*) a frequenza di 4,5 Hz e tripodi in alluminio, collegati mediante un cavo multielettrodo;
- un sistema di acquisizione e memorizzazione costituito da un sismografo modulare in grado di registrare in modo digitale le forme d'onda generate (*Geode Geometrics Mod. 3-1000*); il sismografo A/D è in grado di campionare segnali tra 0.025 ms e 16 ms. Il sistema di acquisizione è completato da dispositivo di *trigger*, computer per l'analisi e la memorizzazione del segnale e appositi cavi di collegamento.

ANALISI ED ELABORAZIONE DEI SEGNALE ACQUISITI

Determinazione degli spettri di velocità ed individuazione delle curve di dispersione

La stima dell'andamento in profondità delle velocità V_s , mediante acquisizione sismica multicanale è ottenuta tramite l'analisi del segnale nel dominio frequenza/velocità di fase.

Viene utilizzato lo spettro di velocità in quanto è il dominio dove è chiaramente più immediato e naturale comprendere le proprietà dispersive del mezzo attraversato, determinando con precisione la velocità di ciascuna componente del segnale registrato.

Dopo aver scelto quindi il sismogramma più idoneo, quello solitamente con il miglior rapporto *segnale/rumore*, si esegue una trasformata dal dominio *spazio/tempo* al dominio *frequenza/velocità* (**Fig. 4**).

Particolare attenzione nell'interpretazione delle curve di dispersione è posta in considerazione del fatto che le vibrazioni indotte dalle onde di superficie sono correlabili a diversi *modi*, che possono sovrapporsi all'interno dello spettro di velocità. Se tale sovrapposizione avviene, come in questo caso, può generarsi una curva di dispersione apparente, che può risultare fuorviante in fase di interpretazione. Al fine di individuare i modi correlabili alla reale successione stratigrafica è stato scelto di eseguire ed analizzare più scoppi sismici ad Offset minimi variabili. Tutte le curve di dispersione sono state quindi visionate prima di procedere al processing del dataset prescelto (*file6.dat*).

I modi superiori, se correttamente riconosciuti, come in questo caso, concorrono ad elaborare un modello maggiormente vincolato e preciso.

Nel caso in esame, sono stati individuati il “*modo fondamentale, e porzioni del primo modo superiore*”, utilizzati per la successiva modellazione della curva di dispersione.

Si riassumono di seguito i dati relativi ai parametri di acquisizione del dataset prescelto, utilizzato per la successiva elaborazione:

ONDE DI RAYLEIGH
Dati relativi allo shot 3 – File6R2.sgy
offset minimo: 8 m
distanza intergeofonica: 1,0 m
Intervallo di campionamento: 0,25 ms
Tempo di acquisizione: 1 s

Procedure di modellazione diretta della curva di dispersione

Analizzato il sismogramma e il rispettivo spettro di velocità si è proceduto alla ricostruzione della distribuzione verticale delle Vs. Partendo dalla curva di dispersione delle onde di Rayleigh è stato ricostruito il modello che è responsabile di quella curva, effettuando quindi un'inversione, vale a dire che si è ricavato il modello di sottosuolo che ha determinato il dato di campagna.

Lo spettro di velocità di fase è stato interpretato identificando le curve modali, mediante modellazione diretta, studiando l'andamento dei vari modi in funzione del modello atteso (**Fig. 4**). Questo è stato iterativamente modificato fino ad ottenere una buona sovrapposizione degli andamenti delle curve di dispersione sui vari modi riconosciuti.

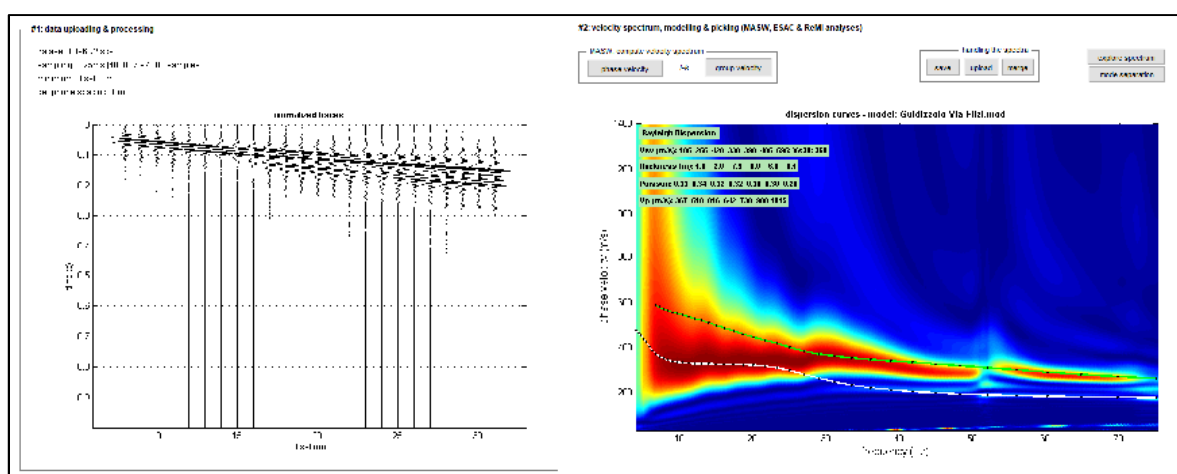


Fig. 1 - Visualizzazione del sismogramma acquisito (sx) e modellazione diretta dello spettro di velocità di fase delle onde di Rayleigh mediante individuazione del modo fondamentale e di porzioni dei modi superiori che compongono lo spettro (dx).

4 PROFILO SISMOSTRATIGRAFICO

Per l'elaborazione e l'interpretazione dei dati, si è tenuto conto delle evidenze del segnale acquisito e delle conoscenze litostratigrafiche e dell'assetto geologico del territorio in cui ricade l'area oggetto di studio. Nella seguente tabella sono riportati i valori delle velocità medie e gli spessori di ciascun sismostrato, in modo da definire un **modello geofisico medio**, ottenuto mediante analisi delle onde di superficie con metodologia MASW in onde di Rayleigh.

Si riportano anche, in maniera indicativa, le stime dei valori della densità e del modulo di Poisson eseguite contestualmente all'elaborazione e mediante correlazioni di letteratura. Poiché la dispersione delle onde di superficie dipende essenzialmente dalla Vs e degli spessori degli strati, tali valori devono essere considerati solamente come stime largamente approssimative. Viene riportato, inoltre, il valore del modulo di taglio che non dipende da Vp, ma solamente da Vs e densità e quindi la sua stima risulta più attendibile.

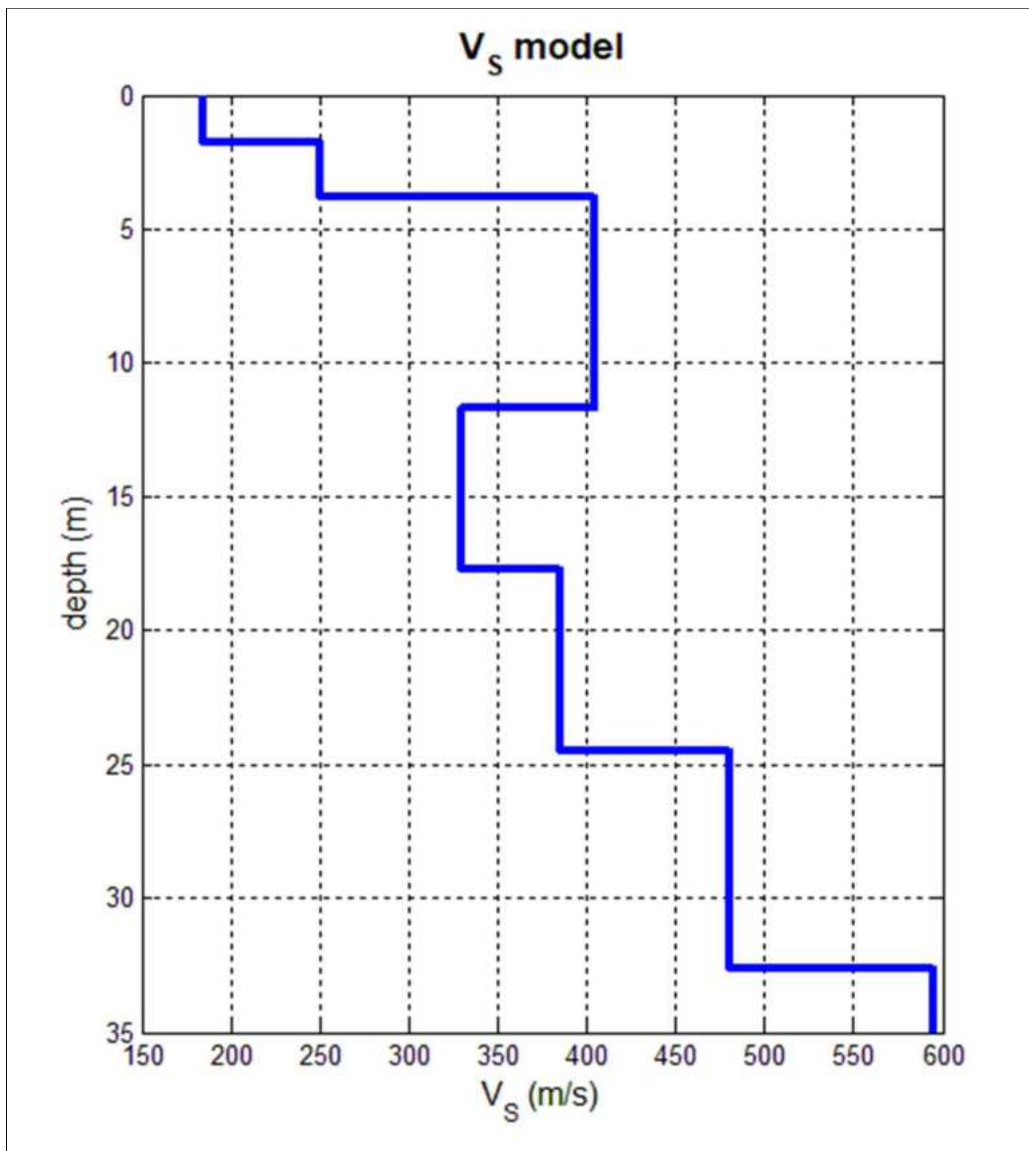
MODELLO GEOFISICO MEDIO – Via Filzi - Guidizzolo (MN)						
Sismostrato	Vs (m/s)	Spessore (m)	Profondità da p.c. (m)	Stima densità (g/cm³)	Modulo di Poisson	Modulo di Taglio (MPa)
1	185	1,8	-1,8	1,81	0,33	62
2	250	2,0	-3,8	1,89	0,34	118
3	405	7,9	-11,7	2,00	0,32	327
4	330	6,0	-17,7	1,95	0,32	212
5	385	6,8	-24,5	1,97	0,30	293
6	480	8,1	-32,6	2,03	0,30	467
7	595	2,4	-35,0	2,06	0,26	731

Il valore del modulo dinamico di taglio, dipendente da Vs e densità, si riferisce a condizioni di bassa deformazione. Per deformazioni significativamente superiori, come di norma nei calcoli geotecnici, i valori dovranno essere idoneamente corretti e utilizzati solo nei modi e nei casi appropriati.

D.M. 17/01/2018	Profondità del bedrock sismico	Vs,eq (m/s)	Categoria di sottosuolo	Valore di Vs,eq calcolato mediante l'espressione 3.2.1 del D.M. 17/01/2018 $V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$
Calcolo a partire dal ripiano di esecuzione MASW (p.c.)	Oltre 30 m dal p.c.	355	C	Categoria di sottosuolo assegnata in base a quanto indicato nella Tabella 3.2 II

Si sottolinea come la Categoria di Sottosuolo di Progetto, stimata in base a quanto previsto dal D.M. 17/01/2018, deve essere definita dal Geologo o dal progettista anche in funzione dei dati progettuali.

Si riporta inoltre la stratigrafia schematica del modello medio fino a -35,0 m dal p.c., ottenuto mediante analisi MASW, utilizzato per il calcolo del parametro $V_{s,eq}$ (**Fig. 5**).



Profilo sismostratigrafico

In base ai dati sismostratigrafici ottenuti, si rileva inizialmente, fino ad una profondità di circa -1,8 m dal p.c., una velocità delle onde di taglio (onde S) pari a 185 m/s, caratteristica di terreni superficiali nel complesso scarsamente addensati.

Da -1,8 a -3,8 m dal p.c., si rilevano valori di velocità delle onde S pari a 250 m/s, correlabili a terreni nel complesso moderatamente addensati, afferenti alla porzione superficiale della sequenza alluvionale/fluvioglaciale caratteristica del territorio in cui ricade l'area in esame.

A partire da -3,8 m, e fino ad almeno -32,6 m dal p.c., si riscontrano velocità delle onde S comprese tra 330 e 480 m/s, correlabili a depositi da addensati a molto addensati, afferenti alla medesima sequenza deposizionale indagata.

Inversioni dei valori di velocità, come quella riscontrata da -11,7 a -17,7 m (V_s pari a 330 m/s), sono imputabili a diminuzioni locali dello stato di addensamento della suddetta unità alluvionale/fluvioglaciale o alla presenza di uno o più livelli di natura più limoso-argillosa.

Oltre -32,6 m dal p.c. si individuano valori di velocità delle onde S pari a 595 m/s, per cui si ipotizza la presenza di orizzonti particolarmente addensati appartenenti alla medesima sequenza deposizionale, ma non rappresentanti il bedrock sismico della successione indagata ($V_s < 800$ m/s).

Il profilo sismostratigrafico ottenuto risulta correlabile con il quadro geologico dell'area oggetto di indagine e i valori di velocità delle onde S nei primi metri risultano compatibili con le caratteristiche litologiche delle unità geologiche previste per il sottosuolo del territorio in cui ricade il sito in esame.

5 STUDIO DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

L'analisi di Risposta Sismica Locale viene eseguita nell'ambito di uno Studio Geologico redatto in Via Filzi, nel comune di Guidizzolo (MN), utilizzando un approccio numerico con utilizzo di accelerogrammi naturali e tramite l'utilizzo di codice di calcolo monodimensionale.

Mediante tali metodologie è stato possibile valutare quantitativamente l'**azione sismica** sul sito indagato secondo lo Stato Limite di Operatività (**SLO**), Stato Limite di Danno (**SLD**), Stato Limite di salvaguardia della Vita (**SLV**) e Stato Limite di Prevenzione del Collasso (**SLC**).

INQUADRAMENTO SISMOTETTONICO

Il territorio in esame si inserisce nelle ampie strutture regionali della pianura in cui affiorano solo depositi di origine fluviale che, in questa zona, sono caratterizzati da condizioni di giacitura uniformi. Tuttavia, al di sotto dei depositi continentali (che presentano spessori di centinaia di metri), si sviluppa un basamento di origine marina per il quale le prospezioni geofisiche, eseguite nei decenni scorsi a scopo di ricerca petrolifera, hanno permesso di

rilevare una situazione strutturale complessa e non priva di significato neotettonico. In linea generale, l'evoluzione geologica del substrato della Pianura Padana deriva dalla convergenza della placca Africana e di quella Europea. Fino dal tardo Cretacico, la Pianura Padana ha rappresentato la parte frontale di due catene di opposta convergenza, l'Appennino settentrionale (N-vergente) e le Alpi meridionali (S-vergenti). Studi sulla base della sequenza plio-quadernaria nella porzione centrale e meridionale della Pianura Padana mostrano lo sviluppo di tre grandi archi costituiti da thrust ciechi N-vergenti che costituiscono il fronte più avanzato della struttura appenninica settentrionale (l'Arco del Monferrato, l'Arco Emiliano e l'Arco Ferrarese-Romagnolo). Nella porzione centro-settentrionale della pianura, invece, il fronte esterno della catena Sud-Alpina si presenta come una serie di thrust embriciati sviluppati nella monoclinale pede-alpina immergente verso S. L'aspetto finale della Pianura Padana si è raggiunto attraverso il riempimento definitivo cominciato nel Pliocene (con depositi dapprima marini e poi continentali) dei bacini di piggyback (bacini sedimentari di tipo sin-orogetici modellati sulle avansfesse padane).

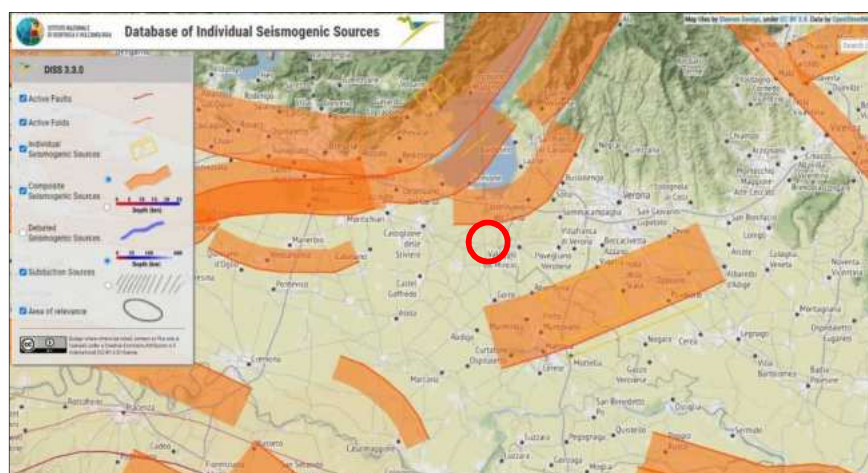
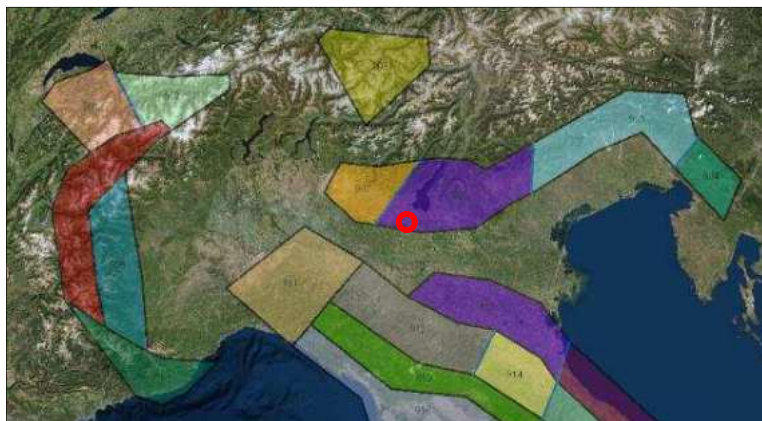


Fig. 2 - Stralcio del Database cartografico delle sorgenti sismogenetiche della regione prealpina e pedemontana gardesana (fonte – DISS.3 by INGV), con ubicazione dell'area di interesse.

SISMICITÀ LOCALE

L'attività sismica storica del territorio bresciano rappresenta la naturale continuazione di quella pliocenica e quadernaria e risulta correlata alla collocazione, dell'area di studio, tra zone sismogenetiche riferibili, da una parte al fronte alpino e dall'altra al fronte appenninico, sepolti al di sotto della coltre fluvioglaciale-alluvionale della Pianura Padana. Alcuni sismi recenti, con

le massime intensità storiche, si sono risentiti, per la relativa vicinanza con l'area sismogenetica del Reggiano-Ferrarese-Parmense e dell'edificio appenninico sepolto al di sotto delle coltri quaternarie dei depositi di pianura.

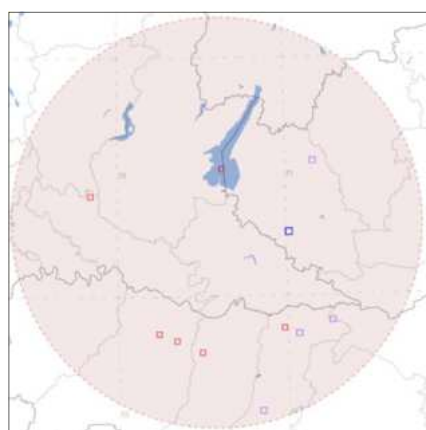


Gli eventi sismici storici sono consultabili nel Catalogo Parametrico dei Terremoti (C.P.T.I.15 versione 4.0 – progetto INGV anno 2022) e sono assegnati mediante l'individuazione della “Zonazione sismogenetica ZS9

(Fig. 7) – App. 2 al Rapporto Conclusivo – Marzo 2004” a cura di C. Meletti e G. Valensise (Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica – O.P.C.M. 3274/2003 - INGV). Schema Zonazione Sismogenetica ZS9

(tratta dal Geoportale del Ministero dell'Ambiente).

L'area in esame, secondo il modello sismotettonico riassunto nella zonazione sismogenetica ZS9, ricade nella zona sorgente 906. Per tale zona sorgente e per quelle limitrofe, si elencano i terremoti, con epicentro collocabile in un'area circolare di raggio pari a circa 100 km e centro in corrispondenza del **Comune di Guidizzolo**:

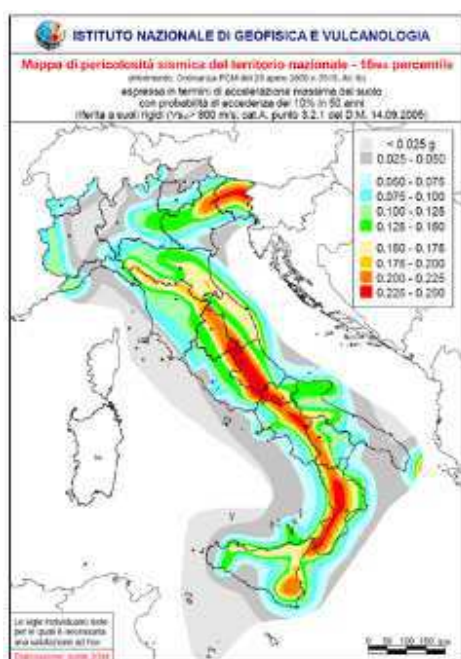


Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDF	Io	Mw
1117	01	03	15	15		Veronese	55	9	6.52
1222	12	25	12	30		Bresciano-Veronese	18	7-8	5.68
1438	06	11	02			Parmense	4	8	5.56
1802	05	12	09	30		Valle dell'Oglio	94	8	5.60
1832	03	13	03	30		Reggiano	97	7-8	5.51
1891	06	07	01	06	14	Valle d'Illasi	403	8-9	5.87
1971	07	15	01	33	23	Parmense	228	8	5.51
2012	05	29	10	55	56	Pianura emiliana			5.50

Fig. 1 - Catalogo multiparametrico dei terremoti italiani con magnitudo (M_w) > 5,0 verificatisi in un'area di raggio pari a 100 km dall'area d'indagine. (C.P.T.I.15 versione 4.0 – progetto INGV anno 2022).

NORMATIVA SISMICA VIGENTE

Con il Testo Unico (D.M. 14/01/08), entrato in vigore con la L.77/2009 di conversione del D.L. 39/2009 (Decreto “Abruzzo”), è divenuto vigente l’obbligo di eseguire la progettazione in prospettiva sismica in tutte le aree classificate in zona sismica. In particolare, con l’Allegato A



sono state adottate definitivamente le stime di pericolosità sismica del progetto S1 già comprese nella citata Ordinanza 3519/2006 (**Fig. 9**). Accedendo al link <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>, si possono scaricare i dati di pericolosità sismica rappresentati dai valori di a_g per diverse frequenze annuali di superamento, relativamente ai 10751 punti di una griglia in cui è stato diviso il territorio nazionale. Per qualsiasi punto del territorio Italiano è quindi possibile calcolare i parametri di azione sismica grazie a formule di interpolazione definite nella Circolare esplicativa 617/09. Tali stime superano il concetto di classificazione a scala comunale sulla base di 4 zone

sismiche. Il concetto di zona sismica comunale tuttavia mantiene una funzione prevalentemente amministrativa così come chiarito, dalla D.G.R. Lombardia 9/2616/2011 e come regolamentato dalle normative regionali in termini di nuova classificazione sismica (D.G.R. 11 Luglio 2014 – n. X/2129) e di normative di indirizzo per la vigilanza sulle costruzioni in zona sismica (L.R. 33/2015, e D.G.R. 5001/2016).

Fig. 3 - Mappa di pericolosità sismica secondo l'O.P.C.M. n. 3519 del 28/4/2006.

La redazione della “Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale” (espressa come accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni) allegata all'O.P.C.M. n. 3519/2006 indica che il **Comune di Guidizzolo** risulta interessato da una fascia con accelerazione sismica **a_g compresa tra 0,125g e 0,150g** (con probabilità di superamento del 10% in 50 anni) riferibile quindi a una Zona sismica 3. La D.G.R. 11 Luglio 2014 – n. X/2129 che ha aggiornato le zone sismiche in Regione Lombardia, ha lasciato tutto il territorio di Guidizzolo in **Zona sismica 3**, indicando un valore di a_{gmax} pari a 0,144 g.

AZIONE SISMICA DI PROGETTO

Date le richieste pervenute dalla committenza, in merito alle verifiche sismiche di progetto, e vista la rilevanza dell'opera in esame, si procede a definire l'azione sismica di progetto attraverso **Risposta Sismica Locale** (RSL), come da specifiche analisi indicate nel par. 7.11.3 del D.M. 17/01/2018.

Per la struttura di progetto considerata (ricadente in classe IV), partendo dalla valutazione dei parametri progettuali forniti dai Tecnici Progettisti dell'opera, si definiscono gli Spettri di Risposta Elastici di progetto eseguendo una modellazione numerica sito-specifica, al fine di aumentare il grado di accuratezza nella previsione del moto sismico e fornire quindi specifici parametri sismici dipendenti.

Si procede quindi escludendo l'approccio mediante metodi semplificati previsti dal D.M. 17/01/18 stesso, che prevede l'assegnazione di una Categoria di Sottosuolo e l'utilizzo di spettri di risposta elastici standard.

Mediante il foglio elettronico Excel "Spettri-NTC (ver. 1.0.3)" è stato possibile individuare i parametri di pericolosità sismica del sito per la strategia di progettazione, sulla base dei risultati del progetto S1 – INGV.

Rimane inteso che per quanto concerne le caratteristiche geomorfologiche facendo riferimento alla tabella 3.2.III del D.M. 17/01/2018 e analizzando la cartografia dell'area di studio a scale da 1:2.000 a 1:5.000, si ritiene che il sito di progetto sia inserito in un contesto caratterizzato da una morfologia nel complesso sub-pianeggiante, con inclinazione media < 15°. Si potrà dunque tenere conto di una **categoria topografica T1**, alla quale, secondo quanto riportato nella sopracitata *Tabella 3.2.III*, corrisponde un coefficiente topografico **S_T pari a 1,0**.

PERICOLOSITÀ SISMICA DEL SITO (PARAMETRI DI RIFERIMENTO)

Attraverso il programma Spettri-NTC ver.1.0.3, partendo dall'identificazione geografica del punto mediano del sito di progetto (**Longitudine: 10,582385 – Latitudine: 45,318953**), sono stati stimati, per varie frequenze annuali di superamento, i valori dei parametri sismici normativi (a_g , F_0 e T_c^*) relativi alla Pericolosità Sismica di base.

Per l'analisi dell'azione sismica di progetto sono stati utilizzati i parametri di seguito riassunti. In funzione delle scelte progettuali adottate è stata considerata un'opera di **Classe d'Uso IV** con vita utile 50 anni.

Classe d'uso dell'edificio	IV			
Vita Nominale della costruzione (in anni) - V_N	50			
Coefficiente d'uso della costruzione - C_U	2			
Periodo di Riferimento per la costruzione (in anni) T_R	SLO 60	SLD 101	SLV 949	SLC 1950

Parametri di input per la determinazione dell'azione di progetto.

Vengono di seguito riportati i valori dei parametri sismici normativi (a_g , F_0 e T_c^*) relativi alla pericolosità sismica, calcolati secondo la strategia di progettazione ordinaria.

STATO LIMITE	T_R (anni)	a_g (g)	F_0 (-)	T_c^* (s)
SLO	60	0,053	2,508	0,257
SLD	101	0,069	2,511	0,262
SLV	949	0,178	2,463	0,279
SLC	1950	0,232	2,421	0,287

STUDIO DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Le Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17/01/2018 riportano al punto 3.2.2., che ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, come indicato nel par. 7.11.3..

Alternativamente quindi ad un approccio semplificato, basato sull'individuazione della categoria di sottosuolo del sito di progetto, le specifiche analisi di Risposta Sismica Locale sono fortemente raccomandate per determinati sistemi geotecnici, se si vuole aumentare il grado di accuratezza nella previsione del moto sismico o per strutture di progetto rilevanti e/o strategiche (ricadenti in classe III o IV), come in questo caso specifico.

Si ritiene pertanto opportuno eseguire una specifica modellazione numerica, definendo l'azione sismica attraverso la Risposta Sismica Locale (RSL).

Le analisi di risposta sismica locale consistono nell'utilizzo di procedure di calcolo in cui viene simulata la propagazione dell'input sismico all'interno dei depositi di copertura esistenti tra il piano campagna e il substrato sismico rigido, definito bedrock. L'analisi svolta nel presente elaborato segue l'iter procedurale convenzionale ai casi in cui si tiene conto di ipotesi di propagazione monodimensionale delle onde di taglio *S*, attraverso un profilo di terreno a stratigrafia piano parallela.

DATI DI INPUT

Come input per l'analisi di risposta sismica locale sono stati utilizzati n°7 accelerogrammi registrati su sottosuolo rigido e compatibili con le forme spettrali di riferimento per gli stati limite considerati, selezionati dall'archivio italiano *Italian ACcelerometric Archive* (ITACA 3.2), accessibile ed analizzato tramite codice *REXWeb*, che ha permesso la ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali spettro-compatibili con il sito di interesse.

Il database ITACA3.2 contiene più di 54.900 forme d'onda, relative a 2.270 eventi sismici di magnitudo superiore o uguale a 3.0, verificatisi nel periodo 1972-2021 e registrati da circa 1.500 stazioni sismologiche.

Il codice *REXWeb* permette di assolvere a due funzioni principali:

- a) consultare la suddetta banca dati relativa a registrazioni accelerometriche reali su tutto il territorio italiano;
- b) selezionare automaticamente gruppi di accelerogrammi spettrocompatibili da utilizzare appunto come input per studi di RSL.

Ai fini dell'analisi della risposta locale gli accelerogrammi sono stati scalati alla PGA di riferimento del sito, per ogni stato limite prescelto (SLO, SLD, SLV, SLC), attraverso una procedura che valuta la similarità tra una forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nella banca dati prescelta.

A tal proposito, si specifica che per SLO, SLD e SLC sono stati utilizzati, come consentito dalle norme procedurali, i medesimi accelerogrammi utilizzati per lo SLV (**Fig. 10**), utilizzando di conseguenza un fattore di scala diverso, necessariamente adattato alle PGA relative a tali stati limite.

Resta inteso che risulta piuttosto improbabile pervenire ad una combinazione di 7 accelerogrammi esattamente corrispondenti al target richiesto. In funzione anche delle caratteristiche sismogenetiche del sito di interesse quindi, la scelta del set di accelerogrammi di input è stata affrontata, come previsto da procedura, considerando la sovrapponibilità della media degli accelerogrammi input rispetto allo spettro “target” di riferimento del sito.

Si riporta quindi di seguito la sintesi grafica degli spettri relativi al set di accelerogrammi scelto come input per le procedure di Risposta Sismica Locale, di seguito affrontate.

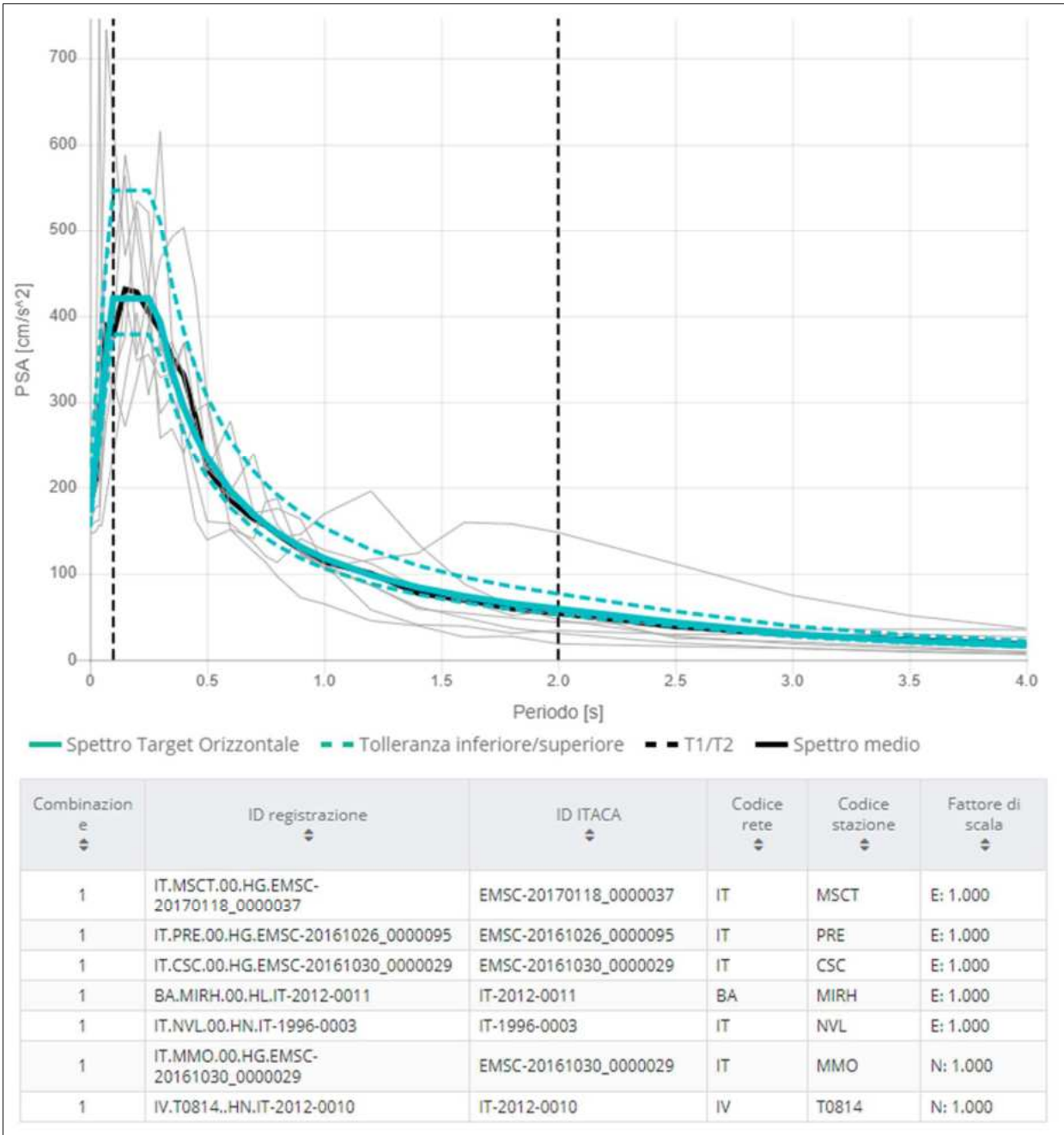


Fig. 4 - Confronto tra gli spettri di accelerazione selezionati allo SLV e relativa media (in nero), con lo spettro di riferimento (in azzurro, linea continua), e indicazione della tolleranza massima e minima (in azzurro, linee tratteggiate), considerata nella ricerca.

Si riportano inoltre di seguito i 7 accelerogrammi spettrocompatibili utilizzati nelle analisi, riferiti allo SLV (**Fig. 11**) estratti secondo i criteri di normativa mediante REXeLite.

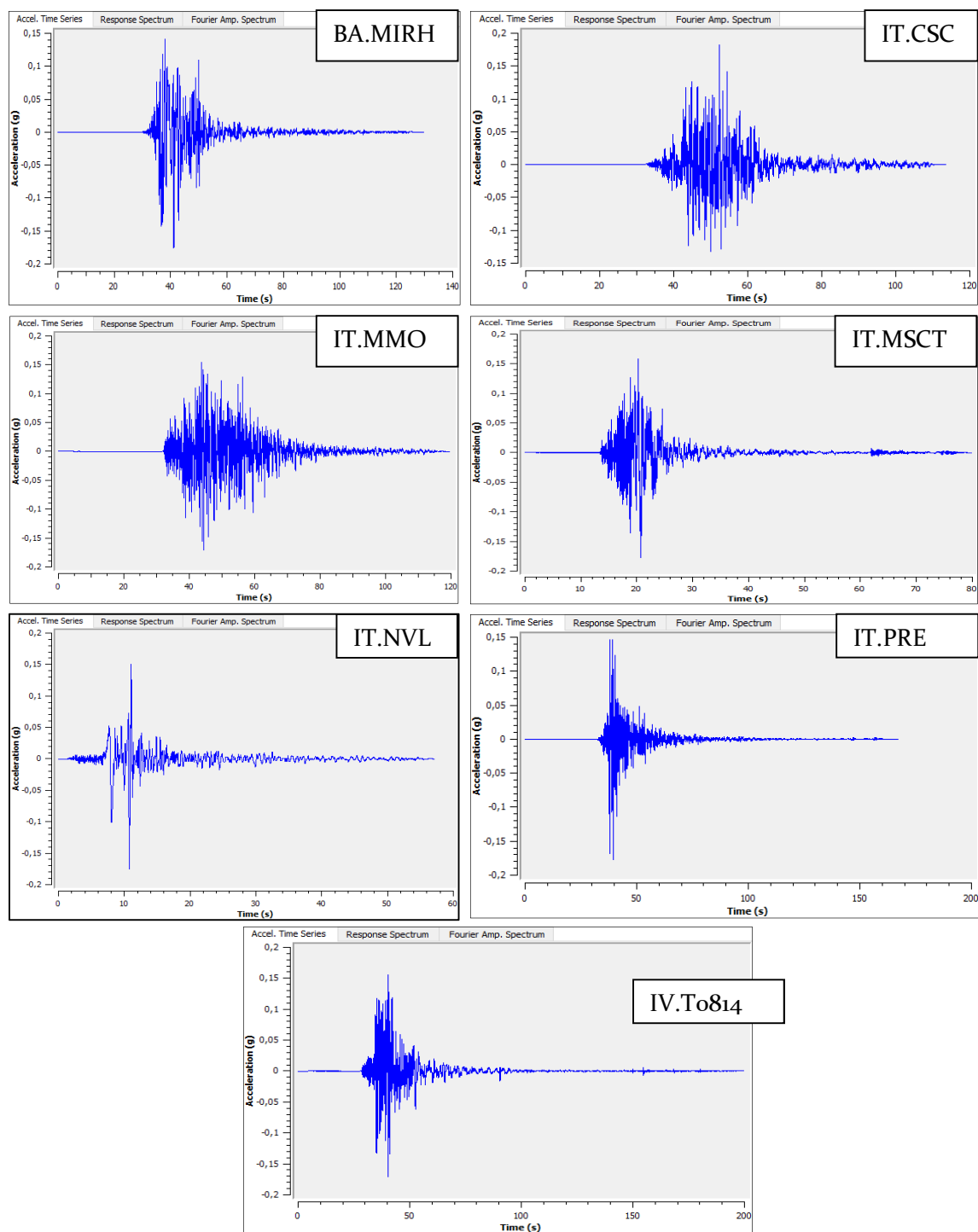


Fig. 5 - Accelerogrammi scaricati tramite REXEweb (ITACA 3.2), riferiti ai parametri di ricerca selezionati per il sito di progetto allo SLV.

PROCESSAMENTO DELLA RSL MEDIANTE SOFTWARE STRATA

Le analisi numeriche di risposta sismica locale sono state effettuate utilizzando il software Strata (Kottke & Rathje, 2008), che si basa sul codice di calcolo SHAKE, in grado di modellare la propagazione unidimensionale delle onde di taglio in un mezzo a stratificazione orizzontale.

Si tratta di un modello monodimensionale applicabile al sito in esame, in cui le modalità principali di amplificazione del moto sismico sono riconducibili al fenomeno di intrappolamento di onde di taglio *S* all'interno dei depositi di copertura, favorito dal contrasto di impedenza fra terreno e substrato rigido e la risonanza, determinata tra le frequenze del moto al substrato e quelle naturali di vibrazione del deposito, o in corrispondenza di altri contrasti di impedenza acustica individuati lungo la verticale del profilo sismostratigrafico.

L'analisi sviluppata in questo caso risulta di tipo "lineare equivalente" e consiste nell'esecuzione di una sequenza di analisi lineari complete con aggiornamento successivo dei parametri di rigidità e smorzamento fino al soddisfacimento di un prefissato criterio di convergenza della soluzione ricercata.

Consecutivamente all'importazione dei suddetti n° 7 file di input, sono stati generati gli spettri di Fourier relativi a tutti gli accelerogrammi al bedrock inseriti, calcolando lo spettro medio e quelli relativi al 95 e al 5 percentile del campione. Di seguito sono stati generati gli spettri di risposta al bedrock, per ciascun accelerogramma di input, utilizzando lo spettro medio.

Il software di elaborazione utilizzato ha generato quindi tutti gli spettri di risposta delle accelerazioni e delle velocità, per un coefficiente di smorzamento posto pari a 5% ed un periodo massimo di calcolo pari a 4s, calcolando le relative ampiezze spettrali.

Per il calcolo della funzione di trasferimento del moto sismico dal bedrock alla superficie è stato considerato un sottosuolo come un sistema di strati orizzontali omogenei, isotropi e visco-elastici, sovrastanti un semispazio uniforme, attraversati dalle onde di taglio che incidono verticalmente le superfici.

Definizione del modello geotecnico e sismostratigrafico del sito

Le indagini eseguite dalla *Crestana S.r.l.s.*, in corrispondenza del fabbricato di interesse, (Prospezione sismica MASW e misura del microtremore sismico HVSr), hanno permesso di definire il modello stratigrafico e sismostratigrafico caratteristico del sito in esame.

Per le porzioni profonde del profilo sismostratigrafico, oltre la profondità massima di indagine di -35 m dal p.c. e fino al raggiungimento del bedrock sismico ($V_s > 800$ m/s), sono state utilizzate le risultanze lito-stratigrafiche desunte dalle stratigrafie di pozzi terebrati in aree limitrofe e nel medesimo contesto geologico in cui ricade l'area oggetto di studio.

Si specifica infatti che, per i limiti intrinseci dovuti alla tipologia della successione stratigrafica del sito in esame, non è stato possibile raggiungere il bedrock sismico ($V_s \geq 800$ m/s). Per questo motivo, la ricostruzione dell'andamento dei valori di V_s fino al valore di 800 m/s è stata stimata sulla base del gradiente di V_s nei primi 35 m indagati e considerando l'assenza, almeno fino a -115 m dal p.c., di orizzonti ipotizzabili rigidi, e quindi associabili univocamente al bed rock sismico, come desunto dalle suddette stratigrafie dei Pozzi considerate. Alla luce del gradiente di V_s , e considerando il carico litostatico agente oltre tali profondità, il bedrock sismico è stato assegnato ad una profondità plausibile di -120,0 m dal piano campagna (p.c.).

Le proprietà dissipative di ogni sismostrato individuato nel profilo sismico sono state considerate utilizzando il decremento logaritmico (δ), funzione della velocità, frequenza e lunghezza d'onda, dal rapporto di smorzamento D espresso in %.

Il comportamento non lineare del terreno, in questo tipo di analisi numerica è espresso in termini di decadimento del modulo di taglio G ed aumento del rapporto di smorzamento interno D , in funzione della deformazione tangenziale, e la sua influenza sulla risposta sismica in superficie, è dipendente dal livello di eccitazione sismica del sito.

Le curve di decadimento di ciascuna litologia principale, assegnata ai diversi orizzonti relativi al profilo sismostratigrafico elaborato (**Fig. 12**), sono state estrapolate dal database messo a disposizione dalla Regione Lombardia per terreni tipo, ovvero per Ghiaie, Limi Argillosi, Limi Sabbiosi e Sabbie.

Si ritiene che le curve così ottenute siano del tutto correlabili alle caratteristiche litologiche riscontrate e allo scenario geologico dell'area oggetto di studio, e molto più attinenti di altre riconosciute in campo internazionale ma riguardanti unità litologiche aventi origini e storie tensionali del tutto differenti da quelle caratteristiche dei depositi che costituiscono il sottosuolo in esame.

	Name	Unit Weight (kN/m ³)	G/G _{max} Model	Damping Model	Notes
1	1	17.65	Limi Sabbiosi	Limi Sabbiosi	
2	2	18.53	Sabbie	Sabbie	
3	3	19.61	Ghiaie	Ghiaie	
4	4	19.12	Limi Argillosi	Limi Argillosi	
5	5	19.32	Limi Argillosi	Limi Argillosi	
6	6	19.91	Ghiaie	Ghiaie	
7	7	20.20	Ghiaie	Ghiaie	
8	8	21.00	Ghiaie	Ghiaie	
9	9	20.00	Sabbie	Sabbie	
10	10	19.50	Limi Argillosi	Limi Argillosi	
11	11	20.00	Limi Argillosi	Limi Argillosi	

Fig. 6 - Tabella riassuntiva con identificazione numerica di tutti i litotipi individuati nel profilo sismostratigrafico utilizzato per lo studio di risposta sismica locale.

Gli strati secondo i quali viene schematizzato il modello geologico-geofisico sono rappresentati dallo spessore H , dal modulo di taglio G_0 (per basse deformazioni) e dalla corrispondente velocità delle onde S , dal valore dello smorzamento D , dal peso dell'unità di volume γ e dalle curve di decadimento del modulo di rigidezza a taglio normalizzato ($G/G_0 - \gamma$), considerando le corrispondenti curve dello smorzamento ($D - \gamma$) con la deformazione di taglio.

Nel caso specifico sono state utilizzate curve di decadimento di G_0 e di incremento D_0 fornite come detto dalla regione Lombardia e caricate nel software di elaborazione utilizzato, per la litologia prevalente ipotizzata per ciascun strato, in quanto ritenute correlabili allo scenario geologico dell'area oggetto di studio.

Per il calcolo della suddetta funzione di trasferimento è stata adottata un'analisi di tipo "lineare equivalente" consistita in una sequenza ciclica di analisi lineari complete con aggiornamento successivo dei parametri di rigidezza G_0 e smorzamento D_0 fino al soddisfacimento di un prefissato criterio di convergenza (ovvero fino a quando le differenze nei valori della deformazione tangenziale calcolati in due iterazioni successive diventa inferiore ad un valore di tolleranza prestabilito).

Sulla scorta dei dati geotecnici e geofisici reperiti, dalle informazioni geologiche di letteratura sul territorio oggetto di studio, sulla base delle Prospezioni Sismiche MASW e HVSR eseguite dalla società *Crestana S.r.l.s.*, in corrispondenza del lotto in esame e dall'elaborazione degli stessi e mediante formule di letteratura, sono stati individuati, da una stima ragionata e cautelativa, i valori caratteristici da utilizzare nel profilo stratigrafico di input, assegnando a ciascuna unità stratigrafica un peso di volume espresso in kN/m^3 .

Inoltre, con l'intento di uniformare le procedure di calcolo con quanto eseguito, ad ogni curva di decadimento è stata assegnata una sigla numerica identificativa dei diversi litotipi individuati, come di seguito riportato (**Fig. 13**).

Viene di seguito schematizzata quindi la successione stratigrafica delle unità sismiche e litologiche riconosciute, riportando i valori del modello di sottosuolo di input utilizzato per il calcolo delle funzioni di trasferimento al suolo, ottenuto a partire dal piano piano campagna (p.c.) in corrispondenza del quale sono state eseguite le prospezioni sismiche.

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	1.80	1	185.00
2	1.80	2.00	2	250.00
3	3.80	7.90	3	405.00
4	11.70	6.00	4	330.00
5	17.70	6.80	5	385.00
6	24.50	8.10	6	480.00
7	32.60	2.40	7	595.00
8	35.00	28.00	8	680.00
9	63.00	18.00	9	560.00
10	81.00	19.00	10	520.00
11	100.00	20.00	11	480.00
12	120.00	Half-Space	Bedrock	830.00

Fig. 7 - Modello geofisico e geotecnico del sottosuolo adottato per il sito di progetto.

Inserito il modello sismico e geologico del sottosuolo del sito di progetto, ed elaborando consecutivamente la funzione di trasferimento del moto sismico in superficie, sono stati ricavati in ultima analisi gli spettri di risposta di sito in superficie, ovvero al p.c. generale (**Figg. 14-15-16-17**).

Si riportano di seguito, per tutti gli stati limite considerati nel presente studio (SLO, SLD, SLV, SLC), gli spettri di risposta in superficie relativi a ciascuno dei 7 accelerogrammi utilizzati:

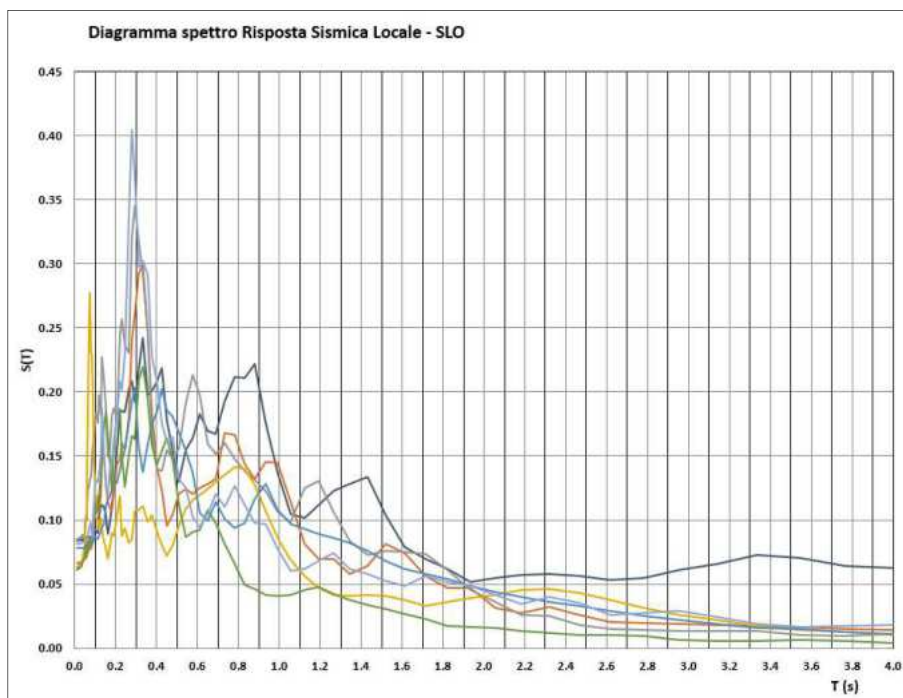


Fig. 8 - Spettri di risposta elastici singoli delle accelerazioni ottenute in superficie allo SLO.

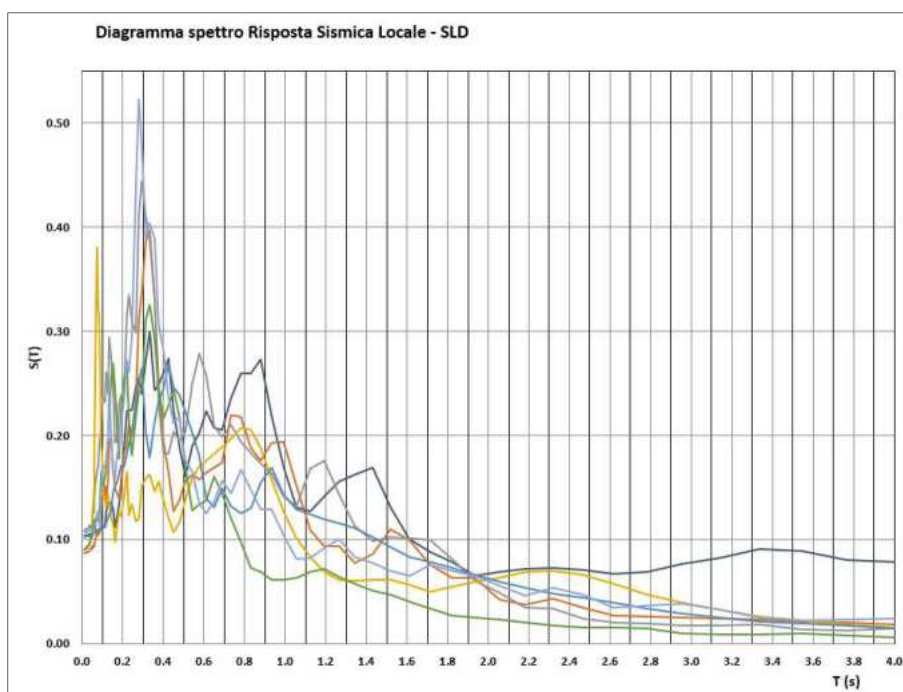


Fig. 9 - Spettri di risposta elastici singoli delle accelerazioni ottenute in superficie allo SLD.

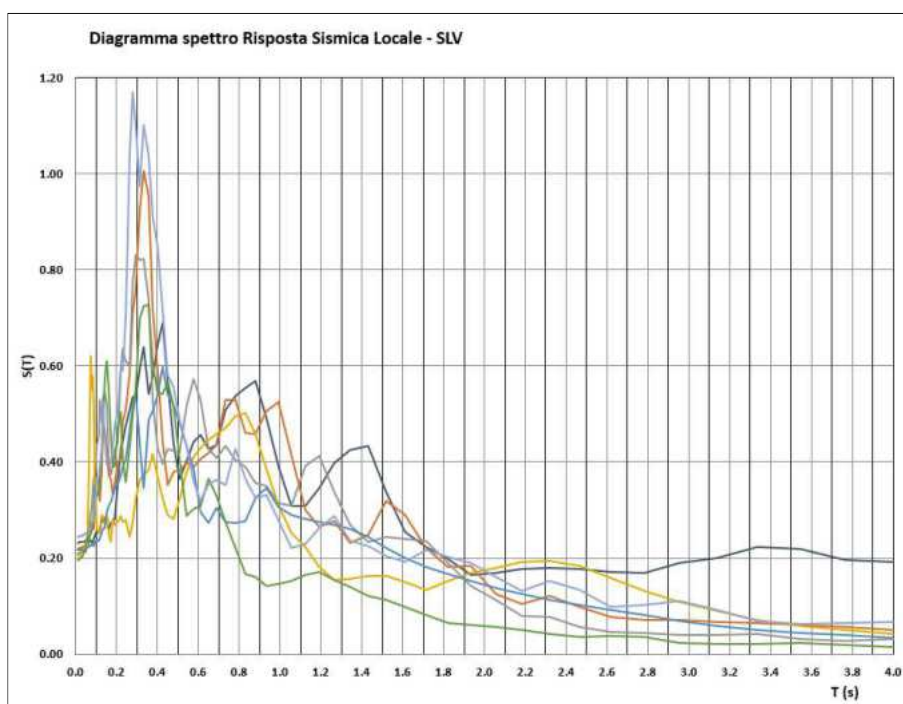


Fig. 10 - Spettri di risposta elastici singoli delle accelerazioni ottenute in superficie allo SLV.

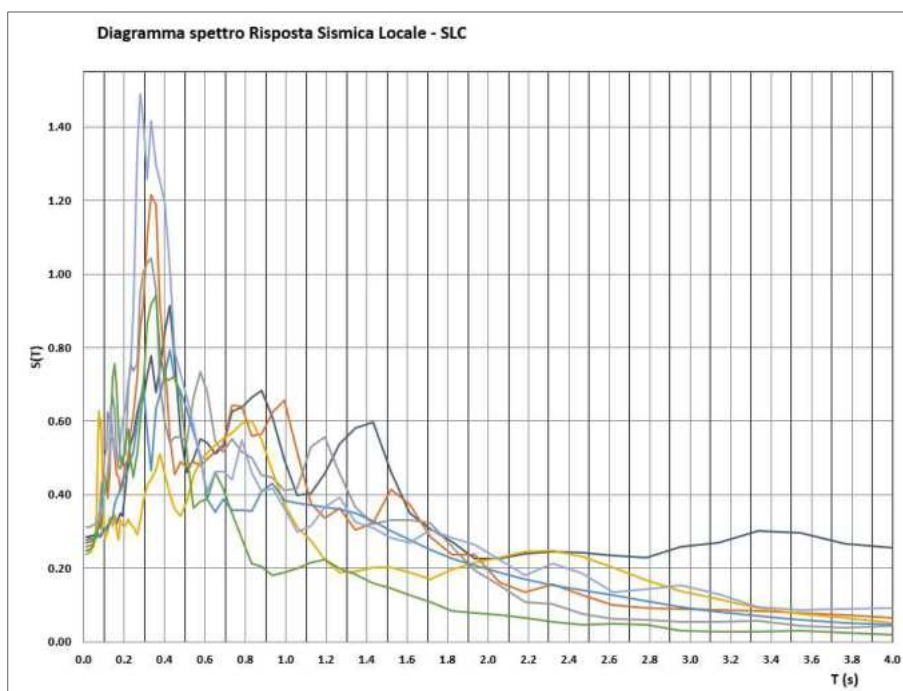


Fig. 11 - Spettri di risposta elastici singoli delle accelerazioni ottenute in superficie allo SLC.

OUTPUT ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Come previsto dalla normativa vigente, si riportano i risultati della Risposta Sismica Locale in termini di valori numerici (**Figg. 18-19**) dello spettro di risposta elastico in accelerazione (PSA), per lo Stato Limite di Operatività (SLO), Stato Limite di Danno (SLD), Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e Stato Limite di Prevenzione del Collasso (SLC).

In merito, in funzione dei risultati ottenuti, per i progettisti incaricati si ritiene fortemente consigliabile l'utilizzo degli spettri di risposta elastici non normalizzati, ovvero quelli ottenuti numericamente tal quale dall'analisi di RSL eseguita, e riportati nelle tabelle di Figg. 18 e 19.

Per un mero confronto grafico tra i risultati ottenuti nel presente studio, e gli spettri di risposta derivanti dal metodo semplificato basato sull'assegnazione di una categoria di sottosuolo (di cui al par. 3.2.2 delle NTC 2018), vengono presentati gli spettri anche in formato normalizzato.

Per tale scopo la procedura ha previsto la trasformazione dello spettro elastico di risposta, risultato delle simulazioni numeriche (output), in uno spettro con forma standard a quello derivabile mediante metodi semplificati (NTC 2018). In questo modo lo spettro di forma standard è risultato costituito da un ramo con accelerazione crescente lineare, un ramo ad accelerazione costante, ed un ramo in cui l'accelerazione decresce con $1/T$ e quindi con velocità costante.

Nello specifico, è stato utilizzato il Metodo di Normalizzazione ICMS (2008), secondo la procedura sviluppata da Pergalani e Compagnoni (2013) e successivamente nell'ambito della MS3 di Fivizzano (GdL Fivizzano, 2017), secondo il quale è stato possibile trasformare lo spettro di RSL in uno spettro con andamento regolarizzato (normalizzato), ovvero come detto simile a quello degli spettri semplificati di normativa.

Pur non essendoci obblighi normativi e/o regolamentari per la scelta di un metodo di normalizzazione rispetto ad un altro, si ritiene preferibile la procedura di Normalizzazione ICMS citata (**Figg. 20-21**) per una migliore coerenza statistica dell'approccio, in cui l'elevazione e l'ampiezza del plateau sono determinate sulla base del valore medio in pseudoaccelerazione

ed in pseudovelocità nell'intorno significativo del valore spettrale di picco. Il secondo motivo riguarda il fatto che tale metodo di normalizzazione è l'unico per il quale si abbia un riferimento normativo (Ord. n. 55 del 24/04/2018 emanata dal Commissario Straordinario per la ricostruzione – Sisma 2016).

SLO				SLD			
Periodo (s)	Periodo (s)			Periodo (s)	Sa (g)		
0.00000	0.0737564	0.29640	0.1828946	0.00000	0.098169	0.29640	0.299693
0.01000	0.0742956	0.31489	0.1828946	0.01000	0.098558	0.31489	0.300826
0.01062	0.0748349	0.33453	0.1828946	0.01062	0.098584	0.33453	0.312603
0.01129	0.0753741	0.35540	0.1828946	0.01129	0.098612	0.35540	0.281011
0.01199	0.0759133	0.37758	0.1828946	0.01199	0.098644	0.37758	0.23926
0.01274	0.0764526	0.40113	0.1828946	0.01274	0.09868	0.40113	0.219861
0.01353	0.0769918	0.42616	0.1828946	0.01353	0.098711	0.42616	0.207344
0.01438	0.0775310	0.45275	0.1828946	0.01438	0.098758	0.45275	0.193598
0.01528	0.0780703	0.48099	0.1828946	0.01528	0.09881	0.48099	0.184939
0.01623	0.0786095	0.51100	0.1828946	0.01623	0.098871	0.51100	0.172125
0.01724	0.0791487	0.54288	0.1828946	0.01724	0.09894	0.54288	0.176411
0.01832	0.0796880	0.57675	0.1828946	0.01832	0.099014	0.57675	0.173632
0.01946	0.0802272	0.61274	0.1828946	0.01946	0.099104	0.61274	0.173355
0.02067	0.0807664	0.65096	0.1828946	0.02067	0.099205	0.65096	0.173241
0.02196	0.0813057	0.69158	0.1828946	0.02196	0.099321	0.69158	0.171528
0.02333	0.0818449	0.73472	0.1828946	0.02333	0.099454	0.73472	0.178821
0.02479	0.0823841	0.78056	0.1828946	0.02479	0.099608	0.78056	0.181881
0.02634	0.0829234	0.82926	0.1828946	0.02634	0.099759	0.82926	0.17309
0.02798	0.0834626	0.88100	0.1828946	0.02798	0.099964	0.88100	0.167866
0.02972	0.0840018	0.93596	0.1828946	0.02972	0.100221	0.93596	0.152259
0.03158	0.0845411	0.99435	0.1828946	0.03158	0.100436	0.99435	0.132234
0.03355	0.0850803	1.05639	0.1828946	0.03355	0.100693	1.05639	0.112049
0.03564	0.0856195	1.12230	0.1828946	0.03564	0.101061	1.12230	0.10814
0.03786	0.0861588	1.19232	0.1828946	0.03786	0.101612	1.19232	0.108307
0.04023	0.0866980	1.26670	0.1828946	0.04023	0.102156	1.26670	0.103943
0.04274	0.0872372	1.34573	0.1828946	0.04274	0.102613	1.34573	0.093711
0.04540	0.0877765	1.42969	0.1828946	0.04540	0.103731	1.42969	0.090736
0.04824	0.0883157	1.51889	0.1828946	0.04824	0.105266	1.51889	0.086332
0.05125	0.0888549	1.61365	0.1828946	0.05125	0.108676	1.61365	0.077172
0.05444	0.0893942	1.71432	0.1828946	0.05444	0.112839	1.71432	0.070561
0.05784	0.0899334	1.82127	0.1828946	0.05784	0.115975	1.82127	0.06274
0.06145	0.0904726	1.93490	0.1828946	0.06145	0.121577	1.93490	0.056773
0.06528	0.0910119	2.05562	0.1828946	0.06528	0.134283	2.05562	0.050756

0.06935	0.0915511	2.18386	0.1828946	0.06935	0.150634	2.18386	0.046582
0.07368	0.0920903	2.32011	0.1828946	0.07368	0.1595	2.32011	0.047482
0.07828	0.0926296	2.46486	0.1828946	0.07828	0.151312	2.46486	0.042311
0.08316	0.0931688	2.61864	0.1828946	0.08316	0.152208	2.61864	0.036469
0.08835	0.0937080	2.78201	0.1828946	0.08835	0.149173	2.78201	0.034361
0.09386	0.0942473	2.95558	0.1828946	0.09386	0.150688	2.95558	0.033099
0.09972	0.0947865	3.13998	0.1828946	0.09972	0.158811	3.13998	0.031288
0.10594	0.0953257	3.33587	0.1828946	0.10594	0.152518	3.33587	0.030136
0.11255	0.0958650	3.54400	0.1828946	0.11255	0.154237	3.54400	0.027809
0.11957	0.0964042	3.76510	0.1828946	0.11957	0.160292	3.76510	0.025292
0.12703	0.0969434	4.00000	0.1828946	0.12703	0.170965	4.00000	0.02425
0.13495	0.0974827			0.13495	0.192025		
0.14337	0.0980219			0.14337	0.190186		
0.15232	0.0985611			0.15232	0.178285		
0.16182	0.0991004			0.16182	0.158603		
0.17192	0.0996396			0.17192	0.161106		
0.18264	0.1001788			0.18264	0.166394		
0.19404	0.1007181			0.19404	0.181439		
0.20614	0.1012573			0.20614	0.201799		
0.21901	0.1017965			0.21901	0.232319		
0.23267	0.1023357			0.23267	0.224131		
0.24718	0.1028750			0.24718	0.224906		
0.26261	0.1034142			0.26261	0.257596		
0.27899	0.1039534			0.27899	0.303705		

Fig. 12 - Valori numerici degli spettri di risposta elastici ottenuti agli stati limite considerati (SLO e SLD).

SLV				SLC			
Periodo (s)	Sa (g)			Periodo (s)	Sa (g)		
0.00000	0.216672	0.29640	0.648214	0.00000	0.26968888	0.29640	0.80561964
0.01000	0.217556	0.31489	0.673389	0.01000	0.26968888	0.31489	0.83813354
0.01062	0.2176	0.33453	0.736065	0.01062	0.26972916	0.33453	0.92041424
0.01129	0.217649	0.35540	0.697957	0.01129	0.2697747	0.35540	0.88636307
0.01199	0.217705	0.37758	0.614061	0.01199	0.26982619	0.37758	0.80404013
0.01274	0.217766	0.40113	0.574329	0.01274	0.26988115	0.40113	0.76419017

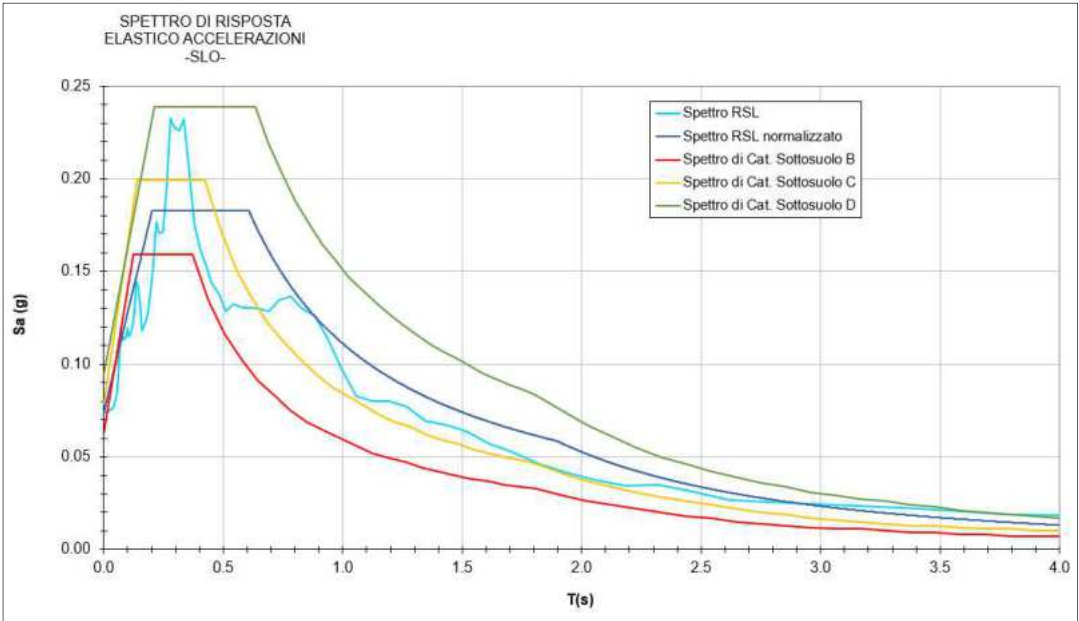
Comune di Guidizzolo (MN)

Relazione geologica-sismica

0.01353	0.217833	0.42616	0.521537	0.01353	0.269944	0.42616	0.69364046
0.01438	0.217914	0.45275	0.472338	0.01438	0.27001859	0.45275	0.61828325
0.01528	0.218003	0.48099	0.438632	0.01528	0.27009831	0.48099	0.56788138
0.01623	0.218107	0.51100	0.402095	0.01623	0.27019415	0.51100	0.51568658
0.01724	0.218225	0.54288	0.400457	0.01724	0.27030283	0.54288	0.50858184
0.01832	0.218362	0.57675	0.396088	0.01832	0.27041481	0.57675	0.50315404
0.01946	0.218516	0.61274	0.388396	0.01946	0.27055377	0.61274	0.48317471
0.02067	0.21869	0.65096	0.391755	0.02067	0.27071205	0.65096	0.48836603
0.02196	0.218889	0.69158	0.386237	0.02196	0.27089706	0.69158	0.48158436
0.02333	0.219116	0.73472	0.406152	0.02333	0.27111167	0.73472	0.50541318
0.02479	0.219361	0.78056	0.413069	0.02479	0.27136465	0.78056	0.51064464
0.02634	0.219637	0.82926	0.394553	0.02634	0.27163585	0.82926	0.48703347
0.02798	0.21997	0.88100	0.381735	0.02798	0.27193365	0.88100	0.44668162
0.02972	0.220362	0.93596	0.358556	0.02972	0.27229433	0.93596	0.40941251
0.03158	0.220813	0.99435	0.322459	0.03158	0.27271784	0.99435	0.35862181
0.03355	0.221338	1.05639	0.27666	0.03355	0.27322355	1.05639	0.35457452
0.03564	0.221843	1.12230	0.270596	0.03564	0.27369601	1.12230	0.3605604
0.03786	0.222565	1.19232	0.272428	0.03786	0.27452853	1.19232	0.35575146
0.04023	0.223698	1.26670	0.266858	0.04023	0.27573277	1.26670	0.32564413
0.04274	0.224385	1.34573	0.242685	0.04274	0.27650429	1.34573	0.31676804
0.04540	0.225062	1.42969	0.235287	0.04540	0.27709086	1.42969	0.30210901
0.04824	0.226508	1.51889	0.22542	0.04824	0.27852801	1.51889	0.2699725
0.05125	0.231272	1.61365	0.200726	0.05125	0.2833669	1.61365	0.24593303
0.05444	0.236505	1.71432	0.182859	0.05444	0.2888272	1.71432	0.21972282
0.05784	0.240485	1.82127	0.163393	0.05784	0.29385767	1.82127	0.2005955
0.06145	0.2448	1.93490	0.149346	0.06145	0.29746279	1.93490	0.17695293
0.06528	0.259623	2.05562	0.13235	0.06528	0.30830479	2.05562	0.16104374
0.06935	0.286853	2.18386	0.121038	0.06935	0.33475432	2.18386	0.16548152
0.07368	0.309853	2.32011	0.124126	0.07368	0.36038264	2.32011	0.14802934
0.07828	0.302912	2.46486	0.11088	0.07828	0.35955446	2.46486	0.1274177
0.08316	0.313019	2.61864	0.095383	0.08316	0.37090139	2.61864	0.11857784
0.08835	0.311774	2.78201	0.088929	0.08835	0.3743435	2.78201	0.11461057
0.09386	0.308812	2.95558	0.085734	0.09386	0.36788973	2.95558	0.10737442
0.09972	0.326882	3.13998	0.080392	0.09972	0.38796673	3.13998	0.10222203
0.10594	0.320592	3.33587	0.076468	0.10594	0.38332427	3.33587	0.09433219
0.11255	0.323018	3.54400	0.070634	0.11255	0.38968976	3.54400	0.08579182

0.11957	0.338624	3.76510	0.064146	0.11957	0.40920963	3.76510	0.08128014
0.12703	0.364955	4.00000	0.061062	0.12703	0.44246737	4.00000	0.80561964
0.13495	0.401831			0.13495	0.48414044		
0.14337	0.412959			0.14337	0.50517414		
0.15232	0.404245			0.15232	0.50002047		
0.16182	0.363271			0.16182	0.45575906		
0.17192	0.346692			0.17192	0.43241973		
0.18264	0.349986			0.18264	0.43365925		
0.19404	0.364222			0.19404	0.4450611		
0.20614	0.401895			0.20614	0.48073021		
0.21901	0.45757			0.21901	0.54457627		
0.23267	0.461773			0.23267	0.56032431		
0.24718	0.485268			0.24718	0.59534267		
0.26261	0.560557			0.26261	0.69886342		
0.27899	0.643454			0.27899	0.79663964		

Fig. 13 - Valori numerici degli spettri di risposta elastici ottenuti agli stati limite considerati (SLV e SLC).



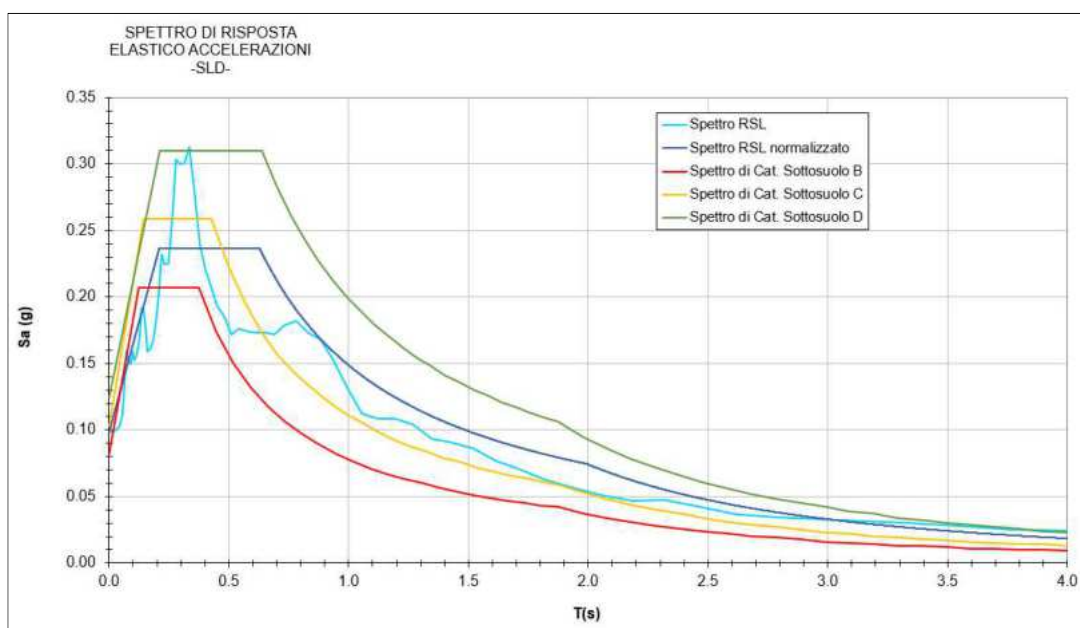
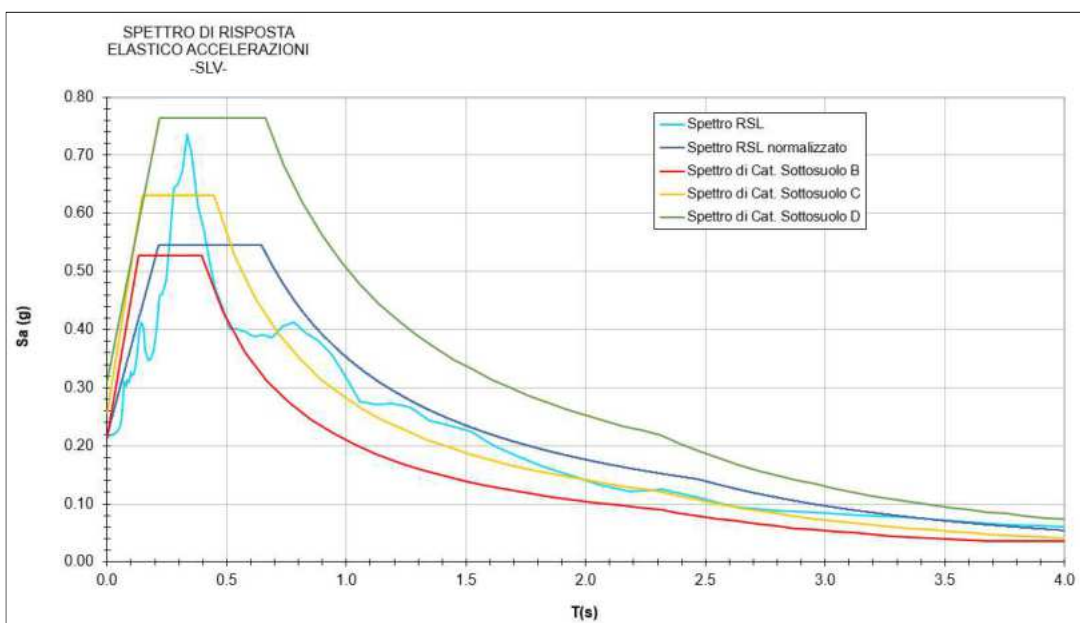


Fig. 14 - Spettri di risposta elastici medi RSL e relativi spettri normalizzati, per lo SLO (in alto) e per lo SLD (in basso).



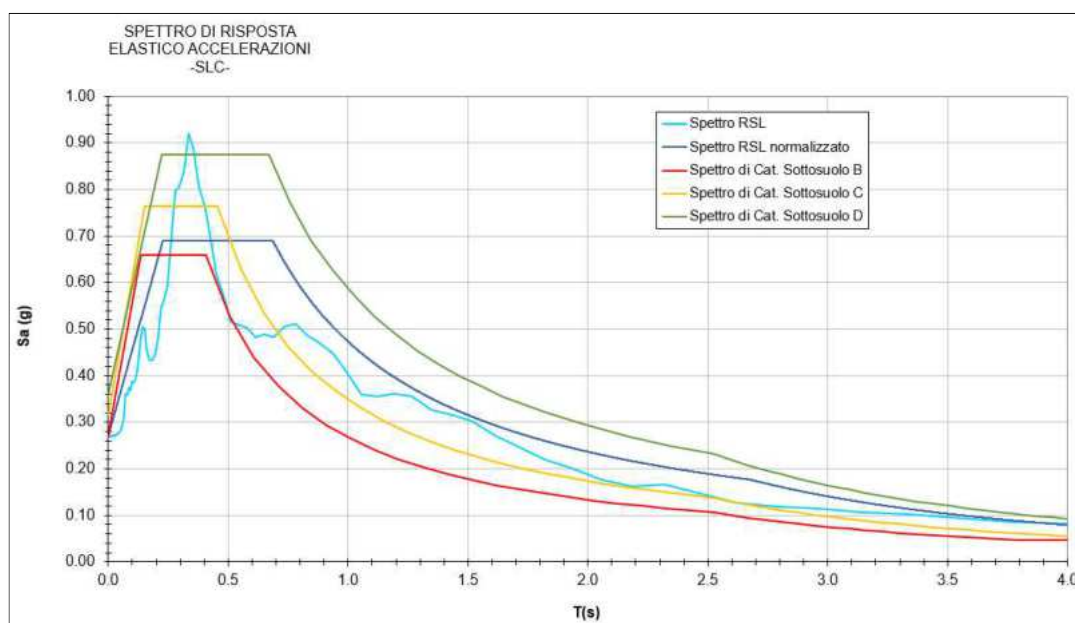


Fig. 15 - Spettri di risposta elastici medi RSL e relativi spettri normalizzati, per lo *SLV* (in alto) e per lo *SLC* (in basso).

Infine, in base ai risultati ottenuti dall'analisi di Risposta Sismica Locale si forniscono, per gli stati limite considerati (SLO, SLD, SLV, SLC), i seguenti parametri dipendenti e parametri indipendenti, calcolati applicando le equazioni riportate nel D.M. del 17/01/2018:

PARAMETRI INDIPENDENTI

SLO		SLD		SLV		SLC	
a_g	0,053	a_g	0,069	a_g	0,178	a_g	0,232
F_o	2,508	F_o	2,511	F_o	2,463	F_o	2,421
T_c^*	0,257	T_c^*	0,279	T_c^*	0,287	T_c^*	0,287

in cui:

a_g = accelerazione orizzontale massima al bedrock

F_o = fattore di amplificazione spettrale massima

T_c^* = tratto spettrale a periodo costante per il periodo di ritorno di riferimento

PARAMETRI DIPENDENTI (Spettro Normalizzato)

SLO		SLD		SLV		SLC	
T_B	0,202 s	T_B	0,210 s	T_B	0,216 s	T_B	0,228 s
T_C	0,607 s	T_C	0,629 s	T_C	0,647 s	T_C	0,685 s
T_D	1,895 s	T_D	1,993 s	T_D	2,467 s	T_D	2,679 s
S_e ($a_{max} T=0$)	0,074g	S_e ($a_{max} T=0$)	0,098 g	S_e ($a_{max} T=0$)	0,217 g	S_e ($a_{max} T=0$)	0,270g
$S_{e,max}$ (plateau norm.)	0,183 g	$S_{e,max}$ (plateau norm.)	0,237 g	$S_{e,max}$ (plateau norm.)	0,545 g	$S_{e,max}$ (plateau norm.)	0,691 g

in cui:

T_B = periodo di inizio del tratto dello spettro di accelerazione orizzontale

T_c = periodo inizio tratto a velocità costante dello spettro di accelerazione orizzontale

T_D = periodo di inizio tratto a spostamento costante dello spettro di accelerazione orizzontale

S_e = accelerazione spettrale orizzontale a $T=0$

$S_{e_{max}}$ = accelerazione spettrale orizzontale massima

Si sottolinea ancora come, in funzione dei risultati ottenuti, soprattutto in merito alle accelerazioni di picco riscontrate, per i progettisti incaricati sia fortemente consigliabile l'utilizzo degli spettri di risposta elastici non normalizzati, ovvero quelli ottenuti numericamente tal quale dall'analisi di RSL e riportati nelle tabelle di *Figg. 18 e 19*.

San Giorgio Bigarello, 09.02. 2023

IL TECNICO

Dott. Geol. Rosario Spagnolo

Estratto di mappa catastale con localizzazione della prova masw



ALLEGATO FOTOGRAFICO

