



COMUNE DI VERCEIA
Provincia di Sondrio

PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO

Componente geologica, idrogeologica e sismica

COMMITTENTE
COMUNE DI VERCEIA (SO)
Via Nazionale 92
23020 Verceia (SO)

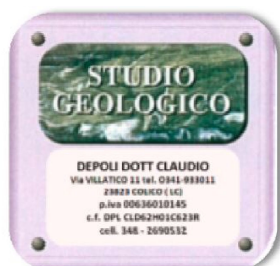
**ANALISI SISMICA
DI SECONDO LIVELLO**

DATA MARZO 2023

ELABORATO **R4**

TECNICO INCARICATO

TIMBRO E FIRMA



STUDIO GEOLOGICO
DEPOLI DOTT. CLAUDIO
Via Villatico, 11
23823 Colico (LC)
Tel./Fax. 0341.933011
info@studiodepoli.com

Sommario

1.	PREMESSA E RIFERIMENTI NORMATIVI.....	2
2.	ANALISI SISMICA DI SECONDO LIVELLO.....	5
3.	CAMPAGNA DI INDAGINE.....	9
3.1.	PIANO DI INDAGINE ATTUATO.....	9
3.2.	INDAGINE GEOFISICA MEDIANTE TECNICA DEI RAPPORTI SPETTRALI O HVSR	10
3.3.	CENNI TEORICI	12
3.4.	STRUMENTAZIONE IMPIEGATA	13
3.4.1.	Hardware	13
3.4.2.	Software	14
3.5.	FASE OPERATIVA	14
3.6.	INVERSIONE PROVA HVSR	15
4.	CARATTERIZZAZIONE DEL TERRITORIO IN ESAME	15
4.1.	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO	15
5.	METODOLOGIA DI CALCOLO.....	17
5.1.	VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LITOLOGICI.....	17
6.	CONCLUSIONI	20
6.1.	ANALISI DEI RISULTATI.....	20
6.2.	CARTA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE	21

1. PREMESSA E RIFERIMENTI NORMATIVI

Vengono di seguito descritte le indagini e le attività di analisi e di studio condotte ai fini dell'aggiornamento della componente sismica – verifica di 2° livello del PGT del Comune di Verceia (SO).

La metodologia seguita è pienamente coerente con i contenuti della D.G.R. 30 novembre 2011 - n. IX/2616: “Aggiornamento dei Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio, in attuazione dell’art. 57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005, n. 12”, approvati con D.G.R. 22 dicembre 2005, n. 8/1566 e successivamente modificati con D.G.R. 28 maggio 2008, n. 8/7374 e non modificata per gli aspetti sismici dalla DGR del 2022.

Per quanto riguarda l’analisi della pericolosità sismica in riferimento alle caratteristiche del territorio in esame assume rilevanza la valutazione degli effetti di sito o di amplificazione sismica locale. Tali effetti sono rappresentati dall’insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico (terremoto di riferimento), relativo ad una formazione rocciosa di base (bedrock), può subire durante l’attraversamento degli strati di terreno sovrastanti il bedrock a causa dell’interazione delle onde sismiche con le particolari condizioni locali.

Gli effetti si distinguono in due gruppi che possono essere contemporaneamente presenti nello stesso sito:

- Effetti di amplificazioni litologiche e geometriche: si verificano quando le condizioni locali sono rappresentate da morfologie sepolte (bacini sedimentari, chiusure laterali, corpi lenticolari, eteropie ed interdigitazioni, gradini di faglia ecc.) e da particolari profili stratigrafici costituiti da litologie con determinate proprietà meccaniche; tali condizioni possono generare esaltazione locale delle azioni sismiche trasmesse dal terreno, fenomeni di risonanza fra onda sismica incidente e modi di vibrare del terreno e fenomeni di doppia risonanza fra periodo fondamentale del moto sismico incidente e modi di vibrare del terreno e della sovrastruttura;

- Effetti di amplificazione topografica: si verificano quando le condizioni locali sono rappresentate da morfologie superficiali più o meno articolate e da irregolarità topografiche in generale; tali condizioni favoriscono la focalizzazione delle onde sismiche in prossimità della cresta del rilievo a seguito di fenomeni di riflessione sulla superficie libera e di interazione fra il campo d'onda incidente e quello diffratto.

Lo studio della pericolosità sismica prevede tre livelli di approfondimento, in funzione della zona sismica di appartenenza e degli scenari di pericolosità sismica locale individuati.

1° livello: è finalizzato al riconoscimento delle aree passibili di amplificazione sismica sulla base sia di osservazioni geologiche (cartografie di inquadramento) sia di dati esistenti.

Questo livello, obbligatorio per tutti i Comuni, prevede la redazione della Carta della pericolosità sismica locale PSL, derivata dalla carta geologica e dalla carta geomorfologica, in cui viene riportata la perimetrazione areale (e lineare per gli scenari Z3a, Z3b e Z5) delle diverse situazioni tipo, riportate nella Tabella 1 dell'Allegato 5 della D.G.R. IX/2616, in grado di determinare gli effetti sismici locali (aree a pericolosità sismica locale - PSL).

Sigla	SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	EFFETTI
Z1a	Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi	Instabilità
Z1b	Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti	
Z1c	Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana	
Z2a	Zone con terreni di fondazione saturi particolarmente scadenti (riporti poco addensati, depositi altamente compressibili, ecc.)	Cedimenti
Z2b	Zone con depositi granulari fini saturi	Liquefazioni
Z3a	Zona di ciglio H > 10 m (scarpata, bordo di cava, nicchia di distacco, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica, ecc.)	Amplificazioni topografiche
Z3b	Zona di cresta rocciosa e/o cocuzzolo: appuntite - arrotondate	
Z4a	Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi	Amplificazioni litologiche e geometriche
Z4b	Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre	
Z4c	Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (compresi le coltri loessiche)	
Z4d	Zone con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale	
Z5	Zona di contatto stratigrafico e/o tettonico tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse	Comportamenti differenziali

Tabella 1 dell'Allegato 5 alla DGR 30 novembre 2011 – n. IX/2616

2^a livello: permette la caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione attesi negli scenari perimetrati nella carta di pericolosità sismica locale; essa fornisce la stima della risposta sismica dei terreni in termini di valore di Fattore di Amplificazione (Fa). Questo livello è obbligatorio, per i comuni ricadenti nelle zone sismiche 2 e 3 (comune di Verceia), negli scenari PSL, individuati attraverso il 1^a livello, suscettibili di amplificazioni sismiche morfologiche e litologiche (Z3 e Z4 Tabella 1 dell'Allegato 5 alla DGR 30 novembre 2011 – n. IX/2616) interferenti con l'urbanizzato e/o con le aree di espansione urbanistica.

3^a livello: definisce gli effetti di amplificazioni tramite indagini e analisi più approfondite. Tale livello si applica in fase progettuale nei seguenti casi:

- quando, a seguito dell'applicazione del 2^a livello, si dimostra l'inadeguatezza della normativa sismica nazionale all'interno degli scenari PSL caratterizzati da effetti di amplificazioni morfologiche e litologiche;
- in presenza di aree caratterizzate da effetti di instabilità, cedimenti e/o liquefazione (zone Z1 e Z2) nelle zone sismiche 2 e 3 per tutte le tipologie di edifici, mentre in zona sismica 4 nel caso di costruzioni di nuovi edifici strategici e rilevanti di cui al d.d.u.o. n. 19904 del 21 novembre 2003, ferma restando la facoltà dei Comuni di estenderlo anche alle altre categorie di edifici.

L'applicazione del 2^a livello consente l'individuazione delle aree in cui la normativa nazionale risulta insufficiente a salvaguardare dagli effetti di amplificazione sismica locale (Fa calcolato superiore a Fa di soglia comunali forniti dal Politecnico di Milano). Per queste aree si dovrà procedere alle indagini ed agli approfondimenti di 3^a livello o, in alternativa, utilizzare lo spettro di norma caratteristico della categoria di suolo superiore. Gli approfondimenti di 2^a e 3^a livello non devono essere eseguiti in quelle aree che, per situazioni geologiche, geomorfologiche e ambientali o perché sottoposte a vincolo da particolari normative, siano considerate inedificabili, fermo restando tutti gli obblighi derivanti dall'applicazione di altra normativa specifica.

Il Comune di Verceia è stato classificato in Zona Sismica 3 e pertanto è tenuto a sviluppare anche gli approfondimenti di 2^a livello.

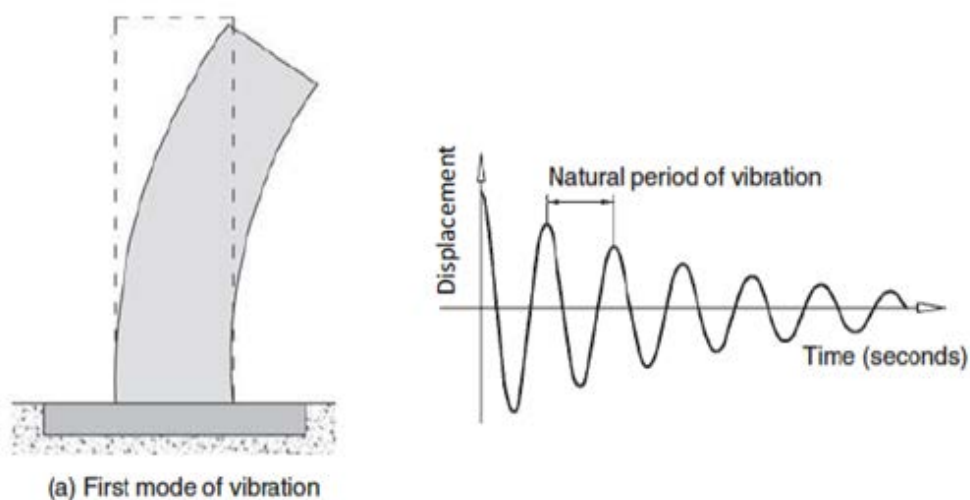
2. ANALISI SISMICA DI SECONDO LIVELLO

L'analisi sismica di 2^a livello prevede una caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione attesi negli scenari PSL Z4, consentendo l'individuazione di aree in cui la normativa nazionale risulta sufficiente o insufficiente a salvaguardare dagli effetti di amplificazione sismica locale. Il 2^a livello si applica agli scenari qualitativi suscettibili di amplificazioni sismiche (litologiche Z4), interferenti con l'urbanizzato e/o con le aree di espansione urbanistica.

Utilizzando metodi di indagine diretti ed indiretti in grado di fornire un modello geologico e geofisico del sottosuolo attendibile, è possibile determinare la stima della risposta sismica dei terreni in termini di valore di Fattore di Amplificazione F_a . Mediante i valori di F_a ottenuti è possibile zonare l'area di studio. Il valore di F_a si riferisce agli intervalli di periodo tra 0,1-0,5s e 0,5-1,5s: tali intervalli rappresentano i periodi propri delle tipologie edilizie presenti più frequentemente nel territorio regionale.

In particolare l'intervallo tra 0,1-0,5 s si riferisce a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide, mentre l'intervallo tra 0,5-1,5 s si riferisce a strutture più alte e più flessibili.

In riferimento alle NTC 2008/2018 si possono fare le seguenti considerazioni: la risposta sismica globale di un edificio dipende dall'interazione delle sue proprietà dinamiche (massa, rigidità e smorzamento) con le caratteristiche del moto del suolo.

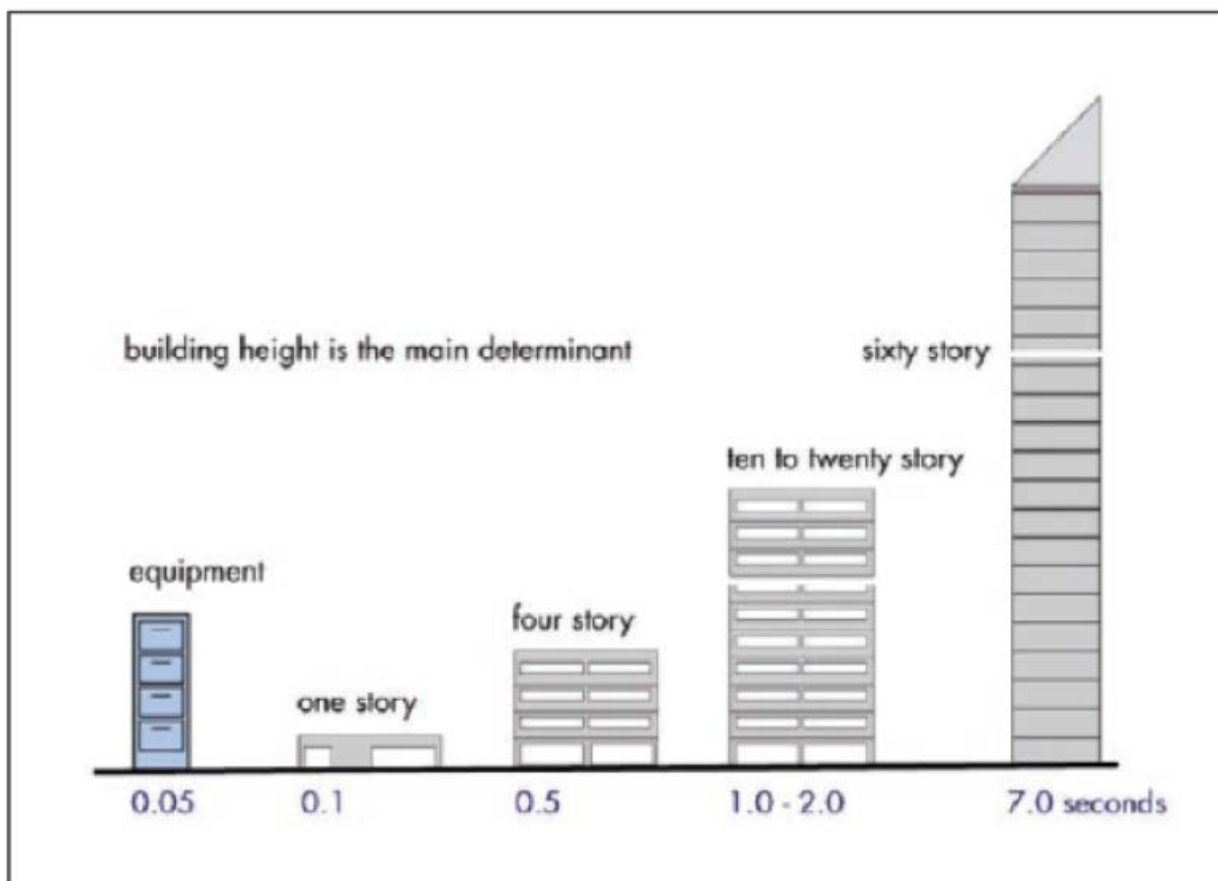


Il periodo fondamentale di vibrazione di un edificio dipende essenzialmente dalla sua altezza.

Una stima approssimata si può ottenere dividendo per 10 il numero dei piani.

Oltre che dall'altezza, il periodo fondamentale di vibrazione è influenzato anche dal sistema strutturale, dal materiale e dalle proporzioni geometriche della costruzione. Più rigido è il sistema strutturale, più piccolo sarà il periodo.

Per esempio, poiché un sistema a pareti è più rigido di un sistema a telaio, il suo periodo sarà minore. Inoltre, maggiore è il peso dell'edificio, più grande sarà il suo periodo fondamentale di vibrazione. In pratica, il periodo fondamentale di vibrazione può variare da un minimo di 0,05 s per edifici rigidi a un piano fino a oltre 7 s per gli edifici alti.



Secondo le NTC 2008/2018 è importante la regolarità strutturale: le costruzioni devono avere, quanto più possibile, struttura iperstatica caratterizzata da regolarità in pianta e altezza.

Se necessario ciò può essere conseguito suddividendo la struttura, mediante giunti, in unità tra loro dinamicamente indipendenti.

Per quanto riguarda gli edifici, una costruzione è regolare in pianta se tutte le seguenti condizioni sono rispettate:

- a) la configurazione in pianta è compatta e approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali, in relazione alla distribuzione di masse e rigidità;
- b) il rapporto tra i lati di un rettangolo in cui la costruzione risulta inscritta è inferiore a 4
- c) nessuna dimensione di eventuali rientri o sporgenze supera il 25% della dimensione totale della costruzione nella corrispondente direzione;
- d) gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano rispetto agli elementi verticali e sufficientemente resistenti.

La procedura per la verifica degli effetti litologici (punto 2.2.2 dell'Allegato 5 alla d.g.r. 30 novembre 2011 n. IX/2616 *“Analisi e valutazione degli effetti sismici di sito in Lombardia finalizzate alla definizione dell'aspetto sismico nei P.G.T.”*) tramite l'impiego delle schede predisposte dalla Regione Lombardia necessita della conoscenza della litologia prevalente dei materiali presenti in sito, della stratigrafia del sito, dell'andamento delle Vs con la profondità fino a valori pari o superiori agli 800m/s e dello spessore e velocità di ciascun strato.

La valutazione del grado di protezione viene effettuata in termini di contenuti energetici, confrontando il valore di Fa ottenuto dalle schede di valutazione con un parametro di analogo significato calcolato per ciascun comune per le diverse categorie di suolo (B, C, D, E NTC 2018) soggette ad amplificazioni litologiche per i due intervalli di periodo 0,1-0,5 s e 0,5-1,5 s.

Il parametro calcolato per ciascun Comune della Regione Lombardia è riportato nella banca dati in formato .xls (soglie_lomb.xls) e rappresenta il valore di soglia oltre il quale lo spettro proposto dalla normativa risulta insufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito.

COMUNE	INTERVALLO	VALORI SOGLIA			
		Tipo suolo B	Tipo suolo C	Tipo suolo D	Tipo suolo E
Vercèia	0.1 - 0.5	1.5	1.9	2.2	2.0
	0.5 – 1.5	1.7	2.4	4.3	3.1

La procedura prevede pertanto di valutare il valore di Fa con le schede di valutazione e di confrontarlo con il corrispondente valore di soglia, considerando una variabilità di + 0.1 che tiene in conto la variabilità del valore di Fa ottenuto.

Si possono presentare quindi due situazioni:

- il valore di Fa è inferiore al valore di soglia corrispondente: la normativa è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito e quindi si applica lo spettro previsto dalla normativa;
- il valore di Fa è superiore al valore di soglia corrispondente: la normativa è insufficiente a tenere in considerazione i possibili effetti di amplificazione litologica e quindi è necessario in fase di progettazione edilizia o effettuare analisi più approfondite (3° livello) o utilizzare lo spettro di norma caratteristico della categoria di suolo superiore con il seguente schema:
 - anziché lo spettro della categoria di suolo B si utilizzerà quello della categoria di suolo C; nel caso in cui la soglia non fosse ancora sufficiente si utilizzerà lo spettro della categoria di suolo D;
 - anziché lo spettro della categoria di suolo C si utilizzerà quello della categoria di suolo D;
 - anziché lo spettro della categoria di suolo E si utilizzerà quello della categoria di suolo D.

3. CAMPAGNA DI INDAGINE

3.1. Piano di indagine attuato

Sono stati ricercati e analizzati, in primo luogo, i documenti bibliografici archiviati nello studio geologico dello scrivente, individuando le pratiche edilizie per le quali fossero state attuate indagini sismiche. La campagna geognostica è stata programmata di conseguenza per garantire l'omogeneità di copertura.

Al fine di ottenere la stratigrafia di velocità delle onde trasversali V_s da cui ricavare il parametro $V_{s,eq}$ (indispensabile per l'analisi sismica di 2° livello) è stata effettuata una campagna sismica basata sulla tecnica dei rapporti spettrali HVSR.

Il piano di indagine e in particolare il posizionamento dei punti di prova sono stati definiti cercando di ottenere una copertura uniforme delle zone urbanizzate del territorio comunale, nei nuclei abitati di Verceia, Vico e Sceglio e nei nuclei montani di Pradella, Pesciallo, Foppaccia, Motta, Casten e Frasnedo.

Sono state pertanto eseguite 23 indagini sismiche in aggiunta alle 14 già note, provenienti dalla bibliografia dello Studio Geologico Depoli.

L'analisi e l'interpretazione congiunta dei risultati hanno consentito di determinare la modellazione del sottosuolo in termini di velocità $V_{s,eq}$, di individuare la profondità del substrato con $V_s > 800$ m/s e di fornire la stima della risposta sismica dei terreni in termini di valore di Fattore di Amplificazione (F_a).

La descrizione dei siti in cui sono state svolte le prove sismiche è raccolta nell'elaborato 5 "Schede indagini analisi sismiche di 2° livello" del presente PGT; esso contiene gli elementi di identificazione, l'ubicazione e i risultati di ogni indagine effettuata o derivante da bibliografia.

3.2. Indagine geofisica mediante tecnica dei rapporti spettrali o HVSR

Le indagini effettuate sono di tipo **geofisico** e si avvalgono della metodologia basata sulla tecnica di Nakamura e sul rapporto spettrale H/V.

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi) non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

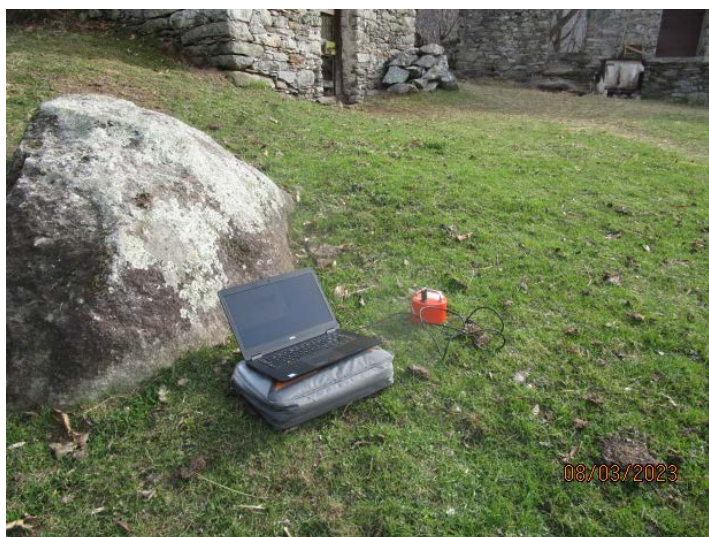


Foto geofono 3D da superficie con interfaccia USB mod. Gemini-2 collegato al computer per la registrazione del segnale

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte

più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde simiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato.

In particolare:

$$f = \frac{V_s}{4h}$$

La frequenza di risonanza del sedimento dipende dallo spessore h del sedimento e dalla velocità “media” (V_s) delle onde S nel sedimento.

Conoscendo lo spessore h del sedimento è possibile avere informazioni sulla velocità “media” delle onde S. Viceversa, conoscendo quest’ultima è possibile definire lo spessore h dello strato sedimentario.

Con le indagini sismiche HVSR effettuate si sono ottenuti i seguenti risultati:

La frequenza caratteristica di risonanza del sito, che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici antisismici.

La velocità media delle onde di taglio V_s calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario comunque, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, etc.) e riconoscibile nella curva H/V. È possibile calcolare la $V_{s,eq}$ e la relativa categoria del suolo di fondazione come esplicitamente richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

La stratigrafia del sottosuolo con un range di indagine compreso tra 0.5 e 100 m di profondità. Il principio su cui si basa la tecnica HVSR, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato, inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

3.3. Cenni Teorici

Le onde di taglio (S) sono le principali responsabili delle lesioni che subiscono gli edifici durante un evento sismico. Infatti, mentre le onde di compressione (P) agiscono sulle sovrastrutture in direzione prevalentemente verticale (moto sussultorio), le onde S sollecitano le stesse con forze di taglio lungo il piano orizzontale (moto ondulatorio), dove gli elementi strutturali sono più vulnerabili. Nelle analisi di pericolosità sismica è quindi fondamentale esaminare in dettaglio in che modo le onde S si propagano. È infatti ampiamente dimostrato che questo tipo di oscillazione durante il percorso verso la superficie può subire un'azione di filtraggio che tende a ridistribuire l'energia associata al treno d'onda, concentrandola in determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali di vibrazione dei terreni attraversati. L'effetto finale è quello di amplificare le onde S che andranno a sollecitare l'opera. Questo fenomeno può essere dovuto sia a particolarità topografiche del sito (amplificazione topografica), come valli sepolte o zone di cresta o di versante in pendii naturali o artificiali, sia a variazioni brusche nelle caratteristiche meccaniche dei terreni attraversati lungo la verticale (amplificazione stratigrafica).

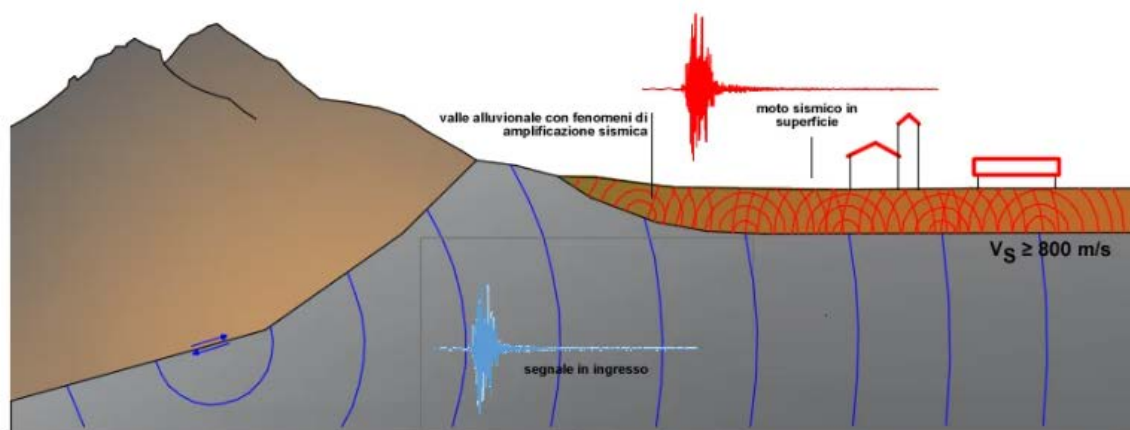


Immagine estratta dall'articolo "Categorie di sottosuolo secondo le NTC 2018" – GeoStru

Il D.M. 14.01.2008 (ex DM 14/09/2005) propone come riferimento di calcolo dell'amplificazione sismica locale, in particolare della componente stratigrafica, il metodo di Borcherdt (1994) basato

sulla stima del parametro Vs30. Per Vs30 s'intende la media pesata delle velocità delle onde S negli strati fino a 30 metri di profondità dal piano di posa della fondazione.

Per velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{s,eq}$ (in m/s) si intende la media pesata delle onde S negli strati nei primi metri di profondità dal piano di posa della fondazione, secondo la relazione:

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

con: h_i spessore dell'i-esimo strato (in m); $V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato (in m/s); N numero di strati; H profondità del substrato SISMICO (in m), definito come quella formazione, costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

3.4. Strumentazione impiegata

3.4.1. Hardware

Per le indagini in sito è stato utilizzato un **GEOFONO 3D DA SUPERFICIE CON INTERFACCIA USB MOD. GEMINI-2** della PASI s.r.l dove in un unico strumento sono integrati una terna di geofoni a bassa frequenza da 2Hz accuratamente accoppiati con elevate caratteristiche e dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit).

La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

3.4.2. Software

Per le analisi dei dati acquisiti si è adottato il software Open Source Geopsy conforme alle direttive fornite dal progetto di ricerca europeo SESAME (2005).

3.5. Fase operativa

Dopo la campagna geofisica di indagine sul territorio di Verceia per ciascuna prova effettuata sono state svolte le seguenti operazioni:

- *La misura di rumore sismico nelle sue tre componenti per un intervallo di tempo di 10-12 minuti eseguita con una frequenza di campionamento a 2ms - 500 Hz*
- *Per ogni segmento è stata eseguita un'analisi spettrale del segmento nelle sue tre componenti*
- *Per ciascun segmento si sono calcolati i rapporti spettrali fra le sue componenti del moto sui piani orizzontale e verticale*
- *Vengono calcolati i rapporti spettrali medi su tutti i segmenti.*

L'interpretazione, nel limite della tipologia investigativa, consente di correlare il valore di picco dello spettro di risposta HVSR con la profondità del secondo rifrattore (bedrock geofisico) e di individuare una corrispondenza tra i valori di frequenza relativi alle discontinuità sismiche e i cambi litologici presenti nell'immediato sottosuolo. Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del moto fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde S_h , si può ricavare il valore di frequenza caratteristica del sito. Sapendo che ad ogni picco in frequenza corrisponde una profondità dell'orizzonte che genera il contrasto d'impedenza si può estrapolare una stratigrafia geofisica del sottosuolo.

La tabella a fianco (rif. bibliografico) mette in relazione le frequenze caratteristiche del sito con la possibile profondità del primo rifrattore.

f_0 (Hz)	h (m)	
< 1	> 100	Centinaia di metri
1 – 2	50 – 100	
2 – 3	30 – 50	
3 – 5	20 – 30	Decine di metri
5 – 8	10 – 20	
8 – 20	5 – 10	
> 20	< 5	Qualche metro

3.6. Inversione prova HVSR

Tramite il codice di calcolo Dinver si procede all'inversione dei dati ottenuti allo scopo di ricavare il profilo stratigrafico dell'area e le velocità delle onde sismiche associate ad ogni strato.

In particolare sulla base di quanto sopra indicato è stato definito un modello iniziale con "fit vincolato" sulle indicazioni del profilo di V_s , che è stato successivamente sottoposto ad inversione al fine di generare una serie di modelli della velocità di fase delle onde di Rayleigh dai quali si possono ottenere una serie di profili V_s/z inclusi in un determinato intervallo di misfit.

4. CARATTERIZZAZIONE DEL TERRITORIO IN ESAME

4.1. Categorie di sottosuolo

L'identificazione della categoria di sottosuolo è basata sulla descrizione stratigrafica e sui valori della velocità di propagazione delle onde di taglio V_s . Ai fini della valutazione semplificata della risposta sismica locale, nell'attuale versione delle NTC, non è più consentita la classificazione del sottosuolo sulla base del parametro $N_{SPT,30}$ per i terreni a grana grossa e $C_{U,30}$ per i terreni a grana fine. Ciò era permesso invece nelle NTC 2008.

Le attuali norme tecniche richiedono che la categoria di sottosuolo sia stabilita sulla base del profilo Vs.

La misura diretta di Vs attraverso specifiche indagini geofisiche è in ogni caso preferibile, essendo in alternativa consentita la definizione del profilo Vs attraverso il ricorso a correlazioni empiriche “di comprovata affidabilità” solo per il metodo semplificato ed in ipotesi residuali, stante la maggiore incertezza che caratterizza la determinazione di Vs con le citate correlazioni empiriche.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{s,eq}$ (in m/s), definite dall’espressione:

$$V_{s, eq} = H / \sum_{i=1...N} (h_i / V_{s,i})$$

con: h_i spessore dell’ i -esimo strato (in m); $V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell’ i -esimo strato (in m/s); N numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore h e dalla velocità V_s ; H profondità del substrato SISMICO (in m), definito come quella formazione, costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30m$ nella formula e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo di riferimento (NTC 2018) sono così definite:

A *Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di *velocità delle onde di taglio* superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m

B *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti*, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente ($V_{s,eq}$) compresi tra 360 m/s e 800 m/s

C *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente $V_{s,eq}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s*

D *Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente ($V_{s,eq}$) compresi fra 100 e 180 m/s*

E *Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalenti riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.*

La velocità equivalente $V_{s,eq}$ si misura dal punto di partenza, ma non fino a 30 m, bensì fino al substrato sismico, se questo non è profondo più di 30 m.

Per profondità del substrato maggiori di 30 m la velocità equivalente $V_{s,eq}$ è uguale a $V_{s,30}$ ponendo $H=30m$ e assumendo le proprietà degli strati fino a tale profondità.

5. METODOLOGIA DI CALCOLO

5.1. Valutazione degli effetti litologici

Metodologia

La procedura semplificata richiede la conoscenza dei seguenti parametri:

- litologia prevalente dei materiali presenti nel sito
- stratigrafia del sito
- andamento delle V_s con la profondità, fino a valori pari o superiori a 800 m/s
- spessore e velocità di ciascun strato
- sezioni geologiche, conseguente modello geofisico - geotecnico ed identificazione dei punti rappresentativi sui quali effettuare l'analisi.

I dati locali a disposizione sono:

- Relazione geologica/geotecnica
- Dati personali di riferimento locale

che consentono di assegnare il seguente grado di attendibilità:

Dati	Attendibilità	Tipologia
Litologici	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Alta	Da prove di laboratorio su campioni e da prove in sito
Stratigrafici (spessori)	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Media	Da prove indirette (penetrometriche e/o geofisiche)
	Alta	Da indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo)
Geofisici (Vs)	Bassa	Da bibliografia e/o dati di zone limitrofe
	Media	Da prove indirette e relazioni empiriche
	Alta	Da prove dirette (sismica in foro o sismica superficiale)

Livelli di attendibilità da assegnare ai risultati ottenuti

Sulla base di intervalli indicativi di alcuni parametri geotecnici, quali curva granulometrica, parametri indice, numero di colpi della prova SPT, si individua la litologia prevalente presente nel sito e per questa si sceglie la relativa scheda di valutazione di riferimento.

Una volta individuata la litologia e la scheda a disposizione di riferimento è necessario verificarne la validità in base all'andamento dei valori di Vs con la profondità; in particolare si dovrà verificare l'andamento delle Vs con la profondità partendo dalla scheda tipo 1 (allegato 5 alla d.g.r. 30 novembre 2011 n. n. IX/2616); nel caso in cui non fosse verificata la validità per valori di Vs inferiori ai 600 m/s si passerà all'utilizzo della scheda tipo 2.

Nel caso di alternanze litologiche, che non evidenziano inversioni di velocità con la profondità, si potranno utilizzare le schede a disposizione solo se l'andamento dei valori di Vs con la profondità, nel caso da esaminare, risulta compatibile con le schede proposte.

All'interno della scheda di valutazione si sceglie, in funzione della profondità e della velocità Vs dello strato superficiale, la curva più appropriata (indicata con il numero e il colore di riferimento)

per la valutazione del valore di Fa nell'intervallo 0,1-0,5s (legato alla tipologia di struttura) (curva 1, curva 2 e curva 3 e relative formule), in base al valore del periodo proprio del sito T.

Il periodo proprio del sito T necessario per l'utilizzo della scheda di valutazione è calcolato considerando tutta la stratigrafia fino alla profondità in cui il valore della velocità Vs è uguale o superiore a 800 m/s ed utilizzando la seguente equazione:

$$T = \frac{4 \times \sum_{i=1}^n h_i}{\frac{\sum V_{s_i} \times h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}}$$

in cui hi e Vsi sono rispettivamente lo spessore e la velocità dello strato i-esimo.

Il valore di Fa così calcolato dovrà essere approssimato alla prima cifra decimale e dovrà essere utilizzato per valutare il grado di protezione raggiunto al sito dall'applicazione della normativa sismica vigente.

6. CONCLUSIONI

6.1. Analisi dei risultati

In base alla campagna di indagine effettuata e ai risultati ottenuti è possibile affermare che la maggior parte del territorio investigato è caratterizzato da sottosuolo di tipo B, ad eccezione di due settori (abitato di Sceglio e porzione di territorio in località Villa nei pressi del torrente omonimo) con sottosuolo di tipo A.

I valori del fattore di amplificazione litologica F_a ricavati a mezzo dell'analisi di approfondimento di secondo livello per i sottosuoli di tipo B sono risultati essere compresi fra **1 e 1,39** (intervallo di periodo 0,1-0,5s) e tra **0,96 e 1,18** (per l'intervallo di periodo 0,5-1,5s).

Detti valori sono inferiori alle soglie fornite per il Comune di Verceia dalla Regione Lombardia, per entrambi gli intervalli di periodo. Ciò comporta che la normativa è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito e quindi si applica lo spettro previsto dalla normativa.

COMUNE	INTERVALLO	VALORI SOGLIA			
		Tipo suolo B	Tipo suolo C	Tipo suolo D	Tipo suolo E
Verceia	0.1 - 0.5	1.5	1.9	2.2	2.0
	0.5 – 1.5	1.7	2.4	4.3	3.1

Valori di soglia del Fattore di Amplificazione F_a forniti dalla Regione Lombardia

COMUNE	INTERVALLO	VALORI OTTENUTI DALLE INDAGINI			
		Tipo suolo B	Tipo suolo C	Tipo suolo D	Tipo suolo E
Verceia	0.1 - 0.5	≤1.39	-	-	-
	0.5 – 1.5	≤1.18	-	-	-

Valori di soglia del Fattore di Amplificazione F_a ottenuti per i suoli di tipo B

6.2. Carta dei fattori di amplificazione

I valori di amplificazione calcolati in corrispondenza dei siti di indagine, unitamente a quelli derivanti dai progetti individuati in bibliografia sono stati interpolati anche con riferimento alle caratteristiche del substrato e di conseguenza estesi spazialmente a copertura dell'intero territorio urbanizzato comunale.

Il risultato dell'operazione di spazializzazione è rappresentato graficamente nelle tavole T7 Carta degli scenari di analisi sismica di 2^a livello – periodo T1 (relativa all' intervallo di periodo 0,1–0,5 secondi riferibile agli edifici e strutture relativamente basse) e T8 Carta degli scenari di analisi sismica di 2^a livello – periodo T2 (relativa all' intervallo di periodo 0,5–1,5 s riferibile alle strutture più alte e più flessibili).

Si rimanda alle schede tecniche delle indagini ed alle tavole per il dettaglio dei valori del fattore di amplificazione ottenuti nelle singole indagini.

Colico, marzo 2023

Depoli dott. Claudio

Geologo