COMUNE DI PRATA CAMPORTACCIO
Provincia di Sondrio

PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO

Componente geologica, idrogeologica e sismica

COMMITTENTE COMUNE DI PRATA CAMPORTACCIO (SO) Via Ezio Vanoni, 2 23020 Prata Camportaccio (SO)	**ANALISI SISMICA DI SECONDO LIVELLO**

DATA FEBBRAIO 2023	ELABORATO **R4**

TECNICO INCARICATO

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

TIMBRO E FIRMA

SOMMARIO

1. PREMESSA E RIFERIMENTI NORMATIVI 2

2. ANALISI SISMICA DI SECONDO LIVELLO 5

3. CAMPAGNA DI INDAGINE 7

3.1. Piano di indagine attuato 7

3.2. Indagine geofisica mediante tecnica dei rapporti spettrali o HVSR 8

3.3. Cenni teorici 9

3.4. Strumentazione impiegata 10

3.5. Fase operativa 11

3.6. Inversione prova HVSR 12

4. CARATTERIZZAZIONE DEL TERRITORIO IN ESAME 13

4.1. Categorie di sottosuolo 13

5. METODO DI CALCOLO 15

5.1 Valutazione degli effetti litologici 15

6. CONCLUSIONI 17

6.1. Analisi dei risultati 17

6.2. Carta dei fattori di amplificazione 17

1. PREMESSA E RIFERIMENTI NORMATIVI

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

Per quanto riguarda l'analisi della pericolosità sismica e con 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 valore 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 amplificazioni topografiche: 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 locale prevede tre livelli di approfondimento, in funzione della zona sismica di appartenenza e degli scenari di pericolosità sismica locale individuati.

1^ livello: riconoscimento delle aree passibili di amplificazione sismica sulla base sia di osservazioni geologiche (cartografia di inquadramento) sia di dati esistenti.

Questo livello, obbligatorio per tutti i Comuni, prevede la redazione della Carta della pericolosità sismica locale, nella quale deve essere riportata la perimetrazione areale (per gli scenari Z1a, Z1b, Z1c, Z2a, Z2b, Z4a, Z4b, Z4c, Z4d) 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

2^ livello: caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione attesi negli scenari perimetrati nella carta di pericolosità sismica locale, che fornisce la stima della risposta sismica dei terreni in termini di valore di Fattore di Amplificazione (Fa).

3^ livello: definizione degli 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^ 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 Z1e 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^ 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^ livello o, in alternativa, utilizzare lo spettro di norma caratteristico della categoria di suolo superiore.

Il secondo livello è obbligatorio, per i Comuni ricadenti nelle zone sismiche 2 e 3, negli scenari PSL, individuati attraverso il 1^ livello, suscettibili di amplificazioni sismiche litologiche e geometriche (zone Z4) interferenti con l'urbanizzato e/o con le aree di espansione urbanistica.

Gli approfondimenti di 2^ e 3^ 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 Prata Camportaccio è stato classificato in Zona Sismica 3 e pertanto è tenuto a sviluppare anche gli approfondimenti di II° livello.

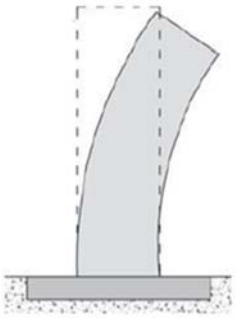
2. ANALISI SISMICA DI SECONDO LIVELLO

Il 2° livello si applica agli scenari qualitativi suscettibili di amplificazioni sismiche (litologiche Z4), interferenti con l'urbanizzato e/o con le aree di espansione urbanistica. Per mezzo di opportune indagini sismiche è possibile determinare la stima della risposta sismica dei terreni, in termini di valore di Fattore di Amplificazione Fa. Mediante i valori di Fa ottenuti è possibile zonare l'area di studio.

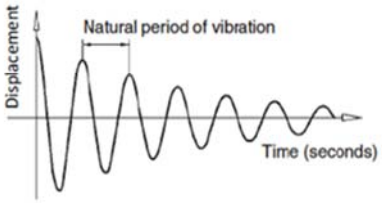
Il valore di Fa si riferisce agli intervalli di periodo tra 0,1-0,5 s e 0,5-1,5 s: tali intervalli rappresentano i periodi propri delle tipologie edilizie presenti più frequentemente nel territorio regionale.

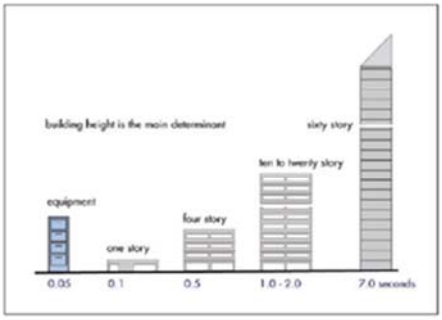
In particolare l'intervallo tra 0,1-0,5 s si riferisce a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide, mentre l'intervallo tra 0,5-1,5 s si riferisce a strutture più alte e più flessibili.

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, rigidezza 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.



(a) First mode of vibration





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 rigidezze;
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 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 e per le diverse categorie di suolo (Norme Tecniche per le Costruzioni 2018) soggette ad amplificazioni litologiche (B, C, D ed E) e per i due intervalli di periodo 0,1-0,5 s e 0,5-1,5 s.

ll 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
Prata Camportaccio	0.1 - 0.5	1.5	1.9	2.3	2.1
	0.5 – 1.5	1.7	2.5	4.4	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 analizzati, in primo luogo, i documenti presenti nella bibliografia dello Studio Geologico Depoli al fine di individuare le pratiche edilizie per le quali fossero state attuate indagini sismiche e di conseguenza è stato definito il piano delle indagini, per garantire l'omogeneità di copertura.

Sono state eseguite 71 indagini sismiche, in aggiunta alle 18 già note provenienti dalla bibliografia presente nello Studio Geologico.

Il piano di indagine è stato attuato mediante prove HVSR di sismica passiva a stazione singola; il posizionamento di ogni prova è stato definito cercando di ottenere una copertura uniforme delle zone urbanizzate (Tanno, Prata Camportaccio, San Cassiano, Malaguardia, Porrettina) e dei nuclei rurali a mezza costa (M. Pratella, M. Stoveno, M. Berlinghero, Dona, M. Bronzone, Lottano, Bovera, Nirola, Pradotti, Belvedere) del territorio comunale.

L'analisi congiunta dei risultati ha consentito la determinazione del modello sismico del sottosuolo in termini di velocità Vs, la definizione del parametro Vs,eq e l'individuazione della profondità del substrato con Vs>800 m/s.

Le schede relative ai singoli siti di prova contenenti gli elementi di identificazione, ubicazione e i risultati delle indagini effettuate sono riportate in allegato.

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.

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 (Vs) 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" (Vs) 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 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 Vs 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 Vs,eq e la relativa categoria del suolo di fondazione come esplicitamente richiesto dalle NTC 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).

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 Vs,eq si intende la media pesata delle velocità delle onde S negli strati nei primi metri di profondità dal piano di posa della fondazione, secondo la relazione:

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

dove:

hi è lo spessore dell'i-esimo strato (in m);

Vs,i è la velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato (in m/s);

N è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore h e dalla velocità Vs;

H è la 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.

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.

3.4. *STRUMENTAZIONE IMPIEGATA*

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.

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*

Si sono eseguite poi le seguenti operazioni:

- *La misura di rumore sismico nelle sue tre componenti per un intervallo di tempo di 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 rifrattore principale e di individuare una corrispondenza tra i valori di frequenza relativi alle discontinuità sismiche e i cambi litologici presenti nell'immediato sottosuolo.

Di seguito si riporta una tabella reperita in bibliografia che mette in relazione le frequenze caratteristiche del sito con la possibilità profondità del primo rifrattore.

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

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.

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 sopraindicato è stato definito un modello iniziale con "fit vincolato" sulle indicazioni del profilo di Vs, 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 Vs/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 Vs. 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, Vs,eq (in m/s)**, definite dall'espressione:**

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

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 Vs; 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.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30m, la velocità equivalente delle onde di taglio Vs,eq è definita dal parametro Vs30, 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 Vs_{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. METODO 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 Vs 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:

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

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*

Dai risultati delle analisi è possibile affermare che la maggior parte del territorio investigato è caratterizzato da sottosuolo di tipo B, ad eccezione di pochi settori con sottosuolo di tipo A (zona apicale della conoide dello Schiesone, Stoveno e parte dell'abitato rurale di Pratella di Prata).

I Fattori di Amplificazioni ottenuti per l'intervallo di periodo 0,1-0,5s, per i sottosuoli di tipo B, variano da 0,97 a 1,44. Per l'intervallo di periodo 0,5-1,5s invece i valori variano da 0,96 a 1,15.

I valori sono inferiori alle soglie fornite per il Comune di Prata Camportaccio per entrambi gli intervalli di periodi (anche il valore 1,44 nell'intervalli 0,1-0,5s risulta accettabile in quanto si discosta di un valore inferiore a 0,1 rispetto al valore soglia).

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.

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 negli archivi comunali sono stati analizzati e 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 sintetizzato nelle carte di analisi sismica 2^ livello periodo T1 e T2 con rappresentati i fattori di amplificazione Fa. (tavole T14 e T15).

Come prescritto dalla DGR sono state realizzate due carte dei fattori di amplificazioni relative agli intervalli di periodo 0,1–0,5 secondi e 0,5–1,5 secondi riferibili rispettivamente agli edifici e strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide e alle strutture più alte e più flessibili.

COMUNE	INTERVALLO	VALORI SOGLIA (dalla normativa)			
		Tipo suolo B	Tipo suolo C	Tipo suolo D	Tipo suolo E
Prata Camportaccio	0.1 - 0.5	1.5	1.9	2.3	2.1
	0.5 – 1.5	1.7	2.5	4.4	3.1

COMUNE	INTERVALLO	VALORI OTTENUTI DALLE INDAGINI			
		Tipo suolo B	Tipo suolo C	Tipo suolo D	Tipo suolo E
Prata Camportaccio	0.1 - 0.5	≤1.44	-	-	-
	0.5 – 1.5	≤1.15	-	-	-

Si rimanda alle schede tecniche delle indagini ed alle tavole allegate alla presente relazione per il dettaglio dei valori del fattore di amplificazione ottenuti per le singole indagini.

Colico, febbraio 2023

Depoli dott. Claudio

Geologo