

Dott. geol. Rosario Spagnolo GEOLOGIA TECNICA-IDROGEOLOGIA
V. Stradella, 35 – 46030 Bigarello (MN)
Tel & Fax 0376.262759 - 338.2949637 - E-mail: ro.spagnolo@tiscali.it



COMUNE DI POZZOLENGO

PROVINCIA DI BRESCIA

VARIANTE GENERALE AL P.G.T.

DGR n° IX/2616 del 30 novembre 2011
ORDINANZA n°3907/2010 e s.m.i.

**ADEGUAMENTO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA
IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PGT AL PIANO DI
GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI (P.G.R.A.)**

(D.G.R. 19 GIUGNO 2017 N° 10/6738)

Committente:
Comune di Pozzolenigo

Il Tecnico
Dott. Geol. Rosario Spagnolo

REV.	DATA	TITOLO
0	Ottobre 2018	Variante generale al P.G.T. Adeguamento della componente geologica al P.G.R.A.

INDICE DEI CAPITOLI

1 PREMESSA	3
2 NORMATIVA	5
3 METODOLOGIA DI STUDIO	7
4 METODOLOGIA DI INDAGINE.....	8
5 INDAGINI GEOGNOSTICHE E SISMICHE	9
STRUMENTAZIONE	12
ELABORAZIONE	13
6 SISMOTETTONICA	15
7 SISMICITA' STORICA.....	18
8 EFFETTI DI SITO	20
9 INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	23
10 ASSETTO GEOMORFOLOGICO IDROGEOLOGICO	24
11 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	28
12 TERREMOTO DI PROGETTO.....	30
13 PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE.....	34
14 RISULTATI DELLE PROVE MASW	38
15 ANALISI DEL RISCHIO SISMICO.....	47
16 VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI SISMICI	48
17 CARTA DELLA PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE (PSL) - DELLE AMPLIFICAZIONI TOPOGRAFICHE.....	56
18. PAI -PGRA	75
18.1 CARTA DEI VINCOLI	76
19 CARTA DI SINTESI.....	77
20 CARTA DELLA FATTIBILITA' GEOLOGICA.....	80

INDICE DELLE TAVOLE

Tav. 1: Carta PAI-PGRA

Tav. 2: Carta della pericolosità sismica locale (PSL)

Tav. 3: Carta dei vincoli

Tav. 4: Carta di sintesi

Tav. 5: Carta della fattibilità geologica

1 PREMESSA

L'Amministrazione Comunale di Pozzolengo, dovendo procedere all'aggiornamento del P.G.T., ha deliberato di affidare allo scrivente la definizione della componente geologica-sismica, secondo quanto disposto dalla D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011 "Aggiornamento dei criteri e indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio. Inoltre il presente documento viene redatto al fine di adeguare la componente geologica, idrogeologica e sismica al Piano di Gestione del Rischio Alluvioni, ai sensi della D.G.R. 19 giugno 2017 – n° 10/6738.

L'aggiornamento è stato predisposto in ottemperanza alle nuove normative regionali relative alla componente geologica, idrogeologica e sismica nella pianificazione territoriale (L.R. 12/05) e riguarda sostanzialmente l'aggiornamento della componente sismica.

La D.G.R. n° 2616 del 2011 introduce importanti innovazioni in fatto di redazione degli studi geologici e in particolare riguardo l'analisi della componente sismica e la cartografia di fattibilità.

Con l'aggiornamento sismico regionale, D.G.R. 2129 del 21 luglio 2014, il territorio comunale è stato inserito a rischio sismico 2 e non più 3. Sia la carta dei vincoli che la tavola della fattibilità geologica sono state aggiornate considerando il rischio sismico territoriale e il P.G.R.A.

Lo studio ha lo scopo di riconoscere a una scala sufficientemente grande (scala comunale o subcomunale) le condizioni locali che possono modificare sensibilmente le caratteristiche del moto sismico atteso o possono produrre deformazioni permanenti rilevanti per le costruzioni e le infrastrutture.

Tali studi sono di fondamentale importanza nella pianificazione al fine di:

- orientare la scelta di aree per nuovi insediamenti;
- definire gli interventi ammissibili in una data area;
- programmare le indagini e i livelli di approfondimento;
- stabilire gli orientamenti e le modalità di intervento nelle aree urbanizzate;
- definire le priorità di intervento.

La conoscenza dei possibili effetti locali indotti da un evento sismico su un territorio contribuisce a:

- scegliere opportunamente le aree in cui si dovranno posizionare le strutture di emergenza e gli edifici strategici;
- individuare le strutture e le infrastrutture che necessitano di specifiche analisi, per definire il grado di adeguamento necessario a evitarne il collasso in caso di sisma e, quindi, per non compromettere le loro funzioni di pubblica utilità.

Il presente documento vuol valutare:

- la risposta sismica locale;
- vulnerabilità dell'ambiente fisico;
- vulnerabilità del territorio.

Il documento geologico di supporto al P.G.T. del 2006, ha permesso di valutare la risposta sismica locale tenendo in considerazione la situazione geologica e geomorfologica che possono influenzare, in occasione di eventi sismici, la pericolosità sismica dell'area.

La direttiva regionale, definisce due fasi di analisi, da completarsi con tre diversi livelli di approfondimento. Il primo livello prevede un approccio di tipo qualitativo e costituisce la base per i successivi livelli di

approfondimento, il secondo livello consente sia una caratterizzazione semiquantitativa degli effetti di amplificazione sismica attesi sia l'individuazione degli ambiti suscettibili di amplificazione, mentre il terzo livello permette sia la caratterizzazione quantitativa degli effetti di amplificazione sismica attesi sia la quantificazione degli effetti di instabilità dei versanti e liquefazioni.

Per la predisposizione della carta sismica locale sono state considerate diverse indagini geognostiche pregresse ed effettuata un'indagine geofisica in diversi siti rappresentativi dei diversi scenari geologico-stratigrafici suscettibili di fenomeni di amplificazione sismica locale.

2 NORMATIVA

La Legge per il Governo del Territorio ha modificato l'approccio alla materia urbanistica passando da concetti pianificatori a concetti di Governo del Territorio, secondo il quale i diversi livelli di pianificazione si devono integrare armonicamente anche mediante l'approfondimento di singole tematiche territoriali in funzione della sostenibilità ambientale delle scelte pianificatorie da effettuare.

Con l'entrata in vigore della D.G.R. n° 2129 del 14 luglio 2014 (aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia), il territorio di Pozzolengo è stato inserito in zona sismica 2, caratterizzata da valori di a_g compresi tra 0.150 e 0.175 (accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni).

Le direttive emanate con D.G.R. n° 7/7868 del 25/01/02 e successive modifiche (D.G.R. n° n°7/13950 del 01/08/03 e s.m.i.) attribuiscono ai comuni nuovi compiti in materia di Polizia Idraulica che richiedono, in attuazione della L.R. 1/2000, l'individuazione del reticolo idrico minore e

delle relative norme per la predisposizione dei provvedimenti autorizzativi e concessori.

In attuazione della L.R. 1/2000 e secondo la D.G.R. n° 7/7868 del 25/01/02 il Comune di Pozzolengo ha predisposto l'Elaborato Tecnico Normativo del Reticolo Idrico Minore, ai sensi della D.G.R. X/4229 del 2015, lo stesso elaborato andrebbe aggiornato.

Con il Testo Unico per l'edilizia, che definisce con D.M. del 17/01/2018 le "NTC", e con la L.R. n° 33 del 2015 (Disposizioni in materia di opere e costruzioni...in zona sismica), è divenuto vigente l'obbligo di eseguire la progettazione in prospettiva sismica in tutte le aree classificate in zona sismica 1, 2 e 3.

In accordo con la normativa tecnica europea (Eurocodici, ed in particolare Eurocodice 8, Parte 5), la normativa nazionale in materia di progettazione in zona sismica (O.P.C.M. 3519/2006 e D.M. 17/01/2018) introduce una serie di criteri, regole e requisiti che i siti di costruzione ed i terreni in essi presenti devono soddisfare; tra cui quello di essere esenti dal rischio di liquefazione in caso di sisma.

Per l'aggiornamento del presente documento si è tenuto debito conto della seguente normativa:

- D.G.R. n° 2616 del 2011 – criteri ed indirizzi per la componente geologica..... del P.G.T.;
- D.G.R. n° 2129/2014 – aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia;
- L.R. n° 33 del 2015 – disposizioni in materia di opere e costruzioni...in zona sismica.
- D.G.R. n° 10/6738 del 10 giugno 2017 – adeguamento della componente geologica, idrogeologica e sismica del PGT al Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA)

3 METODOLOGIA DI STUDIO

Preme ricordare come il presente documento è stato aggiornato in modo particolare sia per l'adeguamento della componente geologica al PGRA che per la componente sismica, in quanto le tematiche idrogeologiche, idrauliche, geomorfologiche, litologiche, geotecniche, non comportano particolari modifiche.

Il precedente studio geologico (dicembre 2006) aveva sviluppato il rischio sismico con l'applicazione del primo e secondo livello di approfondimento, considerando la risposta sismica locale in relazione alle condizioni geologiche geomorfologiche, si era quindi proceduto alla stesura della carta della pericolosità sismica locale. Come riportato in premessa è stato effettuato lo studio di approfondimento sismico, aggiornando in relazione alla pericolosità sismica sia la tavola di sintesi che della fattibilità geologica. Inoltre, è stata rivista la carta sia dei vincoli, con la perimetrazione dei corsi d'acqua a rischio esondazione (PGRA), che la carta della fattibilità geologica, inserendo le aree a rischio alluvioni in classe di fattibilità 4.

Le classi di fattibilità sono state proposte attribuendo un valore ai poligoni riportati nella carta di Sintesi, in relazione non solo alle tematiche di carattere geologico ma considerando il reale rischio sia sismico, di ogni poligono individuato, che legato alle esondazioni delle del Reticolo secondario di pianura.

Per la prima volta la Carta di Fattibilità e le relative normative rappresentano il risultato conclusivo dello studio in oggetto con indicazione delle limitazioni d'uso di tipo geologico.

4 METODOLOGIA DI INDAGINE

Per le finalità dello studio in esame, si sono rese indispensabili nuove indagini geognostiche, oltre all'utilizzo delle informazioni ricavate da un vasto repertorio di prove pregresse.

La metodologia prevede tre livelli di approfondimento con grado di dettaglio crescente: i primi due livelli sono obbligatori (in funzione della zona sismica comunale) in fase di pianificazione, il terzo livello è obbligatorio in fase di progettazione sia quando con il secondo livello si dimostri l'inadeguatezza della normativa sismica nazionale per gli scenari di pericolosità sismica locale caratterizzati da effetti di amplificazione, sia per gli scenari di pericolosità sismica locale caratterizzati da effetti di instabilità, cedimenti e/o liquefazione.

- il primo livello è un livello propedeutico ai veri e propri studi di MS, in quanto consiste in una raccolta di dati preesistenti, elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee;
- il livello 2 introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee, utilizzando ulteriori e mirate indagini, ove necessarie, e definisce una vera carta di MS
- il terzo livello restituisce una carta di MS con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

Lo studio geologico realizzato dallo scrivente in occasione del P.G.T. (2006) ha sviluppato i diversi livelli di approfondimento, si è trovato che il terzo livello di approfondimento andava realizzato solo per le aree ricadenti in zona Z2a o Z2b (zone possibili effetti di cedimenti e/o liquefazioni). Lo studio è stato realizzato con indagini puntali e con lo sviluppo dell'analisi di primo e secondo livello di approfondimento, mentre il terzo livello dovrà

essere sviluppato solo per le aree individuate a pericolosità sismica Z2a e Z2b.

5 INDAGINI GEOGNOSTICHE E SISMICHE

Al fine di realizzare il presente studio si è reso indispensabile realizzare nuove indagini geognostiche e sismiche, oltre che all'utilizzo delle informazioni ricavate da studi pregressi.

Indagini eseguite:

- quattro prove penetrometriche CPTU con punta Gouda di dimensioni standard. Le prove sono state spinte a diverse profondità in funzione dei depositi intercettati.
- Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) per il calcolo della velocità di propagazione delle onde sismiche superficiali (V_s), utile per la classificazione del sottosuolo di fondazione prevista dalla normativa vigente.

Prove pregresse:

- prove penetrometriche CPT – CPTU;
- carotaggi, sondaggi e stratigrafie pozzi.

Di seguito vengono descritte le metodologie utilizzate per le indagini realizzate.

La Masw (Multichannel Analysis of Seismic Waves) è una metodologia di indagine geofisica che consente l'individuazione di frequenza, ampiezza, lunghezza d'onda e velocità di propagazione delle onde sismiche superficiali (principalmente onde di Rayleigh) generate artificialmente. L'analisi delle onde superficiali permette la determinazione delle velocità delle onde di taglio verticali (V_s) nei terreni al di sotto dello stendimento sismico.

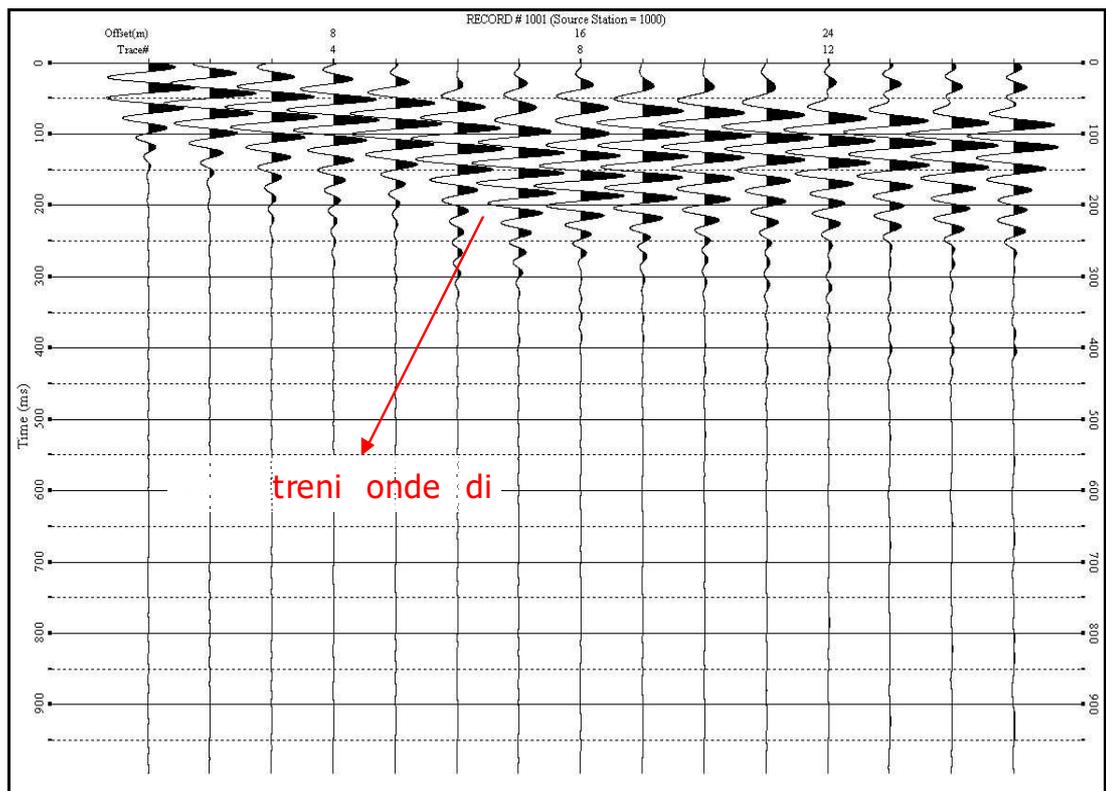
L'indagine è realizzata disponendo lungo una linea retta, a intervalli regolari, una serie di geofoni collegati ad un sismografo. Una fonte puntuale di energia, quale mazza battente su piastra metallica o cannoncino sismico, produce treni d'onda che attraversano il terreno con percorsi, velocità e frequenze variabili. Il passaggio del treno d'onda sollecita la massa inerziale presente nel geofono, l'impulso così prodotto viene convertito in segnale elettrico e acquisito dal sismografo. Il risultato è un sismogramma che contiene molteplici informazioni quali tempo di arrivo ai geofoni rispetto all'istante di energizzazione, frequenze e relative ampiezze dei treni d'onda.

La successiva elaborazione consente di ottenere un diagramma 1D (profondità/velocità onde di taglio) tramite modellizzazione ed elaborazione matematica con algoritmi capaci di minimizzare le differenze tra i modelli elaborati e i dati di partenza. Il diagramma, riferibile al centro della linea sismica, rappresenta un valor medio della sezione di terreno interessata all'indagine di lunghezza circa corrispondente a quella della linea sismica e profondità variabile principalmente in funzione delle caratteristiche dei materiali attraversati e della geometria dello stendimento.

Il metodo Masw sfrutta le caratteristiche di propagazione delle onde di Rayleigh per ricavare le equivalenti velocità delle onde di taglio (V_s), essendo le onde di Rayleigh prodotte dall'interazione delle onde di taglio verticali e delle onde di volume (V_p).

Le onde di Rayleigh si propagano secondo fronti d'onda cilindrici, producendo un movimento ellittico delle particelle durante il transito. Con i metodi di energizzazione usuali i due terzi dell'energia prodotta viene trasportata dalle onde di Rayleigh a fronte di meno di un terzo suddiviso tra le rimanenti tipologie di onde. Inoltre le onde di Rayleigh sono meno sensibili delle onde P e S alla dispersione in funzione della distanza e con un'attenuazione geometrica inferiore.

Onde di Rayleigh ad alte frequenze e piccole lunghezze d'onda trasportano informazioni relative agli strati più superficiali mentre quelle a basse frequenze e lunghezze d'onda maggiori interessano anche gli strati più profondi. In pratica il metodo Masw di tipo attivo opera in intervalli di frequenze comprese tra 5 e 70 Hz circa, permettendo di indagare una profondità massima variabile, in funzione delle caratteristiche dei terreni interessati, tra 30 e 50 metri.



Sismogramma -

La geometria della linea sismica ha influenza sui dati e quindi sul risultato finale, infatti la massima lunghezza d'onda acquisibile è circa corrispondente alla lunghezza dello stendimento; mentre la distanza tra i geofoni, solitamente compresa tra 1 e 3 metri, definisce la minima lunghezza d'onda individuabile evitando fenomeni di aliasing.

Nella campagna di indagine del lavoro in oggetto sono stati eseguiti n. 3 stendimenti di 24 geofoni con spaziatura tra i geofoni di 2,0 metri per una lunghezza di ogni linea sismica di 46,0 metri. L'energizzazione è stata

eseguita a 2,0 e 10,0 metri dal primo geofono. Per ridurre il rumore di fondo e migliorare la qualità complessiva dei sismogrammi sono stati sommati più tiri.

I siti di indagine sono collocati in aree antropizzate o scarsamente antropizzate, non caratterizzate da particolari fonti di rumore antropico in grado di interferire in modo significativo con il segnale sismico.

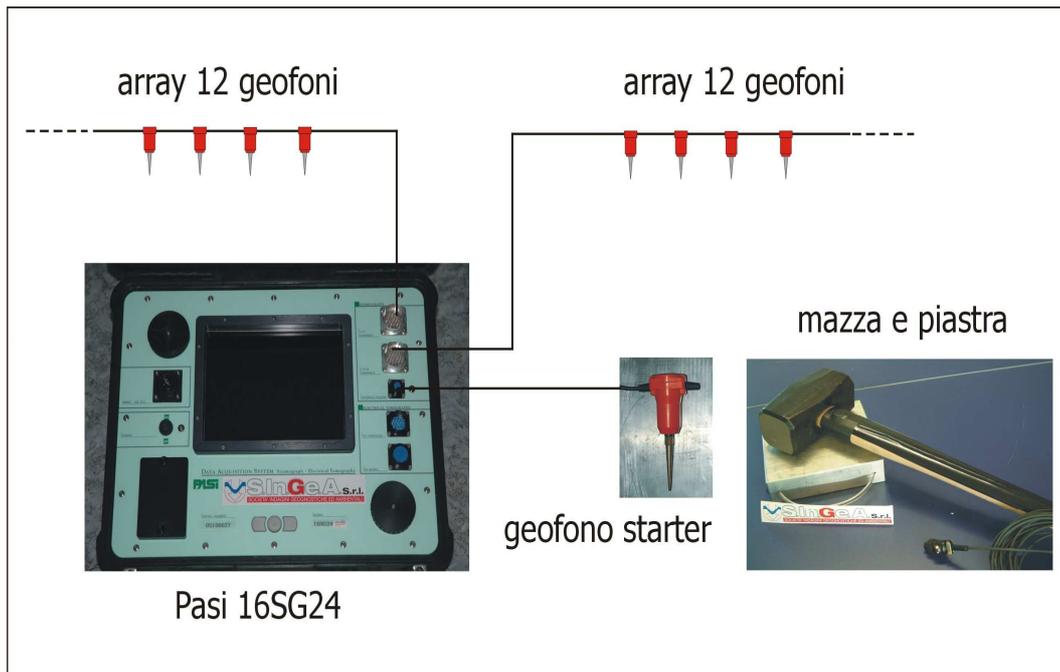
STRUMENTAZIONE

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un sismografo multicanale "PASI 16SG24", dotato di 24 geofoni verticali Oyo Geospace con frequenza propria di 4,5 Hz, collegati allo strumento tramite cavi elettrici schermati.

Lo strumento è in grado di gestire l'acquisizione simultanea su 24 canali e di rilevare l'istante di energizzazione (tempo zero) tramite geofono starter. È inoltre equipaggiato di software proprietario in grado di gestire tutte le operazioni di campagna attraverso le seguenti fasi:

- impostazione numero di canali e metodologia di indagine;
- impostazione frequenza e lunghezza di campionamento;
- selezione entità dell'amplificazione del segnale per ogni canale;
- impostazione filtraggi delle frequenze indesiderate;
- visualizzazione sismogramma con misura dei tempi di arrivo;
- esecuzione operazioni di somma e sottrazione di ulteriori sismogrammi;
- memorizzazione di tutti i dati relativi all'acquisizione.

Per l'energizzazione è stata utilizzata una mazza del peso di 8 kg e una piastra di battuta di alluminio.



ELABORAZIONE

L'elaborazione è stata effettuata con un software dedicato (*Winmasw 4.3 – Eliosoft*) in grado di gestire le fasi di preparazione, analisi, modellizzazione e restituzione finale.

La fase iniziale consiste nel filtraggio del segnale sismico per eliminare il “rumore” ed eventuali frequenze indesiderate. Il software permette di visualizzare il sismogramma nel dominio spazio-tempo e visualizzando i grafici frequenza-ampiezza anche per le singole tracce. Sono disponibili varie modalità di gestione del segnale, le cui principali sono i filtri “passa basso”, “passa alto”, “passa banda”, “taglia banda”, il “muting” e l'ACG. Inoltre tramite le curve di attenuazione delle onde superficiale è possibile valutare con maggior precisione la qualità dei dati acquisiti.

La fase successiva consiste nel calcolo della curva di dispersione, visualizzata tramite diagramma frequenza-numero d'onda con appropriata scala cromatica dell'ampiezza.

Utilizzando la curva di dispersione si procede ad individuare la curva della velocità di fase apparente del modo fondamentale e, ove possibile, dei modi superiori.

La fase di inversione prevede una modellizzazione monodimensionale che consente di determinare un profilo di velocità delle onde di taglio V_s in funzione della profondità. L'elaborazione avviene tramite l'applicazione di procedimenti calcolo e algoritmi genetici di inversione (global-search methods), che gestiscono all'intero di un "spazio di ricerca", modelli caratterizzati da parametri velocità di taglio (V_s) e spessori degli strati. Altri parametri previsti dal modello sono il coefficiente di Poisson e la velocità delle onde di volume (V_p) che, assieme a spessore degli sismostrati e relative V_s , possono venire modificati anche manualmente. Tramite interazioni successive si ottiene un modello di inversione in grado di far coincidere con la migliore approssimazione possibile la curva di dispersione elaborata nella fase precedente e quella modellizzata. Viene inoltre restituita una stima dell'attendibilità (deviazione standard) del modello proposto ottenuta con tecniche statistiche.

Avendo a disposizione informazioni addizionali, quali ad esempio stratigrafie di sondaggio, analisi granulometriche, di densità, prove CPT ecc, è possibile impostare un modello geologico\geofisico con il quale definire parametri quali lo spessore degli strati, la velocità delle onde P stimata e coefficiente di Poisson. Tale modello consente una più accurata inversione dei dati di campagna e di conseguenza una migliore definizione della sismostratigrafia del sito.

In conclusione viene restituito un diagramma (1D) delle velocità delle onde di taglio (V_s) in funzione della profondità, con relativa tabella, calcolo delle V_{s30} e correlazione al tipo di terreno, come da normativa.

6 SISMOTETTONICA

L'istituto di Geofisica e Vulcanologia ha prodotto una zonizzazione sismogenetica del territorio nazionale che tiene conto dell'analisi cinematica degli elementi geologici, cenozoici e quaternari coinvolti nella dinamica delle strutture litosferiche profonde e della crosta superficiale.

La sismicità di questa zona è legata alla tettonica molto complessa del margine padano settentrionale. Le sorgenti sismogenetiche dovrebbero trovarsi ad una profondità compresa tra 5 e 15 km, in corrispondenza dello scollamento tra il basamento cristallino e la sovrastante copertura sedimentaria.

Nel settore settentrionale della pianura padana è presente il sistema di sovrascorrimenti S-vergenti che costituiscono la continuazione in pianura delle Prealpi Lombarde. Nella fascia meridionale si ha, invece, un pronunciato sistema di embricazione N-vergente che costituisce l'avanfossa dell'Appennino settentrionale.

I due sistemi entrano in collisione nella parte mediana della pianura padana; il fronte settentrionale è inquadrabile all'interno dei sistemi di deformazione del Miocene mediosuperiore, quello meridionale è essenzialmente Pliocenico. A partire dalla fine del Pleistocene inf. entrambi i margini del Bacino Padano sono in sollevamento a seguito alla formazione di un bacino flessurale più simmetrico.

L'evoluzione geologica dell'area risulta connessa allo sviluppo della catena alpina prima e di quella appenninica nella fase successiva, costituendo l'avanfossa dei due sistemi. Dal Pliocene ad oggi tale depressione, dal profilo asimmetrico, con minore inclinazione del lato settentrionale, è stata

progressivamente colmata da sedimenti dapprima marino - transizionali e quindi strettamente continentali.

Strutturalmente la monoclinale pedealpina (Pedealpine Homocline) si presenta come un settore prevalentemente omoclinalico limitato a nord dal fronte di sovrascorrimento sudalpino ed a sud dal fronte di accavallamento esterno dell'Appennino sepolto.

A causa del suo comportamento prevalentemente rigido la monoclinale padana non sembra essere stata interessata dalle deformazioni legate alla fase parossistica terziaria sebbene alcuni ricercatori abbiano riconosciuto blandi fenomeni di compressione esercitati dal Fronte Appenninico.

Ricerche recenti hanno evidenziato un sistema di faglie dirette con orientamento est-ovest con deboli segni di attività anche nel Quaternario. Tali disgiunzioni si possono inquadrare in un prevalente fenomeno di tilting innescato dal forte gradiente di subsidenza.

Dati AGIP rielaborati hanno evidenziato come dal Pliocene ad oggi la depressione Padana sia stata progressivamente colmata, denotando un'accentuata subsidenza.

Per quanto concerne l'evoluzione tettonica a partire dal Pliocene inferiore fino a tutto il Pleistocene si evidenzia una lenta subsidenza generalizzata non compensata dalla sedimentazione.

Nell'intervallo successivo (Intervallo IV - 700.000-18.000 anni) si assiste ad un progressivo riempimento del bacino ed il motivo tettonico predominante continua ad essere l'abbassamento generalizzato di tutta l'area.

Il sistema Verona-Brescia ricade a sud delle Alpi meridionali, mostrando un assetto tettonico molto articolato, talora complesso,

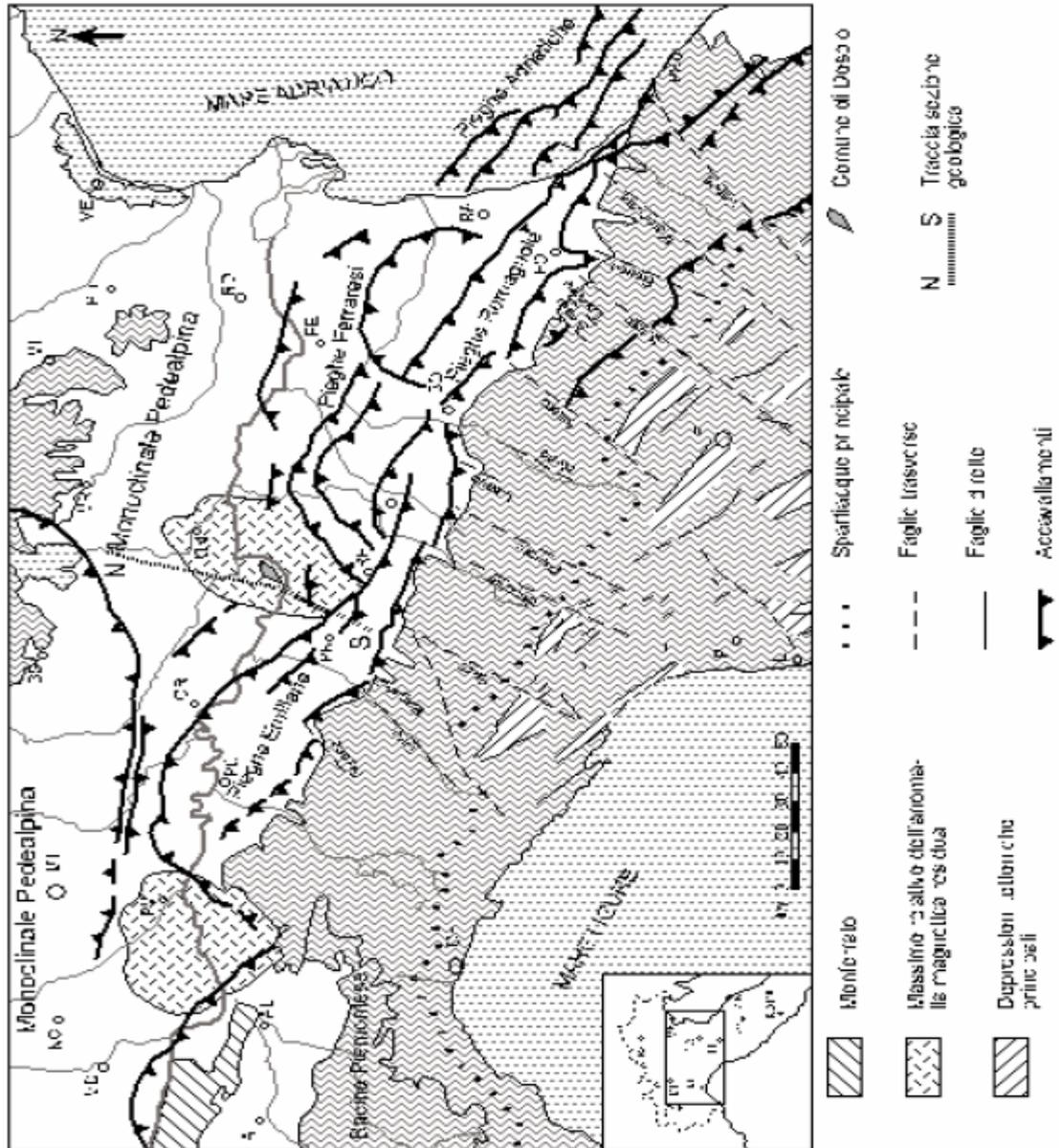
caratterizzato in genere da pieghe, pieghe - faglie e sovrascorrimenti vergenti verso sud.

Si tratta di un insieme di strutture dislocate in tre diverse direzioni e culminanti nel cosiddetto Gomito del Garda:

- sistema delle Giudicarie: orientato NNE-SSO nella zona del Monte Baldo e ENE-OSO più a sud;
- sistema della Val Trompia: orientato ONO-ESE in prossimità del bordo occidentale del Lago di Garda e E-O allontanandosi dal lago;
- faglia di Verona: orientata ONO-ESE al bordo meridionale dei Lessini veronesi.

La distribuzione degli epicentri dei terremoti indica l'esistenza di più centri sismici, probabilmente situati in corrispondenza degli svincoli trasversali alle strutture della Val Trompia e della faglia di Verona.

Per quanto riguarda il comune di Pozzolengo, il territorio risulta inserito nella zona collinare i cui depositi appartengono al Sistema Morenico Frontale del Garda, legati all'ultima glaciazione; la zona pedecollinare, o alta pianura, costituita da depositi fluvioglaciali ciottoloso-ghiaioso-sabbiosi rimane nella parte sud del territorio collinare.



Struttura tettonica relativa all'Appennino settentrionale e all'avanfossa padano adriatica (AGIP 1983)

7 SISMICITA' STORICA

Gli eventi del 3 gennaio 1117 e del 25 dicembre 1222 costituiscono i massimi terremoti storici avvenuti lungo il margine pedalpino bresciano-veronese. Sono ambedue sostanzialmente caratterizzati da:

- attribuzione nei cataloghi macrosismici nazionali di elevate intensità epicentrali, fino all'XI grado MCS;

- amplissima diffusione delle fonti narrative, in grande maggioranza molto posteriori;
- estese aree di risentimento, specialmente per il terremoto del 1117.

In particolare, per il terremoto del 1117, l'epicentro è stato ipotizzato 10 - 15 km a SE di Verona, in corrispondenza della zona della pianura veronese maggiormente danneggiata, anche in relazione ad altre manifestazioni sismiche, come quelle del 25/04/1907 e del 04/03/1963; in questa zona ci sono segnalazioni antecedenti all'anno 1000. L'intensità epicentrale è stata valutata non superiore al IX grado MCS, con punte massime a Ronco all'Adige che possono essere cautelativamente ipotizzate del X grado MCS.

Il terremoto del 1222 ebbe l'epicentro compreso tra Brescia ed il basso Lago di Garda, manifestandosi con intensità compresa tra il IX ed il X grado MCS.

I campi macrosismici dei citati terremoti sono molto complessi con aree di risentimento che si estendono a forte intensità lungo i margini pedemontani alpino (zona Verona-Brescia) ed appenninico (Modena-Parma), e a medio-bassa intensità nelle zone intermedie (comprese tra i margini).

Il campo macrosismico del terremoto del 1117 si è, infatti, manifestato del IX grado MSC nel settore veronese, del VIII grado MSC nel settore emiliano, di Piacenza, Parma, Reggio Emilia e Modena, nel settore lombardo di Mantova e nel settore veneto di Vicenza e Rovigo, del VII grado MSC nella bassa pianura parmense, cremonese e mantovana.

Il campo macrosismico del terremoto del 1222 si è, invece, manifestato del IX - X grado MSC nel settore bresciano, del VIII grado MSC nel settore emiliano di Modena, nel settore lombardo tra il Lago di Garda e il Lago d'Iseo e nel settore veneto di Verona, del VII grado MSC nella bassa pianura modenese, mantovana e bolognese.

Esempi più recenti di terremoti che hanno mostrato un campo macrosismico analogo a quello degli eventi del 1117 e del 1222 sono numerosi, tra cui: terremoti del 26/2/1885 (VI grado nella zona di Reggio Emilia, V grado in quella di Verona e III grado in quella intermedia), del 12/3/1832 (V - VI grado nei pressi di Parma e Verona e IV grado nella zona intermedia), del 29/4/1911 (V grado nei pressi di Parma, III grado vicino Verona e non risentito nella zona intermedia), del 4/7/1834 (VII-VIII grado nel versante dell'appennino parmense, IV grado nel margine pedealpino di Brescia-Verona e III grado nella zona intermedia).

8 EFFETTI DI SITO

Il fenomeno di vibrazione prodotto da un evento sismico in un sito è il risultato della propagazione a distanza dalla sorgente di onde di volume che in profondità attraversano ammassi di roccia lapidea e in superficie interessano formazioni di terreni sciolti. I caratteri del moto sismico in un determinato sito dipendono quindi sia dal meccanismo focale del terremoto sia dalle proprietà dei materiali interessati dalla propagazione delle onde sismiche. La varietà dei meccanismi di generazione e propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo e la natura granulare e multifase dei terreni rendono dunque estremamente difficoltosa la caratterizzazione del comportamento meccanico di un deposito soggetto ad azioni sismiche.

Innanzitutto il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalla complessa interazione tra le onde sismiche e le particolari condizioni locali (caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno e ammassi rocciosi e proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono). Questa interazione determina una specifica *risposta sismica locale* (insieme delle modifiche in termini di ampiezza, frequenza e durata che un moto

sismico subisce propagandosi attraverso un deposito di materiali sciolti e degli spostamenti indotti dal moto ondoso nel deposito stesso) rispetto a quella che si avrebbe in un sito di riferimento ideale (rigido con piano campagna orizzontale). Siti con differenti condizioni locali manifestano quindi differenti risposte sismiche ad uno stesso terremoto e uno stesso sito risponde in maniera diversa a terremoti differenti.

Le modifiche del moto sismico prodotte dalle condizioni locali vengono indicate come effetti di sito. Gli effetti di sito possono riguardare sia i terreni a comportamento sismico stabile, i quali sotto le sollecitazioni dinamiche si mantengono lontani dalla rottura e sono soggetti a deformazioni permanenti limitate, sia i terreni a comportamento instabile, che viceversa giungono a rottura e si deformano permanentemente in maniera significativa. Nel primo caso si parla di effetti stratigrafici (amplificazione sismica dovuta a fenomeni di risonanza tra onde sismiche e terreni) e topografici (modifiche del moto sismico causate da fenomeni di focalizzazione delle onde a causa delle irregolarità del terreno) e risulta oggetto di studio l'entità dell'amplificazione che le onde possono subire propagandosi verso la superficie, ma non il grado di sicurezza rispetto ad una eventuale condizione di rottura.

Nel caso di terreni a comportamento instabile, per effetti di sito si intendono invece i cedimenti per liquefazione ed addensamento ed i fenomeni di instabilità dei versanti, e il compito preminente della verifica sismica risulta essere la valutazione del grado di sicurezza nei riguardi della rottura. La previsione delle modificazioni locali del moto sismico e degli spostamenti e deformazioni che il passaggio delle onde sismiche può indurre nel terreno risulta perciò di particolare interesse per la progettazione e la verifica sismica delle opere dell'ingegneria civile.

In particolare, relativamente ai terreni a comportamento instabile, il termine liquefazione indica una considerevole o addirittura totale riduzione della resistenza a taglio delle terre sabbiose sature con conseguente accumulo di deformazioni plastiche permanenti. La causa eccitatrice è da ricondurre ad azioni di carattere dinamico, quali quelle indotte dai terremoti che, agendo in condizioni non drenate, determinano l'accumulo di sovrappressioni interstiziali positive ed una conseguente riduzione della tensione media efficace. La riduzione della resistenza può rappresentare solo una condizione temporanea, seguita da un successivo recupero, o può indurre nel terreno una condizione di collasso generalizzato e definitivo. Quando il fenomeno di liquefazione è innescato, la riduzione di capacità portante ed il prodursi di deformazioni significative sono funzioni di diversi parametri, tra cui lo spessore e l'estensione areale dello strato liquefatto, lo spessore del materiale non soggetto a liquefazione che ricopre lo strato liquefatto, la pendenza del terreno e l'eventuale prossimità di una superficie libera.

Per i terreni a grana grossa sopra falda, per i quali è possibile escludere l'evenienza che si verifichino fenomeni di liquefazione, possono comunque verificarsi fenomeni di addensamento del terreno per effetto delle vibrazioni sismiche e conseguenti cedimenti e deformazioni permanenti. Allo stesso modo in depositi di terreni a grana fine molto soffici e plastici durante uno scuotimento sismico è possibile prevedere un consistente incremento delle pressioni interstiziali e quindi conseguenti cedimenti di riconsolidazione in fase post-sisma dovuti alla dissipazione delle sovrappressioni accumulate.

9 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il territorio comunale si colloca all'estremità centro orientale della provincia di Brescia, al limite con la provincia di Mantova e Verona, che si estende tra le cerchie moreniche originate nel Quaternario, a seguito del ritiro dei ghiacciai alpini.

La genesi geologica del territorio comunale è riferibile alle numerose avanzate glaciali che nel Quaternario hanno interessato l'area alpina e padana, con il protendersi dei ghiacciai fino alle zone di pianura, depositandovi sedimenti che con il ritiro dei ghiacci, durante le fasi climatiche più miti, rimangono a testimonianza degli eventi che li hanno generato.

Il territorio di Pozzolengo in particolare è riferibile alle numerose avanzate glaciali e ritiri (Quaternario), determinando l'anfiteatro morenico. Le cerchie moreniche segnano le diverse fasi di espansione dei ghiacciai; da un punto di vista cronostratigrafico le cerchie moreniche possiedono in linea generale età crescente allontanandosi dalla linea di riva del Garda.

L'ultima avanzata glaciale quaternaria, avvenuta nella fase terminale del pleistocene superiore, ha creato il sistema di cerchie moreniche presente nel comune di Pozzolengo.

Durante lo scioglimento delle masse glaciali si originavano torrenti fluvio-glaciali che smantellavano i cordoni morenici già formati e deponevano il materiale nelle depressioni rimaste entro le diverse cerchie, i materiali depositati di natura glaciale (till), per nulla o scarsamente selezionati da parte delle acque, costituiti da un miscuglio eterogeneo di massi, ghiaia, sabbia e sedimenti fini; a questi si contrappongono i depositi fluvio-glaciali che si presentano geometricamente più ordinati e sottoposti ad una cernita dimensionale più o meno consistente grazie all'azione trattiva delle acque.

Tra i rilievi morenici sono presenti ampi ripiani, delimitate da scarpate, che corrispondono a terrazzi di Kame formati durante le fasi di ritiro del ghiacciaio. Il dilavamento del fronte delle masse di ghiaccio ad opera delle acque di fusione, ha determinato l'accumulo di materiali a contatto con le stesse masse glaciali.

In alcuni casi il modellamento dei cordoni morenici è avvenuto ad opera degli scaricatori fluvio-glaciali, in grado di smantellare parzialmente i rilievi morenici precedentemente depositi. Talora le cerchie moreniche appaiono discontinue a seguito dell'azione di sfondamento praticata dagli stessi corsi d'acqua fluvio-glaciali.

È preponderante il ritrovamento, nel territorio comunale, di depositi incoerenti di natura glaciale, organizzati morfologicamente in cordoni morenici, terrazzi di kame e piane retromoreniche.

10 ASSETTO GEOMORFOLOGICO IDROGEOLOGICO

I lineamenti morfologici sono la diretta conseguenza sia delle glaciazioni sia dall'azione erosiva provocata dai corsi d'acqua.

Una delle espressioni morfologiche dei depositi glaciali è costituita dai cordoni morenici, solitamente arcuati ed allungati, indicativi di una fase di sosta del fronte del ghiacciaio. Un esempio di cordone è il rilievo che va da Monte degli Olivi fino al Monte Torricelle, passando per l'abitato di Pozzolengo e le località Bosco e Rondotto, tale corpo morenico è interrotto dalla incisione della Fossa Redone. Un altro rilievo morfologico è quello su cui sorge C.na Facchinetto e il rilievo a nord di C.na Campagnola.

Vengono riscontrate delle morfologie subpianeggianti o con blande ondulazioni che rappresentano delle terrazze di Kame, formatesi nelle zone antistanti la fronte glaciale.

Altre unità geomorfologiche (depositi fluviali, conoidi di deiezione, fasce di detrito, ecc.) rivestono importanza secondaria e funzione marginale nel processo morfogenetico complessivo.

Il rilievo di deposito glaciale rappresenta l'elemento geomorfologica dominante ed è costituito da un ammasso di depositi di origine morenica di potenza superiore ai 100 m; la formazione è riferibile a due fasi Riss e Wurm.

L'area studiata ricade nel complesso di depositi glaciali; la morena wurmiana presenta granulometria più fine (spesso con netta prevalenza dei termini limo-argillosi sugli elementi grossolani) la morena rissiana risulta molto più grossolana (fino a massi).

Il territorio, in relazione alle aree morfogenetiche omogenee, è stato suddiviso in diverse Unità e Sottunità di Paesaggio che sono:

CORDONI MORENICI

Si caratterizzano per la presenza di versanti con acclività variabili (5% - 70%) e superfici subpianeggianti. Molti versanti presentano gradonature per un maggior utilizzo nella coltivazione dei luoghi, mentre le superfici piatte, localizzate sulle creste moreniche, sono di origine antropica.

TERRAZZI FLUVIOGLACIALI

Aree costituite da blande ondulazioni appartenenti alle zone interne delle cerchie moreniche; tali superfici costituiscono il 10% del territorio. La natura delle superfici è alluvionale e fluvio-glaciali, i terreni vengono utilizzati per l'attività agricola.

PIANURA DI ROVEGLIA

Superficie con bassa pendenza costituita da depositi colluviali, fluvio-glaciali o di conoide.

FONDOVALLE

Aree a morfologia piatta formate da depositi trasportati dalle acque lungo gli scaricatori fluvioglaciali; tale genesi ha conferito la tipica morfologia pianeggiante. Successivamente le piane fluvioglaciali sono state incise dall'azione erosiva dei corsi d'acqua costituendo l'attuale reticolo drenante.

PALUDI

Aree molto depresse morfologicamente, rappresentano cavità dovute all'attività estrattiva della torba e costituenti conche lacustre caratterizzate da fenomeni di ristagno idrico.

Nella carta geomorfologica sono state riportate le evidenze morfologiche del territorio studiato.

Il territorio comunale appartiene al bacino del fiume Mincio, la parte nord che va dalla torre monumentale di S. Martino della Battaglia sino a V.la Belvedere ha un drenaggio indirizzato verso nord, mentre la restante parte del territorio è drenata dalla fossa Redone

La struttura del sistema idrogeologico è contraddistinta da una bassa permeabilità in generale e soprattutto in senso verticale, per la presenza di livelli impermeabili che fungono da ripartitori delle falde.

La struttura idrogeologica generata dal sovrapporsi dei materiali morenici, di contatto e fluvioglaciali, si presenta discontinua trasversalmente alla struttura arcuata dell'anfiteatro morenico.

I depositi morenici discontinui in superficie sono disposti in strutture a catino, accresciute via via all'interno una dell'altra, ma separate parallelamente da depositi di contatto glaciale di spessore estremamente variabile. Questi depositi in profondità danno luogo ad acquiferi con capacità produttive estremamente diverse, infatti, il Till glaciale, in particolare nella fascia più interna del morenico gardesano, è caratterizzato da forti contenuti in limo ed è spesso compattato dal ghiacciaio, i depositi di contatto, ed ancor

più quelli fluvioglaciali, essendo legati ad acque che hanno cernito i materiali, sono caratterizzati da depositi che possono costituire acquiferi estremamente produttivi. Si possono distinguere, nel settore morenico, acquiferi superficiali generalmente discontinui lateralmente e strettamente collegati alle precipitazioni.

Gli acquiferi produttivi con buona protezione sono localizzati a profondità superiori e risultano in pratica isolati dalle falde superficiali da successioni a granulometria fine.

L'alimentazione delle falde profonde è determinata da afflussi sotterranei provenienti da aree distali con direzioni da nord verso sud.

La ricarica degli acquiferi profondi risulta più lenta di quelli superficiali non risentendo immediatamente delle precipitazioni. Non è comunque raro che lenti di Till morenico grossolano abbiano buona produttività.

In relazione alle unità litologiche, contenenti i corpi idrici sotterranei, è possibile schematizzare i valori di soggiacenza:

- i depositi fluvioglaciali presenti nelle valli intramoreniche sono sede di falde freatiche superficiali continue e con profondità variabile a seconda delle zone. La piezometrica è bassa mentre la soggiacenza è in media di pochi metri;
- i depositi morenici sono sede di falde sospese a profondità variabili di pochi m dal p.c. essendo alimentate dalle precipitazioni;
- il sistema acquifero multistrato circolante nei depositi morenici, è caratterizzato da falde semiartesiane localizzate in orizzonti ghiaioso-sabbiose confinate in successioni limose-argillose.

11 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Grazie ad indagini dirette, realizzate dallo scrivente, in occasione del P.G.T. che per progetti privati, è stato possibile effettuare una caratterizzazione geotecnica di massima che tiene conto della variabilità dei parametri geotecnici per la presenza di eterogeneità litostratigrafica riscontrata sull'intero territorio comunale.

Dall'assetto stratigrafico e dalla parametrizzazione geotecnica dei terreni indagati si evidenziano dei depositi che si caratterizzano per una granulometria assai eterogenea, mal classati, con clasti formati da blocchi, ciottoli, ghiaie e sabbie immerse in matrice limoso-argillosa. I depositi, in relazione all'età di formazione ed ai carichi litostatici, presentano un elevato grado di addensamento e sovraconsolidazione.

Dall'assetto stratigrafico e dalla parametrizzazione geotecnica dei terreni indagati si evidenzia una serie di livelli con proprietà geomeccaniche differenti, e con spessori alquanto variabili in senso verticale e areale.

Vengono di seguito riportati i parametri geotecnici degli orizzonti stratigrafici individuati:

ORIZZONTE TORBOSO - La litozona viene individuata nelle zone paludose con potenza variabile, i depositi palustri organici in molti casi sono misti ad argille. Il livello nel complesso presenta bassissime caratteristiche di resistenza al taglio ed alti indici di compressibilità; i parametri geotecnici che caratterizzano i depositi sono:

- γ_n (peso di volume naturale) = $0.4 \div 0.65$ t/m³;
- c_u (coesione non drenata) = 0.1 Kg/cm²;
- E_u (modulo di deformazione non drenato) = $5 \div 8$ Kg/cm²;
- R_p (resistenza penetrometrica di punta) = $2 \div 4$ Kg/cm².

ORIZZONTE ARGILLOSO - L'orizzonte si caratterizza anche per la presenza di sostanza organica, la litozona presenta uno spessore che varia tra 1 e 4 m circa.

I parametri geotecnici presentano i seguenti range medi di variabilità:

- γ_n (peso di volume naturale) = $0.80 \div 1.85 \text{ t/m}^3$;
- c_u (coesione non drenata) = $0.25 \div 0.4 \text{ Kg/cm}^2$;
- E_u (modulo di deformazione non drenato) = $15 \div 50 \text{ Kg/cm}^2$;
- R_p (resistenza penetrometrica di punta) = $6 \div 12 \text{ Kg/cm}^2$.

ORIZZONTE LIMO-ARGILLOSO - La litozona in esame presenta spessori che vanno da 0.8 a 3 m, è stata individuata in diverse tabelle riportate in appendice; il livello individuato alle varie profondità presenta caratteristiche geomeccaniche differenti.

I parametri geotecnici che caratterizzano la litozona sono:

- γ_n (peso di volume naturale) = $0.85 \div 1.85 \text{ t/m}^3$;
- M_0 (modulo di deformazione edometrico) = $60 \div 80 \text{ Kg/cm}^2$;
- c_u (coesione non drenata) = $0.5 \div 0.7 \text{ Kg/cm}^2$;
- R_p (resistenza penetrometrica di punta) = $20 \div 35 \text{ Kg/cm}^2$.

ORIZZONTE SABBIOSO-LIMOSO - L'orizzonte alle varie profondità si caratterizza per percentuali variabili di limo, pertanto i parametri geotecnici riscontrati presentano valori differenti.

Le prove penetrometriche statiche C.P.T. hanno permesso di rilevare valori della resistenza di punta R_p mediamente compresi tra 60 e 100 Kg/cm^2 , cui è possibile associare valori di $m_v \approx 0,001 \div 0,003 \text{ cm}^2/\text{Kg}$.

I valori riscontrati nelle tabelle sono:

- $\gamma' =$ peso dell'unità di volume (efficace) del terreno = $0,9 \div 1,85$ t/m³;
- $D_r =$ densità relativa = $60\% \div 70\%$;
- $M_o =$ modulo di deformazione edometrico = $120 \div 180$ Kg/cm²;
- $\phi =$ angolo di attrito interno efficace = $30^\circ \div 32^\circ$.

ORIZZONTE SABBIOSO-GHIAIOSO – La litozona presenta ottimi parametri geotecnici, i valori riscontrati sono rassicuranti sia sotto l'aspetto della pressione ammissibile sia per i cedimenti attesi; i depositi presentano alti valori di resistenza al taglio e bassi indici di compressibilità

Le prove penetrometriche statiche C.P.T. hanno permesso di rilevare valori della resistenza di punta R_p mediamente compresi tra 100 e 200 Kg/cm².

I valori riscontrati nelle tabelle sono:

- $\gamma' =$ peso dell'unità di volume (efficace) del terreno = $0,9 \div 1,85$ t/m³;
- $D_r =$ densità relativa = $70\% \div 90\%$;
- $M_o =$ modulo di deformazione edometrico = $200 \div 300$ Kg/cm²;
- $\phi =$ angolo di attrito interno efficace = $32^\circ \div 35^\circ$.

12 TERREMOTO DI PROGETTO

Un moto sismico è abitualmente rappresentato in funzione del tempo attraverso un accelerogramma. Il segnale viene registrato e digitalizzato dalle stazioni sismiche lungo tre direzioni ortogonali (due orizzontali e una verticale) con un passo regolare di campionamento. Dal segnale accelerometrico, mediante filtraggio ed integrazione numerica, si ottengono gli andamenti nel tempo di velocità e spostamento per ciascuna componente del moto. Ampiezza massima, durate e contenuti in frequenza del segnale

variano in relazione sia all' energia del terremoto e ai meccanismi di sorgente, sia alla distanza ed alle condizioni locali del sottosuolo del sito di registrazione. I parametri più rappresentativi per caratterizzare l'ampiezza di un moto sismico sono i valori di picco di accelerazione, velocità e spostamento ed il contenuto in frequenza, analiticamente rappresentabile attraverso lo spettro di Fourier (un segnale definito nel tempo viene decomposto in una serie di armoniche con ampiezza e fase variabili in funzione della frequenza). Le caratteristiche energetiche di un sisma sono invece ben rappresentate dalla magnitudo, grandezza espressa in funzione del logaritmo dell'ampiezza di un parametro rappresentativo del moto, come l'accelerazione di picco, ad una distanza epicentrale di riferimento. Convenzionalmente i sismi con magnitudo inferiore a 3 sono denominati "microtremori", quelli con valori compresi tra 3 e 5 "terremoti deboli", mentre i terremoti forti (strong motion) sono caratterizzati da magnitudo superiori a 5. Per moto sismico di riferimento si intende il moto causato nel sito in esame dall' evento atteso, in relazione ad un'adeguata analisi di pericolosità. La determinazione delle azioni sismiche di riferimento per il progetto di un'opera in condizioni sismiche è regolata da alcuni documenti ufficiali nazionali:

- le mappe di pericolosità sismica nazionale che individuano le principali zone sismogenetiche a scala subregionale e sono espresse in termini di accelerazioni massime attese o di intensità spettrali (parametri valutati sia in base alla sismicità storica sia mediante studi con modelli sismotettonici avanzati);
- la zonazione sismica del territorio nazionale che stabilisce, sulla base della mappa di pericolosità nazionale, i valori di accelerazione massima su affioramento rigido per le zone sismiche a cui è stato assegnato ciascun comune del territorio nazionale.

La normativa tecnica nazionale ed internazionale per la progettazione antisismica degli edifici e delle fondazioni ed opere di sostegno. In tali documenti sono indicate le categorie di sottosuolo cui associare opportuni valori del fattore di amplificazione e dello spettro di risposta normalizzato relativo alle componenti orizzontali e verticali dell'accelerazione.

Le analisi di pericolosità sismica sono tradizionalmente basate su modelli statistici poissoniani, secondo cui ogni evento di una serie casuale è completamente indipendente da qualunque altro evento precedente o successivo. Con riferimento ad una determinata zona sismogenetica, la catalogazione degli eventi più significativi avviene quindi solo in termini di magnitudo su un fissato periodo di osservazione. Il periodo di ritorno aumenta con la magnitudo mentre la localizzazione della sorgente resta del tutto casuale all'interno della zona. Un approccio probabilistico di tipo poissoniano si fonda su una relazione di ricorrenza statistica, basata sulla sequenza temporale degli eventi registrati in una zona sismogenetica. La relazione di ricorrenza più utilizzata è quella di Gutenberg e Richter. Per un intervallo temporale di osservazione sufficientemente ampio il numero di eventi sismici con energia superiore a può essere espresso in termini di frequenza temporale ponendo:

$$\lambda_M = N_E/T_0$$

Con λ_M frequenza media annuale di eccedenza di un particolare valore di magnitudo M .

Il reciproco di λ_M è il periodo di ritorno T_r di un terremoto che supera o uguaglia quella magnitudo. La distribuzione statistica dei dati (λ_M , M) è interpretabile con una funzione esponenziale:

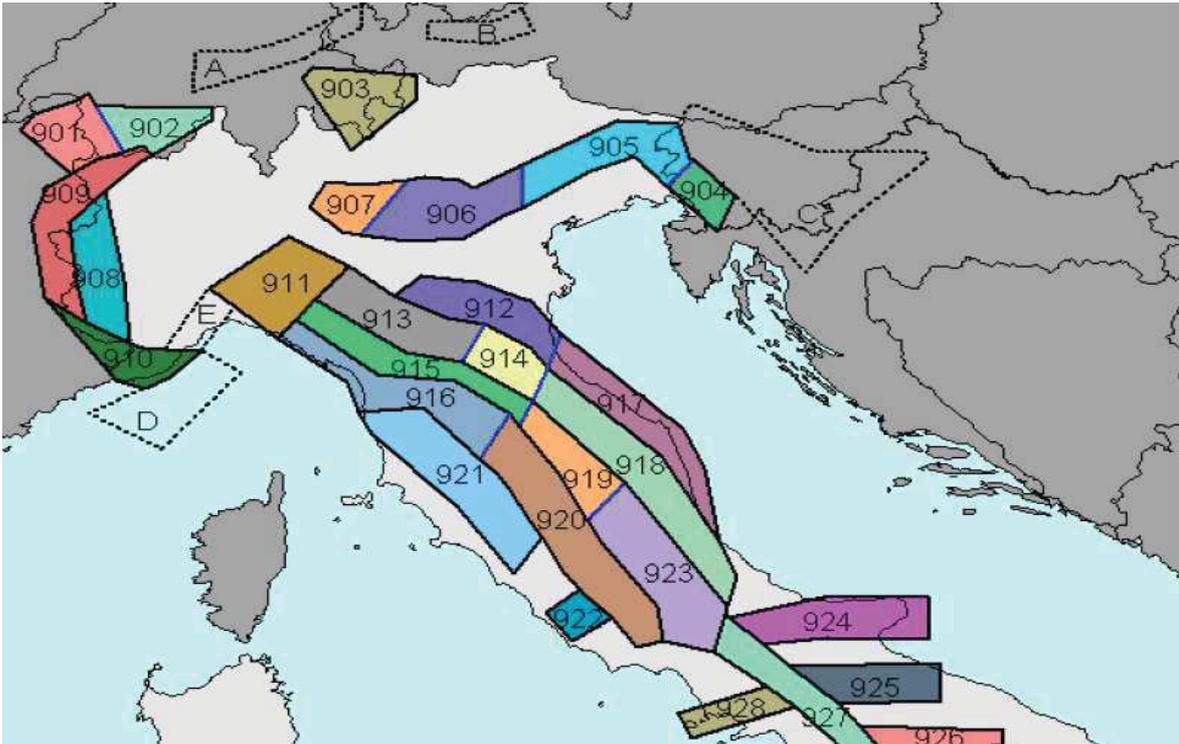
$$\lambda_M = ae^{-bM}$$

Per ottenere i parametri a e b occorre estrarre da un catalogo sismico i valori della magnitudo in ordine temporale, ordinarli in senso decrescente con la magnitudo, contare successivamente per ogni valore di magnitudo il numero di eventi E N con M superiore o uguale e operare infine una regressione esponenziale della relazione (λ_M, M) .

Secondo un modello probabilistico di tipo poissoniano, in un periodo di riferimento s t la probabilità P che avvenga un terremoto con magnitudo superiore o uguale a M è data da:

$$P = 1 - e^{-\lambda_M t}$$

Combinando questa espressione con la precedente si può ottenere la probabilità di superamento di fissata magnitudo su un dato periodo di riferimento, da cui è possibile ottenere il tempo di ritorno di un evento di data probabilità e la magnitudo dello stesso evento: fissati come previsto dalle norme tecniche italiane un anni ed una probabilità di superamento del 10% (cui corrisponde un anni), dall'analisi del catalogo storico (sintetizzato nella Tabella 5.2.1) degli eventi sismici relativi alla zona 906 della zonazione sismogenetica rappresentata in Figura - ZS9 all'interno della quale ricade il territorio del Comune di Pozzolengo, e seguendo la procedura appena esposta, è stato ricavato un valore massimo della magnitudo $M = 6.6$.



13 PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE

Il panorama legislativo in materia sismica è stato profondamente trasformato dalle recenti normative nazionali (Ordinanza P.C.M. n° 3519/2006, D.M. 159/2005, Ordinanza P.C.M. n° 3519/2006 e D.M. 17 gennaio 2018). Alla legislazione si aggiunge il lavoro dell'Associazione Geotecnica Italiana “aspetti geotecnica della progettazione in zona sismica: linee guida”.

L'Ordinanza P.C.M. n° 3519/2006, ha disposto nuovi criteri per la valutazione preliminare della risposta sismica del sottosuolo stabilendo in questo senso:

- una nuova classificazione dei comuni nazionale, secondo quattro diversi gradi di pericolosità sismica espressa in termini di accelerazione massima orizzontale al suolo a_g , con probabilità di superamento del 10% in 50 anni;

- una nuova classificazione del sottosuolo, in categorie di suolo di fondazione basata sulla stima di alcuni parametri fondamentali (V_s , N_{spt} , c_u , profondità del bedrock). Ad ogni categoria sono stati attribuiti i valori dei parametri dello spettro di risposta per la stima delle azioni sismiche di progetto.

La tabella sottostante riassume la classificazione del sottosuolo, secondo le citate categorie:

Categoria di suolo di fondazione	PROFILO STRATIGRAFICO	V_{seq}	N_{spt}	u
		(m/s)		(Kpa)
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.	>800		
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 compresi tra 360 m/s e 800 m/s.	800 360	50	250
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 compresi tra 180 m/s e 360 m/s.	360 180	50 15	250 70
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 compresi tra 100 m/s e 180 m/s.	180	15	70
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30m.			

La nuova classificazione sismica è stata successivamente integrata dall'Ordinanza P.C.M. n° 3519 del 2006, con la pubblicazione della mappa della pericolosità sismica di riferimento per tutto il territorio nazionale e della seguente tabella che attribuisce i valori di a_g orizzontale massima da utilizzarsi per la costruzione degli spettri di risposta.



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

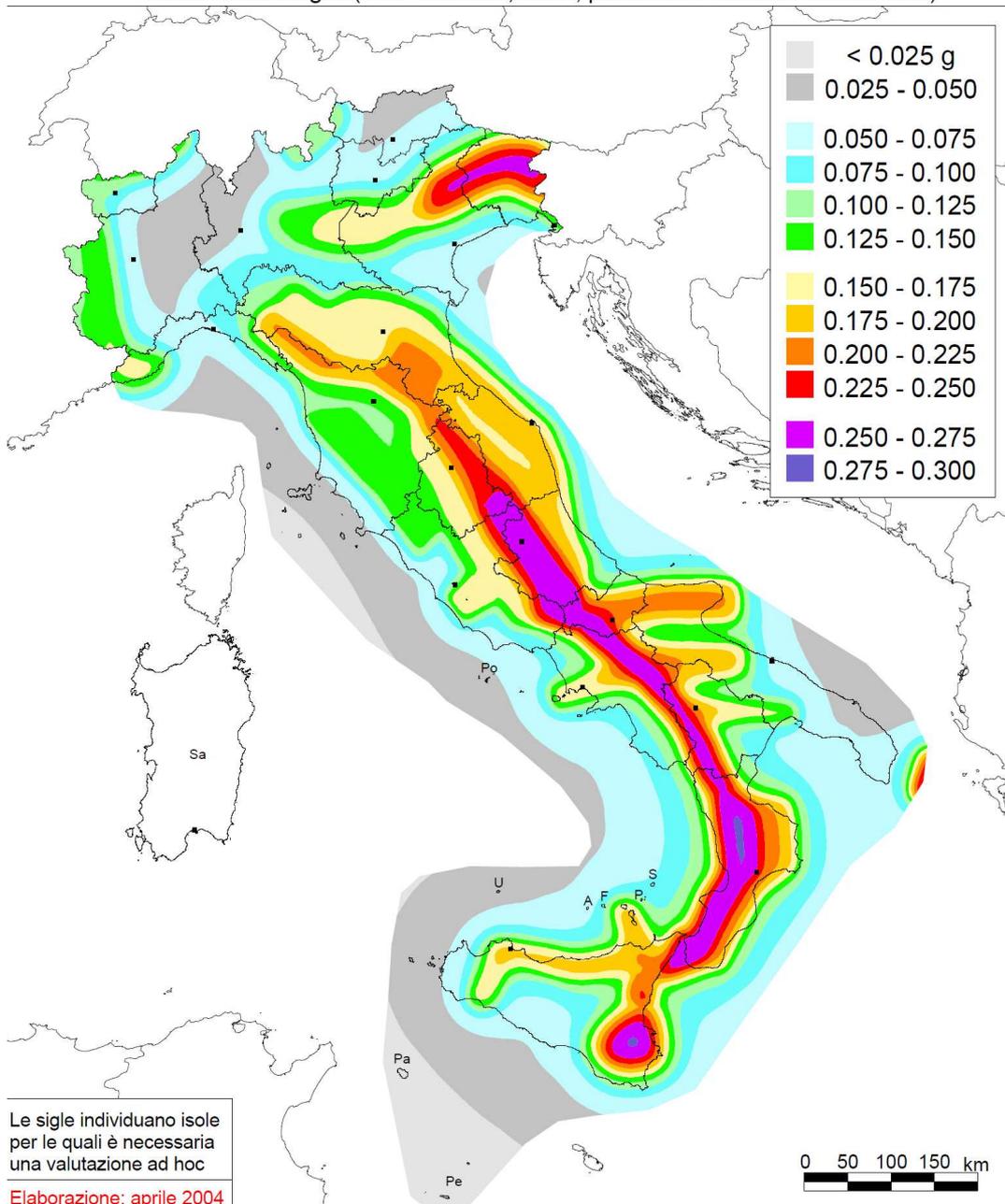
Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale

(riferimento: Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n.3519, All. 1b)

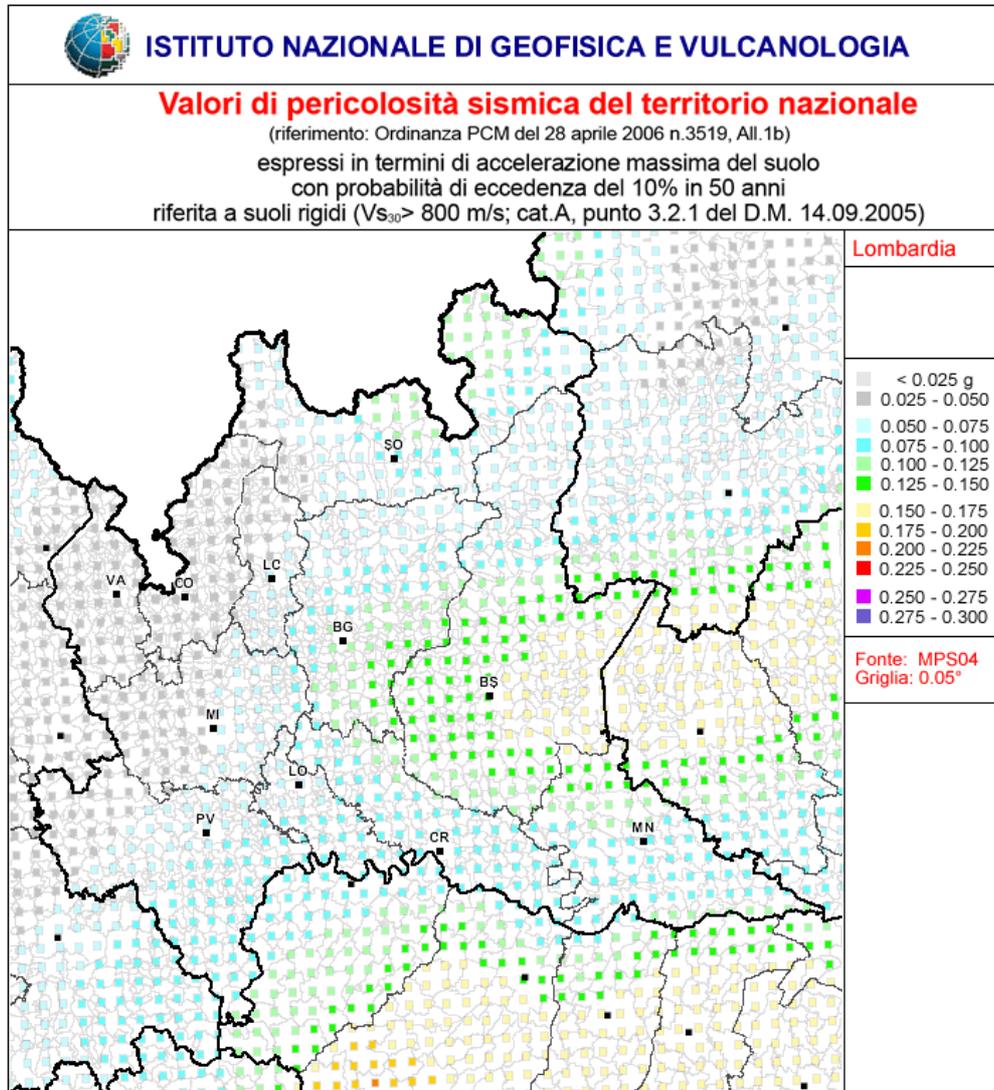
espressa in termini di accelerazione massima del suolo

con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni

riferita a suoli rigidi ($V_{s30} > 800$ m/s; cat.A, punto 3.2.1 del D.M. 14.09.2005)



Per quanto riguarda il Comune di Pozzolengo, la nuova mappa di pericolosità sismica, espressa in termini di accelerazione massima del suolo (amax), con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferita a suoli molto rigidi ($V_{s30} > 800$ m/s), prevede amax variabile da 0,15 a 0,25g.



Mappa della pericolosità sismica in Lombardia

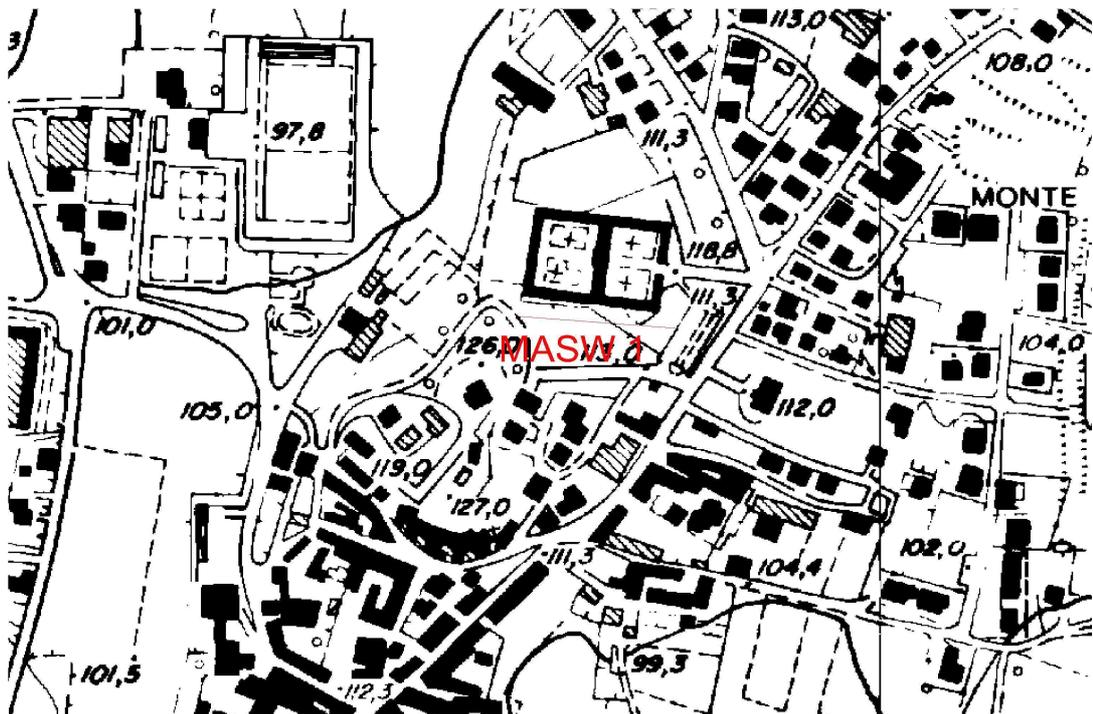
Zona	Accelerazione orizzontale con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (ag/g)	Accelerazione orizzontale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico (ag/g)
1	> 0.25	0.35
2	0.15 - 0.25	0.25
3	0.05 - 0.15	0.15
4	< 0.05	0.05

Le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17 gennaio 2018) impongono nuovi e precisi criteri prestazionali di verifica dell'azione sismica nella progettazione delle nuove opere ed in quelle esistenti, valutata mediante una analisi della risposta sismica locale.

14 RISULTATI DELLE PROVE MASW

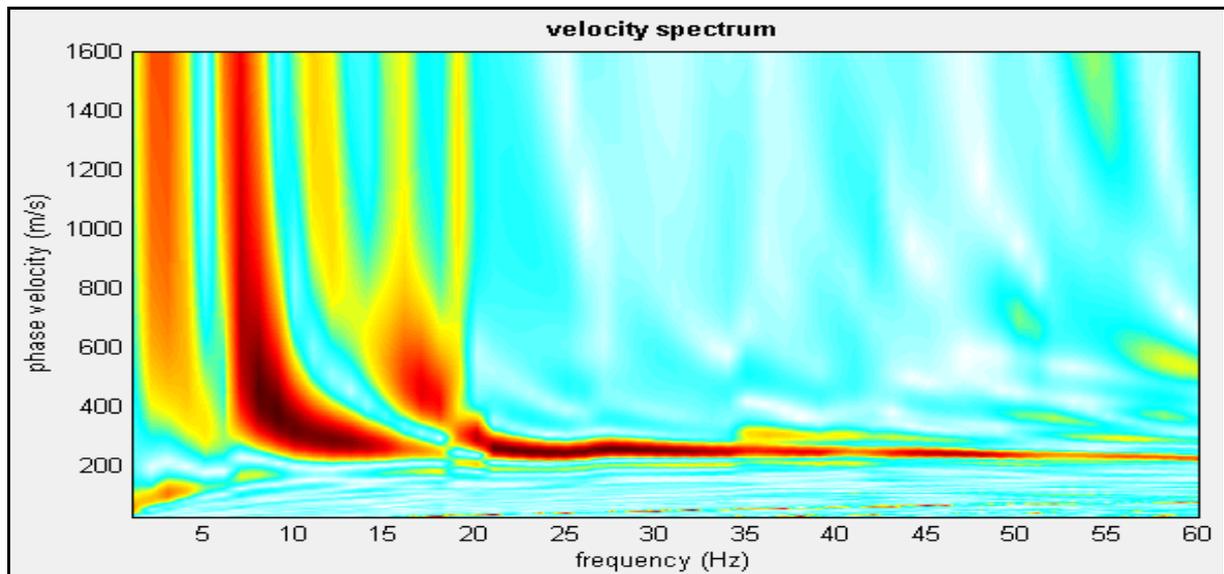
Al fine di caratterizzare il territorio comunale sono state realizzate 4 prove masw, oltre alle indagini pregresse, distribuite in modo omogeneo sull'intero territorio comunale; vengono di seguito riportati i diagrammi e le tabelle relative ai risultati di ciascuna prova.

Ubicazione masw n° 1

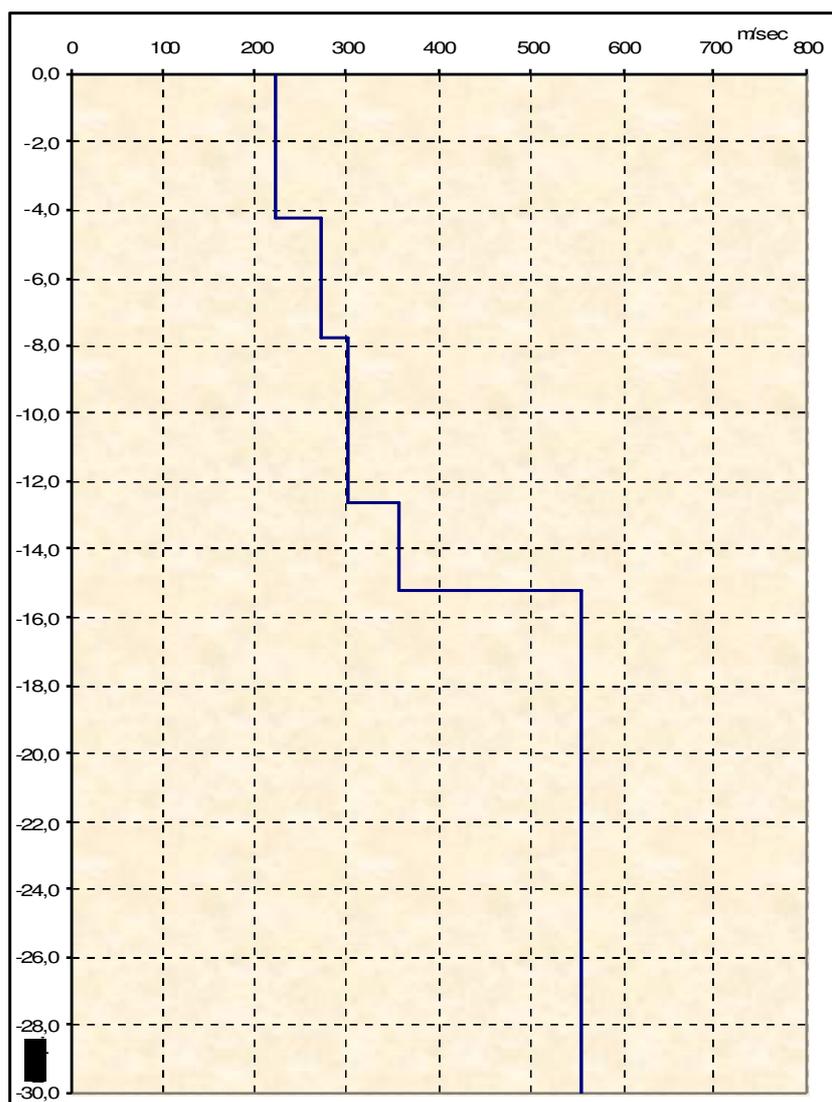


MASW n. 1

Profondità da p.c. (m)	Spessore (m)	Velocità onde S (m/sec)
-4,3	4,3	222
-7,8	3,5	271
-12,6	4,8	301
-15,2	2,6	356
-30,0	14,8	555



-diagramma della curva di dispersione-

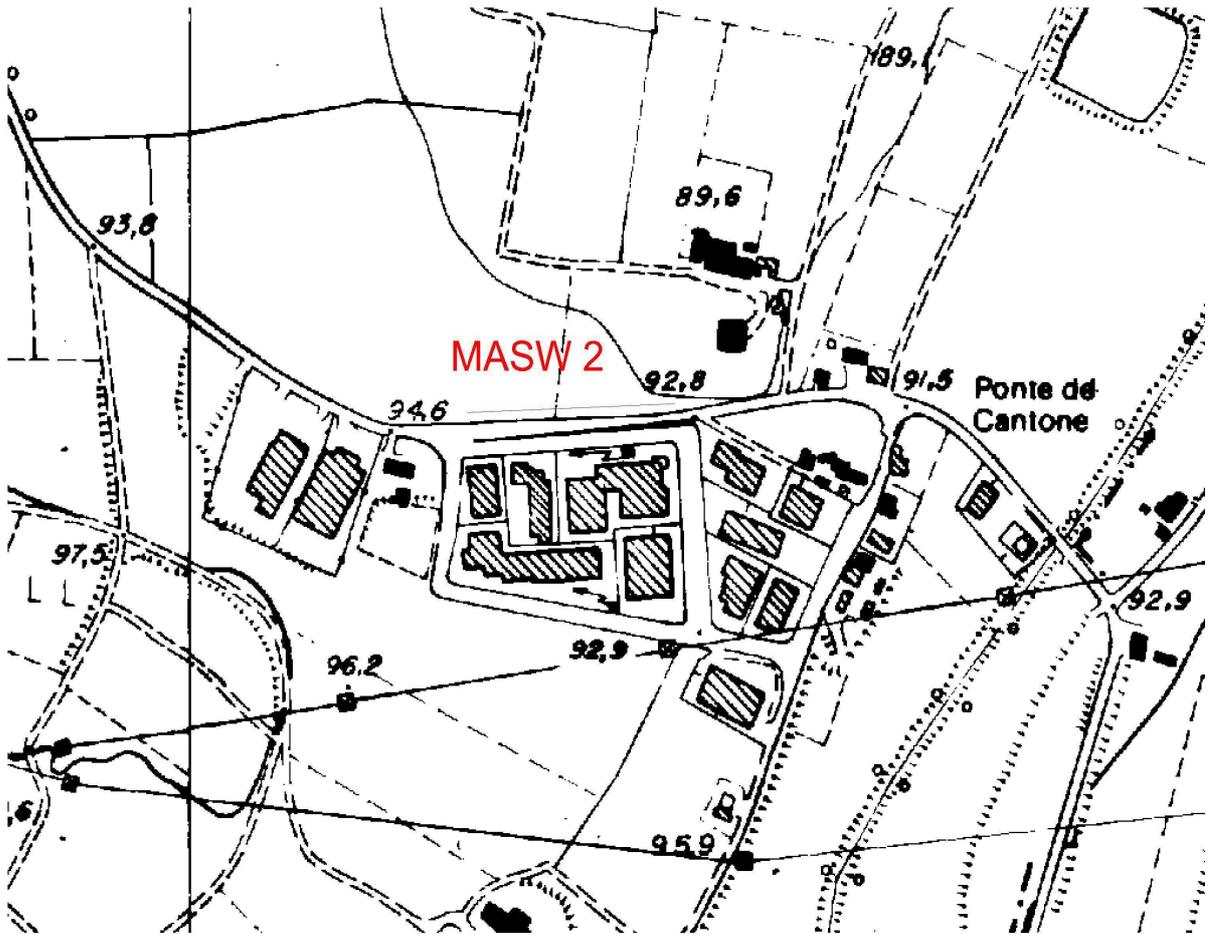


- diagramma velocità V_s /profondità -

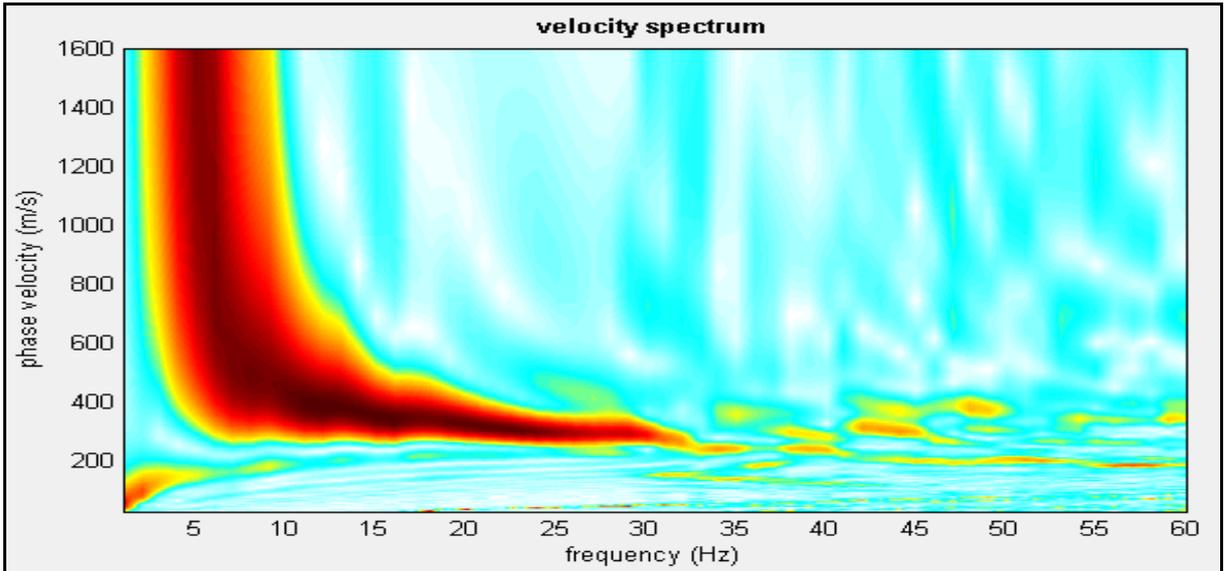
Il valore V_{seq} è **365 m/sec**. Secondo normativa la **categoria di appartenenza del litotipo equivalente è la B:**

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{seq} compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

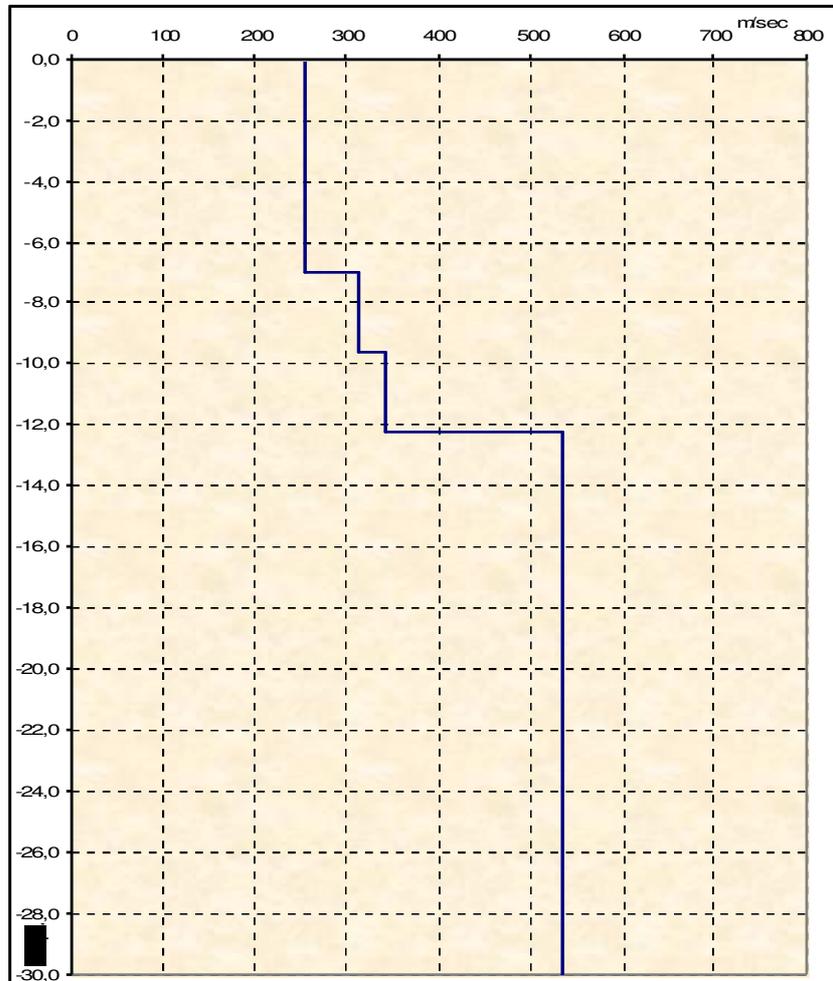
Ubicazione masw n° 2



Profondità da p.c. (m)	Spessore (m)	Velocità onde S (m/sec)
-7,0	7,0	255
-9,6	2,6	312
-12,2	2,6	341
-30,0	17,8	534



-diagramma della curva di dispersione-

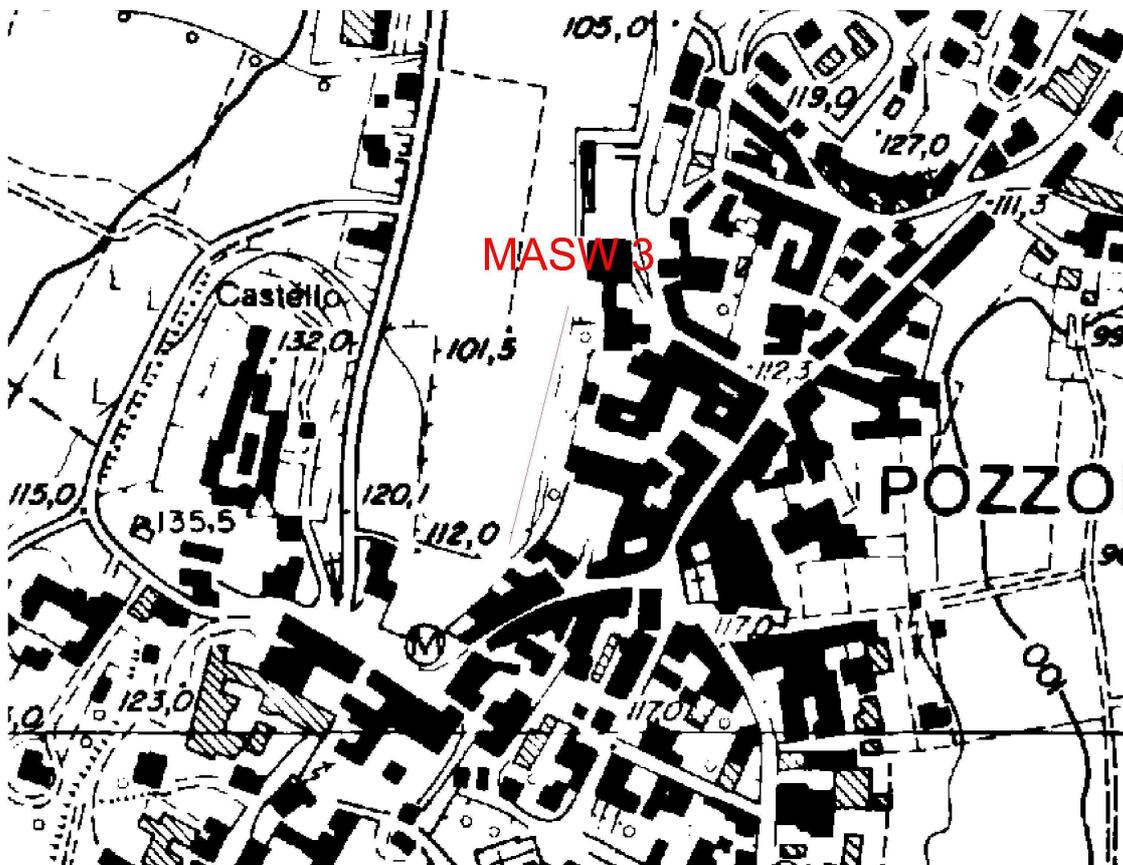


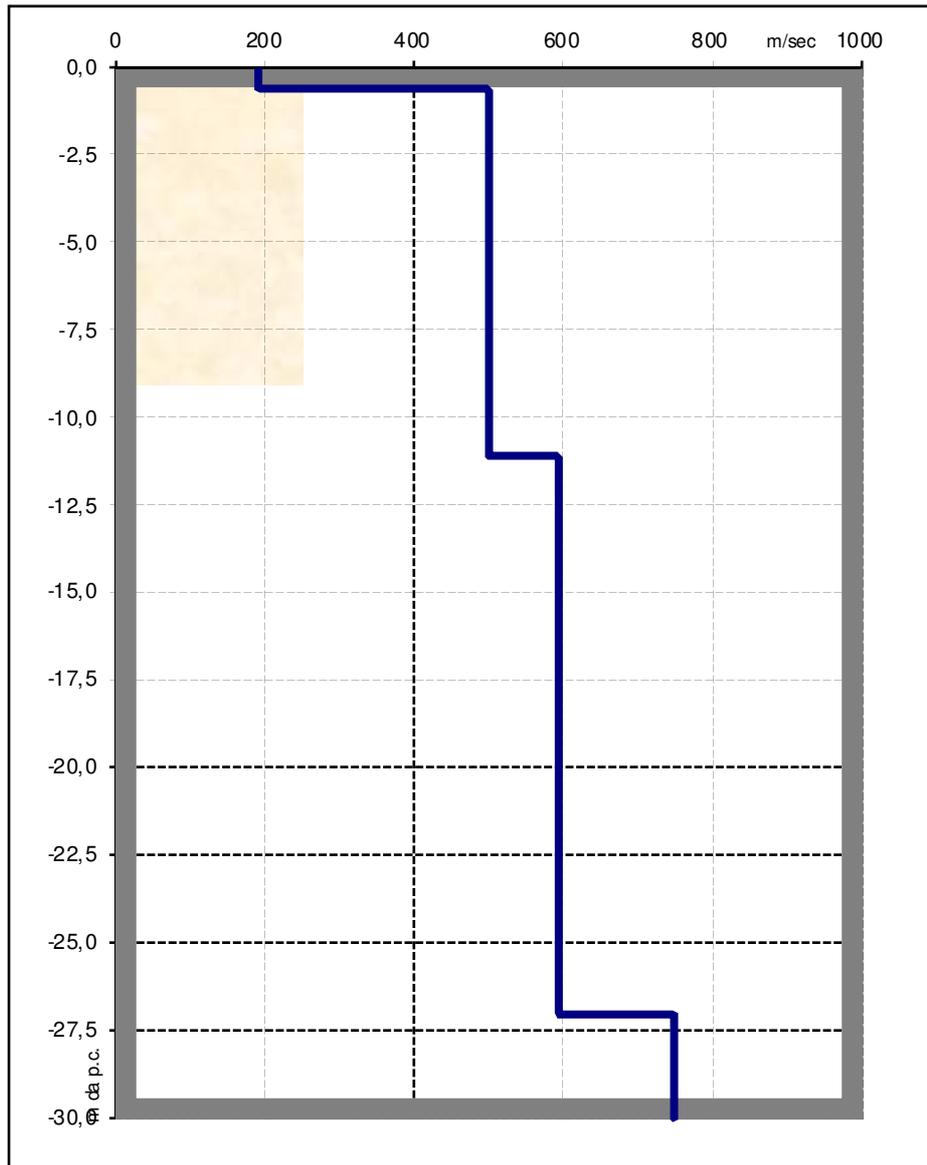
- diagramma velocità Vs/profondità -

Il valore V_{seq} è **391 m/sec.** Secondo normativa la **categoria di appartenenza del litotipo equivalente è la B:**

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{seq} compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Ubicazione masw n° 3



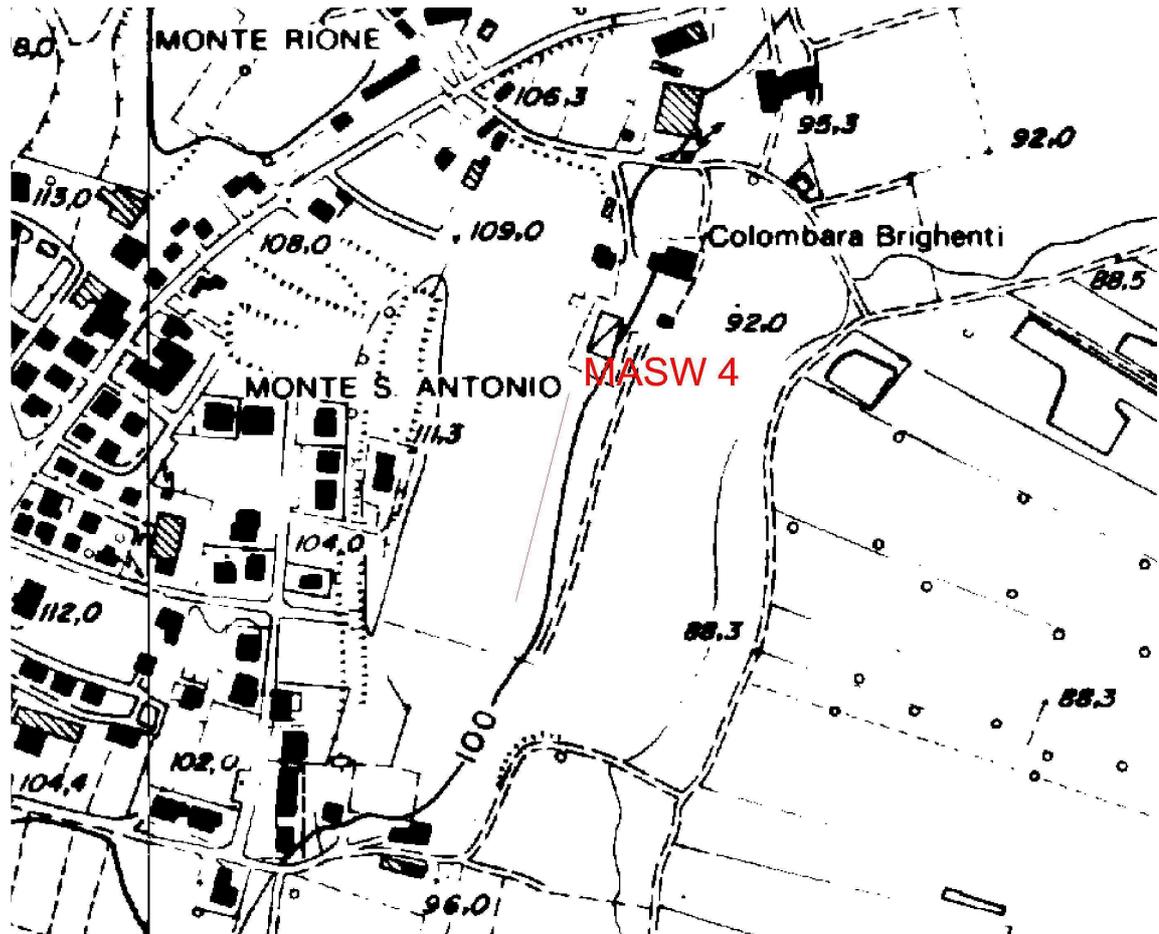


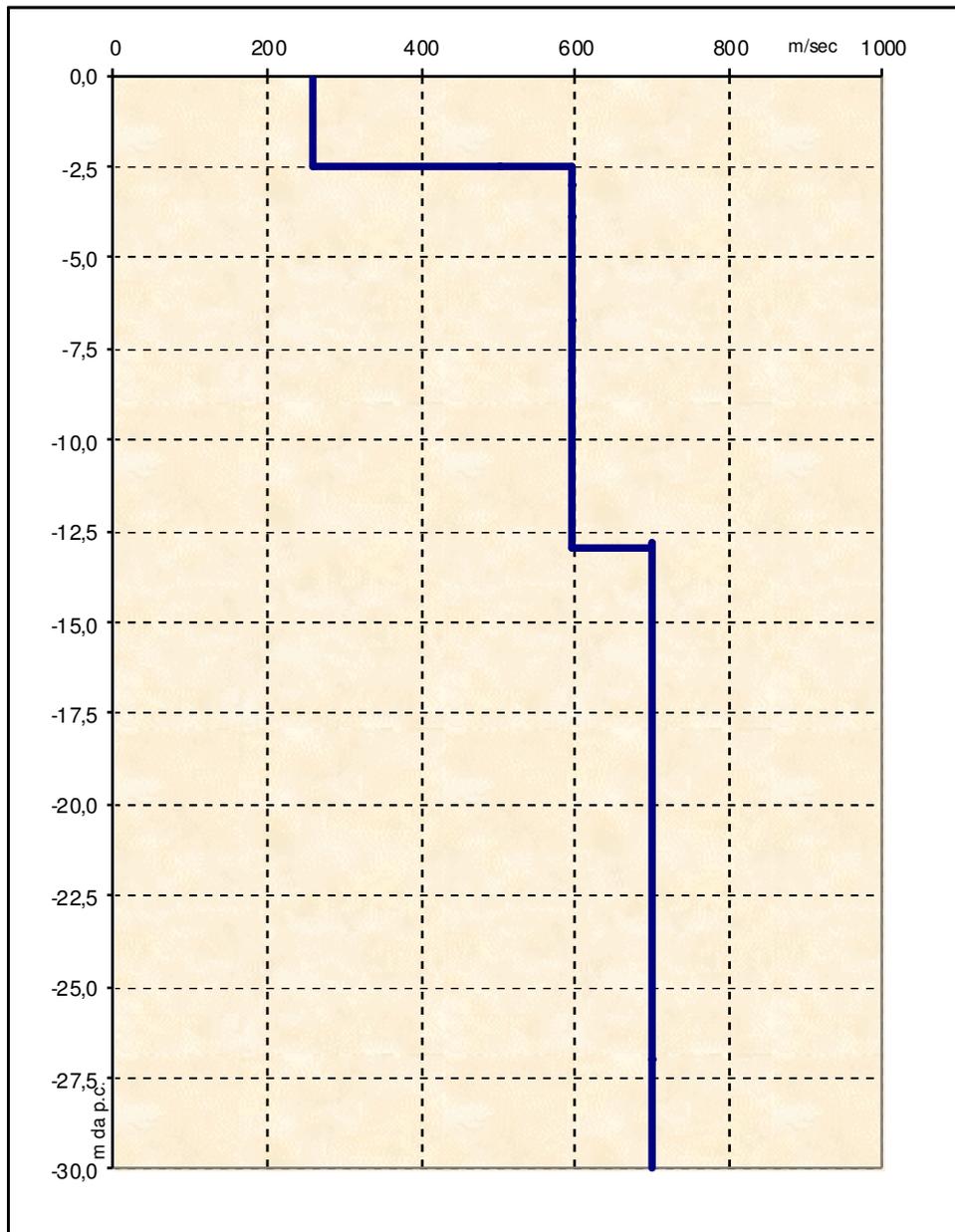
Profondità da p.c.(m)	Spessore (m)	Velocità S(m/sec)	onde
-0,8	0,8	192	
-11,1	10.3	510	
-27,0	15,7	584	
-30,0	2,8	749	

Il valore $V_{s,eq}$ è **508 m/sec**. Secondo normativa la **categoria di appartenenza del litotipo equivalente è la 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 compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Ubicazione masw n° 4





Profondità da p.c. (m)	Spessore (m)	Velocità onde S(m/sec)
-2,5	2,5	230
-13,0	10,5	596
-30,0	17,0	690

Il valore $V_{s,eq}$ è **505 m/sec**. Secondo normativa la **categoria di appartenenza del litotipo equivalente è la 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 compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

15 ANALISI DEL RISCHIO SISMICO

La pericolosità sismica è dunque, come visto, lo strumento di previsione delle azioni sismiche attese su base probabilistica mentre la valutazione della pericolosità è propedeutica a qualsiasi azione di valutazione e mitigazione del rischio sismico.

I criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche, la formazione e l'aggiornamento degli elenchi e delle medesime zone classificano il territorio comunale di Pozzolengo in zona sismica 2 secondo quanto espresso dall'accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni compresa tra 0.15 g e 0.25 g.

La normativa sismica (O.P.C.M. n° 3519 del 2006 e successive modifiche) consente di valutare l'azione sismica, da assumere a base della progettazione, tenendo conto dell'accelerazione massima stimata per il territorio in esame (scuotimento al basamento) e delle caratteristiche geologiche locali (amplificazione dovuta alla stratigrafia) l'azione sismica viene stimata sulla base di due parametri principali:

- accelerazione orizzontale di ancoraggio (a_g/g);
- fattore di stratificazione del suolo di fondazione (S).

16 VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI SISMICI

Come richiesto nell'allegato 5 dei citati attuativi della L.R. 12/2005, sono state analizzate le condizioni del territorio comunale per valutarne gli scenari di pericolosità sismica locale.

Le particolari condizioni geologiche e geomorfologiche di una zona (condizioni locali) possono influenzare, in occasione di eventi sismici, la pericolosità sismica di base producendo effetti diversi che devono essere presi in considerazione nella valutazione generale della pericolosità sismica dell'area.

Tali effetti vengono distinti in funzione del comportamento dinamico dei materiali coinvolti; pertanto gli studi finalizzati al riconoscimento delle aree potenzialmente pericolose dal punto di vista sismico sono basati, in primo luogo, sull'identificazione della categoria di terreno presente in una determinata area.

In funzione, quindi, della categoria del terreno si distinguono due grandi gruppi di effetti locali:

gli effetti di sito o di amplificazione sismica locale: interessano tutti i terreni che mostrano un comportamento stabile nei confronti delle sollecitazioni sismiche attese; 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*. Tali effetti si distinguono in due gruppi che possono essere contemporaneamente presenti nello stesso sito:

gli 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; tale amplificazione è condizionata dalle caratteristiche geometriche del rilievo (quali il fattore di forma h/L), che devono essere tali per cui la lunghezza d'onda incidente sia comparabile con la semilarghezza $L/2$ della base dell'irregolarità; lungo i fianchi del rilievo l'interazione tra onde incidenti ed onde diffratte produce rapide variazioni in ampiezza e frequenza delle onde sismiche generando un complesso campo di spostamenti con alternanza di amplificazioni ed attenuazioni che possono dare luogo a marcati movimenti differenziali; se l'irregolarità topografica è rappresentata da substrato roccioso (bedrock) si verifica un puro effetto di amplificazione topografica, mentre nel caso di rilievi costituiti da materiali non rocciosi l'effetto amplificatorio è la risultante dell'interazione (difficilmente separabile) tra l'effetto topografico e quello litologico di seguito descritto;

effetti di amplificazione litologica: si verificano quando le condizioni locali sono rappresentate da morfologie sepolte (bacini sedimentari, chiusure laterali, corpi lenticolari, eteropie ed interdigitazioni, gradini di faglia etc..) 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.

gli effetti di instabilità: interessano tutti i terreni che mostrano un comportamento instabile o potenzialmente instabile nei confronti delle sollecitazioni sismiche attese e sono rappresentati in generale da fenomeni di instabilità consistenti in veri e propri collassi e talora movimenti di grandi

masse di terreno incompatibili con la stabilità delle strutture; tali instabilità sono rappresentate da fenomeni diversi a seconda delle condizioni presenti nel sito.

La metodologia per la valutazione dell'amplificazione sismica locale prevede tre livelli di approfondimento in funzione della zona sismica di appartenenza e degli scenari di pericolosità sismica individuati sul territorio. In Allegato 5 della DGR 22.12.2005 n. 1566 è riportata la metodologia per la valutazione dell'amplificazione sismica locale.

Il 1 livello di approfondimento consiste in un approccio di tipo qualitativo e costituisce lo studio propedeutico ai successivi livelli di approfondimento; è un metodo empirico che trova le basi nella continua e sistematica osservazione diretta degli effetti prodotti dai terremoti.

Il metodo permette l'individuazione delle zone ove i diversi effetti prodotti dall'azione sismica sono, con buona attendibilità, prevedibili, sulla base di osservazioni geologiche e sulla raccolta dei dati disponibili per una determinata area, quali la cartografia topografica di dettaglio, la cartografia geologica e dei dissesti (a scala 1:10000 e 1:2000) e i risultati di indagini geognostiche, geofisiche e geotecniche già svolte e che saranno oggetto di un'analisi mirata alla definizione delle condizioni locali (spessore delle coperture e condizioni stratigrafiche generali, posizione e regime della falda, proprietà indice, caratteristiche di consistenza, grado di sovraconsolidazione, plasticità e proprietà geotecniche nelle condizioni naturali, etc..).

La carta della pericolosità sismica locale, derivata dalle precedenti carte di base e in cui è riportata la perimetrazione areale delle diverse situazioni tipo in grado di determinare gli effetti locali.

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 dell'izio-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

Sulla base degli scenari individuati, si determina una classe di pericolosità sismica ed il corrispondente livello di approfondimento necessario.

sigla	SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	Classe di pericolosità sismica
Z1a	Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi	H3
Z1b	Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti	H2 Livello di approfondimento 3°
Z1c	Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana	H2 Livello di approfondimento 3°
Z2a	Zone con terreni di fondazione saturi particolarmente scadenti (riporti poco addensati, depositi altamente compressibili, ecc)	H2 Livello di approfondimento 3°
Z2b	Zone con depositi granulari fini saturi	H2 Livello di approfondimento 3°
Z3a	Zona di ciglio H>10 m (scarpata con parate subverticale, bordo di cava, nicchia di distacco, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica)	H2 Livello di approfondimento 2°

Z3b	Zona di cresta rocciosa e/o cocuzzolo: appuntite arrotondate	H2 Livello di approfondimento 2°
Z4a	Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/ fluvio-glaciali granulari e/o coesivi	H2 Livello di approfondimento 2°
Z4b	Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre	H2 Livello di approfondimento 2°
Z4c	Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (comprese le coltri loessiche)	H2 Livello di approfondimento 2°
Z4d	Zone con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale	H2 Livello di approfondimento 2°
Z5	Zona di contatto stratigrafico e/o tettonico tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse	H2 Livello di approfondimento 3°

Il 2 livello è obbligatorio per i comuni individuati nelle zone sismiche II – III e IV nei quali siano state individuate, con l'applicazione del 1 livello, zone suscettibili di amplificazioni sismiche, morfologiche Z3 e litologiche Z4, interferenti con le aree urbanizzate.

La procedura semplificata richiede la conoscenza dei seguenti parametri:

- litologia dei materiali presenti nel sito (litologie ghiaiose e litologie argilloso limose); stratigrafia del sito fino alla profondità in cui le velocità V_s dei materiali raggiungono e superano i 800 m/s;
- spessore, peso di volume e velocità di ciascun strato;
- sezioni geologiche, conseguente modello geofisico-geotecnico ed identificazione dei punti rappresentativi sui quali effettuare l'analisi.

In funzione della litologia prevalente presente nel sito, del gradiente di velocità V_s e del gradiente del peso di volume naturale con la profondità si sceglie l'abaco di riferimento.

In funzione dello spessore e della velocità V_s dello strato superficiale si sceglie la curva più appropriata per la valutazione del valore di F_a nell'intervallo 0.1-0.5 s.

Il periodo proprio del sito necessario per l'utilizzo dell'abaco di correlazione deve essere calcolato considerando tutta la stratigrafia fino alla profondità in cui il valore della velocità V_s è uguale o superiore a 800 m/s ed utilizzando la seguente equazione:

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

La valutazione del grado di protezione viene effettuata in termini di contenuti energetici, confrontando il valore di Fa ottenuto dall'abaco con un parametro di analogo significato calcolato per ciascun comune e valido per la zona 2 e per le diverse categorie di suolo soggette ad amplificazioni litologiche e per i due intervalli di periodo 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s.

La procedura prevede pertanto di valutare il valore di Fa con l'abaco di correlazione 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 dalla procedura semplificata.

Si possono presentare quindi due situazioni:

- il valore di Fa è inferiore o uguale al valore di soglia corrispondente: la nuova normativa è da considerare sufficiente per tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito e quindi si applica lo spettro di norma;
- il valore di Fa è superiore al valore di soglia corrispondente: la nuova normativa è insufficiente per tenere in considerazione i possibili effetti di amplificazione litologica e quindi è necessario effettuare analisi più

approfondite (3° livello) per individuare gli spettri di risposta da utilizzare a livello progettuale.

Il 3 livello consiste in un approccio di tipo quantitativo e costituisce lo studio di maggior dettaglio, in cui la valutazione della pericolosità sismica locale è effettuata ricorrendo a metodologie che possono essere classificate come strumentali o numeriche. La metodologia strumentale richiede l'acquisizione di dati strumentali attraverso campagne di registrazione eseguite in sito con l'utilizzo di strumentazioni specifiche, variabili a seconda del parametro di acquisizione scelto (velocimetri ed accelerometri).

La metodologia numerica consiste nella modellazione di situazioni reali mediante un'appropriate e dettagliata caratterizzazione geometrica e meccanica del sito e nella valutazione della risposta sismica locale tramite codici di calcolo matematico più o meno sofisticati, basati su opportune semplificazioni e riduzioni del problema, necessarie ma comunque di influenza abbastanza trascurabile sul risultato finale. L'applicazione della metodologia numerica richiede una caratterizzazione geometrica di dettaglio del sottosuolo; è inoltre necessaria l'individuazione di uno o più input sismici sotto forma di spettri di risposta e/o di accelerogrammi.

Il 3 livello si applica in fase progettuale agli scenari di pericolosità sismica suscettibili di instabilità (Z2a – Z2b – Z1b – Z1c) e di amplificazioni sismiche sia morfologiche Z3 sia litologiche Z4 qualora il valore di Fa sia superiore al valore soglia ricavato dal 2 livello. Nelle aree Z1 e Z2, per le zone sismiche 2 – 3 si applica il 3 livello a tutte le costruzioni, nella zona sismica 4 è obbligatorio per gli edifici strategici e rilevanti di cui al d.d.u.o. n° 19904/2003.

Da una approfondita indagine comunale è stata individuata, in relazione alle caratteristiche litologiche, idrogeologiche e geomorfologiche, lo scenario di pericolosità sismica locale, cioè:

Z2a	Zona con terreni particolarmente scadenti	Cedimenti
Z2b	Zona con depositi granulari fini saturi	Liquefazioni
Z3a	Zona di ciglio H > 10 m orlo di terrazzo fluviale	Amplificazione topografiche
Z4a	Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e coesivi	Amplificazione litologiche e geometriche
Z4b	Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre	Amplificazione litologiche e geometriche
Z4c	Zona morenica con presenza di depositi granulari	Amplificazione litologiche e geometriche

Per tutte le zone individuate si rende indispensabile effettuare l'approfondimento di secondo livello, che consente una caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione attesi, in quanto fornisce una stima della risposta sismica dei terreni in termini di valore di Fattore di Amplificazione.

Di seguito viene riportata la tabella relativa agli approfondimenti in funzione della pericolosità sismica locale.

Livelli di approfondimento e fasi di applicazione			
	1° livello Fase pianificatoria	2° livello Fase pianificatoria	3° livello Fase progettuale
Zona sismica 2 - 3	obbligatorio	Nelle zone PLs Z3 e Z4 se interferenti con l'urbanizzato e urbanizzabile, ad esclusione delle aree già inedificabili	- Nelle aree indagate con il 2° livello quando Fa calcolato > maggiore valore soglia comunale. - Nelle zone PSL Z1 e Z2
Zona sismica 4	obbligatorio	Nelle zone PLs Z3 e Z4 solo per edifici strategici e rilevanti di nuova previsione (elenco tipologico di cui al d.d.u.on° 19904/03	- Nelle aree indagate con il 2° livello quando Fa calcolato > maggiore valore soglia comunale. - Nelle zone PSL Z1 e Z2 per gli edifici strategici rilevanti

17 CARTA DELLA PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE (PSL) - DELLE AMPLIFICAZIONI TOPOGRAFICHE

ANALISI DI PRIMO LIVELLO

La carta della pericolosità sismica locale, è stata realizzata nel 2006 secondo procedure indicate negli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Lombardia per la pianificazione territoriale e urbanistica. I dati di base utilizzati:

- ✓ carta geologica;
- ✓ carta geomorfologia;
- ✓ geofisica (individuazione mediante prospezioni dei profili di velocità delle onde sismiche nei terreni);
- ✓ geologia e geomorfologia (caratterizzazione dell'assetto stratigrafico e strutturale, delle litologie e della geomorfologia dei siti).

Per l'analisi di 1° livello sono state utilizzate la cartografia topografica della Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000 (voli 1984 e 1994), la carta di inquadramento del presente studio relativa alla litologia (scala 1:10.000).

L'analisi dettagliata delle cartografie e dei dati ha portato alla realizzazione della carta della pericolosità sismica locale (scala 1:10.000), nella quale è riportata l'individuazione delle diverse situazioni tipo.

Partendo dalle caratteristiche sismo-tettoniche complessive legate alla zona sismica 906 e delle principali manifestazioni sismiche, sia epicentrali, sia di risentimento dalle altre zone sismo genetiche presenti nel bacino padano, la pericolosità sismica del territorio comunale è stata approfondita, alla luce delle nuove indagini, in relazione alle condizioni geologiche e morfologiche locali.

Le caratteristiche sismiche di un'area sono definite dalle sorgenti sismogenetiche, dall'energia, dal tipo e dalle frequenze dei terremoti. Il moto

sismico può essere modificato dalle condizioni geologiche e morfologiche locali, queste modifiche dovute alle caratteristiche locali sono definite effetti locali.

La procedura prevede quindi la valutazione di diversi gruppi di effetti locali:

- Effetti di instabilità;
- Effetti di cedimenti e/liquefazioni;
- Effetti di sito o di amplificazione sismica locale.

✓ **Effetti di instabilità**

Vengono di seguito riportati gli effetti di instabilità citati nella tab.1 dell'All. 5 della D.G.R. 8/7374 del 28.05.2008:

sigla	Scenari di pericolosità 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	

Per quanto riguarda gli effetti di instabilità non sono state individuate aree riconducibili agli scenari sopra riportati.

✓ **Effetti di cedimento e/o di liquefazione**

Anche per il seguente scenario viene riportata la tabella presente nella D.G.R. 8/7374 del 28.05.2008:

sigla	Scenario di pericolosità sismica locale	Effetti
Z2a	Zone con terreni di fondazione particolarmente scadenti (riporti poco addensati, terreni granulari fini con falda superficiale)	Cedimenti
Z2b	Zone con depositi granulari fini saturi	Liquefazioni

RISCHIO LIQUEFAZIONE

Con le indicazioni dell'Eurocodice 8, il D.M. 17 gennaio 2018 vengono stabiliti alcuni criteri per l'esclusione della verifica alla liquefazione e si fornisce un'indicazione sulle metodologie di analisi da impiegare nel caso il sito venga

riconosciuto a rischio. Vengono elencati cinque criteri come riferimento al fine di individuare la potenziale liquefacibilità dei terreni:

- magnitudo del sisma;
- accelerazione sismica orizzontale;
- profondità falda;
- resistenza mobilabile del terreno;
- composizione granulometrica.

La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti cinque circostanze esplicate nel D.M. 18.01.2018:

- 1.** eventi sismici attesi di magnitudo M inferiore a 5;
- 2.** accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
- 3.** profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- 4.** depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 180$ dove: $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc_{1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
- 5.** distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 2 a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ ed in Figura 2 b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

Per il territorio comunale posto a nord, delimitato nella carta della fattibilità geologica come area a rischio liquefazione, è stato verificato il rischio liquefazione per due siti.

Verifiche semplificate della liquefazione

Le indagini penetrometriche CPT e SCPT eseguite per questo lavoro consentono la verifica quantitativa della valutazione del rischio sismico di liquefazione. Uno dei più significativi e recenti progressi nell'utilizzazione delle prove penetrometriche statiche è infatti legato allo sviluppo e all'affermazione delle procedure per la valutazione del potenziale di liquefazione: ad oggi, possono essere considerate le prove più frequentemente utilizzate per questo scopo. Il vantaggio dell'uso delle penetrometrie statiche è da ricercarsi nella maggiore accuratezza e ripetibilità delle stesse rispetto ad altre prove, nella sua relativa economicità e soprattutto nella possibilità di avere profili continui con la profondità e che forniscono informazioni dettagliate anche sulla stratigrafia.

Per questo lavoro, la procedura di riferimento è quella attualmente più accreditata di Seed e Idriss (1971) e Robertson & Wride nella sua versione più recente (1998).

La verifica stima la propensione alla liquefazione di un sedimento attraverso il calcolo del fattore di sicurezza $F_s = (CRR(7,5)/CSR(7,5)) * MSF$ con:

- CSR = sollecitazione tangenziale ciclica (Cyclic Stress Ratio) prodotta da un sisma e stimata sulla base di correlazioni empiriche dalle caratteristiche del terremoto, magnitudo e accelerazione tangenziale del suolo. Il CSR viene calcolato dalla nota equazione semiempirica proposta da Seed e Idriss (1971) per terremoti di $M = 7,5$.

La a_{max} di ingresso per la valutazione semplificata del CSR è ricavata dalla formula:

$$CSR = 0.65 \times (a_{max})/(g) \times (\sigma_{vo}/\sigma'_{vo}) \times r_d \times 1/(MSF \times K_\sigma)$$

dove:

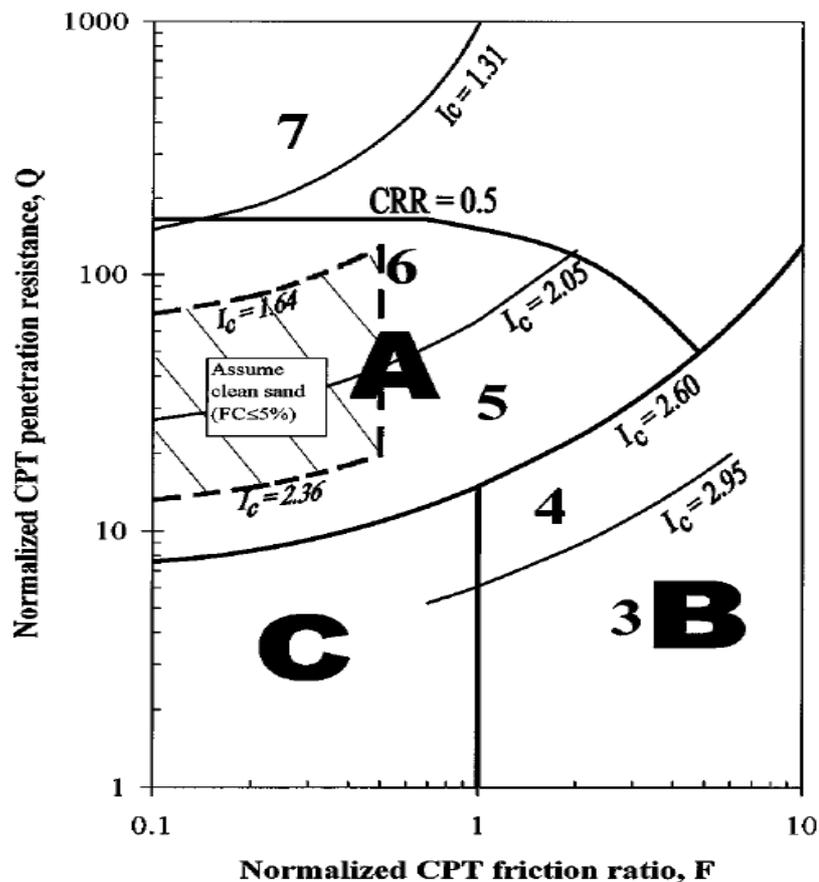
a_{max} = accelerazione sismica di picco al piano campagna;

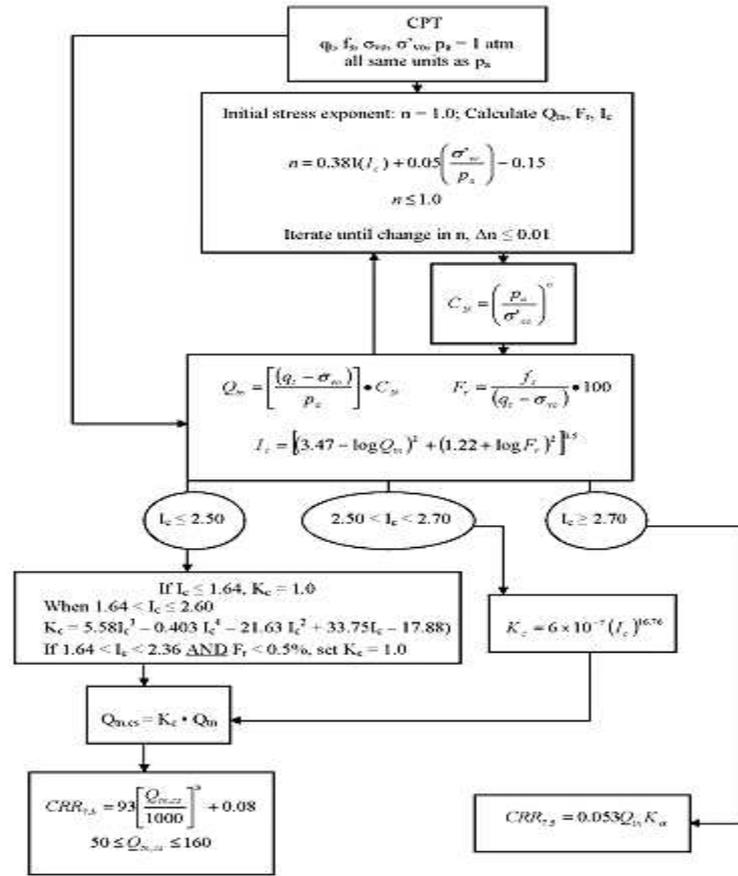
- g = accelerazione di gravità;
 σ_{vo} = pressione verticale totale alla profondità z dal p.c.;
 σ_{vo}' = pressione verticale efficace alla profondità z dal p.c.;
 r_d = fattore di riduzione delle tensioni alla profondità interessata;
 MFS = coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma;
 K_σ = coefficiente correttivo funzione delle tensioni efficaci alla profondità interessata.
 g = gravita 9,81 m/sec²
 r_d = $1 - 0.00765 \times z$;
 K_σ = fattore ≤ 1 correttivo della pressione efficace geostatica
 $K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln(\sigma'_v/Pa)$

- MSF = coefficiente correttivo per eventi sismici di magnitudo differente da 7,5 (nel nostro caso per $M = 6.6$).
 $MSF = 6.9 \exp(-M/4) - 0.058$.

- CRR = resistenza alla liquefazione ciclica (Cyclic Resistance Ratio) dei sedimenti attraversati, ricavata dagli esiti penetrometrici secondo la procedura empirica proposta da Robertson & Wride, 1998 per terremoti di $M = 7,5$. La procedura si fonda su equazioni che determinano i valori di CRR dei sedimenti con diverso contenuto di fini dai dati delle prove CPT, attraverso la normalizzazione a 100 kPa (pressione atmosferica) delle resistenze alla punta penetrometrica e la correzione in funzione delle caratteristiche granulometriche (desunte dalla classificazione dei terreni di Robertson, 1990). La figura sottostante riassume la propensione alla liquefazione dei suoli secondo la classificazione di Robertson (1990), ed il diagramma di flusso relativo alla procedura di valutazione del CRR nei sedimenti.

Si è quindi riproceduto all'analisi della liquefacibilità per ogni verticale CPT e SCPT e la figura sottostante riassume gli esiti di questa verifica. Si evince che, utilizzando l'approccio di verifica più speditiva, ovvero con i parametri semplificati di risposta sismica locale, gli esiti vengono a indicare anche effetti di liquefazione ($F_s < 1$) in significativi intervalli di sottosuolo, sia negli strati più sabbiosi. In conclusione, gli esiti delle verifiche sopra descritte hanno imposto la necessità di un ulteriore approfondimento delle analisi di liquefazione nei sedimenti a comportamento propriamente granulare e saturi. Inoltre, come vedremo, si sono anche valutati i potenziali effetti di perdita di resistenza ("Cycling softening") dei sedimenti fini (argille e limi) caratterizzati da bassi valori di coesione, attraversati dalle prove penetrometriche fino alla profondità di 15÷20 metri.



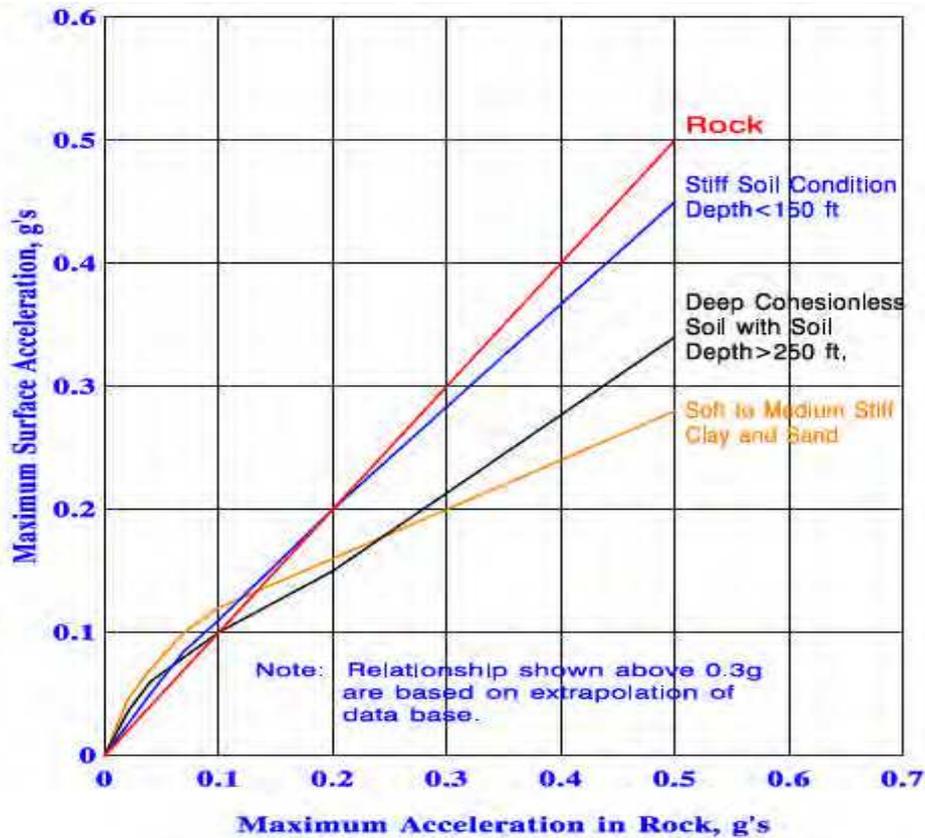


Classi di comportamento dei sedimenti da prove CPT (da P.K. Robertson, 1990) e diagramma di flusso per la verifica della suscettibilità alla liquefazione da prove CPT (P.K. Robertson, 1998-2009).

Verifiche della liquefazione in funzione della modellazione di risposta sismica locale

Come abbiamo visto nel precedente paragrafo la verifica di liquefacibilità dei sedimenti secondo l'approccio di Robertson & Wride 1998 (aggiornato da Robertson nel 2009), utilizzando gli esiti delle penetrometrie e con stima semplificata della sollecitazione tangenziale ciclica CSR (Idriss, 1971), può risultare molto cautelativa: la ag di riferimento (che dovrebbe caratterizzare l'intensità del terremoto atteso) viene infatti calcolata applicando un fattore di amplificazione stratigrafica ai valori di accelerazione massima su roccia, coefficiente che nel caso in esame risulta pari a 1,8 (DGR 112/2007). Questo approccio può portare a risultati non corretti o non verosimili, poichè l'amplificazione dipende anche dal livello di deformazione e

dal comportamento non lineare dei sedimenti attraversati, dalla magnitudo e dal contenuto in frequenza del terremoto.



Variazione dell'accelerazione massima in superficie con l'accelerazione massima su roccia per depositi vari (da Seed et al., 1975)

In questo senso, la figura riportata evidenzia gli effetti di non linearità sull'accelerazione di picco in superficie in funzione di quella su roccia, ottenute sulla base di elaborazioni statistiche di registrazioni accelerometriche per numerosi eventi sismici (Seed, Murnaka, Lysmer, and Idriss, 1975).

A causa del comportamento non lineare dei sedimenti si può verificare che per bassi livelli energetici del terremoto di riferimento l'accelerazione di picco lungo il profilo dello strato aumenta dal basamento roccioso alla superficie; per elevati livelli energetici la ag di picco può viceversa diminuire lungo il profilo (Lanzo e Silvestri, 1999) per l'aumento del fattore di smorzamento.

Ciò detto, in siti caratterizzati da potenti spessori di sedimenti prevalentemente fini (>100 metri), il valore dell'accelerazione di picco deve essere calcolato più correttamente mediante l'analisi numerica della risposta sismica ed utilizzando accelerogrammi di input derivati da registrazioni reali opportunamente normalizzati per il contesto sismico locale.

Per questo lavoro la modellazione di risposta sismica ha consentito di elaborare il profilo equivalente sito-specifico della sollecitazione tangenziale ciclica CSR basato sulla variazione della a_g di picco dal tetto del pseudo bedrock sismico fino alla superficie.

Gli esiti di a_g di picco sono stati implementati nella successiva verifica della liquefazione elaborata con l'approccio già descritto, per ricavare la distribuzione equivalente delle CSR.

Si è quindi proceduto all'analisi della liquefacibilità per ogni verticale CPT e SCPT, eseguita ancora con il metodo di Robertson & Wride 1998 (agg. Robertson 2009), la figura sottostante riassume gli esiti di questa verifica.

Dall'esito dei sondaggi si desume che per la parte nord del comparto le penetrometrie forniscono esiti di sostanziale stabilità alla liquefazione, con intervalli sabbioso-limosi più critici compresi a quote variabili caratterizzati da valori di $F_s < 1,0$ e quindi potenzialmente liquefacibili.

Le terebrazioni evidenziano F_s compresi tra 1,0 e 1,2 negli intervalli corrispondenti a sedimenti ghiaiosi (deposito morenico). In questo intervallo, soltanto pochissime letture (ogni lettura corrisponde a 20 cm di avanzamento) forniscono $F_s < 1,0$:

Si tratta di intervalli di modesto spessore (decimetrici), pertanto con una più bassa probabilità di innesco della liquefazione in caso di sisma per la

maggiore capacità di dissipazione delle sovrappressioni di questi strati granulari meno potenti.

In qualche caso si è riscontrata la possibilità di perdita delle resistenze (“cyclic softening”) sotto l’effetto di impulsi ciclici nei sedimenti poco coesivi.

In sintesi, nelle ulteriori fasi esecutive, le indagini geognostiche dovranno approfondire tali analisi (che in questa fase di aggiornamento del PGT hanno la funzione di verificare la fattibilità dell’area posta a nord, discriminando e definendo in modo dettagliato la presenza di alcuni intervalli sedimentari più critici per la liquefazione.

In particolare, dovranno essere esaminati nel dettaglio i siti in cui saranno localizzati gli interventi edificatori e, sulla base degli esiti, si potranno valutare le opere fondali più adeguate (superficiali e/o profonde) ai fini della stabilità nei confronti della suscettibilità alla liquefazione di questi sedimenti.

Cedimenti post sismici

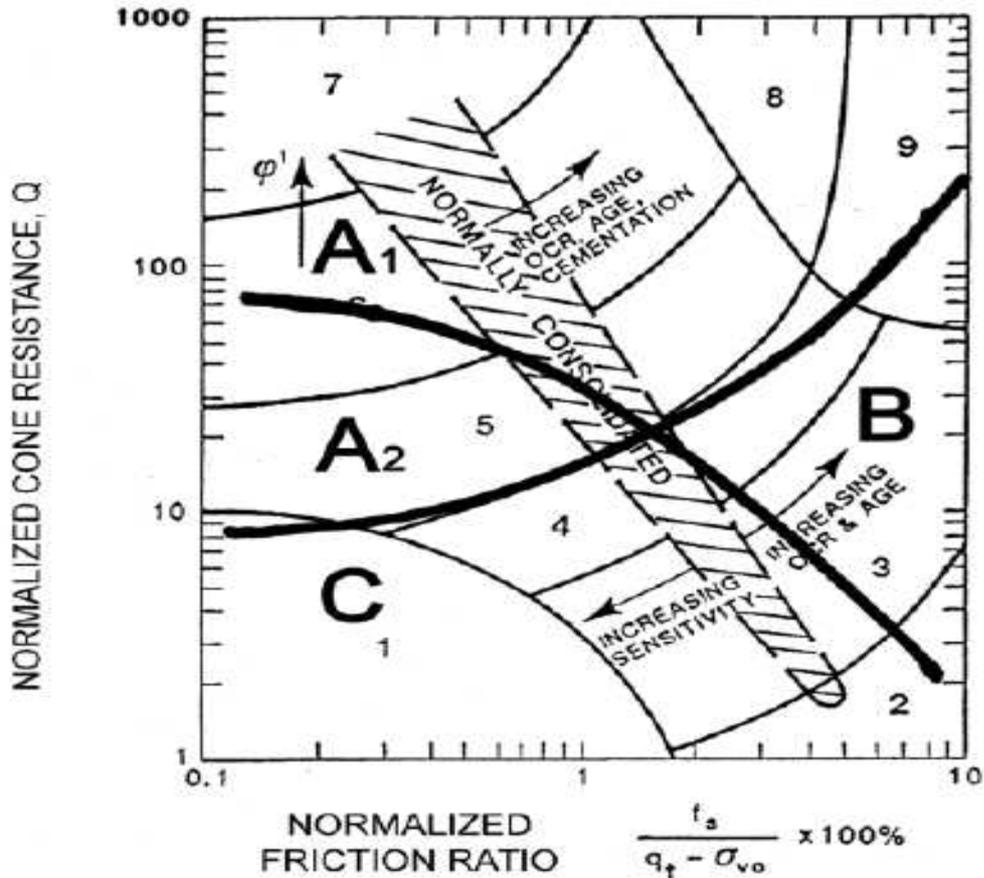
Per una valutazione quantitativa degli effetti di sito sopra descritti, si è proceduto anche ad una stima dei cedimenti in condizioni di “campo libero” (free-field) sia nei sedimenti granulari saturi ed insaturi che in quelli coesivi, se sottoposti a impulso ciclico dovuto a sisma. In tali condizioni i sedimenti possono subire effetto di “riordino” con cedimenti anche significativi, in particolare nei depositi granulari poco addensati e recenti (olocenici) e nei sedimenti coesivi molto plastici e poco consistenti.

I cedimenti verticali post-sisma possono essere causati da riconsolidazione oppure da deformazioni di taglio associate a spostamenti laterali dei sedimenti. Per questo lavoro si sono valutati i cedimenti causati da riconsolidamento dei sedimenti granulari e fini.

Storicamente, le verifiche sismiche applicate alla geotecnica si sono principalmente focalizzate sull'analisi della liquefacibilità dei sedimenti granulari saturi e sui potenziali cedimenti indotti da questo fenomeno cosismico. Nell'ultimo decennio si sono elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma anche nei sedimenti fini (limi e argille a comportamento “non drenato”) provocate da perdite di resistenza.

Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” (Idriss & Boulanger, 2004- 2007). Per le stime preliminari di progettazione, i cedimenti potenziali indotti da sisma possono essere valutati utilizzando correlazioni empiriche basate sui risultati delle prove penetrometriche. Le penetrometrie statiche-dinamiche consentono infatti una dettagliata e continua stima delle deformazioni volumetriche post-terremoto lungo tutto il profilo di sottosuolo attraversato dalle prove. Si sono pertanto utilizzati gli esiti delle prove penetrometriche CPT e SCPT eseguite a nord di Pozzolengo e le verifiche si basano sulla classificazione di comportamento dei terreni proposta da Robertson (1990- 2009). La figura sottostante propone il diagramma (Q_{tn} -F) di classificazione nella quale si distinguono le zone di potenziale di liquefazione e/o di “cyclic softening”: le zone A1 e A2 corrispondono ai sedimenti di bassa coesione attribuibili a comportamento granulare e suscettibili di liquefazione ciclica, in particolare i sedimenti che ricadono nella zona A2 risultano più suscettibili a perdite anche significative di resistenza in caso di sisma; le Zone B e C ($I_c > 2,6$) corrispondono invece ai terreni coesivi a comportamento argilloso ed entrambi sensibili a “cyclic softening”, in particolare i sedimenti che ricadono nella zona C risultano più suscettibili a perdite di resistenza postsisma.

Limi non plastici saturi spesso cadono nella zona C, tuttavia, il loro CRR è fortemente controllato dalla coesione non drenata C_u .



Carta della classificazione di comportamento dei sedimenti da prove CPT (da P.K. Robertson, 2009).

Analizzando i dati penetrometrici si evince che i sedimenti corrispondente ai depositi sabbiosi (morenico) e ai depositi di sabbie fini fluviali, ricadono prevalentemente nella zona A1. I sedimenti limoso argillosi e i sottostanti depositi, ricadono prevalentemente nella zona B, e solo in minima parte nella zona C, sebbene ancora al suo limite con la zona B.

Per la stima automatica dei cedimenti nei sedimenti insaturi a comportamento granulare (fino al tetto della falda freatica rilevata) si è ricorsi alla procedura di calcolo, proposta da Robertson & Lisheng (2010), di cui in allegato si fornisce il diagramma di flusso della procedura di calcolo. Questo metodo fornisce, per sismi di intensità media, esiti comunque cautelativi, essendo correlabile a sismi di magnitudo $M=7,5$ e consente il calcolo delle deformazioni volumetriche attese e dei relativi cedimenti sulla base della stima del modulo di taglio dinamico G_{max} e dello sforzo di taglio

ciclico effettivo indotto dal sisma, mediante diagrammi proposti e le relazioni che seguono.

Nei sedimenti saturi a comportamento granulare, si è proceduto alla stima automatica dei cedimenti utilizzando la recente procedura di Robertson (2009), che si basa sulla valutazione delle deformazioni volumetriche post-cicliche e calcola i cedimenti sulla base dell'entità del fattore di sicurezza alla liquefazione FL calcolato (se $< 1,20$) e degli esiti di densità relativa DR desunti dalle resistenze di punta (q_{c1N})_{cs}.

Fig. 2. Curves for estimating the postliquefaction volumetric strain of clean sands (modified from Ishihara and Yoshimine 1992).

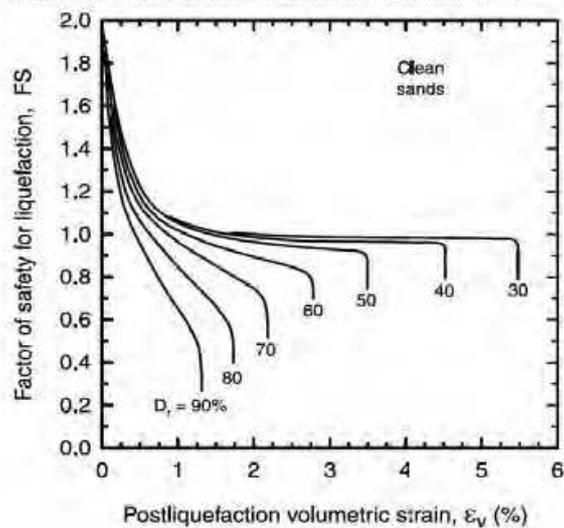
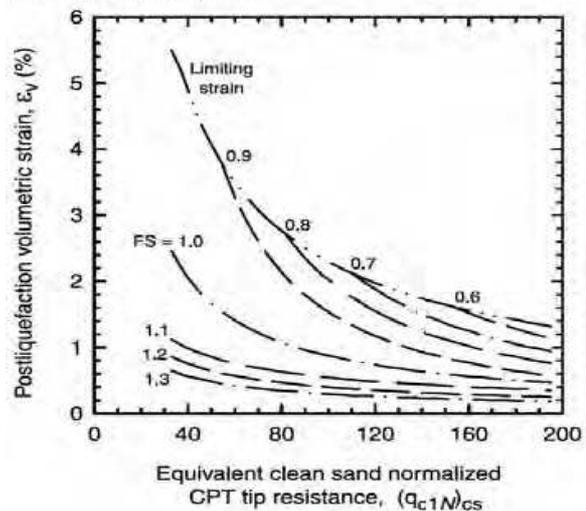


Fig. 3. Relationship between postliquefaction volumetric strain and equivalent clean sand normalized CPT tip resistance for different factors of safety (FS).



Diagrammi di correlazione per la stima dei cedimenti di post-liquefazione nelle sabbie sature da prove CPT (da Zhang et Al., 2007).

Le simulazioni evidenziano i maggiori cedimenti post sisma nei sedimenti granulari attraversati dalle prove (deformazione massima di circa 3 cm).

Per i sedimenti fini coesivi a comportamento argilloso (zone B e C secondo Robertson 2009) il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche.

Generalmente, le deformazioni di riconsolidazione post-sisma sono ritenute molto più piccole di quelle osservate nei sedimenti granulari ed i cedimenti rilevati in seguito a sismi recenti (Loma Prieta; Chi-Chi; Kocaeli) risultano statisticamente modesti anche per potenti intervalli di depositi di argille compressibili. Nella letteratura scientifica, si reputa che le deformazioni volumetriche medie di strati a grana fine siano contenute entro l'1%.

Esperienze empiriche hanno dimostrato che le deformazioni per riconsolidamento nelle argille sono controllate principalmente dallo sforzo di taglio massimo, funzione di un fattore di sicurezza $FS_{\gamma} = 3\% = CRRM / CSR_{7,5} = CRR_{7,5} / CSR_{7,5}$ (Boulanger and Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti (OCR).

Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come $FS_{\gamma} = 3\% = CRR_{5,9} / CSR_{5,9}$ con: $CRR_{5,9} = CRR_{7,5} * MSF_{5,9}$ (fattore di scala della magnitudo per argille -Idriss 2004- pari a 2,1)

$$CRR_{7,5} = 0.8 (s_u / \sigma'_{vo})$$

or

$$CRR_{7,5} = 0.18 (OCR)^{0.8}$$

$CSR_{5,9}$ calcolato con SHAKE 2000 (modello di risposta sito-specifica). Le deformazioni volumetriche sono state calcolate secondo il metodo di Robertson (2009), utilizzando le seguenti relazioni:

$$\varepsilon_{vol} = [0.8 - 2.66 \log (FS)] / [0.33 A (Q_{tn})^3]$$

$$A = 10 - 9 \log (OCR)$$

When $FS \leq 0.84$ set $r_u = 1.0$ & limit $\varepsilon_{vol} \leq 1\%$

La simulazione nei sedimenti coesivi evidenzia solo in alcuni casi deformazioni verticali (cedimenti) post sisma stimati di circa 4 cm, negli intervalli di sedimenti fini poco coesivi, alle diverse profondità dal p.c.

✓ Effetti di amplificazione sismica locale o di sito

Vengono suddivisi in effetti di amplificazione topografica e quelli di amplificazione litologica. Per quanto riguarda l'amplificazione topografica le situazioni locali sono rappresentate da morfologie superficiali più o meno articolate; gli scenari di pericolosità sismica locale correlabili all'amplificazione topografiche vengono di seguito illustrati.

sigla	Scenario di pericolosità sismica locale	Effetti
Z3a	Zona di ciglio $H > 10$ m (scarpata con parete subverticale, bordo di cava, nicchia di distacco, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica)	Amplificazioni topografiche
Z3b	Zona di cresta rocciosa e/o di cocuzzolo	

Per il territorio comunale sono state verificate sia gli scenari Z3a, pur non riscontrando il substrato roccioso bensì il substrato morenico ben compattato.

Per quanto riguarda gli effetti di amplificazione litologica e geometrica vengono verificate da particolari profili stratigrafici e da morfologie sepolte.

Gli scenari legati all'amplificazione litologica e geometrica vengono riportati nella tabella che segue.

sigla	Scenario di pericolosità sismica locale	Effetti
Z4a	Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvioglaciali 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	

Il territorio comunale ricade in zona morenica e zona di fondovalle e pertanto, gli scenari sono di tipo Z4a, Z4b e Z4c.

ANALISI DI SECONDO LIVELLO

Così come realizzato nel 2006, anche per le nuove indagini, effettuate in occasione dell'aggiornamento del P.G.T. viene implementata la verifica di secondo livello. Per le aree perimetrate in zona Z3a – Z4a – Z4b e Z4c, nella carta della pericolosità sismica locale, è stata applicata la procedura di secondo livello per la caratterizzazione semiquantitativa degli effetti di amplificazione di sito.

L'applicazione del secondo livello consente nel determinare la risposta sismica dei terreni relativamente al fattore di amplificazione (F_a) e inoltre, permette di individuare le aree in cui la normativa nazionale risulta insufficiente a salvaguardare dagli effetti di amplificazione locale. Gli approfondimenti con metodi quantitativi, per gli effetti di amplificazione sia morfologica che litologica, sono utilizzati per zonare il territorio comunale in funzione del valore di F_a .

FATTORE AMPLIFICATIVO DOVUTO ALLA LITOLOGIA (Z4a – Z4b e Z4c)

Al fine di valutare l'amplificazione litologica è necessario la conoscenza dei parametri sotto riportati:

- andamento della V_s con la profondità fino a valori pari o superiori a 800 m/s;
- analisi litologica dei siti;
- sezioni geologiche con modello geofisico-geotecnico;
- spessore e velocità di ciascun orizzonte stratigrafico.

Come ricordato in premessa, per la determinazione delle onde V_s sono state realizzate quattro prove masw, ubicate in modo omogeneo sul territorio

comunale, inoltre sono state realizzate n° 4 prove penetrometriche dinamiche-statiche, localizzate nell'area a rischio liquefazione. La ricostruzione litostratigrafia è stata possibile grazie alle numerose prove pregresse realizzate sia dallo scrivente, in occasione di progetti privati.

Tutte le prove masw hanno classificato i terreni in categoria di suolo B, per gli scenari Z4a, Z4b e Z4c, pertanto la successione stratigrafica di riferimento, lo spessore e la velocità di ciascun strato sono stati riportati nelle schede di stima degli effetti litologici. Successivamente

è individuata la scheda di valutazione idonea alla litologia di riferimento compatibile con i campi di validità riportati nei diagrammi Z – Vs (scheda litologica ghiaiosa). La profondità del primo strato (spessore > 4 m) e la relativa velocità Vs determinano la curva caratteristica da utilizzare ai fini dei calcoli.

Viene valutato il periodo del sito T con la seguente formula:

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

dove:

h_i = spessore dello strato i-esimo;

V_s = velocità dello strato i-esimo.

Nella tabella sottostante vengono riportati i valori dei periodi di sito (T) su tutte le masw con i relativi fattori di amplificazione di sito (Fa).

	T di sito	Periodo 0.1s – 0.5 s	Periodo 0.5s – 1.5 s
		Fa di sito	Fa di sito
Masw 1	0.24	1.35	1.1
Masw 2	0.27	1.36	1.12
Masw 3	0.28	1.38	1.13
Masw 4	0.31	1.4	1.15

I valori sopra riportati vengono confrontati con i valori F_a di soglia comunale, definiti dalla D.G.R. 8/7374 del 28.05.2008.

Così come previsto dalla normativa il valore di F_a viene riferito agli intervalli di periodo tra 0.1 – 0.5s e 0.5 – 1.5s: i due intervalli di periodo nei quali è stato calcolato il valore di F_a vengono scelti in funzione del periodo proprio delle tipologie edilizie; in particolare l'intervallo tra 0.1 – 0.5s si riferisce a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide, mentre l'intervallo tra 0.5 – 1.5s si riferisce a strutture più alte e più flessibili.

Considerando l'allegato 5, della D.G.R. 8/1566 del 22 dicembre 2005, effetti litologici – scheda litologia ghiaiosa, è stata scelta la curva n. 3 (color blu), per la velocità riscontrata, come quella più appropriata per la correlazione T – F_a per l'intervallo (0.1s – 0.5s e 0.5s – 1.5s), e infine correlando i valori sopra riportati con i valori F_a di soglia comunale, si ottiene:

	Categoria di suolo	Periodo 0.1s – 0.5 s	Periodo 0.1s – 0.5 s	Periodo 0.5s – 1.5s	Periodo 0.5s – 1.5s
		Fa di sito	Fa di soglia comunale	Fa di sito	Fa di soglia comunale
Masw 1	B	1.28	1.4	1.5	1.7
Masw 2	B	1.33	1.4	1.53	1.7
Masw 3	B	1.31	1.4	1.52	1.7
Masw 4	B	1.29	1.4	1.47	1.7

Tutti i valori riscontrati sono sotto soglia, pertanto la normativa sismica, per tutti i casi considerati sia per il periodo tra 0.1s – 0.5s e tra 0.5s – 1.5s, è sufficiente a tenere in considerazione i possibili effetti di amplificazione litologica.

FATTORE AMPLIFICATIVO DOVUTO ALLA TOPOGRAFIA (Z3a)

Per quanto riguarda gli effetti morfologici (Z3a), sono state determinate, in funzione dei siti rappresentativi, delle sezioni topografiche perpendicolari agli elementi morfologici indagati, le sezioni in esame sono ubicate nella tavola delle indagini.

Per le sezioni prese in considerazione la normativa prevede la conoscenza dei seguenti parametri:

- larghezza alla base del rilievo (L);
- larghezza in cresta del rilievo (I);
- dislivello altimetrico massimo H e dislivello altimetrico minimo h dei versanti;
- inclinazione dei fronti ($\alpha 1 - \alpha 2$);
- coefficiente di forma H/L.

Tutte le misure richieste per ogni singola sezione sono state inserite nella scheda di valutazione morfologica per determinare gli effetti di amplificazione sismica.

Nella tabella sottostante vengono riportati il valore caratteristico di Fa per ciascuna classe altimetrica e classe di inclinazione e l'estensione della relativa area di influenza Ai.

Classe altimetrica	Classe di inclinazione	Valore di Fa	Area di influenza
$10 \text{ m} \leq H \leq 20 \text{ m}$	$10^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	1.12	$A_i = H$
$20 \text{ m} \leq H \leq 40 \text{ m}$	$10^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	1.23	$A_i = \frac{3}{4} H$
$H > 40 \text{ m}$	$10^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$	1.1	$A_i = \frac{2}{3} H$
	$20^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$	1.24	
	$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	1.33	
	$60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$	1.24	
	$\alpha > 70^\circ$	1.19	

18. PAI-PGRA

Il PGRA ha come finalità quello di ridurre le conseguenze derivanti dalle alluvioni, a tal fine nel Piano vengono individuate le aree potenzialmente esposte a pericolosità per alluvioni, individuando le aree a rischio significativo e pianificando le misure per ridurre lo stesso.

La delimitazione e la classificazione delle aree allagabili sono contenute nelle mappe di pericolosità, la classificazione del grado di rischio al quale sono soggetti gli elementi esposti rappresentate nelle mappe di rischio. Il territorio comunale ricade nell'ambito: Reticolo secondario di pianura naturale e artificiale (RSP).

Al fine di adeguare lo strumento urbanistico (PGT) relativamente alle aree allagabili del PGRA si è proceduto ad una verifica tra i contenuti del Piano (PGT) e il PGRA e di adeguare il PGT, così come contemplato dalla D.G.R. del 19 giugno 2017 – n° X/6738. A seguito di verifiche in situ è stato possibile la stesura della tavola PAI-PGRA che aggiorna la perimetrazione dei corsi d'acqua.

18.1 CARTA DEI VINCOLI

Nella tavola 3 sono riportate le delimitazioni dei seguenti vincoli:

□ **Fasce a medio grado di tutela del reticolo idrico minore di competenza comunale**

Il comune di Pozzolengo, in ottemperanza a quanto previsto dalla L.R. 1/2000 e secondo le direttive della D.G.R. n° 7/7868 del 25/01/02, ha provveduto all'individuazione del reticolo idrico minore (redatto da Garda Uno), approvato con Del. di Consiglio Comunale il 12/05/2006, pertanto, per ulteriori approfondimenti sia di carattere normativo che di gestione del demanio idrico si rimanda allo studio sopra citato.

□ **Fascia di rispetto per i corsi d'acqua primari e (R.D. n° 523 del 1904)**

La legge assoggetta a salvaguardia tutti i corsi d'acqua primari e secondari (fascia di rispetto di 10 m). I corsi d'acqua ricadenti nel territorio di Pozzolengo sono: Torrente Redone e la Fossa Redone (Tav.4).

□ **Vincolo ai sensi della L. 431/85 (ex Galasso) – art.1.**

La 431/85 stabilisce che i fiumi, i torrenti ed i corsi d'acqua iscritti negli elenchi previsti dal testo unico, approvato con R.D. n° 1775/1933, e le relative sponde o piedi degli argini per una fascia di 150 metri ciascuna, in ragione del loro interesse paesaggistico, rappresentano dei beni ambientali tutelati.

□ **Aree potenzialmente interessate da alluvioni frequenti (aree P3/H con tempo di ritorno 20 anni)**

La tavola PAI-PGRA fa ricadere l'area in esame nell'Ambito territoriale RSP (D.G.R. n° X/6738 del 19 giugno 2017), lo stesso perimetra le aree potenzialmente allagabili con tempi di ritorno di 20 anni.

□ **Aree di salvaguardia dalle opere di captazione dei pozzi.**

Per i pozzi dell'acquedotto pubblico valgono le prescrizioni contenute al comma 5 art. 5 del D.Lgs. 258/00 e s.m.i., tale norma definisce una fascia di tutela assoluta, con un'estensione di raggio non inferiore a 10 m, da adibire esclusivamente alle opere di captazione, e una zona di rispetto di raggio non inferiore a 200 m (in allegato vengono riportate le schede relative alle caratteristiche dei pozzi pubblici).

La zona di tutela assoluta, recintata, è adibita esclusivamente ad opere di presa e a costruzioni di servizio.

Nella zona di rispetto sono vietate la dispersione di reflui, fanghi e liquami, l'accumulo di concimi organici, la dispersione di acque bianche provenienti da piazzali e strade, la presenza di aree cimiteriali, lo spandimento di pesticidi e fertilizzanti, l'apertura di cave e pozzi, discariche di qualsiasi tipo, lo stoccaggio di rifiuti, reflui prodotti e sostanze chimiche, sostanze radioattive, la presenza di centri di raccolta, rottamazione e demolizione di autoveicoli, di impianti di trattamento rifiuti, la presenza di pascolo e stazzo di bestiame, l'insediamento di pozzi perdenti e tracciati fognari.

19 CARTA DI SINTESI

La carta di sintesi è stata integrata delimitando l'area a rischio liquefazione; è stata redatta mediante la sovrapposizione di dati riportati nella fase di analisi al fine di pervenire alla definizione di scenari di rischio.

L'indagine condotta sui luoghi ha fornito una connotazione ben precisa di tutta l'area in studio, la serie di argomentazioni esposte nei capitoli precedenti in ordine alle condizioni di assetto generale dei terreni, ai principali lineamenti geomorfologici, idrogeologici, pedologici e geotecnici, consentono di riconoscere e classificare schematicamente il territorio comunale.

La delimitazione dei poligoni ha tenuto conto dei seguenti fattori:

- *aree vulnerabili dal punto di vista idrogeologico*
- *aree vulnerabili dal punto di vista idraulico;*
- *aree vulnerabili dal punto di vista geotecnico;*
- *aree a rischio liquefazione;*
- *aree potenzialmente allagabili ricadenti nell'ambito del reticolo secondario di pianura naturale e artificiale (PGRA).*

Nell'azione di antropizzazione, questi fattori devono essere tenuti in strettissima considerazione e verificati in modo sistematico, soprattutto quando si realizzano nuovi interventi.

Sulla scorta di quanto riportato è possibile affermare:

- Il Comune di Pozzolengo presenta un rischio sismico pari a 2.

Il territorio si caratterizza per la presenza di versanti con potenziali fenomeni di amplificazione sismica. In alcune zone si rinvencono falde poco profonde, talora associate a depositi con caratteristiche geotecniche scadenti (torbe), che possono innescare fenomeni di liquefazione dei terreni.

- Aree a rischio idraulico.

Aree allagate per difficoltà di smaltimento in occasioni di piogge torrenziali.

Le più zone più critiche interessate dall'esonazione dei corsi d'acqua sono:

- il tratto compreso tra la confluenza con il torrente Redone e località Paludi;
- il tratto compreso tra la Palude di Mantellina e località la Sacca.

- Aree a rischio idrogeologico

I minimi valori di soggiacenza del livello freatico sono dell'ordine di 1.5 - 2.5 m dal piano campagna.

Aree con emergenze idriche (area precedentemente scavate)

- Il grado di vulnerabilità intrinseca degli acquiferi, tramite la sovrapposizione dei parametri afferenti alla litologia di superficie, alle caratteristiche dell'acquifero nel territorio comunale, presenta quattro gradi:
 - vulnerabilità media;
 - vulnerabilità medio-alta;
 - vulnerabilità alta;
 - vulnerabilità elevata;
 - vulnerabilità estremamente elevata

- Aree con scadenti parametri geotecnici

I parametri geotecnici dei litotipi riscontrati nel territorio risultano scadenti per le torbe, mentre per le litozone sabbiose-ghiaiose i valori riscontrati sono ottimi.

- *Aree potenzialmente allagabili ricadenti nell'ambito del reticolo secondario di pianura naturale e artificiale (PGRA).*

Le aree con problematiche idrauliche sono state riscontrate lungo il fosso Redone e vengono perimetrare e vengono riportate nella tavola PAI-PGRA.

- Aree a rischio liquefazione

Le aree poste a nord del territorio comunale, così come evidenziato nel capitolo 19, sono a rischio liquefazione, pertanto sono state delimitate ed evidenziate nella tavola di sintesi.

20 CARTA DELLA FATTIBILITA' GEOLOGICA

Nella tavola della fattibilità vengono descritte le singole classi che caratterizzano il territorio indagato:

classe di fattibilità prima:

la classe comprende quelle aree che non presentano particolari limitazioni a variazioni di destinazioni d'uso. *La prima classe non è rappresentata all'interno del territorio comunale.*

classe di fattibilità seconda:

il territorio ricadente in questa classe presenta delle ridotte condizioni alla modifica delle destinazioni d'uso dei terreni; buona parte del territorio comunale ricade in questa classe.

classe di fattibilità terza:

fattibilità con consistenti limitazioni. La classe comprende le zone nelle quali sono state riscontrate consistenti limitazioni alla modifica delle destinazioni d'uso. La classe è stata suddivisa in sottoclassi in relazione alle problematiche riscontrate, in questa classe ricadono le aree con scadenti caratteristiche geotecniche, le aree ad alta vulnerabilità idrogeologica compresa la zona di rispetto del pozzo pubblico (raggio 200 m), le aree a rischio idraulico, le aree di scarpata e le aree a potenziale rischio liquefazione.

classe di fattibilità quarta:

le zone ricadenti in questa classe presentano gravi limitazioni per la modifica delle destinazioni d'uso delle aree. *Dovrà essere esclusa qualsiasi nuova edificazione, se non per opere pubbliche o di interesse pubblico non altrimenti realizzabili, previa verifica di compatibilità degli interventi previsti con lo stato di dissesto presente nell'area e, comunque, tale edificazione va assoggetta a salvaguardia temporanea.* Le aree ricadenti in questa classe sono:

- a) aree a rischio idraulico;
- b) le fasce di rispetto dei corsi d'acqua, ai sensi del R.D. 523 del 1904;
- c) ambito territoriale RSP – P3/H (PGRA);
- d) la zona di tutela assoluta per il pozzo pubblico (raggio di 10 m);
- e) aree ad alta vulnerabilità idrogeologica associate ad un interesse geomorfologico-naturalistico;
- f) aree con emergenze idriche precedentemente scavate (area di cava).
- g) aree a bassa soggiacenza della falda e con caratteristiche geotecniche scadenti (depositi torbosi e paludosi talora sortumosi)

Bigarello, Ottobre 2018

Firma

Dott. Geol. Spagnolo Rosario