






COMUNE DI VAZZOLA

Provincia di Treviso



STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA Livello 1 e Livello 2

O.C.D.P.C. n° 293 del 26.10.2015 - D.G.R. n.1572 del 03.09.2013

A cura di	Con la collaborazione di	
Dr. Geol. Matteo Collareda	 Dr. Geol. Claudia Tomassoli	 Dr. Geol. Laura Guerra
Data: febbraio 2017	Incarico affidato con determina n.594 del 07/12/2016	
 <div style="float: right; text-align: right;"> Dr. Geol. Matteo Collareda via Lungo Giara 29 - 36033 Isola Vicentina (Vicenza) tel./fax 0444 962532 - cell. 349 0567455 e-mail: info@studiosisma.com pec: studiosisma@epap.sicurezza postale.it </div>		

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
2. GENERALITÀ	4
3. ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA	6
3.1 Inquadramento geografico	6
3.2 Assetto geomorfologico locale	6
3.3 Inquadramento geologico e litologico	9
3.4 Inquadramento idrografico e idrogeologico	12
4. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO	15
4.1 Inquadramento sismotettonico generale	15
4.2 Caratterizzazione sismogenetica del Comune	17
4.3 Sismicità storica	18
4.4 Faglie capaci e sorgenti sismogenetiche	21
4.5 Zonazione sismica nazionale	23
4.6 Pericolosità sismica di riferimento.....	24
5. MICROZONAZIONE SISMICA. PRINCIPI FONDAMENTALI E FINALITÀ	27
5.1 Introduzione	27
5.2 La natura del problema.....	27
5.3 Finalità e livelli di approfondimento	29
6. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI DA INDAGINI PREGRESSE E DI NUOVA REALIZZAZIONE	30
6.1 Indagini pregresse e di nuova realizzazione	30
6.2 Metodologie di elaborazione e risultati delle nuove indagini.....	30
6.2.1 Indagini sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.)	30
6.2.2 Indagini sismica di tipo passivo in array (Re.Mi.).....	33
6.2.3 Indagini penetrometriche di tipo statico (CPT).....	45
6.3 Modello geosismico del sottosuolo. Interpretazione e incertezze.....	46
7. ELABORATI CARTOGRAFICI.....	47
7.1 Carta delle indagini.....	47
7.2 Carta geologico-tecnica.....	47
7.3 Carta delle microzonee omogenee in prospettiva sismica (Livello 1)	49
7.4 Carta delle frequenze.....	53
7.5 Carta della pericolosità sismica locale (CPSL)	56
8. VERIFICHE PRELIMINARI DI LIVELLO 3	58
8.1 Descrizione del metodo	58
8.2 Analisi numeriche condotte	64
9. CARTA DI MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 2 - STIMA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE FA - FV	69
10. VERIFICHE ALLA LIQUEFAZIONE.....	77
11. METODO GEOFISICO - STRUMENTALE PER LA CARATTERIZZAZIONE DEGLI INDICATORI DI VULNERABILITÀ SISMICA DEGLI EDIFICI	84
12. REDAZIONE CARTOGRAFICA E CREAZIONE BASI INFORMATIVE	91
13. BIBLIOGRAFIA.....	94
14. ALLEGATI FUORI TESTO	95

1. INTRODUZIONE

Tra i principali compiti che la Regione Veneto svolge in materia ambientale e di governo del territorio, vi è quello di pianificare e programmare strumenti diretti alla mitigazione dei rischi naturali e antropici, con l'obiettivo di favorire trasformazioni positive nella vita delle persone e una migliore sostenibilità ambientale.

I rischi naturali possono essere mitigati attraverso azioni preventive, come la corretta gestione del territorio da parte delle Amministrazioni competenti: attendere un evento sismico per intervenire in fase di emergenza, aumenta esponenzialmente il costo di gestione degli interventi e delle successive ricostruzioni. Al contrario, agire in modo preventivo, ridurrebbe i costi di gestione delle fasi successive all'evento.

Procedere in modo preventivo, significa quindi sviluppare una serie di norme, linee guida e/o comportamenti operativi e/o educativi finalizzati alla gestione dei rischi naturali, alla riduzione generale dei costi sociali e conseguentemente alla loro ricaduta sulla popolazione.

La Regione Veneto, da diversi anni, ha attivato una serie di iniziative di tipo normativo e tecnico-operativo per conseguire efficaci progressi sulla conoscenza dei fenomeni naturali del proprio territorio legati alla geologia, con l'obiettivo di attivare azioni efficaci in materia di riduzione dei rischi naturali, con particolare riguardo al rischio sismico.

Gli studi preventivi in campo sismico permettono di identificare aree in cui la pericolosità sismica raggiunge livelli che possono pregiudicare la sostenibilità del territorio, sia in termini di vite umane, sia economici e sia di degrado ambientale.

Per Microzonazione Sismica (di seguito definita MS) si intende la “valutazione della pericolosità sismica locale attraverso l'individuazione di zone del territorio caratterizzate da comportamento sismico omogeneo”.

In sostanza, la MS individua e caratterizza le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazione locale del moto sismico e le zone suscettibili di instabilità: è ormai noto che lo stesso evento sismico può provocare scuotimenti decisamente differenti in dipendenza degli spessori e delle qualità dei terreni posti a copertura del substrato roccioso, delle caratteristiche morfologiche del sito ed, inoltre, è riconosciuto che gli effetti di un terremoto variano col variare delle condizioni geologiche in cui esso si sviluppa.

Le caratteristiche geologiche del territorio possono alterare localmente e in maniera evidente l'azione sismica. Recentemente, anche in Italia (ad esempio Umbria-Marche, 1997; Salò, 2004; L'Aquila, 2010; Modenese, 2012), sono stati evidenziati livelli di danneggiamento estremamente diversi in edifici ubicati a breve distanza tra loro e aventi all'incirca le stesse caratteristiche strutturali. In alcune di queste località (ad esempio Umbria-Marche, 1997) sono state effettuate registrazioni accelerometriche durante un *aftershock*, che hanno mostrato come i livelli di scuotimento su siti in pianura, su terreni sciolti, siano stati amplificati di oltre il doppio rispetto ai siti su roccia e, inoltre, abbiano avuto una durata molto più lunga.

Gli studi di MS hanno l'obiettivo di razionalizzare la conoscenza di questi fenomeni, restituendo informazioni utili per chi deve pianificare o realizzare interventi sul territorio.

2. GENERALITÀ

La MS è uno strumento molto utile ai fini della prevenzione sismica e della valutazione del rischio sismico, per il governo del territorio, per la progettazione e per la pianificazione per l'emergenza.

La MS ha lo scopo di riconoscere ad 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.

In sostanza, lo studio di MS viene sintetizzato in una carta del territorio nella quale sono indicate:

- le zone in cui il moto sismico non viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante e, pertanto, gli scuotimenti attesi sono equiparati a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;
- le zone in cui il moto sismico viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche e/o geomorfologiche del territorio;
- le zone in cui sono presenti fenomeni di deformazione permanente, attivi o potenzialmente inducibili-attivabili in caso di sisma (instabilità di versante, liquefazioni, fagliazione superficiale, cedimenti differenziali, ecc.).

In funzione dei diversi contesti e dei diversi obiettivi, gli studi di MS possono essere effettuati a vari livelli di approfondimento, con complessità e impegno crescenti, passando dal Livello 1 fino al Livello 3:

- il **Livello 1** 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 rispetto alle zone sopra descritte;
- il **Livello 2** si propone di quantificare l'effetto sismico proprio di ogni zona omogenea individuata nel Livello 1, utilizzando allo scopo ulteriori e mirate indagini, ove necessario, e definisce la "Carta di microzonazione sismica";
- il **Livello 3** restituisce una "Carta di microzonazione sismica" con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

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.

Nella pianificazione d'emergenza, sia di livello comunale che provinciale, gli studi di MS consentono una migliore e consapevole individuazione degli elementi strategici di un piano di emergenza e, in generale, delle risorse di protezione civile.

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 definirne il grado di adeguamento necessario ad evitarne il collasso in caso di sisma e, quindi, per non compromettere le loro funzioni di pubblica utilità.

Il presente studio, esteso a tutto il territorio comunale, è stato svolto ad un Livello 1 e Livello 2 di approfondimento, secondo le seguenti modalità:

- studio di **Livello 1** realizzato tramite fondi nazionali secondo gli “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica” approvati dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome il 13.11.2008 e s.m.i. Per quanto riguarda la rappresentazione cartografica e l’informatizzazione dei dati, sono state utilizzate le indicazioni previste dagli “Standard di rappresentazione e Archiviazione Informatica” - versione 4.0.
- studio di **Livello 2** condotto secondo le Linee Guida Regionali approvate con D.G.R. 1572 del 03/09/2013.

Inoltre, sono state effettuate delle misurazioni geognostiche su tutto il territorio comunale, in modo da ottenere informazioni più dettagliate sulla risposta sismica locale, necessaria per definire con maggior cura lo studio di MS e per restituire, oltre a quelle richieste dalle linee guida e delle carte tematiche importanti per lo sviluppo urbanistico del territorio e per gli eventuali adeguamenti sismici delle strutture.

Ad ogni modo, i risultati del Livello 1 possono offrire elementi conoscitivi utili per l’adeguamento o il miglioramento di opere esistenti e per la corretta realizzazione di quelle nuove, orientando il Progettista nella scelta degli approfondimenti specifici da eseguire.

3. ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA

Nel presente capitolo vengono illustrate le principali caratteristiche geomorfologiche, litologiche e idrogeologiche del territorio comunale, facendo riferimento alle considerazioni riportate nel P.A.T. comunale, precedentemente condotto.

3.1 Inquadramento geografico

Il comune di Vazzola è posizionato nella parte nord-orientale della pianura trevigiana, compresa tra i fiumi Piave e Livenza. Amministrativamente confina con i comuni di Codognè a nord, Fontanelle ad est, Cimadolmo a sud, Mareno di Piave ad ovest e San polo di Piave a sud est. Il territorio ha una superficie di circa 26.16 kmq ed una popolazione di 6.969 abitanti (ISTAT, dicembre 2015).



Inquadramento generale del territorio

Le infrastrutture viarie principali in prossimità del territorio sono: l'Autostrada Alemagna A28 per un piccolo tratto a nord, le Strade Provinciali n° 15 (Cadore Mare), n° 41 (di Pianzano), n° 43 (di Orsago) e n° 44 (Vazzola-Roverbasso). A livello cartografico ("Carta Tecnica Regionale") il territorio comunale è compreso nelle Sezioni n° 085090 "San Vendemiano" e n° 085100 "Gaiarine" (1:10.000); inoltre rientra negli Elementi n° 085091 "Levada", n° 085092 "Cimavilla", n° 085093 "San Felice", n° 085101 "Gaiarine", n° 085102 "Case Modonese", n° 085103 "Codognè" e n° 085104 "Roverbasso" (1:5.000).

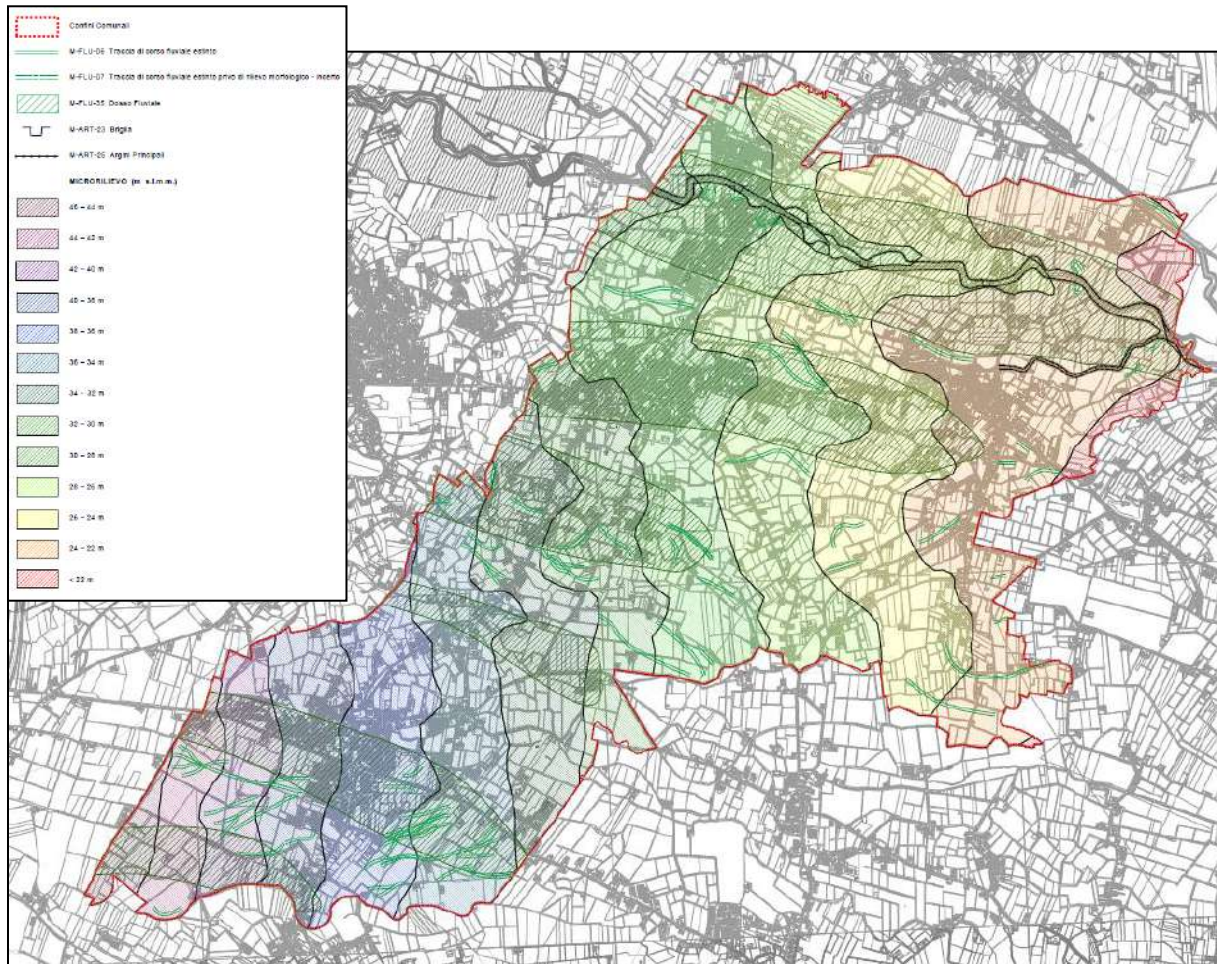
3.2 Assetto geomorfologico locale

Il territorio comunale di Vazzola è situato nella parte nord-orientale della provincia di Treviso, tra la destra orografica del fiume Livenza e la sinistra orografica del fiume Piave.

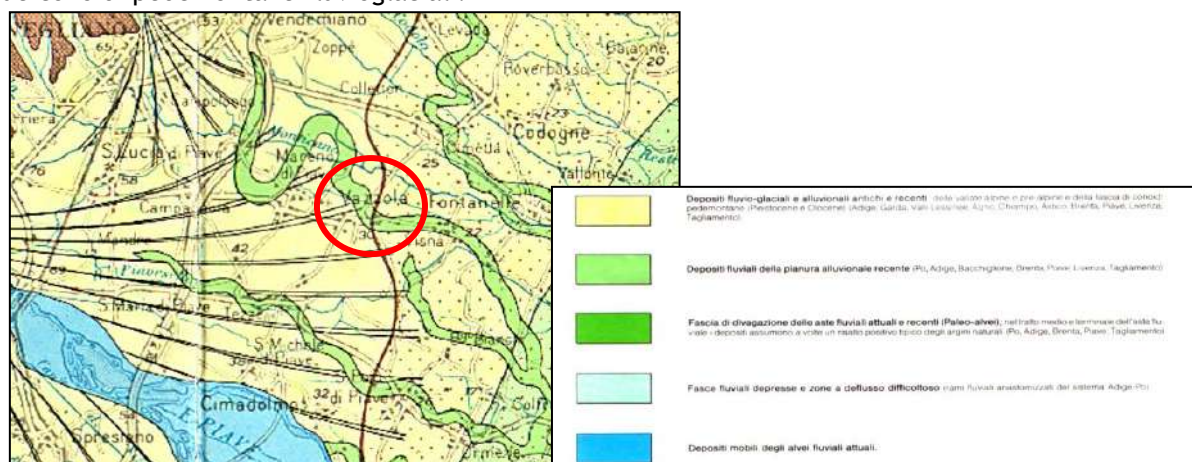
Dal punto di vista **geomorfologico**, il comune di Vazzola si sviluppa nell'Alta Pianura Trevigiana formata, in età glaciale e postglaciale, dal deposito delle alluvioni grossolane apportate dal Fiume Piave che rappresenta l'attuale elemento idrografico di maggiore importanza assieme al torrente Crevada che confluisce nel fiume Monticano in località *Tre Acque*. Entrambi scorrono in direzione

ovest-est rispettivamente nel settore meridionale e settentrionale del territorio comunale. Al fiume Piave sono collegate direttamente altre forme morfologiche come i tratti di scarpata di erosione fluviale attiva e, indirettamente, diversi paleoalvei peraltro privi di rilievo morfologico.

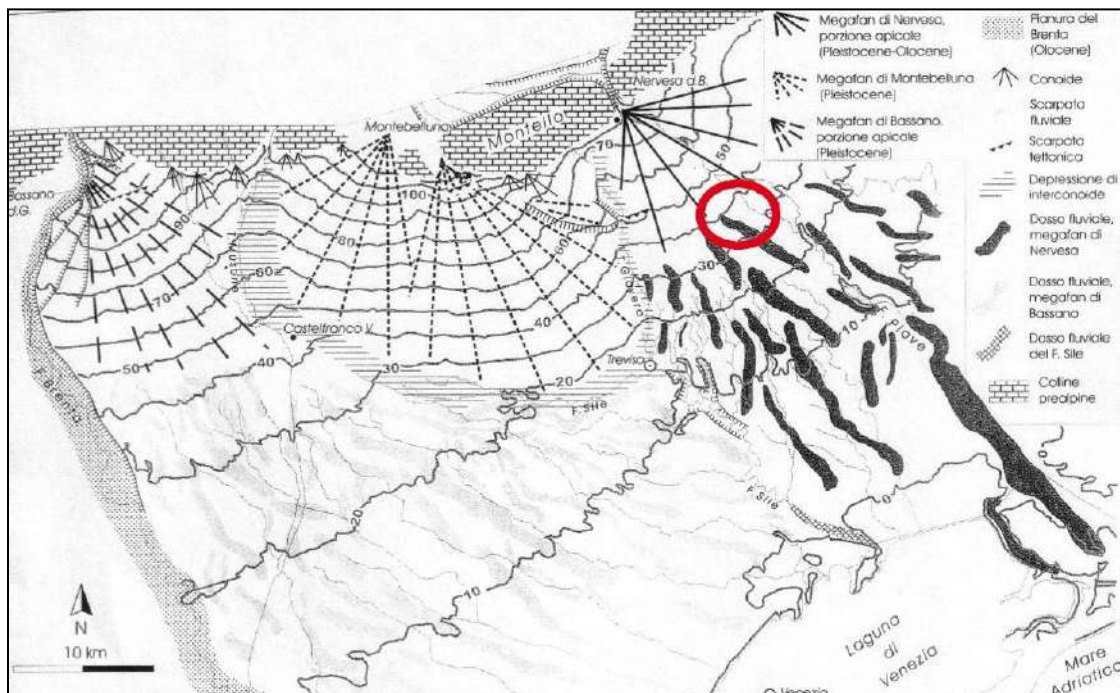
Dal punto di vista altimetrico (vedi mappa sottostante) il comune si presenta piuttosto uniforme con quote che variano tra i 46 m sul livello del mare relative al margine occidentale e i 21 m di quello orientale, digradando quindi in direzione Ovest-Est con una pendenza che si mantiene uniforme intorno al 3‰ in tutto il territorio comunale.



A scala regionale, l'intero territorio comunale ricade nell'Unità detta dei "Depositi fluvio-glaciali e alluvionali antichi e recenti" e, in modo marginale, sono presenti anche delle fasce di divagazione delle aste fluviali antiche e recenti del fiume Piave, infatti si riconoscono due grandi paleo alvi e due conoidi pedemontane fluvio-glaciali.

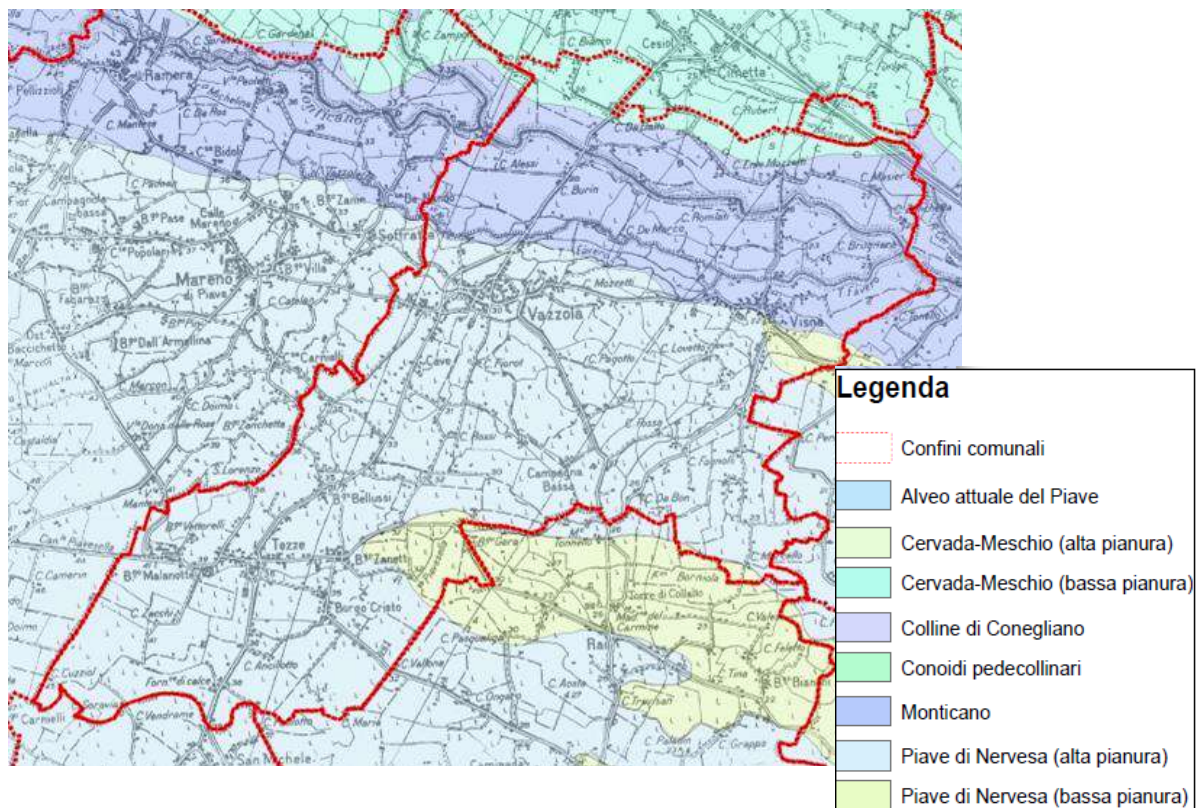


In particolare, nella figura seguente è possibile notare come il territorio in oggetto si posiziona all'interno del *megafan* (grande conoide) di Nervesa e come il suo settore centro-orientale sia interessato dalla presenza dei dossi fluviali legati al medesimo *megafan*.



Fattori genetici della pianura veneta orientale - Estratto da ARPAV "Carta dei suoli del Veneto - anno 2005"

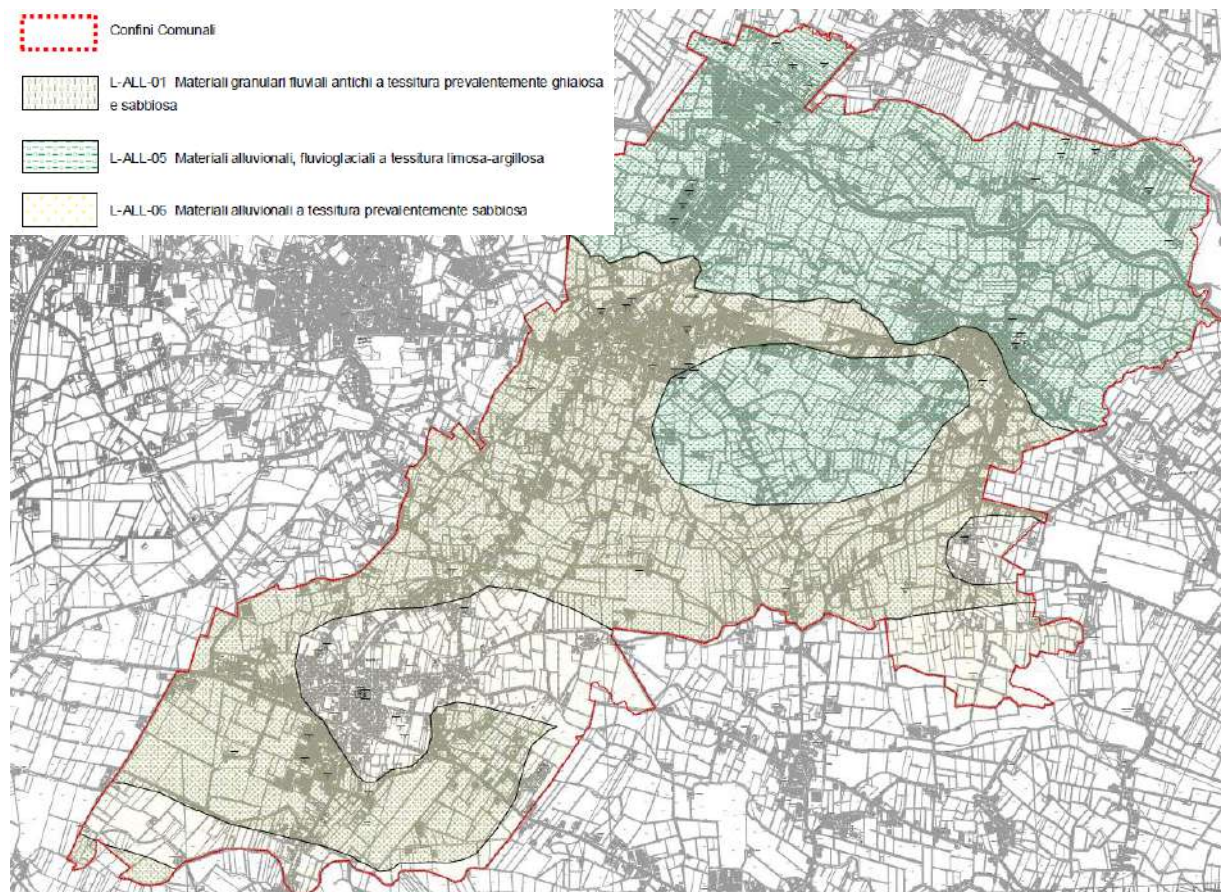
Le unità geomorfologiche appartenenti al territorio comunale sono rappresentate nell'elaborato del PTCP della Provincia di Treviso (2008), denominato "Schema sintetico delle unità geomorfologiche della provincia di Treviso" legato al documento di piano "Carta geomorfologica della provincia di Treviso e unità di paesaggio". L'area di Vazzoia è caratterizzata dalle seguenti unità geomorfologiche:



- *Conoidi pedecollinari*: questa unità è rappresentata da depositi detritici sparsi a forma di ventaglio allo sbocco in pianura delle vallate montane. È rappresentata in quest'area dalla conoide che si colloca ai margini delle colline di Conegliano e soprattutto ai margini occidentali del Montello, ad ovest di Vazzola.
- *Fascia del Monticano*: questa unità geomorfologica forma una striscia allungata composta da sedimenti limosi e argillosi, che collega Conegliano e Oderzo. Essa occupa una posizione di interconoide nell'Alta Pianura interessata dal territorio del PAT, tra il *megafan* di Nervesa e il conoide di Conegliano.
- *Piave di Nervesa*: l'unità si origina allo sbocco del Piave presso la stretta di Nervesa e si allarga a ventaglio fino alla fascia delle risorgive dove la transizione con l'unità del Piave di Nervesa di Bassa Pianura si realizza attraverso digitazioni coincidenti con le principali paleodirettrici fluviali. Il Piave, caratterizzato da un tipico letto largo a canali intrecciati attraversa l'unità in senso mediano, in direzione sudest. La transizione tra Alta e Bassa Pianura è ben marcata dalla fascia delle risorgive. Numerose le tracce di paleoalvei specialmente lungo le principali direttrici di antico scorrimento del Piave rappresentate da dossi che si dispongono a ventaglio sulla superficie dell'unità. Questa unità occupa gran parte del territorio comunale.

3.3 Inquadramento geologico e litologico

Per quanto riguarda le litologie presenti, tipicamente entro i primi 15 m di profondità, il territorio del comune di Vazzola è costituito da alluvioni coerenti ed incoerenti (ghiaie, sabbie, argille), in rapporti verticali e laterali spesso in rapida variazione tra loro: è una tipica zona di transizione tra l'alta e la bassa pianura, in cui le sovrapposizioni tra depositi grossolani (permeabili) e depositi fini (meno permeabili e/o impermeabili) creano a livello stratigrafico una **complessa interdigitazione**.



Il sottosuolo del territorio in esame è costituito, come precedentemente accennato, dalle grandi conoidi alluvionali di natura ghiaioso-sabbiosa, depositate nel passato dai corsi d'acqua che sboccavano dalle vallate prealpine.

Durante la loro formazione, le conoidi si sono più volte incrociate, sovrapposte ed anastomizzate, a causa del mutare frequente dei regimi idrici del corso delle acque. La maggior parte dei depositi presenti nel territorio, costituiti prevalentemente da ghiaie e ciottoli più o meno sabbiosi, sono stati depositati dal fiume Piave in età glaciale e postglaciale.

In particolare, la formazione del territorio è legata a quanto verificatosi nell'ultima glaciazione e nei tempi successivi: nel corso dell'espansione e della fase di massima intensità dell'ultima glaciazione (anaglaciale Würmiano) una spessa coltre di detriti grossolani venne distribuita a ventaglio sulla pianura, formando una grande conoide con vertici a Caerano, Biadene, Nervesa ed altri minori.

Questi vertici erano legati alle varie fronti del ghiacciaio plavense, le quali determinavano grandi correnti fluvio-glaciali che trasportavano verso sud i materiali morenici raccolti. Dopo aver conseguito la massima espansione ed aver sostato lungamente sulle posizioni raggiunte, il ghiacciaio cominciò a ritirarsi (cataglaciale) e le varie correnti pian piano si ridussero. Mantenne una notevole importanza quella in uscita da Nervesa che determinò la formazione di una seconda conoide interconnessa ed in parte sovrapposta alla prima, con vertice a Nervesa e con limite occidentale in corrispondenza del torrente Giavera e limite orientale in corrispondenza del fiume Monticano.

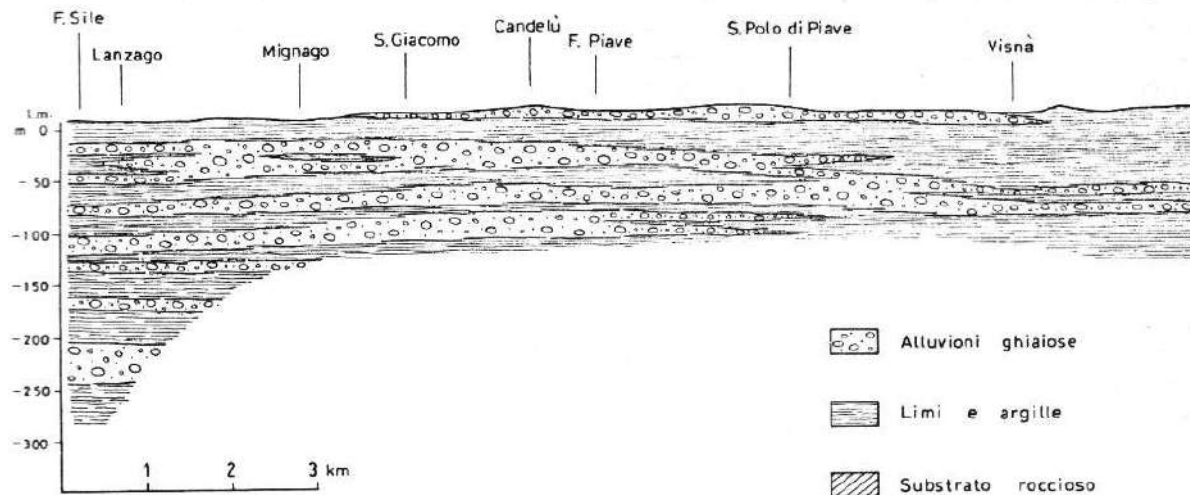
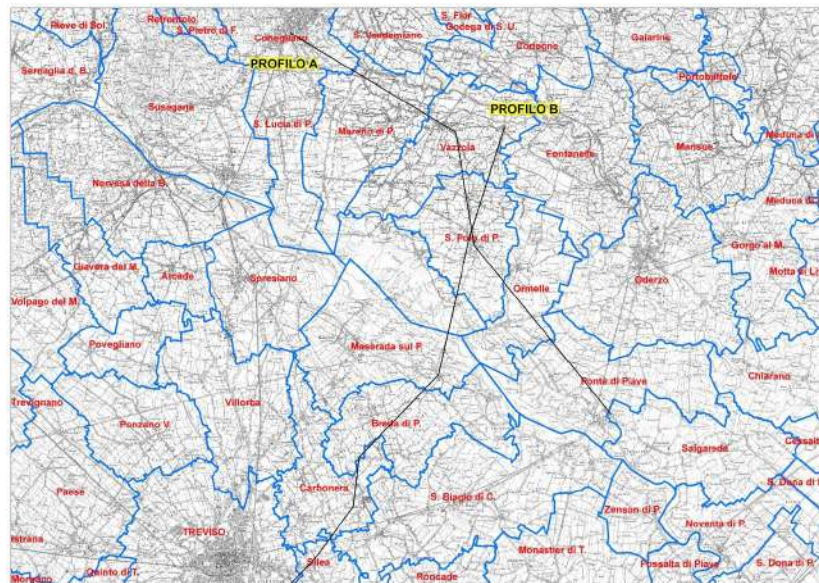
Su quest'ultima conoide in tempi postglaciali (10.000 anni fa circa - oggi) il fiume Piave ha divagato, incidendo e ridepositando sulle vecchie alluvioni. Le singole correnti più veloci hanno lasciato lunghe strisce ghiaiose che ancora oggi si osservano. Alla fine della glaciazione e nel postglaciale, acquisirono importanza i processi deposizionali legati al giungere periodico delle acque di esondazione.

Qui la tranquilla espansione ed il sostare delle acque di piena favorì il deposito di spessori, anche rilevanti, di materiali a granulometria fine: sabbie, limi ed argille. Il tutto terminò con l'intervento dell'uomo che, arginando il Piave (a partire dal 1.200), pose fine all'accumulo di nuove alluvioni sull'Alta Pianura.

Come indicato nel P.A.T. del comune di Vazzola, il territorio viene suddiviso, dal punto di vista **litologico**, in tre zone:

- la fascia settentrionale, interessata dal corso del torrente Crevada e dal fiume Monticano, corrisponde alla zona di deposizione di materiali fini sedimentatisi nella depressione di interconoide. In questa fascia il primo sottosuolo risulta interessato essenzialmente dalla presenza di limi e argille (L-ALL-05);
- la fascia centrale occupa circa i tre quarti dell'estensione complessiva del territorio. Essa è definita dalla presenza, nel sottosuolo, di materiali granulari fluviali antichi a tessitura prevalentemente ghiaiosa e sabbiosa, legati alla presenza del *megafan* di Nervesa. Ai margini meridionali di questa fascia aumenta la presenza di materiale più fine (sabbie e sabbie - limose) che, seppure legato al medesimo *megafan*, segna il passaggio verso la bassa pianura (L-ALL-01);
- la fascia più meridionale, interdigitata con la precedente è costituita da materiali sciolti a varia granulometria e passano in profondità a ghiaie sabbiose con spessore metrico variabile (L-ALL-06).

La situazione stratigrafica presente da nord-ovest verso sud-est è ben rappresentata dai profili stratigrafici tracciati nella figura seguente che attraversano rispettivamente la parte centro settentrionale e quella orientale del territorio comunale.



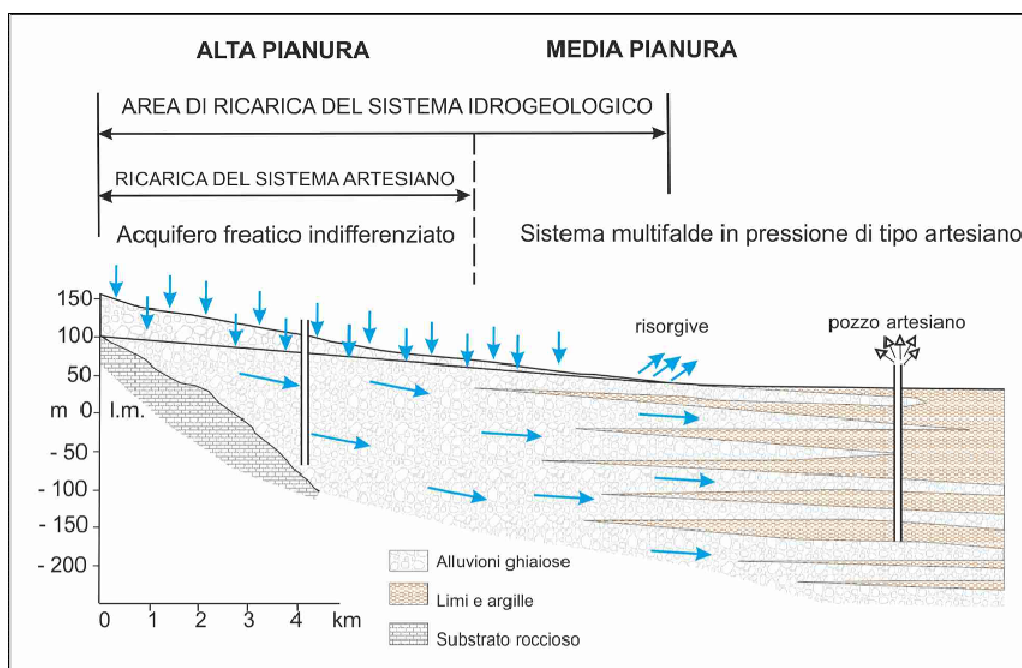
Le sezioni longitudinali interessano sia l'Alta che la Bassa Pianura e mettono in evidenza il passaggio, da nord a sud, da materiali grossolani (ghiaie) a depositi progressivamente più fini (sabbie e argille) che diventano tanto più abbondanti quanto più si procede verso meridione. È evidente il carattere lentiforme sub-orizzontale dei depositi, anche se in numerosi casi gli strati che ospitano gli acquiferi (ghiaie) possono essere seguiti ininterrottamente per decine di chilometri. Dai dati raccolti nell'area comunale e nell'immediato intorno, risulta che, nello specifico, il primo sottosuolo è contraddistinto da abbondanza di ghiaie e sabbie fino a spessori di 20 metri circa che poggiano su spessi livelli di limi-argille, i quali arrivano a spessori di 75 m e all'interno dei quali permangono strati più o meno potenti del deposito grossolano presente più a monte.

3.4 Inquadramento idrografico e idrogeologico

Dal punto di vista stratigrafico generale l'area di pianura in esame, come del resto tutta la pianura veneta, risulta essere costituita dal rimaneggiamento fluviale dei prodotti di disfacimento delle Prealpi e Alpi venete. In generale la pianura veneta è caratterizzata dal punto di vista idrografico da una serie di corsi d'acqua ad andamento subparallelo, con direzione nord-sud che, usciti dalle valli montane, la attraversano fino a riversarsi nel mare Adriatico. È stata appunto questa situazione idrografica a determinare quella che è la divisione della pianura veneta in tre fasce.

Dal punto di vista litologico generale la pianura veneta è caratterizzata lungo il tratto pedemontano da un materasso alluvionale indifferenziato a prevalente natura ghiaiosa, formatosi in seguito alle successive conoidi dei fiumi che si sono non solo sovrapposte, ma anche compenstrate lateralmente tra di loro; in questa unità stratigrafica esiste un'unica potente falda idrica a carattere freatico sostenuta dal substrato roccioso. Tale falda oscilla all'interno dell'acquifero a grande permeabilità in relazione alle fasi di magra e di piena del proprio regime. Al piede dei rilievi la falda si trova tra i 50 e i 100 metri di profondità, ma spostandosi verso sud la superficie freatica si avvicina progressivamente al piano campagna, fino a venire a giorno in corrispondenza di locali livelli impermeabili nei punti più topograficamente depressi, che identificano quella fascia praticamente continua con andamento est-ovest di larghezza variabile tra i 2 Km e gli 8 km detta "fascia dei fontanili o delle risorgive" o "media pianura veneta".

Dal modello idrogeologico generale si può dedurre come, in questa fascia i lembi più avanzati delle conoidi, attraverso digitazioni, abbiano originato un substrato costituito da alternanze di orizzonti ghiaiosi e limoso-argillosi di origine marina o dovuti a episodi di sedimentazione lacustre o palustre tipici della fascia della media pianura. Tale differenziazione del materasso alluvionale origina un complesso idrogeologico multi-falदे ad acquiferi sovrapposti separati tra loro dagli orizzonti impermeabili argillosi. Gli acquiferi sono generalmente in pressione visto che le aree di ricarica sono comunque ad una quota assoluta più alta rispetto a quella degli acquiferi considerati. Segue, per finire, l'ultima fascia che si spinge fino alla costa adriatica il cui sottosuolo è caratterizzato solo rarissimamente dai letti ghiaiosi delle grandi conoidi alluvionali; esso è costituito prevalentemente da orizzonti limoso-argillosi alternati a livelli sabbiosi generalmente fini. Questa porzione del territorio denominata bassa pianura risulta sempre meno ricca di riserve idriche sotterranee produttive spostandosi gradualmente verso sud, a causa della mancanza nel sottosuolo di acquiferi ad elevata permeabilità di spessore apprezzabile.

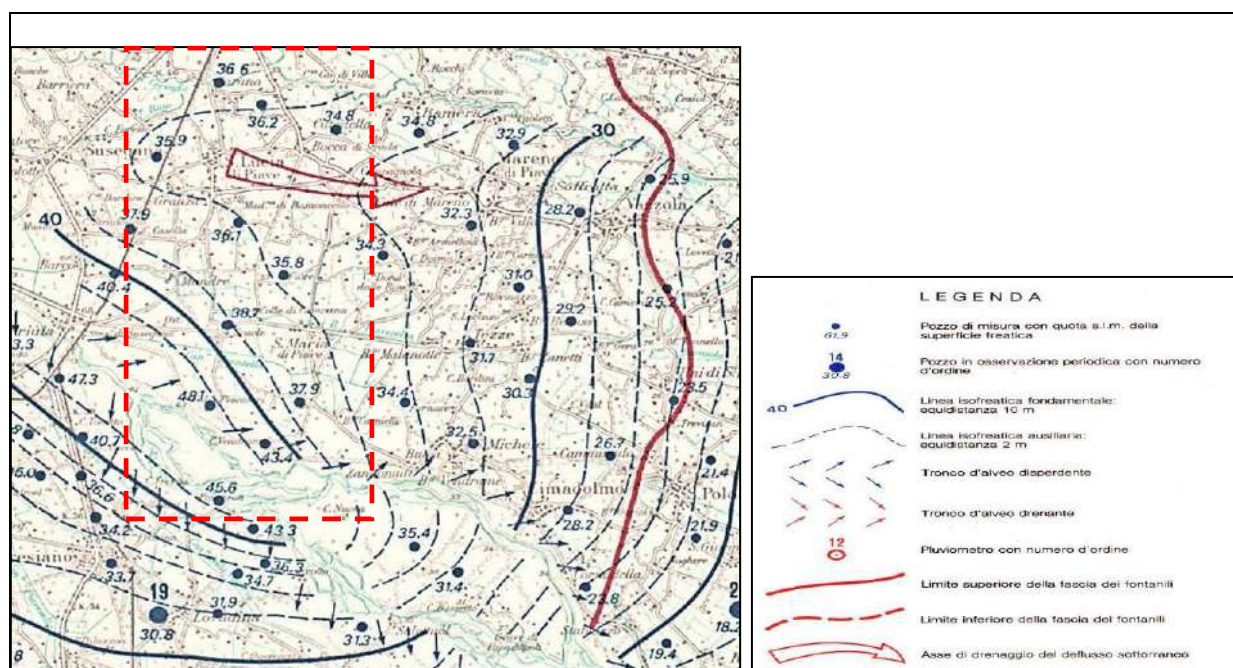


Modello idrogeologico dell'alta e media pianura veneta

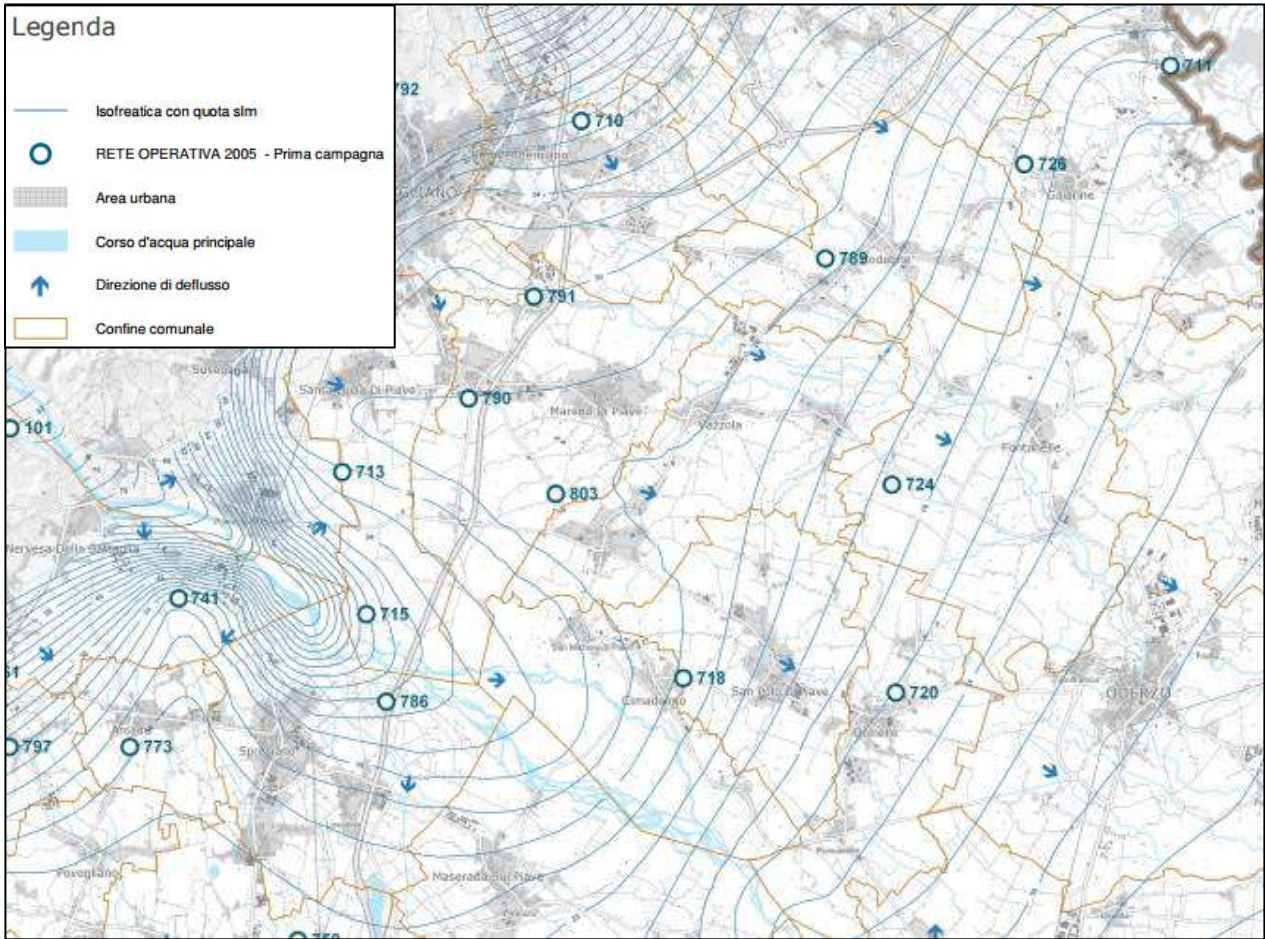
Il comune di Vazzola fa parte del bacino idrogeologico denominato “Piave Orientale e Monticano” (POM), il quale rappresenta una piccola porzione dell’alta pianura trevigiana (circa 85 km²), situata in sinistra idrografica del fiume Piave e caratterizzata dalla presenza di due importanti corsi d’acqua, il Monticano ad ovest ed il Meschio ad est. La superficie freatica è posizionata a profondità di circa 50 metri dal piano campagna nella porzione settentrionale (Vittorio Veneto), fino a circa pochi metri di profondità in prossimità del limite superiore delle risorgive. Anche in quest’area, seppure con portate minori, l’emergenza della falda freatica determina la nascita di piccole risorgive, che in continuità laterale consentono la formazione di modesti corsi d’acqua (torrente Favero, fiume Rasego, fiume Resteggia, torrente Aralt) che confluiscono nel Monticano e nel Livenza. La ricarica dell’acquifero, oltre al contributo principale delle dispersioni del fiume Piave, è assicurata dagli afflussi meteorici diretti ed indiretti e dalle dispersioni derivanti dalle pratiche irrigue.

I dati relativi ai pozzi presenti nel territorio indicano come il comune di Vazzola possa essere ascritto alla fascia di transizione tra le zone di Alta e Media Pianura. In tal senso, pur entro un settore areale piuttosto modesto si verifica una estrema diversità nelle caratteristiche delle falde acquifere, passando da una falda freatica profonda tipica dell’alta pianura ad una falda acquifera superficiale alimentante il sistema delle risorgive.

L’andamento delle isofreatiche permette di riconoscere, oltre alla direzione preferenziale di scorrimento, i principali assi di alimentazione e drenaggio del flusso sotterraneo. La direzione di deflusso rileva una marcata variazione sia di direzione che di gradiente a causa dell’influsso esercitato dal complesso e irregolare assetto strutturale (presenza di conoidi e paleoalvei) e dai processi di dispersione in falda del fiume Piave. Infatti, se a livello provinciale la direzione di deflusso si sviluppa da nord-ovest verso sud-est, nell’area in oggetto le linee di deflusso freatico vengono deformate fino al limite superiore della fascia delle risorgive e in vicinanza del fiume Piave.



Stralcio della Carta idrogeologica dell’Alta Pianura veneta



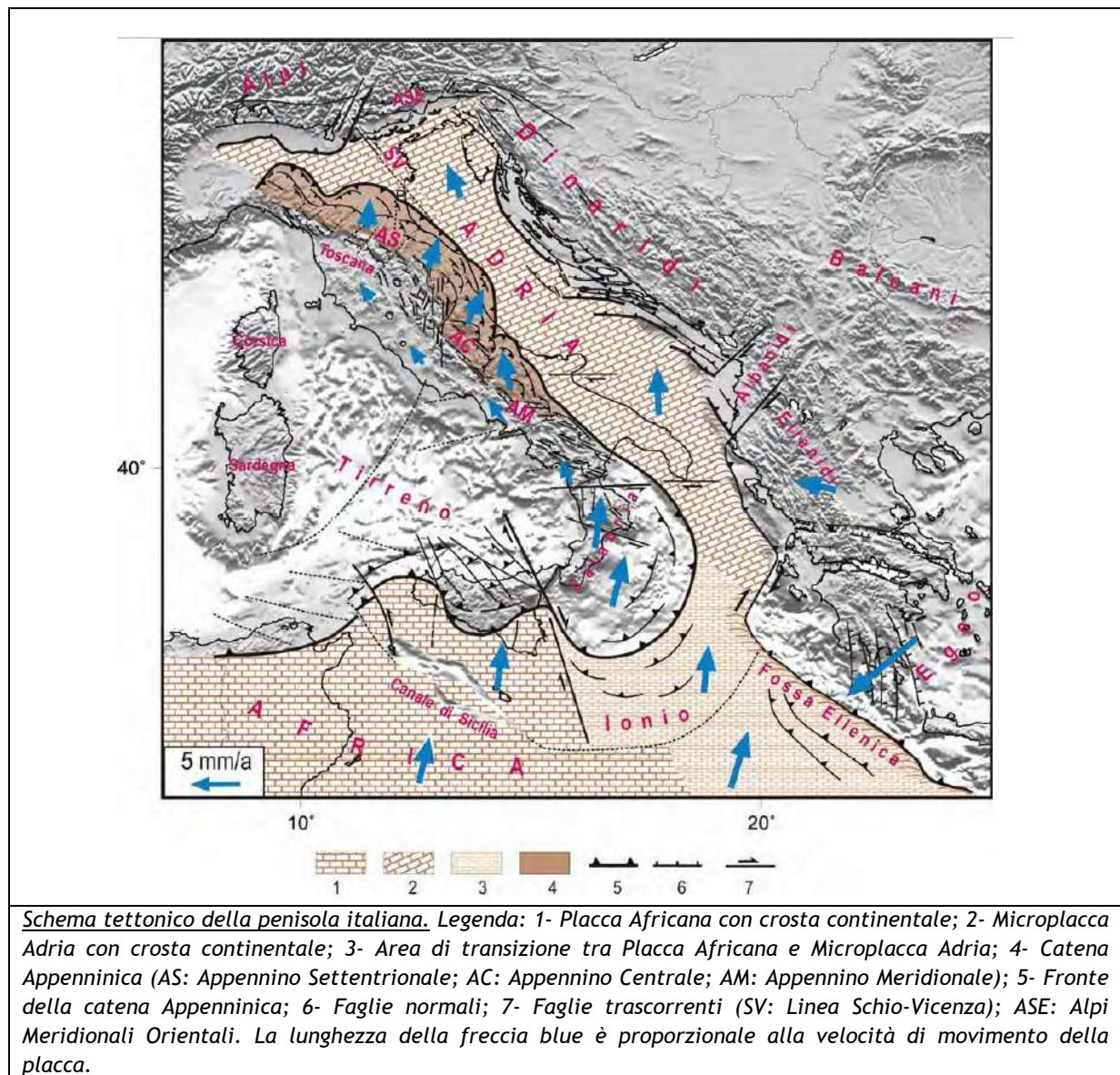
Stralcio della Carta freaticmetrica provinciale - deflussi di magra del 2002

4. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

Nel presente capitolo verrà trattata la sismicità storica locale, le faglie capaci e le sorgenti sismogenetiche, la zonazione sismica nazionale, la pericolosità sismica di riferimento e verrà fatto un accenno all'inquadramento sismo-tettonico generale.

4.1 Inquadramento sismotettonico generale

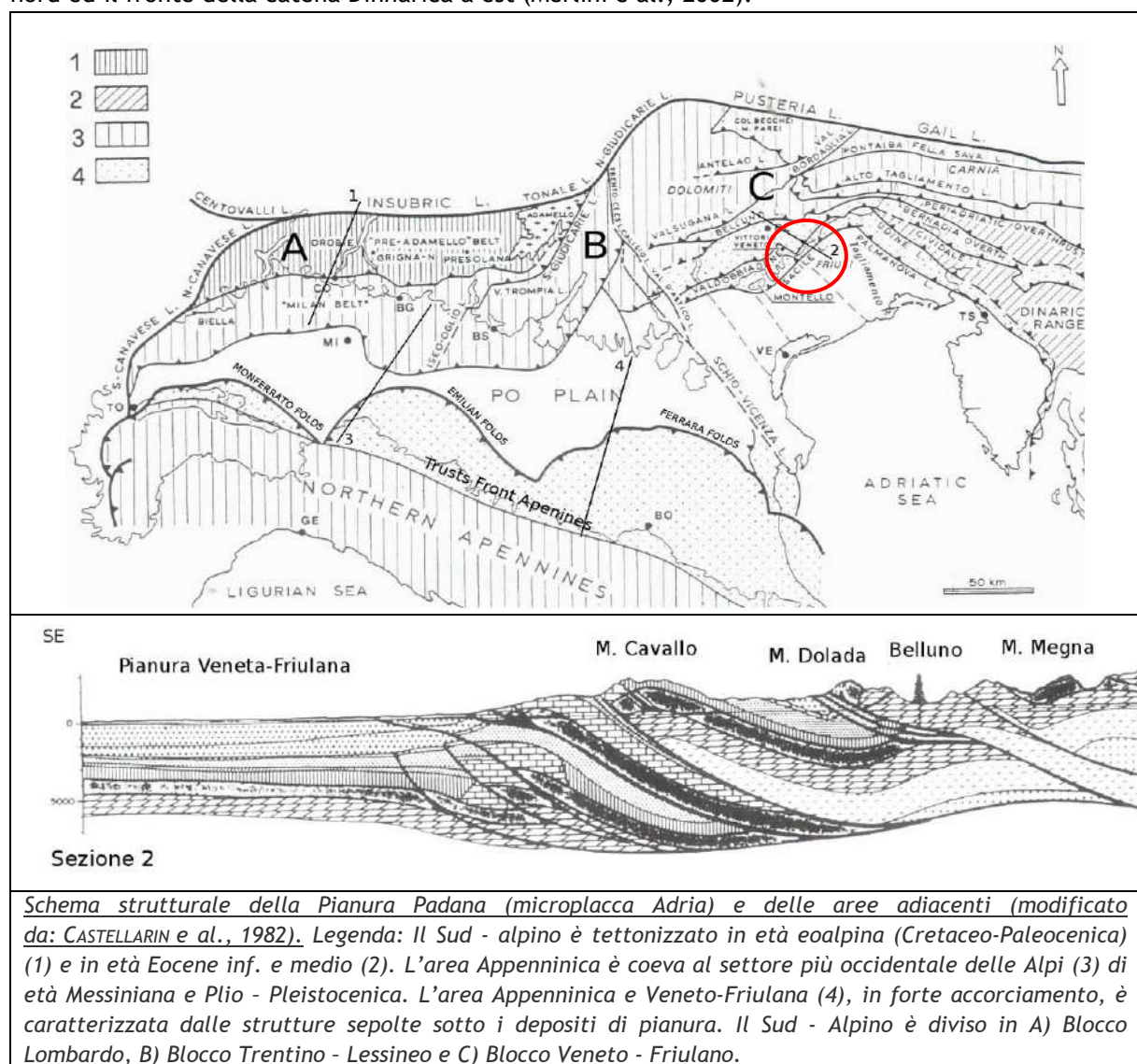
Dal punto di vista strutturale, il territorio di Vazzola si colloca nell'Alta Pianura Veneta a ridosso della grande unità litologica delle Alpi meridionali. Quest'ultima è stata interessata dal *rifting* giurassico con l'individuazione di una piattaforma carbonatica bordata dal Bacino Carnico, Bacino Bellunese, Bacino di Tolmino e dal *plateau* Carnico-Giulio. La placca Adria, che tettonicamente rappresenta un promontorio della placca Africana (Channell, 1996) collocata lungo la Pianura Padana-Veneta e lungo il mare Adriatico, interagisce attivamente con la placca Europea determinando il corrugamento Alpino e Appenninico e, conseguentemente, lo *stress* tettonico attuale.



L'Adria è costituita da crosta continentale che, nella porzione più settentrionale, è rappresentata dal substrato della Pianura Padana interagente con il fronte della catena Appenninica a Sud e con il Sud-Alpino a Nord. La collisione continentale tra la parte più settentrionale della placca Adria e quella Europea ha portato alla formazione della catena Alpina. La conseguente subduzione verso Sud della placca Europea e il sovrascorrimento della placca Adria (subduzione continentale, Ballye al., 1985) ha provocato la formazione di strutture di *retro-trust*.

Un importante ruolo di svincolo cinematico della placca Adria settentrionale, viene svolto dalla Linea Schio-Vicenza (Babbucci e al., 2002): una faglia trascorrente sinistra (Plio - Quaternaria) che mette le Alpi Meridionali a contatto con quelle Centro Occidentali.

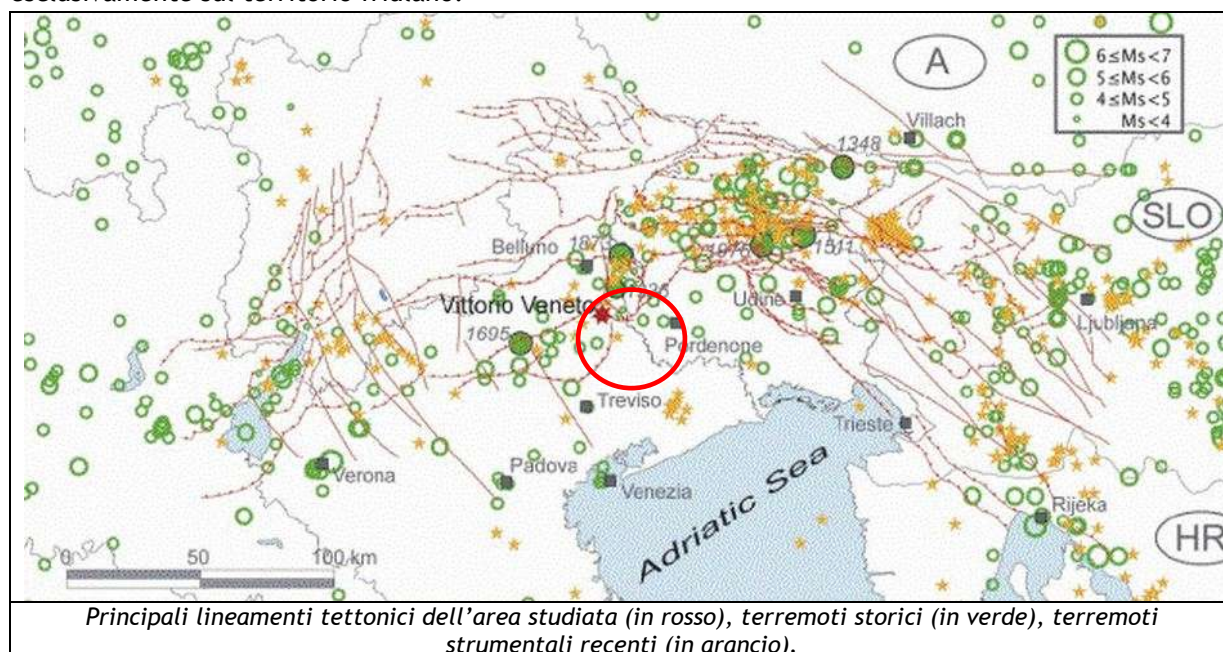
Il blocco Veneto-Friulano (figura seguente) è caratterizzato da strutture tettoniche con direzioni variabili (Dogliosi e al., 1987; Castellarin e al., 1992; Pontron e al., 2000). Nella zona friulana centrale si ha il massimo delle deformazioni e del raccorciamento per l'estrema embricazione sud-vergente delle unità. L'assetto strutturale della Pianura Veneta, che rappresenta l'avampaese di due catene montuose perimetrali, è condizionato dall'interferenza tra le strutture del Sud Alpino a nord ed il fronte della catena Dinarica a est (Merlini e al., 2002).



Dallo studio della distribuzione dei meccanismi focali si è ricavato l'assetto dell'ellissoide dello stress tettonico in termini di direzione di massima compressione e distensione, questo al fine di definire l'interazione tettonica attuale tra la placca Europea e quella Adria, responsabile degli ultimi terremoti emiliani (Balocchi, 2012; Balocchi e al., 2012).

Si può concludere che la placca Adria sia in netta compressione nel settore sud - Alpino dove il sovrascorrimento di quest'ultima rispetto alla placca Europea genera dei retro-stress all'interno delle unità litologiche deposte sulla crosta continentale dell'Adria.

Il risultato finale è rappresentato da un'attività sismica nelle regioni delle Alpi Orientali (Slejko et al., 1989) considerata tra le più elevate del nostro paese. Cinque terremoti con magnitudo di superficie (MS) superiore a 6 sono, infatti, avvenuti nell'ultimo millennio: nel 1348 a Villaco con MS 6,4 (l'epicentro sembra localizzato nell'attuale zona di confine tra Italia e Austria), nel 1511 nella zona tra Gemona e Idria con MS 6,2, nel 1695 ad Asolo con MS 6,5, nel 1873 nell'Alpago con MS 6,3 e nel 1976 a Gemona con MS 6,5. Oltre a questi, nel 1936 un terremoto di magnitudo (MS) 6,1 ha provocato distruzioni nei paesi del Cansiglio. La figura seguente mostra le faglie principali rilevate nella regione e la distribuzione spaziale dei maggiori terremoti. Questi ultimi, nell'area indagata, risultano di numero molto inferiore rispetto a quelli avvenuti nel vicino Friuli: bisogna segnalare, però, che la sismicità friulana risente della coda del forte terremoto del 1976 e che le stazioni della rete sismometrica dell'Italia nord-Orientale sono state ubicate, per un lungo periodo, esclusivamente sul territorio friulano.



Le principali strutture tettoniche nel Veneto Orientale sono rappresentate da sovrascorrimenti con orientazione nord est-sud ovest, tagliati, talvolta, da faglie trascorrenti.

Una prima interpretazione della sismicità in chiave sismogenetica è stata presentata da Slejko et al. (1989) nell'ambito di un modello sismotettonico che interessa il territorio italiano dal lago di Garda al confine con la Slovenia.

Nell'ambito di un progetto sviluppato negli anni Novanta, Meletti et al. (2000) hanno formulato un modello sismogenetico per l'Italia che consta di 80 zone sismogenetiche. Queste zone risultano omogenee sia dal punto di vista tettonico che da quello sismico. Studi successivi (Slejko e Rebez, 2002) hanno portato a complicare, a livello regionale, quel modello (zonazione FRI) o a semplificarlo (zonazione ZS9 - Meletti and Valensise, 2004) al fine di disporre di cataloghi sufficientemente ricchi di terremoti per tutte le zone sismogenetiche.

4.2 Caratterizzazione sismogenetica del Comune

Secondo il modello semplificato strutturale del sud-Alpino Orientale, il Comune di Vazzola si colloca nel sistema di sovrascorrimenti "Montebello-Conegliano".

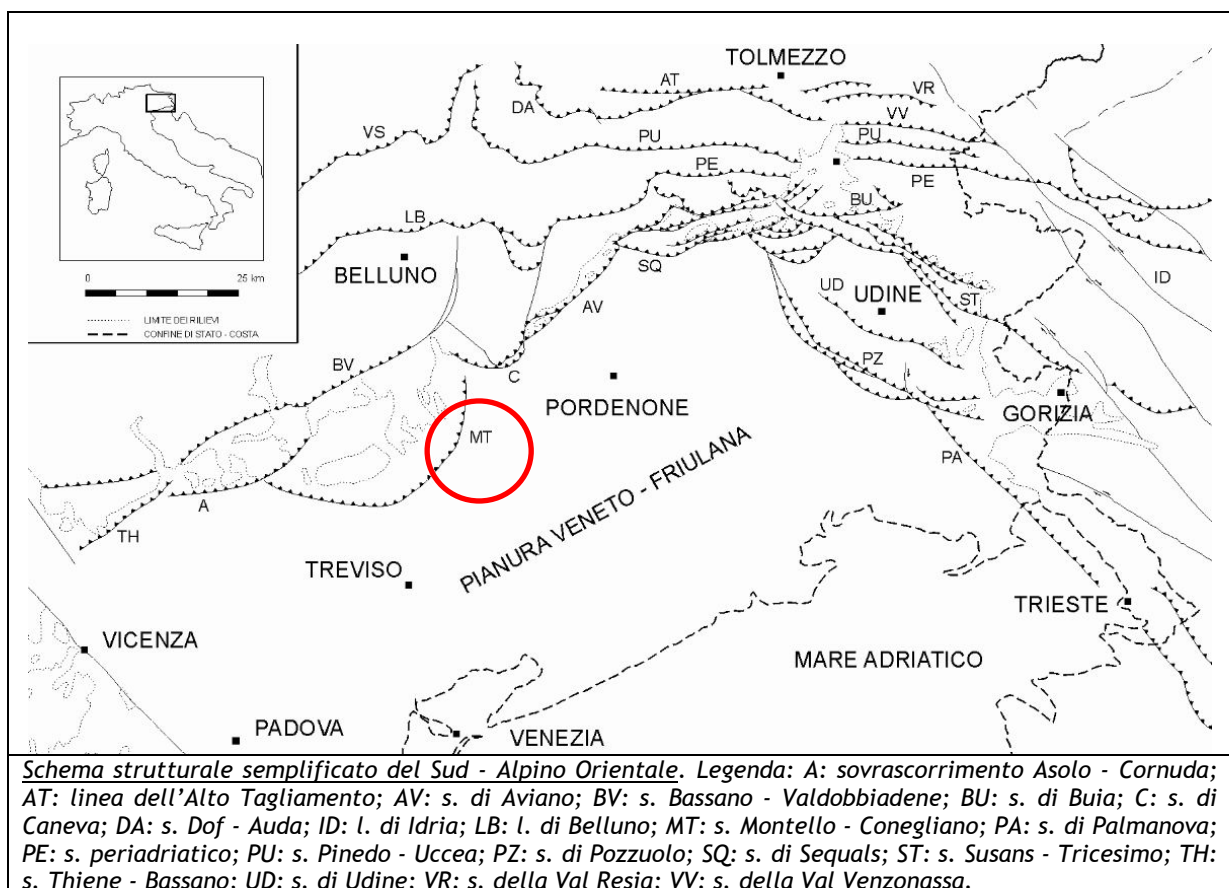
L'area studiata è situata a cavallo del fronte pliocenico-quadernario della catena sud-Alpina Orientale, in corrispondenza del passaggio fra i rilievi prealpini e l'Alta Pianura Veneto-Friulana. Secondo i cataloghi più recenti la sismicità massima dell'area raggiunge magnitudo comprese fra 6 e

7 ed è legata all'evoluzione del sistema di sovrascorrimenti sud-vergenti che formano la porzione più esterna del fronte sud-Alpino Orientale.

Il quadro sismo tettonico disponibile fino alla metà degli anni '90 era dominato da un rilevante cilindrisimo, con lunghi fronti di accavallamento attivi durante il Quaternario, senza evidenze di segmentazione (cfr. Castaldini e Panizza, 1991). Da sud a nord si riscontrava il sovrascorrimento di Sacile, di Aviano, del Bassano-Valdobbiadene e della linea di Belluno (sovrascorrimento periadriatico).

Verso la fine degli anni '90 sono riprese le ricerche sul fronte pliocenico-quadernario del nord-est Italia e sul suo potenziale sismogenetico. Una linea fondamentale di studio è rappresentata dalla reinterpretazione delle linee sismiche industriali realizzate nel settore di pianura compreso fra Conegliano e Cividale: sono stati ridefiniti l'architettura del fronte sepolto nella Pianura Friulana e Veneta Orientale, lo schema dei rapporti fra i sovrascorrimenti paleocenici dinarici ovest sud ovest-vergenti e quelli neoalpini sud-sudest - vergenti e il quadro dell'evoluzione miocenica superiore-quadernaria dell'area.

Lo schema strutturale aggiornato del fronte pliocenico-quadernario (figura seguente) evidenzia la segmentazione del fronte stesso in un sistema di *thrust* arcuati, in massima parte ciechi e spesso caratterizzati da rampe oblique mediante le quali un *thrust* si accavalla lateralmente su un altro. Analisi morfoneotettonica e neotettonica applicate a tali strutture hanno permesso, in vari casi, di datarne l'attività e di definirne la cinematica quadernaria.



4.3 Sismicità storica

Il Veneto è attualmente una regione silente dal punto di vista sismico. L'assenza di grossi eventi sismici recenti sorprende, ma non deve far pensare che il Veneto sia una regione tettonicamente inattiva. Evidenze di movimenti recenti (neotettonica) sono osservabili soprattutto nella fascia pedemontana (in particolare al confine tra le province di Belluno e Treviso) lungo la quale sono allineati i principali eventi storici.

La pericolosità sismica del Veneto è in parte legata all'attività dei distretti sismici del Friuli centrale e, in minor misura, dell'Alpago e del Garda. Allo stato attuale, il territorio regionale è interessato da una certa sismicità di magnitudo media, messa in luce negli ultimi decenni dal monitoraggio strumentale dell'attività sismica.

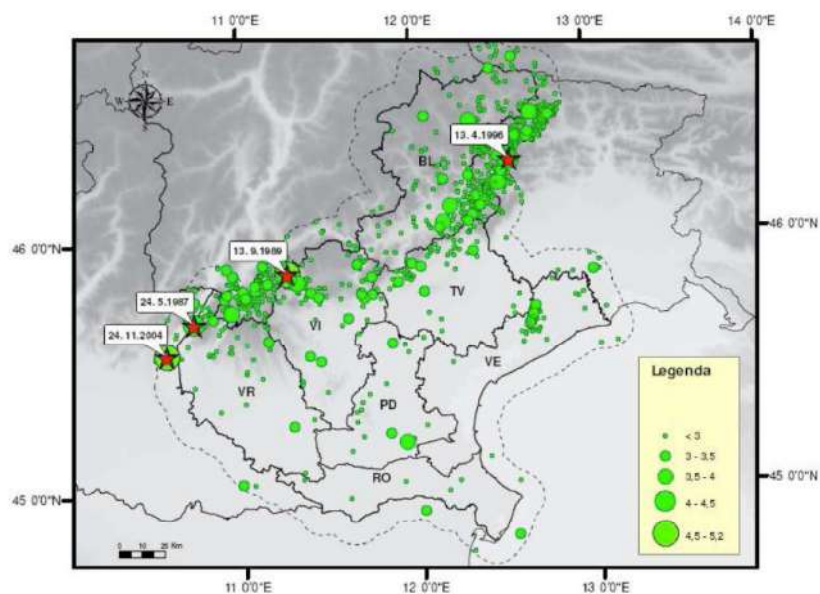
Tra i terremoti storici più rilevanti con epicentro in Veneto si possono ricordare quelli nella tabella sotto riportata.

Data	Area epicentrale	I MCS MAGNITUDO	Descrizione
03/01/1117	veronese	IX-X Mw=6.7	I danni maggiori si registrarono a Verona, ma interessarono anche la valle dell'Adige e, verso sud, il territorio fino ai primi rilievi emiliani.
04/11/1268	trevigiano	VII-VIII Mw=5.4	Colpita la provincia di Treviso. Danni gravi a Treviso, Feltre, Asolo. La scossa fu fortemente risentita a Padova.
25/02/1695	asolano	X Mw=6.5	Gravi danni in larga parte del Veneto in particolare nell'alto trevigiano, a sud del monte Grappa. Colpita la città di Asolo. Centinaia le vittime.
12/06/1836	Bassano	VIII Mw=5.5	Le località più danneggiate furono Liedolo, Fonte, Sant'Eulalia: complessivamente crollarono un centinaio di case. Sentita fortemente anche a Venezia.
11/08/1866	monte Baldo	VII Mw=4.9	Danni nelle località poste sulla riva orientale del Lago di Garda, in particolare ad Assenza, Cassone, Castelletto, Malcesine.
29/06/1873	bellunese	IX-X Mw=6.3	L'area più colpita dalla scossa fu il bellunese, ma gravi danni subirono gli edifici dei paesi compresi tra Belluno, Pordenone e Conegliano Veneto (TV). Il centro più danneggiato fu Belluno e si osservarono lesioni anche a Gorizia, Pordenone, Trieste, Udine, Verona e Vicenza. 80 le vittime.
29/04/1876	monte Baldo	VII Mw=4.9	La scossa provocò danni a Cassone, Malcesine, Ferrara di Monte Baldo.
18/09/1882	monte Baldo	VII Mw=5.0	Interessati i paesi della costa orientale del Lago di Garda, con danni lievi nei paesi di Cassone e Castelletto di Brenzone. Risentita a Verona.
07/06/1891	valle d'Illasi	VIII-IX Mw=5.9	I danni più gravi a Castelvero, Badia Calavena, Marzemigo. Una ventina i paesi danneggiati in modo significativo (superiore o pari al VII MCS). La scossa fu risentita fino a Trieste, Auronzo, Bormio, Chiavenna, Domodossola, Torino, Asti, Genova.
19/02/1932	monte Baldo	VII-VIII Mw=5.0	La scossa provocò danni a diverse località della sponda veronese del Lago di Garda, tra le quali Albisano, S. Zeno, Garda.
18/10/1936	Alpago-Cansiglio (BL-PN)	IX Mw=6.1	Colpita la zona di confine fra le attuali province di Belluno, Treviso e Pordenone con i massimi effetti a sud dell'altopiano del Cansiglio nei paesi di Fiaschetti, Stevenà e Villa di Villa. Gravissimi danni anche a nord del Cansiglio, nella conca d'Alpago in particolare nelle località di Puos d'Alpago, Cornei e Villa.

Nel periodo 1977-2006, la rete gestita dall'OGS (Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste) ha registrato in Veneto quasi 1200 eventi sismici con magnitudo compresa tra 2,0 e 3,0.

La maggior parte di questi eventi è localizzata lungo la fascia prealpina che unisce l'Alpago al monte Baldo. La profondità epicentrale più frequente è compresa tra i 7 Km e i 15 km di profondità. Solo l'11% degli eventi si colloca a profondità maggiore (fino a 22 km). Nella figura seguente è riportata la distribuzione di tutti i terremoti registrati da OGS distinti per classi di magnitudo di durata MD¹. Gli eventi con MD > 4, i cui epicentri ricadono nel territorio regionale o in prossimità di esso, sono identificati con una stella rossa.

¹ La magnitudo di durata MD è il tipo di magnitudo che si utilizza per registrare piccoli terremoti, come quelli registrati in zona vulcanica che, vicini agli strumenti, li saturano. Si basa sul logaritmo della durata dell'evento sismico.



Distribuzione di tutti i terremoti recenti registrati dalla rete sismometrica gestita da OGS in Veneto nel periodo 1977 – 2006 (Priolo, 2008)

I terremoti identificati con la stella rossa sono così sintetizzabili:

- 24/05/1987 - Garda - MD = 4,2
- 13/09/1989 - Pasubio - MD = 4,8
- 13/04/1996 - Claut - MD = 4,2
- 24/11/2004 - Salò - MD = 5,2

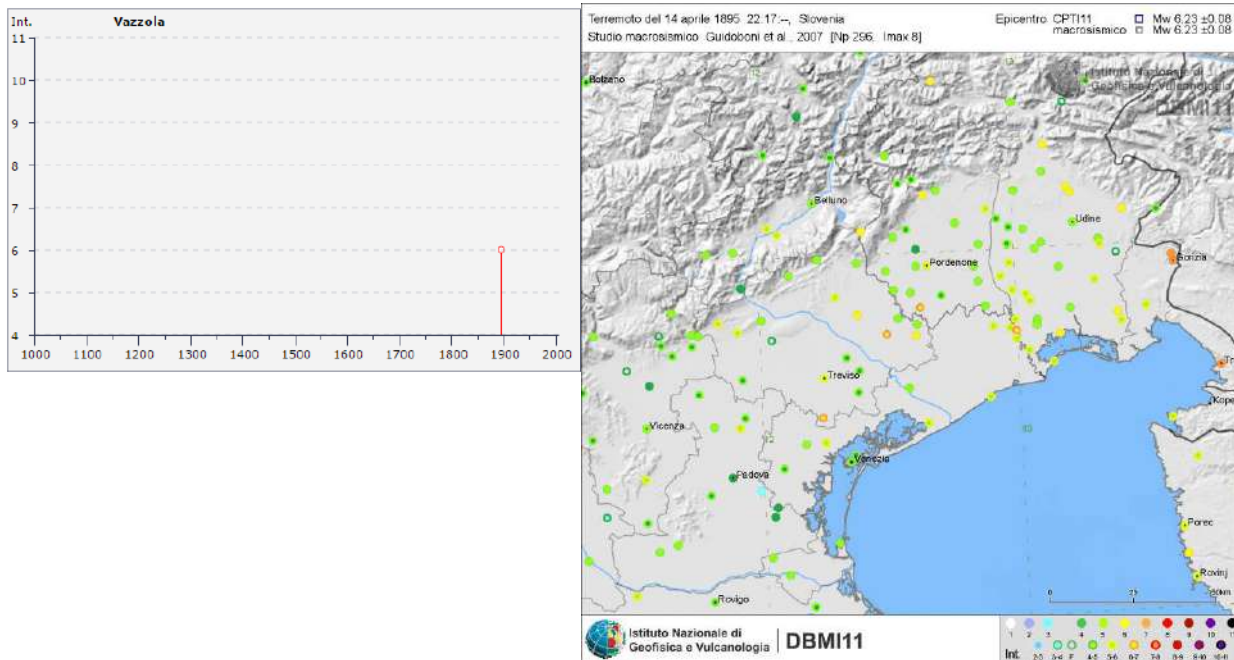
La ricostruzione storica degli eventi sismici che hanno caratterizzato il territorio comunale di Vazzola è stata fatta utilizzando il database macrosismico italiano DBMI11 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (a cura di M. Locati, R. Camassi e M. Stucchi, DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano, Milano-Bologna, 2011, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>): rispetto al precedente DBMI04, raccomandato nelle linee guida della Regione Veneto per la realizzazione dello studio della compatibilità sismica, il DBMI11 ne rappresenta l'integrazione e l'aggiornamento, per cui è stato consultato per estrarre le seguenti informazioni.

Nello specifico, il comune di Vazzola appare 1 volta, con intensità registrata superiore o uguale a 4. Nella tabella seguente sono stati elencati i vari eventi registrati, con indicati, oltre all'intensità in scala MCS al sito in esame (Is), la data (anno, mese, giorno, ora, minuto) in cui si è verificato l'evento Ax, l'intensità massima epicentrale in scala MCS (Ix) e la magnitudo momento (Mw).

Storia sismica di Vazzola [45.837, 12.381]

Numero di eventi: 4

Effetti	In occasione del terremoto del:			
I[MCS]	Data	Ax	Np	Io Mw
6	1895 04 14 22:17	Slovenia	296	8 6.23 ±0.08
2	1952 01 18 01:36	POLCENIGO	108	5 4.57 ±0.18
NF	1987 05 02 20:43	Reggiano	802	6 4.74 ±0.09
NF	2004 12 04 22:20	Valle del Piave	115	5 4.18 ±0.14



L'evento registrato il giorno 14 aprile dell'anno 1895 - Slovenia è stato quello di maggiore intensità rilevato nel territorio di Vazzola. Secondo i cataloghi oggi disponibili (CPTI11, Guidoboni et al., 2007) la magnitudo M_w del 1895 sarebbe stata pari a circa 6 e a Vazzola, si sarebbe avvertito con un'intensità MCS di 6.

4.4 Faglie capaci e sorgenti sismogenetiche

Per quanto riguarda il tema delle faglie capaci (faglie che si sono rotte almeno una volta negli ultimi 40.000 anni, raggiungendo la superficie e producendo una rottura del terreno) e l'inquadramento delle sorgenti sismogenetiche più prossime all'area di Vazzola, si è fatto riferimento agli studi condotti dagli esperti scientifici e riportate nei cataloghi **ITHACA** e **DISS 3.2.0**. Le sorgenti sismogenetiche rappresentano le zone che sono state riconosciute come origine dei terremoti grazie allo studio della sismicità storica e delle indagini geologiche.

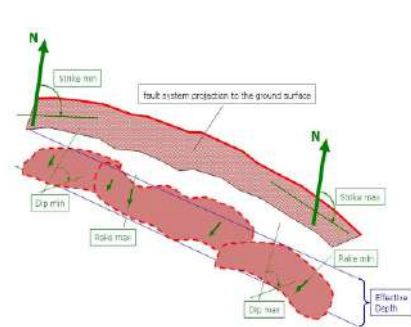
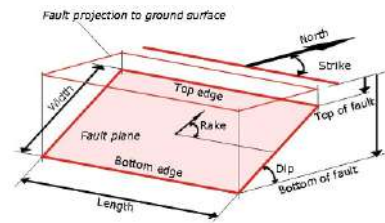
ITHACA invece, è un database creato per la raccolta e la consultazione di tutte le informazioni disponibili sulle strutture tettoniche attive in Italia, con particolare attenzione ai processi tettonici che potrebbero generare rischi naturali.



Il progetto si occupa in modo particolare delle faglie capaci, definite come faglie che potenzialmente possono creare deformazione in superficie: dalla sua consultazione è stato possibile escludere la presenza nel territorio in esame di faglie attive capaci.

La mappa dell'INGV riportata di seguito, denominata DISS 3.2.0 (*Database of Individual Seismogenic Sources - DISS Version 3*), mostra tre tipologie di sorgenti sismogenetiche.

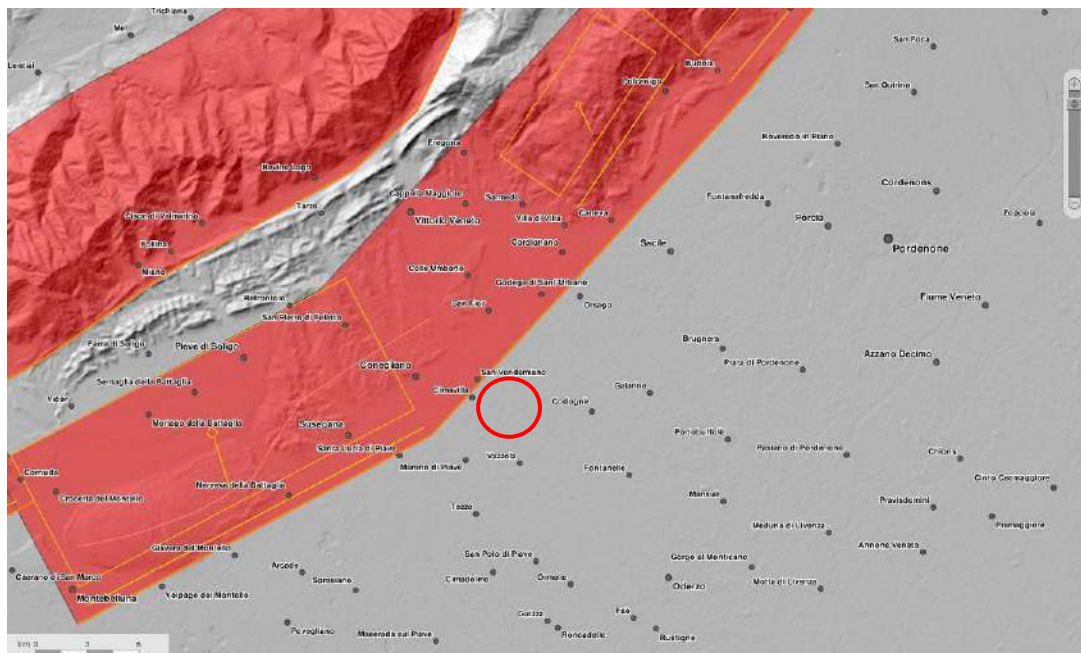
Sorgenti individuali (IS): per le quali viene proposta una rappresentazione tridimensionale semplificata del piano di faglia. Questo tipo di sorgente esibisce caratteristiche definite di estensione, movimento e massima magnitudo attesa.



Sorgenti composite (CS): sono regioni estese contenenti un numero non specificato di sorgenti minori allineate che non è ancora conosciuto singolarmente. Le sorgenti composite non sono associate a uno specifico gruppo di terremoti storici.

Sorgenti dibattute (DS): sono zone proposte in letteratura come potenziali sorgenti, ma considerate ancora non sufficientemente attendibili per entrare nel database.

La mappa del DISS pone il territorio di Vazzola in prossimità della regione a Sorgenti composite (CS) ITCS 060 “Montebelluna-Montereale”. Questa è un’area estesa contenente un numero non specificato di sorgenti minori allineate, di cui le principali sono: ITIS101 “Montello”, ITIS124 “Cansiglio” e ITIS125 “Polcenigo-Montereale”.



Questa zona passa lungo la fascia pedemontana veneto-friulana, a metà strada tra le città di Belluno e Pordenone e appartiene al sistema di *thrust* della catena sud-alpina orientale; si tratta di un sistema di faglie vergente verso sud-est, associato alla convergenza tra il continente africano (microplacca Adria) e quello europeo. I cataloghi storici mostrano una sismicità media associata a questa zona con eventi distruttivi concentrati nel settore orientale della faglia; tra questi si ricordano il terremoto di Pordenone del 1812 (Mw 5,7), quello dell’area Bellunese del 1873 (Mw 6,3) e quello del Bosco del Cansiglio del 1936 (Mw 6,1).

Minima profondità (km)	1
Massima profondità (km)	9
Direzione (°)	210 - 245
Inclinazione (°)	30 - 50
Rake (°)	60 - 100
Velocità di movimento (mm/anno)	0,24 – 0,91
Magnitudo massima	6.5

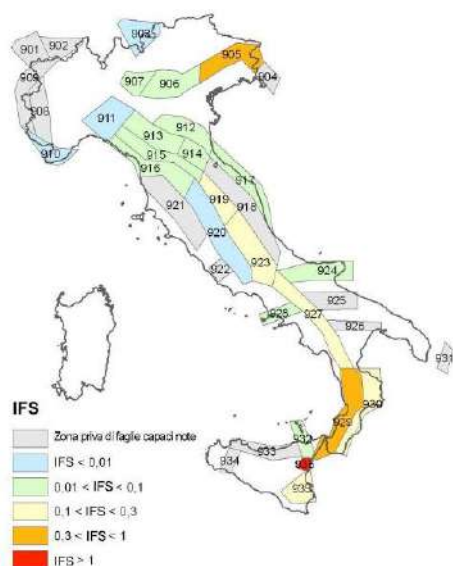
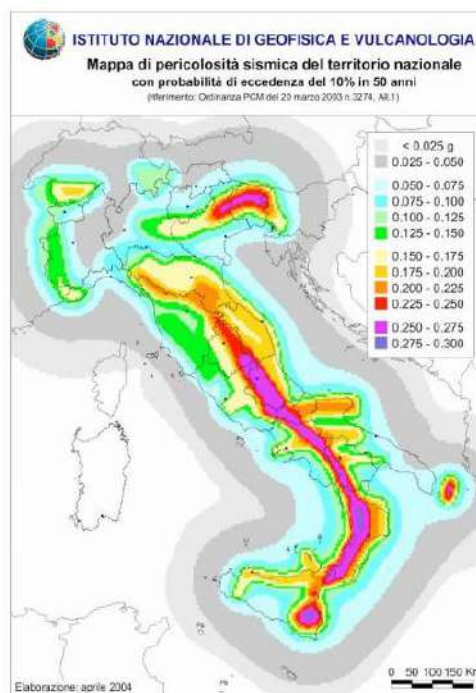
4.5 Zonazione sismica nazionale

In seguito all’emanazione dell’O.P.C.M. 20/03/2003, n° 3274, in cui si manifestava l’esigenza di una mappa di pericolosità sismica di riferimento per l’individuazione delle zone sismiche sul territorio nazionale, è stato redatto a cura dell’INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) un documento denominato “Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall’O.P.C.M. 20/03/2003, n° 3274. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile” (INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici), che rappresenta il punto di riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica su tutto il territorio nazionale (figura a lato).

All’interno della ricerca eseguita per tale redazione, è stata elaborata una nuova zonazione sismogenetica, denominata ZS9 che divide tutto il territorio italiano in 36 zone. Tale zonazione è stata condotta tramite l’analisi cinematica degli elementi geologici (cenozoici e quaternari) coinvolti nella dinamica delle strutture litosferiche profonde e della crosta superficiale; essa,

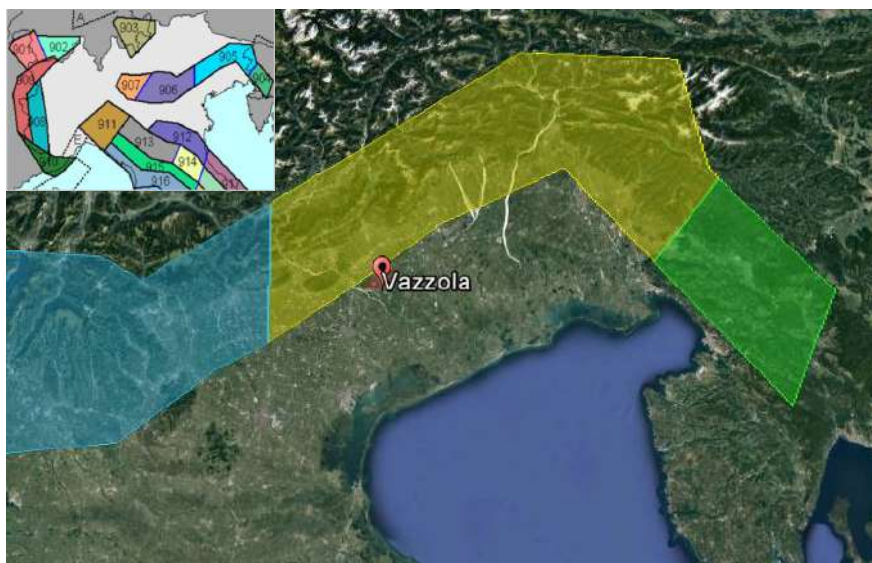
pur basandosi ampiamente sull’impianto generale e sul *background* informativo della precedente zonazione ZS4 (Scandone e Stucchi, 1996), rappresenta un suo sostanziale ripensamento, alla luce delle evidenze di tettonica attiva, delle valutazioni sul potenziale sismogenetico acquisite nei primi

anni del decennio (con i fondamentali contributi del *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS), che, combinando dati geologici, storici e strumentali, censisce le sorgenti in grado di produrre terremoti di magnitudo 5.5 e superiore) e del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (all’epoca della redazione della mappa CPT11, ora arrivato alla versione CPT115). Il confronto tra le informazioni che hanno condotto alla costruzione del modello geodinamico e la sismicità osservata ha permesso di costruire la Carta delle Zone Sismogenetiche del territorio nazionale. Ogni zonizzazione sismogenetica è caratterizzata da un definito modello cinematico il quale sfrutta una serie di relazioni di attenuazione stimate sulla base di misurazioni accelerometriche effettuate sia sul territorio nazionale che europeo.



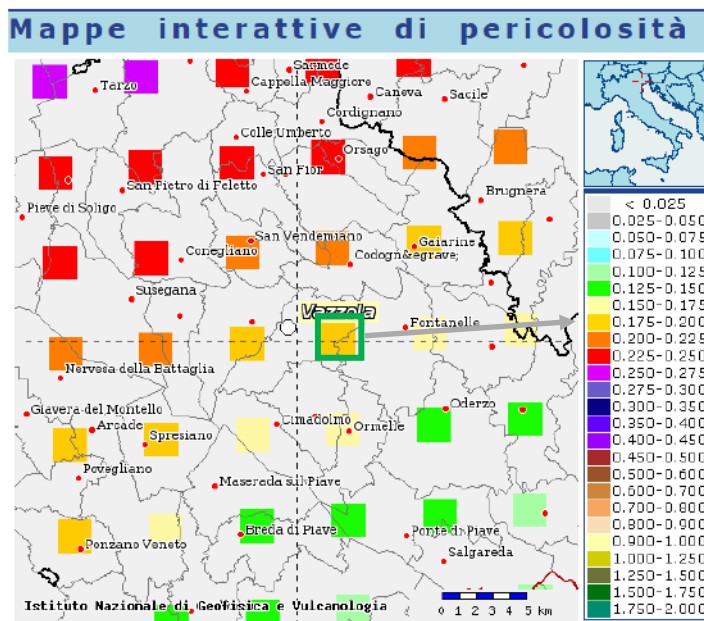
Secondo la zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), nel Veneto ricadono le Zone Sismogenetiche n°905 “Friuli-Veneto orientale” e n°906 “Garda-veronese”, che interessano rispettivamente la fascia pedemontana tra Bassano del Grappa e il confine con il Friuli Venezia Giulia e la fascia pedemontana che da Bassano prosegue fino al lago di Garda. Il meccanismo di fagliazione responsabile dei terremoti che si sono verificati in entrambe le zone è di tipo “faglia inversa”, con una profondità ipocentrale media stimata di 8 km. Entrambe le zone sono legate all’interazione Adria-Europa ma presentano una sismicità differente.

Il comune di Vazzola si posiziona, al confine con la zona sismogenetica n. 905 della figura seguente, per cui si sviluppa all’interno dell’area di massima convergenza tra la placca adriatica ed europea caratterizzata da faglie trascorrenti destre con direzione nord-ovest - sud-est (*trend* dinarico) (es., Bernardis et al., 2000; Baic et al., 2001; Vrabec, 2001).



4.6 Pericolosità sismica di riferimento

La distribuzione e la caratterizzazione delle zone sismogenetiche finora riconosciute e descritte in precedenza è stata tradotta in una Carta di Pericolosità Sismica, valida su tutto il territorio nazionale ed entrata in vigore con l’O.P.C.M. n° 3519 del 28/04/2006. Nella carta, della quale la figura seguente rappresenta l’estratto per il comune di Vazzola, sono riportati i valori di accelerazione orizzontale massima al suolo ag con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi subpianeggianti di Categoria A.



Pertanto, secondo l'O.P.C.M. n° 3519 del 28/04/2006, la cui applicazione è stata definita dalla Regione Veneto con D.G.R.V. n°71 del 22/01/2008 e considerata nell'emanazione del D.M. 14/01/2008, il territorio di Vazzola è inseribile nella fascia distinta da un valore di accelerazione sismica orizzontale a_g riferito a suoli rigidi subpianeggianti caratterizzati da $V_{s,30} > 800$ m/s compreso tra 0,175g e 0,200 (valori riferiti ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni - mappa 50° percentile), ovvero in Zona 2, come classifica la tabella riportata sotto, estratta dall'O.P.C.M. n° 3519 stessa.

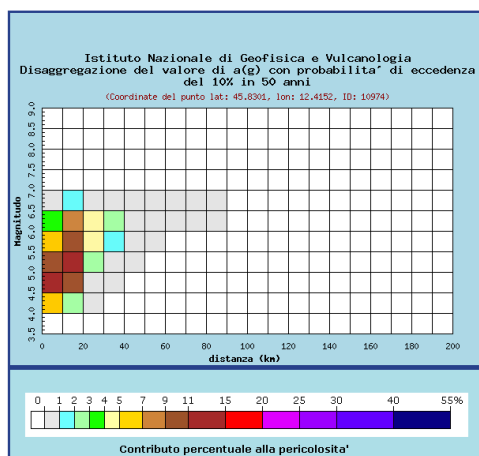
a) Ciascuna zona è individuata mediante valori di accelerazione massima del suolo a_g con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s,30} > 800$ m/s, secondo lo schema seguente:

zona	accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni $[a_g]$	accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico $[a_g]$
1	$0,25 < a_g \leq 0,35 g$	0,35 g
2	$0,15 < a_g \leq 0,25 g$	0,25 g
3	$0,05 < a_g \leq 0,15 g$	0,15 g
4	$\leq 0,05 g$	0,05 g

Per gli aspetti amministrativi, Vazzola rientra nella Zona 3, come classificato nell'elenco (allegato I) della Delibera di Consiglio Regionale n. 67/03 (cfr. D.G.R.V. n. 71 del 22 Gennaio 2008).

Infine, si riporta il calcolo della disaggregazione della pericolosità: questa ha lo scopo di individuare il maggior contributo alla pericolosità del sito in termini di magnitudo-distanza di un evento. I grafici riportati sotto sono stati desunti dalle Mappe Interattive di Pericolosità Sismica dell'INGV e sono relativi al punto della griglia definito nella figura precedente (Carta di Pericolosità Sismica dell'INGV).

Dalla ricostruzione dell'INGV riportata sopra, considerando un tempo di ritorno $T_r = 475$ anni e una Categoria A di sottosuolo in condizioni sub-pianeggianti, si evidenzia che il maggior contributo alla pericolosità sismica locale è dato da eventi di entità M_w compresa tra 4,0 e 6,5 e relativamente vicini ($R =$ entro 10-30 km).



Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.420	14.500	1.140

Distanza in km	Disaggregazione del valore di $a(g)$ con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 45.8301, lon: 12.4152, ID: 10974)									
	Magnitudo									
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5
0-10	0.000	5.100	12.100	9.540	6.150	3.330	0.422	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	2.670	9.370	11.300	10.500	7.920	1.220	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.021	0.946	2.960	4.390	4.740	0.890	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.000	0.002	0.451	1.590	2.400	0.528	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.000	0.000	0.007	0.278	0.664	0.165	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019	0.161	0.049	0.000	0.000	0.000
60-70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045	0.021	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Si fa comunque presente che, come tutte le zone sismogenetiche del territorio italiano, anche quella contrassegnata dal n°905 e precedentemente descritta viene considerata omogenea ai fini della probabilità di accadimento degli eventi sismici, ovvero si ritiene che tutti i punti in essa contenuti abbiano la stessa probabilità di essere sede di eventi sismici.

Secondo il paragrafo 2.8 degli “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”, la magnitudo massima attesa nella Zona n°905 vale $M_{wmax} = 6,60$.

Tabella 2.8-1 – Valori di M_{wmax} per le zone sismogenetiche di ZS9 (estratto da Gruppo di lavoro, 2004)

Nome ZS	Numero ZS	M_{wmax}
Colli Albani, Etna	922, 936	5.45
Ischia-Vesuvio	928	5.91
Altre zone	901, 902, 903, 904, 907, 908, 909, 911, 912, 913, 914, 916, 917, 920, 921, 926, 932, 933, 934	6.14
Medio-Marchigiana/Abruzzese, Appennino Umbro, Nizza Sanremo	918, 919, 910	6.37
Friuli-Veneto Orientale, Garda-Veronese, Garfagnana-Mugello, Calabria Jonica	905, 906, 915, 930	6.60
Molise-Gargano, Ofanto, Canale d'Otranto	924, 925, 931	6.83
Appennino Abruzzese, Sannio – Irpinia-Basilicata	923, 927	7.06
Calabria tirrenica, Iblei	929, 935	7.29

5. MICROZONAZIONE SISMICA. PRINCIPI FONDAMENTALI E FINALITÀ

5.1 Introduzione

I recenti terremoti che hanno interessato il nostro paese hanno ampiamente dimostrato che la variabilità spaziale del danno rilevato trova molto spesso la sua causa principale nei cosiddetti “**effetti locali**”, ossia nelle differenti risposte alle azioni sismiche, legate alla variazione delle sue condizioni geologiche, geomorfologiche e geotecniche.

Una efficace cultura di difesa dai terremoti deve essere fondata su una valutazione della pericolosità locale a scala urbana, più ampia di quella della singola costruzione, e deve potersi basare su un’operazione tecnico-scientifica che sia autorizzata a rientrare a pieno titolo nelle valutazioni urbanistiche di riduzione del rischio e nelle politiche di pianificazione del territorio.

Tale operazione è, appunto, la “Microzonazione Sismica”: la MS è l’operazione di suddivisione di un dato territorio in zone omogenee sotto il profilo della risposta ad un terremoto di riferimento, valutata tenendo conto delle interazioni tra le onde sismiche e le condizioni proprie di ogni zona individuata (“pericolosità sismica locale”).

5.2 La natura del problema

Durante lo scuotimento sismico ed immediatamente dopo il terremoto, si verificano degli effetti molto appariscenti e, spesso, più devastanti dell’onda sismica, che sono tra le cause più importanti di vittime e danni: questi sono gli effetti locali, sono ormai conosciuti e possono amplificare notevolmente le sollecitazioni nelle strutture (di entità tale da portarle fino al collasso) od essere rappresentati da rotture del terreno, movimenti franosi, elevati cedimenti nei terreni soffici, liquefazione dei terreni incoerenti saturi. Le figure sottostanti sono un esempio di tali effetti.



Da tali osservazioni è nata la necessità di iniziare degli studi per ipotizzare il comportamento del territorio in caso di terremoto e, di conseguenza, per valutare la *pericolosità sismica locale* e realizzare la *Microzonazione Sismica (MS)* precedentemente definita.

La MS può assumere forme molto diverse a seconda delle condizioni territoriali in cui viene realizzata ed è difficile da standardizzare anche se, grazie ad alcune procedure ormai consolidate, è possibile sintetizzare lo studio di MS in una cartografia del territorio nella quale sono indicate:

- le zone in cui il moto sismico non viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante (Categoria di sottosuolo A secondo Eurocodice 8) e, pertanto, gli scuotimenti attesi sono equiparati a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;
- le zone in cui il moto sismico viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche del terreno e/o geomorfologiche del territorio;
- le zone potenzialmente soggette all'instaurarsi di fenomeni di deformazione permanente del territorio inducibili o innescabili dal sisma (instabilità di versante, liquefazione, fagliazione superficiale, cedimenti differenziali, ecc.).

In sostanza, dal punto di vista della pericolosità, la MS distingue le seguenti aree:

- **aree sismicamente stabili**, dove possono aversi solo “effetti di sito” (stratigrafici, di valle, topografici);
- **aree sismicamente instabili**, dove possono verificarsi anche fenomeni di instabilità quali movimenti franosi, crolli di roccia, liquefazione, densificazione, subsidenza, spostamenti di faglia, crolli legati a cavità, ecc.

EFFETTI DI SITO

- Qualunque sia l'effetto locale analizzato è necessario valutare preliminarmente gli "Effetti di sito" ("Risposta Sismica Locale"), ovvero le **modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza** del moto sismico rispetto al *moto di riferimento su affioramento rigido pianeggiante*
- Si distinguono 3 tipi principali di effetti:
 1. **effetti stratigrafici** (monodimensionali, 1D)
 2. **effetti di valle** (bi-tridimensionali, 2D-3D)
 3. **effetti topografici** (bi-tridimensionali, 2D-3D)



A tal proposito, per la mitigazione del rischio sismico a scala locale, la finalità di uno studio di MS è, pertanto, quello di pervenire alla stesura di una mappa, dove:

- siano identificati i confini delle zone con analoga risposta al terremoto di riferimento;
- vengano indicati i livelli di pericolosità delle diverse zone attraverso opportuni indicatori.

La mappa di MS diventa, quindi, una cartografia di sintesi che identifica il tipo di problemi e le gerarchie di pericolosità tra le diverse aree; nel caso di Vazzola, tali informazioni serviranno a fornire all'Amministrazione Comunale uno strumento utile per la futura programmazione territoriale, la pianificazione urbanistica e la gestione delle emergenze, nonché per una eventuale ricostruzione post-sismica.

Si fa comunque presente che la MS è legata alla gestione del territorio ed alla pianificazione urbanistica e **NON** alla progettazione delle strutture.

5.3 Finalità e livelli di approfondimento

La MS ha lo scopo di riconoscere a una scala sufficientemente grande (comunale o subcomunale) le condizioni locali che possono modificare sensibilmente le caratteristiche del moto sismico atteso in termini di ampiezza, durata e frequenza o possono produrre deformazioni permanenti rilevanti per le costruzioni e le infrastrutture. Essa si colloca a un livello intermedio tra la classificazione sismica a scala nazionale, che fa riferimento a un terreno ideale rigido e pianeggiante per il quale fornisce dei parametri indicativi della pericolosità di base, e la progettazione antisismica, che opera invece a scala di singolo manufatto.

L'obiettivo principale è quello di distinguere le zone il cui comportamento può essere instabile (*aree critiche*) dalle zone dove possono aversi o meno fenomeni di amplificazione del moto sismico (*aree stabili suscettibili o non suscettibili*), mentre il secondo obiettivo è quello di valutarne la risposta.

Le principali linee guida internazionali, tra cui gli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica del Dipartimento della Protezione Civile (2008) e le Linee Guida Regionali, prevedono tre Livelli di approfondimento.

In sintesi:

- il **Livello 1**, propedeutico ai veri e propri studi di MS, si basa prevalentemente sulla raccolta di dati preesistenti, elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee in prospettiva sismica;
- il **Livello 2** associa alle zone omogenee dei parametri quantitativi di interesse ingegneristico-strutturale, utilizzando allo scopo ulteriori e mirate indagini, ove necessarie, e definisce la “Carta di microzonazione sismica”;
- il **Livello 3** quantifica numericamente l'amplificazione del moto sismico atteso in superficie tramite un'analisi monodimensionale o bidimensionale, a seconda delle condizioni geologiche/topografiche presenti nel sito d'indagine, e restituisce una “Carta di microzonazione sismica” con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

Va sottolineato che l'adozione di tre livelli consente una grande flessibilità nelle applicazioni, in quanto permette di adeguare il livello di approfondimento alle risorse e ai tempi disponibili, nonché al tipo di utilizzo. Si ritiene che, soprattutto nei piccoli centri abitati o nelle fasi preliminari di stesura dei piani urbanistici, anche il Livello 1 si possa rivelare di grande efficacia ai fini della prevenzione sismica.

Nel caso in esame, è possibile affermare che lo studio di MS eseguito soddisfa il Livello 1 e Livello 2 di approfondimento come previsto dagli “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica della Protezione Civile”.

Sono state condotte alcune misure sperimentali sia di tipo sismico che geotecnico per quantificare correttamente il grado di rigidità del sottosuolo e stimare le frequenze di risonanza del sito.

6. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI DA INDAGINI PREGRESSE E DI NUOVA REALIZZAZIONE

6.1 Indagini pregresse e di nuova realizzazione

Le ricerche, finalizzate alla raccolta di indagini pregresse, sono state condotte attraverso la consultazione del catalogo ISPRA, del P.A.T. e presso l'Ufficio Tecnico. In particolare, quest'ultimo non ha prodotto particolari indagini geofisiche significative per il presente lavoro. Per questo motivo, al fine di caratterizzare correttamente, dal punto di vista sismico, i terreni presenti nel comune di Vazzola, sono state condotte una serie di misure geognostiche in prossimità delle zone ritenute più significative, coinvolgendo comunque tutto il territorio; le indagini condotte sono state schedate, archiviate nel supporto informatico e riportate in allegato. In particolare, sono state effettuate:

- n°30 registrazioni di rumore sismico ambientale a stazione singola con elaborazione H.V.S.R. (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) per individuare le frequenze di risonanza dei depositi;
- n°30 prospezioni sismiche con tecnica passiva Re.Mi. (*Refraction Microtremor*) sviluppate in *array* lineari con geofoni ad asse verticale per la ricostruzione sismo-stratigrafica del sottosuolo tramite la misura della velocità di propagazione delle onde S;
- n°2 prove penetrometriche statiche C.P.T. per la corretta ricostruzione stratigrafica e parametrizzazione dei terreni attraversati.

6.2 Metodologie di elaborazione e risultati delle nuove indagini

6.2.1 Indagini sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.)

La tecnica di sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali o H.V.S.R., *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non richiede nessun tipo di perforazione, né stendimento di cavi, né energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura già esiste ovunque. I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la **frequenza di risonanza del sito**, che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale. Si dovranno adottare adeguate precauzioni nel costruire edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno, per evitare l'effetto di *doppia risonanza*, estremamente pericoloso per la stabilità degli stessi;
- la **frequenza fondamentale di risonanza di un edificio**, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito, sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito (*free field*) e capire se, in caso di sisma, la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la **velocità media delle onde di taglio V_s** calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. Sarà quindi possibile calcolare la $V_{s,30}$ e la relativa categoria di sottosuolo come esplicitamente richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 14/01/2008;
- la **stratigrafia del sottosuolo** con un *range* di indagine compreso tra 0,5 m e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 m. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostante per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e la densità del mezzo stesso.

Le basi teoriche della tecnica H.V.S.R. si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremori. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

- dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s ;
- dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
- dalla risposta dello strumento.

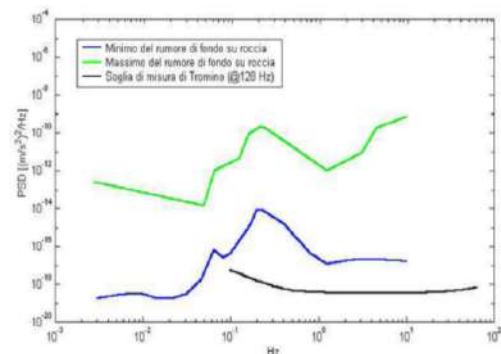
Possiamo scrivere questo come:

segnale registrazione al sito x = sorgente * effetti di percorso * funzione trasferimento strumento

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche *microtremore* poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi, poiché il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che, se da un lato l'informazione riguardante la sorgente è persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni concernenti il percorso del segnale e, in particolare, relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazioni. Questa informazione è però sepolta all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune.

Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o semplicemente H.V.S.R., che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali del sottosuolo, informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

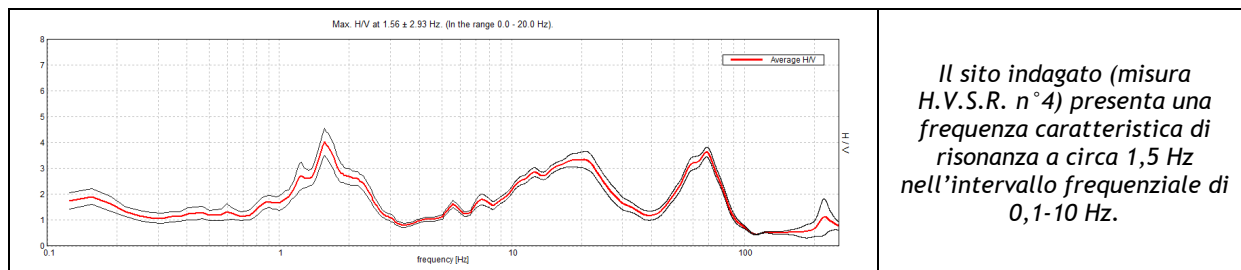
Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale della ditta Micromed Spa modello *Tromino*[®] *ENGY-Plus* che rappresenta la nuova generazione di strumenti ultra-leggeri e ultra-compatti in alta risoluzione adatti a tali misurazioni. Lo strumento racchiude al suo interno tre velocimetri elettrodinamici ortogonali tra loro ad alta definizione con intervallo di frequenza compreso tra 0,1 Hz e 256 Hz. Nella figura a fianco si riporta la curva di rumore di *Tromino*[®] a confronto con i modelli standard di rumore sismico massimo (in verde) e minimo (in blu) per la Terra. Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.



SINTESI DEI RISULTATI

Le frequenze di risonanza del terreno fanno parte degli "effetti di sito" che, assieme all'instabilità per azione sismica, caratterizzano la vulnerabilità del territorio quale elemento indispensabile per la stima del rischio sismico. In linea di principio, visto che il suolo è assimilabile ad un corpo viscoelastico, è possibile misurarne le frequenze proprie di oscillazione in ogni punto: infatti, le frequenze sono determinate dalle proprietà meccaniche e, in maniera secondaria, dalla morfologia attorno al punto di misura. Analizzando la "Carta delle frequenze" e la "Carta delle indagini" successivamente descritte, si vede come sia stato indagato integralmente il territorio previsto dall'incarico e come le n° 30 misure H.V.S.R. eseguite siano state distribuite in modo da interessare completamente il comune di Vazzola: la distribuzione delle prove è stata ottimizzata per vedere il "modo" di rispondere dei vari depositi alle sollecitazioni sismiche.

Nella tabella seguente è riportata esclusivamente la sintesi dei risultati delle misure H.V.S.R. eseguite in questa fase mediante Tromino® (T1, ..., T30), mentre in allegato fuori testo sono riportate le schede riassuntive dei risultati di tali prove con indicata la frequenza “fondamentale - F0” (valore di frequenza più basso) e quella “caratteristica - MAX” (valore di frequenza con rapporto H/V più elevato) di sito. Le valutazioni sulle condizioni di amplificazione di sito sono state effettuate considerando la finestra frequenziale di 0,1-10 Hz, che risulta essere quella di normale interesse ingegneristico-strutturale. A seguire un esempio di misura H.V.S.R. condotta per il presente studio. Inoltre, si segnala la presenza ricorrente di un artefatto alla frequenza di 1,56 Hz generato da una sorgente di rumore puntuale e mono-frequenziale.



CODICE PROVA	F ₀ “FONDAMENTALE” [Hz] (INTERVALLO 0,1 - 10 Hz)	FREQUENZA “MAX” [Hz] (INTERVALLO 0,1 - 10 Hz)	CONDIZIONE DI AMPLIFICAZIONE (INTERVALLO 0,1-10 Hz)	PRESENZA DI ARTEFATTI
T1	1,6	1,6	Si	Si
T2	1,3	1,3	Si	Si
T3	1,5	1,5	Si	Si
T4	1,5	1,5	Si	Si
T5	1,5	1,5	Si	Si
T6	1,6	1,6	Si	Si
T7	2,13	2,13	Si	Si
T8	Misura non interpretabile			
T9	1,6	1,6	Si	Si
T10	1,9	1,9	Si	Si
T11	1,69	1,69	Si	Si
T12	1,5	1,5	Si	Si
T13	1,3	1,3	Si	Si
T14	1,06	1,06	Si	Si
T15	0,88	0,88	Si	Si
T16	1,5	1,5	Si	Si
T17	1,22	1,22	Si	Si
T18	Misura non interpretabile			
T19	1,5	1,5	Si	Si
T20	0,88	0,88	Si	Si
T21	0,9	0,9	Si	Si
T22	1,0	1,0	Si	Si
T23	0,9	4,22	Si	No
T24	1,3	1,3	Si	Si
T25	1,3	1,3	Si	Si
T26	1,34	1,34	Si	Si
T27	1,53	1,53	Si	Si
T28	2,06	2,06	Si	Si
T29	1,3	7,8	Si	Si
T30	1,6	1,6	Si	Si

6.2.2 Indagini sismica di tipo passivo in array (Re.Mi.)

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi, avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più un'unica velocità, ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda. Queste lunghezze d'onda interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche che sono variabili, appunto, con la profondità. Questo comportamento viene definito *dispersione in frequenza* ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie. Ovviamente, le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario, le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie. I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico-matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati con caratteristiche elastiche lineari.

La procedura Re.Mi. è un metodo di prospezione sismica sviluppato presso l'Università di Reno in Nevada (Louie, 2001) e viene classificato come *metodo passivo* in quanto utilizza il rumore ambientale. I vantaggi derivanti da questo metodo sono molteplici poiché è veloce e semplice da usare in fase di acquisizione, raggiunge una buona profondità e risoluzione d'indagine ma, soprattutto, permette di ottenere migliori risultati in ambienti particolarmente urbanizzati. La fase di acquisizione deve essere effettuata con una serie di accorgimenti e precauzioni da adottare in sito e nella pianificazione della registrazione. Tutto è finalizzato alla registrazione di dati contenenti la miglior informazione possibile riguardo alla propagazione delle onde di Rayleigh con buon rapporto segnale-rumore.

Il rumore incoerente, cioè di tipo casuale, rappresenta nel caso Re.Mi. la fonte del segnale utile che si vuole registrare. I microtremori generati dall'ambiente si propagano nel suolo e di questi si cerca di distinguere il modo fondamentale di vibrazione dell'onda di Rayleigh dai modi superiori e dall'*aliasing* spaziale: risulta quindi necessario soddisfare la condizione di *omnidirezionalità* delle sorgenti, cioè si suppone che il rumore ambientale provenga sostanzialmente da tutte le direzioni. I tempi di registrazione dei microtremori sono decisamente più elevati rispetto alle indagini di tipo attivo. La registrazione viene analizzata in finestre temporali che variano dai 10 ai 30 secondi. Sono da considerare la lunghezza dello stendimento L e la distanza intergeofonica Δx , che agisce sul segnale come una specie di filtro in frequenza; supponendo, infatti, che il segnale arrivi da tutte le direzioni, maggiore è la spaziatura, minore sarà la frequenza del segnale utile campionabile e viceversa: se la frequenza è più bassa, aumenta la profondità d'indagine. La fase più delicata è quella del *data processing*, che consiste nel trattamento dei dati acquisiti con l'obiettivo di stimare la velocità di fase delle onde di Rayleigh (V_r), che sono correlabili con le velocità V_s di propagazione delle onde S ($V_s \approx 1,1 V_r$). Le varie tecniche di processing trasformano l'informazione registrata nel dominio $x-t$ (spazio tempo), in un dominio dove l'energia associata all'evento è funzione della frequenza e di altre variabili. Tutto questo allo scopo di localizzare attraverso lo spettro la densità di energia maggiore, alla quale sono di solito associate le onde di Rayleigh. Con procedura manuale vengono selezionati dei punti sullo spettro, che andranno a formare la curva di dispersione sperimentale.

La scelta di questi valori, denominata *picking*, è condizionata da alcune indicazioni ma è imprescindibile dall'abilità e dall'esperienza dell'interprete anche in base ad altre conoscenze in merito al sito in esame.

Per ottenere un elevato dettaglio del segnale, il *sampling rate* utilizzato è stato di 512 Hz. La durata (lunghezza temporale) del segnale registrato per ogni misura è stato di circa 6 minuti. Il software utilizzato per l'analisi spettrale è Grilla v.6.4 - 2013.

Data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 10 Hz), sono stati utilizzati n°9-16 geofoni verticali a 4,5 Hz uniti in *array* lineari totalmente digitali (*SoilSpy Rosina*). Ogni geofono è munito di un digitalizzatore che converte il segnale e lo trasmette al sismografo tramite un'interfaccia USB. Tale sistema permette di avere elevati rapporti di rumore, un perfetto sincronismo e una estrema leggerezza; la spaziatura utilizzata tra i geofoni è stata di 2 m o 3 m. Tutti gli stendimenti eseguiti non presentavano sostanziali variazioni di quota e, quindi, i siti indagati sono stati considerati a sviluppo orizzontale.

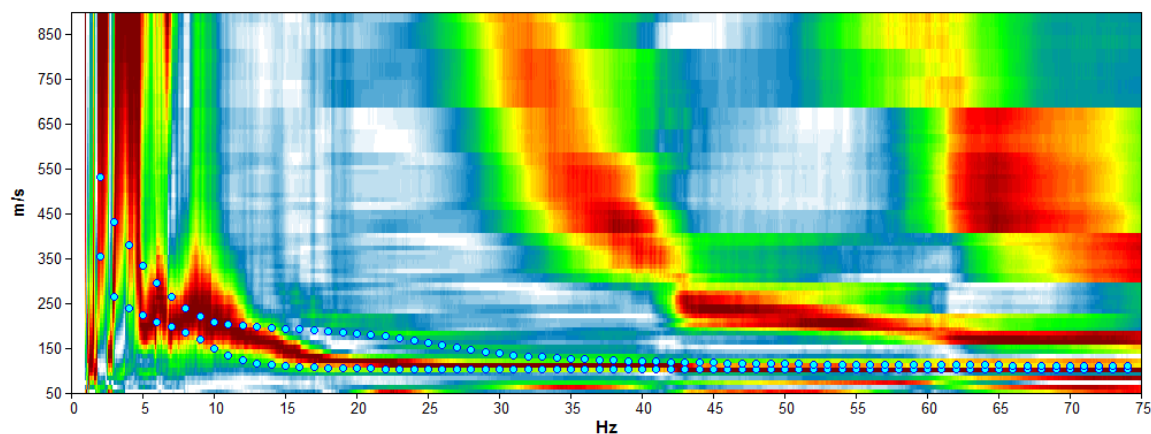


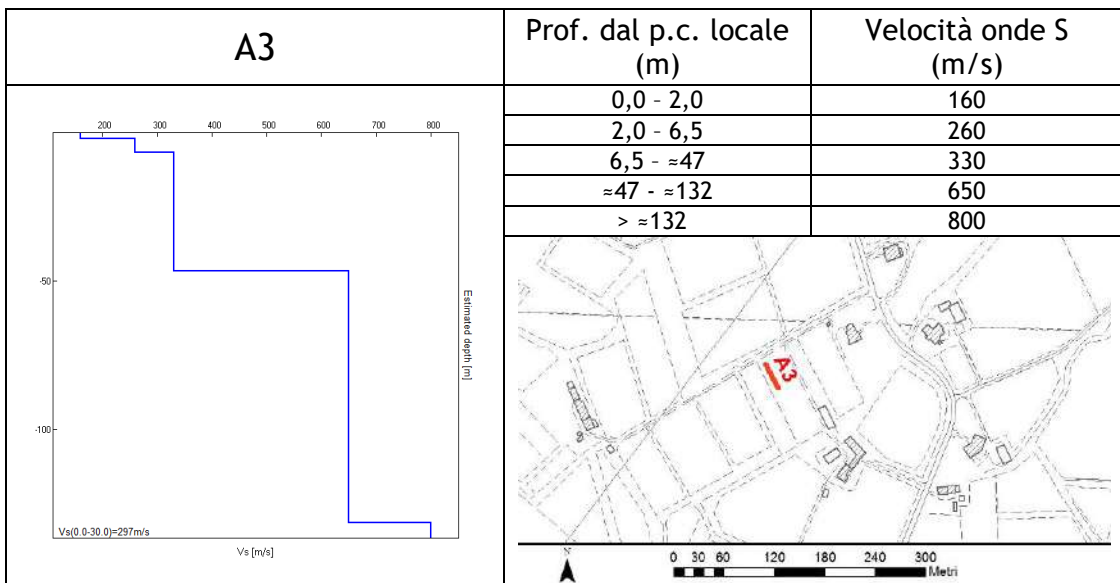
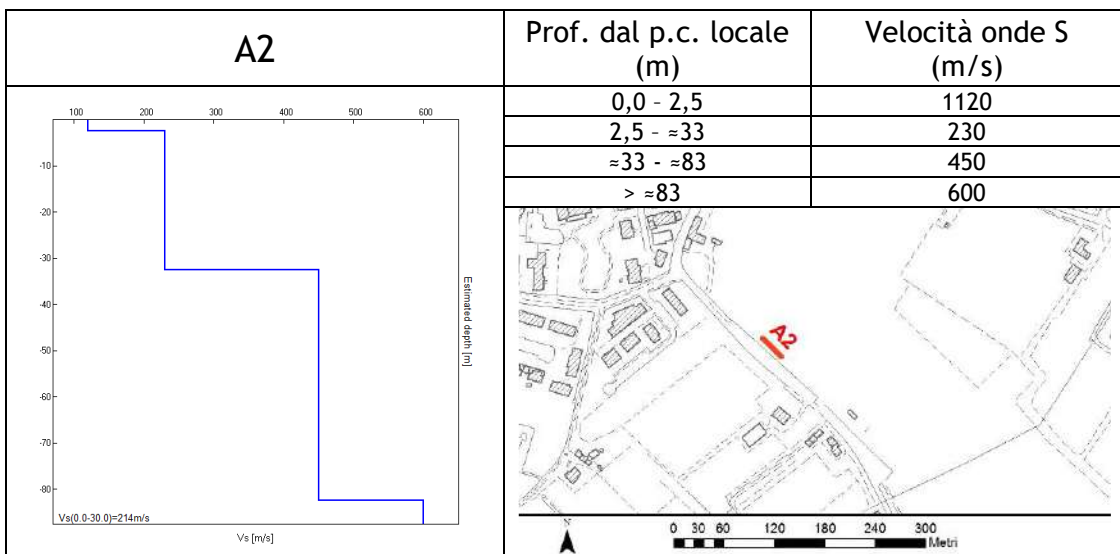
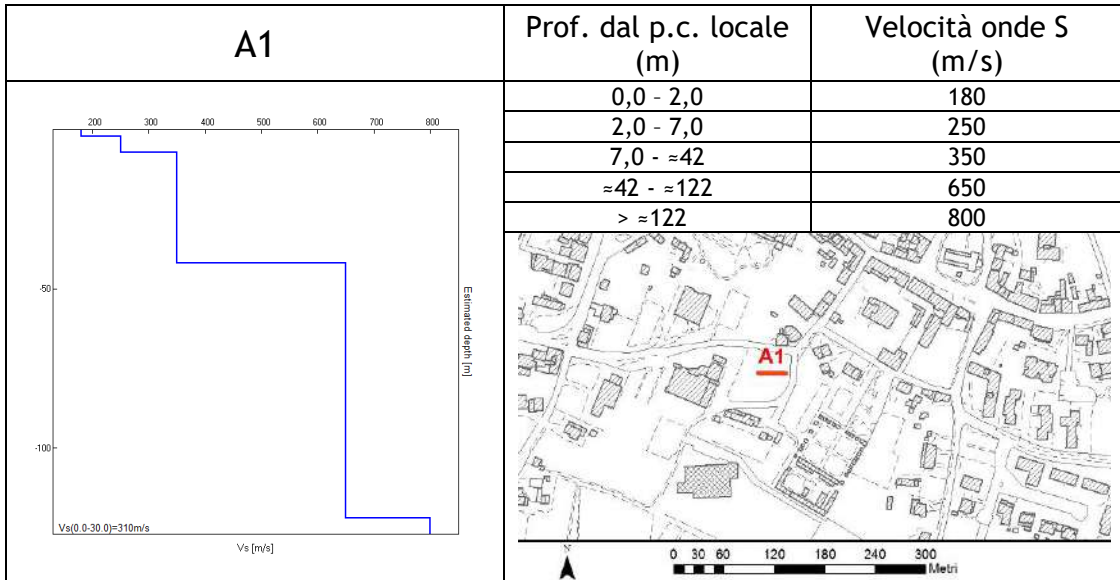
SINTESI DEI RISULTATI

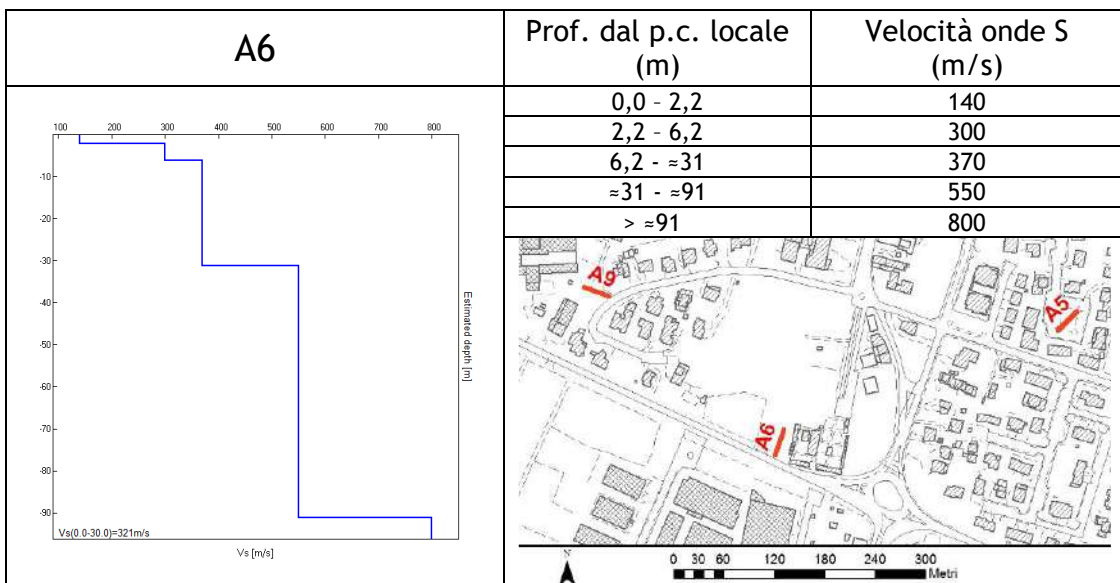
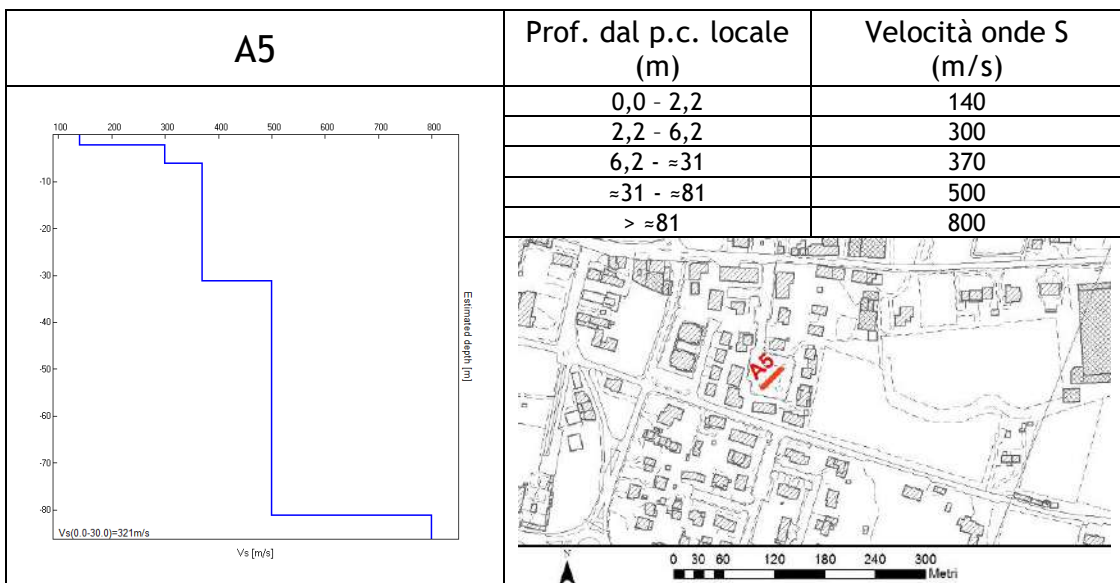
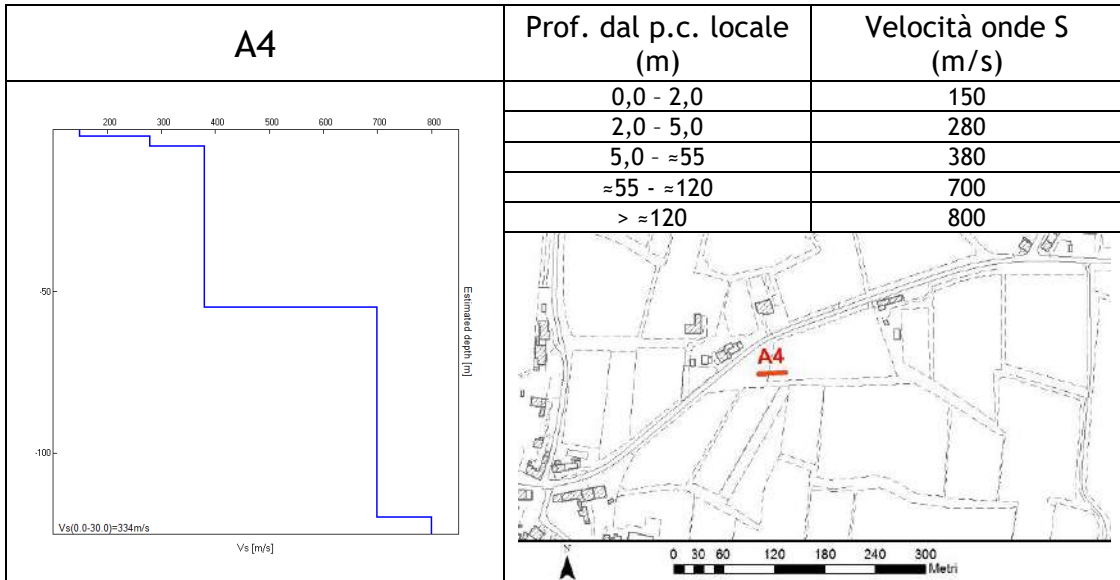
Come detto in precedenza, nel territorio comunale sono state fatte una serie di misure sismiche di superficie (*array* sismici Re.Mi.) per approfondire le conoscenze sulle caratteristiche “sismiche” dei litotipi costituenti il territorio in esame: in particolare, esse sono state utilizzate per determinare la velocità di propagazione delle onde di taglio S (V_s) dei terreni testati.

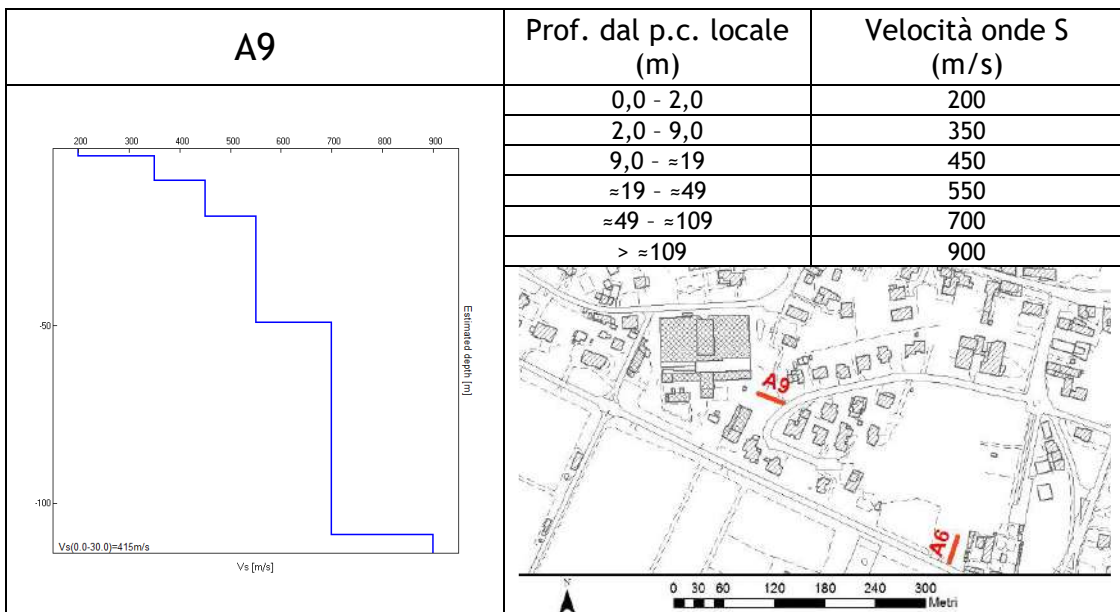
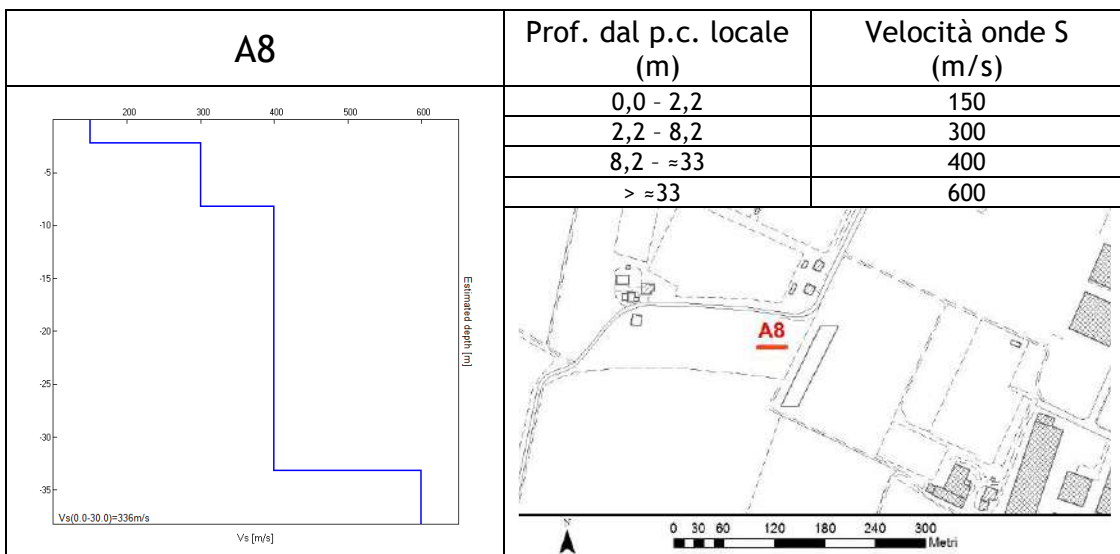
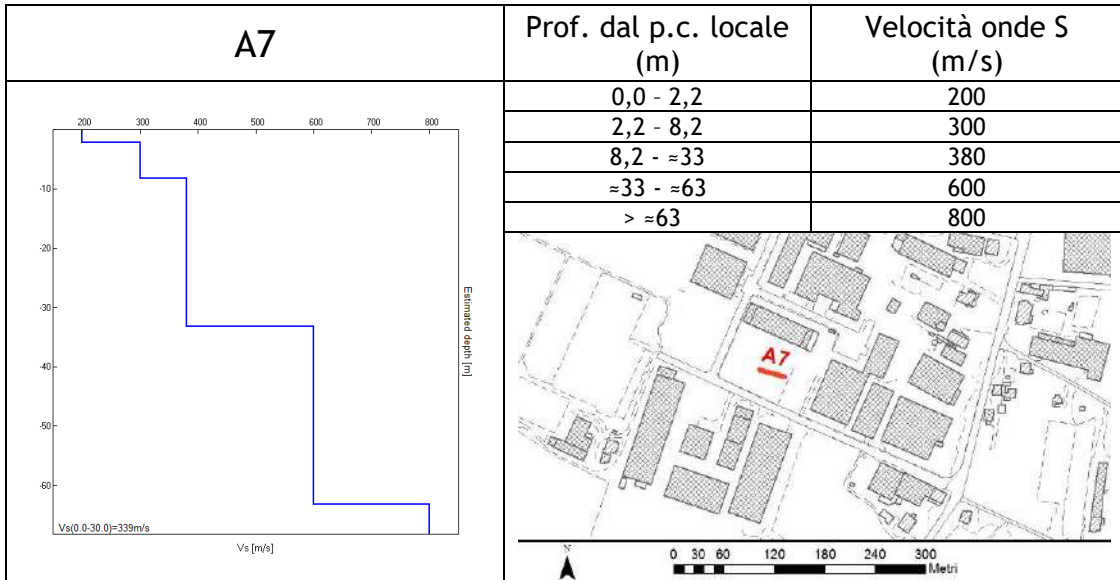
In questo paragrafo è riportata esclusivamente la sintesi dei risultati ottenuti dall'analisi congiunta degli *array* sismici e delle H.V.S.R. accoppiate ad essi (cfr. Schede A1, ..., A30 - T1, ..., T30). Nelle tabelle seguenti sono riportate l'ubicazione degli *array* e il profilo verticale delle onde di taglio S (V_s). Si rimanda all'allegato fuori testo per la lettura completa delle schede con i risultati di tali prove.

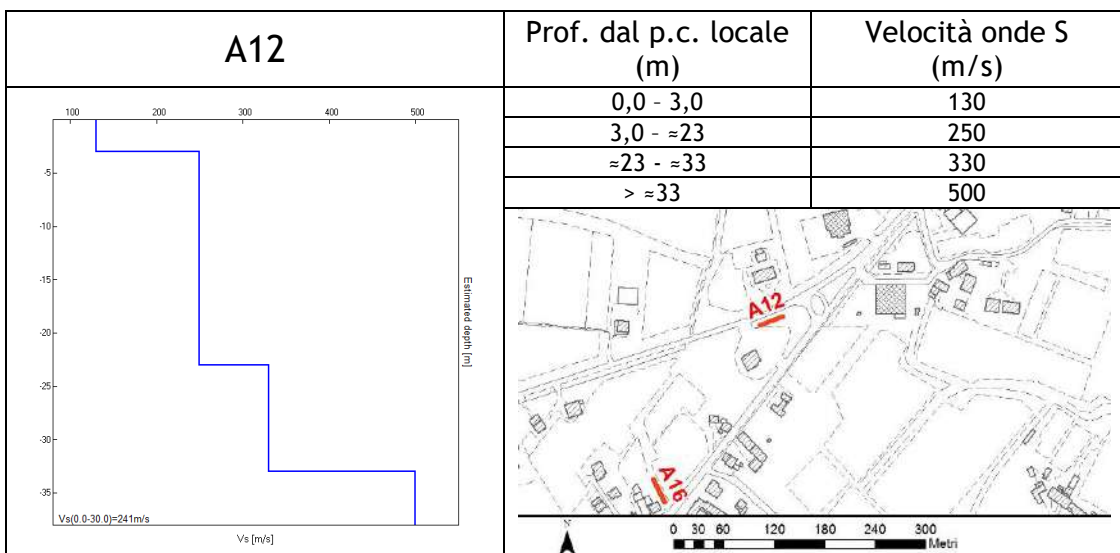
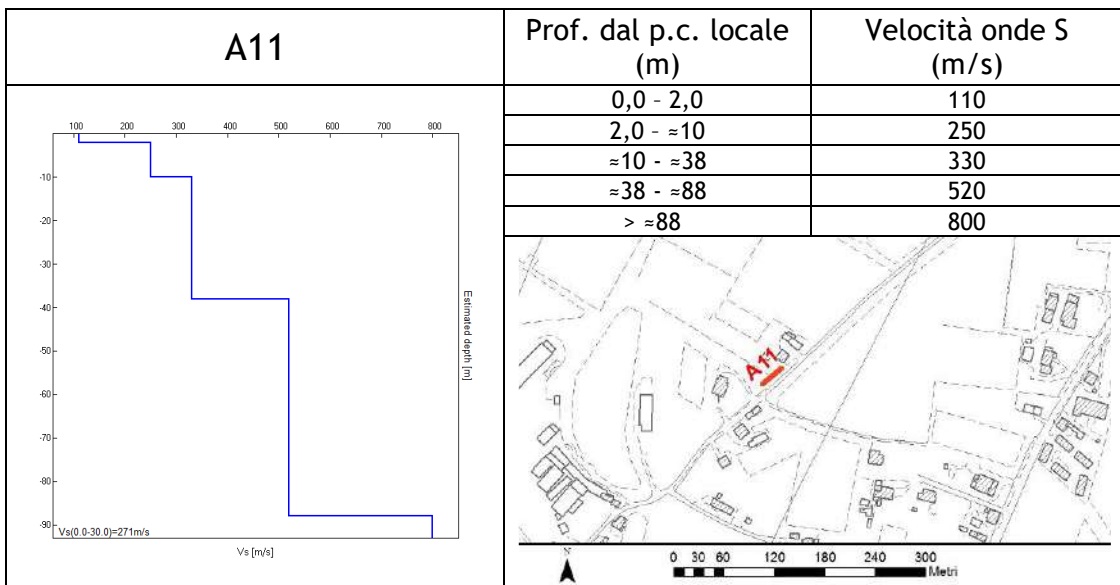
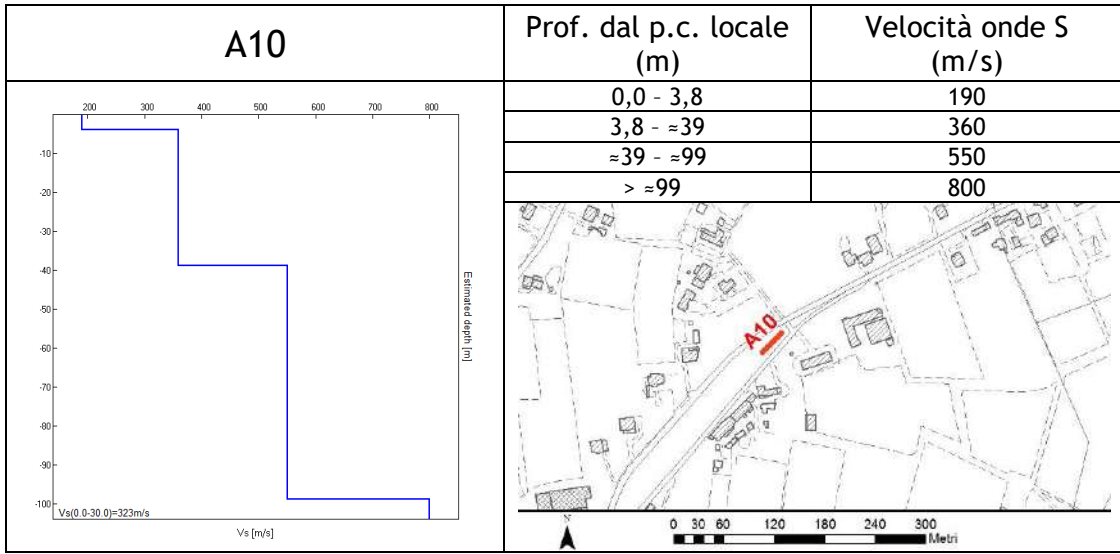
A seguire un esempio di cura di dispersione da misura Re.Mi. (A21) condotta per il presente lavoro. Si può osservare la buona coerenza del segnale e l'elevata profondità d'indagine data dai bassi valori di frequenza registrati.

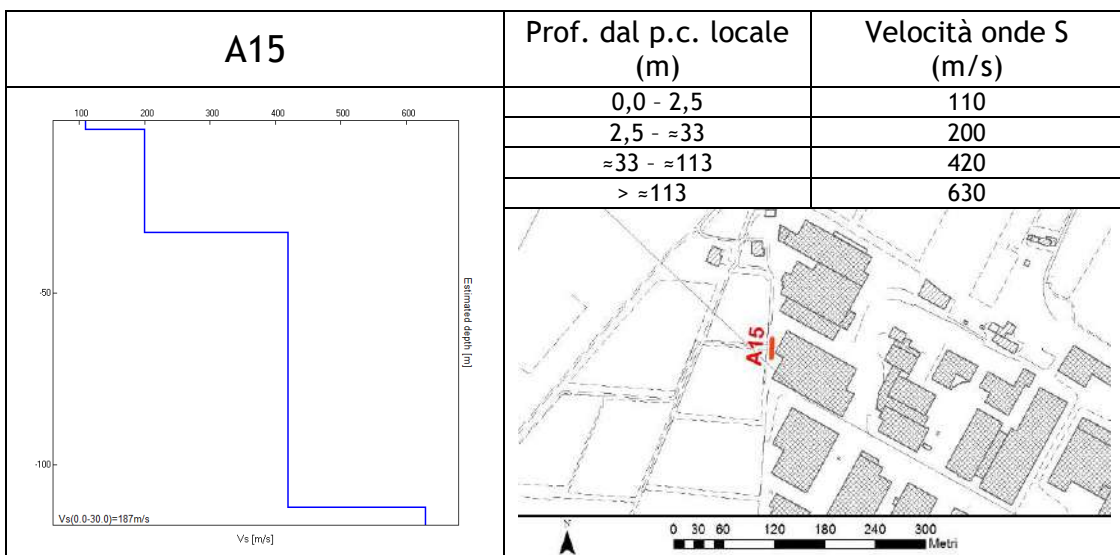
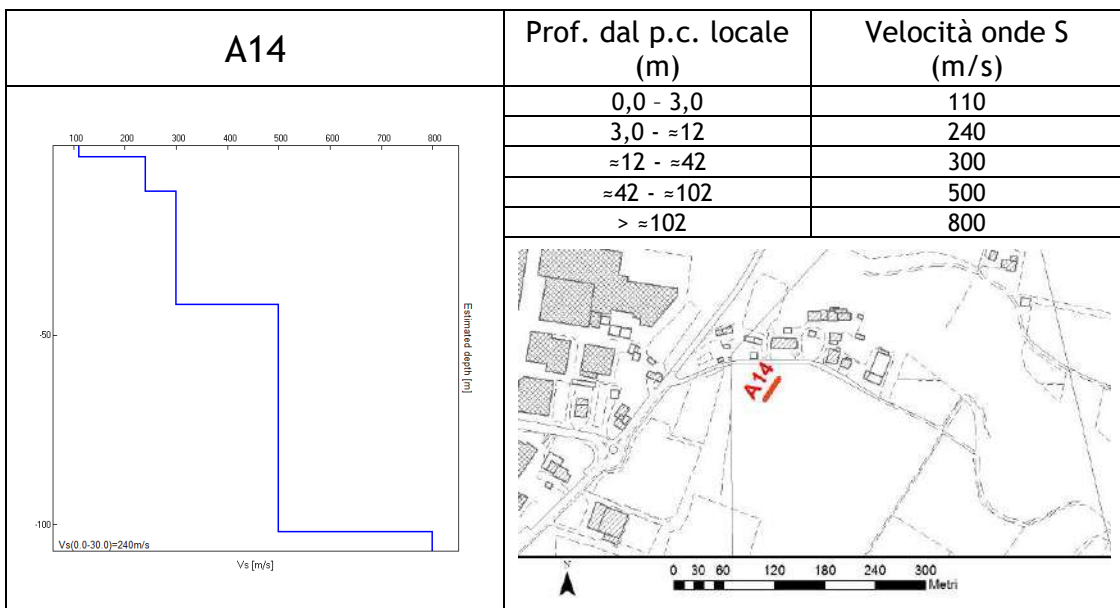
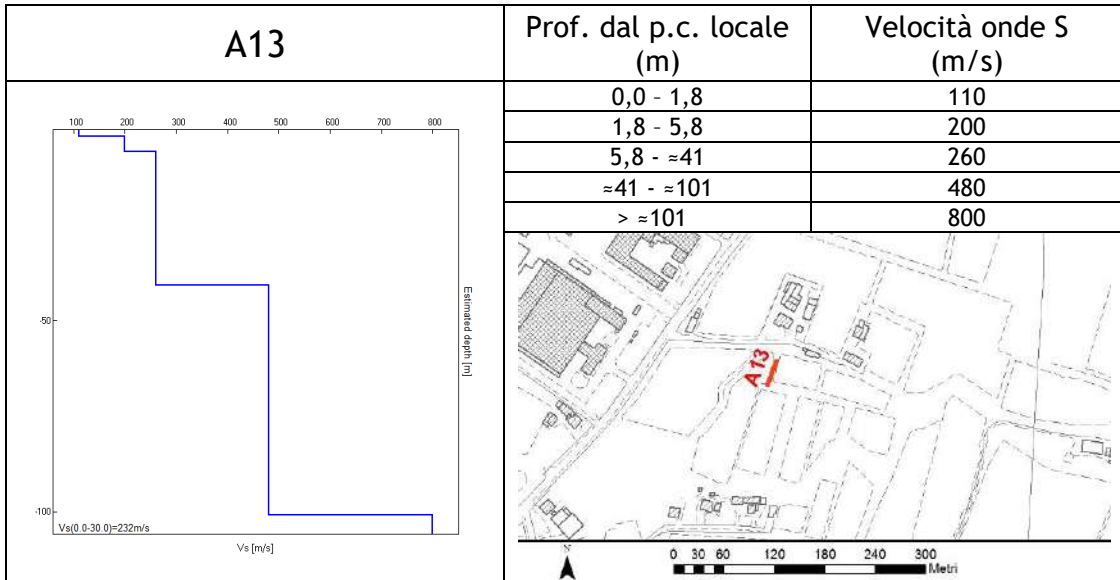


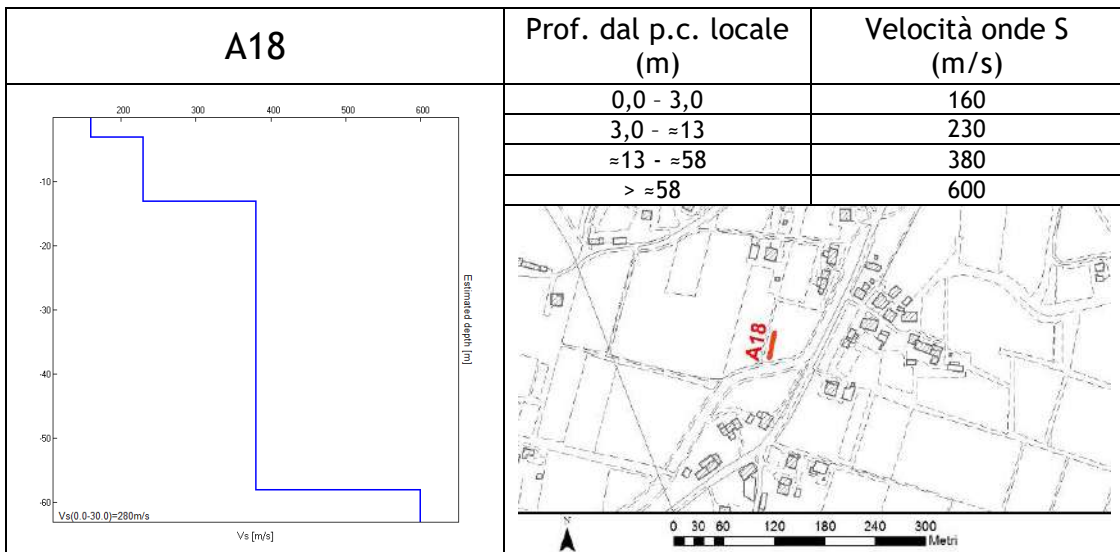
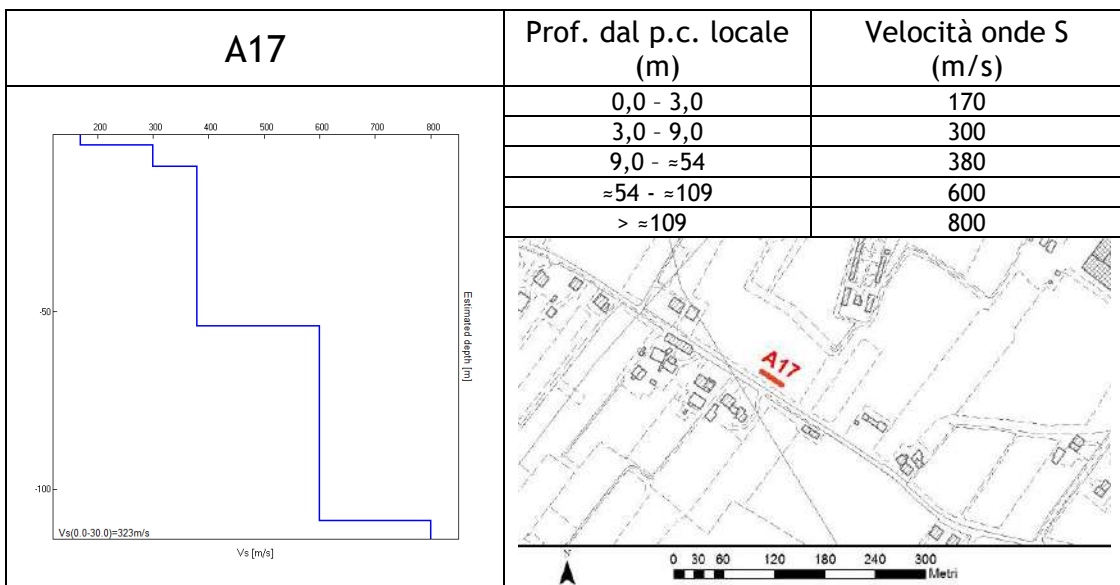
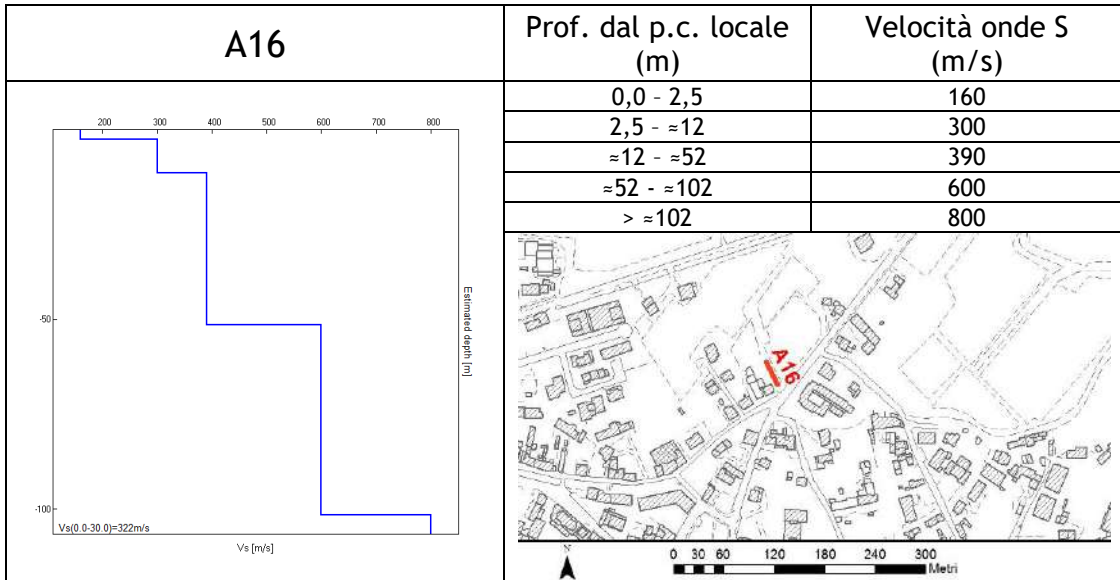


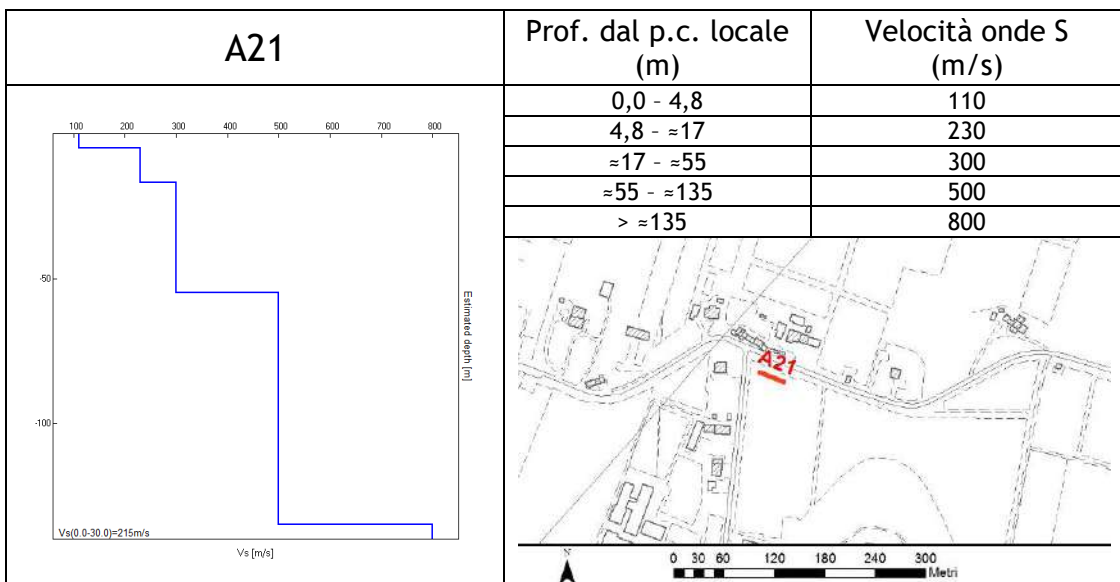
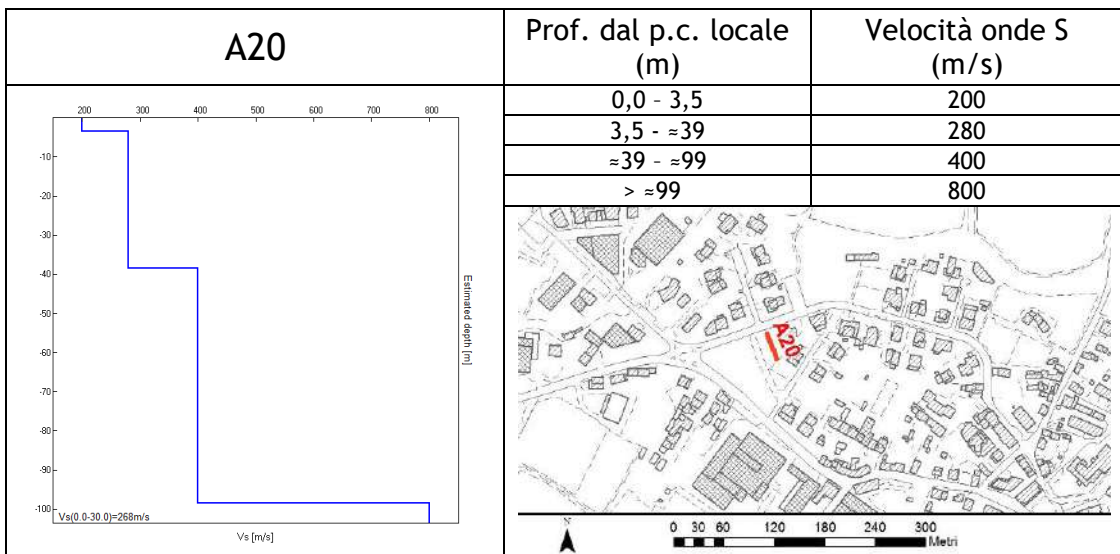
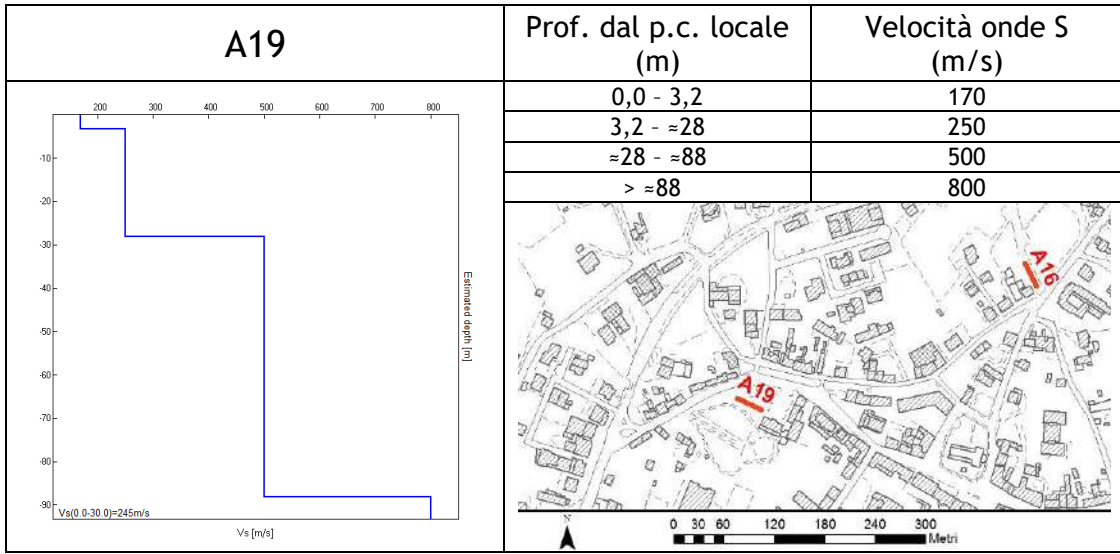


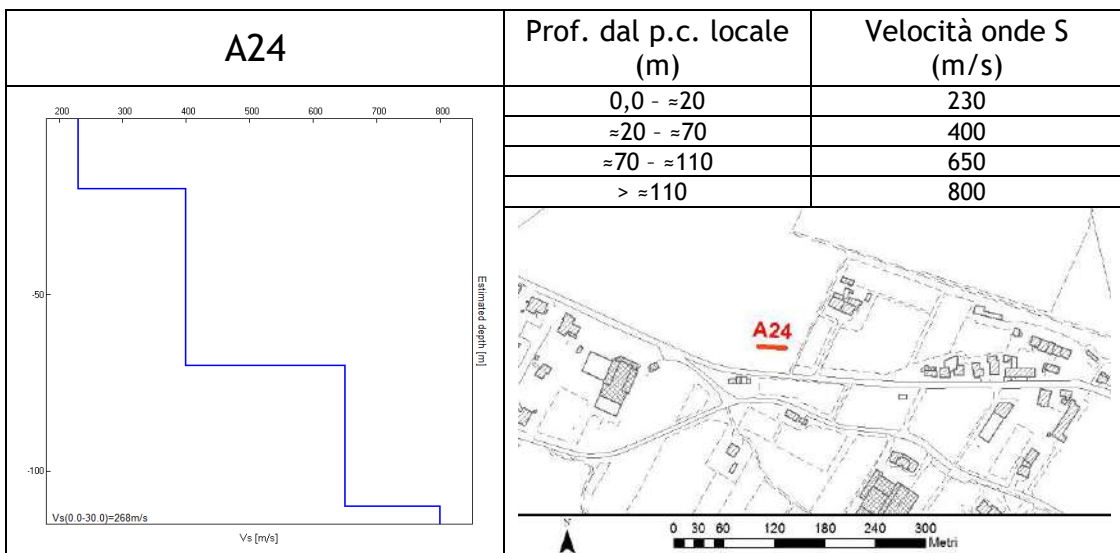
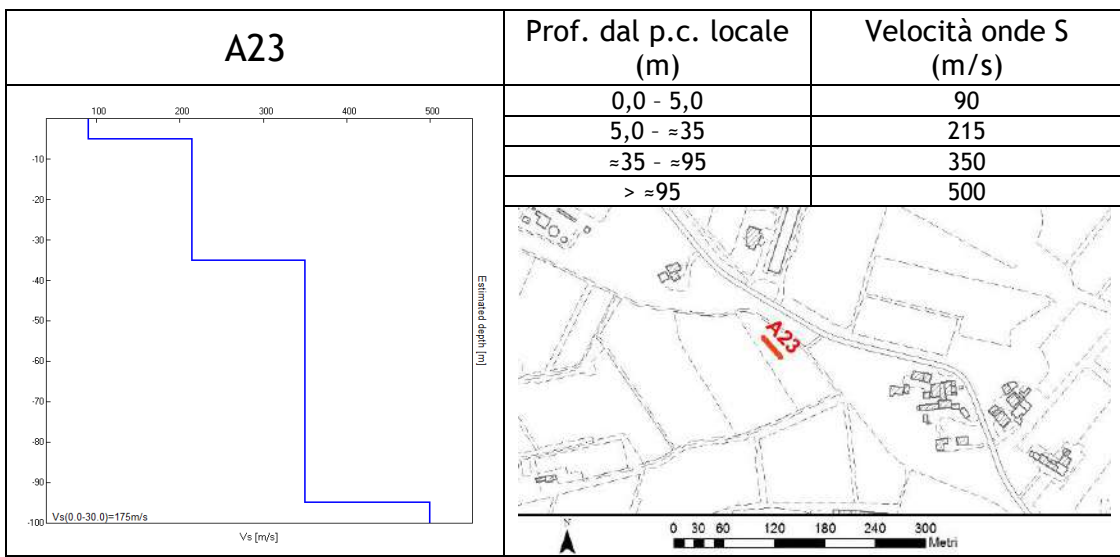
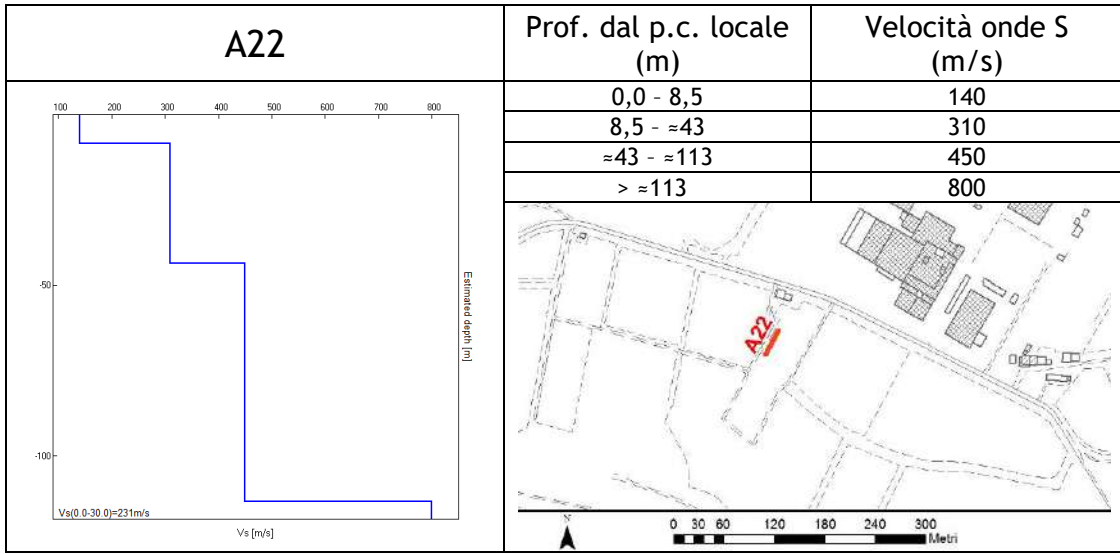


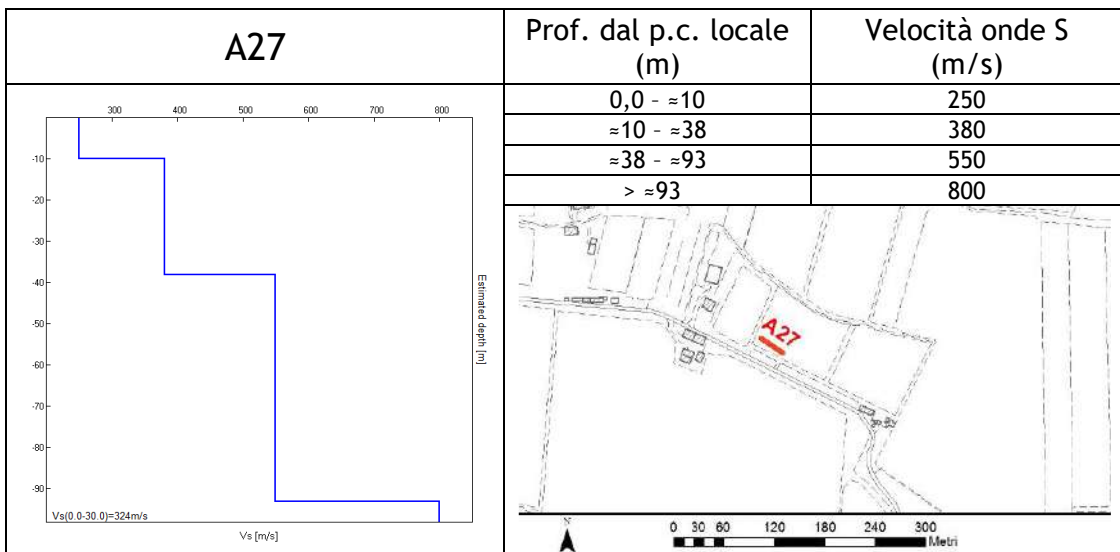
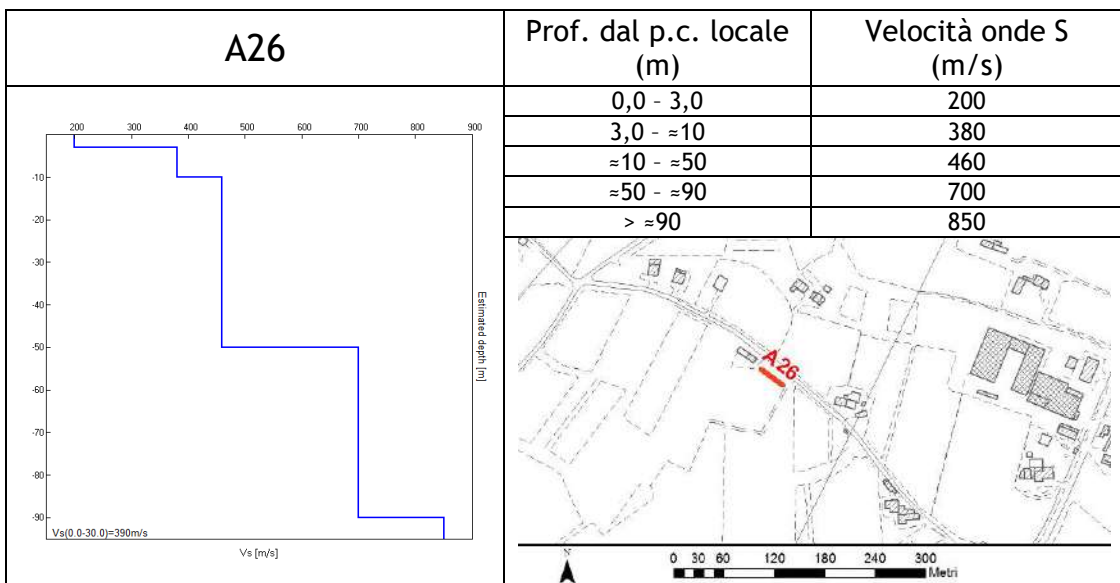
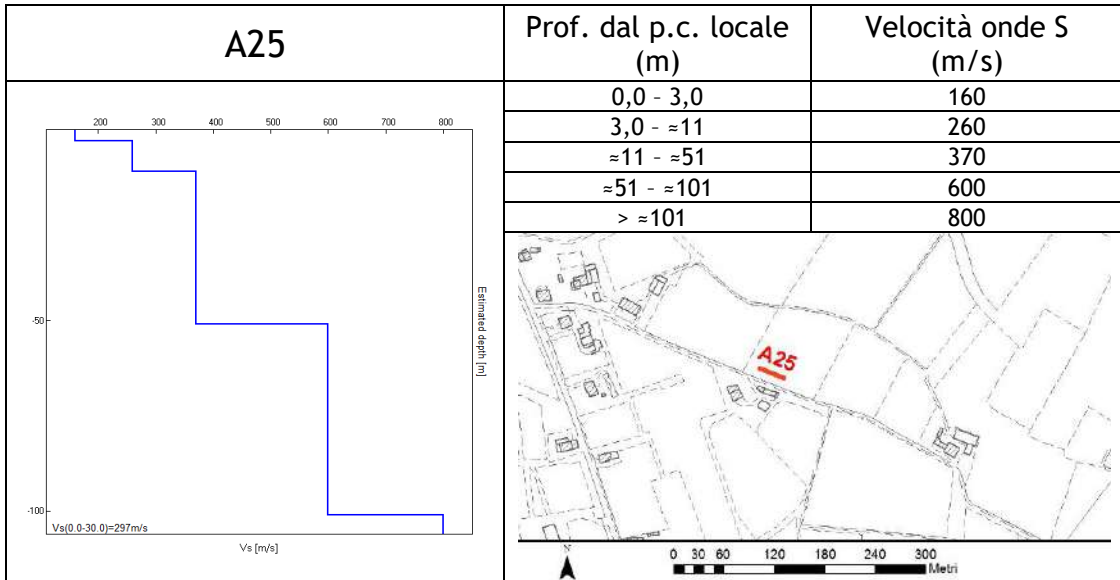


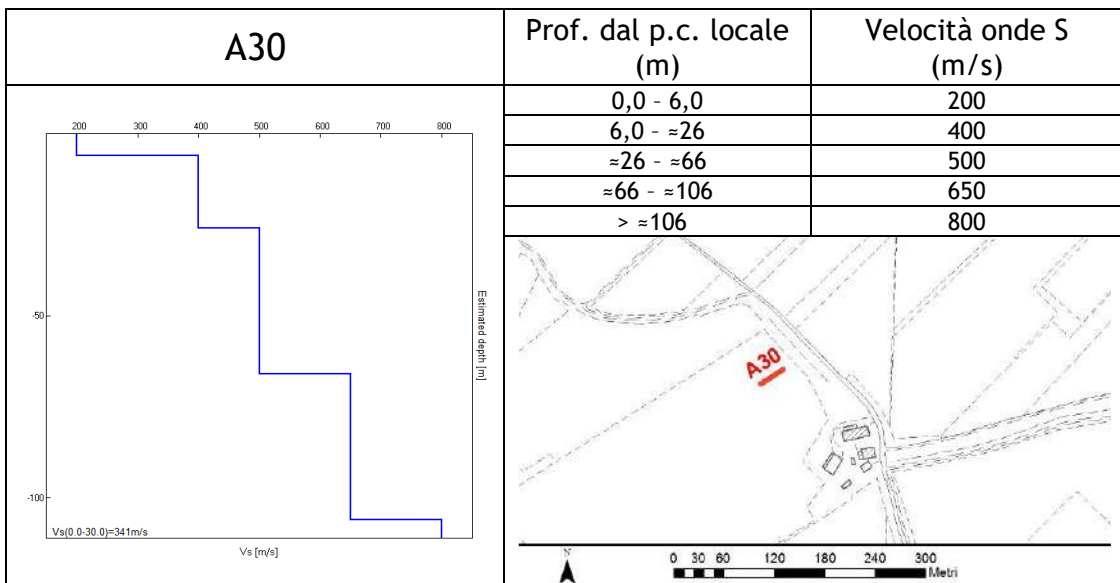
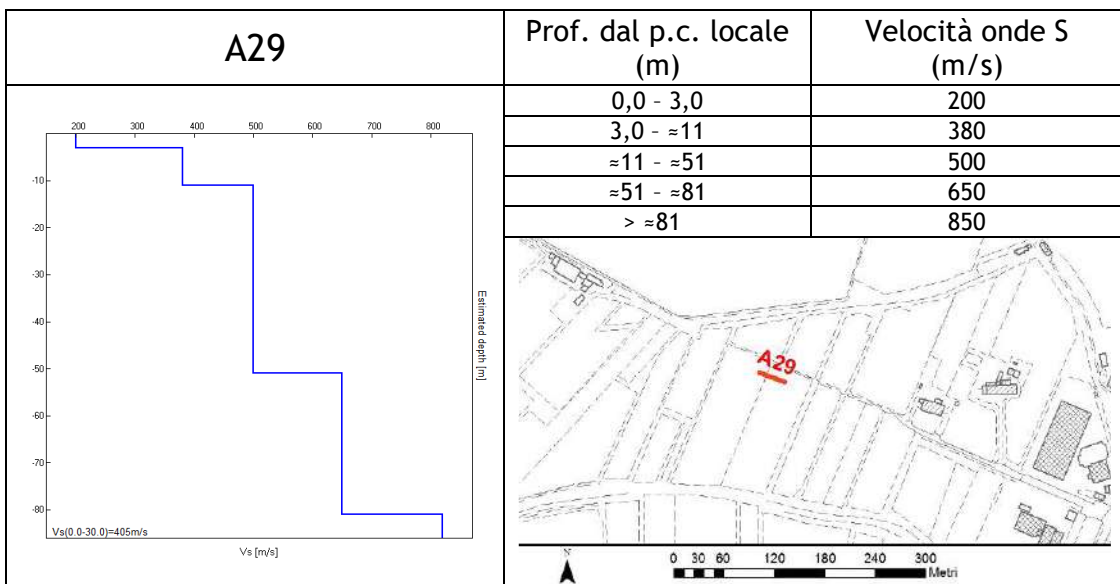
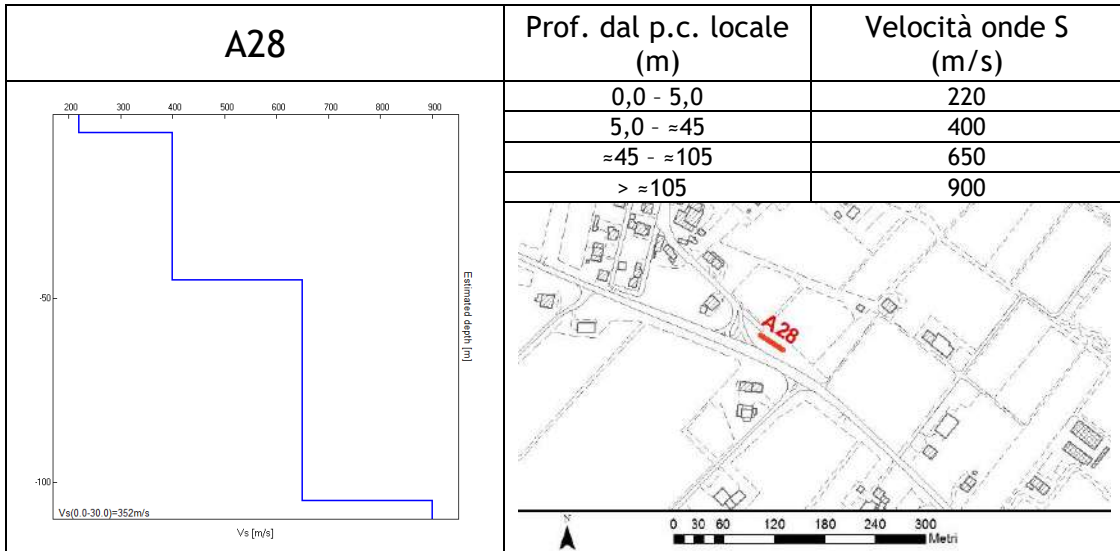








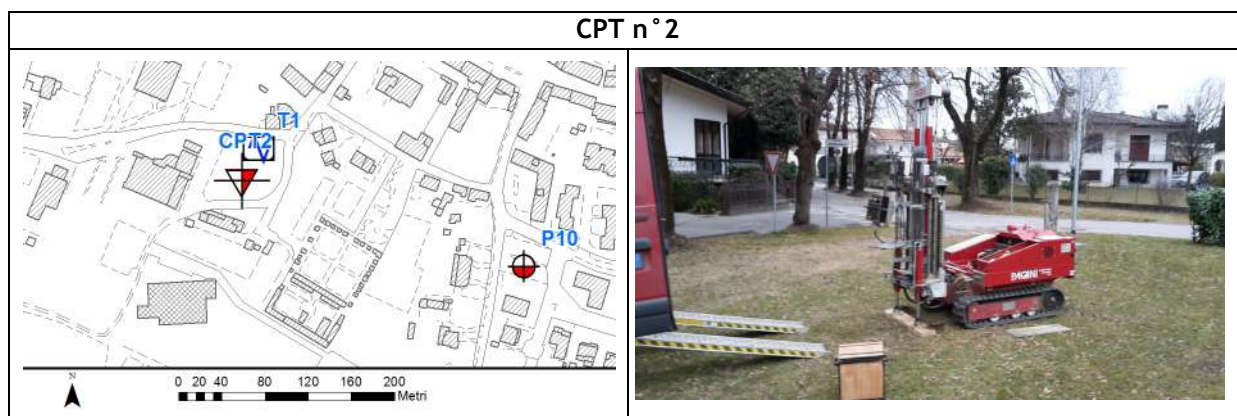
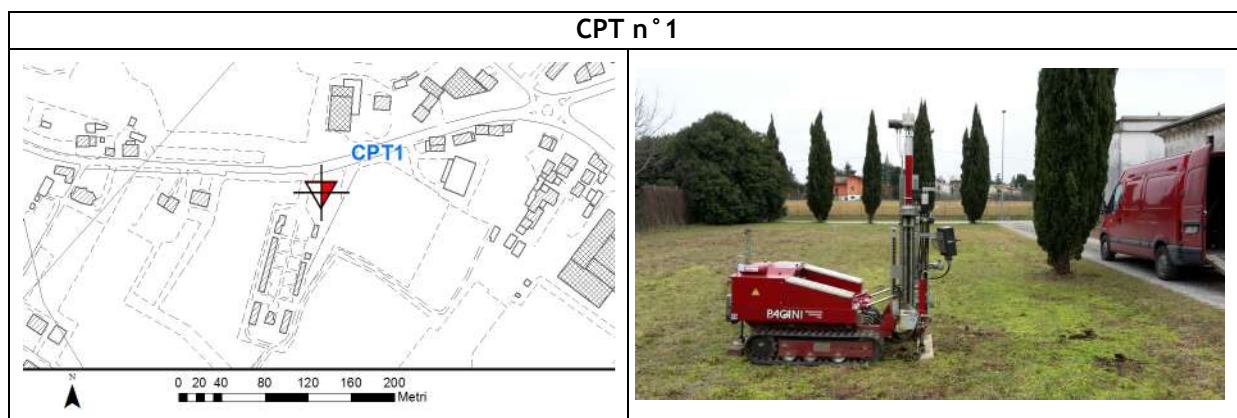




6.2.3 Indagini penetrometriche di tipo statico (CPT)

Il funzionamento del Penetrometro Statico (CPT Cone Penetration Test) è basato sull'infissione di una punta metallica nel terreno tramite un pistone idraulico che spinge la batteria di aste, su cui è montata la punta stessa (Punta tipo Begemann), a velocità costante di 2 cm al secondo, con potenza di spinta variabile. L'attrezzatura può essere montata su veicoli che, tramite il peso proprio o l'ancoraggio al terreno a mezzo di elicoidi, forniscono il contrasto necessario alla spinta. Lo strumento posto alla base della batteria di aste è costituito da una punta conica e da un manicotto mobile posizionato immediatamente dietro il cono, che misurano rispettivamente la resistenza alla penetrazione di punta (R_p in Kg/cm^2) e la resistenza di attrito laterale (R_l in Kg/cm^2). Tali grandezze sono quantitativamente correlabili alle caratteristiche geotecniche dei terreni attraversati. Dal rapporto di questi due valori (R_p/R_l) è possibile inoltre risalire alla stratigrafia del sottosuolo (Begemann, 1966; Schmertmann, 1978). La prova penetrometrica statica è compresa negli standard ASTM e ISSMFE, oltre che nelle "Raccomandazioni per le Indagini Geotecniche (1977)" dell'Associazione Geotecnica Italiana (AGI), ed è disponibile un'ampia letteratura sull'interpretazione dei dati sperimentali.

A seguire vengono riportate le ubicazioni e le foto di ogni prova condotta mentre in allegato il report completo con i valori di resistenza sia alla punta sia laterale.



6.3 Modello geosismico del sottosuolo. Interpretazione e incertezze

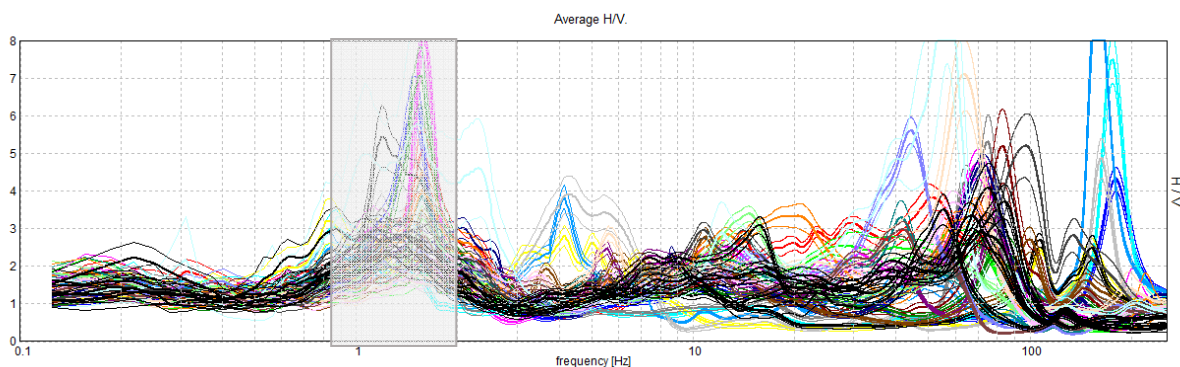
La valutazione della risposta sismica locale, sia con approccio semplificato, sia con modellazioni avanzate, non può prescindere da un'accurata ricostruzione del modello geosismico del sottosuolo tramite l'utilizzo di indagini geofisiche specifiche. Le misurazioni effettuate in *array* (Re.Mi.) ed a stazione singola (H.V.S.R.), hanno permesso di ricostruire con una certa precisione i modelli sismo-stratigrafici locali.

I contrasti di rigidità tra copertura e roccia, nonché quelli presenti all'interno della copertura stessa, come ben noto, contribuiscono in maniera determinante nella valutazione della risposta sismica locale, amplificando gli effetti in modo considerevole. Tali amplificazioni saranno tanto più marcate quanto più elevati sono i contrasti di rigidità tra i vari sismo-strati.

Inoltre, la presenza di un rumore di fondo caratterizzato da un ricco spettro frequenziale, ha permesso di ottenere, nella maggior parte dei casi, un'elevata profondità di penetrazione per quanto riguarda le misure in *array*. Le misure H.V.S.R. si presentano chiare anche se, a volte, la presenza di artefatti ne hanno alterato il naturale andamento; i rapporti spettrali H/V, in generale, non sono molto elevati.

I terreni, nel comune di Vazzola, si presentano caratterizzati da contrasti sismici di media intensità, ad eccezione della porzione settentrionale del territorio dove la differenza di rigidità, tra la copertura poco addensata di natura limoso-argillosa (V_s compresa tra 110 m/s e 140 m/s) e i sottostanti terreni granulari ghiaioso-sabbiosi (V_s compresa tra 200 m/s e 310 m/s), si presenta più elevata. Si segnala, inoltre, una diminuzione delle velocità di propagazione delle onde S nei primi 30 m tra i terreni presenti nella fascia centrale (V_s compresa tra 240 m/s e 320 m/s) rispetto a quelli della zona più meridionale (V_s compresa tra 330 m/s e 420 m/s), dovuta alla presenza di un materiale più sabbioso o meno addensato.

In generale, i risultati hanno evidenziato un modello sismo-stratigrafico del sottosuolo abbastanza regolare in tutto il territorio comunale, soprattutto per quanto riguarda la profondità dell'ultimo riflettore in grado di generare una rilevante amplificazione del moto sismico in superficie. Tale contrasto è ubicato ad una frequenza variabile tra 0,8 Hz e 2,0 Hz associabile ad una profondità di circa 80-120 m dal p.c. locale. Oltre tale profondità si riscontra una velocità di propagazione delle onde di taglio maggiore di 800 m/s e pertanto associabile al *bedrock* geofisico.

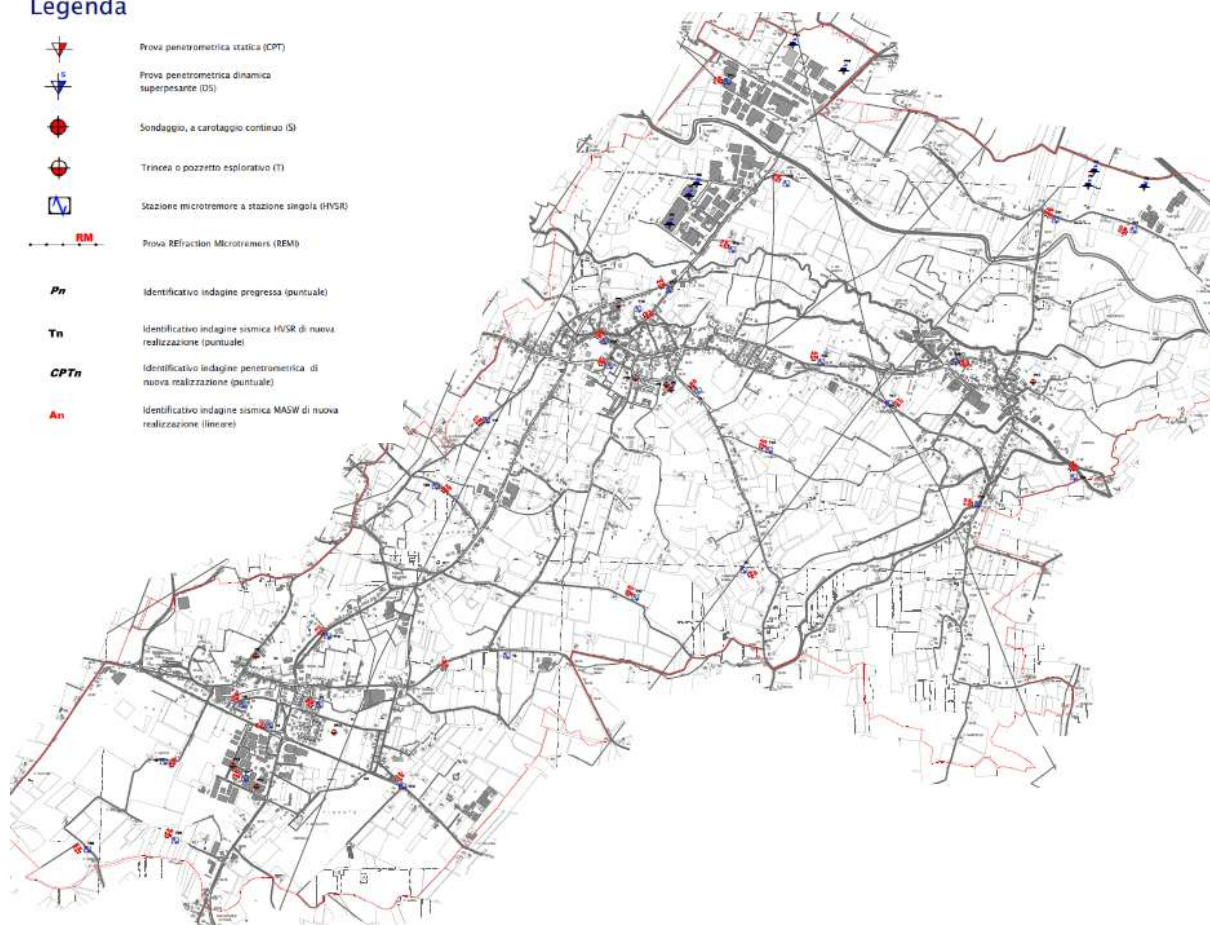


7. ELABORATI CARTOGRAFICI

7.1 Carta delle indagini

Si tratta della cartografia elaborata sulla base della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10.000, con ubicate le indagini *ex-novo* eseguite in questa fase e quelle desunte da studi pregressi che hanno consentito di ricostruire l'assetto tettonico e sismo-stratigrafico locale. Nella figura seguente si riporta un estratto della "Carta delle indagini" che dimostra come sia stato indagato, in modo dettagliato, l'intero territorio comunale; le indagini di nuova realizzazione sono state schedate, informatizzate e allegate fuori testo mentre quelle pregresse inserite nel supporto informatico allegato.

Legenda



7.2 Carta geologico-tecnica

La Carta geologico - tecnica per la Microzonazione Sismica (CGT_MS) serve per individuare gli elementi geologici che, in prospettiva sismica, potrebbero assumere un ruolo rilevante nell'esaltazione degli effetti di un terremoto.

Questa carta, elaborata sulla base della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10.000, riguarda l'integrazione e la rivisitazione in chiave sismologica dei contenuti geolitologici, geomorfologici ed idrogeologici allegati al P.A.T. Infatti, non sono stati eseguiti rilievi di superficie e, come da incarico, sono state utilizzate e mantenute le informazioni del P.A.T., integrandone e modificandone talora i contenuti alla luce dei risultati ottenuti dalle prove geofisiche condotte.

Per l'elaborazione della "Carta geologica-tecnica" sono state, quindi, analizzate le informazioni di carattere geologico disponibili e, sulla base delle caratteristiche meccaniche e degli ambienti genetico-deposizionali dei terreni, le varie unità litologiche sono state accorpate in classi distinte e rappresentative dei depositi costituenti il comune di Vazzola.

Alla fine, è stata creata una unità principale (“Terreni di copertura”) che contiene una serie di unità litologiche derivate dalla selezione e, talora, dall’accorpamento delle litologie locali.

Visto che le definizioni previste dagli “standard di rappresentazione e archiviazione informatica” non descrivono tutti gli ambienti deposizionali, le litologie riconducibili sia all’ambiente fluviale sia fluvioglaciale, sono state classificate come appartenenti all’ambiente glaciale (fg).

Per evidenziare i possibili effetti di amplificazione stratigrafica (contrasto di impedenza tra mezzi geologici differenti) e predisporre le informazioni utili per la MOPS (Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica), sulla base degli studi specifici di carattere geofisico, sono stati individuati i contatti tra litologie che possono rispondere in modo differente alla sollecitazione sismica.

In sostanza, per riconoscere le aree soggette o non soggette ad amplificazione sismica e quelli di attenzione per instabilità, in questa carta sono state indicate le seguenti situazioni:

- delimitazione dai vari terreni di copertura;
- morfologie sepolte come l’asse di paleo alveo;
- le informazioni sulla profondità della falda.

Di seguito vengono quindi descritti, sulla base della loro rigidità, composizione granulometrica e genesi, i vari litotipi testati. In conclusione, le unità litologiche principali definite nella CGT_MS sono le seguenti:

<i>Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica</i>	<i>Simbolo riportato in carta</i>
CL fg (Argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre; fg = deposito fluvio glaciale)	CL
GM fg (Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo; fg = deposito fluvio glaciale)	GM
GW fg (Ghiaie pulite con granulometria ben assortita, miscela di ghiaia e sabbia; fg = deposito fluvio glaciale)	GW

Facendo riferimento alle descrizioni litologiche del Paragrafo 3.3, le unità sopra riportate sono correlabili ai terreni indicati nella tabella seguente.

<i>Carta geologico - tecnica per la Microzonazione Sismica</i>	Carta geo - litologica del P.A.T.
GM fg	L - ALL - 01 + L - ALL - 05
GW fg	L - ALL - 01 + L - ALL - 06
CL fg	L - ALL - 05

In particolare, le indagini effettuate e l’assetto morfologico e/o stratigrafico dell’area hanno consentito di suddividere il territorio comunale in 3 aree litologicamente distinte:

- nella porzione più settentrionale del comune è stata confermata la presenza di materiale a tessitura prevalentemente fini per spessori inferiori ai 10 m poggiante sulle sottostanti ghiaie, come descritto nella carta litologica del P.A.T. (CL fg);
- a sud del comune, sono presenti materiali alluvionali a tessitura prevalentemente ghiaiosa con scarsa matrice (GW fg);
- nella porzione centrale del territorio comunale è stata individuata una fascia di transizione che segna il passaggio tra i depositi limoso-argillosi a nord e quelli ghiaiosi con scarsa matrice sabbiosa a sud e pertanto costituita da materiale ghiaioso con abbondante matrice limosa - sabbiosa interdigitato a livelli limoso-argillosi (GM fg).

Per confermare quanto appena descritto, si è prodotta un'ulteriore carta ("Carta delle Vs") in cui i valori di Vs30 ricavati in ogni indagine effettuata, sono stati cartografati tramite dei cerchi di diverso colore in base a 3 range di Vs.

È possibile osservare che le Vs massime (cerchi rossi) sono tutte concentrate nella porzione meridionale del comune mentre diminuiscono procedendo verso il centro del territorio comunale (cerchi blu). I valori minimi si raggiungono nei depositi limosi-argillosi a nord (cerchi verdi) confermando la loro minore rigidità.

Si specifica, tuttavia, che la delimitazione inferiore della zona di transizione, è del tutto indicativa in quanto non ci sono evidenze geologiche che ne consentono la corretta definizione.

7.3 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (Livello 1)

La "Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica" (MOPS) ha come finalità la suddivisione del territorio comunale nelle seguenti aree.

1. Zone stabili
2. Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali
3. Zone di attenzione per instabilità

Inoltre, in essa sono state inserite le seguenti informazioni:

- morfologie sepolte;
- misure di rumore ambientale H.V.S.R.

La MOPS è stata ricostruita alla scala 1:10.000 a partire dalla "Carta geologico-tecnica" precedentemente esposta, integrandone e rivedendone i contenuti.

1) ZONE STABILI

Nel comune di Vazzola non sono state individuate zone "stabili". In sostanza, si noti che l'intero territorio è considerabile come stabile suscettibile di amplificazione sismica e presenta, su vaste aree, delle zone di attenzione per instabilità.



Infatti, è stato verificato che il moto sismico è amplificabile rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche locali.



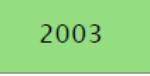
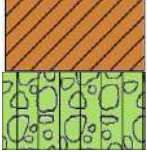
2) ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI

Il comune di Vazzola risulterebbe "suscettibile di amplificazioni locali" per motivi puramente stratigrafici cioè, il moto sismico di base risulterà amplificato a causa dei contrasti di rigidità presenti nel sottosuolo. Tali contrasti non sono presenti solo al contatto tra la copertura e il sottostante substrato roccioso ma possono essere localizzati anche all'interno della copertura stessa al passaggio, per esempio, tra i litotipi poco rigidi superficiali (limi e argille) a quelli addensati di natura prevalentemente granulare (ghiaie e sabbie).

Come detto in precedenza, a Vazzola non si sono verificate le condizioni per ipotizzare la perimetrazione di "zone stabili" dove lo scuotimento sismico sia associabile solamente all'energia ed alla distanza dall'evento.

Pertanto, sulla base di quanto finora esposto ed escludendo la presenza di "zone stabili", le zone che possono essere soggette ad amplificazione sismica sono state così suddivise.

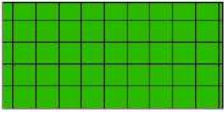
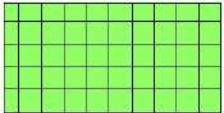
<p>Zona 2001 - GWfg. Costituita da materiale granulare ghiaioso composto prevalentemente da ghiaie sabbiose pulite con scarsa matrice. La velocità di propagazione delle onde S risulta di circa 200 m/s nell'immediato sottosuolo e aumenta gradualmente a profondità maggiori. A circa 100 - 120 m dal p.c. locale il grado di rigidità si stabilizza oltre gli 800 m/s (<i>bedrock geofisico</i>). Gli spessori sono di qualche centinaio di metri.</p>		
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------

<p>Zona 2002 - GMfg. Costituita da materiale granulare ghiaioso composto prevalentemente da ghiaie sabbiose - limose con abbondante matrice. Occupa la porzione centrale del territorio comunale e la velocità di propagazione delle onde S risulta compresa tra 150-200 m/s nell'immediato sottosuolo e aumenta gradualmente a profondità maggiori. Gli spessori sono di qualche centinaio di metri.</p>		
<p>Zona 2003 - CLfg. Caratterizzata da materiale fine prevalentemente limoso - argilloso. La Zona 3 occupa la parte settentrionale del territorio comunale. Lo spessore variabile raggiunge valori anche di qualche decina di metri e poggia sul materiale della Zona 1 o Zona 2. La velocità di propagazione delle onde S è inferiore a 150 m/s nei primi metri di profondità e aumenta gradualmente con la profondità.</p>		

3) ZONE DI ATTENZIONE PER LE INSTABILITÀ

Per quanto riguarda le “zone di attenzione per le instabilità”, è stata attribuita ad alcune aree del territorio la potenziale instabilità per liquefazione.

Tra le aree potenzialmente instabili per fenomeni di liquefazione, visto che il territorio comunale è parzialmente assoggettabile a tale effetto cosmico, è stata fatta una prima analisi di approfondimento per verificare se è possibile escludere qualche ambito geomorfologico di Vazzola. In particolare, le aree nelle quali è stata assegnata la possibile instabilità per liquefazione sono le seguenti:

<p>Zona di attenzione per liquefazione</p> <p>CL fg - Materiali fini prevalentemente limoso-argillosi con sabbia di origine fluvio-glaciale.</p>	
<p>Zona di attenzione per liquefazione</p> <p>GM fg - Materiali ghiaiosi in matrice sabbiosa-limosa di origine fluvio-glaciale.</p>	

Il fenomeno della “liquefazione” dei terreni interessa in genere i depositi sabbiosi e/o sabbioso limosi sciolti sotto falda, a granulometria uniforme, normalmente consolidati e saturi. La liquefazione rientra tra gli “effetti di sito”, ovvero tra quel tipo di effetti dovuti all’interazione tra le onde sismiche e le condizioni geologiche locali. Le principali manifestazioni della liquefazione sono “oscillazioni e rotture del terreno”, “abbassamenti e sollevamenti del terreno”, “movimenti orizzontali del terreno”, “movimento di masse fluide / collasso in pendii naturali o artificiali”, “perdita di capacità portante delle fondazioni”, “collasso di opere di sostegno e banchine”.

Esistono delle condizioni (fattori predisponenti) che rendono alcuni terreni suscettibili di “liquefazione” ma, affinché questo avvenga, l’azione sismica (fattore scatenante) deve essere tale che, durante lo scuotimento sismico, le sollecitazioni indotte nel terreno determinino un aumento delle pressioni interstiziali fino ad eguagliare la pressione litostatica e la tensione di confinamento, annullando la resistenza al taglio ed inducendo fenomeni di fluidificazione. Secondo le NTC, un deposito NON è liquefacibile (nel senso che si può omettere la verifica alla liquefazione) quando si manifesta **almeno una** delle seguenti circostanze:

1. eventi sismici di magnitudo M inferiore a 5;
2. accelerazioni massime attese al p.c. in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
3. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal p.c., per piano campagna suborizzontale e strutture con fondazioni superficiali;

4. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1n} > 180$, dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove S.P.T. normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa, e q_{c1n} è il valore della resistenza determinata in prove CPT e normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
5. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Fig. 7.11.1(a) delle NTC nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ ed in Fig. 7.11.1(b) delle NTC nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

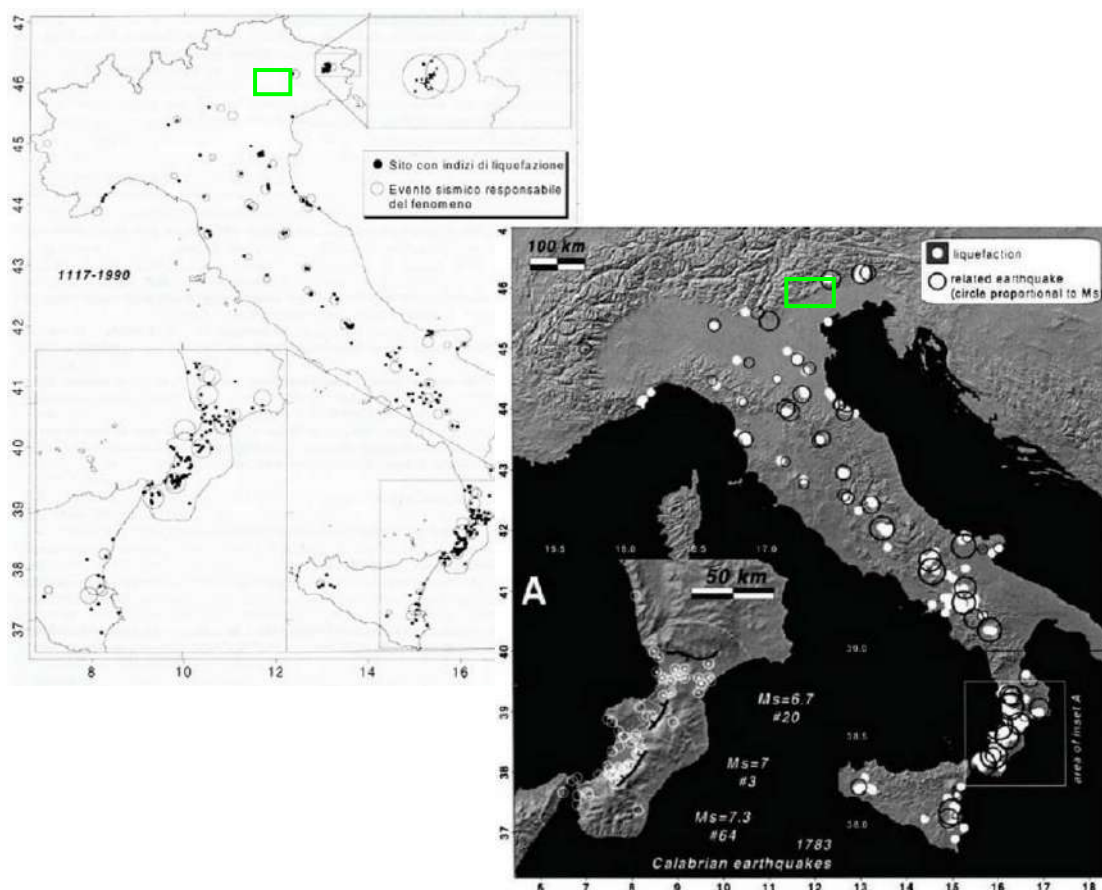
Altri standard di riferimento ed altre linee guida tendono ad ampliare la gamma dei terreni potenzialmente suscettibili alla liquefazione, indicazione di cui si è tenuto conto anche nel presente studio.

Ad ogni modo, per provare a delimitare le aree suscettibili di liquefazione (e di densificazione, conseguente alla dissipazione delle pressioni interstiziali durante e dopo l'evento sismico atteso) sono state utilizzate le informazioni geologiche riportate nella "Carta geologico-tecnica" associandole ad una prima analisi "qualitativa" per la stima del rischio di liquefazione.

Ci sono diversi criteri per valutare qualitativamente la suscettibilità alla liquefazione di un deposito sabbioso, tra cui il "Criterio storico", il "Criterio geologico", il "Criterio di composizione" ed il "Criterio di stato fisico".

Criterio storico, che considera il fatto che suoli liquefatti in passato possono liquefare ancora durante terremoti futuri: non si hanno informazioni particolari in merito al comune in esame e, a tal proposito, si riporta la seguente figura, dove vengono evidenziati i siti con indizi di liquefazione in seguito ai terremoti segnalati dal 1117 al 1990.

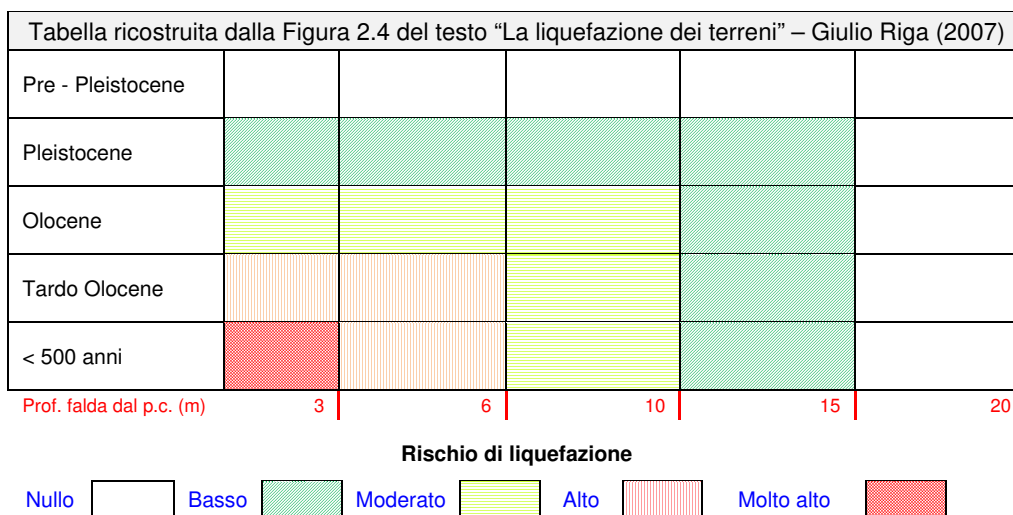
Si noti come i siti con indizi di liquefazione siano esterni all'area in esame: la foto a sinistra è stata estratta da alcuni corsi di aggiornamento che non citavano la fonte mentre, quella a destra, che sostanzialmente riproduce le stesse informazioni, è tratta da "New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction - Galli P. (2000)". Dati analoghi sono riportati anche nel sito www.ceri.uniroma1.it.



Criterio geologico, che tiene conto dell'età e dell'origine del deposito, della profondità della falda, della morfologia e dell'eventuale spessore degli strati sovrastanti non liquefacibili. A tal proposito, si riportano le seguenti tabelle.

Criterio di Iwasaky et al. (1982)		
Classe	Unità geomorfologica	Potenziale di liquefazione
A	Letti di fiumi recenti, paleoalvei, paludi, zone bonificate, zone interdunari	Probabile
B	Conoidi, argini naturali, dune di sabbia, pianure di esondazione, spiagge, altre pianure	Possibile
C	Terrazzi, colline, montagne	Non Probabile

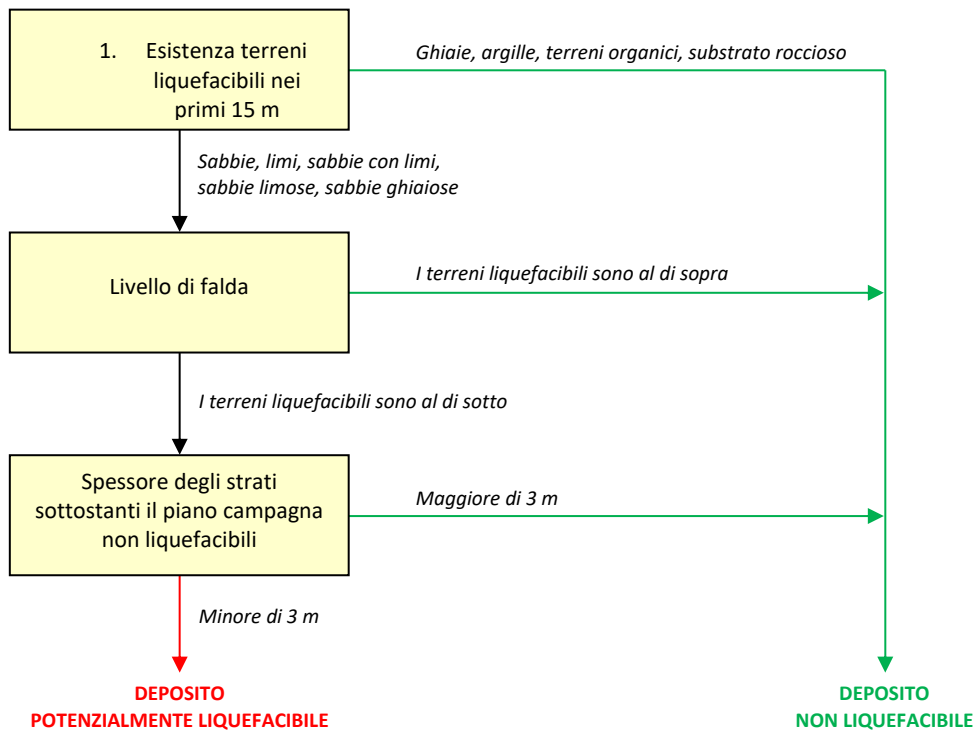
Probabilità di liquefazione			
Età del deposito	Profondità della falda		
	< 9 m	9 m ÷ 15 m	> 15 m
Olocene recente	Elevata	Bassa	Molto Bassa
Alto Olocene	Moderata	Bassa	Molto Bassa
Pleistocene recente	Bassa	Bassa	Molto Bassa
Pleistocene antico e depositi anteriori	Molto Bassa	Molto Bassa	Molto Bassa



In aggiunta a tale inquadramento preliminare, riprendendo un lavoro a cura del Dott. Johann Facciorusso dell'Università di Firenze, esperto in campo di microzonazione sismica e di liquefazione, è stata fatta una prima valutazione qualitativa applicando un metodo derivato da quello proposto da Sherif e Ishibashi (1978) - grafico di flusso riportato nella pagina seguente.

Sulla base di queste tabelle, delle condizioni geologiche locali e a causa della mancanza di informazioni geotecniche precise come le analisi di laboratorio da sondaggi geognostici a carotaggio continuo, **si ritiene di poter attribuire un certo grado di attenzione alla liquefazione a buona parte dei terreni presenti nel comune di Vazzola ad esclusione di quelli ghiaiosi, localizzati prevalentemente nella porzione meridionale del territorio comunale.** In conclusione:

nella Carta delle MOPS, il Comune di Vazzola è stato quindi **parzialmente** inserito tra le zone ZALQ (Zona di attenzione per liquefazione).



Schema estratto da "Microzonazione Sismica – Uno strumento consolidato per la riduzione del rischio" – Par. 5.6 – Figura 5.9 di Johann Facciorusso, Claudia Madaia, Giovanni Vannucchi, Luca Martelli

7.4 Carta delle frequenze

La misura delle vibrazioni ambientali (note anche come rumore sismico ambientale o microtremori) o della sismicità di fondo (*weak motion*) consente di analizzare la variazione della risposta sismica di un sito al variare delle condizioni litostratigrafiche.

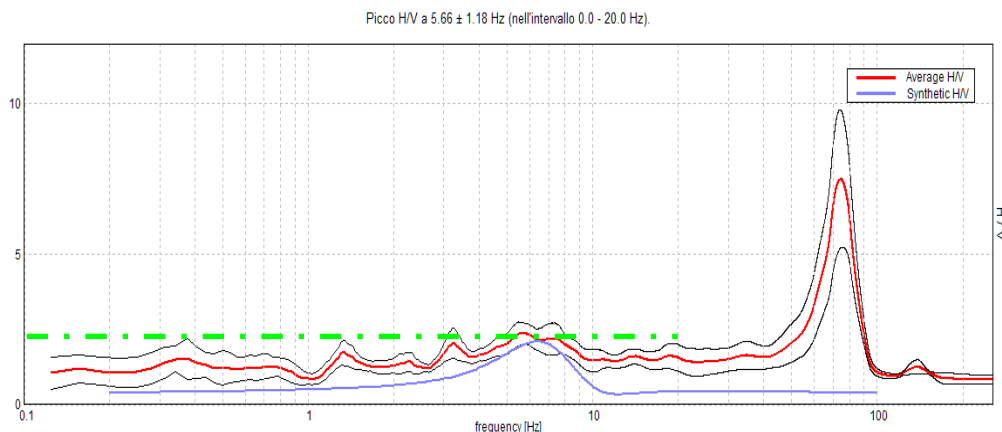
Durante le indagini di MS dell'area aquilana dopo il terremoto del 6 aprile 2009, i risultati di tali analisi si sono rivelati estremamente utili sin dalle prime fasi di elaborazione delle carte di Livello 1.

L'analisi dei microtremori attraverso la tecnica *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (H.V.S.R.) consente di mettere in luce fenomeni di risonanza sismica e di stimare le frequenze alle quali il moto del terreno può essere amplificato (frequenza di risonanza del terreno). Il metodo consente inoltre di valutare qualitativamente l'entità dell'amplificazione (ampiezza del picco H.V.S.R. alla frequenza F) - anche se l'ampiezza del picco H.V.S.R. è una grandezza da interpretare con cautela - e di fornire una stima indicativa sulla profondità del contrasto di impedenza che causa la risonanza sismica.

I risultati delle indagini H.V.S.R. da microtremori hanno consentito di realizzare la "Carta delle frequenze", hanno restituito informazioni utili a definire e delineare con maggior dettaglio la "Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica" (MOPS) ed hanno permesso l'identificazione di alcune criticità locali. I siti selezionati per le indagini geofisiche sono stati determinati sulla base delle differenti unità litologiche presenti nell'area, al fine di verificare e valutare l'influenza dei litotipi e delle loro geometrie sulla risposta sismica locale. In allegato fuori testo sono state riportate le schede di sintesi dei risultati di tali prove.

Dal punto di vista ingegneristico-strutturale il valore di risonanza del sottosuolo rappresenta un parametro fondamentale per una corretta progettazione sismica delle strutture. È ormai consolidata, sia a livello accademico sia professionale, l'ipotesi che le strutture subiscano le sollecitazioni sismiche maggiori quando c'è coincidenza tra la frequenza di vibrazione naturale del terreno investito da un'onda sismica e quella naturale dell'edificio. Si dovrà quindi porre estrema attenzione nell'edificare strutture aventi gli stessi periodi di vibrazione del terreno.

Tutte le valutazioni sulle condizioni di amplificazione di sito sono state effettuate considerando la finestra frequenziale di 0,1-10 Hz, in quanto tali frequenze risultano essere quelle di normale interesse ingegneristico-strutturale. Inoltre, le amplificazioni sismiche considerate nella curva H/V sono state quelle con un rapporto superiore a 2: infatti, in base al progetto **SESAME**, che di fatto fornisce le linee guida per misure sismiche H.V.S.R., il rapporto sotto il quale non si devono considerare le amplificazioni sismiche dovute ad effetti locali è fissato a 2 (linea tratteggiata nella figura sotto).



Sono attribuite condizioni di amplificazione stratigrafica per quei siti in cui la curva mediana di interpolazione del grafico presenta picchi con ampiezza H/V superiore a 2 (criterio SESAME, 2004; Albarello e Castellaro, 2011) all'interno del campo di frequenze compreso tra 0,1 e 20 Hz

Nell'ambito del presente studio, le frequenze di risonanza sono state ottenute utilizzando il software applicativo Grilla in dotazione a Tromino®, secondo la procedura descritta in Castellaro et al. (2005) e Albarello e Castellaro (2011), che prevede quanto segue:

- larghezza delle finestre di analisi pari a 20 s;
- lisciamento secondo una finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale;
- rimozione delle finestre con rapporto STA/LTA (media a breve termine/media a lungo termine) superiore a 2;
- rimozione manuale di eventuali transienti ancora presenti;
- verifica dell'affidabilità delle curve H/V secondo i criteri di qualità SESAME (2004)

SINTESI DEI RISULTATI

In sostanza, questa carta, elaborata sulla base della C.T.R. alla scala 1:10.000 e riportata in estratto nella figura sottostante, evidenzia come la frequenza di risonanza di un sito sia condizionata dai rapporti litostratigrafici che si sviluppano con la profondità: nel nostro caso, la frequenza caratteristica di risonanza F_0 risulta legata al contrasto di rigidità presente all'interno della copertura sedimentaria.

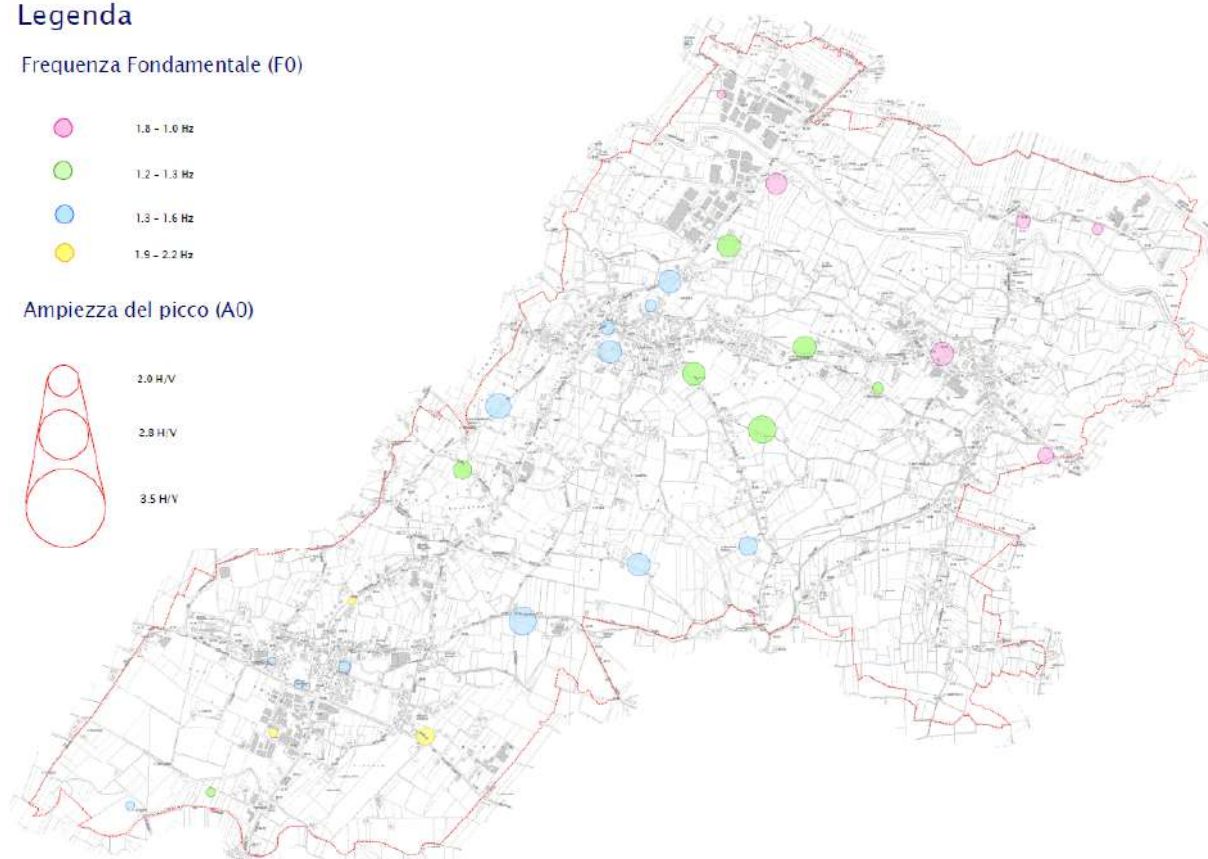
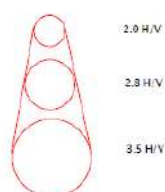
I risultati delle analisi sono stati cartografati, come visibile nell'estratto della "Carta delle frequenze" di seguito riportato, tramite dei cerchi di diverso colore in base ai valori di frequenza F_0 (4 classi) e con un diametro proporzionale all'ampiezza del picco.

Legenda

Frequenza Fondamentale (F0)



Ampiezza del picco (A0)



Osservando la “Carta delle frequenze”, realizzata tramite le misure di rumore ambientale a stazione singola eseguite per il presente studio, è possibile formulare alcune interessanti osservazioni:

- il comune di Vazzola presenta frequenze di risonanza, in generale, caratterizzate da rapporti H/V non superiore a 3,5;
- la frequenza predominante è localizzata alle medio-basse frequenze, ad un valore compreso tra 0,8 Hz e 1,6 Hz;
- si può osservare una distribuzione piuttosto omogenea delle frequenze fondamentali su tutto il territorio comunale che ricalca le tre aree distinte nelle precedenti cartografie: nella porzione settentrionale del territorio sono presenti picchi H/V con frequenze minori di 1 Hz (cerchi rosa) che passano gradualmente a frequenze via via più elevate procedendo verso sud (cerchi verdi e blu). Infine, a sud del comune, la più alta rigidità dei depositi è confermata dalla presenza di picchi H/V con ampiezza di circa 2 e frequenze maggiori di 1,6 HZ (cerchi gialli).

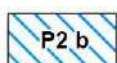
7.5 Carta della pericolosità sismica locale (CPSL)

Le Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica prevedono la realizzazione della “Carta di pericolosità sismica locale” (CPSL), nella quale vengono indicate le maggiori criticità del territorio e individuate le aree che richiedono approfondimenti per particolari tematiche e/o assetti stratigrafici-tettonici complessi. Nel territorio comunale è stato assegnato uno scenario di pericolosità sismica locale come riportato nella seguente descrizione:

Legenda

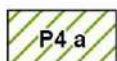
SCENARIO DI PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE

P2 : Zone suscettibili a liquefazione e cedimenti



Zona con depositi granulari fini saturi

P4 : Zone suscettibili ad amplificazioni litologiche e geometriche



Zona di fondovalle ampie e di pianura con depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi

In particolare, le zone CL e GM, associate ai depositi fini di tipo sabbioso e limoso argilloso e ai depositi ghiaiosi con abbondante matrice sabbiosa, sono suscettibili sia di amplificazione sismica (P4a) sia di instabilità per liquefazione (P2b) mentre la zona GW, correlata ai depositi prevalentemente granulari, è soggetta alla sola amplificazione stratigrafica (P4a), come illustrato nella tabella sotto riportata.

<i>Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica</i>	<i>Carta MOPS</i>	<i>Carta CPSL</i>
GW	2001	P4 a
GM	2002	P2 b P4 a
CL	2003	P2 b P4 a

Facendo riferimento alla tabella relativa alla procedura per la MS con i differenti livelli di approfondimento e per i differenti scenari di pericolosità sismica locale (fig. n.2 nelle Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica) si riscontra che **l'analisi di Livello 2 appare appropriata per il territorio comunale di Vazzola.**

Per confermare la reale applicabilità degli abachi nazionali da una parte e calcolare il valore di a_g dall'altra, indispensabile per determinare l'indice di liquefazione, sono state condotte delle **verifiche preliminari di Livello 3**, come descritto nei prossimi capitoli.

PROCEDURA DI MICROZONAZIONE SISMICA								
SIGLA	SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	Verifica di assoggettabilit�	(soglia)	1livello	(soglia)	2livello	(soglia)	3livello
P1a	Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi				cartografia			Analisi stabilit�
P1b	Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti				cartografia			Analisi stabilit�
P1c	Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana				cartografia	Analisi di stabilit�	Fs prossimo a 1	Analisi stabilit�
P2a	Zona con terreni di fondazione particolarmente scadenti quali depositi altamente compressibili, ecc.	zona 4 pga>0,100 zona 3 pga<0,100	pga di sito >0,125		raccolta dati - cartografia	ABITATI* PREV.URBAN.* Cedimenti Eventuale verifica	PREV.URBAN.*	Cedimenti
P2b	Zona con depositi granulari fini saturi	zona 4 pga>0,100 zona 3 pga<0,100	pga di sito >0,125		raccolta dati - cartografia	ABITATI* PREV.URBAN.* Liquefazione Eventuale verifica	PREV.URBAN.*	Liquefazione
P2c	Zona caratterizzata da coltri di terreno di riporto o che hanno subito riempimenti antropici	zona 4 pga>0,100 zona 3 pga<0,100	pga di sito >0,125		raccolta dati - cartografia	ABITATI* PREV.URBAN.* Cedimenti	PREV.URBAN.*	Cedimenti
P3a	Linea di ciglio H>10 m (scarpata, bordo di cava, nicchia di cava, orlo di terrazza fluviale o di natura antropica, ecc...)				H=10 m, a>15°	Effetti topografici		
P3b	Zona di cresta e/o cocuzzolo: appuntita - arrotondata				h=1/3H; a e a2>15°	Effetti topografici		
P4a	Zona di fondovalle ampie e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvo-glaciali granulari e/o coesivi				Vs30<800m/s; C>0,25	Effetti litologici	h/l>0,65/√Cv-1	Effetti lito-geometrici
P4b	Zona di fondovalle stretta (C<0,25) od in presenza di forme geometriche sepolte tali da non permettere di considerare il modello geologico monodimensionale				Vs30<800m/s; C>0,25			Effetti lito-geometrici
P4c	Zona pedemontana di falda di detrito, conoidi alluvionale e conoidi deltizio-lacustre				Vs30<800m/s	Effetti litologici		
P4d	Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (compresi le coltri loessiche)				Vs30<800m/s	Effetti litologici		
P4e	Zona con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale				Vs30<800m/s	Effetti litologici		
P5a	Linea di contatto stratigrafico e/o tettonico tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse				cartografia	Comportamenti differenziali		
P5b	Zona ove sono presenti o potenzialmente presenti cavit� sotterranee o sinkhole				cartografia			Comportamenti differenziali

8. VERIFICHE PRELIMINARI DI LIVELLO 3

Come illustrato nelle pagine precedenti, il comune di Vazzola si presta ad un'analisi di Livello 2 poiché l'assetto tettonico e stratigrafico locale si presenta sostanzialmente monodimensionale.

Comunque, per garantire la reale applicabilità degli abachi nazionali e **scegliere quello più appropriato al contesto stratigrafico locale**, sono state condotte alcune modellazioni di risposta sismica locale (RSL) nei diversi ambiti del territorio comunale. In particolare, la prima modellazione è stata effettuata in corrispondenza della zona 2001 caratterizzata da depositi ghiaiosi sabbiosi con scarsa matrice. La seconda modellazione, è stata condotta nell'ambito CLfg-Zona 2003, caratterizzata da contrasti di rigidità abbastanza elevati e da materiali particolarmente coesivi.

La tecnica di risoluzione numerica adoperata è quella alle differenze finite (FDM) implementata nel codice di calcolo FLAC 8.0 (Itasca, 2016), operante nel dominio del tempo. Il codice effettua un'analisi lagrangiana del continuo risolto mediante uno schema di avanzamento temporale di tipo esplicito.

In particolare, la quantificazione numerica degli effetti sarà rappresentata dal fattore di amplificazione FA (fattore di amplificazione a basso periodo in termini di accelerazione nell'intervallo 0.1-0,5s).

8.1 Descrizione del metodo

Il codice di calcolo FLAC 2D v.8.0 (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) della Itasca (2016) è basato sul metodo delle differenze finite con un procedimento di tipo esplicito. La flessibilità nella modellazione della geometria del problema, la disponibilità di elementi strutturali, l'elevato numero di modelli costitutivi implementati e la possibilità di svilupparne anche di nuovi, rendono FLAC idoneo allo studio di tutti i problemi riguardanti il comportamento meccanico di mezzi continui (terreni, rocce, ecc.) e di strutture interagenti. Sviluppato inizialmente per le applicazioni di ingegneria geotecnica e ingegneria mineraria in campo statico, esso ha trovato successivamente, con l'introduzione del modulo dinamico, largo impiego anche per la soluzione di problemi di risposta sismica locale. Il codice di calcolo FLAC, anche per i problemi in campo statico, risolve le equazioni di equilibrio dinamico di un mezzo continuo:

$$\rho \cdot \frac{\partial u_i}{\partial t} = \sum_j \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (8.1)$$

dove:

- ρ è la densità
- x_j la componente i - esima del vettore posizione
- u_i la componente i - esima del vettore velocità
- g_i la componente dell'accelerazione di gravità (forze di volume) lungo la direzione i
- τ_{ji} la generica componente del tensore degli sforzi.

Il comportamento meccanico dei materiali è espresso dalla legge costitutiva:

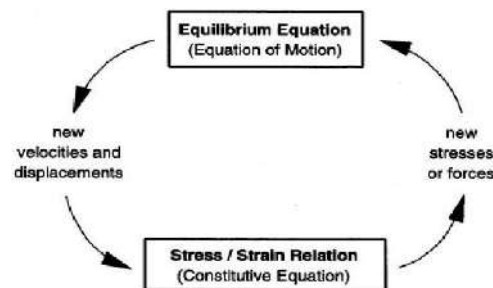
$$\tau_{ji} = M(\tau_{ji}; \dot{\epsilon}_{ij}; k) \quad (8.2)$$

dove k è un parametro che tiene conto della storia di carico, M un funzionale ed $\dot{\epsilon}_{ij}$ il tensore velocità di deformazione espresso dalla:

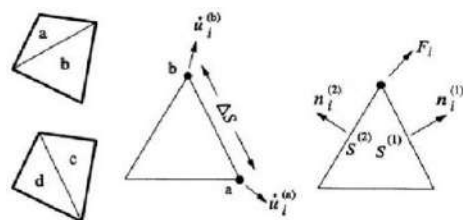
$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (8.3)$$

I materiali vengono rappresentati da elementi quadrilateri, o zone, che formano una griglia (*mesh*) che può essere configurata dall'utente in modo da modellare contatti stratigrafici e morfologie superficiali, anche complesse e irregolari. A ciascuna zona si assegnano le proprietà fisiche e meccaniche che ne caratterizzano il comportamento nell'analisi. I vertici di ogni zona costituiscono i nodi della griglia.

I metodi alle differenze finite come quelli agli elementi finiti traducono un sistema di equazioni differenziali come la (8.1) in un sistema di equazioni algebriche. Se i metodi agli elementi finiti hanno come punto centrale la definizione delle funzioni di forma, che descrivono la variazione delle grandezze che interessano il problema (tensioni, deformazioni) attraverso ciascun elemento, nei metodi alle differenze finite si prescinde da questa definizione della funzione di forma, e le equazioni algebriche vengono scritte direttamente in termini di variabili di campo (tensioni, spostamenti) definite nei nodi della *mesh*. In sintesi, l'algoritmo risolutivo dell'approccio esplicito si articola secondo il ciclo indicato nella seguente figura.



Ad ogni nuovo passo di calcolo (*step*), vengono risolte le equazioni di equilibrio dinamico, per cui dalle tensioni e dalle forze si ottengono i valori corrispondenti delle velocità di deformazione e degli spostamenti; successivamente, dalle velocità di deformazione e attraverso le equazioni dei legami costitutivi, si giunge a valori aggiornati delle tensioni. L'ipotesi base dell'approccio esplicito consiste nel fatto che, durante ciascuna fase, le grandezze vengono ricavate da altre grandezze i cui valori sono assunti costanti durante l'operazione. Ad esempio, attraverso le leggi costitutive, i valori delle velocità di deformazione sono considerati fissi durante l'operazione di calcolo delle tensioni: in altre parole, i nuovi valori calcolati delle tensioni non influenzano le velocità. Questo può apparire poco accettabile dal punto di vista fisico, poiché se c'è una variazione di tensione in un punto, questa necessariamente influenza i punti vicini alterandone le velocità di deformazione. Tuttavia, se l'intervallo di tempo Δt (*timestep*) corrispondente al singolo ciclo di calcolo è sufficientemente piccolo, tale alterazione non può propagarsi da un elemento all'altro in tale intervallo.



Tale approccio si è dimostrato particolarmente efficiente nella modellazione di problemi non lineari in presenza di grandi deformazioni. Per contro, essendo il Δt richiesto generalmente molto piccolo, sono necessari un gran numero di passi di integrazione cui corrispondono tempi di calcolo molto elevati.

Gli elementi quadrangolari della griglia vengono automaticamente suddivisi dal programma in due set sovrapposti di triangoli a deformazioni costanti.

Le equazioni alle differenze finite per ogni triangolo si ottengono dalla forma generalizzata del teorema della divergenza di Gauss:

$$\int_S \mathbf{f} \cdot \hat{\mathbf{n}} \cdot d\mathbf{s} = \int_A \text{div } \mathbf{f} \cdot dA \quad (8.4)$$

in cui:

- $\hat{\mathbf{n}}$ è il versore normale al contorno S del dominio triangolare
- \mathbf{f} la funzione generica (scalare, vettore o tensore)
- A la superficie del dominio triangolare di contorno S
- $d\mathbf{s}$ la lunghezza incrementale lungo il contorno S .

Sostituendo ad \mathbf{f} un valore medio del vettore velocità, la relazione precedente consente di scrivere:

$$\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_i} \cong \frac{1}{2A} \sum_s \left(\dot{u}_i^{(a)} + \dot{u}_i^{(b)} \right) n_j \Delta s \quad (8.5)$$

dove (a) e (b) sono due nodi consecutivi sul generico lato del triangolo. Attraverso la (8.3) e la (8.5) è, quindi, possibile calcolare tutte le componenti del tensore velocità di deformazione. La legge costitutiva è poi utilizzata per calcolare un nuovo valore del tensore delle tensioni. Calcolate le tensioni, vengono calcolate le forze equivalenti applicate ai nodi. Le tensioni agiscono in ciascun triangolo come trazioni sui lati del triangolo stesso; ogni trazione è considerata equivalente a due forze agenti sui due nodi all'estremità del lato. Su ogni nodo del triangolo agiscono, quindi, due forze relative ai due lati convergenti nel nodo stesso:

$$\mathbf{F}_i = \frac{1}{2} \tau_{ji} \left(\mathbf{n}_i^{(1)} S^{(1)} + \mathbf{n}_i^{(2)} S^{(2)} \right) \quad (8.6)$$

Infine, per ciascun nodo vengono sommate tutte le forze dovute ai triangoli convergenti nel nodo stesso, le forze dovute a eventuali carichi esterni applicati e le forze di volume dovute alla gravità. In tal modo viene determinata la forza nodale netta $\Sigma \mathbf{F}_i$; se $\Sigma \mathbf{F}_i = 0$, il nodo è in equilibrio, altrimenti subirà un'accelerazione espressa dalla seconda legge di Newton, nient'altro che la (8.1) espressa in termini incrementali:

$$\dot{u}_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \left[\sum \mathbf{F}_i^{(t)} \right] \frac{\Delta t}{m} \quad (8.7)$$

dove l'apice indica il tempo in corrispondenza del quale è valutata la variabile e m è la massa associata a ciascun nodo pari alla somma di un terzo delle masse dei triangoli convergenti nel nodo. Dalla relazione precedente si determinano nuovi valori della velocità e, quindi, del tensore velocità di deformazione per un nuovo ciclo.

Come detto, condizione essenziale dell'algoritmo descritto è che il *time step* Δt , corrispondente al singolo ciclo di calcolo, sia sufficientemente piccolo da rendere accettabile l'approssimazione di tensioni e velocità costanti sul singolo *step* di calcolo. In particolare, Δt deve essere inferiore ad un *time step* critico Δt_{cr} definito dalla:

$$\Delta t_{cr} = \min \left\{ \frac{A}{V_p \Delta x_{max}} \right\} \quad (8.8)$$

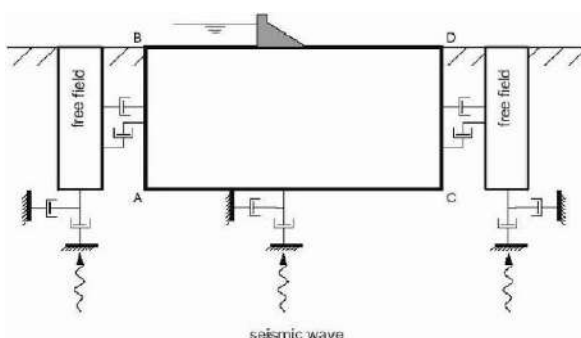
dove A è la superficie del subelemento triangolare, Δx_{max} la dimensione massima della zona (in genere la diagonale) e V_p la velocità delle onde di compressione. La funzione minimo è presa su tutte le zone. Il *timestep* critico è tanto più piccolo (e i tempi di calcolo quindi tanto più elevati)

quanto più la rigidità del materiale è elevata e quanto più piccolo è l'elemento. Il Δt di calcolo viene determinato internamente da FLAC, applicando un coefficiente di sicurezza pari a 2 al valore fornito dalla (8.8). Particolare attenzione va posta nella scelta delle dimensioni degli elementi della *mesh*, in quanto queste condizionano in maniera fondamentale l'accuratezza numerica della trasmissione delle onde. In particolare, per un'accurata modellazione viene consigliato di scegliere una altezza degli elementi h almeno pari ad un valore compreso tra un decimo e un ottavo della minima lunghezza d'onda di interesse λ_{\min} :

$$h \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} \quad (8.9)$$

La λ_{\min} è la lunghezza d'onda che corrisponde alla massima frequenza di interesse ed è legata ad essa dalla velocità di propagazione delle onde di taglio. I metodi alle differenze finite, così come quelli agli elementi finiti, si basano sulla discretizzazione, tramite una *mesh* di nodi, di una porzione finita dello spazio, per cui appropriate condizioni al contorno vanno imposte ai confini artificiali di tale regione. In ogni problema di propagazione di onde sismiche, parte dell'energia si allontana indefinitamente dalla regione di interesse verso il semispazio circostante per fenomeni di diffrazione e riflessione, dando luogo ad una perdita di energia indicata come *smorzamento di radiazione*. Al fine di modellare correttamente questo fenomeno, FLAC consente di minimizzare la riflessione delle onde sui contorni della *mesh*, imponendo su questi condizioni di campo libero (*free field boundaries*) o viscosi (*quiet boundaries*). La definizione delle condizioni al contorno è strettamente correlata all'applicazione della sollecitazione dinamica, come discusso in seguito.

I contorni *free-field* consistono sostanzialmente in colonne monodimensionali di larghezza unitaria, situate ai lati del modello, che simulano il comportamento di un mezzo infinitamente esteso (figura seguente).



In pratica, essi riproducono il moto libero del terreno che si avrebbe in assenza della configurazione bidimensionale e allo stesso tempo impediscono la riflessione ai bordi della *mesh* delle onde diffratte verso l'esterno. Come illustrato, i singoli nodi dei contorni laterali della griglia principale vengono accoppiati alla griglia *free-field* attraverso smorzatori viscosi che materialmente assorbono l'energia delle onde incidenti sui contorni, applicando delle forze viscosi proporzionali alla differenza tra il campo di velocità esistente al bordo e quello in condizioni *free-field*. Prima dell'applicazione delle condizioni *free-field* durante l'analisi dinamica, il modello deve essere in condizioni di equilibrio statico, per cui è necessario eseguire una analisi statica preliminare per determinare lo stato tensionale e deformativo all'interno del modello. All'atto dell'applicazione delle condizioni *free-field*, tutte le variabili di stato determinate dall'equilibrio statico vengono quindi applicate alle colonne monodimensionali ai bordi del modello.

I contorni *free-field* sono di notevole utilità, in quanto consentono di evitare l'allontanamento dei confini laterali, altrimenti necessario in assenza di confini assorbenti, per la minimizzazione delle onde riflesse dai contorni.

I contorni *quiet* sono invece costituiti, secondo la formulazione di Lysmer e Kuhlemeyer (1969), da smorzatori viscosi attaccati alla griglia e agenti in direzione normale e tangenziale al contorno stesso; essi consentono un pressoché completo assorbimento delle onde di volume che incidono sul

contorno. I contorni *quiet* possono essere applicati su contorni verticali, orizzontali o inclinati. Essi vanno applicati al confine inferiore della *mesh* per simulare la base elastica, mentre ai bordi del modello, come detto, è preferibile l'utilizzo dei contorni *free-field*.

Le sollecitazioni dinamiche possono essere applicate sia ai bordi della *mesh* sia ai suoi nodi interni in una delle seguenti forme:

- storia temporale di accelerazioni;
- storia temporale di velocità;
- storia temporale di tensioni;
- storia temporale di forze.

Nell'applicare la sollecitazione dinamica, bisogna però tenere conto di alcune limitazioni che derivano da particolari incompatibilità tra forme di applicazione dell'input e delle condizioni al contorno. Se, ad esempio, queste sono rappresentate da *quiet boundaries* (come avviene solitamente per il bordo inferiore della *mesh*), il loro effetto viene annullato se si applica un accelerogramma o una storia di velocità.

Quindi, in questo caso, la base è modellata come rigida, cioè perfettamente riflettente, dando luogo a irrealistiche sovrastime del moto sismico. Per simulare correttamente una base elastica occorre applicare ai *quiet boundaries*, alla base della *mesh*, una storia temporale di tensioni. A tal fine, un accelerogramma di input deve essere integrato per ottenere una storia temporale di velocità e questa viene infine convertita in tensioni tramite le seguenti relazioni:

$$\sigma_n = 2(\rho V_P) v_n \quad \sigma_s = 2(\rho V_S) v_s \quad (8.10)$$

dove:

- ρ è la densità;
- σ_n , σ_s rispettivamente tensione applicata in direzione normale e tangenziale al contorno;
- V_P , V_S rispettivamente velocità delle onde di compressione e di taglio del materiale che viene simulato al di sotto del contorno inferiore (costituente la base elastica);
- v_n , v_s rispettivamente la velocità di input normale e tangente al contorno.

In definitiva, un input costituito da onde S sarà quindi applicato come una storia temporale di tensioni tangenziali, mentre le onde P tramite una storia temporale di tensioni normali al contorno. Entrambe le sollecitazioni sono applicate con incidenza verticale.

La non linearità e le proprietà dissipative dei terreni possono essere modellate in FLAC secondo differenti modalità: attraverso l'adozione di un legame costitutivo propriamente non lineare o, a partire dalla versione 5.0 (Itasca, 2005), tramite semplici modelli di *smorzamento isteretico*. Le proprietà dissipative possono altresì essere modellate attraverso la formulazione di Rayleigh.

L'adozione di una legge sforzi-deformazione non lineare rappresenta, teoricamente, il modo più efficace per tenere conto della degradazione di rigidità al procedere della deformazione e della dissipazione di energia per isteresi. Questi modelli possono essere accoppiati con modelli di filtrazione per simulare la generazione e dissipazione di eccessi di pressioni neutre e/o fenomeni di liquefazione e consentono, inoltre, la valutazione delle deformazioni permanenti. Però, dal punto di vista pratico, i modelli non lineari sono spesso complessi e richiedono la definizione di molti parametri e lunghi processi di calibrazione.

La complessità dei modelli non lineari e la comodità di un utilizzo diretto delle curve di tipo G / G0 e D / D0, generalmente fornite dalle prove di laboratorio e dalle correlazioni empiriche, ha portato all'introduzione di semplici modelli di *smorzamento isteretico* (*hysteretic damping*) nella recente versione 5.0 del codice.

Durante ciascuno *step* di calcolo, in funzione del valore medio del tensore di velocità di deformazione, viene restituito un fattore moltiplicativo da usarsi nel legame costitutivo, in modo da correggere il valore del modulo tangente di taglio associato a ciascun elemento. Il modello isteretico implementato utilizza solo curve continue che esprimono la variazione del modulo di taglio con la deformazione tangenziale; pertanto, i parametri da fornire in input che definiscono la forma di tali curve vanno ricavati attraverso regressione dei dati sperimentali. Analisi di calibrazione dello smorzamento isteretico sono necessarie prima di un suo uso nella pratica corrente.

Nel caso di analisi lineari, o per modellare comunque lo smorzamento a basse deformazioni che spesso i legami costitutivi non lineari non riescono a cogliere, si può utilizzare la formulazione di Rayleigh. Essa conduce ad uno smorzamento dipendente dalla frequenza, in contrasto con le evidenze sperimentali sul comportamento dei terreni. Il suo impiego richiede, pertanto, una oculata scelta dei parametri che lo definiscono, per limitare la variazione dello smorzamento con la frequenza (Lanzo et al., 2003 e 2004). Lo smorzamento di Rayleigh è stato originariamente formulato per le analisi strutturali ed è espresso in forma matriciale attraverso la definizione di una matrice di smorzamento \mathbf{C} proporzionale alla matrice di massa \mathbf{M} e a quella di rigidità \mathbf{K} :

$$\mathbf{C} = \alpha_R \mathbf{M} + \beta_R \mathbf{K} \quad (8.11)$$

dove α_R e β_R sono i coefficienti di Rayleigh che hanno dimensione rispettivamente di s^{-1} e s . È possibile dimostrare (Chopra, 1995) che lo smorzamento ξ_j associato al j -esimo modo di vibrazione del deposito è espresso dalla:

$$\xi_j = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_R}{\omega_j} + \beta_R \omega_j \right) \quad (8.12)$$

dove ω_j è la frequenza circolare relativa al modo j .

I coefficienti di Rayleigh vengono comunemente determinati attraverso due procedure, a seconda che si fissi il valore dello smorzamento modale in corrispondenza di una o due frequenze naturali opportunamente selezionate (dette frequenze di controllo). Il codice FLAC adotta la prima procedura in accordo alla quale i coefficienti di Rayleigh sono espressi dalle:

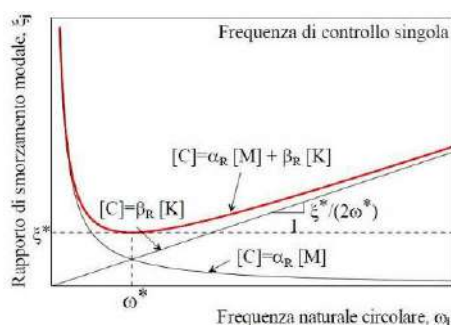
$$\alpha_R = \xi^* \omega^* \quad , \quad \beta_R = \frac{\xi^*}{\omega^*} \quad (8.13)$$

avendo fissato lo smorzamento modale al valore ξ in corrispondenza della singola frequenza ω .

Per ciascun elemento della *mesh* occorre specificare il rapporto di smorzamento ξ^* del materiale e la frequenza ω^* . A titolo di esempio, nel caso di smorzamento ξ^* e frequenza ω^* costante per tutto il deposito, è possibile dimostrare che un'analisi lineare eseguita con FLAC fornisce gli stessi risultati di un'analisi modale, con rapporto di smorzamento modale dell'intero sistema variabile con la frequenza circolare naturale ω_j secondo la:

$$\xi_j = \frac{\xi^*}{2} \left(\frac{\omega^*}{\omega_j} + \frac{\omega_j}{\omega^*} \right) \quad (8.14)$$

riportata nella figura seguente, nella quale si nota come ξ_j assuma un minimo (pari al valore imposto ξ^*) in corrispondenza della frequenza di controllo ω^* , mentre sia sovrastimato nel campo dei valori maggiori e minori di ω^* .



La formulazione di Rayleigh viene applicata a livello del singolo elemento della *mesh* per cui, tra i dati di input, occorre specificare per ciascun elemento il valore del rapporto di smorzamento del materiale che lo costituisce ξ^* e la frequenza di controllo ω^* (o meglio il valore f^*). La scelta di f^* è cruciale per fissare il campo di frequenza in corrispondenza del quale lo smorzamento mostra variazioni contenute rispetto a ξ^* .

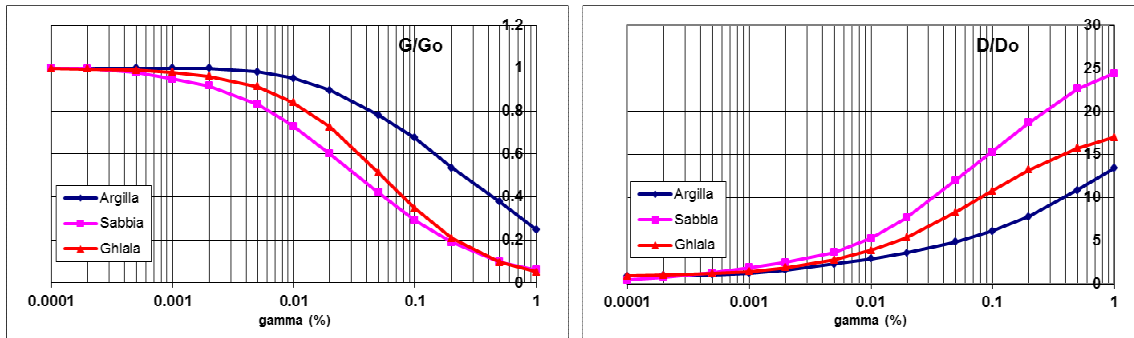
In generale, f^* deve essere scelta nel campo di frequenza significativo per il problema in esame sia in termini di frequenze naturali del sistema che di frequenze predominanti dell'input. In prima approssimazione, si può collocare f^* tra la frequenza fondamentale del sistema e la frequenza predominante dell'input (frequenza corrispondente al massimo dello spettro di Fourier o di risposta). Se questi valori sono distanti è comunque opportuno esaminare con analisi parametriche l'influenza sui risultati delle diverse scelte di f^* . In definitiva, per ciascun materiale occorre fornire i seguenti parametri di input:

- peso dell'unità di volume;
- nel caso di analisi lineari modulo di taglio (G_0) e di elasticità volumetrico (k), o, in alternativa modulo di Young (E) e coefficiente di Poisson (ν);
- nel caso di analisi non lineari occorre fornire i parametri caratteristici del modello adottato;
- rapporto di smorzamento (ξ^*) e frequenza di controllo (f^*) se si adotta la formulazione di Rayleigh.

Il codice offre notevoli potenzialità di dati in output, potendo restituire la storia temporale di tutte le grandezze di interesse: spostamenti, velocità, accelerazioni, deformazioni e tensioni. L'interfaccia grafica consente, inoltre, di costruire ed esportare i grafici delle sopraccitate grandezze, in funzione della profondità o lungo un generico profilo.

8.2 Analisi numeriche condotte

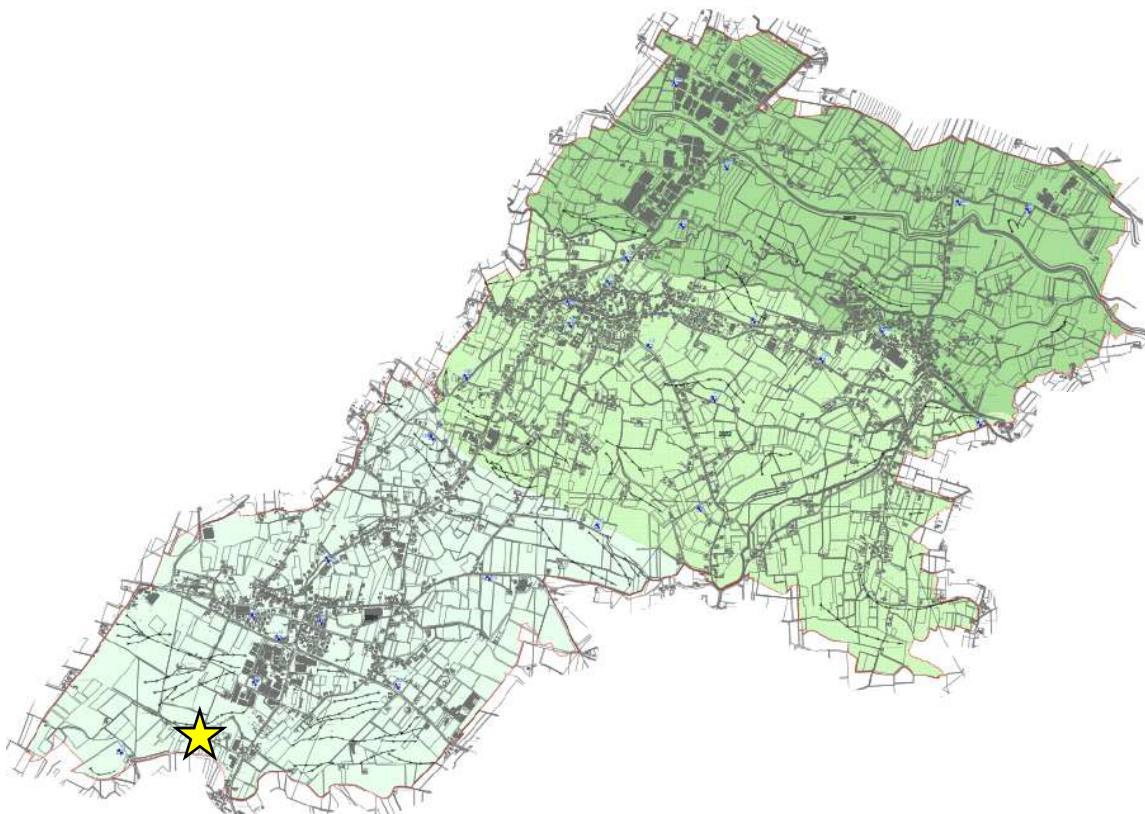
Per quantificare l'azione sismica in superficie e individuare l'abaco da utilizzare nella stima dei fattori di amplificazione $FA - FV$, in funzione dell'assetto stratigrafico locale, sono state ricostruite delle sismo-stratigrafie del sottosuolo sulle quali sono state successivamente condotte le modellazioni numeriche. Le sismostratigrafie e i valori di rigidità utilizzati sono quelli ottenuti dalle indagini sismiche eseguite appositamente e precedentemente descritte. Lungo le frontiere laterali dei modelli sono stati introdotti particolari elementi assorbenti (*free-field boundaries*) che, oltre ad evitare la riflessione delle onde in maniera analoga agli smorzatori viscosi introdotti da Lysmer e Kuhlemeyer (1969), forzano i nodi delle frontiere laterali a riprodurre il moto di *free-field*, essenziale per le analisi di risposta sismica locale bidimensionale (1D). Per limitare la riflessione delle onde in corrispondenza della frontiera inferiore del modello, sono stati utilizzati degli smorzatori viscosi (*quiet boundaries*), mentre le proprietà dissipative dei materiali sono state ottenute attraverso la formulazione di Rayleigh per quanto riguarda il *bedrock geofisico* (smorzamento 0,02%); per i materiali di copertura è stato utilizzato lo *smorzamento isteretico* tramite le curve G/G_0 e D/D_0 indicate negli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica e sotto riportate.

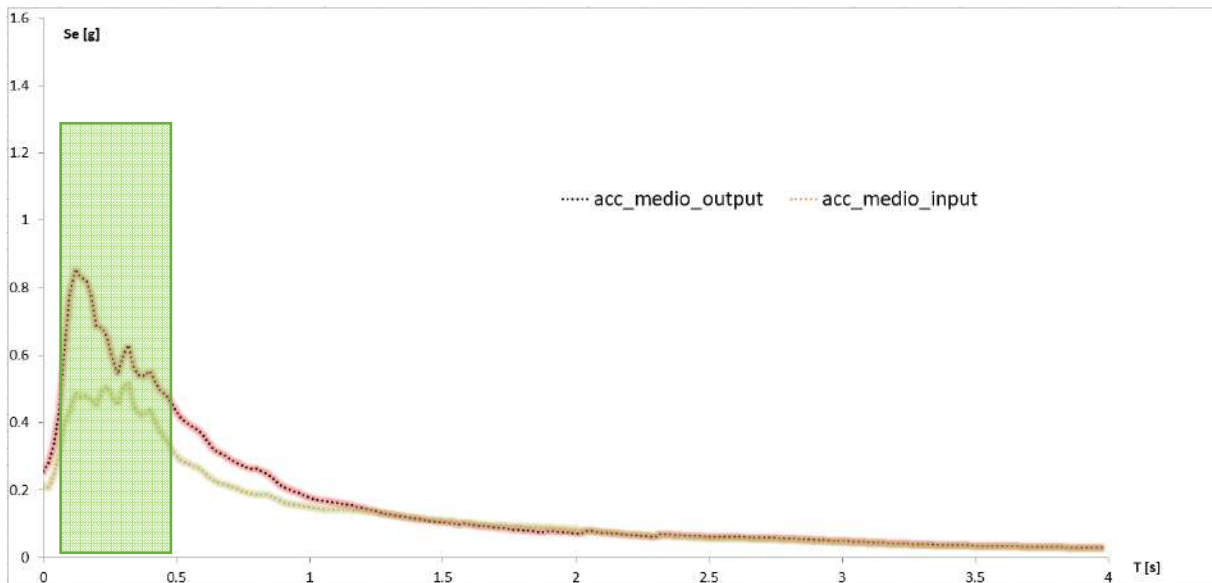
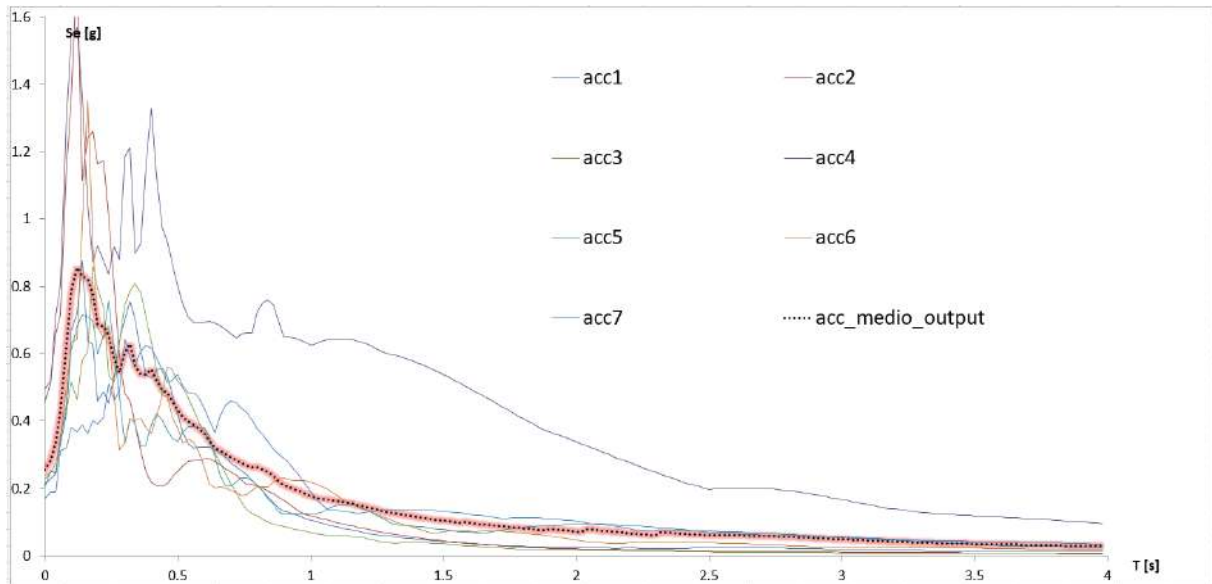
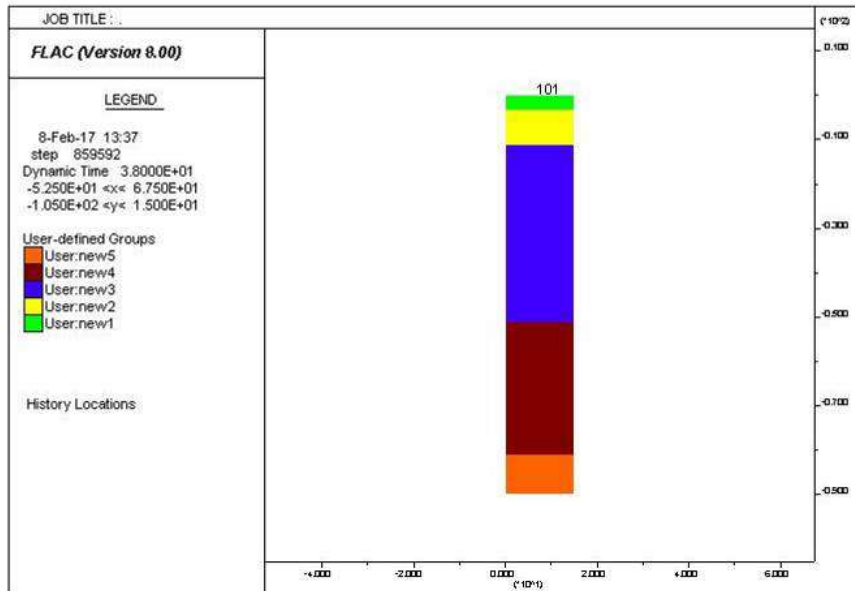


Nel rispetto della normativa vigente - D.M. 14/01/2008 - è stata assunta una severità dell'azione sismica con la probabilità di superamento (P) e con il periodo di ritorno (T_r) relativi allo stato limite considerato. In particolare, è stata considerata una vita nominale della costruzione (V_n) di 50 anni, un coefficiente d'uso (C_u) pari a II e quindi una vita di riferimento $V_r = 50$ anni. A partire da queste indicazioni, si è determinato un periodo di ritorno dell'azione sismica di 475 anni corrispondente ad una probabilità di superamento del 10% allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV).

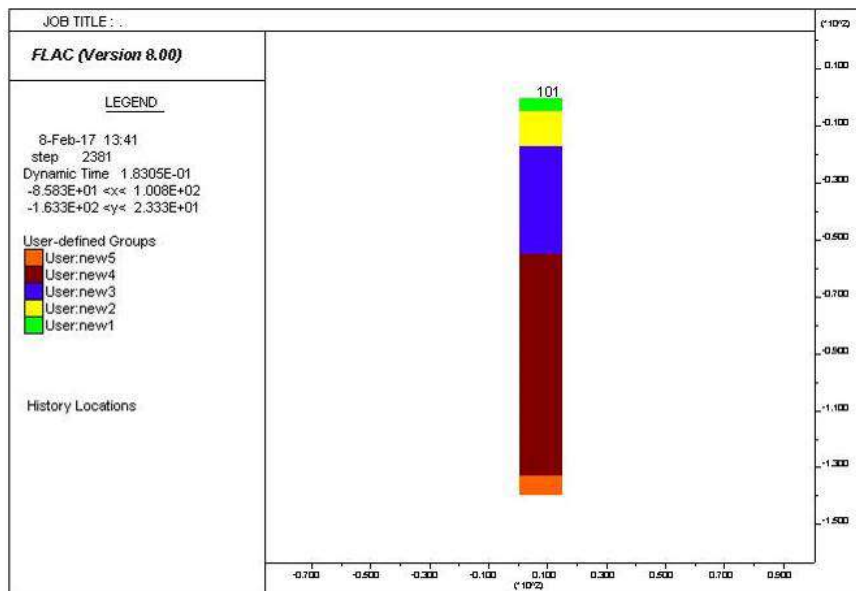
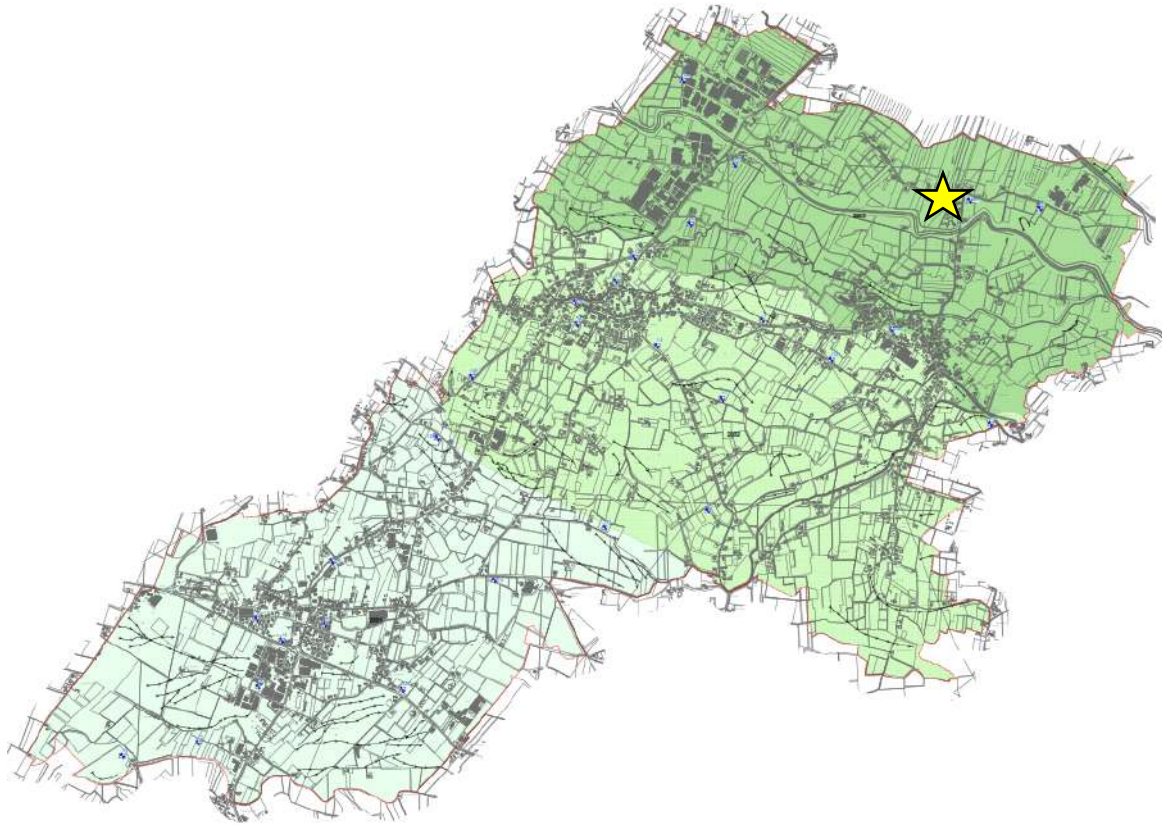
L'*input* sismico utilizzato è rappresentato da una settupla di storie accelerometriche applicate alla base del modello e riferite agli spettri di normativa calcolati per il sito in esame, considerando un sottosuolo di roccia affiorante (classe A) con topografia orizzontale (T1) e correttamente deconvoluto (v. *Dynamic Analysis* della Itasca, 2016). In particolare, gli accelerogrammi sono stati ricavati tramite l'utilizzo del software REXEL - *computer aided record selection for code - based seismic structural analysis*. Le *history* (storia temporale) ricavate al tetto del modello (per ogni *input* sismico applicato) rappresentano le storie accelerometriche orizzontali attese nel sito d'indagine: ogni *history* è stata successivamente plottata in uno spettro di risposta elastico e mediata in una curva rappresentativa. Infine, per calcolare il fattore di amplificazione FA si è confrontato lo spettro medio in ingresso con quello in uscita calcolando il rapporto dell'intensità di Housner per un periodo T compreso tra 0,1s e 0,5s poiché, in tale intervallo, si ha la massima risposta in accelerazione.

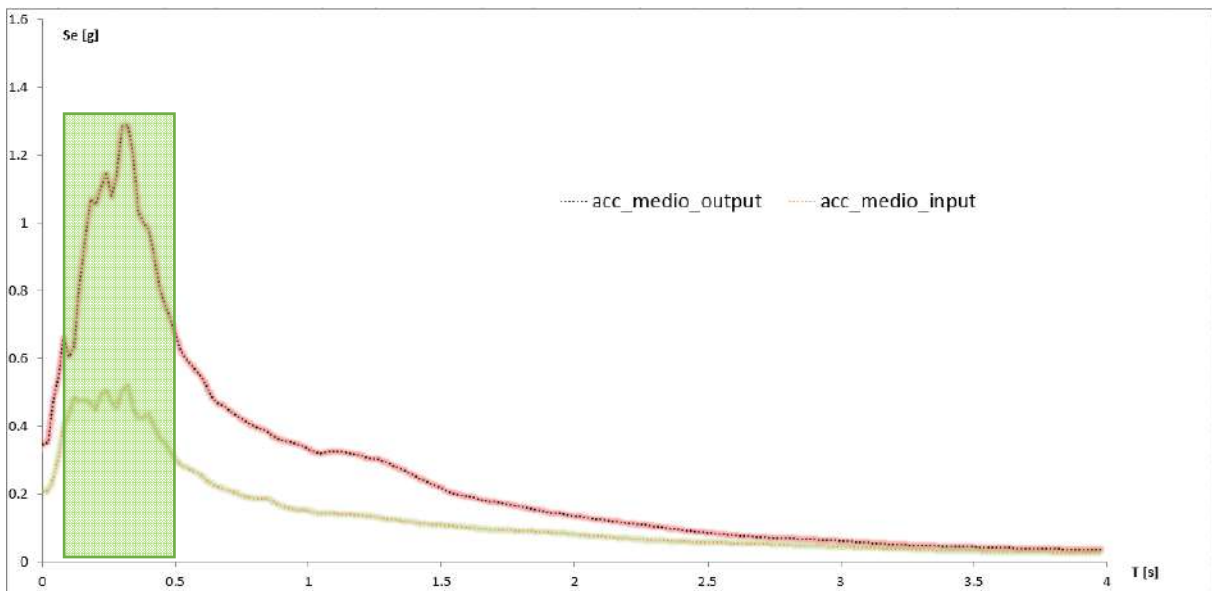
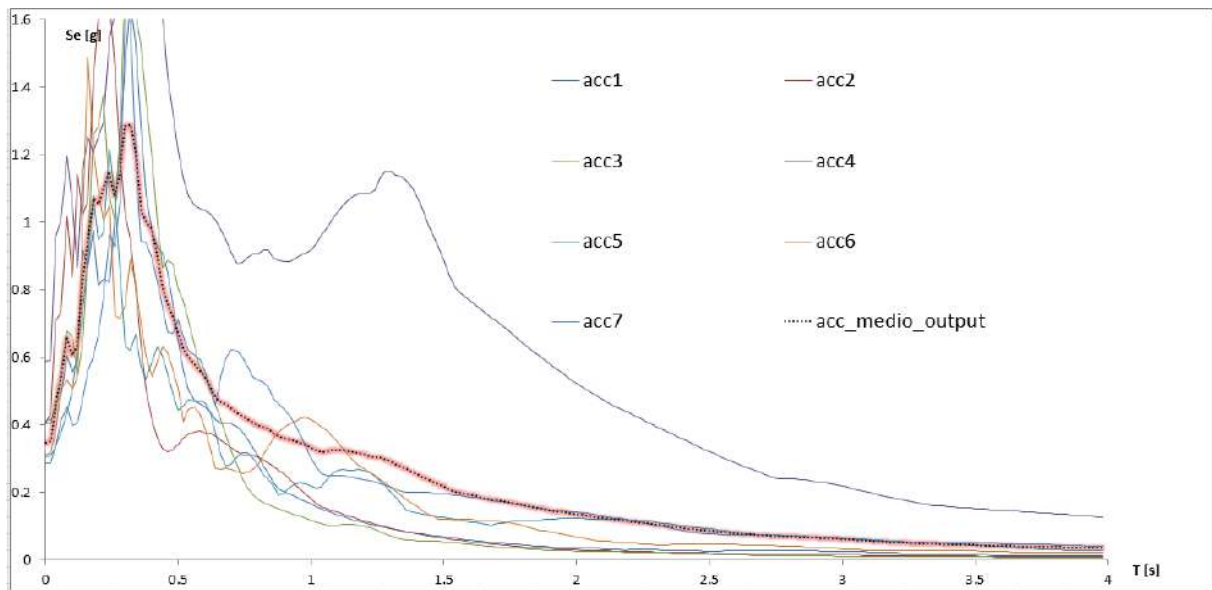
MODELLAZIONE ZONA 2001 GW - Re.Mi. 29 (A29) + H.V.S.R. 29 (T29)





Il fattore di amplificazione FA è risultato di 1,22





Il fattore di amplificazione FA è risultato di 1,92

9. CARTA DI MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 2 - STIMA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE FA - FV

L'obiettivo del Livello 2 di approfondimento è di compensare le incertezze del Livello 1 con approfondimenti conoscitivi e fornire quantificazioni numeriche, con metodi semplificati (abachi e leggi empiriche), della modificazione locale del moto sismico in superficie e dei fenomeni di deformazione permanente.

In particolare, la quantificazione numerica degli effetti sarà rappresentata dai fattori amplificativi FA (fattore di amplificazione in termini di accelerazione) e FV (fattore di amplificazione in termini di velocità), calcolati tramite procedura semplificata. Il primo corrisponde al fattore di amplificazione determinato intorno al periodo proprio per il quale si ha il massimo della risposta in accelerazione mentre il secondo corrisponde al fattore di amplificazione a periodo proprio per il quale si ha la massima risposta in velocità.

Al fine di quantificare il fattore di amplificazione è necessario assegnare alle varie zone una delle classi dei terreni di copertura sotto riportate.

CLASSE	DESCRIZIONE	informazioni
1	terreno di riporto antropico	
2	ghiaia	2a addensata 2b poco addensata
3	ghiaia/sabbiosa-sabbia/ghiaiosa	3a addensata 3b poco addensata
4	sabbia	4a addensata 4b poco addensata
5	Sabbia / limosa - limo/sabbioso	5a addensata 5b poco addensata
6	Limo	6a consistente 6b poco consistente
7	Limo / argilloso - argilla/limosa	7a consistente 7b poco consistente
8	Argilla	8a consistente 8b poco consistente
9	deposito alluvionale a granulometria mista	
10	detrito di versante a granulometria mista	
11	coltre di substrato alterato	

<i>Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica</i>	<i>Carta MOPS</i>	CLASSE
GW	2001	2b (Ghiaia poco addensata)
GM	2002	3b (Ghiaia sabbiosa poco addensata)
CL	2003	7b (Limo argilloso poco consistente)

Come riportato nelle linee guida regionali, l'adozione e l'utilizzo delle tabelle per la determinazione dei fattori amplificativi (FA e FV) predisposte dalla Protezione Civile e contenute negli Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica **devono considerarsi temporanee**, fino a quando la Regione Veneto si sarà dotata di specifici abachi regionalizzati.

I dati di ingresso per la scelta della tabella sono rappresentati dai seguenti elementi:

- la litologia prevalente nei terreni di copertura;
- la profondità del basamento sismico, ovvero la profondità dove si raggiungono velocità delle onde S superiori o uguali a 800 m/s (H);
- l'andamento della velocità delle onde di taglio con la profondità e la velocità media V_{SH} delle onde S nei terreni di copertura fino al basamento sismico. Questa sarà definita dalla seguente relazione:

$$V_{SH} \cong \frac{H}{\sum \frac{h_i}{V_{SI}}}$$

dove:

H è lo spessore totale (in metri) dei terreni di copertura fino al basamento sismico;

h_i è lo spessore (in metri) dell'*i*-mo degli *n* strati che costituiscono la copertura;

V_{SI} è la velocità (in m/s) dell'*i*-mo strato.

Le tabelle riportate nelle linee guida sono riferite a tre livelli di sismicità: 0,06g, 0,18g e 0,26g; sono ordinate per litotipo (argille, sabbie e ghiaie) e all'interno di ciascun litotipo, per tipologia di profilo di velocità assunto (costante, variabile con la massima pendenza e variabile con pendenza intermedia fra costante e massima). La scelta del tipo di profilo va operata sulla base delle conoscenze specifiche ottenute: in generale quando lo spessore di sottosuolo diventa considerevole (diverse decine di metri), è poco probabile che il profilo di velocità si mantenga costante, ed è quindi preferibile orientarsi verso le tabelle riferite al profilo variabile con pendenza intermedia. Si ricorda comunque che il profilo con pendenza massima fornisce generalmente risultati più cautelativi e può essere applicato quando sono effettivamente ipotizzabili gradienti molto accentuati con la profondità. I dati relativi a spessori H elevati (da 50 a 150 metri) sono stati inseriti per consentire il riferimento a situazioni in cui è prevedibile che le caratteristiche meccaniche di resistenza dei terreni siano gradualmente crescenti con la profondità, in assenza di evidenti contrasti di impedenza.

Nel caso in questione, i fattori di amplificazione sono stati ottenuti utilizzando i parametri di ingresso sotto riportati. La scelta del profilo di velocità e della litologia da considerare, è stata valutata alla luce dei risultati ottenuti dalle modellazioni numeriche sopra descritte, proprie del Livello 3 di approfondimento. Inoltre, le misure A2+T2, A8+T8, A12+T12, A15+T15, A18+T18 e A23+T23 non sono state utilizzate poiché non hanno individuato la profondità del *bedrock* sismico.

Re.Mi. 1 (A1) + H.V.S.R. 1 (T1)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,09
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 480 m/s	FV= 1,36
Prof. bedrock (m): 122 m	

Re.Mi. 3 (A3) + H.V.S.R. 3 (T3)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,09
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 466 m/s	FV= 1,41
Prof. bedrock (m): 131 m	

Re.Mi. 4 (A4) + H.V.S.R. 4 (T4)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,09
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 483 m/s	FV= 1,36
Prof. bedrock (m): 120 m	

Re.Mi. 5 (A5) + H.V.S.R. 5 (T5)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,29
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 413 m/s	FV= 1,69
Prof. bedrock (m): 81 m	

Re.Mi. 6 (A6) + H.V.S.R. 6 (T6)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,22
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 443 m/s	FV= 1,54
Prof. bedrock (m): 91 m	

Re.Mi. 7 (A7) + H.V.S.R. 7 (T7)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,29
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 430 m/s	FV= 1,61
Prof. bedrock (m): 63 m	

Re.Mi. 9 (A9) + H.V.S.R. 9 (T9)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,04
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 566 m/s	FV= 1,24
Prof. bedrock (m): 109 m	

Re.Mi. 10 (A10) + H.V.S.R. 10 (T10)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,19
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 437 m/s	FV= 1,50
Prof. bedrock (m): 99 m	

Re.Mi. 11 (A11) + H.V.S.R. 11 (T11)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,25
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 380 m/s	FV= 1,63
Prof. bedrock (m): 88 m	

Re.Mi. 13 (A13) + H.V.S.R. 13 (T13)	
Litologia: Argille	FA= 2,00
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza massima	
Vs eq (m/s): 340 m/s	FV= 2,50
Prof. bedrock (m): 101 m	

Re.Mi. 14 (A14) + H.V.S.R. 14 (T14)	
Litologia: Argille	FA= 2,00
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza massima	
Vs eq (m/s): 358 m/s	FV= 2,50
Prof. bedrock (m): 102 m	

Re.Mi. 16 (A16) + H.V.S.R. 16 (T16)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,19
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 437 m/s	FV= 1,50
Prof. bedrock (m): 102 m	

Re.Mi. 17 (A17) + H.V.S.R. 17 (T17)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,14
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 440 m/s	FV= 1,47
Prof. bedrock (m): 109 m	

Re.Mi. 19 (A19) + H.V.S.R. 19 (T19)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,24
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 369 m/s	FV= 1,75
Prof. bedrock (m): 88 m	

Re.Mi. 20 (A20) + H.V.S.R. 20 (T20)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,19
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 337 m/s	FV= 1,72
Prof. bedrock (m): 99 m	

Re.Mi. 21 (A21) + H.V.S.R. 21 (T21) <u>INDAGINI UTILIZZATE PER LIVELLO 3</u>	
Litologia: Argille	FA= 1,85 (FA = 1,92 da Livello 3)
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza massima	
Vs eq (m/s): 352 m/s	FV= 2,37
Prof. bedrock (m): 135 m	

Re.Mi. 22 (A22) + H.V.S.R. 22 (T22)	
Litologia: Argille	FA= 1,96
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza massima	
Vs eq (m/s): 344 m/s	FV= 2,47
Prof. bedrock (m): 1113 m	
Re.Mi. 24 (A24) + H.V.S.R. 24 (T24)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,17
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 402 m/s	FV= 1,56
Prof. bedrock (m): 110 m	
Re.Mi. 25 (A25) + H.V.S.R. 25 (T25)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,19
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 419 m/s	FV= 1,59
Prof. bedrock (m): 101 m	
Re.Mi. 26 (A26) + H.V.S.R. 26 (T26)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,17
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 507 m/s	FV= 1,45
Prof. bedrock (m): 90 m	
Re.Mi. 27 (A27) + H.V.S.R. 27 (T27)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,22
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 435 m/s	FV= 1,54
Prof. bedrock (m): 93 m	

Re.Mi. 28 (A28) + H.V.S.R. 28 (T28)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,15
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 488 m/s	FV= 1,41
Prof. bedrock (m): 105 m	

Re.Mi. 29 (A29) + H.V.S.R. 29 (T29) <u>INDAGINI UTILIZZATE PER LIVELLO 3</u>	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,19 (FA = 1,22 da Livello 3)
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 499 m/s	FV= 1,46
Prof. bedrock (m): 81 m	

Re.Mi. 30 (A30) + H.V.S.R. 30 (T30)	
Litologia: Ghiaie	FA= 1,13
Valore a _g (g): 0,18 g	
Sismo-stratigrafia: Lineare pendenza intermedia	
Vs eq (m/s): 478 m/s	FV= 1,38
Prof. bedrock (m): 106 m	

A titolo di esempio si riporta la procedura di calcolo per le misure sismiche A21+T21.

Fattore di amplificazione FA	Tipo di terreno Argilla	a _g (g) 0.18g										Profilo di velocità Lineare pendenza massima
		V _s (m/s)										
		150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	
H	5	2.61	2.36	1.75	1.34	1.17	1.09	1.05	1.03	1.02	1.01	
	10	3.29	2.93	2.57	2.10	1.77	1.49	1.32	1.19	1.07	1.02	
	15	3.31	3.28	3.00	2.44	1.95	1.65	1.43	1.29	1.12	1.04	
	20	2.89	3.29	3.23	2.72	2.36	1.81	1.56	1.40	1.16	1.06	
	25	2.87	3.23	3.36	2.82	2.25	1.92	1.66	1.47	1.22	1.08	
	30	-	3.17	3.32	2.89	2.34	1.96	1.70	1.51	1.25	1.09	
	35	-	3.09	3.27	2.84	2.35	1.98	1.73	1.54	1.27	1.09	
	40	-	3.01	3.22	2.87	2.31	2.00	1.74	1.54	1.28	1.10	
	50	-	2.81	3.13	2.76	2.20	1.96	1.71	1.55	1.28	1.09	
	60	-	2.66	2.99	2.68	2.22	1.89	1.69	1.51	1.26	1.09	
	70	-	2.42	2.86	2.61	2.16	1.86	1.64	1.47	1.25	1.07	
	80	-	2.35	2.73	2.51	2.11	1.82	1.61	1.44	1.22	1.06	
	90	-	2.17	2.59	2.43	2.06	1.79	1.58	1.43	1.20	1.05	
	100	-	2.04	2.47	2.36	2.00	1.75	1.56	1.41	1.19	1.04	
	110	-	1.92	2.36	2.27	1.96	1.71	1.53	1.39	1.18	1.02	
	120	-	1.85	2.23	2.19	1.91	1.67	1.50	1.37	1.16	1.02	
130	-	1.75	2.13	2.12	1.85	1.64	1.48	1.35	1.15	1.01		
140	-	1.66	2.05	2.05	1.80	1.61	1.45	1.33	1.14	1.00		
150	-	1.58	1.97	1.98	1.76	1.58	1.43	1.31	1.12	0.99		

Fattore di amplificazione **FV** Tipo di terreno **Argilla** a_g (g) **0.18g** Profilo di velocità **Lineare pendenza massima**

H	V _z (m/s)										
	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	
5	1.15	1.07	1.03	1.02	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	
10	2.30	1.30	1.14	1.09	1.06	1.04	1.03	1.02	1.01	1.00	
15	3.19	2.22	1.42	1.19	1.12	1.08	1.06	1.04	1.02	1.01	
20	3.71	2.83	2.09	1.46	1.22	1.14	1.10	1.07	1.03	1.01	
25	3.92	3.33	2.56	1.88	1.43	1.23	1.14	1.10	1.05	1.02	
30	-	3.60	2.90	2.18	1.67	1.37	1.21	1.15	1.07	1.02	
35	-	3.80	3.27	2.42	1.85	1.50	1.31	1.19	1.08	1.03	
40	-	3.82	3.45	2.69	2.00	1.62	1.40	1.26	1.11	1.04	
50	-	3.80	3.75	2.96	2.29	1.86	1.55	1.37	1.15	1.05	
60	-	3.67	3.76	3.17	2.45	1.96	1.66	1.45	1.19	1.06	
70	-	3.59	3.77	3.21	2.56	2.07	1.75	1.52	1.23	1.07	
80	-	3.42	3.71	3.16	2.63	2.13	1.82	1.57	1.25	1.09	
90	-	3.31	3.60	3.14	2.63	2.10	1.83	1.61	1.27	1.09	
100	-	3.14	3.52	3.09	2.60	2.10	1.81	1.59	1.28	1.10	
110	-	3.11	3.45	3.03	2.57	2.08	1.81	1.59	1.28	1.10	
120	-	3.02	3.39	2.98	2.43	2.06	1.80	1.59	1.29	1.10	
130	-	3.03	3.26	2.93	2.37	2.04	1.78	1.59	1.29	1.10	
140	-	2.98	3.19	2.87	2.34	2.00	1.76	1.56	1.29	1.10	
150	-	2.93	3.11	2.83	2.30	1.98	1.73	1.55	1.28	1.09	

A partire dai risultati ottenuti è stato possibile ottenere la “Carta di microzonazione sismica Livello 2” in cui si sono riportati i valori dei fattori di amplificazione FA - FV in corrispondenza di tutti i punti di misura analizzati.

A seguire si riporta un estratto di tale carta. Dalla sua consultazione è possibile trarre le seguenti considerazioni:

- il territorio comunale di Vazzola è caratterizzato da valori amplificati del moto sismico di base che variano da 1,04 a circa 2,0 per l’FA e da 1,24 a 2,5 per l’FV;
- la distribuzione dei fattori di amplificazioni ha consentito la suddivisione del territorio comunale in due aree: la porzione settentrionale del comune, infatti, presenta valori di amplificazione elevati sia in termini di FA che di FV a causa del contrasto di rigidità tra i depositi limoso-argillosi superficiali e i sottostanti materiali ghiaiosi (FA = 1,85 - 2,00; FV = 2,37 - 2,50). Invece, le porzioni meridionali e centrali del comune sono state accorpate in un’unica area in quanto caratterizzate da fattori di amplificazione più bassi (FA = 1,04 - 1,29; FV = 1,24 - 1,75) e, nonostante le differenze litologiche dei depositi messe in evidenza nella Carta geologico-tecnica, del tutto confrontabili tra loro.

Legenda

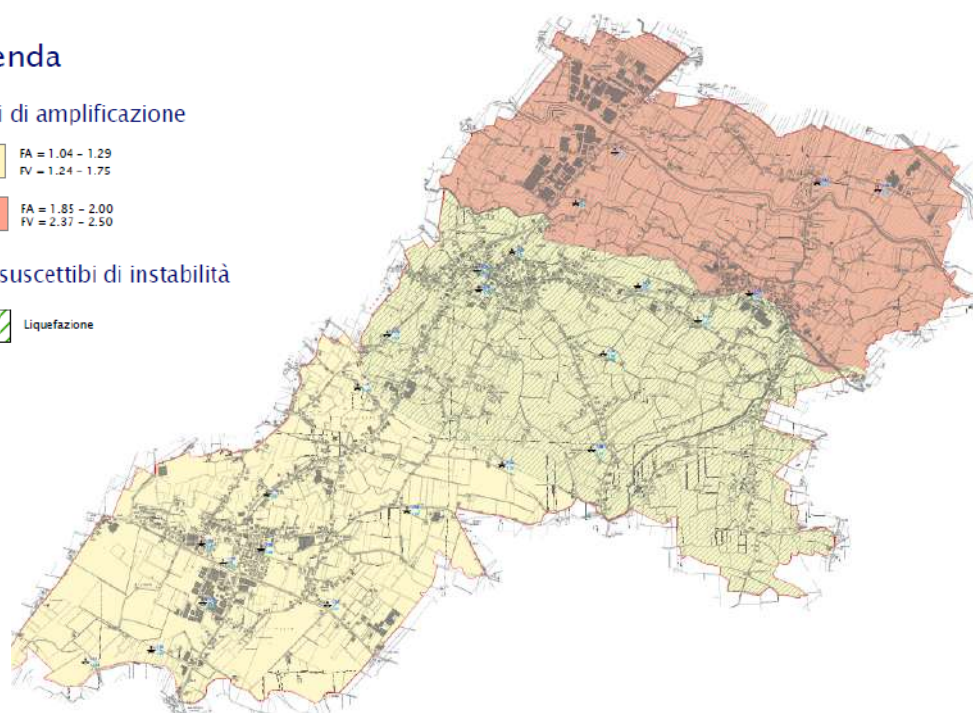
Fattori di amplificazione

FA = 1.04 - 1.29
FV = 1.24 - 1.75

FA = 1.85 - 2.00
FV = 2.37 - 2.50

Zone suscettibili di instabilità

Liquefazione



10. VERIFICHE ALLA LIQUEFAZIONE

Il pericolo di liquefazione è stato ampiamente indagato valutando la contemporanea presenza sia dei fattori scatenanti (caratteristiche dei terremoti attesi) sia predisponenti (susceptibilità dei terreni), come illustrato nel Cap. 7.3. Per questo, nella Carta delle MOPS, il comune di Vazzola è stato parzialmente inserito tra le zone $ZALQ$ (Zona di attenzione per liquefazione).

A questo punto, come previsto dagli standard regionali per la microzonazione sismica, la susceptibilità dei vari terreni è stata valutata sulla base di alcune prove penetrometriche di tipo CPT.

La verifica di liquefazione dei suoli è stata eseguita sui livelli potenzialmente liquefacibili, secondo il metodo di Idriss e Boulanger (2014), come consigliato dalla Determinazione Reg. 1105/14 della Regione Emilia-Romagna in base a numerosi studi condotti a seguito del terremoto del 2012. È noto che nei sedimenti granulari la presenza di percentuali di argilla riduce in maniera rilevante la susceptibilità alla liquefazione dei depositi. Anche la presenza di strati superficiali non liquefacibili con spessore maggiore di 3 metri può ulteriormente contrastare la liquefazione degli strati sottostanti.

Con le indagini geognostiche analizzate sono state evidenziate le disomogeneità stratigrafiche verticali. Il calcolo del coefficiente di sicurezza F_s individua con $F_s < 1,0$ la possibilità che avvenga la liquefazione, mentre $F_s > 1,0$ esclude la possibilità del fenomeno.

Nel caso specifico la verifica alla liquefazione è stata effettuata sui livelli totalmente o parzialmente incoerenti intercettati fino ad un massimo di 15 m (solitamente più susceptibili a fenomeni di liquefazione), considerando un livello di falda, durante l'evento sismico, prossimo a quello misurato. Per quanto riguarda i dati sismici di *input*, oltre al valore della magnitudo massima attesa propria della zona sismogenetica in cui ricade il comune di Vazzola (M_w paria 6,6), è stato assegnato il valore di a_g (PGA) calcolato tramite lo studio di risposta sismica locale condotto per valutare l'attendibilità degli abachi, propri del Livello 2.

Per ogni verticale indagata è stato riportato l'indice del potenziale di liquefazione I_L come di seguito definito nelle linee guida regionali:

Potenziale di liquefazione	Pericolo di liquefazione
$0 < I_L < 2$	Basso
$2 < I_L < 5$	Moderato
$5 < I_L < 15$	Alto
$I_L > 15$	Molto alto

In aggiunta, i terreni incoerenti (saturi e non), se sottoposti a forze dinamiche temporanee, quali intense vibrazioni o eventi tellurici, subiscono un riordino delle particelle, che si traduce in una compattazione dello strato interessato, e quindi in un cedimento, denominato post-sismico.

L'entità della deformazione verticale è funzione della densità iniziale del deposito (per le sabbie), del grado di sovraconsolidazione (per le argille), del suo spessore e della massima resistenza che si sviluppa nello strato. In depositi incoerenti asciutti il cedimento post-sismico avviene pressoché immediatamente, mentre nei depositi incoerenti e coesivi saturi si completa quando le sovrappressioni interstiziali, generate dalle forze dinamiche, vengono interamente dissipate.

Per questo, è stata condotta la valutazione dei cedimenti post-sismici per i terreni incoerenti; effettivamente il riordino dei granuli in uno strato a seguito della dissipazione delle sovrappressioni è spesso legata al fenomeno della liquefazione, che interessa i soli depositi sabbiosi. Tuttavia anche depositi coesivi soffici e/o plastici, sotto carichi dinamici particolarmente intensi, possono subire un riassetto delle particelle.

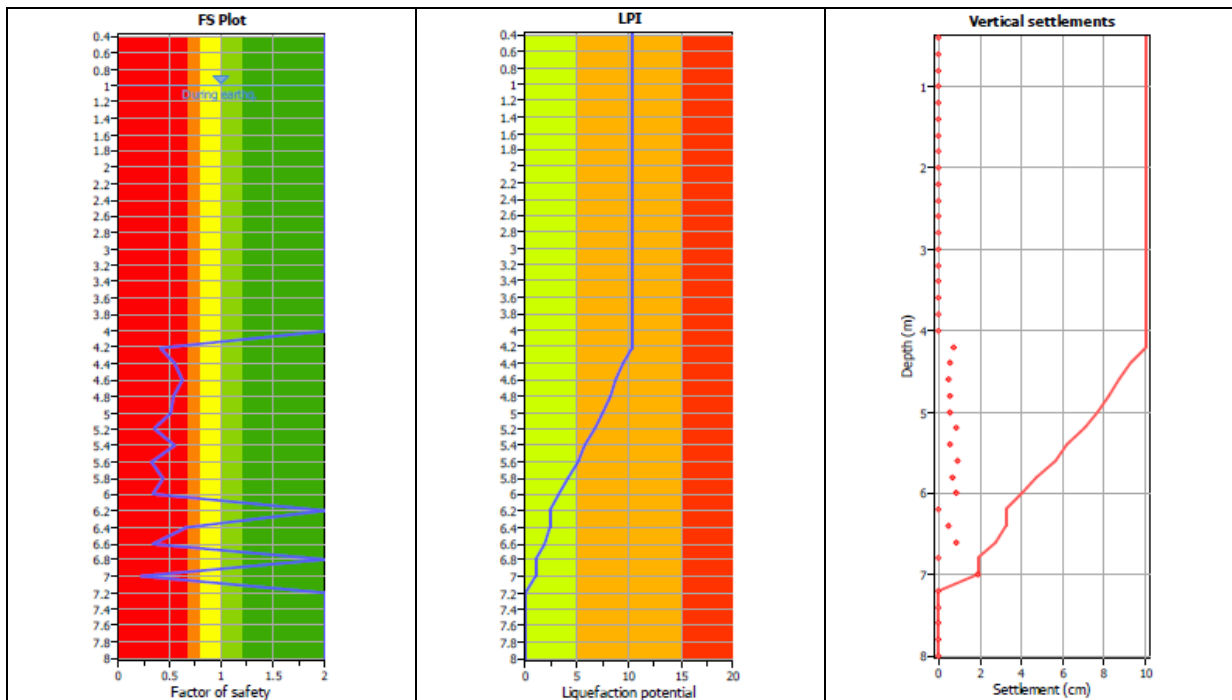
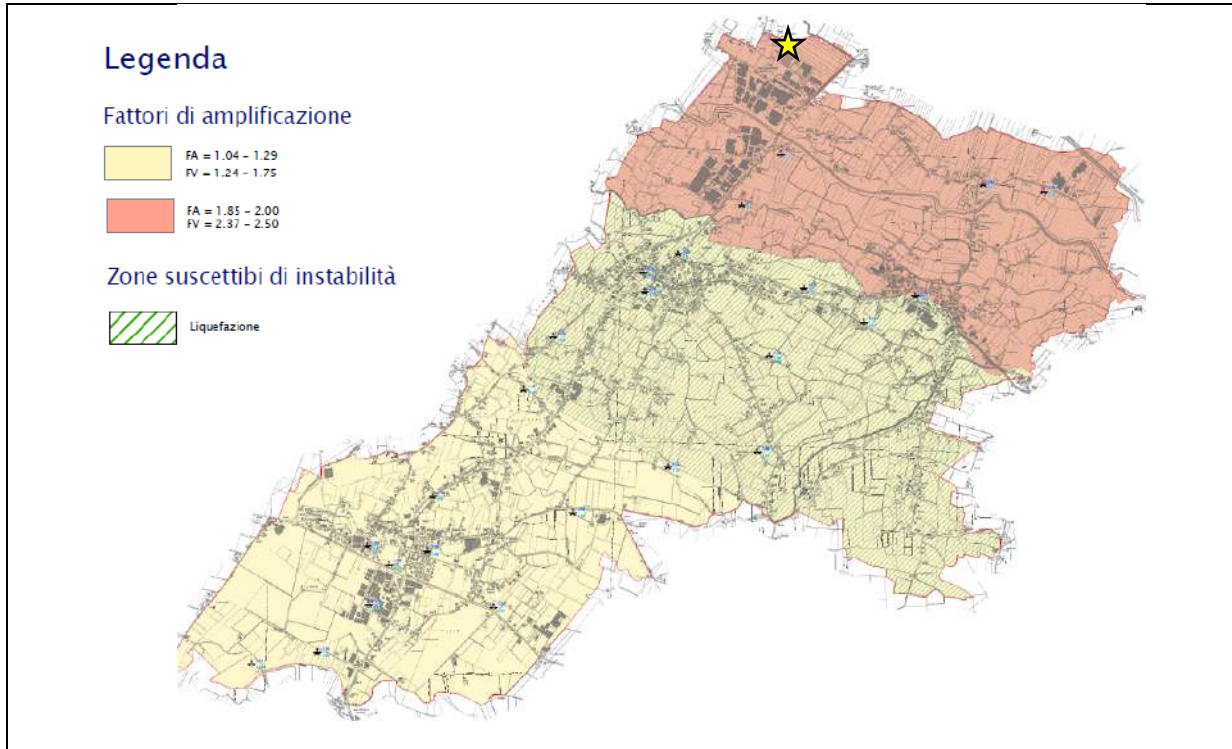
Si precisa che nel caso in esame i cedimenti post-sismici sono stati calcolati nei livelli sabbiosi critici intercettati dalle prove eseguite. In allegato sono stati riportati i *report* completi delle prove mentre a seguire si sono illustrati i risultati ottenuti.

Risultati ottenuti dalle verifiche condotte lungo la verticale CPT n° 1

La prova CPT n° 1 è stata realizzata nei depositi CLfg, in località Via Moretto-Via Battisti. I dati di input possono essere così riassunti:

Analysis method	B&I (2014)
Earthquake magnitude Mw	6,60
Peak ground acceleration	0,33
G.W.T. (earthq.)	1,00 m

RISULTATI OTTENUTI



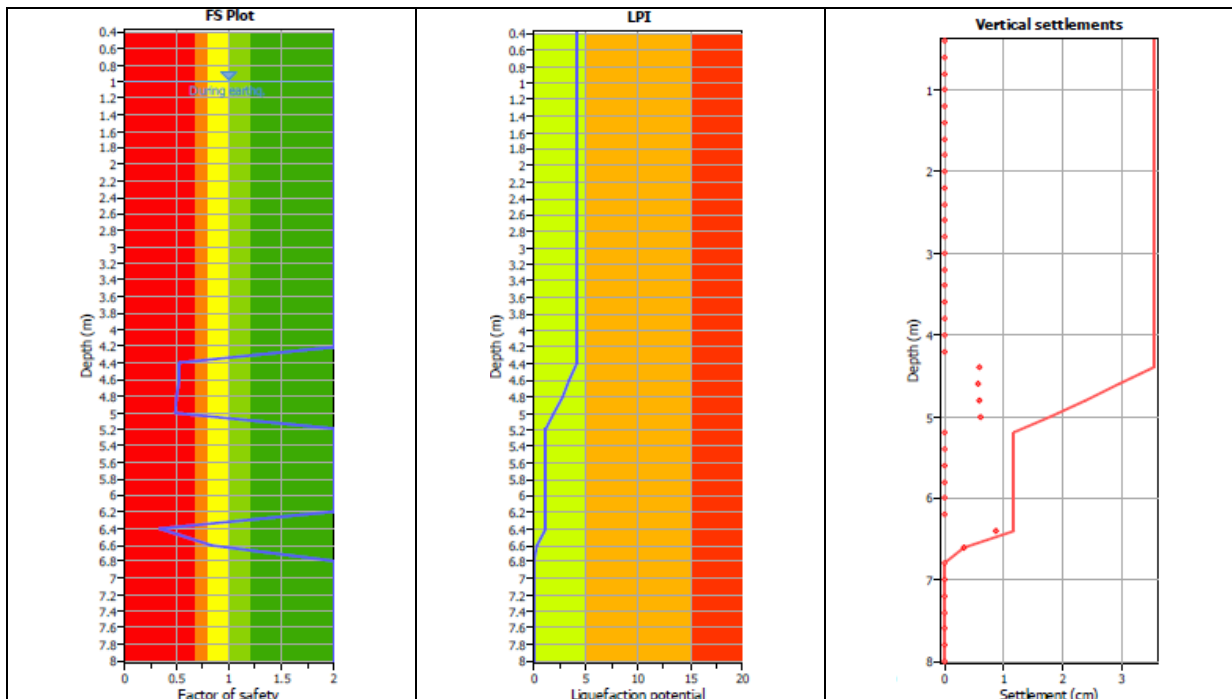
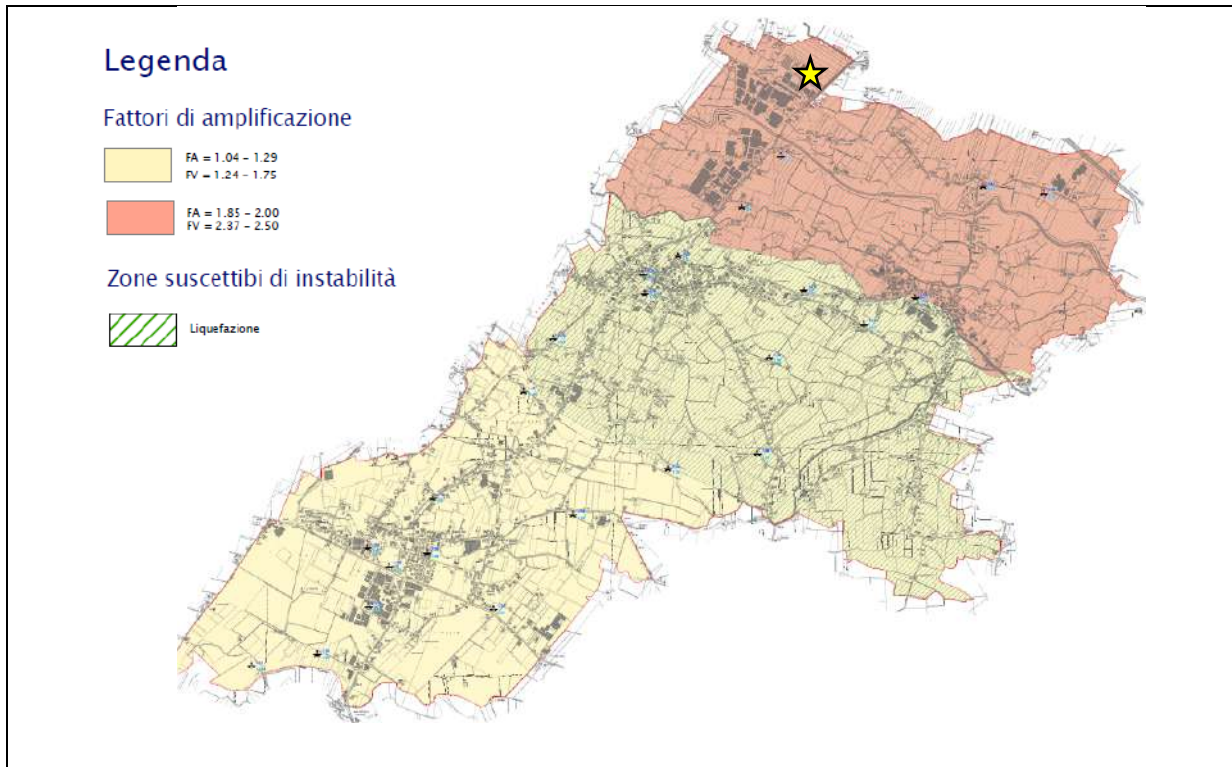
Liquefaction potential	10,37 (rischio alto)
Vertical settlements	10,02

Risultati ottenuti dalle verifiche condotte lungo la verticale CPT n° 2

La prova CPT n° 2 è stata realizzata nei depositi CLfg, in località Via Moretto-Via Battisti. I dati di input possono essere così riassunti:

Analysis method	B&I (2014)
Earthquake magnitude Mw	6.60
Peak ground acceleration	0,33
G.W.T. (earthq.)	1,00 m

RISULTATI OTTENUTI



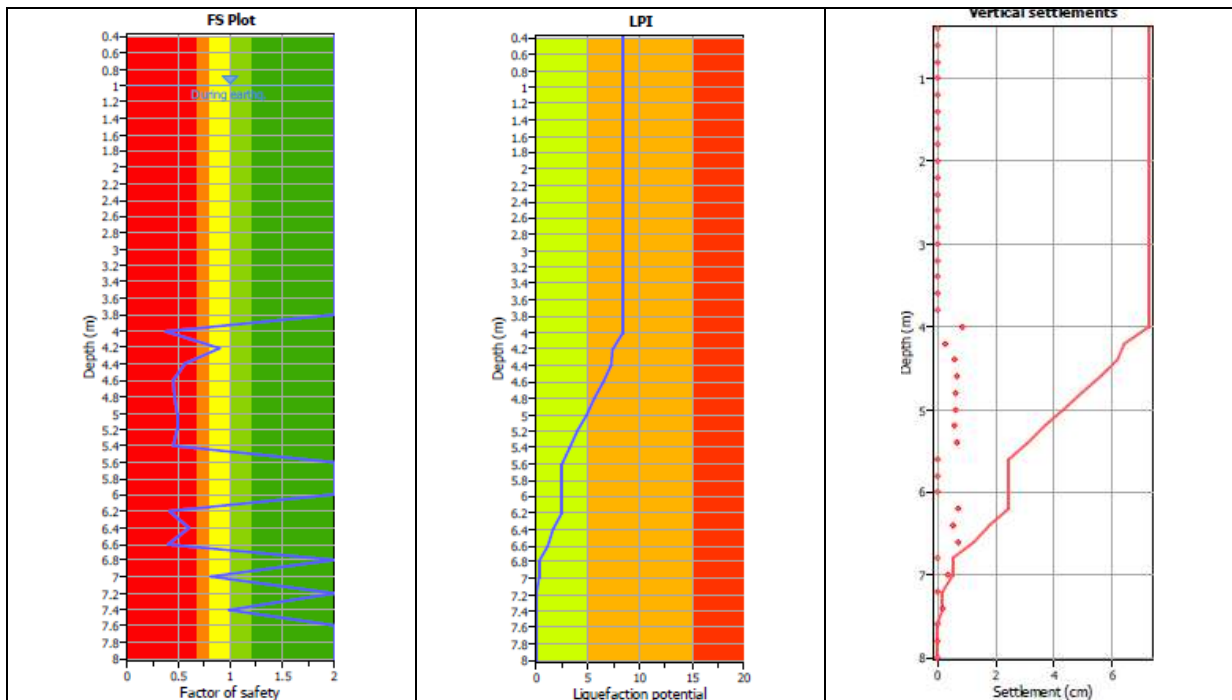
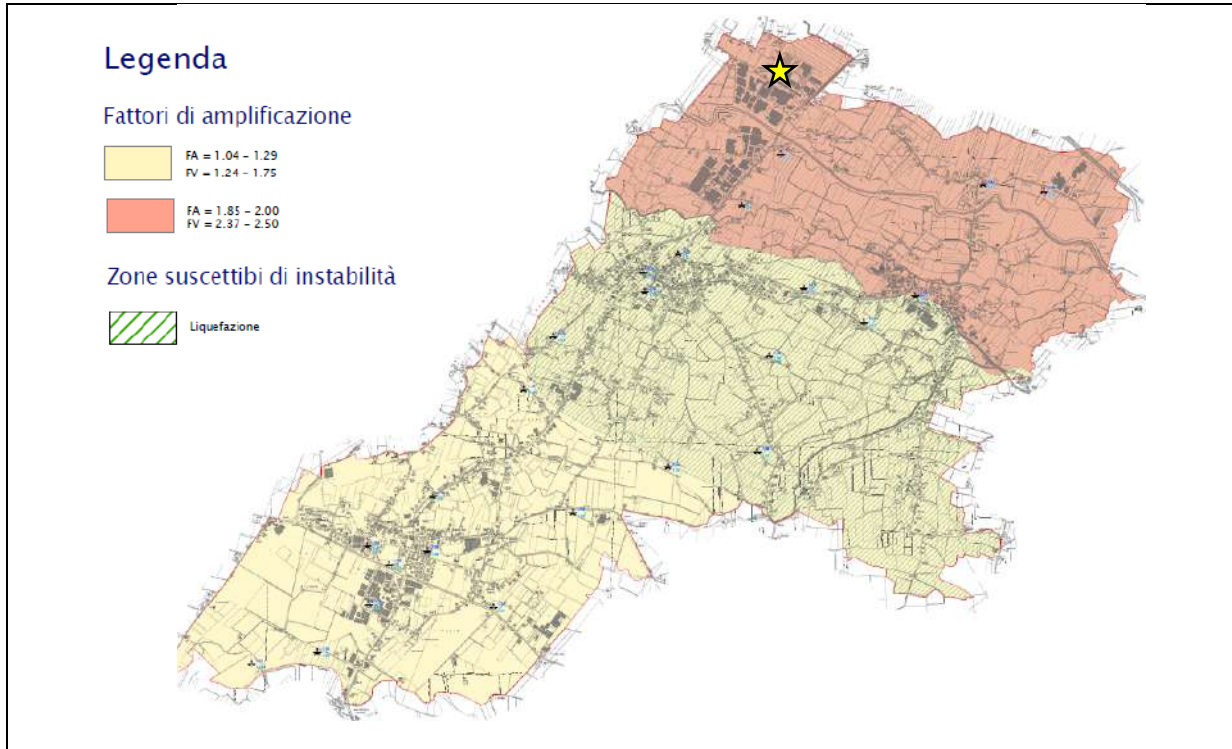
Liquefaction potential	4,15 (rischio moderato)
Vertical settlements	3,55

Risultati ottenuti dalle verifiche condotte lungo la verticale CPT n° 3

La prova CPT n° 3 è stata realizzata nei depositi CLfg, in località Via Moretto-Via Battisti. I dati di input possono essere così riassunti:

Analysis method	B&I (2014)
Earthquake magnitude Mw	6,60
Peak ground acceleration	0,33
G.W.T. (earthq.)	1,00 m

RISULTATI OTTENUTI



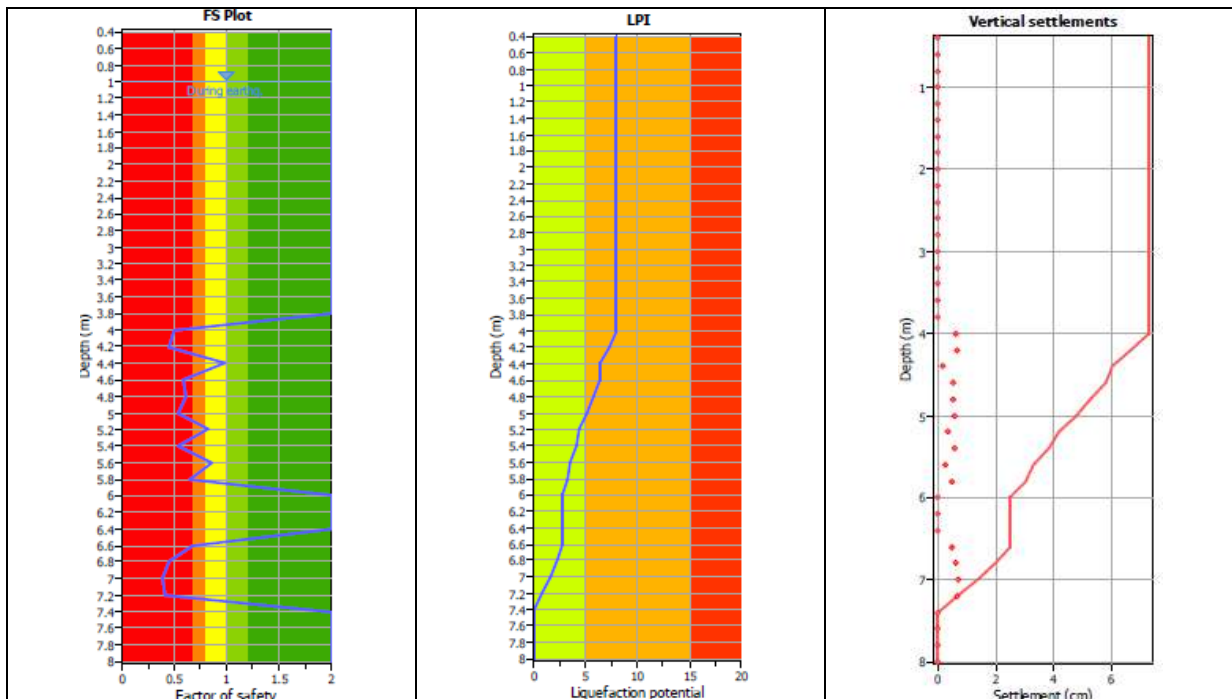
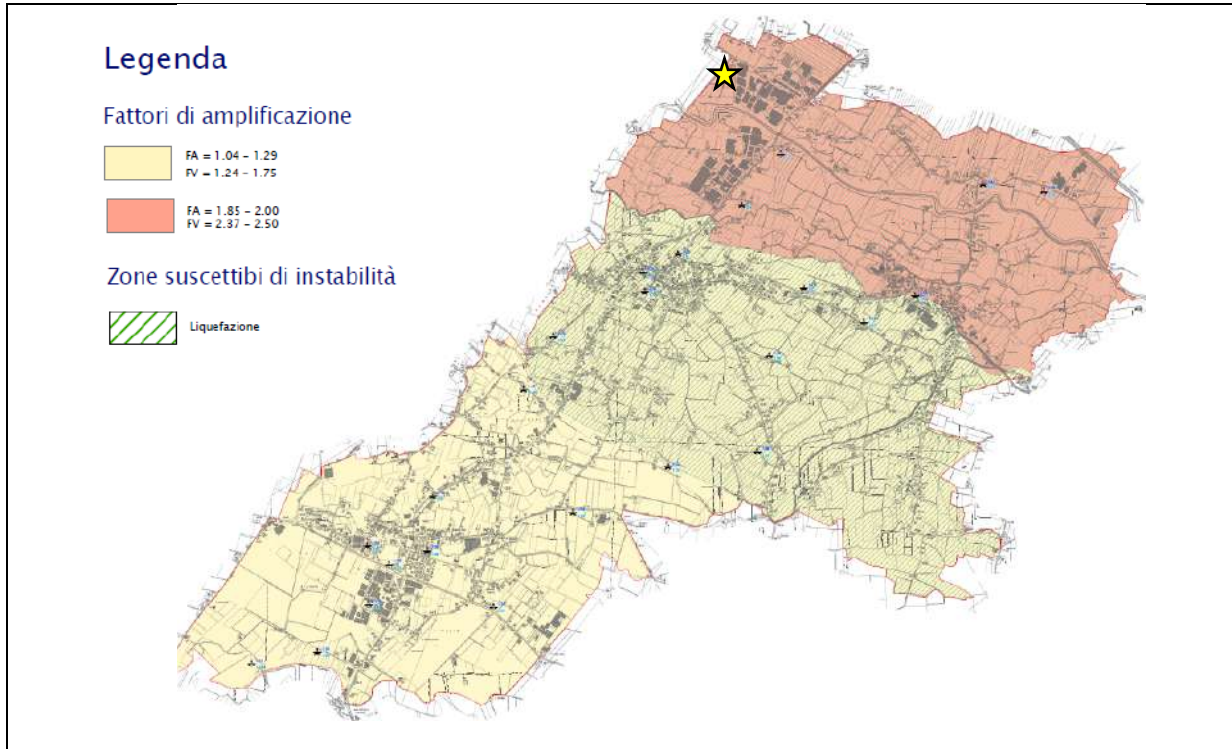
Liquefaction potential	8,32 (rischio alto)
Vertical settlements	7,26

Risultati ottenuti dalle verifiche condotte lungo la verticale CPT n° 4

La prova CPT n° 4 è stata realizzata nei depositi CLfg, in località Via Moretto-Via Battisti. I dati di input possono essere così riassunti:

Analysis method	B&I (2014)
Earthquake magnitude Mw	6,60
Peak ground acceleration	0,33
G.W.T. (earthq.)	1,00 m

RISULTATI OTTENUTI



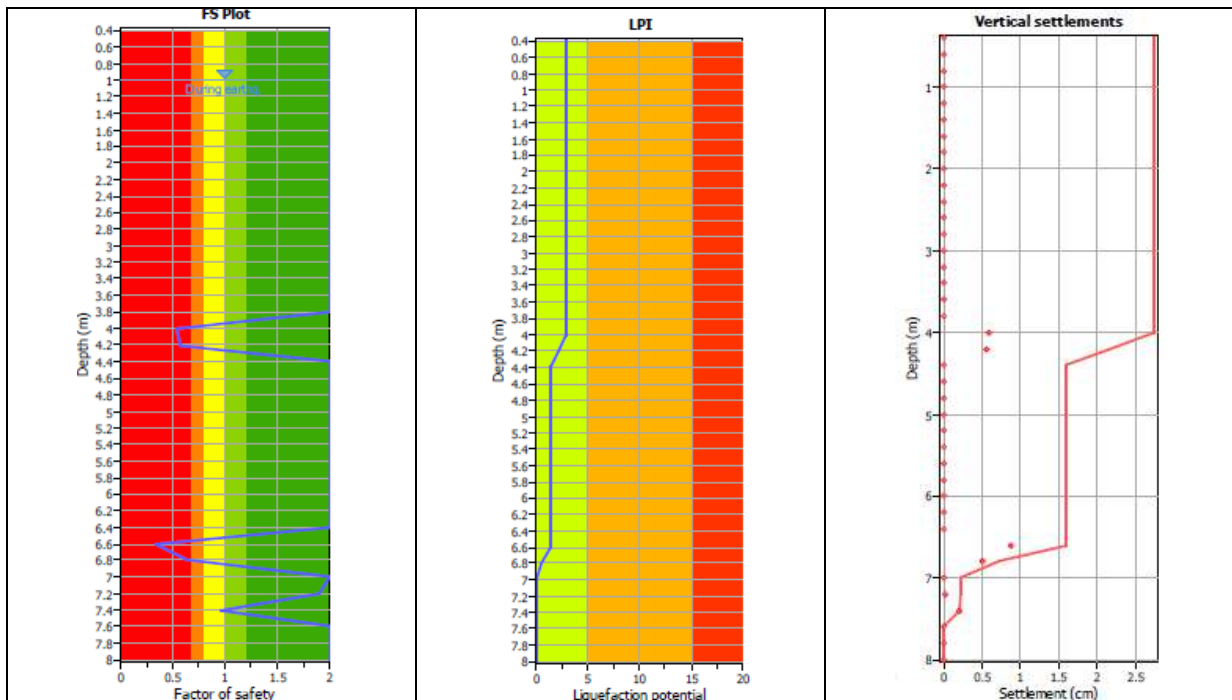
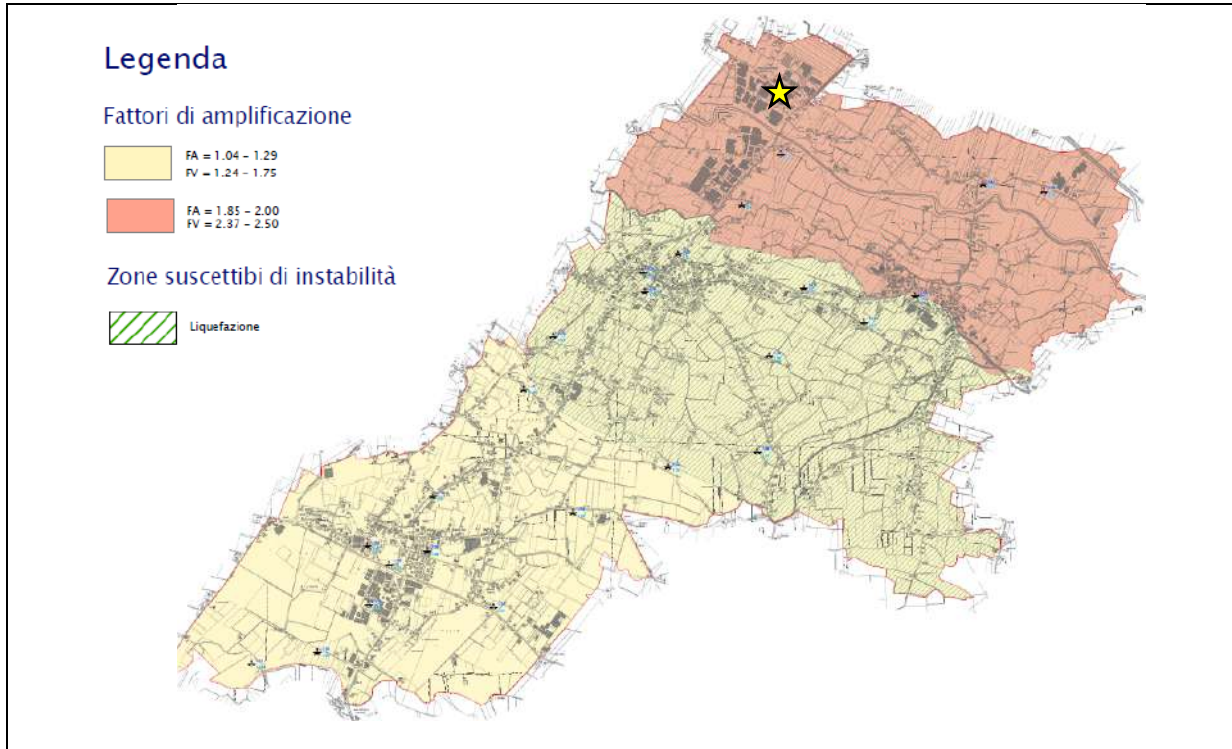
Liquefaction potential	8,00 (rischio alto)
Vertical settlements	7,30

Risultati ottenuti dalle verifiche condotte lungo la verticale CPT n° 5

La prova CPT n°5 è stata realizzata nei depositi CLfg, in località Via Moretto-Via Battisti. I dati di input possono essere così riassunti:

Analysis method	B&I (2014)
Earthquake magnitude Mw	6,60
Peak ground acceleration	0,33
G.W.T. (earthq.)	1,00 m

RISULTATI OTTENUTI



Liquefaction potential	2,86 (rischio moderato)
Vertical settlements	2,74

Le verifiche condotte, esclusivamente sulla porzione settentrionale del territorio comunale, hanno chiaramente evidenziato sia la criticità del territorio sia la forte variabilità, anche a breve distanza, del potenziale a liquefazione; la tabella seguente riassume i risultati ottenuti.

N° prova e litologia	Liquefaction potential	Total estimated settlement
CPT n°1 - CL	10,37 (rischio alto)	10,02 cm
CPT n°2 - CL	4,15 (rischio moderato)	3,55 cm
CPT n°3 - CL	8,32 (rischio alto)	7,26 cm
CPT n°4 - CL	8,00 (rischio alto)	7,30 cm
CPT n°5 - CL	2,86 (rischio moderato)	2,74 cm

Il potenziale di liquefazione calcolato presenta valori variabili anche all'interno della stessa zona MOPS. Infatti, il deposito prevalentemente argilloso-limoso e sabbioso presenta un rischio di liquefazione variabile da alto a moderato in quanto la liquefazione risulta fortemente condizionata sia dalla granulometria sia dal grado di rigidità dei depositi.

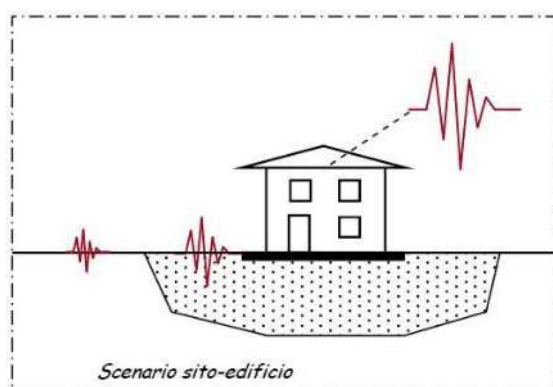
Inoltre, sono state condotte n°2 prove CPT *ex-novo* all'interno della area GM - zona 2002, per confermare o meno l'instabilità assegnata. I risultati di tali prove, andate a rifiuto strumentale nei primi metri (2-3 m) a causa della presenza di materiale grossolano, non hanno consentito la valutazione del rischio alla liquefazione. Nonostante questo e in virtù della normale variabilità spaziale degli orizzonti stratigrafici e alternanze litologiche presenti nell'area GM - zona 2002 (zona di transizione dal CL a nord al GW a sud) non è possibile escludere a priori la suscettibilità alla liquefazione dei terreni.

11. METODO GEOFISICO - STRUMENTALE PER LA CARATTERIZZAZIONE DEGLI INDICATORI DI VULNERABILITÀ SISMICA DEGLI EDIFICI

Il metodo geofisico-strumentale mira a identificare la presenza, in un edificio, di comportamenti ritenuti critici in termini di risposta sismica, attraverso l'interpretazione di misure dirette di tremore ambientale effettuate all'interno dell'edificio e nel sito che lo ospita.

Per interpretare il comportamento del sito in termini di frequenze principali di oscillazione, viene applicata la tecnica H.V.S.R. (rapporto tra le componenti spettrali orizzontali e verticale), mentre per poter meglio individuare il comportamento dell'edificio è preferibile usare la tecnica S.S.R. (Standard Spectral Ratio). Quest'ultima procedura consiste nel calcolare il rapporto tra gli spettri misurati all'interno dell'edificio ai vari piani, in modo tale da riconoscere al meglio le frequenze proprie dei modi di vibrare dell'edificio stesso.

Il metodo parte dall'assunto che, per un'adeguata valutazione della propensione al danneggiamento di una struttura, si deve tenere conto sia del comportamento sismico dell'edificio, sia del comportamento del sito su cui esso è ubicato (figura seguente).



Le misure di tremore sono utilizzate, in particolare, per riconoscere strumentalmente alcuni indicatori di vulnerabilità del sistema unitario sito-edificio.

Nello specifico, le misure di tremore sul sito consentono di:

- definire la presenza di un significativo contrasto di impedenza che può causare l'incremento dell'azione sismica in superficie (tecnica H.V.S.R.);
- valutare la frequenza naturale del sito (tecnica H.V.S.R.);
- identificare la presenza di variabilità laterale della geometria del *bedrock* (rotazione delle componenti spettrali).

Le misure di tremore effettuate all'interno di un edificio consentono invece di:

- risalire alle frequenze naturali delle strutture (tecnica S.S.R.);
- stimare e individuare la propensione a subire effetti torsionali (tecnica S.S.R.).

Conoscendo le frequenze naturali del sito e dell'edificio è possibile, quindi, valutare la propensione alla doppia risonanza tra sito e struttura.

La frequenza naturale di un edificio è considerata il parametro fondamentale per valutare l'azione sismica a partire dallo spettro di progetto; generalmente, essa viene stimata attraverso formule empiriche, anche se molteplici studi hanno dimostrato che i valori così ottenuti non sono sempre in buon accordo con quelli rilevabili con misure dirette (si veda ad esempio Gallipoli et al. 2009). La frequenza naturale può essere direttamente stimata individuando i picchi presenti nei rapporti tra gli spettri dell'edificio e quelli del sito.

La verifica dell'eventuale effetto della doppia risonanza tra sito ed edificio è altrettanto importante, nonostante non sia espressamente contemplata nelle norme tecniche, poiché può causare un incremento dell'azione sismica sulla struttura.

Tale possibile sincronizzazione si valuta semplicemente comparando la frequenza naturale del sito con quella dell'edificio. Le misure geofisiche di tremore sull'edificio consentono anche di individuare la propensione a subire effetti torsionali; la loro eventuale presenza può incrementare le sollecitazioni su alcuni elementi strutturali, aumentando, di conseguenza, la vulnerabilità dell'edificio.

Si riportano a seguire le misurazioni condotte su alcune strutture presenti nel comune di Vazzola per la caratterizzazione diretta degli indicatori di vulnerabilità sismica.

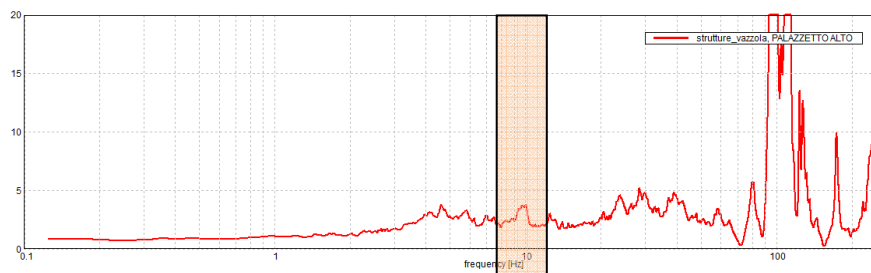
I risultati ottenuti e riportati nelle pagine seguenti, evidenziano che la metodologia proposta consente una valutazione rapida ed economica degli indicatori collegati alla danneggiabilità degli edifici ed è adatta a definire delle strategie di mitigazione di rischio sismico, anche su vasti territori. A differenza di altre metodologie di stima indiretta, quali ad esempio formulazioni empiriche o modellazioni FEM, il metodo consente di ottenere degli indicatori di vulnerabilità misurati direttamente sulla struttura che, pertanto, sono soggetti al solo errore di misura e non a tutte le incertezze che caratterizzano i metodi indiretti.

Si deve tuttavia sottolineare che il metodo geofisico-strumentale non può e non deve sostituirsi a valutazioni e calcoli strutturali o a prove dinamiche attive, né tanto meno è in grado di identificare direttamente quali siano le eventuali carenze strutturali di un edificio in termini di risposta sismica.

Alla luce di quanto appena esposto, si auspica che tale metodologia venga utilizzata su altre strutture e infrastrutture presenti nel territorio comunale di Vazzola, per valutarne la loro predisposizione a subire danni in caso di terremoto.

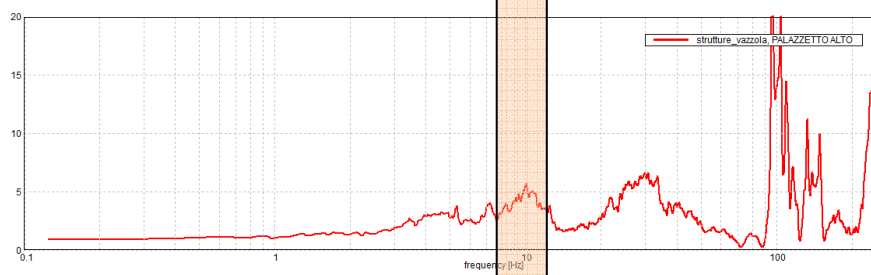


Palazzetto dello sport di Vazzola



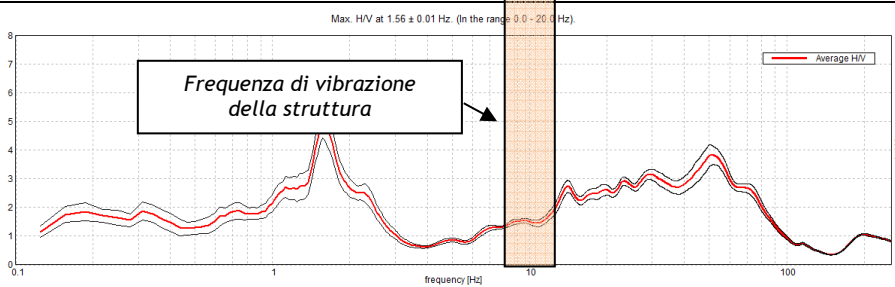
Componente fondamentale nord-sud del moto sismico.

Frequenza del primo modo di vibrazione della struttura:
9-10 Hz.



Componente fondamentale est-ovest del moto sismico.

Frequenza del primo modo di vibrazione della struttura:
≈ 10 Hz.

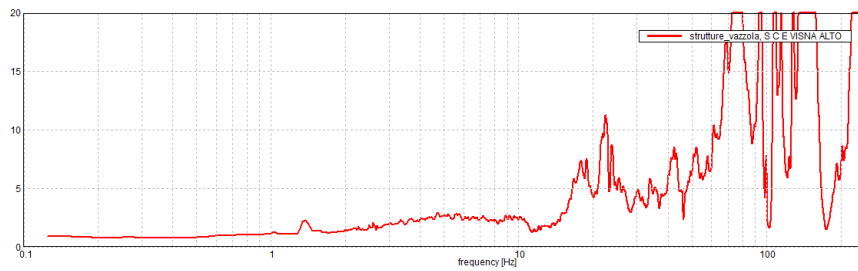


Andamento H.V.S.R. registrato all'esterno della struttura.

Assenza di contrasto sismico nel sottosuolo tale da generare amplificazione alle frequenze della struttura analizzata.

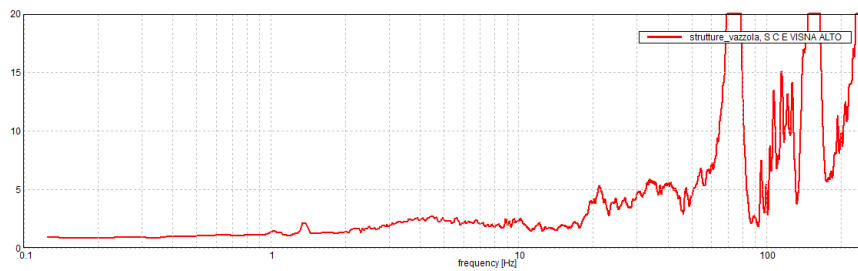


Scuola elementare di Visnà



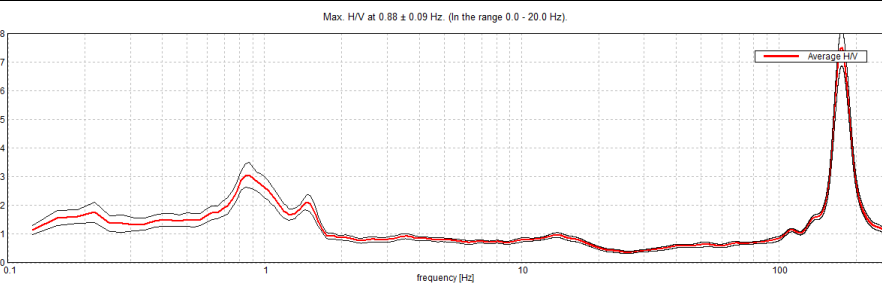
Componente fondamentale nord-sud del moto sismico.

Non interpretabile



Componente fondamentale est-ovest del moto sismico.

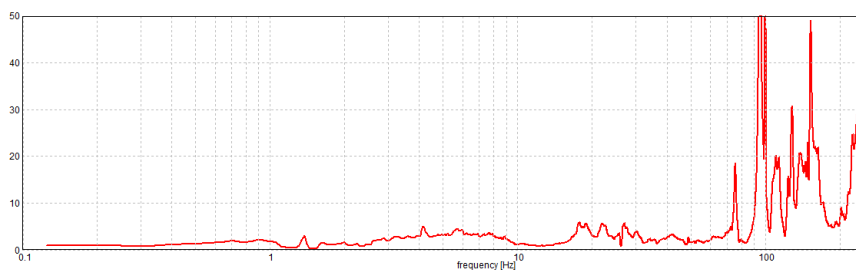
Non interpretabile



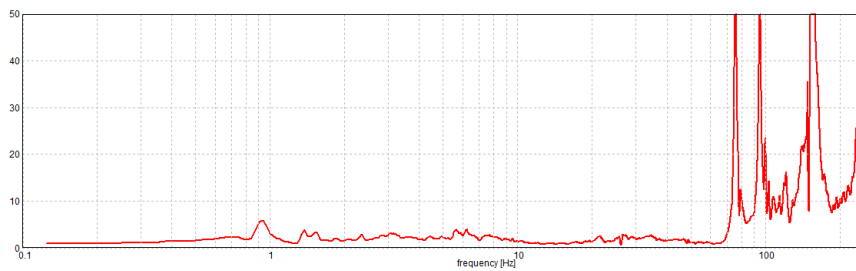
Andamento H.V.S.R. registrato all'esterno della struttura.



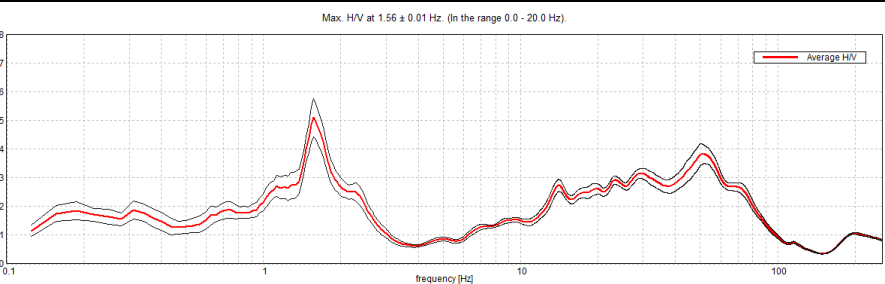
Municipio di Vazzola



Componente
fondamentale
nord-sud
del moto sismico.
Non interpretabile



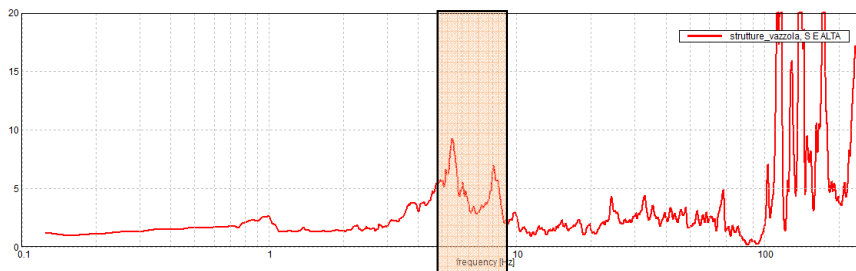
Componente
fondamentale
nord-sud
del moto sismico.
Non interpretabile



Andamento H.V.S.R.
registrato all'esterno
della struttura.

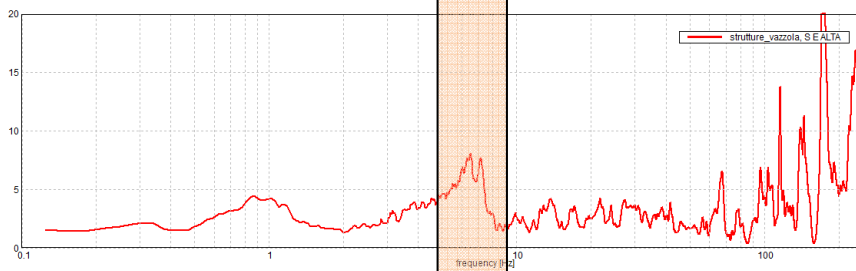


Scuola elementare di Vazzola, Via Nardi



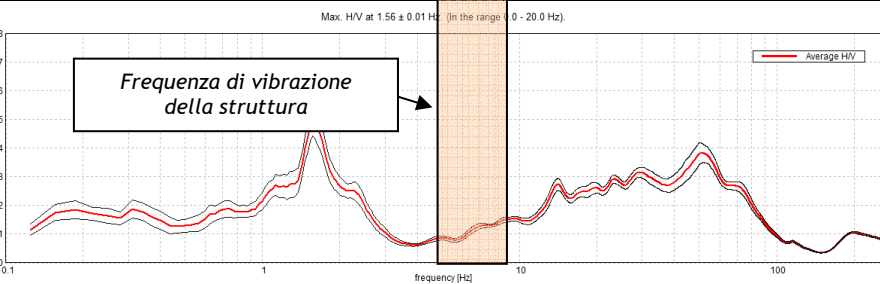
Componente fondamentale nord-sud del moto sismico.

Frequenza del primo modo di vibrazione della struttura:
5,8 Hz. (



Componente fondamentale est-ovest del moto sismico.

Frequenza del primo modo di vibrazione della struttura:
6,0 - 7,0 Hz.

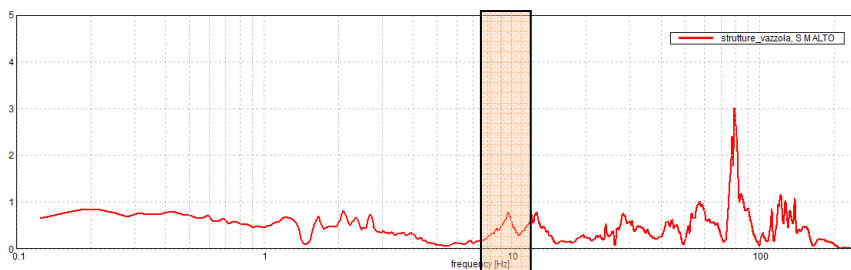


Andamento H.V.S.R. registrato all'esterno della struttura.

Assenza di contrasto sismico nel sottosuolo tale da generare amplificazione alle frequenze della struttura analizzata.

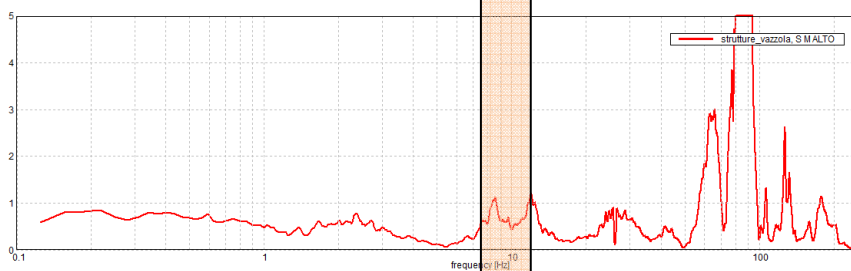


Scuola media statale di Vazzola, Via Nardi



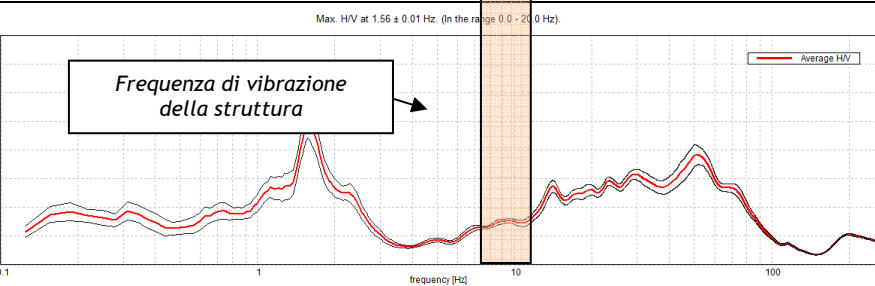
Componente fondamentale nord-sud del moto sismico.

Frequenza del primo modo di vibrazione della struttura:
9,8 Hz.



Componente fondamentale est-ovest del moto sismico.

Frequenza del primo modo di vibrazione della struttura:
8,5 Hz.



Andamento H.V.S.R. registrato all'esterno della struttura.

Assenza di contrasto sismico nel sottosuolo tale da generare amplificazione alle frequenze della struttura analizzata.

12. REDAZIONE CARTOGRAFICA E CREAZIONE BASI INFORMATIVE

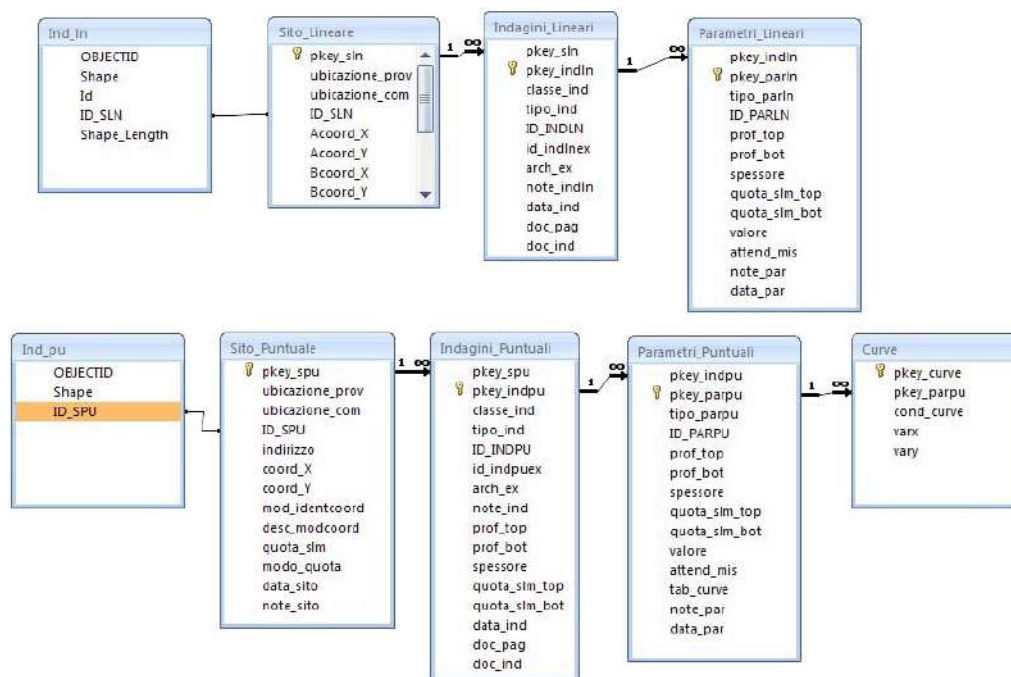
L'analisi di MS ha prodotto informazioni che sono state cartografate secondo le indicazioni previste dalle linee guida emanate dalla Protezione Civile Nazionale per quanto riguarda il Livello 1 e secondo le linee guida regionali per quanto riguarda il Livello 2.

LIVELLO 1 - Standard Nazionali

I *layers* informativi prodotti sono stati organizzati secondo la banca dati geografica definita dagli "Standard di rappresentazione e Archiviazione Informatica" - versione 4.0 - emanati dalla "Commissione tecnica per il monitoraggio degli studi di Microzonazione Sismica" nel giugno 2015. Gli Standard sopracitati definiscono le specifiche tecniche per la redazione in ambiente GIS degli elaborati cartografici della MS.

Per quanto riguarda la rappresentazione cartografica, anch'essa è stata realizzata utilizzando le vestiture previste dagli "Standard di rappresentazione e Archiviazione Informatica" - versione 4.0.

Il contenuto informativo della "Carta delle indagini" si esplica attraverso la relazione tra gli *shapefiles* (Ind_pu e Ind_ln) e le tabelle ad essi collegate, appositamente strutturate per archiviare i dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei parametri delle indagini.



Relazione fra tabelle e shapefiles
(Figura 2.1-1 "Standard di Rappresentazione e archiviazione informatica" - versione 4.0b)

Lo *shapefile* Ind_pu rappresenta la primitiva puntuale che posiziona spazialmente il relativo punto d'indagine, identificato univocamente nel campo ID_SPU; quest'ultimo costituisce la chiave di collegamento (*join*) alla tabella **Sito_Puntuale**, destinata all'archiviazione dei parametri di georeferenziazione dei punti d'indagine.

La tabella **Indagini_Puntuali** descrive le tipologie d'indagine eseguite e le informazioni necessarie alla tracciabilità, mediante collegamento esterno con la relativa documentazione in formato pdf. Infine, nella tabella **Parametri_Puntuali** sono archiviati i parametri associati alle prove descritte nella tabella **Indagini_Puntuali**.

Lo *shapefile* Ind_In costituisce la primitiva lineare che posiziona spazialmente le indagini lineari, identificati univocamente nel campo ID_SLN; quest'ultimo rappresenta la chiave di collegamento alla tabella **Sito_Lineare**, nella quale vengono archiviate le codifiche del tracciato. La tabella

Indagini_Lineari definisce la tipologia d'indagine eseguita e le informazioni necessarie alla sua tracciabilità, tramite un collegamento esterno con documentazione corrispondente, in formato pdf. Infine, la tabella **Parametri_Lineari** contiene i parametri definiti dalle prove descritte nella tabella **Indagini_Lineari**.

Il contenuto informativo riportato nella “Carta delle frequenze” è definito dal campo VALORE della tabella Parametri_Puntuali, dove viene specificato il valore della frequenza fondamentale di risonanza espresso in Hertz (Hz) nell’intervallo compreso tra 0,1 Hz e 10,0 Hz. La restituzione grafica dei valori di frequenza si riferisce a quanto proposto per la “Carta delle frequenze” di risonanza negli “Standard di rappresentazione cartografica e archiviazione informatica. Specifiche tecniche per la redazione degli elaborati cartografici e informatici relativi al Primo livello delle attività di Microzonazione Sismica - Versione 1.2” (2012) della Regione Abruzzo.

Le suddette tabelle sono state compilate e archiviate nel database di Access **Cdl_tabelle.mdb** contenuto, assieme agli *shapefile* Ind_pu e Ind_ln, nella cartella Indagini.

La “Carta geologico-tecnica” e la “Carta delle microzonee omogenee in prospettiva sismica” sono state realizzate in formato vettoriale e rappresentano le informazioni contenute nelle cartelle GeoTec ed MS1. La cartella **GeoTec** contiene i seguenti *layers* informativi.

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione
<i>Elineari</i>	Lineare	Elementi lineari (escluse le isobate)
<i>Geoidr</i>	Puntuale	Elementi puntuali geologici e idrogeologici
<i>Geotec</i>	Poligonale	Unità geologico tecniche

Nella cartella **MS1** sono invece contenuti i seguenti *shapefile*

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione
<i>Instab</i>	Poligonale	Zone instabili
<i>Stab</i>	Poligonale	Zone stabili

La cartografia di base utilizzata per l’elaborazione dello studio è la C.T.R. del Veneto, le cui coordinate piane espresse in Gauss-Boaga (fuso ovest) sono state convertite in WGS84 UTM33N.

All’interno della cartella BasiDati è stata inserita la C.T.R. in formato vettoriale geoferenziata alla scala 1:10.000, utilizzata per il presente lavoro.

Le coordinate delle tabelle (.mdb) e gli *shapefiles* allegati al progetto sono nel formato WGS84 UTM33N.

LIVELLO 2 - Standard Regionali

Le cartografie prodotte per il Livello 2, secondo gli standard regionali, sono state realizzate in formato vettoriale e secondo i seguenti *layers* informativi:

Carta della pericolosità sismica locale

Nome file	Tipo	Descrizione
<i>CPSL</i>	Poligonale	<i>Zone di pericolosità sismica locale</i>

Carta delle Frequenze

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione
<i>FREQ</i>	Puntuale	<i>Valori di F_{MAX} delle misure H.V.S.R.</i>

Carta di microzonazione sismica di Livello 2 (FA e FV)

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione
<i>MS2_POL</i>	Poligonale	<i>Fattori di amplificazione delle zone microzionate</i>
<i>MS2_PUN</i>	Puntuale	<i>Fattori di amplificazione puntuali di FA e FV</i>

Carta delle Vs

Nome file	Tipo <i>shapefile</i>	Descrizione
<i>VS</i>	Puntuale	<i>Valori di Vs,30</i>

La cartografia di base utilizzata per l'elaborazione dello studio è la C.T.R. del Veneto, le cui coordinate piane sono espresse in Gauss-Boaga (fuso ovest).

All'interno della cartella BaseDati è stata inserita la base *raster* georeferenziata della C.T.R. utilizzata per il presente lavoro.

13. BIBLIOGRAFIA

1. A. Viganò, G. Bressan, G. Ranalli, S. Martin (2008) - Focal mechanism inversion in the Giudicarie - Lessini seismotectonic region (Southern Alps, Italy): Insight on tectonic stress and strain
2. Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta - Bacchiglione. Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico del bacino idrografico del fiume Brenta - Bacchiglione.
3. Bramerini F., Di Pasquale G., Naso G., Severino M. (2008) - Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica - Parti I e II - Gruppo di lavoro "Indirizzi e criteri generali per la Microzonazione Sismica" del Dipartimento della Protezione Civile
4. Castellaro S., Albarello D. (2011). Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. *Ingegneria sismica*, pp. 32 - 62
5. Castellaro S., Mulargia F., Bianconi L. (2005). Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. *Geologia tecnica e ambiente*, pp. 77 - 102
6. CERI Centro di ricerca "Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici" (2004) - La Microzonazione Sismica. Metodi, esperienze e normativa
7. Chopra L. (1995). *Dynamic of Structures: theory and applications to earthquake engineering*. Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics. Prentice - Hall
8. Dey A. and Morrison H.F. (1979) - Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 27, 1020-1036
9. F. Galadini, P. Galli, A. Cittadini, B. Gioiaccio (2001) - Late Quaternary fault movements in the Mt. Baldo - Lessini Mts. Sector of the Southalpine area (northern Italy)
10. Facciorusso J. et al. (2012) - Microzonazione Sismica - Uno strumento consolidato per la riduzione del rischio - L'esperienza della Regione Emilia - Romagna - a cura del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia - Romagna
11. FLAC - ITASCA (2016)- Dynamic Analysis
12. Ghosh B.; Madabhushi S. P. G. (2003). A numerical investigation into effects of single and multiple frequency earthquake input motion. *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 23(8), 691-704
13. Gruppo di lavoro MPS (2004) - Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'OPCM 3274 del 20 Marzo 2003. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano - Roma
14. Kuhlmeyer R. L.; Lysmer J. (1969). Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *J. Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, 99(5), 421-427
15. Lanzo G., Pagliaroli A., D'Elia B. (2003). Numerical study on the frequency-dependent viscous damping in dynamic response analyses of ground. In Latini e Brebbia (eds), *Earthquake Resistant Engineering Structures*, WIT Press, Southampton, Boston, pp. 315-324
16. Lanzo G., Pagliaroli A., D'Elia B. (2004a). Influenza della modellazione di Rayleigh dello smorzamento viscoso nelle analisi di risposta sismica locale. *Atti XI Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, Genova, Italia, 25 - 29 Gennaio
17. Lanzo G., Silvestri F. (1999) - *Risposta Sismica Locale*. Hevelius Ed.
18. Louie, J. N. (2001). Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 347-364
19. M. Locati, R. Camassi e M. Stucchi, 2011. DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>
20. Mucciarelli M. e Gallipoli M.R. (2001) - A critical review of 10 Years of microtremor H.V.S.R. technique - *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42, P. 255 - 266
21. Mucciarelli M. e Gallipoli M.R. (2006) - Comparison between V_{s30} and other estimates of site amplification in Italy - *Conf. Earthq. Eng. And Seismol.*, Ginevra, 3 - 8 Sept. no 270
22. Mucciarelli M (2011) - Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici - Progetto ricerca 2007PTRC4C - Aracne editrice
23. Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G., Penna A. (2012) - "Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms", in stampa sul *Bulletin of Earthquake Engineering*
24. SESAME Project (2005) - "Site Effects Assessment Using Ambient Excitations"
25. Slejko D. et al (1987) - *Modello sismotettonico dell'Italia Nord - Orientale*. CNR
26. Spallarossa D. e Barani S. (2007) - Report, Disaggregazione della Pericolosità Sismica in Termini di M - R - ϵ - Progetto DPC-INGV S1, <http://esse1.mi.ingv.it/d14.html>

14. ALLEGATI FUORI TESTO

- | | |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1. Carta delle indagini | Scala 1:10.000 |
| 2. Carta geologico-tecnica | Scala 1:10.000 |
| 3. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica | Scala 1:10.000 |
| 4. Carta delle Vs | Scala 1:10.000 |
| 5. Carta delle frequenze | Scala 1:10.000 |
| 6. Carta della pericolosità sismica locale (CPSL) | Scala 1:10.000 |
| 7. Carta di microzonazione sismica - Livello 2 | Scala 1:10.000 |
| 8. Schede delle indagini e <i>report</i> delle verifiche alla liquefazione | |
| 9. DVD contenente i file pdf dello studio e le basi informative | |