



COMUNE di PAESE
Provincia di Treviso



MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 2

Piano di lottizzazione in via Asiago - ATR/27

D.G.R. 1572 del 3 settembre 2013

Committente: **Severin Costruzioni Generali srl**



Dr. Geol. Matteo Collareda

via Lungo Giara 29 - Isola Vicentina (VI)

tel./fax 0444 962532 - cell. 349 0567455

e-mail: info@studiosisma.com -web: www.studiosisma.com

Indice

1 - Introduzione	3
2 - Generalità	4
3 - Elementi geologici, geomorfologici e idrogeologici locali per la MS	6
4 - Definizione della pericolosità sismica di base e degli eventi di riferimento	9
5 - Microzonazione sismica: principi fondamentali e finalità	18
6 - Dati geotecnici e geofisici da indagini pregresse e di nuova realizzazione	21
7 - Microzonazione sismica di Livello 2	30
8 - Modellazioni numeriche di Livello 3	35
9 - Commenti finali e criticità	45
10 - Bibliografia	46

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, quindi, significa sviluppare una serie di norme, linee guida e comportamenti operativi e/o educativi finalizzati alla gestione dei rischi naturali, alla riduzione generale dei costi sociali e della 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 nella 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 *bedrock* e delle caratteristiche morfologiche del sito. È, inoltre, 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 a siti su roccia e 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 a una scala sufficientemente grande (scala comunale o subcomunale) le condizioni locali che possono modificare sensibilmente le caratteristiche del moto sismico atteso o possono produrre deformazioni permanenti rilevanti per le costruzioni e le infrastrutture.

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 del terreno e/o geomorfologiche del territorio;
- le zone in cui sono presenti fenomeni di deformazione permanente del territorio, 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 definire il grado di adeguamento necessario a evitarne il collasso in caso di sisma e, quindi, per non compromettere le loro funzioni di pubblica utilità.

Il presente studio è stato svolto a un Livello 2 di approfondimento nell'ambito del piano di lottizzazione di via Asiago - ATR 27, secondo le modalità riportate nelle Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica approvate con D.G.R. 1572 del 03/09/2013 e pubblicate nel Bur n.81 del 24/09/2013.

A tal riguardo, le nuove Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica vanno applicate agli studi di MS a corredo degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (P.A.T., P.I. e loro varianti di cui alla L.R. 11/2004). Anche i Piani Urbanistici Attuativi (PUA), nei comuni i cui strumenti urbanistici di livello superiore non contengono studi sismici, devono essere dotati di specifici studi di MS.

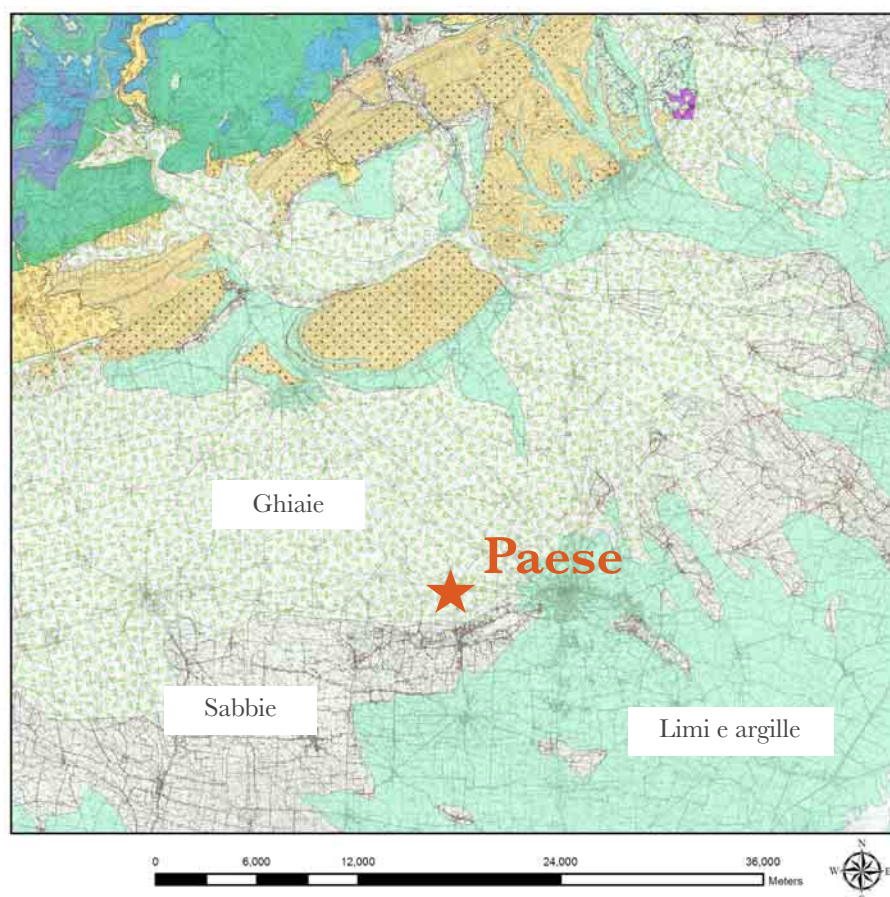
La metodologia prevede che il Livello 2 di approfondimento sia applicato in sede di P.I. a tutte le parti di territorio suscettibili di amplificazione sismica individuati nella precedente fase e per le quali si prevedono trasformazioni urbanistiche del territorio che comportano un incremento dei carichi urbanistico/insediativi e per il territorio compreso nel perimetro del centro abitato-così come previsti dalla normativa vigente.

Ad ogni modo, i risultati del presente studio, in merito al piano di lottizzazione ubicato in via Asiago - ATR/27, sono stati ottenuti a partire dall'analisi della MS di Livello 1 effettuata, su tutto il territorio comunale, in data aprile 2012.

3 - Elementi geologici, geomorfologici e idrogeologici locali per la MS

Nel presente capitolo vengono illustrate le principali caratteristiche geomorfologiche, litologiche e idrogeologiche del territorio comunale, riprese dallo studio di Livello I precedentemente condotto.

Le caratteristiche litologiche della zona in cui ricade il territorio comunale di Paese sono state abbondantemente approfondite da numerosi studi, da cui risulta che l'attuale struttura deriva dalla sovrapposizione di più cicli di sedimentazione fluvio-glaciali e alluvionali. Affiorano sia terreni costituiti da depositi fluvio-glaciali, sia depositi alluvionali, più o meno recenti, connessi con le divagazioni del fiume Piave con le imponenti correnti che si espandevano nella pianura trevigiana. Le varie direttrici hanno pertanto generato dei propri coni di sedimentazione che si sono variamente sovrapposti e anastomatizzati. La deposizione dei materiali, orizzontale e verticale, è stata determinata dalla granulometria degli stessi, nonché dall'energia idraulica delle correnti di deposizione. Si è venuto in tal modo a creare una classazione in senso nord-sud delle alluvioni: a sud della zona collinare si sviluppa un'estesa fascia, denominata alta pianura, in cui il materasso alluvionale risulta costituito prevalentemente da ghiaie più o meno sabbiose. Spostandosi verso meridione la percentuale della matrice fine aumenta sempre più evidenziata dalla formazione di lenti argillose che via via diventano più consistenti formando livelli spessi e continui. A seguire si riporta un estratto della carta litologica del Veneto, ripresa dal progetto PRAC.



Nel territorio comunale sono state individuate quattro categorie di litotipi affioranti:

-Materiali di riporto antropico di varia natura (vegetale, ghiaioso, sabbioso, limoso, ecc.), in area di cava, aree depresse in pianura alluvionale, aree bonificate e/o con bonifica in atto, di spessore variabile, a volte superiore ai tre metri, e poggianti su materiali granulari fluvioglaciali antichi prevalentemente ghiaiosi in matrice sabbiosa, da moderatamente addensati a sciolti. Questi materiali hanno caratteristiche molto variabili essendo costituiti da terreno di riporto.

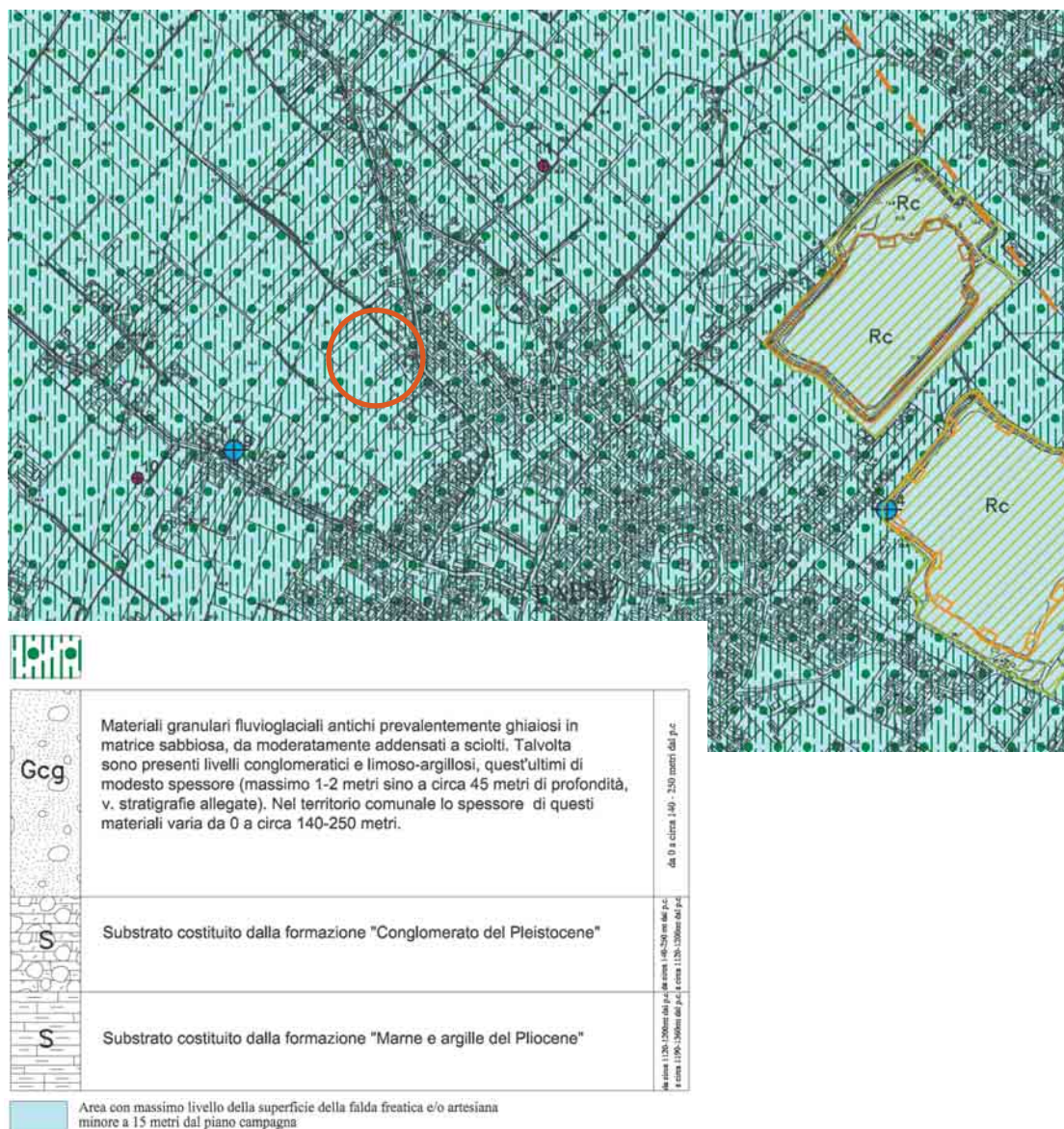
-Materiali di discarica e/o di riporto di rifiuti inerti e/o in matrice cementizia o resinoidi contenenti amianto, di spessore variabile da 0,00 a 20,00 metri e poggianti su materiali granulari fluvioglaciali antichi prevalentemente ghiaiosi in matrice sabbiosa, da moderatamente addensati a sciolti.

-Materiali di riporto di discarica dismessa di RSU e/o di Rifiuti Speciali, di spessore variabile da 0,00 a 20,00 metri e poggianti su materiali granulari fluvioglaciali antichi prevalentemente ghiaiosi in matrice sabbiosa, da moderatamente addensati a sciolti.

-Materiali granulari fluvioglaciali antichi prevalentemente ghiaiosi in matrice sabbiosa, da moderatamente addensati a sciolti. Talvolta sono presenti livelli conglomeratici e limoso-argillosi, quest'ultimi di modesto spessore (massimo 1-2 metri sino a circa 45 metri di profondità). Nel territorio comunale lo spessore di questi materiali varia da 0 a circa 140-250 metri.

Sono poggianti sul substrato costituito dalla formazione del conglomerato del Pleistocene, avente uno spessore variabile: sono presenti dalla profondità di circa 140-250 metri dal p.c. a circa 1120-1200 metri dal p.c.; al letto vi sono le marne e argille del Pliocene. La profondità di queste unità sono state desunte da due stratigrafie di pozzi per idrocarburi. La composizione mineralogica dei materiali fluvioglaciali risulta costante su tutta la potenza analizzata. Gli elementi che la costituiscono sono in prevalenza di natura calcareo-dolomitica, in quantità minore sono presenti elementi derivanti da rocce sedimentarie, intrusive, effusive e metamorfiche. Misure di SPT in sondaggi a carotaggio continuo, eseguite alla profondità di 1,5 e 3,0 metri dal piano campagna, hanno dato risultati di N_{spt} sempre maggiori a 50, confermando che si tratta di una ghiaia molto addensata.

Le aree appena descritte sono state cartografate nella Carta Geologico-Tecnica per la MS di Livello 1, di cui si riporta un estratto relativo all'area interessata dal presente studio.



In conclusione, l'area indagata presenta un materiale granulare fluvio-glaciale antico prevalentemente ghiaioso in matrice sabbiosa, da moderatamente addensato a sciolto con una profondità media della falda di circa 13-14 m dal p.c. locale (informazione desunta attraverso la carta idrogeologica del PAT e da altri studi idrogeologici).

Per quanto riguarda l'assetto morfologico locale risulta possibile affermare che il territorio appare sostanzialmente pianeggiante ad eccezione di alcuni orli di scarpata di cava attiva e/o dismessa e/o abbandonata di altezza compresa tra dieci e venti metri o maggiore. Comunque, l'area oggetto del presente studio risulta priva di qualsiasi assetto morfologico rilevante ai fini dello studio di MS.

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 mentre verrà tralasciato l'inquadramento sismotettonico generale, ampiamente esposto nella relazione illustrativa a corredo dello studio di MS Livello 1.

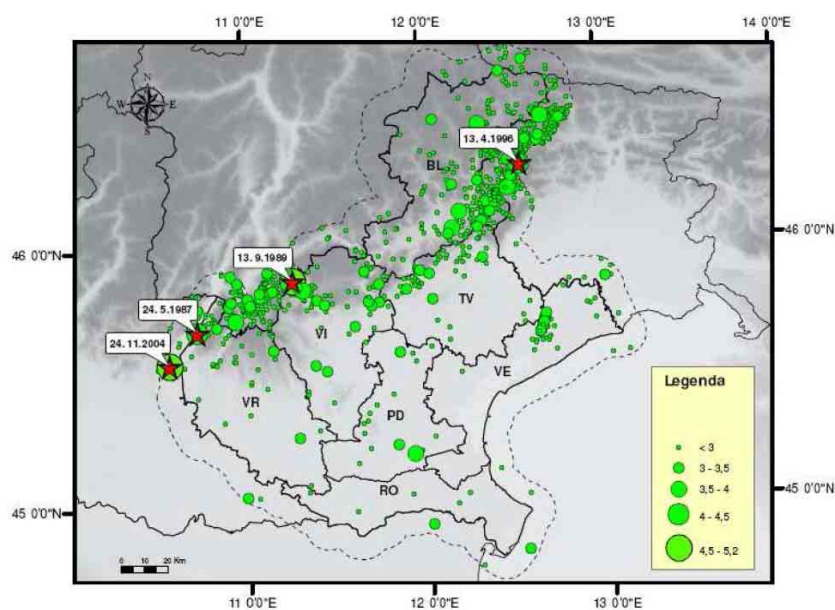
4.1 - Sismicità storica

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 medio-bassa, messa in luce negli ultimi decenni dal monitoraggio strumentale dell'attività sismica.

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 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 M_D . Gli eventi con $M_D > 4$, i cui epicentri ricadono nel territorio regionale o in prossimità di esso, sono identificati con una stella rossa.



Si tratta dei seguenti terremoti:

Data	Località	Magnitudo
24.05.1987	Garda	4.2
13.09.1989	Pasubio	4.8
13.04.1996	Claut M.	4.2
24.11.2004	Salò	5.2

La ricostruzione storica degli eventi sismici che hanno caratterizzato il territorio comunale di Paese 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, 2011): 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 Paese appare quattro volte nel Database Macrosismico DBMI11. Nella tabella seguente sono stati elencati i vari eventi registrati, con indicati, oltre all'intensità in scala MCS al sito in esame (I), la data (anno, mese, giorno, ora, minuto) in cui si è verificato l'evento Ax, l'intensità massima epicentrale in scala MCS (Io) e la magnitudo momento (Mw).

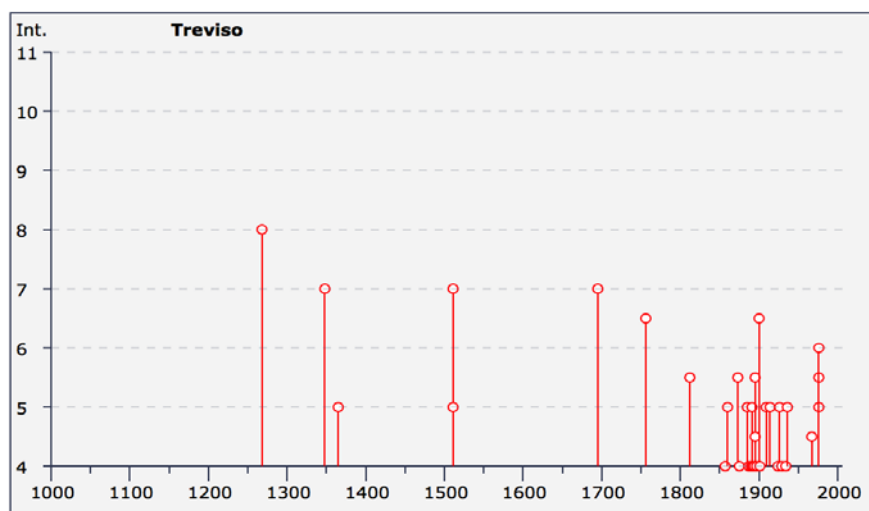
Storia sismica di Paese [45.676, 12.159]



Numero di eventi: 4

Effetti	In occasione del terremoto del:				
I [MCS]	Data	Ax	Np	Io Mw	
NF	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	
3-4	1989 09 13 21:54	PASUBIO	779	6-7 4.88 ±0.09	
NF	1998 04 12 10:55	Slovenia	227	5.66 ±0.09	

Per completezza si è ritenuto opportuno riportare anche la sismicità storica registrata nel comune limitrofo di Treviso in quanto risultano più di 30 eventi sismici con I maggiore o uguale a 4.



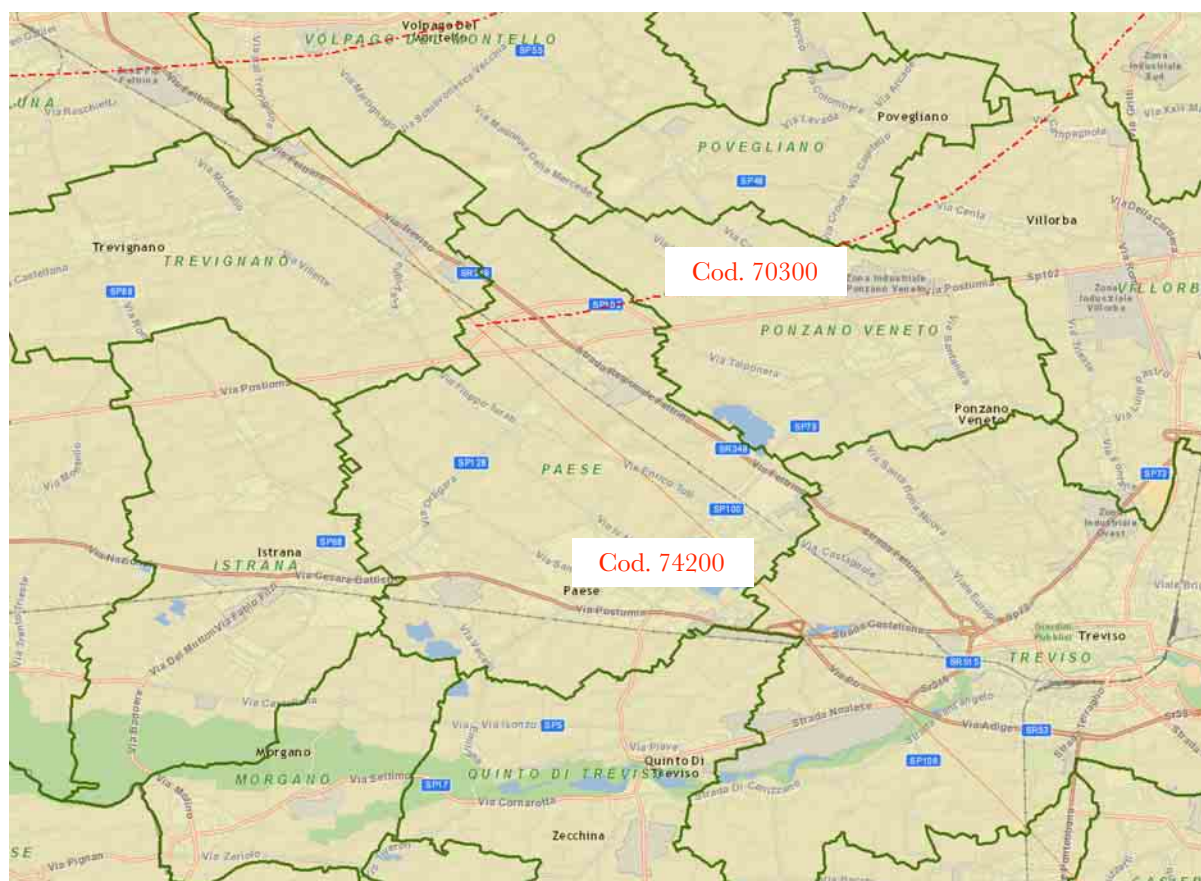
4.2 - Faglie capaci e sorgenti sismogenetiche

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 Paese, si è fatto riferimento agli studi condotti dagli esperti scientifici e riportate nei cataloghi ITHACA e DISS 3.1.1.

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 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 individuare una serie di faglie, ubicabili indicativamente come nella figura sotto riportata (immagine estratta dal sito dell'ISPRA).



La figura appena riportata evidenzia, altresì, che nel territorio comunale sono presenti due faglie attive; nelle tabelle sottostanti, sono riportate le informazioni desunte dalle schede specifiche ITHACA per tali lineamenti.

Nome faglia	Montebelluna	Montello Line
Tipo faglia	Non definita	Inversa
Codice faglia	74200	70300
Macrozona	2	2
Regione	Veneto	Veneto
Sistema	Montebelluna	Montello Line
Ordine		Primaria
Direzione media	140	240
Immersione	0	0
Lunghezza (Km)	60	80
Profondità (Km)		
Ultima attività	Olocene (<10.000)	Olocene (<10.000)
Affidabilità dato	Bassa	Media
Intervallo ricorrente (anni)		750
Velocità mov. (mm/anno)	0	1.9
Max lunghezza di rottura (m)	0	1000
Max scivolamento (m)	0	2000000
Max magnitudo attesa (MW)		6
Qualità dello studio	Basso	Fair

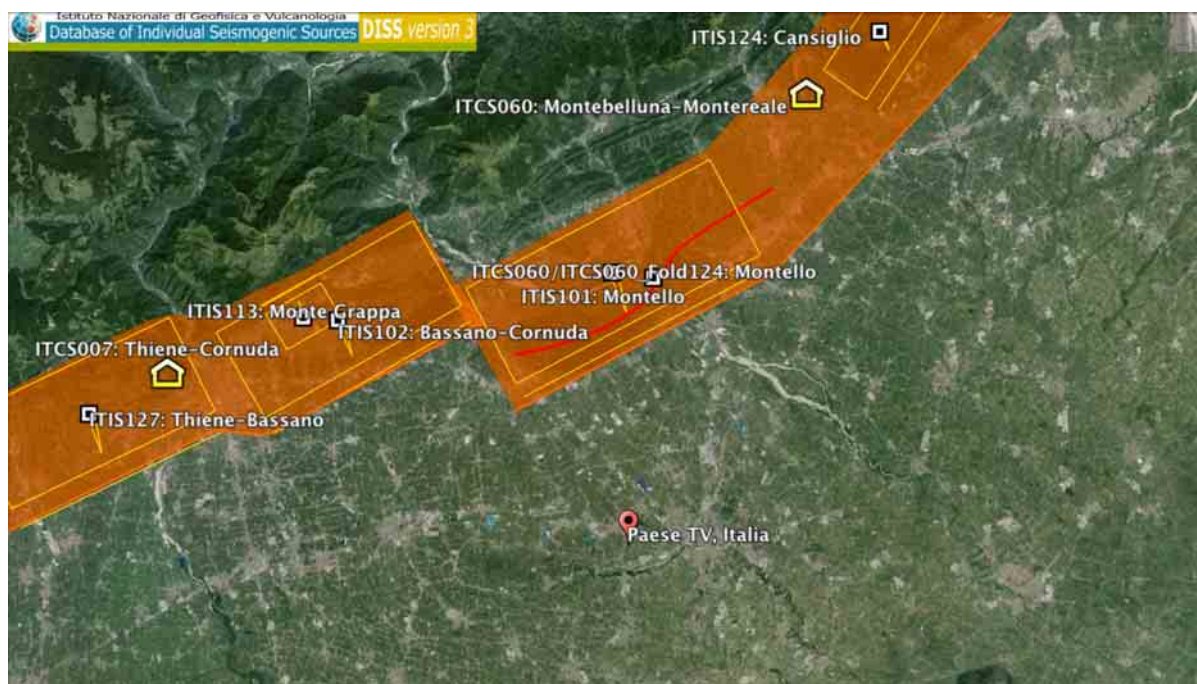
La mappa dell'INGV riportata di seguito, denominata DISS 3.1.1 (*Database of Individual Seismogenic Sources – DISS Version 3*), mostra tre tipologie di sorgenti sismogenetiche.

- **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 posiziona il comune di Paese a circa 12 Km a sud della zona ITIS101 “Montello”, sintetizzata nella tabella seguente.

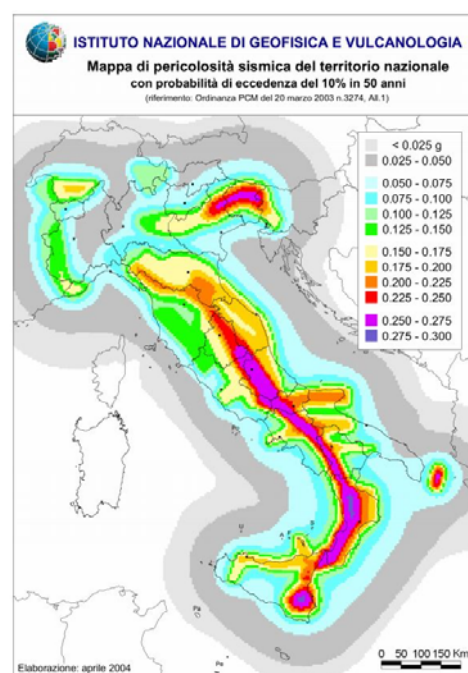
Minima profondità (km)	1
Massima profondità (km)	8.2
Direzione (°)	242
Inclinazione (°)	40

Rake (°)	80
Velocità di movimento (mm/anno)	0.47 - 1.56
Ricorrenza (anni)	513-1702
Magnitudo massima (MW)	6.5



4.3 - Zonazione sismica nazionale

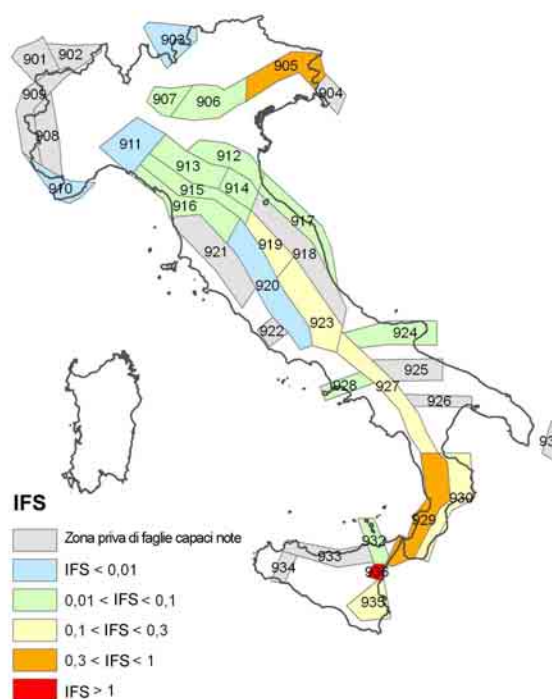
In seguito all'emanazione dell'O.P.C.M. 20/03/2003, n°3274, in cui si manifestava l'esigenza di una mappa di pericolosità sismica di riferimento per l'individuazione delle zone sismiche sul territorio nazionale, è stato redatto a cura dell'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) un documento 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).



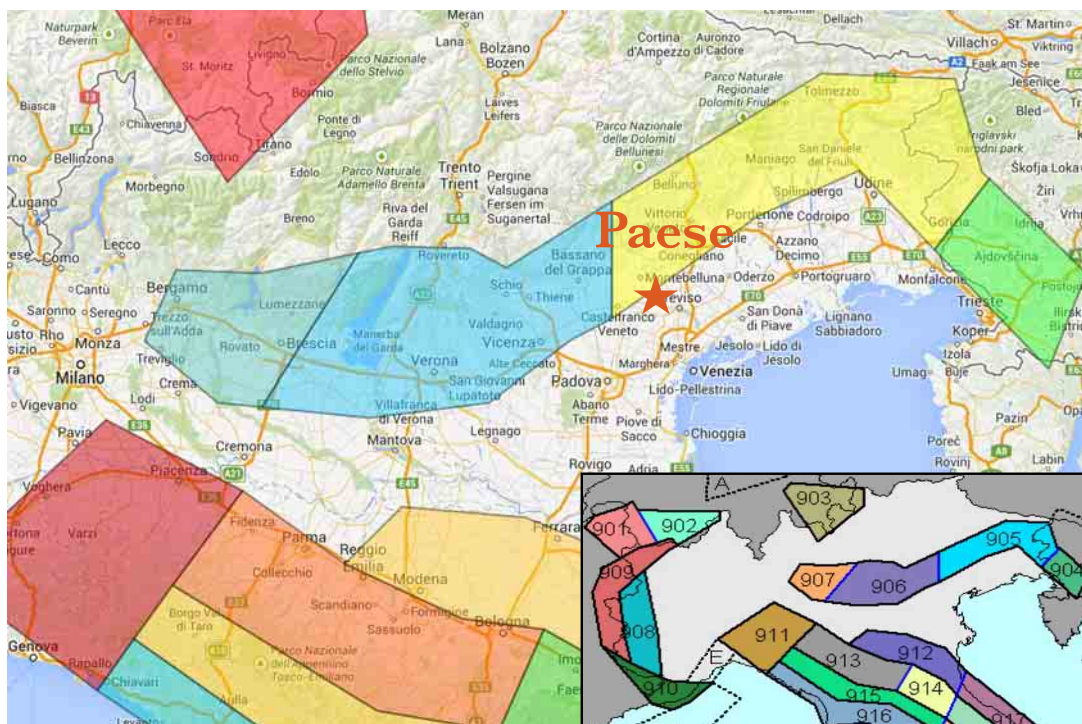
All'interno della ricerca eseguita per tale redazione, è stata elaborata una nuova zonazione sismogenetica, denominata ZS9 che divide tutto il territorio italiano in 36 zone. Tale zonazione è stata condotta tramite l'analisi cinematica degli elementi geologici (cenozoici e quaternari) coinvolti nella 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 CPTI2, ora arrivato alla versione CPTI11). 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.

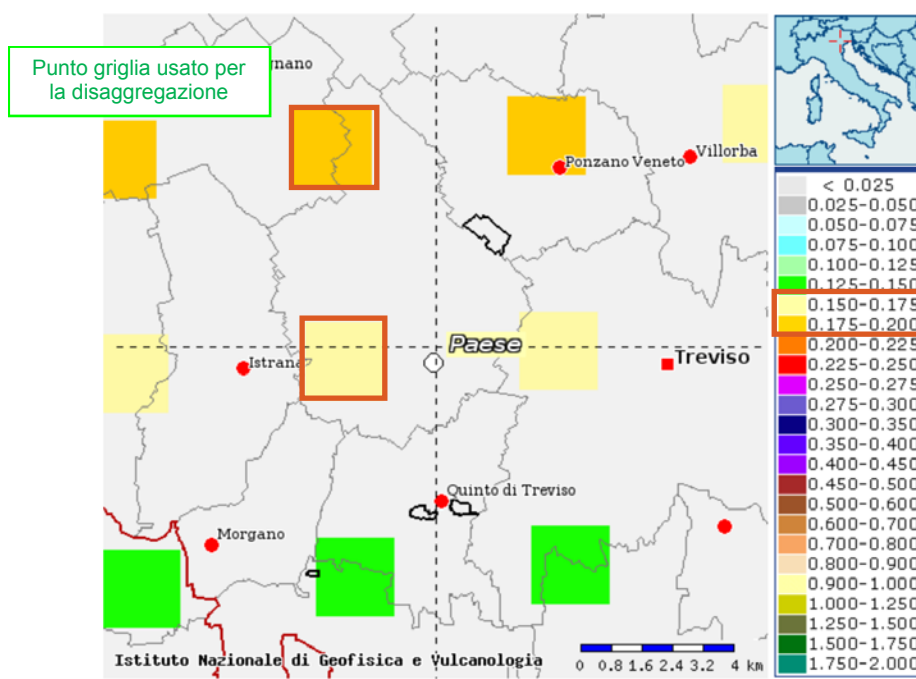


Il comune di Paese si colloca a ridosso della zona sismogenetica n°905 della figura seguente, per cui si sviluppa all'interno dell'area di massima convergenza tra la placca adriatica e quella europea, caratterizzata da faglie trascorrenti destre con direzione nord ovest-sud est (*trend* dinarico) (es.,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



4.4 - 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 Paese, sono riportati i valori di accelerazione orizzontale massima al suolo a_g con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi subpianeggianti di categoria A.



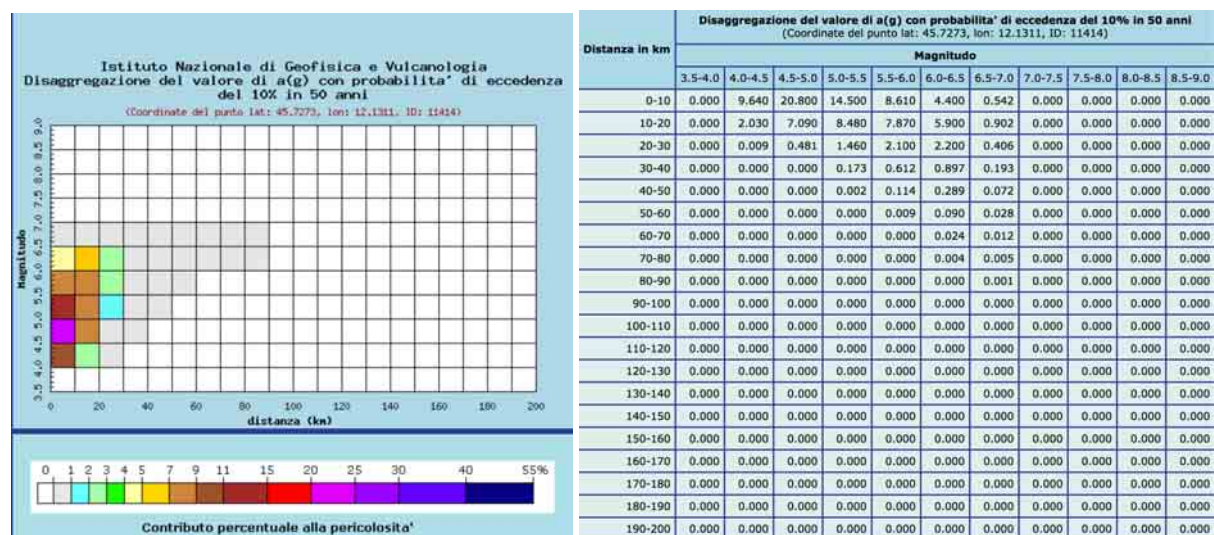
Pertanto, secondo l'O.P.C.M. n°3519 del 28/04/2006, la cui applicazione è stata definita dalla Regione Veneto con D.G.R.V. n°71 del 22/01/2008 e considerata nell'emanazione del D.M. 14/01/2008, il territorio oggetto dello studio di MS è inseribile interamente nella fascia distinta da un valore di accelerazione sismica orizzontale a_g riferito a suoli rigidi subpianeggianti caratterizzati da $V_{s30} > 800$ m/s compreso tra 0,150g e 0,200g (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.

Per gli aspetti amministrativi, tuttavia, il comune di Paese rientra in Zona 3, come classificato nell'elenco (allegato I) della Delibera di Consiglio Regionale n°67/03 (cfr. D.G.R.V. n°71 del 22/01/2008).

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 $V_{s30} > 800$ 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

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).



Si fa comunque presente che, come tutte le zone sismogenetiche del territorio italiano, anche quella contrassegnata al 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 e, in rapporto agli epicentri noti, non esisterebbe quindi l'effetto distanza.

Secondo il paragrafo 2.8 degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, per alcune tipologie di verifiche si potrebbe assumere come valore di magnitudo attesa quella massima della zona sismogenetica di appartenenza, che per la zona n°905 in cui il territorio di Paese risulta prossimo 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 o *effetti di sito*, ossia nelle differenti risposte del sito alle azioni sismiche, a causa delle diverse condizioni geologiche, geomorfologiche e geotecniche.

Una efficace cultura di difesa dai terremoti non può che presupporre 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 a 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 e 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 di sito*, che sono ormai ben conosciuti e possono amplificare notevolmente le sollecitazioni nelle strutture (di entità tale da portarle fino al collasso) o 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.



Le osservazioni condotte nei secoli hanno dimostrato come possono verificarsi situazioni completamente differenti all'interno dello stesso territorio, anche a breve distanza; fin dagli anni settanta, le ricerche scientifiche hanno evidenziato che la causa maggiore di variabilità spaziale del moto sismico sono i fenomeni legati alla propagazione delle onde S nei depositi di terreno, lungo la direzione verticale.

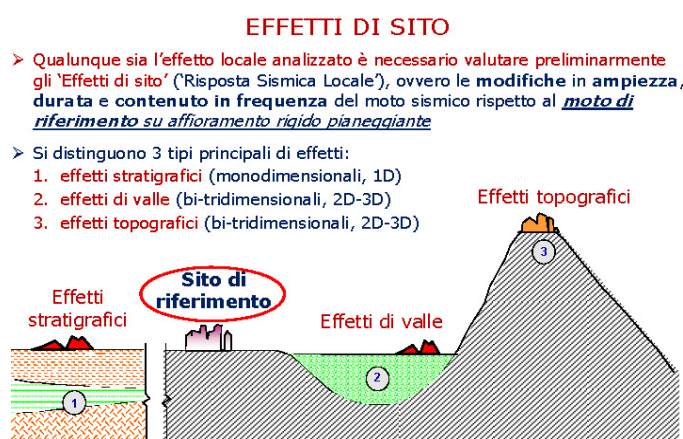
Da tali osservazioni è nata la necessità di iniziare degli studi per ipotizzare il comportamento del territorio in caso di terremoto e, di conseguenza, per valutare la *pericolosità sismica locale* e realizzare la MS, precedentemente definita.

La MS può assumere forme molto diverse a seconda delle condizioni territoriali in cui si realizza 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 A di sottosuolo 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 in cui sono presenti o suscettibili di attivazione fenomeni di deformazione permanente del territorio indotti o innescati 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 verificarsi o meno *effetti di sito* (stratigrafici, di valle, topografici, ecc.);



- **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.

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 2 come previsto nella D.G.R. 1572 del 3 settembre 2013 e dalle Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica, nell'ambito del piano di lottizzazione di via Asiago - ATR/27.

Sono state condotte alcune misure sperimentali di tipo sismico per quantificare correttamente il grado di rigidità del sottosuolo e le frequenze di risonanza del sito al fine di ottenere il fattore di amplificazione tramite l'utilizzo degli abachi nazionali. Per valutare la reale applicabilità di tali abachi si è ritenuto opportuno condurre una modellizzazione numerica avanzata monodimensionale in campo dinamico, propria del Livello 3.

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. comunale, della MS di Livello 1 e di alcune indagini di carattere geologico eseguite per la progettazione di opere civili.

A seguire vengono riportate le prove penetrometriche dinamiche pesanti effettuate nell'area oggetto d'indagine dal Geol. Bernardi, a supporto della relazione di compatibilità geologica, geomorfologica e idrogeologica. Inoltre, si è ritenuto opportuno inserire la stratigrafia del pozzo per acqua prossimo all'area e riportato nello studio di MS di Livello 1.

Prove penetrometriche

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA					n°		1	
					riferimento	053-14		
LETTURE DI CAMPAGNA PUNTA E/O TOTALE					certificato n°			
Committente: SEVERIN COSTRUZIONI GEN.					U.M.: kg/cm²		Data esec.: 07/03/2014	
Cantiere: PDL "Via Asiago" loc.Sovernigo					Pagina: 1		Data certificato: 07/03/2014	
Località: Paese (tv)					Elaborato:		Preforo: m	
					Falda:			
</								

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA						n° 2																																																																																																																																																														
						riferimento		053-14																																																																																																																																																												
						certificato n°																																																																																																																																																														
LETTURE DI CAMPAGNA PUNTA E/O TOTALE																																																																																																																																																																				
Committente: SEVERIN COSTRUZIONI GEN.						U.M.: kg/cm²		Data esec.: 07/03/2014																																																																																																																																																												
Cantiere: PDL "Via Asiago" loc.Sovernigo						Pagina: 1		Data certificato: 07/03/2014																																																																																																																																																												
Località: Paese (tv)						Elaborato:		Preforo: m Falda:																																																																																																																																																												
<table><tr><th>H m</th><th>Asta n°</th><th>L1 n°</th><th>L2 n°</th><th>qcd kg/cm²</th></tr><tr><td>0,20</td><td>1</td><td>2</td><td></td><td>21,57</td></tr><tr><td>0,40</td><td>1</td><td>3</td><td></td><td>32,36</td></tr><tr><td>0,60</td><td>2</td><td>5</td><td></td><td>53,93</td></tr><tr><td>0,80</td><td>2</td><td>7</td><td></td><td>75,50</td></tr><tr><td>1,00</td><td>2</td><td>8</td><td></td><td>79,38</td></tr><tr><td>1,20</td><td>2</td><td>15</td><td></td><td>148,84</td></tr><tr><td>1,40</td><td>2</td><td>17</td><td></td><td>168,68</td></tr><tr><td>1,60</td><td>3</td><td>16</td><td></td><td>158,76</td></tr><tr><td>1,80</td><td>3</td><td>15</td><td></td><td>148,84</td></tr><tr><td>2,00</td><td>3</td><td>9</td><td></td><td>82,69</td></tr><tr><td>2,20</td><td>3</td><td>9</td><td></td><td>82,69</td></tr><tr><td>2,40</td><td>3</td><td>11</td><td></td><td>101,06</td></tr><tr><td>2,60</td><td>4</td><td>10</td><td></td><td>91,88</td></tr><tr><td>2,80</td><td>4</td><td>10</td><td></td><td>91,88</td></tr><tr><td>3,00</td><td>4</td><td>7</td><td></td><td>59,68</td></tr><tr><td>3,20</td><td>4</td><td>11</td><td></td><td>94,09</td></tr><tr><td>3,40</td><td>4</td><td>13</td><td></td><td>111,20</td></tr><tr><td>3,60</td><td>5</td><td>16</td><td></td><td>136,86</td></tr><tr><td>3,80</td><td>5</td><td>18</td><td></td><td>153,97</td></tr><tr><td>4,00</td><td>5</td><td>19</td><td></td><td>152,04</td></tr><tr><td>4,20</td><td>5</td><td>21</td><td></td><td>168,04</td></tr><tr><td>4,40</td><td>5</td><td>23</td><td></td><td>184,05</td></tr><tr><td>4,60</td><td>6</td><td>27</td><td></td><td>216,05</td></tr><tr><td>4,80</td><td>6</td><td>19</td><td></td><td>152,04</td></tr><tr><td>5,00</td><td>6</td><td>17</td><td></td><td>127,79</td></tr><tr><td>5,20</td><td>6</td><td>16</td><td></td><td>120,27</td></tr><tr><td>5,40</td><td>6</td><td>28</td><td></td><td>210,48</td></tr><tr><td>5,60</td><td>7</td><td>31</td><td></td><td>233,03</td></tr><tr><td>5,80</td><td>7</td><td>39</td><td></td><td>293,16</td></tr></table>					H m	Asta n°	L1 n°	L2 n°	qcd kg/cm²	0,20	1	2		21,57	0,40	1	3		32,36	0,60	2	5		53,93	0,80	2	7		75,50	1,00	2	8		79,38	1,20	2	15		148,84	1,40	2	17		168,68	1,60	3	16		158,76	1,80	3	15		148,84	2,00	3	9		82,69	2,20	3	9		82,69	2,40	3	11		101,06	2,60	4	10		91,88	2,80	4	10		91,88	3,00	4	7		59,68	3,20	4	11		94,09	3,40	4	13		111,20	3,60	5	16		136,86	3,80	5	18		153,97	4,00	5	19		152,04	4,20	5	21		168,04	4,40	5	23		184,05	4,60	6	27		216,05	4,80	6	19		152,04	5,00	6	17		127,79	5,20	6	16		120,27	5,40	6	28		210,48	5,60	7	31		233,03	5,80	7	39		293,16	<table><tr><th>H m</th><th>Asta n°</th><th>L1 n°</th><th>L2 n°</th><th>qcd kg/cm²</th></tr></table>					H m	Asta n°	L1 n°	L2 n°	qcd kg/cm²
H m	Asta n°	L1 n°	L2 n°	qcd kg/cm²																																																																																																																																																																
0,20	1	2		21,57																																																																																																																																																																
0,40	1	3		32,36																																																																																																																																																																
0,60	2	5		53,93																																																																																																																																																																
0,80	2	7		75,50																																																																																																																																																																
1,00	2	8		79,38																																																																																																																																																																
1,20	2	15		148,84																																																																																																																																																																
1,40	2	17		168,68																																																																																																																																																																
1,60	3	16		158,76																																																																																																																																																																
1,80	3	15		148,84																																																																																																																																																																
2,00	3	9		82,69																																																																																																																																																																
2,20	3	9		82,69																																																																																																																																																																
2,40	3	11		101,06																																																																																																																																																																
2,60	4	10		91,88																																																																																																																																																																
2,80	4	10		91,88																																																																																																																																																																
3,00	4	7		59,68																																																																																																																																																																
3,20	4	11		94,09																																																																																																																																																																
3,40	4	13		111,20																																																																																																																																																																
3,60	5	16		136,86																																																																																																																																																																
3,80	5	18		153,97																																																																																																																																																																
4,00	5	19		152,04																																																																																																																																																																
4,20	5	21		168,04																																																																																																																																																																
4,40	5	23		184,05																																																																																																																																																																
4,60	6	27		216,05																																																																																																																																																																
4,80	6	19		152,04																																																																																																																																																																
5,00	6	17		127,79																																																																																																																																																																
5,20	6	16		120,27																																																																																																																																																																
5,40	6	28		210,48																																																																																																																																																																
5,60	7	31		233,03																																																																																																																																																																
5,80	7	39		293,16																																																																																																																																																																
H m	Asta n°	L1 n°	L2 n°	qcd kg/cm²																																																																																																																																																																

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA **LETTURE DI CAMPAGNA PUNTA E/O TOTALE**

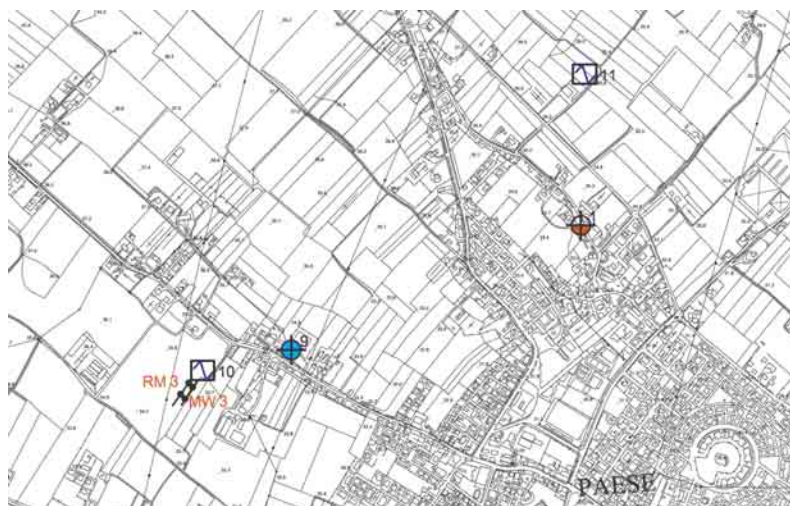
n° **3**
 riferimento 053-14
 certificato n°

Committente: **SEVERIN COSTRUZIONI GEN.**
 Cantiere: **PDL "Via Asiago" loc. Sovernigo**
 Località: **Paese (tv)**

U.M.: **kg/cm²** Data exec.: **07/03/2014**
 Pagina: **1** Data certificato: **07/03/2014**
 Elaborato: **Falda:**

H m	Asta n°	L1 n°	L2 n°	qcd kg/cm²	H m	Asta n°	L1 n°	L2 n°	qcd kg/cm²
0,20	1	1		10,79					
0,40	1	2		21,57					
0,60	1	2		21,57					
0,80	1	2		32,35					
1,00	1	2		19,85					
1,20	1	4		39,69					
1,40	1	5		49,61					
1,60	1	2		19,85					
1,80	1	1		9,92					
2,00	1	5		45,94					
2,20	1	8		73,50					
2,40	1	6		55,13					
2,60	4	5		45,94					
2,80	4	7		64,31					
3,00	4	7		59,88					
3,20	4	6		51,32					
3,40	4	5		42,77					
3,60	5	10		85,54					
3,80	5	12		102,65					
4,00	5	13		104,03					
4,20	5	17		136,03					
4,40	5	23		184,05					
4,60	5	21		168,04					
4,80	5	19		152,04					
5,00	5	27		202,96					
5,20	5	33		248,06					

Pozzo per acqua



Committente:	COMUNE DI PAESE	POZZI PER ACQUA	FOGLIO
Cantiere:	Pozzo Acquedottistico	S9	
Località:	VIA S.LUCA	Il geologo	
Data Inizio		Data Fine	

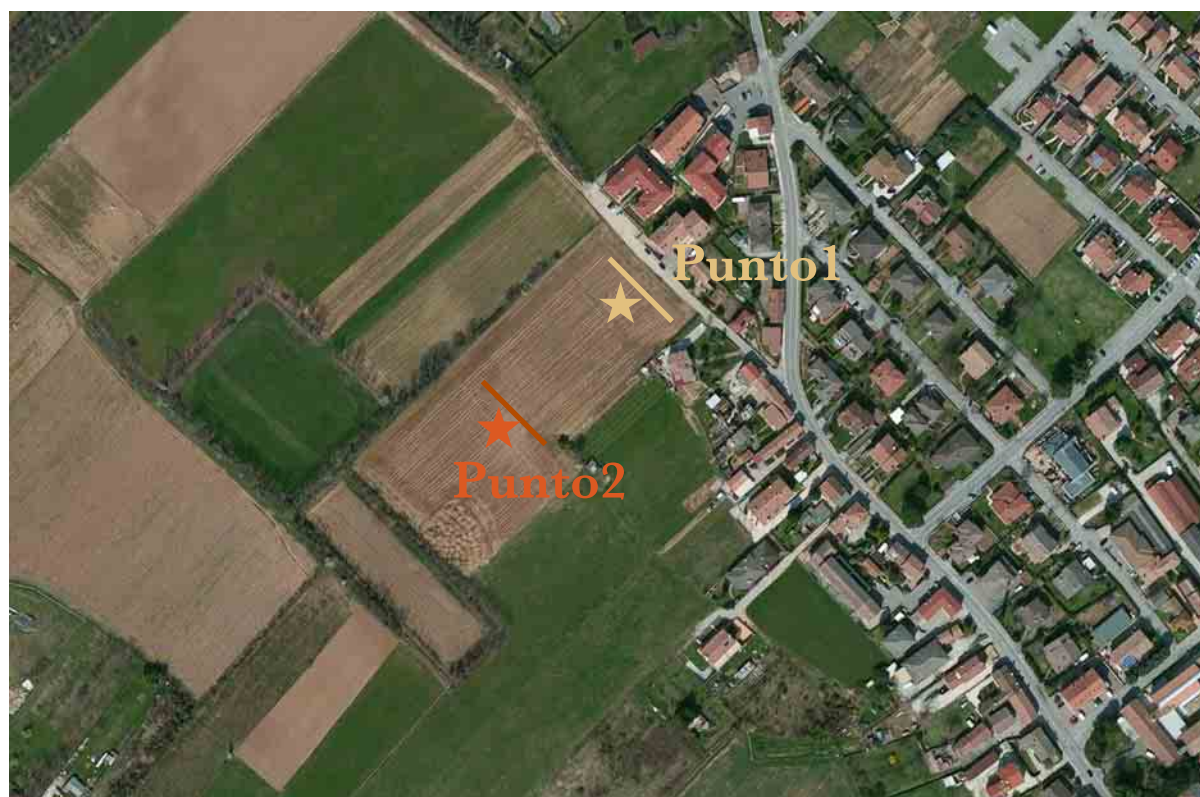
Scaia 1:750	Sinagrafia	Descrizione	Potenza	Profondità
7		TERRENO VEGETALE	1,00	1,00
14		GHIAIA SABBIOSA	2,50	3,50
21		GHIAIA POCO SABBIOSA		
25		GHIAIA CON STRATI DI CONGLOMERATO	18,00	21,50
35		GHIAIA SABBIOSA	7,50	29,00
42		ARGILLA GIALLA	6,50	35,50
45		GHIAIA CON GROSSI CIOTTOLI	1,40	36,70
48		GHIAIA COMPATTA CON CONGLOMERATO	7,30	44,00
56			20,50	
63				
70		GHIAIA MEDIA	8,70	64,50
				73,20

Al fine di caratterizzare dal punto di vista sismico i terreni dell'area indagata, sono state condotte alcune misure geofisiche in prossimità dei punti ritenuti più significativi. In particolare, sono state effettuate:

- **n.2 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 (stelle nella foto sotto riportata);
- **n.2 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 (linee nella foto sotto riportata).

L'ubicazione dell'area è stata ottenuta, secondo i Datum WGS 84 e ED 50, utilizzando un posizionatore GPS: le coordinate ottenute sono specificate nella tabella sottostante. Nella figura seguente sono invece riportate, in dettaglio, le posizioni di ogni misura effettuata.

Latitudine	Longitudine
45.683187°N (WGS-84)	12.155374°E (WGS-84)
45.684089°N (ED-50)	12.156368°E (ED-50)



6.2 - Metodologia di elaborazione e risultati delle nuove indagini

6.2.1. - Indagine 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 caratteristica 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 microtremiti. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

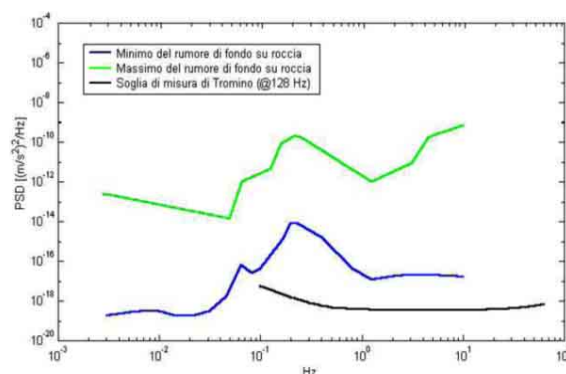
- ! " dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s ;
- ! " dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
- ! " dalla risposta dello strumento.

Possiamo scrivere questo come:

$$\text{segnale registrazione al sito } x = \text{sorgente} * \text{effetti di percorso} * \text{funzione trasferimento strumento}$$

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® ENG-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 sotto riportata 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.

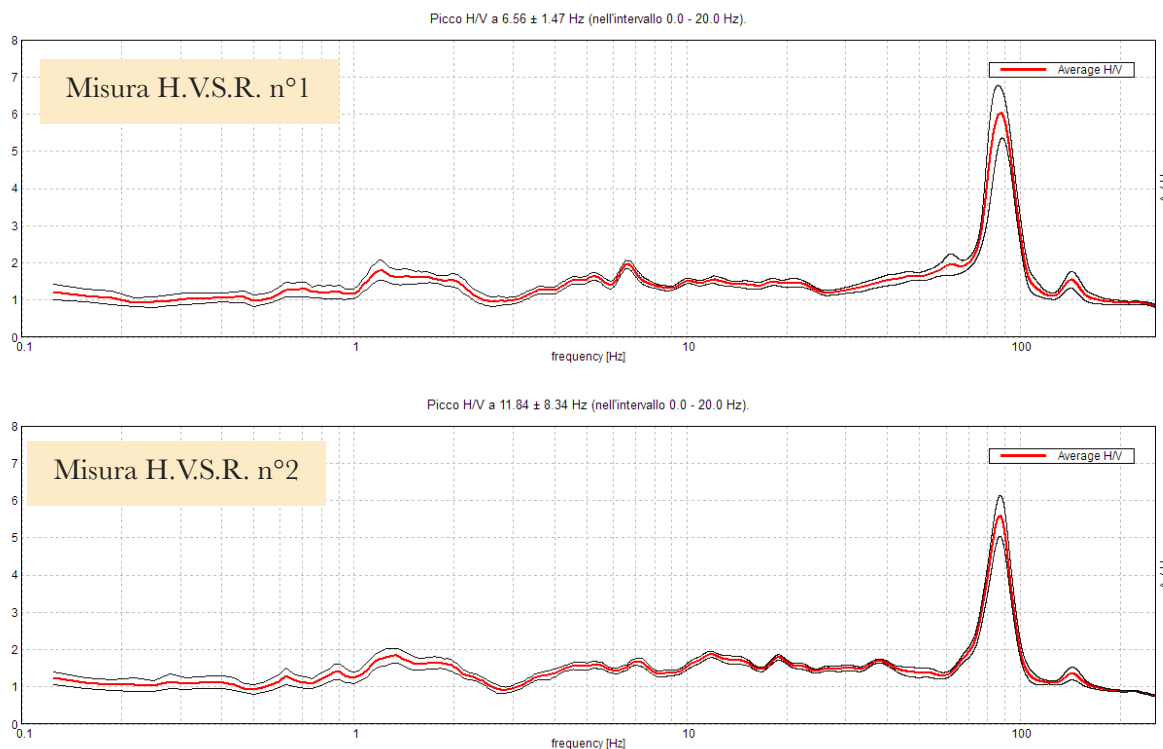


6.2.1.1 Sintesi dei risultati

Le frequenze fondamentali 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.

In particolare, le misure condotte hanno evidenziato l'assenza di contrasti sismici nel sottosuolo tali da poter generare, in occasione di eventi sismici di magnitudo rilevante, marcate amplificazioni del moto ad eccezione di una discontinuità presente a circa 1-2 Hz caratterizzata, comunque, da un basso rapporto H/V (circa 2).



6.2.2. - Indagini sismica passiva 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 classificata 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°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. Tutti gli stendimenti eseguiti non presentavano sostanziali variazioni di quota e, quindi, i siti indagati sono stati considerati a sviluppo orizzontale.

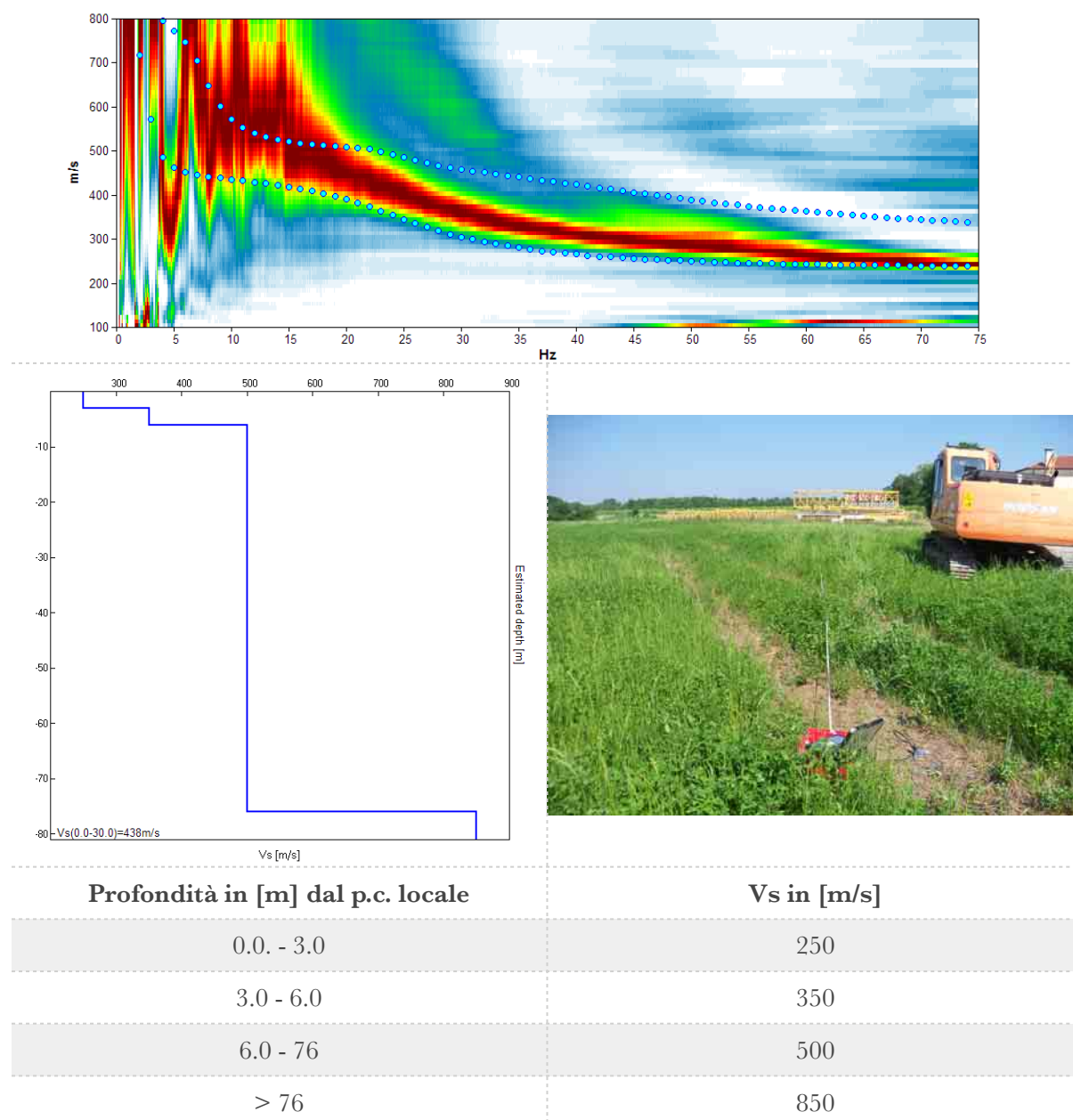


6.2.2.1 - Sintesi dei risultati

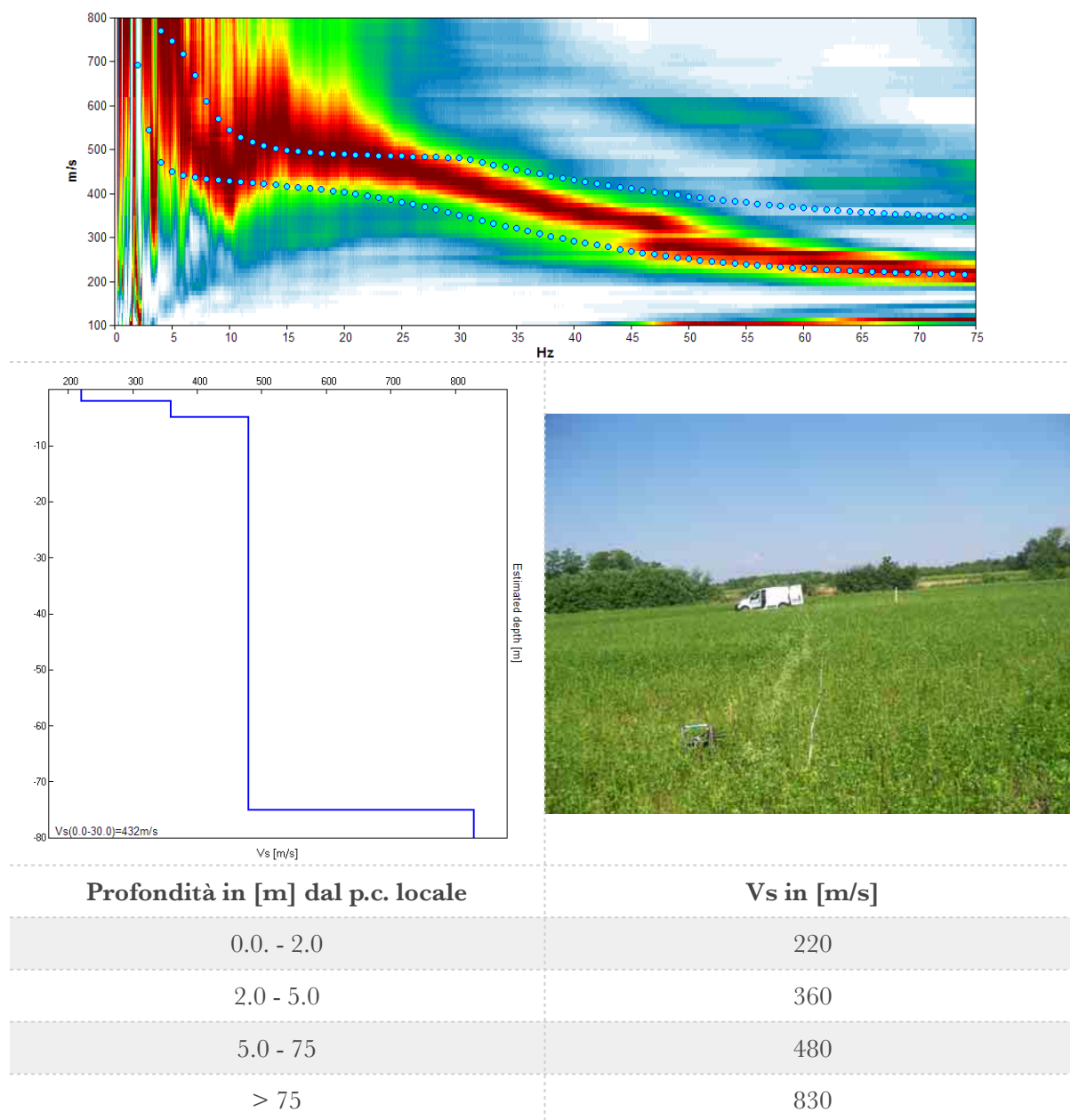
In questo paragrafo è riportata esclusivamente la sintesi dei risultati ottenuti dall'analisi congiunta degli *array* sismici e degli H.V.S.R. accoppiati ad essi.

Nelle figure seguenti vengono riportati i profili verticali delle onde di taglio (V_s) e le curve di dispersione associate.

Misura sismica Re.Mi. n°1 e H.V.S.R. n°1



Misura sismica Re.Mi. n°2 e H.V.S.R. n°2



La ricostruzione sismo-stratigrafica di sito ha evidenziato la presenza di un materiale moderatamente addensato già nell'immediato sottosuolo ($V_s \approx 220 - 360$ m/s) mentre per valori di profondità maggiori di 5.0-6.0 m dal p.c. locale la velocità di propagazione delle onde S si stabilizza a circa 480-500 m/s.

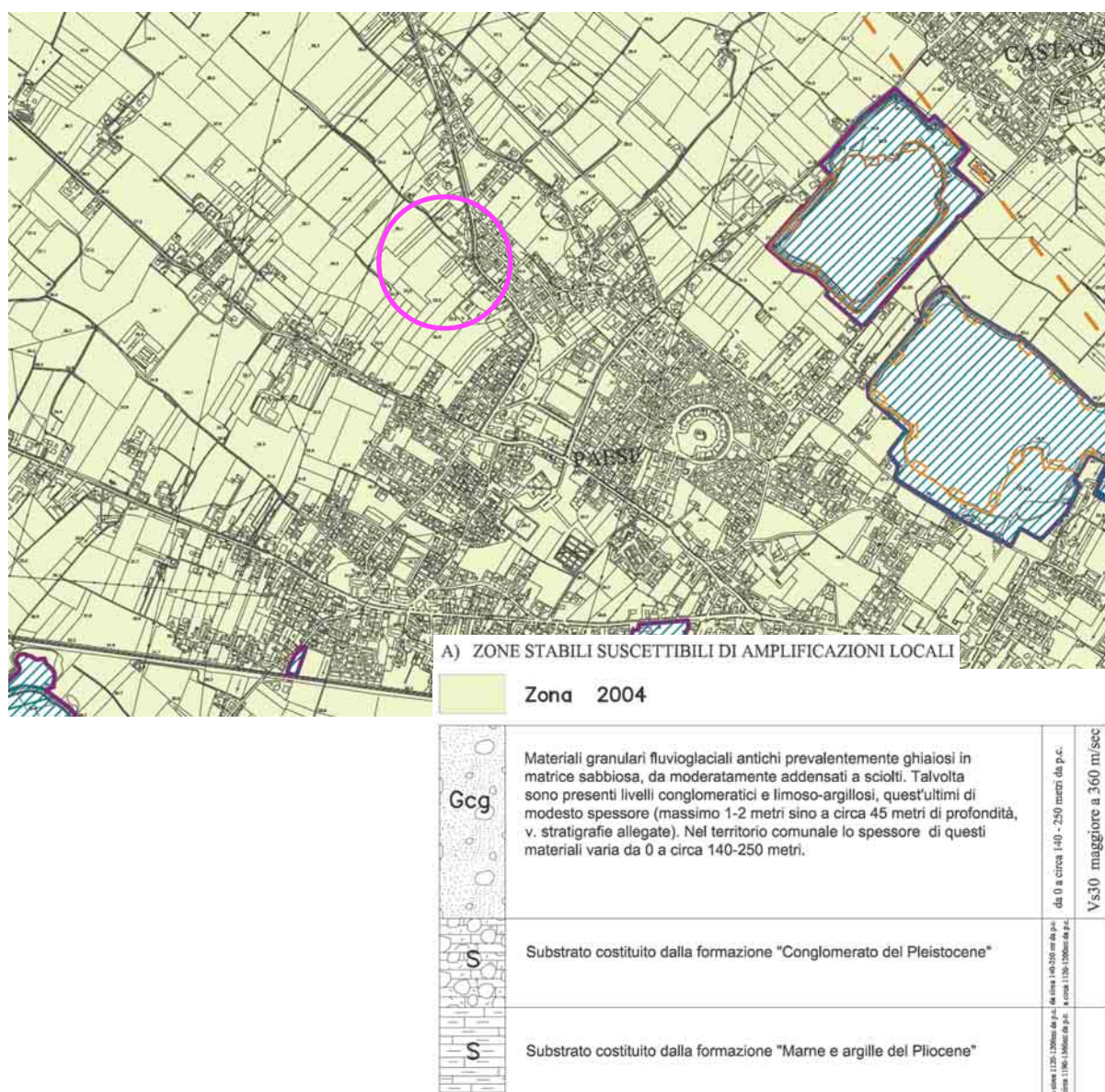
Il *bedrock* geofisico ($V_s \approx 830 - 850$ m/s), inteso come quel materiale che presenta una $V_s \geq 800$ m/s, è stato individuato a una profondità di circa 75 m dal p.c. locale.

7 - Microzonazione sismica di Livello 2

7.1 - Generalità

La MS di Livello 2 si applica a tutte le parti del territorio suscettibili di amplificazione sismica individuate nella precedente fase (Livello 1) e per le quali si prevedono trasformazioni urbanistiche del territorio o incremento dei carichi urbanistici, e per il territorio compreso nel perimetro del centro abitato e lungo le fasce delle nuove reti infrastrutturali, così come previsto dalla normativa vigente.

In particolare, lo studio di Livello 1 definisce la zona d'indagine come **stabile suscettibile di amplificazione sismica** per motivi stratigrafici escludendo in tal modo qualsiasi forma di instabilità e di amplificazione topografica. A seguire si riporta un estratto della Carta delle Microzone Omogenee per la Microzonazione Sismica, dell'area oggetto d'indagine.



Le Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica prevedono la realizzazione, al Livello 1 di approfondimento, 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.

Anche se tale carta non è stata realizzata, è possibile attribuire all'area oggetto d'indagine una **pericolosità P4a** così descritta:

P4 : Zone suscettibili ad amplificazioni litologiche e geometriche

P4a	Zona di fondovalle ampie e di pianura con depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi
------------	---

Inoltre, 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. 2 nelle Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica) si constata che l'analisi di Livello 2 per l'area d'indagine sarà finalizzata a quantificare gli effetti amplificati del moto sismico in superficie per effetto litologico.

PROCEDURA DI MICROZONAZIONE SISMICA								
SIGLA	SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	Verifica di assoggettabilità	(soglia)	1°livello	(soglia)	2°livello	(soglia)	3°livello
P1a	Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi				cartografia			Analisi stabilità
P1b	Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti				cartografia			Analisi stabilità
P1c	Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana				cartografia	Analisi di stabilità	Fs prossimo a 1	Analisi stabilità
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	ABITATP 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	ABITATP PREV.URBAN.* Liquefazione Eventuale verifica	PREV.URBAN.*	Liquefazione
P2c	Zona caratterizzata da coltri di terreno di riporto o che hanno subito riempiimenti antropici	zona 4 pga>0,100 zona 3 pga<0,100	pga di sito >0,125		raccolta dati - cartografia	ABITATP PREV.URBAN.* Cedimenti	PREV.URBAN.*	Cedimenti
P3a	Linea di ciglio H>10 m (scarpata, bordo di cava, ricchia di cava, orlo di terrazzo 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 a>15°	Effetti topografici		
P4a	Zona di fondovalle ampie e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi				Vs30<800m/s, C<0,25 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, conoide alluvionale e conoide 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 cavità sotterranee o sinkhole				cartografia			Comportamenti differenziali

7.2 - Stima dei fattori di amplificazione FA e 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, per gli scenari P3 e P4 la quantificazione numerica degli effetti sarà rappresentata dai fattori amplificativi FA (fattore di amplificazione a basso periodo in termini di accelerazione) e FV (fattore di amplificazione a periodo proprio in termini di pseudo 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 pseudovelocità.

Al fine di quantificare il fattore di amplificazione è necessario assegnare all'area una delle classi dei terreni di copertura sotto riportate. Il piano di lottizzazione ubicato in via Asiago sembra essere collocato prevalentemente a cavallo della classe 2a e 3a con locali intrusioni di materiale poco addensato.

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	

Come riportato nelle linee guida regionali, l'adozione e l'utilizzo della 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 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 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 linearmente con la massima pendenza compatibile con il valore di V_{SH} , e variabile linearmente 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 linearmente 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 le tabelle relative ad un valore di $a_g=0,18$, un profilo di velocità con pendenza intermedia e una litologia prevalentemente ghiaiosa. Infine, le profondità H del *bedrock* geofisico ($V_s = 800$ m/s) e le V_s equivalenti della copertura (V_{SH}), sono state estrapolate dai risultati ottenuti dalle prove geofisiche realizzate *ex-novo*.

Parametri di ingresso	FA	FV
Ghiaie		
0,18g		
Profilo lineare di velocità con pendenza intermedia	1.27	1.60
Profondità bedrock sismico = 75 m		
$V_{SH} = 459$ m/s (ReMi 1 e HVSR 1)		
$V_{SH} = 475$ m/s (ReMi 2 e HVSR 2)		

Fattore di amplificazione		Tipo di terreno		a_g (g)		Profilo di velocità					
FA		Ghiaia		0.18g		Lineare pendenza intermedia					
		V_m (m/s)									
		150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
H	5	2.47	1.91	1.70	1.51	1.30	1.16	1.09	1.05	1.02	1.01
	10	-	2.39	2.14	1.79	1.56	1.38	1.26	1.18	1.08	1.03
	15	-	2.22	2.19	1.99	1.78	1.58	1.43	1.30	1.14	1.05
	20	-	1.90	2.08	1.99	1.80	1.65	1.50	1.38	1.19	1.07
	25	-	1.63	1.87	1.90	1.77	1.65	1.51	1.41	1.23	1.09
	30	-	1.57	1.68	1.73	1.71	1.61	1.51	1.40	1.22	1.10
	35	-	-	1.62	1.65	1.59	1.57	1.47	1.38	1.22	1.09
	40	-	-	1.60	1.59	1.53	1.47	1.43	1.35	1.21	1.09
	50	-	-	1.47	1.52	1.46	1.38	1.33	1.27	1.17	1.07
	60	-	-	1.37	1.47	1.42	1.35	1.29	1.23	1.13	1.04
	70	-	-	1.25	1.34	1.38	1.32	1.27	1.21	1.10	1.01
	80	-	-	1.13	1.26	1.29	1.29	1.23	1.19	1.08	1.00
	90	-	-	1.11	1.20	1.24	1.25	1.22	1.17	1.07	0.99
	100	-	-	1.02	1.13	1.19	1.19	1.19	1.15	1.06	0.98
	110	-	-	0.98	1.11	1.15	1.17	1.14	1.13	1.04	0.97
120	-	-	0.92	1.06	1.11	1.11	1.12	1.09	1.03	0.96	
130	-	-	0.87	1.00	1.08	1.09	1.09	1.06	1.02	0.95	
140	-	-	0.85	0.96	1.04	1.06	1.07	1.05	0.99	0.94	
150	-	-	0.80	0.92	1.00	1.02	1.04	1.02	0.97	0.93	

Fattore di amplificazione		Tipo di terreno		a_g (g)		Profilo di velocità					
FV		Ghiaia		0.18g		Lineare pendenza intermedia					
		V_m (m/s)									
		150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
H	5	1.25	1.10	1.06	1.03	1.02	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00
	10	-	1.73	1.22	1.12	1.08	1.05	1.04	1.03	1.01	1.00
	15	-	2.36	1.73	1.36	1.18	1.12	1.08	1.06	1.03	1.01
	20	-	2.70	2.15	1.66	1.38	1.21	1.14	1.10	1.05	1.02
	25	-	2.72	2.36	1.94	1.58	1.37	1.22	1.15	1.07	1.03
	30	-	2.67	2.51	2.07	1.74	1.50	1.33	1.21	1.10	1.04
	35	-	-	2.50	2.21	1.83	1.59	1.41	1.28	1.12	1.04
	40	-	-	2.44	2.25	1.93	1.66	1.47	1.33	1.15	1.05
	50	-	-	2.34	2.19	1.98	1.78	1.59	1.42	1.20	1.08
	60	-	-	2.19	2.11	1.95	1.76	1.61	1.47	1.23	1.09
	70	-	-	2.14	2.00	1.89	1.75	1.60	1.46	1.24	1.10
	80	-	-	1.99	1.96	1.81	1.69	1.58	1.46	1.26	1.11
	90	-	-	1.87	1.89	1.75	1.63	1.54	1.45	1.25	1.11
	100	-	-	1.85	1.81	1.72	1.59	1.50	1.41	1.25	1.11
	110	-	-	1.83	1.72	1.66	1.56	1.47	1.38	1.24	1.10
120	-	-	1.81	1.69	1.63	1.53	1.43	1.36	1.21	1.08	
130	-	-	1.76	1.67	1.55	1.50	1.41	1.33	1.20	1.06	
140	-	-	1.73	1.67	1.55	1.45	1.40	1.30	1.18	1.06	
150	-	-	1.71	1.65	1.53	1.41	1.36	1.28	1.16	1.05	

8 - Modellazioni numeriche di Livello 3

Per quantificare correttamente la risposta sismica di sito, in virtù del fatto che la procedura semplificata tramite abachi nazionali non risulta a volte corretta essendo stata creata tramite modelli che difficilmente riescono a riprodurre il comportamento dinamico dei terreni locali, è stata condotta una modellazione monodimensionale, propria del Livello 3 di approfondimento.

La simulazione ha considerato solo gli effetti amplificativi del moto sismico dovuti alla stratigrafia, in quanto si sono escluse quelle topografiche (territorio pianeggiante) e anche quelle derivanti da morfologie sepolte.

La tecnica di risoluzione numerica adoperata è stata quella alle differenze finite (FDM) implementata nel codice di calcolo FLAC 7.0 (Itasca, 2011), operante nel dominio del tempo. Il codice effettua un'analisi lagrangiana del continuo risolto mediante uno schema di avanzamento temporale di tipo esplicito.

Il risultato finale è rappresentato in una storia accelerometrica orizzontale attesa nel sito d'indagine e plottata in uno spettro di risposta elastico.

8.1 - Descrizione del metodo

Il codice di calcolo FLAC 2D v.7.0 (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) della Itasca (2011) 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:

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

dove:

- ! " ρ è la densità
- ! " x_j la componente j -esima del vettore posizione
- ! " $\dot{u}_i$ 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:

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

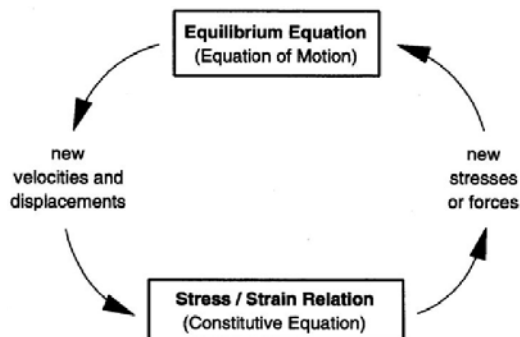
dove k è un parametro che tiene conto della storia di carico, M un funzionale ed $\dot{\epsilon}_{ij}$ il tensore velocità di deformazione espresso dalla:

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

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.

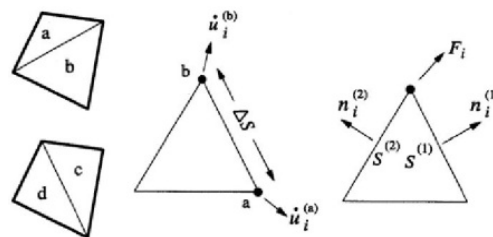
I metodi alle differenze finite come quelli agli elementi finiti traducono un sistema di equazioni differenziali come la (8.1) in un sistema di equazioni algebriche. Se i metodi agli elementi finiti hanno come punto centrale la definizione delle funzioni di forma, che descrivono la variazione delle grandezze 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:

- ! " $\mathbf{n}$ 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_s la lunghezza incrementale lungo il contorno S .

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

$$\frac{\partial \dot{\mathbf{u}}_i}{\partial \mathbf{x}_i} \cong \frac{1}{2A} \sum_s (\dot{\mathbf{u}}_i^{(a)} + \dot{\mathbf{u}}_i^{(b)}) \mathbf{n}_i \Delta s \quad (8.5)$$

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:

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

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:

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

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:

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

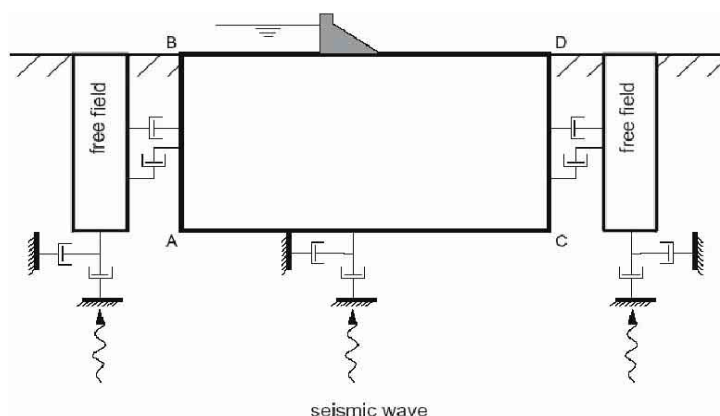
dove A è la superficie del subelemento triangolare, Δx_{max} la dimensione massima della zona (in genere la diagonale) e V_p la velocità delle onde di compressione. La funzione minimo è presa su tutte le zone. Il timestep critico è tanto più piccolo (e i tempi di calcolo quindi tanto più elevati) quanto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

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

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:

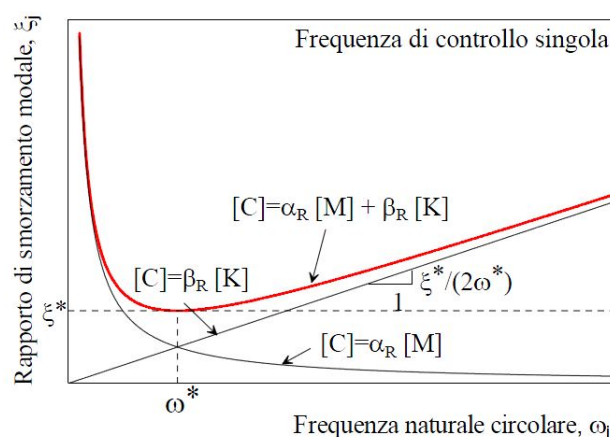
$$\alpha_R = \xi^* \omega^* \quad , \quad \beta_R = \frac{\xi^*}{\omega^*} \quad (8.13)$$

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 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.

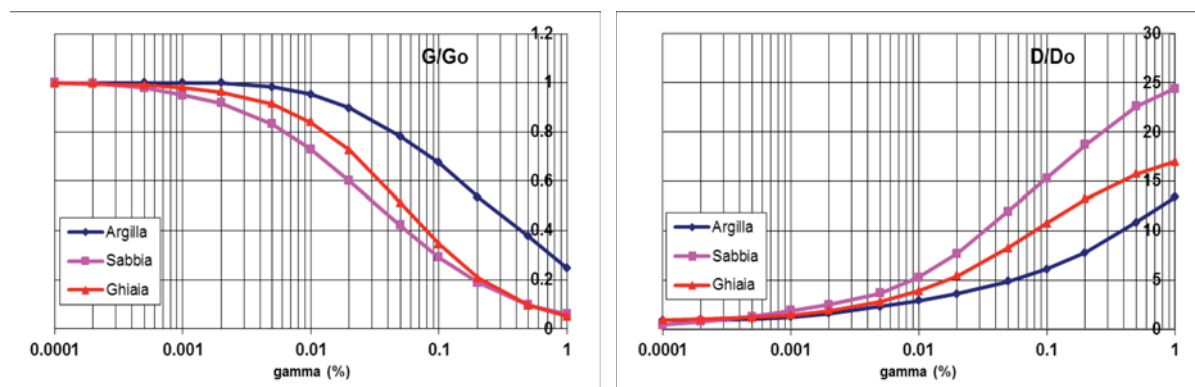
Il codice offre notevoli potenzialità di dati in *output*, potendo restituire la storia temporale di tutte le grandezze di interesse: spostamenti, velocità, accelerazioni, deformazioni e tensioni. L'interfaccia grafica consente, inoltre, di costruire ed esportare i grafici delle sopracitate grandezze,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

8.2 - Caso applicativo nel comune di Paese

Per quantificare l'azione sismica in superficie in corrispondenza del piano di lottizzazione di via Asiago e valutare il fattore di amplificazione è stato realizzato un modello monodimensionale sul quale 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 monodimensionali 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.



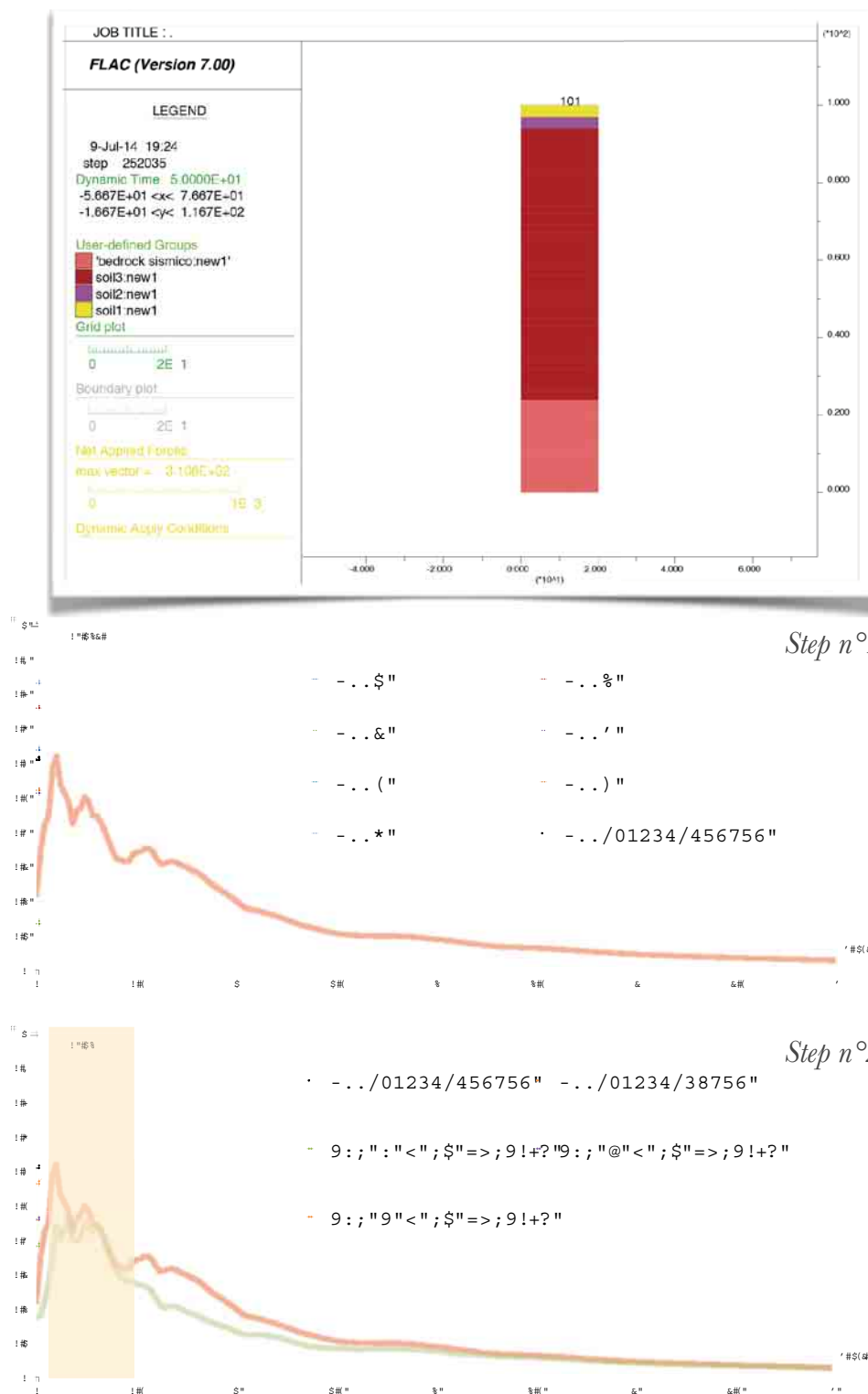
Nel rispetto della normativa vigente – D.M. 14/01/2008 – è stata assunta una severità dell'azione sismica con la probabilità di superamento (P) e con il periodo di ritorno (T_r) relativi allo stato limite considerato. In particolare, è stata considerata una vita nominale della costruzione (V_n) di 50 anni, un coefficiente d'uso (C_u) pari a II e quindi una vita di riferimento $V_r = 100$ 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, 2011).

In particolare, i sette accelerogrammi sono stati ricavati tramite l'utilizzo del portale SEISM-HOME creato dall'Eucentre di Pavia, che seleziona gli *input* con il massimo rigore da parte di operatori esperti, evitando in particolare di inserire più di una registrazione proveniente dallo stesso evento o dalla stessa stazione. Tramite una procedura ottimizzata (Corigliano et al., 2012) è stato selezionato l'insieme migliore di accelerogrammi spettro-compatibili registrati su sottosuolo roccioso di Categoria A e disponibili nelle principali banche dati accelerometriche mondiali accreditate.

La *history* (storia temporale) ricavata al tetto del modello (per ogni *input* sismico applicato) rappresenta la storia accelerometrica orizzontale attesa nel sito d'indagine: ogni *history* è stata successivamente plottata in uno spettro di risposta elastico e mediata in una curva rappresentativa (*Step n°1*).

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 (*Step n°2*).



Il sito presenta un'importante amplificazione a 0,1s con un valore di S_e paria 0,6 mentre per periodi superiori la categoria di sottosuolo B, alla quale il sito appartiene, riesce a quantificare correttamente la risposta sismica locale. **Il fattore di amplificazione in termini di accelerazione nell'intervallo 0,1-0,5s è risultato di 1,11.**

9 - Commenti finali e criticità

I capitoli precedenti hanno evidenziato chiaramente l'assetto geologico e morfologico del comune di Paese che denota una risposta sismica locale condizionata dall'assetto sismo-stratigrafico locale.

In particolare, il piano di lottizzazione - ATR/27 ubicato in via Asiago si sviluppa all'interno di un'area stabile soggetta ad amplificazioni sismiche. Si escludono quindi fenomeni di instabilità sismo-indotta; l'unico contributo amplificativo è dato dai contrasti di rigidità presenti nel sottosuolo che, dalle misure condotte, appaiono di modesta entità.

L'analisi di Livello 2 è stata condotta per quantificare il fattore di amplificazione sia in termini di accelerazione sia di velocità. Nel primo caso è stato assegnato, tramite l'utilizzo degli abachi nazionali, un valore di 1,27 (FA) mentre nel secondo caso di 1,60 (FV).

Al fine di confermare la validità della procedura semplificata (abachi nazionali) si è ritenuto necessario effettuare una modellazione numerica avanzata in campo dinamico propria del Livello 3 di approfondimento. I risultati ottenuti hanno riscontrato una sovrastima da parte del Livello 2 in quanto il fattore di amplificazione desunto in termini di accelerazione dalla procedura di Livello 3 è di 1,11 (FA).

In conclusione, si è confrontato lo spettro di risposta elastico risultante dalla categoria di sottosuolo a cui il sito appartiene (Categoria B) con quello ottenuto tramite la procedura di Livello 3. Ad eccezione del periodo 0,1s, in cui il valore di S_e è risultato pari a 0,6, la categoria di sottosuolo B riesce a modellare correttamente la risposta sismica locale.

In generale, gli studi di MS hanno lo scopo di razionalizzare la conoscenza del territorio per chi deve pianificare gli interventi: invece, per la progettazione delle opere è importante eseguire indagini specifiche, come del resto previsto dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008).

10 - 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. 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
9. 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
10. 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
11. Itasca (2011). *FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua. v.7.0. User's Manual*
12. 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
13. 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
14. 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
15. Lanzo G., Silvestri F. (1999) – *Risposta Sismica Locale*. Hevelius Ed.
16. Louie, J. N. (2001). Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 347–364
17. M. Locati, R. Camassi e M. Stucchi, 2011. DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>
18. 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
19. Mucciarelli M. e Gallipoli M.R. (2006) – Comparison between V_{s30} and other estimates of site amplification in Italy – *Conf. Eartq. Eng. And Seismol.*, Ginevra, 3 - 8 Sept. no 270
20. Mucciarelli M (2011) – Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici – Progetto ricerca 2007PTRC4C – Aracne editrice
21. 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*
22. SESAME Project (2005) – “Site Effects Assessment Using Ambient Excitations”
23. Slejko D. et al (1987) – *Modello sismotettonico dell'Italia Nord – Orientale*. CNR
24. Spallarossa D. e Barani S. (2007) – Report, Disaggregazione della Pericolosità Sismica in Termini di $M - R - \epsilon$ – Progetto DPC-INGV S1, <http://esse1.mi.ingv.it/d14.html>