



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



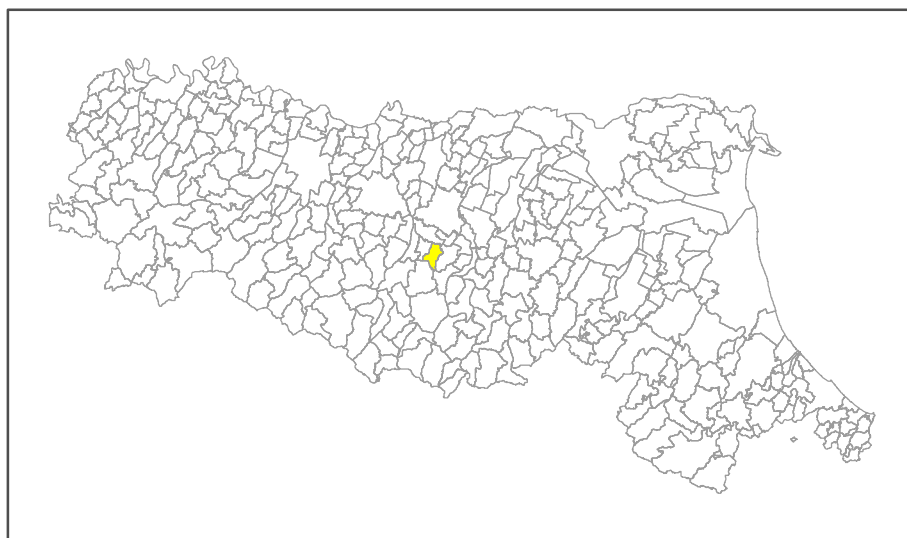
CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Regione Emilia–Romagna
Comune di Maranello



Regione Emilia–Romagna	Soggetto realizzatore Dott. Geol. Valeriano Franchi	Data Aprile 2020
---------------------------	--------------------------------------------------------	---------------------

Responsabile

Arch. Elisa Tommasini

Soggetto realizzatore

Dott. Geol. Valeriano Franchi

Gruppo di lavoro

Dott. Geol. Alessandro Ghinoi

Dott. Geol. Gianluca Vaccari

Dott. Geol. Marco Sacchi

Dott. Geol. Stefano Capocchi

Dott. Geol. Marialuisa Campani

INDICE CONTENUTI

1. Introduzione	5
2. Inquadramento territoriale e cartografico	8
3. Definizione della pericolosità sismica di base e degli eventi sismici di riferimento .	10
3.1. Sismicità del territorio comunale.....	12
4. Aspetti geologici e geomorfologici	18
4.1. Area di analisi "Torre Oche"	20
4.2. Area di analisi "via Fondo Val Grizzaga"	21
4.3. Area di analisi "località Il Poggio"	22
5. Modello del sottosuolo	24
5.1. Area di analisi "Torre Oche"	24
5.2. Area di analisi di "via Fondo Val Grizzaga".....	26
5.3. Area di analisi di "località Il Poggio"	27
6. Dati geotecnici e geofisici	30
6.1. Sondaggi a carotaggio continuo (le 3 aree di studio)	32
6.2. Area di "Torre Oche"	33
6.2.1. MASW/Re.Mi.	33
6.2.2. HVSR	34
6.2.3. Sismica a rifrazione.....	35
6.2.4. Indagine Down-hole	36
6.2.5. Penetrometria dinamica super-pesante (DPSH)	37
6.2.6. Analisi di laboratorio geotecnico	38
6.3. Area di "via Fondo Val Grizzaga".....	38
6.3.1. MASW/Re.Mi.	38
6.3.2. HVSR	40
6.3.3. Sismica a rifrazione.....	41
6.3.4. Indagine Down-hole	42
6.3.5. Penetrometrie statiche, meccaniche (CPTm)	42
6.3.6. Analisi di laboratorio geotecnico	43
6.4. Area di "località Il Poggio"	44
6.4.1. MASW/Re.Mi.	44
6.4.2. HVSR	45
6.4.3. Indagine Down-hole	46
6.4.4. Penetrometria statica, meccanica (CPTm).....	47
6.4.5. Analisi di laboratorio geotecnico	48
7. Interpretazioni e incertezze	49
8. Metodologie di elaborazione e risultati	51
8.1. Analisi di III livello.....	51

8.2. Analisi per l'area di studio di "Torre Oche"	52
8.2.1. Risultati.....	54
8.2.2. Calcolo dei cedimenti post-sismici	57
8.3. Analisi per l'area di studio di "via Fondo Val Grizzaga"	57
8.3.1. Risultati.....	60
8.3.2. Calcolo dei cedimenti post-sismici	63
8.4. Analisi per l'area di studio di "località Il Poggio"	64
8.4.1. Risultati.....	66
8.4.2. Calcolo dei cedimenti post-sismici	69
9. Elaborati cartografici	71
9.1. Carta delle indagini.....	71
9.2. Carta delle Vs	72
9.3. Carta delle frequenze	73
9.4. Carta delle MOPS	74
9.5. Carta di microzonazione sismica (MS_0203).....	100
10. Confronto con la distribuzione dei danni degli eventi passati.....	103
11. Bibliografia.....	103

1. INTRODUZIONE

Su incarico del Comune di Maranello (MO) è stato eseguito uno studio di **Microzonazione Sismica di III livello** in 3 specifiche aree all'interno del territorio comunale, individuate nello "Schema di contratto d'incarico" della "Richiesta di presentazione offerta per l'affidamento di incarico per la redazione della microzonazione sismica di III livello del Comune di Maranello" (CIG: Z7F1FC22A0), sulla base delle risultanze del precedente studio di microzonazione sismica di II livello (Variante 2017 al PSC, approvazione del C.C. nr. 3 del 24/01/2017).

Le tre aree sono indicate come segue:

- *Torre Oche*
- *Via Fondo Val Grizzaga*
- *Località Il Poggio,*

e con questa denominazione si farà ad esse riferimento nel testo, da qui in poi.

Lo studio è stato realizzato nel rispetto delle seguenti disposizioni normative:

- Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L.R. 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" approvato con Delibera dell'Assemblea Legislativa Regione Emilia-Romagna n° 112 del 2 maggio 2007;
- D.G.R. 16 dicembre 2013, n° 1919: "Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del capo dipartimento della protezione civile n.52/2013 a favore degli enti locali";
- D.G.R. 21 dicembre 2015, n° 2193: "Art. 16 della l.r. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla Deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112.

Inoltre, per gli aspetti tecnici, si è fatto anche riferimento al documento "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" (ICMS) approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni¹.

L'assetto geologico, geomorfologico e sismico di base viene descritto per l'intero territorio comunale, con maggiore dettaglio per le tre aree oggetto di analisi di MS3. Le indagini geognostiche e geofisiche eseguite per questo studio di MS3 sono state limitate alle tre aree identificate; le tipologie ed il numero di indagini sono state concordate con l'Ufficio Tecnico comunale. Le tre aree (Figura 1) sono state già oggetto di studi di I e II livello di microzonazione sismica e per ognuna sono stati ipotizzati specifici effetti di sito in caso di evento sismico ("Carta degli effetti attesi per zone a comportamento equivalente e dei livelli di approfondimento" – Tav. 5.1 – scala 1:10.000, Variante PSC 2017):

- **Torre Oche - Zona 7:** Aree caratterizzate da forme e/o elementi sepolti, zone valli strette.
 - **Effetti attesi:** amplificazione stratigrafica per caratteristiche litologiche e variabilità laterale della morfologia del substrato, densificazione, cedimenti differenziali.
 - **Studi richiesti:** la valutazione deve tenere conto delle condizioni litostratigrafiche e della variabilità della morfologia del substrato roccioso, stima delle densificazione e cedimenti.
 - **Microzonazione sismica:** terzo livello di approfondimento.

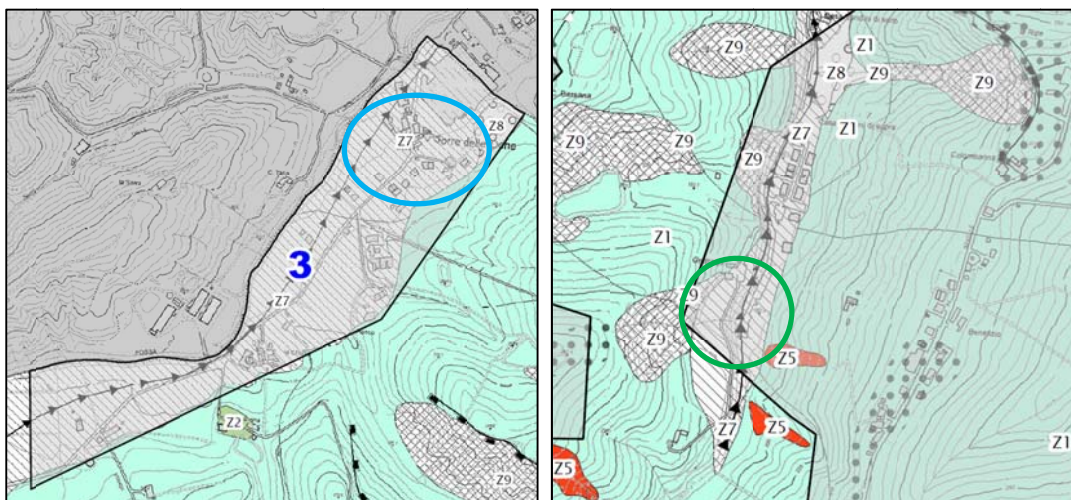
¹ Gruppo di lavoro MS, 2008. "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd. Link breve: <https://goo.gl/Od0XBo>

- *Via Fondo Val Grizzaga - Zona 7*: Aree caratterizzate da forme e/o elementi sepolti, zone valli strette.
 - **Effetti attesi**: amplificazione stratigrafica per caratteristiche litologiche e variabilità laterale della morfologia del substrato, densificazione, cedimenti differenziali.
 - **Studi richiesti**: la valutazione deve tenere conto delle condizioni litostratigrafiche e della variabilità della morfologia del substrato roccioso, stima delle densificazioni e cedimenti.
 - **Microzonazione sismica**: terzo livello di approfondimento.
- *Località Il Poggio - Zona 4*: Aree con presenza di depositi detritici di versante aventi pendenza minore di 15°.
 - **Effetti attesi**: amplificazione stratigrafica, densificazione.
 - **Studi richiesti**: valutazione del coefficiente di amplificazione dovuto alle caratteristiche litologiche e stratigrafiche, dei cedimenti, addensamenti in presenza di terreni a medio - medio elevato grado di compressibilità.
 - **Microzonazione sismica**: secondo livello di approfondimento; nel caso di terreni a medio - medio elevato grado di compressibilità terzo livello di approfondimento per stima dei cedimenti/addensamenti.

In tutti i tre casi il terzo livello di analisi si rende necessario a seguito delle particolari condizioni morfologiche: valli strette per Torre delle Oche e Fondo Val Grizzaga, e un profilo topografico che approssima una condizione di cresta per Il Poggio, e litostratigrafiche locali: presenza di terreni che possono dare origine ad addensamenti e cedimenti.

Relativamente alle caratteristiche litostratigrafiche, la carta delle MOPS (Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica) della microzonazione sismica di I livello identifica, per le tre aree d'indagine, quanto segue:

- *Torre Oche*: depositi alluvionali in alternanze di strati ghiaioso sabbiosi a granulometria da poco a ben assortita e limosi - limoso argillosi, con prevalente percentuale delle componenti fini: 60-65%; $V_s = 300/500$ m/s per le ghiaie, $V_s = 450/550$ m/s per i limi - limi argillosi sabbiosi.
- *Via Fondo Val Grizzaga*: depositi di canale fluviale terrazzati in alternanze di strati ghiaiosi a granulometria poco assortita e limosi - limoso argillosi con prevalenza delle componenti più fini 75% nei primi 25 m del sottosuolo, seguiti alle profondità sottostanti da argille - argille limose debolmente marnose con intercalate sequenze di strati arenacei con matrice marnosa lentiformi tra -25 e -45 m pc; $V_s = 250/300$ m/s per le ghiaie sabbiose, $V_s = 350/400$ m/s per i limi argillosi; $V_s = 450/650$ m/s per le argille - argille limose debolmente marnose con intercalati strati arenacei.
- *Località Il Poggio*: depositi eluvio colluviali con spessore di 3/5 m, su substrato a brecce argillose non stratificato, detensionato e fratturato sino a -10/-15 m pc; substrato a comportamento non rigido: $V_s \leq 550/550$ m/s.



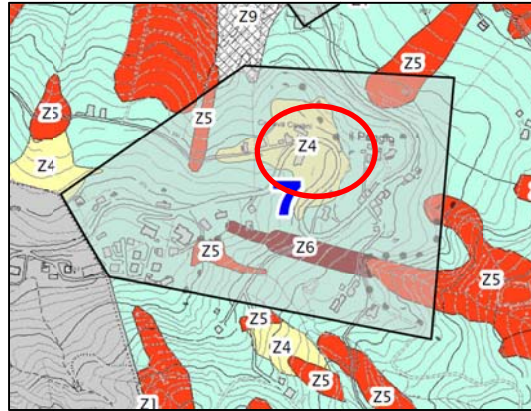


Figura 1 – Stralci della “Carta degli effetti attesi per zone a comportamento equivalente e dei livelli di approfondimento” – Tav. 5.1 – scala 1:10.000, Variante PSC 2017. Per la legenda si veda nel testo. Cerchio azzurro: area di approfondimento MS3 “Torre delle Oche”; cerchio verde: area di approfondimento MS3 “Fondo val Grizzaga”; cerchio rosso: area di approfondimento MS3 “Il Poggio”.

Gli obiettivi del presente studio sono stati i seguenti:

1. Ricostruzione della stratigrafia locale attraverso sondaggi a carotaggio/distruzione e prove penetrometriche.
2. Prelievo di campioni indisturbati in corrispondenza dei livelli di terreno caratterizzati da valori di resistenza meccanica mediocri o scarsi.
3. Analisi di laboratorio geotecnico sui campioni prelevati per determinare i parametri geotecnici funzionali alla stima dei cedimenti post-sismici e per ricavare le curve di decadimento del modulo di taglio e dello smorzamento da inserire come input nell’analisi di risposta sismica locale bi-dimensionale.
4. Determinazione della sismostratigrafia locale nei primi 30 m dal piano campagna tramite acquisizioni Down-Hole e array MASW.
5. Determinazione della frequenza naturale di vibrazione dei terreni tramite elaborazione del rumore sismico da stazione singola (HVSr), stimando al contempo la profondità della principale superficie di risonanza e quella del bedrock sismico.
6. Determinazione delle geometrie dei sismostrati in profondità tramite profili a sismica a rifrazione.
7. Analisi di risposta sismica 2D per ricavare
 - a. i fattori di amplificazione della PGA e dell’intensità di Housner,
 - b. gli spettri di risposta in superficie sia in termini di pseudo-accelerazione che di pseudo-velocità,
 - c. gli accelerogrammi in superficie,
 - d. il profilo delle massime deformazioni co-sismiche con la profondità funzionale alla stima dei cedimenti post-sismici.
8. Calcolo dei cedimenti post-sismici.

Tutte le attività sono state svolte nel rispetto delle specifiche di cui agli “Standard di rappresentazione e archiviazione informatica” elaborati dalla Commissione Tecnica per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica (OPCM 3907/2010, art. 5, comma 7), versione 4.0. dell’ottobre 2015.

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE E CARTOGRAFICO

Il territorio comunale di Maranello si colloca nel settore centrale della Provincia di Modena, al confine con i Comuni di Fiorano Modenese, ad ovest, di Castelvetro, ad est, di Formigine, a nord, e di Serramazzone e Marano sul Panaro, rispettivamente a sud e sud-est (Figura 2). Il territorio è inoltre compreso tra le Valli del Torrente Dolo, a ovest, e del Torrente Dragone, a est (Figura 3).

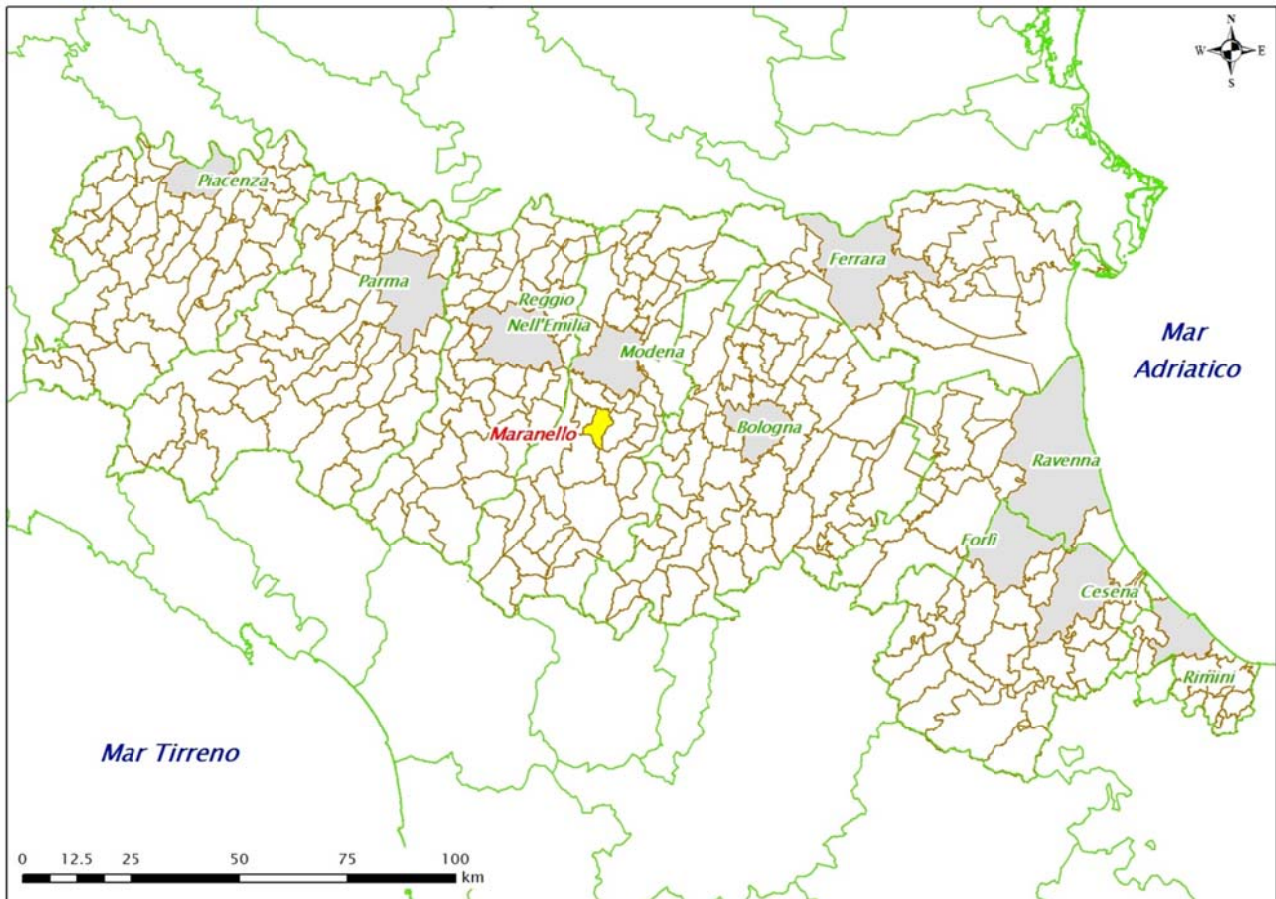


Figura 2 - Inquadramento amministrativo regionale del territorio comunale di Maranello (in giallo in figura).

Il territorio comunale di Maranello fa parte pressoché interamente del settore altimetrico di collina, con solo il suo limite sud-orientale nel settore di bassa montagna, con quote sul livello del mare (dati da modello digitale delle quote – si veda Figura 3) che variano da un minimo di circa 100 m lungo il confine col territorio comunale di Formigine, ai circa 450 m in prossimità di località Salse di Puianello, lungo la Strada Provinciale 18.

Il clima è caratterizzato, nel periodo 1991-2015, da precipitazioni totali annue, in media, di 741 mm e temperature medie annue di 14,1°C, pari, rispettivamente, ad una variazione di +5 mm e +1,3°C rispetto al periodo 1961-1990².

² Atlante Idroclimatico dell'Emilia-Romagna (Ed. 2017) –
https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=3811&idlivello=1591

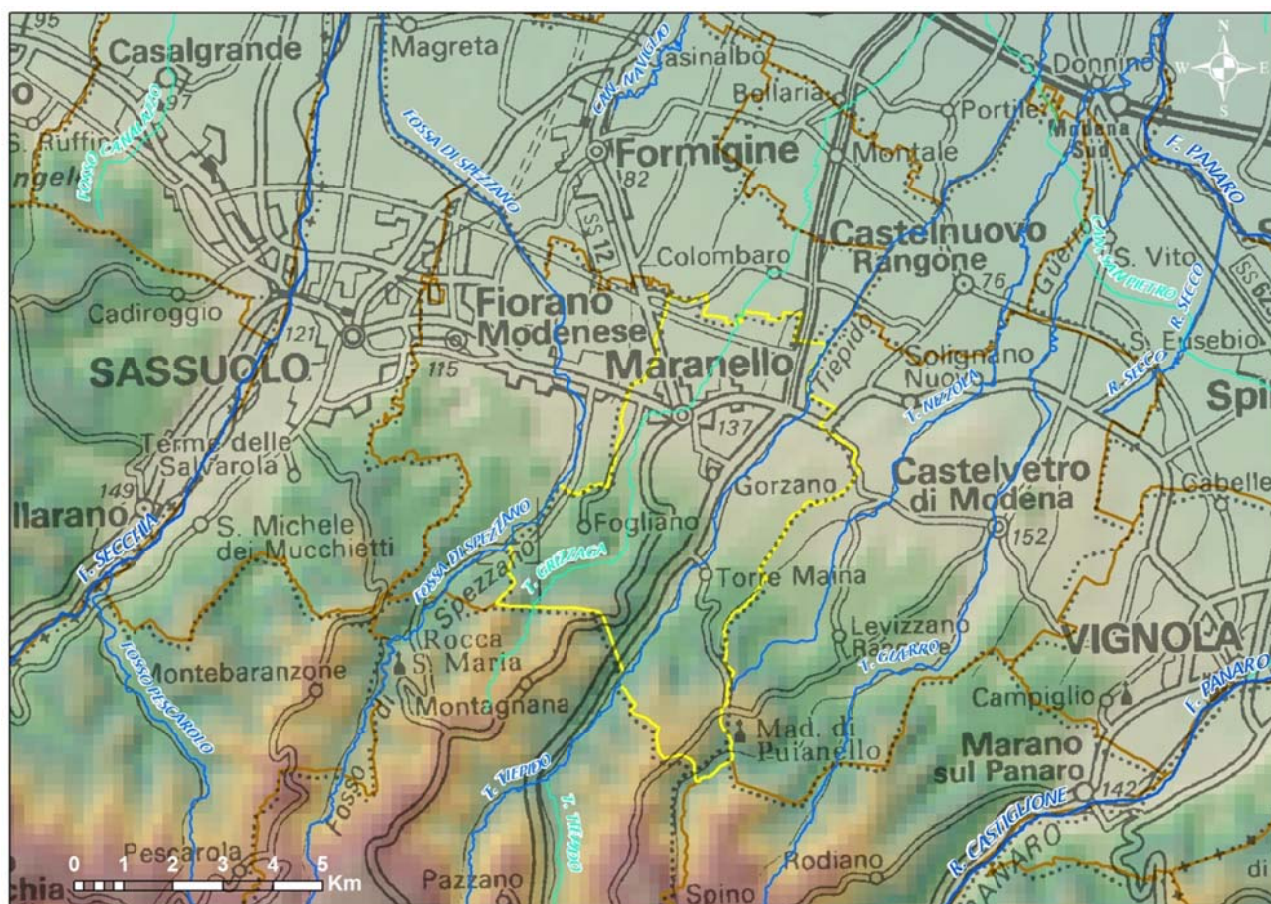


Figura 3 – Inquadramento geografico-fisico del territorio comunale di Maranello. Il DEM (modello digitale delle quote) mostra le differenti fasce altimetriche: da quelle con valori relativamente più alti, in marrone, a quelle con i valori relativamente più bassi, in grigio e azzurro.

Nella cartografia regionale, il territorio comunale di Maranello è compreso nelle Tavole alla scala 1:25.000:

- nr. 219NE denominata "Formigine";
- nr. 219SE denominata "Marano sul Panaro";
- nr. 219SO denominata "Serramazzoni";
- nr. 219NO denominata "Sassuolo";

nelle Sezioni alla scala 1:10.000:

- nr. 219070 denominata "Maranello",
- nr. 219110 denominata "Levizzano",
- nr. 219100 denominata "Montebaranzone",
- nr. 219060 denominata "Sassuolo",

e negli Elementi alla scala 1:5.000:

- nr. 219074 denominato "Maranello",
- nr. 219071 denominato "Pozza",
- nr. 219072 denominato "Gorzano",
- nr. 219073 denominato "Fogliano",
- nr. 219114 denominato "S. Venanzio",
- nr. 219111 denominato "Levizzano",
- nr. 219112 denominato "Madonna di Puianello",
- nr. 219113 denominato "Banzuola Nuova",
- nr. 219101 denominato "Montagnana",
- nr. 219062 denominato "Nirano".

3. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE E DEGLI EVENTI SISMICI DI RIFERIMENTO

Il dato di partenza per un'analisi della potenzialità sismica di un territorio è certamente la ricostruzione delle strutture tettoniche maggiormente attive nel tempo geologico più recente, all'incirca l'ultimo milione di anni (neotettonica). Sono queste le strutture che possono, se confermate anche da dati macrosismici e/o sismologici, ragionevolmente costituire sorgente di terremoti anche nel prossimo futuro.

L'analisi neotettonica di un'area si esegue attraverso l'esame di una serie innumerevole di dati di natura geologica, morfoneotettonica, idrogeologica, e idrochimica, che concorrono a definire, appunto, il regime tettonico di quell'area, con l'individuazione di strutture geologiche rilevanti, per giungere eventualmente alla definizione del loro potenziale sismogenetico, il potenziale, cioè, di generare terremoti.

Il territorio comunale di Maranello, dal punto di vista geologico-strutturale, è parte degli Appennini settentrionali, una catena a pieghe e sovrascorrimenti costituita dalla sovrapposizione di unità tettoniche NE-vergenti, la cui formazione è conseguenza della collisione, in epoca cenozoica, tra la Placca Europea e la Placca Adria (Africana). Attualmente, la convergenza tra le due placche ha velocità pari a circa 6-8 mm all'anno, con vergenza all'incirca NO, e si sviluppa lungo un margine di placca ampio e complesso, ove placche e blocchi crostali minori controllano la distribuzione e la cinematica delle deformazioni. Tale convergenza determina una diffusa sismicità ed un quadro deformativo complesso, caratterizzato da un settore (quello tirrenico) con prevalenti campi tensionali distensivi, e da un settore (quello adriatico) ove prevalgono campi tensionali compressivi (Boccaletti et al., 2011).

In modo più specifico, per quanto riguarda le strutture tettoniche quaternarie più recenti ed attive, il territorio comunale di Maranello si colloca all'interno di un sistema di faglie pressoché continuo che si estende lungo il margine tra gli Appennini e la pianura del Po con direttrice NO-SE (rettangolo contrassegnato col numero 2a in Figura 4), coincidente approssimativamente con il fronte di *thrust* pedeappenninico (PTF o PAT, negli acronimi inglesi utilizzati nella più recente letteratura). Il PTF (in parte affiorante) sembra avere un'attività estesa anche all'Olocene, suggerita dal fatto che la profondità maggiore della base dei sedimenti olocenici si ha proprio lungo il fronte appenninico sulla pianura. Avvicinandoci al territorio di Maranello, in corrispondenza di Castelvetro di Modena, l'attività del PTF è messa in relazione alla formazione di un'anticlinale che ha sollevato e deformato depositi marini e continentali di età variabile tra il Pliocene e il Pleistocene Medio-Olocene (Boccaletti et al., 2011).

A sud-ovest del PTF esiste una serie di *thrust* ciechi ad esso sub-paralleli, che danno ragione della serie di anticlinali e sinclinali con assi a direzione appenninica che caratterizzano tutta la fascia collinare occupata dai territori comunali di Sassuolo, Fiorano Modenese, Maranello e Castelvetro (Figura 5).

La soluzione dei meccanismi focali ha mostrato, per questo segmento del margine Appennini-Pianura, la presenza di un campo deformativo a profondità generalmente inferiori a 15 km (Figura 4), caratterizzato da eventi sismici con meccanismi focali principalmente compressivi e, in maniera minore, trascorrenti ed estensionali.

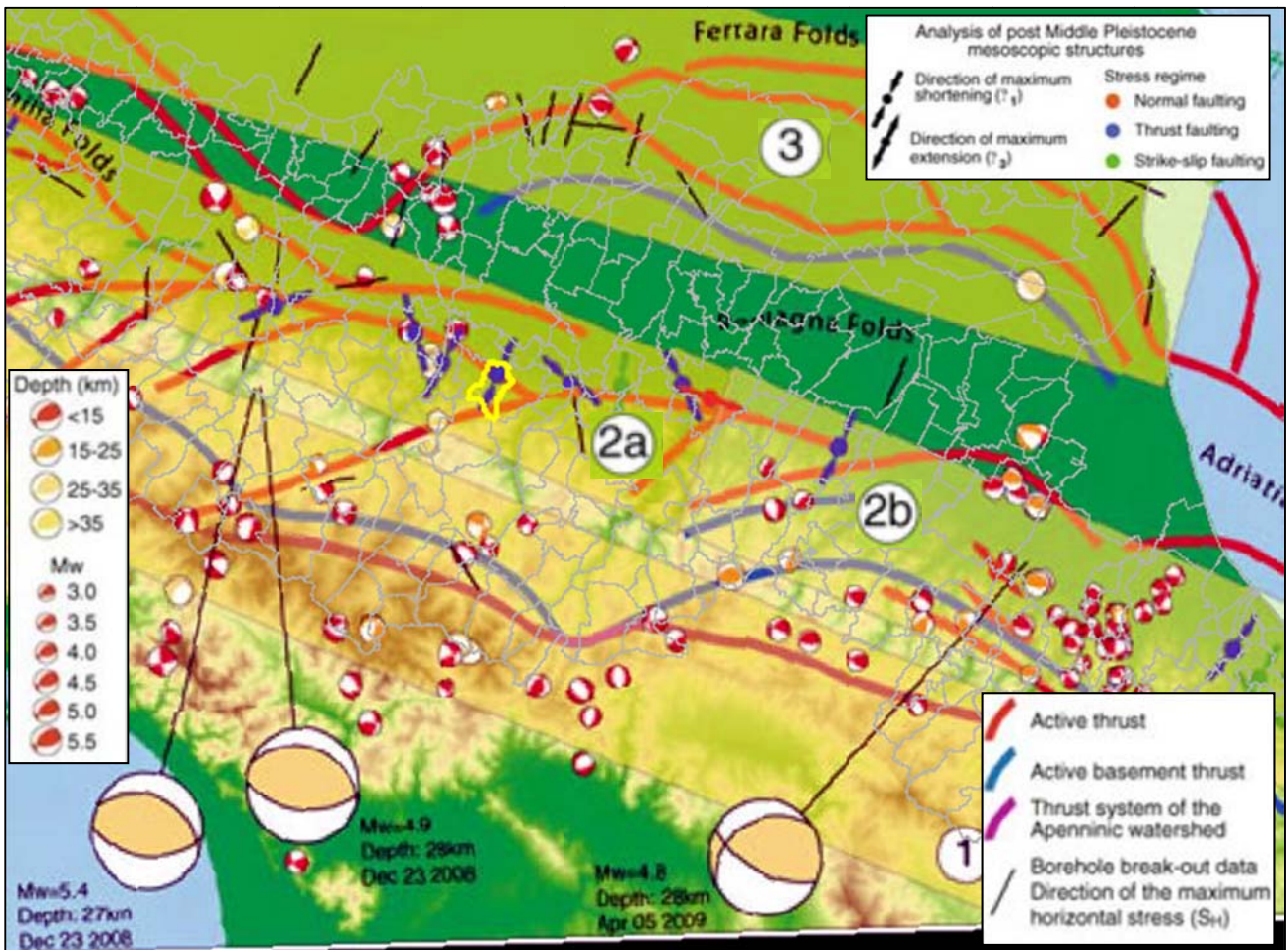


Figura 4 – Sintesi delle strutture recenti e attive del settore esterno degli Appennini settentrionali, con sovrapposte le soluzioni dei meccanismi focali (Boccaletti et al., 2004), i campi tensionali da analisi mesoscopiche (Ghiselli e Martelli, 1997) e i dati di *breakout* da pozzo (Mariucci e Muller, 2003). Tre meccanismi focali in dettaglio relativi agli eventi principali di sequenze sismiche che hanno interessato gli Appennini il 23 dicembre 2008 ed il 5 aprile 2009 (da dati INGV). I numeri nei cerchi indicano i principali sistemi di faglie: (1) Catena appenninica; (2a) Margine Appennini-Pianura (settore nord-occidentale); (2b) Margine Appennini-Pianura (settore sud-orientale); (3) Pieghe Emiliane e Ferraresi sepolte. (Fonte: Boccaletti et al., 2011). Il poligono con contorno giallo individua in carta il territorio comunale di Maranello.

Anche in corrispondenza del territorio comunale di Maranello (Figura 4), i meccanismi focali rivelano la presenza di sismi superficiali (< 15 km), di Mw circa pari a 4/4.5, con campo di stress principalmente compressivo, confermato anche dalle analisi di strutture mesoscopiche successive al Pleistocene medio che evidenziano, in corrispondenza della linea del PTF lungo il confine settentrionale di Maranello, una direzione di massimo raccorciamento SSO-NNE. Raccorciamento compressivo che trova a luoghi svincoli cinematici lungo faglie trascorrenti di direzione anti-appenninica, come nel caso evidenziato da Bonini (2008) in corrispondenza del tratto di valle del Torrente Fossa di Spezzano tra Nirano e lo sbocco in alta pianura (Figura 5).

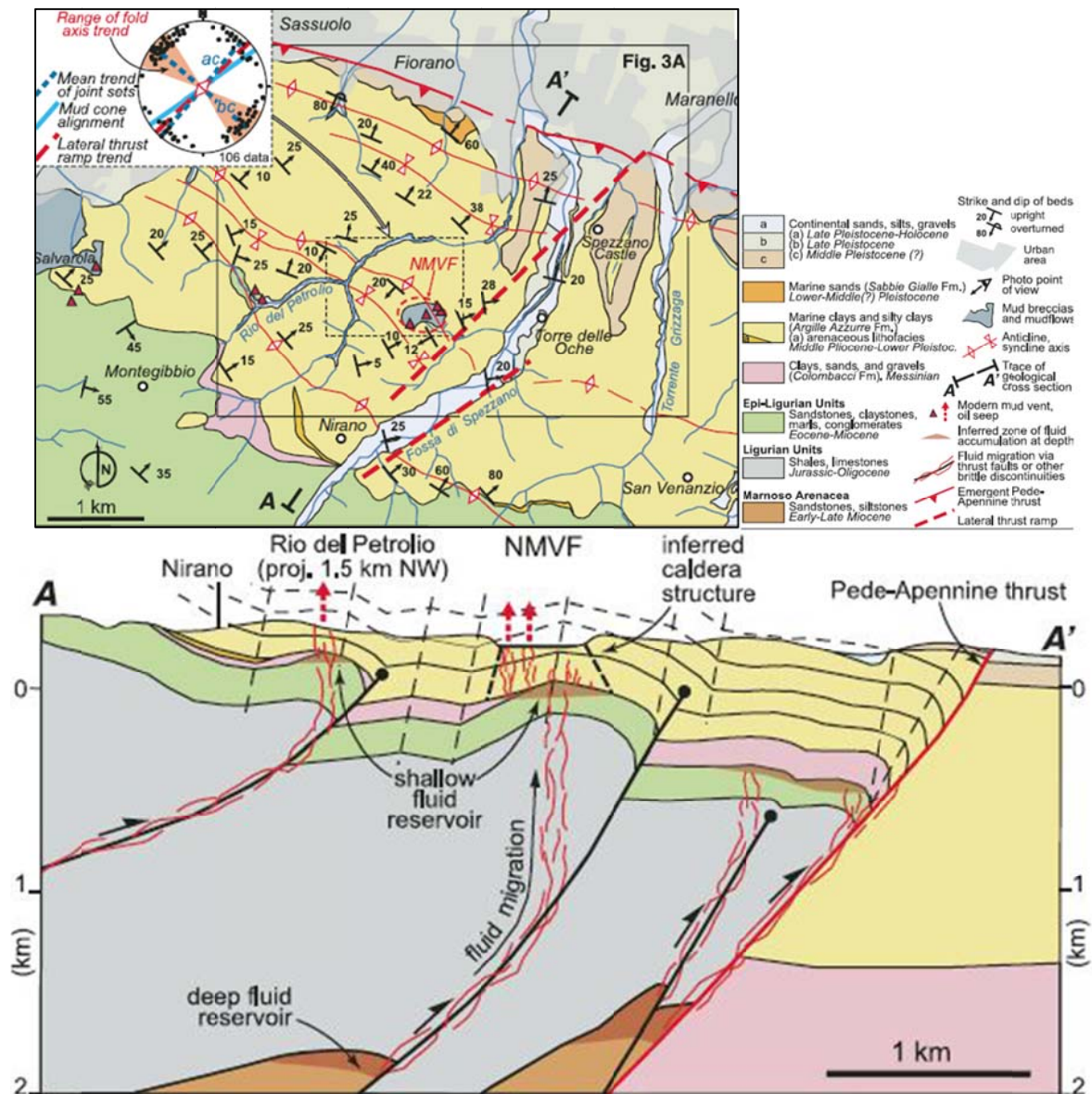


Figura 5 – Sezione geologica che interseca, con direzione SSO-NNE, la depressione delle Salse di Nirano, in prossimità del confine tra i Comuni di Fiorano Modenese e Maranello, esemplificativa delle strutture tettoniche che caratterizzano questo segmento del margine Appennini-Pianura (Fonte: Bonini, 2008).

3.1. Sismicità del territorio comunale

Dal punto di vista sismico, al comune di Maranello è stata assegnata la **classe 2** in base alla DGR 1164 del 23/07/2018, ovvero a media sismicità in base alla precedente classificazione conseguente l'Ordinanza del PCM n. 3274/2003 (Figura 6).

La classificazione sismica non interferisce con la determinazione dell'azione sismica, necessaria per la progettazione e la realizzazione degli interventi di prevenzione del rischio sismico. Essa costituisce, altresì, un riferimento tecnico-amministrativo per graduare l'attività di controllo dei progetti e la priorità delle azioni e misure di prevenzione e mitigazione del rischio sismico.

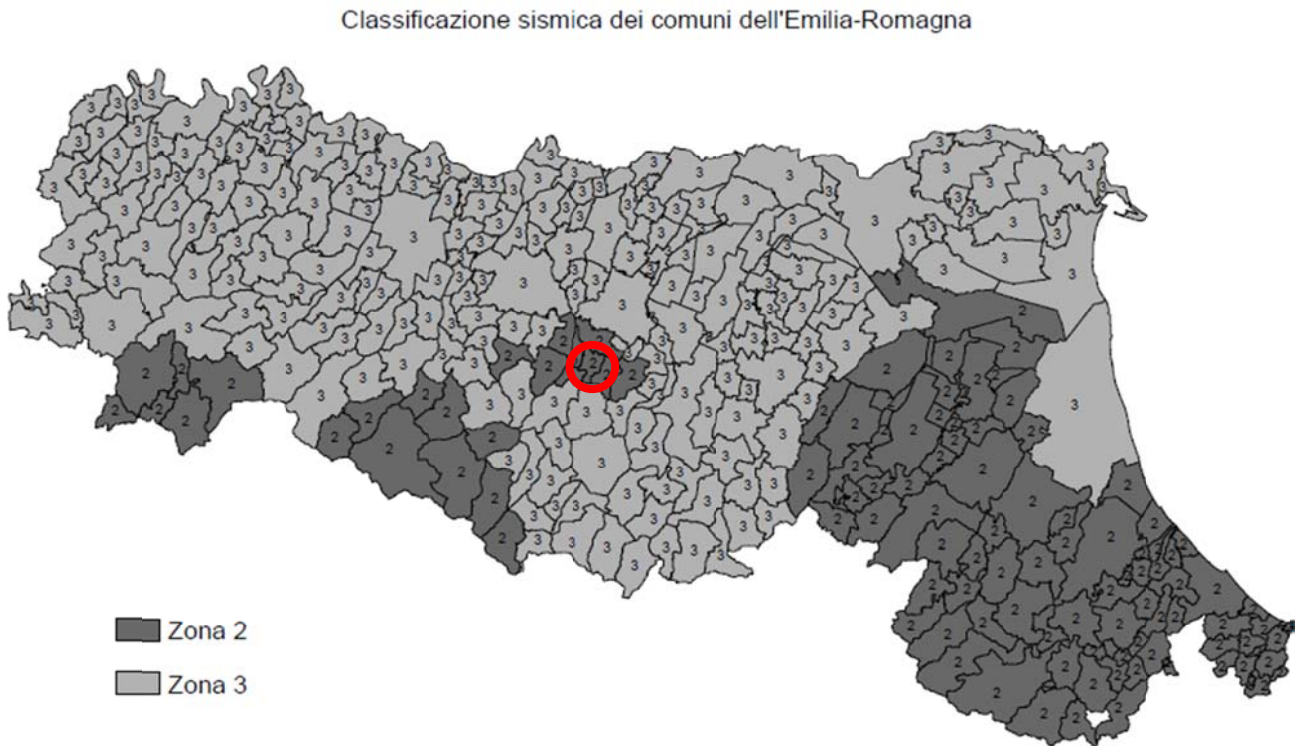


Figura 6 - Classificazione sismica dei comuni dell'Emilia-Romagna aggiornata al luglio 2018. Nel cerchio rosso il Comune di Maranello.

Se si analizza la sequenza storica degli effetti macrosismici registrati nel territorio comunale dal database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani - Database Macrosismico Italiano DBMI15 dell'INGV (Locati et al., 2016)³ - si nota come importanti effetti si siano registrati anche in relazione ad epicentri lontani dal territorio comunale. Di seguito viene riportata la storia sismica del Capoluogo (Figura 7), limitatamente ai terremoti con intensità epicentrale uguale o superiore a 4, così come estratte dal DBMI15 dell'INGV.

Legenda:

Int. - Intensità al sito (MCS); **Io** - Intensità epicentrale (MCS); **Mw** - Magnitudo momento (epicentrale); **NMDP** - Numero di punti, numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto.

³ Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macro seismic Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
9	1501	06	05	10			Modenese	17	9	6.05
5	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
5	1920	09	07	05	55	4	Garfagnana	750	10	6.53
5	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
5	1996	10	15	09	55	5	Pianura emiliana	135	7	5.38
4	1937	12	10	18	04		Frignano	28	6	5.30
4	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
3	1957	08	27	11	54		Appennino modenese	58	5	4.73
3	2002	06	18	22	23	3	Frignano	186	4	4.30
2-3	2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	5-6	4.40
2-3	2002	06	08	20	13	0	Frignano	115	4	4.23
2	1995	10	10	06	54	2	Lunigiana	341	7	4.82
NF	1892	12	29	13	47	4	Castel del Rio	36	5-6	4.37
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
NF	1988	03	15	12	03	1	Reggiano	160	6	4.57
NF	1992	04	17	11	59	0	Appennino bolognese	56	4-5	4.11
NF	1996	12	16	09	09	5	Pianura emiliana	115	5-6	4.06
NF	1997	05	12	22	13	5	Pianura emiliana	56	4-5	3.68
NF	1998	02	21	02	21	1	Pianura emiliana	104	5	3.93
NF	2000	10	03	01	12	3	Frignano	62	5	4.22

Figura 7 - Osservazioni macrosismiche per Maranello (Locati et al., 2016).

Dai dati si evince come le massime intensità macrosismiche registrate (in gradi MCS) corrispondano:

- al terremoto del 5 giugno 1501, con area epicentrale nel modenese, intensità epicentrale pari a 9 MCS e magnitudo momento epicentrale pari a 6.05,
- al terremoto del 13 gennaio 1909, con area epicentrale nell'Emilia-Romagna orientale, intensità epicentrale pari a 6-7 MCS e magnitudo momento epicentrale pari a 5.36,
- al terremoto del 7 settembre 1920, con area epicentrale in Garfagnana, intensità epicentrale pari a 10 MCS e magnitudo momento epicentrale pari a 6.53;
- al terremoto del 2 maggio 1987, con area epicentrale nel reggiano, intensità epicentrale pari a 6 MCS e magnitudo momento epicentrale pari a 4.71;
- al terremoto del 15 ottobre 1996, con area epicentrale nella pianura emiliana, intensità epicentrale pari a 7 MCS e magnitudo momento epicentrale pari a 5.38;
- al terremoto del 2 maggio 1987, con area epicentrale nel reggiano, intensità epicentrale pari a 6 MCS e magnitudo momento epicentrale pari a 4.71.

In generale, le intensità macrosismiche al sito di maggior grado (tra cui 5 è il valore più ricorrente), sul territorio comunale, sono dovute in gran parte a terremoti con epicentri localizzati nella pianura emiliana, in Garfagnana e in Romagna, registrati a partire dall'inizio del XIX secolo ad oggi. Intensità al sito di grado ≤ 4 sono dovute a terremoti con epicentri localizzati nel Frignano, nel parmense e nell'Appennino modenese.

Eccezione è da farsi per il terremoto del 1501, il secondo per intensità macrosismica, che sembra essere avvenuto (pur con tutte le incertezze legate alla mancanza di registrazioni strumentali) proprio all'interno del territorio comunale di Maranello.

Il sisma del 1501 è registrato nel "Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1997 e nell'area mediterranea dal 760 a.C. al 1500" (CFT⁵_{MED}) dell'INGV⁴. Il catalogo sintetizza come l'area più colpita abbia compreso alcuni paesi del territorio di Modena: Castelvetro, Maranello, Sassuolo e Montegibbio, nei quali i danni furono gravi e diffusi e coinvolsero la maggior parte del patrimonio edilizio, con crolli e lesioni che resero inabitabili la maggior parte delle abitazioni. Alessandro Tassoni⁵, per Modena, riporta che nell'anno "1501 il giorno 5 di giugno, sabato, all'ora tredicesima e quattordicesima vi fu un gran terremoto in Modena tale che non vi fu casa che non soffrisse qualche danno e tutti i camini e i merli crollarono e uccisero otto persone nella città di Modena, cioè in piazza (Grande) e altrove; (e) centri fortificati della Diocesi Modenese e specialmente nella zona montana rovinarono quasi completamente, come Castelvetro, Maranello, e Montegibbio ed altri ancora, che non vidi di persona: queste cose (notabili) le ho sentite e viste io, Alessandro Tassoni: e il nove del detto mese la chiesa di San Biagio di Modena crollò completamente per la detta causa".

In Maranello, lo stesso Tassoni riporta come il centro crollò quasi completamente ed il terremoto distrusse quasi dalle fondamenta il castello, di cui rimase indenne il solo torrione.

Sovrapponendo gli epicentri dei sismi che hanno dato, storicamente, effetti macrosismici maggiori all'interno del territorio comunale di Maranello, sulle sorgenti sismogenetiche dell'INGV (Figura 8), è possibile constatare come le maggiori intensità al sito (Int. in Figura 7) siano state determinate da sismi avvenuti all'interno delle sorgenti composite ITCS046 "Langhirano-Sassuolo", ITCS083 "Garfagnana", ITCS049 "Campegine-Correggio" e ITCS012 "Malalbergo-Ravenna".

Intensità leggermente minori (4 MCS) sono invece state determinate da sismi avvenuti all'interno della sorgente sismogenetica composta ITCS027 "Bore-Montefeltro-Fabriano-Laga" e della ITCS009 "Busseto-Cavriago".

Descrivendo nel dettaglio, quindi, le **sorgenti sismogenetiche**, che in maggior modo possono caratterizzare la sismicità locale, il territorio comunale di Maranello ricade pressoché interamente all'interno della sorgente sismogenetica composta **ITCS046** "Langhirano-Sassuolo", ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a **5.9** (derivata dall'evento sismico più forte avvenuto al suo interno). La geometria è determinata principalmente sulla base delle osservazioni geologiche: lo *strike* varia da 95° a 120°; il *dip* varia da 20° a 40°; il *rake* è assunto corrispondente ad un sovrascorrimento puro (80°-100°); la *slip rate* varia da 0,1 a 0,5 mm/anno; le profondità minima e massima sono state individuate, rispettivamente, a -2 e -8 km. La sorgente appartiene al Fronte di Sovrascorrimento Pedepenninico (PTF nell'acronimo inglese), un sistema di faglie NE-vergenti, in parte composto da piccoli archi, che scorre lungo le pendici collinari della catena appenninica settentrionale.

Circa 50 km a SSO del territorio comunale è presente la sorgente sismogenetica composta **ITCS083** "Garfagnana", ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a **6.4** (derivata dalla massima magnitudo delle sorgenti sismogenetiche individuali in essa comprese – ITIS050 "Garfagnana Nord e ITIS 051 "Garfagnana Sud"). Questa sorgente composta rappresenta una fascia a regime tettonico distensivo che attraversa gli appennini toscani ed emiliani in prossimità della valle del Serchio. La letteratura scientifica la interpreta come possibile estensione verso nord-ovest del Sistema di Faglie Etrusco, immergente verso NE, che rappresenta il limite estensionale nord-occidentale degli appennini settentrionali. I cataloghi sismici storici e strumentali (Boschi et al., 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al., 2006; Guidoboni et al., 2007) identificano, per tale fascia, una sismicità da intermedia (4.5 < Mw 5.0) a distruttiva, al di là dei terremoti distruttivi dell'11 aprile 1837 (Mw 5.6, Alpi Apuane) e del 7 settembre 1920 (Mw 6.5).

⁴ <http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/>

⁵ Tassoni Alessandro, Cronaca modenese, in Cronache modenesi di Alessandro Tassoni di Giovanni da Bazzano e di Bonifacio da Morano, "Monumenti di Storia Patria delle provincie modenesi", serie delle Cronache, tomo 15. Modena 1888.

Alcuni segmenti di questa sorgente composita sono stati associati ai terremoti più importanti di questo settore appenninico.

Lo *strike* varia da 300° a 310°; il *dip* varia da 30° a 45°; il *rake* (260°-280°) è assunto corrispondente ad un movimento estensionale puro sulla base di osservazioni geologiche; le profondità minima e massima sono state individuate, rispettivamente, a -1 e -10 km; la *slip rate* varia da 0,1 ad 1 mm/anno, dedotta da osservazioni geologiche relative a strutture adiacenti appartenenti al medesimo quadro tettonico della sorgente Garfagnana.

Nella sorgente composita "Garfagnana" sono comprese due sorgenti sismogenetiche individuali, la **ITIS050** "Garfagnana Nord" e la **ITIS051** "Garfagnana Sud", due faglie normali con immersione verso NE le cui attività controllano l'evoluzione recente della valle del Serchio, comunemente denominata "Garfagnana". La "Garfagnana Nord" costituisce la sorgente del terremoto distruttivo del 7 settembre 1920 ed i suoi caratteri geometrici sono stati derivati proprio dalle caratteristiche di tale evento sismico.

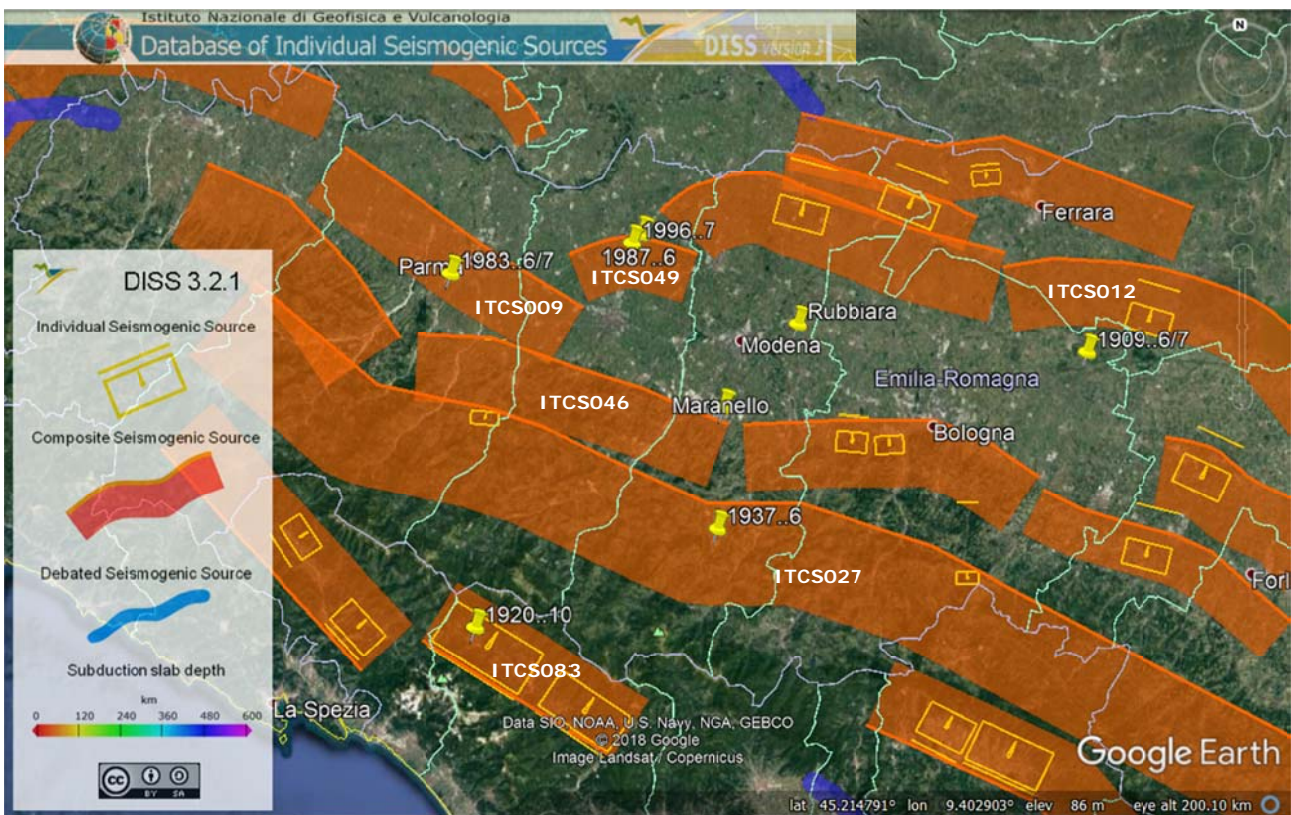


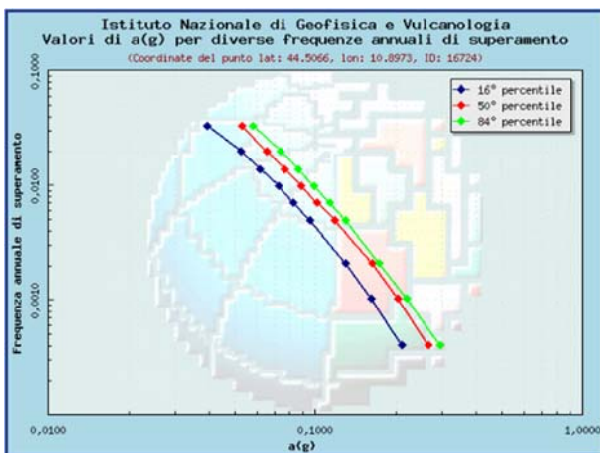
Figura 8 – Estratto dal database of Individual Seismogenic Sources (DISS, versione 3.2.1) dell'INGV: insieme di tutte le sorgenti sismogenetiche composite entro le quali ricadono gli epicentri degli eventi sismici (pin gialli) che hanno determinato i maggiori effetti macrosismici nel territorio di Maranello.

Alla sorgente "Garfagnana Sud", diversamente dalla prima, non sono associati grandi terremoti storici e le sue caratteristiche geometriche sono state necessariamente dedotte da quelle della ITIS050. La valle del Serchio è poi delimitata, a nord, dal lineamento Sarzana-Equi Terme e, a sud, dal lineamento Viareggio-Val di Lima-Bologna, lineamenti che sembrano delimitare anche il blocco delle Alpi Apuane. La dorsale di Monte Perpoli, vicino a Castelnuovo Garfagnana, rappresenta, a sua volta, la linea di separazione tra le due sorgenti individuali, suddividendo la valle del Serchio in due porzioni pressoché di egual lunghezza. La ITIS050 è ritenuta capace di sismi di Mw massima pari a **6.4**; la ITIS051 è ritenuta capace di sismi di Mw massima pari a **6.1**.

Circa 30 km a NO del territorio comunale di Maranello è presente la sorgente sismogenetica composta **ITCS049 "Campegine-Correggio"**, ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a 5.5 (derivata da dati sismologici regionali). Questa sorgente appartiene al fronte di sovrascorrimento dell'Arco di Ferrara, un arco esterno NO-N-vergente posto all'estremità nord-orientale della catena appenninica settentrionale, al di sotto della pianura padana. La geometria è determinata principalmente sulla base delle osservazioni strutturali e sismologiche di vari autori: lo *strike* varia da 70° a 110°; il *dip* varia da 30° a 50°; il *rake* è assunto corrispondente ad un sovrascorrimento puro (80°-100°); la *slip rate* varia da 0,04 a 0,16 mm/anno; le profondità minima e massima sono state individuate, rispettivamente, a -3 e -10 km.

Infine, circa 70 km e NE di Maranello è presente la sorgente sismogenetica composta **ITCS012 "Malalbergo-Ravenna"**, ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a 6. Anch'essa parte del fronte di sovrascorrimento dell'Arco di Ferrara, ne rappresenta il segmento vergente verso N-NE. La sorgente rappresenta il segmento meno profondo del fronte esterno degli Appennini Romagnoli e, nella sua porzione più orientale, ne costituisce la rampa destra. Sembra essere responsabile del livello di sismicità - da intermedio a dannoso - della regione. La geometria è determinata principalmente sulla base di considerazioni geologiche a scala regionale e della sismicità strumentale: lo *strike* varia da 85° a 150°; il *dip* varia da 20° a 40°; il *rake* è assunto corrispondente ad un sovrascorrimento da puro a obliquo (80°-120°); la *slip rate* varia da 0,49 a 0,55 mm/anno; le profondità minima e massima sono state individuate, rispettivamente, a -2 e -8 km.

Sulla base dell'analisi di pericolosità effettuata dall'INGV⁶, il valore di PGA atteso, con 10% di probabilità di superamento in 50 anni, è pari a 0,16g (50° percentile, pari ad una frequenza di superamento annuale di 0,0021) (Figura 9). La disaggregazione del valore di a_g con la medesima probabilità di eccedenza (Figura 10) mostra come il contributo percentualmente maggiore (30-40%) alla pericolosità sismica di base del territorio comunale sia determinato da sismi di magnitudo compresa tra 4.5 e 5, con epicentro nei primi 10 km di distanza dal territorio comunale, in grado di produrre PGA pari a 0,32g.



Frequenza annuale di superamento	a(g) (Coordinate del punto lat: 44.5066, lon: 10.8973, ID: 16724)		
	16° percentile	50° percentile	84° percentile
0.0004	0.2113	0.2658	0.2949
0.0010	0.1621	0.2046	0.2195
0.0021	0.1293	0.1627	0.1728
0.0050	0.0954	0.1183	0.1292
0.0071	0.0827	0.1015	0.1129
0.0099	0.0724	0.0881	0.0991
0.0139	0.0620	0.0764	0.0863
0.0200	0.0524	0.0656	0.0739
0.0333	0.0394	0.0528	0.0582

Figura 9 – Valore di PGA atteso per il territorio comunale di Maranello con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni, calcolato dallo studio di pericolosità sismica dell'INGV.

⁶ <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>

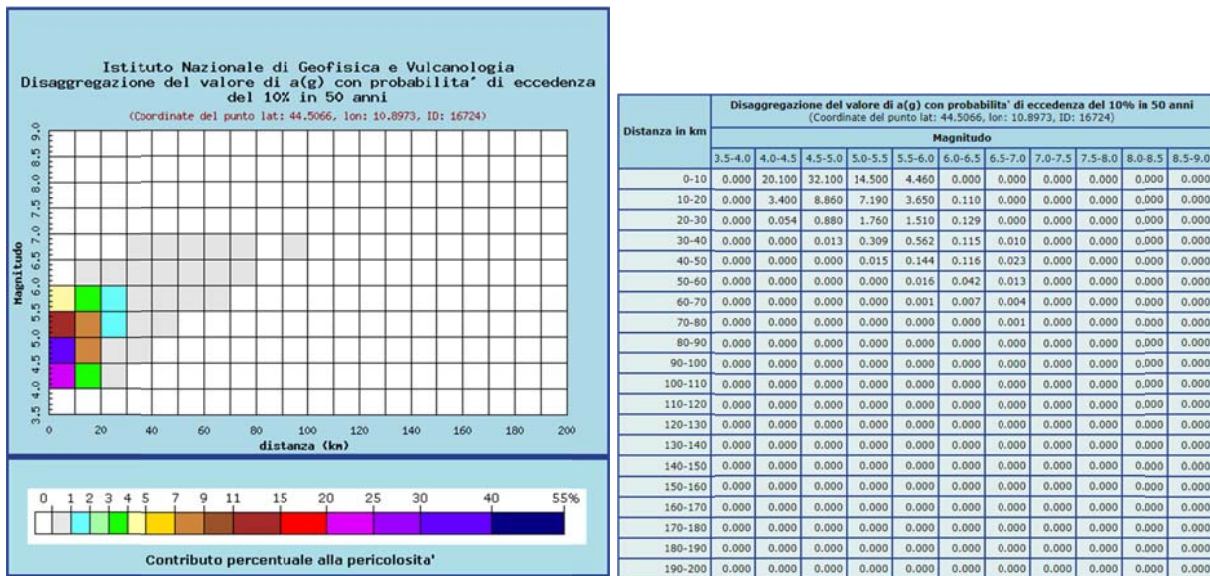


Figura 10 – Disaggregazione del valore di a_g con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per il territorio comunale di Maranello.

Il contributo del 25-30% alla pericolosità sismica di base del territorio comunale è dato dalla coppia (Mw 4-4.5; epicentro 0-10 km), in grado di produrre PGA pari a 0,2g. Contributi percentuali minori alla pericolosità (11-15% e 7-9%) sono dati, rispettivamente, dalle coppie (Mw 5-5.5; epicentro 0-10 km) e (Mw 4.5-5.5; epicentro 10-20 km), in grado di produrre PGA pari a 0,14g e 0,07-0,08g. Solo il 4-5% di contributo alla pericolosità sismica di base è dato dalla coppia (Mw 5.5-6; epicentro 0-10 km), in grado di produrre PGA pari a 0,04g.

4. ASPETTI GEOLOGICI E GEOMORFOLOGICI

Per la descrizione degli aspetti geologici e geomorfologici caratteristici dell'intero territorio comunale di Maranello si rimanda all'ampia trattazione eseguita dal Dott. Geol. Gian Pietro Mazzetti nella Relazione Tecnico Illustrativa della Microzonazione sismica di II livello della Variante 2017 del PSC di Maranello.

A seguire verranno descritti gli aspetti geologici e geomorfologici peculiari delle 3 aree in cui sono state eseguite le analisi di III livello di Microzonazione sismica.

In generale, le tre aree ricadono all'interno della fascia di territorio che si estende, a partire da sud, dal contatto stratigrafico inconforme tra la formazione delle Argille Azzurre (FAA) Plio-Pleistoceniche e le formazioni della Successione epiligure (in particolare la formazione del Termina – TER -per l'area di località Il Poggio), alla fascia prettamente collinare caratterizzata dalla presenza ubiquitaria delle Argille Azzurre (in particolare per le due aree di Torre Oche e via Fondo Val Grizzaga).

Le Argille Azzurre sono presenti nella loro litozona argilloso-marnosa – marnoso-siltosa (FAA), mentre la formazione del Termina è presente sia con le marne argillose, con locali intercalazioni arenacee (TER), sia col Membro di Montardone (TER₁), costituito da brecce poligeniche a matrice argillosa. I rapporti stratigrafico-tettonici tra le varie unità plioceniche ed epiliguri (nonché tra le sottostanti unità liguri) è chiaramente visibile nell'interpretazione della sezione geologica di Figura 5, tracciata in prossimità dell'area di studio di Torre Oche, ma ragionevolmente riferibile anche alle altre due aree di studio.

Grazie alle misurazioni degli assetti di FAA in superficie, la sezione interpreta la successione di anticlinali e sinclinali con assi orientati NO-SE come dovuta a superfici di sovrascorrimento cieche legate al Fronte di thrust Pede-appenninco (PTA), che interseca la superficie topografica in corrispondenza del Capoluogo. In corrispondenza delle porzioni sommitali delle anticlinali è stata ipotizzata la formazione di depressioni morfologicamente simili a quelle di caldera – si veda il caso delle Salse di Nirano. Le depressioni costituiscono preferenziali punti di fuoriuscita di fanghi ricchi in acque salate ed idrocarburi; quest’ultimi sembrano essere contenuti in alti strutturali della Marnoso Arenacea da cui vengono liberati lungo le superfici di thrust cieche di cui sopra.

4.1. Area di analisi “Torre Oche”

L’area di Torre Oche è la più prossima alla linea di sezione di Figura 5 e , in particolare, alla depressione delle Salse di Nirano. Qui, in base ai rapporti di scala della sezione, lo spessore delle FAA può essere ipotizzato di circa 170 m, fino al contatto basale con le formazioni della successione Epiligure e, a luoghi, con la Formazione a Colombacci del Messiniano.

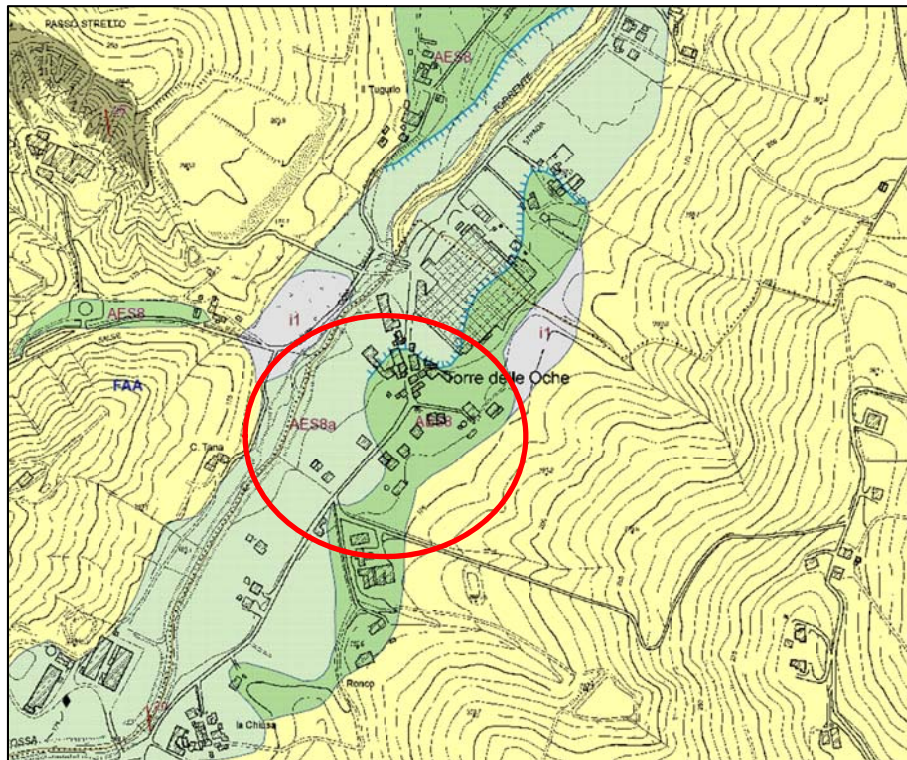


Figura 13 – Stralci della Sezione nr. 219070 della Carta geologica dell’appennino emiliano-romagnolo a scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna. (Fonte: WMS Regione Emilia-Romagna, accesso 11 gennaio 2019). Legenda – FAA: formazione delle Argille Azzurre; AES₈: Subsintema di Ravenna; AES_{8a}: Unità di Modena; i1: conoide torrentizio in evoluzione. Il cerchio rosso individua l’area di studio di Torre Oche.

La formazione delle Argille Azzurre risulta ubiquitaria anche in un ampio intorno dell’area di studio (Figura 13), con un assetto locale che si può ricostruire sulla base dei due affioramenti più prossimi: uno poco a sud di Passo Stretto ed uno nell’incisione del Torrente Fossa di Spezzano, e che risulta avere direzione d’immersione ENE ed inclinazione intorno a 20-28°. Solo superficialmente, all’interno della piana intravalliva del T. Fossa sono presenti sedimenti continentali di origine fluviale (AES₈ e AES_{8a}), terrazzati, costituiti da ghiaie in matrice sabbioso-limosa. L’area d’indagine è attraversata da una piccola scarpata di terrazzo fluviale che, con andamento sinuoso, unisce con direzione SO-NE l’agglomerato di case di Torre Oche

con lo stabilimento ceramico vicino. In realtà, l'esame sul terreno induce a ritenere che tale scarpata prosegua, con altezza progressivamente minore, verso SO, seguendo all'incirca l'isoipsa di quota 165 m s.l.m. fino alla sua intersezione con la sponda destra del torrente. Lo spessore epidermico della superficie terrazzata di AES8 risulta composto da depositi eluvio-colluviali derivanti dal dilavamento, ad opera delle acque di ruscellamento superficiale, del pendio a monte in Argille Azzurre. L'alveo attuale del torrente risulta profondamente inciso nei suoi stessi depositi, raggiungendo la formazione delle Argille Azzurre e determinando la formazione di scarpate di erosione fluviale attive, di altezza variabile dai 2 ai 4 m.

4.2. Area di analisi "via Fondo Val Grizzaga"

L'area di studio di via Fondo Val Grizzaga dista circa 2 km in direzione SO rispetto alla linea di sezione di Figura 5 e tale distanza è ancora sufficientemente breve da permettere di ipotizzare anche per quest'area un assetto geologico generale abbastanza simile a quello descritto dalla sezione stessa. Come per Torre Oche, anche qui la formazione delle Argille Azzurre (FAA) risulta ubiquitaria anche in un più ampio intorno dell'area (Figura 14).

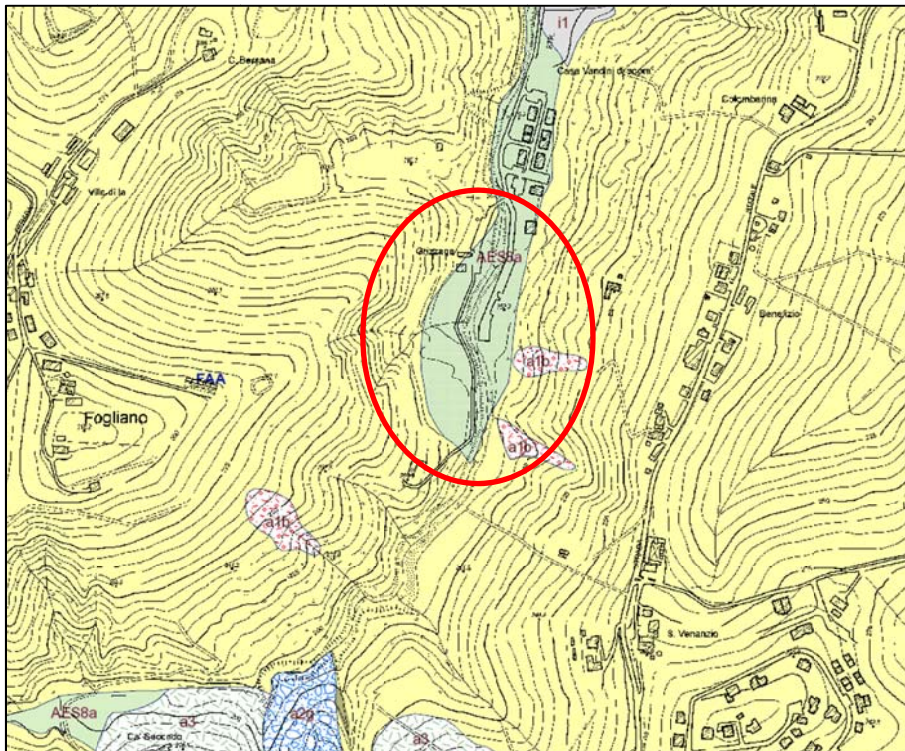


Figura 14 - Stralcio della Sezione nr. 219070 della Carta geologica dell'appennino emiliano-romagnolo a scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna. (Fonte: WMS Regione Emilia-Romagna, accesso 11 gennaio 2019). Legenda - FAA: formazione delle Argille Azzurre; AES8a: Unità di Modena; i1: conoide torrentizia in evoluzione; a1b: deposito di frana attiva per scivolamento; a2g: deposito di frana quiescente complessa; a3: deposito di versante s.l. L'ellisse rossa individua l'area di studio di via Fondo Val Grizzaga.

L'assetto degli strati di FAA non è localmente decifrabile poiché mancano misurazioni puntuali, ma lo schema strutturale generale (Figura 5) fa ritenere possibile una inclinazione verso SO, poiché in corrispondenza del fianco meridionale di una anticlinale a direzione appenninica. Anche qui lo spessore delle FAA può essere ipotizzato a circa 170 m.

La valle risulta molto più stretta rispetto a quella di Torre Oche: il bacino di alimentazione del Grizzaga è in effetti di gran lunga più limitato rispetto a quello del Fossa e ci troviamo non molto distante dalla sua zona sorgente. Il corso d'acqua ha potuto sì scavare una profonda vallecchia nei terreni duttili delle FAA, ma la bassa energia cinetica e la breve distanza dalla zona sorgente non ha reso possibile la costruzione di un ampio letto e di depositi fluviali di

estensione rilevante. In tal modo la valle è formata da due pendii piuttosto ripidi e da un fondo sub-orizzontale, con leggerissima inclinazione verso N, costituito dai sedimenti in gran parte limo-sabbiosi e, in minor parte, ghiaiosi, di AES8a.

A luoghi, in corrispondenza di incisioni lineari lungo le linee di massima pendenza dei due versanti laterali, sono presenti corpi di frana attivi, di limitata estensione e spessore, dovuti a scivolamenti di terra: le zone di distacco sono localizzabili a metà pendio, mentre i settori di accumulo non raggiungono la piana valliva. Ancorché identificate come attive dalla cartografia geologica, il rilevamento sul terreno consente di stimarle quiescenti, essendo la loro superficie completamente vegetata, anche da specie arboree di alto fusto.

4.3. Area di analisi “località Il Poggio”

Quest’area di studio si colloca nei terreni epiliguri della Formazione del Termina (TER e TER1), in prossimità del loro contatto inconforme con le Argille Azzurre (Figura 15).

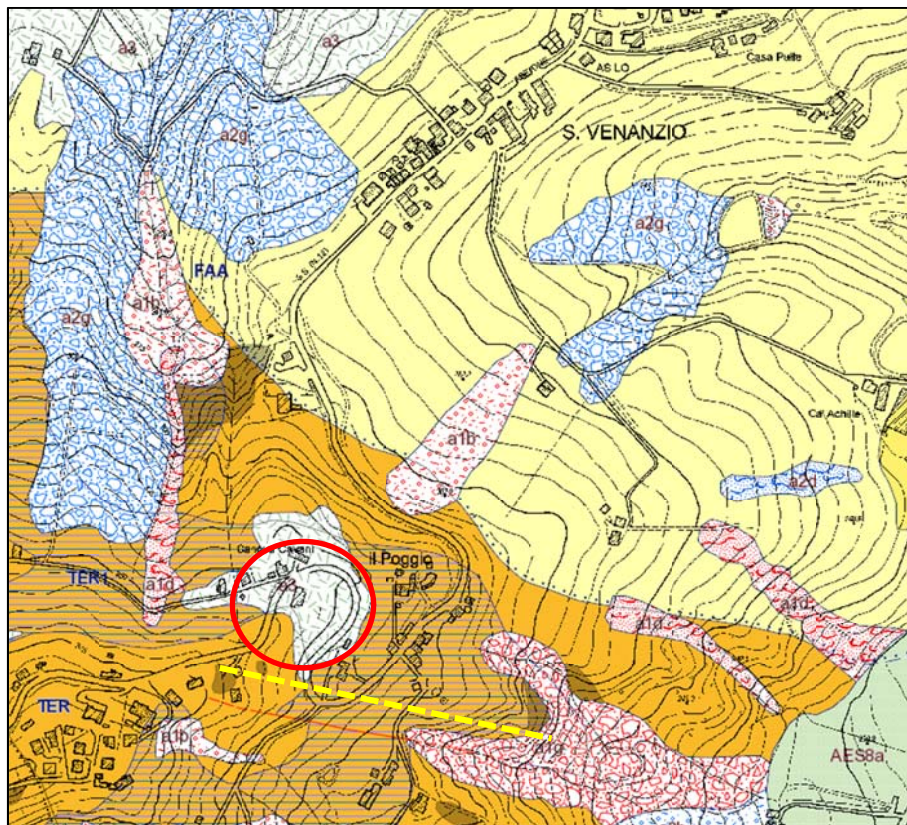


Figura 15 - Stralcio della Sezione nr. 219110 della Carta geologica dell'appennino emiliano-romagnolo a scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna. (Fonte: WMS Regione Emilia-Romagna, accesso 11 gennaio 2019). Legenda – FAA: formazione delle Argille Azzurre; TER: Formazione del Termina; TER1: Formazione del Termina – membro di Montardone; AES8a: Unità di Modena; a1b: deposito di frana attiva per scivolamento; a1d: deposito di frana attiva per colamento di fango; a1g: deposito di frana attiva complessa; a2g: deposito di frana quiescente complessa; a3: deposito di versante s.l. Il cerchio rosso individua l'area di studio di località Il Poggio; la linea tratteggiata gialla indica il profilo utilizzato per interpretare i rapporti stratigrafici locali.

I rapporti stratigrafico-tettonici in quest’area possono essere assunti simili a quelli descritti nell’interpretazione della sezione B-B’ di Figura 16, a meno del contatto tra FAA e TER che, per l’area in esame non è per faglia bensì, come detto, per contatto stratigrafico inconforme.

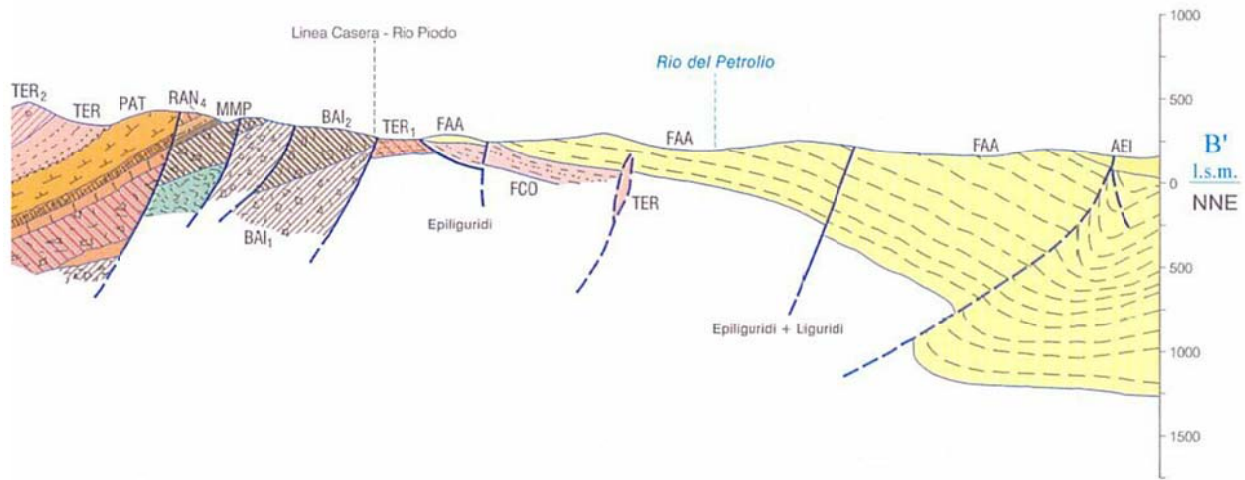


Figura 16 – Stralcio della sezione B-B' del Foglio 219 "Sassuolo" a scala 1:50.000 della Carta Geologica d'Italia, che può essere presa come riferimento per descrivere l'interpretazione dei rapporti stratigrafico-tettonici tra la successione epiligure e i terreni Plio-Pleistocenici marini nell'area di studio di località Il Poggio.

Dal solo esame dei limiti stratigrafici tra le formazioni e del loro rapporto con la superficie topografica - non essendo disponibili misurazioni di assetti in un ampio intorno dell'area - è possibile assumere un contatto tra TER e FAA lungo una superficie inclinata verso NE, con inclinazione superiore a quella del pendio che scende da Il Poggio in direzione S. Venanzio.

Con lo stesso approccio, i contatti tra TER ed il suo membro TER1 sono: a reggipoggio in corrispondenza del versante settentrionale de Il Poggio; a franapoggio maggiore del pendio poco a valle, verso SE, della linea di cresta a SO de Il Poggio, su cui scorre la SP3; a franapoggio minore del pendio nella propaggine più orientale dell'affioramento di TER1, fino al contatto con il deposito di frana attiva complessa che ha il suo piede in località "Basilisco", sul terrazzo fluviale del T. Tiepido.

Lo spessore di TER1 dovrebbe quindi essere abbastanza esiguo in corrispondenza de Il Poggio, e lasciare spazio, a circa 15/20 m di profondità, al sottostante TER che, a sua volta, potrebbe avere il suo contatto basale con PAT (Formazione di Pantano), ad esso stratigraficamente contiguo.

Dal punto di vista geomorfologico, le breccie a matrice argillosa di TER1 sembrano essere predisponenti lo sviluppo di instabilità di versante, come testimoniato dalle numerose frane attive e quiescenti che bordano la dorsale che unisce Il Poggio a Cavana e che hanno la loro zona sorgente in corrispondenza dei terreni di TER1. TER appare relativamente più stabile. Il deposito franoso più prossimo all'area d'indagine è presente lungo il versante orientale che scende da Il Poggio fino al terrazzo del T. Tiepido. E' una frana attiva, complessa, che ha le sue due zone sorgente al contatto tra TER1 e TER, all'interno di due impluvi che si uniscono a metà pendio.

A cavallo della linea di cresta è cartografato un deposito di versante s.l., mentre un altro corpo di frana attiva, per scivolamento, ha la sua linea di coronamento subito a valle della SP3, sul versante settentrionale de Il Poggio, e la sua zona sorgente a cavallo del limite stratigrafico tra TER e FAA.

5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Oltre agli schemi stratigrafico-tettonici generali di questa fascia di territorio collinare dell'Appennino modenese, precedentemente descritti e rappresentati nelle sezioni geologiche di Figura 5 e Figura 16, alle ipotesi sulle stratigrafie locali avanzate nel capitolo precedente si possono di seguito aggiungere i dati relativi ai tre sondaggi geognostici a carotaggio eseguiti nelle tre aree per questo studio.

5.1. Area di analisi "Torre Oche"

Nell'area, ed in un suo più ampio intorno, in base ai dati d'archivio consultati, non sembra siano mai stati realizzati sondaggi a carotaggio. Per questo studio è stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo fino a 10 m, terminato a 30 m con carotaggio a distruzione (Allegato 3). L'ubicazione del sondaggio è riportata in Figura 17.



Figura 17 – Ubicazione del sondaggio a carotaggio continuo/distruzione eseguito per questo studio in località "Torre Oche".

I primi 5 m dal p.d.c. sono costituiti da limo debolmente sabbioso di colore marrone chiaro, intervallati da uno strato di ghiaia tra 1,8 e 3,2 m (Figura 19). Viste le considerazioni di tipo geomorfologico riportate nel capitolo 4, in questo punto dell'area in esame si può interpretare la successione stratigrafica come data da:

- uno strato limo-sabbioso superficiale, di origine eluvio-colluviale,
- uno strato ghiaioso intermedio, di origine alluvionale e legato al terrazzo fluviale,
- un secondo strato limo-sabbioso, nuovamente di origine eluvio-colluviale.

Oltre il secondo strato limo-sabbioso seguono 5 m di argille grigie, compatte e molto omogenee, attribuibili al substrato marino Plio-pleistocenico (FAA).

Nei successivi 20 m il carotaggio a distruzione ha portato in superficie sedimento fine della stessa natura e dello stesso colore dei 5 m di Argille Azzurre precedenti.

La stratigrafia di un pozzo per acqua (dal Database delle indagini geognostiche della Regione Emilia-Romagna), realizzato in prossimità dell'area (Figura 18 ed Allegato 1), ha evidenziato la presenza della stessa argilla grigia, compatta, fino a 60m dal p.d.c.

Questi dati confermano, pertanto, quanto già interpretato dalle analisi geologiche di letteratura, ovvero la presenza su tutta l'area di un'unica litologia dominante, le Argille Azzurre, la cui profondità raggiunge sicuramente i 60 m, ma che può estendersi anche a profondità di gran lunga superiori (come ipotizzato, finanche a 170 m).



Figura 18 – Ubicazione del pozzo per acqua prossimo all'area di indagine (individuato dal cerchio rosso), da cui è stato possibile estendere la stratigrafia locale sino alla profondità di 60 m dal p.d.c. (Fonte: database geognostico Regione Emilia-Romagna).

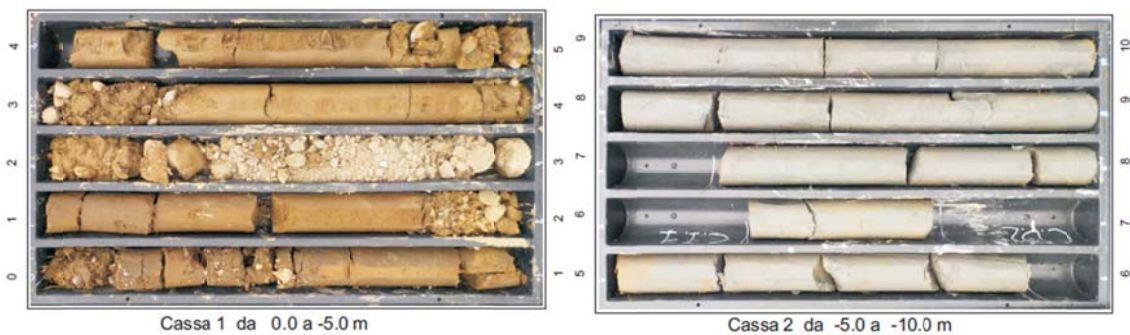


Figura 19 – Fotografie delle casse catalogatrici del sondaggio a carotaggio continuo eseguito, per questo studio, nell'area d'indagine di "Torre Oche".

La colonna lito-stratigrafica rappresentativa del sottosuolo di tutta l'area d'indagine di Torre Oche è quindi schematizzabile come in Figura 20.

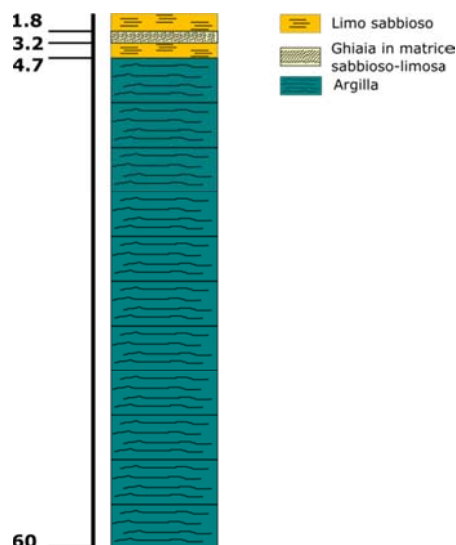


Figura 20 – Schema lito-stratigrafico dell'area d'indagine.

5.2. Area di analisi di “via Fondo Val Grizzaga”

Anche per quest’area, ed per un suo più ampio intorno, in base ai dati d’archivio consultati, non sembra siano mai stati realizzati sondaggi a carotaggio. Per questo studio è stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo fino a 10 m, terminato a 30 m con carotaggio a distruzione (Allegato 3). L’ubicazione del sondaggio è riportata in Figura 21.



Figura 21 - Ubicazione del sondaggio a carotaggio continuo/distruzione eseguito per questo studio in località “via Fondo Val Grizzaga”.

I primi 4 m dal p.d.c. sono costituiti da limo argilloso di colore grigio, a meno dei primi 60 cm dal p.d.c. costituiti da ghiaia in matrice sabbioso-limosa (Figura 22). Viste le considerazioni di tipo geologico e geomorfologico riportate nel capitolo 4, in questo punto dell’area in esame si può interpretare la successione stratigrafica come data da:

- uno strato ghiaioso in matrice sabbioso-limosa superficiale, di origine fluviale,
- uno strato limo-argilloso, di origine eluvio-colluviale.

Oltre lo strato limo-argilloso seguono 6 m di argille grigie, compatte e molto omogenee, attribuibili al substrato marino Plio-pleistocenico (FAA).

Nei successivi 20 m il carotaggio a distruzione ha portato in superficie sedimento fine della stessa natura e dello stesso colore dei 6 m di Argille Azzurre precedenti.

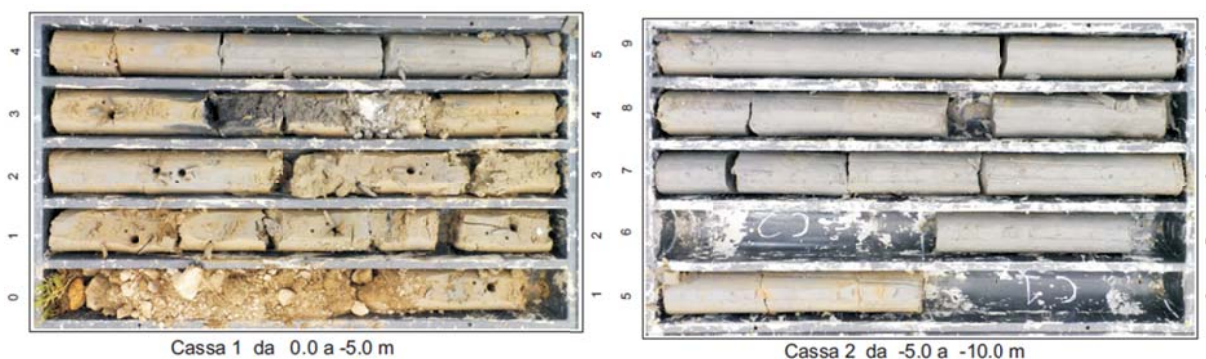


Figura 22 - Fotografie delle casse catalogatrici del sondaggio a carotaggio continuo eseguito, per questo studio, nell’area d’indagine di “via Fondo Val Grizzaga”.

Anche per quest’area, pertanto, è certa la presenza ubiquitaria di un’unica litologia dominante, le Argille Azzurre, il cui spessore locale può essere esteso, in analogia con la vicina Torre Oche, fino a circa 170 m.

La colonna lito-stratigrafica rappresentativa del sottosuolo di tutta l'area d'indagine di via Fondo Val Grizzaga è quindi schematizzabile come in Figura 23.

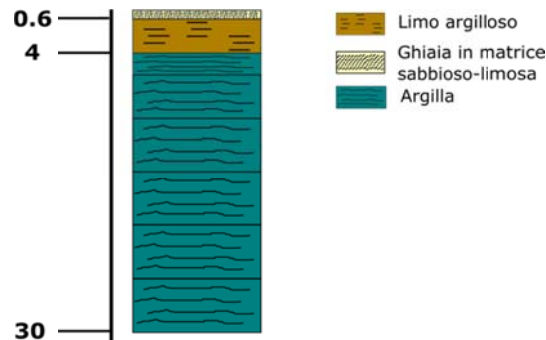


Figura 23 - Schema lito-stratigrafico dell'area d'indagine.

5.3. Area di analisi di "località Il Poggio"

In base ai dati d'archivio consultati, in prossimità dell'area è stato realizzato un sondaggio a carotaggio continuo, visibile con la sigla "SM106" (così come da codifica nella carta delle indagini del II livello di microzonazione sismica) in Figura 24. Per questo studio è stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo fino a 10 m, terminato a 30 m con carotaggio a distruzione (Allegato 3). L'ubicazione del sondaggio è riportata in Figura 24 con la sigla "S3".

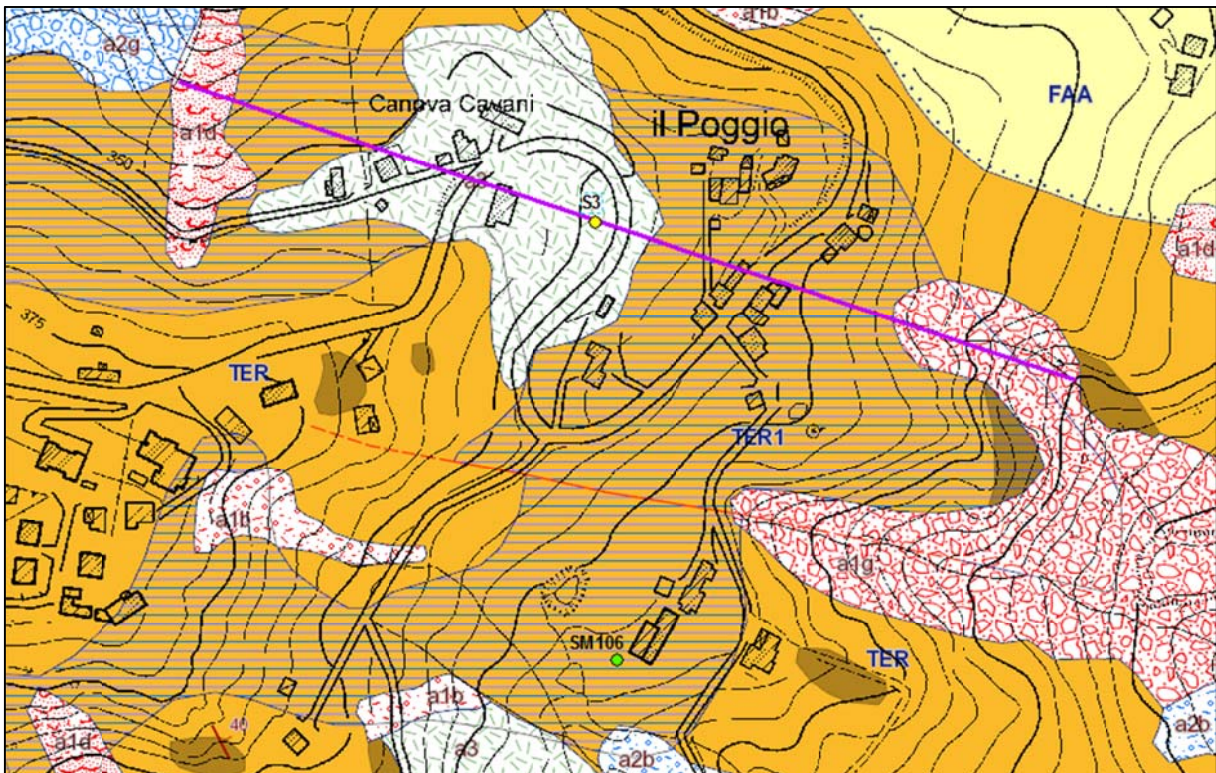


Figura 24 – Ubicazione del sondaggio eseguito per questo studio (S3 in carta) e del sondaggio di cui si dispone la stratigrafia grazie all'indagine di microzonazione sismica di II livello (SM106), consultabile in Allegato 2 di questa relazione. La linea viola è la traccia del profilo lungo la quale è stata eseguita l'analisi di risposta sismica locale 2D per questo studio e lungo la quale è stata interpretata la sezione geologica di Figura 25.

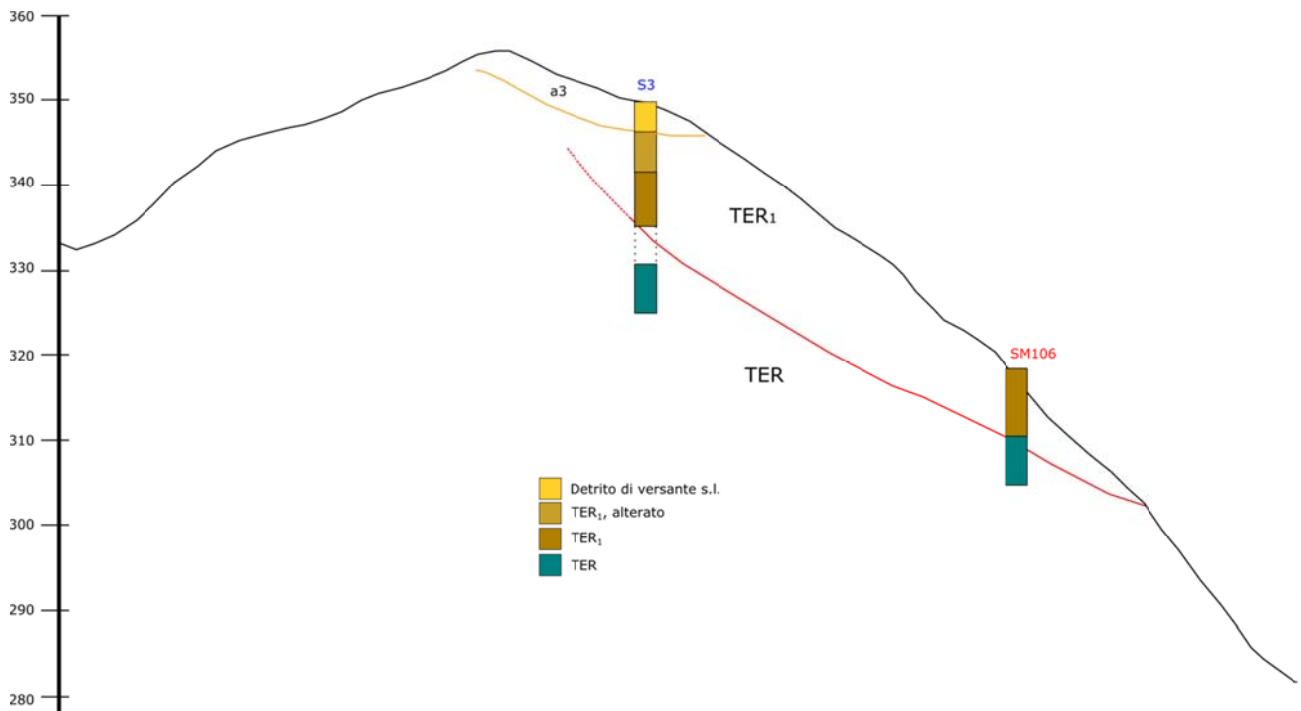
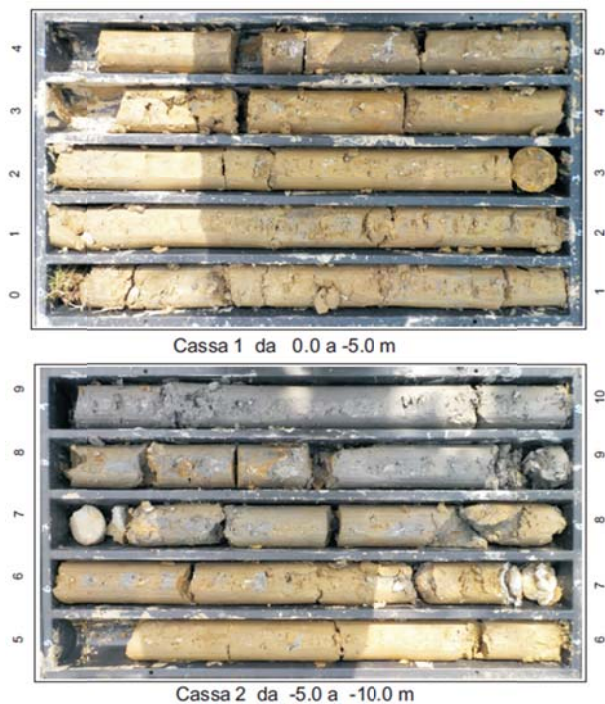


Figura 25 – Sezione geologica interpretata lungo il profilo di Figura 24.

I primi 4 m dal p.d.c. sono costituiti da limo debolmente sabbioso con frammenti lapidei di varia natura, sia arrotondati che spigolosi, identificabili come detrito di versante. Da 4 a 8 m il limo sabbioso sfuma progressivamente verso terreni a maggior percentuale di argilla, rappresentando lo spessore di alterazione della formazione del TER₁. Oltre gli 8 m vi è un sensibile cambio litologico, col passaggio ad argilla debolmente limosa di colore grigio con abbondanti inclusi lapidei di varia natura e dimensione che possono essere riconducibili alle breccie a natura argillosa del TER₁, inalterate.



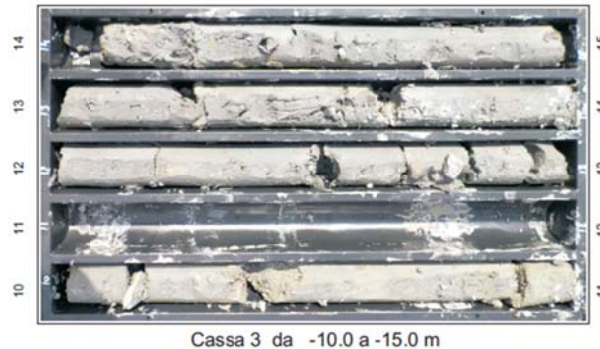


Figura 26 - Fotografie delle casse catalogatrici del sondaggio a carotaggio continuo eseguito, per questo studio, nell'area d'indagine di "località Il Poggio".

Da 15 a 30 m il sondaggio S3 è stato realizzato a distruzione, pertanto non è stato possibile intercettare il passaggio da TER_1 a TER.

Tale passaggio è stato individuato lungo il sondaggio a carotaggio continuo "SM106" (Allegato 2), a circa 8 m di profondità. Come osservabile in Figura 24, il sondaggio è stato realizzato circa 30 più a valle di "S3". Se si trasla il sondaggio "SM106" lungo la sua isoipsa fino ad intercettare la linea del profilo topografico di Figura 24, è possibile avere un quadro, ancorché di massima, dei rapporti tra le due colonne stratigrafiche e tentare una ricostruzione della stratigrafia lungo il profilo stesso, visibile in Figura 25.

Rimane l'incognita della profondità del contatto TER_1/TER in corrispondenza del sondaggio "S3", ma l'inclinazione maggiore del pendio del limite stratigrafico TER_1/TER desumibile a monte di "S3", insieme alla profondità del contatto TER_1/TER emerso in "SM106" permettono di ipotizzarla tra 15 e 30 m.

6. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

La raccolta organica delle indagini geotecniche e geofisiche d'archivio è stata eseguita già in occasione dello studio di microzonazione sismica di II livello eseguito dal Dott. Geol. Gian Pietro Mazzetti, ed ha permesso di acquisire dati geognostici e geofisici contenuti in relazioni geologiche redatte a corredo di progetti di edilizia privata e di opere pubbliche.

Tutte le indagini sono state trasformate in formato digitale, georeferenziate, ed inserite in ambiente GIS (Figura 27). A tal proposito, sia i dati di base che i dati elaborati sono stati organizzati in formato vettoriale (*shapefile*) nel rispetto delle indicazioni per l'archiviazione informatica, rappresentazione e fornitura dei dati degli studi di microzonazione sismica e dell'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza, di cui all'OPCM 4007/2012 e al Decreto del 16.03.2012 del Capo del Dipartimento della Protezione Civile.

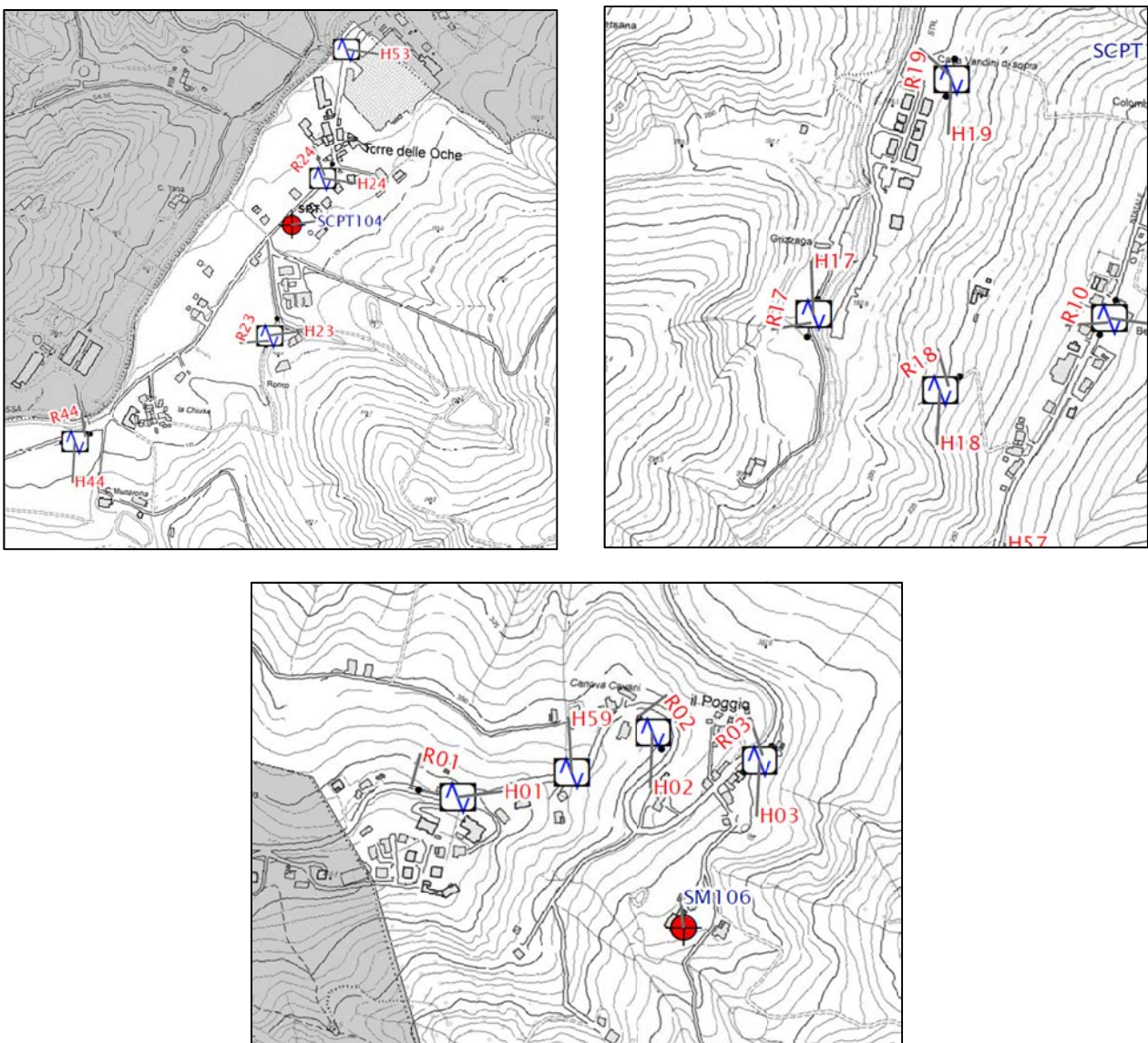


Figura 27 – Indagini geognostiche e geofisiche d'archivio all'interno dell'area di approfondimento di MS3 di "Torre Oche" ed in un suo intorno (in alto, sinistra); all'interno dell'area di approfondimento di MS3 di "via Fondo Val Grizzaga" ed in un suo intorno (in alto, destra) e all'interno dell'area di approfondimento di MS3 di "località Il Poggio" ed in un suo intorno (in basso, al centro). (Fonte: Tav. 1.0 "Carta delle indagini pregresse e nuove", QC.B MS Variante 2017 al PSC).

Ad integrazione delle prove pregresse, è stata eseguita una campagna di indagini ad hoc, in modo da rendere possibile, per ognuna delle 3 aree interessate da questo approfondimento di III livello dello studio di microzonazione sismica, l'analisi di risposta sismica locale 2D (Figura 28).

In particolare sono stati realizzati *ex-novo*:

Per l'area di "**Torre Oche**"

- n. 1 MASW (*Multichannel Spectral Analysis of Waves*) per la definizione del profilo di Vs con la profondità;
- n. 1 indagine di sismica passiva HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) per la misura della frequenza di vibrazione fondamentale del terreno, impiegando un tromografo digitale portatile;
- n. 1 profilo sismico a rifrazione, finalizzato alla definizione dello spessore e della geometria bidimensionale dei sismostrati presenti in corrispondenza dell'area.
- n. 1 sondaggio geognostico a carotaggio continuo per la definizione del profilo stratigrafico in corrispondenza dell'area di studio fino ad una profondità di 10 m, esteso a 30 m a distruzione;
- n. 1 indagine sismica Down-hole nel foro di sondaggio di cui sopra, appositamente attrezzato, per la ricostruzione di dettaglio dei profili di Vs e Vp;
- n. 1 prova penetrometrica dinamica super-pesante (DPSH) per ricostruire il profilo di resistenza del terreno con la profondità.

Per l'area di "**via Fondo Val Grizzaga**"

- n. 1 MASW (*Multichannel Spectral Analysis of Waves*) per la definizione del profilo di Vs con la profondità;
- n. 1 indagine di sismica passiva HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) per la misura della frequenza di vibrazione fondamentale del terreno, impiegando un tromografo digitale portatile;
- n. 1 profilo sismico a rifrazione, finalizzato alla definizione dello spessore e della geometria bidimensionale dei sismostrati presenti in corrispondenza dell'area.
- n. 1 sondaggio geognostico a carotaggio continuo per la definizione del profilo stratigrafico in corrispondenza dell'area di studio fino ad una profondità di 10 m, esteso a 30 m a distruzione;
- n. 1 indagine sismica Down-hole nel foro di sondaggio di cui sopra, appositamente attrezzato, per la ricostruzione di dettaglio dei profili di Vs e Vp;
- n. 2 prove penetrometriche statiche meccaniche (CPT) per ricostruire il profilo di resistenza del terreno con la profondità.

Per l'area di "**località Il Poggio**"

- n. 1 MASW (*Multichannel Spectral Analysis of Waves*) per la definizione del profilo di Vs con la profondità;
- n. 1 indagine di sismica passiva HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) per la misura della frequenza di vibrazione fondamentale del terreno, impiegando un tromografo digitale portatile;
- n. 1 sondaggio geognostico a carotaggio continuo per la definizione del profilo stratigrafico in corrispondenza dell'area di studio fino ad una profondità di 15 m, esteso a 30 m a distruzione;
- n. 1 indagine sismica Down-hole nel foro di sondaggio di cui sopra, appositamente attrezzato, per la ricostruzione di dettaglio dei profili di Vs e Vp;
- n. 1 prova penetrometrica statica meccanica (CPT) per ricostruire il profilo di resistenza del terreno con la profondità.

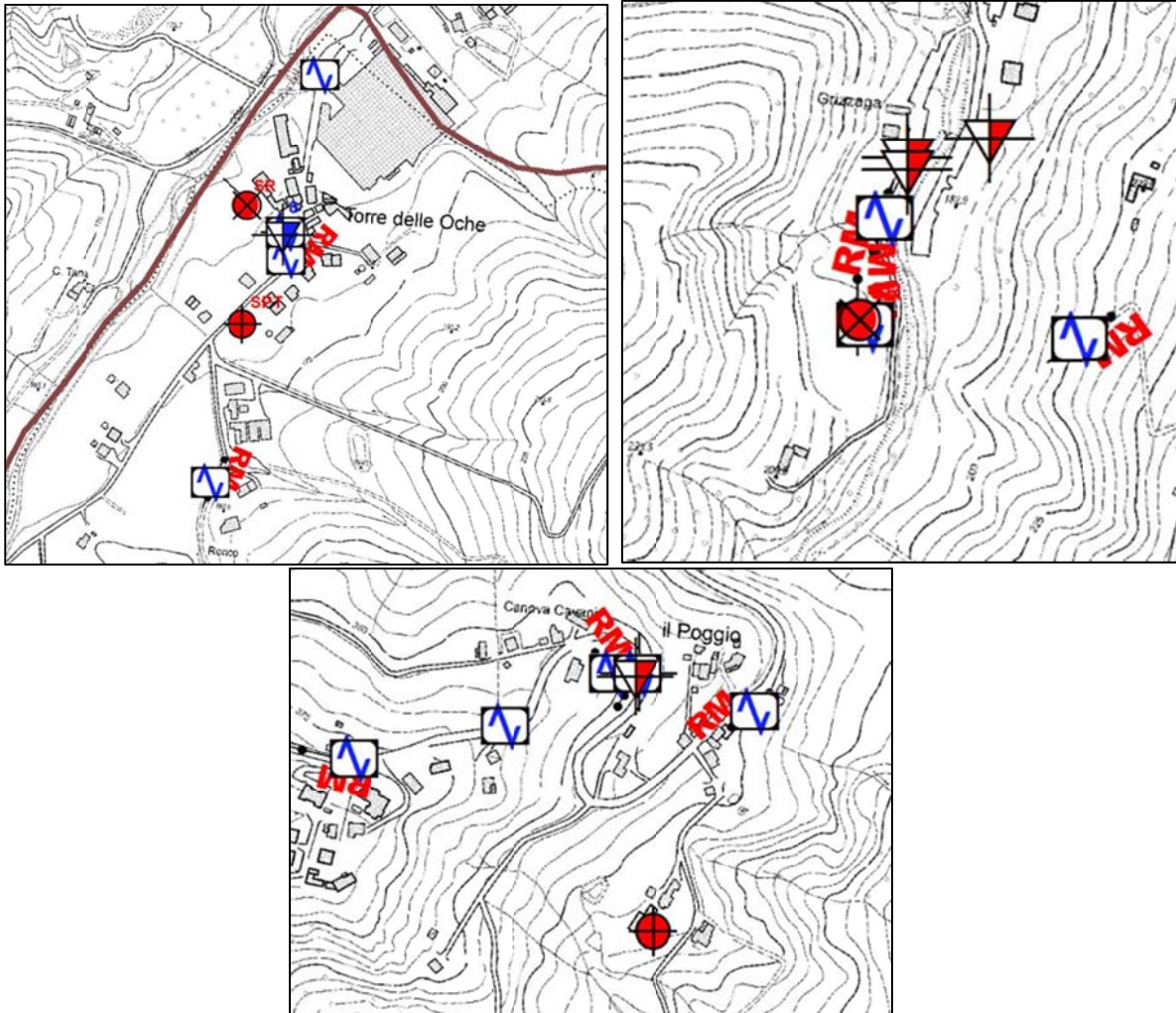


Figura 28 – Indagini geonostiche e geofisiche realizzate per questo studio, unitamente alle indagini pre-esistenti di Figura 27: Torre Oche (in alto a sinistra), via Fondo Val Grizzaga (in alto a destra) e località Il Poggio (in basso al centro).

6.1. Sondaggi a carotaggio continuo (le 3 aree di studio)

Per quanto riguarda i sondaggi a carotaggio continuo/distruzione, sia quello d'archivio vicino a Il Poggio che quelli realizzati per questo studio, le rispettive stratigrafie sono già state ampiamente descritte nel capitolo 5 a cui si rimanda.

Qui si aggiungono solo le seguenti informazioni integrative relative ai tre sondaggi realizzati per questo studio:

- tutti i fori di sondaggio sono stati attrezzati con un tubo in pvc Ø 3" per prova Down-hole;
- in nessun foro di sondaggio è stata rilevata la falda;
- nel tratto a carotaggio continuo è stato prelevato un campione indisturbato per ogni sondaggio, destinato a prove di laboratorio geotecnico:
 - "Torre Oche": C.I. 1, da 5,9 a 6,4 m;
 - "via Fondo Val Grizzaga": C.I. 2, da 5,5 a 6,5 m;
 - "località Il Poggio": C.I. 3: da 11 a 12 m.

6.2. Area di “Torre Oche”

6.2.1. MASW/Re.Mi.

Come si vede dalle figure 27 e 28, nell’area di studio sono state eseguite un’indagine Re.Mi. ed un’indagine MASW. In Allegato 4 si possono visionare i documenti relativi alle acquisizioni ed alle elaborazioni dell’indagine Re.Mi., d’archivio, e MASW, di nuova esecuzione.

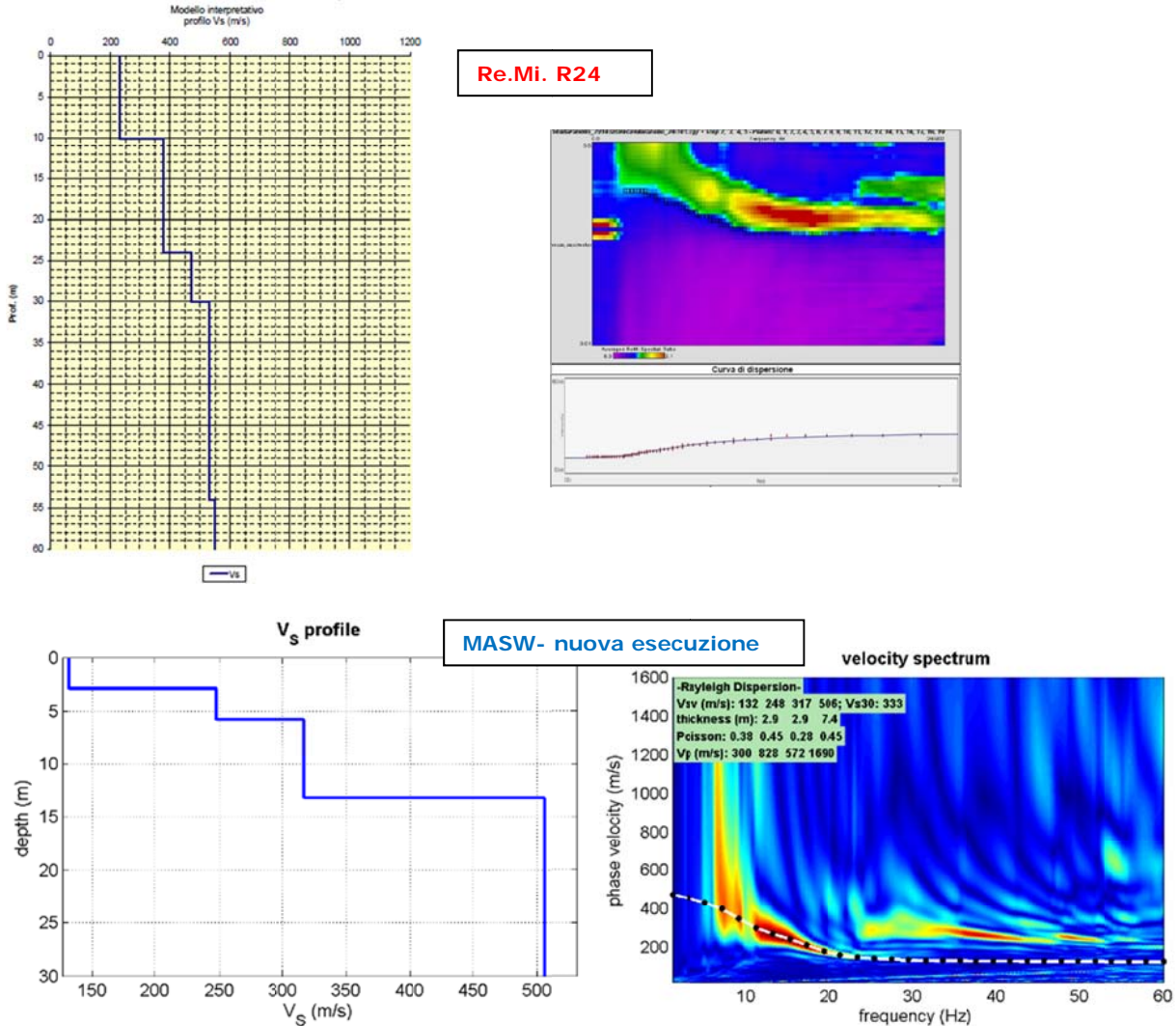


Figura 29 – Profili sismostratigrafici ricostruiti dalle indagini Re.Mi. e MASW eseguite nell’area di studio di “Torre Oche”.

I profili di Vs ricavati dalle due differenti tecniche d’indagine mostrano, fra loro, un andamento sufficientemente affine (Figura 30), sia nei valori di Vs che nelle variazioni del valore con la profondità. Il primo scarto di rilievo è indicato da entrambe tra i 10 e i 15 m, con un secondo scarto intorno ai 5 m, individuato soltanto dalla MASW.

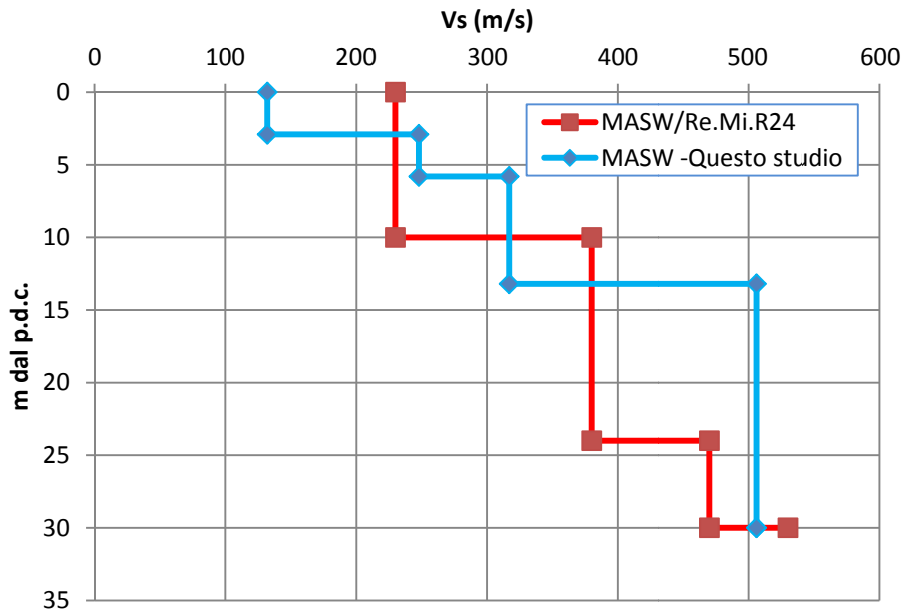
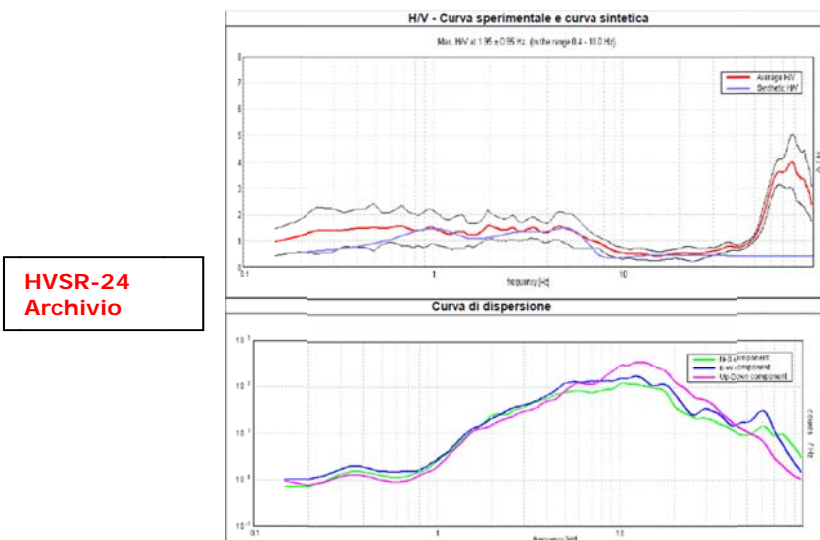


Figura 30 – Confronto tra i profili sismostratigrafici ricostruiti dalle indagini Re.Mi. e MASW eseguite all’interno dell’area di studio di “Torre Oche”. Il profilo ricavato dalla Re.Mi. è stato limitato ai primi 30 m, al fine di confrontarlo con quello ricavato dalla MASW.

6.2.2. HVSR

Le misure H/V (Figura 31, Allegato 5) non hanno evidenziato massimi significativi, con ampiezza dei rapporti ≤ 2 o di pochissimo superiore. Solo nella HVSR-24 è presente un picco pronunciato intorno a 80 Hz, evidentemente indicativo di un contrasto d’impedenza molto superficiale e probabilmente di origine antropica, considerata l’adiacenza del sito di misura rispetto alla sede stradale.



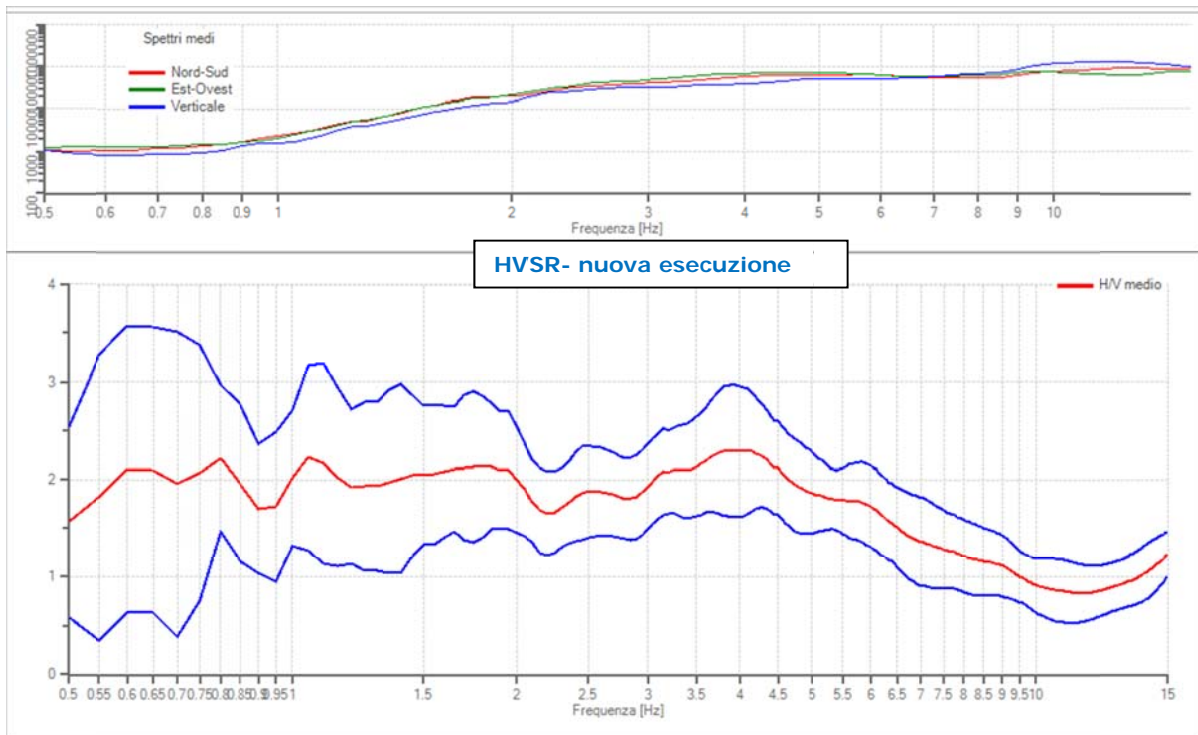
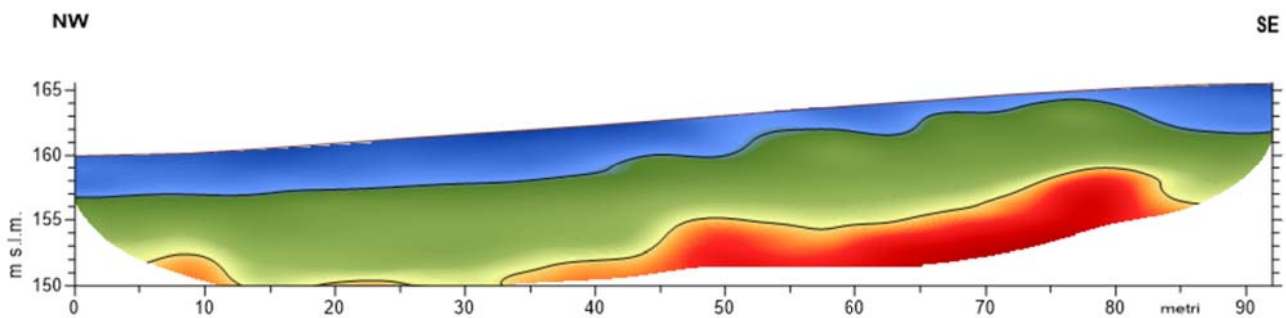


Figura 31 – Curve H/V ricavate dalle indagini HVSr effettuate all'interno dell'area di studio "Torre Oche".

L'assenza, in entrambe le misurazioni, di alcun picco significativo induce a ritenere che la stratigrafia locale sia alquanto omogenea, come del resto già indicato dalle valutazioni geologiche precedentemente esposte e dalle risultanze del sondaggio a carotaggio eseguito. Ancorché abbastanza lontana dall'area d'indagine, anche l'HVSr-53 (consultabile in Allegato 5) mostra un andamento del tutto simile alle due appena descritte, validando l'ipotesi che l'area di studio si inserisca in un contesto litostratigrafico piuttosto omogeneo.

6.2.3. Sismica a rifrazione



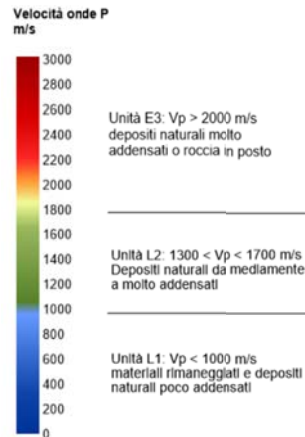


Figura 32 – Tomografia sismica a rifrazione eseguita all'interno di studio di "Torre Oche".

Dalla tomografia sismica di Figura 32 (vedasi anche l'Allegato 6) è possibile individuare una coltre detritica superficiale, poco addensata, di spessore medio intorno ai 4 m, che raggiunge un minimo nel tratto che interseca la piccola scarpata di terrazzo fluviale in corrispondenza della isoipsa 165 m. Il sismostrato intermedio, di depositi mediamente addensati, ha uno spessore medio di circa 5 m, con un massimo approfondimento a 6-7 m nel margine nord-occidentale. Il sismostrato basale è caratteristico di depositi molto addensati o di roccia in posto e si individua essenzialmente in corrispondenza del tratto che interseca la scarpata di terrazzo fluviale.

Nella sostanza, la tomografia sismica conferma la sismostratigrafia locale individuata dalle altre indagini ed un progressivo aumento della rigidità dei materiali con la profondità.

6.2.4. Indagine Down-hole

L'indagine Down-hole ha restituito profili di velocità delle onde sismiche coerenti con i risultati forniti dalle altre indagini. Oltre i primi 4-5 m di terreno, caratterizzati dalle velocità più basse e dalla massima variabilità delle stesse (Figura 33, Allegato 7), si ha un primo sensibile contrasto di velocità fino a circa 10 m, dove si ha un secondo contrasto. Il terzo ed ultimo contrasto si ha a circa 27 m. Come nella MASW di nuova esecuzione, anche la velocità delle onde S in Down-hole raggiunge il valore massimo di 500 m/s e, come anche verificato dalla tomografia a rifrazione, la rigidità del terreno aumenta progressivamente con la profondità, ma senza evidenziare sensibili variazioni.

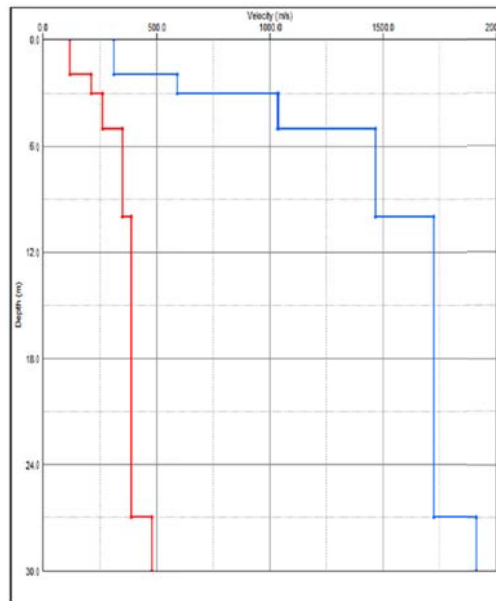


Figura 33 – Profili delle velocità delle onde P (blu) e delle onde S (rosso) ottenuti dall’indagine sismica Down-hole eseguita all’interno del foro di sondaggio eseguito per questo studio per l’area di “Torre Oche”.

6.2.5. Penetrometria dinamica super-pesante (DPSH)

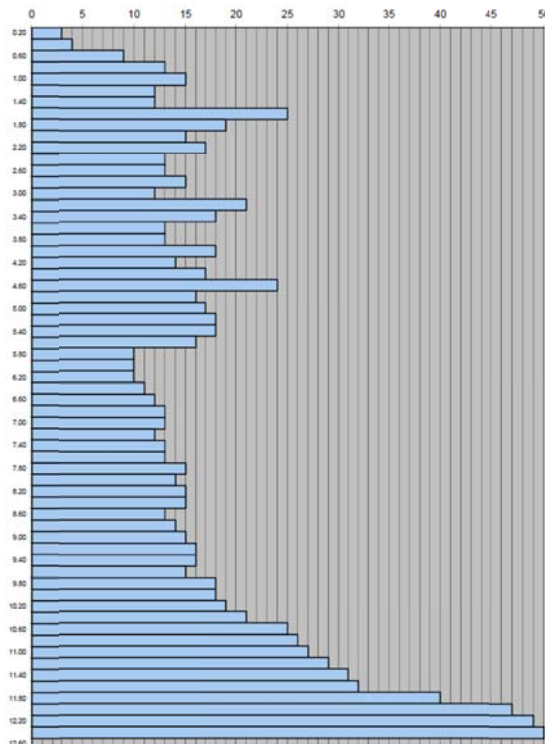


Figura 34 – Profilo del numero di colpi per l’avanzamento di 20 cm della punta del penetrometro dinamico ricavato dall’esecuzione della DPSH in località “Torre Oche”.

Il profilo di resistenza all’infissione dinamica (Figura 34, Allegato 8) mostra alti valori di resistenza nei primi 5,6 m, un decadimento dei valori fino a 9,6 m, seguito da un rapido incremento fino a rifiuto, intorno ai 12,4 m.

L'andamento della resistenza, nei primi 5-6 m, individuato dalla prova penetrometrica, sembra in parte contrastare con quanto restituito dalle indagini geofisiche, poiché rivela una rigidità maggiore rispetto ai 3-4 m successivi. In realtà, come emerso dal sondaggio a carotaggio continuo, gli alti valori di resistenza alla punta in questo spessore sono dovuti alla presenza del livello di ghiaia e piccoli ciottoli di origine fluviale, con i picchi maggiori (discontinui) che possono essere dovuti proprio alla frantumazione dei ciottoli stessi da parte della punta. Oltre i 6 m si nota un aumento progressivo delle resistenze, senza sensibili variazioni, caratteristico di una litologia omogenea che aumenta il suo grado di addensamento e rigidità con l'aumentare della pressione litostatica.

6.2.6. Analisi di laboratorio geotecnico

Dal sondaggio a carotaggio continuo eseguito a Torre Oche è stato prelevato un campione indisturbato da 5,9 a 6,4 m di profondità (Allegato 9) per eseguire su di esso la caratterizzazione fisica, la prova di consolidazione edometrica e la prova di taglio torsionale ciclico.

Alcuni dei parametri ricavati dalle prove di laboratorio sono stati utilizzati nell'analisi di risposta sismica locale e per il calcolo dei cedimenti post-sismici.

La profondità di campionamento è stata scelta sulla base delle risultanze del sondaggio penetrometrico, scegliendo di utilizzare la porzione argillosa con i più bassi valori di resistenza, in modo da ottenere una stima conservativa dei parametri geomeccanici da utilizzare per le successive analisi.

Il campione è risultato essere costituito da **argilla limosa, debolmente sabbiosa**, con **Indice di Plasticità** pari a 18 e collocabile nel settore "*argille inorganiche di media plasticità*" del diagramma di plasticità di Casagrande.

La prova di compressione edometrica ha individuato, alla pressione di confinamento di circa 110 kPa (calcolata alla profondità di prelievo del campione dal profilo di densità restituito dall'indagine Down-hole), un **indice dei vuoti** pari a 0,528 e un **indice di rigonfiamento** (C_s) pari a $5,43 \cdot 10^{-2}$ kPa, fondamentale nel calcolo dei cedimenti post-sismici nei terreni fini, come da metodo indicato dalla DGR2193/2015.

La prova di taglio torsionale ciclico ha permesso di costruire le curve di degrado del **modulo di taglio** e dell'incremento dello **smorzamento** con la deformazione. La stessa prova ha permesso anche di calcolare il valore della **soglia volumetrica** (pari a 0,00334%), ovvero il valore di deformazione oltre il quale le sovrappressioni interstiziali iniziano a crescere sensibilmente: si innesca nel terreno una condizione di instabilità che, al crescere della deformazione, può portare il provino a rottura. Tale soglia è un valore fondamentale nel calcolo dei cedimenti post-sismici nei terreni fini, come da metodo indicato dalla DGR2193/2015.

6.3. Area di "via Fondo Val Grizzaga"

6.3.1. MASW/Re.Mi.

Come si vede dalle figure 27 e 28, nell'area di studio sono state eseguite un'indagine Re.Mi. ed un'indagine MASW. In Allegato 4 si possono visionare i documenti relativi alle acquisizioni ed alle elaborazioni dell'indagine Re.Mi., d'archivio, e MASW, di nuova esecuzione.

I profili di V_s ricavati dalle due differenti tecniche d'indagine mostrano, fra loro, un andamento sufficientemente affine (Figura 36) nelle variazioni del valore di V_s con la profondità. Il primo scarto di rilievo è indicato da entrambe intorno ai 5 m, benché la differenza di velocità sia piuttosto grande.

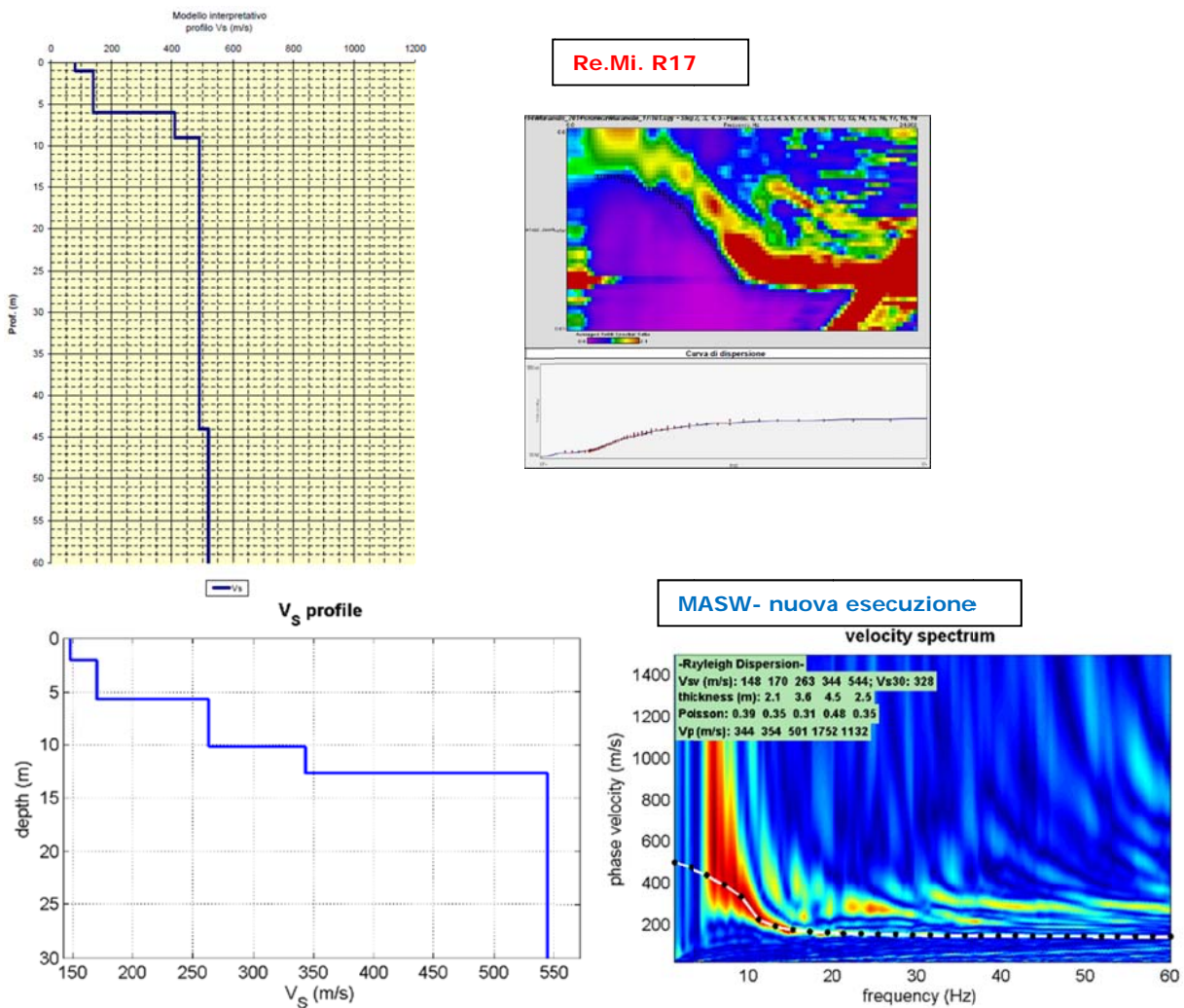


Figura 35 - Profili sismostratigrafici ricostruiti dalle indagini Re.Mi. e MASW eseguite nell'area di studio di "via Fondo Val Grizzaga".

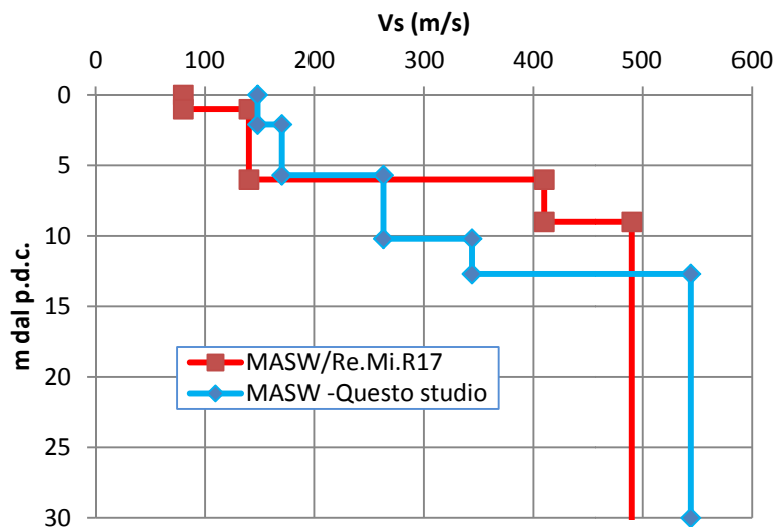


Figura 36 - Confronto tra i profili sismostratigrafici ricostruiti dalle indagini Re.Mi. e MASW eseguite all'interno dell'area di studio di "via Fondo val Grizzaga". Il profilo ricavato dalla Re.Mi. è stato limitato ai primi 30 m, al fine di confrontarlo con quello ricavato dalla MASW.

Un secondo scarto di rilievo si ha intorno ai 10 m, dove in valore assoluto le velocità tornano su livelli confrontabili, prossimi a 500 m/s.

Ancorché prossima al piede del versante, quindi in una condizione morfologica abbastanza differente da quella del sito di realizzazione delle due indagini appena descritte, anche la Re.Mi.-R19 d'archivio (Allegato 4) mostra un andamento alquanto simile a quello indicato dalla Re.Mi.-R17.

6.3.2. HVSR

Le misure H/V (Figura 31, Allegato 5) non hanno evidenziato massimi significativi, con ampiezza dei rapporti intorno a 2 o di poco superiore. Solo nella HVSR-17 sono presenti tre picchi pronunciati intorno a 55, 65 e 90 Hz, evidentemente indicativi di contrasto d'impedenza molto superficiali e probabilmente di origine antropica, considerata l'adiacenza del sito di misura rispetto alla sede stradale.

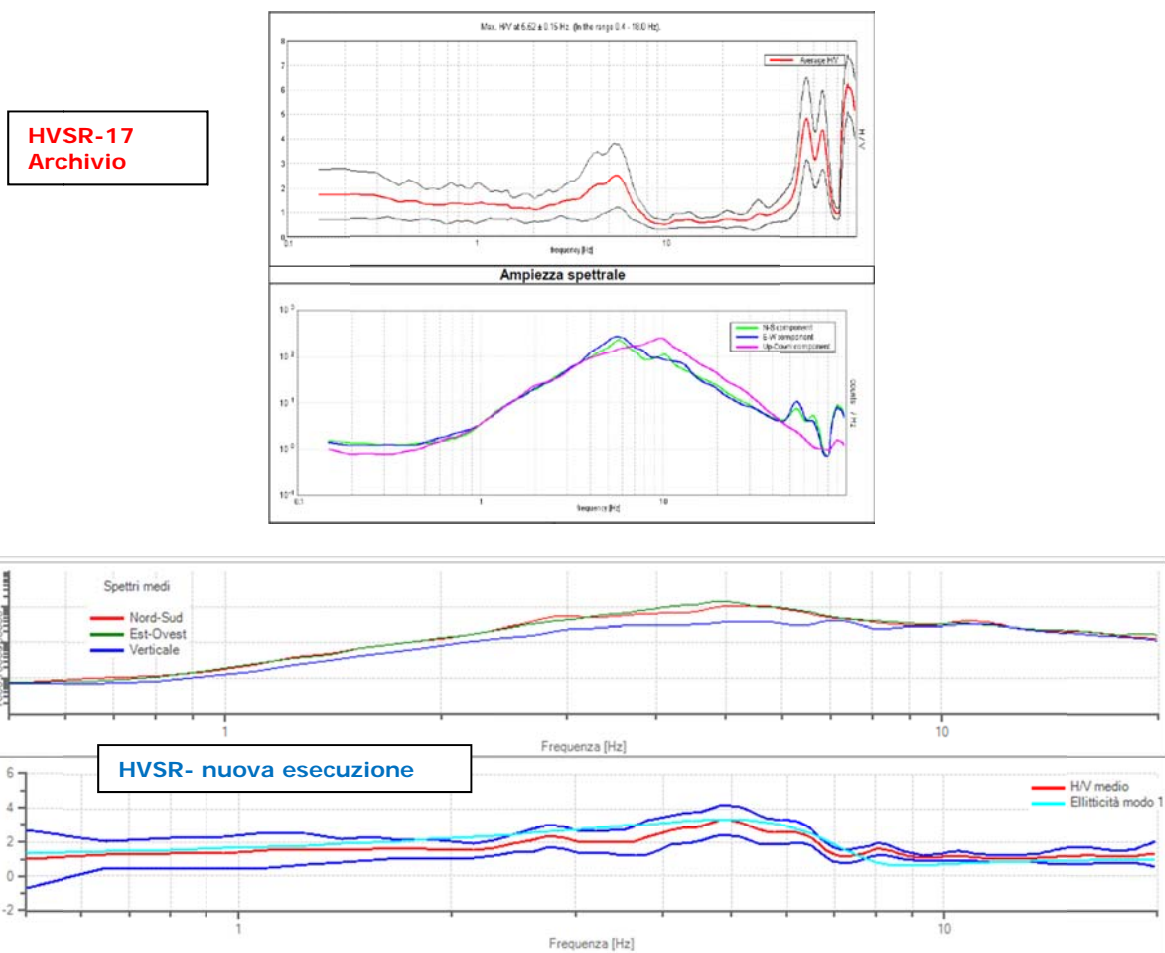


Figura 37 - Curve H/V ricavate dalle indagini HVSR effettuate all'interno dell'area di studio "via Fondo Val Grizzaga".

Un picco comune, minore, di ampiezza compresa tra 2 e 2,5, è individuabile in entrambe le curve H/V a circa 5 Hz.

In generale, la buona somiglianza delle due curve fa ritenere che queste siano rappresentative del terreno in esame, mentre l'assenza, in entrambe le misurazioni, di picchi significativi induce a ritenere che la stratigrafia locale sia alquanto omogenea, come del resto già indicato dalle valutazioni geologiche precedentemente esposte e dalle risultanze del sondaggio a carotaggio eseguito.

Prossima al piede del versante, quindi in una condizione morfologica abbastanza differente da quella del sito di realizzazione delle due HVSR appena descritte, anche l'HVSR-H19 d'archivio (consultabile in Allegato 5) mostra un andamento simile a quello dell'HVSR-H17, con una sostanziale assenza di picchi rilevanti, validando l'ipotesi che l'area di studio si inserisca in un contesto litostratigrafico piuttosto omogeneo.

6.3.3. Sismica a rifrazione

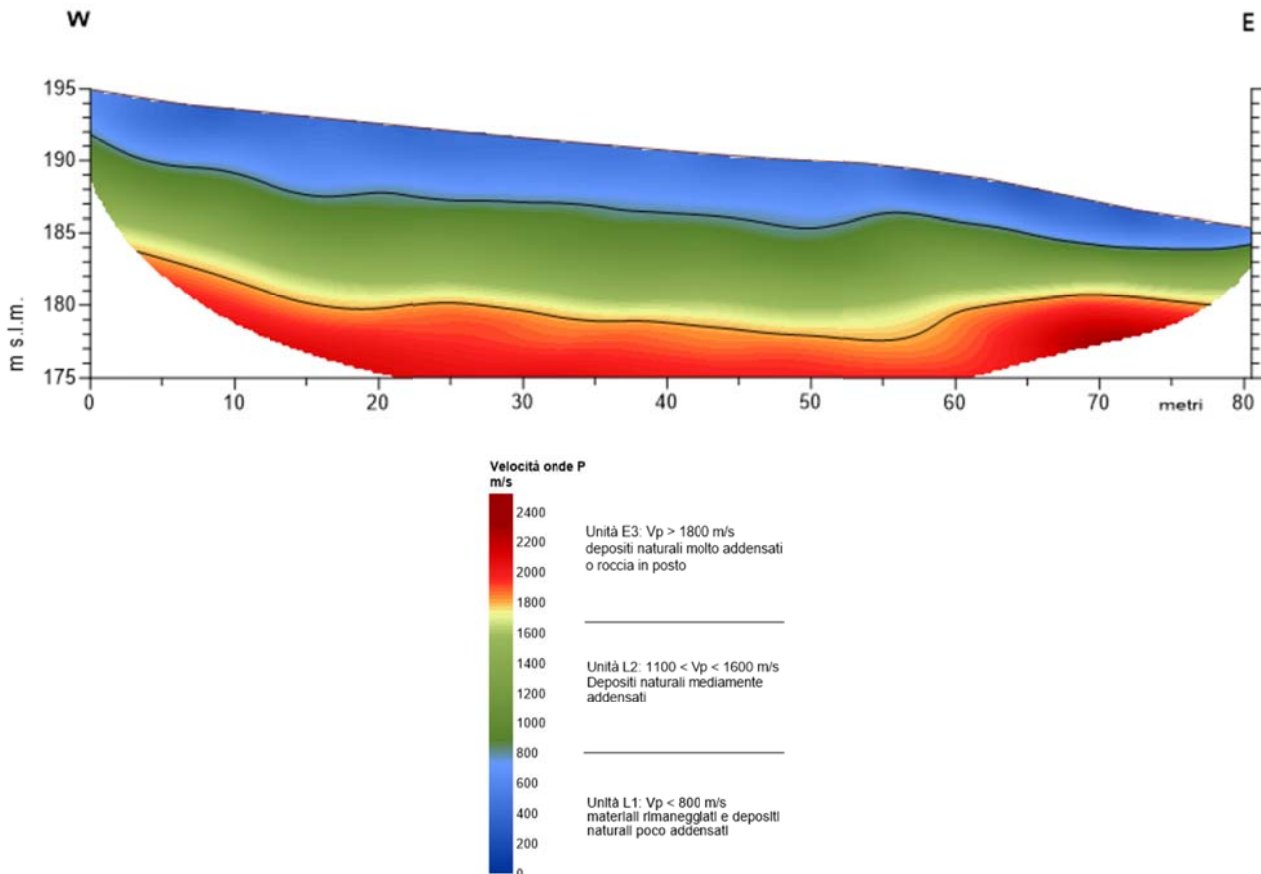


Figura 38 - Tomografia sismica a rifrazione eseguita all'interno di studio di "via Fondo Val Grizzaga".

Dalla tomografia sismica di Figura 38 (vedasi anche l'Allegato 6) è possibile individuare una coltre detritica superficiale, poco addensata, di spessore medio intorno ai 4 m, che si riduce progressivamente da ovest verso est raggiungendo valori minimi di circa 1,5 m. Il sismostrato intermedio, di depositi mediamente addensati, ha uno spessore medio di circa 5-6 m, che si riduce anch'esso verso est anche se in maniera meno evidente. A partire da 10-12 m di profondità da piano campagna si individua l'unità più profonda, che si spinge fino alla massima profondità indagata (circa -15 m da p.c.); è il sismostrato basale, caratteristico di depositi molto addensati o di roccia in posto.

Nella sostanza, la tomografia sismica conferma la sismostratigrafia locale individuata dalle altre indagini, con due discontinuità intorno ai 5 ed ai 10 m, ed un progressivo aumento della rigidità dei materiali con la profondità.

6.3.4. Indagine Down-hole

L'indagine Down-hole ha restituito profili di velocità delle onde sismiche coerenti con i risultati forniti dalle altre indagini. Oltre i primi 4 m di terreno, caratterizzati dalle velocità più basse e dalla massima variabilità delle stesse (Figura 39, Allegato 7), si ha un primo sensibile contrasto di velocità fino a circa 7 m, dove si ha un secondo contrasto. Il terzo ed ultimo contrasto si ha a circa 27 m. Come nella MASW di nuova esecuzione, anche la velocità delle onde S in Down-hole raggiunge il valore massimo di 500 m/s e, come anche verificato dalla tomografia a rifrazione, la rigidità del terreno aumenta progressivamente con la profondità, ma senza evidenziare sensibili variazioni.

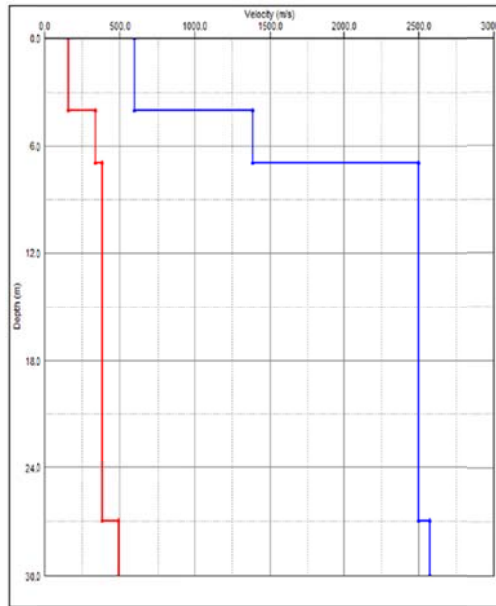


Figura 39 - Profili delle velocità delle onde P (blu) e delle onde S (rosso) ottenuti dall'indagine sismica Down-hole eseguita all'interno del foro di sondaggio eseguito per questo studio per l'area di "via Fondo Val Grizzaga".

Rispetto ai profili MASW e Re.Mi., il Down-hole non identifica il salto di velocità a circa 10 m ed il valore di 500 m/s è raggiunto soltanto in prossimità dei 30 m.

6.3.5. Penetrometrie statiche, meccaniche (CPTm)

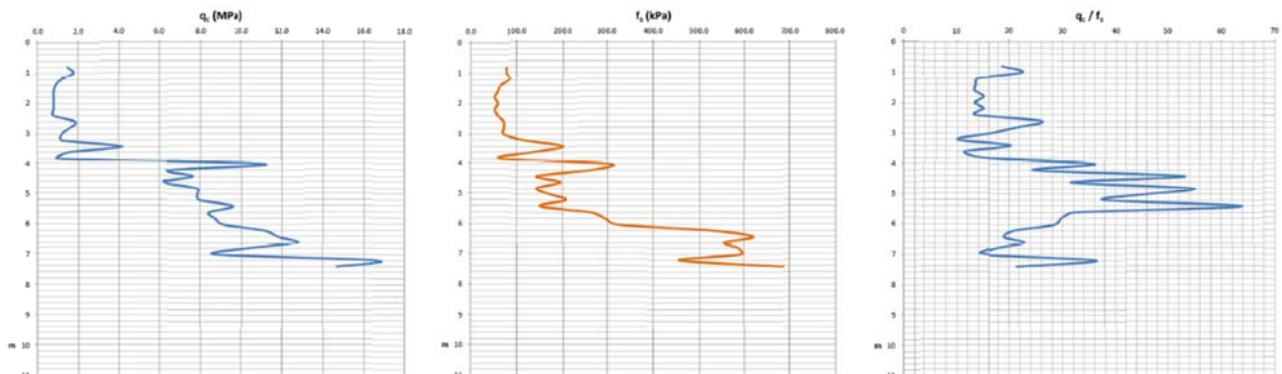


Figura 40 – Profili della resistenza alla punta (sinistra), dell'attrito laterale (centro) e del rapporto tra essi (destra) risultanti dall'esecuzione della penetrometria statica, meccanica in sinistra idrografica del Grizzaga.

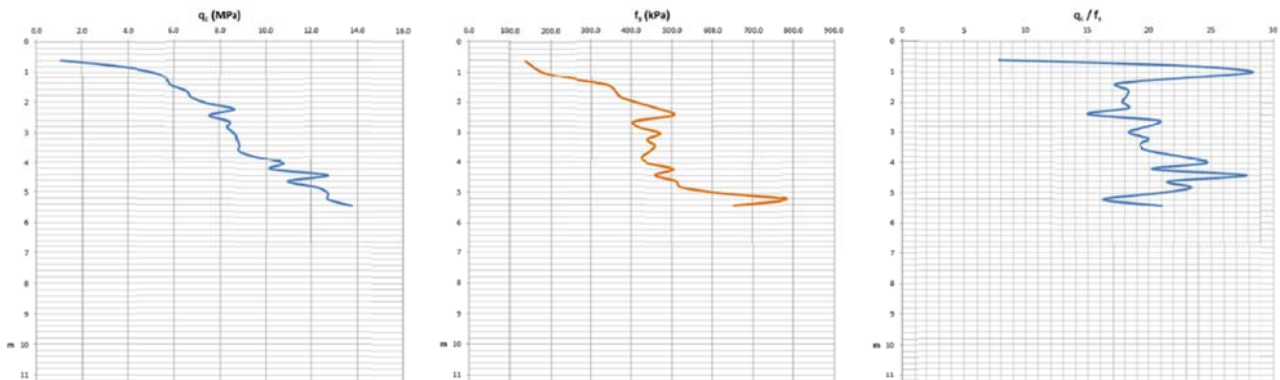


Figura 41 - Profili della resistenza alla punta (sinistra), dell'attrito laterale (centro) e del rapporto tra essi (destra) risultanti dall'esecuzione della penetrometria statica, meccanica in destra idrografica del Grizzaga.

Il profilo della resistenza alla punta in corrispondenza della CPTm in sinistra Grizzaga (Figura 40, Allegato 8) mostra valori discreti nei primi 4 m; da qui si ha un netto salto verso valori altissimi, che aumentano progressivamente fino a 7 m, dove avviene il rifiuto. Se si confronta questo profilo con il profilo di Vs del Down-hole, si nota subito la quasi perfetta corrispondenza delle due superfici di discontinuità, a 4 e 7 m. Le tipologie litologiche indicate dal rapporto q_c/f_s sembrano essere limi argillosi nei primi 4 m, per poi passare a limi sabbiosi/sabbie limose fino a 6 m e da qui nuovamente a limi argillosi fino a 7 m.

Piuttosto differente è il profilo della resistenza alla punta in corrispondenza della CPTm in destra Grizzaga (Figura 41, Allegato 8), con valori di q_c che divengono subito altissimi e continuano a crescere velocemente sino al rifiuto, che avviene a 5 m. La tipologia litologica dominante sono i limi argillosi.

Le due verticali penetrometriche descrivono, verosimilmente, due condizioni litostratigrafiche differenti, intuibili anche dall'interpretazione geomorfologica: quella di fondo vallivo, caratterizzato dalla presenza di deposito alluvionale superficiale che ricopre il substrato argilloso (CPTm sinistra Grizzaga), e quella di base del pendio, in cui pressoché assente è la copertura eluvio-colluviale e subito si ha il passaggio al substrato argilloso.

6.3.6. Analisi di laboratorio geotecnico

Dal sondaggio a carotaggio continuo eseguito in località via Fondo Val Grizzaga è stato prelevato un campione indisturbato da 5,5 a 6,0 m di profondità (Allegato 9) per eseguire su di esso la caratterizzazione fisica, la prova di consolidazione edometrica e la prova di taglio torsionale ciclico.

Alcuni dei parametri ricavati dalle prove di laboratorio sono stati utilizzati nell'analisi di risposta sismica locale e per il calcolo dei cedimenti post-sismici.

La profondità di campionamento è stata scelta sulla base delle risultanze del sondaggio penetrometrico eseguito in sinistra Grizzaga, scegliendo di utilizzare la porzione argillosa con i più bassi valori di resistenza, in modo da ottenere una stima conservativa dei parametri geomeccanici da utilizzare per le successive analisi.

Il campione è risultato essere costituito da **argilla limosa, debolmente sabbiosa**, con **Indice di Plasticità** pari a 13 e collocabile nel settore "argille inorganiche di media plasticità" del diagramma di plasticità di Casagrande.

La prova di compressione edometrica ha individuato, alla pressione di confinamento di circa 88 kPa (calcolata alla profondità di prelievo del campione dal profilo di densità restituito dall'indagine Down-hole), un **indice dei vuoti** pari a 0,507 e un **indice di rigonfiamento** (C_s) pari a $5,22 \cdot 10^{-2}$ kPa, fondamentale nel calcolo dei cedimenti post-sismici nei terreni fini, come da metodo indicato dalla DGR2193/2015.

La prova di taglio torsionale ciclico ha permesso di costruire le curve di degrado del **modulo di taglio** e dell'incremento dello **smorzamento** con la deformazione. La stessa prova ha permesso anche di calcolare il valore della **soglia volumetrica** (pari a 0,0045%), ovvero il valore di deformazione oltre il quale le sovrappressioni interstiziali iniziano a crescere sensibilmente: si innesca nel terreno una condizione di instabilità che, al crescere della deformazione, può portare il provino a rottura. Tale soglia è un valore fondamentale nel calcolo dei cedimenti post-simici nei terreni fini, come da metodo indicato dalla DGR2193/2015.

6.4. Area di "località Il Poggio"

6.4.1. MASW/Re.Mi.

Come si vede dalle figure 27 e 28, nell'area di studio sono state eseguite un'indagine Re.Mi. ed un'indagine MASW. In Allegato 4 si possono visionare i documenti relativi alle acquisizioni ed alle elaborazioni dell'indagine Re.Mi., d'archivio, e MASW, di nuova esecuzione.

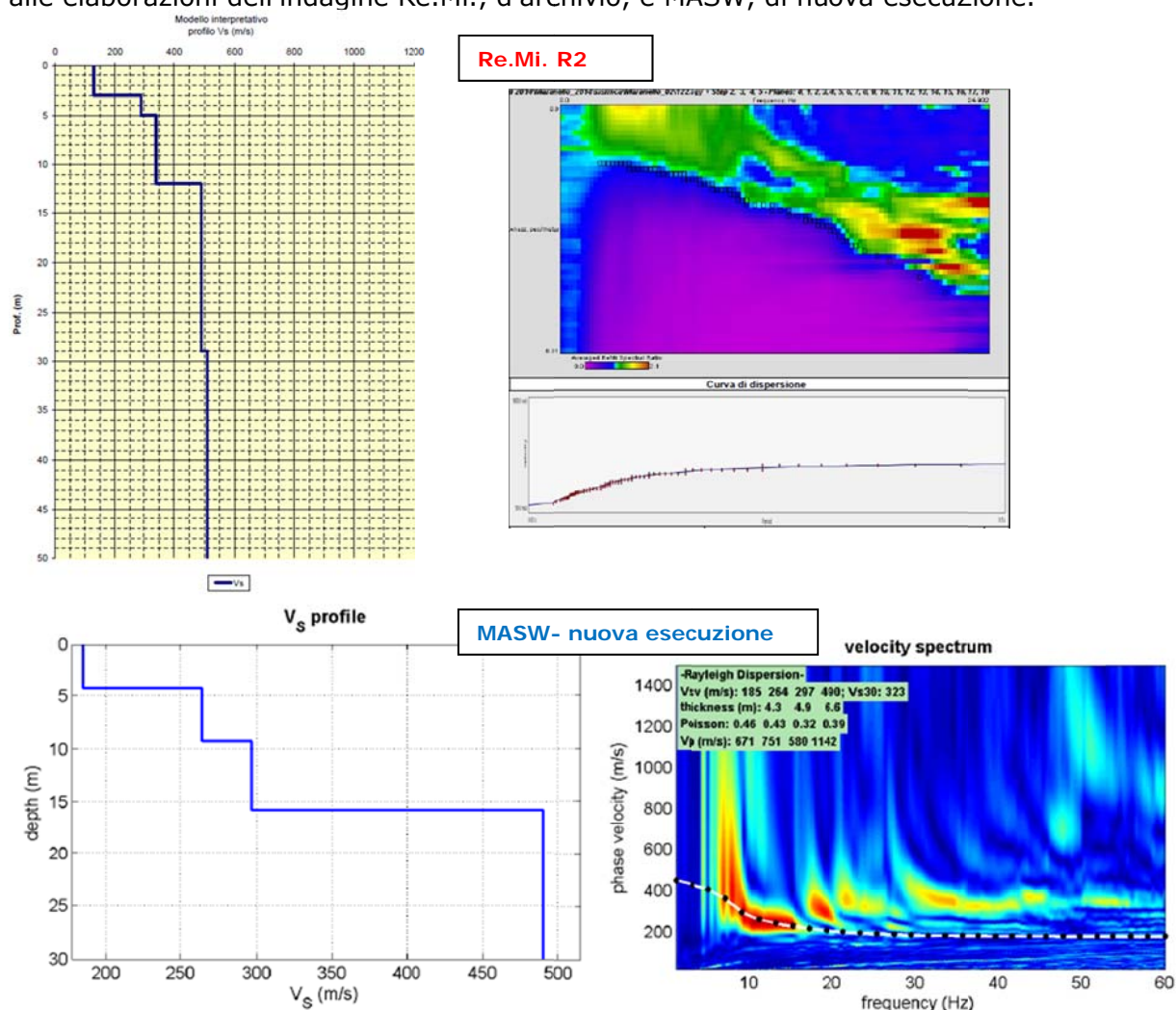


Figura 42 - Profili sismostratigrafici ricostruiti dalle indagini Re.Mi. e MASW eseguite nell'area di studio di "località Il Poggio".

I profili di Vs ricavati dalle due differenti tecniche d'indagine mostrano, fra loro, un andamento molto simile (Figura 43) nei valori di Vs e nelle loro variazioni con la profondità. Il primo scarto

di rilievo è indicato da entrambe intorno ai 5 m, mentre il secondo è identificabile a circa 12-15 m.

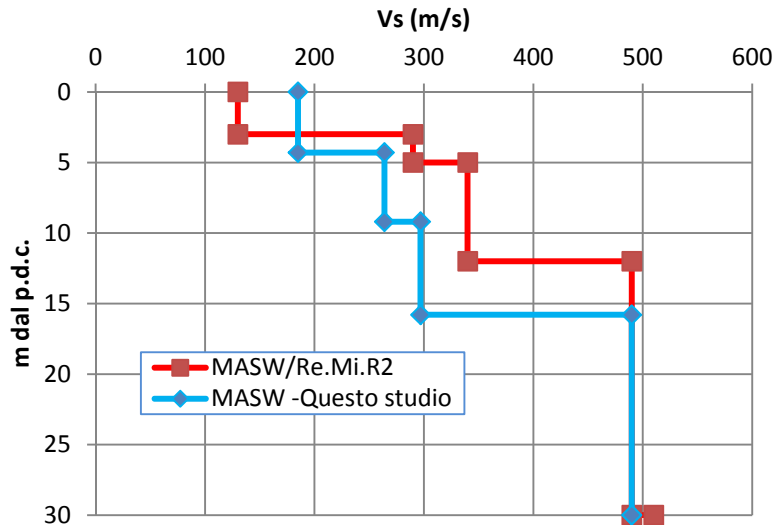


Figura 43 - Confronto tra i profili sismostratigrafici ricostruiti dalle indagini Re.Mi. e MASW eseguite all'interno dell'area di studio di "località Il Poggio". Il profilo ricavato dalla Re.Mi. è stato limitato ai primi 30 m, al fine di confrontarlo con quello ricavato dalla MASW.

Altre due Re.Mi. sono presenti in prossimità dell'area (si veda l'Allegato 4), una (Re.Mi. 3) 150 m ad est dell'area ed una (Re.Mi. 1) circa 300 m ad ovest, entrambe lungo la SP3. Il profilo della Re.Mi. 3 riprende quasi in modo identico quello della MASW realizzata per questo studio fino a 8 m; oltre tale profondità le velocità aumentano in modo sensibile raggiungendo e superando i 500 m/s. E' possibile che in questo sito la roccia in posto sia più superficiale rispetto all'area di studio.

Opposto risulta, invece, l'andamento del profilo della Re.Mi. 1, che sembra raggiungere la roccia in posto solo a 23 m.

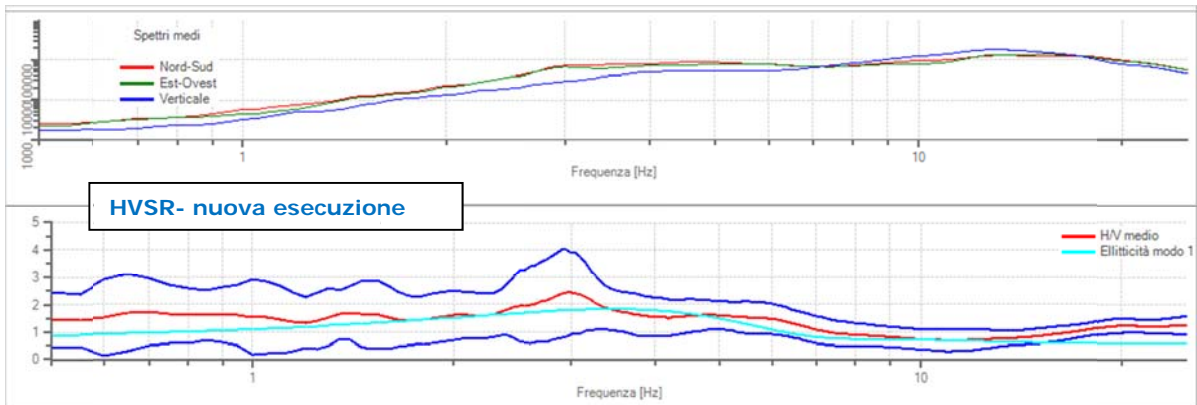
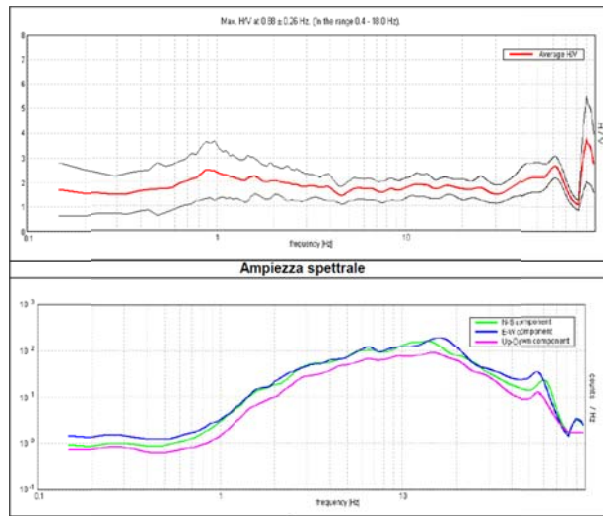
6.4.2. HVSR

Le misure H/V (Figura 44, Allegato 5) non hanno evidenziato massimi significativi, con ampiezza dei rapporti intorno a 2 o di poco superiore. Nella HVSR-2 l'unico picco è a circa 0,9 Hz mentre nella HVSR eseguita per questo studio il picco è situato a circa 3 Hz.

L'assenza, in entrambe le misurazioni, di picchi significativi induce a ritenere che la stratigrafia locale non presenti discontinuità di rigidità rilevanti, nonostante la successione stratigrafica presenti 3 litotipi differenti: il deposito detritico superficiale, le breccie argillose del TER₁ e, alla base, le marne argillose del TER.

Anche altre tre indagini HVSR d'archivio (HVSR-1, HVSR-59 e HVSR-3 - si veda l'Allegato 5) eseguite in corrispondenza delle Re.Mi. d'archivio citate, mostrano un andamento quasi identico a quello dell'HVSR-2, anche qui con picchi pressoché assenti, a conferma di una situazione generalizzata di assenza di contrasti di impedenza lungo la cresta morfologica che termina in località Il Poggio.

**HVSR-2
 Archivio**



HVSR- nuova esecuzione

Figura 44 - Curve H/V ricavate dalle indagini HVSR effettuate all'interno dell'area di studio "località Il Poggio".

6.4.3. Indagine Down-hole

L'indagine Down-hole (Allegato 7) ha restituito profili di velocità delle onde sismiche non del tutto coerenti con i risultati forniti dalle altre indagini. Le velocità più basse caratterizzano in modo uniforme i primi 9 m dal p.d.c. dove si registra il primo salto di velocità. Concorde con il profilo MASW è il secondo salto di velocità a 15 m, di maggior ampiezza rispetto al primo. Una seconda differenza è infine rappresentata dal terzo salto di velocità, a circa 24 m, paragonabile, in ampiezza, al secondo.

Come nella MASW di nuova esecuzione e nella Re.Mi. d'archivio, anche la velocità delle onde S in Down-hole raggiunge il valore massimo di 500 m/s, con un aumento progressivo della rigidità del terreno con la profondità.

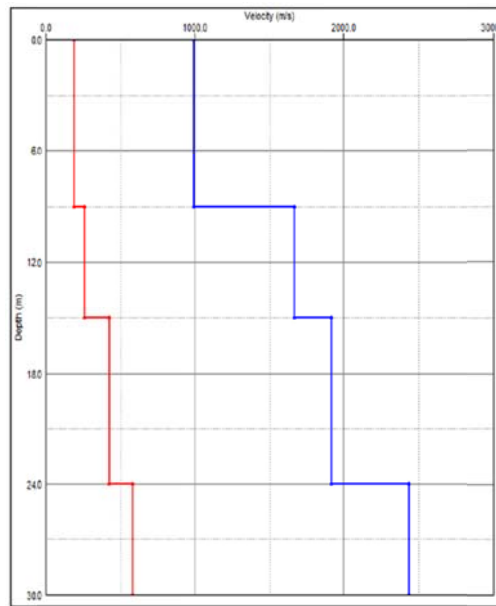


Figura 45 - Profili delle velocità delle onde P (blu) e delle onde S (rosso) ottenuti dall'indagine sismica Down-hole eseguita all'interno del foro di sondaggio eseguito per questo studio per l'area di "località Il Poggio".

6.4.4. Penetrometria statica, meccanica (CPTm)

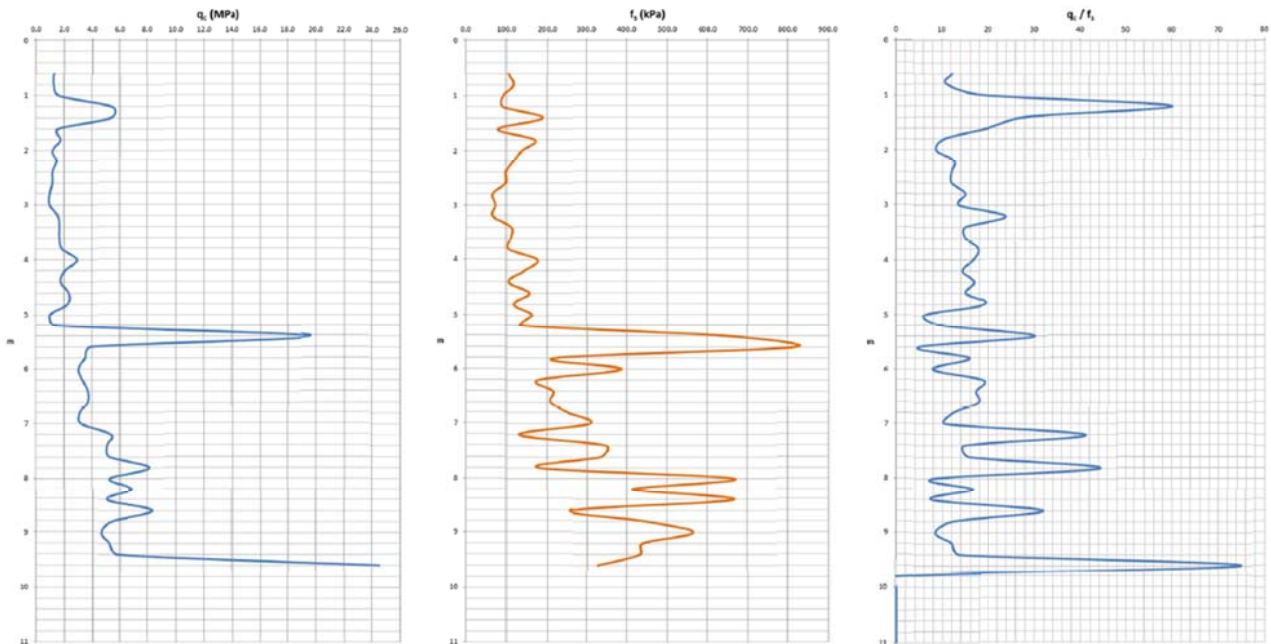


Figura 46 - Profili della resistenza alla punta (sinistra), dell'attrito laterale (centro) e del rapporto tra essi (destra) risultanti dall'esecuzione della penetrometria statica, meccanica nell'area di studio di "località Il Poggio".

Il profilo della resistenza alla punta di Figura 46 (Allegato 8) richiama molto bene il primo salto di velocità della prova MASW, con un sensibile incremento di resistenza sui 5 m. Da qui a 9 m, dove si è avuto il rifiuto dell'avanzamento, le resistenze aumentano progressivamente: il limite di 9 m può essere facilmente correlabile al primo sensibile salto di velocità del Down-hole. Se si guarda all'interpretazione stratigrafica data in Figura 25, si vede come i primi 5 m siano attribuibili al detrito di versante, i secondi 4 m al TER₁ alterato, ed i restanti 6 m al TER₁ non alterato.

6.4.5. Analisi di laboratorio geotecnico

Dal sondaggio a carotaggio continuo eseguito in località Il Poggio è stato prelevato un campione indisturbato da 11 a 11,40 m di profondità (Allegato 9) per eseguire su di esso la caratterizzazione fisica, la prova di consolidazione edometrica, la prova di taglio torsionale ciclico e la prova di compressione triassiale consolidata isotropicamente, non drenata.

Alcuni dei parametri ricavati dalle prove di laboratorio sono stati utilizzati nell'analisi di risposta sismica locale e per il calcolo dei cedimenti post-sismici.

La profondità di campionamento è stata scelta sulla base delle risultanze del sondaggio a carotaggio continuo stesso, scegliendo prelevare il segmento argilloso con la minor presenza possibile di inclusi lapidei.

Il campione è risultato essere costituito da **argilla limosa**, con **Indice di Plasticità** pari a 18 e collocabile nel settore "*argille inorganiche di media plasticità*" del diagramma di plasticità di Casagrande.

La prova di compressione edometrica ha individuato, alla pressione di confinamento di circa 197 kPa (calcolata alla profondità di prelievo del campione dal profilo di densità restituito dall'indagine Down-hole), un **indice dei vuoti** pari a 0,562 e un **indice di rigonfiamento** (C_s) pari a $4,96 \cdot 10^{-2}$ kPa, fondamentale nel calcolo dei cedimenti post-simici nei terreni fini, come da metodo indicato dalla DGR2193/2015.

La prova di taglio torsionale ciclico ha permesso di costruire le curve di degrado del **modulo di taglio** e dell'incremento dello **smorzamento** con la deformazione. La stessa prova ha permesso anche di calcolare il valore della **soglia volumetrica** (pari a 0,0034%), ovvero il valore di deformazione oltre il quale le sovrappressioni interstiziali iniziano a crescere sensibilmente: si innesca nel terreno una condizione di instabilità che, al crescere della deformazione, può portare il provino a rottura. Tale soglia è un valore fondamentale nel calcolo dei cedimenti post-simici nei terreni fini, come da metodo indicato dalla DGR2193/2015.

La prova di compressione triassiale non drenata ha permesso di calcolare l'angolo di attrito di picco pari a 22°, la coesione drenata pari a 28 kPa e la coesione non drenata pari a 121,23 kPa.

7. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Le indagini **MASW** hanno fornito nel complesso buoni risultati. In generale, le acquisizioni effettuate hanno permesso di registrare un segnale sismico sufficientemente chiaro da consentire una elaborazione che ha dato risultati attendibili per le aree in studio, confrontabili con le evidenze geomorfologiche e, soprattutto, con le stratigrafie ricavate dai sondaggi geognostici.

Si premette che la situazione ideale per l'effettuazione di un'acquisizione sismica attiva con metodo MASW è quella di avere una superficie topografica pianeggiante con una stratificazione nel sottosuolo piano-parallela alla superficie topografica.

Partendo da questo presupposto appare evidente che, se per le due aree di fondo vallivo di Torre Oche e di via Fondo Val Grizzaga questa condizione è verificata, lo stesso non vale per località Il Poggio, in cui si sono presentate le seguenti problematiche:

- Irregolarità della superficie topografica dell'area su cui è stato eseguito lo stendimento sismico. Si è cercato comunque di utilizzare al meglio lo spazio a disposizione cercando di posizionare i geofoni secondo un allineamento il più orizzontale possibile.
- Leggera inclinazione del versante, in particolare nel lato a monte dello stendimento, mentre in corrispondenza dello stesso la pendenza è molto lieve. Non si sono comunque generati treni d'onda anomali nel sismogramma.
- Presenza di un sottosuolo con andamento stratigrafico irregolare e non piano-parallelo, ma che ha fatto registrare un segnale sismico regolare, privo di treni d'onda anomali che si discostano dall'andamento generale.

In fase di elaborazione i sismogrammi sono stati filtrati e selezionati in modo da tagliare eventuali distorsioni ed anomalie. Questo ha permesso di utilizzare tutte le acquisizioni effettuate, seppur in alcuni casi l'interpretazione effettuata presenti alcune incertezze.

Per quanto riguarda le indagini **HVSR**, al fine di determinare la qualità delle singole misure H/V effettuate e la loro relativa affidabilità, necessaria per una corretta fase interpretativa, si è provveduto alla classificazione delle prove valutando, in accordo con i più recenti studi in materia, le caratteristiche dei fondamentali principi su cui si basa la tecnica di indagine a sismica passiva utilizzata.

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione.

Considerato che le indagini HVSR sono state eseguite, in 2 su 3 casi, in aree prossime a strade (ancorché di limitato traffico veicolare), non si possono escludere sorgenti di disturbo all'acquisizione.

L'indagine ha previsto una registrazione del rumore ambientale lungo tre direzioni ortogonali tra loro (x,y,z) con una singola stazione. Tale registrazione è stata effettuata, secondo le indicazioni del progetto SESAME, per una durata di 20 minuti.

Successivamente si è proceduto all'elaborazione utilizzando il software WINMASW della Eliosoft, dopo aver eseguito un'operazione detta di *windowing*, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Queste finestre vengono filtrate in base a criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Al termine dell'elaborazione, per ogni acquisizione è stato valutato l'andamento complessivo della curva H/V, prestando particolare attenzione, durante la fase di elaborazione, alla plausibilità fisica della curva stessa, verificabile attraverso l'individuazione di massimi caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale.

Per quanto riguarda gli stendimenti a **sismica a rifrazione** eseguiti per questo, non sono state incontrate particolari difficoltà d'esecuzione e d'interpretazione. In entrambi è stato possibile distinguere chiaramente tre sismostrati, con aumento costante delle velocità delle onde sismiche con la profondità, correlabili sia con la stratigrafia dei sondaggi geognostici meccanici, sia con i profili di Vs da MASW o Re.Mi.

Per quanto riguarda i **sondaggi geognostici**, è da sottolineare l'elevata difficoltà di avanzamento nelle operazioni di carotaggio delle argille della Formazione delle Argille Azzurre per le due aree di Torre Oche e via Fondo Val Grizzaga, nei metri più profondi, dovuto sostanzialmente all'alto grado di consolidamento delle argille stesse. Consolidamento che, per contro, ha favorito l'estrazione e la conservazione intatta dei campioni da utilizzare per le prove di laboratorio geotecnico.

Non si sottolineano particolari incertezze per quanto riguarda l'interpretazione delle **indagini penetrometriche** (sia dinamica che statiche), dei sondaggi **Down-hole** e delle **prove di laboratorio geotecnico**.

8. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Come anticipato nel capitolo introduttivo, la microzonazione sismica di II livello ha ipotizzato, per le due aree di "Torre Oche" e "via Fondo Val Grizzaga", amplificazione stratigrafica condizionata anche dalla presenza di morfologie sepolte e dalla presenza di valli strette ed il verificarsi di cedimenti post-sismici in corrispondenza dei terreni a medio-alto grado di compressibilità. Per l'area di "località Il Poggio" ci si attende amplificazione stratigrafica e possibili cedimenti post-sismici in corrispondenza dei terreni a medio-alto grado di compressibilità.

La presenza di una morfologia di valle stretta (per le prime due aree) e di versante in prossimità di una cresta, ha fatto sì che si optasse, in questo studio, per l'utilizzo di un modello di analisi di risposta sismica locale bi-dimensionale (2D), per tenere in conto del contributo all'amplificazione del segnale sismico dovuto, appunto, alla morfologia.

Nel presente capitolo verranno, pertanto, presentati la metodologia ed i risultati dell'analisi di microzonazione sismica di III livello eseguita per le tre aree in esame, i cui dati di ingresso sono stati già ampiamente descritti nei capitoli precedenti, derivati da: analisi geomorfologica di dettaglio, indagini geognostiche e geofisiche.

8.1. Analisi di III livello

Le analisi hanno permesso di ricavare, per ognuna delle tre aree:

- i profili di velocità delle onde S dal bedrock sismico alla superficie;
- i profili dello smorzamento del materiale dal bedrock sismico alla superficie;
- i profili di deformazione dal bedrock sismico alla superficie;
- gli spettri elastici di risposta, sia in termini di pseudo-velocità che di pseudo-accelerazione al basamento sismico e alla superficie;
- l'amplificazione relativa ai valori di PGA e dell'Intensità di Housner nei periodi 0.1-0.5s e 0.5-1s;
- gli accelerogrammi in superficie;
- i cedimenti post-sismici nei livelli maggiormente compressibili.

I calcoli sono stati effettuati mediante il codice LSR-2D prodotto dalla ditta STACEC (<http://www.stacec.com/>, versione 4.3) e rappresenta un'implementazione evoluta della procedura lineare-equivalente inizialmente proposta da Hudson et al. (1994) nell'implementazione QUAD4M.

La modellazione ha riguardato sezioni trasversali all'asse della valle per le due aree di "Torre Oche" e "via Fondo Val Grizzaga", e trasversale alla cresta montuosa per l'area di "località Il Poggio".

Il moto di riferimento è quello costituito dai tre accelerogrammi (nella sola componente orizzontale) forniti dalla Regione Emilia-Romagna (DGR 2193/2015, Allegato 4), moltiplicandone i valori di accelerazione per quello dell'accelerazione di riferimento della griglia INGV (con 10% di probabilità di superamento in 50 anni) più prossimo ad ogni singola area d'indagine.

Le geometrie e gli spessori dei diversi strati con cui si è discretizzato il terreno sono stati ricostruiti incrociando tutti i dati geognostici e geofisici acquisiti, fino alla profondità raggiunta dalle indagini; oltre tale profondità, fino al bedrock sismico, gli strati sono stati rappresentati con spessori omogenei, estrapolandone i parametri sismo-stratigrafici necessari alla modellazione 2D dai valori sperimentali ricavati dalle indagini nei metri più superficiali.

La modellazione 2D, per i diversi punti di misura scelti lungo i profili, è stata iterata tre volte (una per ognuno degli accelerogrammi di riferimento utilizzati), ma senza variare stocasticamente le caratteristiche del modello. In queste condizioni, i valori delle diverse

grandezze rappresentative della risposta sismica locale dei diversi punti di misura (spettri di risposta, fattori di amplificazione ecc.) sono quelle associate alla media dei valori ottenuti per i diversi moti di riferimento.

8.2. Analisi per l'area di studio di "Torre Oche"

La geometria del modello utilizzato per l'analisi 2D è mostrata in Figura 47. I dettagli del modello sono riportati in Allegato 10 in forma di una specifica relazione descrittiva nel formato previsto dal codice di calcolo adottato.

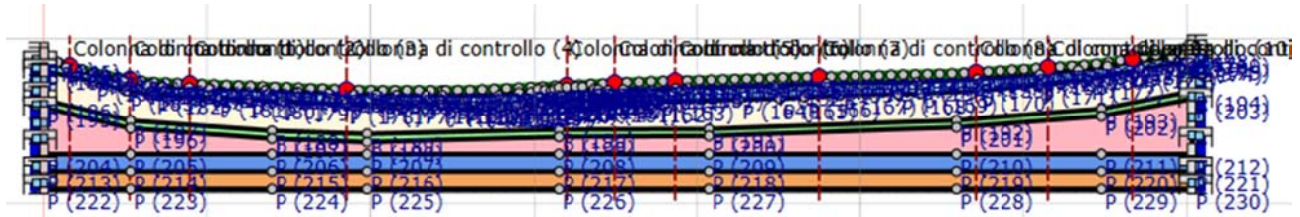


Figura 47 - Modello 2D del sito di "Torre Oche". Il modello ha la stessa scala nelle direzioni verticale ed orizzontale. Il moto di riferimento (relativo alla sola componente **orizzontale** del moto) è applicato alla base del modello. I punti in rosso (meglio visibili nell'Allegato dedicato) indicano i punti di misura per i quali vengono forniti i valori numerici dello spettro di risposta e i relativi fattori di amplificazione. Le colonne di controllo sono utilizzate per la generazione dei profili di massima deformazione co-sismica, massimo smorzamento, accelerazione e velocità delle onde S.

La traccia del profilo adottato per costruire il modello (Figura 48) è stata estesa ben oltre i limiti dell'area circoscritta dalla microzonazione sismica di II livello, ovvero fino alla base dei versanti che bordano la valle e poco oltre, per tener conto della variazione morfologica dovuta alla presenza della valle stretta.



Figura 48 – L'alinea gialla indica la traccia del profilo di Figura 47 lungo il quale è stata effettuata l'analisi di risposta sismica locale 2D. Gli altri simboli indicano le ubicazioni delle indagini geognostiche e geofisiche realizzate nell'area per questo studio.

Il profilo sismostratigrafico è stato disegnato col massimo dettaglio in corrispondenza della traccia dello stendimento a sismica a rifrazione. I vari sismostrati sono stati quindi estesi lateralmente, fino ai due capi del profilo, introducendo inevitabilmente un buon grado di soggettività nell'interpretazione, comunque guidata dalla conoscenza dell'assetto geologico-geomorfologico locale.

Poiché il bedrock sismico non è stato raggiunto né dalla MASW, né dal Down-Hole, si è optato per l'utilizzo del metodo messo a punto da Albarello et al. (2011)⁷ che permette di stimare la profondità del bedrock sismico sulla base dei dati Down-hole e della relazione:

$$V_s(z) \approx V_0 \cdot (1+z)^x$$

che mette in relazione la V_s con il valore di V_s registrato nei primi metri superficiali (V_0), con la profondità (z) e con il coefficiente "x", da variare fino ad ottenere il minimo scarto tra il profilo di V_s così calcolato e quello direttamente ricavato dall'indagine Down-hole. Ciò permette di estrapolare i valori di V_s ben oltre la profondità raggiunta dall'indagine geofisica, fino a raggiungere il valore di 800 m/s. Nel caso di Torre Oche la profondità del bedrock sismico è risultata, con tale metodo, pari a **68 m**.

Questo risultato permette di stabilire a quale profondità ancorare gli accelerogrammi di input sulla base della pericolosità sismica di base. La stratigrafia, dalla profondità raggiunta dalle indagini geognostiche e geofisiche eseguite per questo studio alla profondità del bedrock sismico, è stata discretizzata per intervalli di spessore di 10 m.

Per la caratterizzazione della sismo-stratigrafia, per ogni strato occorre conoscere:

- Il peso di volume γ in Kg/m³,
- La velocità delle onde s in m/s
- Il coefficiente di Poisson
- Le curve di decadimento dei materiali (G/G_0 e $D\%$)

Il peso di volume può essere ricavato direttamente dai dati del Down-Hole. Questa prova fornisce le V_s , le V_p , G_0 ed il coefficiente di Poisson. Da questi 3 parametri si possono ricavare, con note formule, i seguenti parametri:

- γ : da G_0 e V_s ,
- pressione litostatica: dal γ precedentemente ricavato.

Tutti i parametri geotecnici e geofisici da assegnare ad ogni strato necessari per la modellazione possono essere estrapolati fino alla profondità assunta del bedrock sismico tramite i seguenti passi:

- L'estrapolazione delle V_s al bedrock è, come visto, realizzata attraverso il metodo proposto da Albarello et al. (2011);
- Tramite i profili di velocità di V_s e V_p nei primi 30 m del Down-hole, è possibile ricavare l'equazione della relazione tra V_s e V_p e, quindi, estrapolare anche le velocità delle onde P fino al bedrock sismico;
- Di seguito, è possibile ricavare il profilo del coefficiente di Poisson fino al bedrock sismico utilizzando la formula che lo lega alle V_s ed alle V_p ;
- La relazione matematica ricavabile tra G_0 e V_s nei primi 30 m si ricava, inoltre, l'estrapolazione di G_0 al bedrock sismico;
- L'estrapolazione di γ al bedrock sismico viene realizzata dalla formula che lega γ a G_0 ed alla V_s ;
- Infine, è possibile estrapolare il profilo della pressione litostatica al bedrock sismico.

⁷ Albarello, D., Cesi, C., Eulilli, V., Guerrini, F., Lunedei, E., Paolucci, E., Pileggi, D., Puzzilli, L., 2011. The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzoning: an example from the area damaged by the April 6, 2009 L'Aquila (Italy) earthquake. *Boll. di Geofis. Teor. e Appl.* 52, 513-538.

Le curve di variazione del modulo di taglio e dello smorzamento con le deformazioni assegnate a tutti gli strati argillosi della Formazione delle Argille Azzurre sono stati ricavati dalle analisi di laboratorio di taglio torsionale ciclico sul campione estratto dal carotaggio continuo tra 5,9 e 6,4 m: in questo modo, considerati l'omogeneità litologica del terreno fino al bedrock sismico e l'aumento progressivo della rigidità con la profondità, si favorisce una stima conservativa della risposta sismica locale del terreno. Per lo spessore limo-sabbioso superficiale si sono assunte le curve di variazione di modulo di taglio e smorzamento da una prova di laboratorio eseguita su un campione litologico simile, estratto da una profondità paragonabile, a disposizione dello scrivente.

8.2.1. Risultati

Un primo risultato dell'analisi è la ricostruzione della PGA lungo l'intero profilo e dell'accelerazione fino alla profondità del bedrock sismico (Figura 49). Dalla figura è evidente il concentrarsi delle massime accelerazioni in superficie nel settore che procede dall'orlo di terrazzo fluviale fino alla base del versante sud-orientale dell'area, ed una sostanziale omogeneità nel tratto coincidente con l'intera piana alluvionale compresa tra l'orlo di terrazzo di cui sopra e la base del versante di sinistra. Il profilo di accelerazione calcolato in corrispondenza del punto di misura P50 (Figura 50) mostra un incremento sensibile dei valori a partire dalla profondità di circa 15 m.

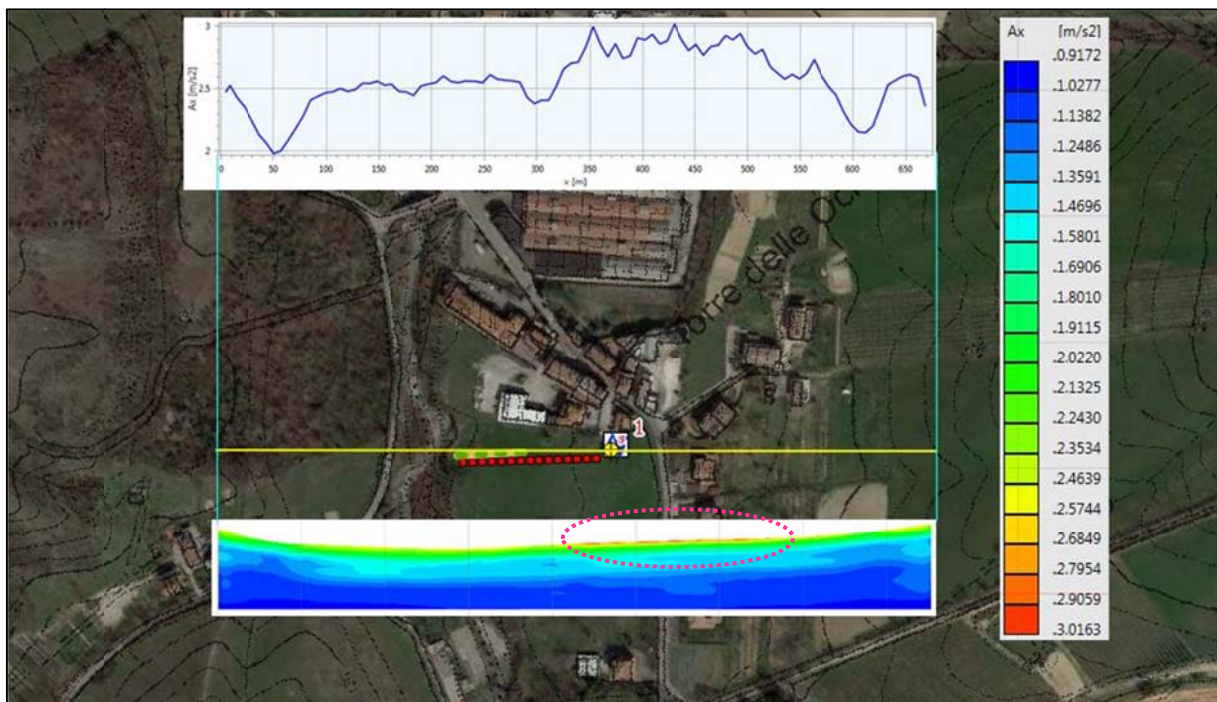


Figura 49 – In alto in figura: profilo della PGA ricostruito attraverso l'analisi di risposta sismica locale 2D per "Torre Oche". L'accelerazione di picco in superficie è espressa in m/s². In basso: distribuzione 2D delle accelerazioni lungo l'intero profilo e fino alla profondità del bedrock sismico; a destra la colonna di legenda.

I valori di PGA registrati lungo tutto il profilo sono stati discretizzati in intervalli omogenei; nel centro di ogni intervallo sono stati collocati sia i punti di misura (in rosso in Figura 47, meglio visibili nell'Allegato dedicato) per i quali sono stati ricavati i valori numerici dello spettro di risposta e i relativi fattori di amplificazione, sia le colonne di controllo, utilizzate per la generazione dei profili con la profondità di massima deformazione co-sismica, massimo smorzamento, accelerazione e velocità delle onde S.

I fattori di amplificazione medi (sui 3 accelerogrammi) della PGA e dell'Intensità di Housner, calcolati in corrispondenza dei punti di misura, sono elencati in Tabella 1.

FA	P4	P9	P14	P27	P46	P50	P55	P67	P80	P86	P93
PGA	1,5	1,3	1,5	1,6	1,5	1,7	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5
IS1	1,63	1,39	1,64	1,82	1,74	1,93	2,01	1,95	1,77	1,63	1,65
IS2	1,56	1,37	1,41	1,52	1,56	1,65	1,71	1,71	1,56	1,5	1,57

Tabella 1 - Fattori di amplificazione medi (sui 3 accelerogrammi) della PGA e dell'Intensità di Housner, calcolati in corrispondenza dei punti di misura posizionati lungo il profilo.

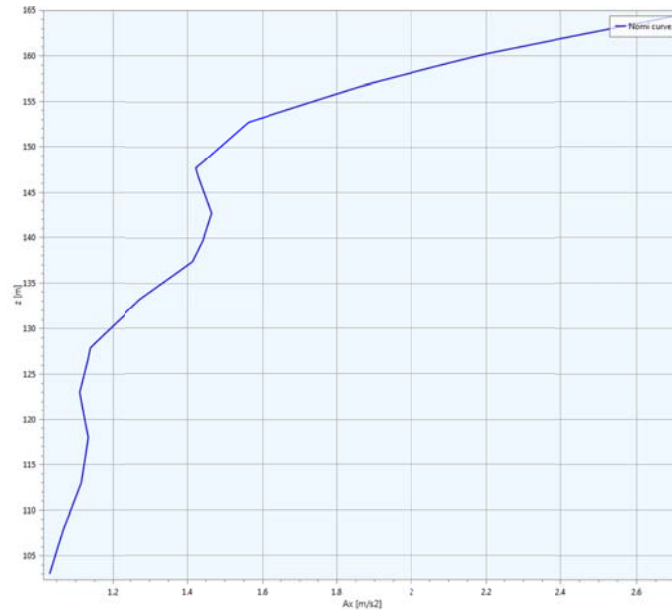


Figura 50 – Profilo dell'accelerazione dal bedrock sismico alla superficie (Colonna di controllo nr. 6), ottenuto in corrispondenza del punto di misura P50, collocato in prossimità del settore dell'area di studio indagato dal sondaggio a carotaggio, dal Down-hole e dalla penetrometria dinamica.

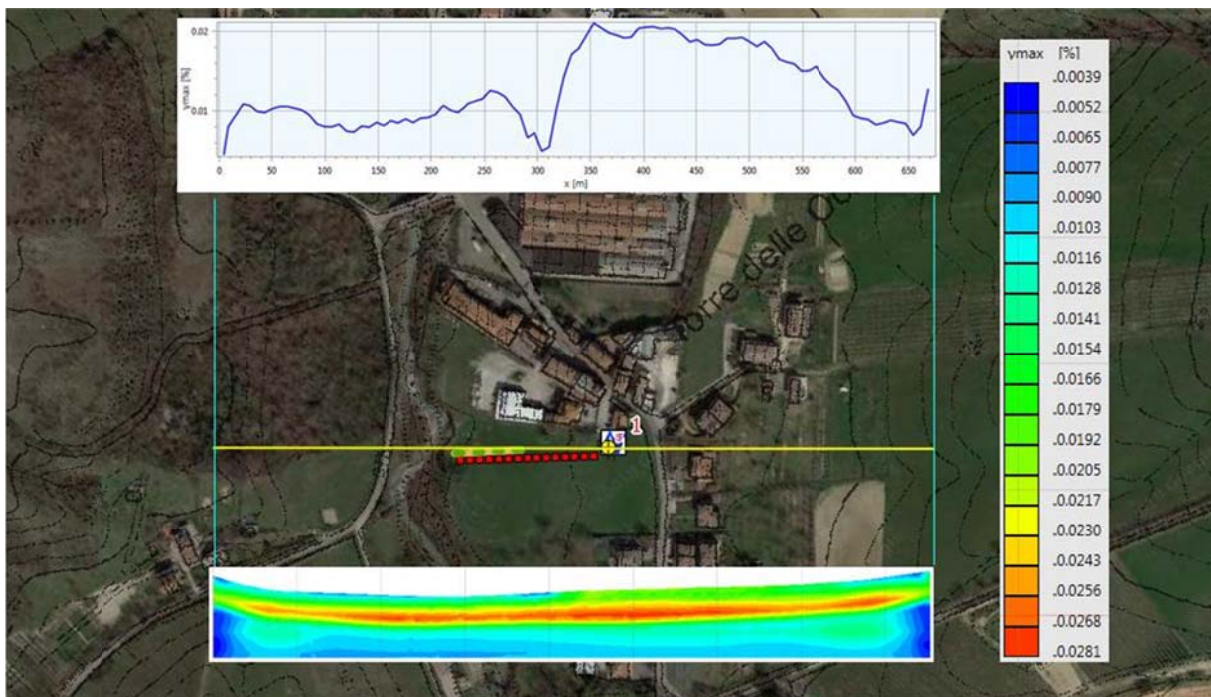


Figura 51 - Distribuzione del valore medio (fra i tre accelerogrammi) della deformazione massima co-sismica lungo l'intero profilo secondo la modellazione 2D.

In Figura 51 si vede come anche il livello di deformazione co-sismica riprenda, nell'andamento, quello della PGA, con i livelli maggiori registrati in corrispondenza del settore che procede dall'orlo di terrazzo fluviale fino alla base del versante sud-orientale dell'area: qui si raggiungono valori prossimi a 0.02%. I profili della massima deformazione e dello smorzamento, calcolati in corrispondenza del punto di misura P50 (Figura 52), mostrano entrambi sensibili incrementi a partire da circa 30 m di profondità.

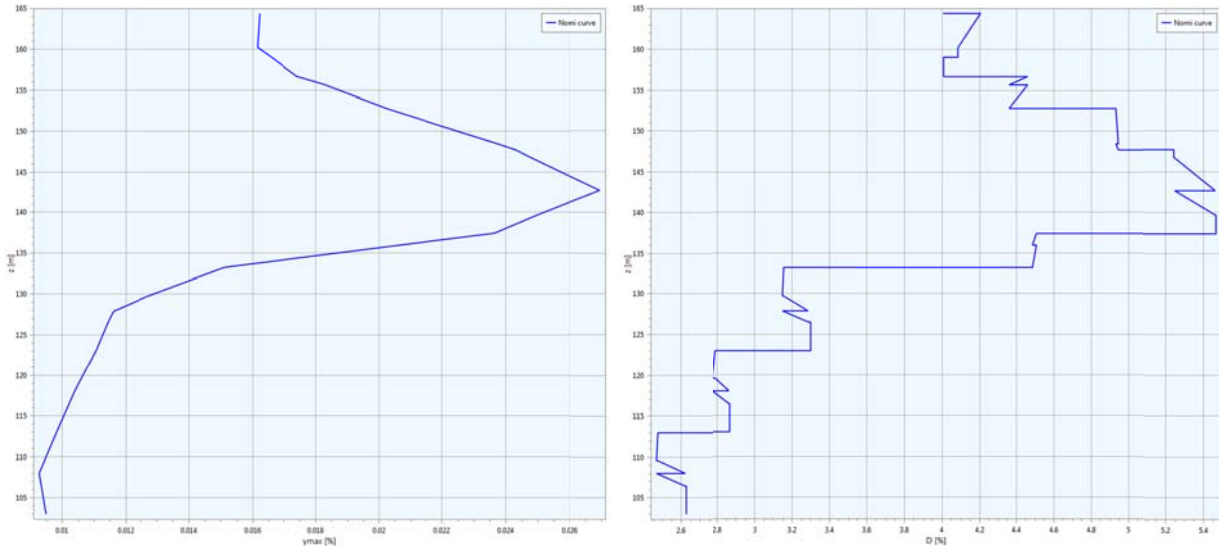


Figura 52 - Profili della massima deformazione co-sismica (sinistra) e dello smorzamento (destra), dal bedrock sismico alla superficie (Colonna di controllo nr. 6), ottenuti in corrispondenza del punto di misura P50, collocato in prossimità del settore dell'area di studio indagato dal sondaggio a carotaggio, dal Down-hole e dalla penetrometria dinamica.

La Figura 53 mostra gli spettri di risposta ottenuti del punto di misura P50. I valori numerici dei diversi spettri di risposta, ricavati per ogni punto di misura, sono riportati nell'Allegato 10.

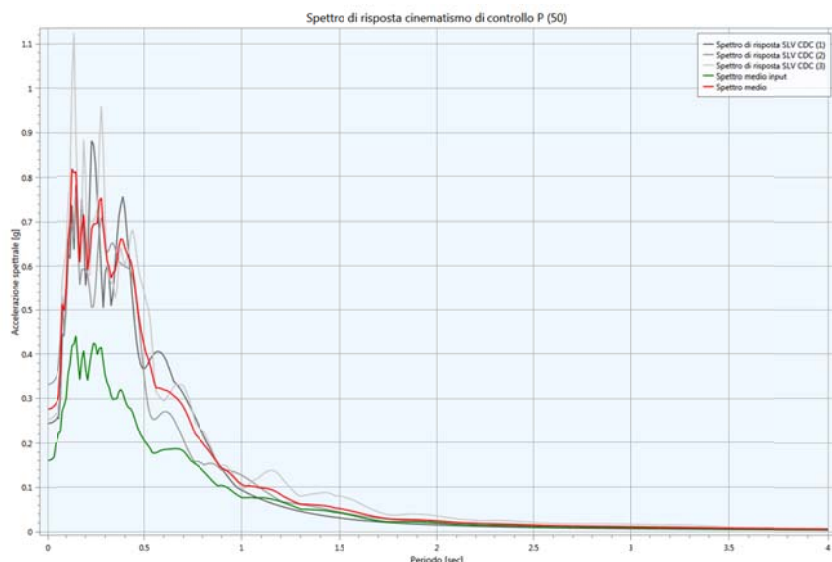


Figura 53 - Spettri di risposta relativi ai tre accelerogrammi di riferimento per l'area di studio relativamente al punto P(50) (3 curve in diverse tonalità di grigio). Vengono anche riportati lo spettro medio del moto di riferimento (curva verde) e quello di risposta medio per i tre accelerogrammi (curva rossa).

8.2.2. Calcolo dei cedimenti post-sismici

Il calcolo dei cedimenti post-sismici nel terreno indagato dai sondaggi eseguiti presso Torre Oche è stato eseguito seguendo le procedure di calcolo dell'Allegato A3, paragrafi B.2 e B.3, della DGR2193/2015, tenendo quindi conto della sommatoria dei cedimenti che possono aver luogo sia nei terreni granulari insaturi che in quelli coesivi soffici.

In realtà, per Torre Oche si è visto come i primi 5 m dal p.d.c. non siano costituiti da terreni granulari, bensì da limi debolmente sabbiosi; pertanto, la stima dei cedimenti in questi primi metri è stata scartata.

Per una stima conservativa dei cedimenti nei terreni argillosi, la procedura di calcolo del paragrafo B.3 della DGR è stata applicata al campione indisturbato prelevato dal sondaggio a carotaggio ed il risultato esteso ai 20 m sottostanti in cui l'analisi di risposta sismica locale ha evidenziato i maggiori valori di massima deformazione co-sismica.

La deformazione volumetrica verticale ε_v è data dalla formula:

$$\varepsilon_v = \frac{\alpha \cdot C_r}{1 + e_0} \cdot \log \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{p_0}} \right)$$

dove C_r è l'indice di ricomprensione, che si assume pari all'indice di rigonfiamento C_s , determinato con la prova edometrica sul campione, $\alpha = 1.5$, e_0 è l'indice dei vuoti naturale in sito dell'argilla calcolato in laboratorio geotecnico, e $\Delta u/p_0 = r_u$ è il rapporto di sovrappressione interstiziale, ovvero il rapporto fra l'incremento di pressione interstiziale indotta dallo scuotimento sismico e la tensione media efficace iniziale.

Il rapporto di sovrappressione interstiziale è dato dalla formula:

$$r_u = \frac{\Delta u}{p_0} = \beta \cdot \left[\log \frac{\gamma_{\max}}{\gamma_v} \right]$$

dove $\beta = 0.45$, γ_{\max} è la deformazione di taglio massima in semplice ampiezza indotta dal terremoto, determinata lungo la colonna di controllo nr. 6 dall'analisi di risposta sismica locale e γ_v è la deformazione di soglia volumetrica, determinata con la prova di taglio torsionale ciclico sul campione.

Il risultato sul campione di 50 cm estratto dalla carota è pari a 0,26 cm, che moltiplicato per i 20 m in cui massimi sono i valori di deformazione co-sismica (all'interno dello stesso tipo litologico) restituiscono circa **10 cm** di cedimento.

Questo risultato è sicuramente una stima conservativa, per quanto detto precedentemente, ma sicuramente supportata da dati oggettivi.

8.3. Analisi per l'area di studio di "via Fondo Val Grizzaga"

La geometria del modello utilizzato per l'analisi 2D è mostrata in Figura 54. I dettagli del modello sono riportati in Allegato 10 in forma di una specifica relazione descrittiva nel formato previsto dal codice di calcolo adottato.

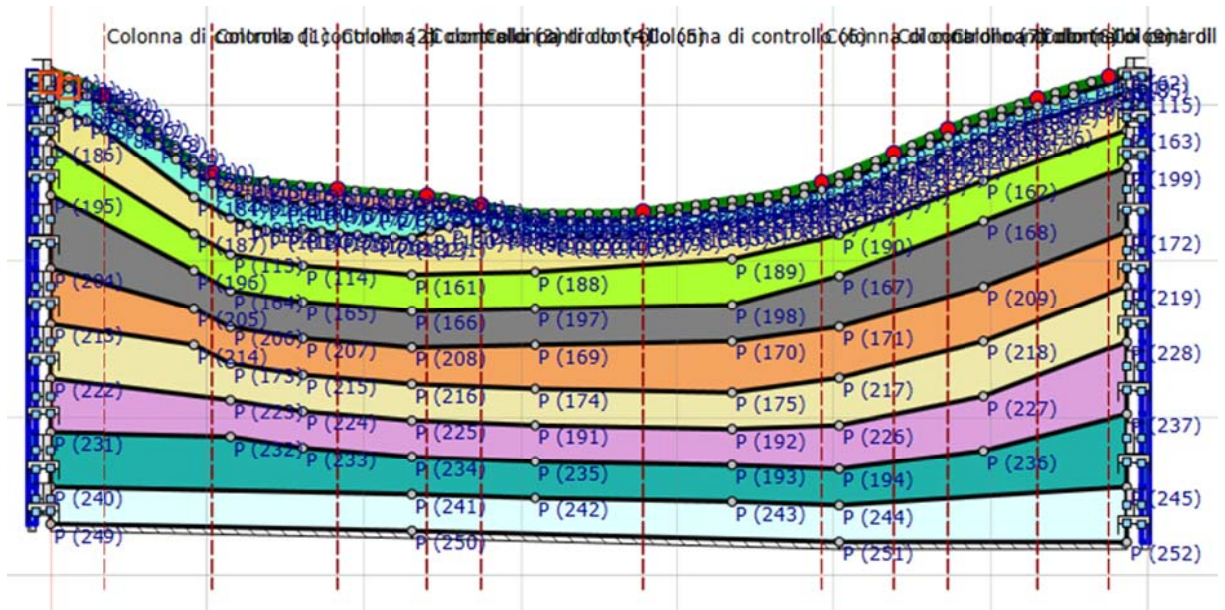


Figura 54 - Modello 2D del sito di "via Fondo Val Grizzaga". Il modello ha la stessa scala nelle direzioni verticale ed orizzontale. Il moto di riferimento (relativo alla sola componente **orizzontale** del moto) è applicato alla base del modello. I punti in rosso (meglio visibili nell'Allegato dedicato) indicano i punti di misura per i quali vengono forniti i valori numerici dello spettro di risposta e i relativi fattori di amplificazione. Le colonne di controllo sono utilizzate per la generazione dei profili di massima deformazione co-sismica, massimo smorzamento, accelerazione e velocità delle onde S.

La traccia del profilo adottato per costruire il modello (Figura 55) è stata estesa fino ai versanti che bordano la valle, per tener conto della variazione morfologica dovuta alla presenza della valle stretta, tenendo come isoipsa comune ai due estremi quella di quota 225 m s.l.m.



Figura 55 – La linea gialla indica la traccia del profilo di Figura 54 lungo il quale è stata effettuata l'analisi di risposta sismica locale 2D. Gli altri simboli indicano le ubicazioni delle indagini geognostiche e geofisiche realizzate nell'area per questo studio.

Il profilo sismostratigrafico è stato disegnato col massimo dettaglio in corrispondenza della traccia dello stendimento a sismica a rifrazione. I vari sismostrati sono stati quindi estesi lateralmente, fino ai due capi del profilo, introducendo inevitabilmente un buon grado di soggettività nell'interpretazione, comunque guidata dalla conoscenza dell'assetto geologico-geomorfologico locale.

Poiché il bedrock sismico non è stato raggiunto né dalla MASW, né dal Down-Hole, si è optato per l'utilizzo del metodo messo a punto da Albarello et al. (2011)⁸ che permette di stimare la profondità del bedrock sismico sulla base dei dati Down-hole e della relazione:

$$V_s(z) \approx V_0 \cdot (1+z)^x$$

che mette in relazione la V_s con il valore di V_s registrato nei primi metri superficiali (V_0), con la profondità (z) e con il coefficiente "x", da variare fino ad ottenere il minimo scarto tra il profilo di V_s così calcolato e quello direttamente ricavato dall'indagine Down-hole. Ciò permette di estrapolare i valori di V_s ben oltre la profondità raggiunta dall'indagine geofisica, fino a raggiungere il valore di 800 m/s. Nel caso di via Fondo Val Grizzaga la profondità del bedrock sismico è risultata, con tale metodo, pari a **110 m**.

Questo risultato permette di stabilire a quale profondità ancorare gli accelerogrammi di input sulla base della pericolosità sismica di base. La stratigrafia, dalla profondità raggiunta dalle indagini geognostiche e geofisiche eseguite per questo studio alla profondità del bedrock sismico, è stata discretizzata per intervalli di spessore di 10 m.

Per la caratterizzazione della sismo-stratigrafia, per ogni strato occorre conoscere:

- Il peso di volume γ in Kg/m³,
- La velocità delle onde s in m/s
- Il coefficiente di Poisson
- Le curve di decadimento dei materiali (G/G_0 e $D\%$)

Il peso di volume può essere ricavato direttamente dai dati del Down-Hole. Questa prova fornisce le V_s , le V_p , G_0 ed il coefficiente di Poisson. Da questi 3 parametri si possono ricavare, con note formule, i seguenti parametri:

- γ : da G_0 e V_s ,
- pressione litostatica: dal γ precedentemente ricavato.

Tutti i parametri geotecnici e geofisici da assegnare ad ogni strato necessari per la modellazione possono essere estrapolati fino alla profondità assunta del bedrock sismico tramite i seguenti passi:

- L'estrapolazione delle V_s al bedrock è, come visto, realizzata attraverso il metodo proposto da Albarello et al. (2011);
- Tramite i profili di velocità di V_s e V_p nei primi 30 m del Down-hole, è possibile ricavare l'equazione della relazione tra V_s e V_p e, quindi, estrapolare anche le velocità delle onde P fino al bedrock sismico;
- Di seguito, è possibile ricavare il profilo del coefficiente di Poisson fino al bedrock sismico utilizzando la formula che lo lega alle V_s ed alle V_p ;
- La relazione matematica ricavabile tra G_0 e V_s nei primi 30 m si ricava, inoltre, l'estrapolazione di G_0 al bedrock sismico;
- L'estrapolazione di γ al bedrock sismico viene realizzata dalla formula che lega γ a G_0 ed alla V_s ;
- Infine, è possibile estrapolare il profilo della pressione litostatica al bedrock sismico.

⁸ Albarello, D., Cesi, C., Eulilli, V., Guerrini, F., Lunedei, E., Paolucci, E., Pileggi, D., Puzzilli, L., 2011. The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzoning: an example from the area damaged by the April 6, 2009 L'Aquila (Italy) earthquake. *Boll. di Geofis. Teor. e Appl.* 52, 513-538.

Le curve di variazione del modulo di taglio e dello smorzamento con le deformazioni assegnate a tutti gli strati argillosi della Formazione delle Argille Azzurre sono stati ricavati dalle analisi di laboratorio di taglio torsionale ciclico sul campione estratto dal carotaggio continuo tra 5,5 e 6,0 m: in questo modo, considerati l'omogeneità litologica del terreno fino al bedrock sismico e l'aumento progressivo della rigidità con la profondità, si favorisce una stima conservativa della risposta sismica locale del terreno. Per lo spessore limo-sabbioso superficiale si sono assunte le curve di variazione di modulo di taglio e smorzamento da una prova di laboratorio eseguita su un campione litologico simile, estratto da una profondità paragonabile, a disposizione dello scrivente.

8.3.1. Risultati

Un primo risultato dell'analisi è la ricostruzione della PGA lungo l'intero profilo e dell'accelerazione fino alla profondità del bedrock sismico (Figura 56). Dalla figura è evidente il concentrarsi delle massime accelerazioni in superficie nel settore che coincide con la parte di fondo vallivo in sinistra idrografica del Grizzaga, ed una sostanziale omogeneità nel tratto coincidente con la piana valliva in destra idrografica. Il profilo di accelerazione calcolato in corrispondenza del punto di misura P26 (Figura 57) mostra un incremento sensibile dei valori a partire dalla profondità di circa 20 m.

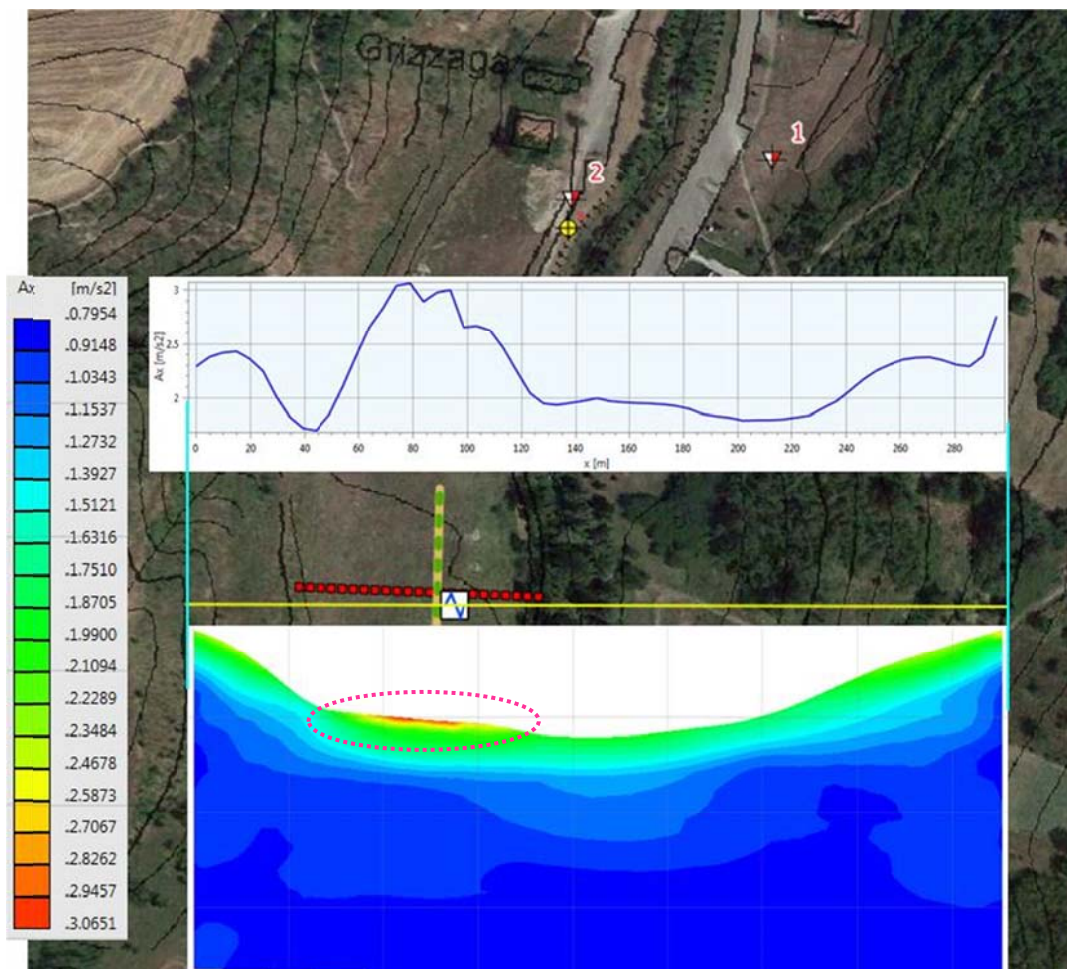


Figura 56 – In alto in figura: profilo della PGA ricostruito attraverso l'analisi di risposta sismica locale 2D per "via Fondo Val Grizzaga". L'accelerazione di picco in superficie è espressa in m/s^2 . In basso: distribuzione 2D delle accelerazioni lungo l'intero profilo e fino alla profondità del bedrock sismico; a sinistra la colonna di legenda.

I valori di PGA registrati lungo tutto il profilo sono stati discretizzati in intervalli omogenei; nel centro di ogni intervallo sono stati collocati sia i punti di misura (in rosso in Figura 54, meglio visibili nell'Allegato dedicato) per i quali sono stati ricavati i valori numerici dello spettro di risposta e i relativi fattori di amplificazione, sia le colonne di controllo, utilizzate per la generazione dei profili con la profondità di massima deformazione co-sismica, massimo smorzamento, accelerazione e velocità delle onde S.

I fattori di amplificazione medi (sui 3 accelerogrammi) della PGA e dell'Intensità di Housner, calcolati in corrispondenza dei punti di misura, sono elencati in Tabella 2.

FA	P5	P11	P18	P23	P26	P35	P45	P49	P52	P57	P61
PGA	1,5	1,2	1,8	1,7	1,4	1,2	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6
IS1	1,5	1,14	2,18	1,83	1,61	1,43	1,2	1,3	1,44	1,5	1,64
IS2	1,46	1,18	1,33	1,24	1,16	1,08	1,07	1,2	1,3	1,39	1,46

Tabella 2 - Fattori di amplificazione medi (sui 3 accelerogrammi) della PGA e dell'Intensità di Housner, calcolati in corrispondenza dei punti di misura posizionati lungo il profilo.

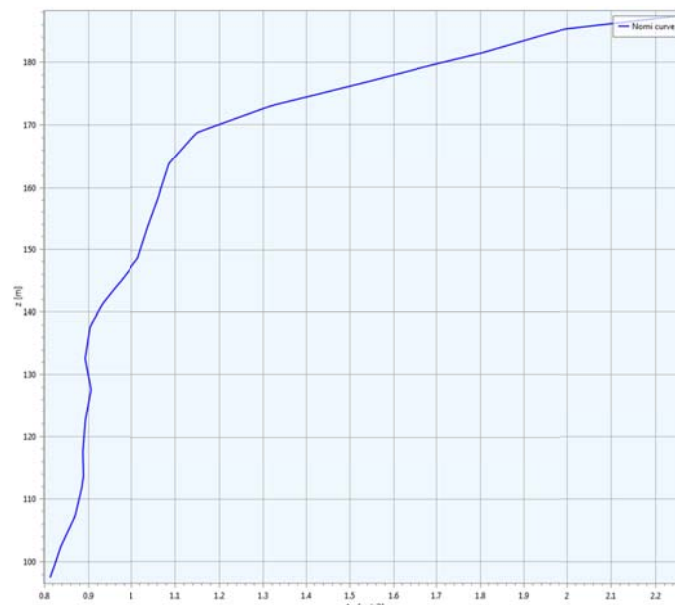


Figura 57 – Profilo dell'accelerazione dal bedrock sismico alla superficie (Colonna di controllo nr. 5), ottenuto in corrispondenza del punto di misura P26, collocato nel punto di proiezione ortogonale sul profilo del luogo in cui sono stati eseguiti il sondaggio a carotaggio, il Down-hole e dalla penetrometria statica nr. 2.

In Figura 58 si vede come anche il livello di deformazione co-sismica riprenda, nell'andamento, quello della PGA, con i livelli maggiori registrati in corrispondenza sempre del settore che coincide con la parte di fondo vallivo in sinistra idrografica del Grizzaga: qui si raggiungono valori prossimi a 0.034%. I profili della massima deformazione e dello smorzamento, calcolati in corrispondenza del punto di misura P26 (Figura 59), mostrano entrambi sensibili incrementi a partire da circa 30 m di profondità fino a circa 10 m di profondità.

La Figura 60 mostra gli spettri di risposta ottenuti del punto di misura P26. I valori numerici dei diversi spettri di risposta, ricavati per ogni punto di misura, sono riportati nell'Allegato 10.

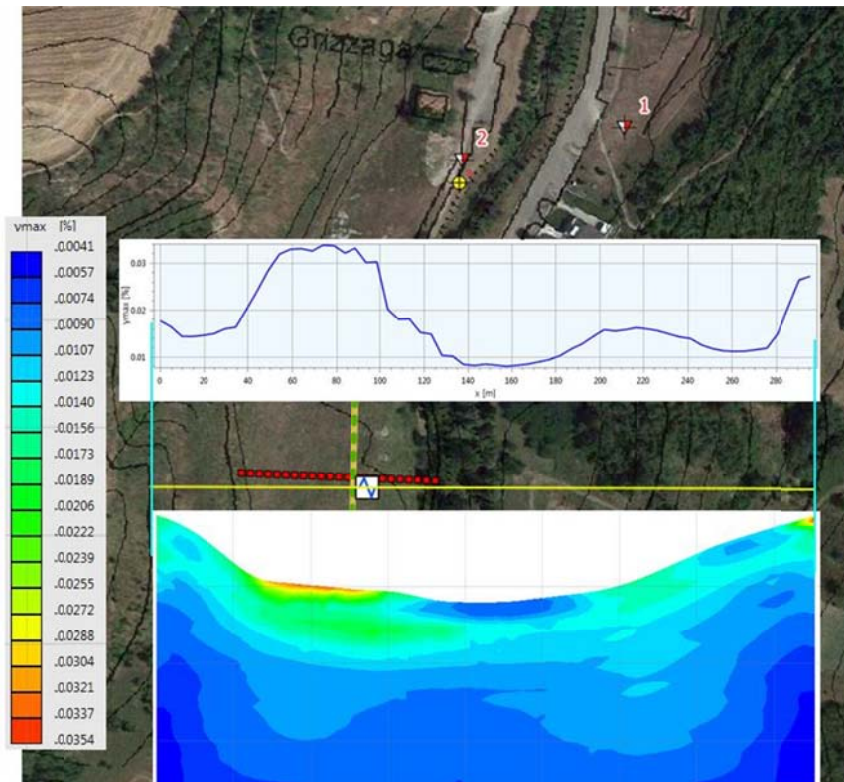


Figura 58 - Distribuzione del valore medio (fra i tre accelerogrammi) della deformazione massima co-sismica lungo l'intero profilo secondo la modellazione 2D.

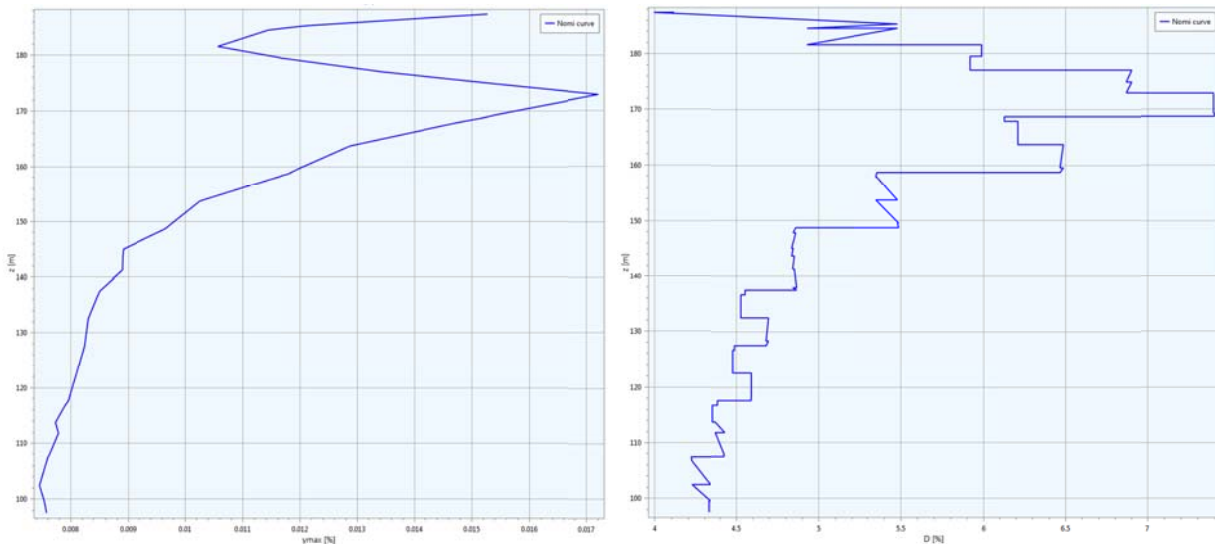


Figura 59 - Profili della massima deformazione co-sismica (sinistra) e dello smorzamento (destra), dal bedrock sismico alla superficie (Colonna di controllo nr. 5), ottenuti in corrispondenza del punto di misura P26, collocato nel punto di proiezione ortogonale sul profilo del luogo in cui sono stati eseguiti il sondaggio a carotaggio, il Down-hole e dalla penetrometria statica nr. 2

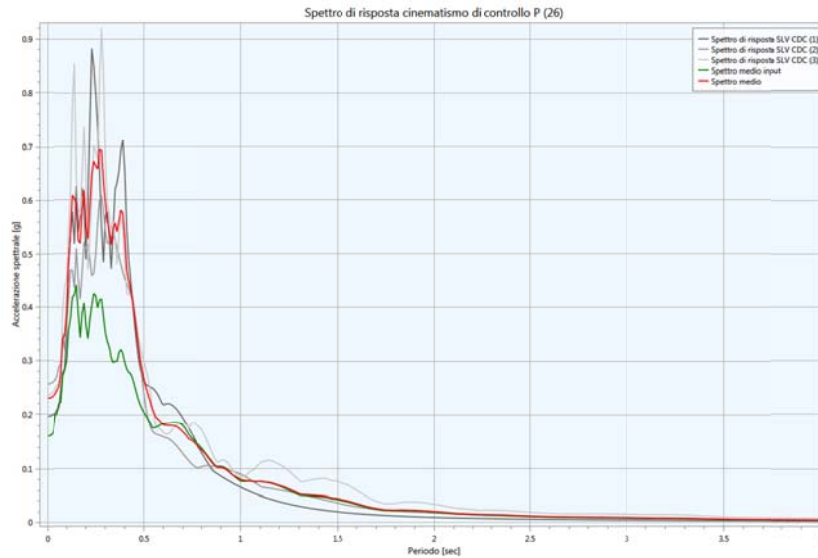


Figura 60 - Spettri di risposta relativi ai tre accelerogrammi di riferimento per l'area di studio relativamente al punto **P(26)** (3 curve in diverse tonalità di grigio). Vengono anche riportati lo spettro medio del moto di riferimento (curva verde) e quello di risposta medio per i tre accelerogrammi (curva rossa).

8.3.2. Calcolo dei cedimenti post-sismici

Il calcolo dei cedimenti post-sismici nel terreno indagato dai sondaggi eseguiti presso via Fondo Val Grizzaga è stato eseguito seguendo le procedure di calcolo dell'Allegato A3, paragrafi B.2 e B.3, della DGR2193/2015, tenendo quindi conto della sommatoria dei cedimenti che possono aver luogo sia nei terreni granulari insaturi che in quelli coesivi soffici. In realtà, per via Fondo Val Grizzaga si è visto come i primi 4 m dal p.d.c. non siano costituiti da terreni granulari, bensì da limi debolmente sabbiosi; pertanto, la stima dei cedimenti in questi primi metri è stata scartata.

Per una stima conservativa dei cedimenti nei terreni argillosi, la procedura di calcolo del paragrafo B.3 della DGR è stata applicata al campione indisturbato prelevato dal sondaggio a carotaggio ed il risultato esteso ai 20 m sottostanti in cui l'analisi di risposta sismica locale ha evidenziato i maggiori valori di massima deformazione co-sismica.

La deformazione volumetrica verticale ε_{vi} è data dalla formula:

$$\varepsilon_v = \frac{\alpha \cdot C_r}{1 + e_0} \cdot \log \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{p_0}} \right)$$

dove C_r è l'indice di ricomprensione, che si assume pari all'indice di rigonfiamento C_s , determinato con la prova edometrica sul campione, $\alpha = 1.5$, e_0 è l'indice dei vuoti naturale in sito dell'argilla calcolato in laboratorio geotecnico, e $\Delta u/p_0 = r_u$ è il rapporto di sovrappressione interstiziale, ovvero il rapporto fra l'incremento di pressione interstiziale indotta dallo scuotimento sismico e la tensione media efficace iniziale.

Il rapporto di sovrappressione interstiziale è dato dalla formula:

$$r_u = \frac{\Delta u}{p_0} = \beta \cdot \left[\log \frac{\gamma_{\max}}{\gamma_v} \right]$$

dove $\beta = 0.45$, γ_{\max} è la deformazione di taglio massima in semplice ampiezza indotta dal terremoto, determinata lungo la colonna di controllo nr. 5 dall'analisi di risposta sismica locale e γ_v è la deformazione di soglia volumetrica, determinata con la prova di taglio torsionale ciclico sul campione.

Il risultato sul campione di 50 cm estratto dalla carota è pari a 0,008 cm, che moltiplicato per i 20 m in cui massimi sono i valori di deformazione co-sismica (all'interno dello stesso tipo litologico) restituiscono circa **0,3 cm** di cedimento.

Il trascurabile valore di cedimento è senza dubbio dovuto al valore della deformazione di soglia volumetrica pressoché identico alla deformazione massima calcolata alla profondità di prelievo del campione dall'analisi di risposta sismica locale, che rende praticamente prossima a zero la sovrappressione interstiziale.

In ogni caso, questo risultato è comunque una stima conservativa, per quanto detto precedentemente, ma sicuramente supportata da dati oggettivi.

8.4. Analisi per l'area di studio di "località Il Poggio"

La geometria del modello utilizzato per l'analisi 2D è mostrata in Figura 61. I dettagli del modello sono riportati in Allegato 10 in forma di una specifica relazione descrittiva nel formato previsto dal codice di calcolo adottato.

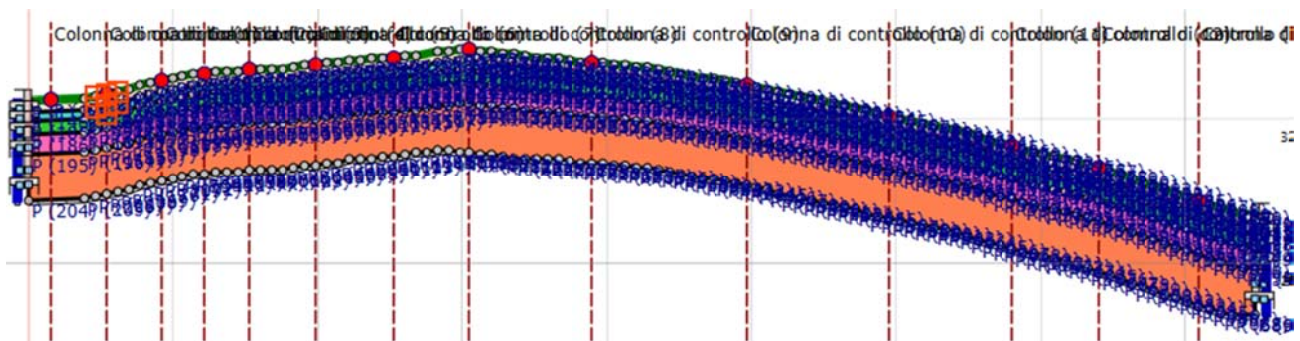


Figura 61 - Modello 2D del sito di "località Il Poggio". Il modello ha la stessa scala nelle direzioni verticale ed orizzontale. Il moto di riferimento (relativo alla sola componente **orizzontale** del moto) è applicato alla base del modello. I punti in rosso (meglio visibili nell'Allegato dedicato) indicano i punti di misura per i quali vengono forniti i valori numerici dello spettro di risposta e i relativi fattori di amplificazione. Le colonne di controllo sono utilizzate per la generazione dei profili di massima deformazione co-sismica, massimo smorzamento, accelerazione e velocità delle onde S.

La traccia del profilo adottato per costruire il modello (Figura 62) è stata estesa in modo da comprendere l'intera cresta montuosa su cui sorge località Il Poggio e gran parte dei suoi versanti.

Il profilo sismostratigrafico è stato disegnato col massimo dettaglio dall'interpretazione congiunta di: sondaggio a carotaggio, penetrometria statica e MASW/Down-hole. I vari sismostrati sono stati quindi estesi lateralmente, fino ai due capi del profilo, introducendo inevitabilmente un buon grado di soggettività nell'interpretazione, comunque guidata dalla conoscenza dell'assetto geologico-geomorfologico locale.

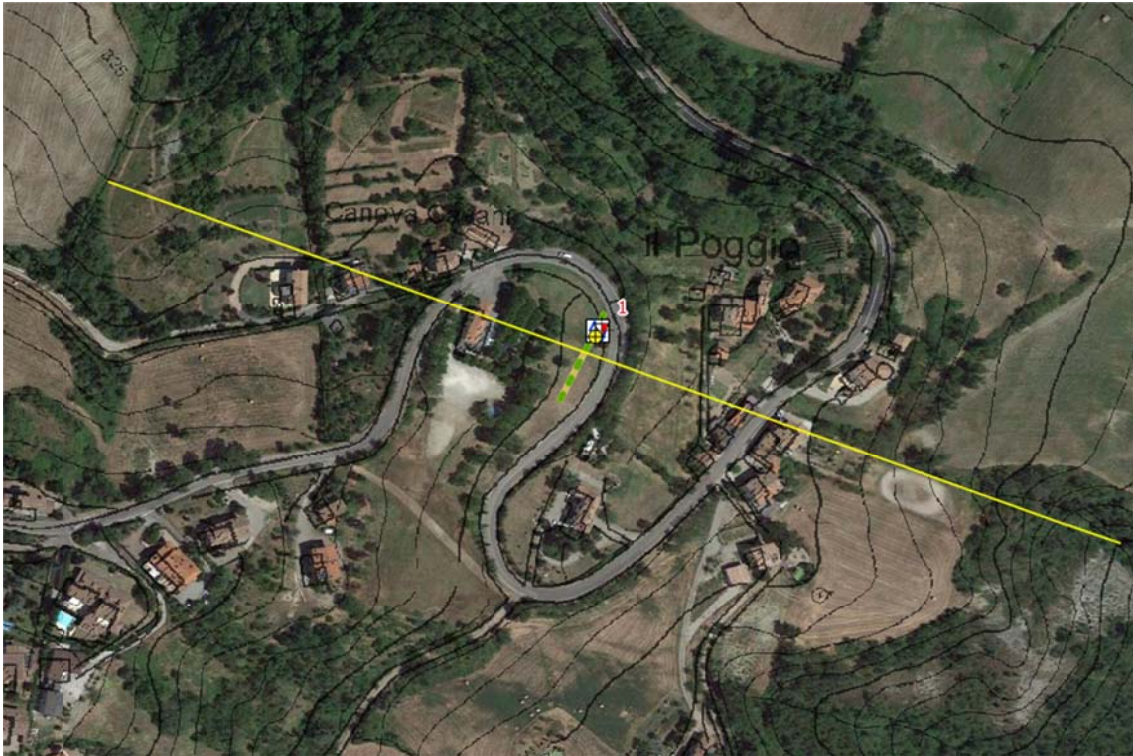


Figura 62 – La linea gialla indica la traccia del profilo di Figura 61 lungo il quale è stata effettuata l’analisi di risposta sismica locale 2D. Gli altri simboli indicano le ubicazioni delle indagini geognostiche e geofisiche realizzate nell’area per questo studio.

Poiché il bedrock sismico non è stato raggiunto né dalla MASW, né dal Down-Hole, si è optato per l’utilizzo del metodo messo a punto da Albarello et al. (2011)⁹ che permette di stimare la profondità del bedrock sismico sulla base dei dati Down-hole e della relazione:

$$V_s(z) \approx V_0 \cdot (1+z)^x$$

che mette in relazione la V_s con il valore di V_s registrato nei primi metri superficiali (V_0), con la profondità (z) e con il coefficiente “ x ”, da variare fino ad ottenere il minimo scarto tra il profilo di V_s così calcolato e quello direttamente ricavato dall’indagine Down-hole. Ciò permette di estrapolare i valori di V_s ben oltre la profondità raggiunta dall’indagine geofisica, fino a raggiungere il valore di 800 m/s. Nel caso di località Il Poggio la profondità del bedrock sismico è risultata, con tale metodo, pari a **45 m**.

Questo risultato permette di stabilire a quale profondità ancorare gli accelerogrammi di input sulla base della pericolosità sismica di base. La stratigrafia, dalla profondità raggiunta dalle indagini geognostiche e geofisiche eseguite per questo studio alla profondità del bedrock sismico, è stata discretizzata per intervalli di spessore di 10 m.

Per la caratterizzazione della sismo-stratigrafia, per ogni strato occorre conoscere:

- Il peso di volume γ in Kg/m^3 ,
- La velocità delle onde s in m/s
- Il coefficiente di Poisson
- Le curve di decadimento dei materiali (G/G_0 e $D\%$)

⁹ Albarello, D., Cesi, C., Eulilli, V., Guerrini, F., Lunedei, E., Paolucci, E., Pileggi, D., Puzilli, L., 2011. The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzoning: an example from the area damaged by the April 6, 2009 L’Aquila (Italy) earthquake. *Boll. di Geofis. Teor. e Appl.* 52, 513–538.

Il peso di volume può essere ricavato direttamente dai dati del Down-Hole. Questa prova fornisce le V_s , le V_p , G_0 ed il coefficiente di Poisson. Da questi 3 parametri si possono ricavare, con note formule, i seguenti parametri:

- γ : da G_0 e V_s ,
- pressione litostatica: dal γ precedentemente ricavato.

Tutti i parametri geotecnici e geofisici da assegnare ad ogni strato necessari per la modellazione possono essere estrapolati fino alla profondità assunta del bedrock sismico tramite i seguenti passi:

- L'extrapolazione delle V_s al bedrock è, come visto, realizzata attraverso il metodo proposto da Albarello et al. (2011);
- Tramite i profili di velocità di V_s e V_p nei primi 30 m del Down-hole, è possibile ricavare l'equazione della relazione tra V_s e V_p e, quindi, extrapolare anche le velocità delle onde P fino al bedrock sismico;
- Di seguito, è possibile ricavare il profilo del coefficiente di Poisson fino al bedrock sismico utilizzando la formula che lo lega alle V_s ed alle V_p ;
- La relazione matematica ricavabile tra G_0 e V_s nei primi 30 m si ricava, inoltre, l'extrapolazione di G_0 al bedrock sismico;
- L'extrapolazione di γ al bedrock sismico viene realizzata dalla formula che lega γ a G_0 ed alla V_s ;
- Infine, è possibile extrapolare il profilo della pressione litostatica al bedrock sismico.

Le curve di variazione del modulo di taglio e dello smorzamento con le deformazioni assegnate a tutti i terreni a prevalente componente fine sono stati ricavati dalle analisi di laboratorio di taglio torsionale ciclico sul campione estratto dal carotaggio continuo tra 11 e 11,40 m: in questo modo, considerato il cambiamento litologico da brecce argillose a marne argillose (quest'ultime contenenti il bedrock sismico) e l'aumento progressivo della rigidità con la profondità, si favorisce una stima conservativa della risposta sismica locale del terreno. Per lo spessore limo-sabbioso superficiale si sono assunte le curve di variazione di modulo di taglio e smorzamento da una prova di laboratorio eseguita su un campione litologico simile, estratto da una profondità paragonabile, a disposizione dello scrivente.

8.4.1. Risultati

Un primo risultato dell'analisi è la ricostruzione della PGA lungo l'intero profilo e dell'accelerazione fino alla profondità del bedrock sismico (Figura 63). Dalla figura sono evidenti un picco principale con le massime accelerazioni in superficie in corrispondenza del punto di minor raggio di curvatura della cresta, all'incirca corrispondente con il ristorante. Un secondo picco è localizzabile pochi metri a valle dell'ultimo edificio, verso NO, del profilo. E' altresì evidente un andamento piuttosto irregolare delle accelerazioni in superficie lungo tutto il profilo, verosimilmente legato all'irregolarità del profilo topografico.

Il profilo di accelerazione calcolato in corrispondenza del punto di misura P48 (Figura 64) mostra un incremento generalmente costante dei valori, con un leggero incremento di gradiente a partire dalla profondità di circa 10 m.

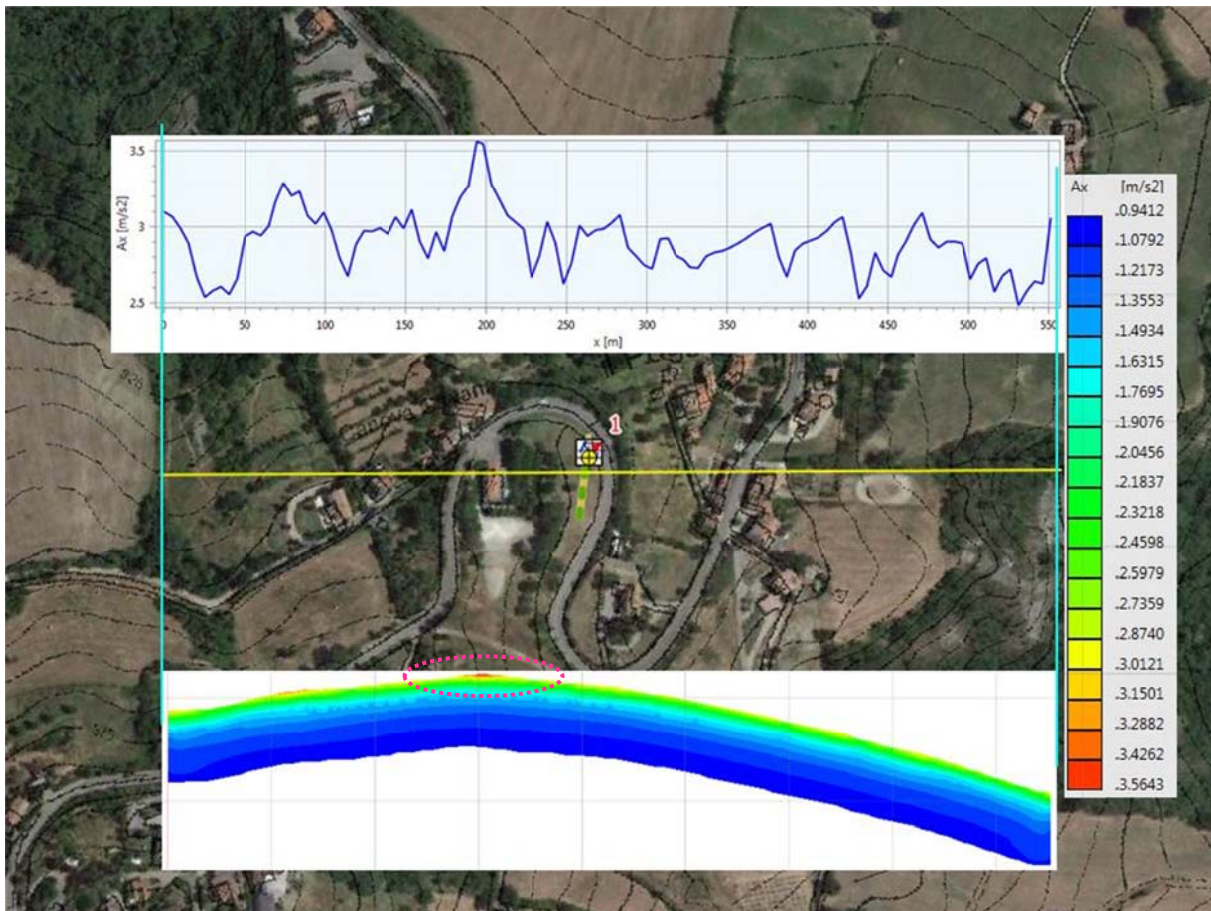


Figura 63 – In alto in figura: profilo della PGA ricostruito attraverso l’analisi di risposta sismica locale 2D per “località Il Poggio”. L’accelerazione di picco in superficie è espressa in m/s². In basso: distribuzione 2D delle accelerazioni lungo l’intero profilo e fino alla profondità del bedrock sismico; a destra la colonna di legenda.

I valori di PGA registrati lungo tutto il profilo sono stati discretizzati in intervalli omogenei; nel centro di ogni intervallo sono stati collocati sia i punti di misura (in rosso in Figura 61, meglio visibili nell’Allegato dedicato) per i quali sono stati ricavati i valori numerici dello spettro di risposta e i relativi fattori di amplificazione, sia le colonne di controllo, utilizzate per la generazione dei profili con la profondità di massima deformazione co-sismica, massimo smorzamento, accelerazione e velocità delle onde S.

I fattori di amplificazione medi (sui 3 accelerogrammi) della PGA e dell’Intensità di Housner, calcolati in corrispondenza dei punti di misura, sono elencati in Tabella 3.

FA	P173	P5	P10	P14	P18	P24	P31	P37	P48	P62	P257	P271	P279	P288
PGA	1,89	1,64	1,87	2,04	1,92	1,86	1,87	2,11	1,84	1,77	1,83	1,71	1,85	1,7
IS1	2,32	2	2,28	2,54	2,44	2,28	2,18	2,63	2,17	2,21	2,12	2,26	2,25	2,07
IS2	1,73	1,6	1,71	1,81	1,79	1,75	1,72	1,91	1,72	1,71	1,67	1,7	1,67	1,6

Tabella 3 - Fattori di amplificazione medi (sui 3 accelerogrammi) della PGA e dell’Intensità di Housner, calcolati in corrispondenza dei punti di misura posizionati lungo il profilo.

In Figura 65 si vede come anche il livello di deformazione co-sismica abbia lo stesso grado di irregolarità di quello della PGA, con i livelli maggiori registrati in corrispondenza della cresta e della sommità del suo versante nord-occidentale: qui si raggiungono valori prossimi a 0.036%. In generale, l’intero segmento a nord-ovest della linea di cresta mostra valori di deformazione superiori al segmento a sud-est della linea di cresta stessa. Forte deformazione si ha, infine, al piede del versante sud-orientale, in corrispondenza del brusco cambio di pendenza al raccordo con il terrazzo alluvionale. I profili della massima deformazione e dello smorzamento, calcolati

in corrispondenza del punto di misura P48 (Figura 66), mostrano entrambi sensibili incrementi a partire da circa 15 m di profondità fino a circa 5 m di profondità.

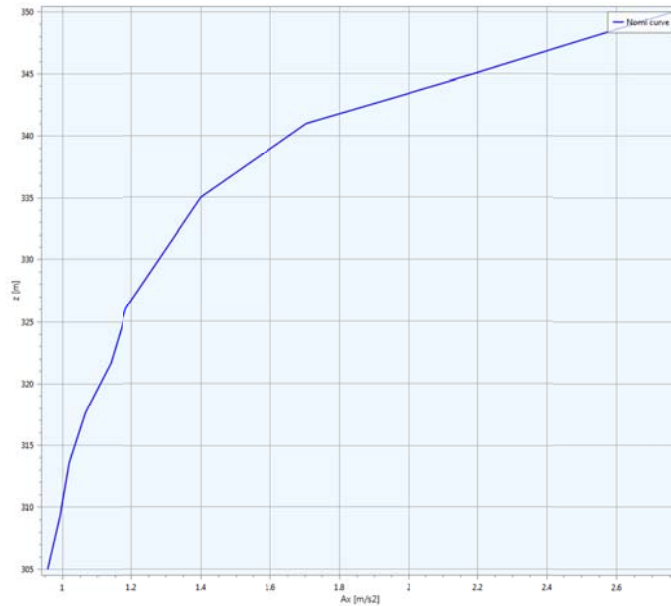


Figura 64 – Profilo dell’accelerazione dal bedrock sismico alla superficie (Colonna di controllo nr. 9), ottenuto in corrispondenza del punto di misura P48, collocato in corrispondenza del sito in cui sono stati eseguiti il sondaggio a carotaggio, il Down-hole e dalla penetrometria statica.

La Figura 60 mostra gli spettri di risposta ottenuti del punto di misura P26. I valori numerici dei diversi spettri di risposta, ricavati per ogni punto di misura, sono riportati nell’Allegato 10.

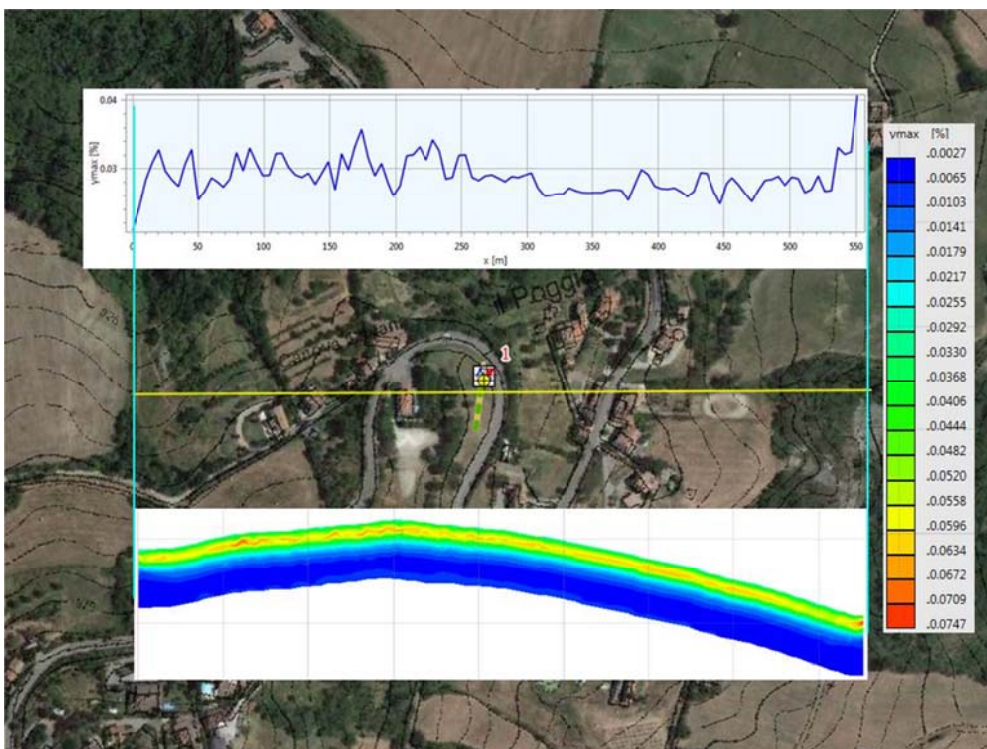


Figura 65 - Distribuzione del valore medio (fra i tre accelerogrammi) della deformazione massima co-sismica lungo l'intero profilo secondo la modellazione 2D.

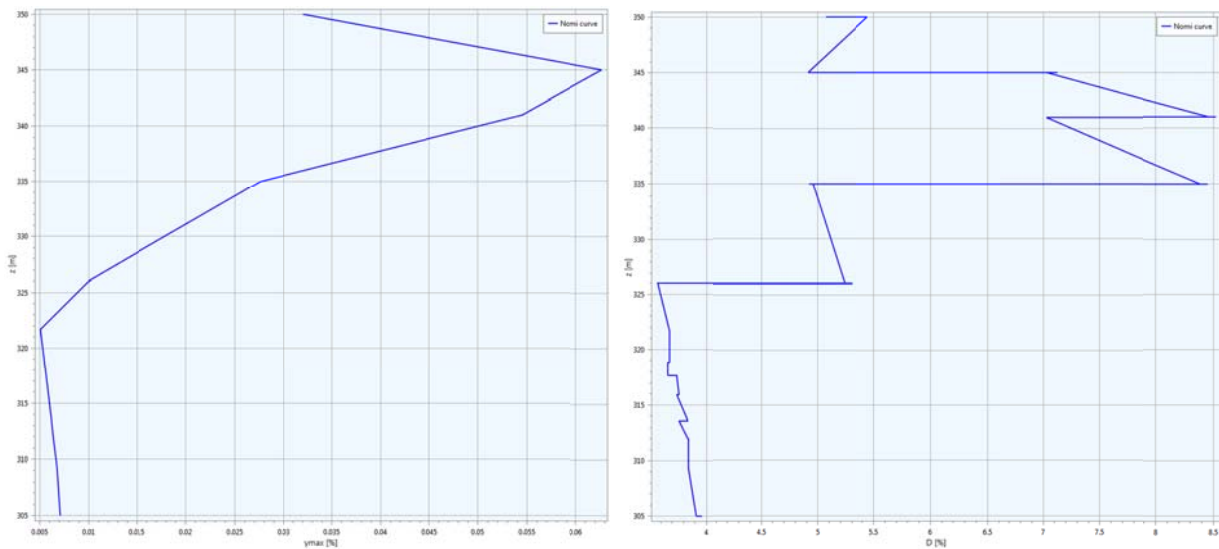


Figura 66 - Profili della massima deformazione co-sismica (sinistra) e dello smorzamento (destra), dal bedrock sismico alla superficie (Colonna di controllo nr. 9), ottenuti in corrispondenza del punto di misura P48, collocato nel sito in cui sono stati eseguiti il sondaggio a carotaggio, il Down-hole e dalla penetrometria statica.

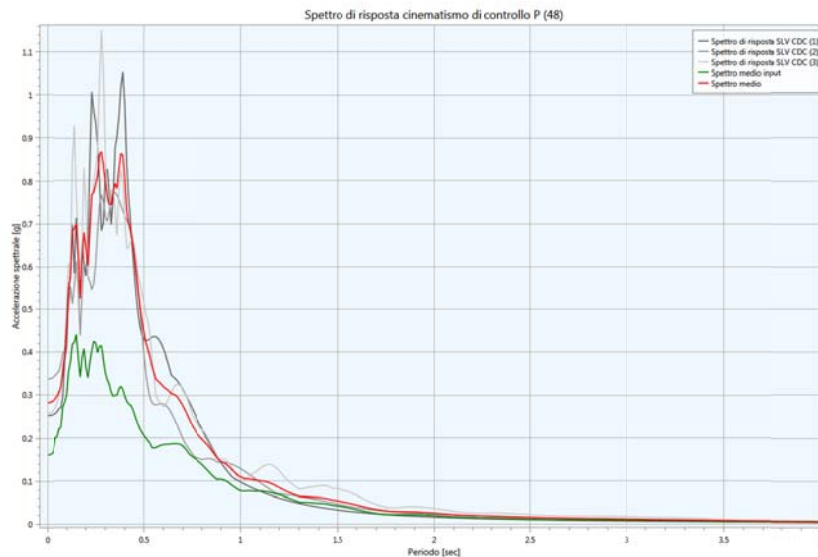


Figura 67 - Spettri di risposta relativi ai tre accelerogrammi di riferimento per l'area di studio relativamente al punto P(48) (3 curve in diverse tonalità di grigio). Vengono anche riportati lo spettro medio del moto di riferimento (curva verde) e quello di risposta medio per i tre accelerogrammi (curva rossa).

8.4.2. Calcolo dei cedimenti post-sismici

Il calcolo dei cedimenti post-sismici nel terreno indagato dai sondaggi eseguiti presso località Il Poggio è stato eseguito seguendo le procedure di calcolo dell'Allegato A3, paragrafi B.2 e B.3, della DGR2193/2015, tenendo quindi conto della sommatoria dei cedimenti che possono aver luogo sia nei terreni granulari insaturi che in quelli coesivi soffici.

In realtà, per località Il Poggio si è visto come i primi 8,5 m dal p.d.c. non siano costituiti da terreni granulari, bensì da limi debolmente sabbiosi; pertanto, la stima dei cedimenti in questi primi metri è stata scartata.

Per una stima conservativa dei cedimenti nei terreni a prevalente componente argillosa, la procedura di calcolo del paragrafo B.3 della DGR è stata applicata al campione indisturbato

prelevato dal sondaggio a carotaggio ed il risultato esteso ai 20 m sottostanti in cui l'analisi di risposta sismica locale ha evidenziato i maggiori valori di massima deformazione co-sismica.

La deformazione volumetrica verticale ε_{vi} è data dalla formula:

$$\varepsilon_v = \frac{\alpha \cdot C_r}{1 + e_0} \cdot \log \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{p_0'}} \right)$$

dove C_r è l'indice di ricomprensione, che si assume pari all'indice di rigonfiamento C_s , determinato con la prova edometrica sul campione, $\alpha = 1.5$, e_0 è l'indice dei vuoti naturale in sito dell'argilla calcolato in laboratorio geotecnico, e $\Delta u/p_0' = r_u$ è il rapporto di sovrappressione interstiziale, ovvero il rapporto fra l'incremento di pressione interstiziale indotta dallo scuotimento sismico e la tensione media efficace iniziale.

Il rapporto di sovrappressione interstiziale è dato dalla formula:

$$r_u = \frac{\Delta u}{p_0'} = \beta \cdot \left[\log \frac{\gamma_{\max}}{\gamma_v} \right]$$

dove $\beta = 0.45$, γ_{\max} è la deformazione di taglio massima in semplice ampiezza indotta dal terremoto, determinata lungo la colonna di controllo nr. 9 dall'analisi di risposta sismica locale e γ_v è la deformazione di soglia volumetrica, determinata con la prova di taglio torsionale ciclico sul campione.

Il risultato sul campione di 40 cm estratto dalla carota è pari a 0,13 cm, che moltiplicato per i 20 m in cui massimi sono i valori di deformazione co-sismica, restituiscono circa **6 cm** di cedimento.

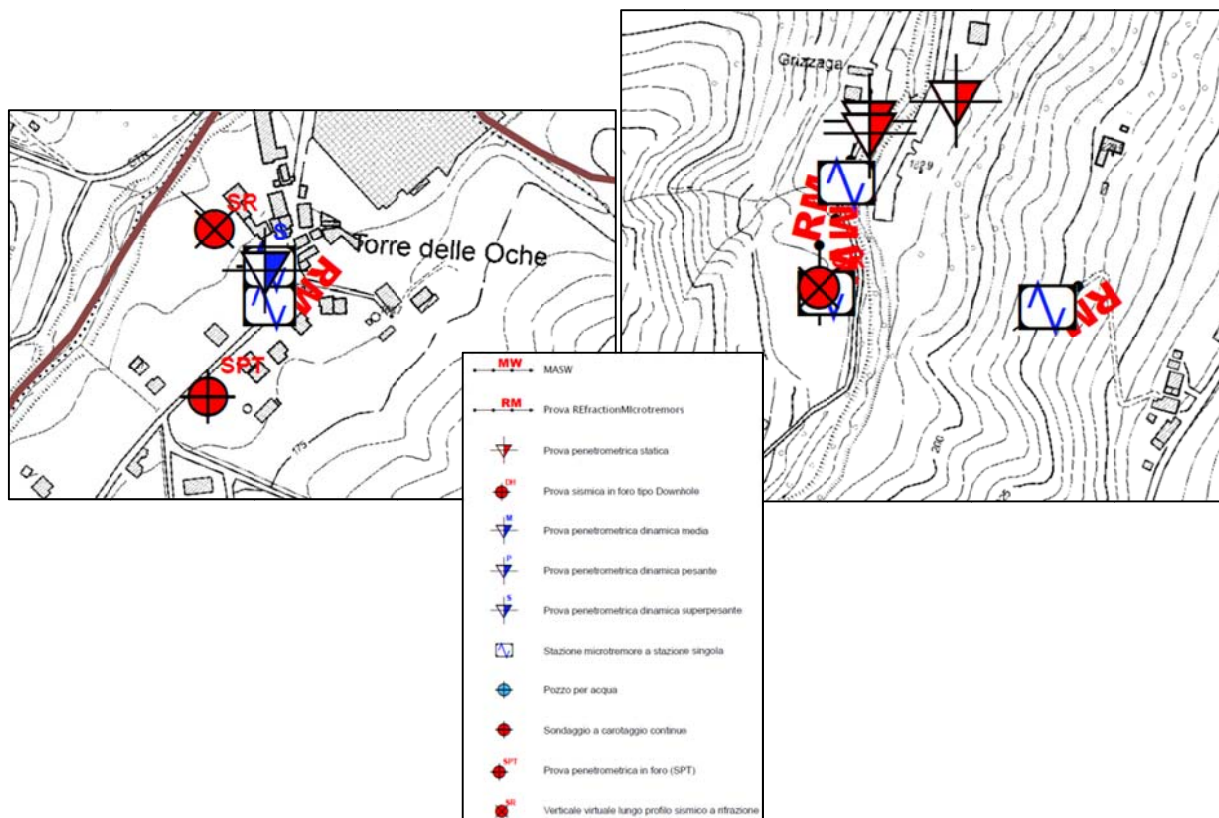
Questo risultato è sicuramente una stima conservativa, per quanto detto precedentemente, ma sicuramente supportata da dati oggettivi.

9. ELABORATI CARTOGRAFICI

Di seguito verranno descritti brevemente i contenuti delle cartografie prodotte per questo terzo livello di approfondimento della microzonazione sismica di Maranello, ponendo in evidenza le differenze rispetto agli elaborati dei precedenti livelli di approfondimento, relativamente alle aree su cui sono stati condotti i presenti studi.

- **La carta delle indagini:** in essa vengono rappresentate le ubicazioni e le tipologie delle indagini di nuova esecuzione, realizzate appositamente per condurre gli studi di terzo livello, insieme alle indagini pregresse, sia precedenti la microzonazione di secondo livello, sia eseguite in occasione della stessa.
- **La carta delle Vs:** in essa vengono rappresentati i valori di Vs (V_{sH} e/o V_{s30}) derivati dalle nuove indagini geofisiche eseguite per questo studio, integrati con i valori dello stesso parametro già presenti nel precedente livello di microzonazione (L2).
- **La carta delle frequenze:** in essa vengono rappresentati i valori della frequenza fondamentale di vibrazione del terreno derivati dalle nuove indagini geofisiche eseguite per questo studio, integrati con i valori dello stesso parametro già presenti nel precedente livello di microzonazione (L2).
- **La carta delle MOPS:** in base ai risultati delle indagini ed analisi del livello 3 di microzonazione, la carta delle MOPS del livello 2 è stata modificata per le sole aree oggetto di approfondimento nel terzo livello; per le restanti aree è stata aggiornata in base ai nuovi standard di rappresentazione (versione 4.0b).
- **La carta di microzonazione sismica (MS_0203):** identifica le aree stabili suscettibili di amplificazioni locali, con fattori di amplificazione calcolati da analisi di risposta sismica locale bi-dimensionale, e le zone di attenzione per instabilità (Livello 2).

9.1. Carta delle indagini



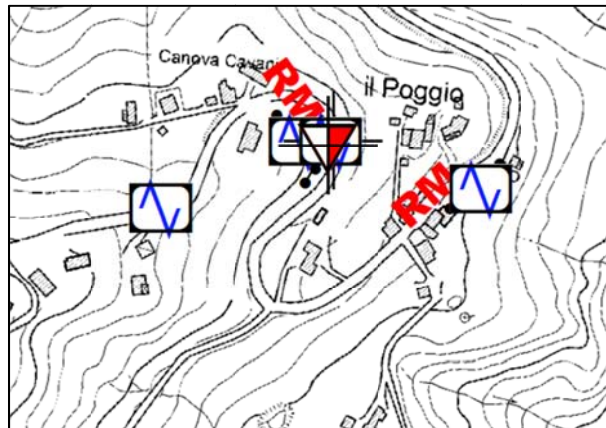
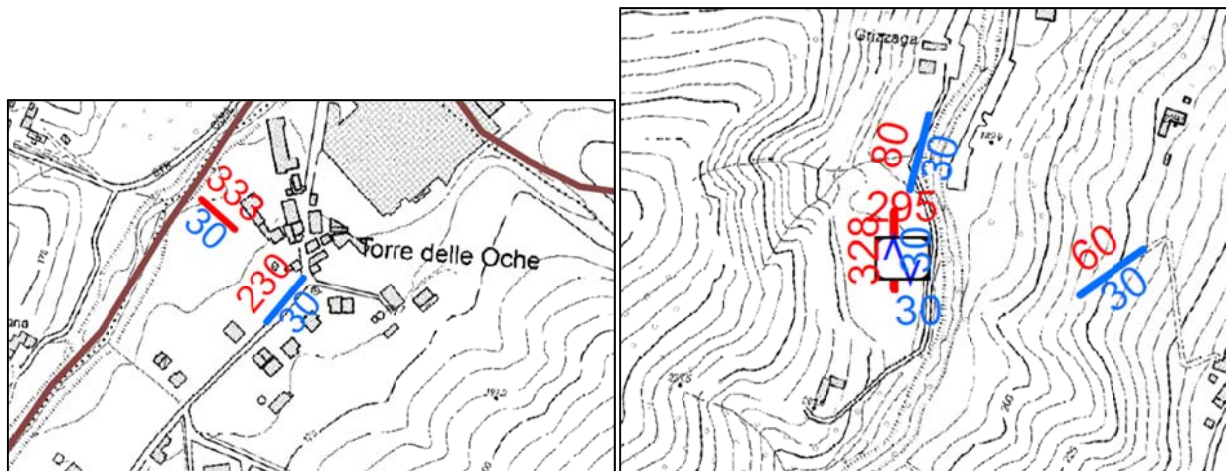



Figura 68 – Stralcio della Tavola di MS23 "Carta delle indagini" in cui sono rappresentate le aree d'indagine per le analisi di MS3 condotte in questo studio, insieme alle indagini geognostiche e geofisiche d'archivio e di nuova esecuzione. In alto a sinistra: area di "Torre Oche"; in alto a destra: area di via Fondo Val Grizzaga"; in basso al centro: area di "località Il Poggio".

La carta delle indagini mostra la distribuzione spaziale di tutte le indagini geognostiche e geofisiche d'archivio e di nuova esecuzione per questo approfondimento di MS3. In sostanza vengono riprese tutte le indagini contenute nell'omonima carta di MS2 aggiungendovi, per le sole aree di approfondimento MS3 (Figura 68) le nuove indagini eseguite.

9.2. Carta delle Vs



- 
326
30
 - 326
30
 - 326
30
- HVSR con indicato il valore di Vs (m/s) in colore rosso e il valore di H (m) in colore blu
- MASW con indicato il valore di Vs (m/s) in colore rosso e il valore di H (m) in colore blu
- REMI con indicato il valore di Vs (m/s) in colore rosso e il valore di H (m) in colore blu

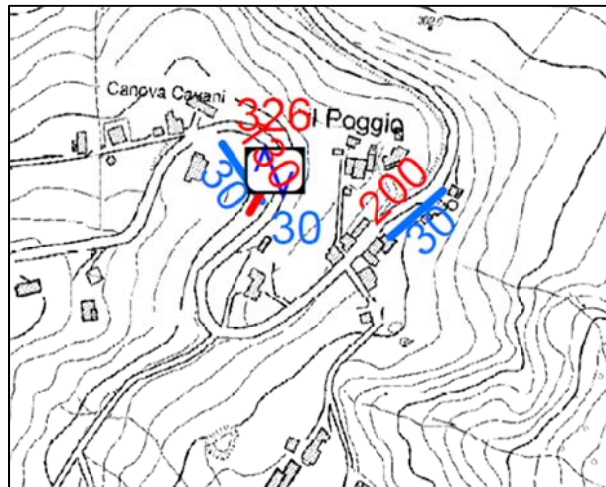
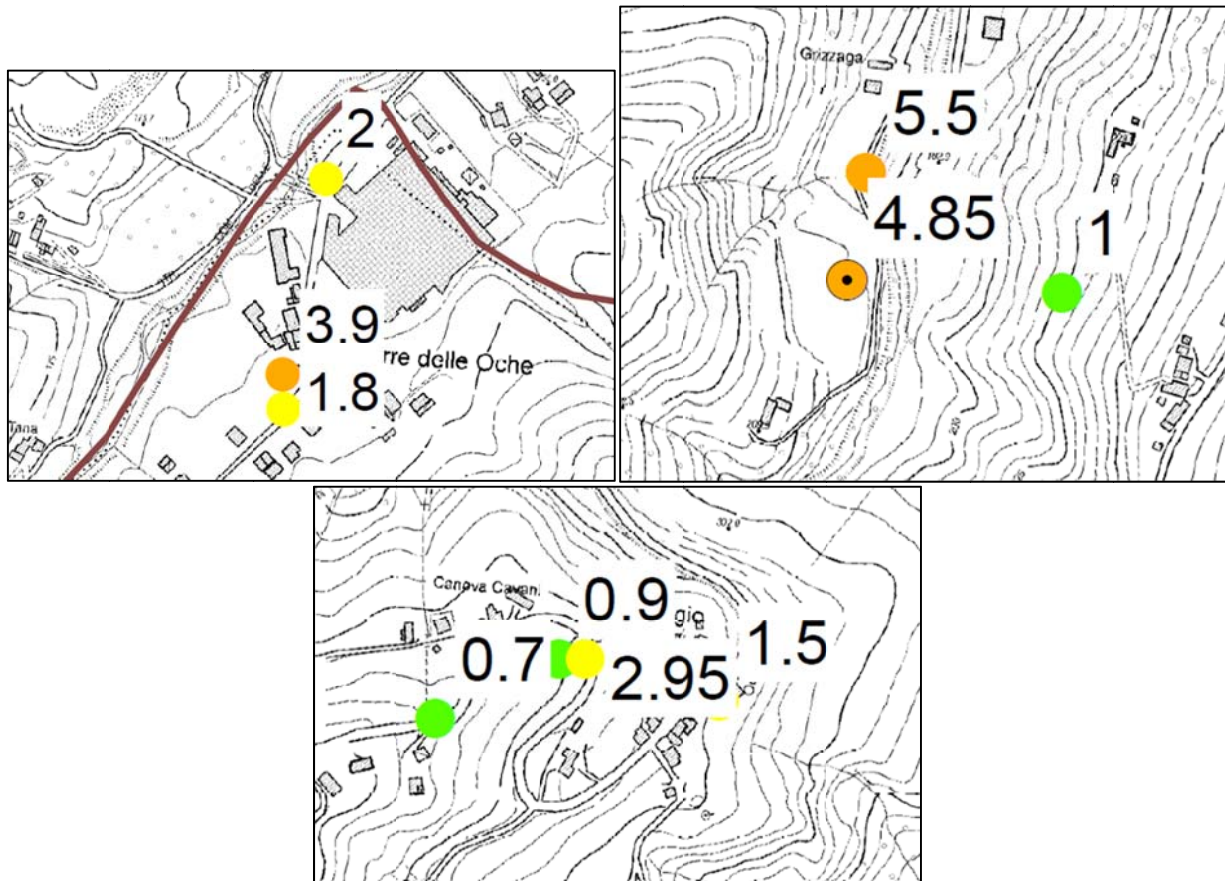


Figura 69 - Stralcio della Tavola di MS23 "Carta delle Vs" in cui sono rappresentate le aree d'indagine per le analisi di MS3 condotte in questo studio, insieme ai fattori di amplificazione calcolati sulla base delle nuove indagini geofisiche e di quelle d'archivio. In alto a sinistra: area di "Torre Oche"; in alto a destra: area di via Fondo Val Grizzaga"; in basso al centro: area di "località Il Poggio".

La carta delle Vs mostra la distribuzione spaziale di tutti i valori di V_{sH} ricavati sia dalle indagini d'archivio (già contenute nella carta di microzonazione MS2) che da quelle di nuova esecuzione per questo approfondimento di MS3. In sostanza vengono riprese tutte le Vs contenute nell'omonima carta di MS2 aggiungendovi, per le sole aree di approfondimento MS3 (Figura 69) le nuove Vs ricavate dalle nuove indagini eseguite.

9.3. Carta delle frequenze



Frequenza picco significativo (Hz)	Ampiezza picco	
	≤ 3	> 3
Assenza di fenomeni di risonanza significativi		●
$f_0 \leq 1$	●	
$1 < f_0 \leq 2$	●	
$2 < f_0 \leq 8$	●	●
$f_0 > 8$	●	

A lato del simbolo sono riportate le frequenze del primo picco significativo

Figura 70 - Stralcio della Tavola di MS23 "Carta delle frequenze" in cui sono rappresentate le aree d'indagine per le analisi di MS3 condotte in questo studio, insieme ai valori di frequenza fondamentale di vibrazione del terreno calcolati sulla base delle nuove indagini geofisiche e di quelle d'archivio. In alto a sinistra: area di "Torre Oche"; in alto a destra: area di via Fondo Val Grizzaga"; in basso al centro: area di "località Il Poggio".

La carta delle frequenze mostra la distribuzione spaziale di tutti i valori della frequenza fondamentale di vibrazione del terreno, ricavati sia dalle indagini d'archivio (già contenute nella carta di microzonazione MS2) che da quelle di nuova esecuzione per questo approfondimento di MS3. In sostanza vengono riprese tutte le frequenze contenute nell'omonima carta di MS2 aggiungendovi, per le sole aree di approfondimento MS3 (Figura 70) le nuove frequenze ricavate dalle nuove indagini eseguite. Come si può vedere, i valori di frequenza vengono distinti all'interno di 5 classi, a loro volta suddivise in base all'ampiezza del picco di risonanza: ≤ 3 o > 3 .

9.4. Carta delle MOPS

La principale modifica introdotta alla carta delle MOPS rispetto allo studio di II livello è stata la estensione delle litozone omogenee all'intero territorio comunale, in base agli Standard di microzonazione sismica nazionali più recenti (versione 4.0b, 2015). Nello studio di II livello, infatti, le MOPS venivano riservate alle sole aree urbanizzate ed urbanizzabili (principalmente nel settore di alta pianura), mentre con il presente III livello di approfondimento vengono estese a tutte le zone precedentemente non contemplate, che coprono gran parte del settore collinare. I modelli geologici rappresentativi del sottosuolo geologico delle tre aree specificatamente indagate da questo III livello di analisi sono descritti nel capitolo 5 a cui si rimanda.

A seguire, vengono descritti tutti i modelli litostratigrafici che caratterizzano le microzone omogenee dell'intero territorio comunale, sostanzialmente identici a quelli presenti nella microzonazione di II livello (da zona 2001 a 2020), con l'implementazione di 3 nuove microzone stabili, suscettibili di amplificazione (zone 2021, 2022 e 2023), e di microzone di "attenzione per instabilità" (zona 30xy2024), che vanno a sostituire le precedenti microzone "suscettibili di instabilità" (nel territorio di Maranello entrambe per frana, suddivise in base al grado di attività). Le microzone di attenzione per instabilità sono contrassegnate in carta da un retinato obliquo su sfondo del colore relativo alla classe del fattore di amplificazione assegnato (Figura 71).

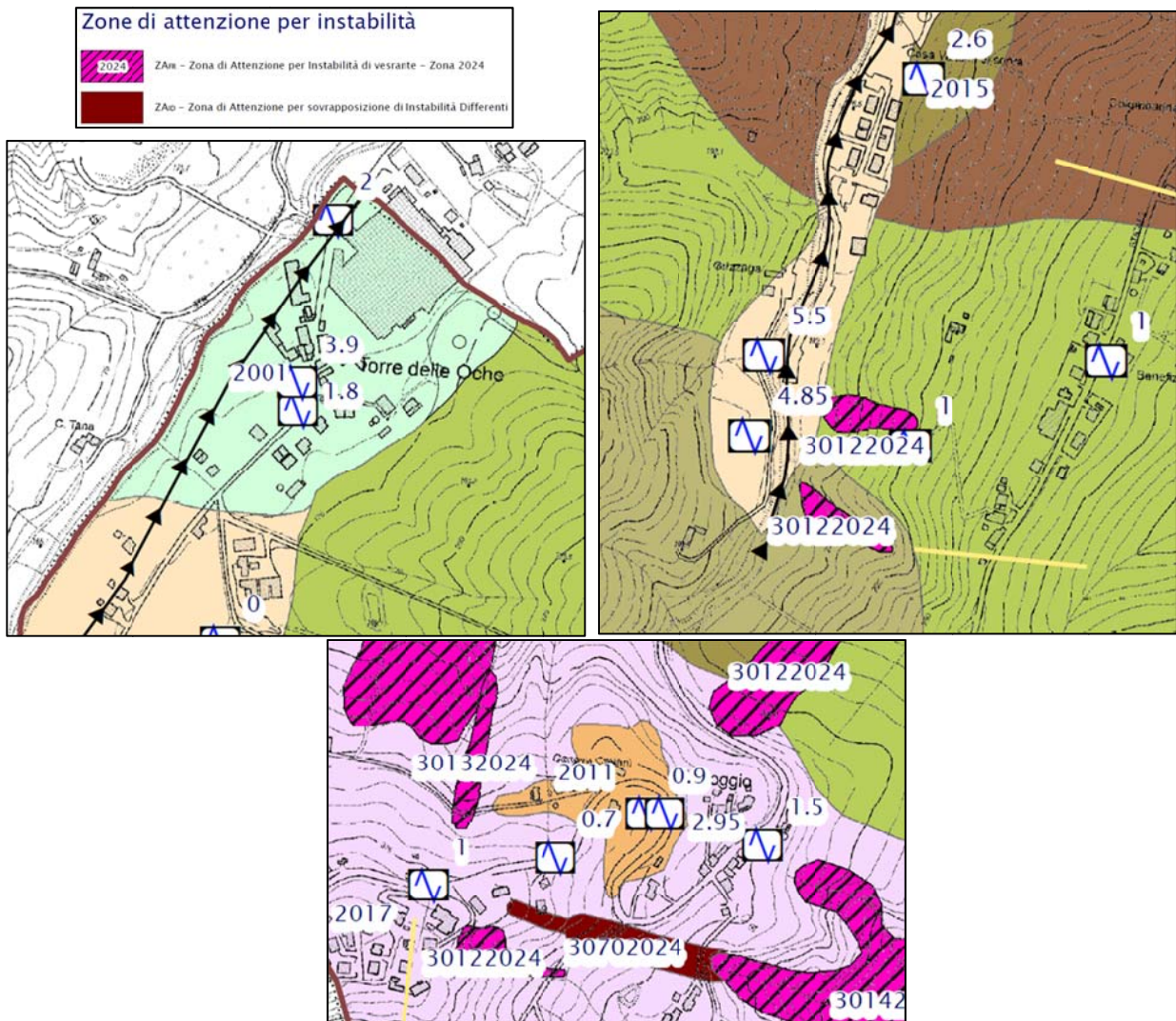
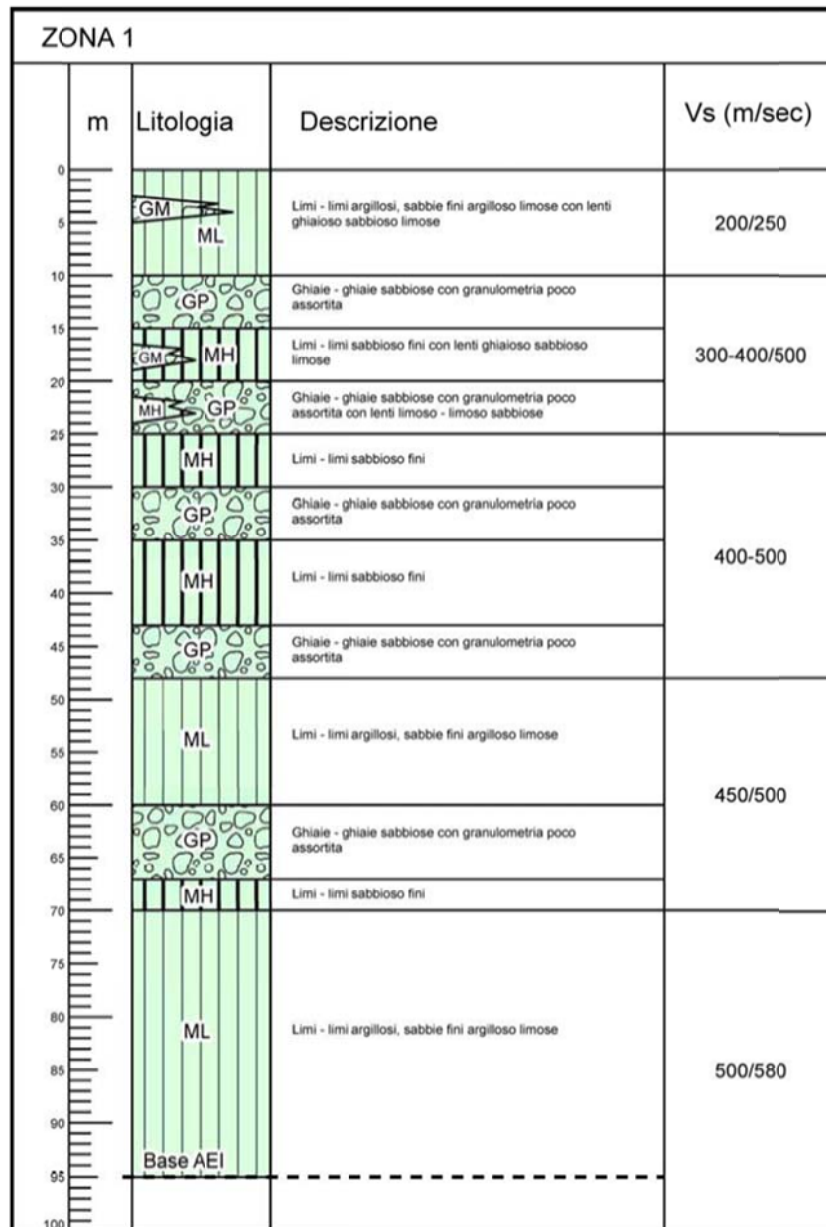


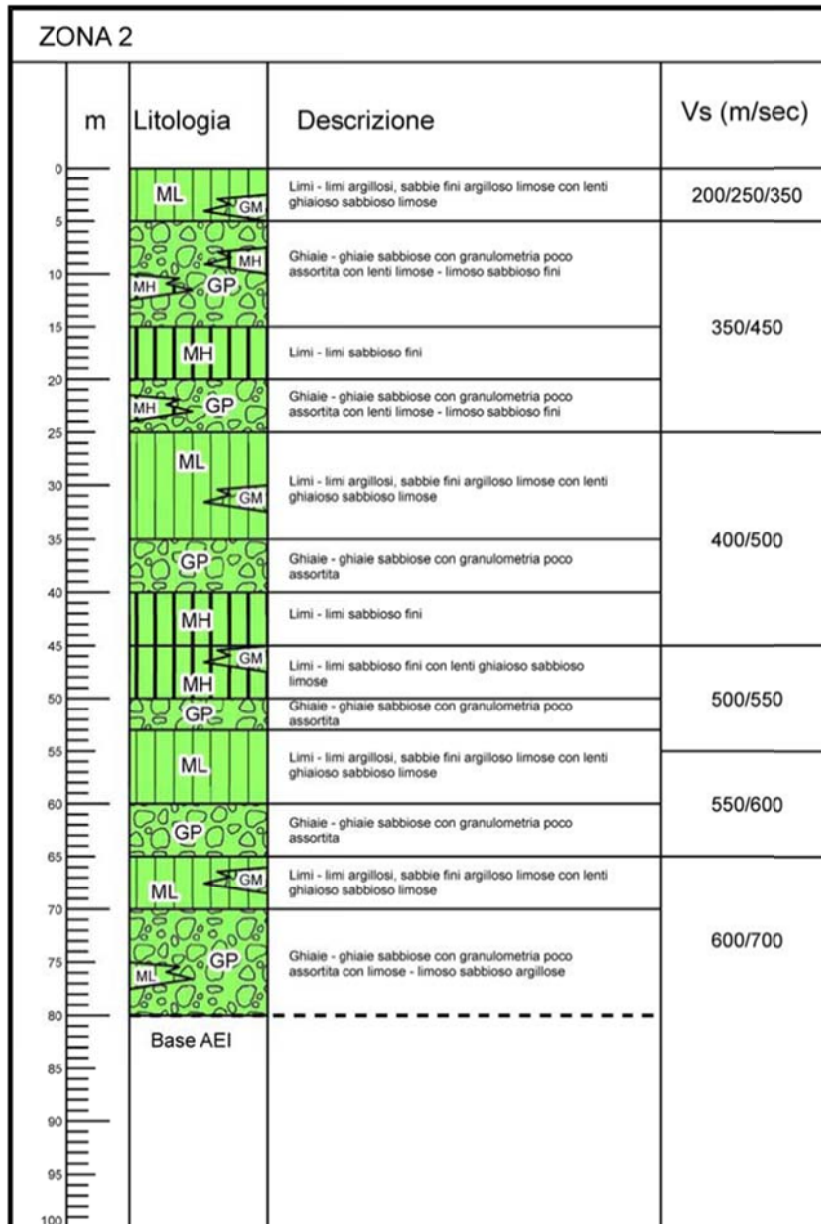
Figura 71 - Stralcio della Tavola di MS1 "Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica" (MOPS) in cui sono rappresentate le aree d'indagine per le analisi di MS3 condotte in questo studio. La carta è stata rielaborata sulla base dei più recenti standard di rappresentazione (4.0b) e a valle dei risultati delle analisi di MS3 condotte per questo studio. In alto a sinistra: area di "Torre Oche"; in alto a destra: area di via Fondo Val Grizzaga"; in basso al centro: area di "località Il Poggio".

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



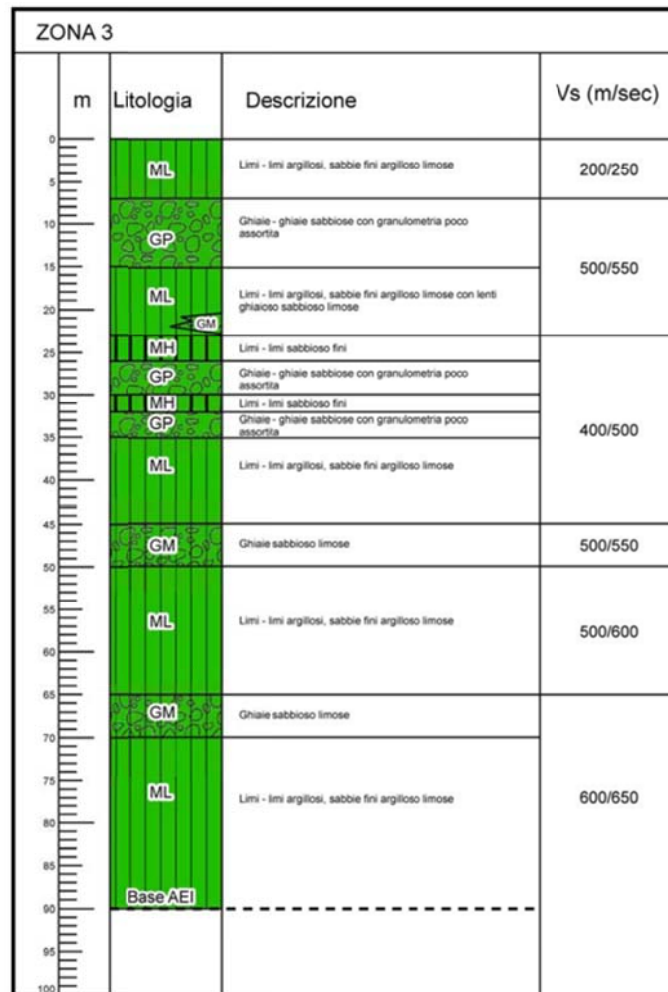
ZONA 1 (2001) – Depositi alluvionali in alternanze di strati ghiaioso sabbiosi a granulometria da poco a ben assortita e limosi – limoso argillosi, con prevalente percentuale delle componenti fini: 60÷65%; Vs = 300/500 m/sec per le ghiaie, Vs = 450/550 m/sec per i limi – limi argillosi sabbiosi.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



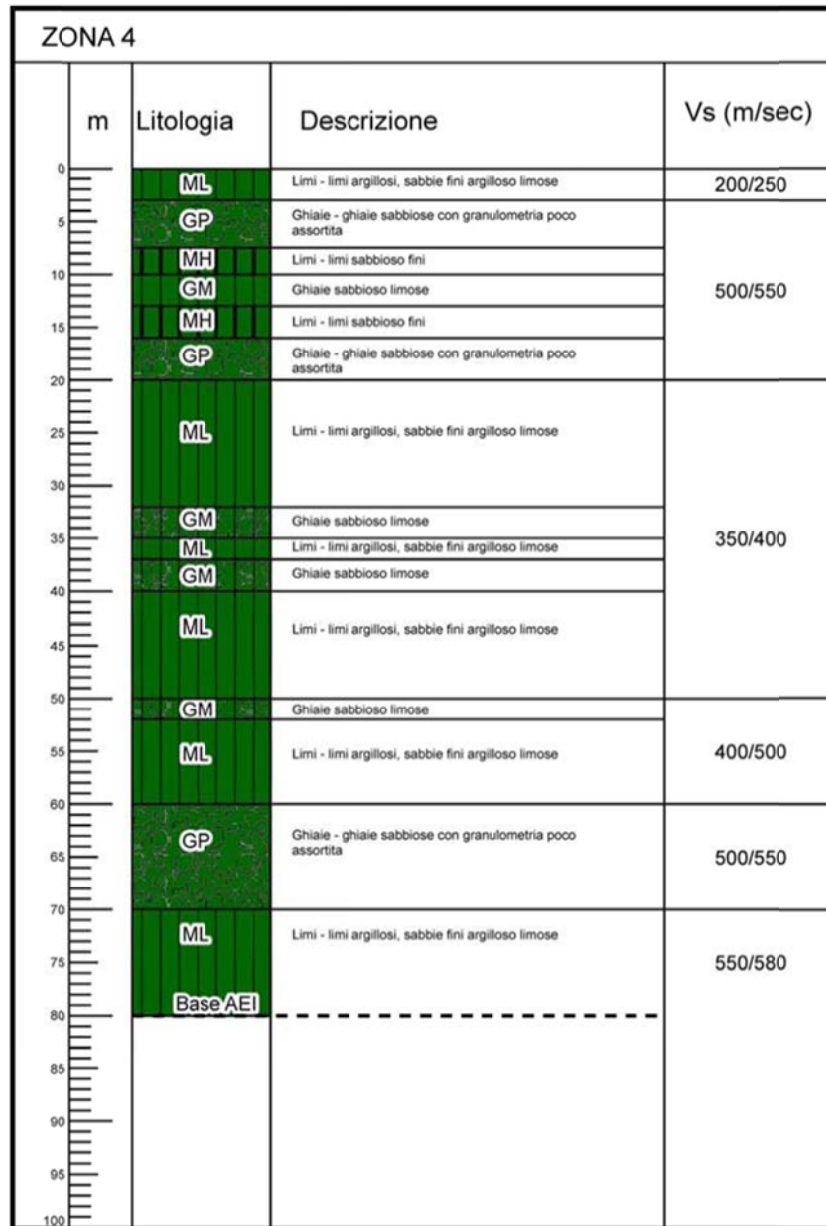
ZONA 2 (2002) – Depositi alluvionali in alternanze di strati ghiaioso sabbiosi a granulometria da ben assortita a poco assortita e limosi – limoso argillosi, con prevalenza delle componenti più grossolane: 55÷60% nelle zone a sud della sS n.569 di Vignola e delle componenti più fini: 60/65% a settentrione di detta sS; Vs=400/600 m/sec per le ghiaie sabbiose, Vs=400/550 m/sec per i limi – limi sabbiosi.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



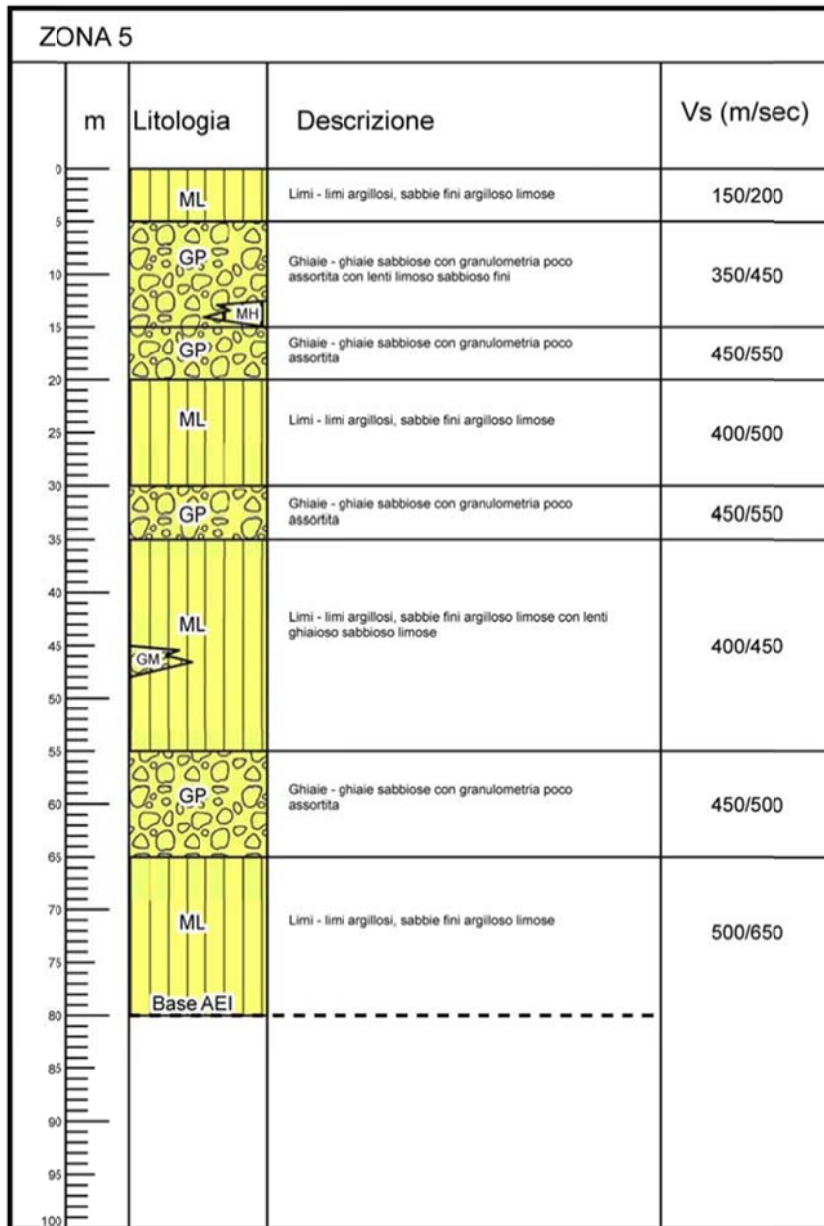
ZONA 3 (2003) – Depositi alluvionali in alternanze di strati ghiaioso sabbiosi con granulometria da ben assortita a poco assortita e limosi – limoso argillosi con prevalenza delle intercalazioni a componenti fini: 60÷70%, Vs=500/550 m/sec per le ghiaie sabbiose, Vs = 500/600 m/sec per i limi – limi argillosi.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



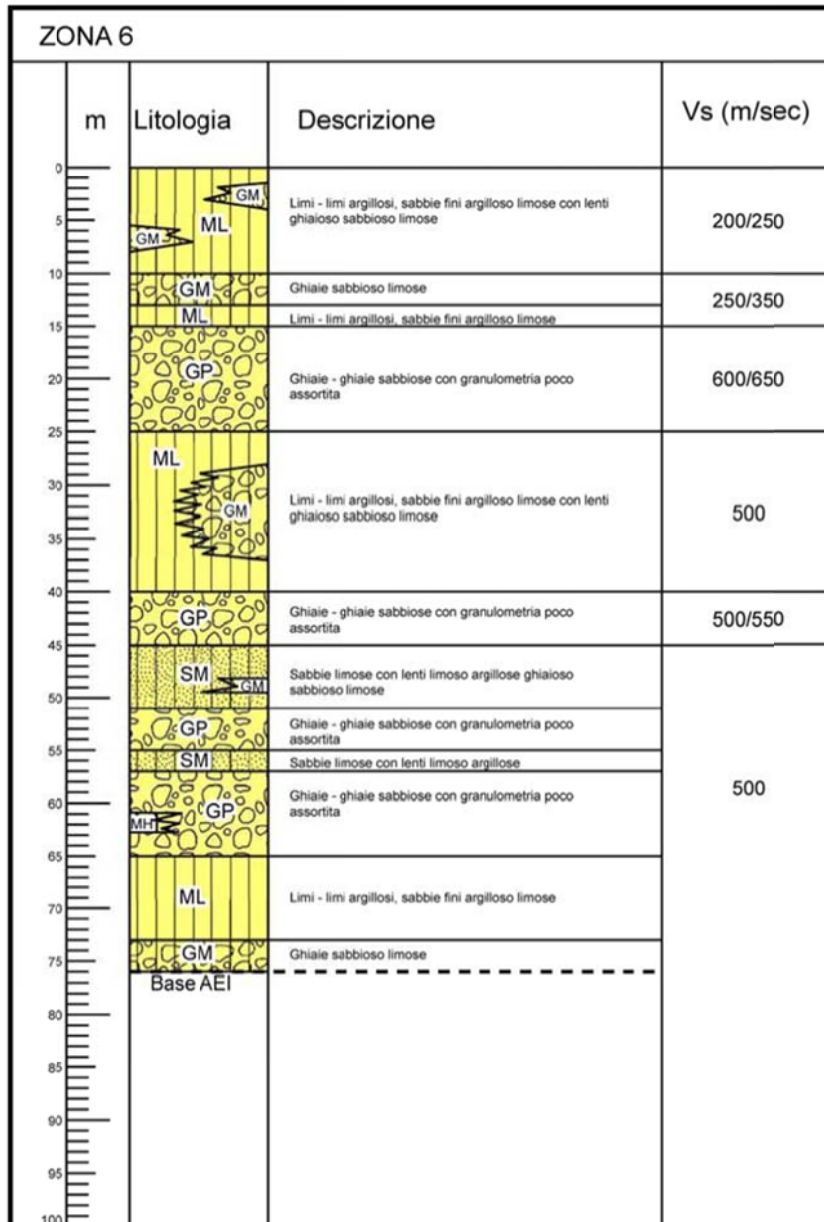
ZONA 4 (2004) – Depositi di canale fluviale terrazzati in alternanze di strati ghiaioso sabbiosi a granulometria poco assortita e limosi – limoso argillosi con prevalenza delle componenti più grossolane 70÷75% nei primi 20 m del sottosuolo e delle componenti fini 70% alle quote sottostanti -20 m pc; Vs = 400/550 m/sec per le ghiaie sabbiose – sabbioso limose, Vs =450/600 m/sec per i limi – limi argillosi.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



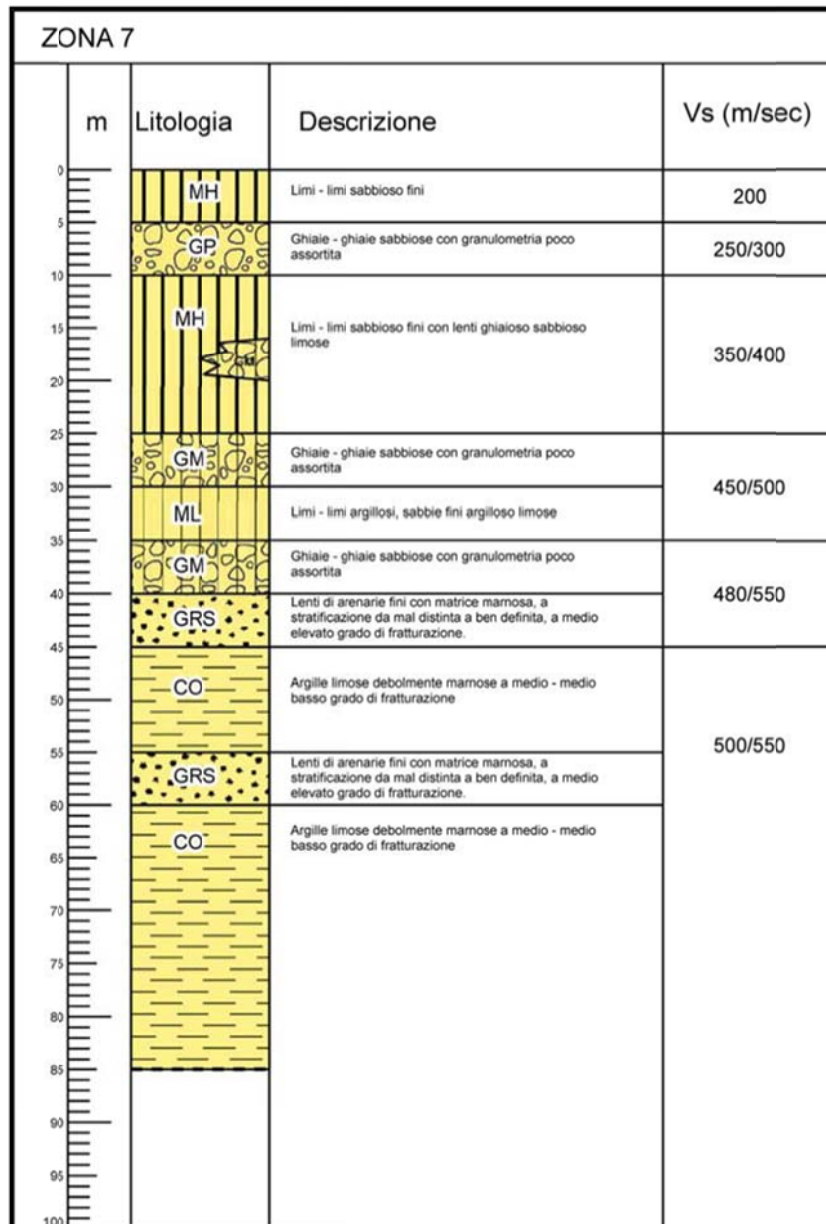
ZONA 5 (2005) – Depositi alluvionali in alternanze di strati ghiaioso sabbiosi a granulometria da ben assortita a poco assortita e limosi – limoso argillosi con prevalenza delle componenti più grossolane 70% nei primi 30/32 m del sottosuolo e delle componenti fini: 70% alle profondità sottostanti 30/35 m dal piano campagna, Vs = 450/550 per le ghiaie sabbiose, Vs = 450/650 m/sec per i limi – limi argillosi.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



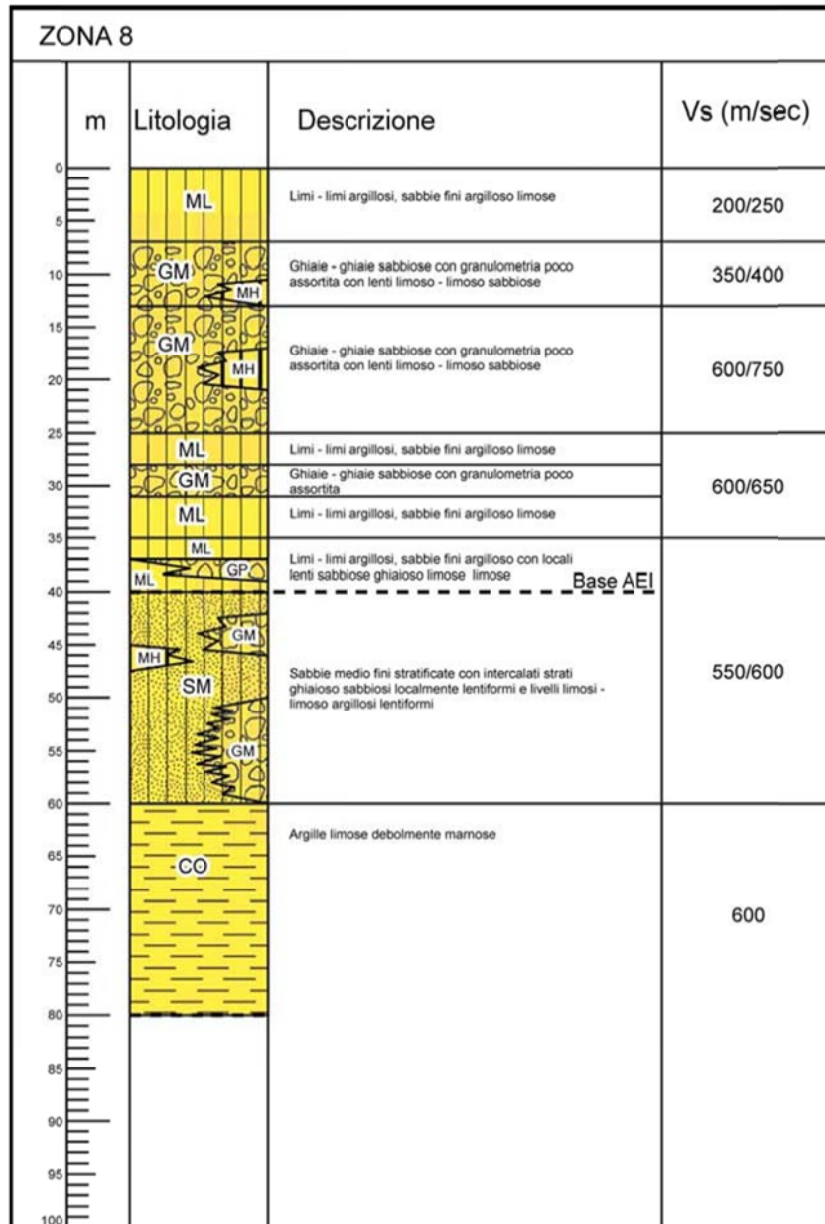
ZONA 6 (2006) – Depositi alluvionali in alternanze di strati ghiaioso sabbiosi a granulometria poco assortita e limosi – limoso argillosi con prevalenza delle componenti più grossolane: 60% nei primi 25 m del sottosuolo e delle componenti fini: 65% alle profondità sottostanti 25 m dal piano campagna; Vs = 500/650 m/sec per le ghiaie sabbiose, Vs = 400/500 m/sec per i limi – limi argillosi.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



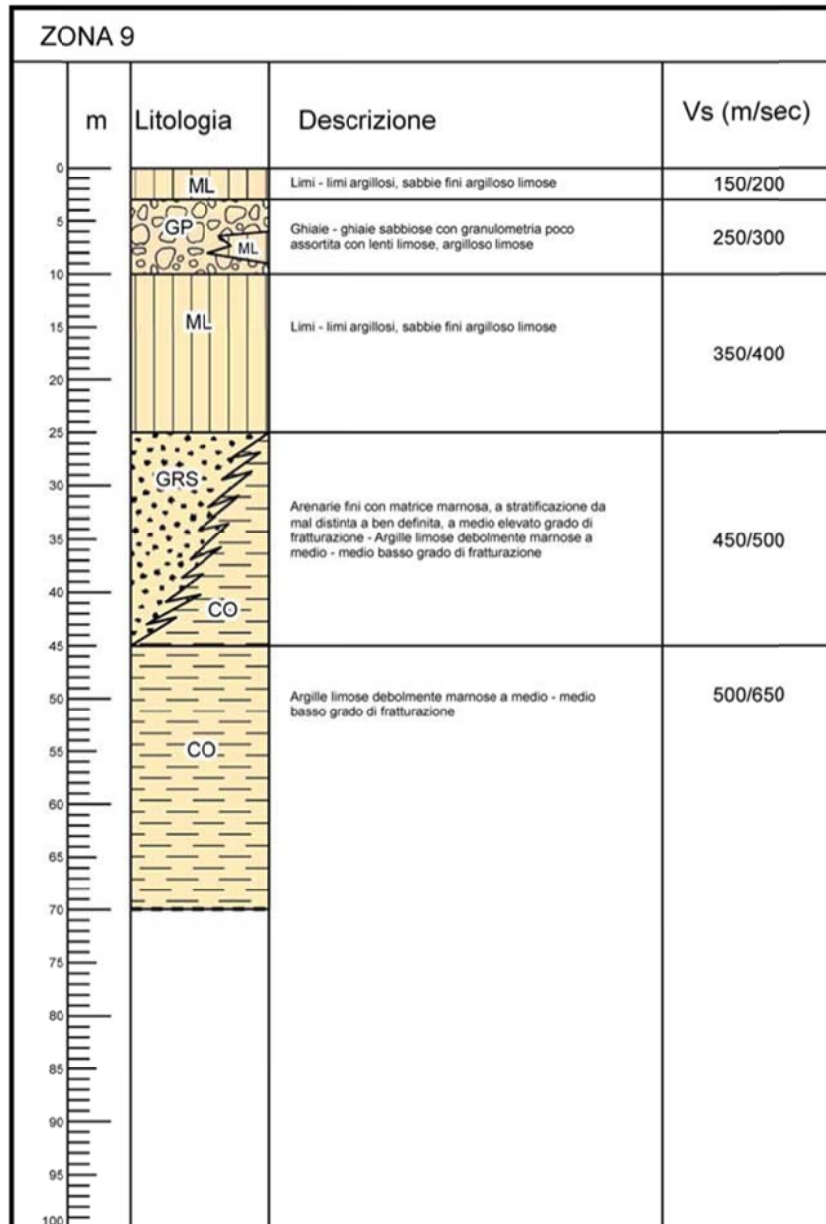
ZONA 7 (2007) – Depositi alluvionali terrazzati in alternanze di strati ghiaioso sabbiosi a granulometria da ben a poco assortita e limosi – limoso argillosi con prevalenza delle intercalazioni più fini 55÷60% nei primi 30/40 m dal sottosuolo, seguiti da substrato prevalentemente argilloso limoso debolmente marnoso, con intercalati strati lentiformi arenacei a profondità sottostanti -40/-45 m pc; Vs = 400/500 m/sec per le ghiaie sabbiose, Vs = 350/450 m/sec per i limi – limi argillosi, Vs= 500/550 m/sec per il substrato argilloso-argilloso limoso debolmente marnoso.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



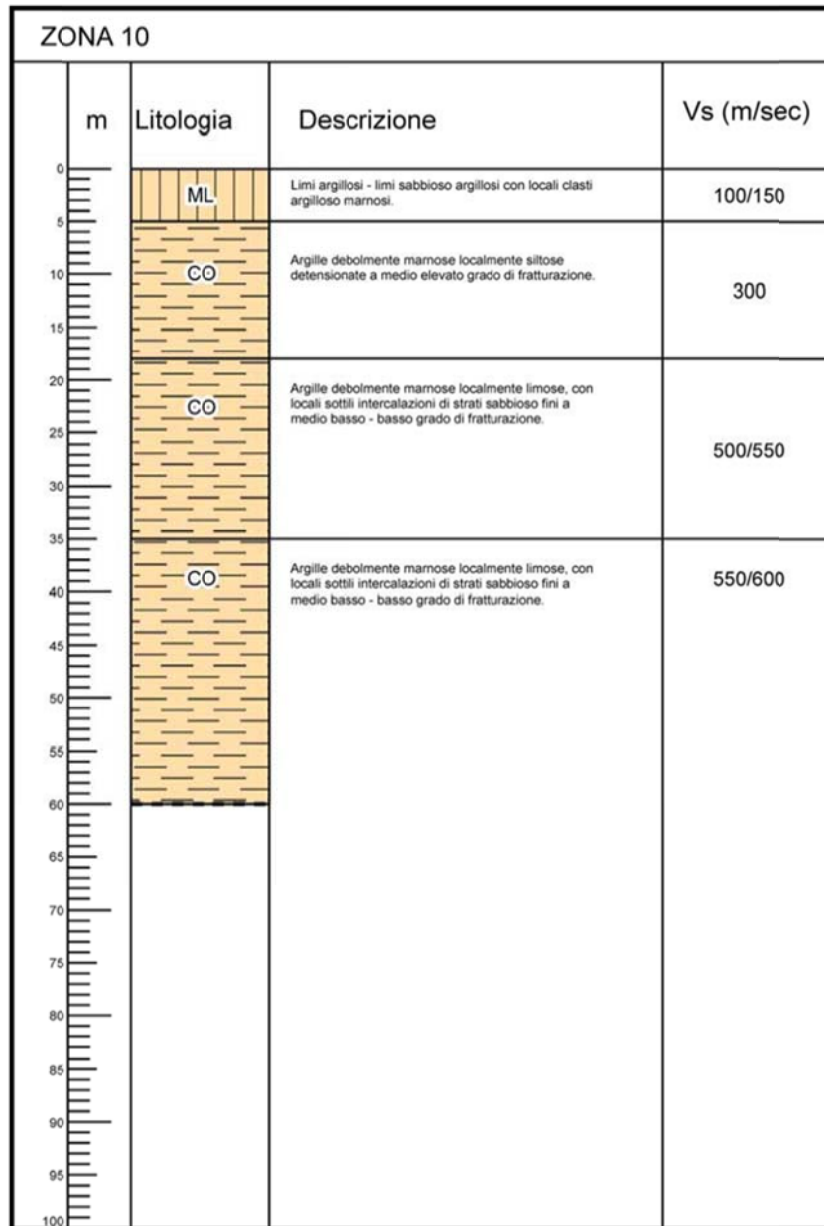
ZONA 8 (2008) – Depositi alluvionali terrazzati in alternanze di strati ghiaioso sabbiosi a granulometria poco assortita e limosi e limosi – limoso argillosi con prevalenza delle componenti più grossolane: 60÷65% nei primi 30 m del sottosuolo e delle componenti più fini: 60÷70% alle profondità sottostanti -30 m dal piano campagna, seguiti nel sottosuolo a quote sottostanti -40 m da sabbie medio fini limose con intercalati strati ghiaioso sabbiosi lentiformi sino a -60 m pc, alle profondità inferiori -60 m pc argille limose debolmente marnose; Vs = 600/700 m/sec per le ghiaie sabbiose, Vs = 500/600 m/sec per i limi – limi argillosi, Vs = 550/600 m/sec per le sabbie fini con lenti ghiaioso sabbiose e per le argille - argille limose debolmente marnose.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



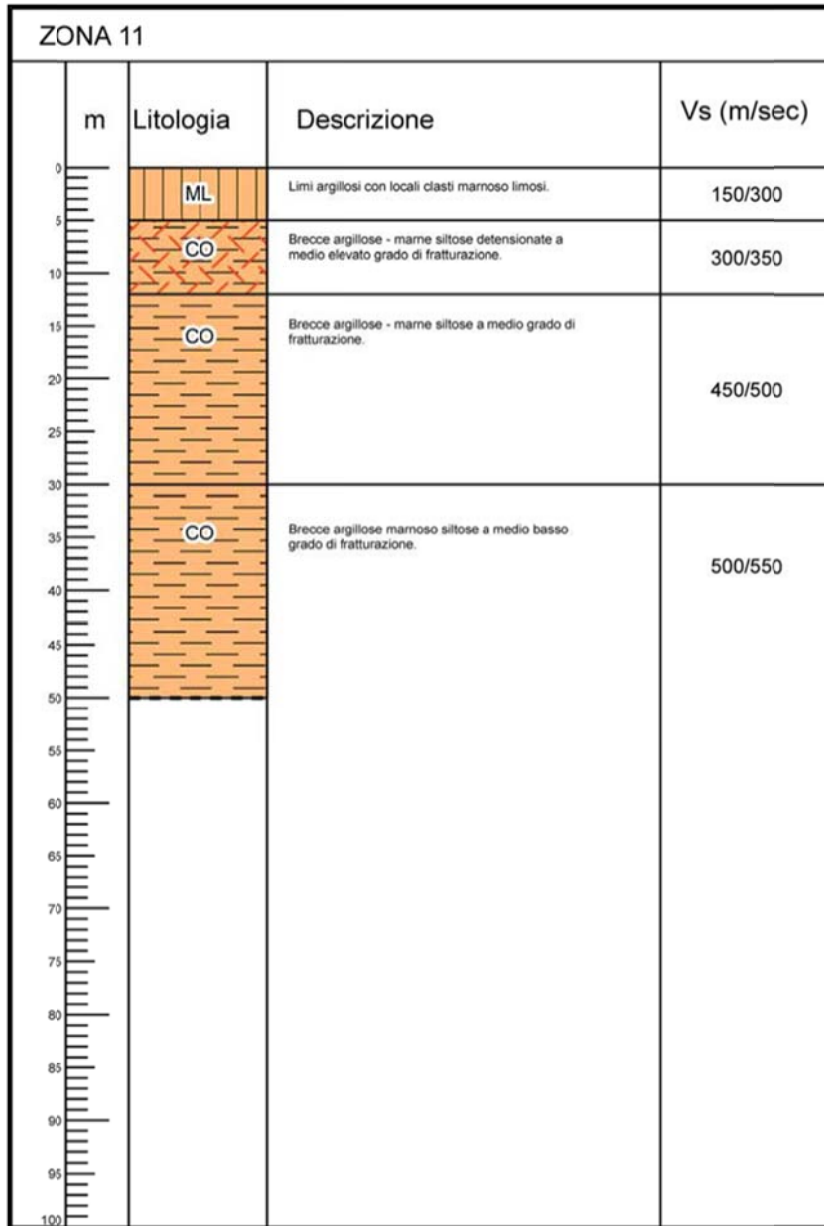
ZONA 9 (2009) – Depositi di canale fluviale terrazzati in alternanze di strati ghiaiosi a granulometria poco assortita e limosi – limoso argillosi con prevalenza delle componenti più fini 75% nei primi 25 m del sottosuolo, seguiti alle profondità sottostanti da argille - argille limose debolmente marnose con intercalate sequenze di strati arenacei con matrice marnosa lentiformi tra -25 e -45 m pc; Vs = 250/300 m/sec per le ghiaie sabbiose, Vs = 350/400 m/sec per i limi argillosi; Vs = 450/650 m/sec per le argille - argille limose debolmente marnose con intercalati strati arenacei.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



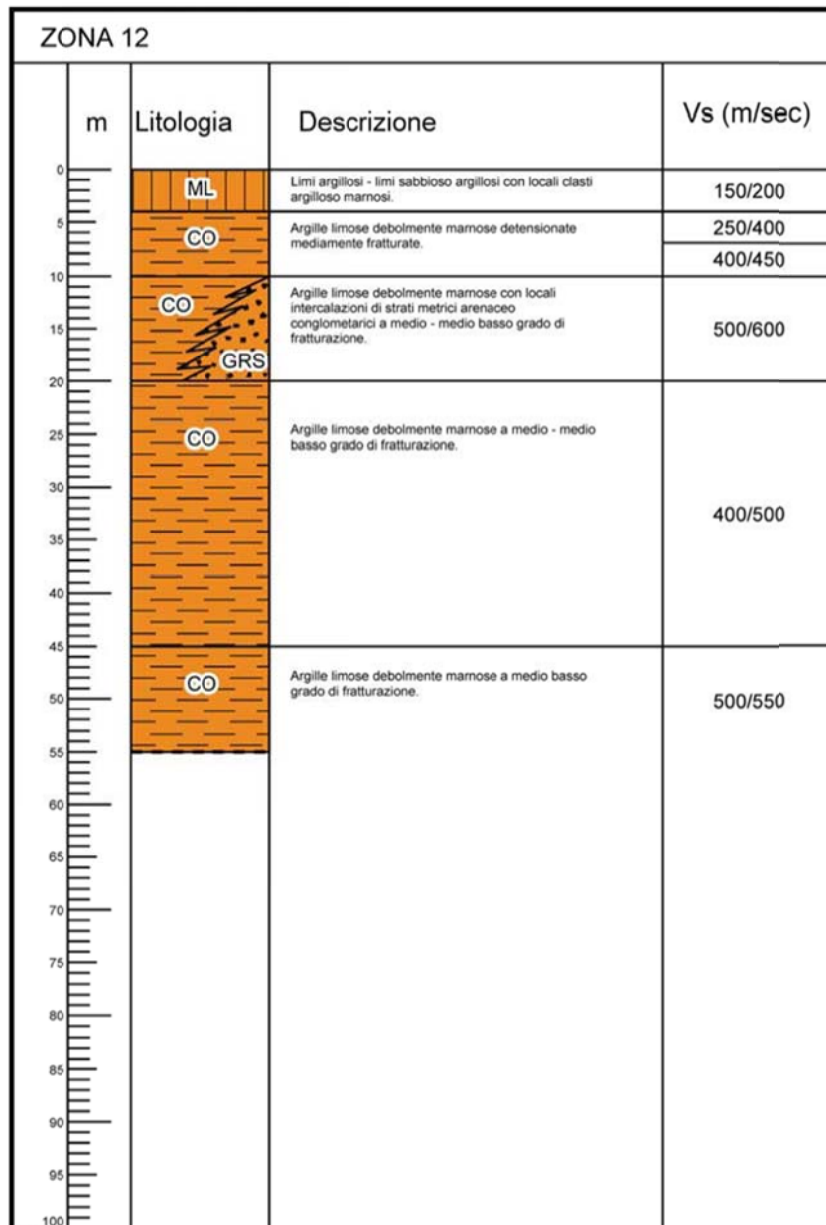
ZONA 10 (2010) – Depositi eluvio colluviali, limosi – limoso argillosi con spessore di 3/5 m, su substrato argilloso – argilloso limoso debolmente marnoso, localmente sabbioso – argilloso limoso, non stratificato, detensionato sino a -15/-30 m pc, substrato a comportamento non rigido: Vs ≤ 550/600 m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



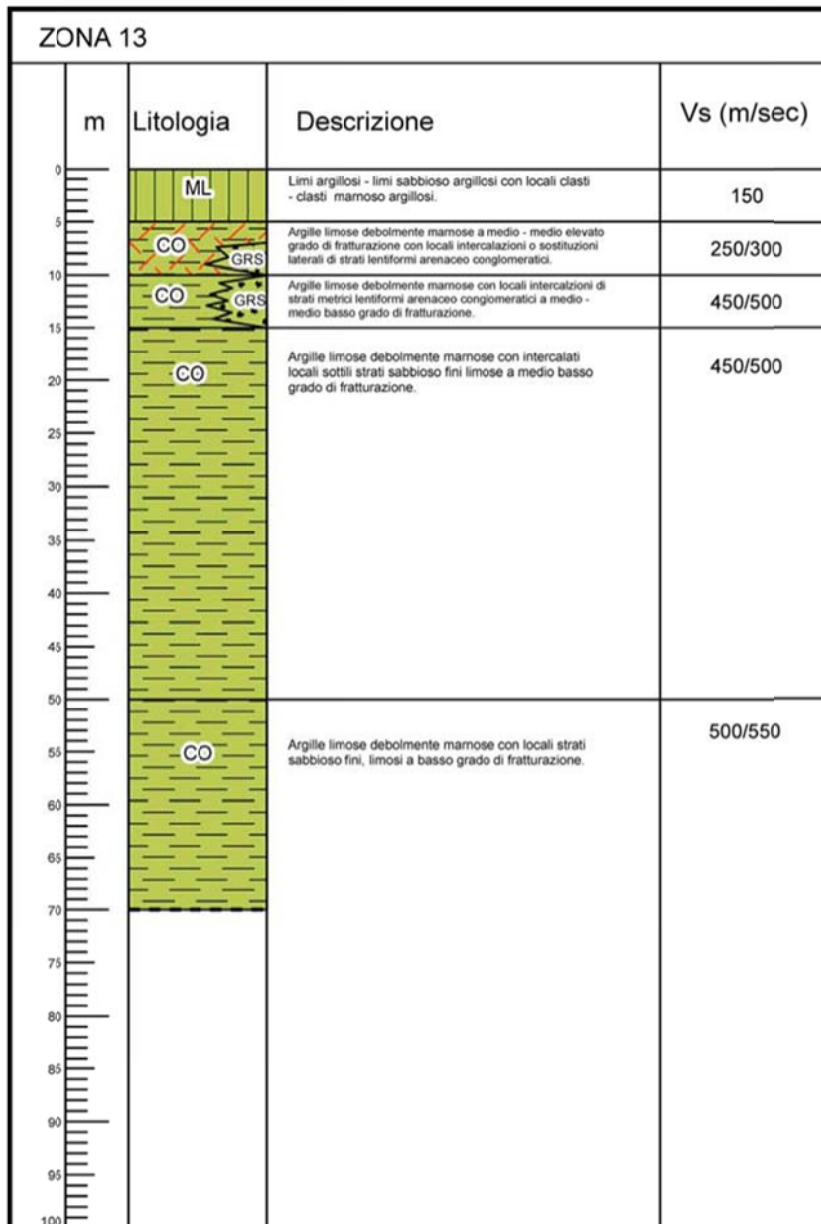
ZONA 11 (2011) – Depositi eluvio colluviali con spessore di 3/5 m, su substrato a brecce argillose non stratificato, detensionato e fratturato sino a -10/-15 m pc; substrato a comportamento non rigido: Vs ≤550/550 m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



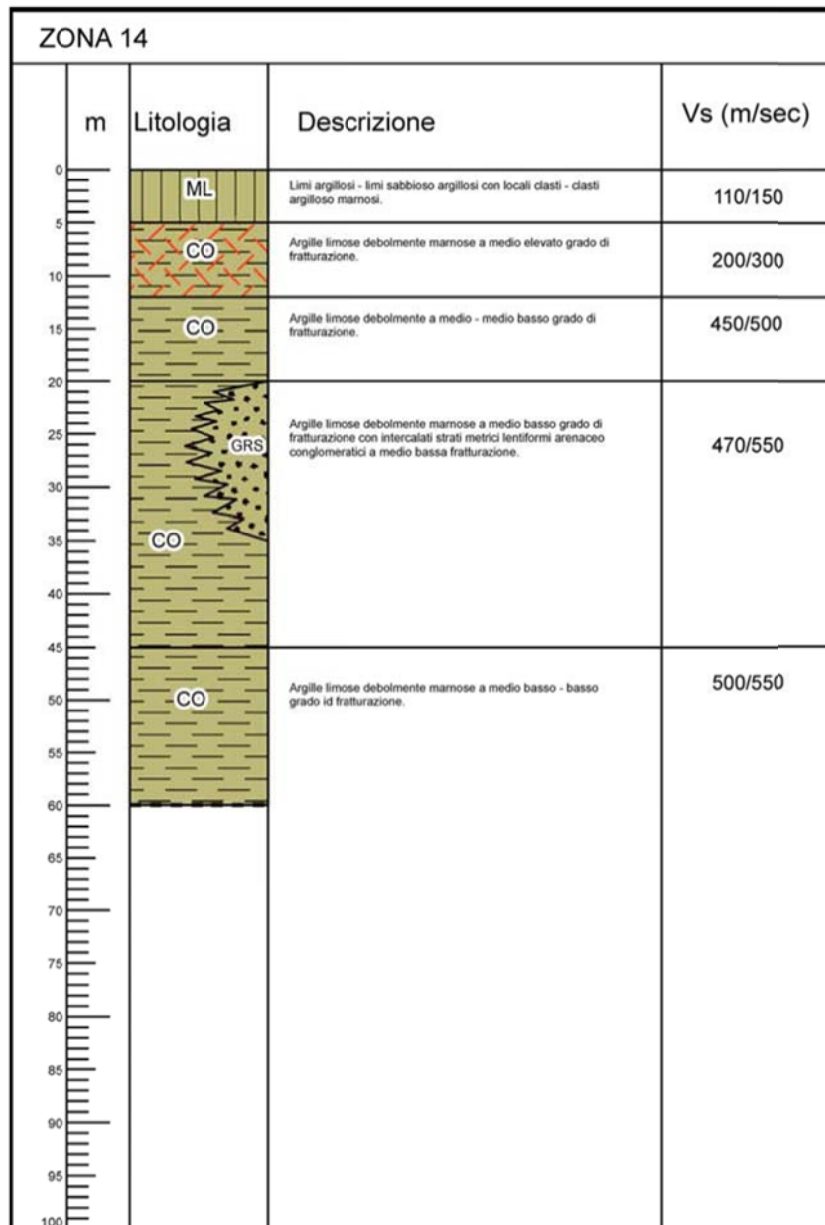
ZONA 12 (2012) – Substrato argilloso – argilloso limoso debolmente marnoso, localmente sabbioso argilloso limoso, non stratificato, detensionato e fratturato sino a -10 m pc, contenente lenti arenaceo conglomeratiche tra -10 e -20 m pc, con coperture eluviali limose – limoso argillose con spessore di 3/4 m; substrato a comportamento non rigido: $V_s \leq 500/600$ m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



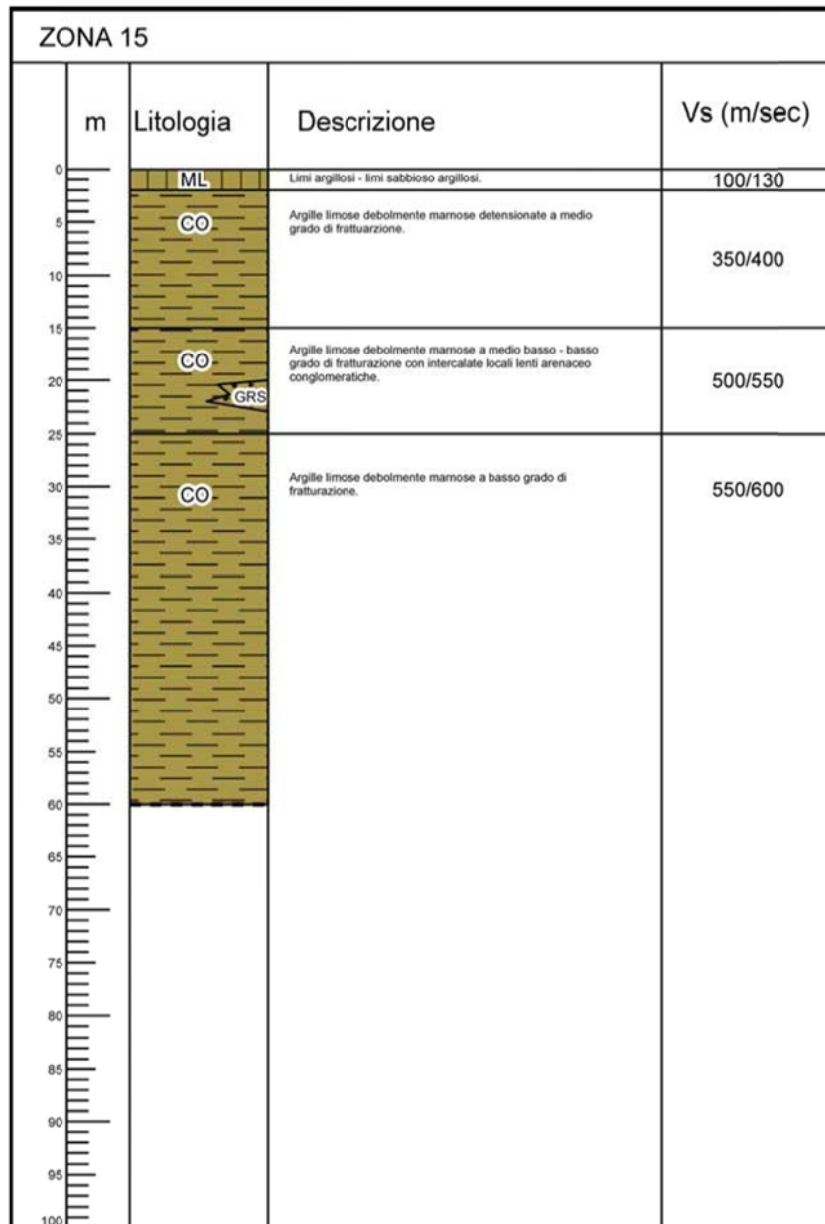
ZONA 13 (2013) – Substrato argilloso - argilloso limoso debolmente marnoso, non stratificato, detensionato sino a -10 m pc, con intercalati locali strati lentiformi arenaceo conglomeratici che a luoghi sostituiscono le argille - argille limose, con coperture eluviali con spessore di 4/5 m; substrato a comportamento non rigido: Vs ≤550/550 m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



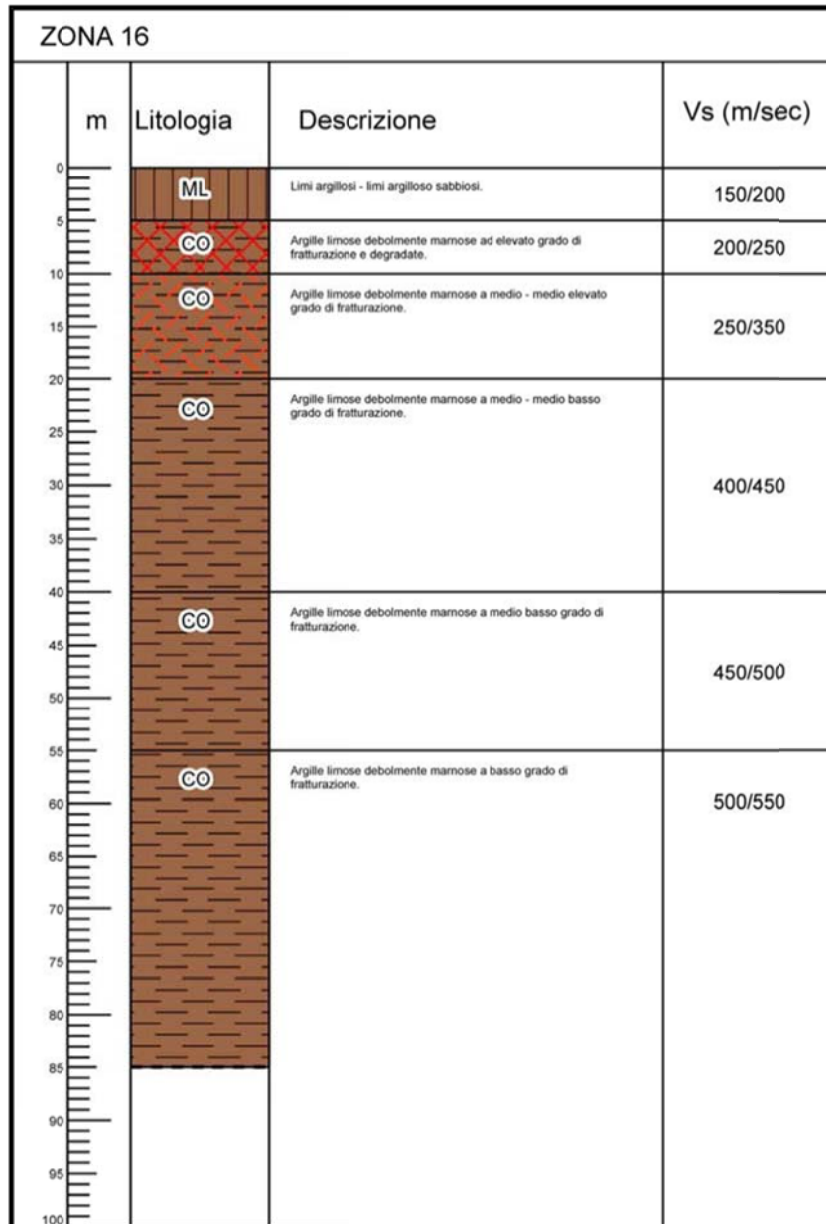
ZONA 14 (2014) – Substrato argilloso – argilloso limoso debolmente marnoso, non stratificato, detensionato sino a -10/-20 m pc, con locali intercalazioni di strati metrici lentiformi arenaceo conglomeratici tra -20 e -35/-40 m pc, con coperture eluviali limose – limoso argillose con spessore di 4/5 m; substrato a comportamento non rigido: Vs ≤500/550 m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



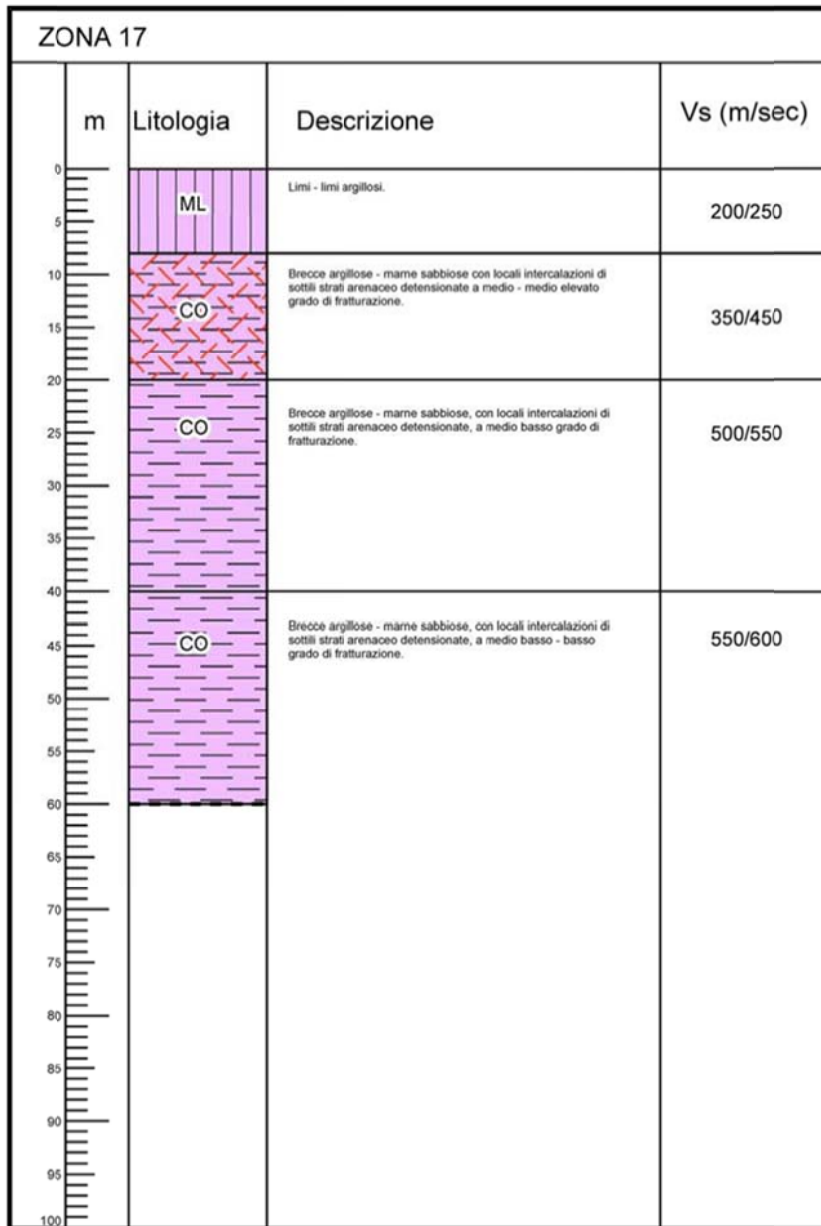
ZONA 15 (2015) – Substrato argilloso – argilloso limoso debolmente marnoso, non stratificato, detensionato sino a -15 m pc. con intercalate locali lenti arenaceo conglomeratiche nei primi 25 m del sottosuolo, con coperture eluviali limoso argillose – limose con spessore di 2/3 m; substrato a comportamento rigido: Vs ≤550/600 m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



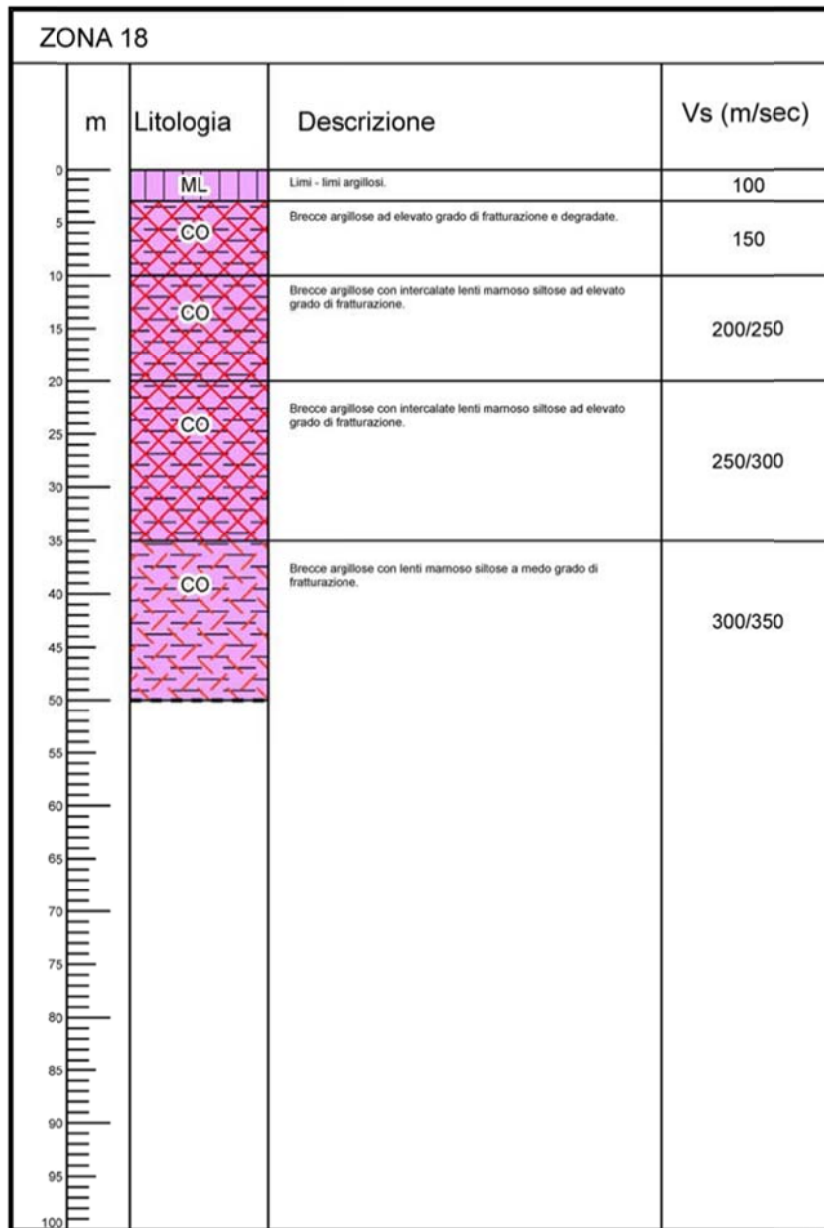
ZONA 16 (2016) – Substrato argilloso – argilloso limoso debolmente marnoso, non stratificato, degradato e fratturato sino a -10/-20 m pc, con coperture eluviali limoso argillose con spessore di 4/5 m; substrato a comportamento non rigido: Vs ≤500/550 m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



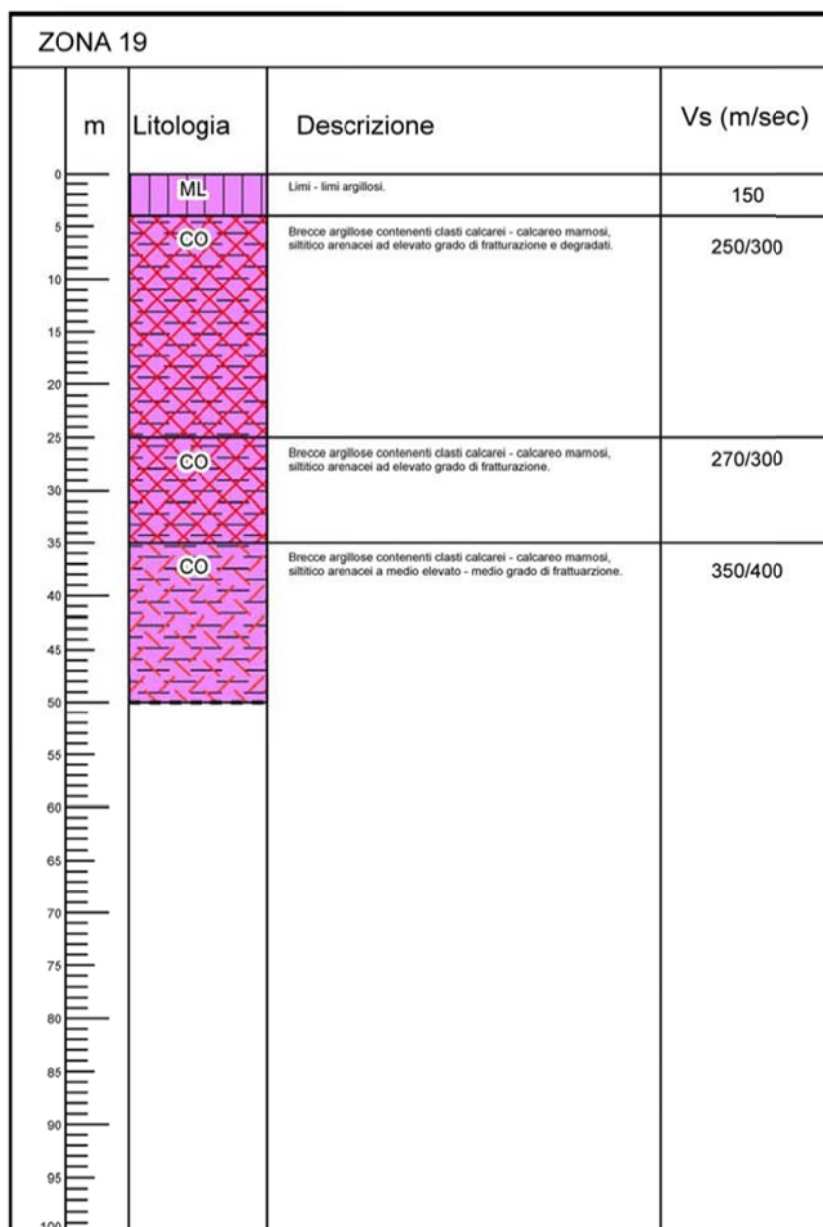
ZONA 17 (2017) – Substrato a brecce argillose – marne siltose con locali intercalazioni di sottili strati arenacei, non stratificato, detensionato sino a -15/-20 m pc, con coperture eluvio colluviali con spessore di 3/8 m; substrato a comportamento non rigido Vs ≤500/550 m/sec;

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



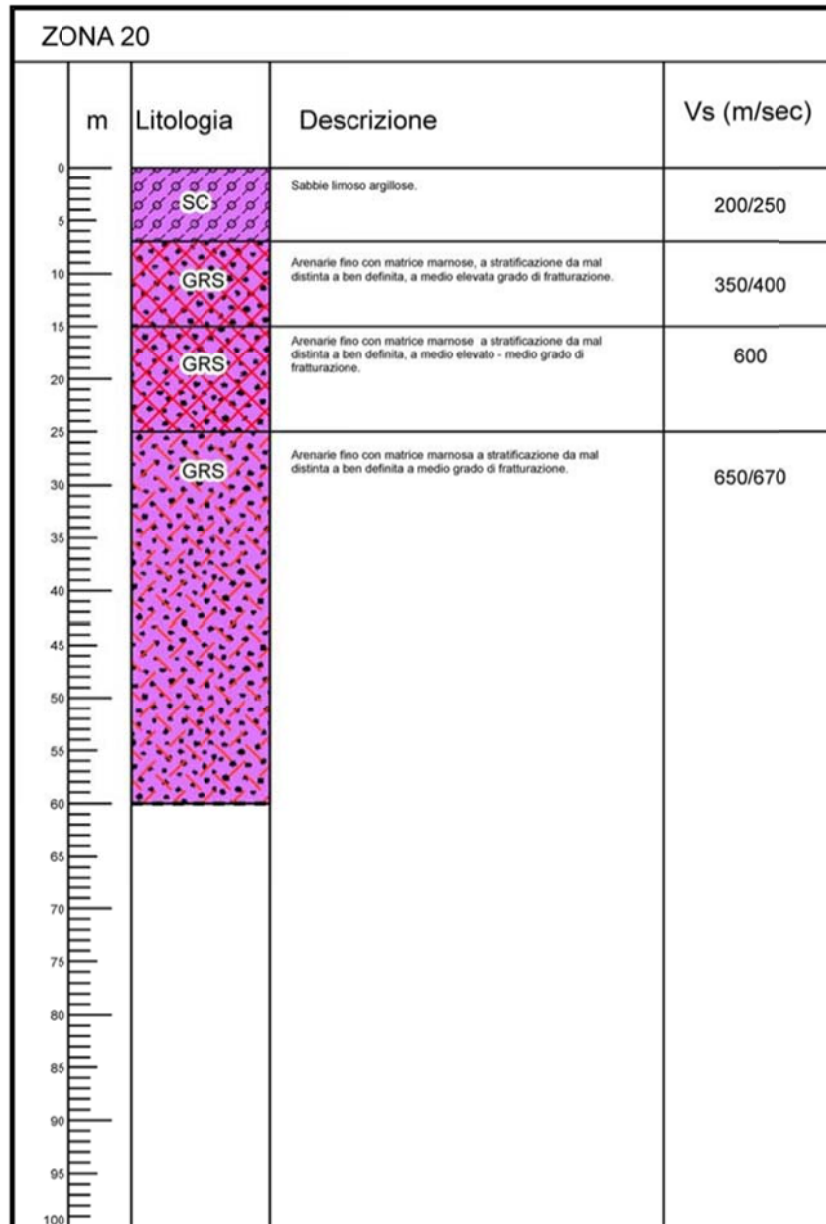
ZONA 18 (2018) – Substrato a brecce argillose non stratificato, ad elevato grado di fratturazione e degradato sino a -10 m pc, e fratturato sino a -35 m pc, con coperture eluviali con spessore di 3/4 m; substrato a comportamento non rigido: Vs<400 m/sec; zona con diffusa presenza di faglie.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



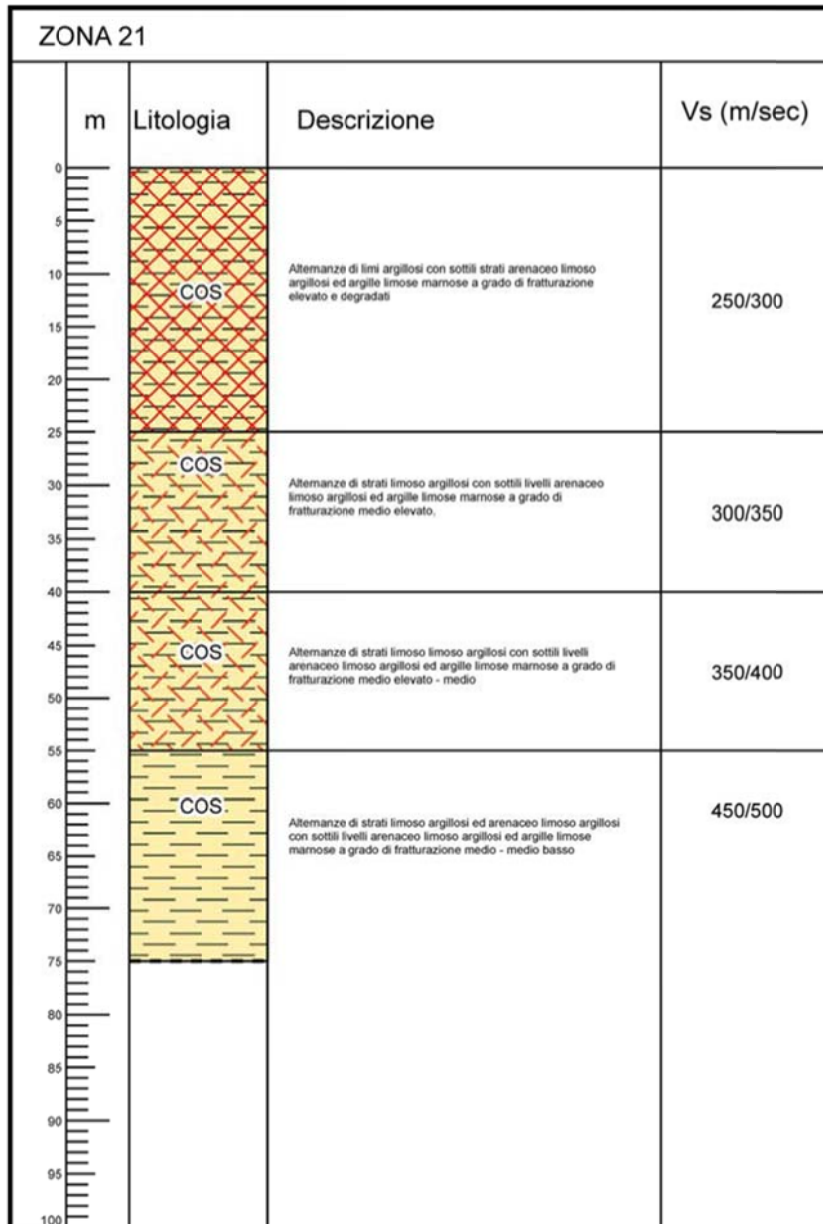
ZONA 19 (2019) – Substrato a brecce argillose non stratificato, ad elevato grado di fratturazione e degradato sino a -25/-30, con coperture eluviali con spessore di 3/4 m, substrato a comportamento non rigido: Vs ≤400 m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



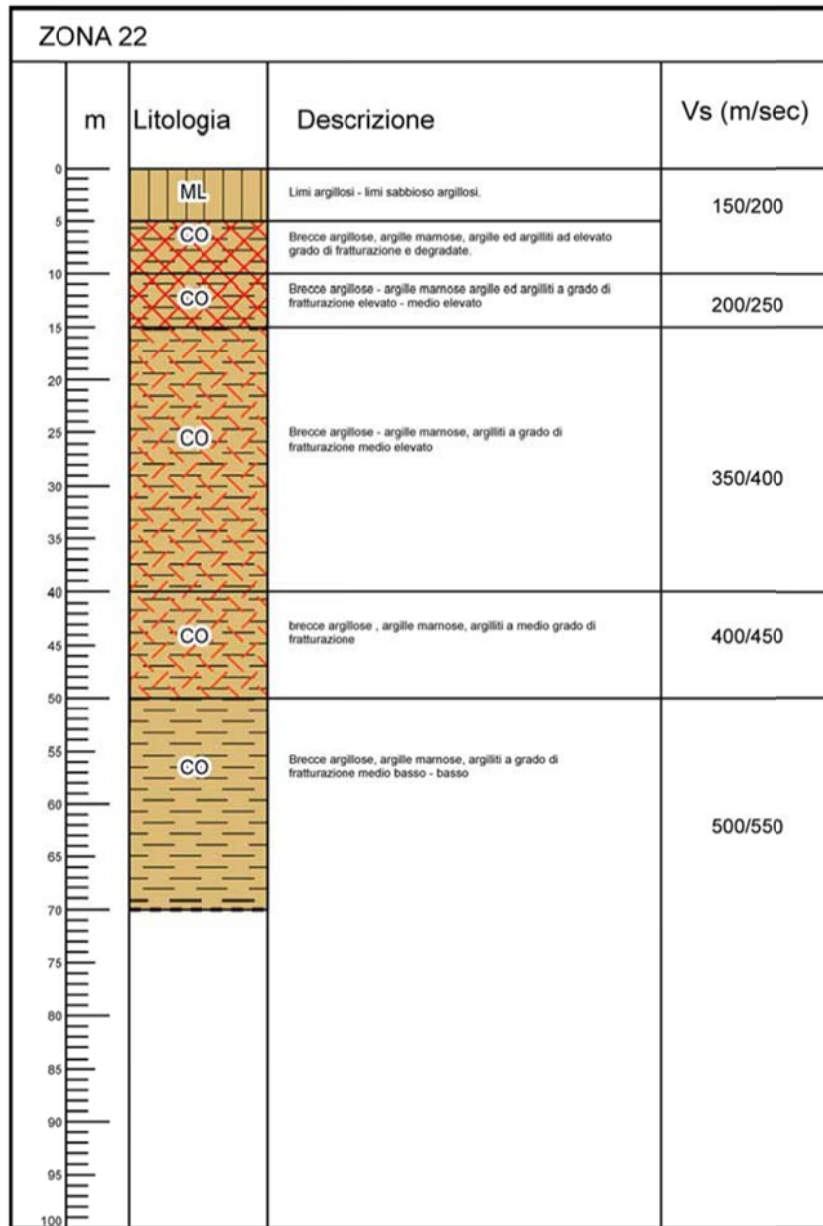
ZONA 20 (2020) – Substrato arenitico in matrice marnosa a stratificazione da mal distinta a ben distinta a medio elevato di fratturazione sino a -25 m e medio a profondità sottostanti, con coperture eluviali colluviali con spessore di 5/7 m; substrato a comportamento non rigido: Vs ≤650/670 m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



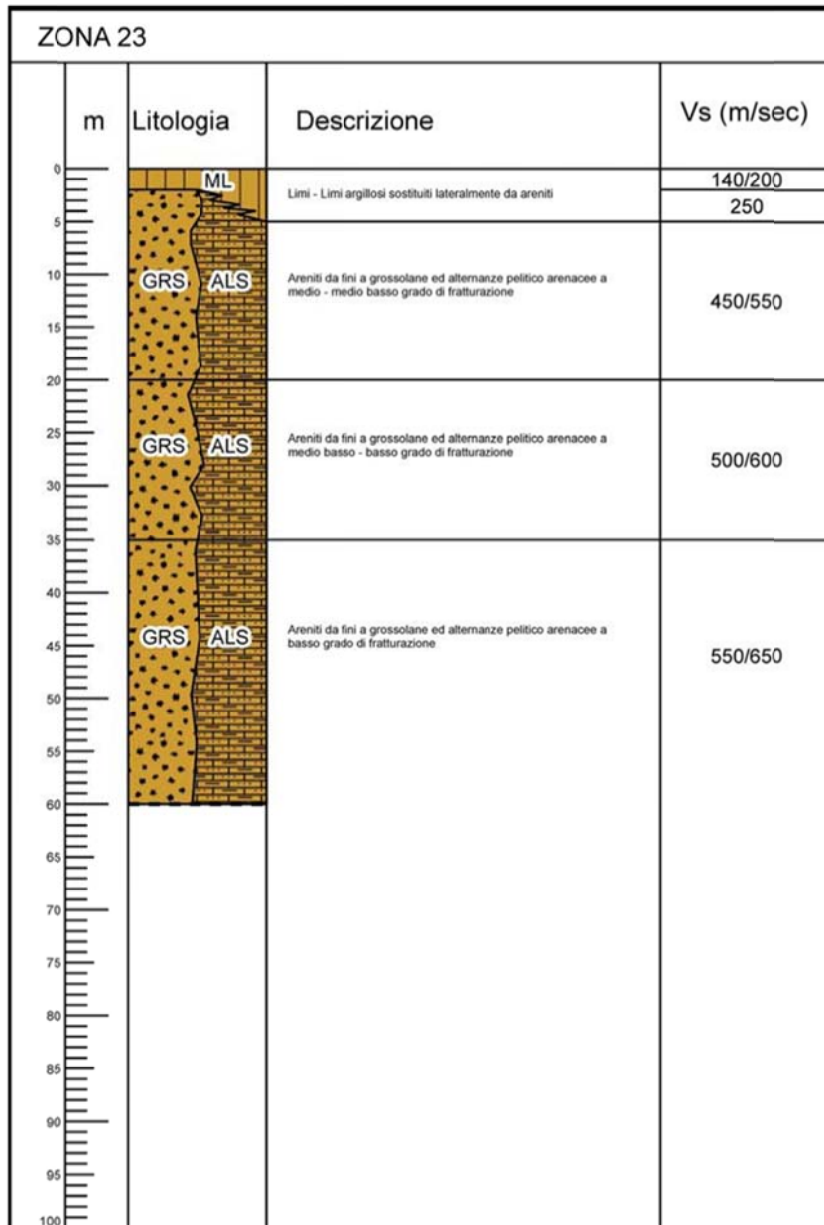
ZONA 21 (2021) – Substrato ad alternanze pelitico arenacee a strati sottili, fratturato sino a - 10 m pc, e detensionato sino a -35 m pc, con coperture eluviali con spessore di 3/4 m; substrato a comportamento non rigido: Vs ≤400 m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



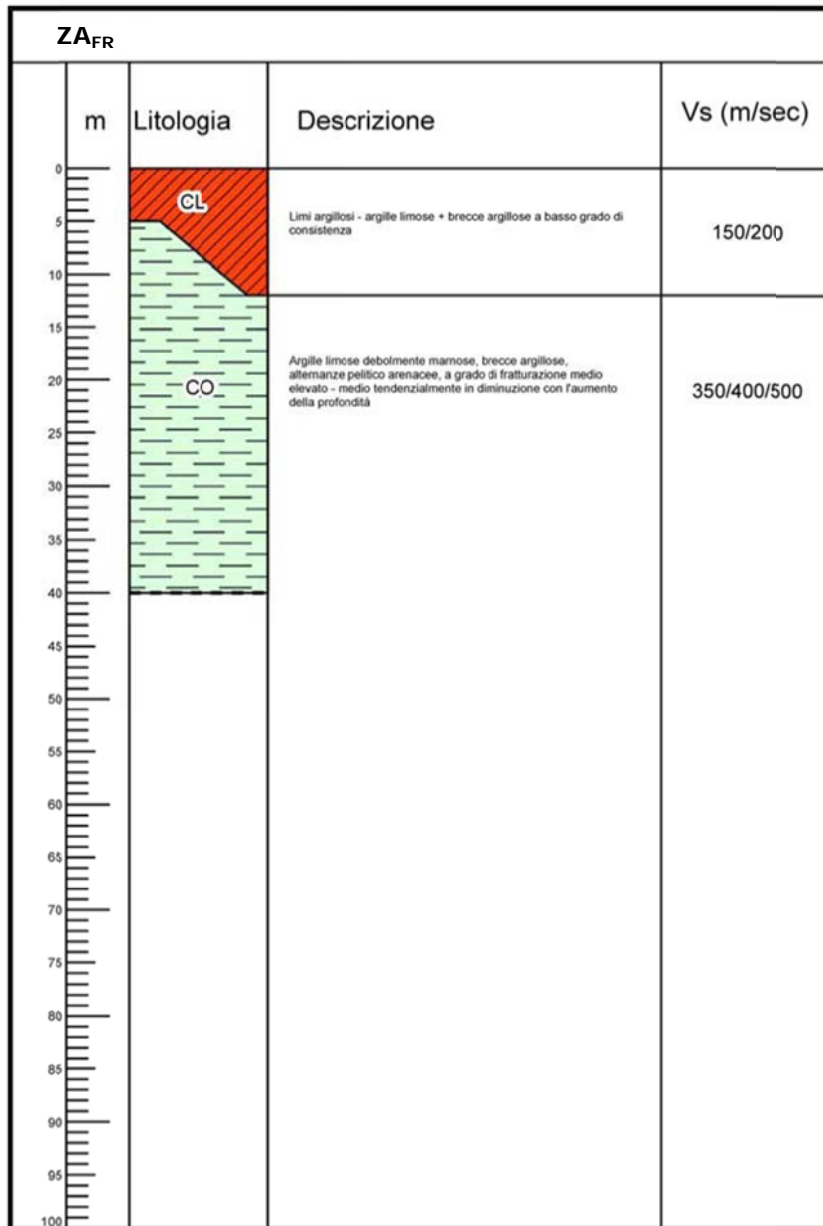
ZONA 22 (2022) – Substrato a brecce argillose, argille marnose, argille – argilliti, non stratificato, fratturato sino a -15 m pc e detensionato sino a -40 m pc, con coperture eluvio colluviali con spessore di 5/7 m; substrato a comportamento non rigido: Vs ≤400 m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



ZONA 23 (2023) – Substrato arenitico a stratificazione da media a molto spessa o ad alternanze pelitico arenacee in strati da sottili a medi, con coperture eluviali/colluviali con spessore di 5/7 m; substrato a comportamento non rigido: Vs<650/670 m/sec.

COMUNE DI MARANELLO – PROVINCIA DI MODENA
 MICROZONAZIONE SISMICA – 3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO
 RELAZIONE ILLUSTRATIVA



ZONA Z_AFR (Zona 30xy2024) – Zona di Attenzione per Instabilità di versante - Accumuli di frana di colata – complessi (in prevalenza) e di scorrimento (in subordine), eterometrici, a granulometria dalle argille limose ai blocchi e massi, con spessori di 5/12 m e V_s = 150/200 m/sec, su substrato argilloso – argilloso limoso debolmente marnoso – breccie argillose – alternanze pelitico arenacee – argilloso marnoso, con V_s = 350/400/500 m/sec.

9.5. Carta di microzonazione sismica (MS_0203)

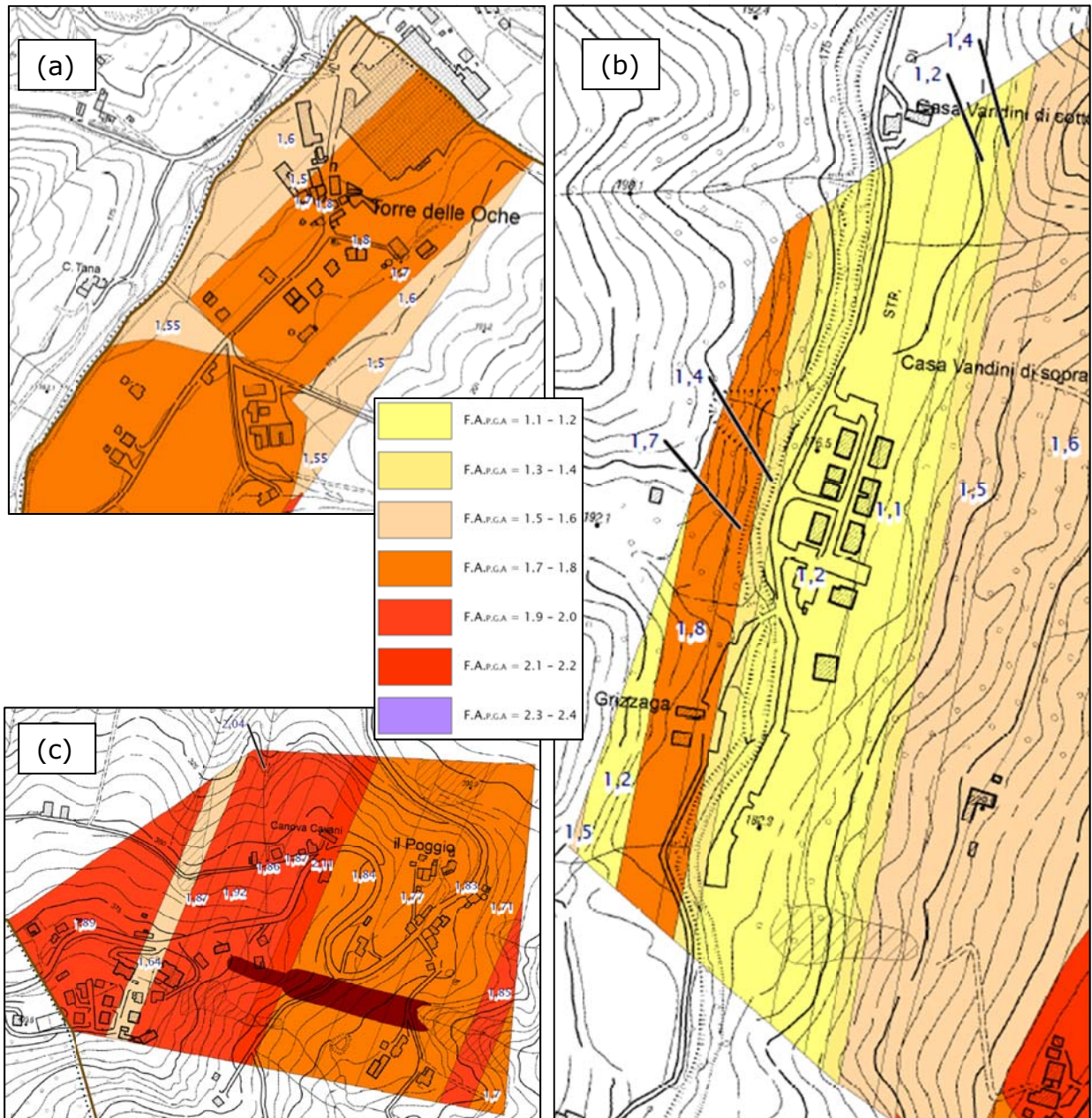


Figura 72 - Stralcio della Tavola di MS_0203 "Carta di microzonazione sismica" – fattori di amplificazione della PGA, per le tre aree di MS3: a) area "Torre oche"; b) area "via Fondo Val Grizzaga"; c) area "località Il Poggio".

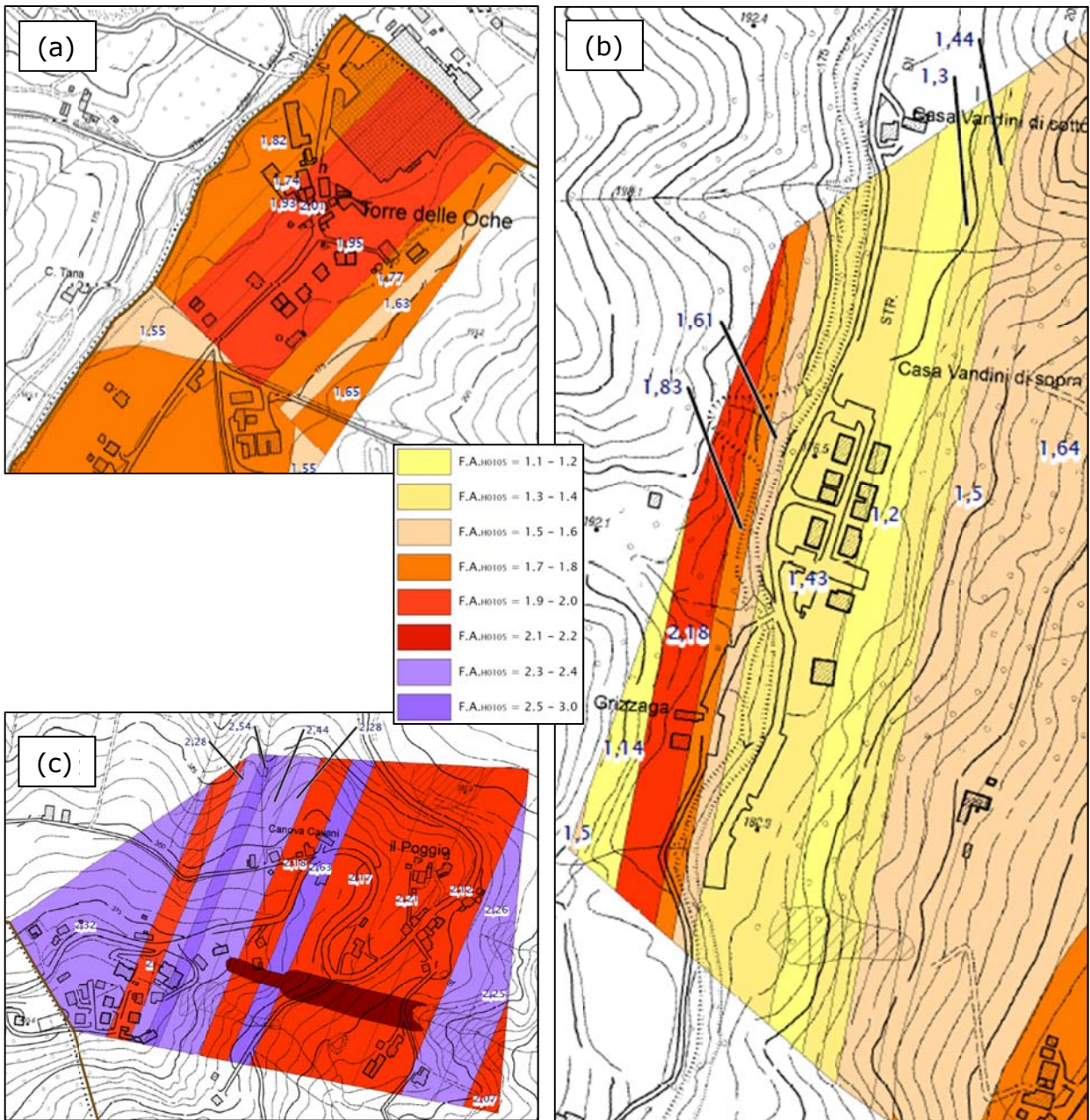


Figura 73 - Stralcio della Tavola di MS_0203 "Carta di microzonazione sismica" – fattori di amplificazione dell'Intensità di Housner in pseudo-velocità nell'intervallo d'integrazione compreso tra i periodi 0,1-0,5 s, per le tre aree di MS3: a) area "Torre oche"; b) area "via Fondo Val Grizzaga"; c) area "località Il Poggio".

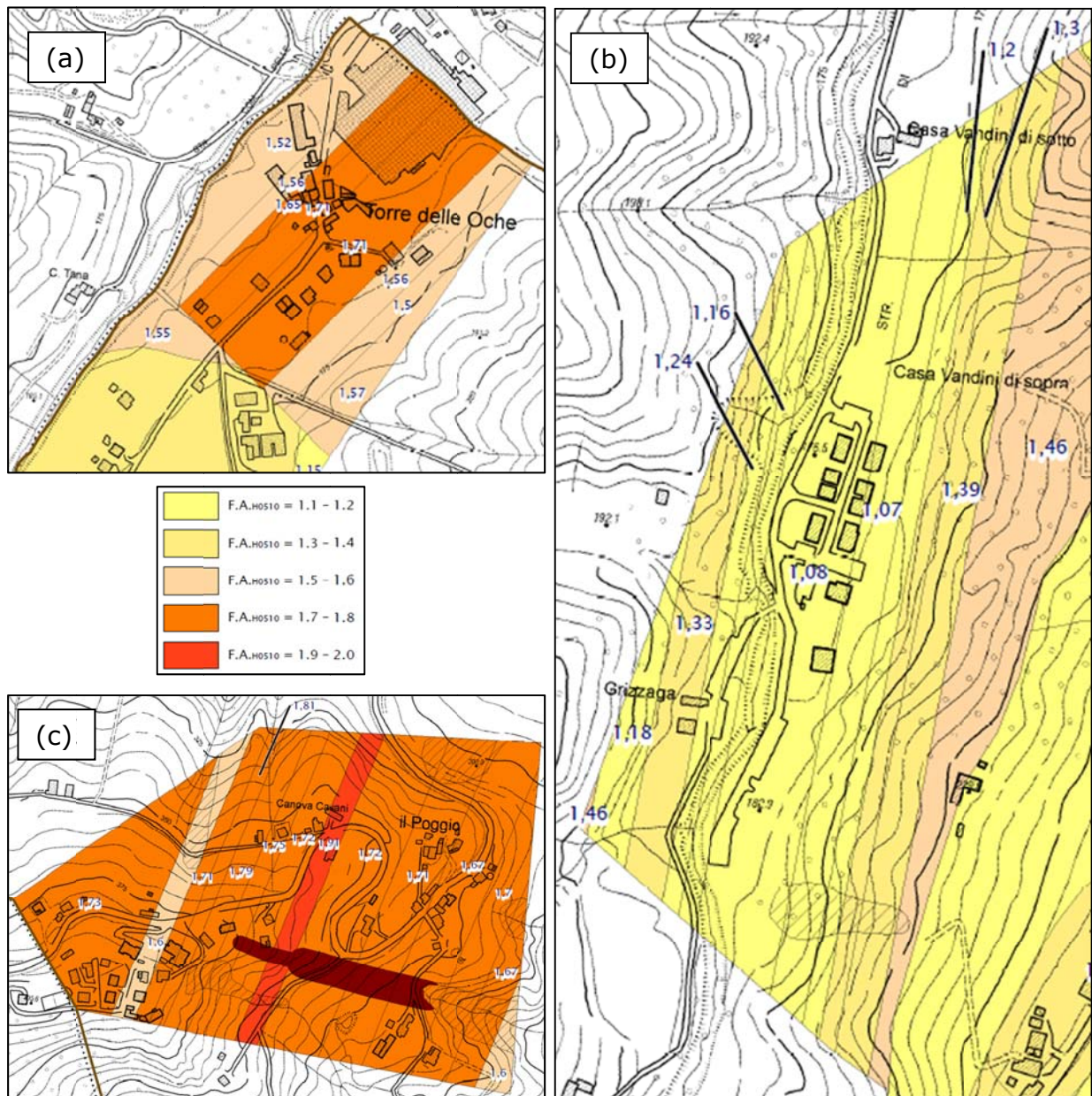


Figura 74 - Stralcio della Tavola di MS_0203 "Carta di microzonazione sismica" – fattori di amplificazione dell'Intensità di Housner in pseudo-velocità nell'intervallo d'integrazione compreso tra i periodi 0,5-1,0 s, per le tre aree di MS3: a) area "Torre oche"; b) area "via Fondo Val Grizzaga"; c) area "località Il Poggio".

Le 3 carte di MS_0203 (Figura 72, Figura 73, Figura 74) sono state elaborate a partire dalle omonime carte di microzonazione di II livello, riclassificando tutte le aree ivi rappresentate in base ai più recenti standard di rappresentazione (versione 4.0b). Rispetto alla precedente cartografia di secondo livello sono state evidenziate anche le aree in frana ricadenti all'interno del solo territorio urbanizzato. Le zone suscettibili di instabilità identificate nel secondo livello sono state classificate come "Zone di attenzione per instabilità". I fattori di amplificazione delle zone stabili suscettibili di amplificazione sono stati modificati nelle sole aree indagate con analisi di risposta sismica locale 2D, estrapolando i risultati ottenuti lungo i profili di analisi ad una più ampia area, caratterizzata da condizioni morfologiche e litostratigrafiche simili a quelle individuate lungo i profili stessi.

Nelle sole zone di III livello, il fattore di amplificazione della PGA comprende già la componente di amplificazione legata alla topografia (ft), pertanto negli shape file si è

deciso di porre il valore dell'amplificazione topografica pari ad 1 mentre quello del fattore di amplificazione della PGA è stato posto uguale al valore restituito dall'analisi di risposta sismica locale 2D, ovvero già comprendente la componente topografica.

10. CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DEI DANNI DEGLI EVENTI PASSATI

Non si hanno dati relativi a danni sul territorio comunale provocati da eventi sismici avvenuti in passato.

11. BIBLIOGRAFIA

- Albarello D., Cesi C., Eulilli V., Guerrini F., Lunedei E., Paolucci E., Pileggi D., Puzzilli L.M., 2011. The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzoning: an example from the area damaged by the 26th April 2009 l'Aquila (Italy) earthquake, *Boll.Geofis.Teor.Appl.*, 52, 3, 513-538, DOI 10.4430/bgta0013
- Boccaletti, M., Corti, G., Martelli, L., 2011. Recent and active tectonics of the external zone of the Northern Apennines (Italy). *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 100, 1331–1348.
- Bonini, M., 2007. Interrelations of mud volcanism, fluid venting, and thrust-anticline folding: Examples from the external northern Apennines (Emilia-Romagna, Italy). *J. Geophys. Res. Solid Earth* 112, DOI: 10.1029/2006JB004859.
- Bonini, M. 2008. Elliptical mud volcano caldera as stress indicator in an active compressional setting (Nirano, Pede-Apennine margin, northern Italy). *Geology* 36, 2, 131-134.
- Bonini, M., Tanini, C., 2009. Tectonics and quaternary evolution of the Northern Apennines watershed area (upper course of Arno and Tiber rivers, Italy). *Geol. J.* 44, 2–29.
- Yang, J., Yan, X.R., 2009. Site response to multi-directional earthquake loading: A practical procedure. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 29, 710–721.