



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



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 San Lazzaro di Savena



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA	STUDIO SAMUEL SANGIORGI Via Valsellustra 32 40060 Dozza (BO)	24/03/2017

INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Contenuti dello studio.....	3
1.2	Riferimenti normativi.....	4
1.3	Gli elaborati a corredo dello studio.....	5
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	7
2.1	Riferimenti bibliografici.....	7
2.2	Sismicità storica.....	8
2.3	Sorgenti sismogeniche.....	8
2.4	Ulteriori elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale: gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL 112/2007 e DGR 2193/2015)..	10
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA.....	13
3.1	Inquadramento geologico e tettonico generale.....	13
3.2	Depositi continentali quaternari.....	16
3.3	Substrato geologico marino.....	17
3.4	Ulteriori elementi geomorfologici: la conoide alluvionale Savena – Zena - Idice.....	19
3.5	Idrogeologia.....	20
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	22
4.1	Dati pregressi.....	22
4.2	Le indagini eseguite per la microzonazione sismica.....	23
4.2.1	<i>Indagini geognostiche.....</i>	23
4.2.2	<i>Indagini geofisiche.....</i>	24
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	27
5.1	Areali frazione Castel dei Britti.....	27
5.2	Areali frazione Farneto.....	28
5.3	Areale “Case Grandi”.....	29
5.4	Frazione Ponticella.....	30
5.5	Areali “Croara”.....	33
5.6	Frazione Martiri Pizzocalvo.....	34
5.7	Areali “Villa San Giacomo” e “Villa Roncaglia”.....	36
5.8	Frazioni La Pulce e Le Mura San Carlo.....	37
5.9	Areali “Ca de Mandorli”, via Valfiore, via San Lazzaro.....	38
5.10	Frazione Idice.....	40
5.11	Areale “Cicogna”.....	43
5.12	Capoluogo.....	44
5.13	Frazione Borgatella.....	47
5.14	Frazioni Mirandola e areale “Colunga”.....	48

6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	51
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	52
7.1	Cenni introduttivi.....	52
7.2	I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS.....	52
7.3	Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali: calcolo dei fattori di amplificazione.....	53
7.4	Zone di attenzione per instabilità: calcolo dei fattori di amplificazione.....	55
7.5	Valutazioni sulla propensione alla liquefacibilità dei sedimenti in caso di sisma.....	56
8	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	59
8.1	Carta delle Indagini (Tavola 1).....	59
8.2	Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica (Tavola 2).....	59
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3).....	60
8.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (Tavola 4).....	61
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	64
8.6	Carta di microzonazione sismica livello 2 (Tavole 6a/b, 7a/b, 8a/b, 9a).....	65
9	BIBLIOGRAFIA.....	66

ALLEGATO: VERIFICHE DI LIQUEFAZIONE PROVE CPTU

1 INTRODUZIONE

1.1 Contenuti dello studio

L'Amministrazione comunale di San Lazzaro di Savena è risultata destinataria di contributi stanziati dal Dipartimento della Protezione Civile nazionale per la realizzazione di studi di microzonazione sismica (livello 2) e di analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE), come previsto dalla Legge 77/2009 e ai sensi dell'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014 (OCDPC 171/2014), recepita dalla Regione Emilia-Romagna con Deliberazione della Giunta Regionale n. 1227/2015. Tali studi sono stati affidati allo Studio scrivente.

Sono state dunque espletate le seguenti attività:

- raccolta dati geognostici e geofisici disponibili ed esecuzione di nuove indagini;
- elaborazione dello studio di microzonazione sismica (MS) di livello 2 per il territorio urbanizzato/urbanizzabile;
- elaborazione delle analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE);
- elaborazione dei dati e delle cartografie secondo gli standard di rappresentazione e archiviazione previsti per la MS e la CLE.

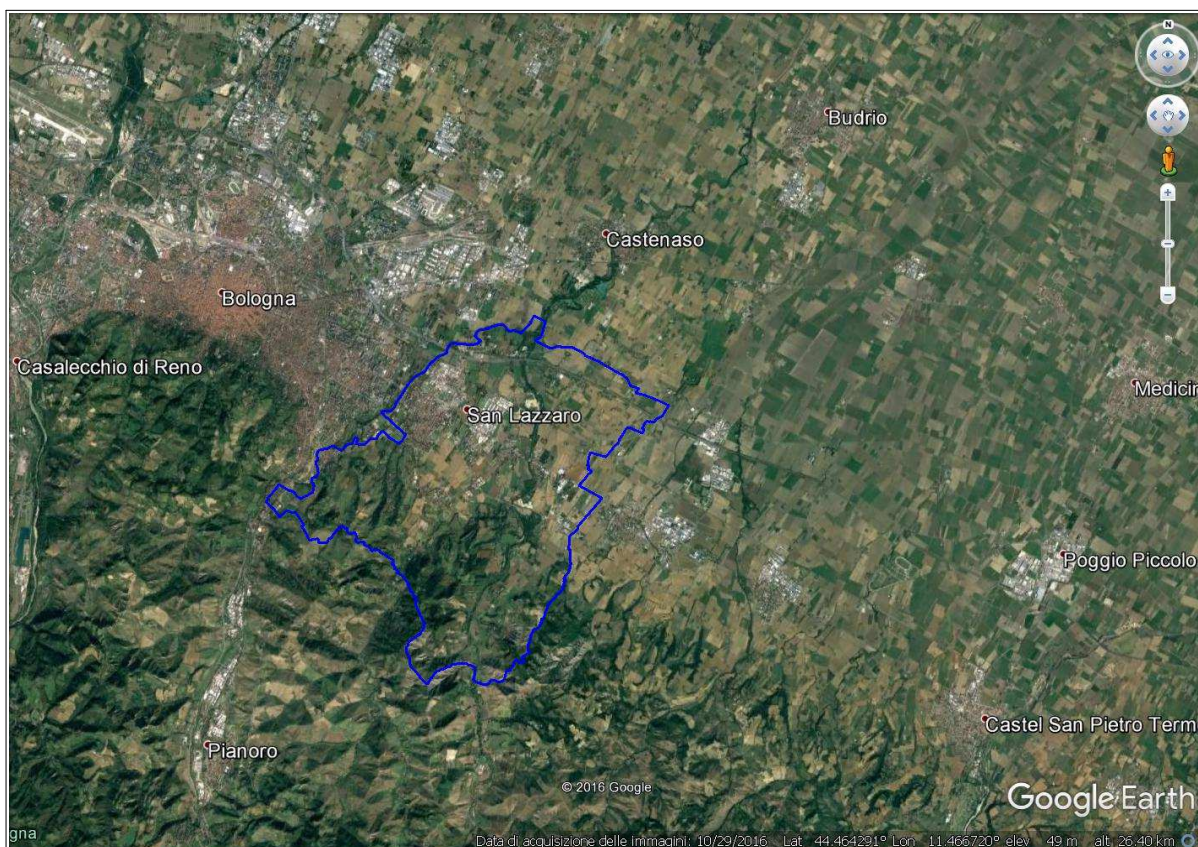


Figura 1.1 – Localizzazione del territorio amministrativo del Comune di San Lazzaro di Savena (foto aerea: “Google Earth”)

La figura 1.1 offre un inquadramento del limite comunale di San Lazzaro di Savena: si tratta di un territorio amministrativo situato in un contesto morfologico variabile da collinare a pianura, di estensione areale totale pari a circa 44,7 Km² e con una popolazione di circa 32.000 abitanti. La figura 1.2 localizza con maggior dettaglio le aree urbane/urbanizzate (il Capoluogo e le frazioni) interessate dallo studio di microzonazione sismica e dove si sono concentrate la maggior parte delle indagini d'approfondimento.

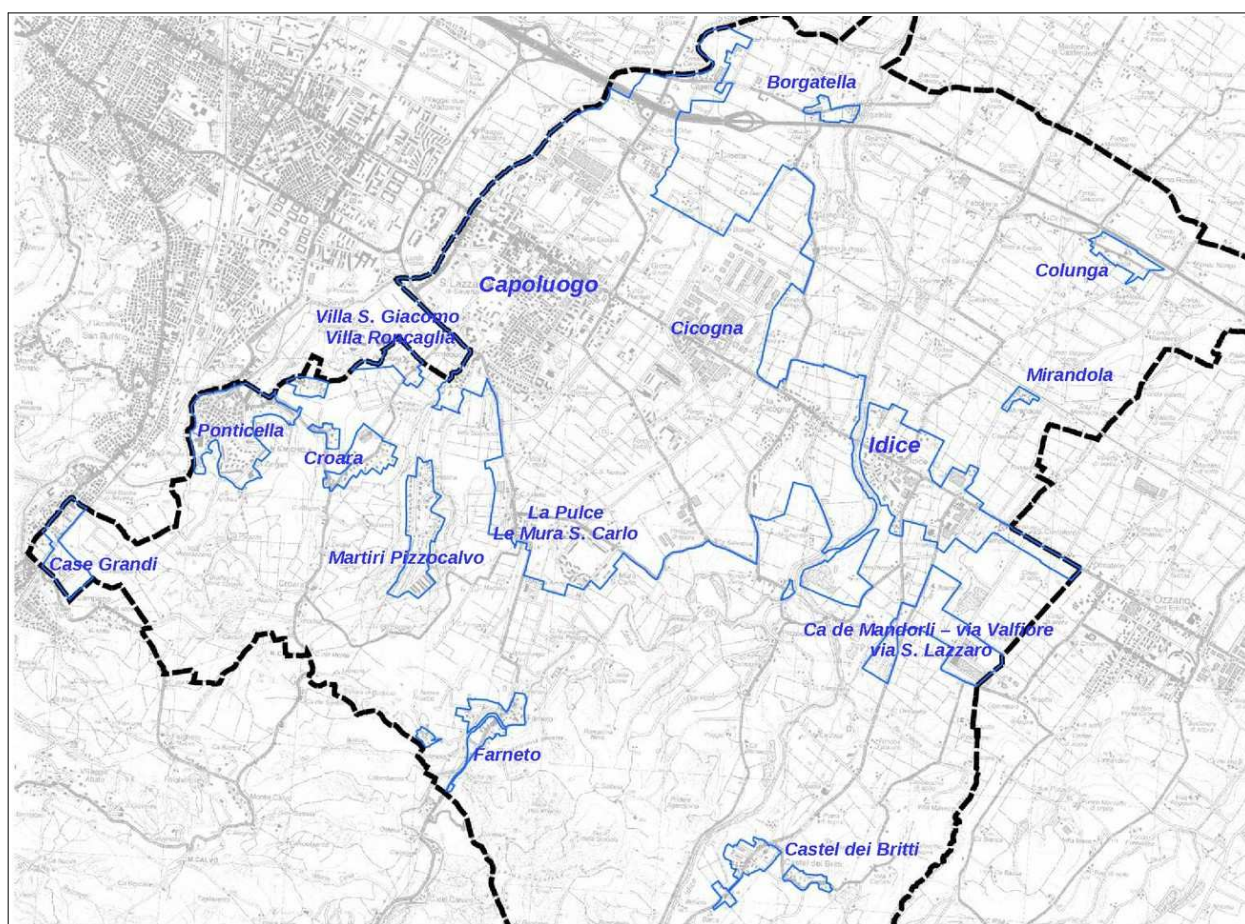


Figura 1.2 - Localizzazione delle aree oggetto di microzonazione (su base topografica della Regione Emilia-Romagna - CTR 1:10.000)

1.2 Riferimenti normativi

Il presente lavoro è redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato C della Delibera 1227/2015 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna, dal titolo "Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile 171/2014 a favore degli Enti locali".

Per quanto non specificato nel suddetto documento, i riferimenti tecnici per la realizzazione dello studio e per l'elaborazione e la redazione delle tavole cartografiche sono rappresentati dai seguenti testi:

- ✓ "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b", redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica

(Commissione tecnica per la microzonazione sismica, ottobre 2015), da qui in avanti "Standard MS 4.0b";

- ✓ "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica", approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (Gruppo di lavoro MS, 2008; AA.VV., 2011), da qui in avanti "ICMS".

Nella redazione dello studio ci si è inoltre riferiti alle seguenti normative:

- ✓ Deliberazione dell'Assemblea Legislativa n. 112/2007 Art. 16 c.1 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica";
- ✓ Deliberazione della Giunta Regionale n. 2193/2015 "Art. 16 della LR 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;
- ✓ LR 30/10/2008 n.19 "Norme per la riduzione del Rischio Sismico";
- ✓ DM del 14/01/2008 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".

Si rammenta che la recente DGR 2193/2015 della Regione Emilia-Romagna ha apportato alcuni aggiornamenti agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica già definiti nella DAL 112/2007. Gli indirizzi regionali per gli studi di MS risultano in tal senso più congrui alle Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/01/2008); gli aggiornamenti sono inoltre derivati dalle ulteriori esperienze (oltre otto anni) di applicazione della DAL 112/2007 e dalle ulteriori conoscenze scientifiche maturate a seguito degli ultimi importanti eventi sismici italiani (L'Aquila 2009 e Pianura emiliana 2012).

1.3 Gli elaborati a corredo dello studio

Gli elaborati dello studio di microzonazione sismica per il Comune di San Lazzaro di Savena sono i seguenti:

- la presente Relazione Descrittiva (riprodotta in formato *.pdf) che, oltre a caratterizzare e inquadrare le aree oggetto delle analisi nel contesto geologico, geomorfologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie;
- le nove tavole cartografiche (riprodotte in formato *.pdf) elencate in tabella 1.1 e illustrate in dettaglio nel capitolo 8;
- l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato *.shp - shapefile);
- le sezioni geologiche di riferimento per il territorio studiato (riprodotte in formato *.pdf), contenute nell'Allegato 1;
- i rapporti delle indagini di nuova esecuzione (riprodotti in formato *.pdf), contenuti nell'Allegato 2.

Elaborato cartografico	Sigla Tavola	Scala
Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000
Carta geologico-tecnica	Tavola 2	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4a/b	1:7.000
Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola 5	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 – FA_{PGA}	Tavola 6a/b	1:7.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 – $FH_{0,1-0,5}$	Tavola 7a/b	1:7.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 – $FH_{0,5-1,0}$	Tavola 8a/b	1:7.000
Carta di microzonazione sismica di livello 2 – $FH_{0,5-1,5}$	Tavola 9a	1:7.000

Tabella 1.1 - Elaborati cartografici predisposti per lo studio di microzonazione sismica del Comune di San Lazzaro di Savena

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate, per il primo, il secondo e il terzo livello di approfondimento, negli allegati C e D della DGR 1227/2015 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard MS 4.0 (CTMS, 2015), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi, integrandoli con alcuni specifici elaborati aggiuntivi, come specificato al capitolo 8. Si segnala a questo proposito che l'obbligo di attenersi in modo rigoroso ai suddetti standard di rappresentazione, ha vincolato il presente lavoro sia a livello di articolazione delle tavole (numero e tipologia) e della relazione (titoli e ordine dei capitoli), che a livello di rappresentazione cartografica (tematismi rappresentati, legende e denominazioni, ma anche layout, colori e font dei caratteri) e di contenuti descrittivi.

Si è tuttavia prodotta un'ulteriore carta di microzonazione sismica di "livello 3" relativa al parametro $FH_{0,5-1,5}$ (tavola 9) per coerenza con quanto richiesto nella successiva DGR 2193/2015 (per il sole aree di studio settentrionali).

Le cartografie elaborate hanno utilizzato come base topografica di riferimento i raster tipografici georeferenziati della Regione Emilia dalla Regione Emilia Romagna (DBT scala 1.5.000), aggiornati al 2013. Per questo lavoro, la base topografica raster è stata georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto, ovvero nelle coordinate "WGS_1984_UTM_Zone_33N", per produrre tutti gli strati informativi in formato numerico in coerenza con quanto richiesto dagli Standard MS 4.0 (CTMS, 2015).

2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Riferimenti bibliografici

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale, dunque alla presenza di strutture geologicamente “attive”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è quindi l'indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui terremoti avvenuti nel passato) e della geologia strutturale locale, fattori strettamente connessi tra loro.

A supporto della redazione del presente capitolo, sono stati utilizzati i dati liberamente consultabili di database pubblici sviluppati da diversi enti e gruppi di ricerca:

- il *CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015* (Rovida et al., 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d'interesse nella finestra temporale 1000–2014
- il *DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani* utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 e provenienti da diverse fonti. È relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000–2014 (Locati et al., 2016 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi et al., 2007);
- il *CFTI4Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea* (Guidoboni et al., 2007; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>), che riporta per numerose località i risentimenti di circa 300 tra i terremoti storici più forti avvenuti sul territorio italiano, e fornisce anche informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti, sui parametri epicentrali, sugli effetti dei terremoti sull'ambiente fisico (fagliazione superficiale, frane sismoindotte, liquefazioni, maremoti, ecc.), sul danneggiamento dei centri storici e di beni monumentali;
- la *Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale* (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>) che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ad essi sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del sisma atteso, i valori di accelerazione orizzontale massima del suolo (ag) e dei principali “parametri spettrali”, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica;
- la *Zonazione Sismogenetica ZS9* (Meletti e Valensise, 2004 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- il *Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.2.0* (DISS Working Group, 2015 e Basili et al., 2008; <http://diss.rm.ingv.it>), che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore;
- il *Catalogo della Sismicità Italiana* (Castello et al., 2006; <http://csi.rm.ingv.it/>) che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;
- il *Database ISIDe* (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 2003 ad oggi.

2.2 Sismicità storica

Il DBMI15 (Locati et al., 2016), riporta solo tre eventi (figura 2.1), con risentimenti non significativi nel territorio di San Lazzaro di Savena (vi risultano associate intensità massime <3–4). La scarsità di dati è chiaramente imputabile alla mancanza o al non reperimento di fonti storiche.

Secondo quanto riportato nel CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007), sono tuttavia reperibili altre informazioni riguardo alcuni significativi terremoti storici prossimi all'area di studio, in particolare i terremoti “bolognesi” delle sequenze sismiche del 1433 (Intensità nell'area epicentrale pari a 7), del 1504–1505 (Intensità =7) e del 1779–1780 (con Intensità =7, le cui scosse più violente causarono danni a chiese ed edifici e crolli di comignoli a Bologna, a Castel San Pietro e a Medicina).

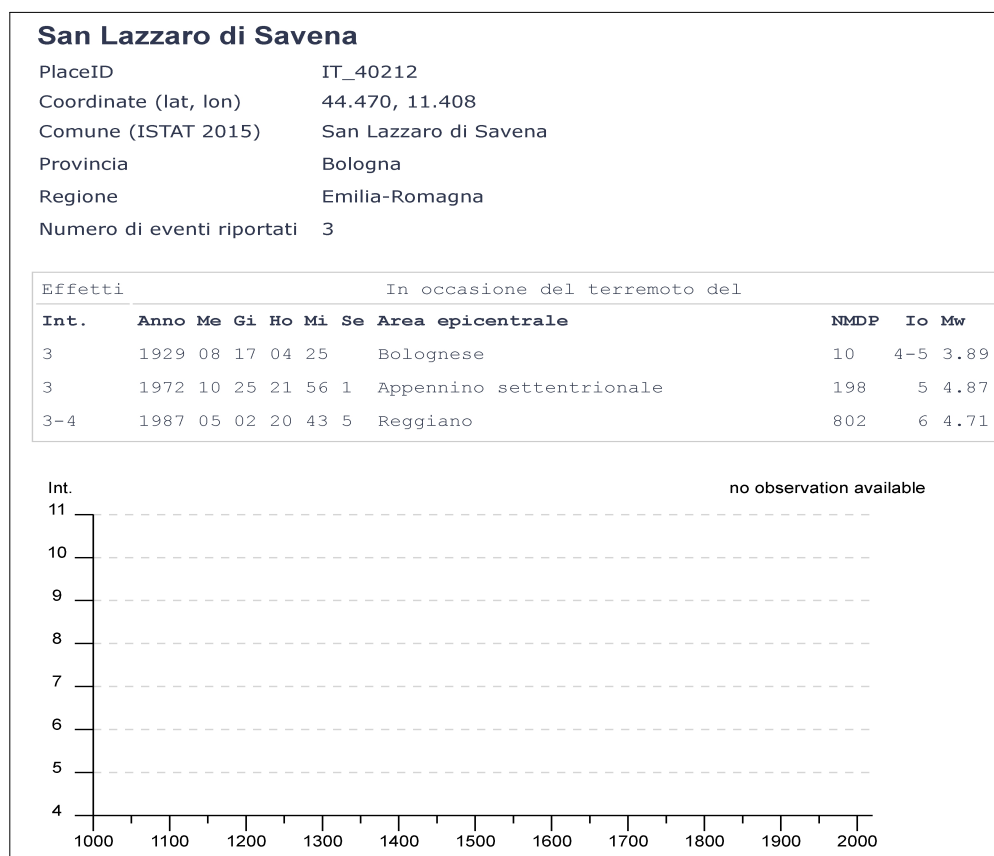


Figura 2.1- Terremoti significativi per il Comune di San Lazzaro di Savena e macrointensità stimata (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano 2015)

2.3 Sorgenti sismogeniche

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano – ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, l'area in esame ricade nella Zona 913 (Appennino Emiliano-romagnolo), caratterizzata da un valore di Mw_{max} pari a 6.14. La zona sismogenica 913 è una delle zone in cui è stato scomposto longitudinalmente l'arco appenninico settentrionale e centrale da Parma fino all'Abruzzo, con eventi sismici riconducibili a meccanismi cinematici prevalentemente compressivi fino al suo

marginie, oppure a situazioni trascorrenti nelle zone di svincolo della struttura appenninica. Tutta la fascia è caratterizzata da terremoti storici che raramente hanno raggiunto valori molto elevati di magnitudo (fonte: INGV).

Il database DISS v. 3.2 (DISS Working Group, 2010) riporta la principale sorgente sismogenica composita che interessa gran parte del territorio comunale di San Lazzaro di Savena, indicata con la sigla “ITCS047 Castelvetro di Modena–Castel San Pietro Terme” (figura 2.2) e lungo la quale si concentrano i maggiori eventi sismici accaduti dell’area bolognese. Si tratta di una porzione del fronte compressivo pedeappenninico, caratterizzato da un sistema di faglie con prevalente vergenza nordest, a cui è associata una magnitudo massima pari a 6,0. La profondità è indicata tra 2 e 8 km, mentre lo slip-rate è compreso tra circa 0.2 e 0.6 mm/anno.

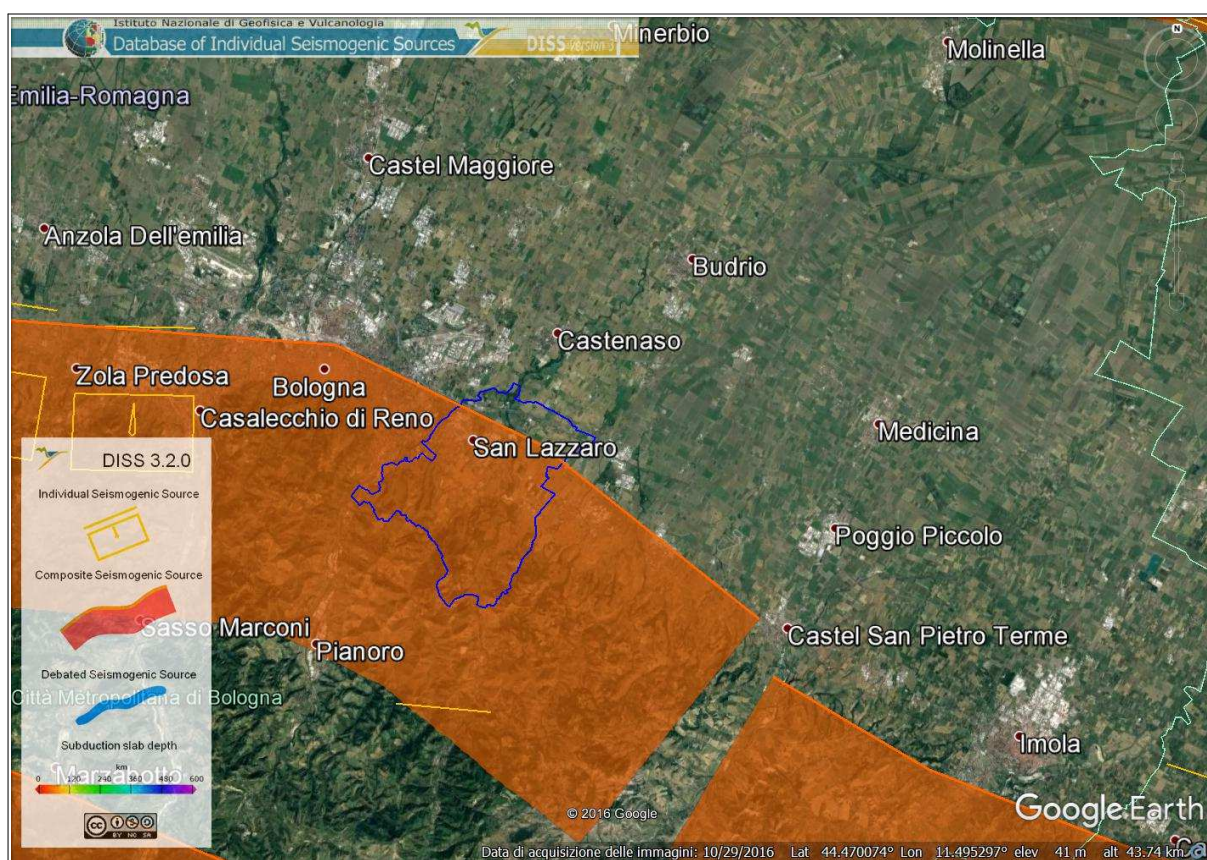


Figura 2.2 – Localizzazione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (v.3.2). Foto aerea: Google Earth

Il database DISS v. 3.2 riporta anche due sorgenti sismogenetiche individuali, ITIS091 “Casalecchio di Reno” e ITIS103 “Crespellano”. Alla più vicina sorgente ITIS091 è attribuita una $M_w = 5,5$ associata al terremoto bolognese del 3 gennaio 1505 (fonte: CPTI, 2004): la zona epicentrale è stata stimata tra Zola Predosa e Bologna e sono documentati danni più consistenti a Zola Predosa, Bologna e S. Lorenzo in Collina (grado IX della scala Mercalli, cfr. Zecchi, 1882) ed i seguenti effetti indotti dal sisma: frane, fratture superficiali (Boschi et al., 2000), effetti di liquefazione a Zola Predosa (Prestininzi e Romeo, 2000).

Alla seconda sorgente ITIS103 è attribuita una magnitudo $M_w = 5,6$ associata al terremoto del

20 aprile 1929 (fonte: CPTI, 2004): a seguito di tale evento sismico sono documentati danni ad edifici ed infrastrutture con intensità pari al grado VII della scala Mercalli (Zecchi, 1982) ed anche effetti indotti dal sisma: frane, fratture superficiali, emissioni di gas (Boschi et al., 2000). Si tratta di aree sismogenetiche che distano dal Capoluogo comunale rispettivamente circa 15 km e 20 km.

Le più importanti questioni aperte citate nel database DISS, a cui è difficile dare una risposta allo stato attuale delle conoscenze, riguardano i tempi di ritorno dei terremoti associati alle sorgenti individuali e la magnitudo massima associabile all'area sottesa dalla sorgente composita.

2.4 Ulteriori elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale: gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL 112/2007 e DGR 2193/2015)

La Regione Emilia-Romagna ha elaborato e approvato (con Delibera dell'Assemblea Legislativa n.112 del maggio 2007) gli <<Indirizzi per gli studi di Microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica>>, in coerenza con la LR n.20/2000 <<Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio>>. Questi indirizzi regionali per la microzonazione sismica, sono stati elaborati sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale negli ultimi 40 anni circa, assumendo come riferimento la "pericolosità di base" elaborata da INGV e recepita a livello nazionale con l'OPCM 3519/2006.

Con la recente approvazione della DGR 2193/2015, la Regione Emilia-Romagna ha introdotto aggiornamenti agli indirizzi riportati nella DAL 114/2007. Questa parziale revisione prende quale riferimento anche le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/1/2008), le ulteriori esperienze scientifiche seguite ai recenti eventi sismici italiani (L'Aquila 2009; pianura emiliana del 2012) e, infine gli oltre otto anni di applicazione della DAL 112/2007. In sintesi, le principali novità contenute nella la DGR 2193/2015 consistono:

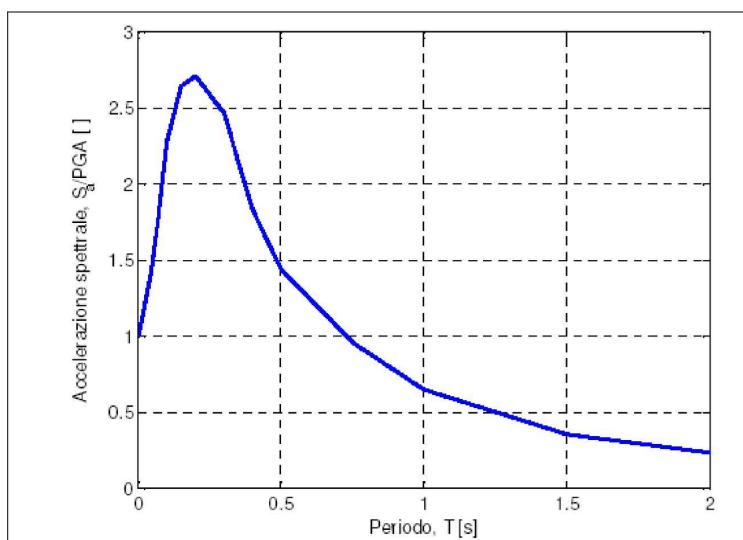
- ✓ nelle rimodulazioni degli abachi di microzonazione sismica da considerarsi per le analisi semplificate ("livello 2");
- ✓ nella definizione di un ulteriore parametro di amplificazione riferito all'intensità spettrale di Housner (per l'intervallo di periodo T compreso tra 0,5 s e 1,5 s);
- ✓ nella definizione dell'input sismico (ag al sito di riferimento) che ora è definito in base ai valori di pericolosità sismica elaborati dall'INGV per tutto il territorio nazionale sui punti di una griglia di passo pari a 0,05° (reticolo analogo a quello previsto per le NTC 2008);
- ✓ nell'obbligo di predisporre cartografie delle frequenze naturali dei terreni a scala territoriale e a supporto del "primo livello" di approfondimento;
- ✓ nello stralcio dell'obbligo degli approfondimenti di "livello 3" per la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico (in quanto tali verifiche sismiche saranno espletate ai sensi

delle NTC vigenti, con input di pericolosità sismica di base che dovranno tenere conto delle condizioni di progettazione “non ordinaria”).

Gli indirizzi RER forniscono gli elementi essenziali per espletare gli studi di pericolosità sismica secondo i tre “livelli” di approfondimento, inoltre tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata dell’amplificazione locale (microzonazione sismica di “secondo livello”).

Gli indirizzi forniscono anche i dati fondamentali per le valutazioni più accurate della risposta sismica di terzo livello: lo spettro di risposta normalizzato di riferimento per l’Emilia-Romagna (per $T_r = 475$ anni cioè con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni), riportato in figura 2.6, e i valori di P_g anch'essi normalizzati (riferiti al suolo rigido) per ogni sito nella Regione Emilia-Romagna (basato sul reticolo INGV). Tale forma spettrale è sostanzialmente congrua con lo spettro elastico di riferimento per le norme tecniche per le costruzioni attualmente vigenti (NTC 2008).

Figura 2.3- Spettro di risposta normalizzato impiegato per la selezione dalla banca dati accelerometrica IESD dei segnali di riferimento regionale



Gli indirizzi regionali di MS indicano anche tre accelerogrammi di riferimento per le modellazioni numeriche di risposta sismica locale: sono input selezionati dalla Banca dati IESD attraverso una procedura che ha valutato la similarità tra la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei singoli segnali.

È così possibile ricavare lo spettro di risposta e gli accelerogrammi di riferimento per ogni Comune riscaldando lo spettro di figura 2.6 con la a_{refg} attribuita al sito di studio. In tal senso, la figura 2.4 riporta per il territorio comunale di San Lazzaro i punti del reticolo INGV e i relativi valori di a_{refg} . I valori di a_{refg} regionali si riferiscono al reticolo INGV (mappa MPS04) che attribuisce la pericolosità sismica attraverso il parametro dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido e pianeggiante, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni: i valori sono attribuiti ad ogni punto della griglia di calcolo, costruita per tutto il territorio nazionale (griglia con una densità di 20 punti per grado, circa un punto ogni 5 km). La mappa MPS04 è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale con l'emanazione dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).

Si evince che per il territorio urbanizzato/urbanizzabile, i valori di a_{refg} (per terremoti con $T_R = 475$ anni) sono compresi tra circa 0,180g e 0,169g, pertanto con una variabilità relativamente modesta della pericolosità “di base”.

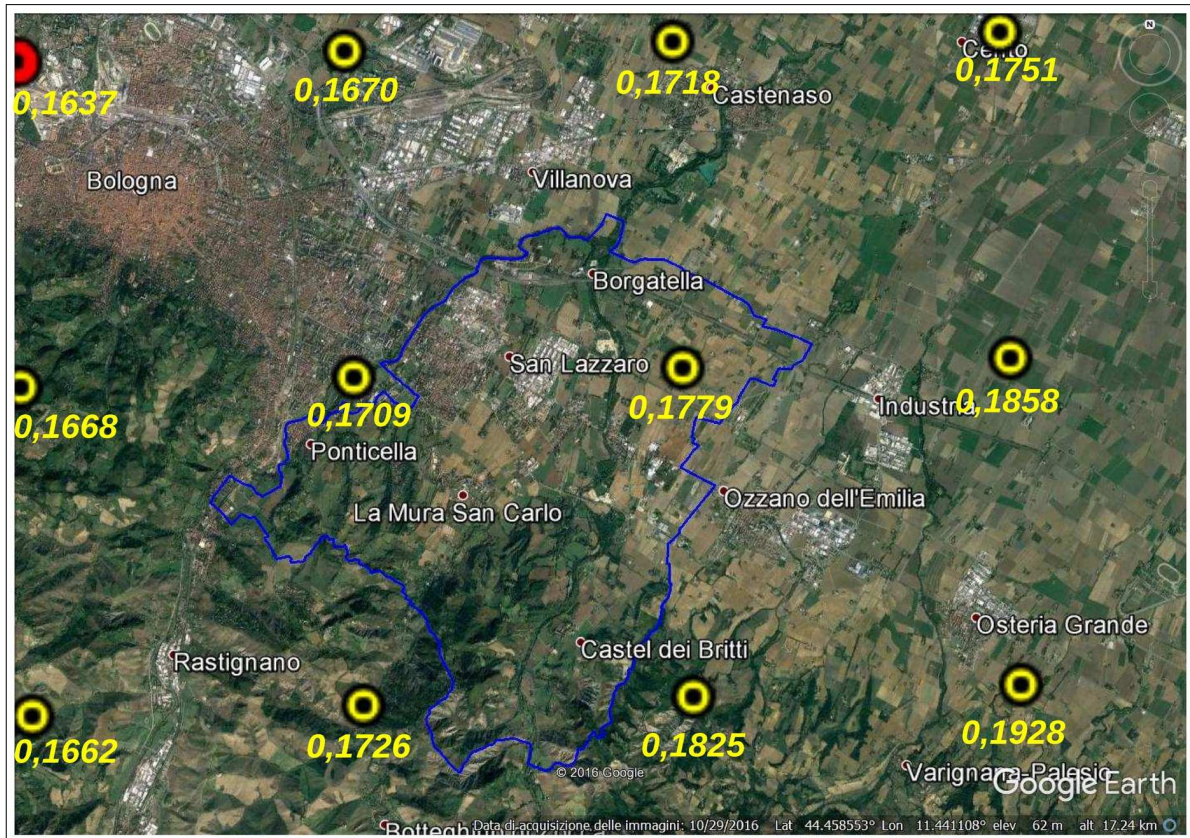


Figura 2.4 – Reticolo INGV di pericolosità sismica. La figura riporta i punti della griglia relativi al territorio comunale di San Lazzaro di Savena

3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA

3.1 Inquadramento geologico e tettonico generale

L'assetto geologico strutturale del territorio di San Lazzaro di Savena è quello di zona di transizione da “catena” a “margine” appenninico. Si rammenta che la zona in cui la pianura termina contro i primi declivi appenninici non rappresenta l'inizio della “catena”: infatti all'Appennino morfologico, visibile, segue in pianura un “Appennino in embrione” sepolto sotto i depositi alluvionali padani.

In figura 3.1 è inquadrato il contesto geologico strutturale locale che identifica i rapporti tra catena e pianura nel territorio studiato. Benché la ricostruzione effettuata dall'AGIP (M. Pieri e G. Groppi 1981), in particolare per i profili di sottosuolo (figura 3.2) interessi direttamente il territorio di San Lazzaro di Savena solamente in modo marginale, tuttavia la ricostruzione consente di estrapolare con ragionevole sicurezza le informazioni per un ampio intorno (Dondi et Alii, 1982; Dondi, 1985).

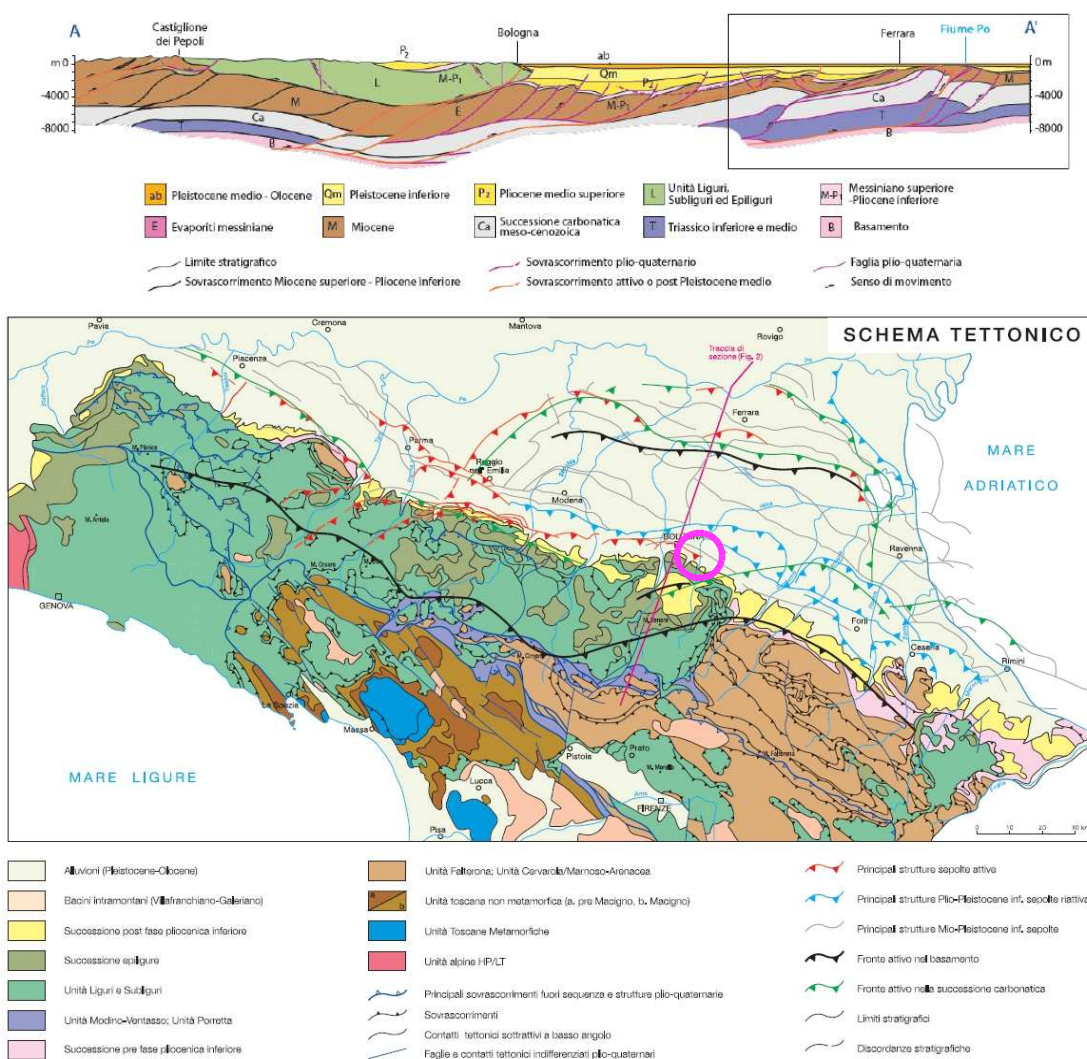


Figura 3.1 – Schema tettonico dell'area studiata, tratto dalle “Note Illustrative alla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna”. Il territorio studiato è localizzato nel cerchio fuxia

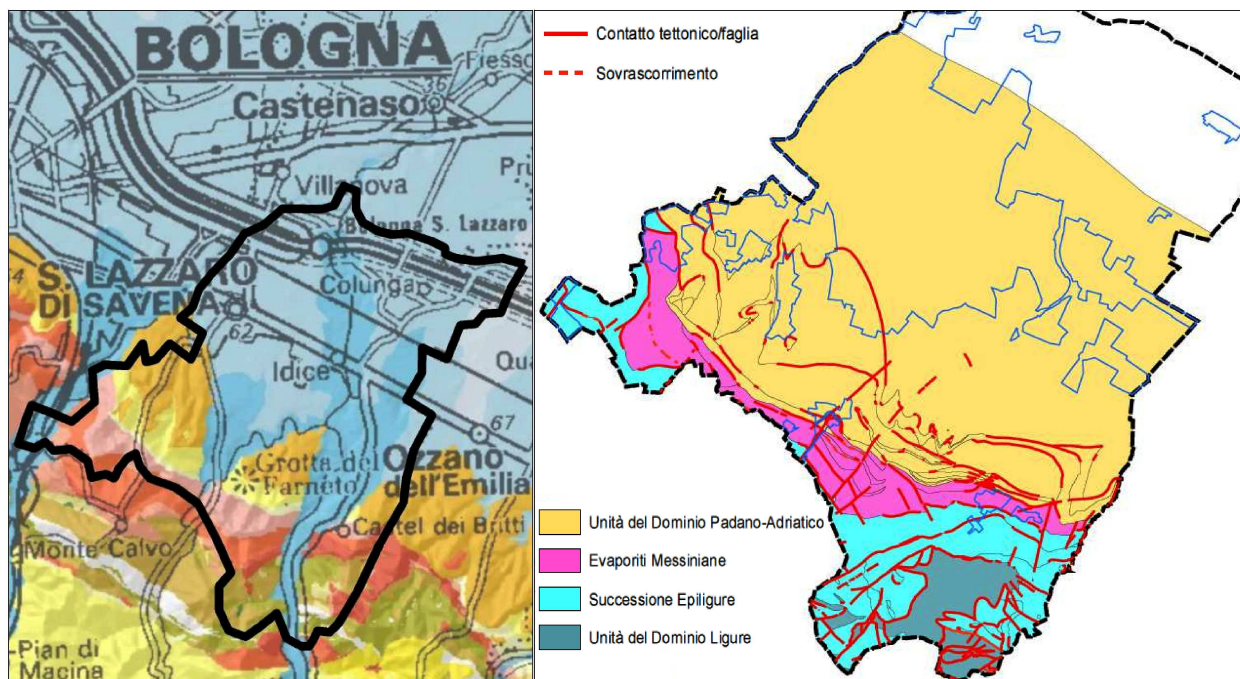


Figura 3.2 - A sx: schema geologico del territorio di San Lazzaro di Savena (in azzurro i depositi alluvionali intravallivi e di conoide Savena - Zena - Idice). A dx: schema geo litologico del territorio montano e collinare

La figura 3.2 offre un ulteriore schema del settore di catena appenninica del territorio in esame, caratterizzato da un generale assetto strutturale a falde sovrapposte che si sono dislocate a partire dal Miocene inferiore fino al Plio-Pleistocene. Il territorio collinare di San Lazzaro di Savena può essere schematicamente suddiviso nelle seguenti fasce:

1. la fascia più settentrionale (margine affiorante) caratterizzata dalle peliti e dalle arenarie poco cementate del Pliocene inferiore-Pleistocene (unità affioranti IMO, FAA) che insieme si immergono sotto i sedimenti alluvionali dell'antistante pianura ("monoclinale pedeappenninica" nordvergente). Questo raccordo con la pianura in realtà cela, come già scritto, le strutture geologiche sepolte che sono evidenziate in figura 3.1. Il sollevamento connesso alla tettonica attiva di "thrust" pedeappenninico ha determinato anche il basculamento/sollevamento delle coperture alluvionali più antiche (tardo Pleistocene) che ricoprono le Unità marine appenniniche del margine affiorante. Le formazioni a tessitura prevalentemente argillosa (FAA) sono facilmente degradabili e possono evolvere in calanchi, ed altre forme di erosione superficiale;
2. la fascia degli affioramenti delle unità evaporitiche messiniane (Formazione Gessoso-Solfifera GES) che interessano i territori studiati di Castel dei Britti, Farneto e Ponticella. Questa dorsale gessosa, si sviluppa prevalentemente in direzione SO-NE ed è caratterizzata da forme di carsismo anche di rilievo geologico-naturalistico (es. grotta del Farneto). Le azioni deformative tettoniche indotte dal sollevamento dei gessi (iniziato in concomitanza con l'avanzamento del fronte appenninico dal Messiniano superiore) e le diverse caratteristiche reologiche delle rocce coinvolte hanno prodotto "smembramenti" e dislocazioni nella stessa Formazione che risulta in contatto discordante oppure tettonico sia con i sedimenti soprastanti più recenti (FAA plioceniche ed FCO del Messiniano superiore),

sia con i sottostanti depositi epiliguri e liguri;

- una grande struttura anticlinale che interessa il territorio comunale più meridionale (vedi profilo di figura 3.2) e più in particolare anche l'areale di Case Grandi e parte della frazione Castel dei Britti. Al suo nucleo mostra unità geologiche più antiche e fortemente tettonizzate: Liguridi e unità Epiliguri. Questa anticlinale è distinta strutturalmente e stratigraficamente dalla “sinclinale intrappenninica bolognese” (che risulta parzialmente alloctona e con sedimenti attribuiti anche al Pliocene inferiore secondo Ricci Lucchi, 1982) ed è caratterizzata da unità geologiche fortemente tettonizzate a tessitura prevalentemente argillosa e caotica o caoticizzata ed interessate di norma da una notevole instabilità potenziale e da processi d’erosione che coinvolgono la loro porzione più superficiale (coltre più alterata).

Nel Quaternario medio inferiore (Villafranchiano p.p.) i depositi di margine della catena suturano definitivamente ogni struttura disgiuntiva (figura 3.1): ciò è importante anche per comprendere la “storia” sismica dell’area. Le successioni marine sub affioranti sono inoltre troncate al tetto dai depositi ghiaiosi e sabbiosi alluvionali del “Supersistema Emiliano-Romagnolo” di età Pleistocenica medio-superiore (figura 3.3). Nel territorio studiato, questi depositi sono presenti in lembi discontinui entro le valli appenniniche (corrispondono a depositi di terrazzi intravallivi) mentre occupano interamente il settore di pianura (sistema conoide Savena - Zena - Idice).

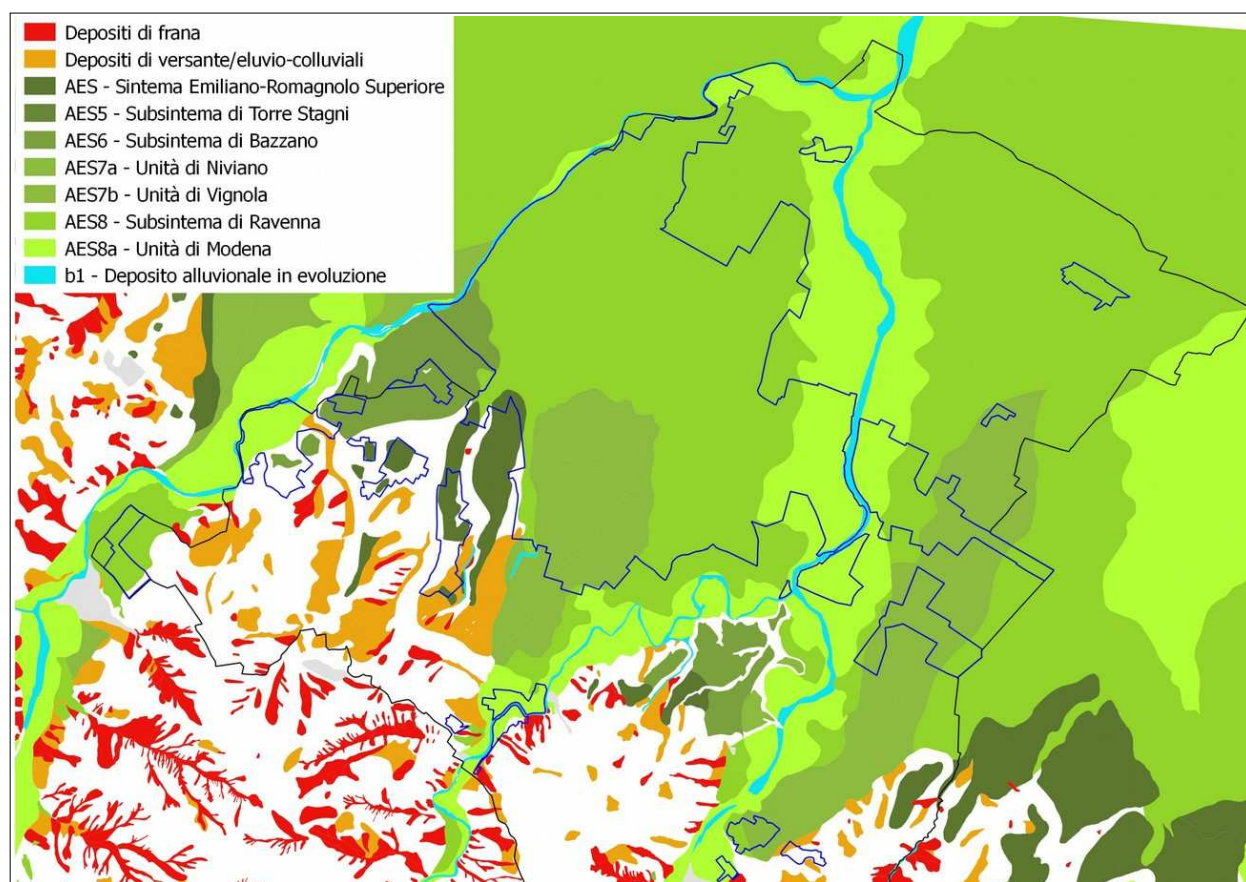


Figura 3.3 – Depositi continentali quaternari nel territorio studiato di San Lazzaro di Savena (alluvionali; di versante/eluvio-colluviali; frane)

Gli spessori dei depositi del “Supersistema Emiliano–Romagnolo” possono superare i 3000 metri di profondità, verso la pianura. Il Supersistema Emiliano–Romagnolo raggruppa, tutti i depositi alluvionali affioranti (e sepolti) ed è caratterizzato alla sua base da una superficie di discontinuità che lo separa da tutti i depositi marini sottostanti. All'interno del Supersistema è stata riconosciuta una superficie di discontinuità (età: 350.000÷450.000 anni – Pleistocene medio) che separa tra loro due unità definite “sistemi”: quello inferiore è denominato Sistema Emiliano–Romagnolo Inferiore (AEI) e affiora solamente allo sbocco in pianura di alcune aste vallive ed è caratterizzata da depositi di piana alluvionale o di conoide alluvionale. Quello superiore è denominato Sistema Emiliano–Romagnolo Superiore (AES) e affiora in tutti i settori intravallivi che in pianura ed è costituito da sedimenti di piana intravalliva, di conoide e di piana alluvionale.

Nei successivi paragrafi verranno descritte con maggior dettaglio le unità marine sub affioranti e i depositi quaternari che interessano il territorio studiato di San Lazzaro di Savena.

3.2 Depositi continentali quaternari

La base conoscitiva è rappresentata dalla Carta Geologica dell'Emilia–Romagna alla scala 1:10.000, consultabile anche on line nel sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia–Romagna¹. Un ulteriore riferimento per questo lavoro, è rappresentato anche dalla Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (progetto CARG)².

Occorre anche rammentare che le citate cartografie geologiche regionali e nazionali distinguono le coperture alluvionali comprese in AES secondo la convenzionale classificazione stratigrafica sequenziale (cicli deposizionali), comprese nel principale “Supersistema Emiliano–Romagnolo” (R.E.R., ENI–AGIP, 1998). I depositi alluvionali attribuiti AES sono suddivisi in quattro principali sequenze deposizionali di diverso ordine gerarchico (subsistemi identificati con sigle da AES5 – più antichi – ad AES8 – più recenti).

Depositi “AES8” (Subsistema di Ravenna) → Si tratta di sedimenti che nei settore intravallivi del Savena e Idice risultano ghiaiosi passanti a sabbie e limi anche argillosi. Nello sbocco vallivo dell'Idice e nella relativa piana alluvionale di conoide, i depositi sono caratterizzati ancora da ghiaie (anche sub–affioranti), sabbie, limi e argille. L'età deposizionale è attribuita al Pleistocene sup– Olocene. Si rileva, inoltre, un ordine di terrazzo di rango inferiore, attribuito alla più recente Unità di Modena (sigla AES8a), di età Olocene – Attuale. Questi depositi, risultano morfologicamente distinti dalle alluvioni AES8 da scarpate di erosione fluviale; dal punto di vista tessiturale, queste alluvioni risultano prevalentemente ghiaiose e ciottolose nel settore intravallivo (più fini nel fondovalle del torrente Zena); verso gli sbocchi vallivi risultano ancora caratterizzati da ghiaie, sabbie e limi.

Depositi “AES7” (Subsistema di Villa Verrucchio) → nell'area di studio sono attribuiti a questo

¹ Cartografia interattiva consultabile on line: https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss.

² E Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (Foglio 220 – Casalecchio di Reno)

Subsistema alcuni importanti depositi terrazzati di piana intravalliva affioranti lungo le valli e agli sbocchi vallivi (conoide prossimale) dei torrenti Zena e Idice (es. in località Pulce e località Ca' de Mandorli). Occorre precisare che il deposito terrazzato di conoide alluvionale in sinistra idrografica allo sbocco vallivo del torrente Zena è stato attribuito sia al sottogruppo AES7a (Unità di Niviano), costituita da ghiaie sub-affioranti, sia al secondo sottogruppo AES7b (Unità di Vignola). A quest'ultima unità vengono attribuite anche alluvioni terrazzate ghiaiose in destra Idice che interessano il fondovalle di Castel dei Britti, Ca' de Mandorli e fino a più a nord (via Valfiore e via San Lazzaro.). L'età deposizionale è attribuibile al Pleistocene superiore.

Depositi "AES6" (Subsistema di Bazzano) → è costituita da depositi di conoide alluvionale terrazzati affioranti agli sbocchi vallivi del Savena, Zena e Idice. In particolare, risultano sub-affioranti in limitati lembi terrazzati a Ponticella e più a nord presso Villa Roncaglia e Villa S. Giacomo. Si tratta di alluvioni prevalentemente ghiaiose e spesso sormontate da depositi fini (limi argillosi o sabbiosi; sabbie) di modesto spessore nei settori in affioramento (fino a circa 10 metri) e contatto inferiore erosivo con il bedrock marino IMO (Sabbie Gialle). Età deposizionale complessivamente attribuibile al pleistocene superiore.

Depositi "AES" indifferenziati → si tratta di sedimenti interfluviali (depositi di paleo conoide) della porzione basale del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (di età attribuibile al Pleistocene medio), di difficile attribuzione ai subsistemi e prevalentemente caratterizzati da limi sabbiosi e/o sabbie limose. Nell'area di studio risultano affiorare con caratteristiche geometrie cuneiformi (blandamente basculate verso NNE), presso le località Croara e Martiri di Pizzocalvo, inoltre nel limite meridionale del Capoluogo.

Depositi eluvio-colluviali → riscontrabili al piede del versante sottostante Castel dei Britti e formati dal disfacimento per alterazione "in situ" o selezionato dall'azione mista delle acque di ruscellamento e della gravità.

Depositi di frana → la cartografia geologica regionale rileva alcune forme di dissesto di versante interferenti con alcune aree studiate (Farneto e Ponticella). Si tratta di movimenti di frana quiescenti con meccanismi d'innescio per scivolamento e/o colamento e che dovranno essere oggetto di ulteriori approfondimenti per stabilirne l'effettiva condizione di instabilità in caso di sisma.

3.3 Substrato geologico marino

La base conoscitiva è ancora rappresentata dalla Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000 e dalla Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (progetto CARG).

SUCCESSIONE POST-EVAPORITICA DEL MARGINE PADANO-ADRIATICO:

Sabbie di Imola (IMO) → questa unità affiora diffusamente al margine appenninico e rappresenta la più recente tra le unità marine dell'appennino. Sono costituite da depositi sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi, di ambiente costiero e subordinatamente da peliti di piana alluvionale e laguna. Le Sabbie Gialle sono state convenzionalmente suddivise in tre sub unità (membri), corrispondenti a differenti cicli deposizionali: nell'area di studio risultano affiorare

depositi IMO1 (membro di Monte Castellaccio) corrispondenti a sabbie e ghiaie del ciclo basale trasgressivo, e depositi IMO3 (membro di Castel San Pietro) corrispondenti alle sabbie di tetto del secondo ciclo trasgressivo. Nel territorio di San Lazzaro di Savena, risultano in affioramento presso le località Ponticella, Croara e Martiri di Pizzocalvo. Le Sabbie gialle sono attribuibili alla parte terminale del Pleistocene inferiore e Pleistocene medio.

Argille Azzurre (FAA) → si tratta di argille, argille marnose, marne argillose e siltose grigie e grigio-azzurre (con subordinati strati arenacei) di ambiente deposizionale variabile da scarpata a piattaforma (localmente litorale). Nel territorio studiato, il suo limite inferiore è netto, discordante sulle unità più antiche TER, GES e FCO. Risultano in affioramento presso Ponticella. Età deposizionale: Pliocene inferiore – Pleistocene inferiore.

Formazione a Colombacci (FCO) → depositi di ambiente di transizione (da continentale a lago – mare) prevalentemente argillosi, talora marnosi e siltosi, grigio – verdi, con intercalati strati sabbiosi generalmente sottili e livelli spessi di calcari (denominati “colombacci”). Non risultano affiorare nel territorio di studio e tuttavia costituiscono localmente il bedrock marino (sottostante a depositi alluvionali) presso Farneto. Il contatto inferiore è discordante su GES. Età deposizionale: Messiniano superiore.

SUCCESSIONE EVAPORITICA MESSIANIANA:

Formazione Gessoso – Solifera (GES) → depositi di ambiente deposizionale evaporitico/lagunare, costituiti da banchi di gesso selenitico (con cristalli geminati a “coda di rondine”), oppure gessoareniti o gessoruditi, che si alternano ad argille siltose bituminose grigio scure o nerastre e sottili livelli siltitici. Il limite inferiore è netto su TER. Nell'area di studio risultano in affioramento (oppure sovrastati da depositi quaternari) presso Castel dei Britti. In queste unità si sviluppano anche numerose cavità ipogee. Età deposizionale: Messiniano inferiore.

SUCCESSIONE EPILIGURE:

Formazione del Termina (TER) → depositi di ambiente deposizionale di scarpata e piattaforma esterna, costituiti da marne argillose, talora siltose grigio scure e localmente bituminose, con rari strati arenacei. Nell'area di studio il limite inferiore è netto su CIG e PAT e affiorano (oppure sovrastati da depositi quaternari) presso Case Grandi, Castel dei Britti, Farneto e Ponticella. Età deposizionale: Tortoniano.

Formazione di Cigarello (CIG) → depositi di ambiente deposizionale di piattaforma esterna e scarpata, con locali fenomeni torbiditici (frane sottomarine). Sono costituiti da marne siltose – argillose generalmente grigie – beige in strati medi e spessi e con alternati arenarie siltose medio – fini. Il limite inferiore passa gradualmente a PAT e nell'area di studio non risultano in affioramento ma sovrastati da depositi alluvionali (fondovalle presso Castel dei Britti). Età deposizionale: Langhiano – Tortoniano (parte basale).

Formazione di Pantano (PAT) → depositi di ambiente deposizionale variabile da litorale e piattaforma esterna. Sono costituiti da arenite siltose fini e finissime grigie – beige, alternate a peliti marnose grigio chiare. Verso l'alto compaiono livelli di marne siltose grigio azzurre.

Nell'area di studio affiorano (oppure risultano sovrastati da depositi quaternari) presso Case Grandi.

3.4 Ulteriori elementi geomorfologici: la conoide alluvionale Savena – Zena – Idice

Un'ampia porzione del territorio urbanizzato di San Lazzaro si insedia su depositi alluvionali che costituiscono il complessivo corpo della conoide coalescente più “recente” (Pleistocene superiore → Olocene), attribuibile ai torrenti Zena, Idice e Savena. Questa forma deposizionale è ben distinguibile in figura 3.4, ove si riportano le isoipse ricostruite (per questo lavoro) basandosi sui punti quotati della CTR regionale. In tal senso, è possibile distinguere la sua parte “prossimale” (con quote maggiori e pendenze elevate) e la sua porzione “mediana”, caratterizzata da quote inferiori e minore acclività (figura 3.5).

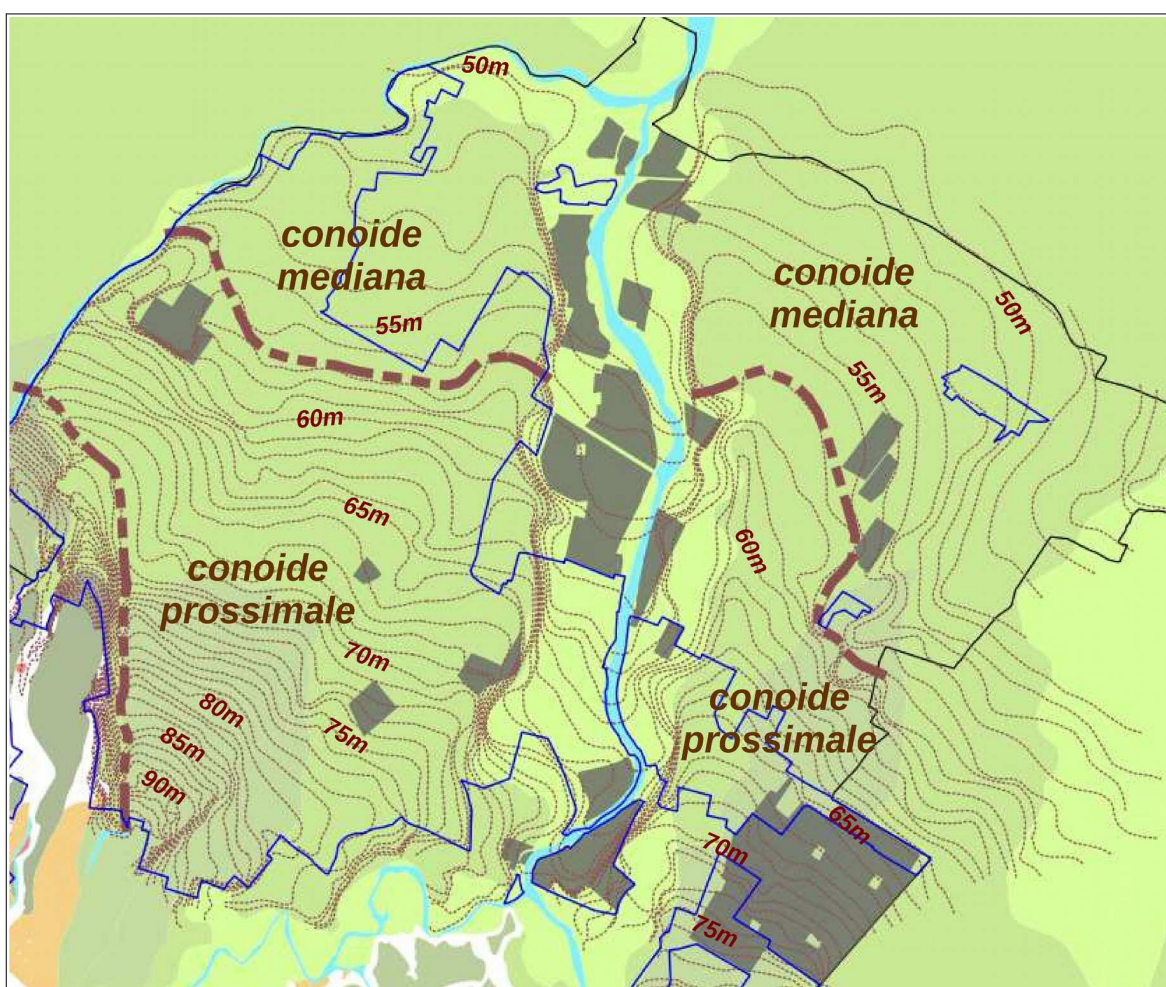


Figura 3.4 - Delimitazione della conoide alluvionale recente formata dai corsi d'acqua Zena, Idice e Savena, basata sull'analisi delle isoipse ricostruite per questo lavoro. La figura riporta le aree di studio settentrionali, le isoipse (quote in metri slm), inoltre le aree di cava (grigio scuro) e gli alvei attivi (azzurro)

È interessante evidenziare come i settori di conoide prossimale e mediana i corsi d'acqua Zena, Idice e Savena risultino incassati nel corpo sedimentario, con pendenze inferiori a quella del conoide stesso; ciò ha prodotto un classico terrazzamento convergente dei depositi e riconducibile a tre principali cause (Eckis, 1928): 1) sollevamento tettonico; 2) riduzione del gradiente del canale; 3) cambiamenti climatici. È presumibile che tutte e tre le citate cause

abbiano concorso alla conformazione dell'attuale conoide. Come vedremo nel capitolo 5, i settori di conoide terrazzata più acclivi (prossimale) corrispondono ai depositi alluvionali sub-affioranti relativamente più antichi (unità AES7a/b), caratterizzate da maggior grado di rigidità (maggiori velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio) rispetto ai depositi di conoide più settentrionali (località Borgatella; Colunga; Mirandola).

Le quote topografiche sono comprese tra oltre 95 metri slm presso la frazione Pulce a circa 45 metri slm nel settore nord orientale del territorio comunale.

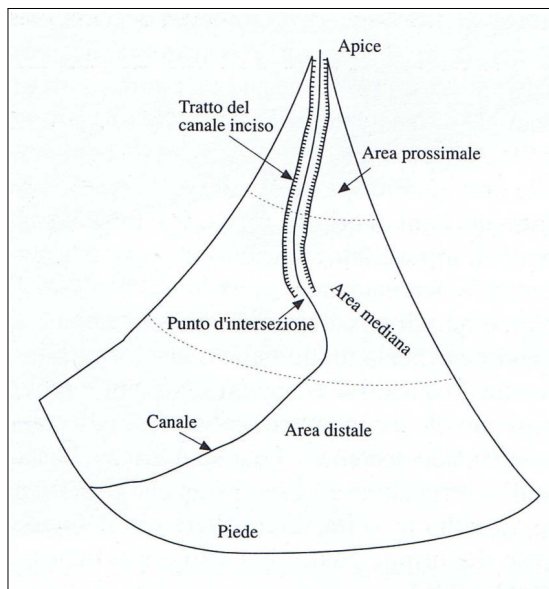


Figura 3.5 - Nomenclatura di un conoide alluvionale (da "geomorfologia fluviale" di M. Marchetti, ed. Pitagora)

3.5 Idrogeologia

Riprendendo quanto scritto nella Relazione Geologica (dr. geol. G. Viel, 2006), elaborata per il PSC in forma associata dei Comuni dell'Associazione Valle Idice (della quale San Lazzaro di Savena faceva parte), nel territorio studiato si riscontra un'ampia area di depressione piezometrica tra Ozzano e San Lazzaro di Savena con quota dinamica di circa 15 metri slm, cioè con soggiacenze >40 metri (dati ex IDROSER ora ARPA) e con disturbo provocato sulla geometria piezometrica tuttavia molto molto più vasto (figura 3.6).

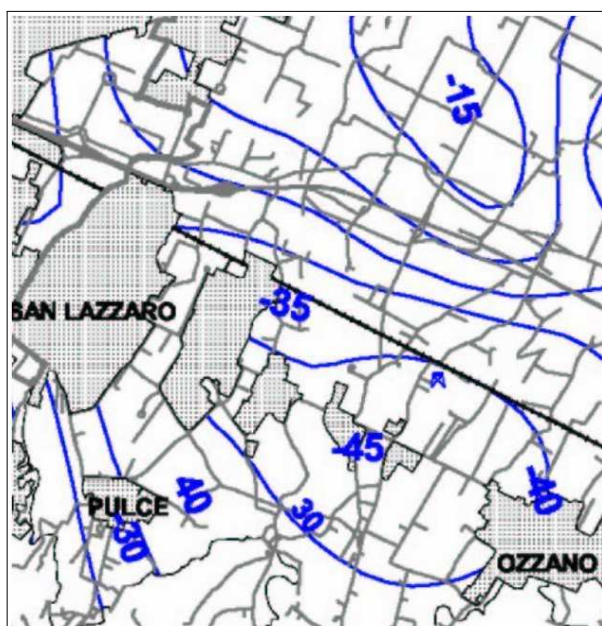


Figura 3.6 - Soggiacenza media della falda calcolata sui punti di controllo IDROSER/ARPA (1996). Figura ripresa dalla Rel. Geologica PSC Comuni Valle Idice (dr. geol. G. Viel, 2006)

La distorsione della geometria del tetto piezometrico è collegata alla presenza del campo di sollevamento di Mirandola (HERA), che è immediatamente a settentrione della quota di

maggiore soggiacenza. L'ampiezza dell'area superficiale interessata da questo processo di depressurizzazione delle falde profonde ha occupato un ampio areale fino al pedecollina nei periodi di massimo prelievo (anni '90 del secolo scorso) e tuttavia con effetti ancora chiaramente evidenti.

Lo studio geologico elaborato per il PSC ha consentito il rilievo (2006) delle quote d'acqua in circa 200 pozzi freatici distribuiti nel pedecollina e nella pianura dell'Associazione Comunale Valle Idice. La figura 3.7 riporta uno stralcio della carta idrogeologica prodotta alla scala 1:10.000: lo studio aveva confermato l'ampia zona di pianura (conoide) caratterizzata da quote d'acqua inferiori a 25 metri oppure non rilevabili. Il torrente Idice risulta drenante in tutto il suo corso di alta pianura (conoide) e solamente in corrispondenza del confine settentrionale di Castenaso le isofreatiche mostrano la tendenza ad invertire la loro geometria. Anche il torrente Savena, nel territorio studiato, risulta drenare i suoi depositi più recenti, tuttavia nel suo tratto immediatamente a valle dell'autostrada potrebbe svolgere un ruolo infiltrante (sebbene con soggiacenze >5 metri).

Occorre evidenziare che le due prove penetrometriche CPTU, eseguite per ottenere ulteriori informazioni sulla liquefacibilità dei sedimenti (cfr. paragrafo 7.5), hanno confermato la presenza di importanti spessori di sedimenti superficiali insaturi.

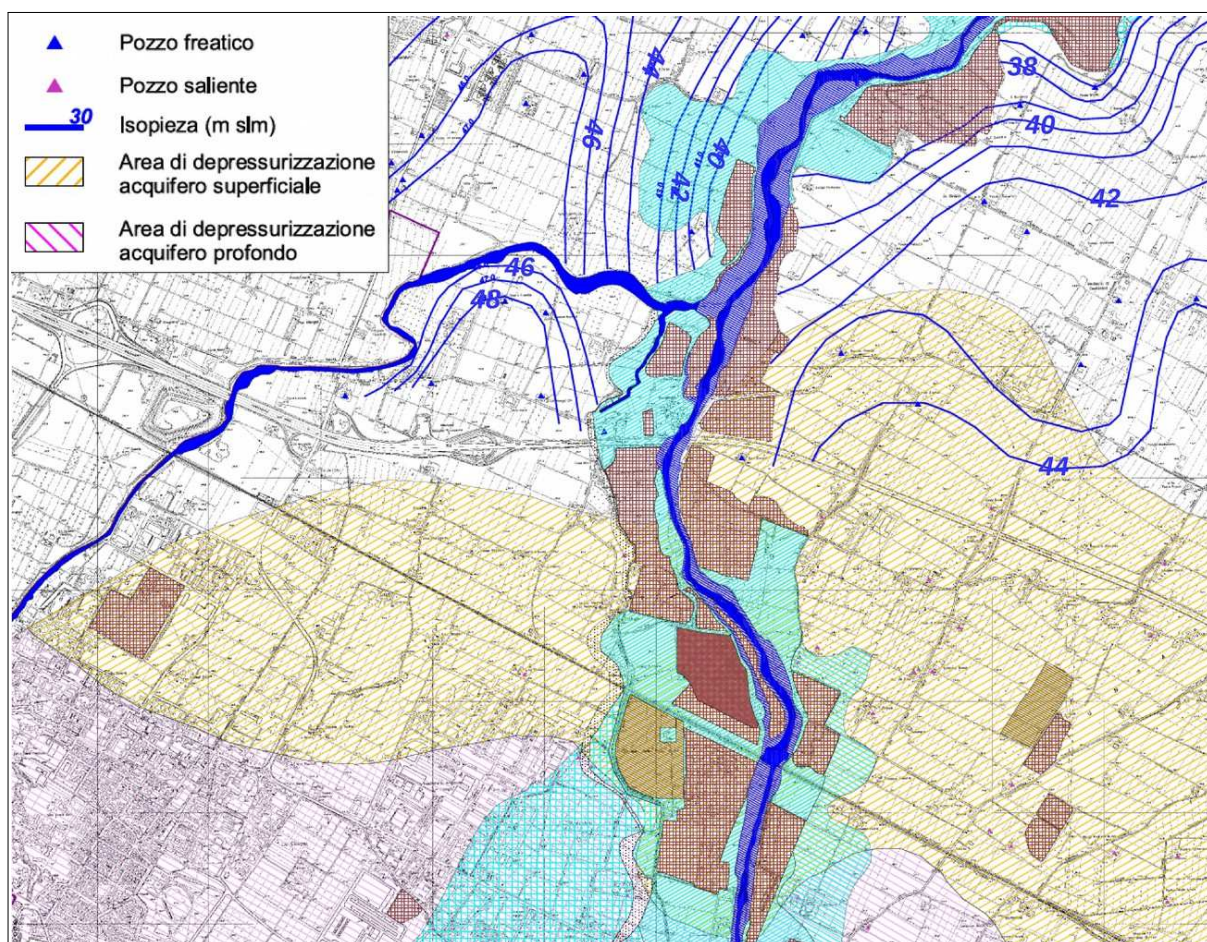


Figura 3.7 – Stralcio della “Carta Idrogeologica” (elaborato SI.B.1.2a, scala 1:10.000) e relativa legenda elaborate per il Quadro Conoscitivo del PSC dell'Associazione Intercomunale Valle dell'Idice (2006)

4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

4.1 Dati pregressi

La fase iniziale di lavoro ha previsto la raccolta, selezione e riordino delle indagini geognostiche/geofisiche e di laboratorio disponibili per il territorio di San Lazzaro di Savena. In questo senso, si è potuto disporre di un buon numero di prove che sono state raccolte e archiviate dalla Regione Emilia-Romagna e dal Comune e in particolare:

- ✓ dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, che ha fornito i dati della propria banca dati geognostica;
- ✓ prove geognostiche e geofisiche di repertorio fornite dall'Amministrazione comunale, relative a indagini geologiche archiviate presso l'Ufficio Tecnico e svolte nel territorio comunale per gli interventi più significativi di progettazione esecutiva (permessi di costruire) o per interventi di pianificazione (es: Variante Generale al Piano Regolatore e Varianti specifiche; Piani Particolareggiati; ecc.).

I dati utilizzati sono quelli delle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo e di alcuni pozzi per acqua, delle penetrometrie (DPL, DPSH e CPT/CPTU) indagini geofisiche (stendimenti rifrazione e MASW; registrazioni HVSR). Le prove pregresse, considerate per lo studio di microzonazione e implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per questo lavoro, risultano così distinte per tipologia:

- ✓ n. 66 carotaggi continui (S) di cui 5 hanno permesso il recupero di campioni, con analisi geotecniche effettuate in laboratorio "terre";
- ✓ n. 86 sondaggi a distruzione di nucleo
- ✓ n. 234 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)
- ✓ n. 11 prove penetrometriche con punta elettrica (CPTE)
- ✓ n. 28 prove penetrometriche dinamiche superpesanti (DPSH)
- ✓ n. 7 prove penetrometriche dinamiche medie (DM)
- ✓ n. 28 prove penetrometriche dinamiche leggere (DL)
- ✓ n. 39 pozzi per acqua
- ✓ n. 17 trincee o pozzetti esplorativi
- ✓ n. 3 profili sismici a rifrazione
- ✓ n. 9 stendimenti sismici attivi MASW;
- ✓ n. 39 registrazioni microtremori a stazione singola (HVSR)

Dall'analisi della distribuzione delle verticali delle numerose indagini geognostiche pregresse e dei dati ad esse associati, si è potuto quindi osservare che buona parte del territorio comunale, ed in particolare la sua porzione urbanizzata, presenta caratteristiche geomeccaniche dei terreni ben note, da cui emerge un quadro complessivamente chiaro e di buona correlabilità.

Relativamente alla qualità dei dati, nel corso dello studio di MS è chiaramente emerso che, data

l'eterogeneità dell'archivio, non sempre indagini della stessa tipologia possono essere ritenute allo stesso modo attendibili. Dal confronto di indagini analoghe eseguite da soggetti diversi, in tempi diversi sulla stessa area, si sono evidenziati risultati a volte non coerenti. Per quanto possibile lo studio di MS ha dunque espletato una prima valutazione speditiva sull'affidabilità dei dati raccolti, tenendone opportunamente conto in sede di elaborazione e di studio, della quale si è ulteriormente tenuto conto per questi ulteriori approfondimenti.

4.2 Le indagini eseguite per la microzonazione sismica

4.2.1 Indagini geognostiche

- n. 2 sondaggi a carotaggio continuo → (foto 4.1) spinti fino a -50 metri di profondità, eseguiti a Idice e nel Capoluogo (zona stadio Kennedy), finalizzati alla caratterizzazione dei depositi di conioide dell'Idice e Savena. Si è utilizzata una sonda autocarrata. La terebrazione è proceduta con l'utilizzo di carotieri di diametro pari a 101 mm di tipo semplice T1 e a corona normale, e hanno consentito il campionamento in continuo per la conseguente ricostruzione stratigrafica del terreno. Sono state effettuate manovre di carotaggio di lunghezza <1,5 m per consentire il miglior recupero dei sedimenti in termini di quantità e di minor disturbo. Il carotaggio estratto è stato sistemato in cassette catalogatrici in PVC per la successiva conservazione in luogo riparato. Gli ultimi 20 m sono stati approfonditi con distruzione di nucleo. I sondaggi sono stati predisposti per l'esecuzione delle successive prove sismiche in foro "Down-Hole" fino a -50 metri.

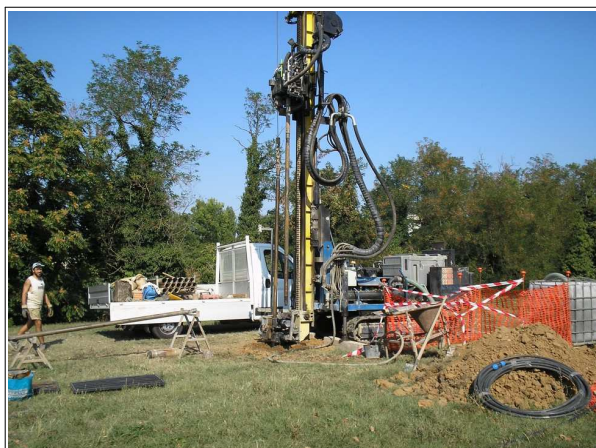
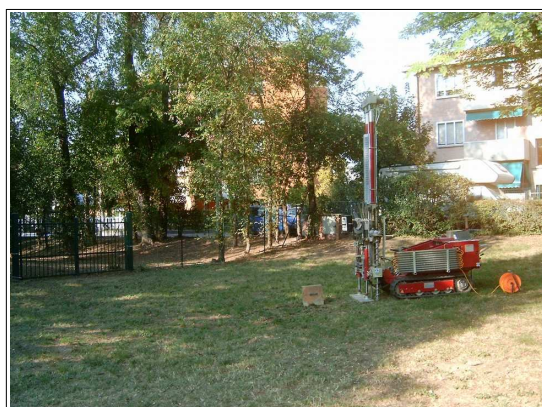


Foto 4.1 – Esecuzione dei sondaggi eseguiti in località Idice (a sx) e nel Capoluogo –stadio Kennedy (a dx)

- n. 8 prove penetrometriche dinamiche superpesanti (DPSH) → (foto 4.3) eseguite con mezzo semovente cingolato "Pagani" e spinte fino a "rifiuto strumentale";
- n. 2 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU) → eseguite con mezzo semovente cingolato "Pagani" e spinte fino a "rifiuto strumentale".

Foto 4.3 – Esecuzione della penetrometria DPSH in località Ponticella



4.2.2 Indagini geofisiche

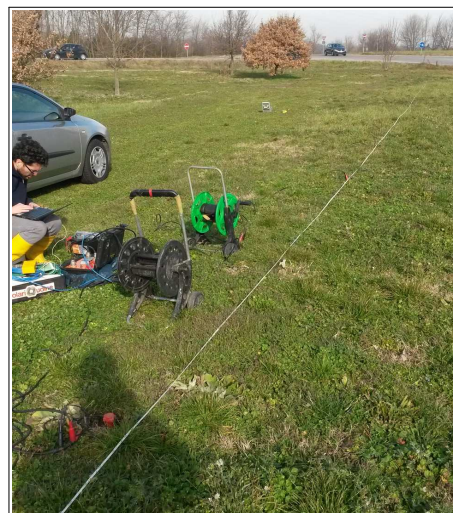
- n. 2 prove sismiche in foro “Down-Hole” → (foto 4.4) spinte fino a -50 metri di profondità, eseguite nei sondaggi di Idice e del Capoluogo (zona stadio Kennedy). La tecnica down-hole prevede la misura dei tempi di propagazione delle onde di compressione (P) e di taglio (S) tra il punto di energizzazione in superficie (shot) ed il punto di ricezione mobile in profondità entro il foro di sondaggio;

Foto 4.4 – prova “Down-Hole” e geofono utilizzato per le misure in foro



- n. 12 stendimenti combinati MASW/Re.Mi → (foto 4.5) Le prove MASW/ReMi hanno consentito la stima della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio (Vs) nel sottosuolo fino a circa -35÷40 metri di profondità. La metodologia per la realizzazione di una indagine sismica MASW/ReMi ha previsto acquisizioni dei segnali sismici con sismografo multicanale ABEM RAS24 a 24 canali, generati da sorgenti energizzanti artificiali lungo lo stendimento dei geofoni.

Foto 4.5 – Esecuzione dello stendimento sismico MASW/Re.Mi. in località Ca' de Mandorli



- n. 63 registrazioni microtremori a stazione singola (HVSR) → (foto 4.6) con registrazioni di 20 minuti e frequenza di campionamento di 128 Hz, eseguite con strumento “Tromino” della Micromed.

Foto 4.6 – Esecuzione di una registrazione dei microtremori sismici HVSR presso la frazione Martiri di Pizzocalvo



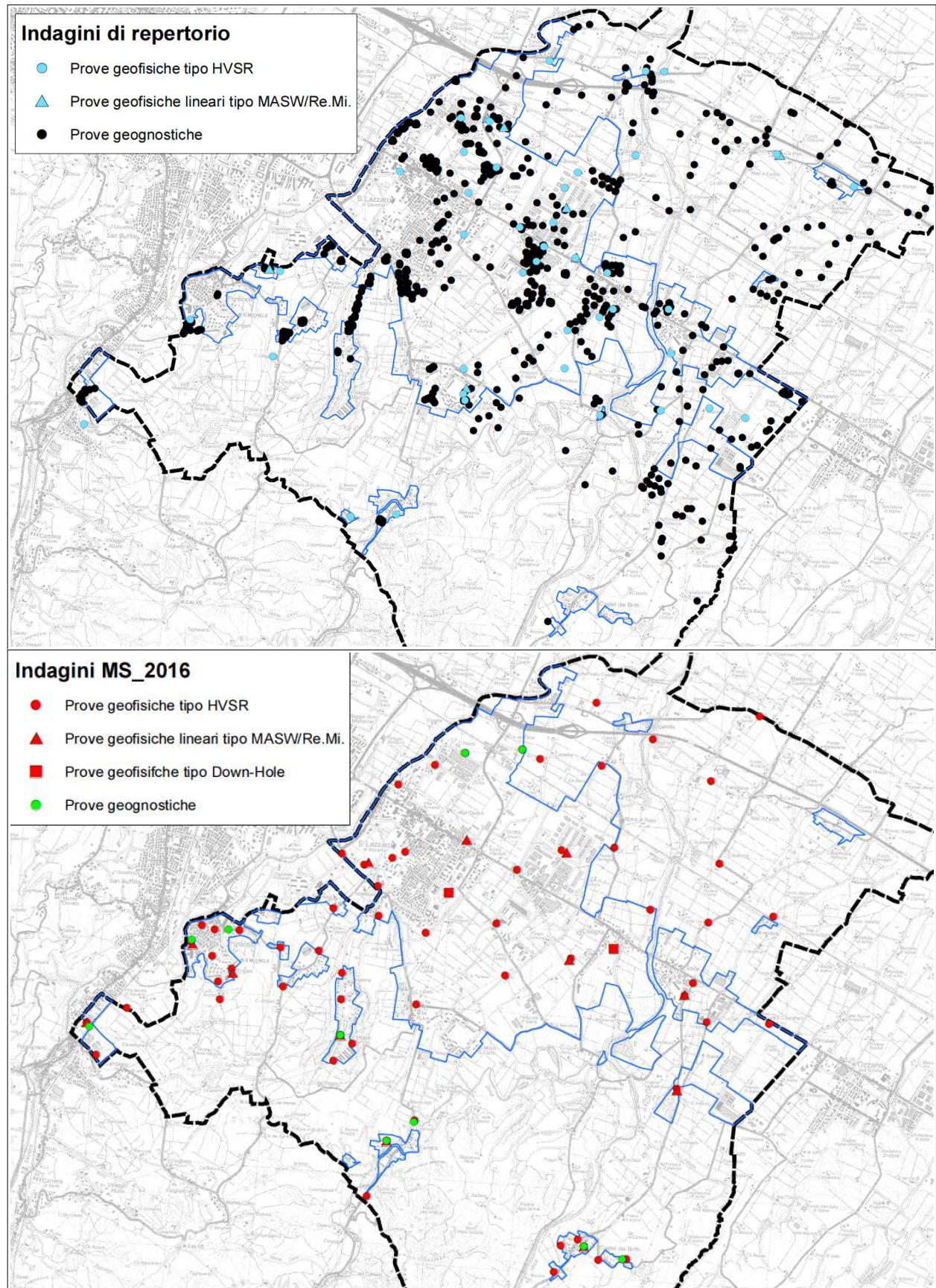


Figura 4.1 - Localizzazione delle indagini di repertorio (in alto) e delle indagini integrative (in basso) eseguite per questo studio

5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Il contesto geologico generale, descritto nel capitolo 3 e gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili e di nuova esecuzione hanno permesso la classificazione e la modellazione del sottosuolo finalizzata alla caratterizzazione sismica.

Nei seguenti paragrafi vengono descritti gli elementi ritenuti essenziali ai fini della caratterizzazione sismica delle aree studiate.

5.1 Areali frazione Castel dei Britti

Il nucleo storico della frazione è costruita su una cresta di gessi (GES) in affioramento, tuttavia di modesta altezza. Il sedime della chiesa (inagibile per cedimenti e crolli) è situata ad una quota di circa 157 m s.l.m. In prossimità della chiesa sono state eseguite una penetrometria DPSH e una registrazione HVSR che hanno evidenziato la presenza di substrato affiorante alterato (la DPSH si è arrestata a -4,4 m) e amplificazioni a medie frequenze (f_0 circa 4,6 Hz). La presenza di inghiottitoi e numerose cavità (naturali e antropiche) scavate nei gessi, di piccoli crolli e cedimenti di scarpata, impongono attenzione nella caratterizzazione sismica locale e ulteriori approfondimenti sismici.

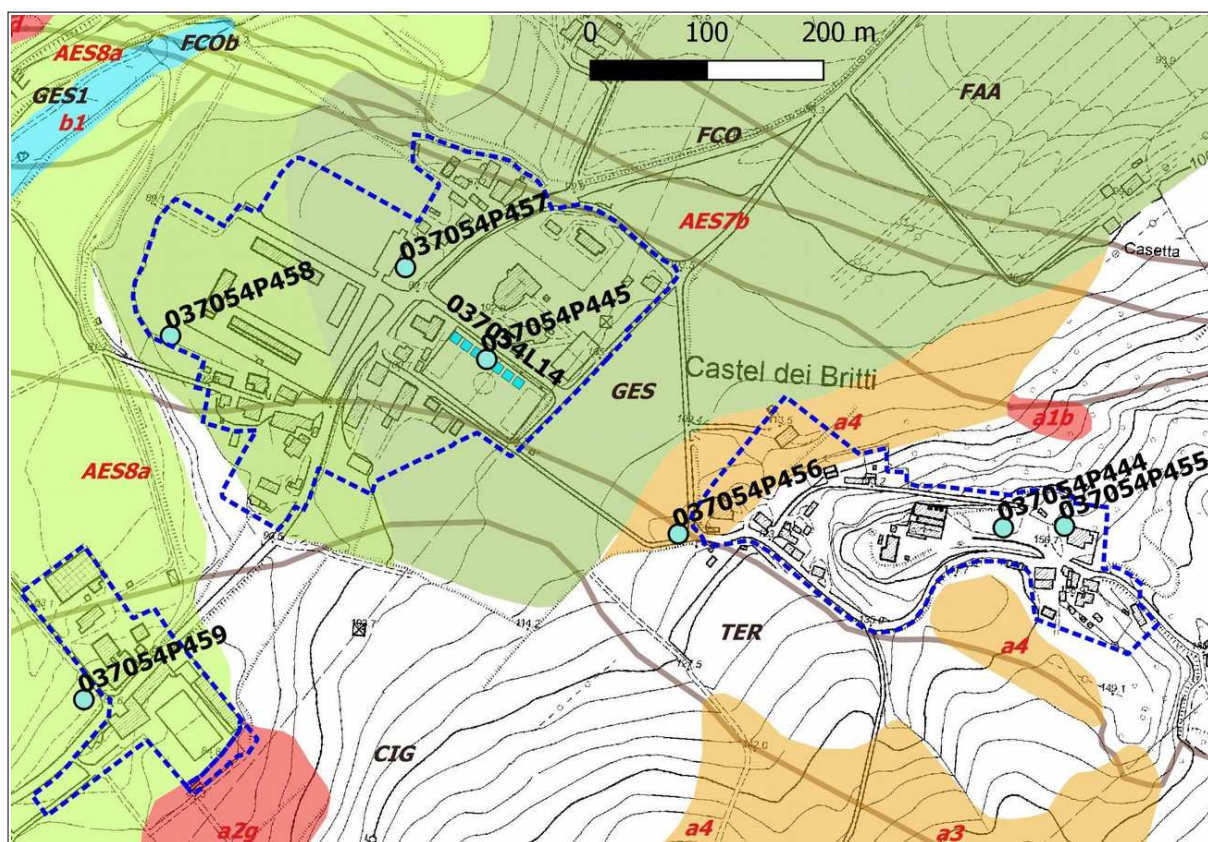


Figura 5.1 - Area di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

La prova MASW (L14) eseguita nell'abitato recente ha evidenziato Vs del substrato GES comprese tra 500 m/s e 650 m/s (figura 5.2).

Il versante sottostante la cresta affiorante è caratterizzata da coperture eluvio-colluviali da disfacimento del bedrock gessoso di modesto spessore (<5÷7 m), come desunto dalle frequenze di amplificazione ricavate dalla registrazione HVSR (P456) con f_0 a circa 16,4Hz.

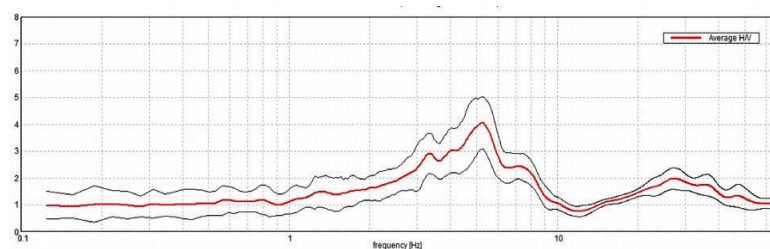
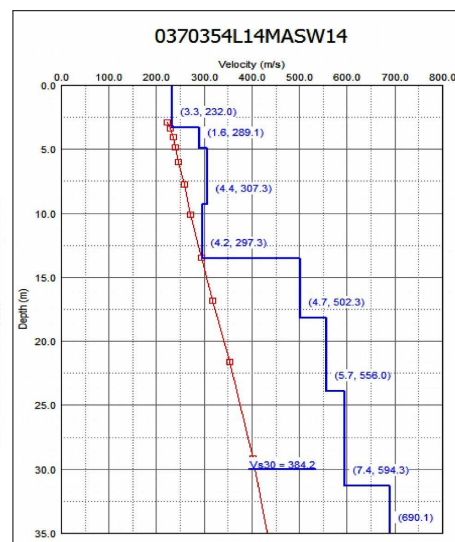


Figura 5.2 - stendimento MASW (L14: alluvioni e substrato GES) eseguito a Castel dei Britti e registrazione HVSR (P457)



La parte di frazione più recente è invece situata in un contesto di fondovalle del torrente Idice e insediata su depositi alluvionali (unità AES8/AES8a e AES7b) sovrastanti il bedrock marino (TER; GES; FCOa?). Le indagini eseguite (penetrometria DPSH; MASW; registrazioni HVSR) evidenziano uno spessore della coltre alluvionale e del sottostante bedrock alterato relativamente costante nella parte di fondovalle studiato (circa 13÷17 m) con frequenze di f_0 registrate comprese tra 5,2 Hz e 7,3 Hz (riconducibili all'amplificazione di tale complessivo intervallo).

5.2 Areali frazione Farneto

La frazione di Farneto è situata nel fondovalle del torrente Zena e insediata su depositi alluvionali recenti (unità AES8a) sovrastanti il bedrock marino (FAA; GES; TER). Le penetrometrie di repertorio e le indagini eseguite (penetrometria DPSH; MASW; registrazioni HVSR) evidenziano uno spessore della coltre alluvionale e del sottostante bedrock alterato relativamente costante nella parte di fondovalle studiato (fino a circa 10÷12 m) con frequenze di f_0 registrate comprese tra 11,9 Hz e 8,1 Hz (riconducibili all'amplificazione di tale complessivo intervallo). Si precisa che una porzione del piede di versante situato a monte della strada provinciale Zena è caratterizzato da substrato roccioso sub-affiorante (GES), come dimostrato dall'esito della registrazione HVSR privo di amplificazioni significative.

È stato inoltre studiato l'areale corrispondente agli stabilimenti delle ex cave di gesso, mediante registrazione sismica HVSR (P439): le amplificazioni H/V riscontrate alle alte frequenze (f_0 circa 10,3 Hz) sono imputabili a uno spessore alterato del substrato GES valutabile in circa 5÷7 m.

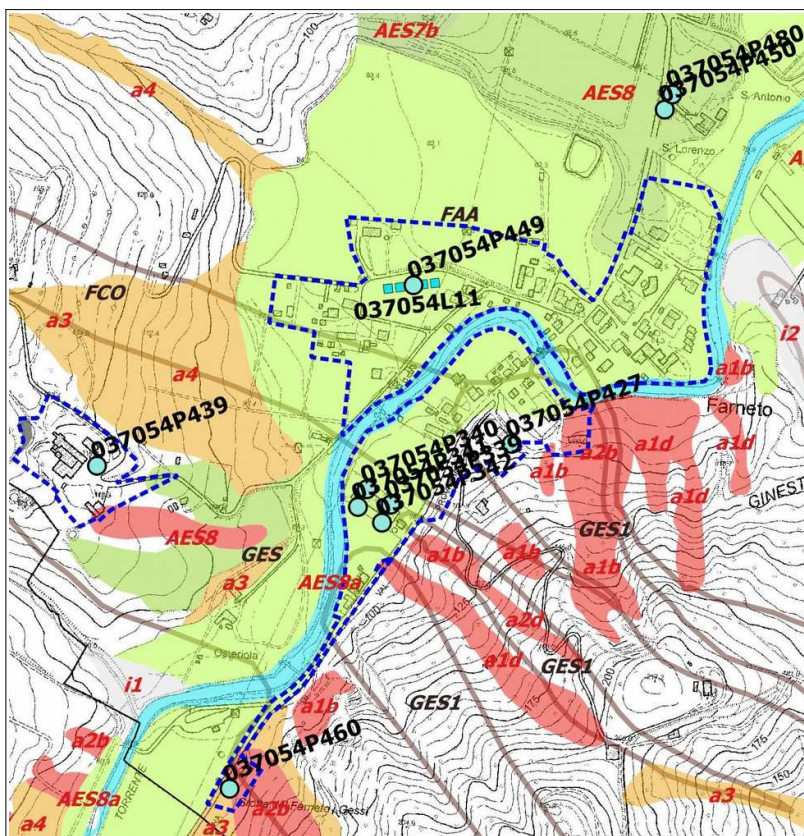


Figura 5.3 – Area di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

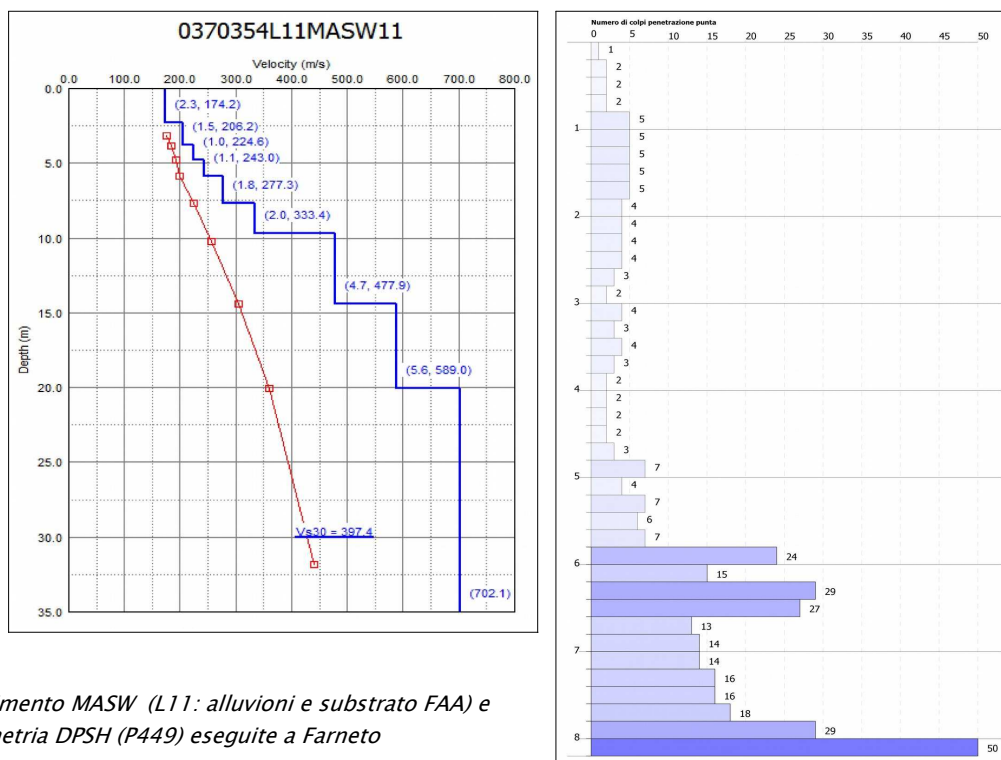


Figura 5.4 – stendimento MASW (L11: alluvioni e substrato FAA) e penetrometria DPSH (P449) eseguite a Farneto

5.3 Areale “Case Grandi”

L'areale “Case Grandi” è collocato nel fondovalle del torrente Savena e insediato su depositi alluvionali recenti (unità AES8/AES8a) sovrastanti bedrock marino (GES; TER; PAT). Si tratta di uno spessore alluvionale di modesto spessore (fino a 5÷7 m), come dimostrano le prove di

repertorio e la prova DPSH (P446) eseguita per questo lavoro (“rifiuto” strumentale a -5,6 m). Lo stendimento MASW (L12) evidenzia esiti di Vs nel substrato roccioso PAT comprese tra 500 m/s e 700 m/s.

Le registrazioni HVSR evidenziano frequenze di f_0 comprese tra circa 10 Hz e 11,3 Hz, riconducibili all'amplificazione di tale complessivo intervallo.

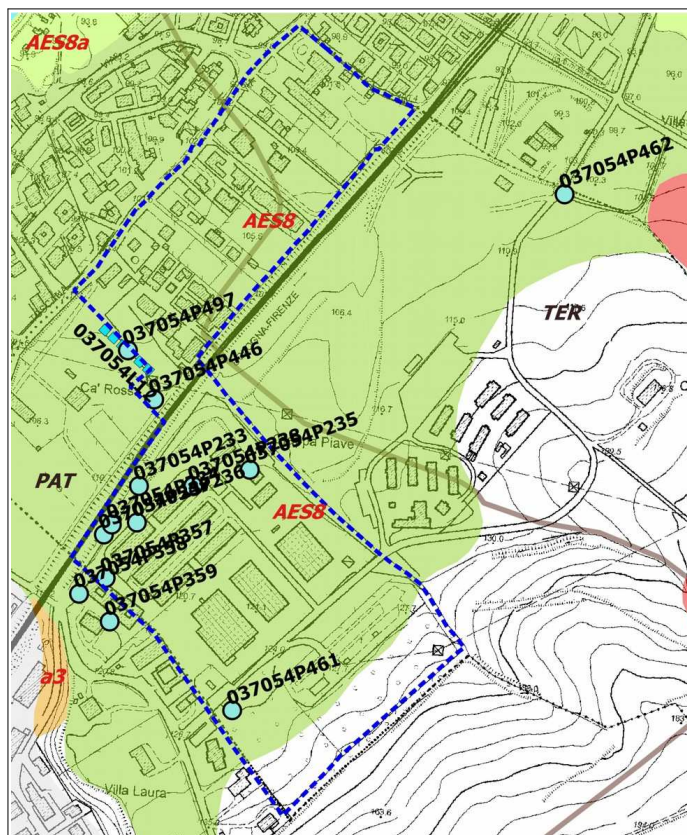


Figura 5.5 - Area di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

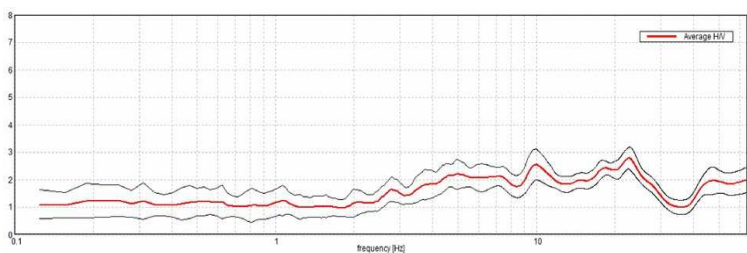
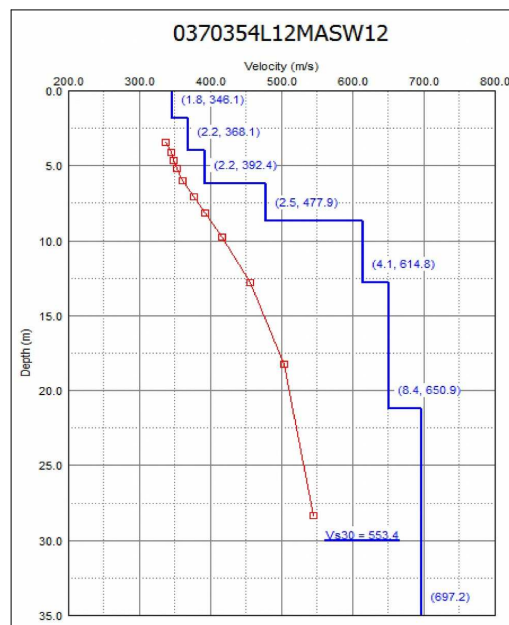


Figura 5.6 - stendimento MASW (L12: alluvioni e substrato PAT) e penetrometria DPSH (P497) eseguite a Case Grandi



5.4 Frazione Ponticella

La frazione Ponticella è situata nel versante in destra idrografica del torrente Savena. L'insediamento urbano si spinge dal versante fino al fondovalle, a ridosso dell'alveo attivo. Il fondovalle è caratterizzato da uno spessore di alluvioni recenti (AES8a) di modesto spessore,

come risulta dalle prove geognostiche di repertorio, dalle due prove DPSH (P448; P451) eseguite (coltre alluvionale rispettivamente di 2 e 5 metri) e come facilmente appurabile osservando le scarpate fluviali in sinistra del Savena, nei pressi del parco di Villa Brizzi (GES sub-affiorante). Occorre precisare che la prova P551DPSH ha inoltre attraversato il substrato pelitico più alterato FAA fino al “rifiuto” strumentale.

Altro importante elemento, ai fini della risposta sismica locale, è la presenza del bedrock GES e TER nel settore occidentale di Ponticella (GES sub-affioranti nel versante), mentre la parte orientale è caratterizzata dal bedrock pliocenico FAA e pleistocenico IMO1 (anch'essi sub-affioranti nel versante). Le registrazioni HVSR evidenziano amplificazioni a frequenze medio alte (f_0 da 6,3 a 9,9 Hz) e con picchi H/V più ampi nel versante con bedrock GES sub-affiorante, a dimostrare la presenza di uno spessore più superficiale di substrato roccioso molto alterato (fino a fino a 5 ÷ 7 m) e con Vs calcolate pari a circa 185 m/s (P668HVSR).

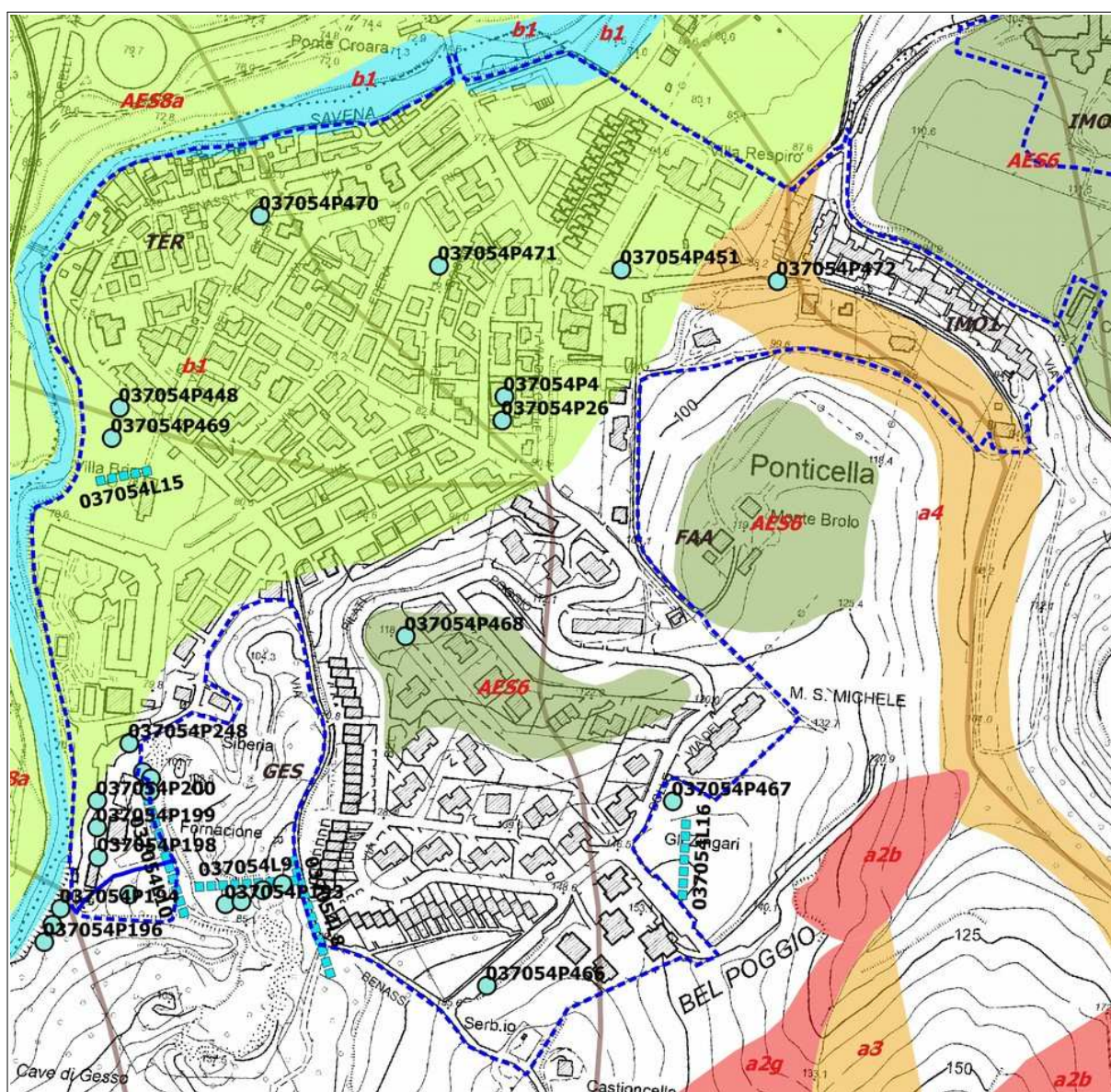


Figura 5.7 - Area di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

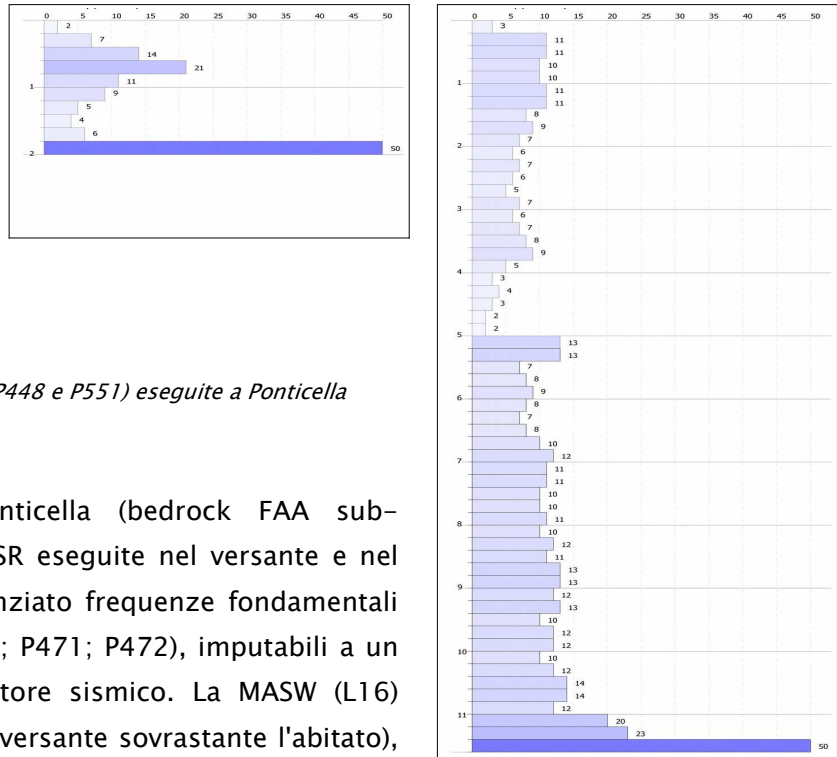


Figura 5.8 – Penetrometrie DPSH (P448 e P551) eseguite a Ponticella

Nel settore orientale di Ponticella (bedrock FAA sub-affiorante), le registrazioni HVSR eseguite nel versante e nel fondovalle hanno invece evidenziato frequenze fondamentali comprese tra 3 e 2,1 Hz (P467; P471; P472), imputabili a un più profondo e marcato riflettore sismico. La MASW (L16) eseguita in questo settore (nel versante sovrastante l'abitato), ha ulteriormente confermato la presenza di un primo spessore di substrato roccioso scarsamente rigido (V_s equivalente circa 250 m), probabilmente alterato/fratturato, seguito da un netto incremento di rigidità nel bedrock ($V_s > 400$ m/s) alla profondità di circa 25 metri. Questo riflettore è presumibilmente imputabile ad un netto cambio litologico, continuo e correlabile in un'ampia porzione del settore orientale di Ponticella. Per questo studio, è stata eseguita un ulteriore stendimento MASW (L15) nel settore di fondovalle occidentale (parco Villa Brizzi), in adiacenza alla prova DPSH con “rifiuto” strumentale a 2 m: la prova sismica ha evidenziato il rapido incremento delle V_s nel substrato roccioso GES (V_s fino a circa 550 m/s).

Figura 5.9 – Stendimenti MASW eseguiti a Ponticella (L15: alluvioni e substrato FAA; L16: alluvioni e substrato GES)

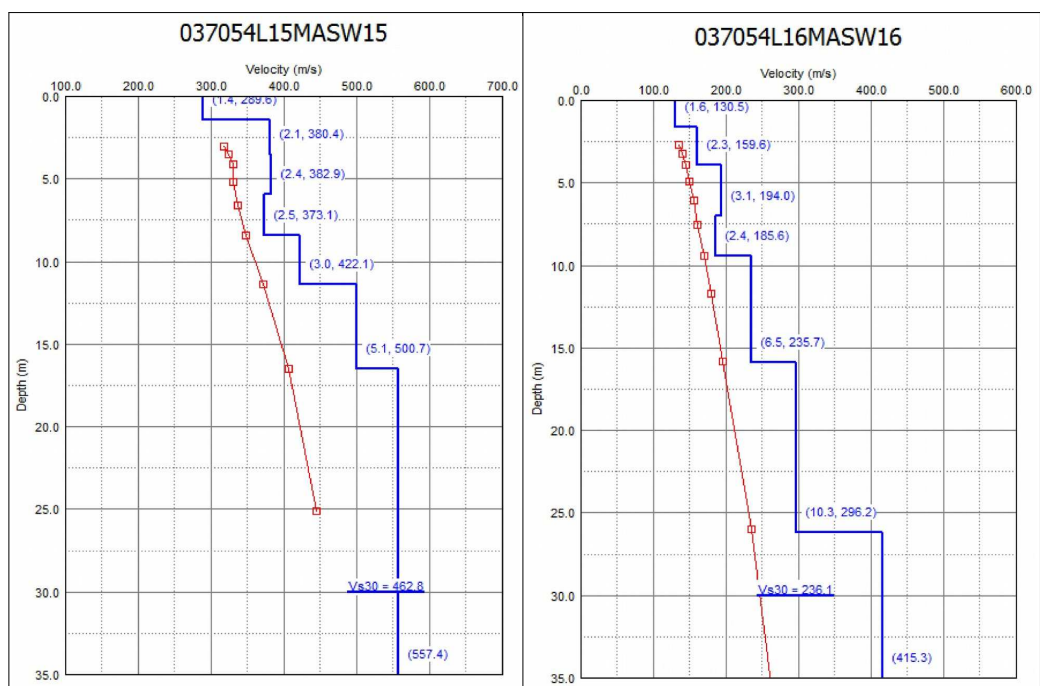
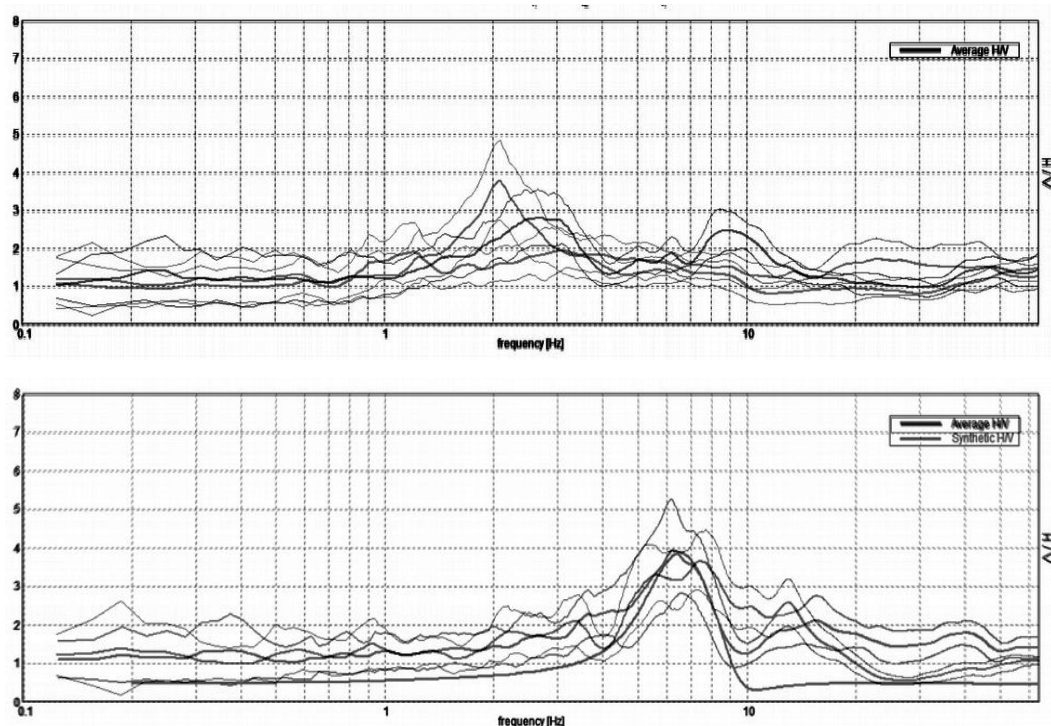


Figura 5.10 - In Alto: registrazioni HVSR eseguite nel settore orientale di Ponticella (P467, P471, P472: substrato FAA). In basso: registrazioni HVSR eseguite nel versante occidentale di Ponticella (P466, P468: substrato GES), con curva sintetica elaborata per il calcolo della VSH



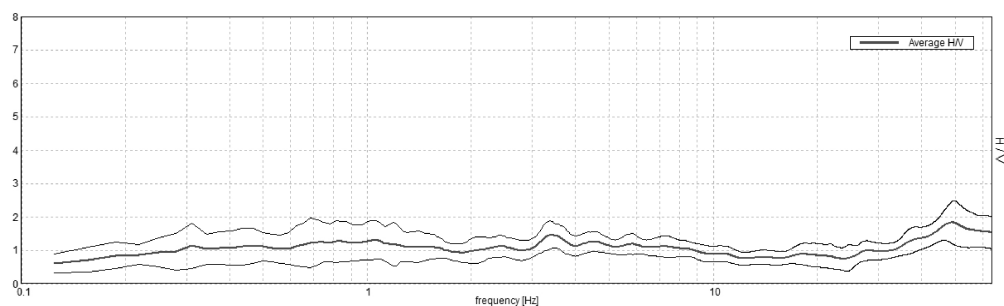
Un'ulteriore e limitata porzione orientale dell'abitato (sottostante la strada San Ruffillo) è invece insediata sul bedrock IMO1 sub-affiorante: si tratta di un versante/scarpa di incisione di un rio secondario, di modesta altezza (il dislivello con il sottostante fondovalle è di circa 15 ÷ 20 metri) e densamente urbanizzato.

Occorre evidenziare che territorio di San Lazzaro di Savena, il bedrock marino IMO1/IMO3 in affioramento risulta scarsamente rigido (MASW eseguite presso Villa S. Giacomo e Martiri Pizzocalvo/Villaggio Martino), con Vs equivalenti nei primi 30 metri pari a circa 350 m/s e, inoltre le registrazioni HVSR non evidenziano amplificazioni spettrali di particolare significato.

5.5 Areali “Croara”

Il nucleo abitativo presso l'incrocio tra la strada San Ruffillo e la via Croara è anch'esso insediato sul bedrock pleistocenico delle “Sabbie di Imola” (IMO1 e IMO3). È inoltre caratterizzato da modeste coperture alluvionali antiche (AES) residuali, sebbene le indagini geognostiche e sismiche (registrazione HVSR) non evidenzino contrasti d'impedenza con il sottostante bedrock (P463HVSR). Come già scritto in precedenza (cfr. frazione Ponticella, le “Sabbie di Imola” sub-affioranti risultano scarsamente rigide (Vs30 circa 350 m/s).

Figura 5.11 - Registrazione HVSR eseguita nel settore sud dell'areale Croara (P463: substrato IMO1)



Proseguendo verso nord, i nuclei abitativi disposti lungo la strada San Ruffillo e la via Croara si insediano sopra coperture alluvionali AES di maggior spessore (come evidenziano le indagini geognostiche di repertorio eseguite poco a nord del deposito acquedotto) e sempre sovrastanti il bedrock IMO. Le registrazioni HVSr (P464; P474) eseguite evidenziano una (limitata?) possibilità di amplificazione delle coperture più alterate e/o con litologia fine (frequenze fondamentali comprese tra 7,8 Hz e 9,2 Hz) con Vs10 stimata pari a circa 250 m/s.

Figura 5.11 - Aree di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

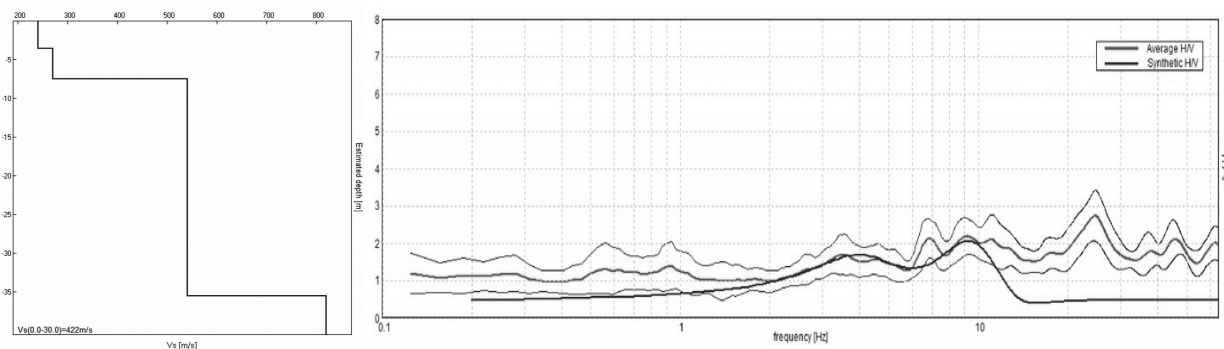
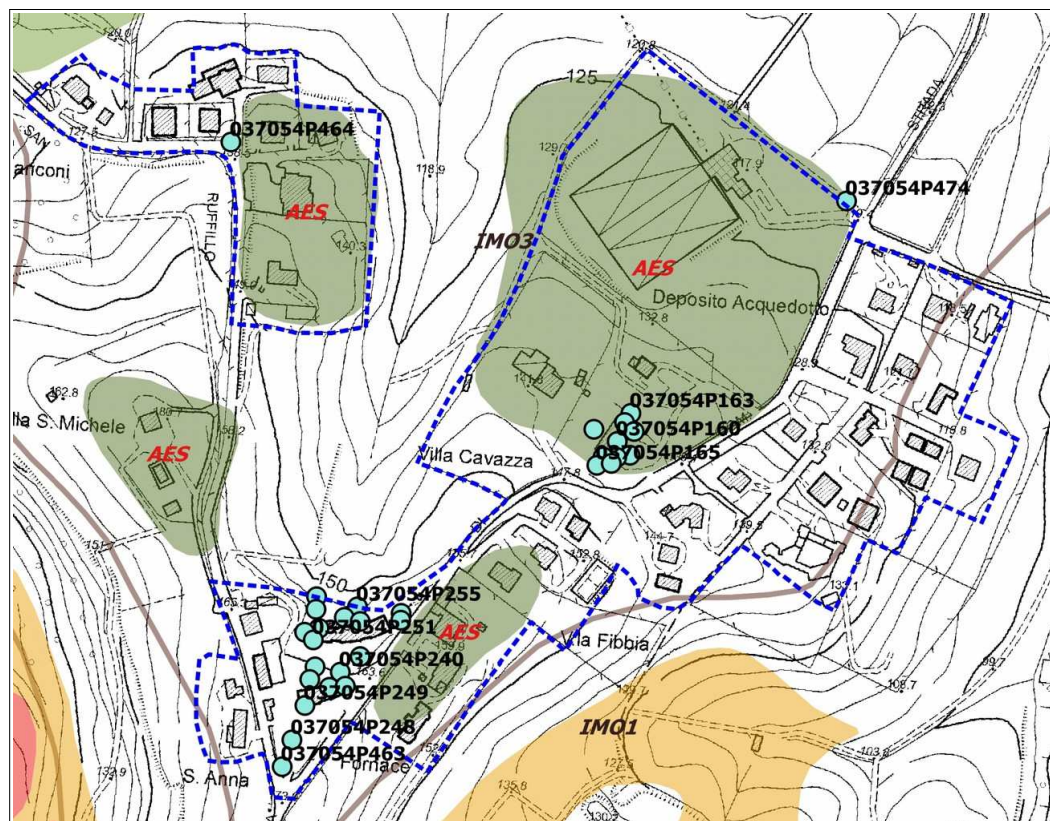


Figura 5.12 - Registrazione HVSr eseguita nel settore nord dell'areale Croara (P464:substrato IMO3), curva sintetica elaborata per il calcolo della VsH

5.6 Frazione Martiri Pizzocalvo

La frazione Martiri di Pizzocalvo è insediata su un modesto altipiano con declivio verso NNE (quote altimetriche da circa 150 metri s.l.m. a circa 110 m s.l.m.) impostato sulla struttura monoclinica plio-pleistocenica del margine appenninico affiorante.

Sulla base dei dati geognostici e geofisici disponibili, la frazione è suddivisibile in due principali settori, nord e sud. Nel settore sud, risulta sub-affiorante il substrato roccioso pleistocenico IMO1, con locali coperture eluvio-colluviali di modesto spessore. Come già scritto, le indagini eseguite (penetrometria DPSH; MASW; registrazioni HVSR) evidenziano come il bedrock sub-affiorante sia scarsamente rigido (V_{s30} circa 325 m/s).

In particolare, lo stendimento MASW (L13), eseguito nel parco attrezzato (campo di basket) ha evidenziato il progressivo incremento delle velocità di propagazione delle onde di taglio in profondità fino a circa 500÷550 m/s, senza tuttavia riscontrare incrementi netti e marcati della rigidità. Ciò risulta coerente con gli esiti delle registrazioni HVSR (eseguite nel settore sud): queste ultime, infatti, non evidenziano amplificazioni significative nello spettro H/V.

Figura 5.13 - Area di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

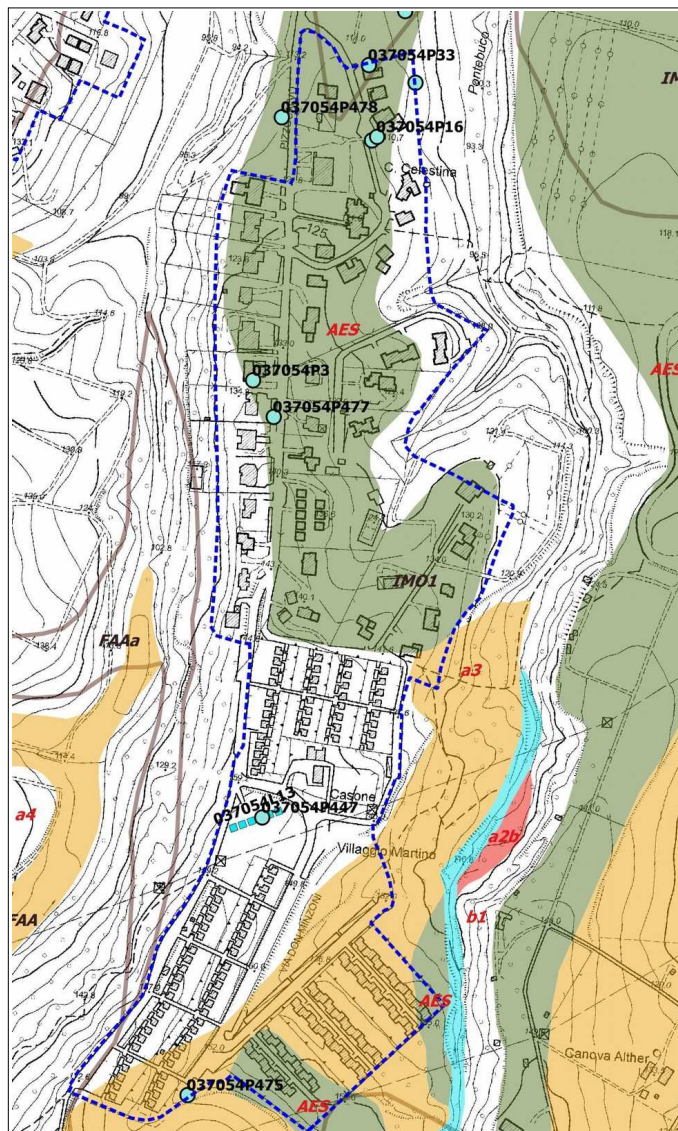
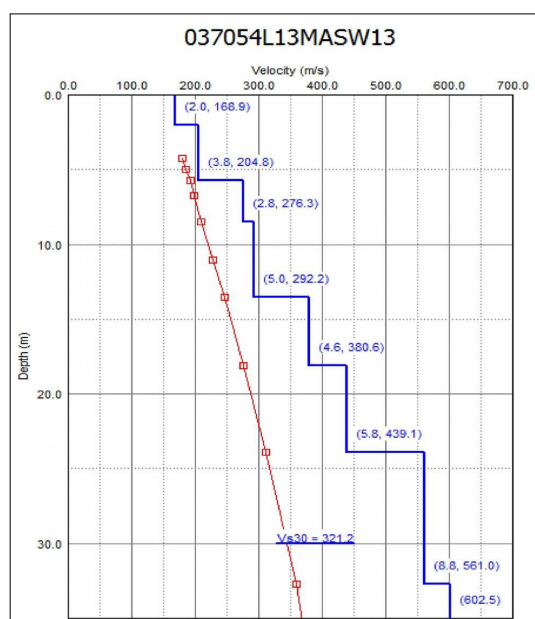


Figura 5.14 - Stendimento MASW eseguito a Martiri Pizzocalvo (L13: substrato IMO1)

Proseguendo verso nord, l'abitato si insedia sopra coperture alluvionali AES di maggior spessore e fino a 10÷12 metri (come confermano le indagini geognostiche di repertorio), con registrazioni HVSR (P477; P478) che rilevano blande amplificazioni a frequenze alte (f_0 da 10 a 15,6 Hz).

5.7 Areali “Villa San Giacomo” e “Villa Roncaglia”

Questi due areali, situati poco a NE di Ponticella, si collocano su un ampio terrazzo alluvionale (unità AES6) sovrastante il bedrock pleistocenico “Sabbie di Imola” (IMO1/IMO3). Il massimo approfondimento delle indagini geognostiche disponibili e gli esiti delle indagini geofisiche disponibili (registrazioni HVSR) evidenziano coperture alluvionali a tessiture più fini in superficie e/o più alterate fino a circa fino a 10÷12 m. Come già scritto, l'indagine MASW (L5) indica un incremento delle velocità in corrispondenza del tetto del bedrock marino pleistocenico, tuttavia è caratterizzato da modesta rigidezza (V_s circa 350 m/s). La prova MASW, inoltre sovrastima lo spessore delle coperture maggiormente amplificabili.

Le registrazioni HVSR (P415; P473) riscontrano una blande amplificazioni a frequenze fondamentali medio-alte (f_0 da 5,2 a 9,3 Hz) imputabili alle coperture alluvionali a tessiture prevalentemente fini.

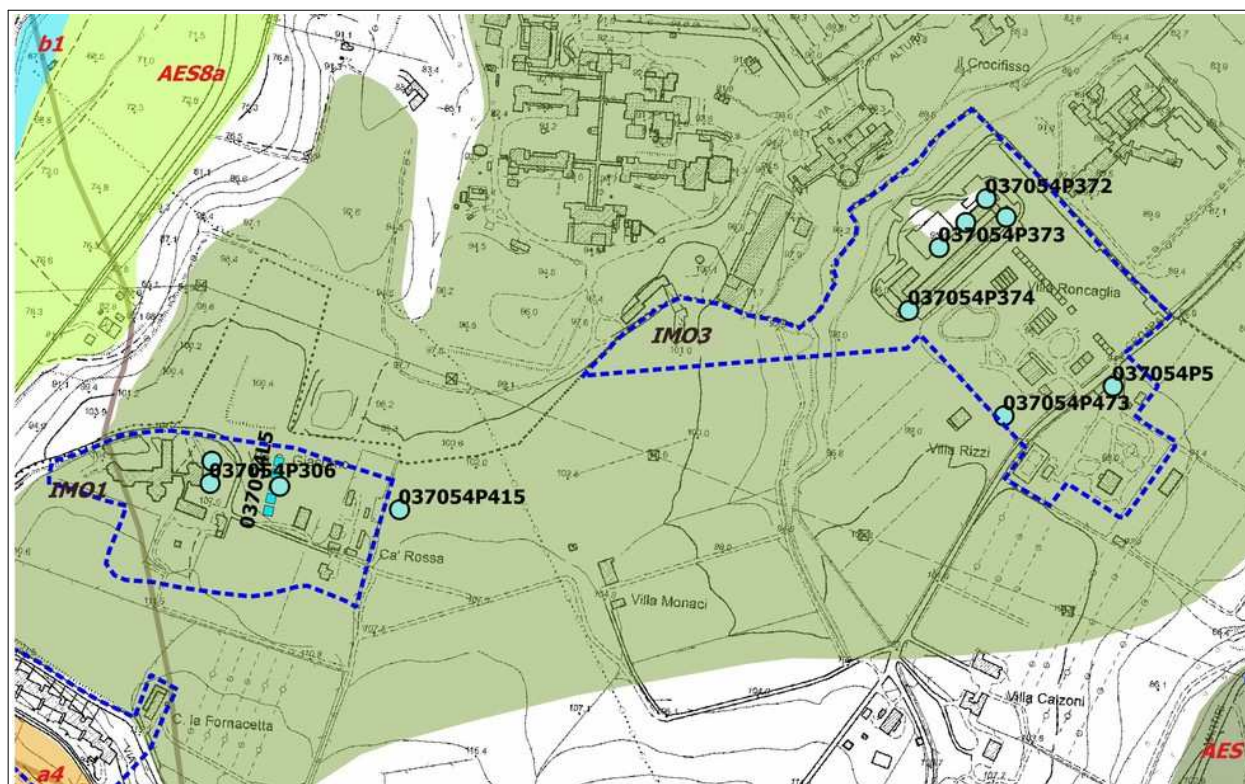
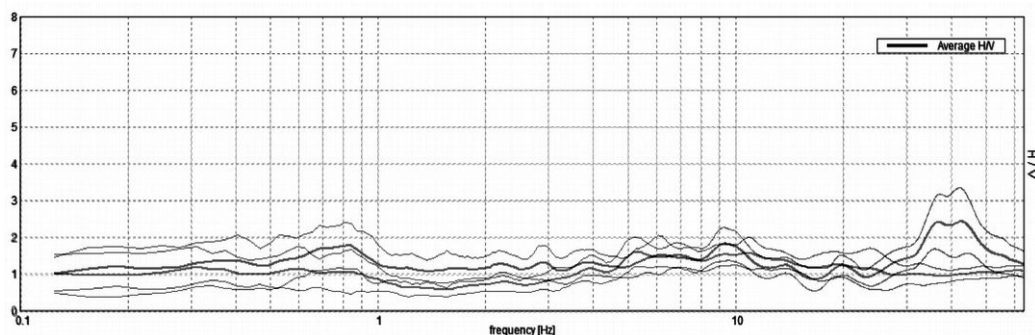


Figura 5.15 - Aree di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

Figura 5.16 -
Registrazioni
HVSR eseguite a
Villa S. Giacomo e
Villa Roncaglia
(P415 e P473)



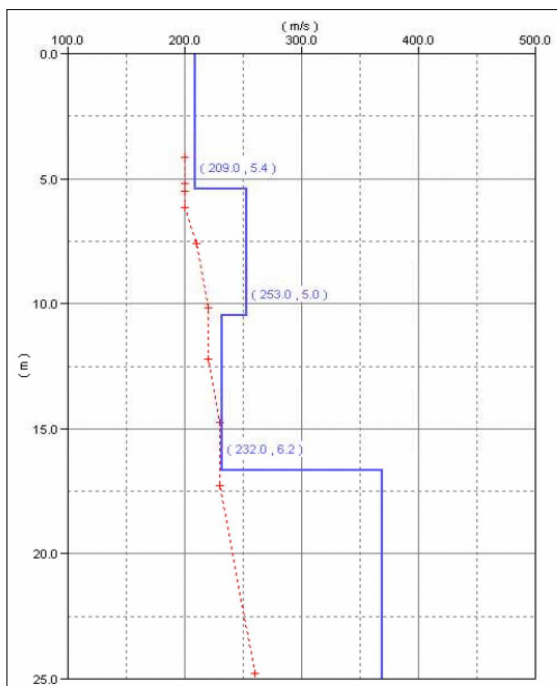


Figura 5.17 – Stendimento MASW eseguito a Villa San Giacomo (L5: alluvioni e substrato IMO3)

5.8 Frazioni La Pulce e Le Mura San Carlo

La frazione La Pulce si insedia su depositi alluvionali terrazzati (unità AES7a/b) attribuibili al torrente Zena e Idice e sovrastanti il bedrock marino IMO. Dal punto di vista morfologico, il profilo presenta acclività tipiche di contesto deposizionale di conoide prossimale recente (cfr. paragrafo 3.4). Le indagini geognostiche (sondaggi, penetrometrie) evidenziano depositi superficiali con importante scheletro ghiaioso. In questo settore è disponibile uno stendimento MASW (L3), con esiti di Vs relativamente elevati ($Vs_{30} = 407$ m/s) e tuttavia coerenti con tessiture prevalentemente ghiaiose di conoide.

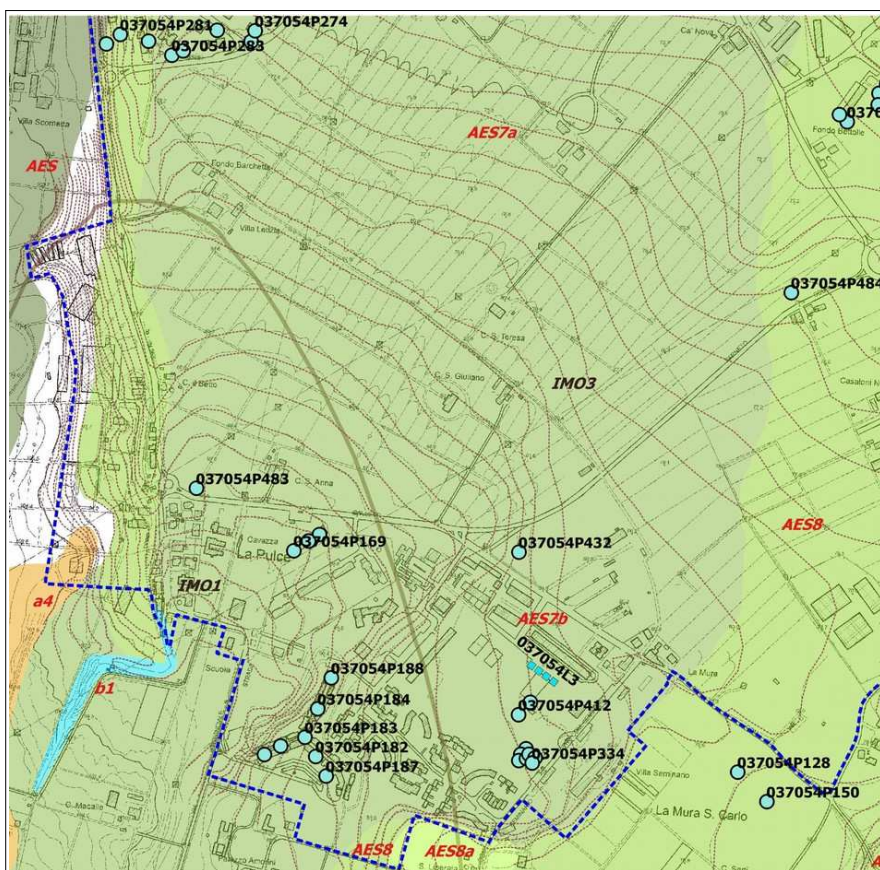


Figura 5.18 – Area di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

Le registrazioni HVSR (P412; P432; P483) non hanno riscontrato amplificazioni spettrali di particolare significato, a dimostrare l'assenza di contrasti d'impedenza nei primi 30 metri di sottosuolo. Ciò detto, gli esiti geofisici ottenuti per questa complessiva coltre ghiaiosa alluvionale, le caratteristiche litostratigrafiche locali e la relativa rigidezza dei depositi, consentono di equipararla dal punto di vista sismico ad un contesto di appennino "affiorante".

Al limite ovest della frazione, la modesta scarpata sulla quale si insediano alcune attività produttive agricole è costituita da depositi terrazzati più antichi (unità AES6): prove geognostiche e HVSR disponibili nel medesimo versante (poco più a nord) evidenziano coperture di alterazione oppure sedimenti fini meno consistenti (fino a circa 5÷7 metri) con possibilità di blande amplificazioni del segnale sismico (frequenze fondamentali da 10,7 Hz a 14 Hz).

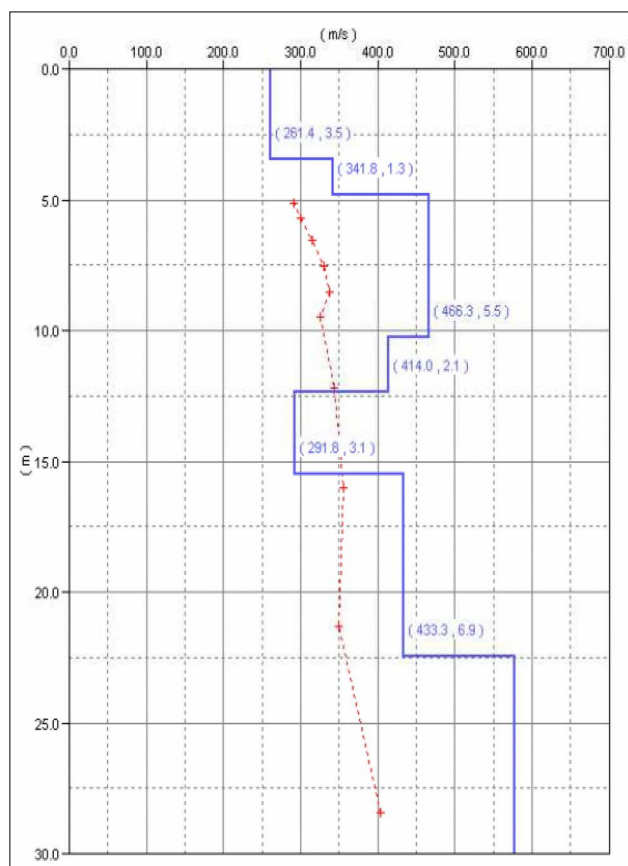


Figura 5.19- Stendimento MASW eseguito a La Pulce
(L3: alluvioni e substrato IMO)

5.9 Areali "Ca de Mandorli", via Valfiore, via San Lazzaro

Questi areali si insediano su depositi alluvionali in destra idrografica del torrente Idice, coevi e sostanzialmente correlabili con i depositi alluvionali terrazzati già descritti della frazione Pulce (AES7b). Si tratta, anche in questo caso, di depositi con importante scheletro ghiaioso-sabbioso sub-affiorante. La prova MASW (L17) eseguita nei pressi di Ca' de Mandorli ha ricavato esiti di Vs relativamente elevate ($V_{s30} = 403$ m/s), correlabili con i risultati della MASW eseguita a la Pulce. Un ulteriore e importante riferimento risulta il sondaggio profondo (-136 metri) eseguito dalla Regione Emilia-Romagna (P141) eseguito poco a nord degli areali in oggetto: la terebrazione ha attraversato la coltre alluvionale (alternanze di ghiaie-sabbie e sedimenti più fini), individuando il tetto dei depositi marini (bedrock IMO) a circa -104 metri. Il sondaggio RER ha inoltre attraversato un più potente banco ghiaioso - ciottoloso alluvionale, con tetto a circa -40 metri slm (spessore oltre 11 metri) e che verso nord (frazione Idice) sembra rappresentare un significativo riflettore sismico (ghiaie basali AES7b?).

In questi areali, gli esiti delle registrazioni HVSR non evidenziano amplificazioni spettrali, ad esclusione della prova eseguita presso il toponimo "Buscaroli", tuttavia ricadente in zona di

cava e quindi di difficoltosa interpretazione (amplificazione di terreni di tombamento?). Questa zona è stata parzialmente interessata da attività di cava (escavazione di ghiaie; sabbie e limi sabbiosi).

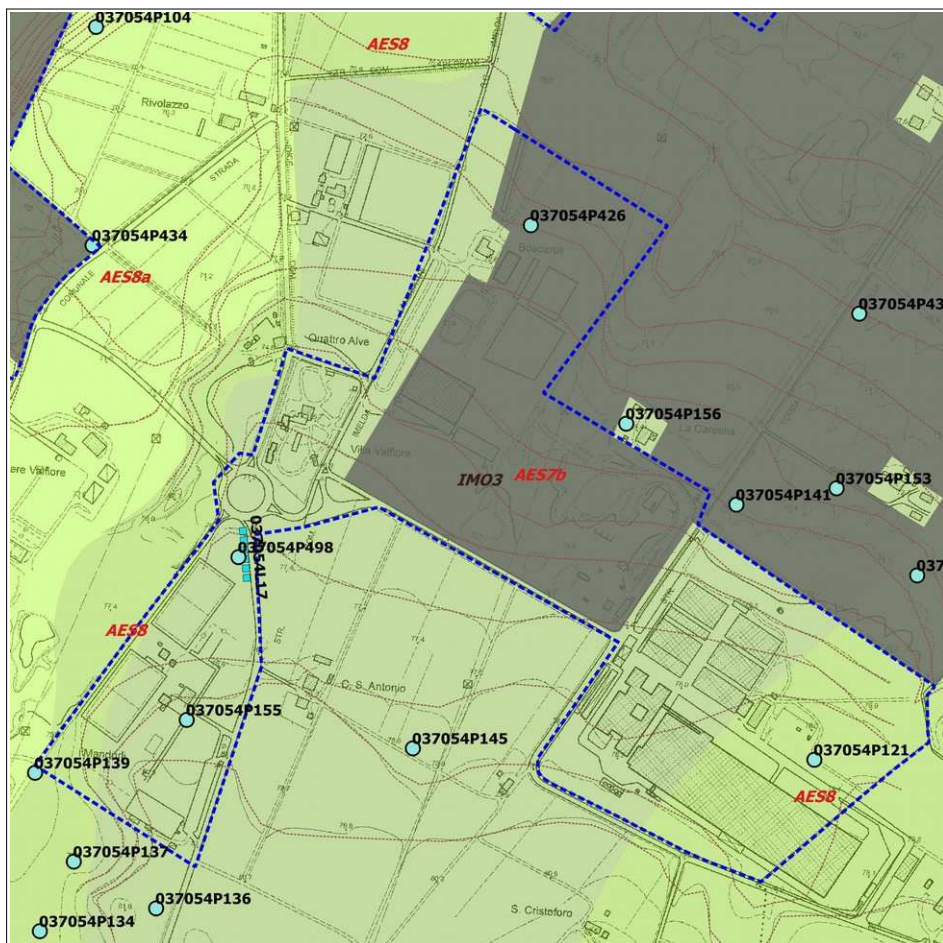


Figura 5.20- Aree di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

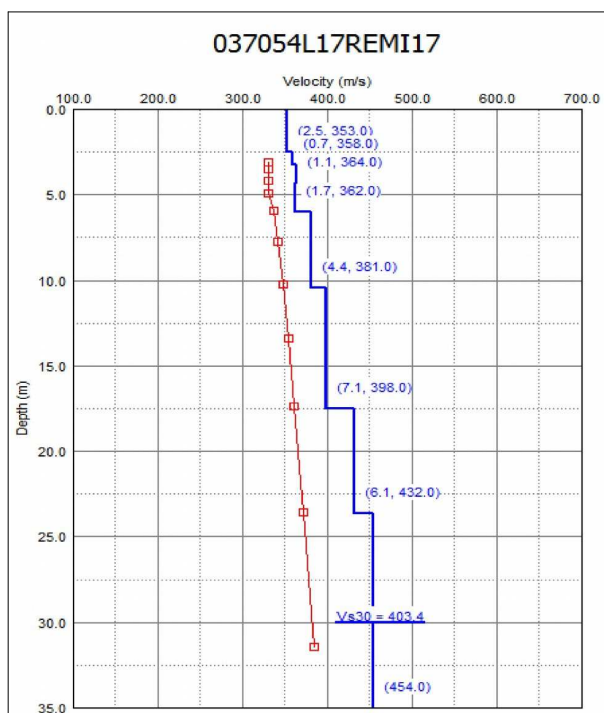


Figura 5.21- Stendimento MASW eseguito a La Pulce (L17: alluvioni e substrato IMO)

5.10 Frazione Idice

L'abitato Idice si è espanso in sinistra e in in destra dell'attuale alveo del torrente Idice, insediato su depositi alluvionali sub-affioranti relativamente recenti e terrazzati (unità AES8 e AES8a). I depositi terrazzati di ordine superiore (AES8), rilevati sia in sinistra che in destra idrografica dell'Idice, sono caratterizzati da abbondante scheletro sabbioso ghiaioso superficiale e con acclività ancora tipiche di contesto deposizionale di conoide prossimale recente (cfr. paragrafo 3.4).



Figura 5.22- Aree di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

La prova MASW (L18) eseguita sul terrazzo AES8, in destra Idice, poco a nord dello stabilimento “Eurodent”, evidenzia esiti di Vs ancora relativamente alti (consoni con sequenze ghiaioso sabbiose), con Vs30 pari a circa 358 m/s. La prova MASW non evidenzia significativi incrementi di Vs fino alla profondità investigata (circa 35 metri).

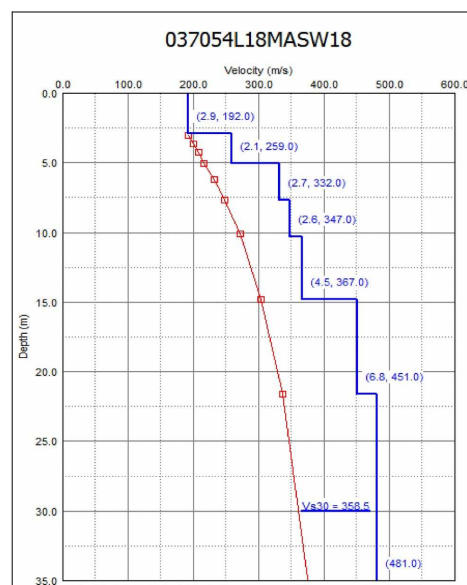
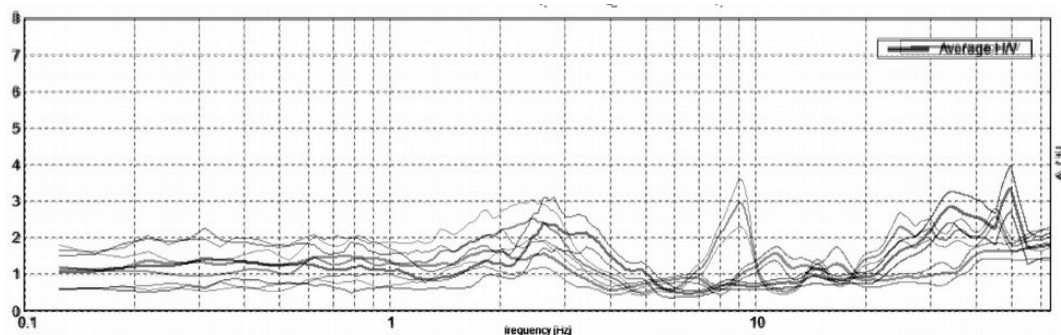


Figura 5.23- Stendimento MASW eseguito a La Pulce (L18: alluvioni)

Figura 5.24 –
Registrazioni
HVSr eseguite
presso la
frazione Idice,
nel terrazzo
ASE8 in destra
idrografica del
torrente
(P499; P506;
P507)



Le registrazioni HVSr evidenziano alti spettrali a frequenze medio-basse (f_0 $2,7 \div 2,1$ Hz), imputabili a un significativo riflettore sismico a profondità superiori a 30 metri, e in particolare al tetto dello spessore decametrico di ghiaie ciottolose che il sondaggio RER (P141), eseguito a SE di Idice, ha attraversato a circa -40 metri di profondità. Il sondaggio e la prova “Down-Hole”, eseguite per questo studio nella sottostante piana terrazzata (AES8a) di Idice, hanno effettivamente evidenziato un significativo incremento di rigidità/velocità onde sismiche di taglio (V_s fino a oltre 500 m/s), tra -18 e -31 metri, in corrispondenza di ghiaie (base depositi AES7?), che sovrastano ancora altre alternanze di sedimenti fini e grossolani. Considerando le differenze di quota topografica dei depositi terrazzati AES8 e AES8a (separati da una scarpata di circa $5 \div 7$ metri), questo riflettore sismico si può mediamente collocare a circa -35 metri in destra idrografica dell'Idice (figura 5.25).

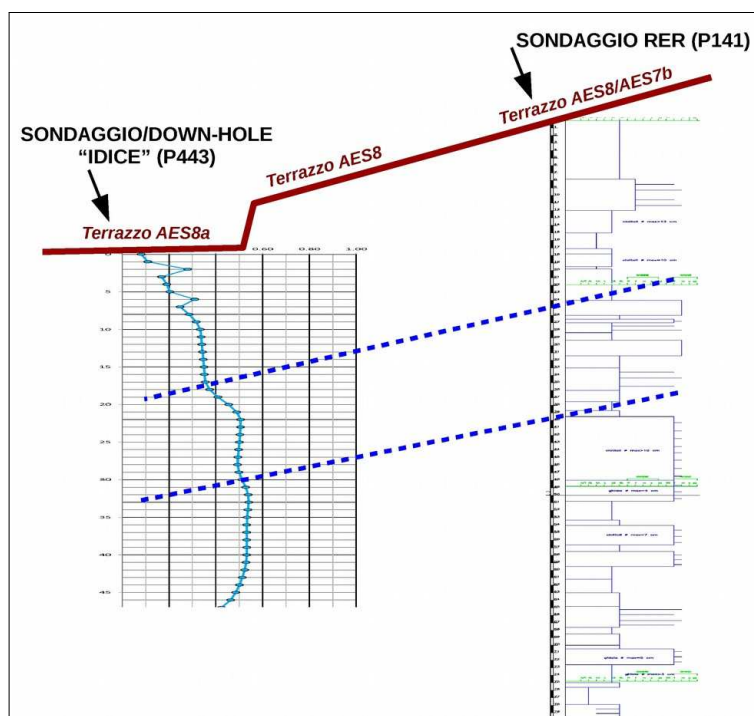


Figura 5.25 – Confronto sismostratigrafico tra le terebrazioni profonde disponibili nel territorio della frazione Idice (prova DH eseguita per lo studio di microzonazione sismica e sondaggio RER)

In sinistra idrografica, il terrazzo AES8 è stato investigato da numerose prove geognostiche (sondaggi; penetrometrie) che evidenziano anche in questo caso depositi sabbioso ghiaioso sub-affioranti. Per questo studio è stata eseguita una prova MASW (L19) nel parco pubblico tra via B.M. dal Monte e via Fondè: gli esiti sono comparabili con la MASW eseguita in sinistra Idice ($V_{s30} = 328$ m/s). Anche le registrazioni non evidenziano amplificazioni significative, almeno nei primi 30 metri di sottosuolo (presenza di ghiaie sabbiose sub-

affioranti) e per questo motivo un ampio settore di questo terrazzo è stato anch'esso equiparato in termini di risposta sismica a pseudo bedrock affiorante.

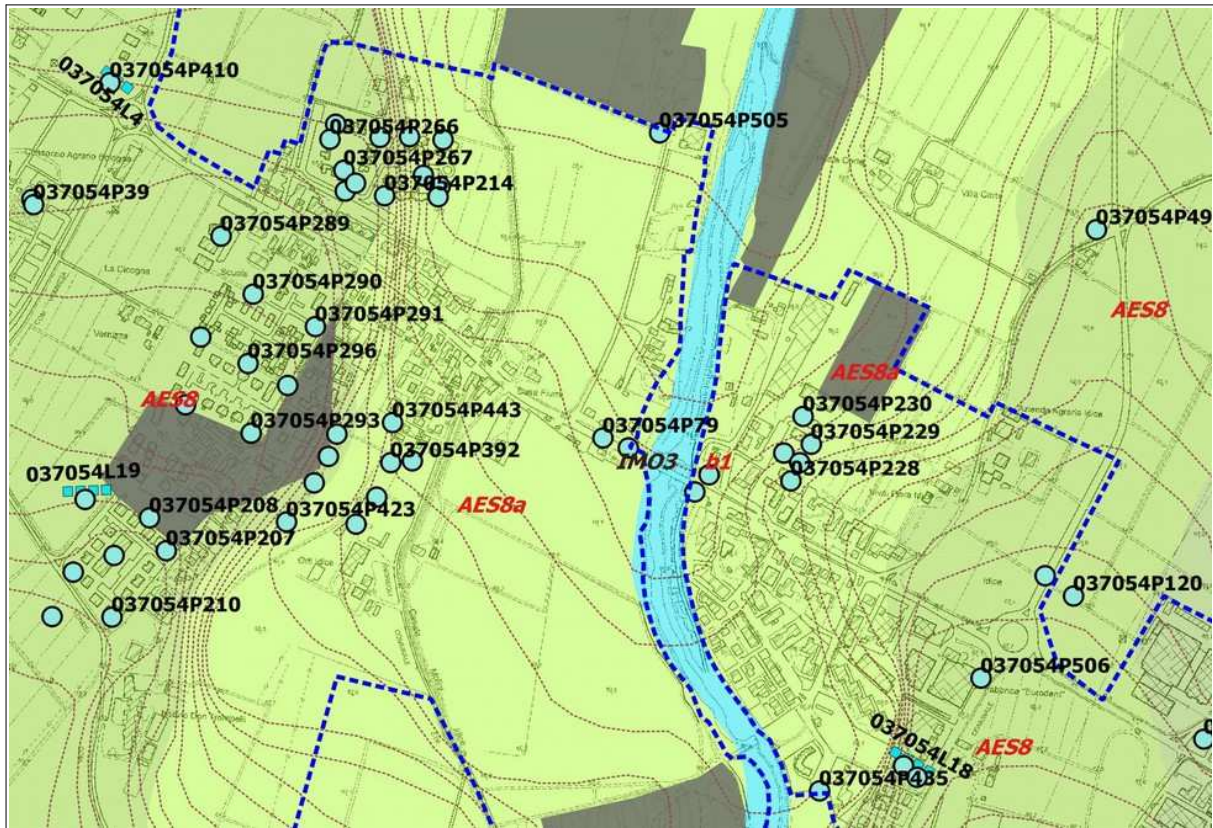


Figura 5.26 – Ulteriore dettaglio delle aree di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

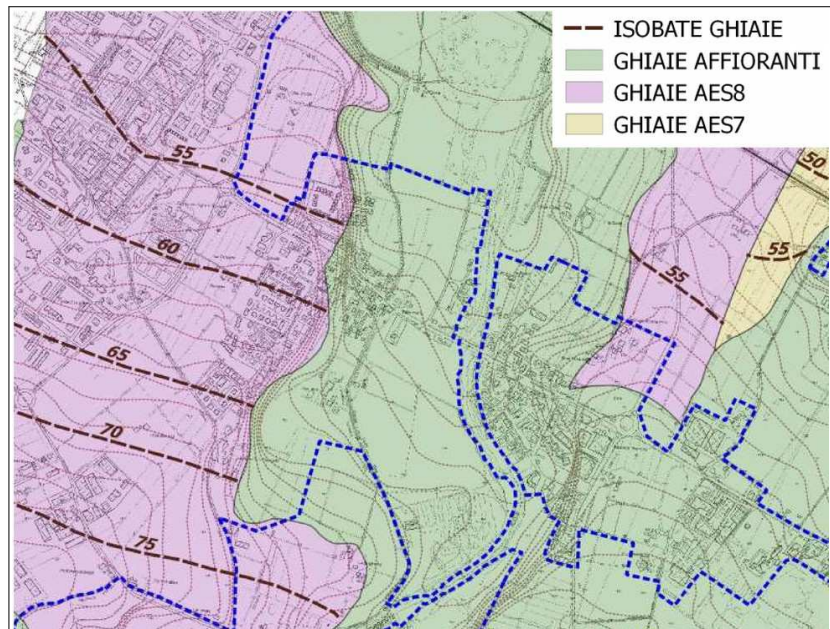


Figura 5.27 – Isobate del tetto delle ghiaie della conoide Idice (fonte: ISPRA carta geologica 1:50.000)

Il fondovalle terrazzato AES8a (investigato dal sondaggio con prova sismica in foro “Down-Hole” fino a -50 metri) è caratterizzato da depositi sub-affioranti sabbioso-ghiaiosi recenti e più in profondità da alternanze di sedimenti granulari e fini. Come già scritto, la prova “Down-

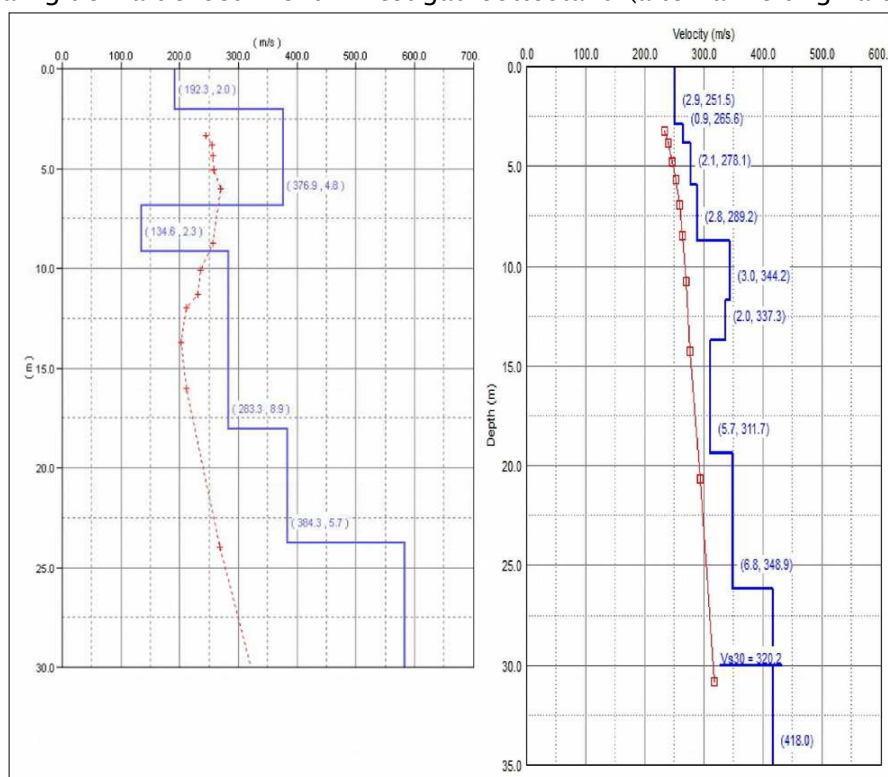
Hole” ha riscontrato un significativo incremento delle Velocità di propagazione delle onde sismiche a partire da circa -18 metri (con Vs fino a oltre oltre 500 m/s), tuttavia non chiaramente rilevabile nelle registrazioni HVSR eseguite in questo settore, per gli effetti di smorzamento indotti dai depositi granulari più superficiali e meno addensati.

5.11 Areale “Cicogna”

Il settore di urbanizzato prevalentemente produttivo situato tra Idice e il Capoluogo, sviluppato sia a sud che a nord della via emilia, ricade anch'esso nel contesto deposizionale di conoide prossimale e mediana (parte più settentrionale) terrazzata del torrente Idice.

Il settore sud - orientale (fino a poco oltre la via Emilia) è ancora caratterizzato da sequenze deposizionali rappresentate da alternanze di ghiaie-ghiaie sabbiose (unità AES8), tuttavia lo spessore sedimentario più superficiale è costituito sedimenti meno grossolani e/o addensati (da sabbie limose a limi argillosi) e come si evince anche dalla precedente figura 5.27. Il settore sud è stato investigato da numerose registrazioni sismiche HVSR: queste prove hanno riscontrato massimi spettrali, in alcuni casi anche di discreta entità (H/V 2÷3) a frequenze alte (f_0 compresi tra 10 Hz e 18,7 Hz), riconducibili ad un più significativo incremento di rigidità (tetto delle ghiaie a profondità fino a circa 5÷7 metri). In questo settore lo stendimento MASW di repertorio (L4) non consente una buona definizione sismostratigrafica dei primi 5÷7 metri, tuttavia conferma la discreta rigidità dei sedimenti investigati sottostanti (alternanze di ghiaie e depositi fini con Vs comprese tra 300 m/s e oltre 400 m/s a circa -25 metri di profondità).

Figura 5.28- Confronto tra MASW L4 e MASW L20 eseguite rispettivamente nel settore orientale e nord - occidentale della zona produttiva Cicogna

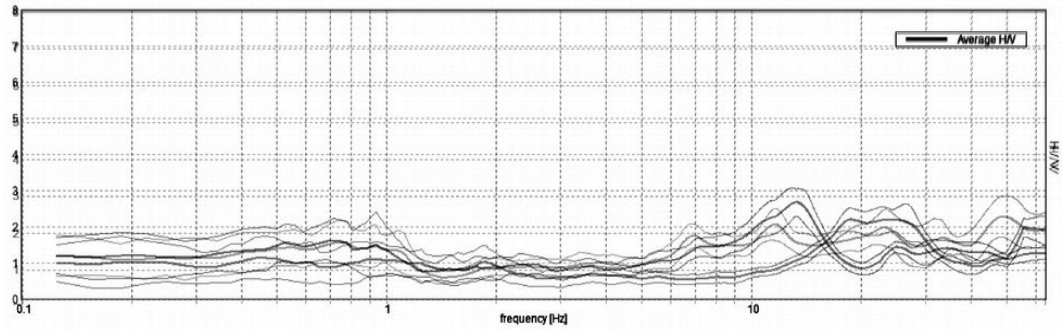


Nel settore nord - occidentale della zona produttiva Cicogna, le alternanze ghiaiose tendono ad approfondirsi e lo spessore più superficiale (sedimenti da limi sabbiosi ad argille limose) raggiunge grossomodo una profondità media di circa 10 metri. Le indagini geofisiche espletate

nel settore NO (e in particolare le registrazioni HVSR) confermano la presenza di un riflettore sismico più significativo riconducibile al tetto del primo intervallo ghiaioso (f_0 compresi tra 5,9 Hz e 10 Hz) il cui tetto è collocabile ad una profondità media di circa 10 metri.

Le sottostanti ghiaie (e/o alternanze di ghiaie e sedimenti fini), investigate a nord dalla MASW (L20) di via della Meccanica, evidenziano V_s in tendenziale incremento da oltre 300 m/s a circa 400 m/s).

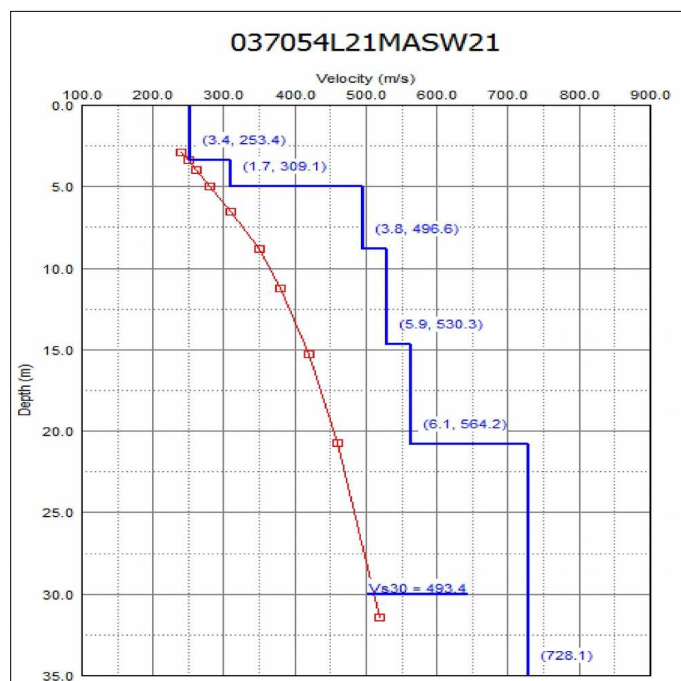
Figura 5.29 -
Registrazioni
HVSR eseguite
nella frazione
Cicogna,
settore
orientale (P410;
P420; P484)



5.12 Capoluogo

Il Capoluogo è prevalentemente insediato su depositi di conoide recente, attribuibili agli apparati distributori dell'Idice e Savena. Tuttavia, il settore SO dell'abitato (grossomodo il territorio in sinistra idrografica del rio Pontebuco) è caratterizzato da depositi alluvionali sub-affioranti terrazzati più antichi (unità AES6) prevalentemente fini ma di elevata consistenza. Tale settore è stato investigato da numerose registrazioni HVSR e queste prove hanno evidenziato amplificazioni (in alcuni casi anche di discreta entità $(H/V \ 2 \div 3)$) a frequenze elevate (f_0 compresi tra 10,7 Hz e 17,1 Hz), riconducibili ad un contrasto sismico poco profondo (circa $5 \div 7$ metri). Tale amplificazione è da ricondursi allo spessore di sedimenti alterati e/o più fini superficiale; in alcuni casi, anche alla presenza di coperture più recenti e meno consistenti, attribuibili al rio Pontebuco. In questo settore è stato eseguito lo stendimento MASW L21. La prova sismica evidenzia depositi piuttosto rigidi già a modeste profondità ($V_s > 500$ m/s a circa $-10 \div 15$ metri).

Figura 5.30- MASW L21 eseguita nel Capoluogo (a sud del rio Pontebuco)



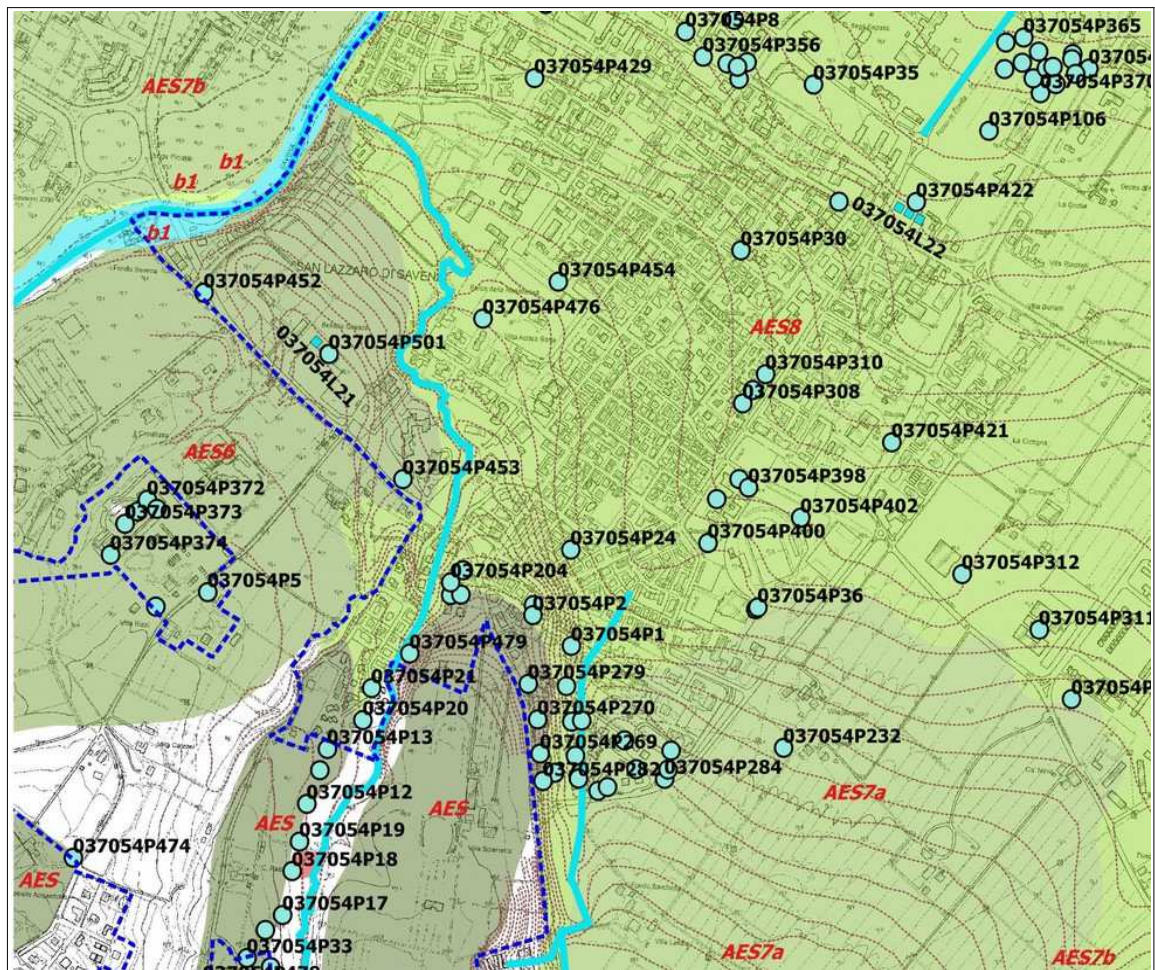


Figura 5.30- Area di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

A nord e a est del rio Pontebuco, il Capoluogo si insedia su depositi alluvionali di conoide più recente (depositi AES8). Le indagini geognostiche disponibili hanno riscontrato alternanze di ghiaie/ghiaie sabbiose e sedimenti fini. Tuttavia, la parte di abitato situato più a sud risulta caratterizzato da sequenze deposizionali caratterizzate da maggior rigidità per la presenza di ghiaie di maggior spessore e con minore matrice fine. Il secondo sondaggio eseguito per lo studio di microzonazione sismica (P402), spinto anch'esso fino a -50 metri di profondità, è stato eseguito nella zona dello stadio Kennedy e attrezzato per eseguire la prova sismica in foro "Down-Hole" (fino a -50 m). Il sondaggio ha attraversato alternanze di ghiaie sabbiose e limi argillosi, tuttavia lo spessore più superficiale (circa 9÷10 metri) è caratterizzato da sedimenti prevalentemente fini, sovrastanti un banco ghiaioso attraversato fino a circa -22 metri. Gli esiti della prova "Down-Hole" mostrano un più marcato incremento delle Vs al tetto delle ghiaie meno profonde. Inoltre, i depositi alluvionali sottostanti risultano caratterizzati da Vs (circa 400÷420 m/s) pressoché costanti nelle alternanze di ghiaie e sedimenti fini ma particolarmente consistenti (figura 5.31).

L'esito della registrazione HVSR eseguita in prossimità del sondaggio dello stadio Kennedy evidenzia un massimo spettrale alla frequenza di 9,4 hz, dunque attribuibile al riflettore sismico significativo in corrispondenza del tetto delle prime ghiaie (circa -9÷10 metri).

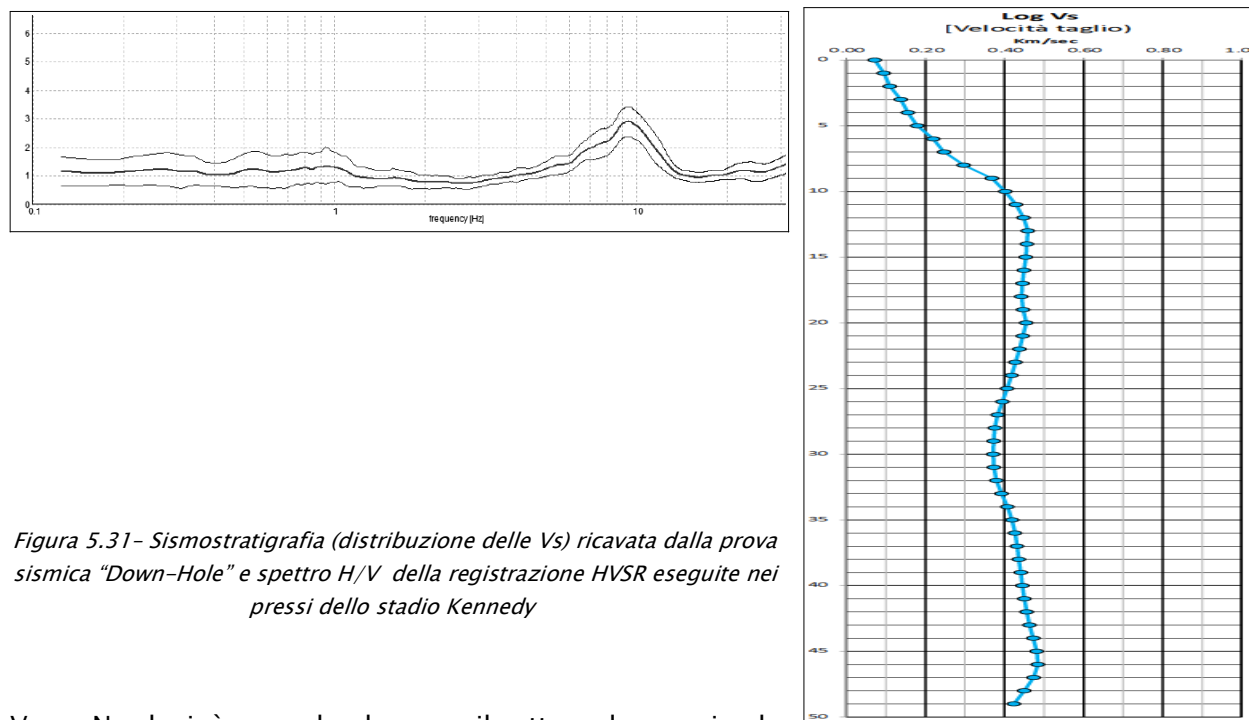
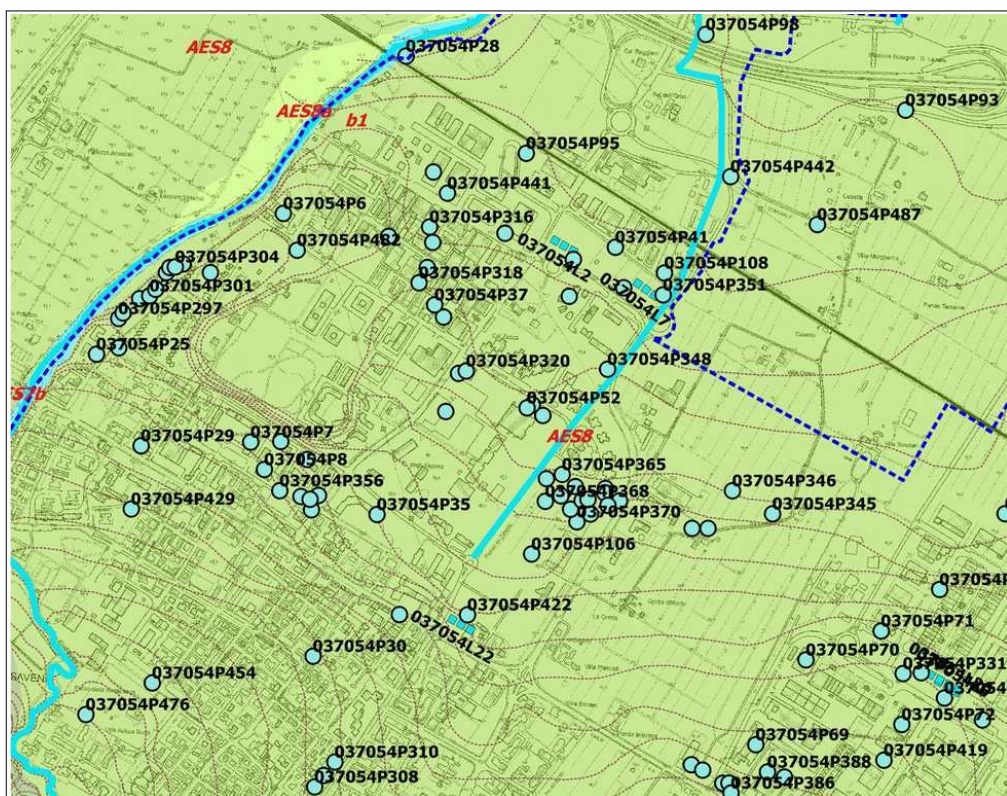


Figura 5.31- Sismostratigrafia (distribuzione delle Vs) ricavata dalla prova sismica "Down-Hole" e spettro H/V della registrazione HVSR eseguite nei pressi dello stadio Kennedy

Verso Nord, cioè procedendo verso il settore da prossimale a mediano dell'apparato di conoide, cominciano a prevalere i depositi fini, inoltre gli spessori ghiaiosi risultano meno potenti, meno grossolani e/o più sabbiosi e caratterizzati da più matrice fine. Ciò si traduce in un differente contesto di risposta sismica locale: gli esiti delle registrazioni sismiche nel settore di Capoluogo fino a oltre la via Emilia presentano frequenze fondamentali molto variabili da (0,7 Hz a 19 Hz) in relazione alla presenza di livelli ghiaioso-sabbiosi sub-affioranti recenti (più frequenti verso ovest e in questo caso, attribuibili al torrente Savena).

Figura 5.32- Area di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento



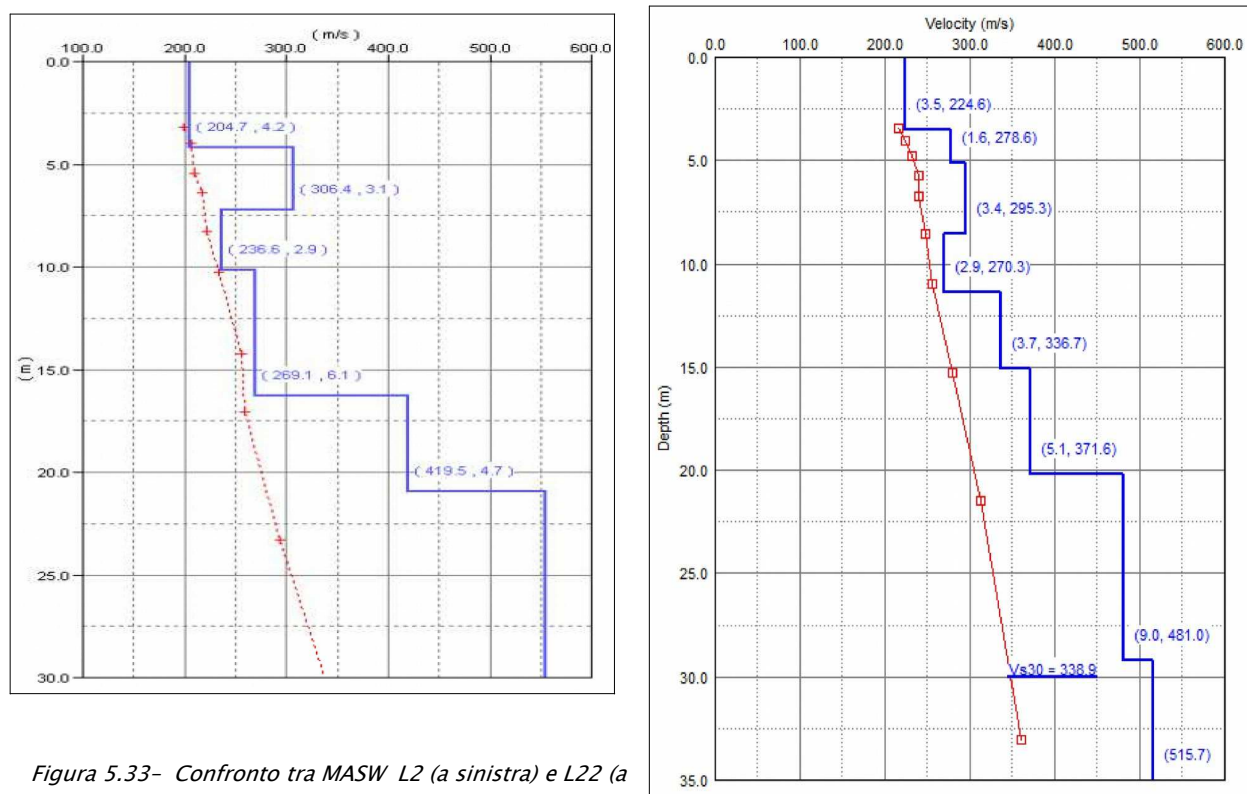


Figura 5.33- Confronto tra MASW L2 (a sinistra) e L22 (a destra) eseguite nel Capoluogo

Nella parte di abitato più settentrionale è stato eseguito uno stendimento MASW (L22) in adiacenza la via Emilia e, ancora più a nord (in vicinanza della ferrovia) sono disponibili ulteriori prove MASW (L2). Le prove geofisiche evidenziano la progressiva riduzione delle Vs30 (rispettivamente da 339 m/s a 322 m/s) e non riscontrano marcati incrementi di Vs in profondità, a dimostrare l'assenza di riflettori sismici significativi per la risposta sismica locale nei primi 30 metri di sottosuolo. In tal senso, si ritiene che, nel settore settentrionale del Capoluogo, le amplificazioni evidenziate dagli spettri H/V a frequenze elevate non possano costituire i principali riflettori sismici.

5.13 Frazione Borgatella

La frazione Borgatella si insedia su depositi di piana alluvionale di fondovalle recente (unità AES8a). Sono disponibili molte indagini geognostiche (penetrometrie e sondaggi anche profondi) e registrazioni sismiche HVSR in grado di offrire una adeguata caratterizzazione sismostratigrafica dell'area in oggetto. In sintesi, le indagini evidenziano ghiaie e ghiaie sabbiose sub-affioranti e più in profondità sedimenti prevalentemente fini alternati a più modesti intervalli sabbioso-ghiaiosi. Le registrazioni HVSR non riscontrano picchi H/V particolarmente significativi, anzi le frequenze fondamentali risultano basse (f_0 tra 1,3 Hz e 2,1 Hz) e riconducibili a riflettori più profondi di 30 metri. La disponibilità di dati stratigrafici profondi (es. sondaggio P87 fino a -36 metri) ha consentito di elaborare una Vs30 dagli esiti della registrazione HVSR (P502) eseguita in adiacenza ($Vs30 = 254$ m/s).

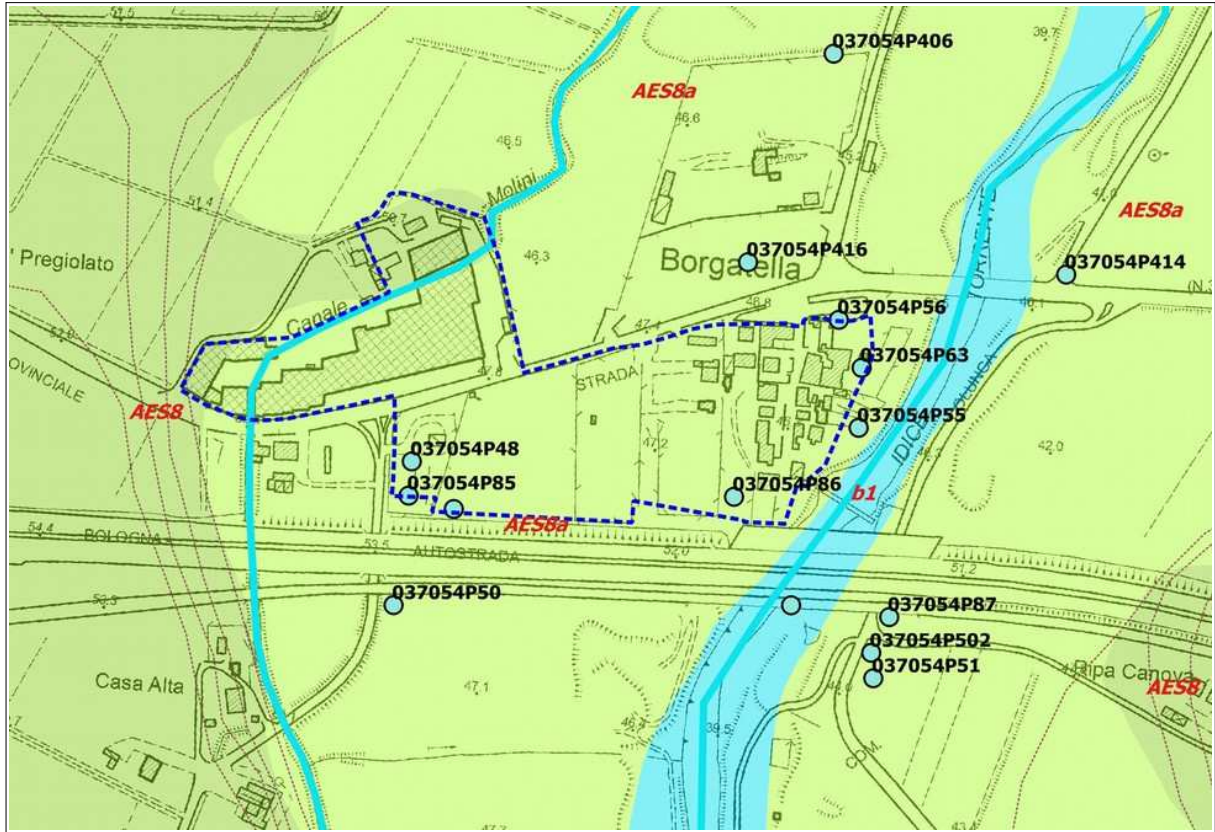


Figura 5.34- Area di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

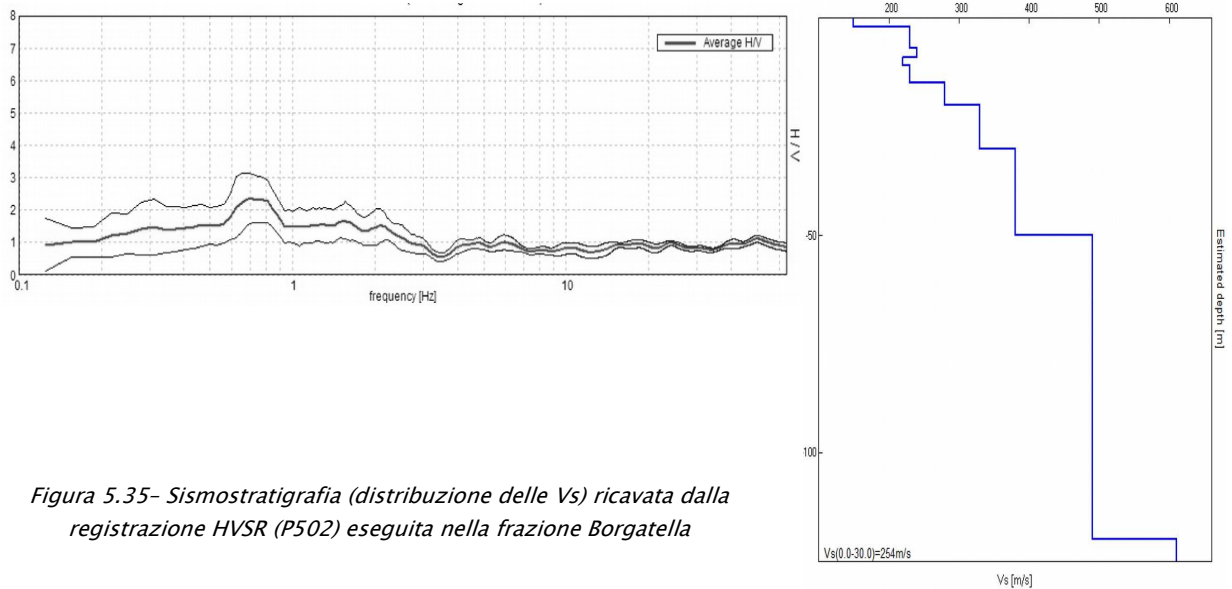


Figura 5.35- Sismostratigrafia (distribuzione delle Vs) ricavata dalla registrazione HVSR (P502) eseguita nella frazione Borgatella

5.14 Frazioni Mirandola e areale “Colunga”

La frazione di Mirandola può considerarsi collocabile nel contesto di conoide mediana terrazzata del torrente Idice (depositi unità AES7b). Le indagini disponibili evidenziano sedimenti superficiali prevalentemente fini, con un intervallo ghiaioso a -8 metri. Il sottosuolo più profondo è caratterizzato da alternanze di intervalli fini (prevalenti) e intervalli ghiaioso sabbiosi. La prova HVSR (P492) eseguita subito a nord della ferrovia riscontra un picco massimo

(non particolarmente significativo) a circa 8,1 Hz, corrispondente al tetto delle citate ghiaie meno profonde.

Basandoci anche sui dati delle indagini geognostiche limitrofe, la prova HVSR P492 ha consentito l'elaborazione di un modello sismostratigrafico locale, ricavando una Vs30 pari a 261 m/s.

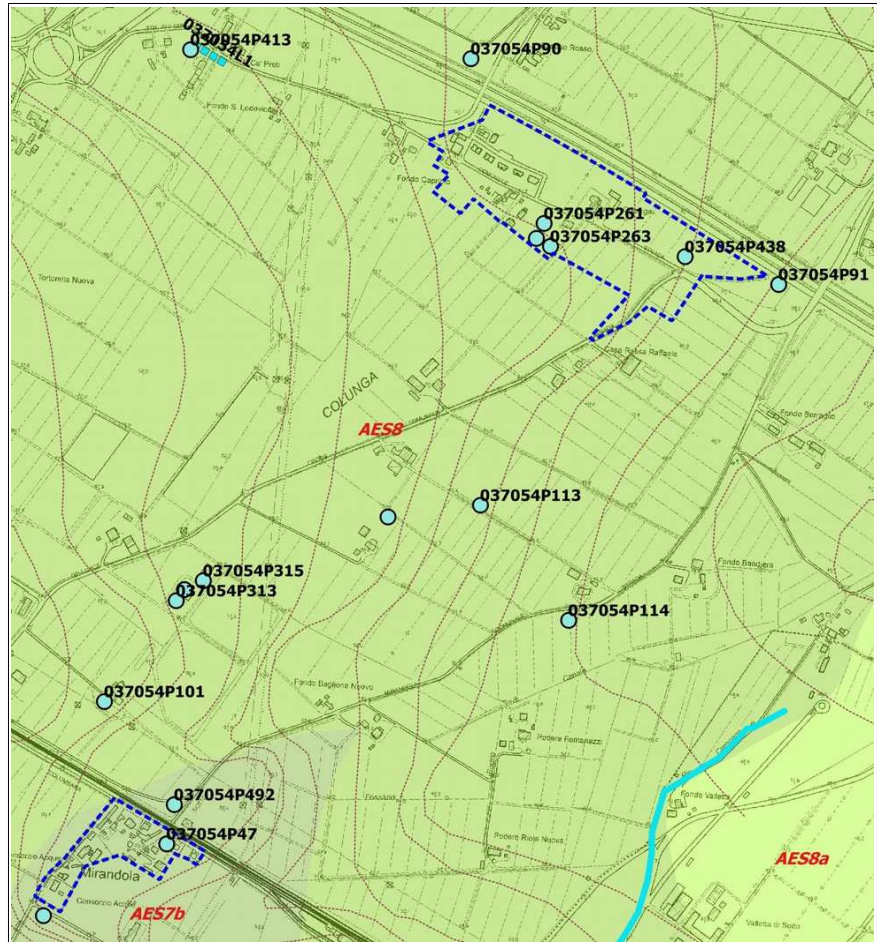


Figura 5.36 – Aree di studio, coperture quaternarie e substrato geologico. La figura riporta le indagini geognostiche e geofisiche di riferimento

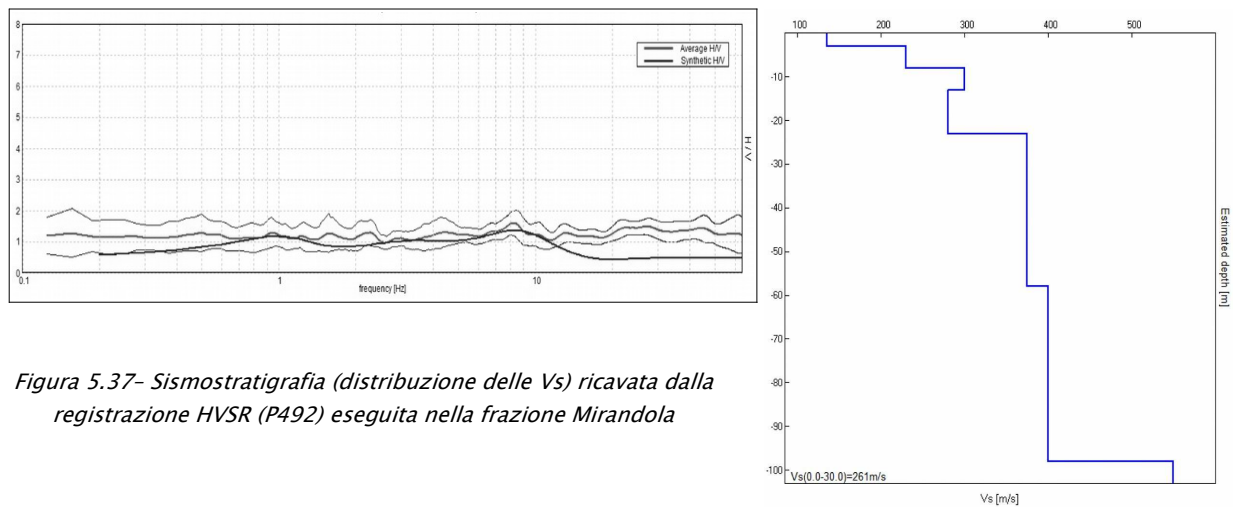


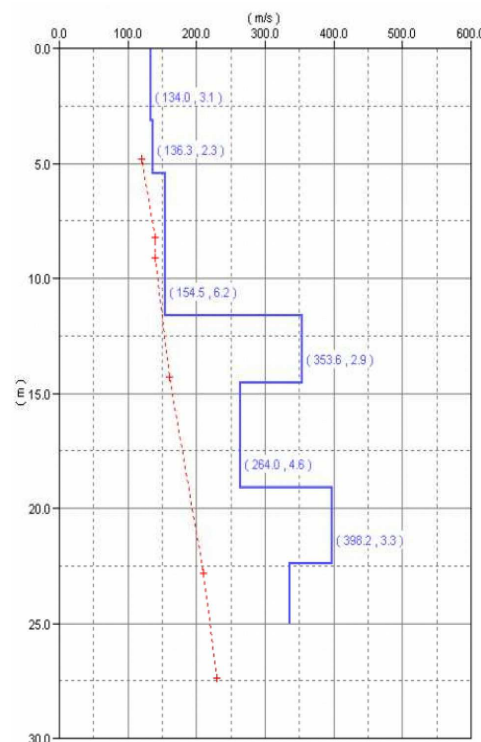
Figura 5.37- Sismostratigrafia (distribuzione delle Vs) ricavata dalla registrazione HVSR (P492) eseguita nella frazione Mirandola

Anche l'areale Colunga ricade nel contesto deposizionale di conoide mediana del torrente Idice, inoltre il sismostratigrafico è simile alla frazione Mirandola: anche in questo caso, i dati geognostici disponibili (sondaggi; penetrometrie)

evidenziano sedimenti prevalentemente fini superficiali, e intercalazioni ghiaiose anche poco profonde, con tetto variabilmente riscontrato da -7 m a -11 metri circa. Le registrazioni HVSR (P413 e P438), più vicine all'areale, evidenziano picchi poco significativi (f_0 tra 12,2 Hz e 16,9 Hz) imputabili al tetto delle ghiaie meno profonde. Tuttavia, questo primo intervallo granulare non è da considerarsi come principale riflettore sismico per il suo modesto spessore.

È possibile estrapolare l'esito di Vs30 dalla limitrofa MASW L1 (eseguita lungo la via Colunga e poco a ovest dell'area di studio), che risulta pari a 227 m/s.

Figura 5.38- MASW L1 eseguita in via Colunga a ovest dell'areale di studio



6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Lo studio di microzonazione sismica ha permesso una preliminare cernita delle indagini di repertorio eseguite anche con attrezzature fuori standard (fornendo quindi esiti inutilizzabili o non interpretabili). Peraltro, i dati geognostici considerati offrono una sufficiente “copertura” conoscitiva delle aree studiate e le indagini geofisiche espletate ex novo per questo studio di microzonazione (prove in foro “Down-Hole; stendimenti MASW e registrazioni HVSR) consentono una modellazione del sottosuolo esaustiva per l'elaborazione della risposta sismica locale semplificata (secondo livello).

Le incertezze sono comunque accettabili in funzione del grado di approfondimento che si è inteso espletare. Lo studio, come vedremo, ha inoltre ben definito le aree che dovranno ineludibilmente approfondire gli aspetti di pericolosità sismica.

7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

7.1 Cenni introduttivi

Il fine ultimo dello studio di microzonazione sismica di “livello 2” è quello di consentire una suddivisione del territorio indagato in:

- zone “stabili”
- zone “stabili suscettibili di amplificazione” → a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione da quantificare con analisi semplificate (abachi)
- zone “instabili” → a loro volta suddivise in “zone suscettibili di instabilità” con stima della pericolosità da ricavare in termini quantitativi (ulteriori analisi di livello 3)

Come riportato nelle note introduttive degli standard di MS (v.4.0), i risultati degli studi sono fondamentalmente riconducibili alla carta delle MOPS (microzone omogenee in prospettiva sismica) e alla cartografia di MS (microzonazione sismica).

Occorre rammentare che la carta delle MOPS è riferita unicamente al “livello 1” di approfondimento e perciò le zone individuate hanno approfondimenti esclusivamente di tipo qualitativo. La cartografia di MS può avere sia zone con approfondimenti di “livello 2”, sia zone con approfondimenti di “livello 3”.

Per il Comune di San Lazzaro di Savena, lo studio sismico di livello 2 ha permesso di valutare i fattori di amplificazione sismica semplificata delle MOPS individuate per gli areali di studio. La stima dell'amplificazione si è basata sul modello di sottosuolo locale valutato per le aree studiate (cfr capitolo 5) in particolare considerando gli abachi predisposti dalla Regione Emilia-Romagna e riportati nella DGR 2193/2015 (Allegato A2), riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

Si rammenta che la DGR 2193/2015 ha determinato l'aggiornamento dei precedenti indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna (DAL 112/2007).

I paragrafi del presente capitolo illustrano i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione sul territorio e per identificare le zone di attenzione per instabilità.

7.2 I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, sono stati calcolati i fattori di amplificazione di ogni zona studiata. I fattori di amplificazione indicati nella DGR regionale n. 2193/2015 sono i seguenti:

- FA PGA → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido e la massima ampiezza dell'accelerazione alla superficie del deposito (PGA/PGA_0). Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento

D e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;

- FA SI – Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità per determinati periodi dello scuotimento. Nel nostro caso, si sono determinati i fattori di amplificazione per i tre intervalli di periodo: $FA_{0,1-0,5s}$ $FA_{0,5-1,0s}$ $FA_{0,5-1,5s}$.

7.3 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali: calcolo dei fattori di amplificazione

Il calcolo dei fattori di amplificazione ha interessato solo le aree urbanizzate/urbanizzabili e alcune ulteriori aree attigue.

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, nello studio di microzonazione sismica di livello 2, i fattori di amplificazione vengono calcolati con approccio semplificati mediante l'utilizzo di abachi. In tal senso, si sono utilizzati gli abachi di riferimento per gli studi di MS in Emilia-Romagna (DGR 2193/2015), sulla base delle differenti caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo ritenute importanti dal punto di vista della risposta sismica locale (cfr. capitolo 5).

La seguente tabella 7.1 riporta una sintesi riepilogativa dei fattori di amplificazione (FA) riferibili alle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS); si riportano il macrocontesto attribuibile a tale zona e i parametri (spessori; VsH; VS30) necessari per il calcolo dei FA.

Tabella 7.1

ZONA (MOPS)	LOCALITA' INTERESSATE	MACRO CONTESTO	VS / SPESSORI	FA PGA	FA SI (0,5-1,0s)	FA SI (0,5-1,0s)	FA SI (0,5-1,5s)	NOTE
2001	Borgatella	MARGINE B	VS30=250	1,6	1,9	2,5	2,7	Piana di fondovalle Ghiaie sabbiose recenti sub- affioranti
2002	Colunga Mirandola	MARGINE B	VS30=250	1,6	1,9	2,5	2,7	Conoide mediana Depositi prevalentemente fini nei primi 30 m
2003	Capoluogo (Caselle) (ZI Capoluogo nord)	MARGINE B	VS30=300	1,6	1,8	2,3	2,4	Conoide mediana Alternanze depositi fini e sabbie/sabbie ghiaiose nei primi 30 m
2004	Capoluogo	MARGINE B	VS30=350	1,6	1,7	2,1	2,2	Conoide prossimale Alternanze depositi fini e ghiaie/ghiaie sabbiose nei primi 30 m
2005	ZI Cigogna nord Capoluogo sud	MARGINE A	VSH10 =250	2,0	2,0	1,8	--	Conoide prossimale Depositi fini (10 metri) sovrastanti ghiaie
2006	ZI Cigogna centro/nord Capoluogo sud	MARGINE A	VSH5 =250	1,8	1,7	1,6	--	Conoide prossimale Depositi fini (5÷7 metri) sovrastanti ghiaie

ZONA (MOPS)	LOCALITA' INTERESSATE	MACRO CONTESTO	VS / SPESSORI	FA PGA	FA SI (0,5-1,0s)	FA SI (0,5-1,0s)	FA SI (0,5-1,5s)	NOTE
2007	Idice	APPENNINO	VSH20=300	2,0	2,1	1,6	-	Piana di fondovalle. Ghiaie sabbiose recenti sovrastanti depositi alluvionali antichi equiparabili a bedrock <800m/s
2008	Idice dx	APPENNINO	VSH35=350	1,9	2,2	1,8	--	Conoide prossimale Ghiaie sabbiose sub-affioranti sovrastanti ghiaie decametriche antiche equiparabili a bedrock <800m/s
2009	Idice sx	APPENNINO	VS30=350	1,9	1,9	1,5	--	Conoide prossimale Ghiaie sabbiose recenti sub-affioranti equiparabili a bedrock <800m/s
2010	Capoluogo SSE Sx idrografica rio Pontebuco	APPENNINO	VS5=250	1,6	1,5	1,4	--	Depositi alluvionali terrazzati con coperture alterate/fini fino a 5 metri
2011	La Pulce Le Mura S. Carlo Ca' de Mandorli	APPENNINO	VS30=400	1,8	1,7	1,5	--	Depositi alluvionali terrazzati con ghiaie sabbiose sub-affioranti equiparabili a bedrock <800m/s
2012	Villa S. Giacomo Villa Roncaglia	APPENNINO	VS10=250	2,0	1,9	1,4	--	Depositi alluvionali terrazzati alterati e/o fini superficiali (10÷12 metri)
2013	Castel dei Britti	APPENNINO	VS15=300	2,0	1,9	1,4	--	Depositi alluvionali terrazzati fini e/o bedrock alterato sovrastanti bedrock <800 m/s (fino a 15 metri)
2014	Farneto	APPENNINO	VS10=250	2,0	1,9	1,4	--	Piana di fondovalle sovrastante bedrock <800 m/s (10÷12 metri)
2015	Ponticella Case Grandi	APPENNINO	VS5=200	2,0	1,7	1,4	--	Piana di fondovalle sovrastante bedrock <800 m/s (5÷7 metri)
2016	Castel dei Britti	APPENNINO	VS10=250	2,0	1,9	1,4	--	Depositi eluvio-colluviali sovrastanti bedrock marino <800 m/s (fino a 10÷12metri)
2017	Farneto	APPENNINO	vs30=500	1,4	1,4	1,4	--	Bedrock marino <800 m/s affiorante
2018	Ponticella SO Farneto	APPENNINO	VS5=200	2,0	1,7	1,4	--	Bedrock marino <800 m/s alterato (fino a 5÷7 metri)

ZONA (MOPS)	LOCALITA' INTERESSATE	MACRO CONTESTO	VS / SPESSORI	FA PGA	FA SI (0,5-1,0s)	FA SI (0,5-1,0s)	FA SI (0,5-1,5s)	NOTE
2019	Ponticella N-NE	APPENNINO	VS25=250	2,1	2,5	2,3	--	Bedrock marino alterato <800 m/s e/o coperture quaternarie (25 metri)
2020	Croara nord Martiri Pizzocalvo nord	APPENNINO	VS10=250	2,0	1,9	1,4	--	Depositi alluvionali terrazzati alterati e/o fini sovrastanti bedrock marino <800 m/s (fino a 10÷12metri)
2021	Ponticella NNE Croara sud Martiri Pizzocalvo sud	APPENNINO	VS30=350	1,9	1,9	1,5	--	Bedrock marino affiorante <<800 m/s

7.4 Zone di attenzione per instabilità: calcolo dei fattori di amplificazione

Il calcolo dei fattori di amplificazione ha interessato anche le aree perimetrate come “zone di attenzione per instabilità di versante”, come richiesto negli Standard MS 4.0 (CTMS, 2015) della protezione Civile. Tuttavia, sono aree ove vengono richiesti ulteriori approfondimenti (livello 3).

Le aree instabili perimetrate sono desunte dalla cartografia geologica RER (superfici di frana già classificate). Per quanto riguarda il dissesto cartografato presso la frazione Ponticella, gli spessori dei depositi rimaneggiati sono ricavati dalle indagini geognostiche di repertorio (dr. geol. Vannelli) eseguite al piede del versante nel corpo di frana. In un solo caso, è stata cautelativamente inserita una nuova zona di attenzione (ZA_FR 25) in località Farneto: si tratta del piede di versante a ridosso dell'abitato, limitrofo a una forma di dissesto già cartografata.

Per il calcolo dei fattori di amplificazione semplificati (che andranno tuttavia confermati con studi di approfondimento di livello 3) si è dunque considerato il contesto litostratigrafico e sismico locale e stimato lo spessore di sedimento rimaneggiato compatibile con la presunta profondità del piano di taglio/scivolamento della frana. In assenza di specifici studi di caratterizzazione sismica, allo spessore di sedimenti potenzialmente instabile si è attribuita la Vs equivalente più cautelativa riportata negli abachi RER (VsH =150 m/s).

La seguente tabella 7.2 riporta una sintesi riepilogativa dei fattori di amplificazione (FA) attribuiti alle “zone di attenzione per instabilità di versante” perimetrate nel territorio di San Lazzaro di Savena e interferenti con il territorio urbanizzato:

Tabella 7.2

ZONA (MOPS)	LOCALITA' INTERESSATE	MACRO CONTESTO	VS / SPESSORI	FA PGA	FA SI (0,5-1,0s)	FA SI (0,5-1,0s)	FA SI (0,5-1,5s)	NOTE
30122022	Farneto	APPENNINO	VS5=150	2,3	2,1	1,4	--	Instabilità di versante attiva per scorrimento. Zona di accumulo. Spessore coperture fino a 5 metri.

ZONA (MOPS)	LOCALITA' INTERESSATE	MACRO CONTESTO	VS / SPESSORI	FA PGA	FA SI (0,5-1,0s)	FA SI (0,5-1,0s)	FA SI (0,5-1,5s)	NOTE
31132023	Farneto Ponticella	APPENNINO	VS5=150	2,3	2,1	1,4	--	Instabilità di versante attiva per colamento. Zona di accumulo. Spessore coperture fino a 5 metri.
30222024	Farneto	APPENNINO	VS10=150	2,3	2,6	1,8	--	Instabilità di versante quiescente per scorrimento. Zona di accumulo. Spessore coperture fino a 10 metri.
30232025	Farneto	APPENNINO	VS5=200	2,0	1,7	1,4	--	Instabilità di versante attiva per colamento. Nicchia di frana. Spessore bedrock alterato fino a 5 metri.
30242026	Castel dei Britti	APPENNINO	VS10=150	2,3	2,6	1,8	--	Instabilità di versante quiescente complessa. Zona di accumulo. Spessore coperture fino a 10 metri.
30452027	Farneto	APPENNINO	VS30=500	1,4	1,4	1,4	--	Instabilità di versante non definita. Possibile zona di accumulo. Bedrock affiorante

7.5 Valutazioni sulla propensione alla liquefabilità dei sedimenti in caso di sisma

Le 8 penetrometrie CPTU eseguite per lo studio di MS 2016 consentono di calcolare il Fattore di Sicurezza nei confronti della liquefazione (FSL) e la stima del parametro IL definito anche come LPI (Liquefaction Potential Index). La stima di IL offre ulteriori elementi di valutazione e comparazione del rischio di liquefazione anche alla scala territoriale.

L'analisi della liquefabilità dei sedimenti, se sottoposti a sollecitazioni cicliche indotte da terremoti, è di fondamentale importanza per gli aspetti di progettazione geotecnica antisismica. In particolare, occorre valutare, nel modo più adeguato possibile, le effettive condizioni di suscettibilità, le condizioni di innesco e il rischio sito specifico di tale fenomeno.

Con il termine "liquefazione" si indicano vari fenomeni fisici (mobilità ciclica, liquefazione ciclica, fluidificazione) osservati durante terremoti significativi (generalmente, $M > 5.5$) nei depositi e nei pendii sabbiosi saturi; in questi sedimenti, le condizioni "non drenate" durante il sisma possono indurre un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali, che a loro volta possono provocare una drastica caduta della resistenza al taglio e quindi una perdita di capacità portante del terreno. Il meccanismo di liquefazione dei sedimenti è governato da molti

fattori che si possono ricondurre principalmente:

- ✓ alle caratteristiche dell'impulso sismico (forma; durata dello scuotimento; ecc.) e la sua energia (magnitudo; accelerazioni; ecc.);
- ✓ alle caratteristiche tessiturali e meccaniche dei sedimenti (fuso granulometrico; densità relativa; coesione; limiti di Atterberg; ecc.);
- ✓ alla presenza di falda superficiale e alle condizioni di confinamento dello strato liquefacibile (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15–20 metri).

La differenza fra i diversi fenomeni dipende dalle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche e dalla resistenza al taglio residua dopo il terremoto.

Come descritto nel capitolo 5, un'ampia porzione del territorio urbanizzato di San Lazzaro di Savena è caratterizzato da depositi alluvionali sub-affioranti ghiaiosi e/o sabbioso-ghiaiosi insaturi, potenzialmente non liquefacibili. Dal punto di vista idrogeologico, la forte depressurizzazione degli acquiferi più o meno profondi indotta dal prelievamento d'acqua dai campi pozzi in zona Mirandola, ha creato condizioni di desaturazione degli acquiferi ghiaiosi e sabbiosi meno profondi. Occorre inoltre evidenziare che il progressivo infornamento degli alvei dei torrenti Idice e Savena ha indotto una permanente condizione di drenaggio dei sedimenti meno profondi, contribuendo a conservare soggiacenze relativamente elevate.

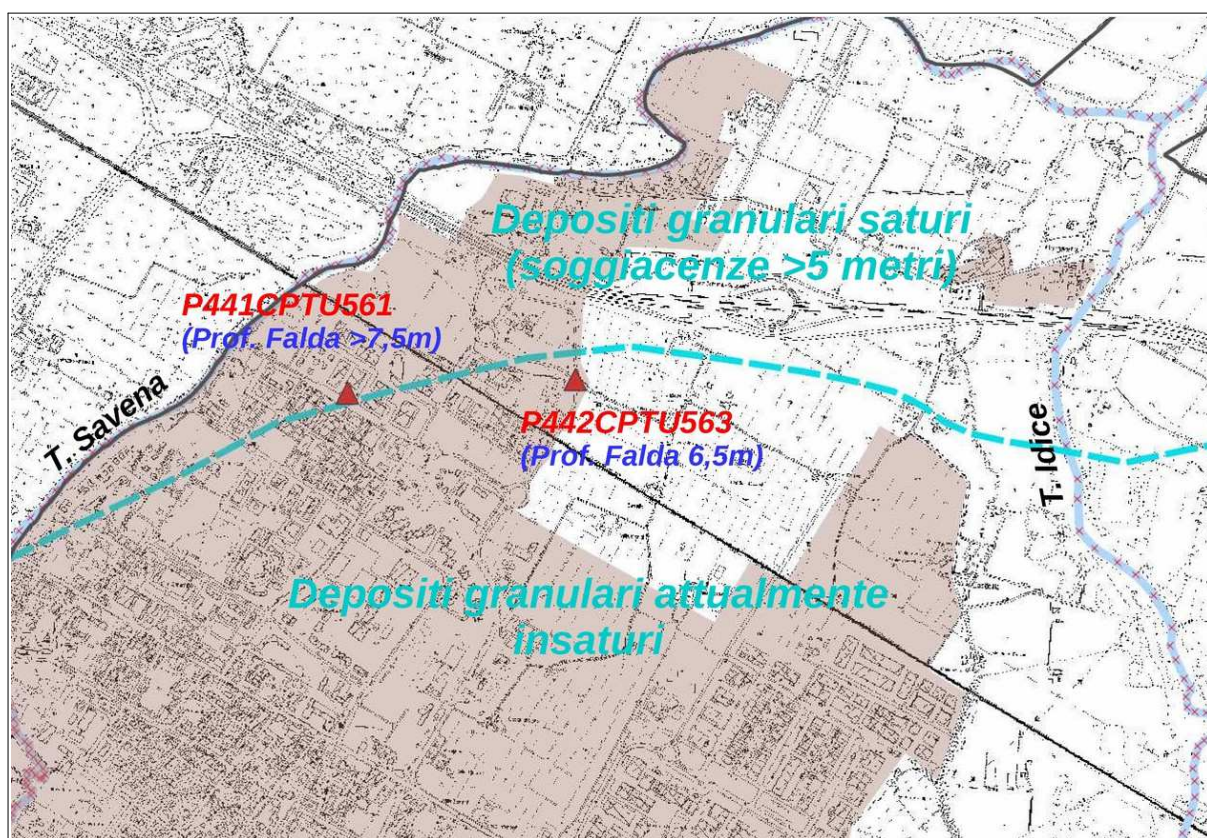


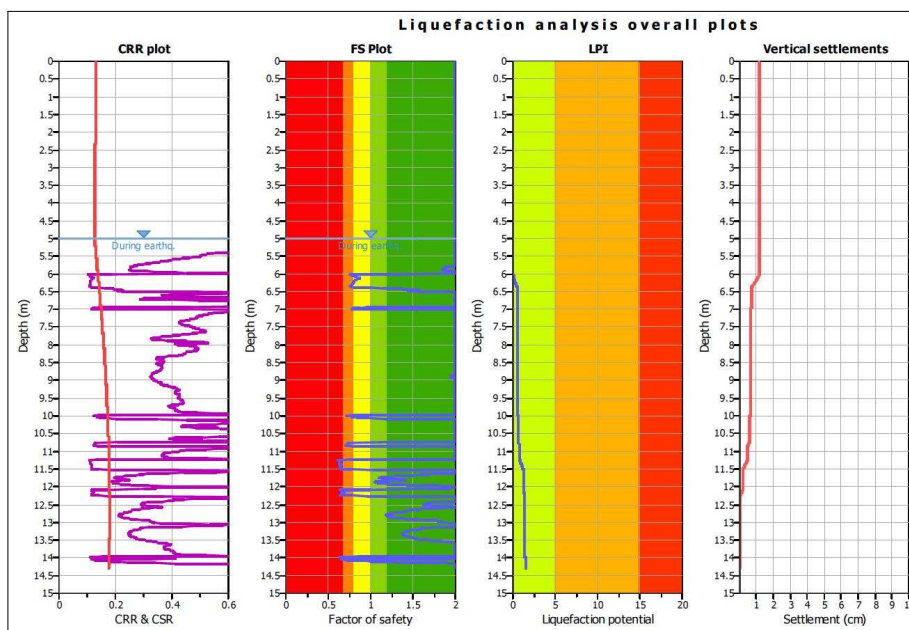
Figura 7.1 – Localizzazione delle prove CPTU eseguite per la verifica della liquefacibilità. La figura riporta il limite del territorio insaturo (cfr. Carta Idrogeologica scala 1.25.000 – Quadro Conoscitivo PSC)

Sulla base dello studio idrogeologico locale riportato nel Quadro Conoscitivo del PSC di San

Lazzaro di Savena (G. Viel, 2006) sono state tuttavia eseguite due prove CPTU spinte fino a rifiuto strumentale (figura 7.1).

I dati numerici delle prove CPTU hanno permesso una verifica speditiva della liquefacibilità (approccio secondo P.K. Robertson 2009), eseguita considerando una P_{ga} di input ricavata dalla $a_{g_{ref}}$ (0,172g) moltiplicata per il corrispondente FA P_{ga} (1,6). Per quanto riguarda la quota di falda, anche in questo caso si è considerata una condizione molto più cautelativa rispetto allo stato di fatto e cioè è stata considerata una soggiacenza equiparabile alla quota d'alveo del Savena (-5 metri). Le simulazioni forniscono esiti di LPI/IL in un caso “nullo” e in un caso “basso” ($IL = 0,8$). La figura 7.2 riporta gli esiti della prova con esito più “severo” (penetrometria P442CPTU563).

Figura 7.2 - Verifiche di liquefazione: si riporta l'esito più severo ottenuto dalla prova P442CPTU563 con approccio secondo P.K. Robertson (2009)



In conclusione, le caratteristiche idrogeologiche, litologiche e geotecniche dei sedimenti che caratterizzano il territorio di San Lazzaro di Savena non consentono l'insorgere di significativi effetti locali di liquefazione, come desumibile dalle indagini geognostiche e dai dati geotecnici di sottosuolo disponibili. Non sono state pertanto delimitate zone di attenzione per liquefazione.

8 ELABORATI CARTOGRAFICI

8.1 Carta delle Indagini (Tavola 1)

Gli studi di microzonazione sismica hanno consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio e sugli esiti delle prove integrative.

In questo senso, la “Carta delle Indagini”, realizzata alla scala 1:10.000, permette la visione di insieme delle localizzazioni delle prospezioni geologiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale di San Lazzaro di Savena, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio. Per una descrizione dettagliata sulla tipologia delle indagini disponibili e in particolare di quelle eseguite per gli studi di MS si rimanda al Capitolo 4.

La cartografia identifica il tipo di prova con la simbologia riportata negli <<Standard di rappresentazione e archiviazione informatica>> CTMS (v.4.0), distinguendo la tipologia delle prove e indicando il sito oggetto delle indagini.

8.2 Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica (Tavola 2)

La <<Carta geologico–tecnica>>, elaborata alla scala 1:10.000, ha lo scopo di fornire ulteriori elementi per la definizione del modello di sottosuolo meno profondo, necessario per lo studio di microzonazione sismica. Tuttavia, nella pianura, si distingue nei contenuti dalla classica carta geologica e/o litologica.

In particolare, la cartografia geologico–tecnica ha suddiviso il territorio studiato sulla base del controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo (analisi tessiturali; classificazione dei campioni prelevati) e dalle prove penetrometriche, disponendo anche di dati numerici.

L'elaborazione di questa cartografia è basata sul criterio delle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.0);

Il territorio di studio è stato suddiviso nelle classi USCS/AGI riportate in figura 8.1.

La cartografia geologico–tecnica inoltre riporta:

- ✓ “forme di superficie” (riconducibili a orli di scarpata morfologica, aree con cavità sepolte/doline/sinkhole; cavità sepolte puntuali)
- ✓ aree di instabilità di versante
- ✓ elementi geologici e idrogeologici (giaciture strati e sondaggi/pozzi)
- ✓ le tracce delle sezioni geologiche di riferimento per questo lavoro.




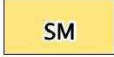





	RI	Aree di cava riempite con terreni di natura eterogenea.
	GM	Chiaie e/o ghiaie sabbiose prevalenti con sottili livelli limosi – terrazzo fluviale (tf), piana pedemontana (pd) e piana inondabile (pi).
	SW	Sabbie ghiaiose – terrazzo fluviale (tf).
	SM	Sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi prevalenti alternati a limi argillosi e argille limose – terrazzo fluviale (tf), piana pedemontana (pd) e piana inondabile (pi).
	SC	Sabbie limose e argillose – piana inondabile (pi).
	ML	Limi argillosi e argille limose prevalenti con locali livelli di limi sabbiosi e sabbie – depositi eluvio-colluviali (ec) e piana inondabile (pi).
	SFLPS	Substrato lapideo stratificato fratturato o alterato – Formazione Gessoso-Solfifera (GES) e Formazione a Colombacci (FCO).
	SFGRS	Substrato granulare cementato stratificato fratturato o alterato – Formazione delle Sabbie Gialle di Imola (IMO1, IMO3).
	SFCOS	Substrato coesivo sovraconsolidato, stratificato fratturato o alterato – Formazione delle Argille Azzurre (FAA).

Figura 8.1 – Stralcio della legenda della Tavola 2 – Carta geologico-technica: si riportano le classi geotecniche USCS/AGI che caratterizzano il sottosuolo meno profondo (circa 6 metri) del territorio studiato di San Lazzaro di Savena

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)

La <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>>, elaborata alla scala 1:10.000, riporta la suddivisione del territorio comunale in aree per classi di frequenza, secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera 1227/2015 della Regione Emilia-Romagna: $f_0 \leq 1$ Hz, $1 < f_0 \leq 2$ Hz, $2 < f_0 \leq 8$ Hz, $f_0 > 8$ Hz.

Lo studio di microzonazione ha dunque permesso di proporre una classificazione delle frequenze di possibile amplificazione/risonanza distinguendo le seguenti classi (con colori differenti).

La tavola permette di discriminare le misure anche in base all'entità del rapporto spettrale H/V riferito a contrasti di impedenza alla base delle coperture, in particolare discriminando le prove che hanno ricavato rapporti: $H/V \leq 2$ (ampiezze basse); $2 < H/V \leq 3$ (ampiezze moderate); $H/V > 3$ (ampiezze elevate).

I dati acquisiti attraverso l'estesa campagna di misure di microtremore realizzata a supporto del presente studio, correlati coi dati geognostici disponibili, hanno permesso di individuare zone in cui gli spessori dei depositi ghiaiosi sono prevalenti, di definire la profondità del tetto di quello che può essere definito in alcuni casi il substrato rigido e di individuare quindi le

caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, per la definizione dei fattori di amplificazione.

8.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (Tavola 4)

La cartografia MOPS, elaborata alla scala 1:7.000, rappresenta la suddivisione del territorio comunale studiato in "Zone stabili suscettibili di amplificazione" e in "Zone di attenzione per instabilità". Tale carta rappresenta l'elaborato fondamentale della microzonazione sismica di livello 1.

Per quanto riguarda le "Zone stabili suscettibili di amplificazioni", l'aggiornamento espletato con lo studio di MS permette di distinguere le seguenti zone, così descritte in legenda (fig. 8.2):

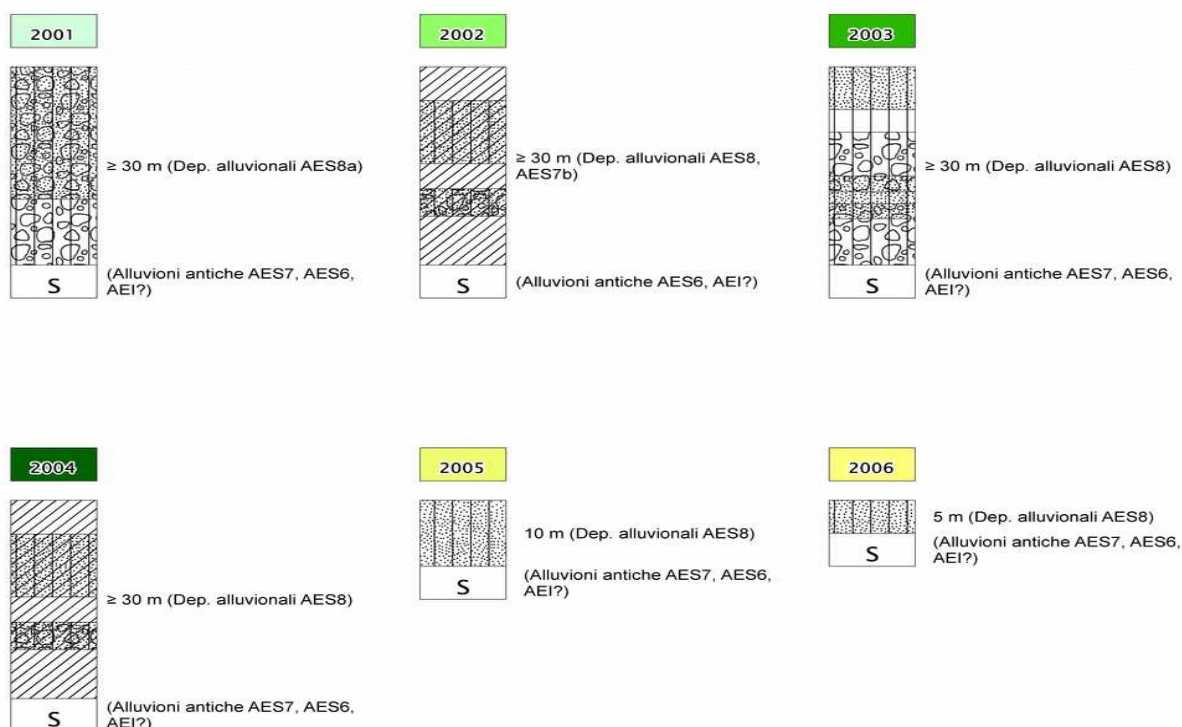
2001	Zona 1 – Piana di fondovalle con successioni alluvionali caratterizzate da ghiaie sabbiose recenti sub-affioranti di spessore metrico (Unità AES8a).
2002	Zona 2 – Conoide distale terrazzata con successioni alluvionali caratterizzate da depositi prevalentemente fini nei primi 30 metri, con intercalazioni discontinue di sabbie/sabbie ghiaiose (Unità AES8, AES7b).
2003	Zona 3 – Conoide mediana terrazzata con successioni alluvionali caratterizzate da alternanze di depositi fini e sabbie/sabbie ghiaiose nei primi 30 metri (Unità AES8).
2004	Zona 4 – Conoide prossimale terrazzata con successioni alluvionali caratterizzate da alternanze di depositi fini e ghiaie/ghiaie sabbiose nei primi 30 metri (Unità AES8).
2005	Zona 5 – Conoide prossimale terrazzata con successioni alluvionali caratterizzate da depositi fini e/o sabbiosi (Unità AES8) sovrastanti ghiaie più addensate a profondità media di 10 metri.
2006	Zona 6 – Conoide prossimale terrazzata con successioni alluvionali caratterizzate da depositi fini e/o sabbiosi (Unità AES8) sovrastanti ghiaie più addensate a profondità media di 5–7 metri.
2007	Zona 7 – Piana di fondovalle con successioni alluvionali caratterizzate da ghiaie sabbiose recenti sub-affioranti di spessore metrico (Unità AES8a), sovrastanti depositi alluvionali antichi (Unità AES7) equiparabili a bedrock pseudo-rigido. Spessore coperture fino a 18–22 metri.
2008	Zona 8 – Conoide prossimale terrazzata con successioni alluvionali caratterizzate da ghiaie sabbiose sub-affioranti di spessore metrico (Unità AES8), sovrastanti ghiaie decametriche e alternanze di depositi alluvionali fini e ghiaie/ghiaie sabbiose equiparabili a bedrock pseudo-rigido. Spessore coperture fino a 33–37 metri.
2009	Zona 9 – Conoide prossimale terrazzata con successioni alluvionali caratterizzate da ghiaie sabbiose sub-affioranti di spessore metrico (Unità AES8) equiparabili a bedrock pseudo-rigido.
2010	Zona 10 – Depositi alluvionali terrazzati (Unità AES6) più alterati e/o fini in superficie oppure con coperture alluvionali recenti (Unità AES8) di modesto spessore (fino a 5 metri), sovrastanti depositi alluvionali antichi equiparabili a bedrock pseudo-rigido.
2011	Zona 11 – Depositi alluvionali terrazzati (Unità AES7a, AES7b) caratterizzati da ghiaie sabbiose sub-affioranti equiparabili a bedrock pseudo-rigido.
2012	Zona 12 – Depositi alluvionali terrazzati (Unità AES6) più alterati e/o fini in superficie (fino a 10–12 metri), sovrastanti depositi alluvionali antichi equiparabili a bedrock pseudo-rigido.

Figura 8.2 – Stralcio della legenda della Tavola 4a/b – Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica: si riportano le zone omogenee del territorio studiato di San Lazzaro di Savena

2013	Zona 13 – Depositi alluvionali terrazzati (Unità AES7b) più alterati e/o fini in superficie, sovrastanti bedrock marino pseudo-rigido alterato (GES, TER, CIG). Spessore coperture/bedrock alterato fino a 15 metri.
2014	Zona 14 – Piana di fondovalle con successioni alluvionali recenti (Unità AES8a) sovrastanti bedrock marino pseudo-rigido alterato (FAA, GES, TER). Spessore coperture/bedrock alterato fino a 10-12 metri.
2015	Zona 15 – Piana di fondovalle con successioni alluvionali recenti (Unità AES8a, AES8) sovrastanti bedrock marino pseudo-rigido alterato (GES, TER, PAT). Spessore coperture/bedrock alterato fino a 5-7 metri.
2016	Zona 16 – Depositi eluvio-colluviali sovrastanti bedrock marino pseudo-rigido alterato (GES). Spessore coperture/bedrock alterato fino a 10-12 metri.
2017	Zona 17 – Bedrock marino pseudo-rigido sub-affiorante (GES).
2018	Zona 18 – Bedrock marino pseudo-rigido alterato (GES). Spessore bedrock alterato fino a 5-7 metri.
2019	Zona 19 – Bedrock marino pseudo-rigido alterato (FAA) con importante riflettore sismico collocabile a circa 25 metri. Localmente coperture alluvionali recenti (Unità AES8a) inferiori a 5-7 metri.
2020	Zona 20 – Depositi alluvionali terrazzati (Unità AES) più alterati e/o fini in superficie sovrastanti bedrock marino pseudo-rigido alterato (IMO3, IMO1). Spessore coperture/bedrock alterato fino a 10-12 metri.
2021	Zona 21 – Bedrock marino di scarsa rigidità sub-affiorante (IMO3, IMO1).

Figura 8.2 bis – Stralcio della legenda della Tavola 4a/b – Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica: si riportano le zone omogenee del territorio studiato di San Lazzaro di Savena

Nella seguente figura 8.3 si riportano gli schemi dei rapporti stratigrafici rappresentativi delle zone stabili.



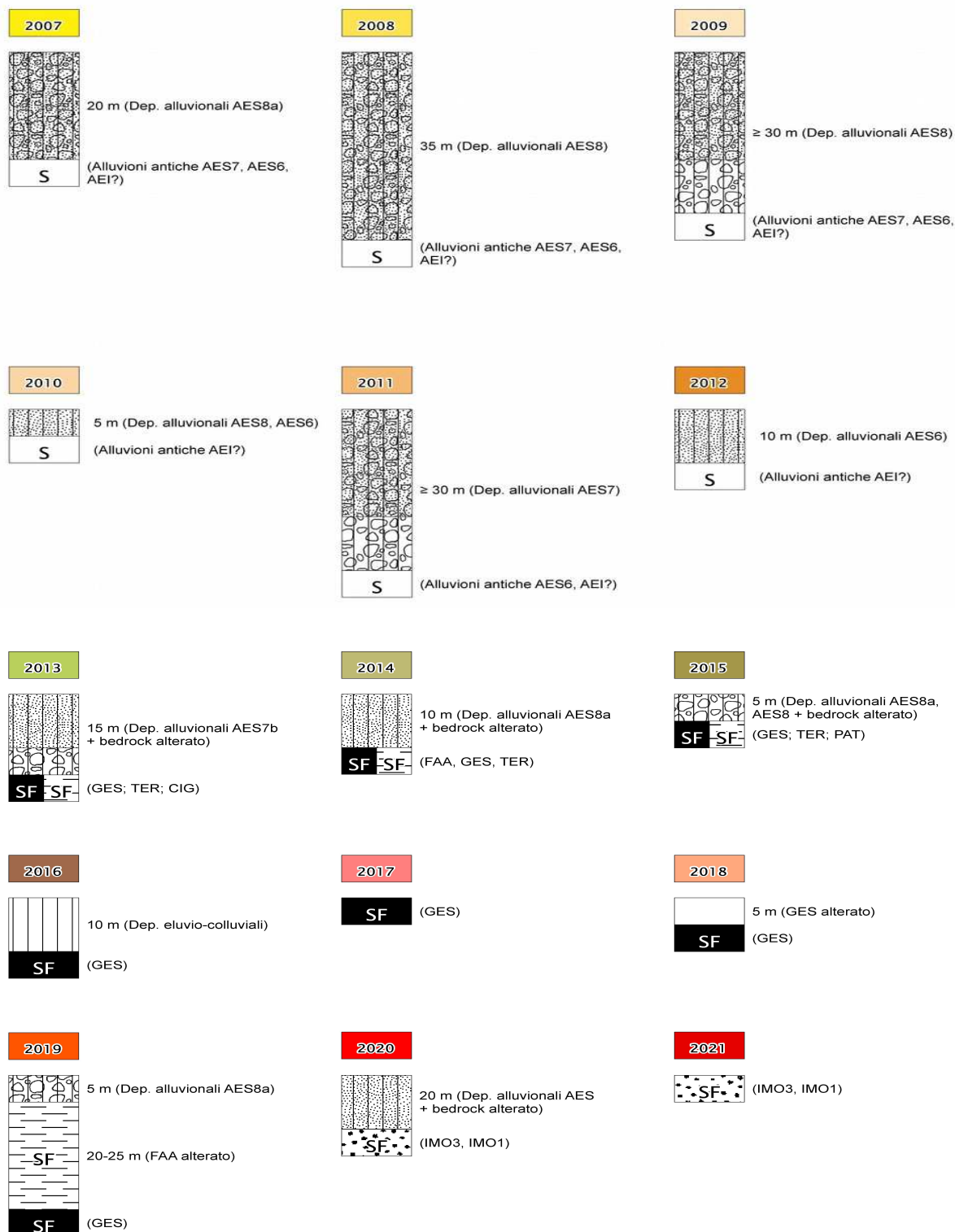


Figura 8.3 – Schemi dei rapporti stratigrafici rappresentativi delle zone stabili

Sono state infine distinte le seguenti zone attenzione per instabilità (di versante, cave e situazioni di crollo/cavità riscontrate nelle litologie GES), così descritte nella legenda (figura 8.4):

	ZA_FR 22 – Zone di attenzione per instabilità di versante attiva per scorrimento. Zona di accumulo di frana con spessore coperture fino a 5 metri.
	ZA_FR 23 – Zone di attenzione per instabilità di versante attiva per colamento. Zona di accumulo di frana con spessore coperture fino a 5 metri.
	ZA_FR 24 – Zone di attenzione per instabilità di versante quiescente per scorrimento. Zona di accumulo di frana con spessore coperture fino a 10 metri.
	ZA_FR 25 – Zone di attenzione per instabilità di versante quiescente per colamento. Zona di nicchia di frana con spessore coperture fino a 5 metri.
	ZA_FR 26 – Zone di attenzione per instabilità di versante quiescente complessa. Zona di accumulo di frana con spessore coperture fino a 10 metri.
	ZA_FR 27 – Zone di attenzione per instabilità di versante non definita. Possibile zona di accumulo di frana.
	ZA_CD – Zona di attenzione per cedimenti differenziali (area di cava tombata)/crollo di cavità/sinkhole.

Figura 8.4 – Stralcio della legenda della Tavola 4a/b – Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica: si riportano le zone di attenzione per instabilità (di versante) perimetrate nel territorio studiato di San Lazzaro di Savena

Nella seguente figura 8.5 si riportano gli schemi dei rapporti stratigrafici rappresentativi delle zone di attenzione per instabilità.

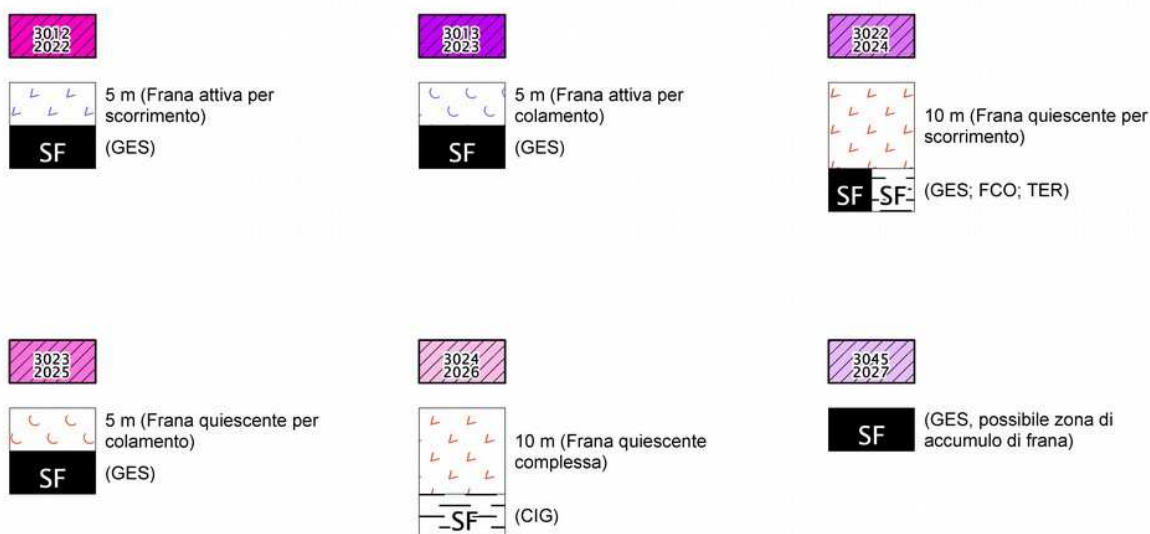


Figura 8.5 – Schemi dei rapporti stratigrafici rappresentativi delle zone di attenzione per instabilità

La cartografia MOPS riporta anche tutti i punti di misura del rumore ambientale con l'indicazione della frequenza fondamentale.

8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5)

La <<Carta delle velocità delle onde di taglio S>>, elaborata alla scala 1:10.000, localizza tutti i punti di misura di V_s , con indicazione, per ogni punto di controllo, del valore della media armonica nei primi 30 metri della velocità delle onde sismiche di taglio ($V_{s_{30}}$) oppure della V_sH .

Tale parametro risulta di fondamentale importanza per la caratterizzazione della risposta sismica locale, sia semplificata (DGR 1227/2015; DGR 2193/2015; criteri nazionali ICMS 2007), sia numerica.

Informazioni relative alle tipologie d'indagine e agli esiti delle Vs misurate nelle aree di approfondimento, sono riportate nei precedenti capitoli a cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

8.6 Carta di microzonazione sismica livello 2 (Tavole 6a/b, 7a/b, 8a/b, 9a)

Le cartografie <<carta di microzonazione sismica livello 2>> sono elaborate alla scala 1:7.000 e riportano le “zone stabili suscettibili di amplificazioni” e le “zone di attenzione per instabilità” per le liquefazioni e le “zone di attenzione” riscontrate nel territorio studiato di San Lazzaro di Savena. Rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente studio di microzonazione sismica.

Si tenga presente che le zone stabili suscettibili di amplificazione derivano dalla cartografia MOPS (Tavola 4) e tuttavia:

- alle “zone stabili suscettibili di amplificazioni” vengono attribuiti i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA SI) attraverso la suddivisione del territorio studiato in classi di amplificazione, come previsto dagli Indirizzi della CTMS e come indicato negli Standard di rappresentazione per la microzonazione sismica (v. 4.0). Si rammenta che agli areali studiati i fattori di amplificazione sono attribuiti sulla base degli abachi regionali (cfr. DGR 2193/2015, allegato A2).
- Per le “zone di attenzione” per instabilità” vengono attribuiti i parametri di amplificazione considerati (FA Pga; FA SI) sono attribuiti sulla base degli abachi regionali (cfr. capitolo 7) e considerando il contesto litostratigrafico e sismico locale. La stima dello spessore di sedimento rimaneggiato e maggiormente amplificabile è compatibile con la presunta profondità del piano di taglio/scivolamento della frana.

La grafica standard (colore pieno) consente di attribuire alle zone di suscettibilità i rispettivi parametri di amplificazione (ricavati dalle modellazioni numeriche di RSL).

In sintesi, sono state elaborate le seguenti quattro cartografie di microzonazione sismica:

- ✓ Tavola 6a/b → riporta il fattore di amplificazione FA PGA (rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0);
- ✓ Tavola 7a/b → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodi compresi tra 0,1 e 0,5secondi);
- ✓ Tavola 8a/b → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodi compresi tra 0,5 e 1,0 secondi);
- ✓ Tavola 9a → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodi compresi tra 0,5 e 1,5secondi).

Occorre precisare che il fattore di amplificazione FA SI relativo a periodi compresi tra 0,5 e 1,5secondi (Tavola 9) non viene incluso negli Standard di rappresentazione della MS (v. 4.0), ma è tuttavia richiesto dagli indirizzi regionali (cfr. DGR 2193/2015). Per questo motivo, negli shape file poligonali “stab” e “istab” è stato creato il nuovo campo <<FH0515>> ove riportare numericamente il valore di quest'ultimo fattore di amplificazione.

9 BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2005) – Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Albarello D. e Castellaro S. (2011) – Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. In AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n.2.
- Basili R., G. Valensise P. Vannoli, P. Burrato, U. Fracassi, S. Mariano, M.M. Tiberti, E. Boschi (2008) – The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. Tectonophysics.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P. e Vannucci G. (2004) – Carta sismotettonica della regione Emilia-Romagna; Note illustrative. A cura di : Boccaletti M. e Martelli L., Servizio geologico sismico e dei suoli.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2004) – *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32–56.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2007) – *Evaluation of cyclic softening in silts and clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133(6): 641–52.
- Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) – Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. *Geologia e tecnica ambientale*, 3.
- Castellaro S. e Mulargia F. (2011) – Seismic soil classification from a different perspective. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13–15.
- Castellaro S. (2012) – H/V: un contributo oltre Vs30. In "Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici" a cura di Mucciarelli M.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C. e Amato A. (2006) – CSI Catalogo della sismicità italiana 1981–2002 versione 1.1. INGV-CNT, Roma, [Online], Available: <http://csi.rm.ingv.it/>.
- Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P. & Ottria G. (2002) – Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, sismico e dei Suoli – CNR, Istituto di Georisorse e Geoscienze, Pisa. S.EL.CA., Firenze.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2015) – Microzonazione sismica –

Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0. Disponibile all'indirizzo web: http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS_4.0_open.pdf .

Crespellani, Nardi, Simoncini (1991) – *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Zanichelli, Bologna.

DISS Working Group (2015) – Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, ©INGV2015 – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0.

Elmi, Zecchi (1982) – *Note sulla sismicità dell'appennino emiliano-romagnolo*. In Guida alla geologia del margine appenninico-padano. *Società Geologica Italiana – Guide Geologiche regionali*, Bologna.

Galli P., Castenetto S., Peronace E. (2012) – *Terremoti dell'Emilia – maggio 2012 – Rilievo Macrosismico MCS speditivo – Rapporto finale*. Dipartimento della Protezione Civile – Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico.

Galli, Meloni, Rossi (1999) – *Historical liquefaction in Italy: relationship between epicentral distance and seismic parameters*. European Geophysical Society XXIII General Assembly Natural Hazards NH3, The Hague, Netherlands.

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. Disponibili nel sito web del Dipartimento della Protezione Civile, area “Rischio Sismico” all'indirizzo: http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833 .

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G. e Valensise G., INGV-SGA (2007) – CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.–1997) and Mediterranean Area (760 B.C.–1500). <http://storing.ingv.it/cfti4med/> .

ISIDe Working Group (2010) – Italian Seismological Instrumental and parametric database. [Online], Available: <http://iside.rm.ingv.it>.

ISPRA (2009) – *Carta Geologica d'Italia, Foglio 221 Bologna*. Coord. Scientifico: Regione Emilia-Romagna. ISPRA, Servizio Geologico d'Italia – Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. SystemCart, Roma.

Lanzo G. & Silvestri F. (1999) – *Risposta Sismica Locale*. Edizioni Hevelius

Locati, R. Camassi e M. Stucchi (a cura di), 2011. *DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>. DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11.

Meletti, Valensise (2004) – *Zonazione sismogenetica ZS9 – App.2 al Rapporto conclusivo*. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Ministero delle Infrastrutture (2008) – D.M. 14/01/2008 (G.U. n.29 del 04/02/2008 – Norme Tecniche per le Costruzioni, Roma.

Pieri M. e Groppi G. (1981) – Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy). Progetto Finalizzato Geodinamica, publ.n° 414, C.N.R., 23.

Provincia di Bologna – *Variante al PTCP in materia di riduzione del rischio sismico. Adeguamento alla L.R. 19/2008.* 2013

Regione Emilia Romagna – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, CNR – Istituto di Geoscienze e Georisorse (2004) – *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna – scala 1:250.000.* Ed. SELCA, Firenze.

Regione Emilia Romagna – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Carta Geologica in scala 1:10.000 della regione Emilia-Romagna – cartografia interattiva consultabile on line: https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss

Regione Emilia Romagna – *Legge Regionale n.20/2000 – “Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio”.*

Regione Emilia Romagna – *Delibera Regionale n.112/2007 – “Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della LR 20/2000 Disciplina generale sulla tutela del territorio, in merito a <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>”.*

Regione Emilia Romagna – Delibera della Giunta Regionale n.2193/2015 – “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 ed urbanistica>>, di cui alla deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112”.

Robertson P.K. (2009). *Performance based earthquake design using the CPT.* Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering – from case history to practice, IS-Tokyo, June 2009.

Robertson P.K., Lisheng S. (2010). Estimation of seismic compression in dry soils using the CPT. *FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING AND SOIL DYNAMICS, Symposium in honor of professor I. M. Idriss, San diego, CA.*

Robertson P.K., Cabal K.L. (2010). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. *Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010.*

Robertson P.K. (2009). Interpretation of Cone Penetration Tests – a unified approach., *Canadian Geotechnical Journal* 46(11): 1337-1355.

Robertson P.K. (2010). Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 136, 842 (2010).

Robertson P.K. and, Wride CE . (1998). “Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test”. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, Vol. 35, No. 3 : pp. 442-459.

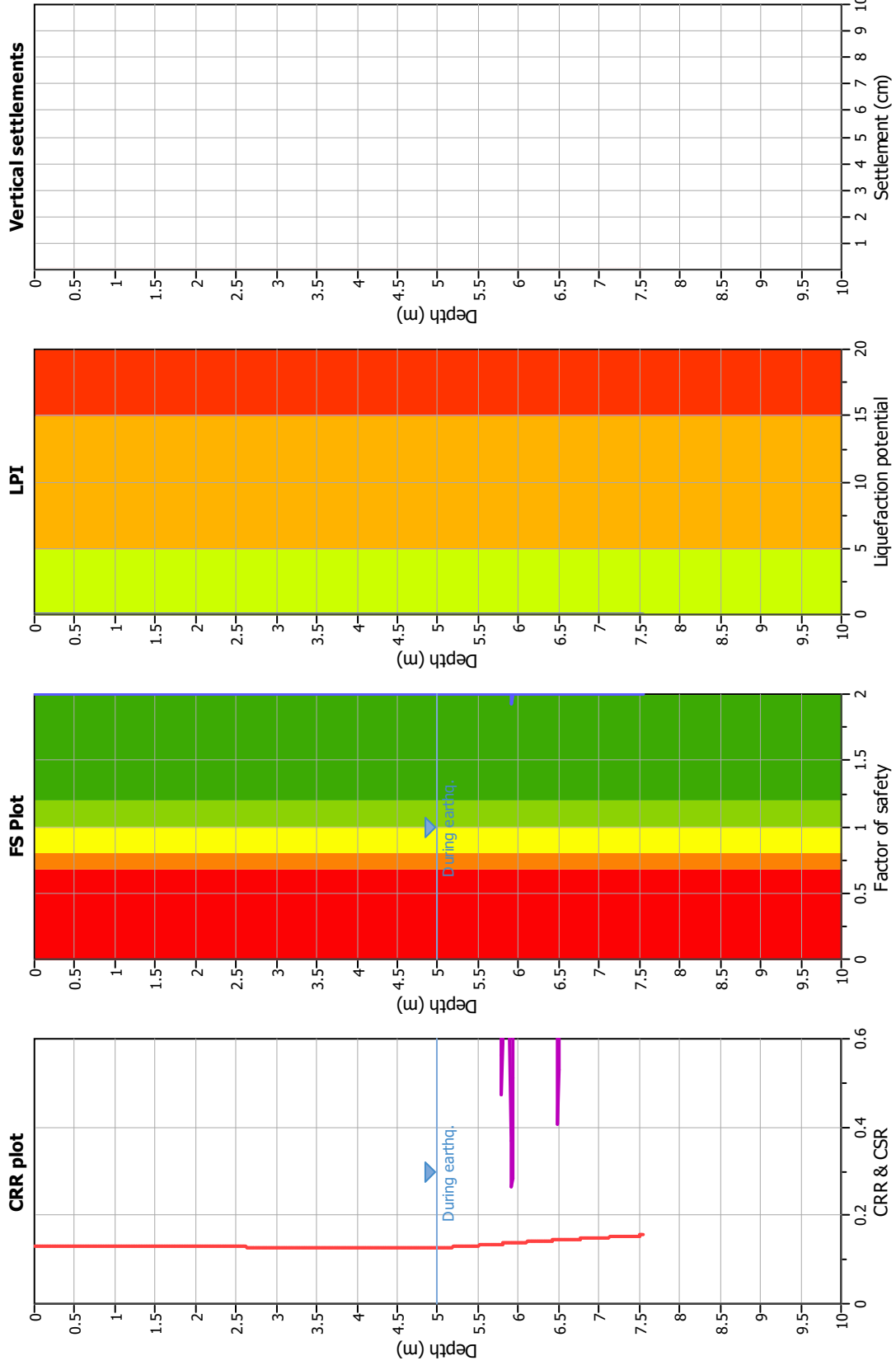
Tarabusi G. (2013). Studio di Microzonazione Sismica del Comune di Calderara di Reno – Livello 2 – in attuazione dell'art. 11 della Legge n.77/2009.

Youd, T.L., and Idriss, I.M. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(4), 297–313.

Zhang, Robertson, Brachman (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(5) : 1168–1180, 10.1139/t02-047.

ALLEGATO: VERIFICHE LIQUEFAZIONE PROVE CPTU

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: Robertson (2009)
 Fines correction method: Robertson (2009)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.28
 Depth to water table (insitu): 8.00 m

Depth to water table (earthq.): 5.00 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: Yes
 K_σ applied: Yes
 Clay like behavior applied: All soils
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

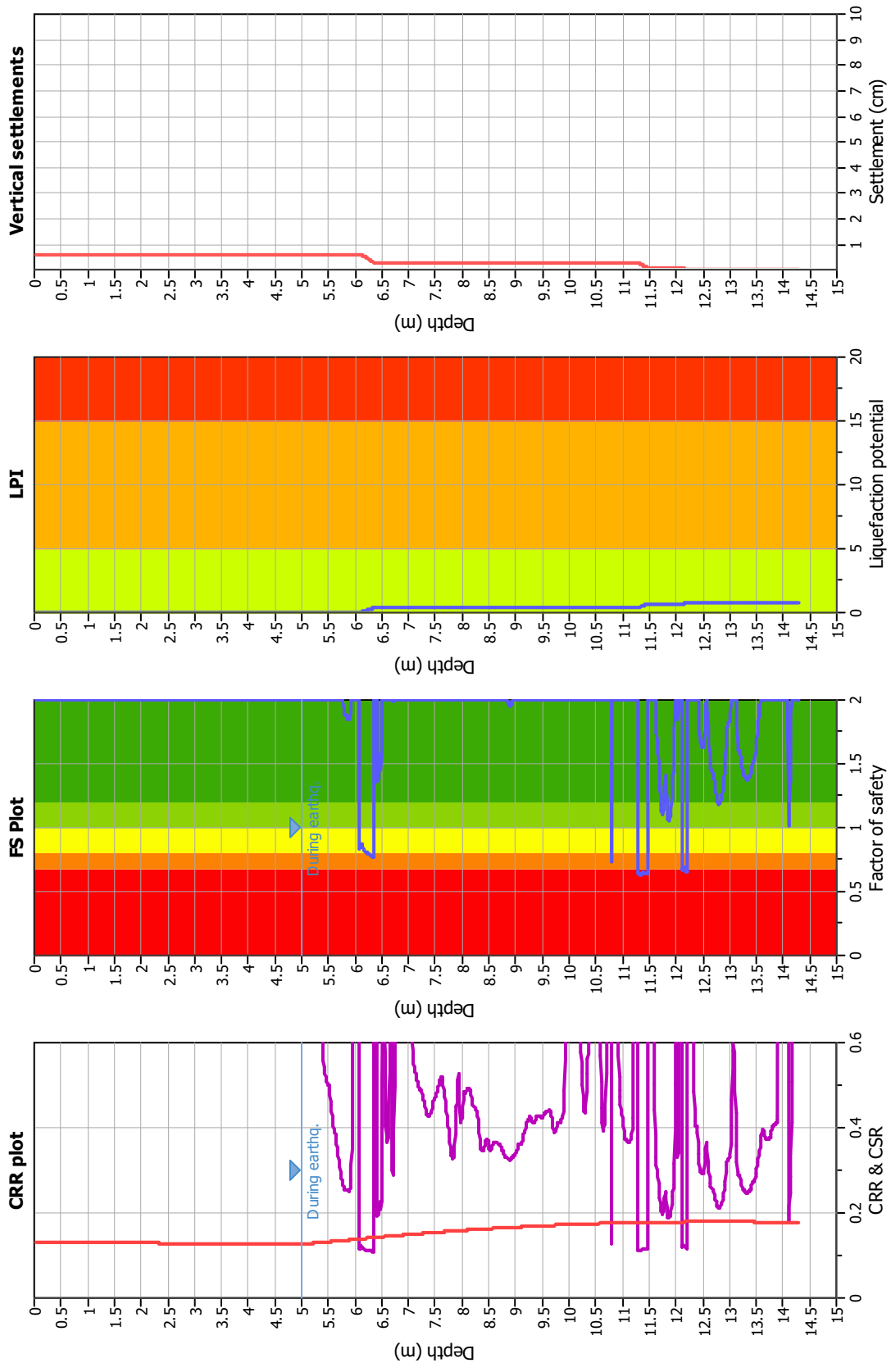
F.S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy
■ Very likely to liquefy
■ Liquefaction and no liq. are equally likely
■ Unlikely to liquefy
■ Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

■ Very high risk
■ High risk
■ Low risk

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: Robertson (2009)
 Fines correction method: Robertson (2009)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.28
 Depth to water table (insitu): 6.40 m

F.S. color scheme

Almost certain it will liquefy
 Very likely to liquefy
 Liquefaction and no liq. are equally likely
 Unlikely to liquefy
 Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Very high risk
 High risk
 Low risk

Fill weight: N/A
 Transition detect: applied: Yes
 K_σ applied: Yes
 Clay like behavior applied: All soils
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

Depth to water table (earthq.): 5.00 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A