



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna
Comune di Sant'Agata Bolognese



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA		
Comune		
SANT'AGATA BOLOGNESE	STUDIO SAMUEL SANGIORGI Via Valsellustra 32 40060 Dozza (BO)	20/10/2014
		

INDICE GENERALE

1 INTRODUZIONE.....	2
2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	5
2.1 Sorgenti sismogeniche e terremoti di riferimento.....	5
2.2 Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012.....	10
2.3 Altri elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale.....	12
2.3.1 <i>Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL regionale n.112/2007)</i>	12
2.3.2 <i>La pericolosità preliminare elaborata per il PSC e per il PTCP di Bologna</i>	13
3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA.....	16
4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	22
4.1 Dati pregressi.....	22
4.2 Le indagini effettuate per la microzonazione sismica.....	23
5 ELABORAZIONE DEI DATI E RISULTATI.....	33
5.1 Modello di sottosuolo.....	33
5.1.1 <i>Sottosuolo profondo</i>	33
5.1.2 <i>Caratterizzazione geotecnica del sottosuolo sub-affiorante</i>	39
5.2 L'analisi della risposta sismica locale.....	42
5.2.1 <i>L'analisi del rumore sismico ambientale</i>	42
5.2.2 <i>I fattori di amplificazione semplificati per la microzonazione di livello 2</i>	46
5.3 L'analisi della liquefacibilità e dei cedimenti post-sisma dei sedimenti.....	48
5.3.1 <i>Aspetti generali</i>	48
5.3.2 <i>Analisi delle condizioni locali di suscettibilità alla liquefazione</i>	49
5.3.3 <i>Ulteriori valutazioni sul rischio di liquefazione</i>	55
5.4 Conclusioni e commenti.....	59
6 ELABORATI CARTOGRAFICI.....	61
6.1 Carta delle Indagini.....	61
6.2 Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica.....	61
6.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni.....	63
6.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS).....	64
6.4.1 <i>Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali</i>	64
6.4.2 <i>Zone di attenzione per instabilità</i>	66
6.5 Carta delle velocità delle onde di taglio (Vs).....	66
6.6 Carta di microzonazione sismica livello 2.....	67
6.6.1 <i>Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali</i>	67
6.6.2 <i>Zone di attenzione per instabilità</i>	68
7 BIBLIOGRAFIA.....	69

1 INTRODUZIONE

L'Amministrazione comunale di Sant'Agata Bolognese è risultata destinataria di contributi per la realizzazione di studi di Microzonazione sismica del territorio di propria competenza, finanziati con OCDPC 52/2013 in Emilia-Romagna (DGR 1919/2013). Il Comune di Sant'Agata Bolognese ha pertanto affidato allo Studio scrivente l'elaborazione delle analisi di microzonazione sismica con approfondimenti di "secondo livello". Lo Studio scrivente è stato inoltre incaricato dall'Amministrazione comunale dell'elaborazione delle analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE), i cui contenuti sono descritti in altra Relazione.

Il lavoro di microzonazione sismica del Comune di Sant'Agata Bolognese è elaborato secondo i criteri generali dettati nell'OCDPC 52/2013 e secondo i criteri per gli studi di microzonazione sismica riportati negli allegati della deliberazione della Giunta Regionale (Emilia-Romagna) n. 1919 del 16/12/2013. Più nel dettaglio, si precisa che l'elaborazione dello studio di microzonazione e la redazione degli elaborati richiesti sono impostati secondo i contenuti tecnici degli <<Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica>> approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle regioni e delle provincie Autonome (di seguito indicate come "ICMS 2008").

Per i depositi e le forme che possono determinare effetti locali si è fatto riferimento agli Allegati della deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 2 maggio 2007 (di seguito indicata come "DAL 112/2007").

Occorre rammentare che l'Amministrazione di Sant'Agata Bolognese già dispone di uno studio¹ sismico preliminare elaborato a corredo del Quadro Conoscitivo per il Piano Strutturale Comunale (PSC) in forma associata². La Provincia di Bologna ha inoltre elaborato nel 2012, a supporto del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP), lo studio e la cartografia³ di pericolosità sismica preliminare, individuando alla scala amministrativa di pertinenza le zone suscettibili degli effetti locali nell'intero territorio provinciale.

Considerando gli studi pregressi, in accordo con il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della regione Emilia-Romagna e con la Provincia di Bologna, lo studio di microzonazione sismica di secondo livello elaborato per il Comune di Sant'Agata Bolognese permette un ulteriore aggiornamento della pericolosità sismica locale per l'intero territorio comunale e in particolare per le aree urbanizzate e urbanizzabili, ove si sono concentrate la maggior parte delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite per questo lavoro.

¹ <<Piano Strutturale Comunale dell'Associazione Intercomunale Terre d'Acqua che comprende i Comuni di Anzola dell'Emilia, Calderara di Reno, Sala Bolognese, Crevalcore, Sant'Agata Bolognese e San Giovanni in Persiceto – Quadro Conoscitivo – Sistema Naturale e Ambientale>> (Tavola di pericolosità sismica locale, scala 1:25.000)

² Ai sensi della LR n.20/2000 e ss.mm.

³ <<Tavola 2C – "Rischio Sismico – Carta degli Effetti Locali Attesi" >> alla scala 1:65.000 per la pianura e 1:25.000 per la collina e montagna;

Nel Lavoro si è dunque tenuto conto degli esiti degli studi sismici preliminari, aggiornandoli sulla base degli esiti delle nuove indagini espletate e sulla base dei contenuti richiesti dalla citata normativa sismica di riferimento per questo lavoro.

Come già anticipato, lo studio di microzonazione si è basato sugli esiti delle nuove indagini geognostiche e geofisiche espletate per questo lavoro (descritte nei successivi capitoli) e sugli esiti delle indagini pregresse che si sono potute acquisire nel corso del lavoro. In particolare, si è potuto disporre di informazioni geognostiche e geofisiche pregresse recuperate dai seguenti archivi:

- banca dati delle indagini “in situ” predisposta dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS) della regione Emilia-Romagna;
- Ufficio Tecnico del Comune di Sant'Agata Bolognese (Relazioni Geologiche allegate a istanze di permessi di costruire e/o Relazioni Geologiche elaborate per la predisposizione di Varianti o Piani Particolareggiati o Attuativi, ecc.).

Le cartografie elaborate hanno utilizzato come base topografica di riferimento lo strato vettoriale fornito dall'Amministrazione comunale, costruito a partire dalla Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5.000 (elementi: 202062; 202092; 202101; 202102; 202103; 202104; 202114; 202141; 202144), più aggiornato per quanto riguarda lo stato dell'urbanizzato (edifici e viabilità). Per questo lavoro, la base topografica vettoriale è stata georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto, ovvero nelle coordinate “WGS_1984_UTM_Zone_33N”, per produrre tutti gli strati informativi delle analisi in coerenza con quanto richiesto dall'OCDPC 52/2013 e dalla deliberazione regionale 1919/2013.

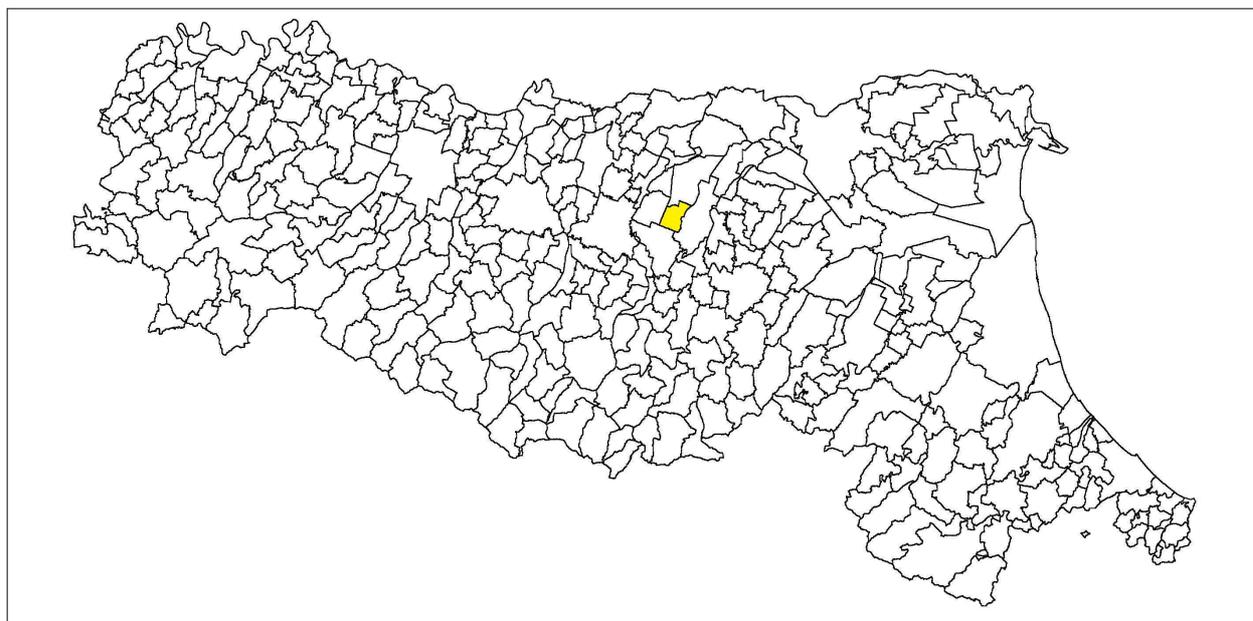


Figura 1.1 - Localizzazione del territorio comunale di Sant'Agata Bolognese (evidenziato in giallo) rispetto ai Comuni dell'Emilia-Romagna.

La figura 1.1 propone un inquadramento del limite comunale di Sant'Agata Bolognese rispetto ai Comuni dell'Emilia-Romagna: si tratta di un'Amministrazione situata in contesto completamente di pianura e di estensione areale complessiva pari a circa 3.477 ettari.

La figura 1.2 propone uno stralcio della topografia tecnica regionale alla scala 1:250.000, mentre la figura 1.3 localizza le aree urbane/urbanizzate (il Capoluogo e le due frazioni Maggi e Crocetta, ove si sono concentrate la maggior parte delle indagini d'approfondimento), sulla Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5.000. Il limite dell'area studiata è stato sempre ben riportato nelle tavole elaborate per lo studio di microzonazione.

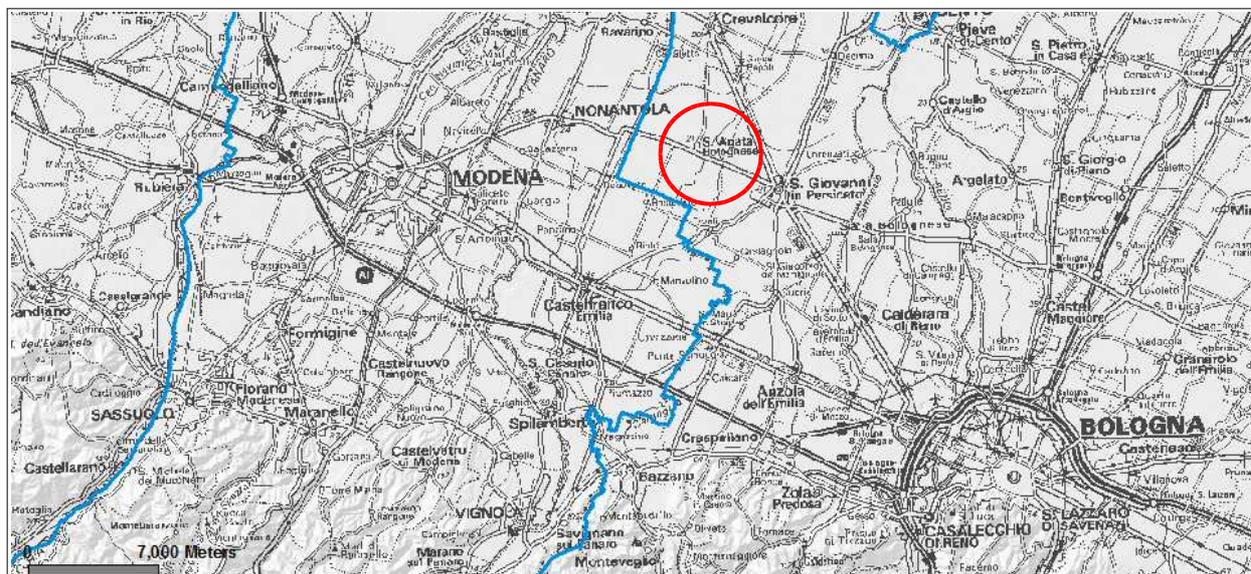


Figura 1.2- Localizzazione topografica del Comune di Sant'Agata Bolognese (su base topografica alla scala 1:250.000 della Regione Emilia-Romagna).

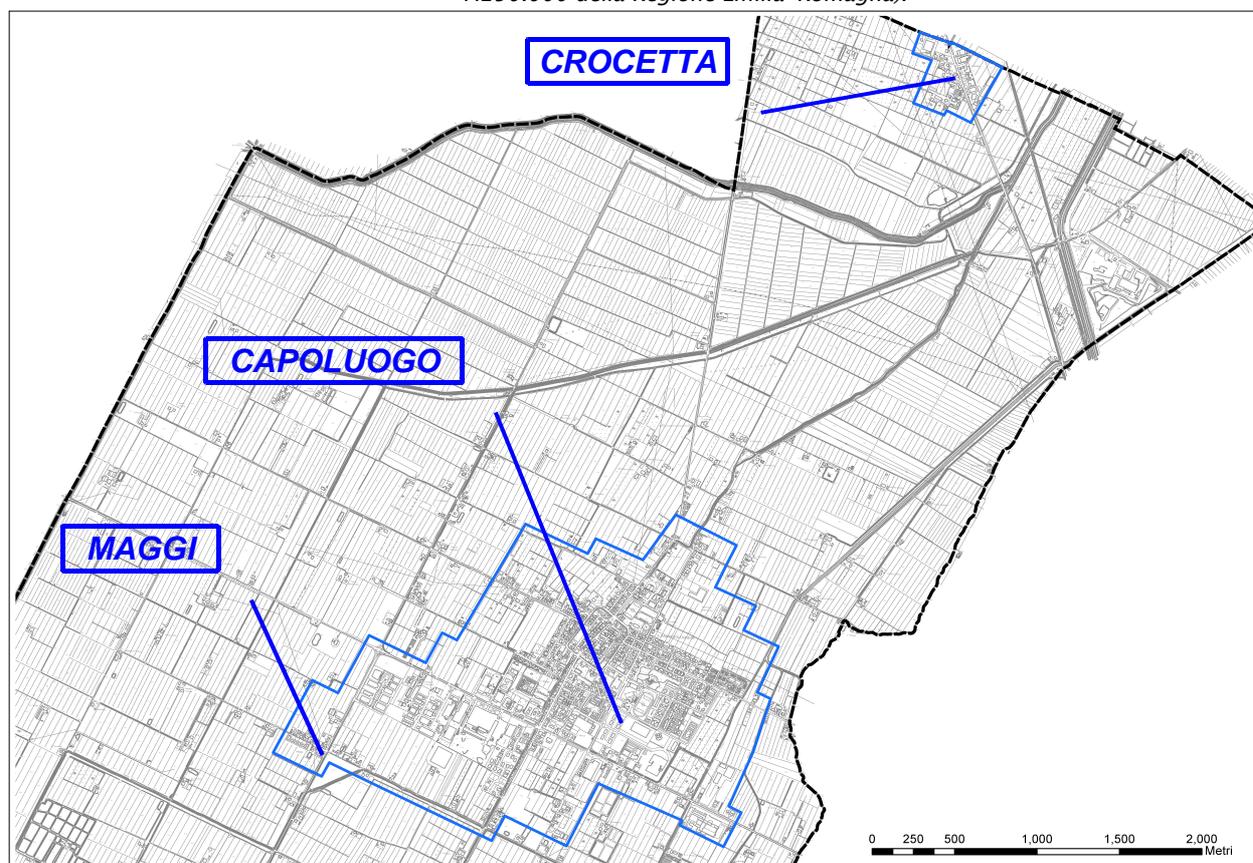


Figura 1.3- Delimitazione delle aree oggetto di indagine (su base topografica alla scala 1:25.000 della Regione Emilia-Romagna).

2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Sorgenti sismogeniche e terremoti di riferimento

La sismicità che caratterizza la penisola italiana è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale e quindi alla presenza di strutture geologicamente “attive⁴”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è dunque l'indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui sismi avvenuti nel passato e della geologia strutturale locale, entrambe strettamente connesse tra loro).

Le evoluzioni scientifiche e tecnologiche susseguitesesi in particolare dal 1800 hanno permesso catalogazioni sempre più dettagliate dei terremoti, analisi più raffinate dei meccanismi di innesco e di propagazione dei sisma e una progressiva migliore conoscenza delle zone o delle strutture responsabili della sismicità (“zone” o “sorgenti sismogenetiche”) presenti nel territorio italiano.

Recentemente, la Regione Emilia-Romagna, a conclusione di un lungo lavoro iniziato alla fine degli anni '70 del secolo scorso, ha prodotto la <<Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna>>, edita nel 2004 alla scala 1:250.000, che riporta gli epicentri dei terremoti noti con Magnitudo $M > 4$, le strutture attive e quelle potenzialmente sismogenetiche (della catena appenninica, del suo margine e quelle correlate alle strutture del sottosuolo padano-adriatico) ed i relativi meccanismi focali tettonici. La localizzazione degli epicentri si è basata sulla catalogazione nazionale dei terremoti CPTI⁵. La figura 2.1 riporta la sovrapposizione del territorio di Sant'Agata Bolognese con la Carta Sismotettonica regionale, mentre la figura 2.2 riporta la cartografia degli epicentri dei terremoti della regione Emilia-Romagna, desunti dal catalogo CPTI e suddivisi per classi di magnitudo.

A livello nazionale si è invece giunti, attraverso varie fasi di studi e revisioni, all'ultima zonazione sismogenica del territorio nazionale, nota con la semplice sigla “ZS9” (2004), prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Questa zonazione rappresenta il più recente riferimento per gli studi di pericolosità sismica del territorio italiano, ed è stata elaborata riferendosi anche ai più recenti background informativi sui terremoti, in particolare CPTI e le ultime banche dati relative alle sorgenti sismogeniche italiane: DISS 2.0⁶. Il catalogo CPTI, divulgato nel 1999 è frutto del lavoro sinergico di diversi gruppi di ricerca operativi nel settore della sismologia storica e della macrosismica (GNDT, INGV e SSN) e rappresenta un catalogo parametrico dei terremoti italiani e il primo prodotto di comune riferimento per le stime di “rischio”.

⁴ La definizione di faglia <<attiva>> è ancora fonte di accese discussioni scientifiche tra i vari Autori, riferendosi alla possibilità di riattivazione in un intervallo temporale che possa interferire con la nostra società: dall'olocenico (circa 12.000 anni, secondo l'U.S. E.P.A., 1981), al “regime tettonico corrente” (Muir Wood & Mallard, 1992).

⁵ Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (Gruppo di lavoro CPTI, 1999–2002).

⁶ Database of Potential Sources for Earthquake Larger than M 5.5 in Italy (Valensise e Pantosti, 2001).

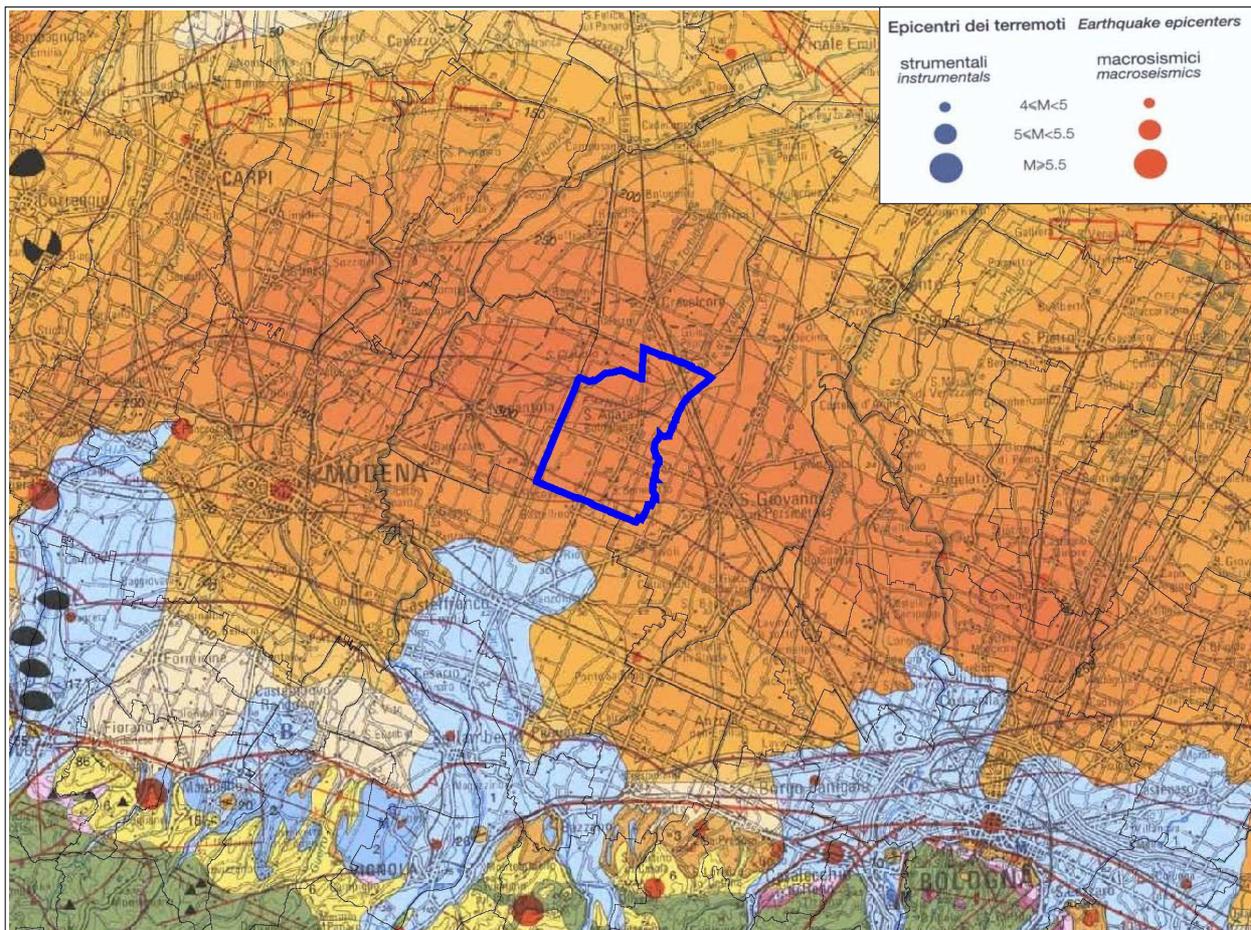


Figura 2.1- Sovrapposizione del territorio comunale di Sant'Agata Bolognese con la Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (2004). Si riporta uno stralcio della legenda relativamente alla classificazione degli ipocentri dei terremoti strumentali di $M_w > 4$ e l'epicentro dei più significativi effetti macroscismici. La fonte regionale degli eventi sismici riportati è il catalogo parametrico nazionale dei terremoti storici (CPTI, 1999).

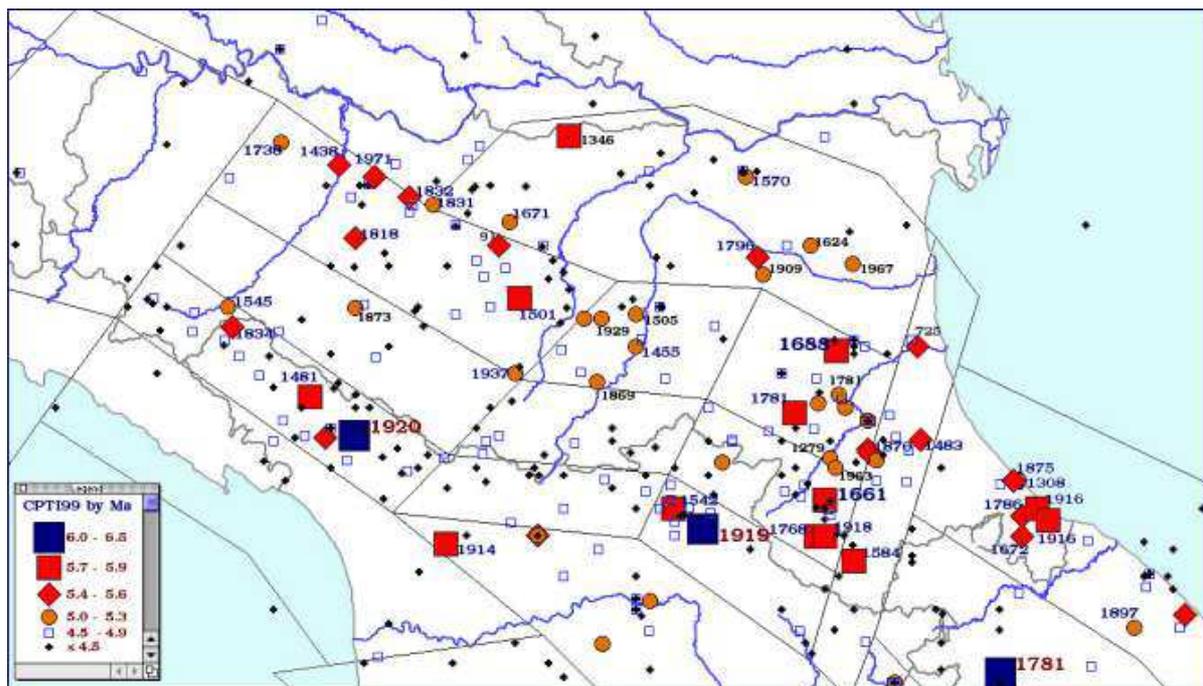


Figura 2.2- Carta degli epicentri dei terremoti (CPTI, 1999) della Regione Emilia-Romagna per classi di magnitudo, estrapolata dal sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS) regionale.

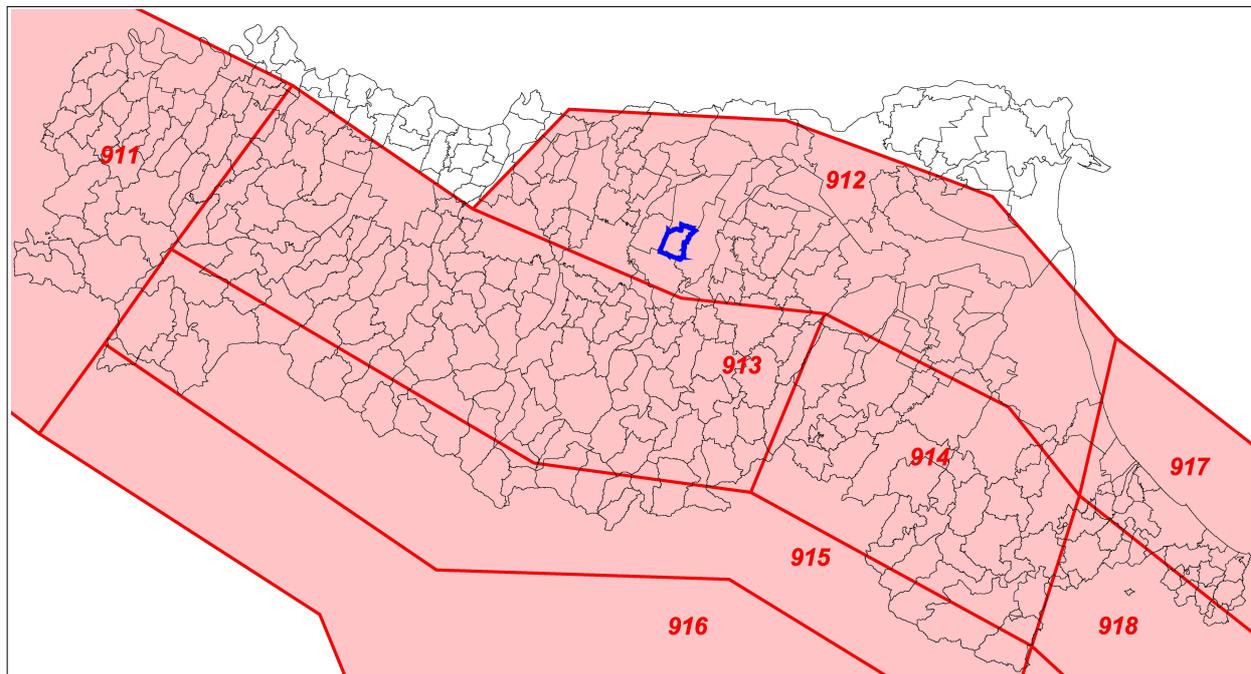


Figura 2.3 - Amministrazione territoriale di sant'agata bolognese e zonazione sismogenetica ZS9.

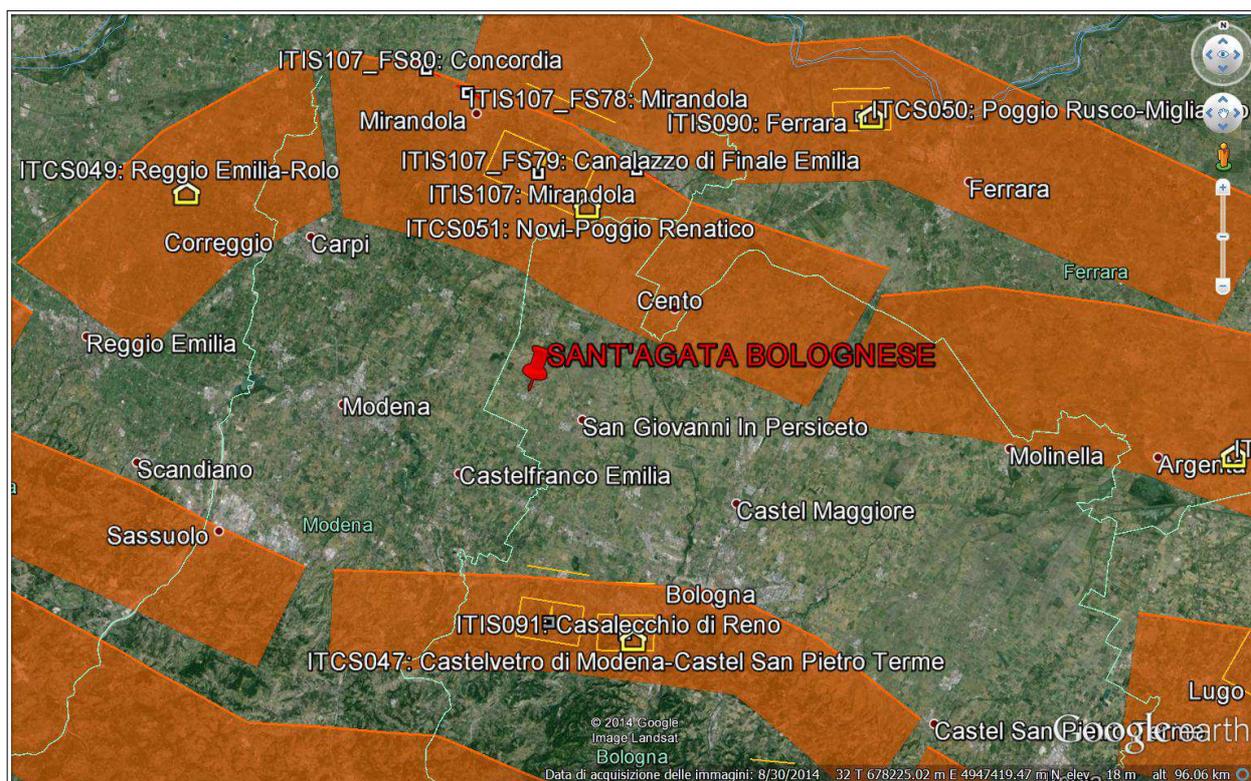


Figura 2.4 - Zonazione sismogenetica ZS9 e distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (versione aggiornata 3.1). Foto aerea: Google Earth. Nel database DISS le sigle ITCS corrispondono alle "fasce" di sorgenti composite, mentre le sigle ITIS corrispondono alle "sorgenti" sismogenetiche singole.

Il catalogo CPTI, pur essendo un prodotto preliminare (in seguito affiancato da un'ulteriore versione più aggiornata del 2004), costituisce ancora oggi un riferimento fondamentale per le analisi di pericolosità e per le stime di rischio.

Il database DISS 3.1 costituisce, invece, la versione più aggiornata e disponibile di DISS, relativamente alla localizzazione, alla distribuzione e alle informazioni note delle sorgenti sismogeniche nel contesto italiano nazionale.

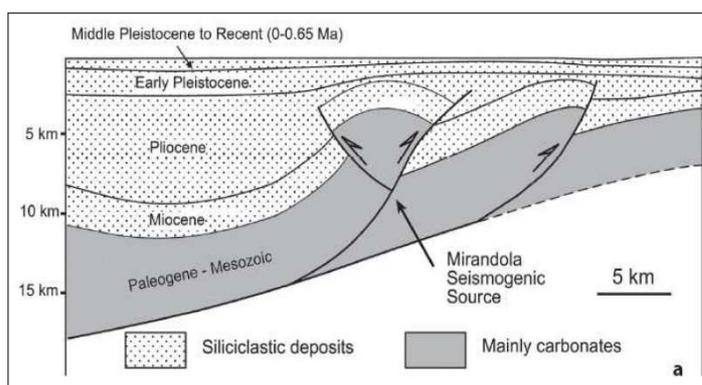
La figura 2.3 propone la sovrapposizione del territorio comunale di Sant'Agata Bolognese con la zonazione ZS9: l'area di studio ricade nella zona 912, cioè in una delle zone in cui è stato scomposto longitudinalmente l'arco appenninico centro settentrionale e il suo margine sepolto, da Parma fino all'Abruzzo. In particolare, la zona 912 rappresenta la porzione più avanzata e sepolta della fascia in compressione dell'arco appenninico settentrionale che si spinge fino al Po e caratterizzata da meccanismi di fagliazione inversa prevalente (Meletti & Valensize, 2004): ad essa viene attribuita un valore di Magnitudo Mw_{max} pari a 6.14.

La figura 2.4 offre invece la sovrapposizione del territorio di Sant'Agata Bolognese con le sorgenti sismogeniche individuate nel database DISS, nella sua versione più aggiornata e disponibile (DISS 3.1). Questo fondamentale database evidenzia come il territorio di Sant'Agata Bolognese ricada esternamente a sorgenti sismogeniche note, peraltro risulta limitrofa alle fasce di sorgenti composite denominate:

1. la <<ITCS051 - Novi-Poggio Renatico>> situata a nord, questa fascia sismogenetica attraversa parte del territorio di pianura bolognese e modenese ed è caratterizzata da una Magnitudo Mw_{max} pari a 5.9. In sintesi, la sismicità locale è data prevalentemente dall'attività delle faglie compressive delle "Pieghe Ferraresi" (Pieri & Groppi, 1981): questo sistema di pieghe-faglie ha dato origine alle due principali dorsali sepolte ("interne" ed "esterne") che descrivono un arco vergente verso nord, esteso tra Reggio Emilia e la costa adriatica e che si spinge fino ed oltre il Po ferrarese (Bigi et al., 1990). Queste dorsali sepolte, sono il risultato dell'attività di faglie inverse (thrust) la cui attività è iniziata nel Pliocene medio-superiore, con vergenza settentrionale e piano di scorrimento immergente verso sud; di attivazione più recente sono le strutture retrovergenti con piano di scorrimento immergente verso nord (backthrust) che interessano soprattutto gli orizzonti più superficiali (Martelli, 2014).

La più vicina sorgente sismogenica individuale nota (fino al 2012) e compresa in questa fascia è denominata "ITIS107 - Mirandola": ad essa è stata attribuita una $Mw_{max} = 5,9$, basata su considerazioni prevalentemente geologiche, in quanto non risultavano ben noti episodi sismici di rilevanza associati a tale zona. Questa sorgente è coincidente con il trusth che forma la struttura anticlinale sepolta dell'"Alto di Mirandola" (figura 2.5) e ad essa sono associate le faglie attive "Mirandola" (F78), "Canalazzo di Finale Emilia" (F79) e "Concordia" (F80); è dunque effettivamente sismica, sebbene con tempi di ritorno (per eventi significativi) non chiaramente valutabili;

Figura 2.5 - Schema geologico e fagliazione della zona mirandolese (Pieri & Groppi, 1981)



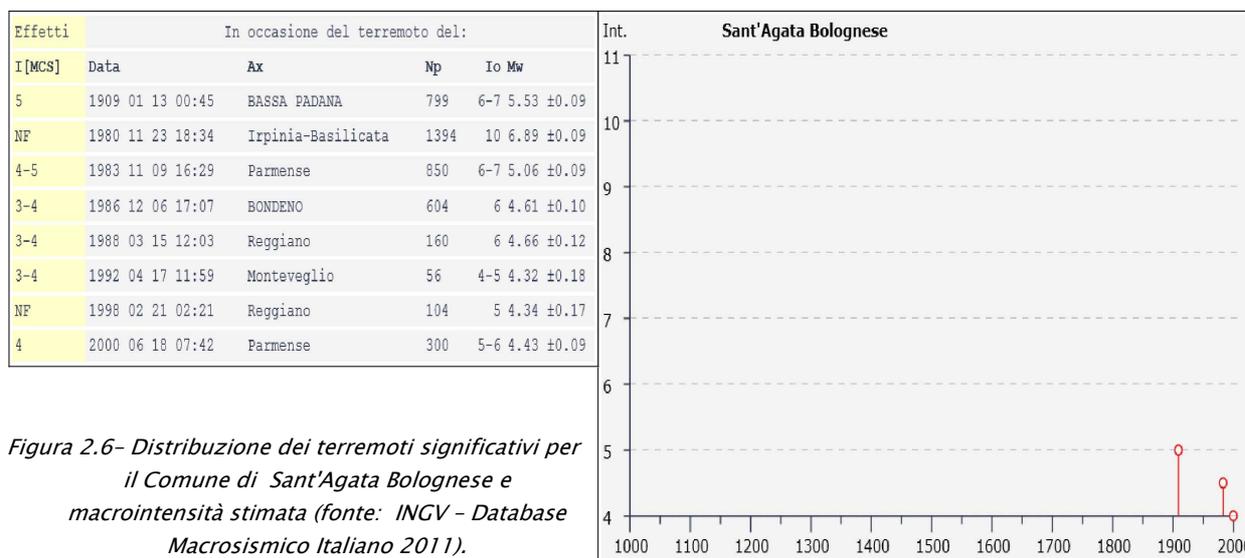
2. la <<ITCS047 - Castelvetro di Modena - Castel San Pietro Terme>> che interessa i territori appenninici e pedeappenninici situati più a sud, con una magnitudo stimata di $M_w = 5,6$ e derivata dalle magnitudo dei terremoti più significativi bolognesi (1505 e 1929) e modenesi (1399).

La più vicina sorgente sismogenica individuale nota è denominata "ITIS103 - Crespellano", alla quale 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).

"ITIS091 - Casalecchio di Reno" a cui 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).

Un'ulteriore sorgente sismogenica individuale è la "ITIS091 - Casalecchio di Reno", alla quale è attribuita una $M_w = 5,5$ associata al terremoto bolognese del 3 gennaio 1505 (fonte: CPTI, 2004); per tale evento, 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, 1982) ed i seguenti effetti indotti dal sisma: frane, fratture superficiali (Boschi et al., 2000), effetti di liquefazione a Zola Predosa (Prestininzi e Romeo, 2000).

Si tratta di aree sismogeniche che, in entrambi i casi, distano dal Capoluogo comunale poco meno di 20 km.



In conclusione, sia gli studi nazionali, sia quelli regionali, attribuiscono al territorio studiato una pericolosità "media", con terremoti locali moderatamente forti ed epicentri storici che hanno interessato località limitrofe al territorio di Sant'Agata Bolognese. In questo senso, la figura 2.6 riporta un grafico della distribuzione temporale dei terremoti più significativi che hanno

coinvolto il territorio studiato, fino al 2011⁷, e le relative intensità macrosismiche stimate sulla base dei danni e degli effetti percepiti nel territorio in questione: sulla base degli archivi INGV non risultano eventi storici particolarmente significativi, con intensità massima stimata fino al quinto grado.

Occorre ricordare che tutti gli archivi finora citati non sono aggiornati rispetto agli eventi sismici del maggio 2012 che hanno coinvolto parte della pianura padana soprattutto nel ferrarese e modenese e di cui si accennerà nel successivo paragrafo.

Infine, si rimanda al successivo capitolo 3 per una sintesi sugli aspetti geologico strutturali generali, che risultano di fondamentale importanza per una migliore comprensione della pericolosità sismica dell'area studiata.

2.2 Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012

Dal 20 maggio 2012 una vasta porzione della Pianura Padana⁸ è stata interessata da una sequenza sismica, con una prima forte scossa (di magnitudo locale ML=5.9), registrata alle ore 4:03 locali e con epicentro tra Mirandola (MO) e Finale Emilia (MO). A tale sisma sono seguite dopo pochi minuti altre due scosse importanti, la prima di ML =4,8 e la seconda di ML =5,1, con epicentro nel territorio comunale di Bondeno (FE). Successivamente, tra il 20 maggio e il 3 giugno 2012, si sono state registrate altre 5 forti scosse (ML >5), con epicentri distribuiti tra Novi di Modena (MO) e Vigarano Mainarda (FE). Tra queste, la più forte e disastrosa (ML =5.8) è avvenuta il 29 maggio 2012 con epicentro tra Mirandola (MO) e Medolla (MO). La figura 2.7 localizza gli epicentri della citata sequenza emiliana.

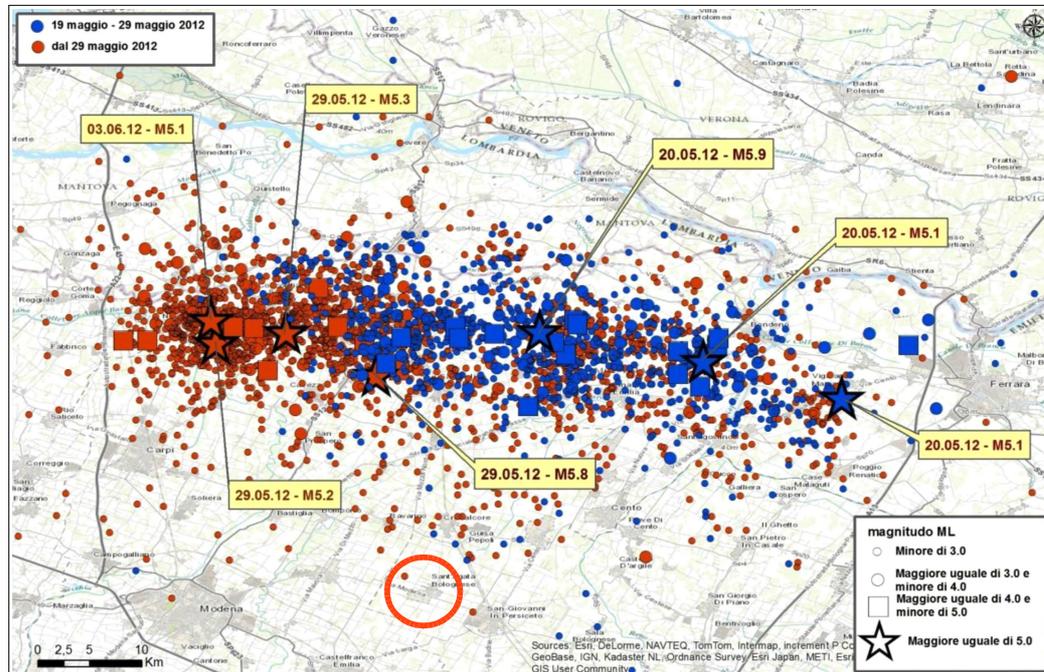


Figura 2.7 – Localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (fonte: INGV <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>). In cerchiato arancio l'area di studio.

⁷ Database Macrosismico Italiano v. DBMI11, 2011 a cura di M. Locati, R. Camassi e M. Stucchi (INGV).

⁸ Compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara.

I maggiori effetti locali osservati sono risultati amplificazione del moto sismico e fenomeni di liquefazione, questi ultimi diffusi soprattutto in corrispondenza di rami abbandonati dei fiumi appenninici (Reno, Panaro e Secchia) e, subordinatamente, del Po⁹. In termini di amplificazione, si sono invece registrate massime accelerazioni orizzontali al sito (Pga) che hanno superato 0,2g e in alcune aree anche 0,3g. Nel territorio di Sant'Agata Bolognese, le massime Pga stimate¹⁰ per tali eventi sismici sono risultate comprese tra 0,05g e 0,1g.

La figura 2.8 propone una sintesi degli effetti macrosismici osservati, in relazione all'entità dei danni ai manufatti e al Comune di Sant'Agata Bolognese è stata attribuita una macrosismicità massima compresa tra 5 e 6 gradi della scala MCS. Il territorio comunale di Sant'Agata Bolognese è stato solamente lambito dagli effetti più gravosi causati dalle scosse del maggio e giugno 2012, con pochi edifici effettivamente lesionati e localizzati nella porzione più settentrionale, cioè più vicini alle zone epicentrali. Complessivamente, nell'intero Comune, le verifiche di agibilità AEDES effettuate a seguito del sisma hanno contato otto edifici abitativi significativamente lesionati, di cui due classificati "E" (inagibili) e altri sei classificati "B" oppure "C" (temporaneamente inagibili o parzialmente inagibili).

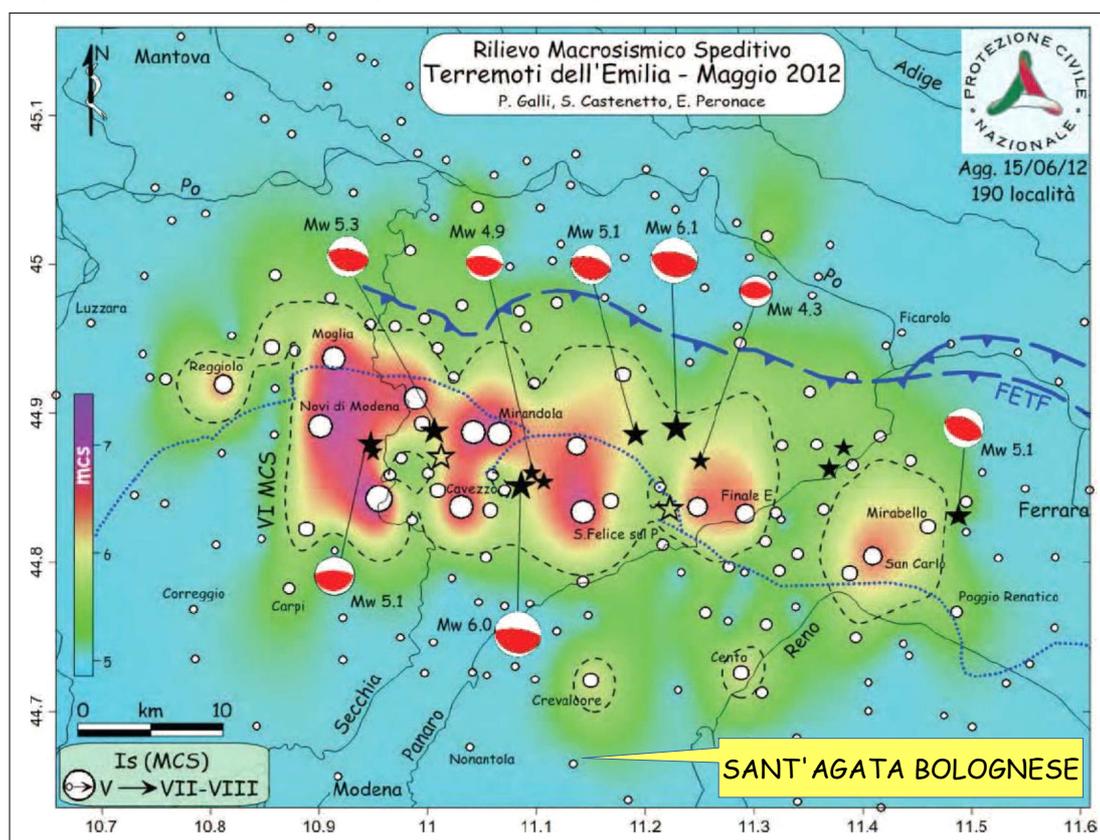


Figura 2.8- Schema delle intensità macrosismiche osservate (Galli et al., 2012).

⁹ Fonte: "Microzonazione sismica e analisi della CLE delle aree epicentrali dei terremoti della Pianura Emiliana di maggio-giugno 2012" - Relazione Illustrativa a cura di L. Martelli e M. Romani e "Rilievo macrosismico MCS speditivo - Rapporto Finale" a cura di P. Galli, S. Castenetto e E. Peronace.

¹⁰ Fonte: INGV (consultabile on line da <http://shakemap.rm.ingv.it/shake/archive/>).

2.3 Altri elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale

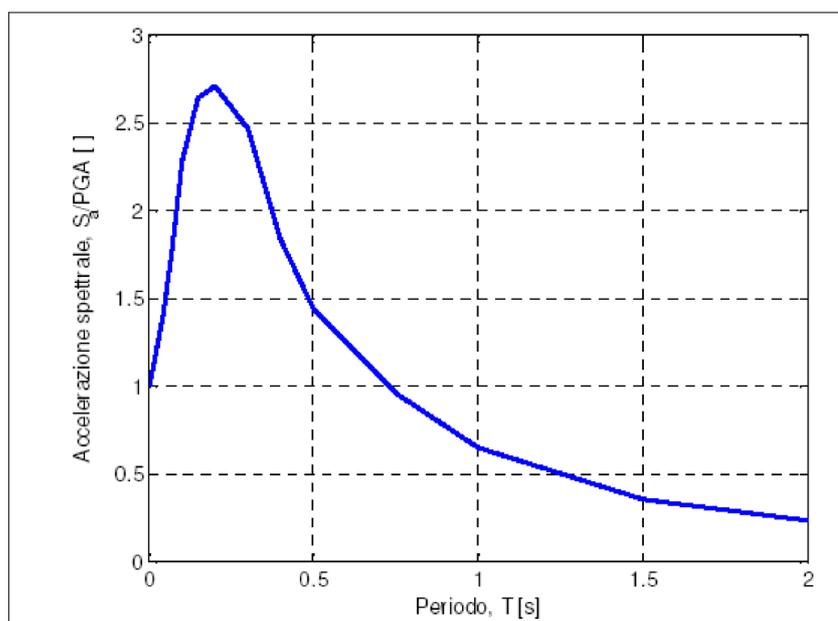
2.3.1 Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL regionale n.112/2007)

La Regione Emilia-Romagna ha elaborato ed 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 L.R. n.20/2000 <<Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio>>.

Gli Indirizzi, sono stati elaborati sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale a partire dalla fine degli anni '70 del secolo scorso e assumendo come riferimento, per la pianificazione, la pericolosità di base elaborata da INGV (recepita a livello nazionale dall'OPCM 3519/2006). In questo senso, la delibera fornisce tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata (secondo livello) dell'amplificazione locale, dati che tengono conto delle caratteristiche sismiche riscontrate nel contesto regionale.

Il documento fornisce anche i dati fondamentali per 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 2.9, e i valori di P_{ga} anch'essi normalizzati (riferiti al suolo rigido) per ogni Comune della Regione. Tale forma spettrale è sostanzialmente congrua con lo spettro elastico di riferimento per le norme tecniche per le costruzioni attualmente vigenti (NTC 2008). La DAL 112/2007 riporta anche tre accelerogrammi di riferimento per le modellazioni numeriche di risposta sismica locale, 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.

Figura 2.9 - Spettro di risposta normalizzato impiegato per la selezione dalla banca dati accelerometrica IESD dei segnali di riferimento regionale.



È così possibile ricavare lo spettro di risposta e gli accelerogrammi di riferimento per ogni Comune riscaldando lo spettro normalizzato di figura 2.9 con la a_{refg} attribuita allo stesso

Comune dalla DAL 112/2007. Per il territorio amministrativo di Sant'Agata Bolognese, la Pga di riferimento su suolo rigido attribuita dalla Regione Emilia-Romagna risulta pari a 0,159g (vedi Allegato A4 della DAL 112/2007). Occorre precisare che i valori di Pga di riferimento al suolo rigido riportati nella DAL 112/2007 già si basano sui dati INGV alla scala nazionale, sintetizzati nella Mappa di Pericolosità Sismica 2004 - MPS04 (figura 2.10), sebbene i valori di Pga regionali si riferiscano a tutto il territorio comunale. La mappa MPS04 descrive anch'essa 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).

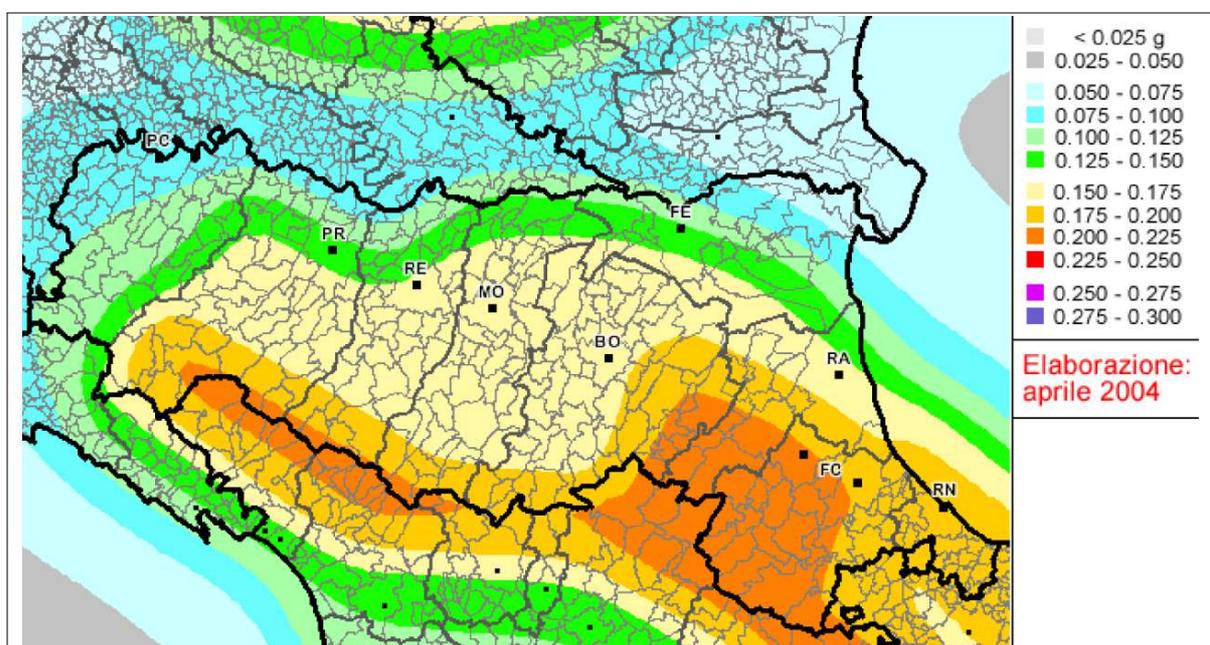


Figura 2.10 - Pericolosità sismica di base: valori di Pga al suolo rigido (10% di probabilità di superamento in 50 anni) secondo la OPCM 3519/2006.

2.3.2 La pericolosità preliminare elaborata per il PSC e per il PTCP di Bologna

L'Amministrazione comunale di Sant'Agata Bolognese già dispone di uno studio di pericolosità sismica preliminare, equiparabile a un approfondimento di "livello 1". Lo studio costituisce l'analisi per il Quadro Conoscitivo del Piano Strutturale Comunale (PSC) in forma associata, elaborata per l'Associazione di Comuni "Terre d'Acqua"¹¹. Si tratta di uno studio elaborato negli anni 2006 e 2007, pertanto risulta precedente sia agli indirizzi regionali contenuti nella DAL n. 112/2007, sia agli "ICMS 2008". Lo studio si basa sugli esiti delle indagini geognostiche disponibili all'epoca e ha permesso di elaborare una prima cartografia degli "effetti di sito",

¹¹ Associazione costituita dai Comuni di Anzola dell'Emilia, Calderara di Reno, Crevalcore, San Giovanni in Persiceto e Sant'Agata Bolognese. I documenti del Quadro Conoscitivo sono stati adottati dall'Amministrazione di Sant'Agata Bolognese con delibera di G.M n.64 del 29/05/2008

redatta alla scala 1:25.000 dell'area Capoluogo (figura 2.11). La cartografia, in particolare, ha delimitato zone con differente propensione alla liquefazione, in funzione del fattore di sicurezza FS ricavato da esiti di prove penetrometriche: risulta, peraltro, un'elaborazione a grande scala e carente di informazioni utili per un'effettiva quantificazione della liquefacibilità.

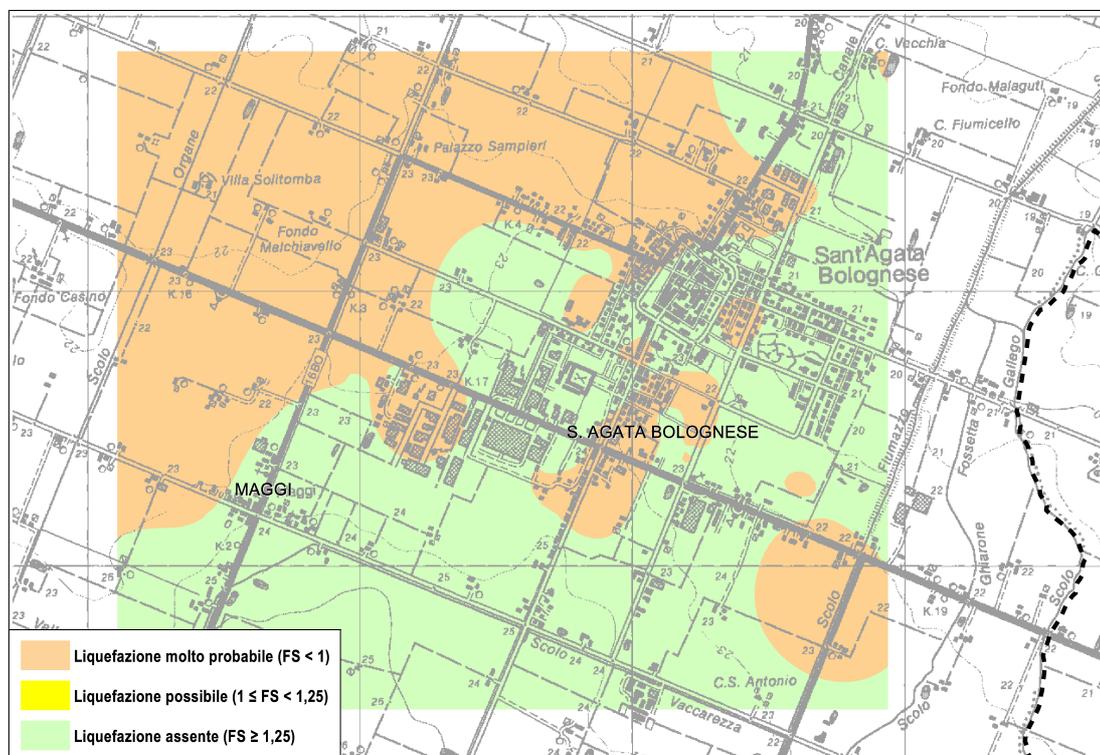


Figura 2.11 – Stralcio della Tavola QC.6/t7b – Pericolosità Sismica Locale – Effetti di Sito alla scala 1.25.000 (da Quadro Conoscitivo del PSC Associato Terre d'Acqua)

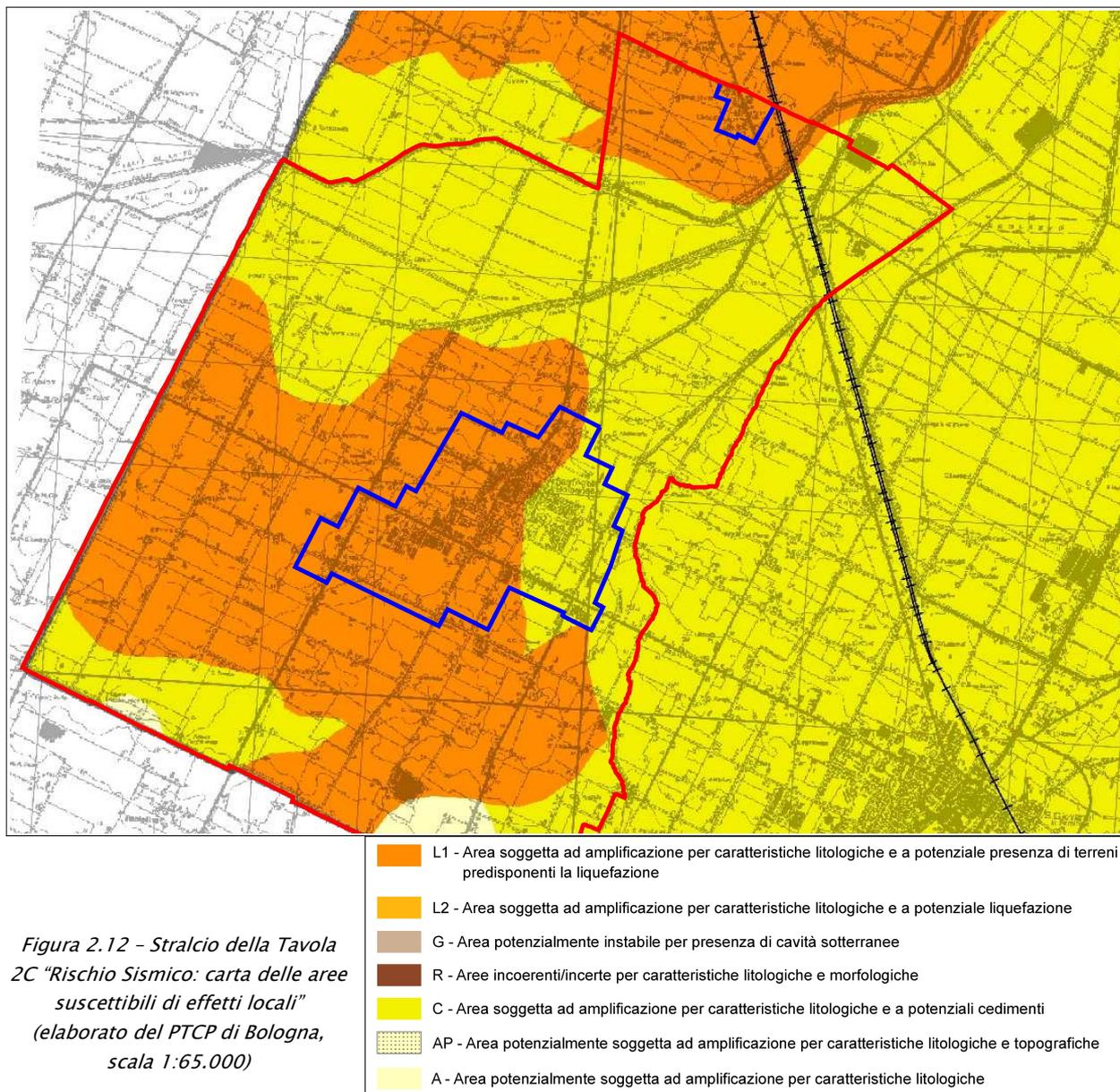
Occorre anche rammentare che la Provincia di Bologna ha recentemente proceduto all'elaborazione degli studi di pericolosità sismica preliminare di tutto il territorio amministrativo competente. Gli esiti di tali studi sono contenuti nella <<Variante al PTCP in materia di Rischio Sismico>>¹². In sintesi, la Provincia di Bologna ha elaborato la nuova Tavola di Piano, denominata "TAV. 2.C – Rischio sismico – Carta degli effetti Locali Attesi", alla scala 1:25.000 per quanto riguarda i Comuni della collina e montagna e alla scala 1:65.000 per i Comuni di pianura. Tale tavola costituisce il primo livello di approfondimento sismico richiesto dalla DAL 112/2007, identificando gli scenari di pericolosità sismica locale dell'intero territorio provinciale. La citata Tavola fornisce anche le prime indicazioni sui limiti e sulle condizioni richieste per orientare le scelte di pianificazione alla scala comunale verso ambiti meno esposti alla pericolosità sismica.

La figura 2.12 mostra uno stralcio della TAV. 2.C del PTCP, con sovrapposti i limiti comunali di Sant'Agata Bolognese e i limiti delle aree urbane/urbanizzate (il Capoluogo e le due frazioni Maggi e Crocetta), ove si sono concentrate la maggior parte delle indagini d'approfondimento. Si evince che il territorio comunale ricade nelle macrozone omogenee definite come "A", "C" e

¹² La variante è stata approvata con delibera del C.P. n.57 del 28/10/2013.

“L1” (vedi legenda).

Lo studio espletato ha pertanto considerato le informazioni preliminari contenute nel PSC in forma associata e i contenuti cartografici e normativi in materia di pericolosità sismica del PTCP di Bologna, aggiornando il quadro pregresso sulla base degli esiti delle nuove indagini geognostiche e geofisiche espletate per questo lavoro, come descritto nei successivi capitoli.



3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA

Dal punto di vista tettonico, il territorio di Sant'Agata Bolognese si colloca nella zona di raccordo fra la parte esterna della catena Appenninica settentrionale (strutturatasi nel Miocene superiore–Pliocene inferiore), e il settore padano in cui le deformazioni, sepolte, sono prevalentemente del Pliocene medio–superiore e Quaternario.

Tali deformazioni sepolte, rappresentano il vero fronte appenninico che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano–veneta, e ha strutturato una serie di archi di pieghe–faglie, sepolte, disposte a formare una fascia circa parallela al bordo appenninico (figura 3.1).

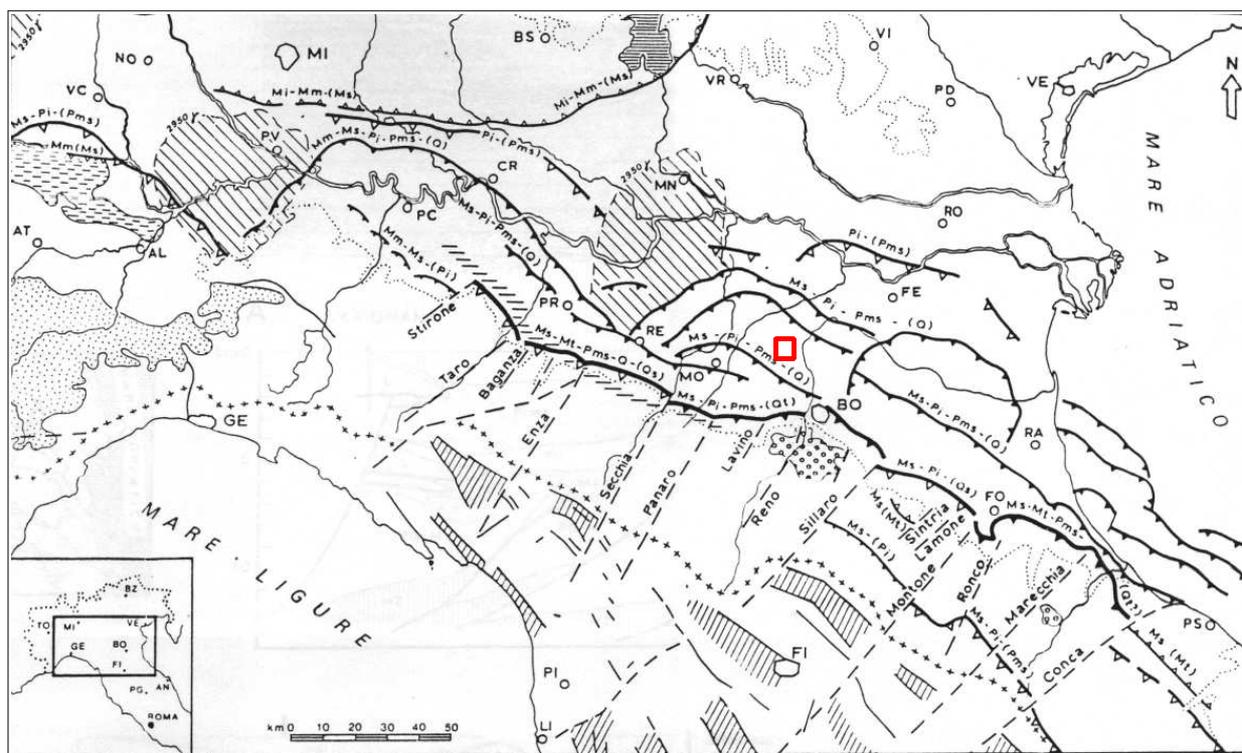


Figura 3.1 – Schema strutturale del fronte compressivo dell'Appennino settentrionale e ricostruzione temporale delle fasi tettoniche principali (da Castellarin et al., 1985). L'area di studio è localizzata nel quadrato rosso.

In particolare, Sant'Agata Bolognese ricade nell'ampia sinclinale “Bologna–Bomporto–Reggio Emilia”, collocata tra due grandi archi di pieghe, rappresentati dalle “Pieghe Pedeappenniniche” (a sud e più prossimali alla catena appenninica) e dalla “Dorsale Ferrarese Interna” (a nord), un'ampia struttura anticlinale (figura 3.2) vergente verso nord ed estesa tra Reggio–Emilia e la costa adriatica, caratterizzata da un massimo sollevamento tra Novi di Modena e Medolla, noto come Alto di Mirandola” (si rimanda anche al paragrafo 2.1).

Le dorsali del fronte appenninico sepolto sono il risultato dell'attività di faglie inverse (thrust) la cui attività è iniziata nel Pliocene medio–superiore, con vergenza settentrionale e con piano di scorrimento immergente verso sud. Sono riscontrabili anche strutture retrovergenti con piano di scorrimento immergente verso nord (backthrust), di attivazione più recente e che interessano soprattutto gli orizzonti meno profondi. La figura 3.3 propone una schematica sezione geologica profonda, che ben rappresenta il contesto tettonico sopra descritto.

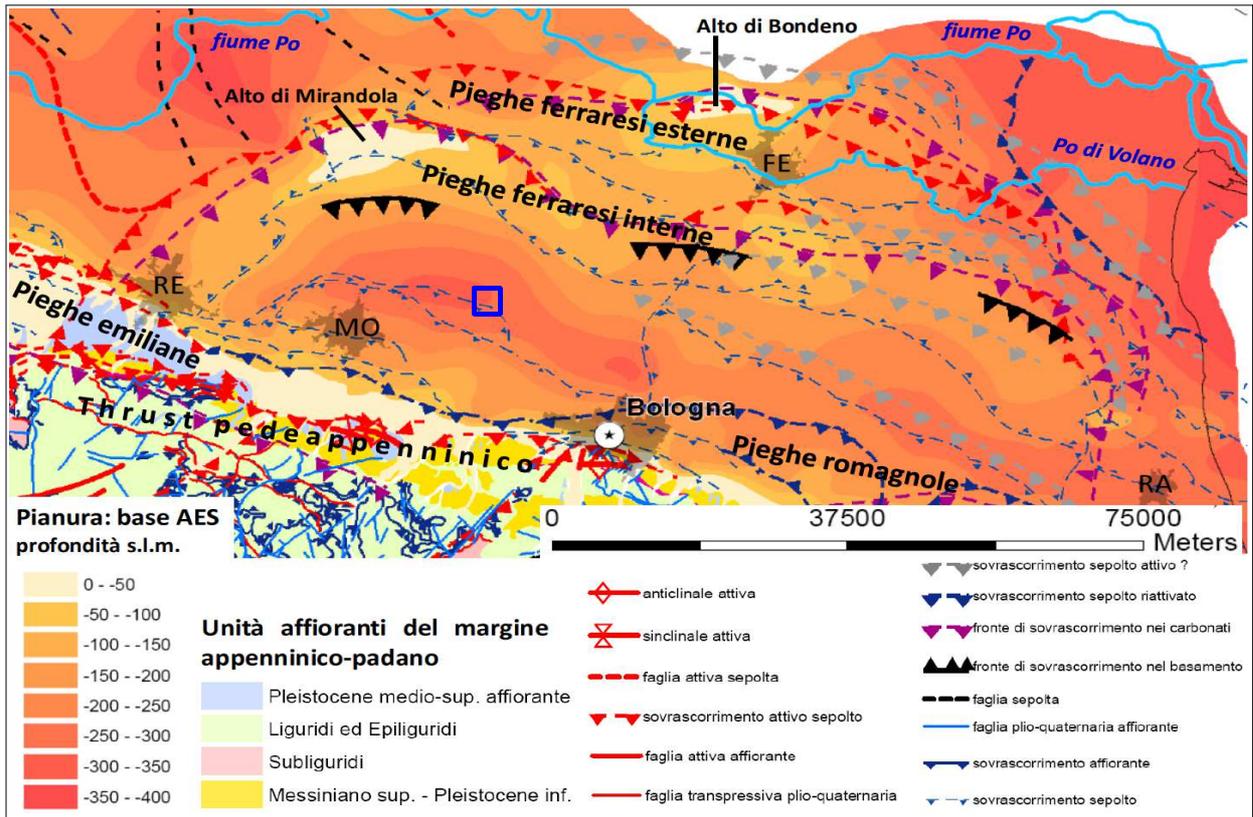


Figura 3.2 – Schema tettonico della pianura emiliana (L.Martelli, 2011). L'area di studio è localizzata nel quadrato blu.

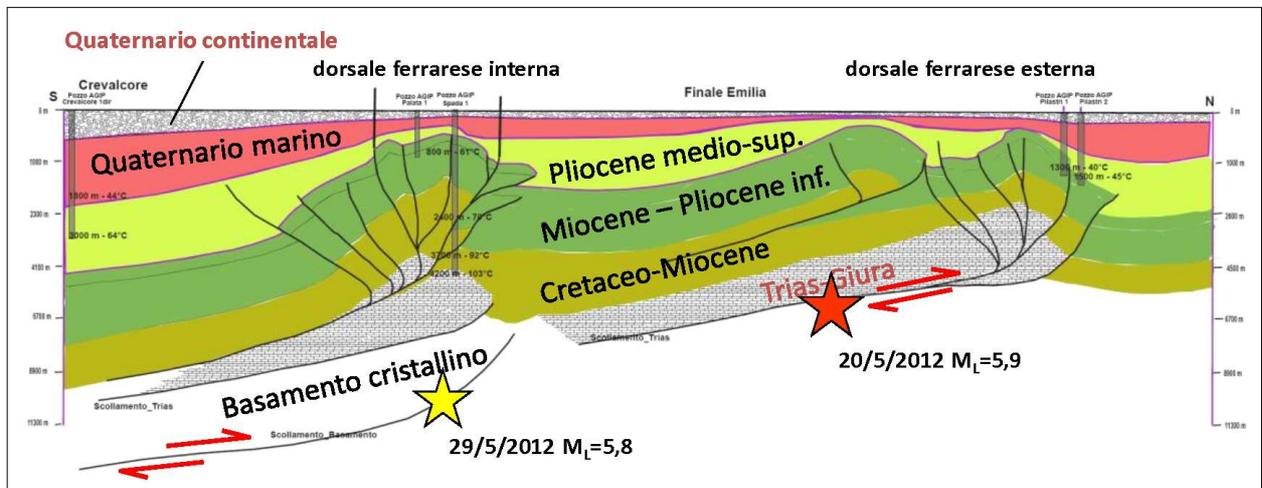


Figura 3.3 – Sezione geologica profonda di sintesi, da Crevalcore al Po, con proiezione degli ipocentri delle scosse principali (da L. Martelli & M. Romani, 2014).

Queste strutture tettoniche sono chiuse da depositi di età più recente, costituiti dalla coltre alluvionale del Quaternario, sovrapposta ai depositi marini plio-pleistocenici.

La coltre alluvionale è caratterizzata da alternanze di sabbie, limi e argille (in funzione dell'evoluzioni delle facies deposizionali dominanti), di età Pleistocene medio-Olocene e localmente attribuibili ai fiumi Po, Panaro e Samoggia; è inoltre riferibile a due cicli deposizionali di ordine maggiore: il "Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore" (AEI), di età compresa tra circa 0,7 Ma e circa 0,4 Ma, e il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), di età compresa tra 0,45/0,4 Ma e l'attuale (RER & ENI-Agip, 1998).

Lo spessore complessivo dei depositi alluvionali è fortemente variabile nella pianura padana, in funzione della disposizione delle strutture tettonizzate sepolte: studi RER & ENI-Agip (1998) hanno evidenziato come, nelle aree di sinclinale, la coltre alluvionale superi i 500 metri, mentre nelle aree di anticlinale si hanno potenze decisamente inferiori ai 100 metri. Come già anticipato, il territorio studiato è situato sulla sinclinale denominata “Bologna-Bomporto-Reggio Emilia” e in prossimità della sua maggiore depressione, individuabile tra Sant'Agata Bolognese e Crevalcore e fino a NO di Nonantola¹³.

Le indagini effettuate, compresi i più recenti studi di microzonazione sismica, espletati dal SGSS regionale nei Comuni emiliani che hanno subito i maggiori danneggiamenti a seguito degli eventi sismici del maggio e giugno 2012¹⁴, mostrano come, dal punto di vista geofisico, il sottosuolo della pianura presenti differenze laterali generalmente minime, almeno fino alla profondità di 50-60 metri, mentre nelle zone di alto strutturale, le alluvioni più profonde e antiche (il sintema AEI) sono interessate da lacune stratigrafiche e da spessori ridotti, confermando, sostanzialmente, il quadro conoscitivo già sintetizzato nella cartografia sismotettonica regionale¹⁵.

Per quanto riguarda il sottosuolo meno profondo, il territorio comunale di Sant'Agata Bolognese ricade in un contesto deposizionale sub-affiorante riconducibile a “depositi di argine, canale e rotta fluviale” attribuibili all'apparato distributore del Fiume Panaro, prevalenti nella porzione sud orientale del Comune, mentre la porzione nord occidentale è attribuibile a depositi fini di “piana inondabile” (“interbacino”), come schematizzato nella figura 3.4.

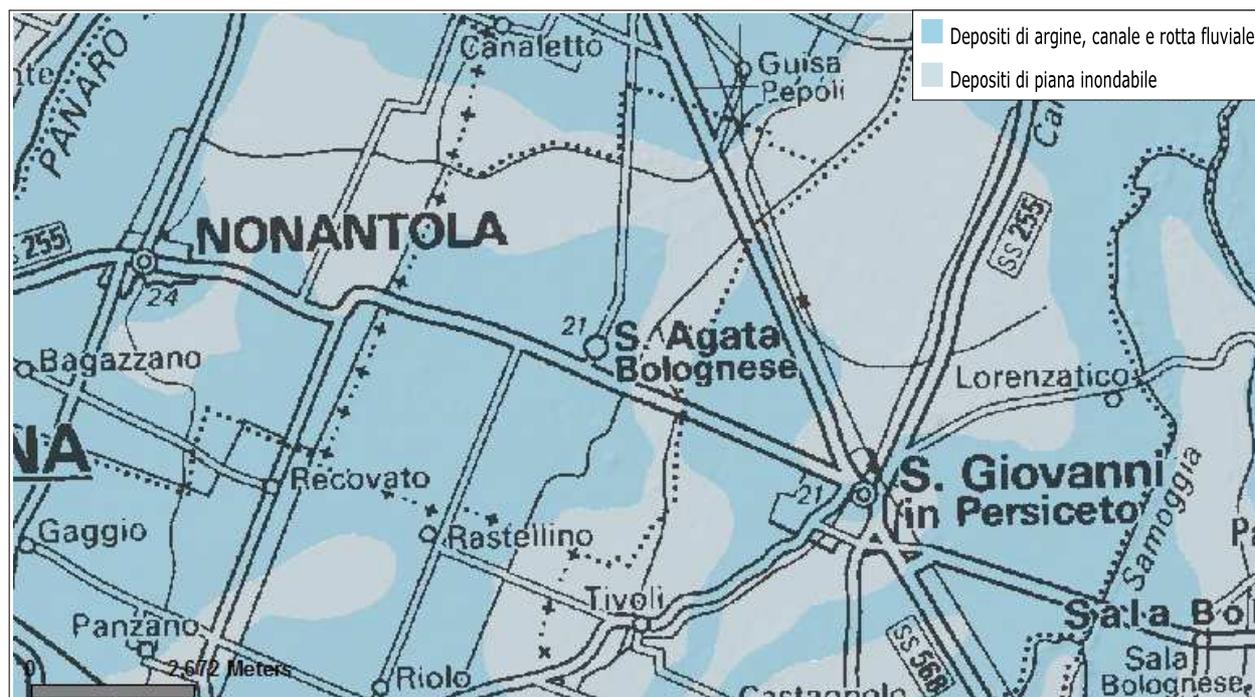


Figura 3.4 – Geologia di sintesi (fonte: cartografia interattiva pubblicata nel sito internet del SGSS regionale).

¹³ La base del Sintema AES viene stimata a circa -300 metri slmm.

¹⁴ Studi di microzonazione sismica elaborati in ossequio all'Ordinanza del Commissario delegato - Presidente della Regione Emilia - Romagna n. 70/2012.

¹⁵ “Carta Sismotettonica della regione Emilia-Romagna” (scala 1:250.000), a cura del SGSS regionale e CNR, 2004.

Il territorio di Sant'Agata Bolognese ricade nel Foglio 202 della Carta Geologica in scala 1:50.000 della Regione Emilia-Romagna (Progetto CARG) e secondo tale cartografia (figura 3.5), i sedimenti sub-affioranti sono riconducibili alle unità AES8 ("Subsistema di Ravenna") e alla sua unità più recente AES8_a ("Unità di Modena") di età deposizionale da attuale a Pleistocene-Olocene (<14.000 anni). Si tratta di depositi costituiti da sabbie, limi e argille, mentre i corpi ghiaiosi sono praticamente assenti nell'area di studio (affiorano più a SO, in prossimità del Fiume Panaro). Lo spessore medio del subsistema alluvionale AES8 è di circa 20÷22 metri e di geometria relativamente tabulare nell'area di studio. La cartografia geologica alla scala 1:50.000 riporta tracce di paleoalvei sabbiosi del Panaro, riscontrati soprattutto nella porzione meridionale del territorio e a ovest, al confine con Nonantola.

Nella porzione del territorio comunale più occidentale, i sedimenti superficiali sono ascrivibili all'Unità più recente AES8_a la cui deposizione è riconducibile ai sovralluvionamenti che dal IV÷V secolo d.C. hanno interessato gran parte della Pianura Padana; nell'area di studio, la deposizione è principalmente riconducibile all'attività trattiva del F. Panaro, con spessori che possono raggiungere localmente i 5÷6 metri e tessiture anch'esse variabili da sabbie, limi ad argille.

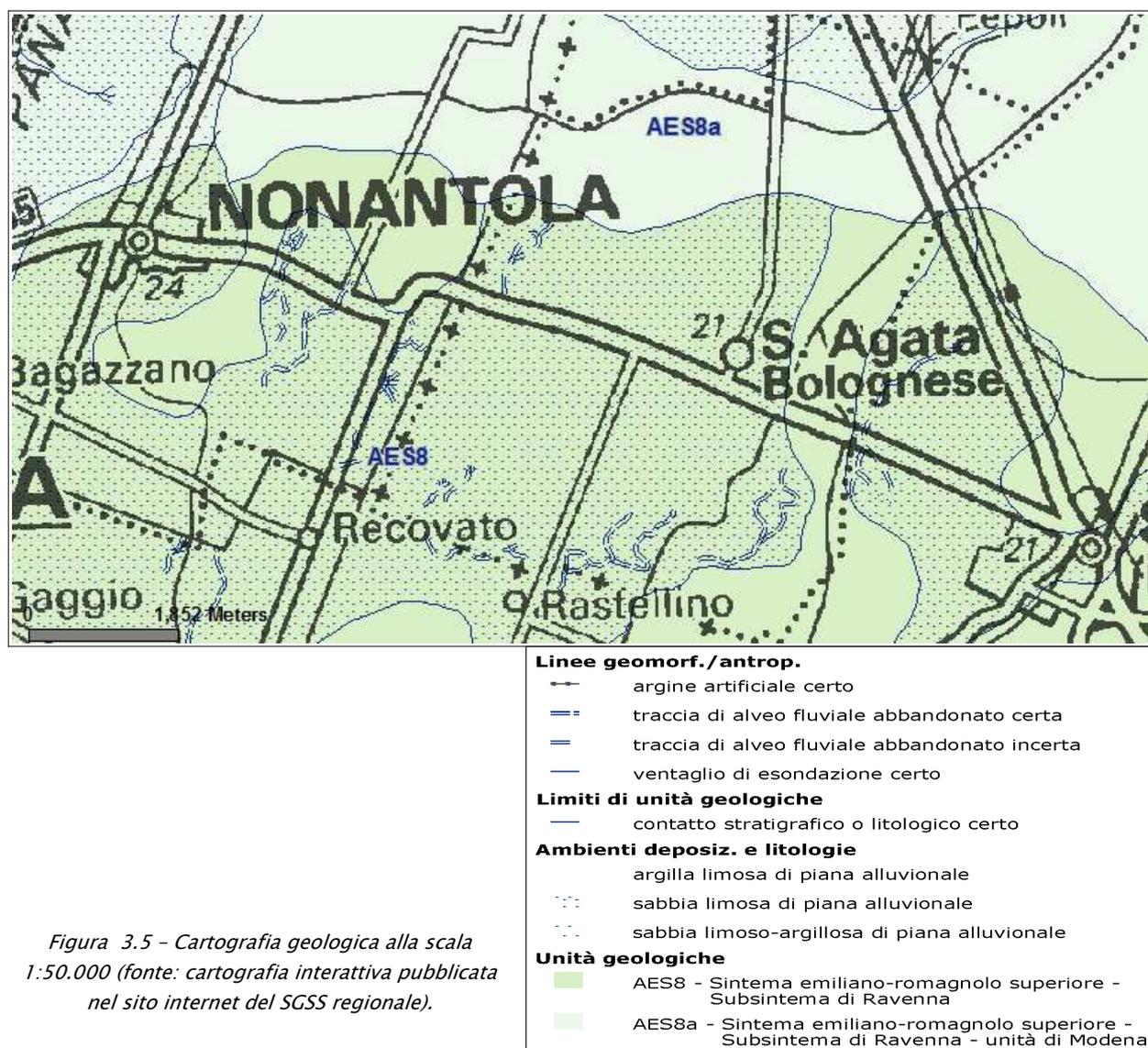


Figura 3.5 - Cartografia geologica alla scala 1:50.000 (fonte: cartografia interattiva pubblicata nel sito internet del SGSS regionale).

Per quanto riguarda gli aspetti più propriamente geomorfologici, l'area di studio risulta morfologicamente sub-pianeggiante, con un lieve declivio verso NNE da quote massime di circa 27 m slmm a circa 19 m slmm. Non si riscontrano rilievi morfologici degni di nota, ad esclusione di rilevati stradali e argini dei corsi d'acqua, elevati fino a 6÷8 metri.

L'elaborazione del microrilievo, effettuata per il Quadro Conoscitivo del PSC¹⁶, sulla base delle analisi delle curve di livello (interpolazione automatica dei punti quotati), evidenzia la presenza di alcuni "alti morfologici" di forma allungata e riconducibili a recenti dossi di origine fluviale e anch'essi riconducibili, con probabilità, al F. Panaro (figura 3.6). In particolare, si riscontra una forma morfologica decisamente riconducibile a un dosso che percorre da sud a NNE (a sud di Crocetta) la porzione centrale del territorio comunale e sul quale si insedia il centro storico del Capoluogo. La Tavola Geomorfológica del PSC riporta un ulteriore paleoalveo, al limite con il confine comunale di San Giovanni in Persiceto, peraltro di scarso riscontro, almeno secondo il controllo dei dati quotati di superficie.

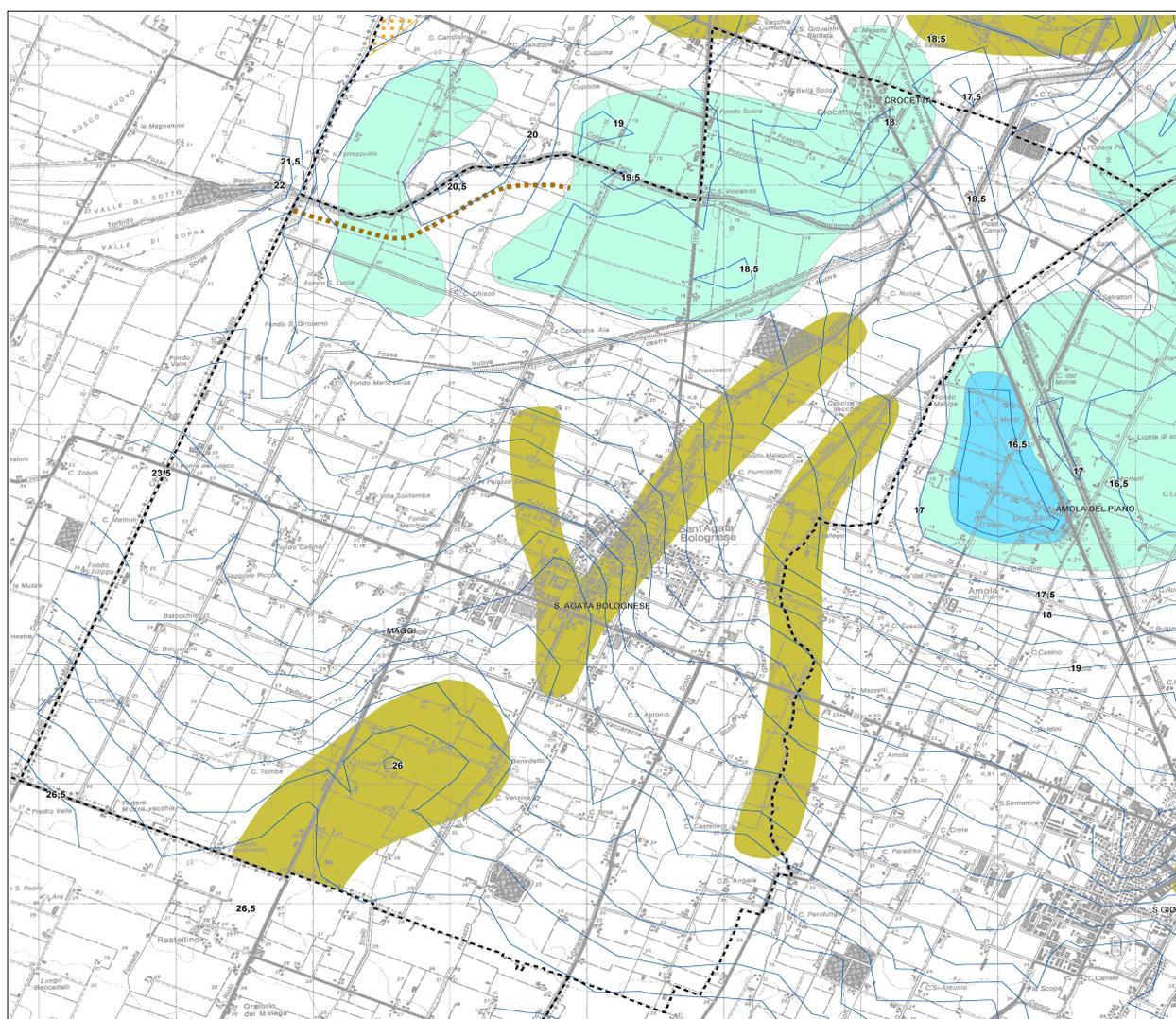


Figura 3.6 – Stralcio della Tavola "QC.6/t2b – Geomorfologia" (elaborato del PSC dell'Associazione Terre d'Acqua, scala 1:25.000).

¹⁶ Tavola QC.6/t2b – Geomorfologia (scala 1.25.000).

Anche per gli aspetti idrogeologici generali, si rimanda alle analisi riportate nello studio geologico elaborato per il QC del PSC. In sintesi, lo studio ha ricostruito (seppur con metodi automatici) il campo di moto della prima falda sulla base dei rilievi delle quote d'acqua misurate in pozzi privati, ove si evince il complessivo deflusso sotterraneo verso NE. Ha inoltre elaborato una cartografia delle profondità medie della prima falda rispetto alla superficie, che evidenzia una soggiacenza variabile da circa 2,5 metri a circa 3,5 metri (figura 3.7). La geometria della falda meno profonda è governato dal reticolo idrografico, che la alimenta per infiltrazione da subalveo e laterale; risente, inoltre, dell'assetto morfologico locale e appare di scarso significato idrogeologico per quanto riguarda le caratteristiche di permeabilità e trasmissività.

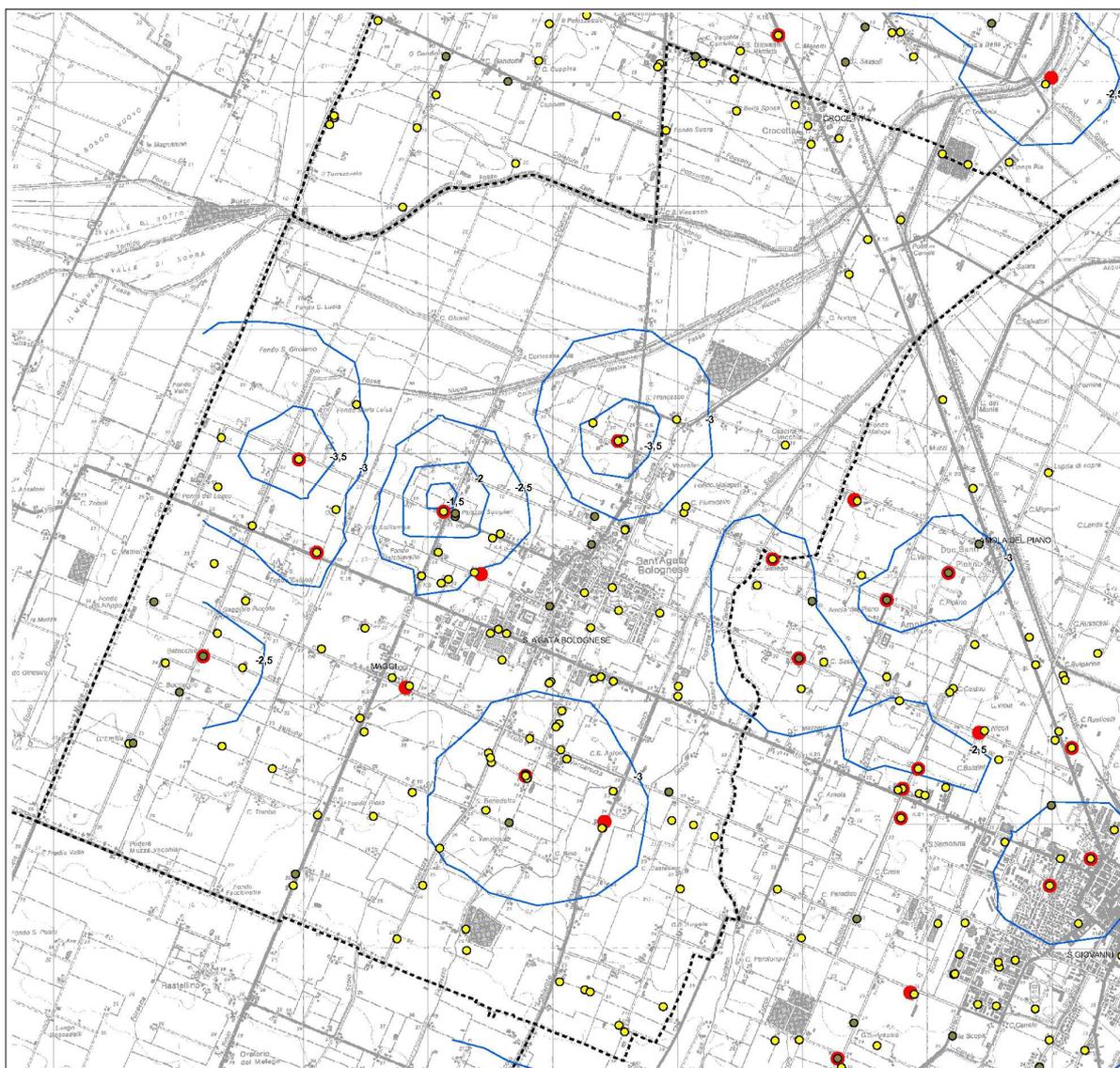


Figura 3.7 – Stralcio della Tavola “QC.6/t9b – Soggiacenza della falda acquifera superficiale” (elaborato del PSC dell'Associazione Terre d'Acqua, scala 1:25.000).

4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

4.1 Dati pregressi

Lo studio di microzonazione ha consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio. 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:

- ✓ sezioni geologiche e prove disponibili nella Banca Dati Geognostica della Regione Emilia-Romagna, pubblicate e consultabili anche nel sito internet del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS) regionale;
- ✓ 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 interventi di pianificazione (es: Variante Generale al Piano Regolatore e Varianti specifiche; Piani Particolareggiati; ecc.).

La selezione delle prove di repertorio è risultata necessaria in quanto molte indagini sono state eseguite con attrezzature fuori standard (fornendo quindi esiti inutilizzabili o non interpretabili), oppure altre sono risultate troppo superficiali per poter essere pienamente usate per gli scopi del presente lavoro. In conclusione, i dati utilizzati sono quelli delle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo, le CPT e CPTU spinte fino a profondità maggiori di 6 metri e indagini geofisiche (stendimenti ReMi e MASW; registrazioni HVSR). Il totale delle prove pregresse, considerate per lo studio di microzonazione e implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per questo lavoro, risulta pari a 125 prove, così distinte per tipologia:

- n. 7 carotaggi continui (S) di cui 3 hanno permesso il recupero di campioni, con analisi geotecniche effettuate in laboratorio “terre”;
- n. 66 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)
- n. 34 prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU)
- n. 1 prova sismica con “Cono Sismico” (SCPT)
- n. 10 misure di microtremori a stazione singola (HVSR)
- n. 1 stendimento sismico passivo ReMi;
- n. 6 stendimenti sismici attivi MASW;

Tra le prove di repertorio, è risultato molto utile disporre, come vedremo, anche dei dati numerici delle penetrometrie CPTU eseguite dalla RER nell'ambito del Progetto Carta Geologica d'Italia. Si tratta di prove eseguite in tutto il territorio di pianura della regione, secondo una

distribuzione a “maglia” piuttosto regolare e che consentono di avere dati di sottosuolo fino a profondità di oltre –30 metri, anche esternamente ai centri abitati (ove si concentrano la maggior parte delle informazioni).

Presso l'archivio dell'Ufficio Tecnico comunale è stato inoltre possibile recuperare gli esiti di una prova penetrometrica con “Cono Sismico” spinta fino a –31 m di profondità; questa prova consente la misura diretta della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio (V_s) nei sedimenti attraversati, rappresentando un riferimento anche per le elaborazioni delle indagini geofisiche indirette (MASW e ReMi).

Presso l'archivio dell'UT comunale, si sono inoltre ottenuti esiti di sondaggi a carotaggio continuo, anche con recupero di campioni indisturbati. Si è così potuto disporre di dati geotecnici ricavati da prove di laboratorio (edometrie; prove di taglio diretto “non drenato”; Limiti di Atterberg e analisi tessiturali), pertanto ulteriori elementi utili per la caratterizzazione della risposta sismica locale e per le valutazioni di liquefacibilità dei sedimenti meno profondi.

Le figure da 4.1 a 4.4 riportano la distribuzione delle prove di repertorio nell'intero territorio comunale, con un ulteriore dettaglio per quanto riguarda l'area del Capoluogo.

I report e i diagrammi degli esiti delle indagini puntuali e lineari sono riportati anche in formato *.pdf nella cartella Indagini\documenti contenuti nel DVD.

4.2 Le indagini effettuate per la microzonazione sismica

Per consentire questo ulteriore approfondimento della pericolosità sismica e di microzonazione, si è reso indispensabile effettuare ulteriori indagini in sito, sia di tipo geofisico, sia di tipo geognostico. Si è cercato di concentrare le indagini soprattutto nell'insediato storico del Capoluogo e nelle porzioni di territorio urbanizzato/urbanizzabile maggiormente carenti di informazioni di sottosuolo.

Per quanto riguarda l'insediato storico, in tale zona non si avevano disponibilità di dati sufficienti (come spesso accade per i nuclei abitativi più antichi), inoltre si è ritenuto necessario approfondire le conoscenze sia della propensione alla liquefazione dei sedimenti sottoposti a impulso sismico, sia delle caratteristiche di risposta sismica locale (RSL) dell'area abitata certamente più “vulnerabile” dal punto di vista costruttivo. Per questo motivo, nel centro storico sono state eseguite prove CPTU, registrazioni del rumore sismico passivo HVSR e uno stendimento sismico in “array” bidimensionale (ESAC). In particolare sono state eseguite nove registrazioni HVSR (e con disponibile un'ulteriore prova di repertorio), in quanto tali indagini sono apparse molto utili, come vedremo, a fornire dati sulla RSL nel centro storico; gli esiti delle prove HVSR sono stati comunque confrontati e “tarati” con i dati geofisici e geognostici di disponibili. La prova ESAC, eseguita in un parco pubblico adiacente il centro storico ha inoltre permesso di stimare con buona approssimazione la distribuzione delle velocità delle onde sismiche di taglio V_s nel sottosuolo fino ad una profondità di circa 60 metri. Nella medesima area, si è tentata una registrazione HVSR con lungo tempo di acquisizione (50 minuti).

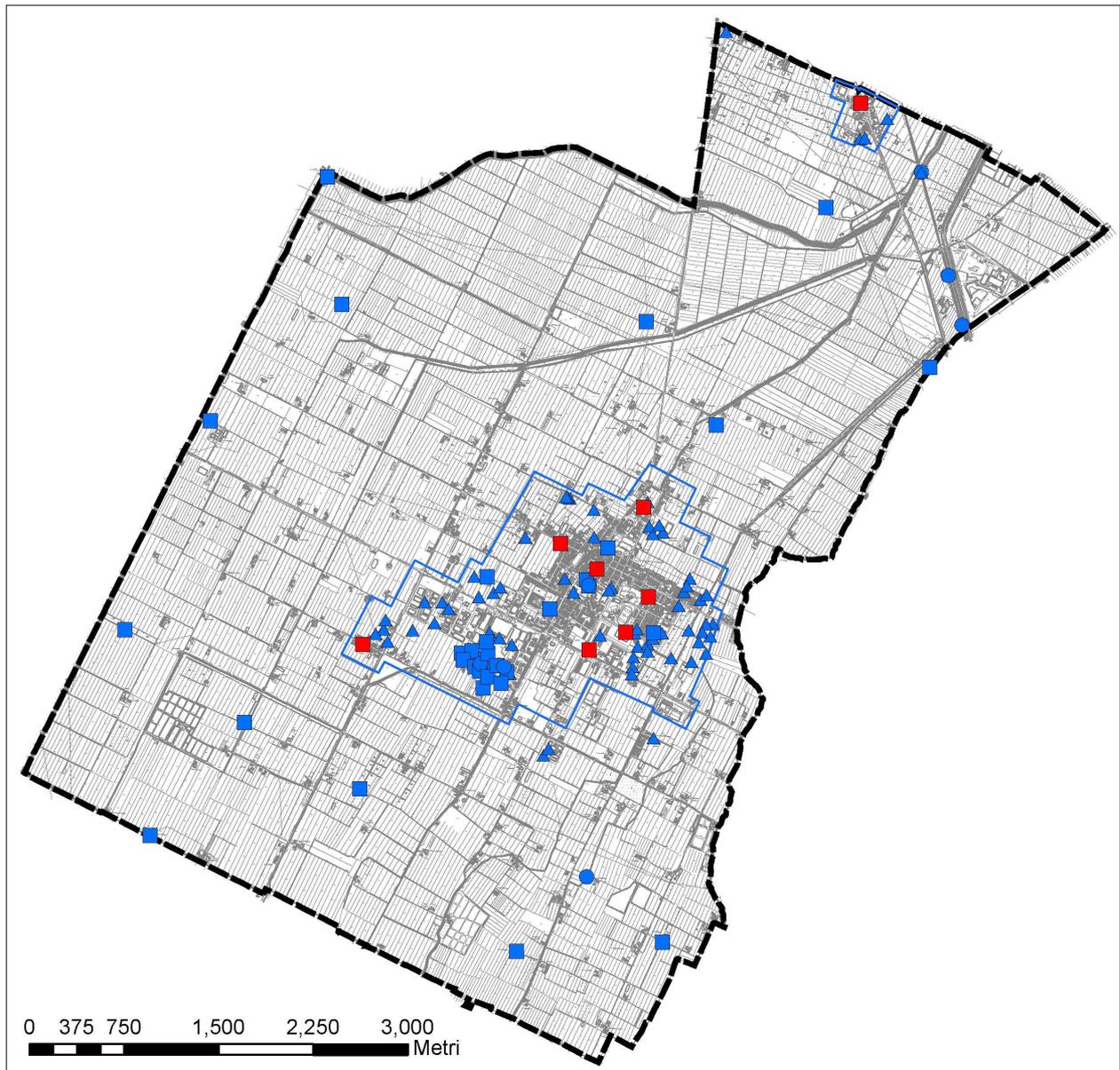
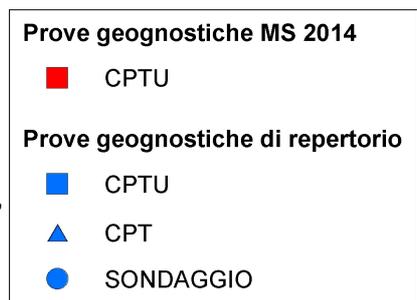


Figura 4.1 - Localizzazione delle indagini geognostiche pregresse e integrative per lo studio di microzonazione sismica nell'intero territorio comunale.



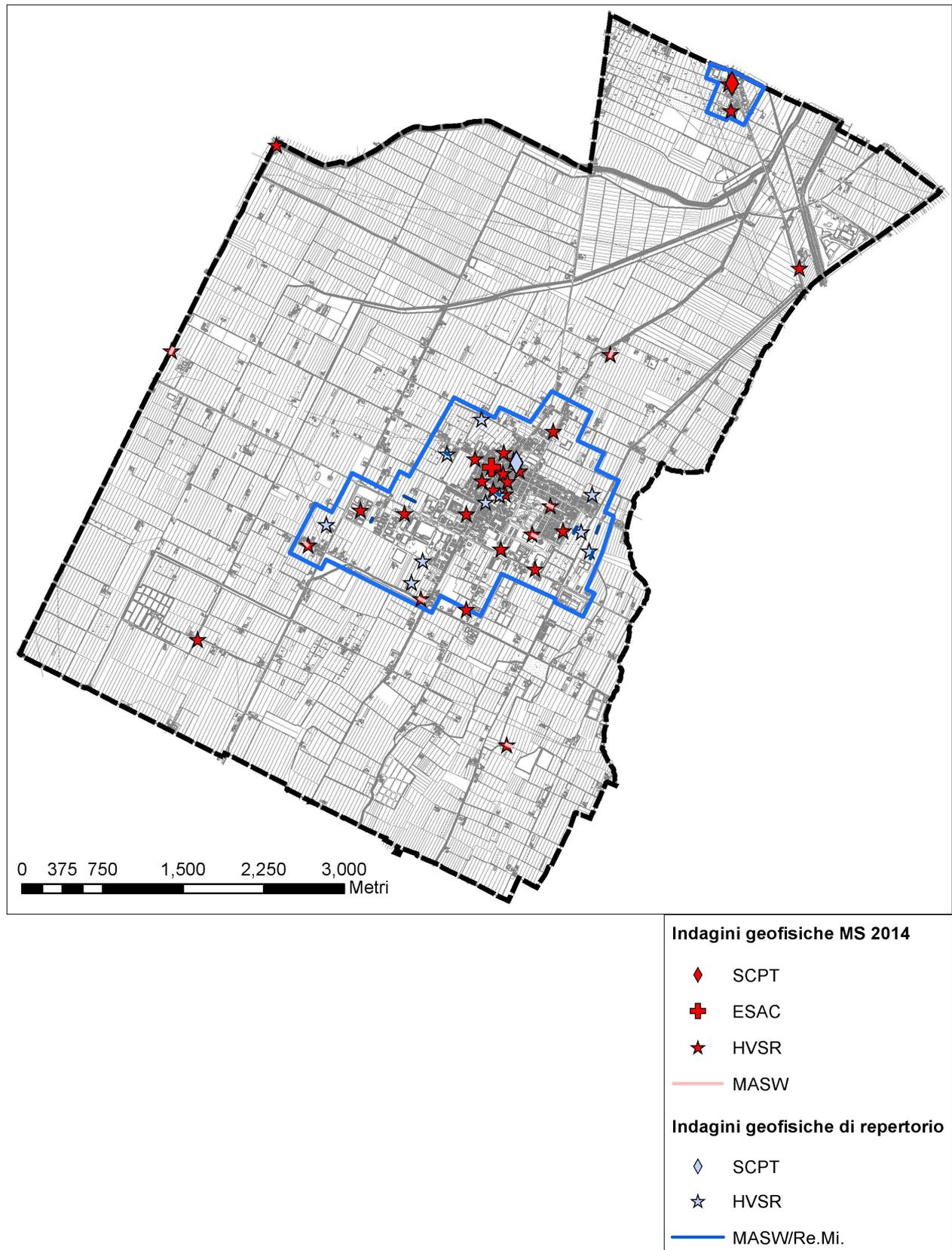


Figura 4.2 - Localizzazione delle indagini geofisiche pregresse e integrative per lo studio di microzonazione sismica nell'intero territorio comunale

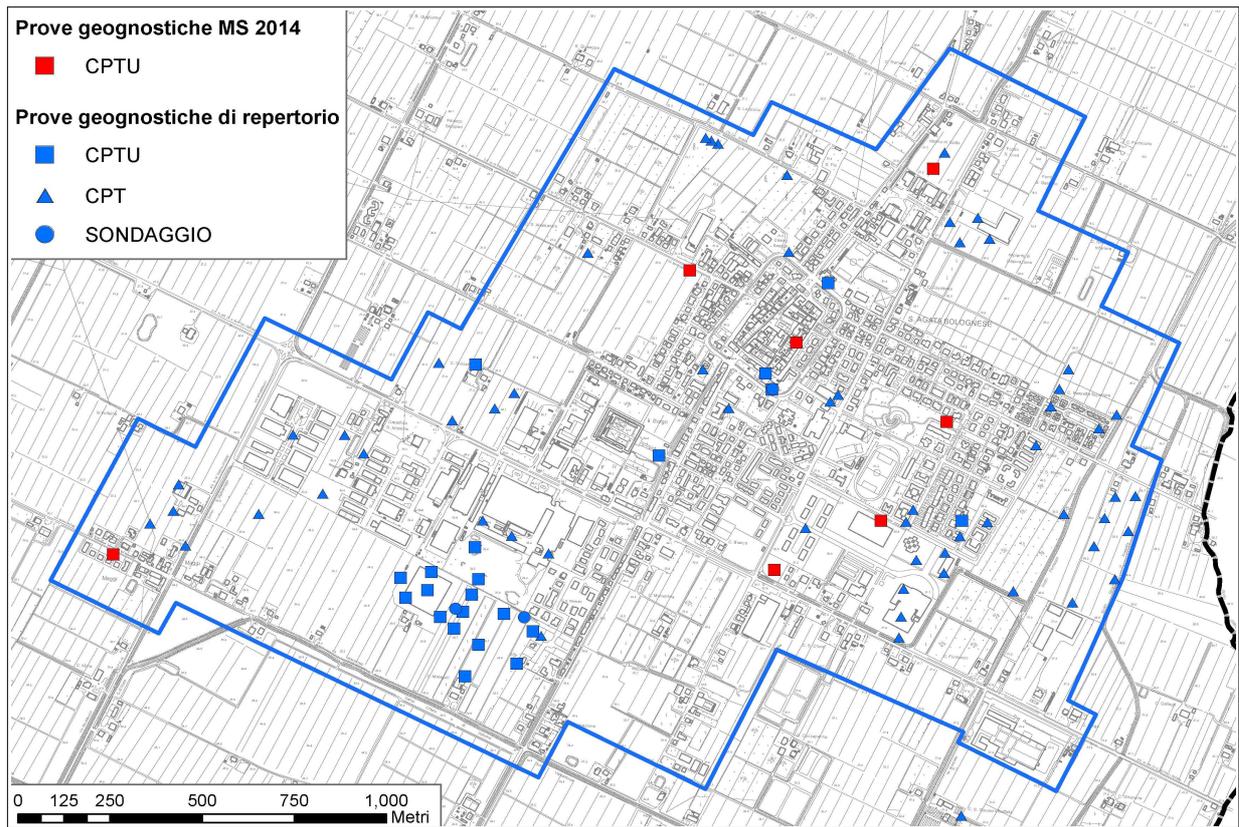


Figura 4.3 - Localizzazione delle indagini geognostiche pregresse e integrative per lo studio di microzonazione sismica (dettaglio del Capoluogo)

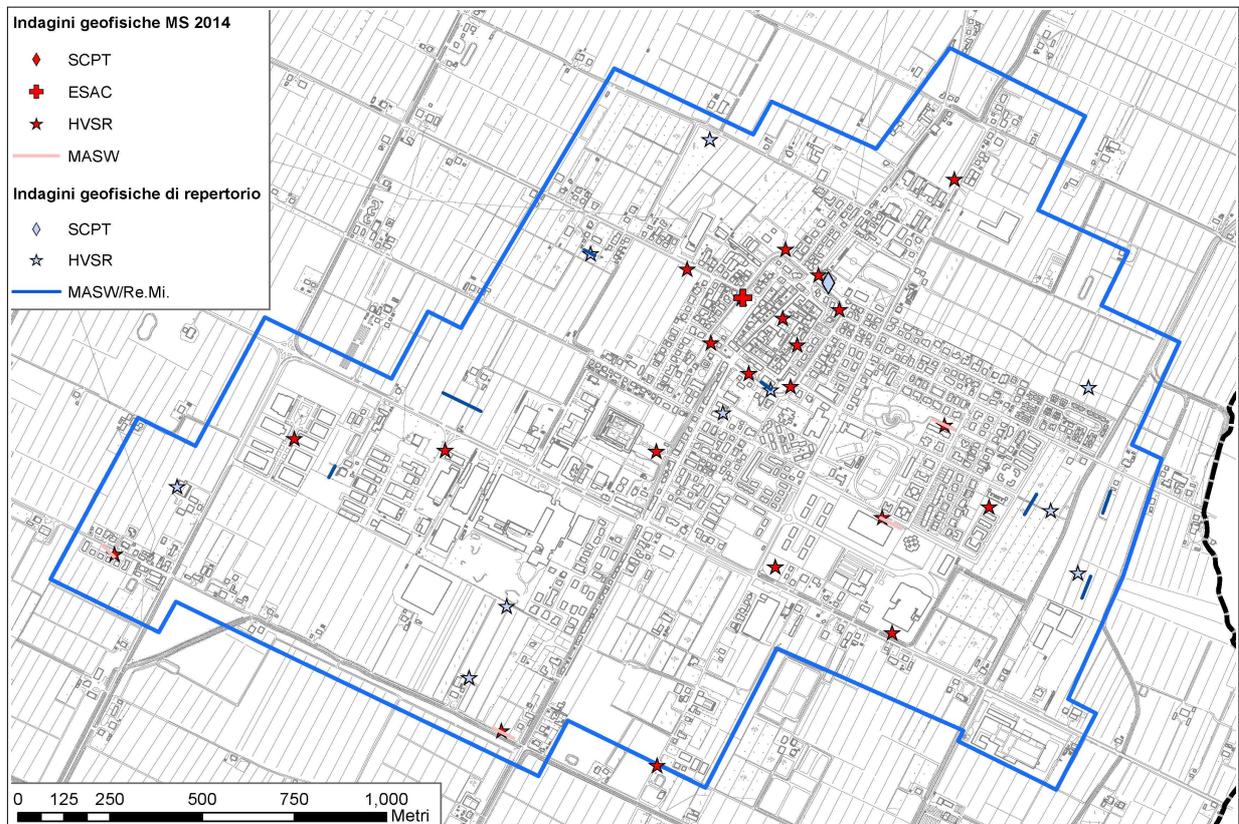


Figura 4.4 - Localizzazione delle indagini geofisiche pregresse e integrative per lo studio di microzonazione sismica (dettaglio del Capoluogo)

Si è inoltre deciso di eseguire nella frazione di Crocetta la prova penetrometrica statica con “Cono Sismico” (SCPTU) in quanto l'abitato risultava carente di dati: si è così potuto disporre di informazioni relative alla distribuzione delle Vs nel sottosuolo e, nello stesso tempo, verificare la propensione alla liquefazione dei sedimenti indagati.

Una parte delle indagini geofisiche (sei registrazioni HVSR e tre stendimenti sismici MASW) sono state eseguite anche all'esterno delle aree urbanizzate/urbanizzabili, soprattutto in prossimità di punti di controllo diretti già noti (es. sondaggi e/o penetrometrie CPTU eseguite dalla RER), per consentire un'analisi della pericolosità sismica estrapolabile a tutto il territorio comunale, almeno per quanto riguarda la risposta sismica locale semplificata.

Più in dettaglio, per questo lavoro sono state eseguite le seguenti prove in sito:

- ✓ *n. 8 prove penetrometriche elettriche con piezocono (CPTU)* → realizzate con strumento penetrometrico con max contrasto pari a 200 kN, montato su semovente cingolato “Pagani” dotato di ancoraggi supplementari per migliorare l'ancoraggio al suolo e consentire il massimo approfondimento delle prove (foto 4.1). Le penetrometrie sono state spinte fino a -20 metri di profondità per consentire un ulteriore approfondimento delle caratteristiche tessiture e geotecniche nell'intervallo più utile ai fini delle verifiche della possibilità di liquefazione e cedimenti post-sisma.

<p>Unit Weight, g (kN/m³) ::</p> $g = g_w \cdot \left(0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1.236 \right)$ <p>where g_w = water unit weight</p> <p>Permeability, k (m/s) ::</p> <p>$I_c < 3.27$ and $I_c > 1.00$ then $k = 10^{0.952-3.04 \cdot I_c}$</p> <p>$I_c \leq 4.00$ and $I_c > 3.27$ then $k = 10^{-4.52-1.37 \cdot I_c}$</p> <p>N_{SPT} (blows per 30 cm) ::</p> $N_{60} = \left(\frac{q_c}{p_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268-0.2817 \cdot I_c}}$ $N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268-0.2817 \cdot I_c}}$ <p>Young's Modulus, Es (MPa) ::</p> $(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ <p>(applicable only to $I_c < I_{c_cutoff}$)</p> <p>Relative Density, Dr (%) ::</p> $100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad \text{(applicable only to SBT}_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8 \text{ or } I_c < I_{c_cutoff})$ <p>State Parameter, ψ ::</p> $\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,cs})$ <p>Peak drained friction angle, ϕ (°) ::</p> $\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$ <p>(applicable only to SBT_n: 5, 6, 7 and 8)</p>	<p>:: 1-D constrained modulus, M (MPa) ::</p> <p>If $I_c > 2.20$</p> <p>$\alpha = 14$ for $Q_{tn} > 14$</p> <p>$\alpha = Q_{tn}$ for $Q_{tn} \leq 14$</p> $M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$ <p>If $I_c \leq 2.20$</p> $M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ <p>:: Small strain shear Modulus, Go (MPa) ::</p> $G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$ <p>:: Shear Wave Velocity, Vs (m/s) ::</p> $V_s = \left(\frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$ <p>:: Undrained peak shear strength, Su (kPa) ::</p> <p>$N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r)$ or user defined</p> $S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$ <p>(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)</p> <p>:: Remolded undrained shear strength, Su(rem) (kPa) ::</p> <p>$S_{u(rem)} = f_s$ (applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)</p> <p>:: Overconsolidation Ratio, OCR ::</p> $k_{OCR} = \left[\frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{-1.25} \text{ or user defined}$ $OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$ <p>(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)</p>
--	---

Figura 4.5 – Correlazioni empiriche utilizzate per la stima dei principali parametri geotecnicici dei sedimenti da prove CPTU

Nella figura 4.5 sono riportate le correlazioni¹⁷ utilizzate per la stima delle proprietà meccaniche dei sedimenti indagati.



Foto 4.1 - Una delle prove CPTU eseguite nel Capoluogo (zona "centro storico").

- ✓ n. 1 prova penetrometrica elettrica con piezocono e "Cono Sismico" → realizzata anch'essa con penetrometrico montato su semovente cingolato "Pagani" (foto 4.2). La prova è stata spinta fino a -31 metri di profondità. La punta è dotata di tre accelerometri, che consentono di misurare direttamente la velocità di propagazione nel terreno delle onde sismiche di taglio (V_s). Le modalità esecutive della prova si basano sull'arresto dell'infissione del piezocono a step regolari (nel nostro caso, la misura è stata eseguita ogni 50 cm nei primi 15 metri di approfondimento e, successivamente, ogni 100 cm), per effettuare l'acquisizione dei dati sismici tramite sensori e sismografo. Il sistema di energizzazione del terreno (sorgente delle onde di taglio) è costituito da due masse metalliche compatte poggianti su traversina in legno, caricata con gli stabilizzatori a pistone del penetrometro ad una distanza di 50 cm dalla verticale di prova. Una delle piastre metalliche viene colpita con una mazza da 10 kg di peso, ad ogni metro di profondità, con le aste svincolate dal penetrometro stesso (figura 4.6).



Foto 4.1 - Prova SCPTU eseguita nella frazione Crocetta.

Tramite i sensori sismici presenti nella punta è possibile rilevare e registrare tali segnali sismici e di conseguenza determinare i tempi necessari alle onde sismiche per percorrere il tratto da piano campagna fino alla profondità dei sensori (tempi di arrivo).

¹⁷ Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010
Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests – a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337-1355 (2009)

Attraverso il rapporto distanza/tempo di percorrenza, è quindi possibile determinare direttamente e con grande precisione le velocità delle onde sismiche S.

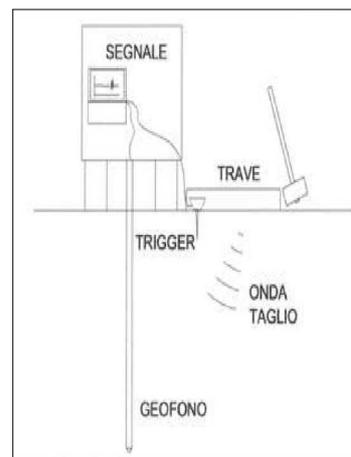


Figura 4.6 - Schema di funzionamento del sismocono.

- ✓ n. 1 prova sismica in array lineare MASW/ReMi → Le prove MASW/ReMi sono state finalizzate alla stima della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio (V_s) nel sottosuolo, fino a circa $-35 \div 40$ metri di profondità. La prova si basa sulla misura delle onde superficiali (Rayleigh) in corrispondenza di geofoni disposti in linea (foto 4.3). Le onde superficiali di Rayleigh, durante la loro propagazione vengono registrate lungo lo stendimento di geofoni e vengono successivamente analizzate attraverso complesse tecniche computazionali basate su un approccio di riconoscimento di modelli multistrato di terreno. 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. La spaziatura tra geofoni è stata sempre mantenuta pari a 3 metri, per uno sviluppo complessivo di 69 metri ad esclusione dello stendimento effettuato nella frazione Maggi (circa 35 metri, per limiti di spazio).



Foto 4.3 - Prova MASW/ReMi eseguita a sud del Capoluogo.

L'elaborazione degli esiti (eseguita con software "Geogiga Surface") consiste, sinteticamente, nell'estrazione dei modi dalle curve di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh e analisi dell'inversione delle curve di dispersione per ottenere profili verticali delle V_s . La metodologia ReMi (Refractor Microtremor), come la MASW, studia le proprietà dispersive delle onde superficiali (Rayleigh) in modalità di acquisizione passiva, ovvero registrando i microtremori del sottosuolo. Anche in questo caso, si tratta di una prova non invasiva, con array lineare, utilizzando la medesima strumentazione della prova

MASW. Lo studio scrivente ha proposto per questo lavoro la combinazione delle due acquisizioni MASW e ReMi, in quanto tale soluzione offre i seguenti vantaggi:

- entrambi i metodi si basano sulle onde Rayleigh e sulla loro dispersione;
- consente la stima della V_s del sottosuolo a maggiori profondità;
- si usano sia il rumore ambientale (ReMi) sia una sorgente puntuale artificiale (MASW attiva);
- la curva di dispersione sperimentale “combinata” può essere definita tra 0 e 60 Hz, quindi sia a basse sia ad alte frequenze.

- ✓ *n. 1 prova sismica in array bidimensionale ESAC (foto 4.4)* → il metodo ESAC è un'estensione del metodo SAC (Spatial Auto-Correlation) proposto da AKI nel 1957 ed è utilizzato per determinare la velocità di fase apparente o effettiva delle onde di Rayleigh a partire dalla misura del rumore ambientale. Dato che il rumore ambientale è in genere caratterizzato da onde a basse frequenze (<10–15Hz), la velocità di fase apparente fornita dal metodo riguarda le basse frequenze e quindi gli strati di terreno o roccia più profondi. In tal senso il metodo ESAC, così come il metodo ReMi, è complementare al metodo MASW attivo eseguito con sorgenti attive comuni.

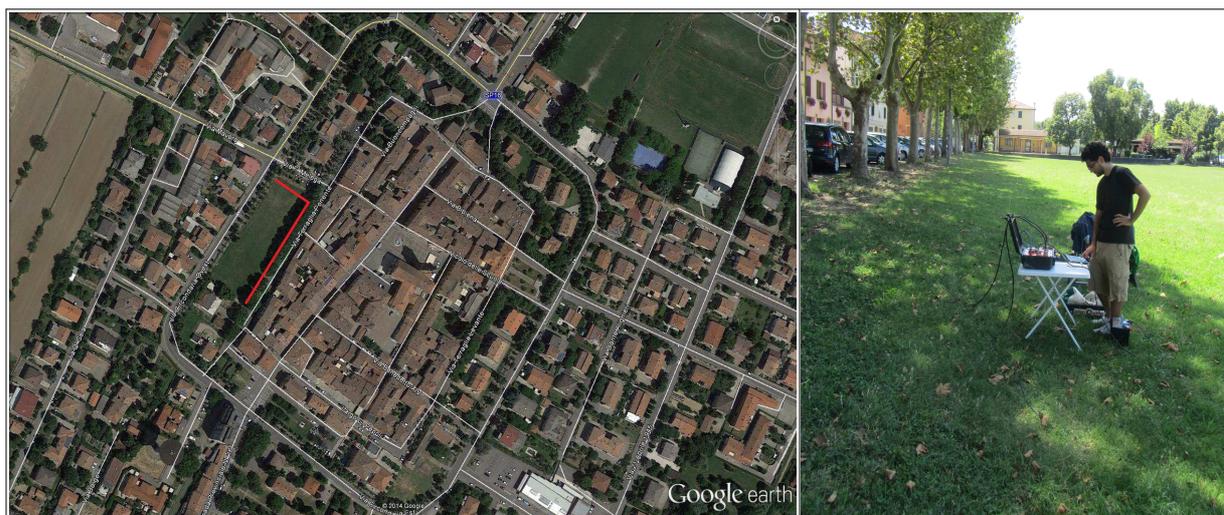


Foto 4.4 - Prova MASW/ReMi + ESAC eseguita nella zona “centro storico”. La foto riprende il lato più lungo dell'array bidimensionale disposto a “L”.

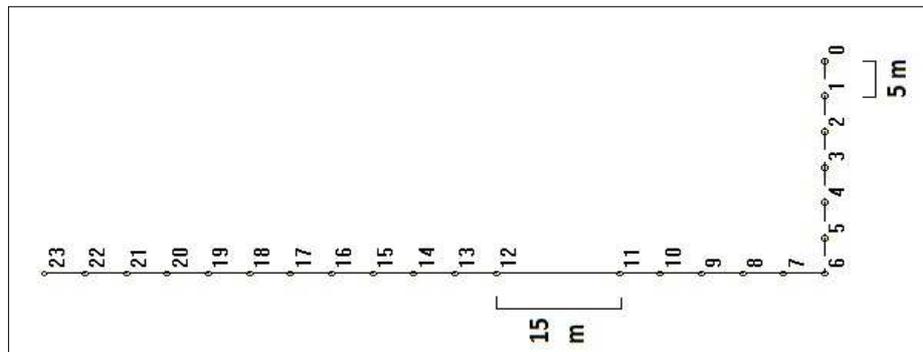
Occorre comunque rammentare che il metodo ESAC è da preferire rispetto al metodo ReMi perché offre una curva di dispersione sperimentale ottenuta in maniera oggettiva, contrariamente a quanto avviene nel metodo ReMi, che prevede un picking soggettivo del Professionista della curva di dispersione a partire dallo spettro ReMi nel dominio $f-k$ (frequenza–numero d’onda) oppure $f-p$ (frequenza–lentezza). In conclusione la Prova ESAC offre i seguenti vantaggi:

- consente la stima della V_s del sottosuolo a maggiori profondità;
- risulta più affidabile del ReMi in quanto consente di fare un picking automatico della curva di dispersione alle basse frequenze;

- si sovrappone con una buona corrispondenza alla curva di dispersione MASW attiva;
- gli esiti ricavati dalle prove MASW/ReMi + ESAC sono complementari dalle basse alle alte frequenze (dagli strati più profondi alla superficie).

L'attrezzatura utilizzata per l'acquisizione è la medesima delle prove MASW e ReMi. La configurazione dei 24 geofoni di acquisizione è stato effettuato secondo un array bidimensionale, disposti a "L" secondo lo schema riportato in figura 4.7) e con una spaziatura di 5 metri (ad esclusione dei due geofoni centrali); ciò che ha consentito di estendere lo stendimento in tutta la superficie disponibile del parco pubblico. La prova ha permesso un'elaborazione di buona qualità fino a una bassa frequenza di circa 2 Hz.

Figura 4.7 - Schema geometrico dello stendimento in array bidimensionale ESAC



- ✓ n. 30 registrazioni sismiche passive HVSR con stazione singola → Si tratta di una prova non invasiva e l'elaborazione del microtremore misurato fornisce i rapporti spettrali HVSR o H/V (Nogoshi & Igarashi, 1970). La tecnica dei rapporti spettrali (HVSR) trova la sua massima applicazione negli studi di risposta sismica locale poiché consente la stima delle frequenze fondamentali di risonanza del sottosuolo ($f_r = V_s / 4 * H$ con H = spessore dello strato).

Figura 4.8 – Principali caratteristiche strumentali del tromografo TROMINO

Code	Description
 TROMINO® ZERO	All-in-one digital recorder 10 x 7 x 13 cm, ~ 1 kg 1 Gb storage capacity battery powered (AA, 2 x 1.5 V) 2 set of spikes for sensor-soil coupling frequency band 0.1-200 Hz <ul style="list-style-type: none"> • 3 velocimetric channels for seismic ambient microtremor (± 1.2 mm/s in band) • sampling rates 128, 256, 512 Hz on all channels • rigid transport case • USB cable for data transfer to PC

Foto 4.5 - Prova HVSR eseguita nel Capoluogo (in prossimità del cinematografo multisala). La freccia rossa indica lo strumento in fase di registrazione.



In questo modo, le misure tomografiche forniscono un utile supporto alla ricostruzione di sottosuolo ed alla preliminare valutazione della pericolosità sismica, sulla base della stima delle frequenze amplificanti caratteristiche del terreno, oltre alla possibilità di individuare il bedrock sismico di riferimento. Lo strumento utilizzato (figura 4.8) dispone di tre canali di acquisizione connessi a tre velocimetri elettrodinamici ad alta risoluzione, in grado di misurare le componenti della velocità (moto) di ogni strato lungo le direzioni N-S; E-W; H-V. Si sono eseguite registrazioni di 20 minuti (foto 4.5), oltre a un'acquisizione di 50 minuti, eseguita in adiacenza la prova combinata MASW/ReMi+ESAC, sempre con frequenze di campionamento impostate a 128 Hz.

5 ELABORAZIONE DEI DATI E RISULTATI

5.1 Modello di sottosuolo

5.1.1 Sottosuolo profondo

I dati di riferimento sono desunti dagli studi geologici e sismici della pianura padana, effettuati da ENI-AGIP e dal SGSS regionale. Ulteriori e fondamentali informazioni sono state ricavate anche dai recenti studi di microzonazione sismica delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio 2012, ed elaborate dal SGSS della RER (Ordinanza del Commissario delegato – Presidente della regione Emilia-Romagna n.70/2012). Tra i territori interessati da tali studi, vi è il limitrofo Comune di Crevalcore (BO).

Le indagini eseguite per gli studi di microzonazione ai sensi dell'Ordinanza RER n.70/2012 hanno evidenziato come, dal punto di vista geofisico, il sottosuolo delle aree studiate presenti differenze laterali minime, almeno fino alla profondità di 50-60 metri, e che i valori equivalenti delle velocità di taglio delle onde sismiche nei primi 30 metri di sottosuolo (V_{s30}) sono sempre inferiori a 220 m/s, sia da prove DH e CH in sondaggi, sia da prove SCPTU. La prova in foro "Down-Hole" eseguita a Crevalcore (spinta fino a 51 m di profondità) ha misurato una V_{s30} pari a circa 197 m/s. Le indagini sismiche più profonde (prove "Cross-Hole"), eseguite nei sondaggi di Medolla e di Mirandola, hanno fornito valori di V_s di tutta la successione alluvionale in media dell'ordine di 300-350 m/s e valori maggiori di 700 m/s per il substrato marino, raggiunto rispettivamente a profondità di 96 metri e 113 m dal p.c.

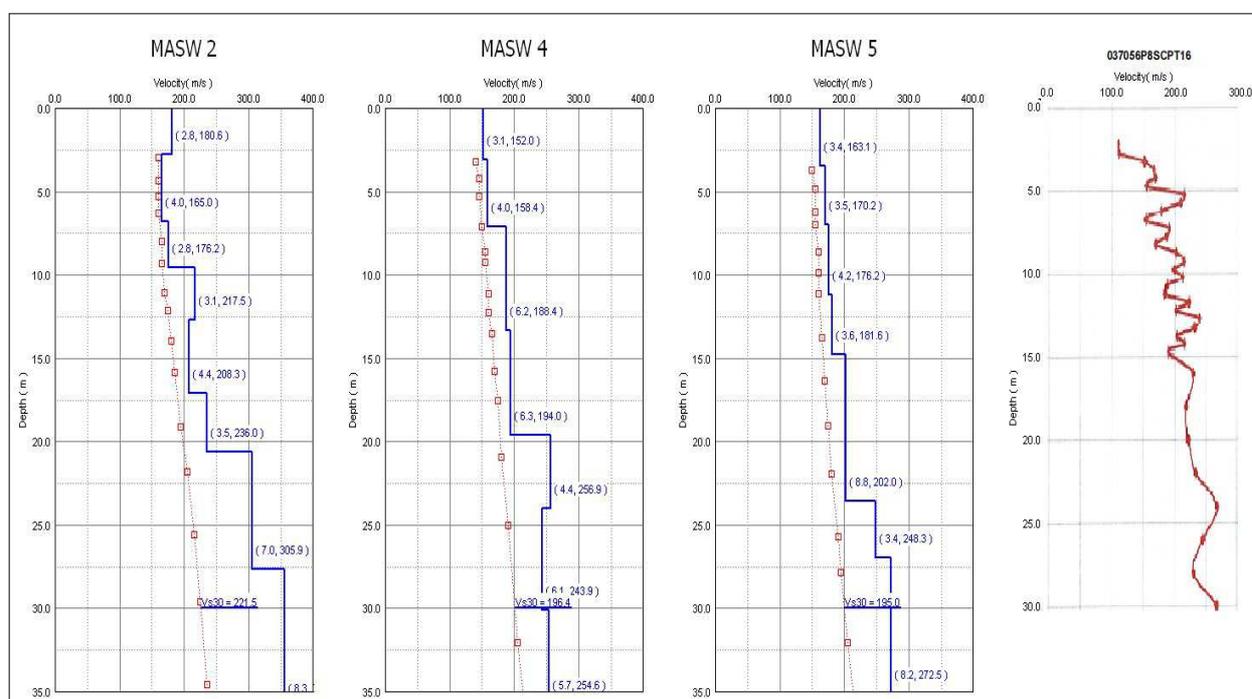


Figura 5.1 – Distribuzione delle V_s ricavate dal "Cono Sismico" (eseguito nella frazione Crocetta) e da prove combinate MASW/ReMi eseguite nel territorio comunale.

Le indagini geofisiche eseguite nel Comune di Sant'agata Bolognese (MASW/ReMi e "Coni Sismici"), finalizzate alla stima delle V_s hanno ricavato esiti di V_{s30} compresi tra 181 m/s e 222

m/s (figura 5.1), in coerenza con quanto atteso (ad esclusione di una sola prova MASW di repertorio che fornisce una V_{s30} probabilmente sovrastimata e pari a circa 228 m/s).

La prova ESAC eseguita nel Capoluogo (zona “centro storico”) ha inoltre permesso la stima della distribuzione delle Vs fino ad una profondità pari a circa –60 metri, come riportato nel grafico di figura 5.2.

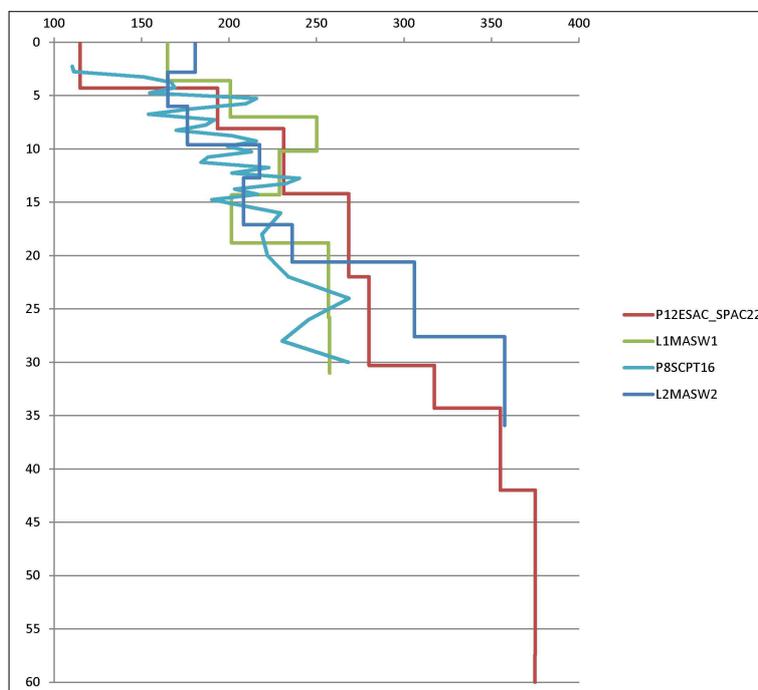
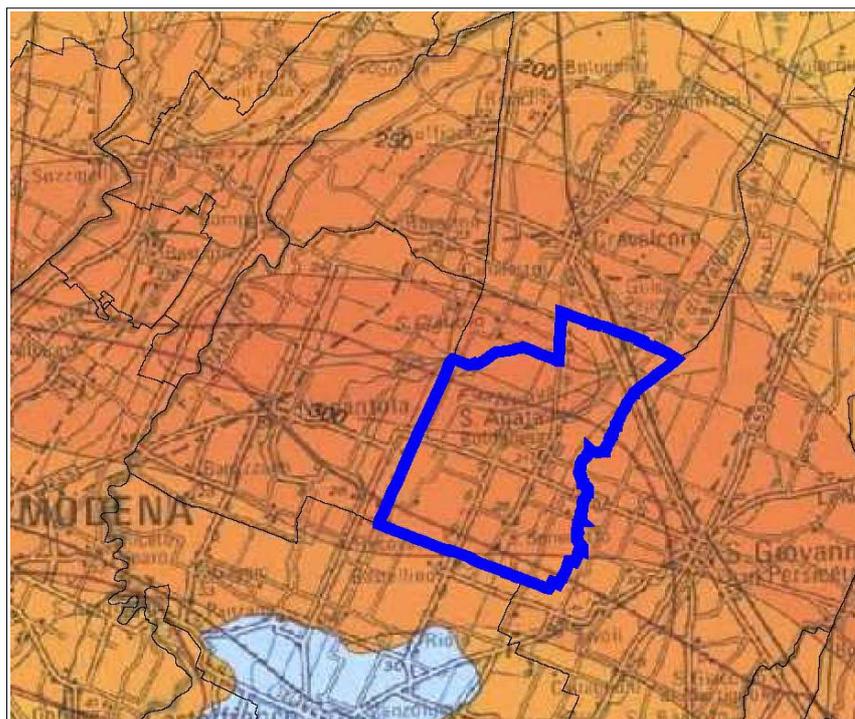


Figura 5.2 - Distribuzione delle Vs nel sottosuolo (zona “centro storico” del Capoluogo): il grafico riporta il confronto tra le indagini disponibili (“Cono Sismico”; MASW/ReMi; ESAC).

Le indagini eseguite per gli studi di microzonazione ai sensi dell'Ordinanza RER n.70/2012 hanno inoltre confermato come il primo forte contrasto di impedenza si ha nei depositi alluvionali, in genere tra la base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES, datata 400.000–450.000 anni) e la base del subsistema AES6 (datata 230.000–250.000 anni), mentre una seconda importante discontinuità sismica corrisponde alla più profonda interfaccia da depositi alluvionali e bedrock marino.

Figura 5.3 - Stralcio della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna alla scala 1:250.000 (SGSS e CNR, 2004) e territorio comunale di Sant'Agata Bolognese. Le aree in arancio discriminano differenti profondità della base del Sintema Emiliano-Romagnolo superiore AES (le quote delle isobate si riferiscono al livello medio del mare)



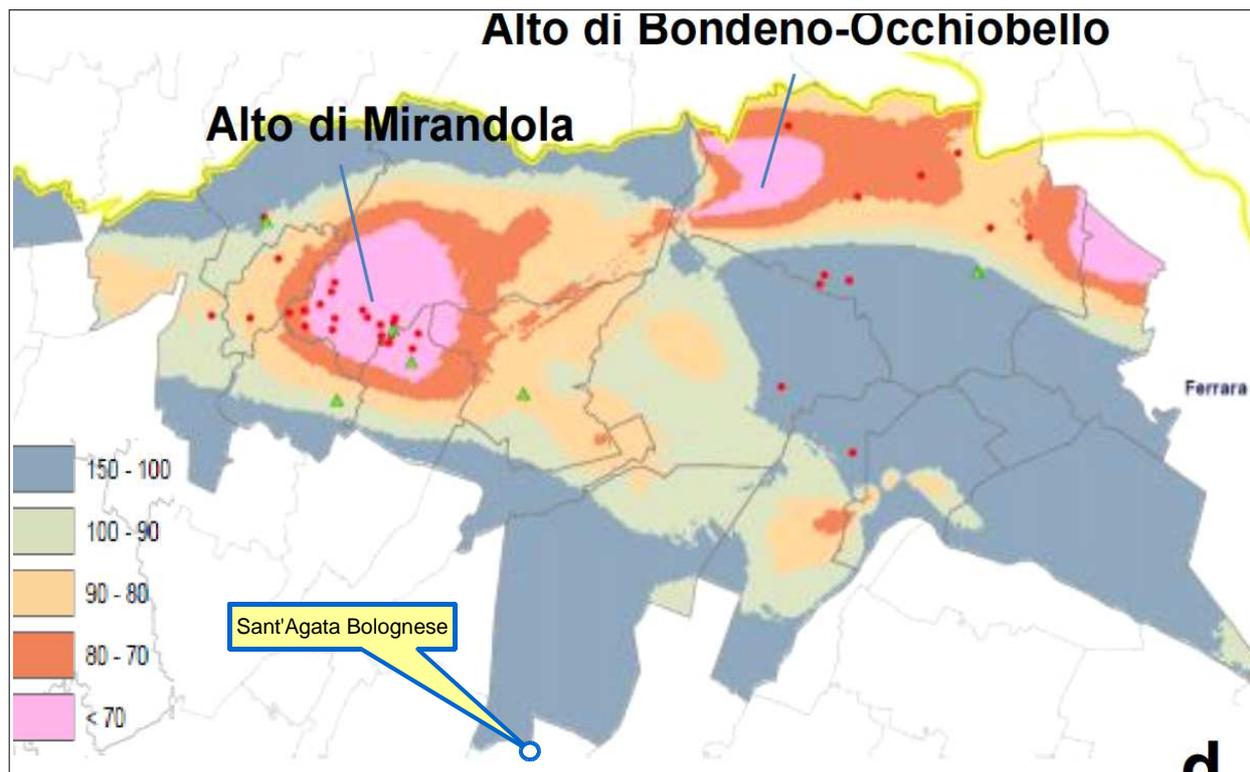


Figura 5.4 - Isobate della profondità della base delle alluvioni del subsistema AES6 (da "Relazione microzonazione sismica ord. 70/2012", L. Martelli e M. Romani, 2014).

Come già descritto nel Capitolo 3, il territorio comunale di Sant'Agata Bolognese ricade nell'ampia sinclinale "Bologna-Bomporto-Reggio Emilia", nella quale gli spessori delle coperture alluvionali risultano di maggiore potenza. In particolare, la Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (scala 1:250.000) colloca il territorio in questione parzialmente situato sulla zona di maggiore depressione della sinclinale, individuabile tra Sant'Agata Bolognese e Crevalcore e fino a NO di Nonantola: la base del Sintema AES viene stimata tra circa -250 metri fino a circa -300 metri slmm (figura 5.3).

Dagli studi di microzonazione relativi all'Ordinanza RER n.70/2012 è inoltre possibile estrapolare la base del subsistema AES6, che risulterebbe profonda oltre 100 metri rispetto al piano campagna (figura 5.4). Sono inoltre disponibili due sezioni geologiche profonde della pianura (pubblicate nel sito del SGSS regionale) che interessano anche Sant'Agata Bolognese: le tracce delle sezioni n. 27 e n. 66 attraversano il territorio comunale da SSO s NNE (figure 5.5 e 5.6). In particolare, la sezione n.66 (denominata per questo lavoro 2-2') attraversa le aree urbane/urbanizzate del Capoluogo e delle frazioni di Maggi e Crocetta, evidenziando il complessivo approfondimento, verso Crevalcore, delle sequenze alluvionali profonde.

Le indagini HVSR eseguite nel territorio comunale di Sant'Agata Bolognese, sulla base della relazione tra frequenza fondamentale (f_0) e velocità delle onde di taglio V_s , forniscono ulteriori elementi relativamente alla profondità del bedrock sismico, inteso come superficie di forte contrasto di impedenza. Le registrazioni tomografiche hanno chiaramente evidenziato un picco del rapporto spettrale H/V compreso tra 0,7 Hz e 1,2 Hz (figura 5.7), con rapporti spettrali che risultano sempre "bassi" o appena "moderati" (rapporto H/V <2,2). Ulteriori commenti sugli esiti HVSR sono riportati nel successivo paragrafo 5.2.

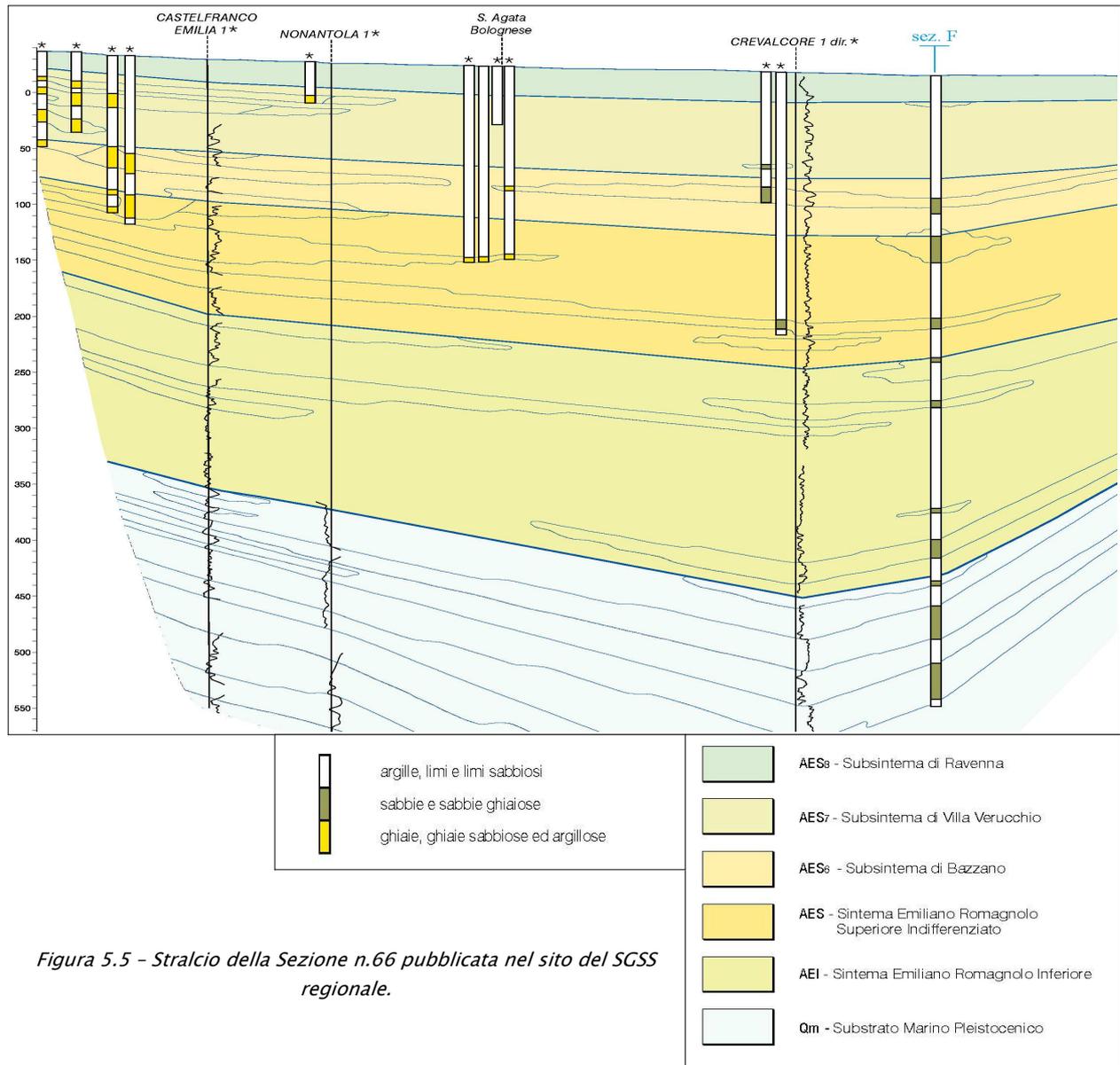
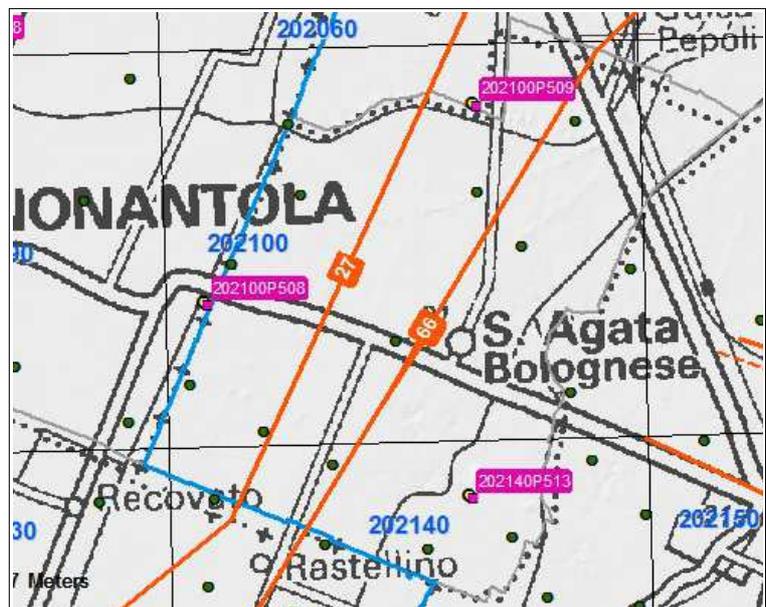


Figura 5.5 - Stralcio della Sezione n.66 pubblicata nel sito del SGSS regionale.

Figura 5.6 - Tracce delle sezioni geologiche pubblicate nel sito del SGSS regionale.



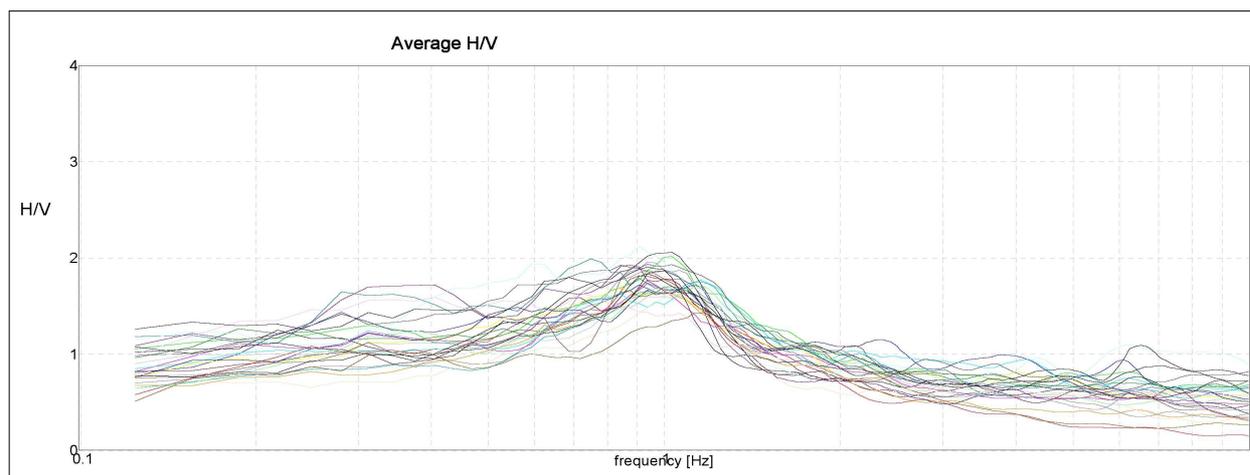


Figura 5.7 - Spettri di amplificazione H/V ricavati dalle registrazioni tromografiche effettuate nel Comune di Sant'Agata Bolognese.

Sulla base delle conoscenze stratigrafiche e geofisiche del sottosuolo già descritte, è possibile associare i contrasti di impedenza riscontrati a un principale riflettore sismico ascrivibile alla discontinuità litostratigrafica situata alla base del subsistema AES6 e approssimabile a profondità certamente superiori a 100 metri. Secondo la nomenclatura scientifica in materia, si tratterebbe, peraltro, di un "pseudobedrock", in quanto caratterizzato da V_s presumibilmente inferiori a 800 m/s, come è emerso dagli studi geofisici di microzonazione sismica effettuati nei Comuni danneggiati dal sisma del maggio-giugno 2012, e come confermerebbero i risultati di moderata amplificazione spettrale ottenuti dalle registrazioni dei microtremori sismici nel territorio studiato.

I rapporti spettrali H/V ricavati dalle registrazioni dei microtremori effettuati nel capoluogo (zona "centro storico"), consentono di proporre un'ulteriore elaborazione del profilo verticale delle velocità delle onde sismiche di taglio (V_s), fino al presumibile pseudobedrock (figura 5.8).

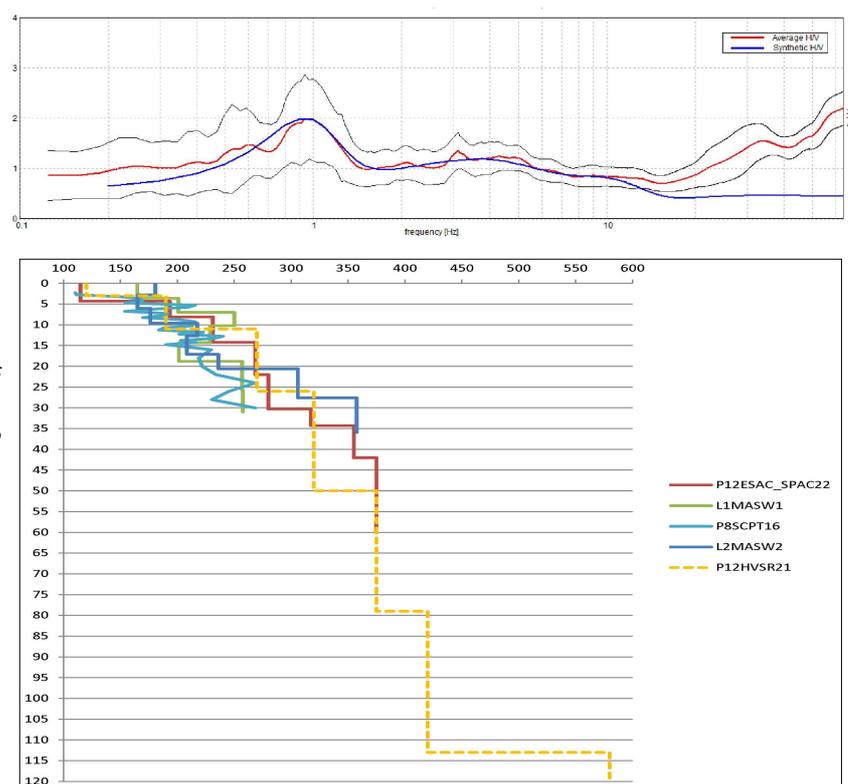


Figura 5.8- Distribuzione delle V_s nel sottosuolo (zona "centro storico" del Capoluogo): il grafico riporta il confronto tra alcune indagini geofisiche eseguite per questo studio nella frazione Crocetta ("Cono Sismico") e nel Capoluogo (MASW/ReMi; ESAC) e un'ulteriore elaborazione fino al presunto "pseudobedrock" ricavata mediante rapporto spettrale H/V (registrazione tromografica di 50 minuti).

Quest'ultima elaborazione è basata sul confronto delle misure più attendibili di Vs degli strati meno profondi, ricavate dalle altre indagini geofisiche disponibili e limitrofe ("Cono Sismico"; stendimenti MASW/ReMi e ESAC). Si tratta, in ogni caso, di una valutazione puramente indicativa, in quanto gravata dalle scarse informazioni sismo-stratigrafiche degli strati profondi (moduli di Poisson; rigidità e/o Vs reali; spessori, ecc.). Gli esiti, peraltro, convergono a confermare il pseudobedrock sismico ad una profondità superiore a 100 metri dal piano campagna. Le terebrazioni geognostiche disponibili nella zona Capoluogo hanno consentito di elaborare un'ulteriore sezione geologica (denominata 1-1'), in questo caso sviluppata da ovest a est. Si tratta di uno schema litologico meno profondo, cioè elaborato fino alla profondità massima di circa 30 metri, ma più dettagliato dal punto di vista della caratterizzazione tessiturale. La sezione, riportata in figura 5.9, consente di evidenziare:

- la presenza della zona morfologicamente rilevata nella porzione ovest della traccia, interpretabile come il paleodosso fluviale sul quale si insedia il nucleo storico di Sant'Agata Bolognese (si anche rimanda al capitolo 3);
- la presenza di sedimenti prevalentemente fini (argille e argille limose) con intercalati livelli più granulari (limi e limi sabbiosi) che, nei primi 10 metri, tendono a individuarsi soprattutto nella porzione ovest della traccia;

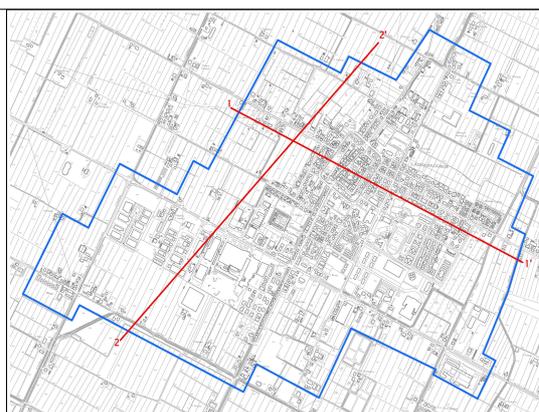
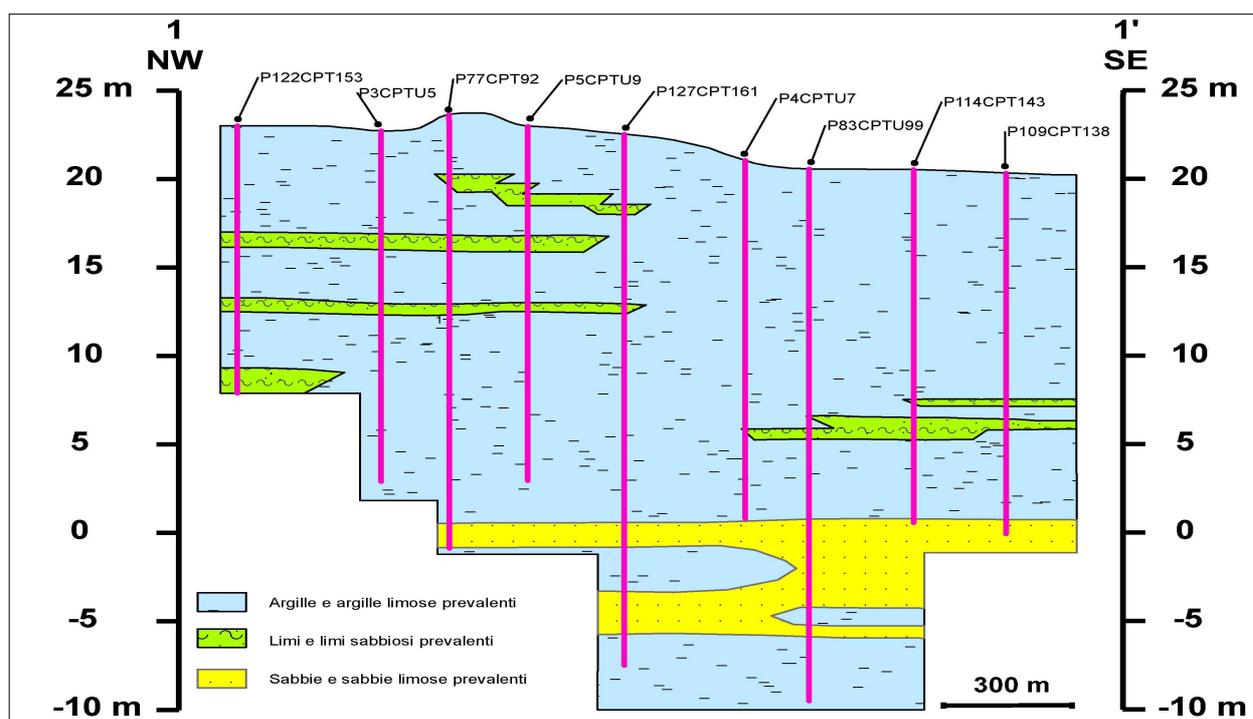


Figura 5.9 – Sezione geologica 1-1' elaborata per il Capoluogo. A dx la localizzazione delle sezioni che attraversano Sant'Agata Bolognese.

- la presenza di uno spessore di sabbie e sabbie limose più potente e probabilmente continuo e tabulare, almeno nell'area Capoluogo, il cui tetto è collocato ad una profondità di circa 20÷25 metri. Questo intervallo sedimentario è attribuibile all'attività deposizionale del Fiume Panaro (lobi distali della sua conoide alluvionale) e sede della prima importante falda freatica della zona.

5.1.2 Caratterizzazione geotecnica del sottosuolo sub-affiorante

L'elaborazione della sezione 1-1' è risultata di fondamentale supporto, come vedremo, per le ulteriori ricostruzioni della cartografia geologico-technica e per le valutazioni della pericolosità di liquefazione locale.

Per gli aspetti geologico-technici, lo studio si è infatti basato sul controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo e, in particolare, sugli esiti delle analisi tessiturali e di classificazione dei campioni prelevati. Occorre peraltro precisare che si è potuto disporre di campioni prelevati entro i primi 8 metri solo in tre sondaggi su sette complessivi. Inoltre, le analisi di laboratorio effettuate (tessiture e limiti di Atterberg) consentono la caratterizzazione degli strati campionati, in alcuni relativi a intervalli limoso sabbiosi, in altri casi riconducibili a intervalli prevalentemente argillosi e con limiti di liquidità (quando effettuati) sempre <50%. Gli esiti sono dunque tali da includere tutti gli intervalli campionati nelle due classi USCS/AGI denominate "CL" e "ML".

Si è quindi deciso di considerare anche gli esiti delle prove penetrometriche, in quanto si è potuto disporre, oltre ai grafici delle resistenze, anche dei dati numerici delle prove CPTU eseguite dal SGSS regionale nell'ambito del progetto di elaborazione della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000.

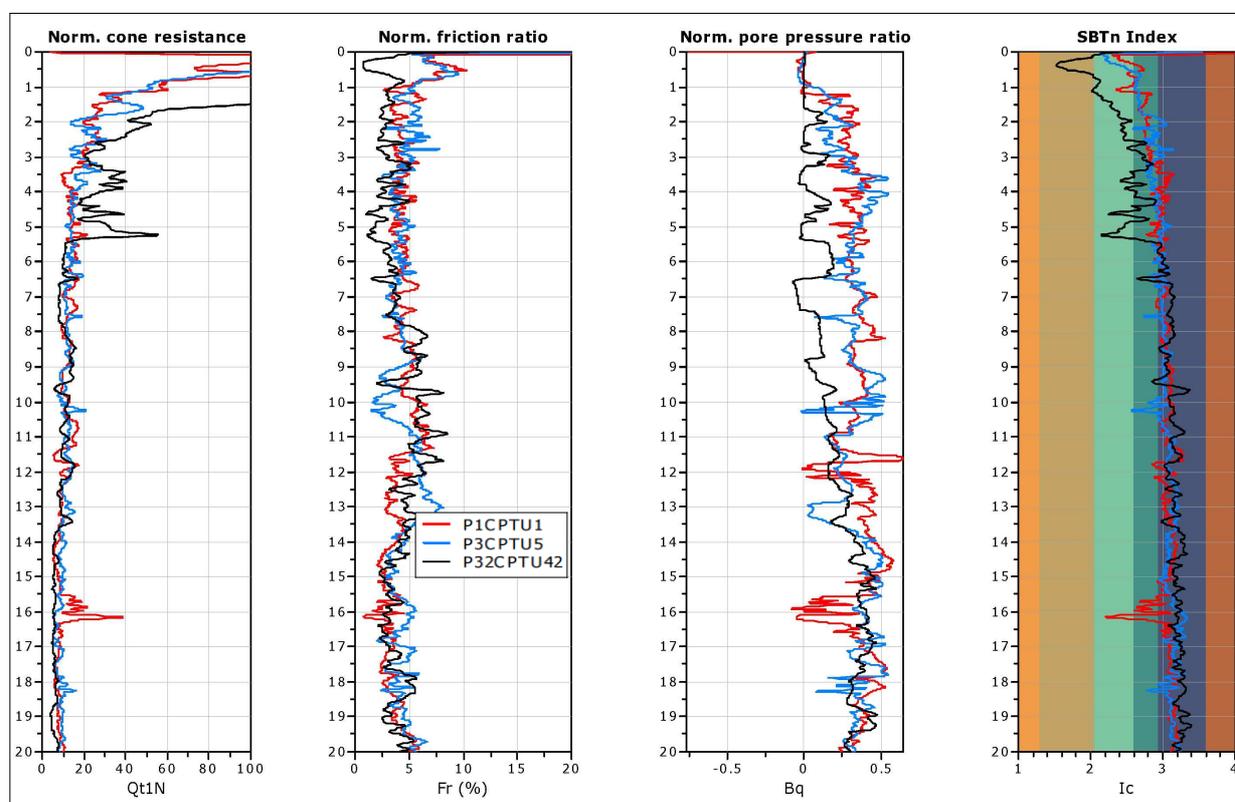


Figura 5.10 – Esiti tessiturali ricavati dalle prove CPTU: la prova CPTU42 è stata classificata "ML" mentre le prove CPTU1 e CPTU5 sono state classificate "CL".

Le prove CPTU regionali e le prove CPTU eseguite per questo lavoro hanno premesso di ricavare in modo automatico le tessiture, secondo la nota classificazione dei terreni proposta da P.K. Robertson (1990; 2009).

La figura 5.10 riporta alcuni esiti tessiturali ricavati da prove CPTU della zona Capoluogo, con dati numerici disponibili.

Sulla base di queste informazioni, si è potuto elaborare una classificazione dei punti di controllo per giungere ad una zonizzazione geotecnica, ai fini della microzonazione sismica, dei sedimenti di copertura e sulla base dei seguenti criteri:

- classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.3.0);
- si è considerata la prevalenza tessiturale nella “colonna” di sedimenti rispettivamente profonda fino a -6 metri e a -10 metri dal piano campagna;
- nelle attribuzioni tessiturali da prove penetrometriche, si è escluso lo spessore di sedimenti soprafalda e cioè più superficiale. Tale esclusione è risultata ineludibile, in quanto nei sedimenti insaturi, spesso sovraconsolidati per essiccamento, le correlazioni tessiturali e meccaniche risultano falsate.

Assumendo come riferimento di valutazione la colonna di sedimenti profonda -10 metri (figura 5.12), si ottiene una sostanziale omogeneità di classificazione (argille e argille limose “CL”), invece considerando la colonna di sedimenti fino a -6 metri (figura 5.13) la classificazione dei punti di controllo appare più eterogenea, in quanto enfatizza anche la prevalenza di livelli limoso sabbiosi più superficiali (“ML”).

Il controllo ha consentito di rilevare alcuni livelli torbosi di spessore significativo (in due prove: >60 cm), sebbene la colonna sia ancora prevalentemente classificabile come “CL” (figura 5.13). Questi sedimenti sono caratterizzati da basse resistenze di punta e coesione e ciò può costituire una limitazione alla progettazione di particolare impegno costruttivo anche considerando le sole condizioni statiche, inoltre questi livelli appaiono suscettibili a cedimenti se sottoposti a scuotimento sismico.

In particolare, l'intervallo torboso più critico è localizzato ad una profondità di circa 4÷5 metri (figura 5.11) rispetto al piano campagna, cioè all'interno del “volume significativo” di sedimenti per gran parte degli edifici esistenti.

Figura 5.11 - Confronto tra prove penetrometriche che evidenziano un intervallo torboso nei primi 6 metri di sottosuolo.



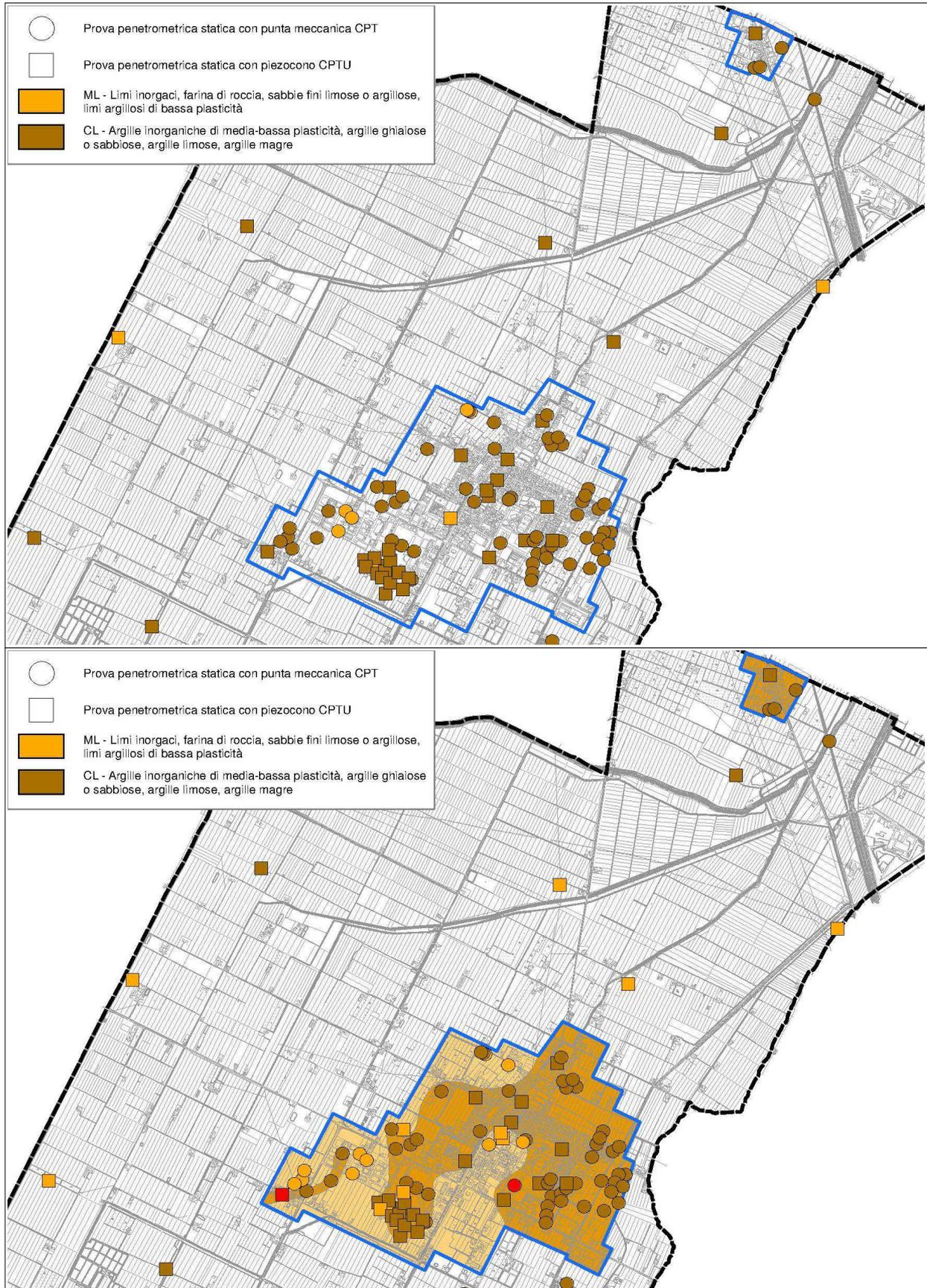


Figure 5.12 (in alto) e 5.13 (in basso) – Classificazione secondo il sistema USCS/AGI delle colonne di sedimenti fino a -10 metri e -6 metri, attraversati dalle prove penetrometriche CPT e CPTU. La figura riporta (in rosso) due punti di controllo caratterizzati da intervalli torbosi di spessore significativo (>60 cm).

In conclusione, la zonizzazione geotecnica delle aree urbane/urbanizzabili è stata elaborata considerando la caratterizzazione dei sedimenti fino a una profondità di -6 metri, in quanto tale intervallo è da ritenersi maggiormente confrontabile con il “volume significativo” per la maggior parte degli edifici di normale impegno costruttivo, dotati di fondazioni dirette.

5.2 L'analisi della risposta sismica locale

5.2.1 L'analisi del rumore sismico ambientale

Lo studio di microzonazione ha compreso una serie di misurazioni del rumore sismico del sottosuolo con tecnica HVSR. Ciò ha consentito l'analisi degli spettri di amplificazione H/V ricavati dalle registrazioni, sebbene si premette che tali esiti spettrali devono intendersi puramente indicativi e non possono consentire una quantificazione delle amplificazioni spettrali.

Peraltro, le indagini HVSR rappresentano un utile strumento per valutazioni riguardo la possibile presenza di riflettori sismici e per le prime indicazioni riguardo la vulnerabilità dei manufatti di previsione e/o esistenti rispetto agli effetti di amplificazione locale del moto sismico. È infatti noto come le strutture siano caratterizzate da differenti modi di vibrazione, in funzione di molti parametri tra cui l'elevazione, la tipologia, il materiale costruttivo, etc. La risposta sismica locale deve essere valutata anche in funzione delle amplificazioni del moto di vibrazione in termini frequenze dell'impulso sismico. Infatti, il moto sismico può essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali f_n di vibrazione della colonna stratigrafica. In questo senso, molto importante risulta la prima frequenza naturale di vibrazione f_0 denominata frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore massimo.

Dal punto di vista analitico, la vibrazione di un edificio è governata soprattutto dalla sua altezza: la figura 5.14 riporta un abaco di possibile relazione tra altezza di un edificio in c.a. e frequenza di risonanza propria. Un'ulteriore relazione empirica che lega la frequenza di vibrazione di un edificio e la sua altezza è la seguente: $f = (10 \div 12)/n$.piani.

La coincidenza fra frequenze di risonanza naturale del terreno e frequenze di vibrazione delle strutture può dunque causare pericolose amplificazioni nel caso di impulsi ciclici dovuti ad un evento sismico (effetto di "doppia risonanza").

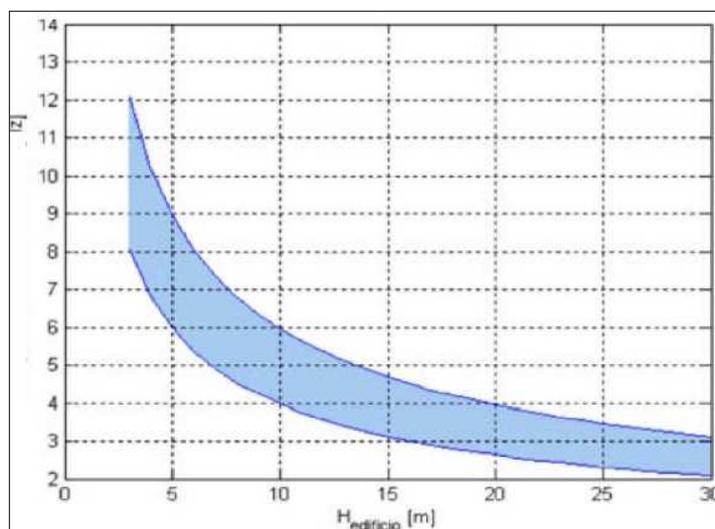


Figura 5.14 – Abaco di relazione tipica tra altezza edificio in c.a. – primo modo flessionale (da Masi et al., 2007).

Come già scritto nel paragrafo 5.1, le registrazioni tomografiche eseguite nelle aree di maggior approfondimento hanno chiaramente evidenziato un picco di amplificazione del rapporto spettrale H/V compreso tra 0,8 Hz e 1,2 Hz. Le prove eseguite nelle aree esterne all'urbanizzato/urbanizzabile hanno evidenziato anche picchi dell'amplificazione a frequenze spinte fino a circa 0,7 Hz. Questi picchi sono riconducibili alla frequenza fondamentale f_0 che caratterizza il territorio studiato. I massimi rapporti spettrali risultano sempre “bassi” o appena “moderati” (rapporto H/V <2,2), anche nel caso delle F_0 lievemente più alte ($1,1 < F_0 < 1,2$). È chiaro che anche le misure di risonanza delle prove HVSR possono risultare inficiate da disturbi, pertanto le singole prove possono risultare non rappresentative.

Per questo motivo, il Capoluogo è stato oggetto del maggior numero di acquisizioni HVSR, e la densità delle prove ha permesso ulteriori approfondimenti relativamente alla risposta sismica locale. Si è innanzitutto deciso di effettuare 9 nuove registrazioni (più una di repertorio) per caratterizzare il centro storico (figura 5.16), ritenuta l'area abitata più vulnerabile dal punto di vista sismico per la vetustà, la densità e la tipologia delle costruzioni. Una delle registrazioni HVSR è stata eseguita con una durata di acquisizione pari a 50 minuti, elaborando lo spettro con finestre temporali di 30 secondi.

La densità delle registrazioni, considerando la modesta estensione del centro storico (circa 8,7 Ha), permette una valutazione stocastica del rapporto spettrale che caratterizza la zona circoscritta. In questo senso, la figura 5.16 riporta gli spettri delle singole prove e il rapporto spettrale medio relativo alle prove effettuate (con tempi di acquisizione pari a 20 minuti).

Si evince come lo spettro H/V della prova di più lunga acquisizione risulti marcare più precisamente il picco in corrispondenza della frequenza fondamentale F_0 , che corrisponde, peraltro, con l'esito dello spettro medio (0,95 Hz). La registrazione evidenzia un ulteriore picco a bassa frequenza (circa 0,6 Hz), riscontrabile anche in altre prove (sebbene meno marcato), dimostrando la presenza di un riflettore sismico più profondo, messo in luce da tempi prolungati di acquisizione. Lo spettro H/V della registrazione lunga 50 minuti evidenzia alti spettrali anche a frequenze più elevate e in particolare a circa 2 Hz e tra 3 Hz÷6 Hz: si tratta di modeste amplificazioni che, peraltro, potrebbero essere inficiate da perturbazioni dovute a sorgenti di rumore antropiche.

Come già accennato, le registrazioni eseguite nella zona Capoluogo hanno misurato massime ampiezze spettrali a frequenze lievemente discordanti e fino a quasi 1,2 Hz, peraltro con rapporti H/V sempre piuttosto contenuti. Gli esiti HVSR hanno spinto a elaborare un'analisi d'interpolazione delle singole misure di F_0 , mediante l'utilizzo dell'estensione “Spatial Analyst” di ArcGis, finalizzata a evidenziare eventuali correlazioni spaziali.

Si è pertanto proceduto con un'interpolazione automatica secondo il metodo IDW (Inverse Distance Weighted), che stima il valore di una variabile in una cella come media dei valori misurati più vicini. Secondo questa logica, il punto misurato più vicino alla cella è comunque quello che influenza maggiormente il valore stimato, inoltre la variabile che si sta misurando decresce allontanandosi dal luogo di riferimento.

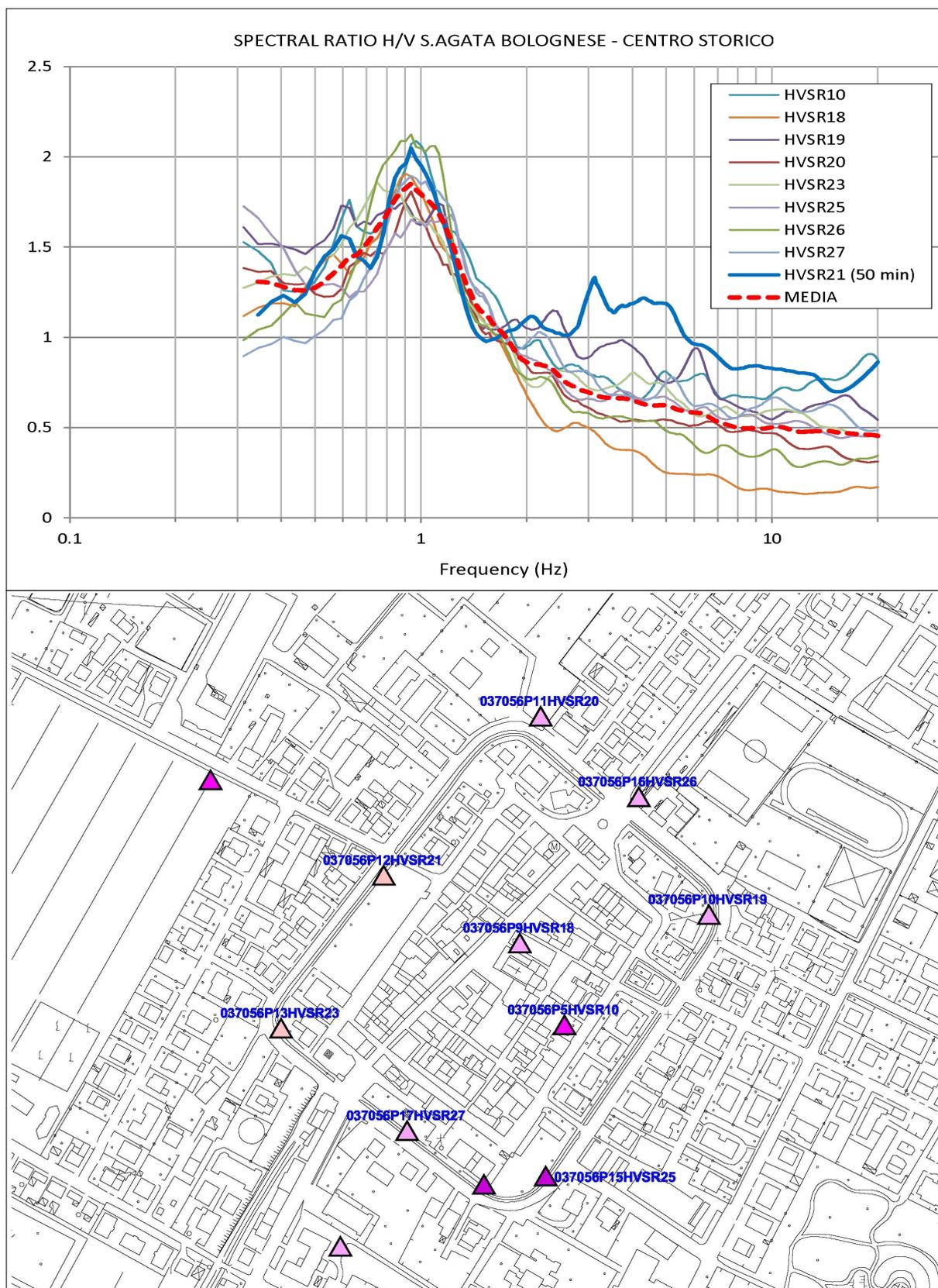


Figura 5.16 - Spettri H/V delle registrazioni dei microtremori sismici nel Capoluogo (zona "centro storico"). Il grafico riporta le singole curve spettrali delle prove HVS eseguite con tempi di acquisizione pari a 20 minuti, il relativo rapporto spettrale medio, e la curva spettrale della prova HVS eseguita con tempi di acquisizione pari a 50 minuti.

L'interpolazione è basata sui seguenti parametri di input: risoluzione pari a 40x40 metri (output cell size); raggio di ricerca dei punti di misura fissa e pari a 500 m (search radius); peso di influenza dei punti misurati più vicini pari a 1 (power). L'esito dell'elaborazione viene proposto in figura 5.17, ed evidenzia una possibile distribuzione spaziale dei valori più “elevati” di frequenza fondamentale F_0 che si sviluppa da SE a NO, lungo una fascia localizzabile nella zona circa centrale dell'area studiata e poco a sud del centro storico.

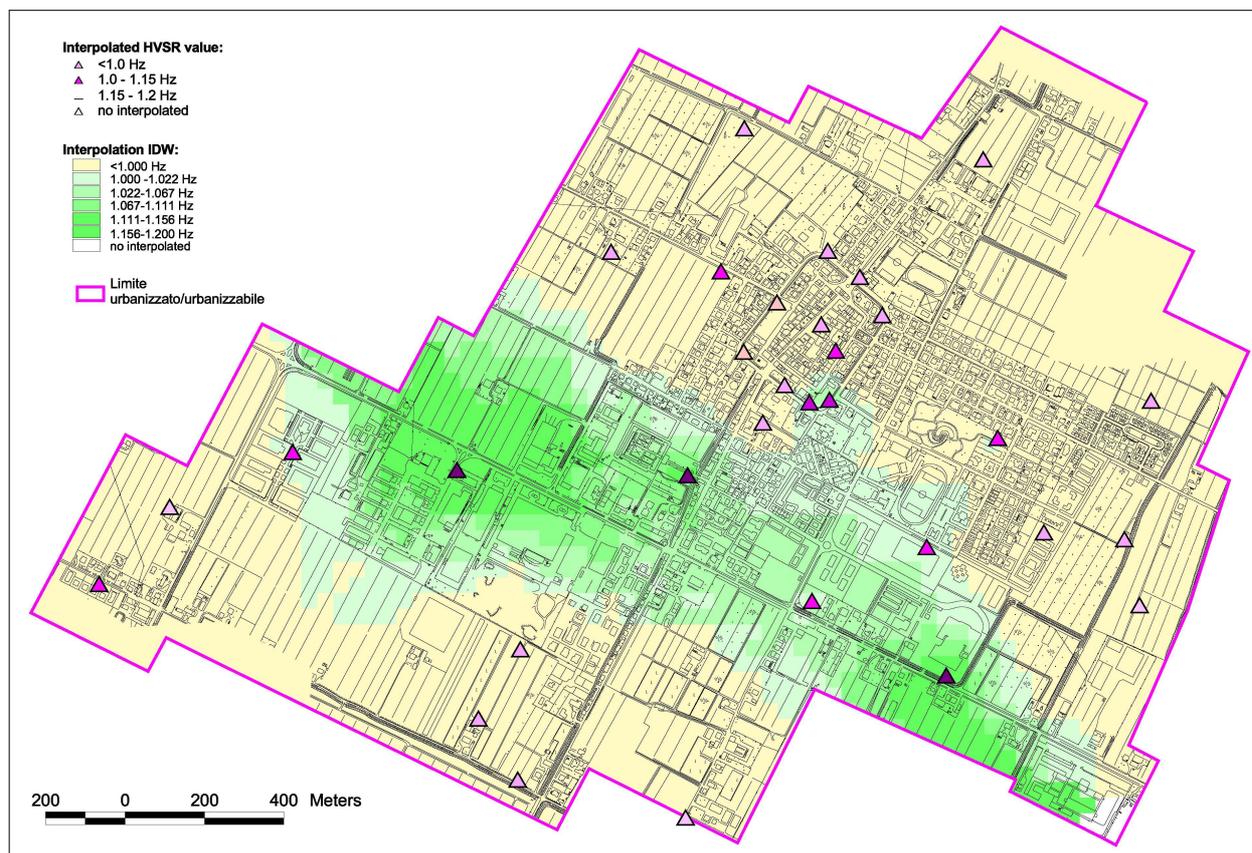


Figura 5.17 - Distribuzione spaziale degli esiti di frequenza fondamentale da prove HVSR nell'area Capoluogo, ricavata da interpolazione automatica con metodo IDW.

L'esito ottenuto potrebbe essere riconducibile a cause tettoniche, cioè determinato da una blanda deformazione plicativa che coinvolgerebbe anche i sedimenti alluvionali del Pleistocene medio che costituiscono il pseudobedrock sismico (subsistema AES6). A tal proposito, si rammenta che la Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna riporta poco a nord del Capoluogo il fronte di un sovrascorrimento sepolto di età relativamente recente (Pliocene-Pleistocene inferiore), che potrebbe giustificare questa interpretazione dei dati (figura 5.18).

Lo sviluppo della fascia definita dall'analisi spaziale è oltretutto simile alla direzione delle principale struttura sepolta nota nell'area di studio. Un ulteriore fronte di sovrascorrimento sepolto è inoltre individuato più a sud, ancora nel territorio di Sant'Agata Bolognese al confine con il Comune di Castelfranco Emilia (figura 5.19). In conclusione, il contesto tettonico compressivo che caratterizza il territorio di pianura studiata, pare coinvolgere in misura lieve anche il materasso alluvionale di età pleistocenica, con blande deformazioni plicative di accrezione (figura 5.19).

Figura 5.18 – Stralcio della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (SGSS-CNR, 2004). Le linee rimarcate in blu rappresentano i fronti di sovrascorrimento sepolti riportati nella cartografia.

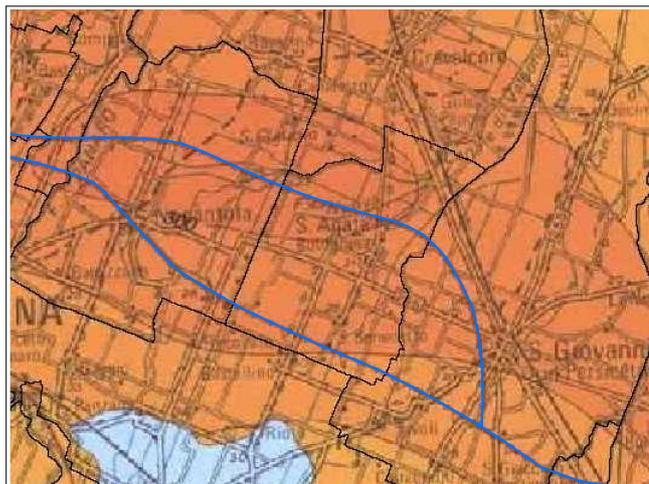
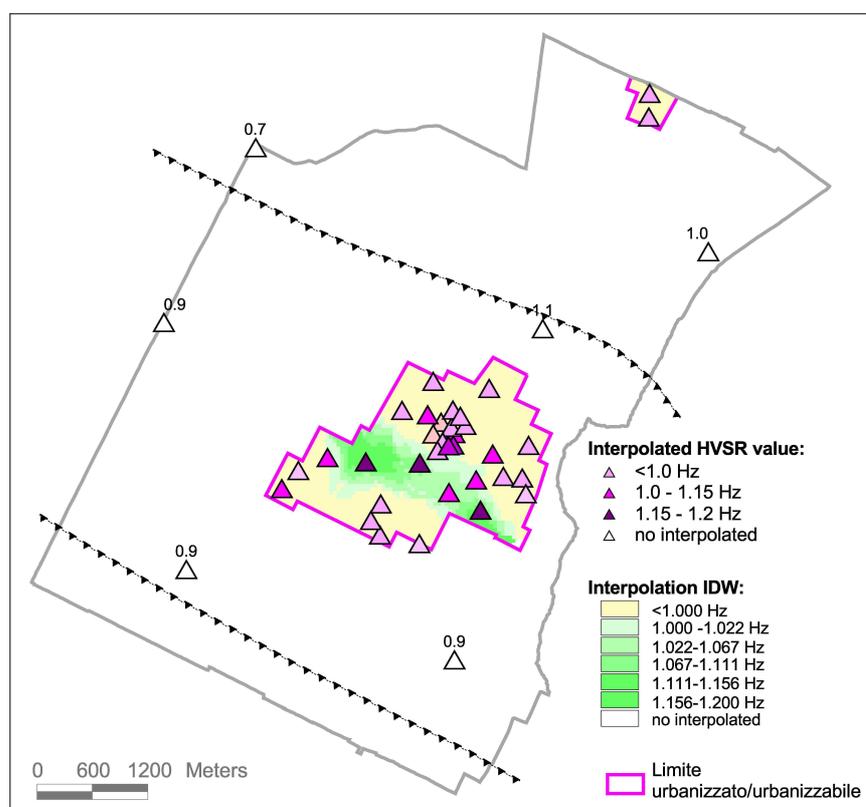


Figura 5.19 – Esiti dell'interpolazione spaziale e le registrazioni HVSR esterne al territorio urbanizzato/urbanizzabile. La figura riporta anche le tracce approssimate dei fronti di sovrascorrimento sepolti desunti dalla Carta Sismotettonica RER.



5.2.2 I fattori di amplificazione semplificati per la microzonazione di livello 2

Per i depositi e le forme che possono determinare effetti locali si è fatto riferimento agli Allegati della deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n.112 del 2 maggio 2007 (DAL 112/2007).

La delibera regionale propone la definizione semi quantitativa degli effetti di amplificazione locale semplificata (secondo livello di approfondimento) per le aree urbane e urbanizzabili comprese <<nelle aree pianeggianti o sub-pianeggianti, incluse le zone di fondovalle appenniniche, con stratificazione orizzontale e sub-orizzontale, e sui versanti con acclività $\leq 15^\circ$, in cui il deposito ha spessore costante>>.

Per le aree stabili suscettibili di amplificazione, la risposta sismica locale è stata quantificata secondo i seguenti parametri FA riferiti alla superficie:

- FA_{PGA} → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido ($a_{max,0}$) e la massima ampiezza dell'accelerazione alla superficie del deposito ($a_{max,s}$) alla frequenza f . 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, è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità; nel nostro caso, si sono determinati i fattori di amplificazione per i due intervalli di frequenze, rispettivamente da $0.1 < T_0 < 0.5$ s e da $0.5 < T_0 < 1$ s ($FA_{0,1-0,5s}$ e $FA_{0,1-0,5s}$).

I fattori di amplificazione sopra descritti, sono desunti dagli abachi riportati nella DAL 112/2007 (Allegato A2), riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

Le variabili fondamentali, da inserire nelle tabelle per la stima dell'amplificazione locale sono dunque la velocità equivalente delle onde di taglio nel sottosuolo e gli spessori dei sedimenti superficiali che possono amplificare il moto sismico e/o la profondità del bedrock sismico.

Sulla base del modello di sottosuolo profondo, descritto nel paragrafo 5.1.1, e sulla base dei dati geofisici disponibili, discussi anche nel precedente paragrafo, il bedrock sismico è considerato ad una profondità maggiore di 100 metri in tutto il territorio comunale. Le registrazioni HVSR evidenziano un massimo spettrale a frequenze tali da associare i relativi contrasti di impedenza a un principale riflettore sismico ascrivibile alla discontinuità litostratigrafica situata alla base del subsistema AES6 e approssimabile a profondità certamente superiori a 100 metri. Secondo la nomenclatura scientifica si tratterebbe, peraltro, di un "pseudobedrock", in quanto caratterizzato da V_s presumibilmente inferiori a 800 m/s, come è emerso dagli studi geofisici di microzonazione sismica effettuati nei Comuni più danneggiati dal sisma emiliano del 2012, e come confermerebbero anche i risultati di moderata amplificazione spettrale ottenuti dalle registrazioni HVSR nel territorio studiato.

Sebbene le registrazioni tromografiche riscontrino una lieve variabilità del massimo spettrale (F_0), come descritto nel precedente paragrafo, le prove HVSR non rilevano chiare variazioni in termini di ampiezza H/V, che risultano, come già detto, sempre "basse" o appena "moderate" ($H/V < 2,2$), così come riscontrato nelle registrazioni HVSR eseguite nel resto del territorio comunale. La $V_{s_{30}}$ che caratterizza tutto il territorio studiato risulta, inoltre, sempre minore di 225 m/s.

Per queste motivazioni, si è ritenuto di considerare la risposta sismica locale del territorio studiato, nel suo complesso, omogenea.

Infine, essendo il territorio pressoché ovunque pianeggiante, con rilievi modesti, fino a 6–8 metri costituiti soprattutto da rilevati arginali e stradali, il valore del coefficiente di

amplificazione topografica S_t è stato assunto ovunque pari a 1.

In conclusione, utilizzando il parametro V_{s30} come richiesto dalle procedure semplificate per la stima dell'amplificazione in aree di pianura dell'Emilia-Romagna (DAL 112/2007, Allegato 2, v. abachi Pianura 1 e Pianura 2), si sono stimati i fattori di amplificazione riportati nella seguente tabella (per $T_R = 475$ anni e $\xi = 5\%$ e con P_{ga_0} di riferimento su suolo rigido $= 0,159g$):

V_{s30}	Macro contesto morfologico	FA	PGA	FA SI ($0,1s < T_0 < 0,5s$)	FA SI ($0,5s < T_0 < 1s$)
200	“Pianura 2” (alternanze di sabbie e peliti con spessori anche decametrici, talora con intercalazioni di ghiaie – di spessore anche decine di metri – con substrato profondo – > 100 m da p.c.)		1,5	1,8	2,5

5.3 L'analisi della liquefacibilità e dei cedimenti post-sisma dei sedimenti

5.3.1 Aspetti generali

L'analisi della liquefacibilità 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 della 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.

In condizioni di sisma, vi possono anche essere effetti di “riordino” dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi che possono coinvolgere sia i depositi granulari, sia i sedimenti fini poco coesivi. Nell'ultimo decennio, sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma, provocate da perdite di resistenza, anche nei sedimenti

fini (limi e argille a comportamento “non drenato”). Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” (Idriss & Boulanger, 2004 e 2008).

Fenomeni di liquefazione si sono chiaramente manifestati con gli eventi sismici emiliani del maggio 2012, tuttavia non si sono riscontrati i fenomeni più critici riconducibili a fluidificazione (con perdita della capacità portante del terreno dei sedimenti al di sotto delle costruzioni) e neppure scorrimenti significativi nelle scarpate degli argini; anche i cedimenti rilevati degli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni¹⁸. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

5.3.2 Analisi delle condizioni locali di suscettibilità alla liquefazione

Sulla base delle esperienze scientifiche maturate anche in Emilia-Romagna, il presente studio, ha consentito un approfondimento relativamente alle condizioni di suscettibilità alla liquefazione dei sedimenti. In particolare, ci si è basati sui dati di sottosuolo desunti dalle prove geognostiche disponibili (sondaggi e prove penetrometriche) e per questo motivo gli accertamenti risultano più accurati soprattutto nelle zone urbane dove, per ovvi motivi, si concentrano le indagini geognostiche.

Occorre precisare che si è potuto disporre di pochi dati direttamente ricavati da sondaggi (fusi granulometrici; limiti si Atterberg; prove di taglio; ecc.); per questo motivo, ci si è basati soprattutto sull'interpretazione delle indagini penetrometriche: grafici delle resistenze e dati numerici. In particolare, si sono utilizzati i dati numerici di 16 prove CPTU di repertorio e di ulteriori 8 prove integrative CPTU, eseguite per questo lavoro.

I dati numerici delle prove CPTU hanno consentito una migliore interpretazione degli intervalli tessiturali potenzialmente liquefacibili, rispetto alla sola analisi dei diagrammi plottati su cartaceo. I dati numerici, infatti, consentono un'analisi della suscettibilità basata anche sulla classificazione di comportamento dei sedimenti proposta da P.K. Robertson (1990; 2009): in questo senso, la figura 5.20 mostra gli esiti di due prove CPTU rappresentative della zona Capoluogo¹⁹.

Le zone A1 e A2 evidenziate nel diagramma, corrispondono ai sedimenti di bassa coesione, attribuibili a comportamento granulare e suscettibili di liquefazione ciclica; in particolare, i sedimenti che ricadono nella zona A2 risultano più suscettibili a perdite anche significative di resistenza in caso di sisma. Le Zone B e C ($I_c > 2,6$) corrispondono invece ai terreni coesivi a comportamento argilloso ed entrambi sensibili a “cyclic softening” (Boulanger & Idriss, 2004); in particolare, anche i sedimenti fini che ricadono nella zona C possono risultare suscettibili a

¹⁸ Fonte: "Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012", C. Crespellani et Al., 2012.

¹⁹ Identificabili nell'archivio delle indagini geognostiche con le sigle P23CPTU100 e P7CPTU13

liquefazione ciclica e a perdite significative delle caratteristiche di resistenza in funzione della plasticità, sensibilità e resistenza di taglio intrinseca. Come si evince dalla figura 5.20, le prove rappresentano due casi differenti riscontrabili nel territorio studiato e cioè:

- sedimenti granulari e/o poco coesivi attribuibili alle zone A2 e A1 (questi ultimi prevalenti);
- sedimenti fini attribuibili prevalentemente alla zona B e in minor misura alla zona C; si riscontrano livelli classificabili come depositi organici (caratterizzati anche da basse resistenze di punta).

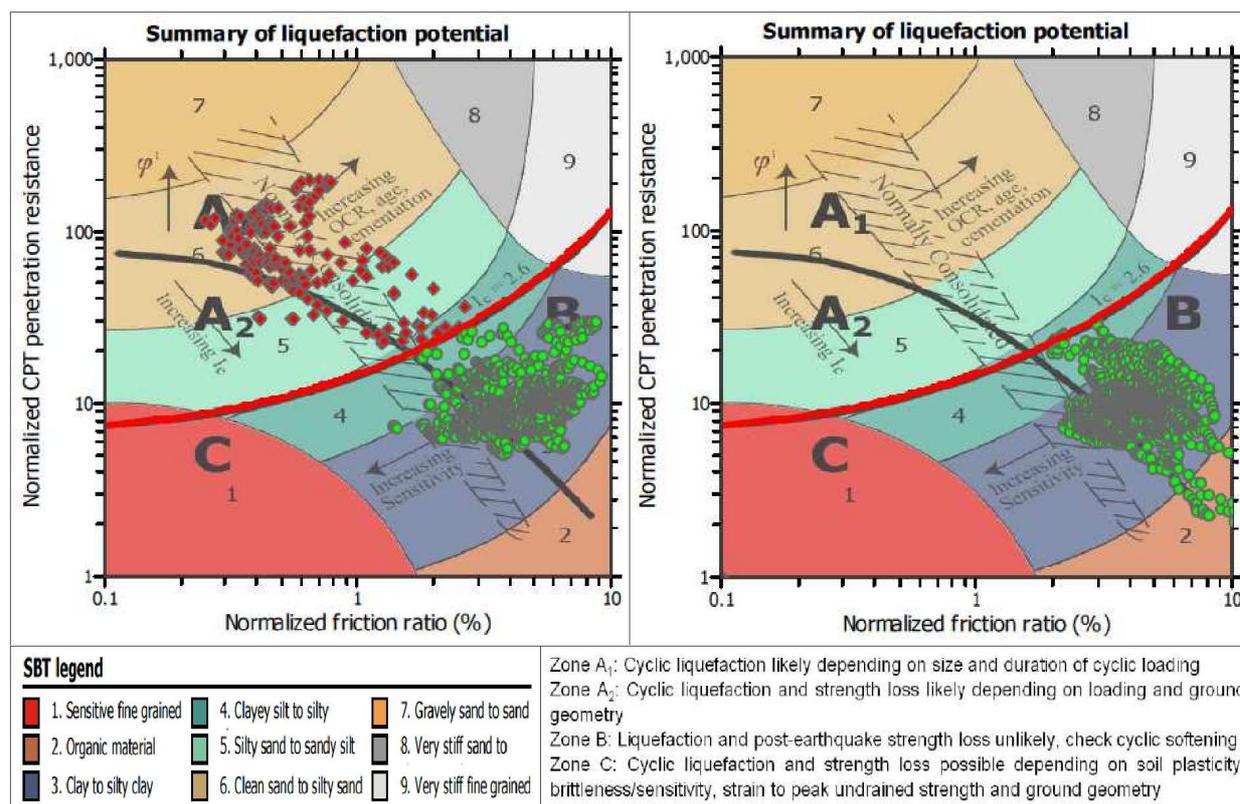


Figura 5.20 - Plottaggio degli esiti penetrometrici sulla Carta della classificazione di P.K. Robertson (1990; 2009).

Ciò detto, prendendo come riferimento gli esiti delle CPTU numeriche, anche le prove penetrometriche delle quali si è potuto disporre dei soli diagrammi delle resistenze in formato cartaceo, sono state interpretate per individuare intervalli potenzialmente liquefacibili. Si è così potuto disporre di 108 punti di controllo che raggiungono almeno 10 metri di profondità²⁰.

Si è poi deciso di discriminare due differenti intervalli (layer) di verifica, rispettivamente fino a 0÷10 metri e 10÷20 metri. Ciò ha permesso di “pesare” maggiormente le prove che riscontrano livelli potenzialmente liquefacibili nei primi 10 metri, intervallo generalmente ritenuto più suscettibile agli effetti di liquefazione, con maggiori evidenze in termini di manifestazioni superficiali (condizioni free-field) e in termini di interazione con eventuali fondazioni dirette di manufatti.

Si sono infine classificate le prove (figure 5.21 e 5.22), prendendo come riferimento la

²⁰ Solo due prove si riferiscono a profondità poco oltre -9 metri.

procedura già adottata dal SGSS regionale per gli studi di microzonazione sismica²¹ nei Comuni maggiormente danneggiati dagli eventi sismici del maggio e giugno 2012. Il controllo delle indagini ha dunque permesso di distinguere le seguenti classi:

PROFONDITA'	CLASSI SUSCETTIBILITA'
LAYER 0÷10 metri	L1 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >40 cm sotto falda e nei primi 5 metri
	L2 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >100 cm tra 5 e 10 metri
	L1+ L2
LAYER 10÷20 metri	L3 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 10 e 15 metri
	L4 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 15 e 20 metri

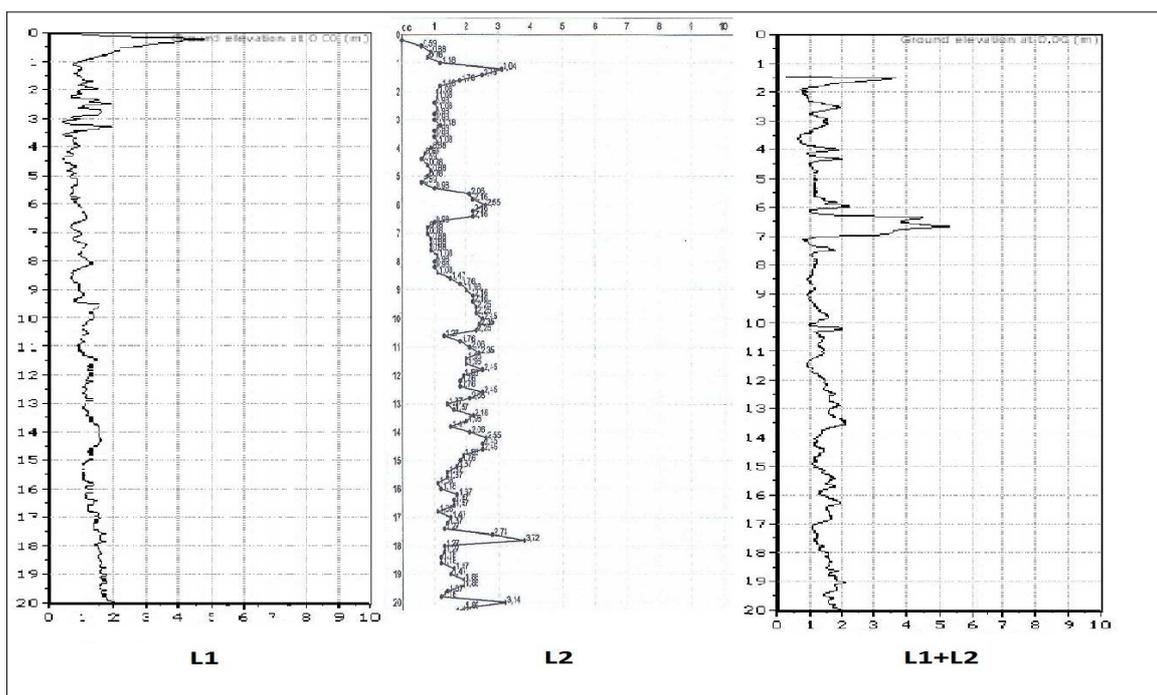
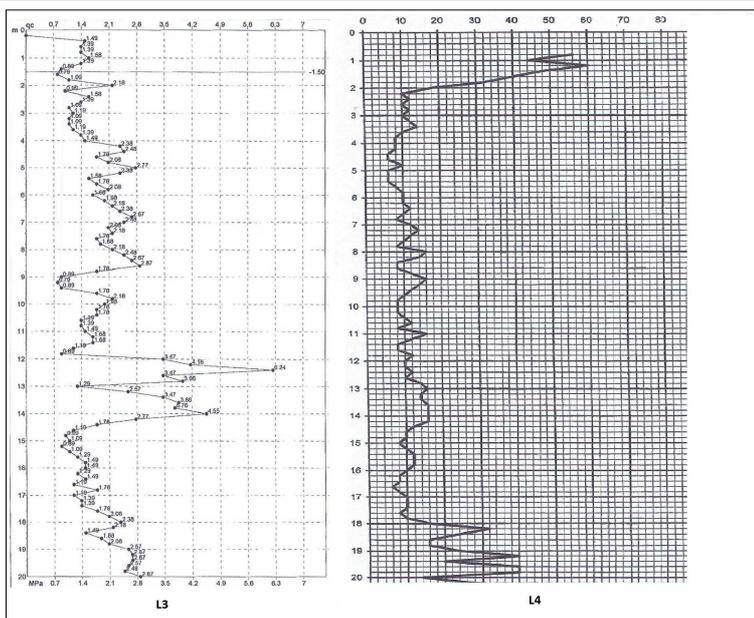


Figura 5.21 – Esempi di interpretazione di prove CPT e CPTU per l'identificazione di condizioni predisponenti la liquefazione (intervallo 0-10 m).

Figura 5.22 – Esempi di interpretazione di prove CPT e CPTU per l'identificazione di condizioni predisponenti la liquefazione (intervallo 10-20 m).



²¹ Vedi tavole MOPS elaborate per i Comuni ai sensi dell'Ordinanza del Commissario delegato n. 70/2012).

Si evidenzia che 75 prove hanno raggiunto la profondità di -15 metri e di queste 58 prove hanno raggiunto o superato i -20 metri di profondità. È dunque chiaro che le interpretazioni relative al layer più profondo sono inficiate da maggiori incertezze.

Occorre anche rammentare che i dati idrogeologici locali (vedi capitolo 3) indicano una soggiacenza media della falda che nel territorio comunale è compresa tra 2,5 metri e 3,5 metri. La soggiacenza piuttosto modesta che caratterizza tutta l'area di studio, è chiaramente riconosciuta come una delle condizioni predisponenti fondamentali per la liquefacibilità dei sedimenti.

Le figure 5.23 e 5.24 riportano una sintesi della classificazione dei punti di controllo dell'intero territorio comunale relativamente ai due intervalli considerati, con un maggior dettaglio per l'area Capoluogo. In sintesi, il controllo ha evidenziato:

- per quanto riguarda l'intervallo di sottosuolo fino alla profondità di -10 metri, le indagini raccolte e gli esiti delle prove CPTU eseguite per questo studio rilevano una modesta presenza di livelli granulari (limi sabbiosi e sabbie per lo più fini) nei primi 5 metri, soprattutto concentrati nella porzione SO del Capoluogo, mentre risultano più frequenti e di maggior spessore tra -5 e -10 metri: si tratta di paleoalvei abbandonati forse riconducibili a “rotte” del Fiume Panaro. È stato possibile delimitare una fascia di inviluppo dei paleoalvei rilevabili dalle indagini puntuali, come riportato nella figura 5.23.

La porzione est del Capoluogo, risulta complessivamente caratterizzata da sedimenti fini ritenuti non liquefacibili. Le indagini penetrometriche, inoltre, hanno localmente riscontrato alcuni significativi intervalli di sedimenti caratterizzati da mediocri esiti di resistenze alla punta, interpretabili come livelli torbosi e/o argille scarsamente consistenti (si rimanda anche alla descrizione del modello di sottosuolo meno profondo, in conclusione al paragrafo 5.1).

- per quanto riguarda l'intervallo più profondo considerato (tra -10 e -20 metri), le indagini rilevano intervalli ritenuti liquefacibili generalmente di spessore poco significativo in tutto il territorio. Si evidenziano, peraltro, alcuni livelli granulari di spessore metrico in alcune prove situate nella porzione est del Capoluogo.

Il controllo ha consentito di elaborare una zonizzazione del territorio in termini di “attenzione per liquefazioni”, coerente con gli standard di rappresentazione richiesti per gli studi di microzonazione sismica (v.3.0). La densità di punti di controllo nell'area Capoluogo, in particolare di prove CPTU, ha permesso di rivedere per questa parte di territorio i limiti della zonizzazione di liquefacibilità elaborata alla scala provinciale per il PTCP di Bologna (“Tavola 2C – Rischio Sismico”, vedi capitolo 3, par. 2.3.2), che già si basava sulle informazioni di sottosuolo relative ai primi metri di profondità. Si tratta di una revisione parziale dei limiti, in quanto lo studio del PTCP già indicava per la parte orientale del territorio comunale di Sant'Agata Bolognese la potenziale liquefacibilità dei sedimenti. La presenza di paleoalvei sabbiosi riscontrati nei primi 10 metri di sottosuolo nella zona ovest del Capoluogo (delimitati dalla fascia di inviluppo riportata nelle figura 5.23) rafforza, pertanto, il contesto preliminare di pericolosità già noto.

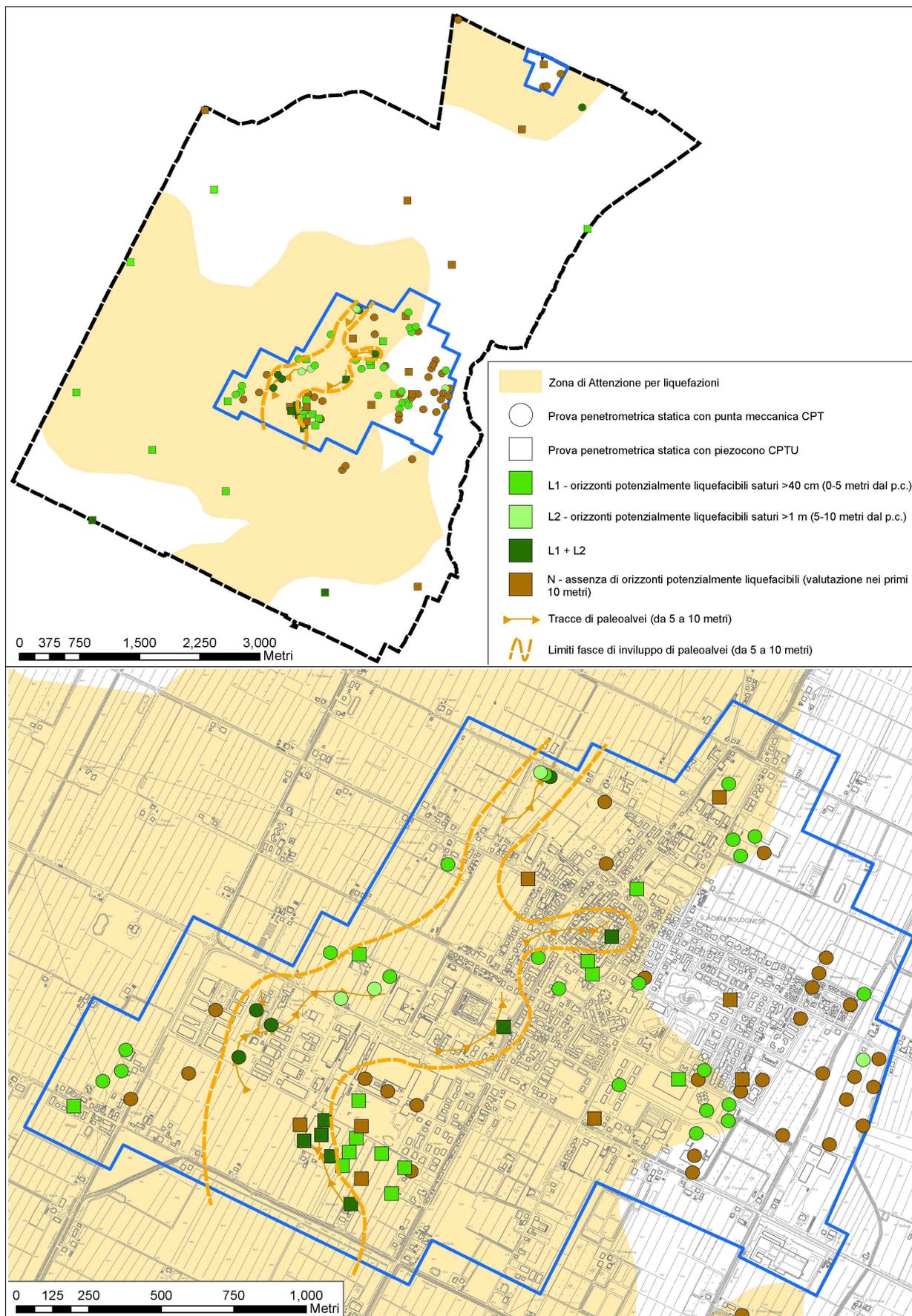


Figura 5.23 - Classificazione dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefabilità (sottosuolo fino a 10 metri di profondità), con ulteriore dettaglio dell'area Capoluogo.

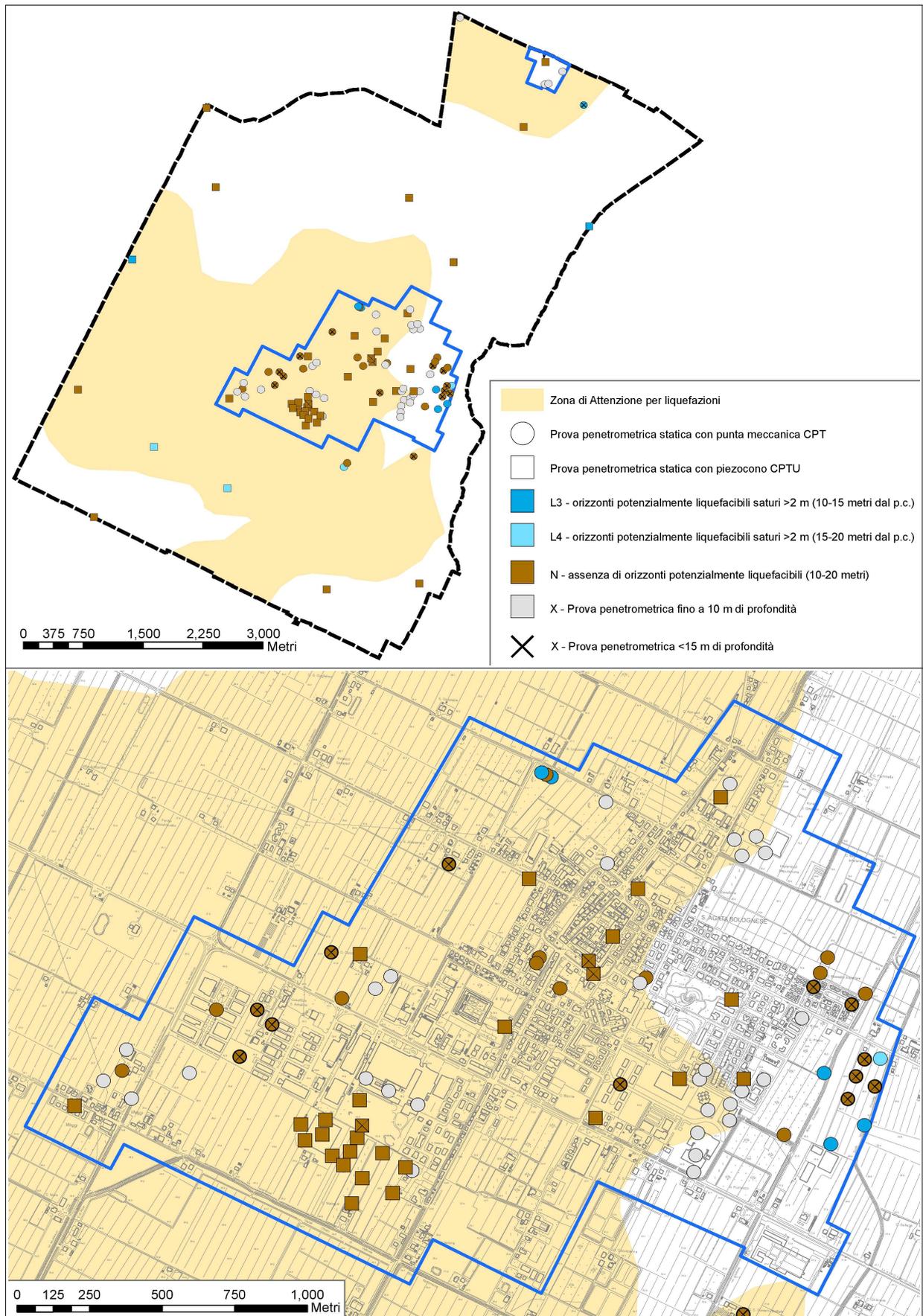


Figura 5.24 - Classificazione dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefacibilità (sottosuolo da -10 metri a -20 metri di profondità), con ulteriore dettaglio dell'area Capoluogo.

Si rammenta, inoltre, che la tavola 2C del PTCP già escludeva dalla liquefacibilità la porzione orientale del territorio comunale. Un'ulteriore variante rispetto alla cartografia del PTCP riguarda l'area urbana della frazione di Crocetta: in questo caso, le indagini disponibili consentono di escludere la possibilità di liquefazione (almeno nei primi 10 metri), per l'assenza di livelli granulari. A supporto di questa valutazione, si segnala che anche lo studio di microzonazione sismica del limitrofo Comune di Crevalcore (espletata come già scritto dal SGSS regionale), ha classificato la porzione di territorio amministrativo al confine con Crocetta come zona in cui sono presenti orizzonti liquefacibili significativi solamente tra -10 m e -20 m, con Indici di Potenziale Liquefazione piuttosto contenuti ($IL < 2$). L'indagine SCPTU eseguita per questo lavoro a Crocetta non ha attraversato livelli sabbiosi fino a 20 metri di profondità.

Ai fini dell'elaborazione della cartografia MOPS, occorre evidenziare che per la delimitazione della zona di "attenzione per liquefazioni" ci si è riferiti all'intervallo di sottosuolo fino a -10 metri, ritenuto come già scritto il più critico per le conseguenze legate alla possibile interazione con le fondazioni dirette della maggior parte delle abitazioni/o dei manufatti esistenti. Ciò ha consentito di delimitare anche le zone ove riscontrano livelli fini scarsamente consistenti (argille e/o livelli torbosi), potenzialmente soggetti a perdite di resistenza e a deformazioni volumetriche (cedimenti) se sottoposti a impulsi sismici, pertanto da sottoporre ad ulteriori verifiche.

5.3.3 Ulteriori valutazioni sul rischio di liquefazione

La possibilità di disporre di un buon numero di dati numerici di penetrometrie CPTU profonde almeno 20 metri ha permesso di calcolare, per tali prove, il Fattore di Sicurezza nei confronti della liquefazione (FSL) e la stima del parametro LPI (Liquefaction Potential Index), per offrire ulteriori elementi di valutazione del rischio di liquefazione anche alla scala territoriale, per comprovare le analisi di pericolosità precedentemente descritte e, infine, per motivare gli ulteriori approfondimenti sismici che, ineludibilmente, si dovranno effettuare sia alla scala territoriale e di pianificazione, sia alla scala di dettaglio e di progettazione.

Si è pertanto proceduto alla stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL), definito dalla seguente relazione:

$$\text{con: } FSL = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}$$

$CRR_{7.5}$ = resistenza alla liquefazione ciclica (Cyclic Resistance Ratio) dei sedimenti attraversati, ricavata dagli esiti CPT (a punta elettrica), per terremoti di $M = 7,5$. La procedura si fonda su equazioni che determinano i valori di CRR dei sedimenti attraversati utilizzando i valori di resistenza alla punta q_t , corretti per tenere conto delle tensioni litostatiche di confinamento, della differente classificazione dei sedimenti attraversati (contenuto di fine; plasticità; ecc.);

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

$$CSR = 0.65 \cdot \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} \right) \cdot r_d$$

K_σ = Fattore di correzione per la pressione di confinamento (Overburden Correction Factor);

MSF = Fattore di Scala della Magnitudo (Magnitude Scale Factor) da applicare per sismi con magnitudo diverse da 7,5.

Il valore di FSL è stato determinato mediante calcolo automatico con il noto software “Cliq”, sviluppato dalla GeoLogismiki Geotechnical Engineers, che consente di utilizzare differenti metodi di stima di FSL.

Per questo lavoro, si sono considerati i seguenti metodi di calcolo di FSL, tutti di lunga sperimentazione e di ampia diffusione nel campo ingeneristico:

1. procedura NCEER²² (1996; 1998; 2001)

(Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R., and Stokoe, K.H. – *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*

(G. Zhang, P.K. Robertson, and R.W.I. Brachman – *Estimating Liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground, 2001*)

2. procedura di Idriss & Boulanger (2008)

(I. M. Idriss and R.W. Boulanger – *Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland*)

3. procedura di P. K. Robertson (2009)

(P.K. Robertson – *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, 2009*)

Per la descrizione dettagliata dei metodi si rimanda ai diagrammi di flusso allegati in calce alla relazione e alla letteratura scientifica originaria. Si rammenta che tali approcci differiscono nel calcolo dei parametri di MSF, $CRR_{7.5}$, K_σ e r_d e che i metodi di P.K. Robertson (2009) e di Idriss & Boulanger (2008) sono validi per tutti i tipi di sedimenti e considerano anche la possibilità di “cyclic softening” nei sedimenti fini poco coesivi. Gli esiti sono inoltre condizionati da altre grandezze, tra queste, il contenuto in fini FC che introduce significative correzioni alla resistenza penetrometrica normalizzata. Per questo lavoro, FC viene stimato sulla base dei metodi di riferimento e in funzione dell'indice di comportamento I_c ricavato dalla classificazione dei terreni di P.K. Robertson (1990).

Per giungere ad un calcolo speditivo di FSL si sono adottate le seguenti condizioni di input:

- si è utilizzata la a_{\max} al suolo ricavata dalla RSL semplificata e cioè ($a_{\max} = 1,159 \cdot 1,5 = 0,24g$);
- sulla base del contesto idrogeologico locale (vedi capitolo 3), si è considerata una soggiacenza (molto cautelativa) della falda in condizioni di sisma pari a 1 metro;

²² National Center for Earthquake Engineering Research (USA)

- riferendoci alla pericolosità sismica di base, si è considerata una magnitudo di input pari a $M_w = 6,14$ come da zonizzazione macrosismica “ZS9” (vedi capitolo 2, paragrafo 2.1). Il coefficiente correttivo MSF utilizzato è quello di riferimento per i metodi di calcolo utilizzati.

L'Indice di Potenziale Liquefazione LPI (Liquefaction Potential Index) di Iwasaki et al. (1982) è stato calcolato per una profondità “critica” fino a 20 metri di profondità ed è definito nel seguente modo:

$$LPI = \int_0^{20} F_1 W(z) dz$$

[con: $W(z)$ fattore di peso della profondità $= 10^{-0.5z}$; F_1 variabile $= 1 - FSL$ (per $FSL < 1.0$) oppure $F_1 = 0$ per $FSL > 1.0$; z = profondità dello strato considerato].

Il calcolo fornisce un valore numerico compreso tra 0 e 100 e quantifica i possibili effetti della liquefazione secondo classi di rischio, tenendo conto della severità dell'azione sismica, della profondità, dello spessore e del valore di FSL degli strati liquefacibili.

Le simulazioni sono state eseguite sia per le prove CPTU di repertorio (con dati numerici disponibili), sia per le prove CPTU integrative ed eseguite nelle aree urbane/urbanizzabili oggetto dei principali approfondimenti dello studio. Da queste prime simulazioni non emergerebbero, nel territorio di Sant'Agata Bolognese, situazioni di rischio di liquefazione particolarmente significative, almeno alla scala territoriale. Gli esiti più significativi, sono ricavati in alcuni punti di controllo ove si sono calcolati valori di $LPI \cong 4$ (corrispondente a rischio di liquefazione “moderato”), per la presenza di intervalli liquefacibili (con $FSL < 1$) in corrispondenza dei paleoalvei sepolti limoso sabbiosi già descritti nel precedente paragrafo. Si è inoltre riscontrata la possibilità di liquefazione in alcuni intervalli fini (argille e/o torbe di scarsa consistenza). In tutti i casi, il principale contributo all'esito più elevato di LPI è legato ai livelli liquefacibili rilevati nell'intervallo fino a circa 6÷7 metri di profondità (figura 5.25).

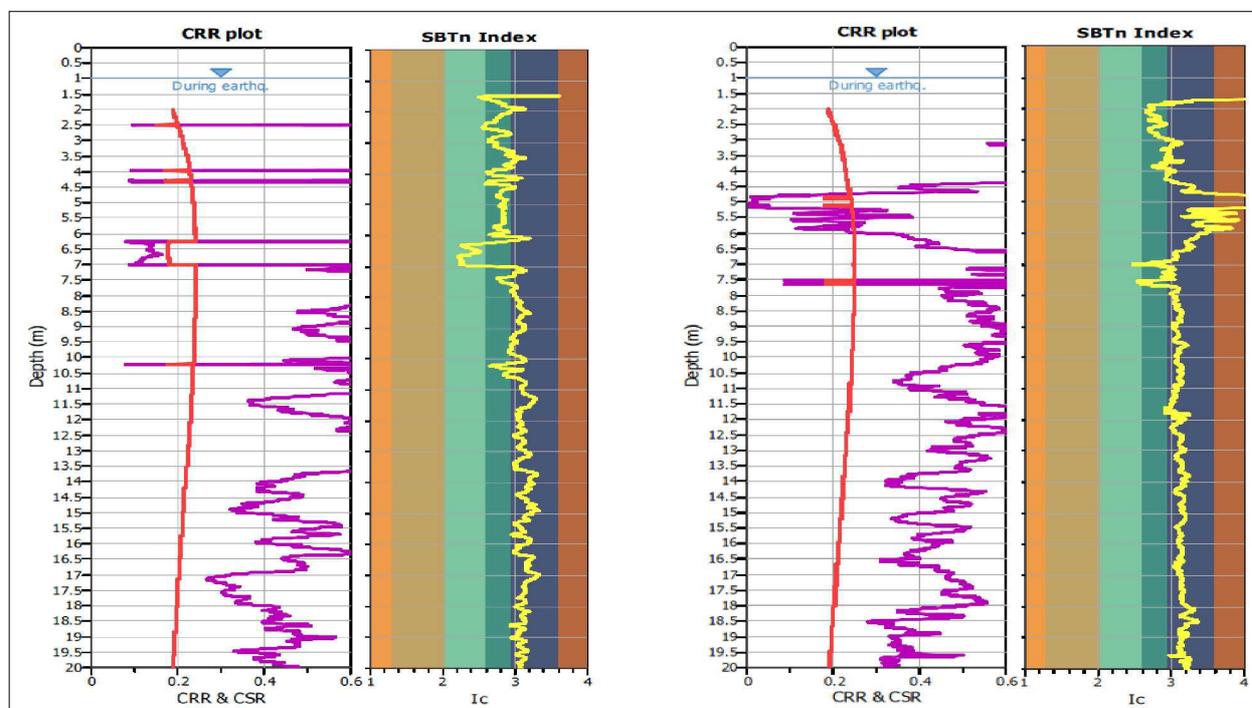


Figura 5.25 – Esempi rappresentativi delle verifiche di FSL secondo l'approccio di Idriss & Boulanger (2008). A sinistra, la prova “P5CPTU9” evidenzia un orizzonte limoso sabbioso liquefacibile; a destra, la prova P7CPTU13 evidenzia un livello argilloso probabilmente organico anch'esso liquefacibile (per: $M = 6.14$; $a_{max} = 0,24g$; falda $= -1$ m).

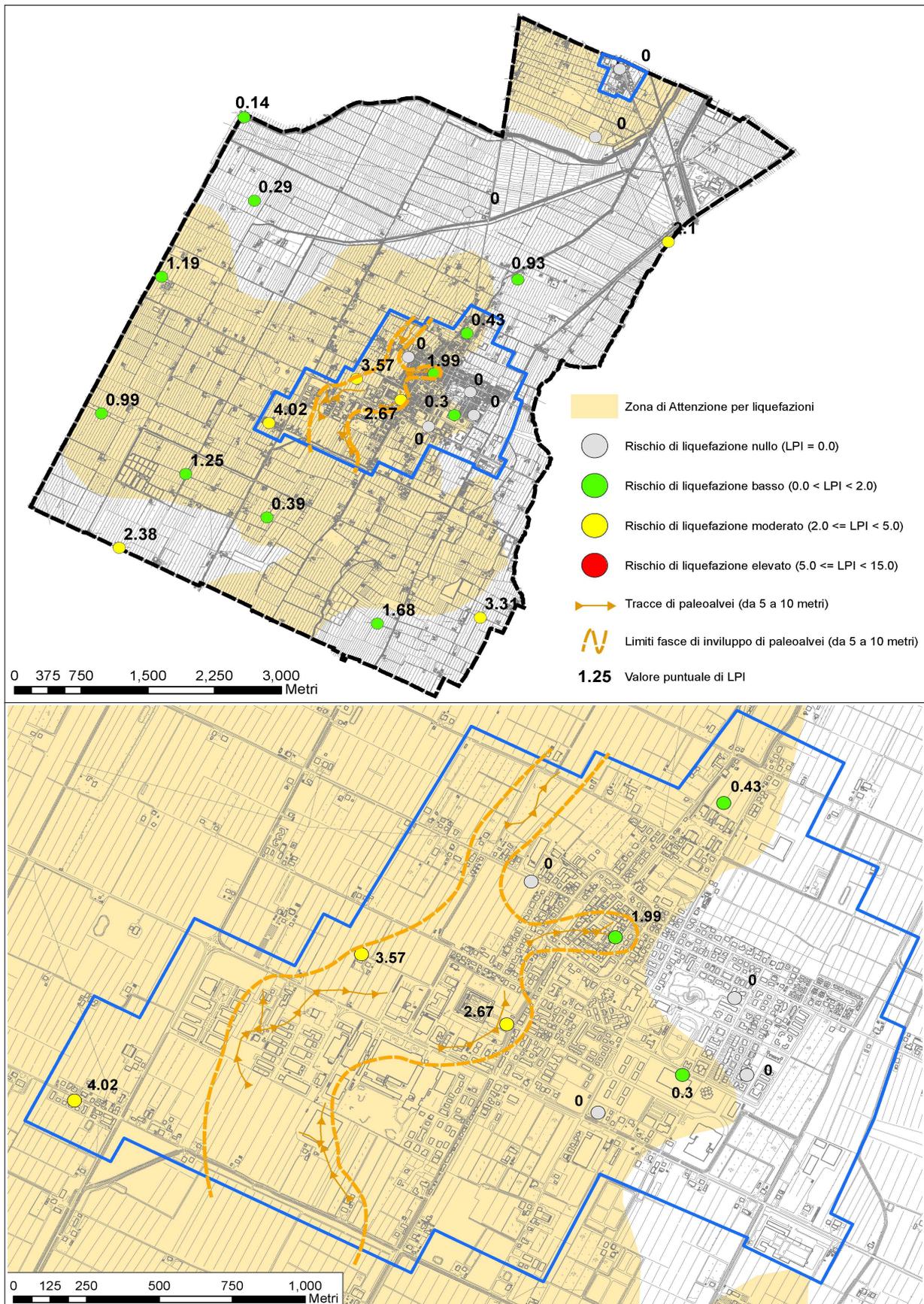


Figura 5.26 - Punti di controllo dell'Indice di Potenziale Liquefazione LPI (prove CPTU), con ulteriore dettaglio dell'area Capoluogo. La figura riporta l'esito più cautelativo ricavato dalla stima di FSL secondo i metodi NCEER 1998/2001, Idriss & Boulanger 2008 e Robertson 2009 (per: $M = 6.14$; $a_{max} = 0,24g$; falda $= -1$ m).

La figura 5.26 riporta i punti ove si è calcolato il valore di LPI (si riporta l'esito più cautelativo) rispetto alle zone di “attenzione per liquefazione” definite dal presente studio e riportate nella cartografia MOPS.

5.4 Conclusioni e commenti

Lo studio di microzonazione sismica si è basato su una preliminare cernita delle prove di repertorio, per escludere quelle eseguite con attrezzature fuori standard oppure con esiti inutilizzabili o non interpretabili; altre prove sono risultate troppo superficiali per poter essere utilmente considerate per gli scopi del presente lavoro. Si è potuto comunque disporre di un buon numero di indagini (vedi capitolo 4) che, integrate con le prove eseguite per questo lavoro (penetrometrie CPTU; “Cono Sismico”; MASW/ReMi e registrazioni HVSR) hanno consentito di ottenere una sufficiente “copertura” conoscitiva, in particolare delle aree urbane/urbanizzabili del territorio comunale.

Per quanto riguarda la risposta sismica locale (RSL), i dati disponibili hanno permesso la modellazione esaustiva del sottosuolo secondo i criteri semplificati (approfondimento di “secondo livello”, come riportato nel paragrafo 5.2), malgrado incertezze che appaiono comunque accettabili in funzione del grado di approfondimento che si è inteso espletare.

Lo studio ha inoltre consentito di far emergere alcuni aspetti di risposta sismica locale che possono giustificare ulteriori approfondimenti. In questo senso, risulterebbero molto utili, ai Professionisti che si occupano di analisi di RSL di dettaglio, avere più certezze riguardo la definizione del bedrock sismico e dello spessore di sedimenti sovrastanti, in grado di amplificare il segnale sismico (profondità/spessori; caratteristiche sismostratigrafiche; parametri dinamici; eventuali eterogeneità laterali). Si rammenta come i dati disponibili convergano a individuare spessori amplificabili complessivamente maggiori di 100 metri (vedi paragrafi 5.1 e 5.2), sebbene nel territorio studiato non si dispongano nemmeno di sufficienti dati di V_s e/o rigidità. Allo stato di fatto, il più significativo contributo all'amplificazione sismica sembrerebbe determinato da spessori granulari (riflettori sismici) individuabili tra la base del subsistema alluvionale AES6 e il tetto del Sistema Emiliano Romagnolo Inferiore (AEI) di età Pleistocene medio e che, per caratteristiche sismostratigrafiche, appaiono ascrivibili a “pseudobedrock” sismico. Ulteriori dati sismostratigrafici profondi potrebbero chiarire l'effettiva profondità del “pseudobedrock” e levare dubbi riguardo al fatto che l'amplificazione locale sia principalmente indotta da spessori di alluvioni meno potenti, cioè che il presumibile “pseudobedrock” sia collocato addirittura a minori profondità e, presumibilmente, nell'intervallo alluvionale AES6.

Si ritiene importante poter verificare, con opportuni dati e modellazioni, gli “effetti” delle eterogeneità di frequenza fondamentale (F_0) emerse con le registrazioni HVSR: allo stato di fatto, sono interpretate come blande deformazioni plicative che coinvolgono i depositi alluvionali pleistocenici del “pseudobedrock” sismico (vedi paragrafo 5.2.1).

Per quanto riguarda la liquefacibilità dei sedimenti, l'analisi delle indagini di repertorio (in particolare le prove CPTU), e l'esecuzione delle ulteriori penetrometrie CPTU hanno evidenziato la presenza di livelli potenzialmente instabili in caso di sisma. I punti di controllo hanno consentito di aggiornare il limite delle aree ritenute più critiche per la presenza di orizzonti granulari e/o poco coesivi (primi 10 metri). In particolare, si sono anche riscontrati livelli di sedimenti fini scarsamente consistenti, probabilmente organici che, in alcune aree, presentano una discreta continuità laterale soprattutto a profondità di circa 4÷5 metri: tali livelli hanno evidenziato la possibilità di “cyclic softening”.

Peraltro, tutti gli esiti di liquefazione ricavati dalle prime simulazioni numeriche di verifica (vedi paragrafo 5.3) riscontrano un complessivo rischio di liquefazione, variabile da “basso” a “moderato”. Lo studio ha comunque evidenziato la necessità di espletare ulteriori approfondimenti per verificare le effettive condizioni di suscettibilità a liquefazione e l'analisi dei possibili cedimenti post sisma. Gli approfondimenti potranno essere svolti effettuando specifiche indagini di laboratorio (es.: prove triassiali cicliche; prove di taglio dinamiche) in campioni di sedimenti prelevati negli intervalli che risulteranno più critici (granulari e fini poco coesivi e consistenti).

Si ritiene, infine, che per il contesto litostratigrafico che caratterizza il territorio comunale, sia ineludibile prevedere, anche nelle usuali indagini geotecniche, prove penetrometriche di tipo elettrico e possibilmente con piezocono (CPTU), in grado di fornire una migliore definizione tessiturale e meccanica degli intervalli che possono risultare critici per la stabilità anche in condizioni sismiche, a costi ancora piuttosto contenuti. Gli esiti delle indagini CPTU, consentiranno di valutare la necessità o meno di ulteriori e più raffinati approfondimenti, con prove di laboratorio di campioni prelevati negli orizzonti più critici.

Per ulteriori considerazioni sui dati geotecnici e geofisici, sulle interpretazioni derivate, si rimanda alla lettura del capitolo 5.

6 ELABORATI CARTOGRAFICI

6.1 Carta delle Indagini

Lo studio di microzonazione ha 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 realizzate per questo lavoro.

Per l'intero territorio comunale, si è elaborata la <<Carta delle indagini>> alla scala 1:5.000, che localizza tutte le indagini di riferimento per lo studio di microzonazione sismica di Sant'Agata Bolognese. La cartografia identifica il tipo di prova (figura 6.1) con la simbologia riportata negli <<Standard di rappresentazione e archiviazione informatica v.3.0>> (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, ottobre 2013).

La cartografia riporta sia le prove di repertorio, sia le nuove indagini puntuali e lineari eseguite per questo lavoro, in particolare indica il sito oggetto delle indagini.

Legenda	
	Sondaggio a carotaggio continuo
	Sondaggio da cui sono stati prelevati campioni
	Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
	Prova penetrometrica statica con piezocono
	Prova REfractionMicrotremors
	Prova penetrometrica con cono sismico
	Stazione microtremore a stazione singola
	Array sismico, ESAC/SPAC
	MASW

Figura 6.1 – Stralcio della legenda della “Carta delle Indagini” elaborata per lo studio di microzonazione di Sant'Agata Bolognese.

6.2 Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica

La <<Carta geologico-tecnica>> elaborata per lo studio di microzonazione alla scala 1:5.000, costituisce una revisione delle cartografie geologiche e geomorfologiche esistenti e in particolare della Carta Geologica dell'Emilia-Romagna in scala 1:10.000 (realizzata, come già scritto, dal Servizio geologico Sismico e dei Suoli della RER). Tale revisione si è basata sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche analizzate (di repertorio ed ex novo) e sugli ulteriori rilevamenti di controllo espletati per aree di studio.

In particolare, lo studio ha consentito il 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. Sulla base di queste informazioni, si è potuto elaborare una classificazione dei punti di controllo per giungere ad una zonizzazione geotecnica, ai fini della microzonazione sismica, dei sedimenti di copertura e sulla base dei seguenti criteri:

- classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.3.0);
- si è considerata la prevalenza tessiturale nella “colonna” di sedimenti rispettivamente profonda fino a –6 metri;
- nelle attribuzioni tessiturali da prove penetrometriche, si è escluso lo spessore di sedimenti soprafalda e cioè più superficiale (sovracconsolidato per essiccamento).

Gli esiti (discussi nel paragrafo 5.1.2) sono tali da includere tutti gli intervalli campionati nelle due classi USCS/AGI denominate “CL” e “ML”.



La figura 6.2 riporta lo stralcio della relativa legenda che include:

- forme sepolte riconducibili a depositi di paleoalvei distali attribuibili a “rotte” del Fiume Panaro (attraversati a profondità comprese tra –5 e –10 metri dl p.c.);
- Tracce delle sezioni geologiche che sono risultate di riferimento per questo lavoro, ovvero le due sezioni (nominate 1–1' a 2–2') e fondamentale supporto per la modellazione geotecnica;
- la localizzazione delle terebrazioni che hanno raggiunto o meno il bedrock sismico (nell'area di studio sono risultate disponibili allo Scrivente solamente indagini dirette che

non hanno raggiunto il bedrock sismico);

- la localizzazione dei pozzi freatici, con indicata la relativa soggiacenza (in metri) della falda.

6.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni

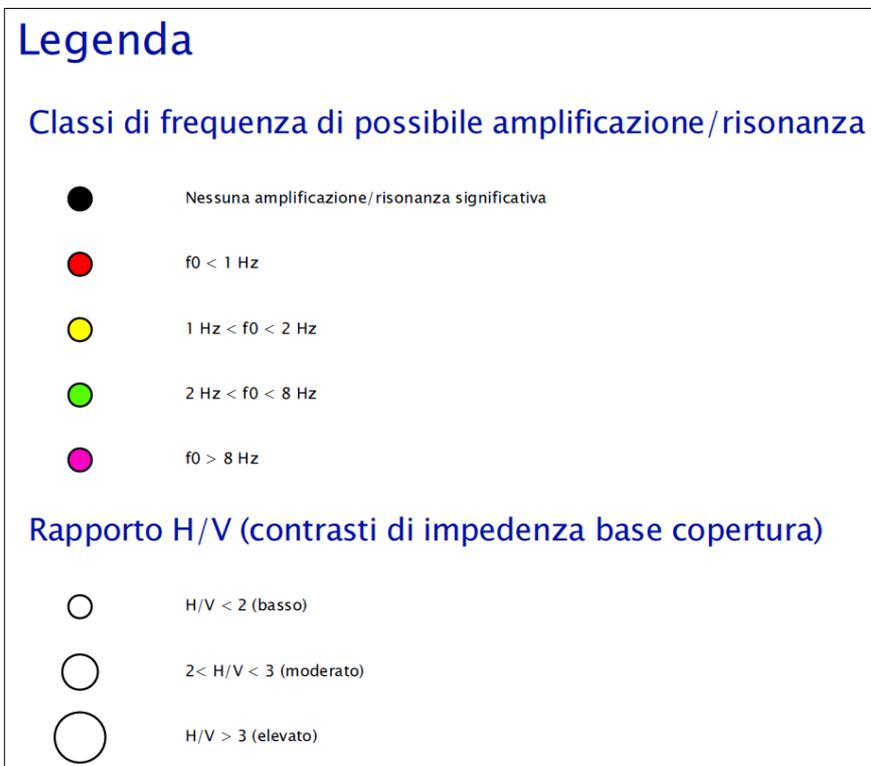
La <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>>, elaborata alla scala 1:10.000, localizza tutti i punti di misura dei microtremori sismici registrati a stazione singola (con tecnica HVSR). Ad ogni punto, nella cartografia viene indicato il valore stimato di F_0 (valore del “picco” più significativo a più bassa frequenza, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale).

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

- registrazioni senza amplificazioni significative (traccia spettrale H/V priva di picchi);
- registrazioni con $f_0 < 1$ hz (indica la presenza di riflettori sismici molto profondi e possibilità di risonanza, in caso di sisma, per edifici/manufatti molto elevati (oltre 10 piani);
- registrazioni con $1 < f_0 < 2$ hz
- registrazioni con $2 < f_0 < 8$ hz
- registrazioni con $f_0 > 8$ hz (possibilità di risonanza per edifici/manufatti di modesta altezza – certamente inferiore a due piani – che rappresentano la tipologia di abitazione più diffusa)

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 minori di 2 (basso), compresi da 2 e 3 (moderato), maggiori di 3 (elevato).

Figura 6.3 - Stralcio della legenda della <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>> elaborata per lo studio di microzonazione sismica di Sant'Agata Bolognese.



La figura 6.3 riporta uno stralcio della legenda elaborata per la rappresentazione cartografica, mentre gli esiti vengono richiamati nei paragrafi 5.1.1 e discussi più in dettaglio nel paragrafo 5.2.1.

6.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)

La <<carta delle aree suscettibili di effetti locali”, elaborata alla scala 1:5.000, riporta tutte le aree in cui si ritiene necessario effettuare indagini e analisi di Microzonazione sismica e i livelli di approfondimento ritenuti necessari per le aree richieste Sant'Agata Bolognese. In questo senso, la cartografia delle MOPS ha distinto e classificato le aree studiate in “zone stabili suscettibili di amplificazione” (ove è sufficiente un approfondimento sismico di secondo livello) e in “zone di attenzione per instabilità” (ove si ritengono opportuni ulteriori approfondimenti sismici di terzo livello).

6.4.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Nelle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, sono attese amplificazioni del moto sismico come effetto dell'assetto litostratigrafico e morfologico locale. Queste zone sono state distinte cartograficamente con numero arabo progressivo, mentre nello shape numerico vengono riportate con sigla numerica a quattro cifre, secondo le disposizioni di standard di rappresentazione e archiviazione informatica (formato numerico: “20xy”). In conclusione, si sono distinte le seguenti zone:

ZONA 1 ≡ Coperture alluvionali recenti (AES8) di “Pianura 2” con pseudobedrock sismico a profondità maggiore di 100–120 metri. Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: argille inorganiche di media-massa plasticità, argille limose e argille sabbiose

si tratta di sedimenti alluvionali sub-affioranti recenti a tessiture prevalentemente fini (come desunto dalla caratterizzazione geotecnica), sovrapposti a potenti sequenze, sempre di facies deposizionale alluvionale, ascrivibili al contesto di “Pianura 2” della DAL regionale n.112/2007 (vedi paragrafo 5.2.2). Gli spessori amplificabili risultano complessivamente maggiori di 100 metri (vedi paragrafi 5.1 e 5.2). Come meglio descritto nei precedenti paragrafi, il più significativo contributo all'amplificazione sismica è determinato da spessori granulari (riflettori sismici) individuabili tra la base del subsistema alluvionale AES6 e il tetto del Sistema Emiliano Romagnolo Inferiore (AEI) di età Pleistocene medio. Le indagini geofisiche disponibili (tomografie; prove MASW/ReMi; “Coni Sismici”; ESAC), consentono di stimare per tale zona una Vs30 sempre inferiore a 225 m/s. La morfologia è complessivamente piana

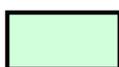
ZONA 2 ≡ Coperture alluvionali recenti (AES8) di “Pianura 2”, con pseudobedrock sismico a profondità maggiore di 100–120 metri. Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: limi inorganici, sabbie fini limose o argillose e limi argillosi a bassa plasticità

si tratta di sedimenti alluvionali sub-affioranti recenti, a tessiture prevalentemente fini (come desunto dalla caratterizzazione geotecnica), sovrapposti a potenti sequenze,

sempre di facies deposizionale alluvionale, ascrivibili al contesto di “Pianura 2” della DAL regionale n.112/2007 (vedi paragrafo 5.2.2). Gli spessori amplificabili risultano complessivamente maggiori di 100 metri (vedi paragrafi 5.1.1 e 5.2). Come meglio descritto nei precedenti paragrafi, il più significativo contributo all'amplificazione sismica è determinato da spessori granulari (riflettori sismici) individuabili tra la base del subsistema alluvionale AES6 e il tetto del Sistema Emiliano Romagnolo Inferiore (AEI) di età Pleistocene medio. Le indagini geofisiche disponibili (tomografie; prove MASW/ReMi), consentono di stimare per tale zona una Vs30 sempre inferiore a 225 m/s. La morfologia è complessivamente piana.

Legenda

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

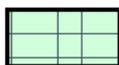


Zona 1 - Coperture alluvionali recenti (AES8) di PIANURA 2 (pseudobedrock sismico a profondità maggiore di 100-120 m). Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: argille inorganiche di medio-bassa plasticità, argille limose e argille sabbiose. Morfologia: piana.

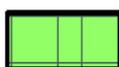


Zona 2 - Coperture alluvionali recenti (AES8) di PIANURA 2 (pseudobedrock sismico a profondità maggiore di 100-120 m). Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: limi inorganici, sabbie fini limose o argillose e limi argillosi di bassa plasticità. Morfologia: piana.

Zone di attenzione per instabilità



ZLQ1 - Zona di attenzione per liquefazione.
Tessiture prevalentemente fini nei primi 6 metri con presenza di livelli liquefacibili fino a 10 metri (da verificare).



ZLQ1 - Zona di attenzione per liquefazione.
Tessiture prevalentemente limoso-sabbiose nei primi 6 metri con presenza di livelli liquefacibili fino a 10 metri (da verificare).



Sovrapposizione di zone suscettibili di instabilità differenti: zona di attenzione per liquefazione e per cedimenti post-sisma.
Tessiture prevalentemente fini con livelli poco consistenti e probabilmente organici nei primi 6 metri e con presenza di livelli liquefacibili (>40 cm) fino a 10 metri (da verificare).

Forme di superficie e sepolte



Asse di paleoalveo (attraversato a profondità di 5-10 metri)

Punti di misura di rumore ambientale



Punto di misura di rumore ambientale con indicazione del valore di f0

Figura 6.4 - Stralcio della legenda della «Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica» elaborata per lo studio di microzonazione sismica di Sant'Agata Bolognese.

6.4.2 Zone di attenzione per instabilità

Oltre ai fenomeni di amplificazione stratigrafica locale, le zone di attenzione per instabilità individuate nel territorio di Sant'Agata Bolognese sono aree potenzialmente soggette a ulteriori criticità per liquefazione e/o per cedimenti post sisma. Si tratta di effetti cosismici che potrebbero interessare gli intervalli granulari e poco coesivi sub-affioranti, soprattutto i primi 10 metri di sottosuolo.

Le zone di attenzione per instabilità sono state distinte cartograficamente con retinatura (liquefazione), mentre le zone risultate più esplicitamente suscettibili anche di cedimenti post sisma sono state distinte con il relativo colore pieno²³, secondo le disposizioni di standard di rappresentazione e archiviazione informatica.

Per quanto detto, sono state perimetrare le seguenti zone, che dovranno necessariamente essere oggetto di ulteriori approfondimenti sismici di terzo livello:

ZLQ1 Zona di attenzione per liquefazione → per la presenza di intervalli granulari significativi in falda (vedi capitolo 5.3), rinvenuti soprattutto nell'intervallo compreso tra -6 metri e -10 metri dal p.c. (paleoalvei distali del fiume Panaro);

Sovrapposizione di zone suscettibili di instabilità differenti: zona di attenzione per liquefazione e per cedimenti post-sisma → comprendono le situazioni caratterizzate da orizzonti di sedimenti fini poco consistenti e probabilmente organici, riscontrati in alcune prove effettuate nel capoluogo. In particolare, queste zone discriminano parti del territorio ove le prove hanno evidenziato tali intervalli nei primi 6 metri di sottosuolo, cioè a profondità comprese nel “volume significativo” di sedimenti per gran parte degli edifici esistenti (vedi paragrafo 5.1.2).

La figura 6.4 riporta lo stralcio della relativa legenda. La cartografia include inoltre:

- forme sepolte riconducibili a depositi di paleoalvei distali attribuibili a “rotte” del Fiume Panaro (ataversi a profondità comprese tra -5 e -10 metri dl p.c.);
- Punti di misura del rumore sismico ambientale (registrazioni HVSR), con indicati i valori di f_0 evidenziati.

6.5 Carta delle velocità delle onde di taglio (Vs)

La <<Carta delle velocità delle onde di taglio S>>, è stata elaborata alla scala 1:10.000 e localizza tutti i punti di misura di Vs, con indicazione, per ogni punto di controllo, del valore della media armonica nei primi 30 metri della velocità delle onde sismiche di taglio ($V_{s_{30}}$). Tale parametro risulta di fondamentale importanza per la caratterizzazione della risposta sismica locale semplificata secondo i criteri della citata DAL regionale n. 112/2007 e secondo i criteri nazionali ICMS 2007.

Nel caso di Sant'Agata Bolognese, le Vs sono ricavate in modo diretto da prove penetrometriche con “Cono Sismico”, inoltre da prove ReMi, MASW e da array bidimensionale (ESAC eseguita nel

²³ Eascrivibili a <<sovrapposizione di zone suscettibili di instabilità differenti>>.

Capoluogo). La cartografia riporta per ognuna di esse (nell'etichetta creata per ogni singola prova di riferimento) la tipologia della prova e la stima della relativa V_{s30} .

Ulteriori informazioni relative alle tipologie d'indagine e agli esiti delle V_s misurate nelle aree di approfondimento, sono riportate nei capitoli 4 e 5, a cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

6.6 Carta di microzonazione sismica livello 2

La cartografia <<carta di microzonazione sismica livello 2>> è stata elaborata alla scala 1:5.000 e riporta le “zone stabili suscettibili di amplificazioni” e le “zone di attenzione per instabilità”.

6.6.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Sono individuate nella carta delle MOPS, con gli esiti dell'amplificazione tramite procedura semplificata (secondo livello). L'amplificazione è stata quantificata riferendosi agli Allegati della deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n.112 del 2 maggio 2007 (DAL 112/2007). Per tali aree, l'amplificazione è stata quantificata secondo i seguenti parametri FA riferiti alla superficie:

- FA_{PGA} → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido ($a_{max,r}$) e la massima ampiezza dell'accelerazione alla superficie del deposito ($a_{max,s}$) alla frequenza f . 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, è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità, nel nostro caso si sono determinati i fattori di amplificazione per i due intervalli di frequenze, rispettivamente da $0.1 < T_0 < 0.5$ s e da $0.5 < T_0 < 1$ s ($FA_{0,1-0,5s}$ e $FA_{0,1-0,5s}$).

I fattori di amplificazione sopra descritti, sono desunti dagli abachi riportati nella DAL 112/2007 (Allegato A2), riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

Dal punto di vista cartografico, sono state prodotte tre differenti carte: ognuna di esse riporta, per una migliore comprensione, un solo fattore di amplificazione e cioè FA_{PGA} , FA_{SI} per l'intervallo $0.1s < T_0 < 0.5s$ e FA_{SI} per l'intervallo $0.5s < T_0 < 1s$. Gli esiti dell'amplificazione, per ogni fattore, sono stati ordinati in classi crescenti secondo quanto richiesto dagli <<standard di rappresentazione e archiviazione informatica>> (v.3.0, ottobre 2013) che consentono di evidenziare con dovuta chiarezza quali aree risultano più critiche dal punto di vista della risposta sismica. Occorre precisare che, poiché i fattori di amplificazione di riferimento per la Regione Emilia-Romagna differiscono da quelli riportati dagli ICMS 2008, gli shapefile poligonali “Stab” (elaborati per l'archiviazione dei dati della microzonazione sismica), riportano i valori dei fattori di amplificazione considerati nei seguenti campi:

- nel campo previsto <<FH0105>> si è riportato il valore di $FA_{0,1-0,5s}$ valutato per tale poligono/microzona;
- nel campo previsto <<FH0510>> si è riportato il valore di $FA_{0,5-1,0s}$ valutato per tale poligono/microzona;
- nel campo previsto <<FPGA>> si è riportato il valore FA_{PGA} valutato per tale poligono/microzona;

6.6.2 Zone di attenzione per instabilità

Sono individuate nella carta delle MOPS, sono state anch'esse perimetrare e distinte, riportando in legenda la tipologia di instabilità riscontrata (liquefazione e sovrapposizione di liquefazione e cedimenti post-sisma).

Per ogni ulteriore descrizione delle zone suscettibili di instabilità si rimanda ai precedenti capitoli e in particolare alla descrizione della cartografia MOPS (paragrafo 6.4).

Poiché i fattori di amplificazione di riferimento per la Regione Emilia-Romagna sono tre e vengono tutti richiesti per la caratterizzazione di livello 2, si precisa che gli shapefile poligonali “Instab” elaborati per l'archiviazione dei dati della microzonazione sismica di livello 2 (MS2), hanno necessitato di alcune modifiche dei campi previsti dagli standard di riferimento (v.3.0) e cioè:

- sono stati eliminati i campi <<Valore_f>> e <<Tipo_f>>;
- sono stati aggiunti i tre campi <<FH0105>>, <<FH0510>> e <<FPGA>> (già riportati nello shape “Stab”) e riportati i fattori di amplificazione indicati dalla DAL 112/2007.

7 BIBLIOGRAFIA

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.

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.

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

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.

Facciorusso, J., Madiati C., Vannucchi G., Martelli, L. (2012). *Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione: il caso della costa adriatica romagnola*. In: “La microzonazione sismica per la gestione del territorio. L'esperienza della regione Emilia-Romagna”. Regione Emilia-Romagna Eds.

Facciorusso, J., Madiati C., Vannucchi G., (2013). *Confronto tra metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione da prove CPT e CPTU*. Università degli Studi di Firenze – Facoltà di Ingegneria – Sezione geotecnica.

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 XXVIII 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.

INGV – DISS Working Group (2010) – *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>.

ISPRA (2009) – *Carta Geologica d'Italia, Foglio 202 San Giovanni in persiceto*. 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.

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 – *“Microzonazione sismica e analisi della CLE delle aree epicentrali dei terremoti della Pianura Emiliana di maggio-giugno 2012 (Ordinanza del Commissario delegato – presidente della Regione Emilia-Romagna n.70712) – Relazione Illustrativa”*– a cura di L. Martelli e M. Romani. Novembre 2013.

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.

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.