



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

## Livello 3

Regione Emilia-Romagna  
Comune di Poggio Renatico



## Relazione Illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Geotema S.r.l.	31/08/2018

## Indice

1	Introduzione.....	4
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi.....	4
1.2	Lo studio di microzonazione sismica .....	5
1.3	Elaborati prodotti .....	6
2	Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento .....	7
2.1	Sismicità storica .....	8
2.1.1	La sequenza del 2012 .....	12
2.2	Sorgenti sismogenetiche .....	15
3	Assetto geologico e geomorfologico dell'area .....	18
3.1	Quadro geografico geomorfologico .....	18
3.2	Contesto geologico stratigrafico.....	20
3.3	Contesto strutturale .....	22
4	Dati geognostici e geofisici .....	27
4.1	Indagini di repertorio.....	27
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica .....	29
4.2.1	Indagini realizzate in situ .....	29
5	Modello del sottosuolo.....	31
5.1	Substrato .....	33
5.2	Terreni di copertura.....	34
5.2.1	Quaternario prevalentemente continentale (Supersistema Emiliano-Romagnolo).....	34
5.2.2	Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) .....	35
6	Interpretazioni e incertezze .....	37
6.1	Frequenza naturale dei terreni ( $f_0$ ).....	38
6.2	Substrato rigido .....	40
6.3	Terreni suscettibili di liquefazione.....	43
7	Metodologie di elaborazione e risultati.....	44
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali .....	44
7.1.1	Risposta sismica locale con modellazioni numeriche.....	46
7.2	Zone instabili soggette a liquefazione .....	69
7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione .....	70

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

8	Elaborati cartografici.....	74
8.1	Carta delle indagini (Tavola 1) .....	75
8.2	Carta Geologico Tecnica microzonazione sismica (Tavola 2) .....	76
8.2.1	Elementi geologici ed idrogeologici.....	76
8.2.2	Terreni di copertura.....	77
8.2.3	Forme di superficie e sepolte .....	78
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3) .....	78
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4).....	79
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	82
8.6	Carte di microzonazione sismica (Tavole 6, 7, 8, 9).....	82
9	Commenti finali e criticità.....	85
9.1	Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale.....	85
9.2	Microzonazione sismica e criticità.....	86
9.3	Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione .....	88
9.4	Indicazioni per la riduzione del rischio sismico .....	88
10	Bibliografia .....	90
11	Allegati .....	98

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

<i>Coordinamento dello studio di Microzonazione Sismica:</i>	dott. Luca Minarelli
<i>Redazione della relazione:</i>	dott. Luca Minarelli prof. Marco Stefani dott. geol. Massimiliano Fazzini dott. Davide Franciosi
<i>Creazione geodatabase dei dati geologici e geotecnici:</i>	dott. Luca Minarelli dott. Andrea Pavanati dott. Matteo Fusetti
<i>Elaborazione tavole cartografiche:</i>	dott. Luca Minarelli dott. Andrea Pavanati
<i>Elaborazione dei dati stratigrafici:</i>	prof. Marco Stefani dott. Luca Minarelli
<i>Esecuzione ed elaborazione misure HVSR:</i>	dott.ssa Ambra Mantovani

## 1 Introduzione

Il percorso di microzonazione sismica del Comune di Poggio Renatico è stato alquanto articolato ed ha visto la partecipazione diretta del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, di alcune Università e gruppi di ricerca nazionali.

Nella fase immediatamente successiva alla sequenza sismica emiliana del maggio 2012, la Regione Emilia-Romagna, attraverso l'Ordinanza 70/2012, ha infatti realizzato studi di microzonazione sismica negli ambiti urbanizzati e suscettibili di urbanizzazione dei 17 Comuni dell'area epicentrale (Martelli *et al.*, 2013). Con Determinazione di Giunta Regionale n. 17050/2016, sono stati infine destinati al Comune di Poggio Renatico i contributi per la realizzazione del presente studio di microzonazione sismica con adeguamento agli standard di terzo livello ed analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (C.L.E.).

Questa fase conclusiva del percorso di microzonazione fornisce l'occasione per approfondire ed uniformare i contenuti dei precedenti studi agli "indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" nazionali (Gruppo di Lavoro MS, 2008) ed agli attuali "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" recentemente aggiornati dalla D.G.R. 2193/2015.

### 1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

Lo studio di microzonazione sismica di terzo livello del Comune di Poggio Renatico è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nella Delibera di Giunta della Regione Emilia-Romagna 573/2016 avente come oggetto "O.C.D.P.C. 26 ottobre 2015, n. 293 - Annualità 2014 - Criteri per l'attribuzione di contributi per la realizzazione di interventi di riduzione del rischio sismico in edifici pubblici strategici e rilevanti, in edifici privati e per studi di microzonazione sismica, di cui all'art. 2, comma 1, lettere a), b) e c). Modalità di concessione e liquidazione dei contributi".

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

- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b", redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015), da qui in avanti "Standard MS 4.0b";
- "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica", approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome (Gruppo di lavoro MS, 2008) e successive modifiche e integrazioni (AA.VV., 2011), da qui in avanti "ICMS".

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Nella redazione dello studio si è fatto ulteriore riferimento alle seguenti norme:

- Delibera di Giunta Regionale D.G.R. n. 2193/2015 “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica”;
- Variante specifica al PTCP della Provincia di Ferrara relativa ad “ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale”, adottata dal Consiglio Provinciale il 29 maggio 2014. Tale variante contiene, all’interno del proprio Quadro Conoscitivo, un documento relativo la sismicità in Provincia di Ferrara;
- L.R. n. 19 del 30 ottobre 2008 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- D.M. del 14 gennaio 2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- D.M. del 16 gennaio 2018 “Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- Ordinanza n. 70 del 16 ottobre 2014 del Commissario Delegato Regione Emilia-Romagna “Approvazione programma per gli studi di microzonazione sismica” e relativi elaborati prodotti.

### 1.2 Lo studio di microzonazione sismica

Come noto le caratteristiche geologiche e geomorfologiche locali possono determinare alterazioni nel moto sismico in superficie ed effetti di instabilità, come frane, liquefazioni o cedimenti innescati dal sisma.

La finalità principale dello studio consiste nella suddivisione del territorio indagato in aree omogenee, sia sulla base della risposta sismica dei terreni, sia per quanto concerne i possibili effetti locali indotti dallo scuotimento. In particolare, lo studio di terzo livello ha come finalità l’analisi dell’effettivo grado di pericolosità sismica delle aree riconosciute come instabili e/o potenzialmente instabili.

In un contesto di pianura alluvionale come quello in esame, ciò si applica mediante valutazione approfondita della risposta sismica locale, in termini di amplificazione attesa e stima degli indici di rischio legati alle aree soggette a liquefazione e densificazione.

Gli studi di microzonazione sismica si pongono quindi come strumenti fondamentali per la prevenzione e la riduzione del rischio sismico, fornendo elementi capaci di indirizzare le scelte di pianificazione urbanistica verso zone a minore pericolosità, ed orientare gli interventi di mitigazione in aree a rischio instabilità, fornendo anche utili indicazioni preliminari per la progettazione. Secondo gli indirizzi regionali (D.G.R. 2193/2015) tali studi, necessari per la redazione e l’approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (L.R. 19/2008), devono interessare le aree urbanizzate e quelle potenzialmente sottoposte a trasformazioni urbanistiche, comprese le porzioni delle reti infrastrutturali principali.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Gli ambiti interessati dagli studi di microzonazione sismica sono stati utilizzati i medesimi ambiti individuati negli studi prodotti dalla Regione Emilia-Romagna attraverso l'Ordinanza 70/2012, in accordo con quanto stabilito con l' "Area Gestione del Territorio" del Comune di Poggio Renatico.

### 1.3 Elaborati prodotti

Gli elaborati di riferimento dello studio di microzonazione sismica sono rappresentati dalle tavole cartografiche di sintesi e dagli archivi digitali contenenti i dati informatizzati ad esse associate.

La relazione illustrativa rappresenta, invece, il documento tecnico che accompagna gli elaborati cartografici; essa illustra i criteri adottati per studio, descrive le metodologie d'analisi dei dati ed i risultati del percorso di microzonazione, oltre ad inquadrare il territorio nel contesto geologico e sismotettonico regionale.

Nel complesso il presente studio di microzonazione sismica è costituito da:

- 9 Tavole cartografiche, compiutamente descritte al capitolo 8;
- 5 Sezioni geologiche;
- Archivi digitali dei dati informatizzati;
- Relazione illustrativa;
- Rapporti di prova delle indagini di nuova esecuzione.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in conformità con quanto indicato nell'allegato A2 della D.G.R. 573/2016 avente come oggetto "O.C.D.P.C. 26 ottobre 2015, n. 293 - Annualità 2014 - Criteri per l'attribuzione di contributi per la realizzazione di interventi di riduzione del rischio sismico in edifici pubblici strategici e rilevanti, in edifici privati e per studi di microzonazione sismica, di cui all'art. 2, comma 1, lettere a), b) e c). Modalità di concessione e liquidazione dei contributi".

Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile dal titolo "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2015), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi. L'obbligo di attenersi in maniera rigorosa ai suddetti standard, ha vincolato lo studio di microzonazione sia a livello di organizzazione della relazione illustrativa, in tema di contenuti, titoli ed ordine dei capitoli trattati, sia a livello cartografico, in merito a numerazioni, tematismi, layout, legende e font utilizzati nelle diverse tipologie di elaborati prodotti.

## 2 Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al proprio assetto tettonico - strutturale, dunque alla presenza di quelle che vengono definite strutture “geologicamente attive”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio, oltre alle conoscenze legate all’evoluzione delle principali strutture deformative esistenti, risultano fondamentali anche quelle relative alla storia sismica del territorio stesso, cioè tutte le informazioni riguardanti i terremoti avvenuti in epoca storica e gli effetti ad essi associati. L’inquadramento sismotettonico dell’area è stato pertanto realizzato anche attraverso la consultazione di diversi database pubblici, sviluppati da vari Enti e gruppi di ricerca:

- il CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015 (Rovida *et al.*, 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), che raccoglie dati parametrici omogenei, sia macrosismici, sia strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  o magnitudo  $\geq 4.0$  d’interesse per l’Italia nella finestra temporale 1000-2014;
- il DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 (Locati *et al.*, 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), che fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  e d’interesse per l’Italia nella finestra temporale 1000-2014;
- il DISS versione 3.2.0 - Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane (DISS Working Group, 2015; <http://diss.rm.ingv.it>), che contiene informazioni relative a sorgenti individuali e composite in grado di generare terremoti di magnitudo pari a 5.5 o superiore. Le sorgenti sono rappresentate in pianta in modo semplificato tramite segmenti o aree georeferenziate che indicano rispettivamente singole faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite). Per ognuna delle sorgenti il database contiene informazioni che consentono la ricostruzione tridimensionale della struttura sismogenetica;
- il Database ISIDe (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale relative ai terremoti avvenuti dal 2003 ad oggi; tale portale, attualmente in fase di dismissione, sarà sostituito dal nuovo sito del Centro Nazionale Terremoti raggiungibile al seguente indirizzo: <http://cnt.rm.ingv.it/>;
- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello *et al.*, 2006; <http://csi.m.ingv.it/>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;



## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

- il CFTI4Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea (Guidoboni *et al.*, 2007; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>), che riporta, per numerose località, i risentimenti di circa 300 tra i più forti terremoti storici italiani, e fornisce informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti. Nel catalogo sono anche presenti dati relativi ai parametri epicentrali, ad effetti locali sismoindotti (fagliazione superficiale, frane, maremoti, ecc.) e danni ai centri storici ed a beni monumentali;
- la Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>), che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di  $a_g$  (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri spettrali” riferiti all’accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell’azione sismica;
- la Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004; <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e che ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica di base a scala nazionale.

### 2.1 Sismicità storica

La ricostruzione della sismicità storica del Comune di Poggio Renatico è stata effettuata basandosi innanzitutto sull’analisi del Database Macrosismico Italiano - DBMI15 (Locati *et al.*, 2016), il quale consente la consultazione online dei dati macrosismici di tutte quelle località a cui sono associate osservazioni di danno riferibili ad almeno 3 eventi sismici nella finestra temporale 1000-2014.

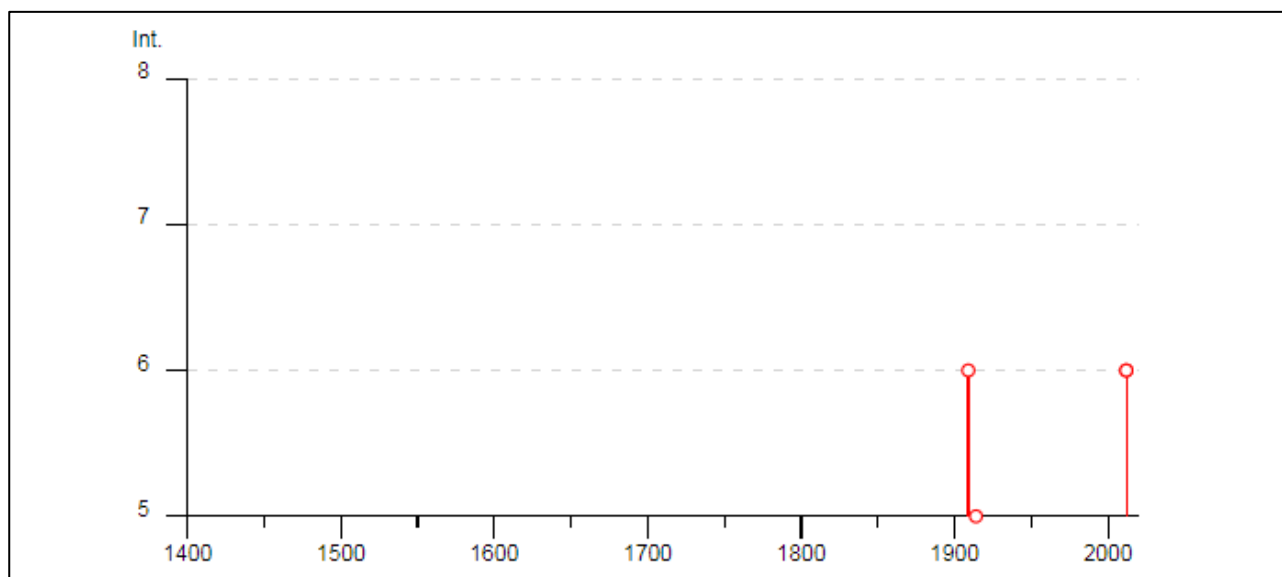
In relazione al Comune di Poggio Renatico il database contiene 13 record relativi ad eventi sismici storici (Tabella 2-1 e Figura 2-1). Per ciascun terremoto sono stati quindi riportati i valori di intensità macrosismica (IMCS) osservata nel territorio comunale in occasione degli eventi considerati, l’area epicentrale, il numero di Macro seismic Data Point (NMDP), l’intensità epicentrale ( $I_0$ ) e la magnitudo momento ( $M_w$ ) stimata mediante relazioni empiriche. I valori di intensità sono espressi in accordo con la scala Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930), come riportato in Tabella 2-2.

IN OCCASIONE DEL TERREMOTO DEL:										EFFETTI
DATA						AREA EPICENTRALE	NMDP	$I_0$	$M_w$	IMCS POGGIO RENATICO
Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se					
1898	01	13	13	10		Romagna settentrionale	110	6	4.59	IV
1898	03	09	11	43		Romagna settentrionale	68	6	4.59	IV
1907	04	25	04	52		Veronese	122	6	4.79	III-IV

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36	VI
1914	10	27	09	22		Lucchesia	660	7	5.63	V
1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04	IV
1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43	IV
1987	05	08	11	10	2	Bassa modenese	24	6	4.44	III
1989	09	13	21	54	0	Prealpi vicentine	779	6-7	4.85	III-IV
1996	10	15	09	55	5	Pianura emiliana	135	7	5.83	IV-V
2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	5-6	4.40	NF
2012	05	20	02	03	5	Pianura emiliana	53	7	6.09	V
2012	05	29	7	00	0	Pianura emiliana	87	7-8	5.90	VI

**Tabella 2-1 - Valori di intensità macrosismica osservati nel Comune di Poggio Renatico tratti dal database DBMI15 (Locati *et al.*, 2016). Alcuni effetti non sono esprimibili tramite scala MCS per cui vengono utilizzati codici alternativi come: F = avvertito (felt) in caso in cui si ritenga di escludere che si siano verificati danni ( $3 \leq I_{MCS} \leq 5$ ); NF = non avvertito (not felt) in presenza di segnalazione esplicita è equiparabile a  $I_{MCS} = 1$ .**



**Figura 2-1 - Valori di intensità macrosismica  $I_{MCS} \geq 5$  attribuite al Comune di Poggio Renatico, dall'anno 1000 al 2014, tratte dal database DBMI11 (Locati *et al.*, 2016).**

GRADO	SCOSSA	DESCRIZIONE DEGLI EFFETTI
IV	Moderata	Avvertita da molte persone, tremito di infissi e cristalli, leggere oscillazioni di oggetti appesi.
V	Piuttosto forte	Avvertita anche da persone addormentate, caduta di oggetti.
VI	Forte	Qualche leggera lesione negli edifici e finestre in frantumi.
VII	Molto forte	Caduta di fumaioli, lesioni negli edifici.
VIII	Rovinoso	Rovina parziale di qualche edificio; qualche vittima isolata.

**Tabella 2-2 - Stralcio della scala delle intensità macrosismiche Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930).**

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Come è possibile notare dai dati disponibili, i più recenti terremoti a maggiore intensità con epicentro nelle vicinanze dell'area di studio sono quelli che si sono verificati il 20 ed il 29 maggio 2012, con valori di intensità macrosismica osservati nel territorio comunale rispettivamente di V e di VI grado. Valori pari al VI grado sono stati osservati anche con i terremoti del 1909 dell'Emilia Romagna orientale. Nonostante non sia riportato nella Tabella 2-1, probabilmente a causa dei rari edifici presenti nell'area e pertanto di sporadici punti di osservazione macrosismica, il territorio comunale è stato certamente e fortemente interessato anche dal terremoto del 1570, con epicentro a Ferrara.

Di quest'ultimo terremoto, verificatosi il 17 novembre 1570, con intensità epicentrale pari al VII-VIII grado e magnitudo momento pari a 5.44, si riporta di seguito un estratto dal catalogo CFTI4med dei commenti storico-critici e delle descrizioni degli effetti locali.

I maggiori effetti del sisma sono ampiamente riportati nelle fonti ferraresi *che ricordano concordemente una lunga serie di scosse iniziata nelle prime ore del 17 novembre e continuata per tutta la giornata. Le quattro più forti sono ricordate con precisione oraria: la prima avvenne alle ore 9:30 italiane (1:40 GMT ca.) e causò il crollo di molti merli, terrazzini e comignoli, che cadendo danneggiarono molti tetti. Numerose repliche si susseguirono durante la stessa notte e nella mattinata successiva; fra queste le più forti furono quella delle ore 20 italiane (12:10 GMT ca.), che scosse violentemente le case, lesionando leggermente le murature, e quella delle ore 24 (16:10 GMT ca.), che causò il crollo di comignoli e cornicioni e gravi lesioni nelle murature. La scossa principale avvenne alle ore 3 (19:10 GMT ca.), colpì edifici già notevolmente lesionati e sconnessi e causò i danni più gravi. A Ferrara fu danneggiata soprattutto la parte medievale della città, dove alcuni edifici crollarono totalmente e quasi tutti gli altri subirono caduta di muri e tetti, lesioni e sconnessioni di pareti, che resero in gran parte inagibili sia gli edifici pubblici, sia le abitazioni private. I danni maggiori riguardarono gli edifici sviluppati in altezza: chiese, campanili, palazzi con soffitti a volta. Le scosse colpirono soprattutto gli edifici posti all'estremità delle vie, che non erano sostenuti da altre costruzioni. Diversi dettagli si hanno anche sull'edilizia privata: risulta danneggiato circa il 40% delle abitazioni. Fuori dalla città, in un raggio di circa 15-20 km, notevoli danni subirono circa 30 paesi e villaggi della campagna, dei quali sono documentati soprattutto i danni agli edifici religiosi. La scossa fu sentita in una vasta area comprendente le principali città emiliane, Milano, Padova e Venezia a nord; Pesaro a sud. Il quadro complessivo degli effetti è cumulativo delle scosse del 17 novembre. Numerosissime e frequenti furono le repliche ricordate e descritte, fino ai primi mesi del 1572, dalle fonti, tra le quali molteplici lettere degli ambasciatori presenti a Ferrara rintracciate negli archivi di Firenze, Urbino, Mantova, Torino. Qualche scossa fu avvertita anche nel 1573 e nel 1574.*

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Le fonti storiche riportano anche evidenze di effetti geologici di sito legati al sisma, come i fenomeni di *liquefazione del terreno nell'area urbana di Ferrara e nelle immediate vicinanze (in alcuni casi con emissione di fumi o con fuoriuscita di sabbie bollenti) e apertura di fessure con fuoriuscita di "una schiuma nera"*. Tra gli effetti viene anche riportato come *presso Stellata il Po subì un temporaneo arresto del flusso delle acque; il loro innalzamento e il successivo rapido abbassamento causarono danni ai mulini*.

In Figura 2-2 è riportata in mappa la distribuzione degli effetti macrosismici relativi al terremoto del 17 novembre 1570. L'area del Comune di Poggio Renatico appare priva di osservazioni macrosismiche cosa che appare al quanto inverosimile vista l'ubicazione epicentrale e la distribuzioni dei valori di intensità nei territorio limitrofi compresi tra il 6-7 e 7-8 grado delle scala MCS.

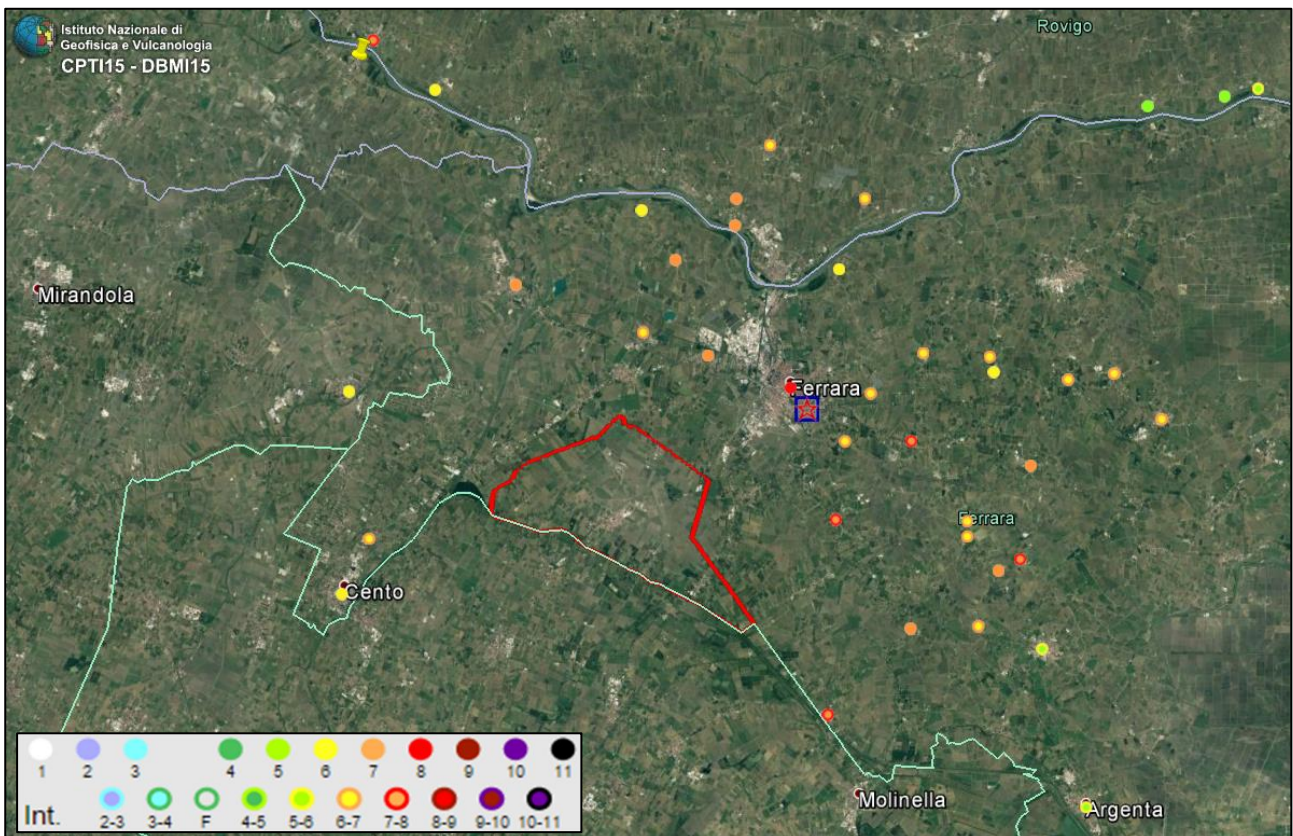


Figura 2-2 - Distribuzione degli effetti del sisma del 17 novembre 1570. Dati DBMI15. In rosso è rappresentata l'area del Comune di Poggio Renatico.

La Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento (INGV, 2004) mostra, per l'area in esame, un'accelerazione massima attesa su suolo rigido compresa tra 0,125 e 0,175 g, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Figura 2-3).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

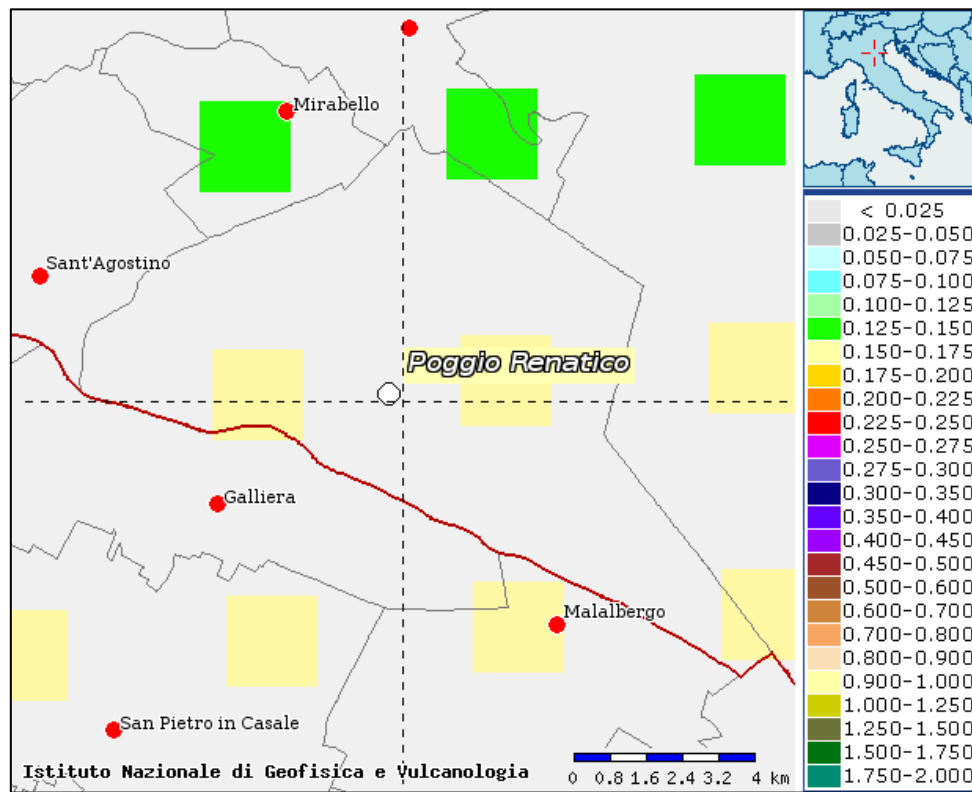


Figura 2-3 - Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento nell'intorno dell'area di studio.

### 2.1.1 La sequenza del 2012

Tra il maggio ed il giugno 2012 un'importante sequenza sismica ha interessato una vasta area della Bassa Pianura Padana, compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara. La sequenza è stata caratterizzata da due scosse principali; la prima, di magnitudo locale  $M_L$  pari a 5.9, si è verificata il 20 maggio alle 4:03 ora locale, con epicentro tra Finale Emilia e San Felice sul Panaro ( $44^{\circ}51'50''$  N,  $11^{\circ}14'31''$  E, profondità 6,3 km - Figura 2-4), mentre la seconda, di  $M_L$  pari a 5.8, è avvenuta il 29 maggio alle 9:00 ora locale con epicentro tra Mirandola e Medolla, ( $44^{\circ}50'00''$  N,  $11^{\circ}03'37''$  E, profondità 13,5 km - Figura 2-4) (Massa *et al.*, 2012).

Scosse successive hanno interessato un'area estesa oltre 50 km in direzione Est - Ovest; in particolare sono state registrate cinque repliche di  $M_W \geq 5,0$ , aventi epicentri distribuiti tra Novi di Modena e Vigarano Mainarda (Figura 2-4), ed oltre 3.700 scosse di  $M_W \geq 1,5$  (Figura 2-4).

La sequenza sismica ha interessato le strutture fragili costituenti la parte frontale della catena appenninica sepolta, le cosiddette Pieghie Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981), serie di pieghie e sovrascorrimenti a vergenza nord-orientale che coinvolgono sia la copertura sedimentaria Terziario - Quaternaria che la successione carbonatica Mesozoica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

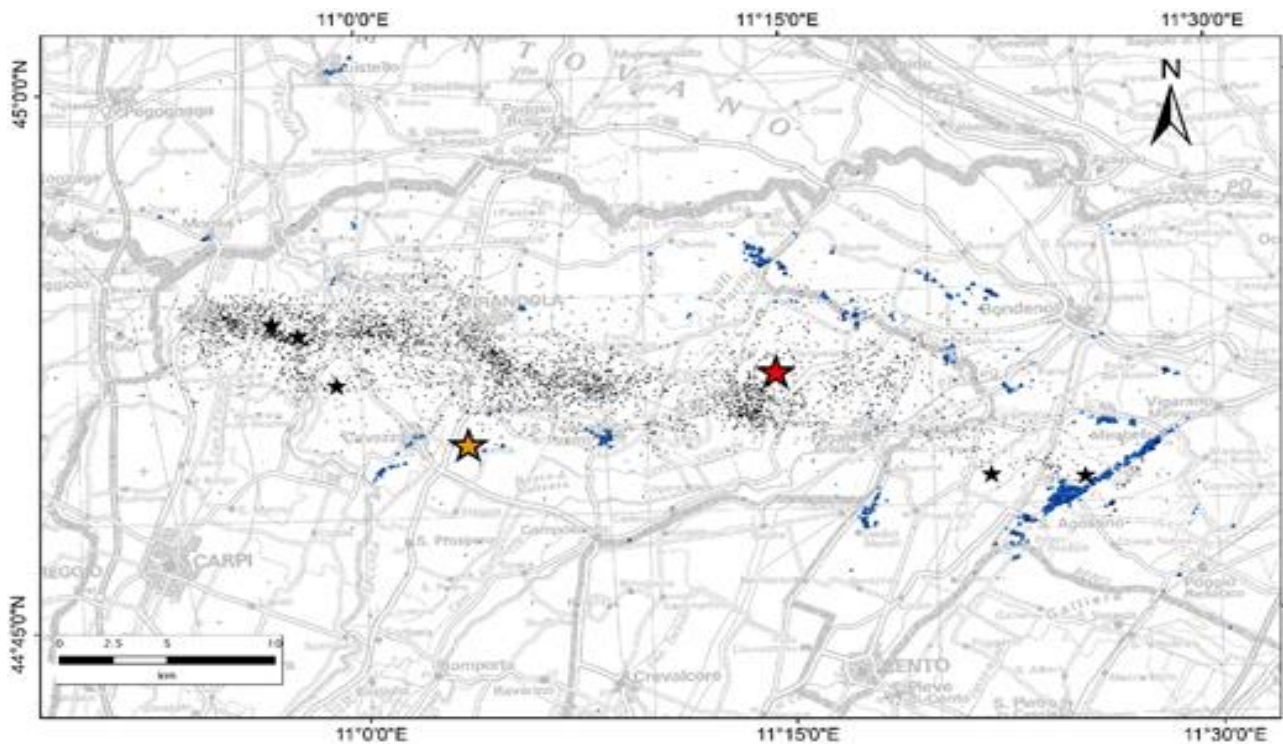


Figura 2-4 - Sequenza sismica emiliana del 2012. Le stelle rossa e arancio rappresentano rispettivamente le scosse del 20 e 29 maggio. Le stelle nere riportano la localizzazione degli *aftershocks* con  $M_w \geq 5.0$ , mentre i piccoli punti neri indicano gli eventi con  $M_w \geq 1.5$ . I piccoli punti blu infine evidenziano le liquefazioni osservate (Caputo e Papathanassiou, 2012; Emergeo Working Group, 2012; GdL Liquefazione RER, 2012).

I risultati di diversi studi sui meccanismi focali degli eventi principali suggeriscono una cinematica di tipo compressivo, quindi un movimento delle faglie sepolte lungo piani orientati essenzialmente Est - Ovest ed immergenti verso Sud (Pondrelli *et al.*, 2012; Scognamiglio *et al.*, 2012). Questi dati sono in accordo con quanto emerso da studi del campo di velocità derivato da misure GPS (Devoti *et al.*, 2011) e dagli indicatori del campo di stress agente su questa area (Montone *et al.*, 2012).

I rilievi macrosismici eseguiti immediatamente dopo le scosse (Galli *et al.*, 2012a e 2012b) hanno determinato, per il territorio di Poggio Renatico, valori di intensità macrosismica pari al VI grado della Scala MCS (Figura 2-5 e Figura 2-6) per entrambi gli eventi principali della sequenza sismica del 2012.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

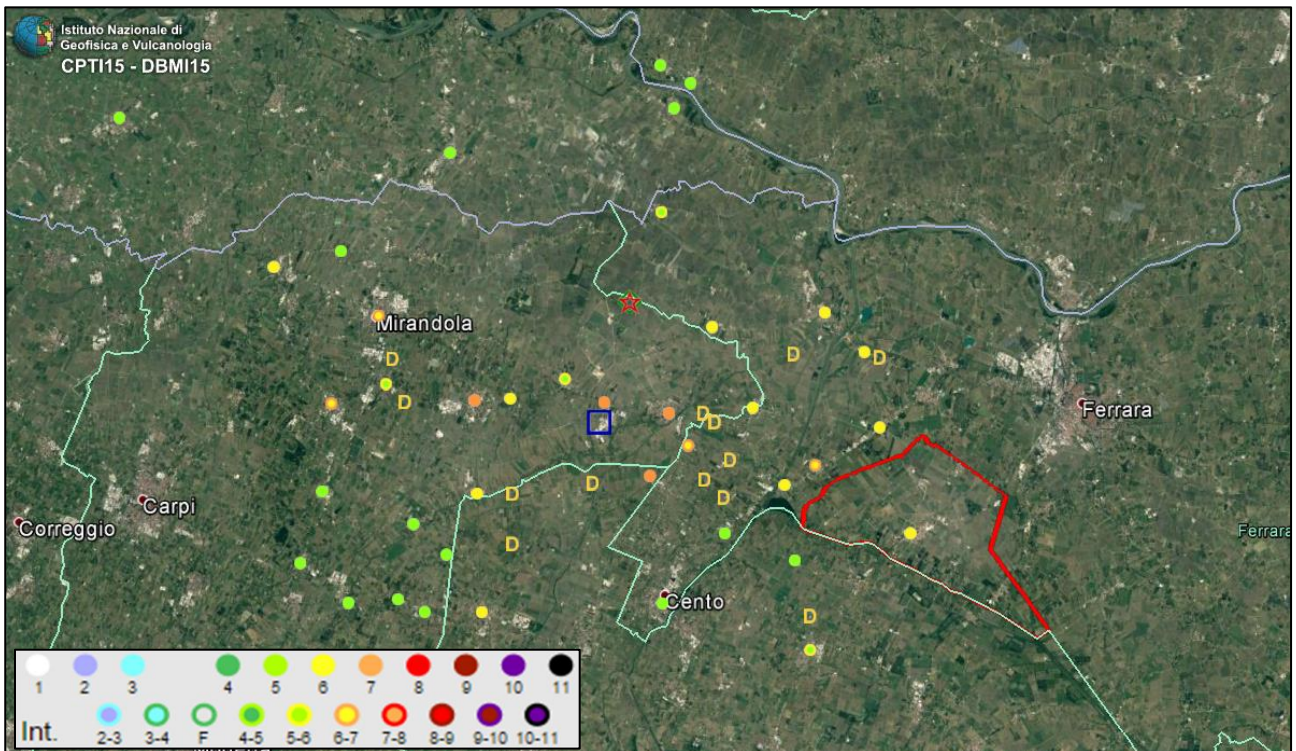


Figura 2-5 - Distribuzione degli effetti del sisma del 20 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentata l'area del Comune di Poggio Renatico.

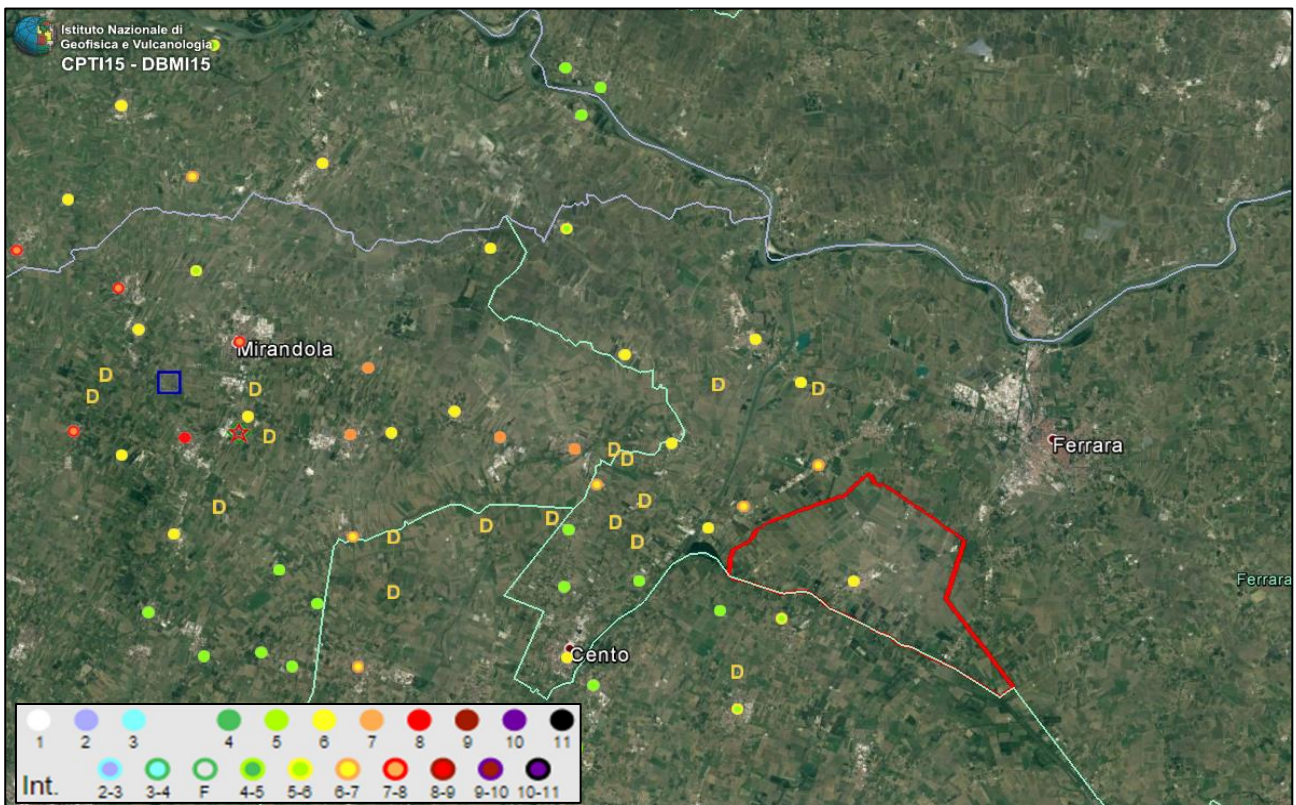


Figura 2-6 - Distribuzione degli effetti del sisma del 29 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentata l'area del Comune di Poggio Renatico.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Nel territorio, duramente colpito dagli eventi sismici del 20 e 29 Maggio 2012, sono state verificate numerose lesioni e crolli parziali su larga parte degli edifici storici pubblici e privati, con danneggiamenti dei paramenti murari ed in corrispondenza delle connessioni tra la copertura e gli elementi strutturali degli edifici stessi.

Gravi danni hanno, inoltre, interessato svariati edifici produttivi ed agricoli con crolli, anche completi, delle coperture.

I danni più ingenti al patrimonio storico e artistico hanno riguardato il crollo della torre di Castello Lambertini, ex sede della municipalità cittadina, con conseguenti lesioni diffuse su tutto il complesso, distacco senza crollo della torre del Centro Civico con conseguenti lesioni diffuse su tutte le zone prospicienti alla torre. Danneggiamenti diffusi hanno inoltre interessato la Torre Fornasini, l'abbazia di S. Michele Arcangelo il cui campanile, a causa di grave instabilità, è stato abbattuto, mentre altre lesioni di minori entità hanno interessato le chiese parrocchiali di Gallo, Chiesa Nuova, Coronella e Madonna Boschi.

Unico edificio scolastico nel territorio comunale dichiarato totalmente inagibile è stato quello destinato a Scuola Primaria "G.B. Bentivoglio". Altri danni che hanno causato la parziale inagibilità hanno interessato la scuola materna di Coronella ex Spazio bambino di Madonna Boschi.

Ulteriori effetti osservati durante le due principali scosse della sequenza emiliana, sono stati l'amplificazione del moto sismico ed i fenomeni di liquefazione, diffusi in corrispondenza di antichi alvei fluviali, oggi abbandonati e sepolti.

Le stazioni della Rete Accelerometrica Nazionale e quelle temporanee installate in area epicentrale dopo le scosse del 20 maggio, hanno infatti registrato valori di accelerazione orizzontale in superficie superiori a 0,2 g, con picchi nell'area modenese anche maggiori di 0,3 g. Tali accelerazioni, anche di molto superiori a quelle considerate per la redazione della mappa di pericolosità di base dell'area (Figura 2-3), sono state determinate da evidenti fenomeni di amplificazione stratigrafica del moto sismico.

Le manifestazioni di liquefazione hanno ampiamente interessato l'area epicentrale, specialmente la porzione più occidentale della provincia di Ferrara e quella settentrionale della provincia di Modena, comprese alcune aree dell'Oltrepò Mantovano. Effetti isolati di liquefazione sono stati mappati anche in alcune aree rurali del territorio poggese oltre che al margine sud-occidentale del abitato di Poggio Renatico.

## 2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS Working Group, 2015) mostra come la parte sud-occidentale del territorio di Poggio Renatico sia interessato dalla presenza della sorgente sismogenetica composita ITCS051 ed – in piccola parte – della sorgente sismogenetica composita ITCS103; la parte sud-



## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

orientale infine è interessata dalla presenza della sorgente sismogenetica composta ITCS102 (Figura 2-7). La prima struttura, denominata Carpi - Poggio Renatico ed orientata Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest, comprende la sorgente individuale di Mirandola (ITIS107), caratterizzata da magnitudo momento massima  $Mw_{max}$  pari a 6, profondità tra 4 e 7 km e slip-rate compreso tra 0.5 e 1.04 mm/anno.

La seconda struttura invece, denominata Finale Emilia - Mirabello, si estende verso occidente in direzione di Mirandola anch'essa con orientazione Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest, e comprende la sorgente individuale di Finale Emilia (ITIS134), caratterizzata da magnitudo momento massima  $Mw_{max}$  pari a 6.1, profondità tra 4 e 8.4 km e slip-rate compreso tra 0.25 e 0.5 mm/anno.

La terza struttura infine, denominata Malalbergo-Ravenna, si estende verso oriente con orientazione Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest, e comprende la sorgente individuale di Argenta (ITIS141), caratterizzata da magnitudo momento massima  $Mw_{max}$  pari a 5.8, profondità tra 3 e 6.3 km e slip-rate compreso tra 0.49 e 0.55 mm/anno.

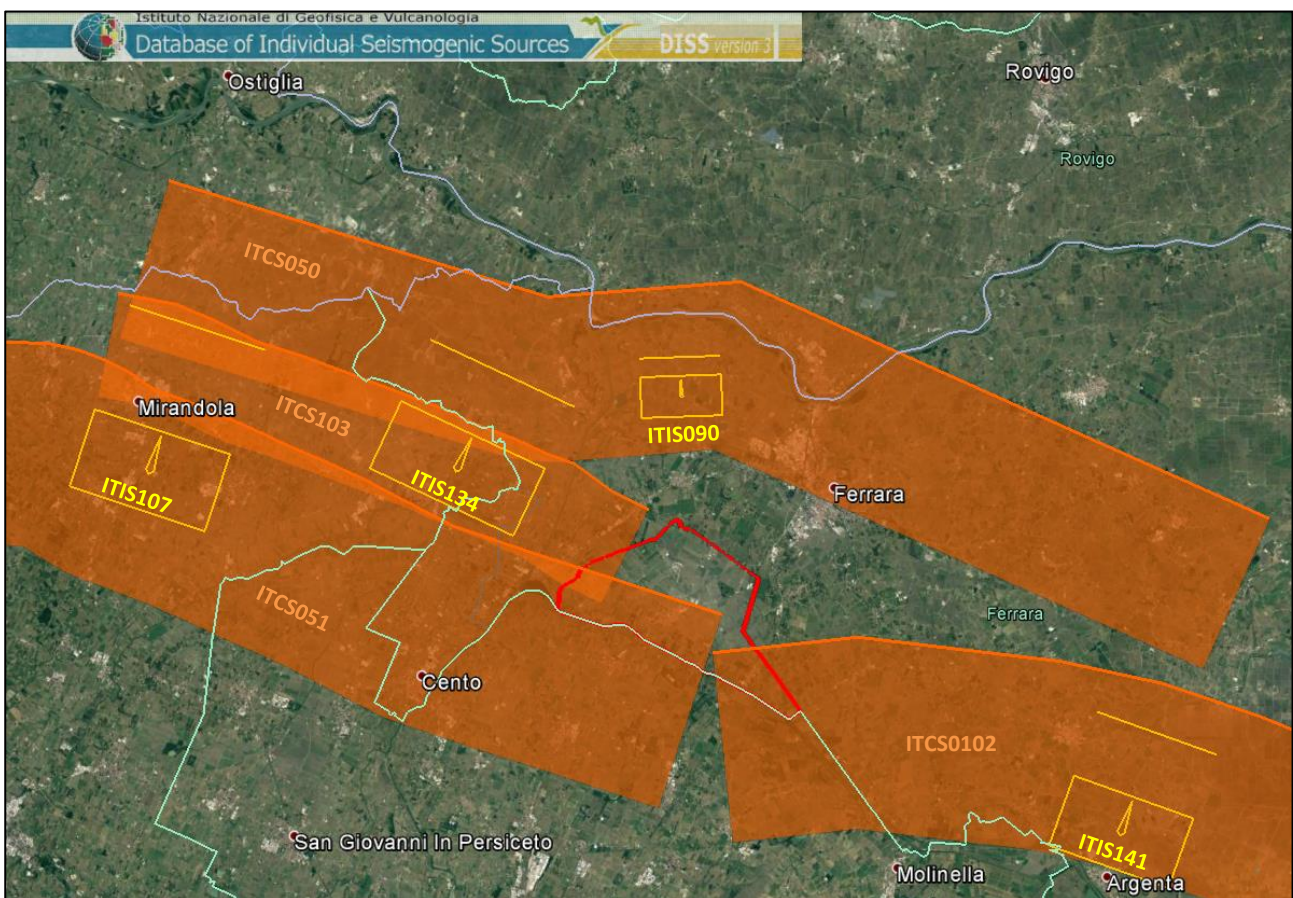


Figura 2-7 - Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) ed individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.2.0, nell'intorno dell'area di studio. In rosso l'area comunale di Poggio Renatico.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

L'area di studio è inoltre bordata a Nord da un'altra sorgente sismogenetica composta anch'esse approssimativamente orientata Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest e denominata Poggio Rusco - Migliarino (ITCS050). Tale struttura delimita il settore esterno delle Pieghe Ferraresi e comprende la sorgente individuale di Ferrara (ITIS090), a cui è assegnata una  $Mw_{max}$  pari a 5.5, profondità tra 1.4 e 4.5 km e slip-rate compreso tra 0.1 e 0.5 mm/anno.

Rispetto alle sorgenti individuali citate invece, mentre quella di Mirandola, coincidente con il sovrascorrimento responsabile della scossa del 29 maggio 2012, era già conosciuta sia in base a prospezioni geologiche profonde, sia mediante osservazione di anomalie nel reticolo idrografico, quella di Finale Emilia invece è stata proposta sulla base della localizzazione dell'evento del 20 maggio 2012.

In relazione all'esistenza della sorgente individuale di Ferrara, questa è avvalorata sia da dati di sottosuolo (Pieri e Groppi, 1981; Boccaletti e Martelli, 2004; Burrato *et al.*, 2003; 2012), sia da attività tettonica "relativamente recente", alla quale si riconduce il terremoto di Ferrara del 17 novembre 1570. L'ubicazione della sorgente è stata proposta in base ad anomalie del reticolo idrografico, in particolare alla deviazione dell'alveo del fiume Po in prossimità di Stellata, interpretata come possibile conseguenza della deformazione indotta dall'attività tettonica della struttura sepolta.

Infine, la sorgente individuale di Argenta appartiene all'estremità settentrionale dell'appennino settentrionale che si estende a cavallo della regione attraverso la bassa valle del Reno fino a Ravenna (a sud-est), ed è la parte più orientale del fronte dell'arco ferrarese.

Nonostante siano tra le meglio documentate tra quelle presenti nel sottosuolo della pianura, per le strutture sismogenetiche appartenenti all'Arco Ferrarese permangono interrogati relativi ai tempi di ritorno degli eventi associati alle sorgenti individuali ed alla magnitudo massima attesa per l'area sottesa alla sorgente composita.

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, il Comune di Poggio Renatico ricade dentro alla Zona 912 "Dorsale Ferrarese", caratterizzata da un valore di  $Mw_{max}$  pari a 6,14 (Figura 2-8).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

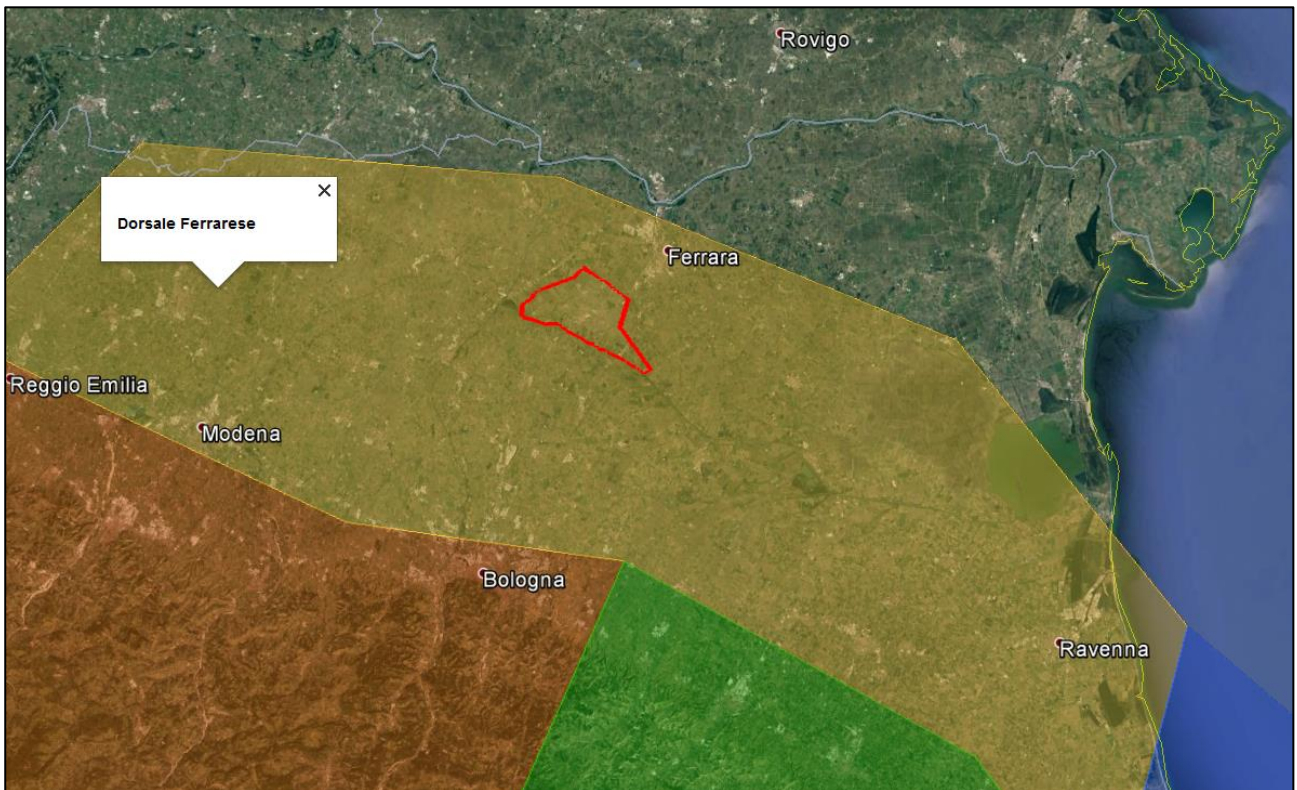


Figura 2-8 - Ubicazione del territorio comunale di Poggio Renatico (in rosso) rispetto alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).

### 3 Assetto geologico e geomorfologico dell'area

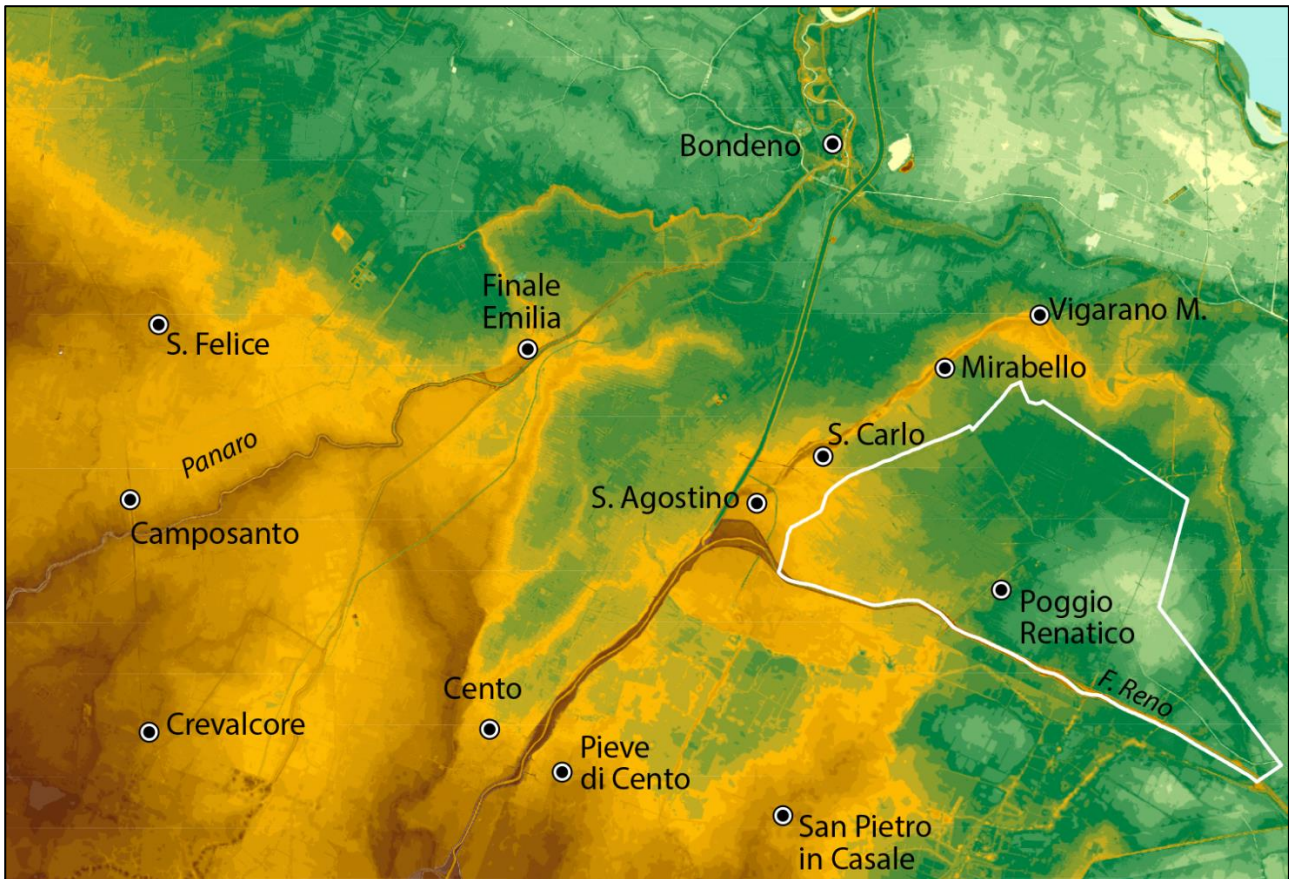
Nei paragrafi seguenti sono delineati i caratteri geografici, geologico-geomorfologici e tettonici dell'area con particolare riguardo alla successione sedimentaria che costituisce il sottosuolo del Comune di Poggio Renatico.

#### 3.1 Quadro geografico geomorfologico

Il territorio analizzato fa parte della porzione sud-occidentale della Provincia di Ferrara ed è limitato a nord dal comune capoluogo di Provincia ed a sud dalla Provincia di Bologna. Il comune di Poggio Renatico si sviluppa in un'area di bassa pianura alluvionale, formata dai depositi del fiume Reno accumulati in età storica. Le forme geomorfologiche ed i corpi sedimentari affioranti sono tutti di età molto recente, in quanto formati in larga parte dopo il XVI secolo. La morfologia del territorio è caratterizzata da un articolato microrilievo, costituito da dossi fluviali ed estese aree di argine naturale che sfumano in depressioni chiuse interalvee. L'area comunale è in gran parte situata in un'ampia depressione chiusa, limitata a nord ed a est dal dosso di paleoalveo del Reno del XVII secolo, a sud dall'attuale corso artificiale del fiume, creato nel XVIII secolo, ed a ovest dal corpo sedimentario semisepolto del Reno di età romana.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Questi caratteri geomorfologici risultano estremamente evidenti grazie alle tecniche di telemetria laser (LIDAR), che permettono una ricostruzione altimetrica di elevato dettaglio (Figura 3-1).



**Figura 3-1 - Modello altimetrico LIDAR (dati Regione Emilia-Romagna). Le quote più basse sono rappresentate in verde chiaro, le aree topograficamente più elevate in giallo e marrone. Le quote topografiche dell'area comunale variano fra 5 e 13 m circa. Evidenti appaiono i numerosi dossi del Reno, che limitano ampie depressioni interalvee (in verde). Ben riconoscibile è l'area depressa chiusa, sviluppata ad ovest del centro abitato di Poggio Renatico.**

Nel territorio considerato non si osservano forme legate a depositi fluviali di età pre-moderna precedenti al XVI secolo, in quanto i sedimenti più antichi sono sempre sepolti nel sottosuolo. I caratteri geomorfologici principali dell'area indagata era già noti grazie alla Carta Geomorfologica della Pianura Padana 1:250.000 (Castiglioni G.B. Ed. 1999 - Figura 3-2), in questa area realizzata a cura del Prof. Marco Bondesan, dell'Università di Ferrara. Nella carta geomorfologica si osserva bene il dosso corrispondente al paleoalveo del Reno, sviluppatosi fra XVI e XVIII secolo, associato a strutture di ventaglio da rotta. Altri ventagli sono associati al canale attuale del Reno, in corrispondenza di sfondamenti degli argini artificiali, ben documentati durante il XIX e in parte del XX secolo. A sud del fiume, in Provincia di Bologna, si osservano due corpi di paleoalveo del Reno, di età antica, che verso nord scompaiono come forme geomorfologiche,

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

essendo coperti da sedimenti recenti dello stesso fiume. L'ampia depressione interalvea è delimitata dalla linea verde, mentre il puntinato rado indica aree interalvee parzialmente colmate dai depositi di provenienza appenninica. Questi depositi sono stati utilizzati per bonifiche per colmata, in epoca post-rinascimentale, rese possibili dall'abbondante trasporto solido del Reno e degli altri fiumi di provenienza appenninica. La carta geomorfologica indica anche i principali canali di bonifica idraulica attuali, strutture molto importanti per la sicurezza dell'area qui discussa.

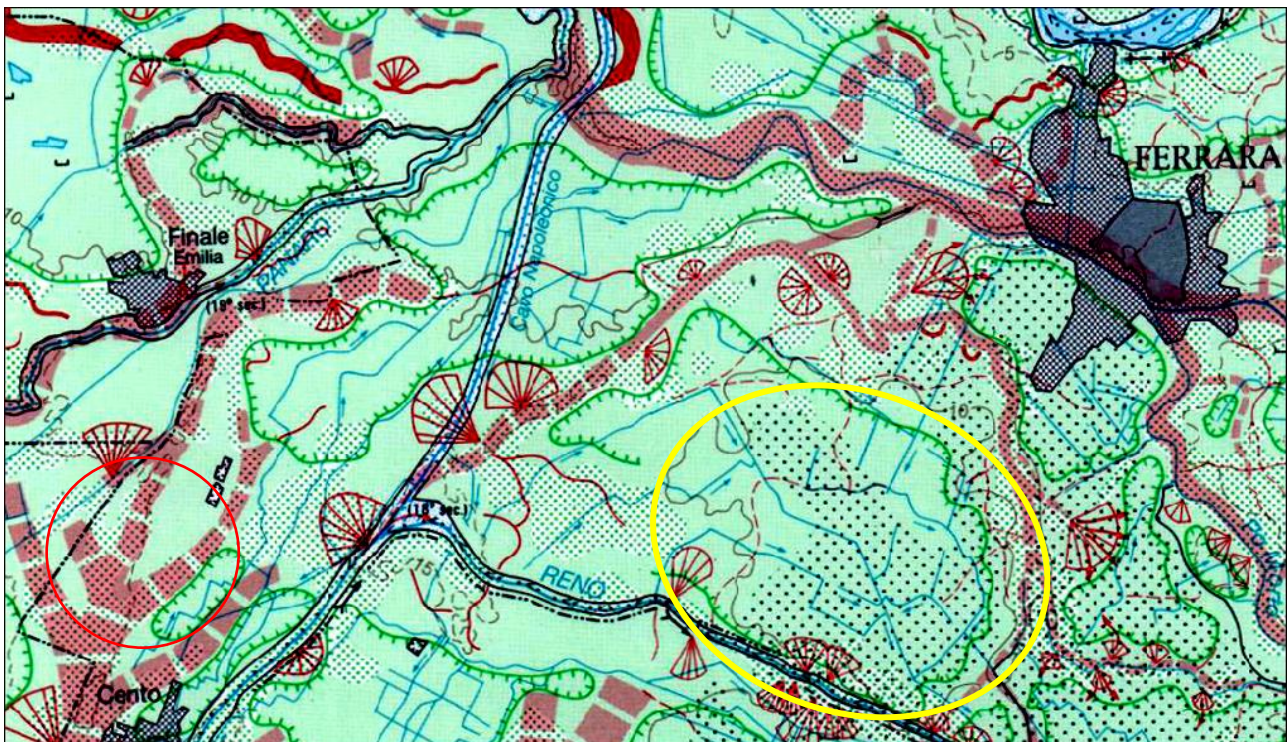


Figura 3-2 - Stralcio dalla Carta Geomorfologica della Pianura Padana 1:250.000 (Castiglioni G.B. Ed. 1999), che illustra la complessa alternanza di corpi dossivi di paleoalveo (in rosso) e depressioni interalvee (in verde), limitate da piccole scarpate morfologiche (linee verdi). Nella parte centro-meridionale della carta si osservano i corpi di riempimento di canale distributore di delta interno del Reno di età medioevale.

### 3.2 Contesto geologico stratigrafico

Prima degli eventi sismici del 2012, le conoscenze geologiche disponibili riguardavano soprattutto la parte centro-meridionale del territorio comunale. Questa area era stata infatti oggetto delle indagini svolte per la realizzazione del foglio geologico 1:50.000 CARG "Poggio Renatico" e le relative note illustrative. In questo ambito erano stati effettuati alcuni sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo che hanno fornito importanti informazioni puntuali sul sottosuolo. Secondo i criteri stratigrafici adottati dalla cartografia nazionale del Progetto CARG, tutti i sedimenti affioranti nell'area cartografata sono riferibili all'Unità di

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Modena (AES<sub>8a</sub>), di età post-romana. Questa unità costituisce la parte sommitale del Subsistema di Ravenna (AES<sub>8</sub>), inquadrato a sua volta nella parte terminale del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) (cfr. Note Illustrative Foglio CARG 203 “Poggio Renatico”).

La parte settentrionale del territorio era invece pressoché priva sia di studi stratigrafici di sottosuolo che di cartografia geologica di superficie. Gli studi geologici realizzati durante l'emergenza sismica del 2012 hanno delineato in maniera generale i principali caratteri geologici anche della parte settentrionale dell'area e confermato i dati derivanti dal Progetto CARG sulla porzione centro-meridionale. La carta geologica di superficie in scala 1:100.000, allegata allo studio di microzonazione sismica dell'Ordinanza 70/2012 già indicava come i depositi affioranti fossero costituiti da argille e limi organici di palude interalvea, intercalati a subordinati corpi di sabbie di canale, argine e rotta fluviale.

Recentemente, la conoscenza dei corpi geologici affioranti nel territorio comunale indagato è stata notevolmente migliorata ed inquadrata nel contesto geologico della Provincia di Ferrara, grazie alla realizzazione della nuova carta geologica provinciale. La nuova cartografia, realizzata da Geotema S.r.l. nel 2016, è basata sull'analisi di immagini satellitari, modelli altimetrici ed informazioni derivanti da cartografia storica, integrate da rilevamenti di terreno e confronti con indagini geognostiche sul sottosuolo prossimo alla superficie. La carta mostra come la porzione sud-occidentale della Pianura Ferrarese sia costituita dai grandi corpi sabbiosi di paleoalveo del Reno e di altri fiumi di provenienza appenninica. Questi corpi si sono in gran parte depositi in età assai recente e sono quindi attribuibili, come detto, all'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>). I centri abitati, la rete viaria e le infrastrutture sono in gran parte sviluppati in corrispondenza dei pronunciati dossi sabbiosi depositi, a partire dal medioevo, dal fiume Reno. Lateralmente, aree più depresse sono formate da sedimenti fangosi depositi in zone interalvee palustri, spesso associate ad estesi depositi di argille organiche e torbe. A ovest, nord ed est di Poggio Renatico è delineato in dettaglio il corpo di sabbie di riempimento dell'alveo del Reno, fiancheggiato da ampi corpi di sabbie e limi di argine e ventaglio da rotta, formati durante episodi di piena. L'alveo a nord-ovest del territorio comunale si è in buona parte sviluppato durante il XVI secolo, quello a nord e nord-est nel XVII, dopo il taglio arginale del 1604, avvenuto a Vigarano Mainarda. La maggior parte del territorio comunale di Poggio Renatico è formato da ampie estensioni di fanghi di pianura inondabile, mentre la depressione morfologica ad oriente del capoluogo corrisponde ad argille organiche e torbe, deposte in ambienti umidi paludosi che nell'area sono sopravvissuti fino all'avvento delle moderne bonifiche per sollevamento meccanico.

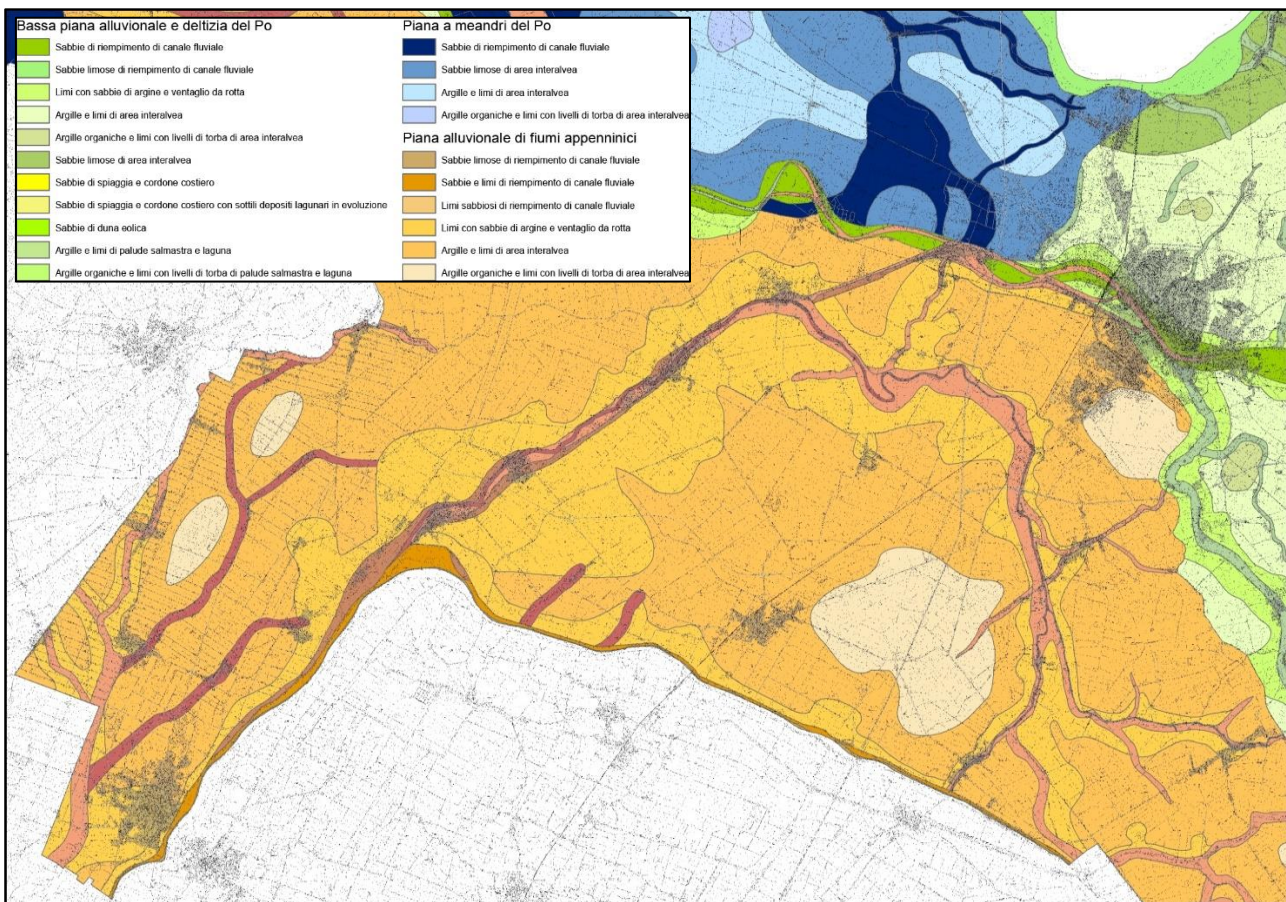
**MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO**


Figura 3-3 - Stralcio della Carta Geologica e Geomorfologica della Provincia di Ferrara (2016), in cui sono visibili a corpi di paleoalveo del Reno e di altri fiumi appenninici e i corpi depositi dal Po. Il territorio comunale di Cento è interamente sviluppato a cavallo del più recente paleoalveo del Fiume Reno. Cartografia accessibile online: <http://www.ferraradeltapo-unesco.it/>.

### 3.3 Contesto strutturale

L'area esaminata fa parte del bacino di Avanfossa dell'Appennino, compreso tra l'Appennino settentrionale ed il Sudalpino. Le strutture sepolte sotto la Pianura Padana sono note grazie a profili di sismica a riflessione e sondaggi profondi, realizzati per la ricerca di idrocarburi, da parte dell'AGIP. Il sottosuolo è caratterizzato da una complessa serie di piani di scollamento e sovrascorrimenti, associati ad anticlinali di rampa ed ampie pieghe sinclinali. Queste strutture compressive hanno progressivamente coinvolto l'avanfossa appenninica in età geologica recente, durante il Neogene e il Quaternario. Si è riconosciuta una complessa serie di pieghe e sovrascorrimenti con geometria a pianta arcuata e vergenza settentrionale (Pieri e Groppi, 1975, 1981; Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002). All'interno delle pieghe che formano il fronte esterno della catena appenninica sepolta, è possibile distinguere (Pieri e Groppi, 1975) due fasci maggiori di pieghe, denominati "Arco delle Pieghe Emiliane", a nord-ovest, ed "Arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole", ad sud-est (Figura 3-4).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

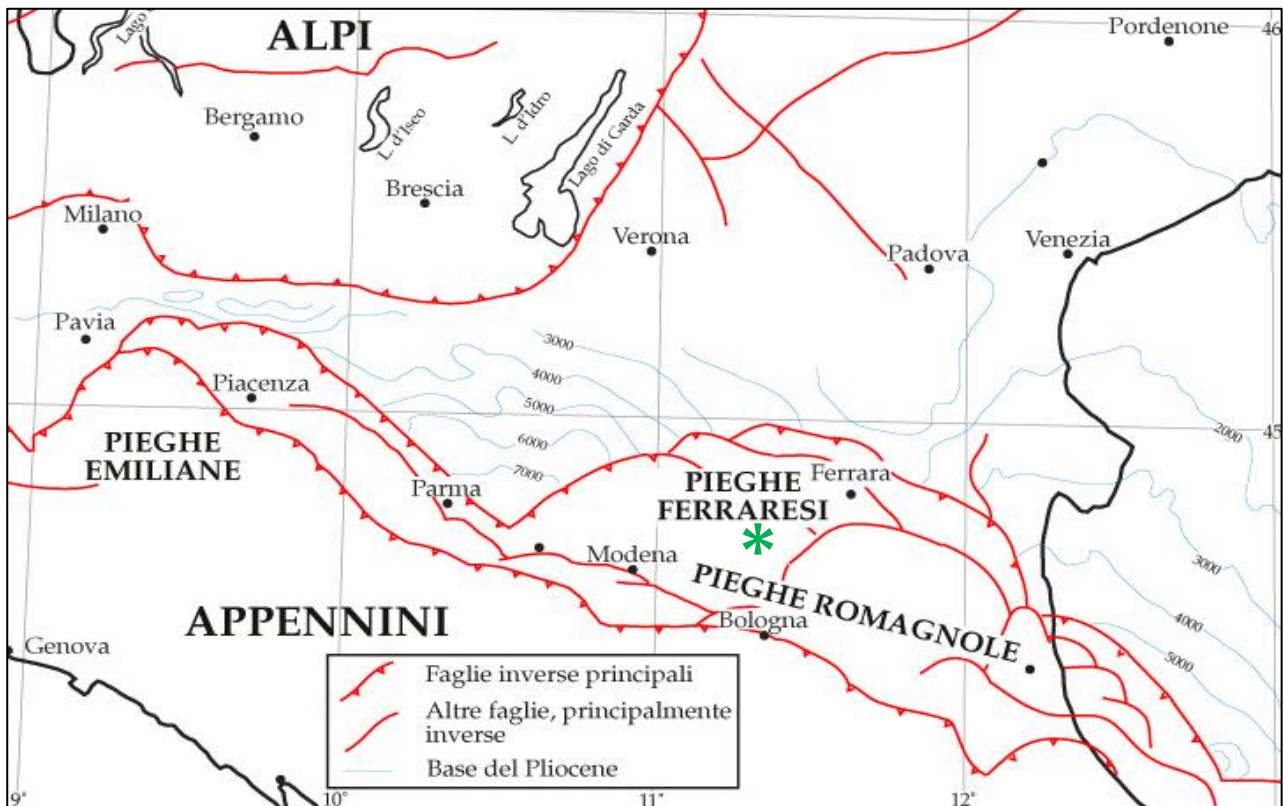


Figura 3-4 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana centro-orientale (Modificata da Burrato *et al.*, 2003, da Pieri e Groppi, 1975). L'area analizzata si trova nella parte meridionale del fascio di pieghe ferraresi.

L'arco orientale può essere suddiviso in tre strutture minori dette "Pieghe Ferraresi", "Pieghe Romagnole" e "Pieghe Adriatiche" (Bigi *et al.*, 1990). Le Pieghe Ferraresi (Dorsale Ferrarese o "Ferrara Folds" in Pieri e Groppi, 1981) rappresentano le strutture più settentrionali, tra Reggio Emilia e la costa adriatica (Figura 3-4, Figura 3-5), che si spingono a nord del Po tra Occhiobello e Ferrara (Bigi *et al.*, 1990). La complessa struttura sismogenetica delle Pieghe Ferraresi si sviluppa a nord della direttrice San Pietro in Casale - Pieve di Cento. Verso sud, questa struttura è limitata da una fascia di pieghe e sovrascorrimenti sepolti lungo la direzione Minerbio- San Giorgio di Piano, più prossima al margine appenninico ("Pieghe Romagnole" in Pieri e Groppi, 1981). Tali strutture sono ben visibili nei profili di sismica a riflessione prodotti negli anni '50 dalla Società Petrolifera Italiana (ora ENI-AGIP) e nelle diverse interpretazioni geologiche degli stessi, proposte in letteratura (es. Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002; Corrado *et al.*, 2010; Pieri e Groppi, 1981; Toscani *et al.*, 2009).



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

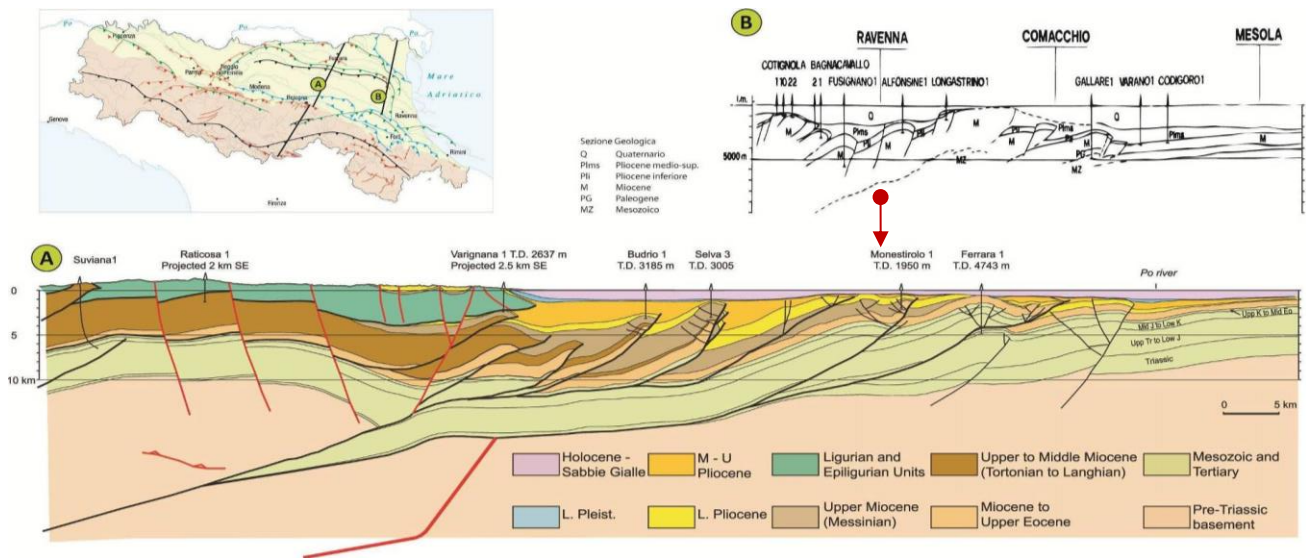


Figura 3-5 - Contesto strutturale della porzione emiliano-romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) deriva da Pieri e Groppi, 1981, mentre la sezione inferiore è presa (A) da Toscani *et al.*, 2009. L'area indagata, ubicata all'incirca in corrispondenza delle frecce rosse, attraversa varie fasce strutturali di pieghe e faglie, come ben visibile dalla sezione geologica.

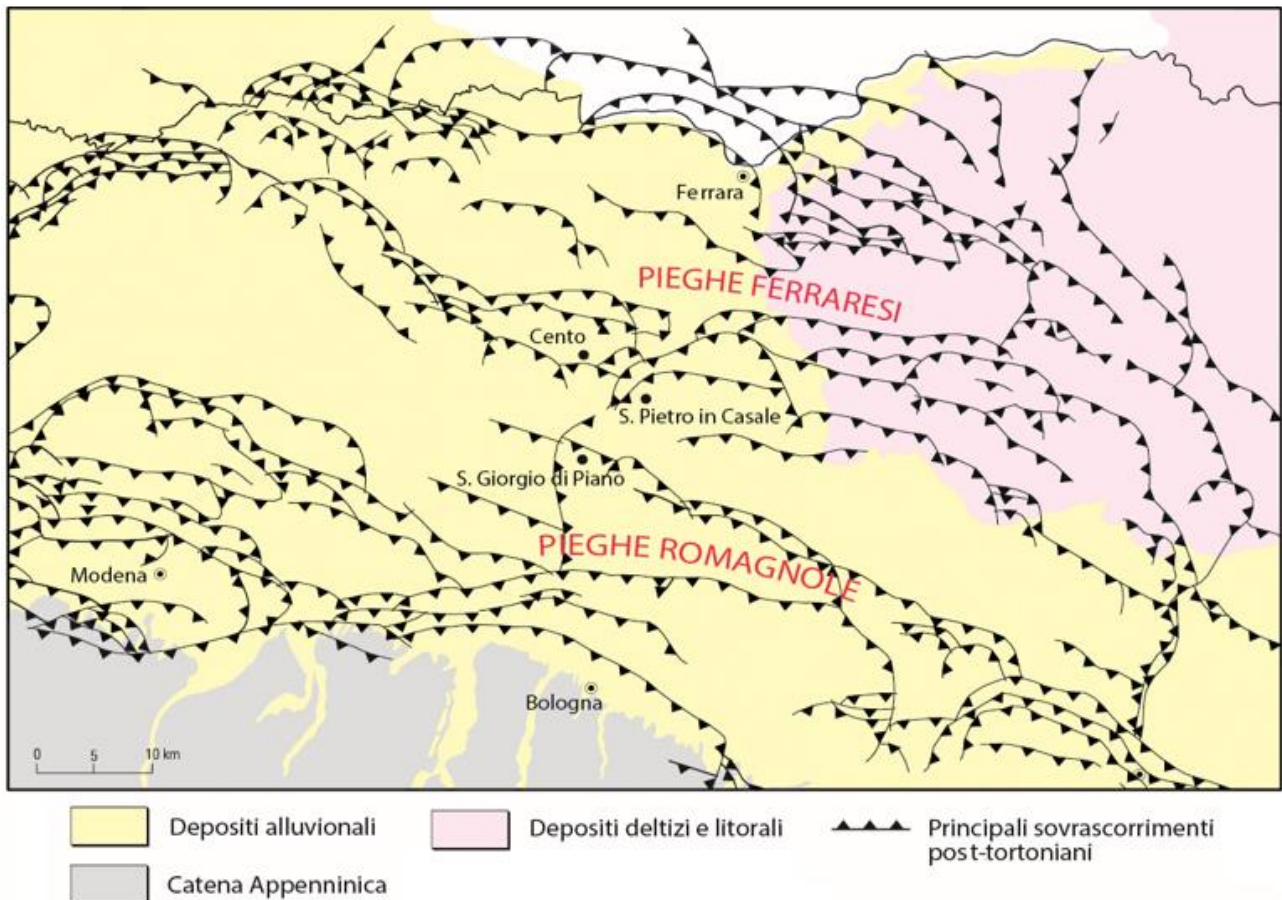


Figura 3-6 - Inquadramento delle strutture tettoniche sepolte, che illustra la complessità dell'arco delle Pieghe Romagnole e Ferraresi. I colori illustrano i caratteri delle unità geologiche affioranti. Modificato dalle Note Illustrative del Foglio CARG 203, Poggio Renatico. L'area analizzata si sviluppa nella parte meridionale del fascio di pieghe ferraresi.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

La Figura 3-5 illustra due profili attraverso le Pieghe Ferraresi. La sezione A è tratta da Toscani *et al.* (2009), mentre la precedente sezione B, localizzata alcuni km più ad est, è tratta da Pieri e Groppi (1981). Entrambe le sezioni mostrano un piano di sovrascorrimento (*thrust*) principale profondo, che verso l'esterno si apre in ventagli (*splay*) di faglie meno profonde, associati retroscorrimenti di ordine minore. In sezione A, sono evidenti scollamenti multipli a diversi livelli strutturali, mentre la sezione B mostra superfici di scollamento generalmente più profonde.

L'insieme delle Pieghe Ferraresi e delle Pieghe Romagnole rappresenta la culminazione strutturale che delimita, a nord, un ampio bacino di *piggy-back* (Ori e Friend, 1984), all'interno del quale si sono depositi notevoli spessori sedimentari che costituiscono la successione pliocenica marina e quaternaria marino-continentale (Figura 3-5). L'architettura stratigrafica dei depositi plio-quaternari è stata fortemente influenzata dalla deformazione tettonica e presenta quindi spessori massimi nelle aree di sinclinale e minimi sulle anticlinali sepolti (Correggiari *et al.*, 1992; Amorosi *et al.*, 1997 a, b; Di Dio e Caporale, 1998; Di Dio e Molinari, 2000). Questo andamento è evidente anche dalle abbondanti variazioni laterali di spessore delle successioni più recenti, in buona parte deposte in condizioni di pianura alluvionale. Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, deposto negli ultimi 350-450.000 anni (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998) e limitato al tetto da una superficie topografica, mostra spessori che variano da meno di 70 m in corrispondenza della culminazione dell'Anticlinale di Casaglia, ad anche oltre 400 m nelle aree di sinclinale più depresso. Queste grandi variazioni di spessore registrano quindi altrettanto grandi variazioni laterali di subsidenza, indotte anche dalla deformazione delle strutture tettoniche sismogenetiche. L'area di Poggio Renatico, qui considerata, è interessata da un fascio di faglie trasversali, che spezzano la continuità assiale delle pieghe, separando un blocco occidentale, che a nord comprende le pieghe di Casaglia, da uno orientale (Figura 3-6). A sud-ovest del territorio comunale, in Provincia di Bologna, né presente nel sottosuolo una struttura anticlinale che rappresenta la continuazione sud-orientale dell'accentuata piega di Mirandola. Questo alto è interessato da diverse faglie inverse, sovrascorrimenti e retroscorrimenti. L'alto strutturale è limitato a nord, nei pressi di Buonacompra, da una piega sinclinale ed a sud dal fianco di un'altra ampia sinclinale che si approfondisce in direzione di Sala Bolognese. La maggior parte del territorio comunale qui indagato corrisponde a parte della vasta area sinclinalica sviluppata a sud delle pieghe ferraresi più settentrionali. Lungo il fascio trasversale la struttura è particolarmente depressa ed è caratterizzata da elevati valori di subsidenza, come evidenziato anche dall'andamento delle superficie isobate della base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, recentemente pubblicate (Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna 1:250.000, Martelli *et al.*, 2017).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

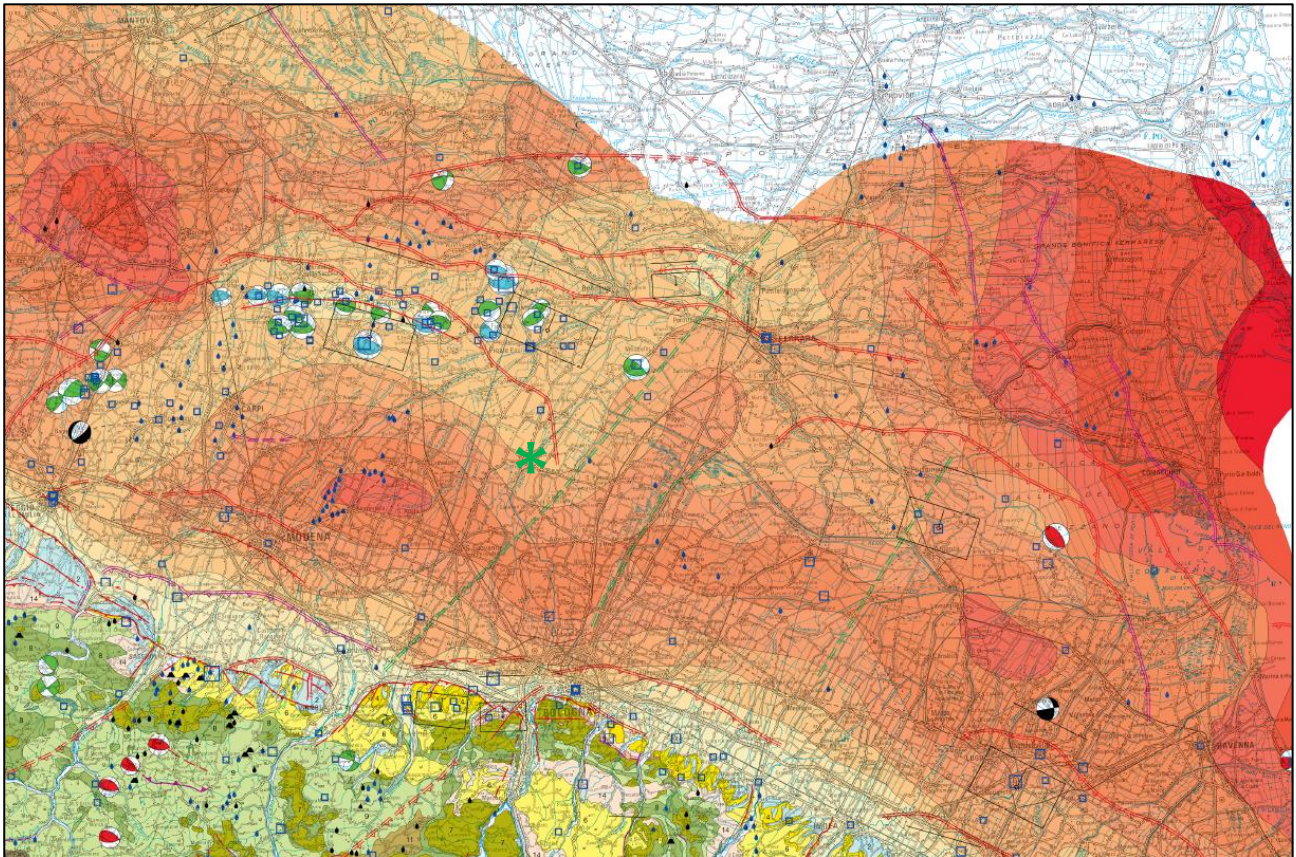


Figura 3-7 - Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017). L'area analizzata è indicata dall'asterisco.

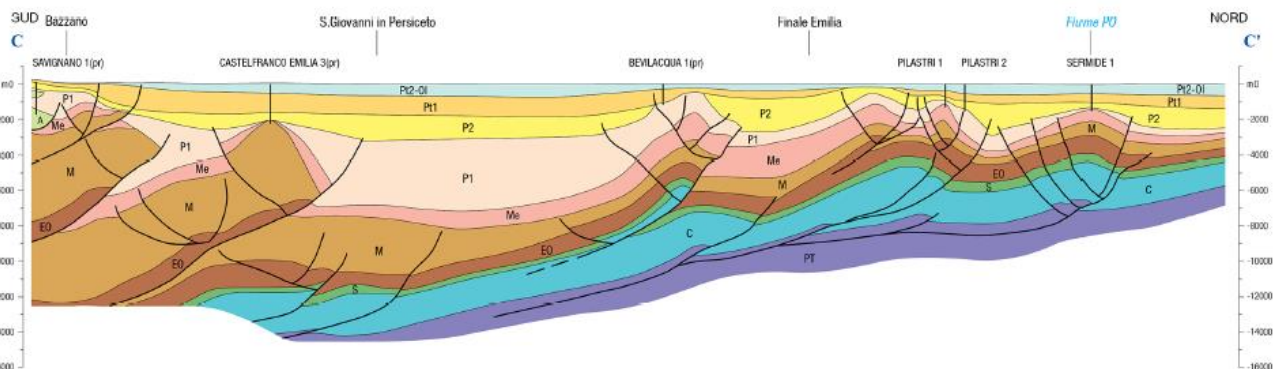


Figura 3-8 - Sezione geologica profonda C - C', da Bazzano (BO) al Po. Fonte: Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017).

## 4 Dati geognostici e geofisici

Per quanto concerne i metodi di analisi diretta del sottosuolo sono state esaminate le stratigrafie provenienti sia da sondaggi a carotaggio continuo, sia da sondaggi a distruzione di nucleo che, seppur meno dettagliate delle prime, offrono informazioni relative allo spessore ed alla tipologia dei corpi sepolti a maggiori profondità, e talvolta anche in relazione alla tipologia e profondità del substrato.

In relazione ai sistemi d'indagine indiretta, sono stati analizzati log parametrici derivanti da prove penetrometriche statiche (CPT), con punte elettriche (CPTe) e da piezoconi digitali (CPTU e SCPTU) oltre ai rapporti di prova di indagini geofisiche tipo Down-Hole, Cross-Hole, HVSR, MASW e ARRAY.

Sono inoltre state raccolte ed utilizzate ai fini di risposta sismica locale e valutazioni del rischio liquefazione prove di laboratorio quali colonne risonanti (CR) e triassiali cicliche (TC).

Le ubicazioni delle prove utilizzate per lo studio di microzonazione sismica sono riportate nella carta delle indagini - scala 1:10.000 (Tavola 1) descritta al paragrafo 8.1.

### 4.1 Indagini di repertorio

Nella prima fase dello studio di microzonazione sismica si è provveduto al reperimento delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili sul territorio comunale. Questa attività ha portato all'acquisizione della banca dati geognostica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, oltre che alla raccolta dei dati di sottosuolo disponibili presso l'archivio comunale, con particolare riguardo a quelli derivanti dalle indagini realizzate dopo il sisma del 2012.

Nel complesso si sono potute utilizzare ai fini della microzonazione sismica ben 564 prove pregresse di buona affidabilità, suddivise per numero e tipologia così come riportato in Tabella 4-1.

Da ultimo sono stati considerati dati di sottosuolo di altri Comuni, ubicati in prossimità del confine amministrativo. Tali dati, non riportati in carta, hanno permesso di aumentare le conoscenze geologiche e meglio definire geometrie e limiti sia dei corpi deposizionali cartografati sia delle aree a diverso rischio liquefazione lungo le fasce di confine.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
Sondaggi a carotaggio continuo	S	63
Sondaggi a distruzione di nucleo	SD	1
Sondaggi da cui sono stati prelevati campioni	SC	3
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)	CPT	259

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	CPTe	2
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTU	147
Pozzi per idrocarburi	PI	4
Prove sismiche in foro tipo Downhole	DH	1
Prove sismiche in foro tipo Crosshole	CH	4
Prove penetrometriche con cono sismico	SCPT	34
Stazioni microtremori a stazione singola	HVSR	15
Array sismici, ESAC/SPAC	ESAC_SPAC	1
Multi-channel Analysis of Surface Waves	MASW	16
Prove di colonna risonante	CR	10
Prove triassiali cicliche	TC	4
	<b>TOTALE</b>	<b>564</b>

**Tabella 4-1 - Numero di indagini pregresse raccolte ed utilizzate per lo studio, suddivise per tipologia.**

Le indagini ritenute effettivamente affidabili sono state raccolte, organizzate ed archiviate in una banca dati informatizzata e georeferenziata in ambiente GIS ESRI, la cui struttura risponde alle specifiche indicate dal Dipartimento nazionale della Protezione Civile (D.P.C.) per gli studi di microzonazione sismica. Un archivio informatizzato consente di strutturare e sistematizzare il patrimonio informativo disponibile, al fine di renderlo più facilmente consultabile, fruibile ed aggiornabile. La struttura della banca dati consente, inoltre, di associare al dato geografico (sito d'indagine) degli attributi alfanumerici relativi alle diverse prove realizzate come, ad esempio, profondità indagata, livello della falda, spessore degli orizzonti rilevati, ed altro. Oltre a ciò, ad ogni prova archiviata è possibile associare parametri tecnici come, ad esempio, colpi di avanzamento, valori di  $V_s$  misurati o frequenze di risonanza.

Per l'archiviazione dei dati acquisiti si è fatto ricorso all'applicativo software SoftMS versione 4.0.1 – messo a disposizione dal D.P.C.– che, attraverso maschere dedicate, consente l'inserimento dei dati all'interno di tabelle costituite da un insieme di record, gerarchicamente organizzate in modo da memorizzare in maniera indipendente le informazioni legate al sito di indagine, alle prove in esso realizzate ed ai parametri tecnici di ognuna di queste.

L'abbondanza e la distribuzione tutto sommato omogenea delle indagini geognostiche pregresse, ha consentito una chiara ed accurata ricostruzione del quadro litostratigrafico, con buona correlabilità generale delle proprietà geotecniche dei terreni presenti nei primi trenta metri di sottosuolo.

Allo stesso modo la buona disponibilità di indagini geofisiche, come SCPT e MASW, consente di definire adeguatamente le variazioni di  $V_{s30}$  alla scala dell'intero territorio indagato.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Al contrario, data la carenza e la dubbia affidabilità di diverse indagini di microtremore recuperate dagli archivi pubblici, si è ritenuto opportuno realizzare una nuova campagna di indagini HVSR, funzionale ad integrare i non sufficienti valori di frequenza recuperati e ad ottenere dati tra loro confrontabili in quanto acquisiti dalla stessa stazione singola.

### 4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

A supporto degli studi di microzonazione sismica del Comune di Poggio Renatico è stato necessario realizzare una campagna specifica di 21 indagini di microtremore sismico, con lo scopo di meglio caratterizzare dal punto di vista delle frequenze di risonanza i terreni presenti nelle aree indicate come suscettibili di trasformazioni urbanistiche e negli ambiti urbani consolidati.

In Tabella 4-2 si riporta una sintesi delle indagini realizzate con finalità di microzonazione sismica, mentre in seguito sono descritte le metodologie di esecuzione e di analisi delle stesse.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
INDAGINI REALIZZATE IN SITU		
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	21
	<b>TOTALE</b>	<b>21</b>

Tabella 4-2 - Numero e tipologia di indagini realizzate direttamente con finalità di microzonazione sismica.

#### 4.2.1 Indagini realizzate in situ

##### 4.2.1.1 Misure di microtremore a stazione singola (HVSR)

Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con tromografo digitale Tromino e sono finalizzate all'elaborazione degli spettri di base ed alle analisi HVSR del sottosuolo (Albarello e Castellaro, 2011). Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l'amplificazione sismica, considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

Il rumore di fondo (microtremore), ovunque presente sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici sia all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole ( $10-15 \text{ m/sec}^2$ ), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione di tipo "passivo".

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Tutte le onde elastiche dalla sorgente al sito, subiscono modifiche al loro tragitto ed attenuazioni in relazione alla natura del sottosuolo attraversato. Le informazioni stratigrafiche contenute nei microtremori sono sovrapposte al rumore casuale e possono essere estratte attraverso metodologie come quella di Nakamura dei rapporti spettrali (HVSr - *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Tale tecnica è utilizzata anche per la determinazione dell'amplificazione sismica locale e per stimare le frequenze principali di risonanza del sottosuolo, dati molto utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture (Castellaro, 2012; Castellaro e Mulargia, 2011).

Il metodo considera i microtremori derivanti da onde di superficie (onde di *Rayleigh*) nelle componenti orizzontali e verticali, che vengono amplificate per effetto di sito a causa della presenza di discontinuità stratigrafiche nel sottosuolo. È quindi possibile ricostruire la forma spettrale del microtremore, in cui i picchi alle diverse frequenze rappresentano il rapporto tra la componente orizzontale e verticale dei segnali registrati.

Le 21 misure tromografiche realizzate a supporto dello studio di microzonazione sismica (Tabella 4-3) sono state eseguite con un tromografo digitale Tromino modello "Zero", orientato secondo il nord geografico, e georiferite tramite GPS con precisione variabile tra 2 e 3 m. L'acquisizione dei dati è stata effettuata generalmente con frequenza di campionamento di 128 Hz e con tempo di singola registrazione pari a 30 minuti.

In Tabella 4-3 sono riportati i principali dati associati a ciascuna delle 21 misure di microtremore realizzate per lo studio di microzonazione. Alcune acquisizioni sono state scartate e ripetute, in quanto soggette ad evidenti disturbi di natura antropica o meteorica che ne hanno pregiudicato l'interpretazione.

La campagna di misure realizzate per lo studio di microzonazione, ha consentito la caratterizzazione sismica dei terreni presenti negli ambiti d'interesse, attraverso l'individuazione della loro frequenza fondamentale di risonanza. Le misure realizzate con la medesima stazione singola, hanno fornito una serie di dati con caratteristiche omeogene e tra loro confrontabili, che correlati con i dati geognostici disponibili hanno permesso di stimare la profondità di quello che può essere definito "substrato sismico" (paragrafo 5.1).

PROVA	ID_SPU	DATA	F0	A0	DURATA	lat WGS84	long WGS84
HVSR01	038018P1HVSR1	30/05/2016	0.75	2.0	30 min	44.7790	11.4290
HVSR02_1	038018P2HVSR2	03/06/2016	0.75	2.6	30 min	44.7723	11.4512
HVSR03	038018P3HVSR3	30/05/2016	0.88	2.8	30 min	44.8181	11.4902
HVSR04	038018P4HVSR4	30/05/2016	0.81	2.2	30 min	44.8169	11.4967
HVSR05	038018P5HVSR5	30/05/2016	0.72	2.1	30 min	44.8001	11.5251
HVSR06	038018P6HVSR6	30/05/2016	0.78	2.2	30 min	44.7963	11.5415

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

HVSR07	038018P7HVSR7	30/05/2016	0.94	2.8	30 min	44.7831	11.5566
HVSR08	038018P8HVSR8	30/05/2016	0.78	2.9	30 min	44.7868	11.5465
HVSR09	038018P9HVSR9	31/05/2016	0.69	2.2	30 min	44.7661	11.4801
HVSR10	038018P10HVSR10	01/06/2016	0.75	2.2	30 min	44.7639	11.4938
HVSR11	038018P11HVSR11	31/05/2016	0.75	2.9	30 min	44.7679	11.4908
HVSR12	038018P12HVSR12	01/06/2016	0.75	2.2	30 min	44.7640	11.5049
HVSR13	038018P13HVSR13	01/06/2016	0.72	2.2	30 min	44.7511	11.5217
HVSR14	038018P14HVSR14	03/06/2016	0.63	2.9	30 min	44.7355	11.5592
HVSR15	038018P15HVSR15	03/06/2016	0.69	2.7	30 min	44.7310	11.5499
HVSR18	038018P16HVSR16	13/06/2016	0.63	2.7	30 min	44.7268	11.5480
HVSR20	038018P17HVSR17	31/05/2016	0.69	2.3	30 min	44.7581	11.4811
HVSR Scuola Elementare	038018P418HVSR439	20/06/2017	1.02	2.1	30 min	44.7670	11.4867
HVSR S9 CARG	038018P419HVSR440	20/06/2017	0.44	2.5	30 min	44.7192	11.5676
HVSR Marrara 01	038018P420HVSR441	20/06/2017	0.72	1.9	30 min	44.7183	11.5780
HVSR Montalbano 20	038018P417HVSR438	20/06/2017	0.7	1.7	30 min	44.7487	11.4979

$f_0$  = Frequenza naturale

$A_0$  = Ampiezza del picco di  $f_0$

**Tabella 4-3 - Principali dati associati alle 21 misure di microtremore a stazione singola HVSR di nuova esecuzione.**

## 5 Modello del sottosuolo

Le prime centinaia di metri di sottosuolo dell'area indagata sono interamente costituite da successioni terrigene estremamente spesse, che registrano un andamento globalmente regressivo, mostrando una evoluzione da ambienti marini profondi a condizioni continentali di pianura alluvionale. Queste potenti unità sedimentate di età quaternaria presentano spessori estremamente variabili ed un grado di litificazione molto basso o del tutto assente. La loro organizzazione stratigrafica è stata fortemente controllata sia dalla ciclicità eustatica e climatica, legata all'alternanza di fasi glaciali ed interglaciali, sia dalla deformazione tettonica sin-sedimentaria di questa porzione sismicamente attiva dell'Avanfossa Appenninica.

Le unità quaternarie sono caratterizzate da un progressivo aumento della rigidità e della velocità di propagazione delle onde sismiche, causata da fenomeni come il costipamento e parziale cementazione dei sedimenti granulari ed il consolidamento dei litotipi coesivi, legato all'espulsione di fluidi dal sottosuolo, come acqua e metano biogenico. L'aumento della rigidità nel sottosuolo si attua in modo progressivo, ma non spazialmente uniforme, dato che superfici di non deposizione e discordanza stratigrafica corrispondano a bruschi aumenti di questo parametro meccanico, come dimostrano le misure di  $V_s$  eseguite in pozzo, anche a grandi profondità, nell'ambito di precedenti studi di microzonazione sismica (cfr. Ordinanza



## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

70/2012, Minarelli *et al.* 2016). Tali superfici corrispondono spesso ai limiti disconformi fra Sintemi e Subsintemi, a riflettori sismici e passaggi fra unità sismo-stratigrafiche.

Per l'individuazione delle profondità dei limiti discordanti e per la loro classificazione sono stati utilizzati diversi metodi geofisici, interpretati nel contesto stratigrafico regionale del sottosuolo. I principali contrasti di impedenza associati a tali limiti, sono stati identificati mediante misure di microtremore sismico che hanno permesso di ricostruire la variazione del rapporto tra le componenti orizzontali e verticali (H/V o HVSR) alle diverse frequenze.

L'analisi di questi dati, unita ad una stima delle proprietà meccaniche delle diverse unità stratigrafiche note dal contesto regionale ha permesso l'individuazione, con buona affidabilità, della superficie che genera il principale contrasto di impedenza rilevabile con la tecnica HVSR.

La superficie è associata ad un aumento non troppo marcato della rigidità e della velocità di propagazione delle onde sismiche, all'interno della successione del Quaternario superiore.

Questo limite stratigrafico, come dettagliato al paragrafo 5.2.2 e 6.1, è posto a tra 70 e 85 m di profondità e corrisponde al tetto del Subsistema di Bazzano "AES<sub>6</sub>".

I dati di velocità delle onde di taglio, rilevati mediante down-hole profondo nel limitrofo Comune di Terre del Reno, mostrano come a tali profondità i valori di Vs siano ancora inferiori a 400 m/s, quindi non compatibili con quelli caratterizzanti il "bedrock sismico" di riferimento per le analisi di risposta sismica locale.

Tale livello di riferimento deve quindi essere ricercato a profondità più elevate a cui corrisponda un picco a più bassa frequenza.

Sulla base delle misure disponibili e dei dati noti sul contesto stratigrafico risulta plausibile che tale picco a più bassa frequenza sia correlabile con il tetto dei depositi del Quaternario Marino (QM), che possono essere quindi verosimilmente assunti come bedrock sismico per l'area di studio.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

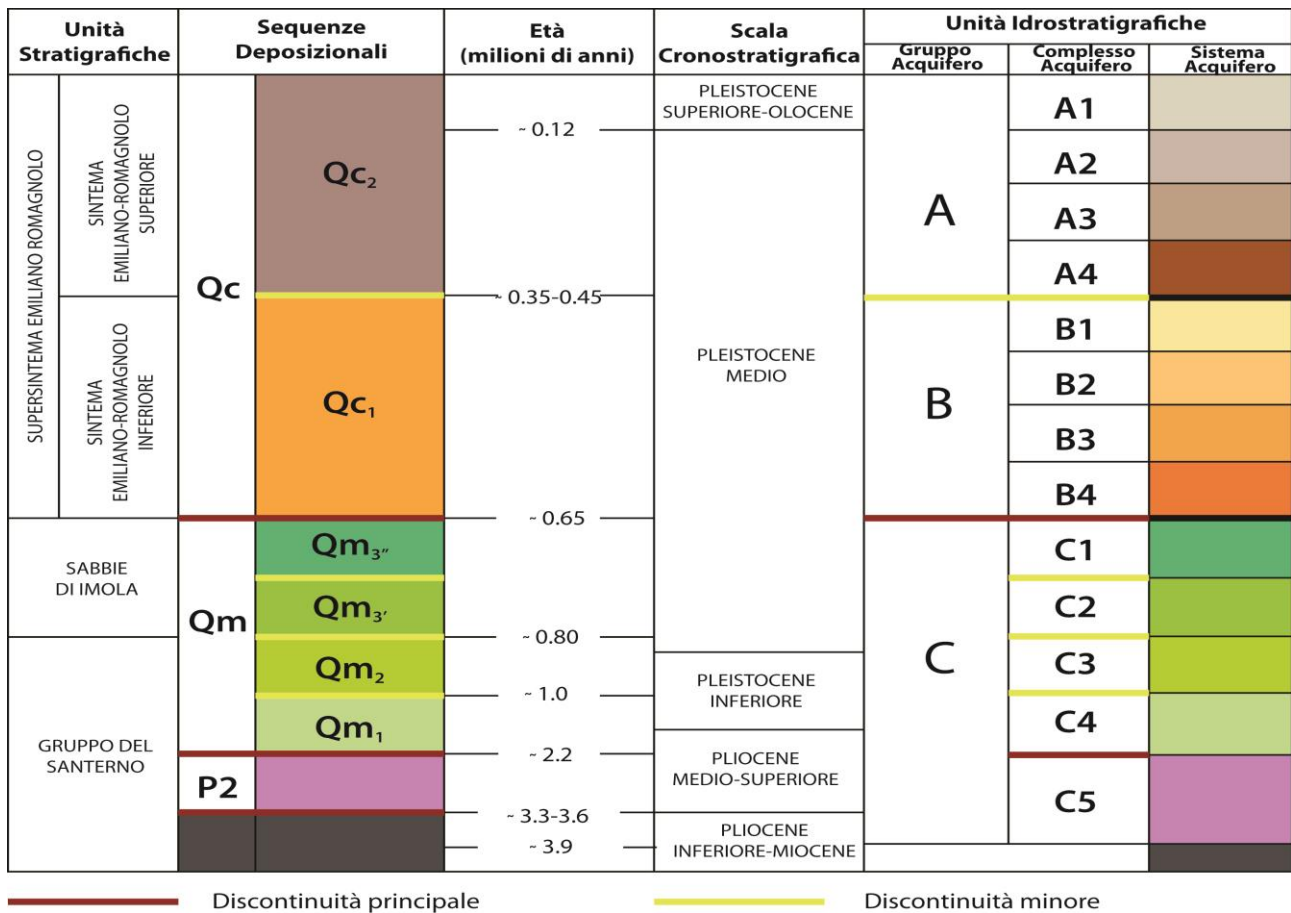


Figura 5-1 - Schema stratigrafico dei depositi plio-quadernari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche e superfici di discontinuità, sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche (da Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

## 5.1 Substrato

Con il termine “substrato” sono qui definite tutte le successioni sottostanti il Supersistema Emiliano-Romagnolo. Sopra i depositi prevalentemente carbonatici mesozoici e paleogenici, poggiano le potenti successioni in gran parte terrigene del Neogene. Queste ultime sono qui costituite per tutto il Miocene da fanghi depositi in ambienti marini profondi anche anossici, ricoperti da spesse unità torbiditiche plioceniche. Le unità plioceniche sono state progressivamente coinvolte nella rapida deformazione tettonica compressiva di questa porzione dell’Avanfossa appenninica che ne ha fortemente influenzato spessori e ambienti deposizionali.

Questi movimenti hanno indotto diffuse superfici di discordanza stratigrafica e lacuna, legate a periodi di non deposizione od erosione (Ghielmi *et al.*, 2010). Lacune e discordanze, anche angolari, sono particolarmente diffuse nelle aree corrispondenti ad anticlinali sepolte, come quella di Renazzo-Corporeno o di Casaglia. Fra questi due fasci anticlinali complessi si sviluppa una ampia zona di sinclinale dove le

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

sequenze Plioceniche superano spessori di 1500 m e non presentano discordanze stratigrafiche marcate.

Buona parte dell'area di studio corrisponde a questa struttura sinclinalica fortemente subsidente.

Nell'area di sinclinale considerata, approssimativamente al limite Plio-Pleistocene, è presente invece una discontinuità stratigrafica associata ad un netto cambio litologico e di facies deposizionale, indotto da una fase di importante riorganizzazione strutturale. In questa area, la sedimentazione torbiditica è stata infatti bruscamente interrotta, al limite delle sequenze deposizionali PL3 e PL4 (Ghielmi *et al.*, 2010). Questa evoluzione è stata determinata dall'innalzamento del fondo marino a nord-ovest dell'area considerata, indotto da movimenti tettonici. Gli spessi corpi di arenarie e arenarie-conglomeratiche plioceniche sono quindi limitati superiormente da una superficie netta, a cui seguono centinaia di metri di argille a foraminiferi platonici, passanti superiormente a facies di prodelta e sabbie di fronte deltizio. Queste sequenze, inquadrare nell'unità stratigrafica del Quaternario Marino, si sono deposte nella prosecuzione occidentale dell'antico Mare Adriatico, soggetta a forte subsidenza ed apporto sedimentario.

Nell'area considerata tale unità è in gran parte costituita da argille di mare aperto con spessori di oltre 500 m. Nel contesto in esame i depositi deltizi si sovrappongono, in condizioni di relativa continuità, ai fanghi di mare più aperto e profondo.

Il Quaternario Marino è frequentemente limitato al tetto da una discordanza stratigrafica anche angolare che lateralmente passa in condizioni di paraconcordanza. La discordanza è legata alla fase di riorganizzazione strutturale datata a circa 650.000 (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

Questa discordanza erosiva, che corrisponde ad un significativo riflettore sismico, viene proposta come il tetto del substrato sismico.

## 5.2 Terreni di copertura

La porzione medio-superiore della successione quaternaria è formata da sedimenti non litificati e poco consolidati, attribuibili, in base alle proprietà elasto-meccaniche e alla posizione stratigrafica ai "terreni di copertura" (cfr. parte introduttiva capitolo **5** **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Questi terreni presentano comunque notevoli variazioni petrofisiche e litologiche interne oltre a caratteri geometrici che ne hanno permesso la suddivisione in una serie di unità stratigrafiche descritte di seguito.

### 5.2.1 Quaternario prevalentemente continentale (Supersistema Emiliano-Romagnolo)

La discordanza regionale sopradescritta è stata scelta come limite inferiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo, formato, in questa area, da depositi fluviali continentali, intercalati inferiormente da livelli

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

marini, costieri o salmastri, maggiormente sviluppati verso est. Il Supersistema Emiliano-Romagnolo registra la prosecuzione di un'evoluzione complessivamente regressiva, che porta da condizioni marine alle attuali condizioni francamente continentali. Nell'area indagata, questo Supersistema si è accumulato nella fascia di interazione fra i sedimenti di provenienza appenninica e quelli del Po. Nel tempo geologico, il fronte dei sedimenti di provenienza appenninica è migrato verso nord, a discapito di quelli padani.

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è formato da ripetute alternanze di livelli dominati da sedimenti granulari sabbiosi ed altri ricchi di sedimenti fini. Questa alternanza è stata fortemente influenzata dal susseguirsi di fasi glaciali ed interglaciali. Le fasi glaciali sono registrate da depositi fluviali di pianura alluvionale fredda, con granulometrie marcatamente più grossolane di quelle delle fasi interglaciali. Le fasi di massima trasgressione sono caratterizzate da influenze marine, qui sviluppate soprattutto nella parte bassa del Supersistema.

### 5.2.2 Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è bipartito in Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e Superiore (AES) da una superficie di discordanza, influenzata dalla deformazione tettonica delle Pieghe Ferraresi sepolte, fra 400.000 ed 350.000 anni fa circa. In aree di culminazione anticlinale, la superficie di discordanza può sovrapporsi direttamente al Pliocene, mentre in gran parte del territorio di Poggio Renatico diventa meno marcata.

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è organizzato in cinque cicli deposizionali trasgressivo-regressivi, con uno spessore di circa 30-40 metri ciascuno, in corrispondenza delle aree di sinclinale come quella di Poggio Renatico. Le facies marino-costiere interessano maggiormente i due cicli inferiori, mentre i restanti risultano prevalentemente continentali. Questa evoluzione testimonia sia il progressivo riempimento del bacino sedimentario, sia lo spostamento verso nord degli assi depocentrali e del reticolo fluviale padano; spostamento legato al prevalere degli apporti terrigeni rispetto alla creazione di spazio di accomodamento sedimentario.

Lo sviluppo di questi cicli sedimentari è stato controllato dalle grandi fluttuazioni glacio-eustatiche, che hanno influenzato sia il clima dei bacini idrografici padano-appenninici, sia il livello eustatico. Il limite inferiore dei cicli è formato da una superficie netta di disattivazione della sedimentazione fluviale grossolana singliale. La porzione trasgressiva basale di ciascun ciclo è caratterizzata dalla presenza di limi e sabbie prevalentemente continentali, seguiti da argille organiche di piana alluvionale, palude e piana costiera, che solamente nella parte inferiore del Sintema mostrano intercalazioni di sabbie litorali o fanghi salmastri. Le porzioni regressive sono invece costituite da spesse successioni di depositi fini di piana

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

alluvionale, con subordinati corpi nastriformi isolati di sabbie di canale fluviale. Nella parte superiore dei cicli, le sabbie di canale fluviale divengono più abbondanti, fino alla formazione di corpi sabbiosi continui, lateralmente estesi in ampie porzioni di sottosuolo della pianura ferrarese. Questi grandi corpi di sabbie sono stati depositi in ambienti di media pianura alluvionale fredda, durante le fasi di stazionamento basso singlaciale del livello del mare.

Nell'ambito del Progetto di Cartografia Geologica Nazionale, i cinque cicli che compongono il Sintema sono stati suddivisi in 2 cicli inferiori definiti rispettivamente Subsintema di *Liano* (AES<sub>4</sub>) e Subsintema di *Torre Stagni* (AES<sub>5</sub>) (cfr. AES indifferenziato - Foglio 204 Portomaggiore e Foglio 203 Poggio Renatico), ed in 3 cicli superiori, inquadrati nei Subsintemi di *Bazzano* (AES<sub>6</sub>), di *Villa Verucchio* (AES<sub>7</sub>) e di *Ravenna* (AES<sub>8</sub>). Nella porzione più recente del Subsintema di Ravenna, è stata ulteriormente distinta l'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>) di età post-romana.

I cicli più antichi registrano eventi trasgressivi maggiormente sviluppati verso l'entroterra rispetto a quelli più recenti. I tre Subsintemi superiori (AES<sub>6</sub>, AES<sub>7</sub>, AES<sub>8</sub>), presentano tra loro forti analogie nell'organizzazione stratigrafica.

Questi cicli sono i meglio definiti a scala regionale dato il numero relativamente alto di pozzi che li attraversano, compresi diversi sondaggi a carotaggio continuo appositamente eseguiti per la cartografia geologica (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998; Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000 - es. Fogli 202-203-204). La base di ciascun Subsintema, corrisponde ad una superficie erosiva incisa in sabbie fluviali singlaciali o, in aree meridionali soggette a forti apporti appenninici, ad un paleosuolo carbonatico maturo sviluppato su depositi continentali. La fase di massima ingressione della linea di costa è registrata da depositi palustri dulcicoli di pianura costiera, ricchi di argille organiche e torbe o da depositi salmastri costieri. La fase di stazionamento alto è invece caratterizzata da sabbie di canale fluviale intercalate a potenti successioni di fanghi di piana interalvea. La parte superiore dei Subsintema AES<sub>6</sub> è caratterizzata da sabbie grossolane di media pianura alluvionale, che passano lateralmente a sedimenti fini di pianura fredda. Nell'area considerata, la parte superiore del Subsintema di Bazzano (AES<sub>6</sub>) è dominata da grandi corpi di sabbie di Po, il cui limite meridionale è migrato progressivamente verso nord nelle fasi successive.

L'organizzazione stratigrafica delle prime decine di metri di sottosuolo è particolarmente rilevante sia ai fini geotecnici sia per quelli di microzonazione sismica. La legislazione vigente impone infatti di valutare, in questi contesti, la velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) nei primi 30 m di sottosuolo, qui costituiti da sedimenti del Pleistocene terminale e dell'Olocene, intervalli di tempo che corrispondono a fasi dell'ultima glaciazione e all'intervallo post-glaciale. La porzione singlaciale è ascritta al Subsintema di Villa Verucchio (AES<sub>7</sub>),

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

mentre la parte più recente è attribuita al Subsistema di Ravenna (AES<sub>8</sub>), di cui è affiorante solo l'intervallo di età post-romana, attribuito all'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>).

In gran parte del territorio comunale, la porzione superiore del Subsistema di Villa Verucchio (AES<sub>7</sub>) è costituita di alternanze di sabbie ed abbondanti limi di provenienza appenninica. Nei pressi del confine settentrionale, invece, lo stesso intervallo è formato da estesi corpi di sabbie grossolane di riempimento di canali del Po. La porzione superiore di AES<sub>7</sub> si è infatti deposta nella zona di interferenza fra i canali a treccia del Po ed i fiumi di origine appenninica, che presentavano canali di dimensioni relativamente più contenute e granulometrie più fini. Il Subsistema di Ravenna (AES<sub>8</sub>) è formato prevalentemente da sedimenti fini, spesso deposti in ambienti umidi, stagni e paludi di acqua dolce. La parte inferiore è però più ricca di limi, che possono mostrare paleosuoli carbonatici maturi, assenti nella porzione superiore dell'unità. All'interno di questi sedimenti di piana interalvea sono presenti corpi sabbiosi nastriformi, deposti dal Reno e da altri fiumi appenninici, e nella parte più settentrionale, nei pressi di Coronella e Madonna Boschi anche dal fiume Po.

La distribuzione dei sedimenti affioranti è ovviamente nota con dettaglio e accuratezza molto maggiore rispetto a quella dei corpi di sottosuolo. L'area indagata è interamente formata da sedimenti della porzione più recente dell'Olocene, di età post-romana, ascritti all'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>). Questi sedimenti sono stati deposti in gran parte in età moderna, a partire dal XVI secolo dopo Cristo. Il territorio è ampiamente dominato da argille e argille torbose deposte in aree di depressione interalvea e palude dulcicola, associate a plaghe di limi sabbiosi di argine naturale. Solamente nella zona di Gallo affiora un corpo di riempimento del canale di Reno del XVII secolo costituito da sabbie limose e limi sabbiosi.

Una più completa descrizione delle parti affioranti dell'Unità di Modena è fornita nel paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, che analizza in dettaglio la carta geologica appositamente rilevata per la realizzazione di questo studio.

## 6 Interpretazioni e incertezze

In questo capitolo vengono descritte le principali scelte interpretative che hanno guidato lo sviluppo logico e delineato la struttura dello studio, nel tentativo di evidenziare ragioni ed elementi a sostegno delle stesse, ma valutando al contempo le inevitabili incertezze e criticità rilevate.

## 6.1 Frequenza naturale dei terreni ( $f_0$ )

Le misure di rumore ambientale a stazione singola sono fortemente influenzate dal contesto del sito nel quale viene effettuata la registrazione e dalle condizioni meteorologiche.

Tra i fattori ambientali il vento è l'agente atmosferico con maggiore influenza, in grado di indurre perturbazioni a bassa frequenza (< 1 Hz) non legate alle caratteristiche del sito.

I transienti principali sono provocati da sorgenti di breve durata, come il passaggio di automobili e treni, la cui influenza dipende dall'energia e dalla distanza. Il traffico urbano di una strada ad elevato scorrimento ad esempio, è una sorgente di onde a grande ampiezza e breve periodo, mentre i disturbi di natura industriale possono generare picchi estremamente ampi, o massimi locali multipli, in alcun modo connessi alle condizioni geologiche del sito.

Al fine di ridurre gli effetti appena descritti e limitare quindi le incertezze indotte alle misure, sono stati utilizzati alcuni accorgimenti durante l'esecuzione dei microtremori di cui al paragrafo 4.2.1.

Lo strumento di misura è stato inserito in una piccola buca scavata nel terreno in modo da ridurre al minimo le perturbazioni indotte dal vento sul segnale. La rimozione della parte superficiale del suolo ha permesso anche di migliorare l'accoppiamento tra i sensori accelerometrici ed il terreno, oltre che di verificare l'assenza di interfacce intermedie (es. cemento, fondo stradale, stabilizzato), responsabili di inversioni di velocità in grado di determinare una non corretta interpretazione della curva HVSR.

È stato ritenuto opportuno ripetere alcune misure, ad esempio quella denominata HVSR02\_1, a causa di frequenti attività temporalesche che hanno interessato l'area nel periodo di acquisizione delle registrazioni. Nelle aree a prevalente vocazione industriale tra Gallo e Poggio Renatico, la rimozione dei disturbi connessi alle attività produttive durante la fase di analisi del dato ha consentito di ottenere un risultato affidabile. Le perturbazioni riscontrate in quasi tutte le misure realizzate sono imputabili ai numerosi transienti legati al traffico urbano. Alcune misure realizzate presso Poggio Renatico risultavano affette da disturbi legati al traffico ferroviario, rimossi in fase di elaborazione del dato, evitando così di pregiudicare il risultato dell'analisi.

L'assenza di misure in località Case Reno Sabbioni e Case Borgatti, aree poco estese e scarsamente abitate (cfr. Tavola 3), è stata invece determinata dall'assenza di aree pubbliche liberamente accessibili.

La serie di microtremori realizzati a supporto dello studio di microzonazione ha fornito dati con distribuzione areale e caratteristiche strumentali omogenee che, correlati con i dati geognostici e geofisici disponibili hanno permesso di stimare la profondità di quello che può essere definito "substrato sismico"

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

(paragrafo 5.1) attraverso la caratterizzazione delle superfici di disconformità stratigrafica in grado di influenzare il moto sismico in superficie.

Le frequenze fondamentali ( $f_0$ ) acquisite mostrano valori generalmente inferiori ad 1 Hz con ampiezze di picco non elevate (Tabella 4-3). Frequenze maggiori, comprese tra 0,9 e 1,02 Hz, caratterizzano la porzione occidentale dell'ambito di Poggio Renatico con una tendenza alla diminuzione nei valori di  $f_0$  spostandosi sia verso est che verso nord, come possibile verificare negli ambiti di Coronella e Madonna Boschi. Le aree più occidentali e orientali del territorio comunale, rispettivamente rappresentate dagli ambiti di Chiesanuova e Gallo, sembrano invece essere caratterizzate da frequenze più basse, generalmente comprese tra 0,63 e 0,75 Hz, con punte minime di 0,44 Hz nella porzione più orientale.

Queste differenze possono essere messe in relazione all'evoluzione geologica e tettonica dell'area che ha determinato una fascia centrale maggiormente subsidente, orientata nord-est – sud-ovest e sviluppata tra Poggio Renatico e Coronella, e due fasce laterali a minor subsidenza che interessano le porzioni più occidentali e orientali del territorio comunale.

Vista la disponibilità nell'area di profili di velocità delle onde di taglio (Vs) fino a notevoli profondità (Minarelli *et al.*, 2016) e di alcuni sondaggi stratigrafici profondi, si è tentato di mettere in relazione le frequenze acquisite con le misure HVSR ed i principali contrasti di impedenza presenti nel sottosuolo. Rispetto ai dati disponibili le frequenze più elevate, presenti nella fascia centrale maggiormente subsidente sviluppata tra Poggio Renatico e Coronella, sono state messe in relazione al tetto del Subsistema di Bazzano (AES<sub>6</sub>), costituito da una spesso ed esteso corpo di sabbie di Po deposte durante la glaciazione rissiana. Tali sabbie si rivengono a profondità variabili comprese tra i 70 e 85 metri circa rispetto alla superficie topografica.

Frequenze minori, tipiche soprattutto delle aree più orientali, devono invece essere legate a contrasti di impedenza posti a maggior profondità rispetto al tetto del Subsistema di Bazzano (AES<sub>6</sub>).

Le curve di ellitticità ottenute dalle elaborazioni delle singole registrazioni, mostrano sovente picchi di frequenza ampi che non permettono di discriminare i singoli contributi di superfici di discontinuità stratigrafica caratterizzate da blandi contrasti e poste a poca distanza le une delle altre. Risulta quindi spesso impossibile mettere in relazione tali frequenze ad una ben definita superficie.

Una buona correlazione tra principale contrasto di impedenza e frequenza di risonanza pare invece possibile nella porzione più orientale del territorio indagato, dove è stato registrato il valore di frequenza fondamentale più basso pari a 0,44 Hz. La misura è stata effettuata in corrispondenza del sondaggio stratigrafico denominato "S9", realizzato nell'ambito del progetto nazionale di cartografia geologica CARG (Foglio 203 - Poggio Renatico) e spinto sino alla profondità di 220 metri.



## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Utilizzando i vincoli e le interpretazione stratigrafiche derivate dal sondaggio e le velocità delle onde di taglio proposte in Minarelli *et al.*, 2016 è stato possibile correlare la frequenza ottenuta con il tetto del Sintema Emilia-Romagnolo Inferiore (AEI), qui posto alla profondità di 187 metri rispetto alla superficie topografica.

### 6.2 Substrato rigido

Un tassello fondamentale per la comprensione della struttura e dell'organizzazione stratigrafica del sottosuolo profondo è stato fornito dalle sezioni stratigrafiche realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna nell'ambito del progetto nazionale di cartografia geologica CARG (v. Allegato 1).

Confrontando e correlando i dati geofisici con le sezioni stratigrafiche disponibili si è tentato di associare i principali contrasti di impedenza ad alcune delle discontinuità stratigrafiche che separano le principali unità riconosciute a scala regionale. Andamento e posizione stratigrafica di queste superfici sono stati ricostruiti mediante correlazioni su scala regionale di sondaggi stratigrafici profondi e pozzi esplorativi.

Per meglio vincolare tale modellazione sono state appositamente realizzate alcune misure di microtremore in corrispondenza di pozzi per idrocarburi o carotaggi profondi presenti nel territorio comunale di Poggio Renatico.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

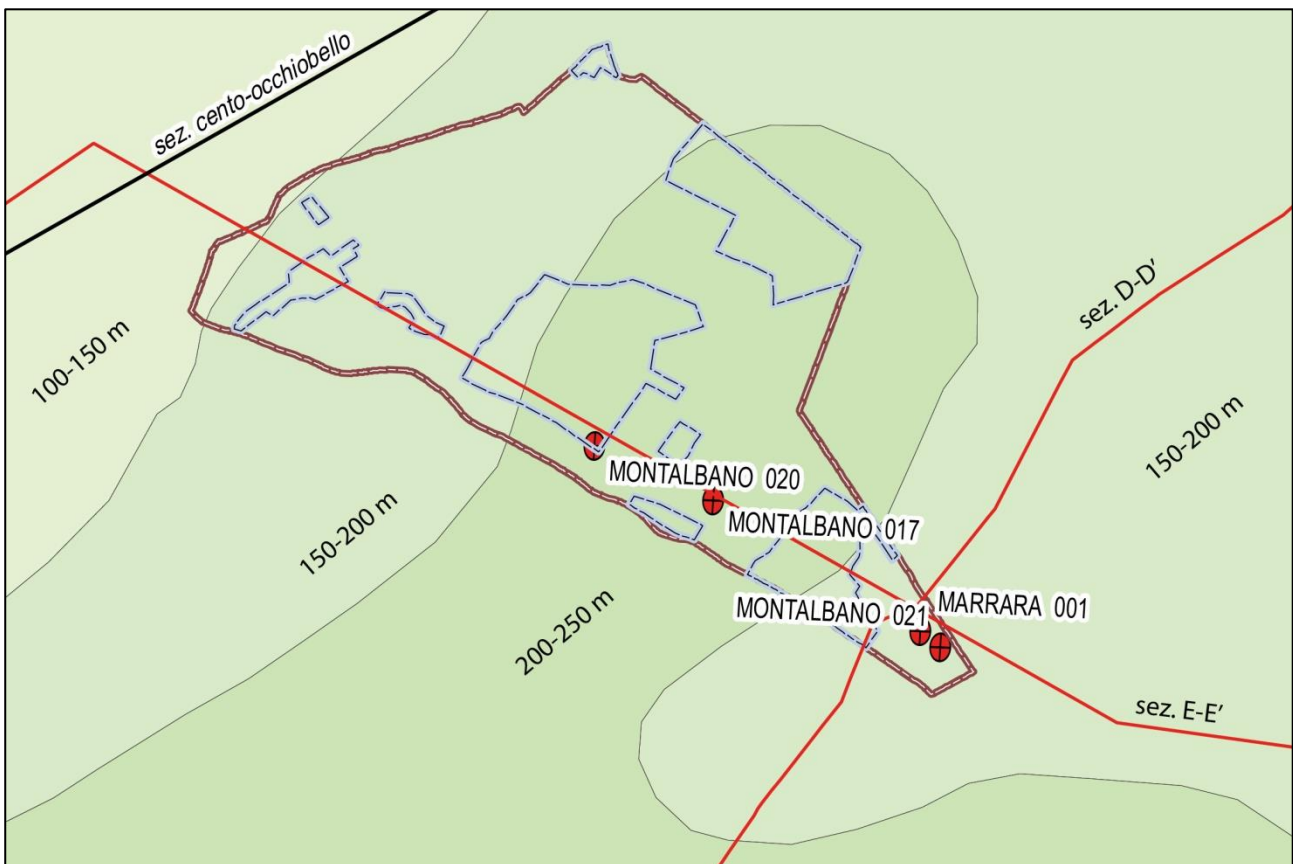


Figura 6-1 – mappa delle isobate della base di del Sintema AES rispetto al livello medio mare. In mappa sono riportate le ubicazioni dei sondaggi profondi di esplorazione petrolifera e le tracce delle principali sezione stratigrafiche utilizzate per la ricostruzione del sottosuolo profondo.

Come discusso al paragrafo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** i limiti delle registrazioni delle isure di microtremore spesso non hanno consentito di associare in maniera affidabile le frequenze ottenute con le superfici di discontinuità stratigrafica. Alla scala comunale è comunque stato possibile osservare alcune variazioni nei valori di frequenza acquisiti.

Frequenze maggiori, comprese tra 0,9 e 1,02 Hz, caratterizzano la porzione occidentale dell'ambito di Poggio Renatico con una tendenza alla diminuzione nei valori di  $f_0$  spostandosi sia verso est che verso nord (es. ambiti di Coronella e Madonna Boschi). Le aree più occidentali e orientali del territorio comunale, su cui sorgono gli abitati di Chiesanuova e Gallo, sembrano invece essere caratterizzate da frequenze più basse, generalmente comprese tra 0,63 e 0,75 Hz, con punte minime di 0,44 Hz nella porzione più orientale (v. paragrafo 6.1).

In analogia con quanto riscontrato in altri recenti studi di microzonazione sismica della pianura emiliana, è stato possibile correlare i più elevati valori di frequenza fondamentale  $f_0$ , che spesso mostrano anche i

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

picchi di maggior ampiezza, con il tetto del Subsistema di Bazzano (AES<sub>6</sub>), datato circa 120.000-130.000 anni (Figura 5-1 - Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

Secondo i sondaggi e le sezioni geologiche disponibili la profondità di tale superficie varia tra i 70 e gli 85 m circa e determina il contrasto di impedenza individuato attraverso le misure di microtremore che registrano un picco principale a frequenza variabile tra 1,02 e 0,75 Hz. Tali valori risultano confermati dalla relazione che lega le frequenze fondamentali dei terreni, desunte da analisi di sismica passiva, con le velocità delle onde di taglio disponibili e la profondità di un dato contrasto di impedenza.

Il tetto del Subsistema di Bazzano (AES<sub>6</sub>), che marca il passaggio tra spessi depositi singlaciali di sabbie di riempimento di canali anastomizzati di Po e sedimenti coesivi fini di piana interalvea post-glaciale, non può, però, essere considerato come *bedrock sismico*. Valori di velocità delle onde di taglio acquisiti in pozzo mediante tecniche cross-hole e down-hole (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016; Minarelli *et al.*, 2016), dimostrano, infatti, come le unità stratigrafiche della successione del Quaternario superiore siano caratterizzate, in aree di bassa pianura alluvionale, da valori di Vs in media inferiori ai 400 m/s, e quindi non compatibili con quelli caratteristici del “*bedrock sismico*” di riferimento per analisi di risposta sismica locale. Per le stesse ragioni anche le frequenze più basse rilevate nella zona orientale del territorio comunale faticano ad essere messe in relazione con contrasti di impedenza rappresentativi di un possibile “*bedrock sismico*”. Di fatto anche il valore minimo di 0,44 Hz rilevato a Gallo è riconducibile alla discontinuità stratigrafica tra il Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) e quello Inferiore (AEI), datata circa 350.000-400.000 anni. I valori di Vs registrati al passaggio tra queste due unità non sono compatibili con quelle caratteristiche di un “*bedrock sismico*”.

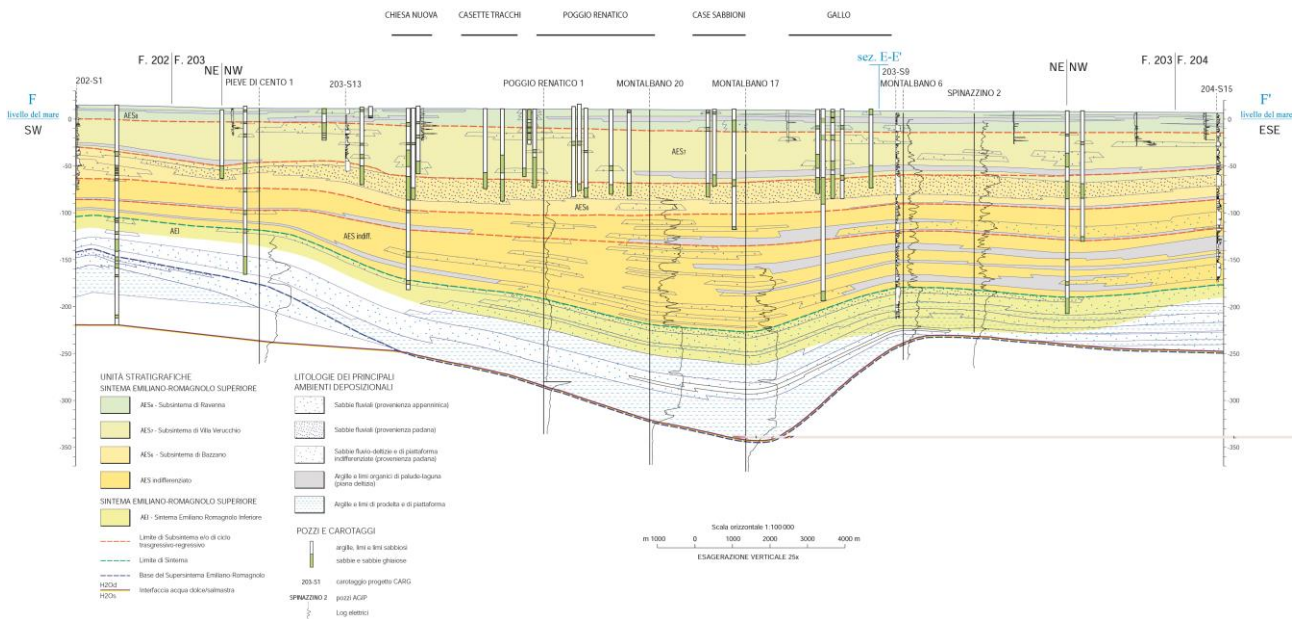
Sulla base delle considerazioni effettuate ed utilizzando esclusivamente i dati e le sezioni stratigrafiche profonde (v. Allegato 1) il *bedrock sismico* è stato tentativamente posto in corrispondenza del passaggio tra i depositi prevalentemente continentali inquadrati nell'unità del Supersistema Emiliano-Romagnolo e quelli sottostanti appartenenti all'unità del Quaternario Marino.

Come visibile nella sezione stratigrafica di Figura 6-2 (E-E' v. Allegato 1), questa superficie è stata ampiamente deformata dalla tettonica attiva, ragion per cui essa si rinviene a profondità variabile all'interno del territorio comunale.

L'evoluzione tettonica dell'area ha infatti determinato una depressione strutturale maggiormente subsidente nella fascia centrale del territorio indagato. Questa struttura, orientata nord-est sud-ovest, si sviluppata tra Poggio Renatico e Coronella. In questa fascia il passaggio tra le unità del Supersistema Emiliano-Romagnolo e del Quaternario Marino è stato assunto ad una profondità di 340 m, valore medio derivato dalla interpolazione dei dati stratigrafici disponibili.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Nelle due fasce laterali a minor subsidenza, in cui si sviluppano gli ambiti di Chiesanuova, Madonna Boschi e la porzione più orientale di quello di Gallo, il *bedrock sismico* è stato invece posto alla profondità di 270 m dalla superficie topografica (cfr. Figura 6-2).



**Figura 6-2 – sezione stratigrafica E-E' (cfr. sezione F-F' foglio CARG 203 "Poggio Renatico").** La sezione, orientata NW-SE, ricostruisce l'andamento dei principali corpi deposizionali nella porzione meridionale del territorio comunale di Poggio Renatico. La sezione è stata utilizzata per ricostruire l'andamento del substrato sismico, supposto in corrispondenza della base del Supersistema Emiliano-Romagnolo.

### 6.3 Terreni suscettibili di liquefazione

La principale criticità che interessa il territorio comunale di Poggio Renatico è legata alla presenza diffusa di terreni potenzialmente suscettibili di liquefazione.

In occasione del sisma 2012 le manifestazioni di fenomeni di liquefazione non sono state così evidenti come in altre aree del ferrarese (es. San Carlo, Mirabello), tuttavia effetti isolati sono stati mappati in alcune aree rurali del territorio e al margine sud-occidentale del abitato di Poggio Renatico.

La scarsa occorrenza del fenomeno, probabilmente legata a distanza epicentrale e propagazione delle sollecitazioni sismiche, contrasta però con la presenza di condizioni predisponenti la liquefazione in diverse aree appartenenti agli ambiti comunali indagati.

Già negli studi eseguiti dalla Regione Emilia-Romagna durante la fase di emergenza sismica erano stati mappati, in maniera speditiva, limiti ed estensione delle aree con presenza di terreni potenzialmente liquefacibili (Martelli e Romani, 2013).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Le analisi condotte per gli approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello, hanno permesso di rivedere e modificare i precedenti limiti areali, sulla base di nuove indagini, pubbliche e private, realizzate nell'ambito del processo di ricostruzione post-sisma.

Le nuove perimetrazioni sono state riportate nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica e indicate come Zone di Attenzione per Liquefazione (Tavole 4, paragrafo 8.4).

L'elevato numero di indagini penetrometriche con piezocono (CPTu) acquisite ha permesso di meglio discriminare spessore e geometrie dei principali corpi liquefacibili in ambiti privi di dati pregressi o con dati di scarsa affidabilità. Al contempo, queste prove hanno consentito la realizzazione di diverse decine di analisi puntuali del rischio liquefazione, effettuate mediante metodi semplificati (cfr. paragrafo 7.2.1). L'interpretazione dei risultati ottenuti rispetto al contesto geologico locale ha portato alla definizione dei limiti delle Zone di Suscettibilità per Liquefazioni ed alla loro suddivisione in base al diverso grado di rischio (paragrafo 8.6).

Gli approfondimenti di terzo livello hanno dunque ridotto notevolmente le incertezze relative alla distribuzione ed alle caratteristiche geotecniche dei corpi suscettibili a liquefazione. Il contesto deposizionale e l'elevata variabilità laterale nella distribuzione dei depositi sedimentari non consentono comunque di escludere in senso assoluto la presenza di locali livelli granulari saturi in acqua anche in quelle porzioni di territorio non classificate come "Zone di Attenzione per Liquefazione". Questa affermazione risulta ancora più veritiera nelle aree meno documentate da prove geotecniche, che nel caso specifico sono generalmente confinate in zone rurali.

Per tali ragioni la valutazione sito specifica del rischio di liquefazione è comunque sempre delegata ad ulteriori indagini geotecniche da realizzarsi, ad esempio, in occasione di nuove fasi di pianificazione territoriale e/o nella progettazione esecutiva di eventuali interventi.

## 7 Metodologie di elaborazione e risultati

La finalità di uno studio di microzonazione sismica è quella di giungere ad una suddivisione del territorio esaminato in zone a diversa pericolosità sismica, in base alla loro suscettibilità ad effetti locali cosismici. Le zone sono classificate come **stabili**, nel caso in cui non si ipotizzino effetti locali di alcuna natura e come **suscettibili di amplificazioni locali** qualora siano attese esclusivamente amplificazioni del moto sismico dovute all'assetto litostratigrafico e morfologico. Qualora siano invece possibili, oltre ai fenomeni di amplificazione, effetti di deformazione permanente del territorio, le zone sono identificate come **suscettibili di instabilità** e per esse sono richiesti approfondimenti di terzo livello.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Una corretta suddivisione in aree a diversa pericolosità, deve essere necessariamente basata su un modello di sottosuolo di dettaglio, la cui definizione compete al geologo. La bontà del modello è certamente funzione della disponibilità di dati geognostici e geofisici, ma altrettanto dell'esperienza del tecnico che lo definisce.

In contesti di pianura in cui la ricostruzione del sottosuolo è basata essenzialmente su informazioni derivanti da indagini puntuali, in numero anche molto rilevante e con distribuzione eterogenea, il compito del geologo può risultare particolarmente gravoso.

La ricostruzione dei primi 30 m di sottosuolo è stata dunque basata sia sulla tradizionale interpretazione delle facies sedimentarie e delle geometrie deposizionali, sia sulle informazioni estratte dalle sezioni stratigrafiche prodotte dalla Regione Emilia-Romagna a supporto del Foglio geologico n.203 "Poggio Renatico" (v. Allegato 1).

Nei paragrafi seguenti sono descritte le metodologie utilizzate per la definizione dei modelli sismo-stratigrafici, per la determinazione dei fattori di amplificazione locale e per la definizione del grado di rischio associato alle diverse aree classificate come instabili.

La conformazione geologica del territorio e gli effetti di sito osservati durante gli eventi sismici del 2012, consentono di attribuire alle aree studiate problematiche sostanzialmente connesse ad amplificazione del moto sismico e liquefazione dei terreni. Nelle aree classificate come instabili per liquefazione sono state, pertanto, eseguite stime puntuali del potenziale di liquefazione mediante metodologie semplificate proposte dalla letteratura internazionale. Tali metodi sono stati applicati e verificati sul territorio comunale in seguito agli eventi sismici del 2012.

### **7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali**

Gli eventi sismici del 2012 hanno permesso di verificare come l'area di pianura emiliana colpita sia stata interessata da fenomeni di amplificazione stratigrafica (eg. Bordoni *ed al.*, 2012; Govoni *ed al.*, 2014). La determinazione del valore dell'amplificazione attesa può essere ottenuta sia attraverso l'utilizzo degli abachi di riferimento nazionali (ICMS - Gruppo di lavoro MS, 2008) o regionali (D.G.R. 2193/2015), sia mediante analisi di risposta sismica locale.

Per le aree classificate come soggette ad amplificazioni locali ed instabilità (cfr. liquefazione) la quantificazione dell'accelerazione massima attesa in superficie (PGA) è stata ottenuta mediante calcolo della risposta sismica locale (RSL). I risultati sono stati confrontati con i fattori di amplificazione sismica proposti dai nuovi (D.G.R. 2193/2015) e vecchi (D.A.L. 112/2007) abachi regionali, al fine di verificare la

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

coerenza dei coefficienti di amplificazione ottenuti attraverso i due differenti approcci e valutare l'applicabilità degli uni o degli altri all'intero territorio in esame.

### 7.1.1 Risposta sismica locale con modellazioni numeriche

Sulla base dei dati stratigrafici, geofisici e geotecnici disponibili e considerando l'andamento del *bedrock sismico* nell'area di studio (paragrafo 6.2), sono state eseguite modellazioni numeriche di risposta sismica locale in siti "tipo" per i quali sono disponibili dati accurati per la definizione del modello sismo-stratigrafico anche in profondità (Tabella 7-1). I sei modelli proposti derivano dalle combinazioni ottenute considerando sia le variazioni di profondità del *bedrock sismico* sia le principali differenze stratigrafiche riscontrate nelle varie MOPS.

Le MOPS 2001, 2002 e 2003 costituiscono circa l'88% degli ambiti di studio e la quasi totalità dei centri abitati, rappresentando quindi le condizioni geologiche e stratigrafiche più frequenti alla scala comunale. Le restanti MOPS differiscono dalle precedenti essenzialmente per i caratteri stratigrafici più superficiali, differenze che in questo caso influenzano solo marginalmente la risposta sismica. Questo ha permesso di estendere i risultati delle modellazioni effettuate sulle tre aree maggiori alla totalità delle MOPS considerate.

Sulla base di queste considerazioni sono state realizzate le analisi di risposta sismica locale denominate:

- RSL zona 2001 (Tabella 7-2), sia con *bedrock* profondo sia con *bedrock* più superficiale. Questa modellazione è stata ritenuta valida, per affinità di risultati, anche per le MOPS 2004 e 2005, che insieme alla 2001 costituiscono gran parte del territorio comunale;
- RSL zona 2002 (Tabella 7-3), sia con *bedrock* profondo sia con *bedrock* più superficiale. La modellazione, realizzata per la fascia di territorio interessata dalle sabbie di Reno sepolte a debole profondità, è stata ritenuta valida per affinità di risultati anche per la MOPS 2006 relativa all'attuale zona di alveo del fiume Reno;
- RSL zona 2003 (Tabella 7-4), sia con *bedrock* profondo sia con *bedrock* più superficiale. Quest'ultimo modello rappresenta esclusivamente la porzione più settentrionale del territorio comunale (Figura 7-1) in cui sono sviluppati spessi corpi di riempimento di sabbie di canale di Po.

Le analisi di risposta sismica locale sono procedure di calcolo numerico che permettono di ricavare le funzioni di trasferimento del moto sismico dal *bedrock* alla superficie. Tali procedure necessitano pertanto della definizione di un modello sismo-stratigrafico profondo che descriva le caratteristiche geotecniche e geofisiche delle successioni sedimentarie che ricoprono il *bedrock sismico*.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

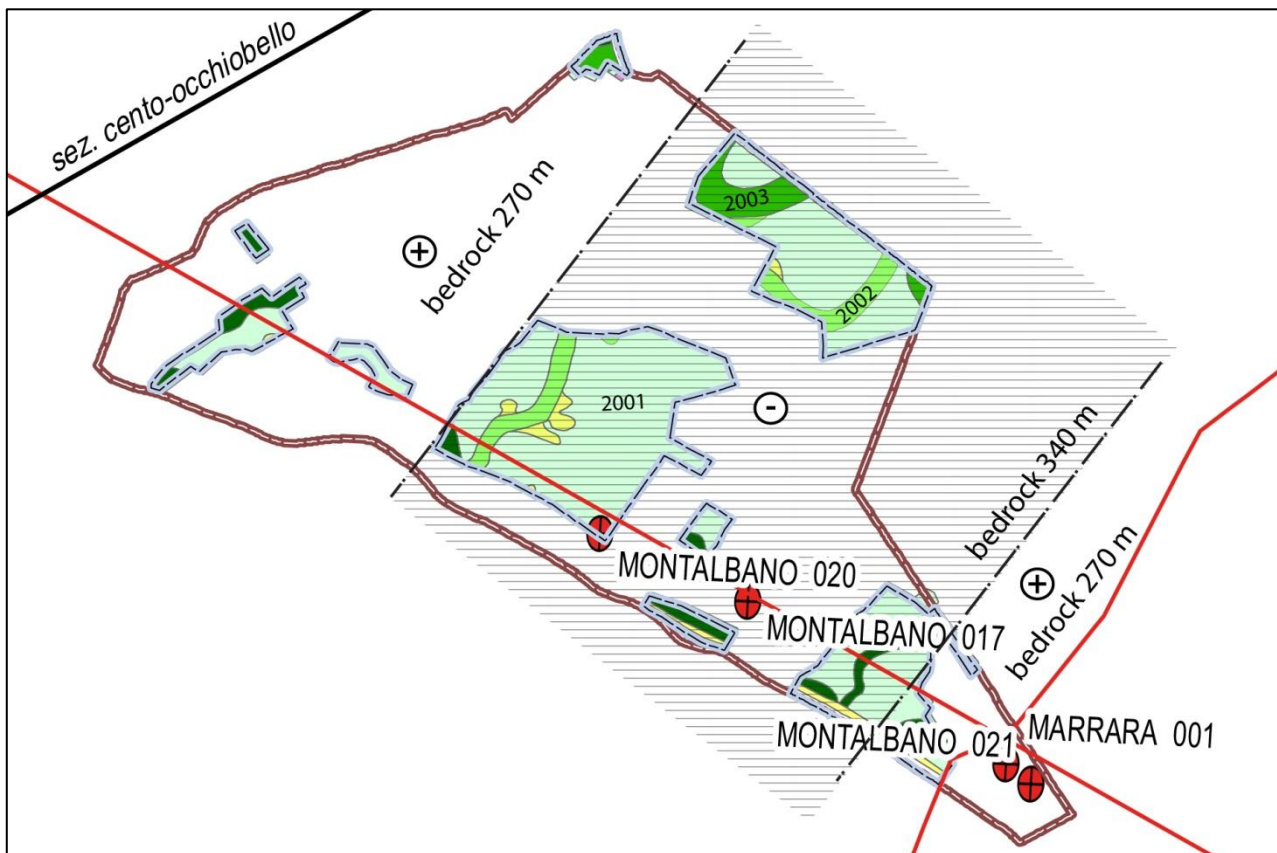


Figura 7-1 – Schematizzazione dell'andamento del substrato sismico all'interno del Comune di Poggio Renatico e distribuzione delle MOPS utilizzate come riferimento per i modelli di risposta sismica locale (RLS zona 2011, RSL zona 2002, RSL zona 2003). In mappa sono riportate le ubicazioni dei sondaggi profondi di esplorazione petrolifera e le tracce delle principali sezione stratigrafiche utilizzate per la ricostruzione del sottosuolo profondo.

I modelli ricostruiti per questo studio si basano sui risultati di indagini geognostiche e geofisiche in situ ed in laboratorio eseguite per la caratterizzazione dei terreni di copertura costituenti le prime decine di metri di sottosuolo. Le unità stratigrafiche più profonde sono state invece descritte utilizzando dati di letteratura e correlazioni a scala regionale attraverso il confronto con sezioni stratigrafiche e dati di pozzo.

I modelli sismo-stratigrafici e geotecnici sono stati definiti associando alle varie unità individuate: (i) i valori di velocità delle onde di taglio  $V_s$  ottenuti da misure dirette disponibili (es. con sismici e down-hole) o da letteratura (Minarelli *et al.*, 2016); (ii) le curve di decadimento del modulo di taglio ( $G/G_0 - \gamma$ ) e di incremento del fattore di smorzamento ( $D - \gamma$ ) ottenute da indagini pregresse eseguite con dilatometro sismico (Amoroso *et al.*, 2014) e da prove dinamiche di laboratorio su campioni indisturbati prelevati sul territorio o estratte da letteratura (per i livelli a maggiore profondità); (iii) i valori del peso per unità di volume stimati dalle prove in situ e di laboratorio disponibili.



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

In Tabella 7-1 sono indicate, per ciascuna delle modellazioni di risposta sismica locale, le indagini utilizzate per la ricostruzione del modello sismo-stratigrafico di riferimento.

	RSL zona 2001		RSL zona 2002		RSL zona 2003	
	Bedrock 270 m	Bedrock 340 m	Bedrock 270 m	Bedrock 340 m	Bedrock 270 m	Bedrock 340 m
<b>Descrizione</b>	Prevalenti argille-limose (MOPS 2001, 2004, 2005)		Sabbie di Reno sub-affioranti (MOPS 2002, 2006)		Grossi spessori di sabbie di Po (MOPS 2003)	
<b>Stratigrafia superficiale</b>	038018P31CPTU33 (fino a 30 metri)		038018P383CPTU400 (fino a 30 metri)		038018P499CPTU547 (fino a 30 metri)	
<b>Stratigrafia profonda</b>	038018P444S465 (fino a 220 metri) e 038018P468SD491 (fino a 140 metri)					
<b>Bedrock sismico</b>	Sezioni D-D' e E-E' (Allegato 1) - 038018P418HVSR439 - 038018P4HVSR4 038018P489PI535 (Marrara1) 038018P490PI536 (Montalbano 17) 038018P491PI537 (Montalbano 20) 038018P492PI538 (Montalbano 21)					
<b>Vs superficiale</b>	038018P471DH512 (fino a 50 metri)		038018P330SCPT346 (fino a 30 metri)		038018P474SCPT516 (fino a 30 metri)	
<b>Vs profonda</b>	038018P221ESAC_SPAC235 (fino a 121 metri) Correlazione con DH Mirabello					

Tabella 7-1 - Indicazione delle indagini e delle correlazioni su cui si basa la ricostruzione dei tre modelli sismo-stratigrafici di riferimento per le simulazioni di risposta sismica locale.

Le correlazioni tra dati stratigrafici, sezioni geologiche (cfr. Allegato 1), e curve H/V ottenute da tramite misure di microtremore (paragrafo 6.1), hanno permesso di individuare alcuni dei principali contrasti di impedenza e stimare la profondità e la natura della bedrock sismico (paragrafi 5.1 e 6.2). Il bedrock, posto in corrispondenza del tetto del Quaternario Marino (QM), è stato assunto ad una profondità pari a 340 m per modellare la zona centrale del territorio interessata dalla depressione strutturale (Figura 7-1) e di 270 m per i modelli relativi alle fasce contigue a minor subsidenza.

La stima delle velocità delle onde di taglio (Vs) dei terreni di copertura compresi tra il bedrock ed i primi 50 m di sottosuolo è stata ricavata estrapolando i valori di Vs acquisiti, mediante down-hole profondo, nell'ambito della microzonazione sismica del Comune di Mirabello (Minarelli *et al.*, 2016). L'estrapolazione dei dati di Mirabello è stata possibile considerando la contiguità delle aree, il medesimo contesto geologico-strutturale e la presenza delle stesse unità stratigrafiche inquadrato all'interno del Supersistema Emiliano-Romagnolo. Nell'estrapolare ed associare le velocità alle unità stratigrafiche, sono state considerate opportune correzioni nei valori di Vs legati al diverso spessore, seppellimento e conseguente carico litostatico a cui sono sottoposte le unità stratigrafiche a Poggio Renatico rispetto alle stesse presenti

**MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO**

a Mirabello. Queste stime sono state effettuate verificando l'accordo con i principali contrasti di impedenza identificati dai picchi di H/V.

Come velocità sismica del bedrock è stato infine assunto un valore plausibile rispetto alla natura dello stesso, in grado di poter riprodurre ampiezze similari a quelle del picco a più bassa frequenza osservato dalle misure di HVSr (paragrafo 6.1). In Tabella 7-2, Tabella 7-3 e Tabella 7-4 sono riportate le sintesi dei modelli sismo-stratigrafici proposti.

MOP2001 bedrock superficiale				MOP2001 bedrock profondo			
profondità (m)	spessore (m)	soil type	Vs (m/s)	profondità (m)	spessore (m)	soil type	Vs (m/s)
0	3	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	126	0	3	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	126
3	2	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	100	3	2	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	100
5	2,5	Poggio Renatico (14.1 m) - A	150	5	2,5	Poggio Renatico (14.1 m) - A	150
7,5	2,5	Poggio Renatico (14.1 m) - A	160	7,5	2,5	Poggio Renatico (14.1 m) - A	160
10	2,5	Poggio Renatico (14.1 m) - A	180	10	2,5	Poggio Renatico (14.1 m) - A	180
12,5	2,5	Poggio Renatico (14.1 m) - A	210	12,5	2,5	Poggio Renatico (14.1 m) - A	210
15	4	Poggio Renatico (10.1 m) - SL	230	15	4	Poggio Renatico (10.1 m) - SL	230
19	3	Poggio Renatico (23.6 m) - L	220	19	3	Poggio Renatico (23.6 m) - L	220
22	3	Poggio Renatico (29.1 m) - SL	254	22	3	Poggio Renatico (29.1 m) - SL	254
25	5	Poggio Renatico (25.6 m) - AL	230	25	5	Poggio Renatico (25.6 m) - AL	230
30	3	Poggio Renatico (29.1 m) - SL	254	30	3	Poggio Renatico (29.1 m) - SL	254
33	8	Poggio Renatico (33.5 m) - L+A	260	33	8	Poggio Renatico (33.5 m) - L+A	260
41	3	Poggio Renatico (29.1 m) - SL	282	41	3	Poggio Renatico (29.1 m) - SL	282
44	4	Poggio Renatico (44.3 m) - L+A	262	44	4	Poggio Renatico (44.3 m) - L+A	262
48	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	278	48	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	278
53	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	295	53	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	295
58	3	Poggio Renatico (44.3 m) - L+A	306	58	3	Poggio Renatico (44.3 m) - L+A	306
61	3	Poggio Renatico (23.6 m) - L	311	61	3	Poggio Renatico (23.6 m) - L	311
64	2	Poggio Renatico (29.1 m) - SL	315	64	2	Poggio Renatico (29.1 m) - SL	315
66	3	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	319	66	3	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	319
69	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	325	69	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	325
75	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	330	75	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	330
81	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	334	81	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	334
87	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	348	87	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	349
91	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	356	93	11	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	360
99	3	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	362	104	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	369
102	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	367	109	7	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	375
107	3	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	371	116	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	381
110	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	377	121	11	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	389
118	7	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	385	132	9	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	399
125	3	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	390	141	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	405
128	6	Poggio Renatico (23.6 m) - L	394	146	8	Poggio Renatico (23.6 m) - L	411
134	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	399	154	7	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	418
139	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	407	161	15	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	427
151	9	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	416	176	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	437
160	2	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	420	188	4	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	443
162	11	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	426	192	14	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	450
173	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	434	206	13	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	459
183	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	439	219	6	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	466
187	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	448	225	19	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	474
205	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	457	244	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	481
213	7	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	462	248	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	486
220	16	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	470	259	18	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	494
236	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	481	277	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	505
254	16	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	491	295	45	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	522
270	Half-Space	Bedrock	800	340	Half-Space	Bedrock	800

**Tabella 7-2 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato come input per il calcolo della RSL zona 2001, sia per bedrock superficiale (270 m) sia per bedrock profondo (340 m).**

MOP2002 bedrock superficiale				MOP2002 bedrock profondo			
profondità (m)	spessore (m)	soil type	Vs (m/s)	profondità (m)	spessore (m)	soil type	Vs (m/s)
0	3	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	126	0	3	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	126
3	2	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	100	3	2	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	100
5	3	Poggio Renatico (7.1 m) - SL	170	5	3	Poggio Renatico (7.1 m) - SL	170
8	5	Poggio Renatico (10.1 m) - SL	200	8	5	Poggio Renatico (10.1 m) - SL	200
13	3	Poggio Renatico (14.1 m) - A	150	13	3	Poggio Renatico (14.1 m) - A	150
16	3	Poggio Renatico (14.1 m) - A	200	16	3	Poggio Renatico (14.1 m) - A	200
19	3	Poggio Renatico (14.1 m) - A	240	19	3	Poggio Renatico (14.1 m) - A	240
22	3	Poggio Renatico (29.1 m) - SL	254	22	3	Poggio Renatico (29.1 m) - SL	254

**MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO**

25	5	Poggio Renatico (25.6 m) -AL	230		25	5	Poggio Renatico (25.6 m) -AL	230
30	3	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	254		30	3	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	254
33	8	Poggio Renatico (33.5 m) -L+A	260		33	8	Poggio Renatico (33.5 m) -L+A	260
41	3	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	282		41	3	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	282
44	4	Poggio Renatico (44.3 m) -L+A	262		44	4	Poggio Renatico (44.3 m) -L+A	262
48	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	278		48	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	278
53	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	295		53	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	295
58	3	Poggio Renatico (44.3 m) -L+A	306		58	3	Poggio Renatico (44.3 m) -L+A	306
61	3	Poggio Renatico (23.6 m) -L	311		61	3	Poggio Renatico (23.6 m) -L	311
64	2	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	315		64	2	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	315
66	3	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	319		66	3	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	319
69	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	325		69	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	325
75	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	330		75	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	330
81	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	334		81	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	334
87	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	348		87	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	348
91	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	356		91	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	356
99	3	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	362		99	3	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	362
102	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	367		102	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	367
107	3	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	371		107	3	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	371
110	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	377		110	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	377
118	7	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	385		118	7	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	385
125	3	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	390		125	3	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	390
128	6	Poggio Renatico (23.6 m) -L	394		128	6	Poggio Renatico (23.6 m) -L	394
134	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	399		134	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	399
139	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	407		139	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	407
151	9	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	416		151	9	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	416
160	2	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	420		160	2	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	420
162	11	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	426		162	11	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	426
173	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	434		173	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	434
183	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	439		183	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	439
187	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	448		187	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	448
205	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	457		205	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	457
213	7	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	462		213	7	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	462
220	16	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	470		220	16	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	470
236	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	481		236	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	481
254	16	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	491		254	16	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	491
270	Half-Space	Bedrock	800		340	Half-Space	Bedrock	800

**Tabella 7-3 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato come input per il calcolo della RSL zona 2002, sia per bedrock superficiale (270 m) sia per bedrock profondo (340 m).**

MOPS2003 bedrock superficiale				MOPS2003 bedrock profondo			
profondità (m)	spessore (m)	soil type	Vs (m/s)	profondità (m)	spessore (m)	soil type	Vs (m/s)
0	3	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	126	0	3	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	126
3	2	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	100	3	2	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	100
5	4	Poggio Renatico (14.1 m) - A	151	5	4	Poggio Renatico (14.1 m) - A	151
9	3	Mirabello blast Po pre-glaciale (9-17 m) -SL	188	9	3	Mirabello blast Po pre-glaciale (9-17 m) -SL	188
12	4	Mirabello blast Po pre-glaciale (9-17 m) -SL	207	12	4	Mirabello blast Po pre-glaciale (9-17 m) -SL	207
16	5	Mirabello blast Po pre-glaciale (9-17 m) -SL	227	16	5	Mirabello blast Po pre-glaciale (9-17 m) -SL	227
21	5	Mirabello blast Po pre-glaciale (9-17 m) -SL	232	21	5	Mirabello blast Po pre-glaciale (9-17 m) -SL	232
26	4	Poggio Renatico (25.6 m) -AL	215	26	4	Poggio Renatico (25.6 m) -AL	215
30	3	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	254	30	3	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	254
33	8	Poggio Renatico (33.5 m) -L+A	260	33	8	Poggio Renatico (33.5 m) -L+A	260
41	3	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	282	41	3	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	282
44	4	Poggio Renatico (44.3 m) -L+A	262	44	4	Poggio Renatico (44.3 m) -L+A	262
48	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	278	48	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	278
53	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	295	53	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	295
58	3	Poggio Renatico (44.3 m) -L+A	306	58	3	Poggio Renatico (44.3 m) -L+A	306
61	3	Poggio Renatico (23.6 m) -L	311	61	3	Poggio Renatico (23.6 m) -L	311
64	2	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	315	64	2	Poggio Renatico (29.1 m) -SL	315
66	3	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	319	66	3	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	319
69	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	325	69	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	325
75	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	330	75	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	330
81	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	334	81	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	334
87	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	348	87	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	348
91	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	356	91	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	356
99	3	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	362	99	3	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	362
102	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	367	102	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	367
107	3	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	371	107	3	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	371
110	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	377	110	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	377
118	7	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	385	118	7	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	385
125	3	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	390	125	3	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	390
128	6	Poggio Renatico (23.6 m) -L	394	128	6	Poggio Renatico (23.6 m) -L	394
134	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	399	134	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	399
139	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	407	139	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	407
151	9	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	416	151	9	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	416
160	2	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	420	160	2	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	420
162	11	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	426	162	11	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) -L + A - RER	426
173	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	434	173	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	434

**MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO**

183	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	439		219	6	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	466
187	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	448		225	19	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	474
205	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	457		244	4	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	481
213	7	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	462		248	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	486
220	16	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	470		259	18	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	494
236	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	481		277	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	505
254	16	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	491		295	45	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	522
270	Half-Space	Bedrock	800		340	Half-Space	Bedrock	800

**Tabella 7-4 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato come input per il calcolo della RSL zona 2003, sia per bedrock superficiale (270 m) sia per bedrock profondo (340 m).**

Definiti i modelli sismo-stratigrafici (Tabella 7-2, Tabella 7-3, Tabella 7-4), sono state eseguite alcune simulazioni numeriche di analisi di risposta sismica locale. Le simulazioni, realizzate mediante software STRATA (Rathje e Kottke, 2013), sono state effettuate variando sia i profili stratigrafici dei primi 30 m di sottosuolo, sia la profondità del substrato sismico considerando i due casi definiti per l'area di studio (*bedrock* a 270 e 340 m). I risultati delle simulazioni espressi in termini di spettri di risposta e accelerazioni di picco sono riportati nelle pagine seguenti.

Come accelerogrammi di input (*bedrock*) per il calcolo della risposta sismica locale, sono stati utilizzati i tre segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193/2015 (Figura 7-2). I segnali sono stati scalati in modo da far corrispondere la loro accelerazione massima con il valore di  $a_{grf}$  derivante dai punti della griglia della mappa di pericolosità sismica elaborata da INGV per il territorio nazionale. Tale valore può essere assunto pari a 0,154 g, in considerazione di un valore medio tra quelli dei due punti ricadenti nel territorio del Comune di Poggio Renatico e di quelli che ricadono nel suo immediato intorno.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

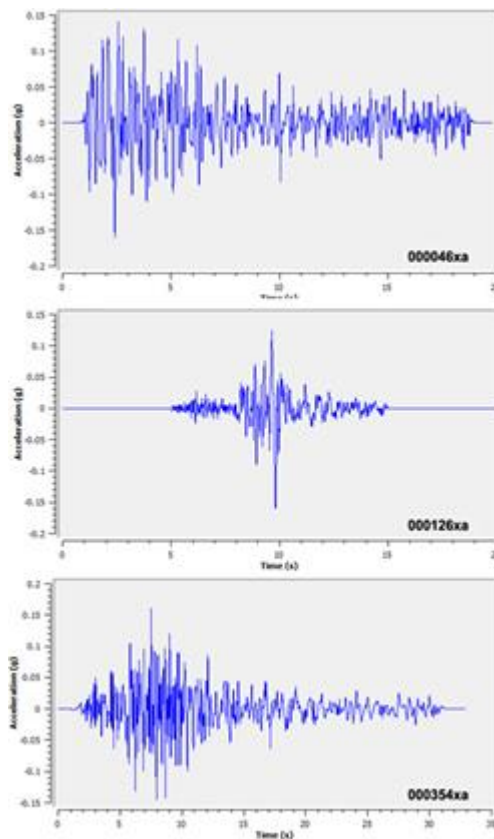


Figura 7-2 - Plot eseguito con il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013) dei segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193 del 2015, scalati per una  $a_{\text{ref}}$  pari a 0,153 e utilizzati come input per le simulazioni numeriche della risposta sismica locale.

Sono stati quindi calcolati e confrontati gli spettri di risposta al bedrock (Figura 7-3) ed in superficie per un periodo di ritorno di 475 anni con uno smorzamento assunto pari al 5%. Gli spettri elastici in pseudo accelerazione in input e in output, relativi alla simulazione di risposta sismica locale, sono stati quindi archiviati nel database in formato .txt secondo quanto richiesto dagli Standard MS 4.0b (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2015).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

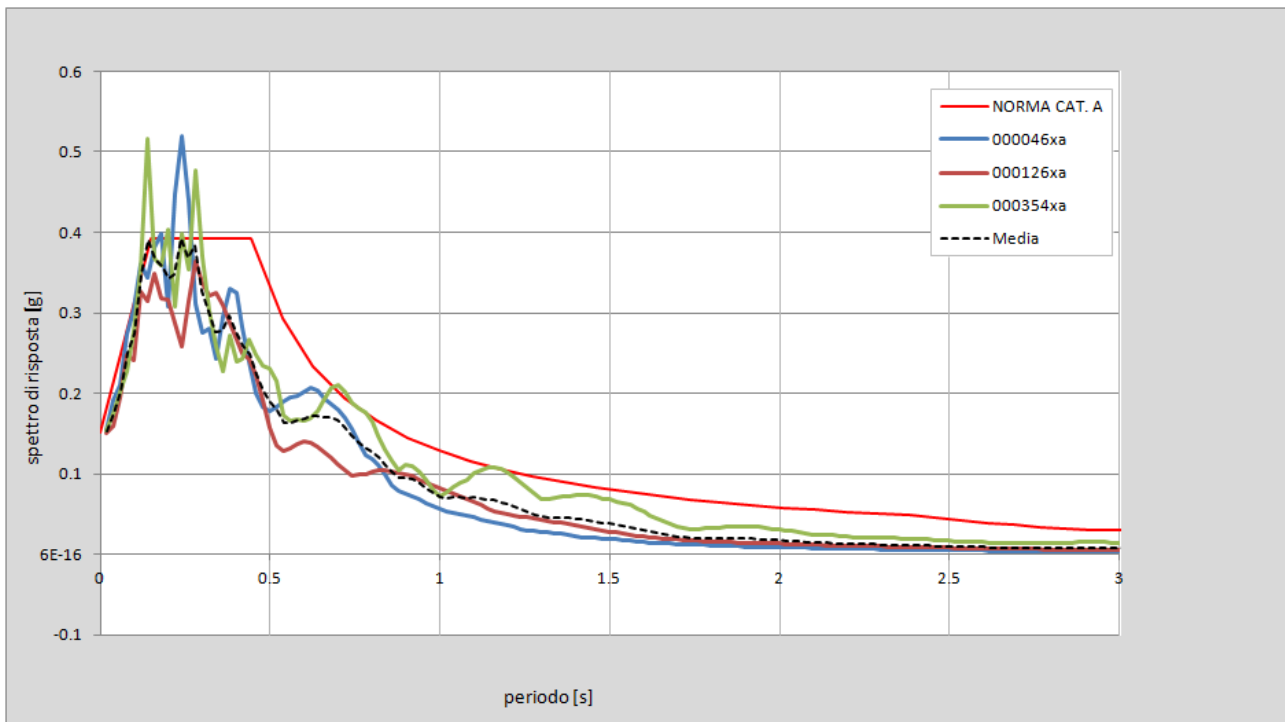


Figura 7-3 - Spettri di risposta al bedrock per i tre accelerogrammi ed il loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria A secondo le NTC2018.

**RSL zona 2001**

In Figura 7-4 si riportano le funzioni di trasferimento, definite come il rapporto tra lo spettro di Fourier del segnale in superficie in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro media. Nei due grafici, relativi alle condizioni di *bedrock* profondo e *bedrock* più superficiale, si osserva una prima amplificazione a frequenza compresa tra 0,35 e 0,4 Hz e una seconda tra 0,8 e 0,9 Hz, coerentemente con quanto riscontrato in buona parte delle misure di rumore ambientale. La presenza di altre frequenze, alcune delle quali armoniche superiori delle precedenti, appare legata al basso smorzamento delle coperture.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

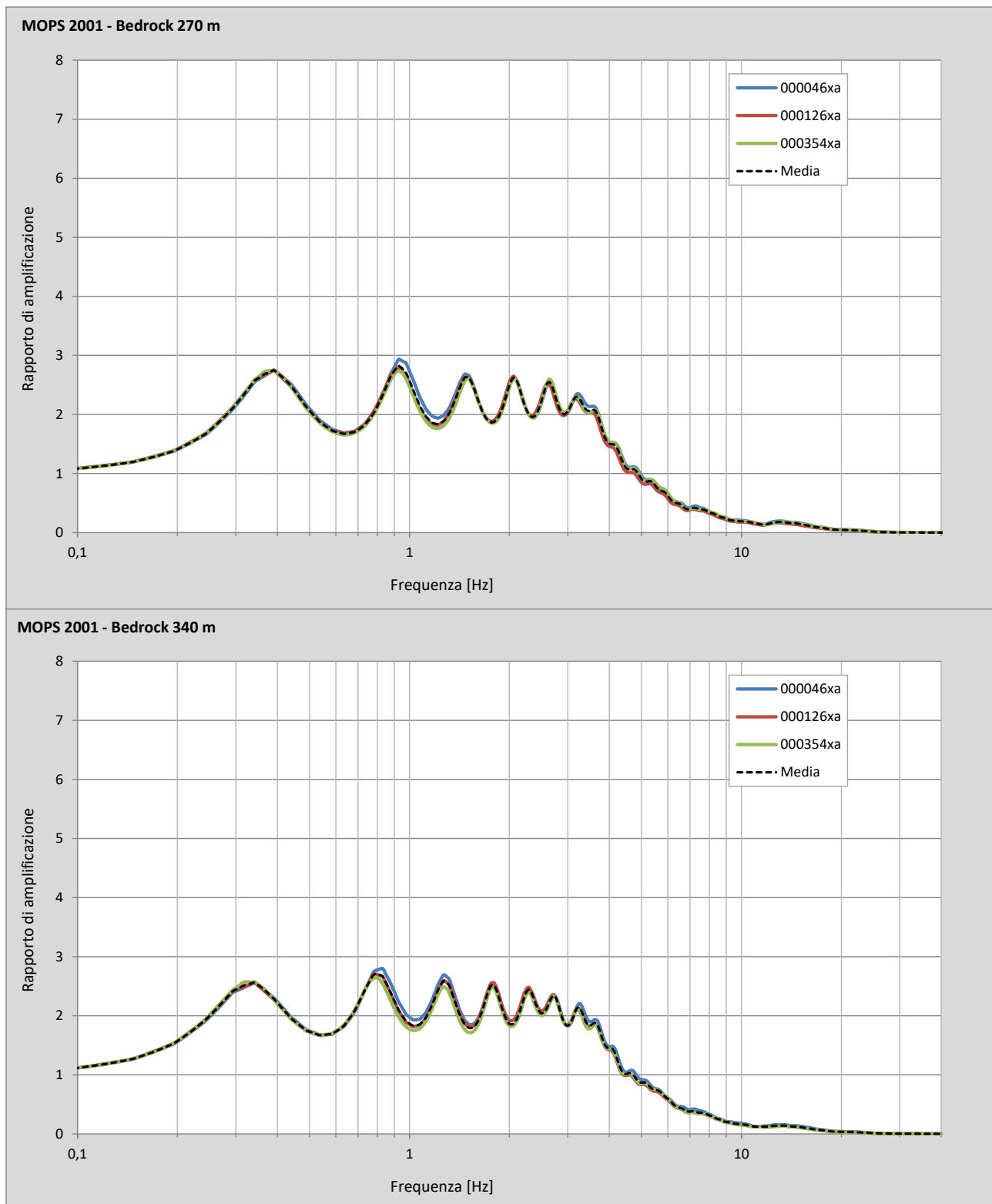


Figura 7-4 - RSL zona 2001: Funzioni di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

In Figura 7-5 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 e lo spettro medio. Risulta evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente del moto di input, risultando quindi piuttosto differenti per i tre accelerogrammi utilizzati. In questo caso lo spettro medio risulta caratterizzato da una deviazione standard relativamente alta, dovuta alla sostanziale diversità dei tre soli terremoti utilizzati come input per gli studi di microzonazione sismica (segnali di riferimento D.G.R. 2193/2015).



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

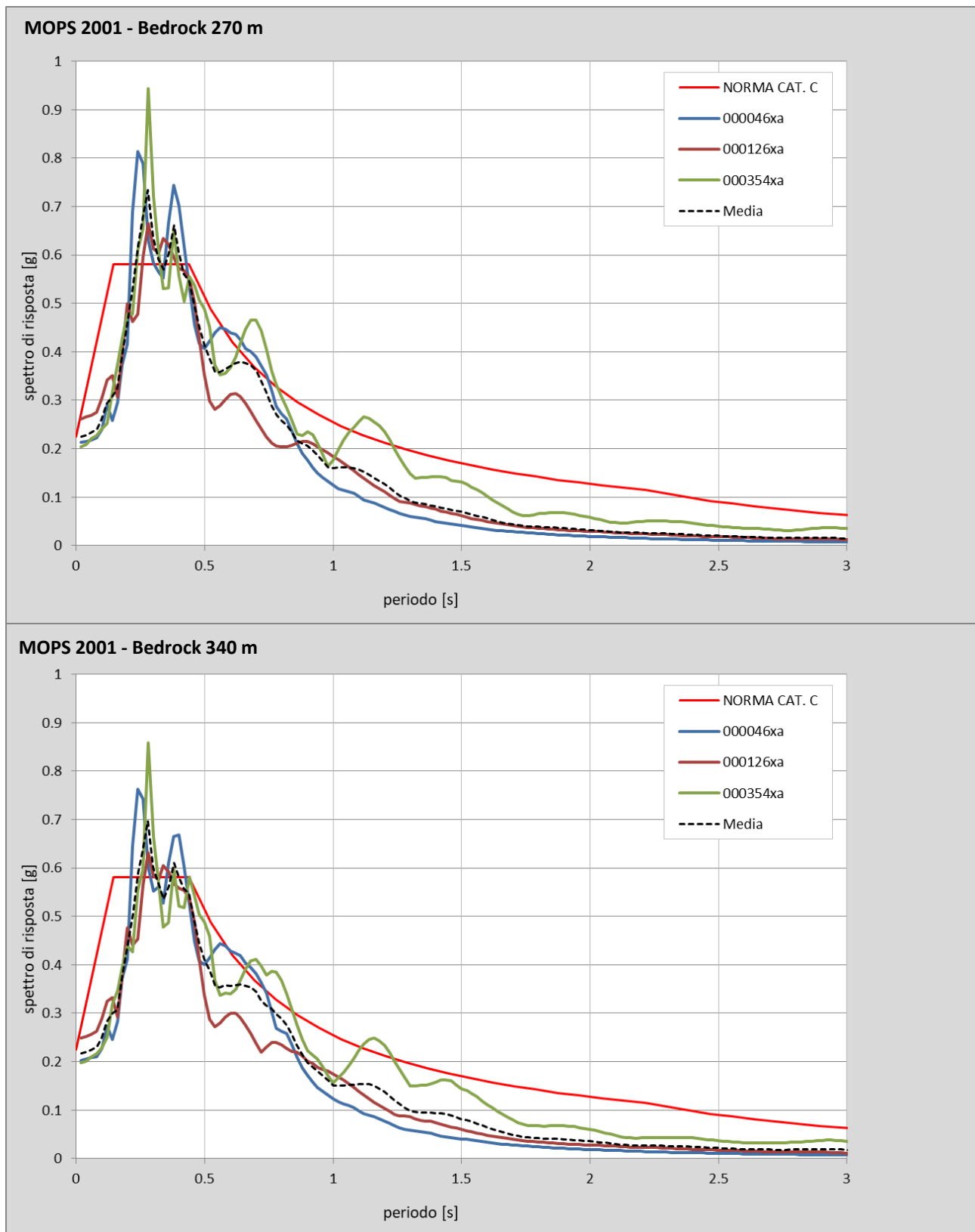


Figura 7-5 - RSL zona 2001: Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

In Figura 7-6 sono infine riportati gli andamenti, nei primi 20 m di sottosuolo, dell'accelerazione massima (PGA) attesa in funzione della profondità per i tre terremoti di input e la loro mediana. Si nota un generale progressivo aumento al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 4-5 metri e la superficie.

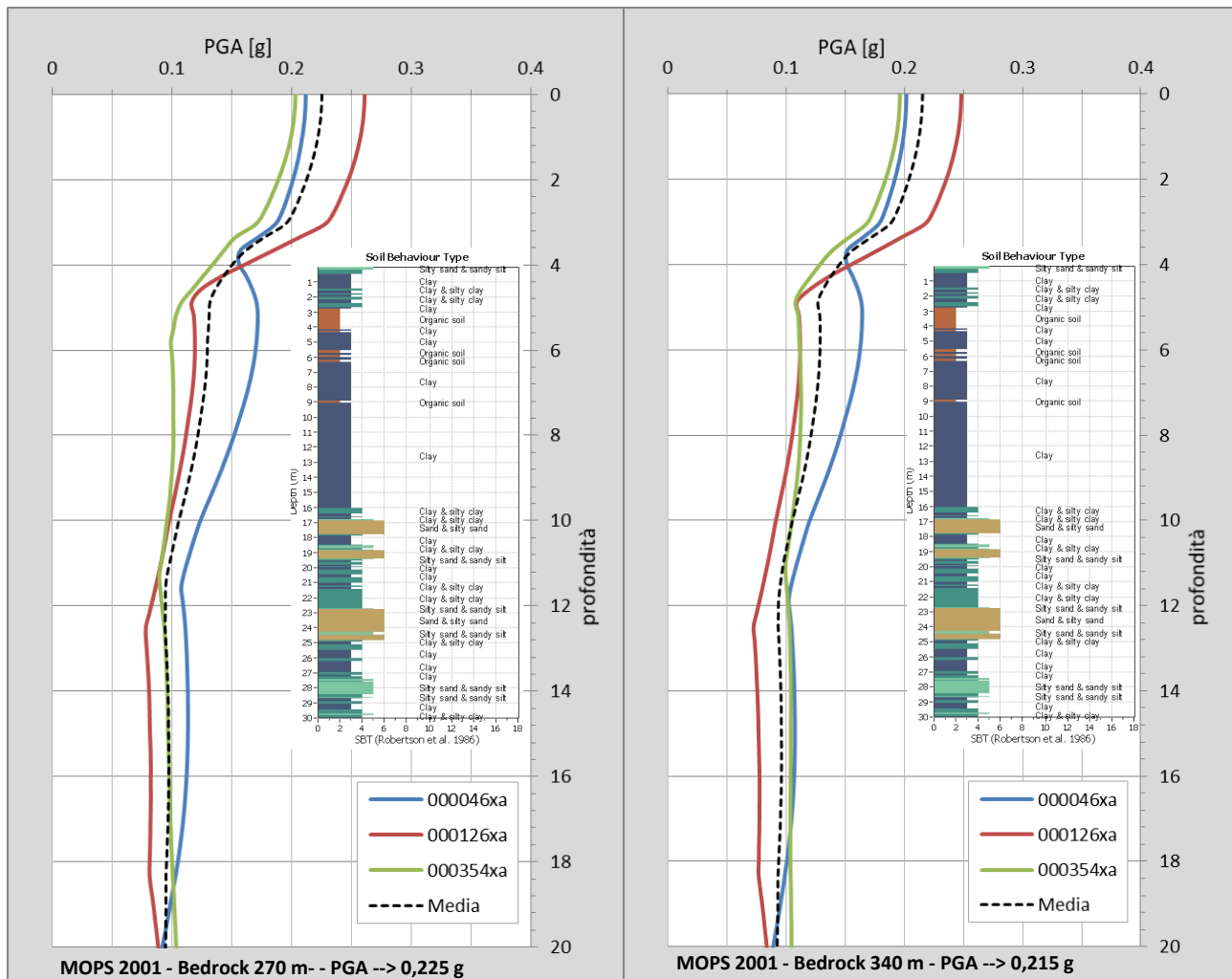


Figura 7-6 - RSL1: RSL zona 2001: Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Nel caso di substrato sismico più superficiale (270 m) l'accelerazione massima (PGA) attesa in superficie risulta pari a 0,225 g, mentre diminuisce ponendo il bedrock a maggiori profondità (Figura 7-6). In termini di fattori di amplificazione si ottengono coefficienti di  $FA(PGA) = 1,47$  per il modello con substrato sismico più superficiale e  $FA(PGA) = 1,41$  per quello con *bedrock* più profondo.

Analogamente i fattori di amplificazione derivati in termini di intensità di Housner sono rispettivamente:

**MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO**

**Bedrock 270 m**

$S11-FH_{(0.1-0.5)} = 1.69$	$S12-FH_{(0.5-1)} = 2.19$	$S13-FH_{(0.5-1.5)} = 2.20$
-----------------------------	---------------------------	-----------------------------

**Bedrock 340 m**

$S11-FH_{(0.1-0.5)} = 1.60$	$S12-FH_{(0.5-1)} = 2.15$	$S13-FH_{(0.5-1.5)} = 2.16$
-----------------------------	---------------------------	-----------------------------

**RSL zona 2002**

In Figura 7-7 si riportano le funzioni di trasferimento, definite come il rapporto tra lo spettro di Fourier del segnale in superficie in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro media. Nei due grafici, relativi alle condizioni di bedrock profondo e bedrock più superficiale, si osserva una prima amplificazione a frequenza compresa tra 0,35 e 0,4 Hz e una seconda tra 0,8 e 0,9 Hz, coerentemente con quanto riscontrato in buona parte delle misure di rumore ambientale. La presenza di altre frequenze, alcune delle quali armoniche superiori delle precedenti, appare legata al basso smorzamento delle coperture.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

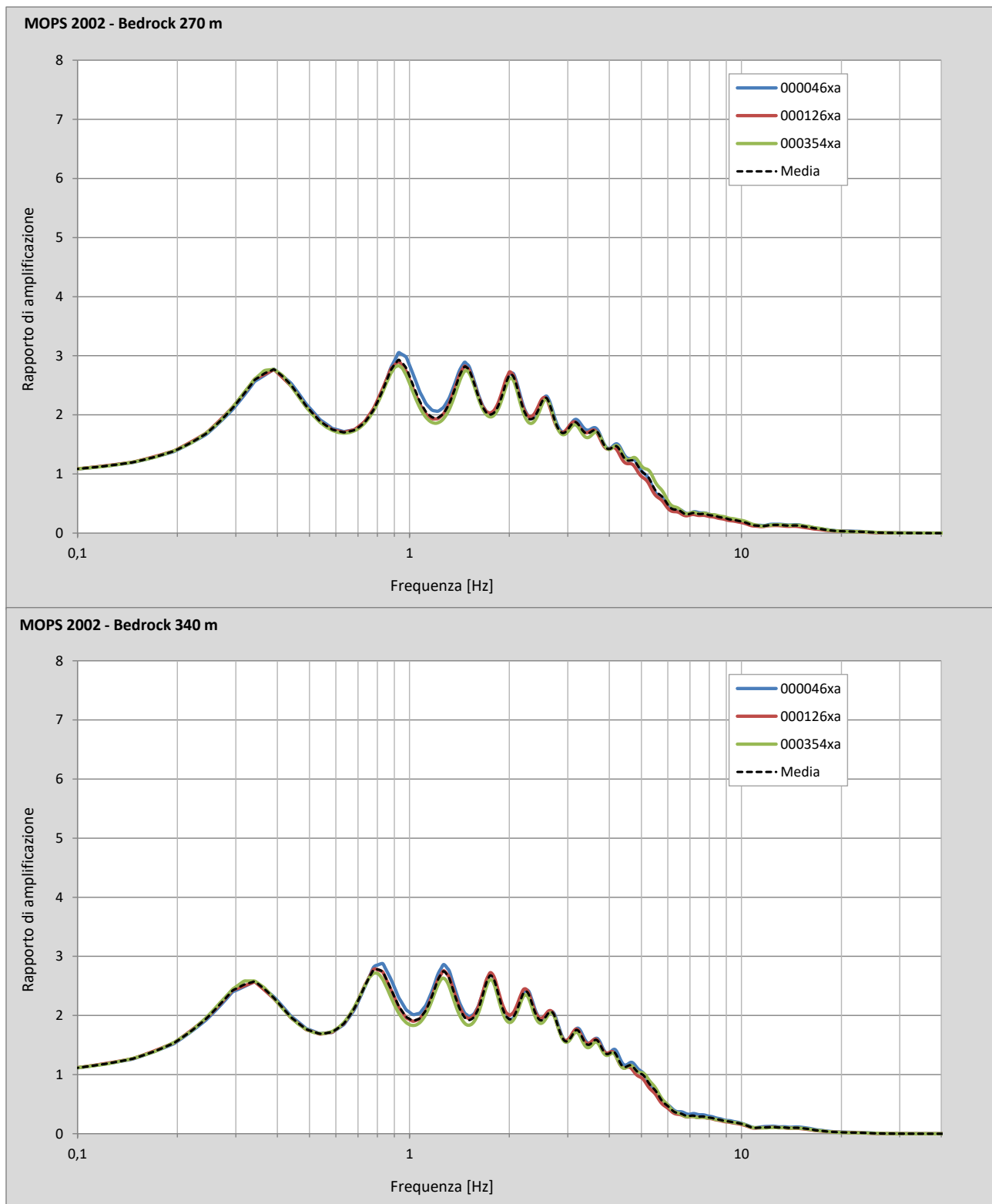


Figura 7-7 - RSL2: Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

In Figura 7-8 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 e lo spettro medio. Risulta evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente del moto di input, risultando quindi piuttosto differenti per i tre accelerogrammi utilizzati. In questo caso lo spettro medio risulta caratterizzato da una deviazione standard relativamente alta, dovuta alla sostanziale diversità dei tre soli terremoti utilizzati come input per gli studi di microzonazione sismica (segnali di riferimento D.G.R. 2193/2015).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

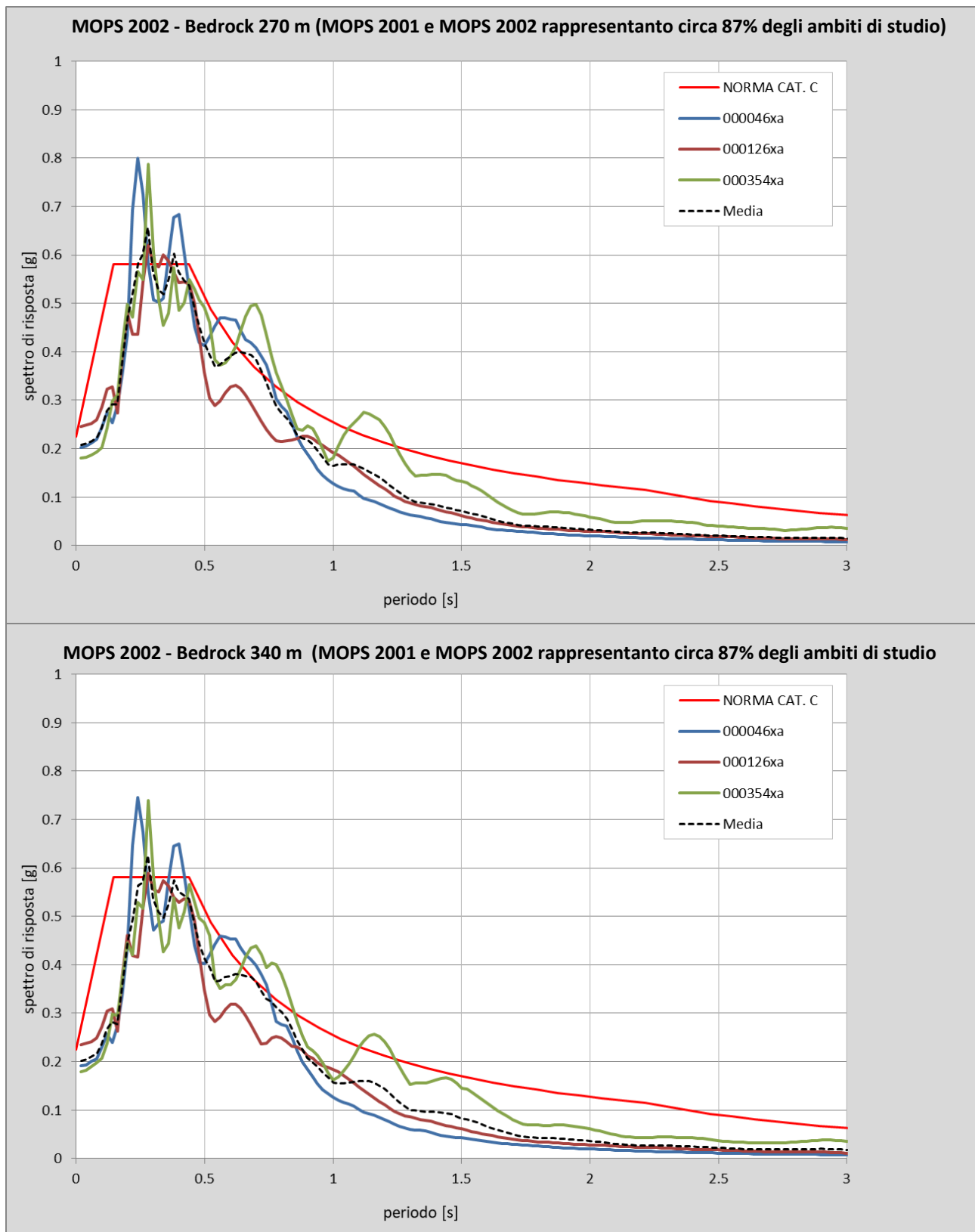


Figura 7-8 - RSL2: Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2008.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

In Figura 7-9 sono infine riportati gli andamenti, nei primi 20 m di sottosuolo, dell'accelerazione massima (PGA) attesa in funzione della profondità per i tre terremoti di input e la loro mediana. Si nota un generale progressivo aumento al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 4-5 metri e la superficie.

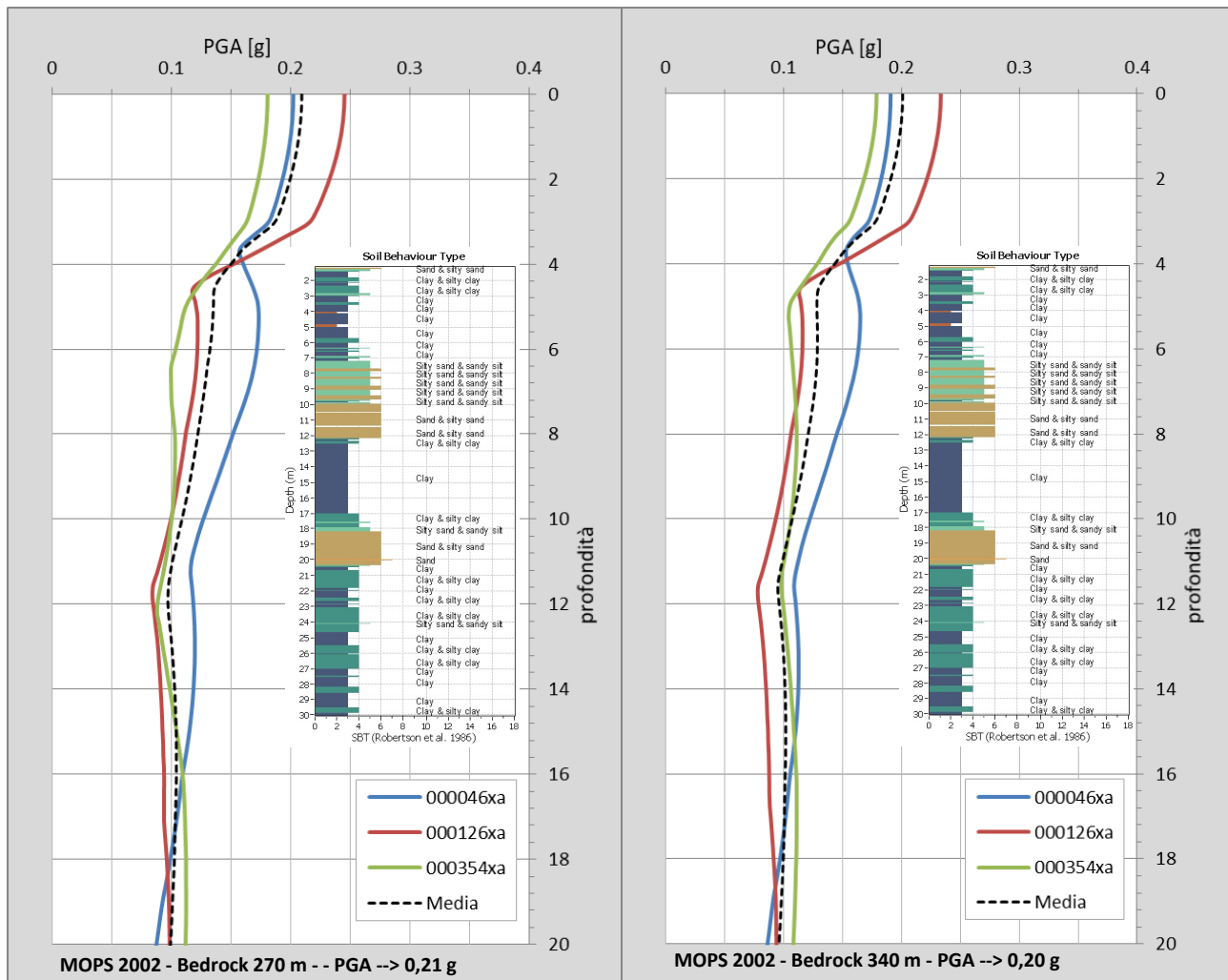


Figura 7-9 - RSL2: Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Nel caso di substrato sismico più superficiale (270 m) l'accelerazione massima (PGA) attesa in superficie risulta pari a 0,21 g, mentre diminuisce ponendo il *bedrock* a maggiori profondità (Figura 7-9). In termini di fattori di amplificazione si ottengono coefficienti di  $FA(PGA) = 1,37$  per il modello con substrato sismico più superficiale e  $FA(PGA) = 1,31$  per quello con *bedrock* più profondo.

Analogamente fattori di amplificazione derivati in termini di intensità di Housner sono rispettivamente:

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

**Bedrock 270 m**

$SI1-FH_{(0.1-0.5)} = 1.58$	$SI2-FH_{(0.5-1)} = 2.30$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2.31$
-----------------------------	---------------------------	-----------------------------

**Bedrock 340 m**

$SI1-FH_{(0.1-0.5)} = 1.52$	$SI2-FH_{(0.5-1)} = 2.25$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2.25$
-----------------------------	---------------------------	-----------------------------

**RSL zona 2003**

In Figura 7-10 si riportano le funzioni di trasferimento, definite come il rapporto tra lo spettro di Fourier del segnale in superficie in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro media. Nei due grafici, relativi alle condizioni di *bedrock* profondo e *bedrock* più superficiale, si osserva una prima amplificazione a frequenza compresa tra 0,35 e 0,4 Hz e una seconda tra 0,8 e 0,9 Hz, coerentemente con quanto riscontrato in buona parte delle misure di rumore ambientale. La presenza di altre frequenze, alcune delle quali armoniche superiori delle precedenti, appare legata al basso smorzamento delle coperture.



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

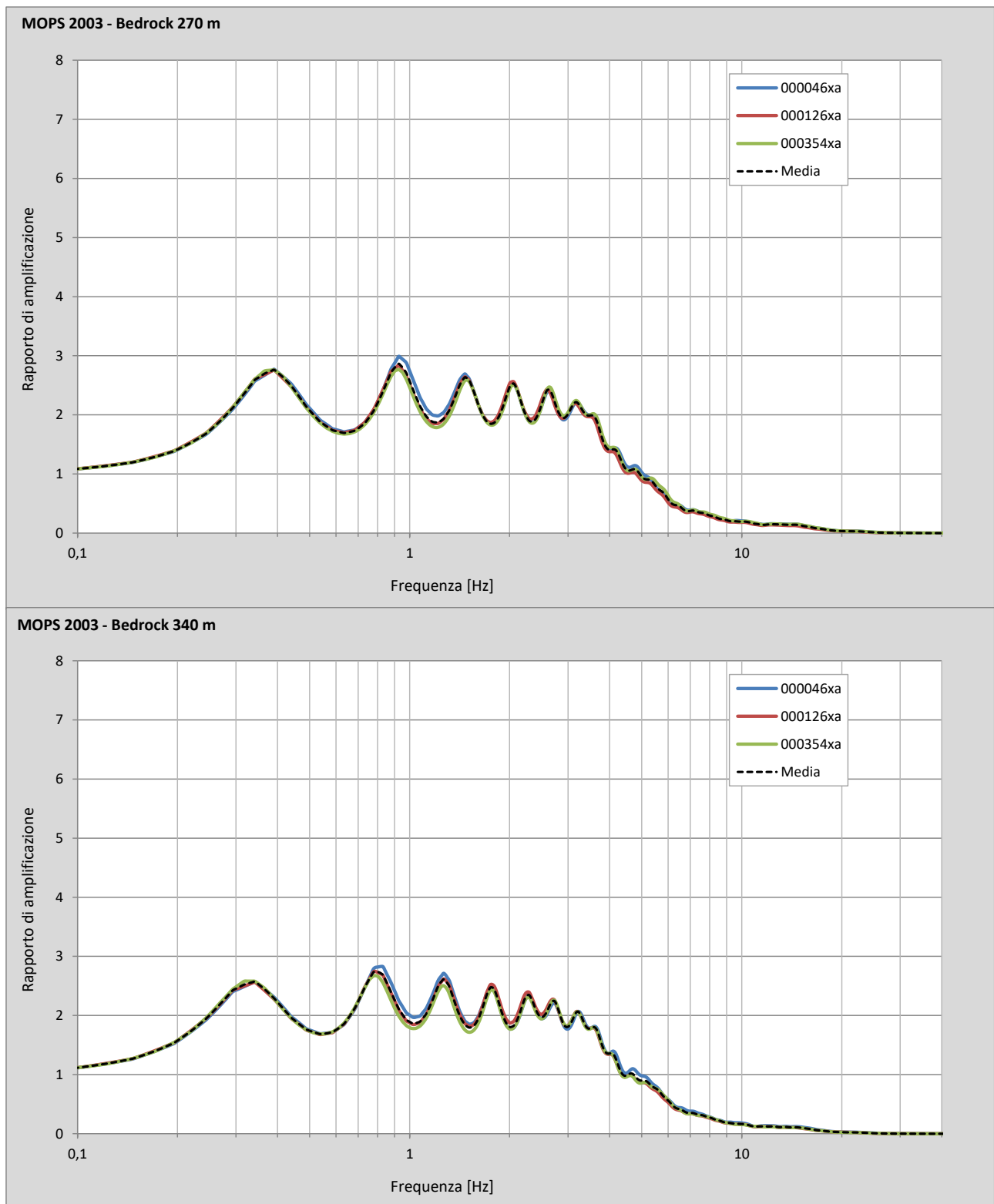


Figura 7-10 - RSL3: Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

In Figura 7-11 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 e lo spettro medio. Risulta evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente del moto di input, risultando quindi piuttosto differenti per i tre accelerogrammi utilizzati. In questo caso lo spettro medio risulta caratterizzato da una deviazione standard relativamente alta, dovuta alla sostanziale diversità dei tre soli terremoti utilizzati come input per gli studi di microzonazione sismica (segnali di riferimento D.G.R. 2193/2015).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

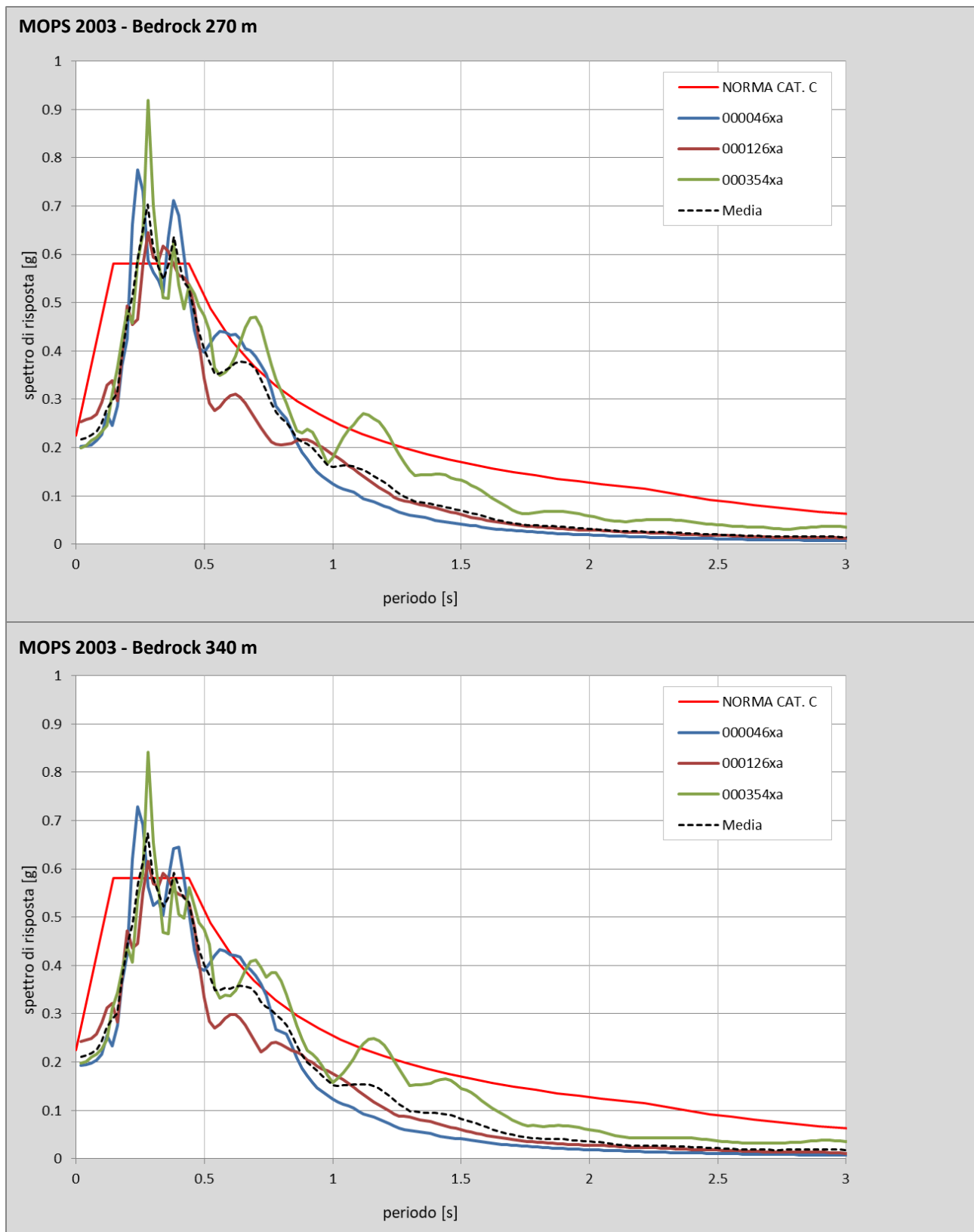


Figura 7-11 - RSL3: Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2008.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

In Figura 7-12 sono infine riportati gli andamenti, nei primi 20 m di sottosuolo, dell'accelerazione massima (PGA) attesa in funzione della profondità per i tre terremoti di input e la loro mediana. Si nota un generale progressivo aumento al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 4-5 metri e la superficie.

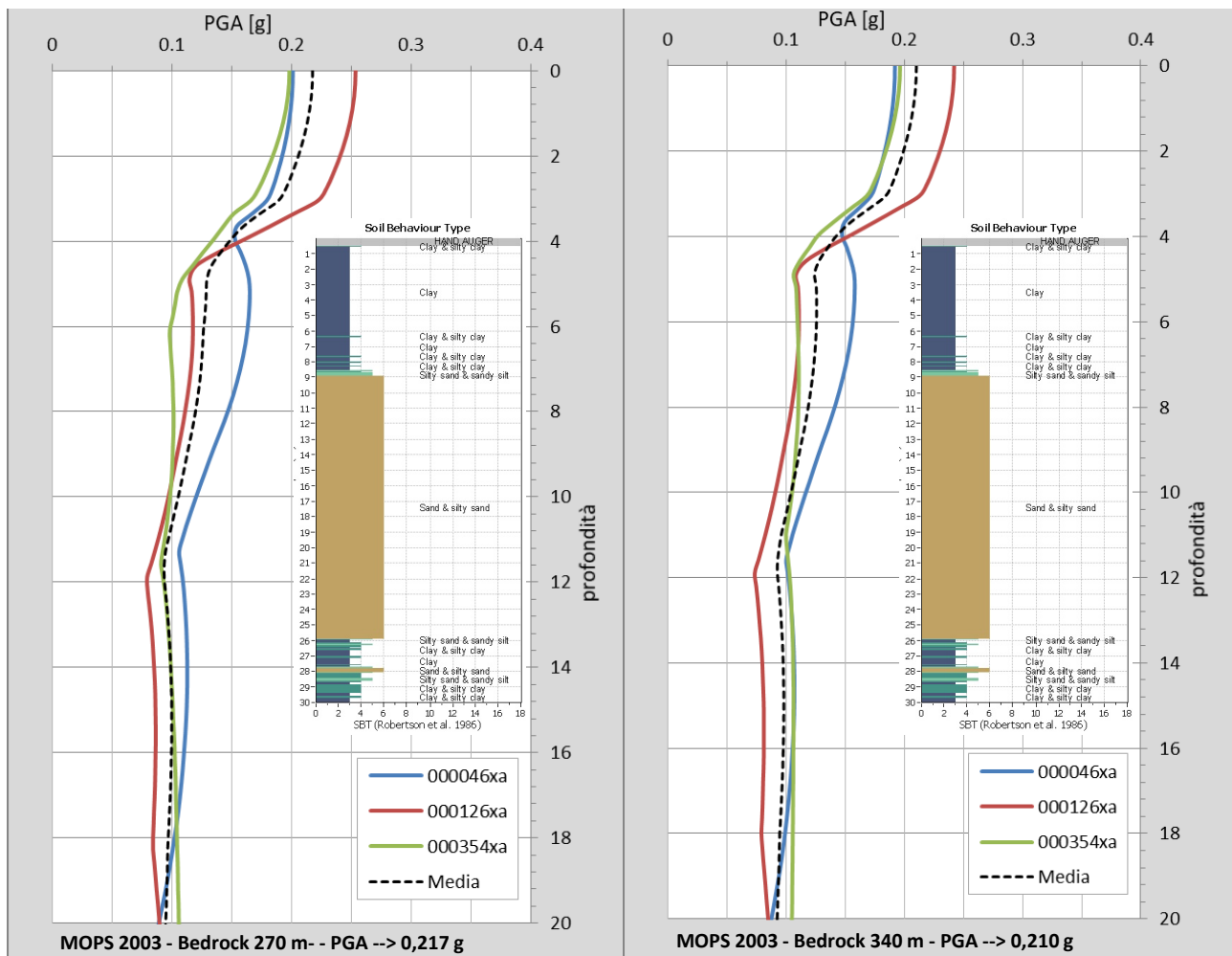


Figura 7-12 - RSL3: Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Nel caso di substrato sismico più superficiale (270 m) l'accelerazione massima (PGA) attesa in superficie risulta pari a 0,217 g, mentre diminuisce ponendo il *bedrock* a maggiori profondità (Figura 7-12). In termini di fattori di amplificazione si ottengono coefficienti di **FA(PGA) = 1,42** per il modello con substrato sismico più superficiale e **FA(PGA) = 1,37** per quello con *bedrock* più profondo.

Analogamente (in rosso in Figura 7-1), i fattori di amplificazione derivati in termini di intensità di Housner sono rispettivamente:

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

**Bedrock 270 m**

$SI1-FH_{(0.1-0.5)} = 1.63$	$SI2-FH_{(0.5-1)} = 2.19$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2.21$
-----------------------------	---------------------------	-----------------------------

**Bedrock 340 m**

$SI1-FH_{(0.1-0.5)} = 1.56$	$SI2-FH_{(0.5-1)} = 2.14$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2.15$
-----------------------------	---------------------------	-----------------------------

Per valutare la consistenza e l'affidabilità complessiva dei modelli sismo-stratigrafici proposti e dei dati ottenuti dalle modellazioni è possibile mettere a confronto i fattori di amplificazione calcolati con quanto indicato dagli abachi regionali.

Nello specifico l'area di depressione strutturale (Figura 7-1) mostra una successione stratigrafica coerente con quanto indicato nella D.G.R. 2193/2015 per le zone di "Pianura 3": *"settore di pianura caratterizzato da elevati spessori di sedimenti ....., con substrato rigido a profondità non inferiori a 300 m da p.c"*. Come si evince da quanto messo a confronto in Tabella 7-5, i risultati delle risposte sismiche eseguite in aree di depressione (bedrock 340 m) strutturale hanno restituito fattori di amplificazione prossimi a quelli dell'abaco di riferimento.

	ABACO PIANURA 3 DGR 2193/2015	RSL2001	RSL2002	RSL2003
$FA_{PGA}$	1.3	1.41	1.31	1.37
$FA_{SI1}$	1.5	1.60	1.52	1.56
$FA_{SI2}$	2.3	2.15	2.25	2.14
$FA_{SI3}$	2.6	2.16	2.25	2.15

**Tabella 7-5 - Fattori di amplificazione ottenuti dalle modellazioni eseguite per l'area di depressione strutturale (bedrock 340 m) confrontate con quanto previsto dagli abachi della D.G.R. 2193/2015 per le aree di "Pianura 3" (bedrock a profondità non inferiore a 300 m) caratterizzate da Vs30 di circa 200 m/s.**

La D.G.R. 2193/2015 non prevede però abachi specifici per settori di pianura con substrato rigido a profondità comprese tra 200 e 300 m, come le fasce a minor subsidenza che caratterizzano i settori orientale e occidentale del territorio comunale di Poggio Renatico (Figura 7-1). La norma prevede esclusivamente le situazioni in cui il bedrock è posto a meno di 100 m ("Pianura 1"), a circa 150 m ("Pianura 2") e oltre 300 m ("Pianura 3") dalla superficie topografica. Come logico i fattori di amplificazione ottenuti per le fasce con bedrock posto a 270 m di profondità mostrano valori intermedi tra quelli proposti dagli abachi di "Pianura 2" e Pianura 3" della D.G.R. 2193/2015 (Tabella 7-6). Al contempo i risultati ottenuti

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

appaiono coerenti anche con i fattori proposti dalla ormai superata D.A.L. 112/2007, che prevedeva un abaco “Pianura 2” per aree con substrato profondo ( $\geq 100$  m da p.c.).

	ABACO PIANURA 2 D.G.R. 2193/2015	ABACO PIANURA 3 D.G.R. 2193/2015	ABACO PIANURA 2 D.A.L.112/2007	RSL2001	RSL2002	RSL2003
FA <sub>PGA</sub>	1.7	1.3	1.5	1.47	1.37	1.42
FA <sub>S11</sub>	2.0	1.5	1.8	1.69	1.58	1.69
FA <sub>S12</sub>	3.0	2.3	2.5	2.19	2.30	2.19
FA <sub>S13</sub>	3.3	2.6	-	2.20	2.31	2.21

**Tabella 7-6 - Fattori di amplificazione ottenuti dalla modellazione per le aree a minor subsidenza (bedrock 270 m) a confronto con: 1) quelli previsti dalla D.G.R. 2193/2015 per le aree di “Pianura 2” (bedrock a circa 150 m dal p.c.), “Pianura 3” (bedrock a profondità non inferiore a 300 m dal p.c.); 2) quelli previsti dalla D.A.L.112/2007 per le aree di “Pianura 2” (bedrock a oltre 100 m dal p.c.). Valori definiti per aree caratterizzate da Vs30 di circa 200 m/s.**

### 7.2 Zone instabili soggette a liquefazione

Il carattere pianeggiante del territorio ed il contesto geologico e sismotettonico in cui si colloca il Comune di Poggio Renatico, riducono i potenziali fenomeni di instabilità attesi a liquefazione e cedimenti differenziali.

I numerosi dati geognostici raccolti a supporto dello studio di microzonazione, sono stati singolarmente analizzati rispetto alle possibili criticità legate alla natura dei terreni presenti. Le valutazioni hanno confermato le evidenze del 2012, indicando come principale criticità la diffusa presenza di orizzonti granulari saturi potenzialmente liquefacibili, così come riportato negli elaborati di sintesi redatti a seguito dell’Ordinanza 70/2012 (Martelli e Romani, 2013).

L’estensione e la perimetrazione di queste aree è stata notevolmente affinata (v. Tavola 4) a fronte dei risultati di nuove indagini geotecniche acquisite nell’ambito degli approfondimenti di terzo livello (paragrafo 4.2). Per ottenere valutazioni quantitative della suscettibilità a liquefazione nelle aree classificate come instabili e poter suddividere il territorio in classi di rischio, sono state eseguite stime dell’indice di potenziale liquefazione ( $I_L$ ) con le procedure semplificate indicate dai recenti indirizzi regionali per la microzonazione sismica (paragrafo 7.2.1). Tali stime sono state eseguite su tutte le indagini penetrometriche con piezocono raccolte durante lo studio di microzonazione sismica.

### 7.2.1 Verifiche del potenziale di liquefazione

La liquefazione è un fenomeno che si verifica generalmente in occasione di terremoti con magnitudo  $M > 5$  e interessa i sedimenti granulari (limi sabbiosi, sabbie e ghiaie sabbiose) poco addensati e saturi in acqua presenti nei primi 15-20 m di sottosuolo.

Durante l'evento sismico la pressione interstiziale dell'acqua, che è fluido incomprimibile, aumenta fino ad eguagliare le tensioni efficaci che legano i sedimenti granulari. L'annullamento della resistenza al taglio dovuto alle sovrappressioni indotte dallo scuotimento conduce alla liquefazione dei terreni, con conseguente perdita di capacità portante degli stessi e manifestazione di deformazioni permanenti, come osservato in occasione della sequenza sismica del 2012.

Già durante gli studi di microzonazione relativi all'Ordinanza 70/2012, furono effettuate stime del potenziale di liquefazione su alcune indagini penetrometriche (v. Allegato 1.7 - Ordinanza 70/2012) mediante diverse procedure semplificate indicate dagli indirizzi regionali (D.A.L. 112/2007, Allegato 3) e nazionali (Gruppo di lavoro MS, 2008). Il confronto tra i vari metodi di letteratura utilizzati, tutti basati su analisi di prove penetrometriche, aveva permesso di concludere che i valori degli indici di liquefazione  $I_L$  (Iwasaki *et al.*, 1982) ottenuti con il metodo di Idriss e Boulanger (2008) fossero maggiormente compatibili con gli effetti osservati, e venissero dunque utilizzati per la redazione delle mappe.

Per questi approfondimenti di terzo livello di microzonazione sismica sono state eseguite stime del potenziale di liquefazione anche con il metodo di Boulanger e Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015. Tale metodo ha mediamente fornito indici di liquefazione più elevati rispetto ai metodi precedenti (cfr. Idriss e Boulanger, 2008; Robertson NCEER, 2001 e Robertson, 2009) e in quanto più cautelativo è stato utilizzato come riferimento per la stima del potenziale di liquefazione.

Sono state quindi analizzate 128 verticali d'indagine realizzate con punta elettrica e piezocono (CPTu) distribuite su tutto il territorio comunale, come riportato in Tavola 6.

Come parametri di input per la modellazione sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 7-7. Il valore di  $M_{w_{max}}$  corrisponde a quello massimo atteso per la Zona 912 della Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), mentre la PGA è stata derivata moltiplicando l'agref (così come definita al paragrafo 7.1.1) per i fattori di amplificazione ottenuti dalle risposte sismiche locali per le singole zone (paragrafo 7.1.1) riportati in Tabella 7-5 e Tabella 7-6 in funzione della variazione di profondità del substrato sismico.

In mancanza di uno studio idrogeologico dettagliato e di un'analisi storico-statistica dell'andamento delle isofreatiche, è stato adottato un valore di soggiacenza cautelativo per le verifiche a liquefazione.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

In accordo con in precedenti studi di microzonazione svolti durante la fase di emergenza sismica dalla Regione Emilia-Romagna è stata assunta una soggiacenza della falda pari ad 1 metro rispetto alla superficie topografica.

Zone	Mwmax	PGA	Falda
Zona 2001 - Bedrock superficiale (270 m)	6,14	0,22	1 m
Zona 2001 - Bedrock profondo (340 m)	6,14	0,22	1 m
Zona 2002 - Bedrock superficiale (270 m)	6,14	0,21	1 m
Zona 2002 - Bedrock profondo (340 m)	6,14	0,20	1 m
Zona 2003 - Bedrock superficiale (270 m)	6,14	0,22	1 m
Zona 2003 - Bedrock profondo (340 m)	6,14	0,21	1 m

**Tabella 7-7 - Parametri di input utilizzati per la verifica puntuale del potenziale di liquefazione mediante metodo di Boulanger e Idriss (2014).**

I valori puntuali di  $I_L$ , ottenuti mediante il software "Cliq 2.0" della Geologismiki Geotechnical Software, sono rappresentati in carta (Tavole da 6 a 9) suddivisi per classi secondo Sonmez (2003), in modo da poter distinguere tra aree a rischio di liquefazione basso ( $0 < I_L \leq 2$ ), moderato ( $2 < I_L \leq 5$ ) e alto ( $5 < I_L \leq 15$ ).

In Tabella 7-8 sono riportati i valori di  $I_L$  relativi a tutte le 128 indagini penetrometriche con punta elettrica analizzate per gli approfondimenti di terzo livello dello studio, mentre nell'Allegato 3 sono raccolti i rapporti di calcolo delle verifiche eseguite sulle CPTu commissionate dall'Amministrazione Comunale di Poggio Renatico per le verifiche post-sisma di diversi edifici pubblici.

Codice	Lat.	Lon.	PGA	IL Boulanger e Idriss (2014)
038018P18CPTU18	44.765225	11.455705	0,22	0,3
038018P19CPTU19	44.764912	11.455992	0,22	1,5
038018P24CPTU25	44.769771	11.436108	0,22	1,2
038018P25CPTU27	44.769694	11.435778	0,22	7
038018P31CPTU33	44.782626	11.447218	0,22	1,6
038018P32CPTU35	44.812229	11.502912	0,22	2,2
038018P33CPTU37	44.812657	11.502994	0,22	2,8
038018P36CPTU40	44.795630	11.533895	0,22	0,9
038018P37CPTU42	44.802566	11.524422	0,22	0
038018P43CPTU49	44.773653	11.483342	0,22	0,8
038018P44CPTU50	44.773434	11.483416	0,22	1,5
038018P58CPTU66	44.780790	11.408858	0,22	3,2
038018P59CPTU68	44.780915	11.408644	0,22	1,7
038018P67CPTU76	44.755543	11.530615	0,22	0,7
038018P68CPTU78	44.755389	11.530436	0,22	0,7



**MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO**

038018P72CPTU82	44.764758	11.485923	0,22	0,5
038018P73CPTU84	44.764888	11.485400	0,2	12,1
038018P74CPTU85	44.764654	11.485562	0,2	3,2
038018P75CPTU86	44.764522	11.485312	0,22	0,8
038018P76CPTU87	44.764504	11.485842	0,22	1,9
038018P77CPTU88	44.765717	11.483925	0,2	8,1
038018P78CPTU90	44.767142	11.486187	0,2	13,5
038018P80CPTU93	44.766804	11.485840	0,2	6,6
038018P82CPTU95	44.819964	11.492690	0,22	3,6
038018P86CPTU100	44.799385	11.444254	0,22	3,1
038018P87CPTU101	44.815295	11.496764	0,21	3,3
038018P106CPTU120	44.775215	11.408448	0,22	2
038018P254CPTU268	44.776868	11.488668	0,2	4,6
038018P255CPTU269	44.776913	11.487450	0,2	2,6
038018P256CPTU270	44.776942	11.486976	0,22	1,1
038018P257CPTU271	44.787401	11.466353	0,22	0,1
038018P258CPTU272	44.791262	11.452222	0,22	0,1
038018P259CPTU273	44.791074	11.428151	0,22	1,4
038018P260CPTU274	44.791117	11.427139	0,22	2,7
038018P261CPTU275	44.791136	11.426464	0,22	1,7
038018P262CPTU276	44.791138	11.425849	0,22	1,7
038018P263CPTU277	44.776384	11.494401	0,22	1,1
038018P264CPTU278	44.776680	11.493993	0,22	1,3
038018P265CPTU279	44.776677	11.488842	0,2	3,6
038018P266CPTU280	44.776803	11.480909	0,22	0,5
038018P267CPTU281	44.777795	11.477804	0,22	1,4
038018P268CPTU282	44.778637	11.476257	0,22	0,4
038018P269CPTU283	44.782080	11.474268	0,22	0,4
038018P270CPTU284	44.781913	11.473948	0,22	0,4
038018P271CPTU285	44.781236	11.472881	0,22	0,4
038018P272CPTU286	44.783902	11.470379	0,22	0,3
038018P273CPTU287	44.783485	11.469535	0,22	0,2
038018P274CPTU288	44.786826	11.465861	0,22	1,1
038018P275CPTU289	44.790131	11.462196	0,22	1,1
038018P276CPTU290	44.790475	11.457088	0,22	0
038018P277CPTU291	44.791857	11.451281	0,22	1
038018P278CPTU292	44.792828	11.450603	0,22	0,6
038018P279CPTU293	44.793297	11.450148	0,22	0,8
038018P280CPTU294	44.793787	11.449676	0,22	1,1
038018P281CPTU295	44.793903	11.446407	0,22	0,4
038018P282CPTU296	44.792474	11.443833	0,22	0,8
038018P283CPTU297	44.796577	11.442418	0,22	0,6

**MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO**

038018P284CPTU298	44.796571	11.442336	0,22	1,6
038018P285CPTU299	44.796923	11.442047	0,22	0,6
038018P286CPTU300	44.798027	11.441286	0,22	1,4
038018P287CPTU301	44.797892	11.440983	0,22	1,4
038018P288CPTU302	44.797798	11.440685	0,22	2,6
038018P289CPTU303	44.793355	11.436290	0,22	1,9
038018P292CPTU306	44.794807	11.434546	0,22	1,3
038018P293CPTU307	44.795199	11.433943	0,22	1,5
038018P294CPTU308	44.793450	11.433018	0,22	2,1
038018P295CPTU309	44.793949	11.432418	0,22	2,7
038018P296CPTU310	44.794074	11.432275	0,22	2,4
038018P297CPTU311	44.792298	11.431920	0,22	2,7
038018P298CPTU312	44.786753	11.466185	0,22	0,2
038018P299CPTU313	44.790944	11.452523	0,22	0
038018P300CPTU314	44.793631	11.446484	0,22	0,9
038018P301CPTU315	44.783584	11.479229	0,22	0,1
038018P302CPTU316	44.775073	11.430630	0,22	6,2
038018P303CPTU317	44.763809	11.463791	0,22	2
038018P304CPTU318	44.792922	11.488597	0,22	0,3
038018P305CPTU319	44.783284	11.498648	0,22	12,8
038018P306CPTU320	44.780875	11.456117	0,22	1,1
038018P307CPTU321	44.794075	11.468932	0,22	0,1
038018P329CPTU343	44.752896	11.518264	0,22	1
038018P330CPTU345	44.779996	11.541849	0,2	8,4
038018P331CPTU347	44.795326	11.520373	0,2	8,3
038018P378CPTU395	44.793300	11.539783	0,22	0,3
038018P379CPTU396	44.793265	11.539399	0,22	0,8
038018P380CPTU397	44.792158	11.534802	0,22	0,8
038018P381CPTU398	44.792037	11.530624	0,22	2
038018P382CPTU399	44.785509	11.520910	0,22	15,9
038018P383CPTU400	44.783136	11.516049	0,22	14,5
038018P384CPTU401	44.778850	11.506131	0,2	2,4
038018P385CPTU402	44.777586	11.502474	0,22	0,1
038018P395CPTU412	44.793435	11.545841	0,22	0,1
038018P399CPTU416	44.784781	11.545045	0,2	4,4
038018P400CPTU417	44.767575	11.520495	0,22	1,5
038018P401CPTU418	44.750025	11.553603	0,22	1,8
038018P402CPTU419	44.749601	11.503963	0,22	2,2
038018P403CPTU420	44.794728	11.524541	0,2	11,9
038018P404CPTU421	44.777035	11.520006	0,22	2,6
038018P405CPTU422	44.763297	11.548554	0,22	7,3
038018P410CPTU427	44.729844	11.552572	0,22	1,1

**MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO**

038018P411CPTU429	44.738163	11.511159	0,22	2,5
038018P412CPTU431	44.770027	11.453657	0,22	0,2
038018P413CPTU433	44.779092	11.428710	0,22	1,9
038018P451CPTU472	44.736132	11.540737	0,22	8,3
038018P452CPTU473	44.723241	11.578610	0,22	8,5
038018P457CPTU478	44.796577	11.514134	0,22	0
038018P463CPTU484	44.767099	11.486564	0,2	8,2
038018P464CPTU486	44.766622	11.486206	0,2	12,6
038018P465CPTU488	44.766603	11.486597	0,2	3,3
038018P474CPTU515	44.818540	11.492325	0,22	7,4
038018P475CPTU517	44.764217	11.482102	0,2	6,1
038018P477CPTU519	44.755926	11.529852	0,22	1,1
038018P478CPTU520	44.756252	11.529316	0,22	2,8
038018P479CPTU521	44.763974	11.493351	0,22	1,5
038018P480CPTU523	44.764003	11.493175	0,22	1,2
038018P481CPTU524	44.764348	11.444283	0,22	5
038018P482CPTU526	44.764137	11.444031	0,22	5,5
038018P483CPTU527	44.756557	11.531163	0,22	1
038018P484CPTU529	44.732830	11.553047	0,22	3
038018P485CPTU531	44.732572	11.553545	0,22	1,7
038018P496CPTU543	44.767632	11.487094	0,2	6,6
038018P514CPTU563	44.803649	11.461562	0,22	2,7
038018P515CPTU564	44.803501	11.461304	0,22	2,6
038018P516CPTU565	44.776786	11.424598	0,22	3,4
038018P499CPTU547	44.801092	11.516556	0,21	8,9
038018P20CPTU21	44.757051	11.465085	0,22	4,5
038018P21CPTU22	44.757335	11.464964	0,22	6,7
038018P290CPTU304	44.793870	11.435531	0,22	3,2
038018P291CPTU305	44.794364	11.435314	0,22	1

**Tabella 7-8 - Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna delle prove penetrometriche CPTU. In tabella è riportato anche il valore di della PGA attesa in superficie ed utilizzata per il calcolo di  $I_L$  su ciascuna verticale.**

## 8 Elaborati cartografici

Le indagini e gli approfondimenti eseguiti nell'ambito di questo studio, unitamente agli standard di rappresentazione ed archiviazione informatica nazionali e alla direttiva regionale in materia di microzonazione sismica (D.G.R. 1227/2015), hanno fornito gli elementi necessari alla redazione degli elaborati cartografici per il terzo livello di microzonazione sismica.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Gli ambiti comuni interessati dallo studio sono stati rappresentati nelle diverse cartografie mediante riquadri alla scala 1:10000. Per tutti gli elaborati è stata utilizzata come base cartografica la Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5.000, messa a disposizione dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

ELABORATO	RIFERIMENTO	SCALA
Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000
Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica	Tavola 2	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica	Tavola 4	1:10.000
Carta della velocità delle onde di taglio	Tavola 5	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - $FA_{PGA}$	Tavola 6	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - $FA_{0,1-0,5s}$	Tavola 7	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - $FA_{0,5-1s}$	Tavola 8	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - $FA_{0,5-1,5s}$	Tavola 9	1:10.000

**Tabella 8-1 - Elenco degli elaborati cartografici redatti per lo studio di microzonazione sismica.**

### 8.1 Carta delle indagini (Tavola 1)

La carta delle indagini consente di visualizzare l'ubicazione delle prospezioni geologiche e geofisiche utilizzate per lo studio di microzonazione sismica e comprende, pertanto, sia quelle di repertorio (564) sia quelle realizzate per questi approfondimenti di terzo livello (21).

Nella cartografia a scala 1:10.000, le indagini sono raffigurate mediante simboli definiti dagli standard di rappresentazione e archiviazione informatica – versione 4.0b – della Commissione tecnica nazionale per la microzonazione sismica (anno 2015).

Utilizzando il metodo di rappresentazione proposto all'Appendice 2 dei suddetti standard, ad ogni sito d'indagine (punto viola in carta) associati i simboli grafici delle diverse tipologie di prove in esso realizzate (es. prova penetrometrica statica con piezocono, sondaggio a distruzione ecc.). Il numero presente a fianco di ogni simbolo identifica il quantitativo di prove di un determinato tipo realizzate nel sito. Utilizzando il metodo appena citato, il posizionamento dei simboli in cartografia avviene in maniera automatica e non modificabile. Ciò implica che per un sito ubicato in prossimità del limite amministrativo, il contrassegno della prova possa cadere anche al di fuori del territorio comunale.

Si precisa inoltre che il rispetto delle procedure indicate negli standard non consente di differenziare graficamente le prove pregresse da quelle realizzate per gli approfondimenti di terzo livello. Per ulteriori dettagli in merito a provenienza, tipologia e qualità delle indagini riportate in carta, si rimanda al capitolo 4.

## 8.2 Carta Geologico Tecnica microzonazione sismica (Tavola 2)

Nella Carta Geologico Tecnica per la Microzonazione Sismica sono sintetizzate tutte le informazioni di base quali, geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche o geotecniche, derivate dalla revisione critica di studi, elaborati e cartografie disponibili.

In questa cartografia, a scala 1:10.000, sono rappresentati gli elementi geologici e morfologici in grado di modificare il moto sismico in superficie o determinare eventuali effetti locali, la distribuzione dei terreni di copertura ed altre informazioni necessarie alla definizione del modello di sottosuolo e funzionali alla realizzazione della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica.

Non essendo presenti unità deposizionali affioranti o sub-affioranti riconducibili a substrato geologico, verranno in seguito esclusivamente descritte le forme di superficie e sepolte, i terreni di copertura e gli altri elementi geologici riportati in cartografia.

### 8.2.1 Elementi geologici ed idrogeologici

Tra gli elementi funzionali alla definizione del modello di sottosuolo, sono stati riportati in carta i pozzi e sondaggi disponibili, con i rispettivi valori di profondità rispetto alla superficie topografica.

Gli standard di rappresentazione e archiviazione informatica prevedono che i pozzi ed i sondaggi vengano tematizzati in colore verde nel caso in cui la loro profondità raggiunga il substrato geologico, mentre in colore rosso nel caso contrario. Nel territorio comunale sono complessivamente quattro le perforazioni che intercettano il substrato, ma solamente il sondaggio stratigrafico profondo "Montalbano 20", realizzato per scopi di ricerca di idrocarburi, è situato all'interno di uno degli ambiti di studio (cfr. ambito di Poggio Renatico - Tavola 2).

In relazione agli altri tematismi previsti per la carta geologico tecnica dagli standard di rappresentazione e archiviazione informatica, si precisa che, vista la quasi totale assenza di dati geognostici sul sottosuolo profondo, non è stato possibile ricostruire in pianta, tramite isobate, l'andamento della superficie considerata come tetto del bedrock sismico in questo studio. Allo stesso modo, gli esigui dati freaticometrici disponibili non sono stati riportati in carta in quanto disomogenei e di dubbia qualità, dunque ritenuti non utili, se non addirittura forvianti, ai fini della ricostruzione dell'andamento della superficie piezometrica. Allo studio sono, infine, allegare sezioni geologiche considerate rappresentative del modello di sottosuolo, realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna nell'ambito del progetto di cartografia geologica nazionale CARG, a supporto del Foglio 203 - Poggio Renatico (v. Allegato 1). Le due sezioni profonde (tracce D-D', E-E'), mostrano l'assetto stratigrafico delle principali unità litologiche

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

riconosciute nel sottosuolo comunale. I rapporti geometrici e l'andamento dei corpi sedimentari sono stati ricostruiti alla scala regionale mediante correlazioni di sondaggi stratigrafici profondi, mentre le unità sono state interpretate in chiave strettamente stratigrafica, mediante l'utilizzo di unità a limiti inconformi (v. Allegato 1).

Le altre sezioni, più superficiali, (tracce A-A', B-B', C-C') mostrano i rapporti geometrici dei corpi sedimentari costituenti la porzione sommitale dei terreni di copertura, appartenenti all'intervallo stratigrafico considerato per la definizione delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS). Tali sezioni, sono state ottenute mediante correlazione di indagini penetrometriche e sondaggi a carotaggio continuo, contenuti nella banca dati geognostica regionale (v. Allegato 1).

### 8.2.2 Terreni di copertura

Nella parte affiorante delle unità di copertura si sono distinte tre unità, ciascuna associata ad una classe prevista dagli standard di microzonazione. Queste classi sono state individuate sulla base del *Unified Soil Classification System (U.S.C.S. modificato, ASTM, 1985)*.

Questo sistema di classificazione dei terreni è applicabile alla maggioranza dei sedimenti non consolidati e frequentemente utilizzato sia in ambito ingegneristico che geologico. Le unità sono rappresentate in carta tramite colori e codici alfabetici, corrispondenti alle classi *U.S.C.S.* di rappresentazione e archiviazione geoinformatica. Il codice è formato da una prima parte maiuscola seguita da una minuscola (es. **SMes**), indicanti rispettivamente i caratteri litotecnici e quelli paleoambientali.

In base a questa classificazione sono state definite unità costituite da:

- **sedimenti sabbiosi di alveo (SMes)**

L'unità è formata da sabbie limose con granulometria poco assortita che rappresentano i sedimenti depositi dal Reno all'interno dell'attuale alveo delimitato dagli argini artificiali. Questi sedimenti sono di età contemporanea essendoci depositi negli ultimi due secoli. Tale corpo è visibile solo nel settore meridionale degli ambiti di Chiesa Nuova, Case Reno Sabbioni e Gallo.

- **sedimenti di argine naturale e canale (MLes)**

Sono formati da alternanze di limi inorganici, sabbie fini limose, loam, limi argillosi a bassa plasticità. In questi depositi si possono talvolta osservare intraclasti di sedimenti fangosi, resti organici vegetali, o strutture sedimentarie da corrente trattiva come lamine parallele, inclinate o gradazione diretta.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

Questi sedimenti formano generalmente corpi di argine naturale o ventaglio da rotta e sono presenti in tutti gli ambiti considerati, tranne quello di Casette Tracchi. In corrispondenza dell'abitato di Gallo, sedimenti di granulometria analoga costruiscono invece il riempimento di un canale terminale di Reno facente parte di un delta interno seicentesco che progrediva all'interno delle Valli di Poggio.

- **sedimenti fini di depressione interalvea (Olpi)**

Consistono di argille, argille limose, argille limose organiche, diffusamente bioturbate, a plasticità generalmente medio-bassa, deposti in ambienti di piana inondabile, stagno e palude dolce. Questi sedimenti formano la maggior superficie degli ambiti zonati e le aree corrispondenti erano soggette a consistenti apporti sedimentari fini, durante gli episodi di piena e tracimazione fluviale.

### 8.2.3 Forme di superficie e sepolte

Tra le forme di superficie e sepolte proposte dagli standard di rappresentazione e archiviazione informatica, sono state individuate e riportate in carta quelle riferibili ai soli assi di paleoalveo.

Gli assi di paleoalveo cartografati evidenziano l'andamento di antichi alvei oggi sepolti a debole profondità, appartenuti ai fiumi Reno e Po. Le paleo-direzioni dei corsi fluviali, indicate dal verso delle frecce del simbolo grafico, sono state ricostruite mediante l'utilizzo di fonti e cartografie storiche o attraverso analisi e correlazioni di prove geognostiche di repertorio. Grazie ai dati disponibili è stato possibile ricostruire in dettaglio gli andamenti del Reno romano, che provenendo da San Pietro in Casale si dirige a nord interessando il centro storico di Poggio Renatico, e quello di un antico Po che, proseguendo da Mirabello con andamento nord-ovest sud-est, borda le porzioni più settentrionali degli ambiti di Madonna Boschi e Coronella (cfr. Tavola 2).

### 8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)

In questa tavola sono riportati i punti di misura di microtremore a stazione singola utilizzati per lo studio di microzonazione con i rispettivi valori di frequenza di risonanza fondamentale ( $f_0$ ).

I punti di misura riportati in carta sono tematizzati con colori diversi in relazione al valore di ampiezza massima del picco di H/V. Ampiezze superiori a 2.5 sono restituite con colori arancio e rosso, mentre giallo e verde sono utilizzati per valori inferiori a 2.5.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

I differenti simboli grafici (cerchi e rombi) indicano rispettivamente le indagini realizzate da Geotema S.r.l. per lo studio di microzonazione sismica di terzo livello (cfr. Tabella 4-2) e quelle di repertorio acquisite da singoli professionisti o recuperate dagli archivi comunali (cfr. Tabella 4-1).

Sulla base dei dati ottenuti dalle misure microtremore sismico non è stato possibile suddividere il territorio indagato secondo le diverse classi di frequenza proposte nell'allegato B della Delibera di Giunta Regionale D.G.R. 1227/2015, in quanto le frequenze rilevate risultano sostanzialmente sempre inferiori ad 1 Hz. Alla scala comunale è comunque possibile osservare alcune variazioni nei valori di frequenza acquisiti. Frequenze maggiori, comprese tra 0,9 e 1,02 Hz, caratterizzano la porzione occidentale dell'ambito di Poggio Renatico con una tendenza alla diminuzione nei valori di  $f_0$  spostandosi sia verso est che verso nord (es. ambiti di Coronella e Madonna Boschi). Le aree più occidentali e orientali del territorio comunale, su cui sorgono gli abitati di Chiesanuova e Gallo, sembrano invece essere caratterizzate da frequenze più basse, generalmente comprese tra 0,63 e 0,75 Hz, con punte minime di 0,44 Hz nella porzione più orientale (v. paragrafo 6.1).

### 8.4 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4)

La carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) o carta delle aree suscettibili di effetti locali, è l'elaborato di sintesi fondamentale del primo livello di approfondimento degli studi microzonazione.

Tra gli elaborati prodotti per i precedenti studi di microzonazione sismica, la carta delle microzone omogenee è quella che ha subito maggiori modifiche. Tali revisioni si sono rese necessarie sia per adeguare l'elaborato cartografico agli standard di rappresentazione e archiviazione informatica della Commissione Tecnica Nazionale, sia a fronte della disponibilità di molte nuove indagini realizzate per la ricostruzione post-sismica (capitolo 4).

L'elaborato, realizzato alla scala 1:10.000, mostra la suddivisione del territorio comunale in **zone suscettibili di amplificazioni locali** e **zone suscettibili di instabilità**, in quanto non sono presenti zone classificabili come stabili. Nella tavola sono riportate anche le ubicazioni dei punti di misura del rumore ambientale (v. tavola 3, paragrafo 8.3), come richiesto dagli standard di rappresentazione già citati.

Le diverse microzone sono state definite sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche dei primi trenta metri di sottosuolo (Figura 8-1) e ad esse sono stati associati codici identificativi progressivi e colorazioni distinte come previsto dagli standard sopra citati.

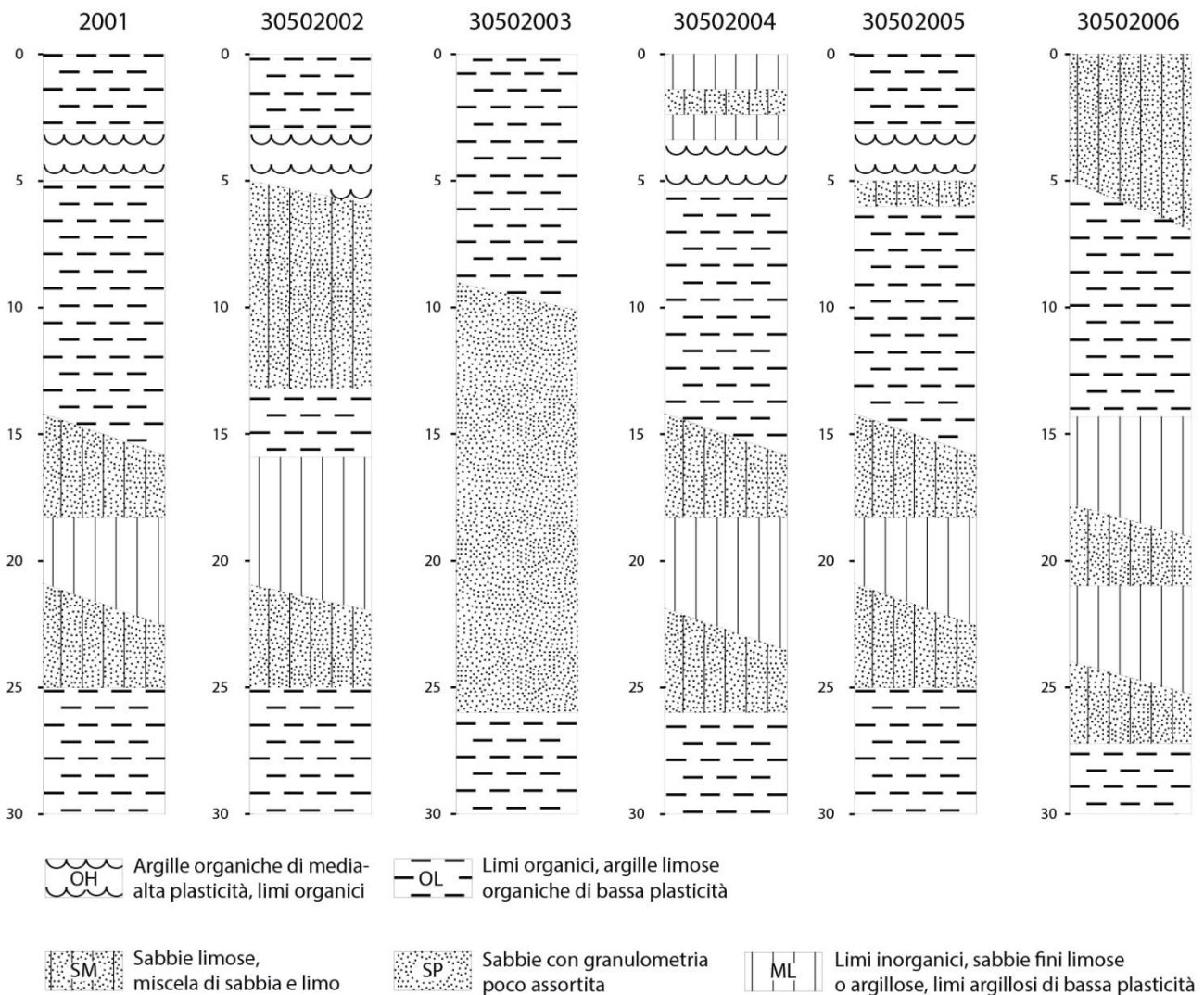
**Le 5 zone** cartografate come **instabili** presentano tutte problematiche legate a potenziali fenomeni di liquefazione e sono quindi state classificate come **zone di attenzione per liquefazione** ( $Z_{A_{LQ}}$ ) e



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

rappresentate in carta mediante apposito retino e relativo prefisso identificativo 3050. È stata inoltre identificata una microzona **suscettibile di sola amplificazione locale** a cui è stato attribuito il codice 2001.

Di seguito sono riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi (Figura 8-1) con la descrizione delle relative successioni in base alle quali sono state definite le classi zonali. Le descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.



**Figura 8-1 - Colonne stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti che costituiscono i primi 30 metri nelle diverse zone MOPS individuate nel territorio comunale.**

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

### **Zona 2001**

Argille organiche plastiche con intercalazioni di torbe poggiano su argille e argille limose di media-bassa plasticità. Seguono limi argillosi e argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie limose organizzate in corpi lenticolari.

### **Zona 30502002**

Argille organiche plastiche con intercalazioni di torbe poggiano su limi sabbiosi e sabbie limose poco addensate. Seguono limi argillosi e argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie limose organizzate in corpi lenticolari.

### **Zona 30502003**

Argille organiche plastiche con intercalazioni di torbe poggiano su una spessa serie di sabbie e sabbie limose poco addensate. Limi argillosi e argille limose di bassa plasticità si estendono infine sino alla base della successione indagata.

### **Zona 30502004**

Limi sabbiosi e sabbie fini limose poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni di torbe alternate a argille e argille limose di media-bassa plasticità. Seguono limi argillosi e argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie limose organizzate in corpi lenticolari.

### **Zona 30502005**

Argille organiche plastiche con intercalazioni di torbe poggiano su argille e argille limose di media-bassa plasticità intercalate da un livello metrico di limi sabbiosi e sabbie limose poco addensate. Seguono limi argillosi e argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie limose organizzate in corpi lenticolari.

### **Zona 30502006**

Sabbie e sabbie limose poco addensate poggiano su argille e argille limose di media-bassa plasticità. Seguono limi argillosi e argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie limose organizzate in corpi lenticolari.

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

La carta della velocità delle onde volumetriche di taglio mostra, a scala 1:10.000, i 52 punti di misura di  $V_s$  utilizzati per lo studio di microzonazione sismica ed i rispettivi valori di  $V_{s30}$ .

I valori di  $V_{s30}$  sono stati ricavati dall'elaborazione dei dati di velocità acquisiti mediante misure geofisiche di tipo sia diretto che indiretto (Tabella 8-2). Le differenti tipologie di indagini sono rappresentate in cartografia mediante simboli grafici distinti, rispondenti agli standard di rappresentazione utilizzati per lo studio e già ampiamente citati.

MISURE DIRETTE		MISURE INDIRETTE	
SCPT	31	MASW	15
DH	1	ESAC-SPAC	1
CH	4		

**Tabella 8-2 - Numero di indagini, suddivise per tipologia, utilizzate per la redazione della carta delle velocità delle onde di taglio.**

Osservando le  $V_{s30}$  si nota come, in alcuni casi, le indagini indirette forniscano valori lievemente sovrastimati rispetto a quelli derivati da misure dirette tipo cono sismico (SCPT), down-hole (DH) o cross-hole (CH).

La distribuzione e l'andamento dei valori di  $V_{s30}$ , spesso inferiori a 200 m/s, sono comunque coerenti con quelli di terreni analoghi che formano il primo sottosuolo di gran parte della bassa pianura alluvionale emiliano-romagnola.

## 8.6 Carte di microzonazione sismica (Tavole 6, 7, 8, 9)

Le carte di microzonazione sismica di livello 3, o carte dei fattori di amplificazione delle aree, sono state realizzate in accordo con quanto previsto dall'Allegato C della D.G.R. n. 1227/2015 e dagli Standard MS 4.0b e rappresentano gli elaborati finali di sintesi dello studio di microzonazione.

Gli elaborati in scala 1:10.000, riportano la classificazione delle aree indagate in base all'amplificazione attesa, quantificata tramite fattori parametrici (FA) espressi in termini di accelerazione di picco al suolo e di intensità di Housner<sup>1</sup> per i diversi periodi di vibrazione previsti dagli indirizzi regionali dell'Emilia-Romagna (D.G.R. 2193/2015):

<sup>1</sup> L'Intensità di Housner corrisponde all'area sottesa dallo spettro di risposta di pseudovelocità e rappresenta un indicatore della pericolosità sismica poiché correlabile all'energia dissipata nelle strutture durante un terremoto.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

- $FA_{PGA}$  (tavole 6) - fattori di amplificazione espressi come rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0);
- $FA_{0,1-0,5s}$  (tavole 7) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico ( $SI/SI_0$ ) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;
- $FA_{0,5-1s}$  (tavole 8) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico ( $SI/SI_0$ ) per periodi compresi tra 0,5 e 1 secondi.
- $FA_{0,5-1,5s}$  (tavole 9) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico ( $SI/SI_0$ ) per periodi compresi tra 0,5 e 1,5 secondi.

I fattori di amplificazione utilizzati per la redazione delle carte (Tabella 8-3, Tabella 8-4, Tabella 8-5, Tabella 8-6, Tabella 8-7, Tabella 8-8) sono stati derivati da analisi di risposta sismica locale (paragrafo 7.1.1). Le analisi sono state eseguite tenendo conto delle diversità litotecniche delle microzone individuate e dell'assetto tettonico, caratterizzato da una depressione strutturale nella fascia centrale del territorio comunale che abbassa il substrato sismico a maggiori profondità. I coefficienti ottenuti dalle modellazioni numeriche eseguite nelle diverse aree (Tabella 8-3, Tabella 8-4, Tabella 8-5, Tabella 8-6, Tabella 8-7, Tabella 8-8) sono stati confrontati con quelli proposti dagli abachi regionali (v. paragrafo 7.1.1). La sostanziale coerenza e compatibilità riscontrata ha fornito una validazione dei modelli utilizzati per la risposta sismica locale e ha permesso di caratterizzare i diversi ambiti con i rispettivi fattori di amplificazione, calcolati per diversi periodi di vibrazione.

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0,1-0,5)}$	$SI2-FH_{(0,5-1)}$	$SI3-FH_{(0,5-1,5)}$
1,47	1,69	2,19	2,20

**Tabella 8-3 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle zone 2001, 2004 e 2005 degli ambiti di Chiesanuova, Casette Tracchi, Madonna Boschi e settore orientale di Gallo, caratterizzati da bedrock superficiale posto a 270 m di profondità.**

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0,1-0,5)}$	$SI2-FH_{(0,5-1)}$	$SI3-FH_{(0,5-1,5)}$
1,37	1,58	2,30	2,31

**Tabella 8-4 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle zone 2002 e 2006 degli ambiti di Chiesanuova, Casette Tracchi, Madonna Boschi e settore orientale di Gallo, caratterizzati da bedrock superficiale posto a 270 m di profondità.**

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0,1-0,5)}$	$SI2-FH_{(0,5-1)}$	$SI3-FH_{(0,5-1,5)}$
1,42	1,63	2,19	2,21

**Tabella 8-5 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della zona 2003 degli ambiti di Chiesanuova, Casette Tracchi, Madonna Boschi e settore orientale di Gallo, caratterizzati da bedrock superficiale posto a 270 m di profondità.**

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$
1,40	1,60	2,15	2,16

**Tabella 8-6 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle zone 2001, 2004 e 2005 degli ambiti di Poggio Renatico, Case Reno Sabbioni, Gallo Centro e Coronella, caratterizzati da bedrock profondo posto a 340 m di profondità.**

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$
1,31	1,52	2,25	2,25

**Tabella 8-6 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle zone 2002 e 2006 degli ambiti di Poggio Renatico, Case Reno Sabbioni, Gallo Centro e Coronella, caratterizzati da bedrock profondo posto a 340 m di profondità.**

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$
1,37	1,56	2,14	2,15

**Tabella 8-7 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della zona 2003 degli ambiti di Poggio Renatico, Case Reno Sabbioni, Gallo Centro e Coronella, caratterizzati da bedrock profondo posto a 340 m di profondità.**

Le zone suscettibili di instabilità per liquefazione sono state distinte da quelle soggette a sola amplificazione locale per mezzo di soprassegno cartografico. Dalle geometrie delle “Zone di attenzione per liquefazione” rappresentate nella carta MOPS (v. tavola 4, paragrafo 8.4), sono state derivate quelle delle “Zone di suscettibilità per liquefazione”. Queste ultime sono state suddivise per classi di rischio sulla base degli indici del potenziale di liquefazione ( $I_L$ ) ottenuti da analisi semplificate eseguite su prove penetrometriche a piezocono (CPTu). Le classi individuate sono riportate in carta mediante l’utilizzo dei retini previsti per le aree a rischio moderato ( $2 < I_L \leq 5$ ) e elevato ( $5 < I_L \leq 15$ ). Si ricorda che gli indirizzi di microzonazione nazionale non prevedono che le aree a basso rischio ( $2 < I_L$ ) vengano rappresentate in carta con il retino che contraddistingue le zone instabili per liquefazione.

Rispetto a quanto previsto dagli Standard MS 4.0b, nelle carte sono rappresentati anche i valori puntuali delle stime del potenziale di liquefazione eseguite sulle singole verticali d’indagine. Considerata l’elevata disponibilità di prove elettriche e il maggior grado di affidabilità degli indici da esse ottenute si è ritenuto opportuno non riportare in carta indici derivati da precedenti verifiche effettuate su prove meccaniche. I valori di  $I_L$  ottenuti sono esplicitati mediante etichette numeriche associate a simboli quadrati con colorazioni distinte a seconda del grado di rischio. I simboli bianchi indicano rischio di liquefazione basso ( $0 < I_L \leq 2$ ), quelli gialli moderato ( $2 < I_L \leq 5$ ) i rossi elevato ( $5 < I_L \leq 15$ ) e quelli viola rischio molto elevato ( $> 15$ ).

## 9 Commenti finali e criticità

Gli approfondimenti di terzo livello eseguiti per lo studio di microzonazione sismica hanno permesso di determinare l'amplificazione sismica attesa e quantificare il grado di rischio nelle aree caratterizzate dalla presenza di condizioni predisponenti la liquefazione.

L'amplificazione attesa è stata determinata mediante analisi numeriche di risposta sismica locale, basate su dati stratigrafici e velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) acquisiti in foro sino ad elevate profondità. Le modellazioni e le analisi di risposta sismica locale eseguite per la microzonazione (paragrafo 7.1.1) possono fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni, ma non possono in alcun modo sostituirle. Specifiche analisi di risposta sismica locale devono infatti essere eseguite tenendo conto delle caratteristiche geologico-geotecniche del sito ed in funzione della tipologia di progetto o di opera da realizzare, in accordo con le suddette Norme Tecniche.

Per la determinazione del rischio di liquefazione sono state, inoltre, eseguite numerose verifiche di suscettibilità mediante metodi semplificati. Sulla base dei risultati ottenuti il metodo di Boulanger e Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015, è stato considerato come maggiormente cautelativo ed affidabile per il calcolo degli indici di liquefazione  $I_L$  (paragrafo 7.2.1).

Nei paragrafi seguenti viene proposta una sintesi dei principali caratteri geologici ed evolutivi dell'area ed una analisi di come questi ultimi abbiano determinato la stretta correlazione tra rischio liquefazione e insediamento antropico. Infine vengono riepilogati i risultati dello studio condotto e le principali criticità rilevate, anche attraverso il confronto tra quanto prodotto nei precedenti elaborati di microzonazione sismica (cfr. Ordinanza 70/2012).

### 9.1 Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale

La parte inferiore dei corpi indagati è costituita da **sedimenti pleistocenici** di media pianura alluvionale, depositi durante fasi dell'ultima glaciazione, costituiti da alternanze di sabbie e grossi volumi di limi di provenienza appenninica, con  $V_s$  comprese tra 200 e 250 m/s.

Secondo i criteri stratigrafici adottati dalla cartografia nazionale del Progetto CARG, i sedimenti pleistocenici sono inquadrati nel **Subsistema di Villa Verucchio** (AES7).

Contrariamente ai sedimenti più antichi, anche i **sedimenti post-glaciali** presentano caratteri sensibilmente diversi nella parte meridionale ed in quella settentrionale dell'area di studio. Nei settori centro-meridionali si sviluppa, infatti, una spessa successione di prevalenti limi continentali, con intercalazioni di sabbie e argille di provenienza appenninica. Sono presenti importanti livelli di paleosuoli a concrezioni carbonatiche

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

nei quali l'alterazione diagenetica influenza notevolmente i parametri geotecnici e geofisici. Le velocità sismiche tipiche di questa unità superano di poco i 200 m/s, con bruschi incrementi in corrispondenza dei livelli di paleosuolo più evoluti. Nella parte settentrionale dell'area di studio, invece, la successione limosa viene sostituita da spessi corpi di sabbie di alveo di Po. Tali sedimenti costituiscono la porzione inferiore del **Subsistema di Ravenna (AES8)**.

I **sedimenti più recenti**, depositi negli ultimi 5.000 anni, sono dominati da fanghi argillosi organici di origine appenninica con estesi orizzonti di torbe di ambienti di palude continentale. Questi depositi coesivi presentano scarse proprietà geotecniche e sono caratterizzati dai più bassi valori di Vs con minimi intorno a 100 m/s.

All'interno dei sedimenti fangosi si trovano corpi allungati di sabbie e sabbie limose di riempimento di canale di Reno mentre, nella parte settentrionale del territorio comunale, di Po. I corpi di età relativamente più antica sono ovunque sepolti, come tutti i depositi di paleoalveo del Po e quelli del Reno che interessano l'abitato di Poggio Renatico. I depositi di argine naturale e di canale di Reno di età più recente affiorano in superficie e conservano una espressione morfologica, come visibile in corrispondenza del ramo seicentesco di Gallo.

### 9.2 Microzonazione sismica e criticità

Sulla base delle nuove conoscenze acquisite mediante gli approfondimenti di terzo livello, **il territorio di Poggio Renatico è stato suddiviso in due distinte aree a diversa pericolosità sismica**, in base ai differenti valori dei fattori di amplificazione ottenuti dalle analisi di risposta sismica. Tali aree riflettono la distribuzione delle strutture tettoniche e l'assetto stratigrafico del sottosuolo.

L'evoluzione tettonica dell'area ha infatti determinato una **depressione strutturale maggiormente subsidente**, orientata nord-est sud-ovest, **nella fascia centrale del territorio indagato**.

L'elevata subsidenza, la notevole disponibilità di spazio di accomodamento sedimentario ed i forti apporti terrigeni, hanno qui determinato una spessa successione di coperture sedimentarie, dominate da depositi continentali di pianura alluvionale di provenienza appenninica e subordinatamente padana a cui si intercalano, nella parte inferiore, depositi di fronte deltizia e marino marginale. Le coperture quaternarie sono quindi in larga parte costituite di depositi argilloso-limosi alternati a subordinati corpi sabbiosi di alveo.

Questa porzione di territorio, in cui si sviluppano gli **ambiti urbani di Poggio Renatico, Coronella e Gallo**, è caratterizzata da un **bedrock sismico** posto **ad una profondità di 340 m** e da **fattori di amplificazione (FA)** in termini di PGA, che risultano **compresi tra 1.3 e 1.4**.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

**Nelle due fasce laterali a minor subsidenza**, in cui si **sviluppano gli ambiti di Chiesanuova, Madonna Boschi e la porzione più orientale** di quello di Gallo, il *bedrock sismico* è stato invece posto alla profondità di 270 m (cfr. Figura 6-2). In quest'area i terreni di coperta sono perciò meno spessi pur essendo costituiti da depositi analoghi a quelli poc'anzi descritti. Questa porzione di territorio è caratterizzata dai **più elevati fattori di amplificazione (FA)** in termini di PGA, che risultano **compresi tra 1.5 e 1.6**.

Rispetto agli studi precedenti (cfr. Ordinanza 70/2012), i coefficienti di amplificazione ed i valori di **accelerazione** di picco (PGA) sono stati rivisti ed attualmente risultano più articolati rispetto al precedente unico coefficiente di amplificazione valido per l'intero territorio comunale ( $FA_{PGA} = 1.5$  cfr. Ordinanza 70/2012). La rimodulazione dei fattori è stata dettata dai risultati delle risposte sismiche locali, che risultano d'altra parte coerenti con quelli proposti dai nuovi abachi regionali introdotti con la D.G.R. 2193/2015.

Per il **calcolo del potenziale di liquefazione** delle diverse aree sono stati utilizzati i rispettivi valori di PGA (*Peak Ground Acceleration*) ottenuti dalle analisi di risposta sismica locale (cfr. 7.1.1e 7.2.1).

Gli indici di liquefazione ( $I_L$ ) sono stato calcolati utilizzando il metodo semplificato di *Boulanger e Idriss* (2014) in ogni sito caratterizzato mediante indagine CPTu.

La distribuzione degli indici di liquefazione evidenzia come le **fasce a maggior rischio** siano collocate in **corrispondenza dei paleoalvei o dei corpi da rotta fluviale** sub-affioranti o sepolti a debole profondità. Queste fasce, formate da sabbie e limi poco addensati di riempimento di canale e argine prossimale (MOPS 30502002, 30502003, 30502004, 30502005 e 30502006), mostrano potenziali di liquefazione variabili da moderati ( $<2 I_L <5$ ) a alti ( $<5 I_L <15$ ).

**Rischi di liquefazione da molto bassi a nulli** ( $I_L <2$ ) caratterizzando invece le **aree topograficamente più depresse del territorio comunale**, che non presentano significativi corpi di sabbie nei primi 20 m di sottosuolo, in quanto essenzialmente formate da sedimenti argillosi coesivi, spesso organici, depositi in condizione di palude e depressione interalvea (MOPS 2001).

**Le aree a minor rischio** coincidono spesso con le **aree rurali** scarsamente abitate del territorio comunale. Fasce classificate a **rischio liquefazione non significativo** ( $I_L <2$ ) interessano però anche la **porzione più orientale** dell'abitato di **Poggio Renatico e la sua area industriale**, oltre che **gran parte del centro di Chiesanuova e di Coronella**.

**Gli indici** ottenuti dalle nuove analisi di liquefazione hanno permesso di aumentare notevolmente le conoscenze relative al grado di rischio liquefazione delle diverse aree di studio.

Raffronti con i preesistenti studi di microzonazione sismica risultano alquanto complessi sia per il numero limitato di verticali precedentemente analizzate, sia per l'utilizzo di differenti metodi semplificati per la



## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

stima del potenziale di liquefazione. A questo si deve inoltre aggiungere la riduzione delle accelerazioni di picco utilizzate per il calcolo degli indici di liquefazione, dettata dai risultati delle risposte sismiche locali e peraltro suggerita dai nuovi abachi regionali (D.G.R. 2193/2015).

### 9.3 Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione

Nel territorio in esame emerge una forte correlazione fra la distribuzione dell'edificato storico e le zone a più elevato potenziale di liquefazione.

Questa infelice correlazione non è casuale ed interessa gran parte dei centri abitati e nuclei storici della bassa Pianura Padano-Veneta, in quanto i fattori che hanno controllato la nucleazione e lo sviluppo degli insediamenti sono gli stessi che hanno prodotto i corpi sabbiosi liquefacibili. In questi vasti territori di bassa pianura i limitati gradienti morfologici e gli alvei fluviali naturalmente pensili rendono lo scolo delle acque molto difficoltoso, particolarmente nelle aree più subsidenti. La diffusione storica di aree umide, paludi e acquitrini ha, quindi, fortemente limitato le possibilità di sviluppo agricolo ed insediativo. In questo contesto i corpi arginali e i dossi sabbiosi di paleoalveo costituivano le sole strutture stabilmente emerse e drenate, percorribili anche nei periodi più umidi. La natura continua degli alvei fluviali consentiva il tracciamento di percorsi e strade, mentre gli alvei attivi hanno rappresentato, storicamente, importanti vie di trasporto fluviale. La presenza di falda libera all'interno dei corpi acquiferi freatici consentiva l'approvvigionamento idrico attraverso pozzi superficiali, fornendo al contempo acqua agli apparati radicali delle piante coltivate anche nei periodi siccitosi. La combinazione di questi fattori ha fatto sì che i centri antichi si enucleassero nella quasi totalità dei casi su corpi sabbiosi di alveo fluviale. A seguito delle diffuse bonifiche idrauliche e allo sviluppo economico e tecnologico in epoca più recente, questi condizionamenti territoriali si sono fortemente ridotti, anche se la correlazione fra zone sabbiose liquefacibili e insediamento permane. Infatti le zone morfologicamente depresse con sedimenti fangoso-torbosi presentano scarse caratteristiche geotecniche e gli insediamenti moderni tendono a svilupparsi intorno ai centri preesistenti e buona parte della rete stradale attuale ripercorre percorsi storici su corpi di paleoalveo.

### 9.4 Indicazioni per la riduzione del rischio sismico

Le norme regionali in materia urbanistica e di riduzione del rischio sismico prevedono che le risultanze degli studi della microzonazione debbano essere recepite negli strumenti di pianificazione territoriale (es. previgenti PSC o redigenti PUG), predisponendo cartografie e norme di piano che contengano indicazioni ed indirizzi per la riduzione del rischio sismico.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

In base alle principali criticità emerse dallo studio di microzonazione sismica di terzo livello, si indicano in sintesi le analisi e gli approfondimenti ritenuti necessari per studi geologici da realizzarsi a supporto dei diversi livelli di pianificazione territoriale (es. nuovi accordi operativi o PUA) e in fase esecutiva di progetti e opere.

L'analisi delle numerose indagini raccolte per lo studio di microzonazione ha evidenziato come la presenza di livelli sabbiosi e limo-sabbiosi saturi, risulta distribuita lungo le direttrici di antichi alvei di Reno e di Po, spesso sepolti, su cui oggi si sviluppano gran parte dei centri abitati del territorio comunale.

L'interazione e lo sviluppo dei reticoli idrografici dei fiumi Reno e Po, avvenuta nel tempo attraverso rotte, avulsioni e divagazioni, ha portato ad una distribuzione estremamente eterogenea dei litotipi alluvionali, che nel sottosuolo formano un complesso intreccio di corpi sabbiosi.

Pertanto, la definizione dei limiti delle aree potenzialmente suscettibili di liquefazione e delle diverse classi di rischio presenta inevitabili incertezze legate all'imperfetta conoscenza del sottosuolo, nonostante il numero elevato di indagini presenti nel territorio. L'incertezza diviene maggiore laddove non si disponga di dati stratigrafici attendibili o adeguatamente distribuiti.

Per queste ragioni su tutto il territorio comunale si raccomanda l'esecuzione di specifici approfondimenti volti ad accertare la presenza di orizzonti potenzialmente liquefacibili, mediante adeguate campagne di indagini geotecniche che comprendano prove penetrometriche con punta elettrica, preferibilmente a piezocono, spinte almeno sino a 20 metri di profondità. Tali indagini garantiscono infatti un'affidabile valutazione del potenziale di liquefazione e una quantificazione dei cedimenti indotti.

Il calcolo dell'indice di potenziale di liquefazione ( $I_L$ ) dovrà tenere conto dei metodi e dei parametri di input utilizzati per lo studio di microzonazione (paragrafo 7.2.1). Scelte meno cautelative dovranno essere adeguatamente motivate dai tecnici incaricati delle verifiche e supportate da metodi di analisi avanzati (es. prove di laboratorio) e approfondite indagini sul contesto idrogeologico locale e sulle soggiacenze minime dei livelli di falda.

Nelle aree a maggior rischio si ritiene opportuno realizzare quindi sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di campioni indisturbati, da sottoporre ad analisi granulometriche e prove cicliche di laboratorio, al fine di quantificare l'effettiva suscettibilità alla liquefazione. Queste prove dovranno considerarsi indispensabili qualora si rinvenissero spessori significativi di depositi i cui fusi granulometrici rientrino nelle fasce di possibile liquefazione, o in caso di interventi edilizi strategici o comunque rilevanti previsti dalla pianificazione urbanistica.

Tuttavia, anche le più sofisticate analisi di liquefacibilità sono sempre da considerarsi rappresentative di volumi di terreno limitati, specie in un contesto come quello di pianura in cui la variabilità laterale dei

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

caratteri stratigrafici e sedimentologici risulta particolarmente elevata. Estendere valutazioni puntuali di suscettibilità alla liquefazione ad aree contigue può risultare alquanto incerto e pertanto è altamente consigliabile prevedere indagini di tipologia e numero adeguate all'ampiezza dell'area considerata e alla rilevanza delle opere.

Si ricorda inoltre che le Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 prediligono l'utilizzo di **analisi di risposta sismica locale** per la definizione dell'azione sismica, rispetto all'approccio semplificato basato sulle categorie di sottosuolo. Nelle aree caratterizzate dalla presenza di terreni potenzialmente liquefacibili questa scelta risulta ancor più opportuna e pertanto si consiglia di procedere con specifiche analisi di risposta sismica locale.

Si precisa inoltre che le modellazioni e le analisi di risposta sismica eseguite per la microzonazione (paragrafo 7.1.1) possono fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle norme tecniche, ma non possono in alcun modo sostituirle. Le analisi di risposta sismica finalizzate alla definizione dell'azione sismica di progetto devono essere, infatti, realizzate sulla base di dati geologici, geotecnici e geofisici acquisiti nel sito d'interesse ed in funzione delle caratteristiche e della classe d'uso dell'opera da realizzare.

Infine anche nelle aree caratterizzate dalla presenza di spessori significativi di depositi con caratteristiche geotecniche particolarmente scadenti (bassi valori di  $C_u$  e alto indice plastico), concentrate in particolare nella microzona 2001 (Figura 8-1 - Tavola 4) dovranno essere proposte adeguate campagne di indagini geotecniche in sito e di laboratorio, per la valutazione e quantificazione di possibili cedimenti indotti.

## 10 Bibliografia

- AA.VV., (2004): *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. Deliverable D23.12 of the SEASAME project, April, [Online], <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV., (2011): *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*. Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII - n. 2.
- Albarello D., Castellaro S., (2011): *Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola*. In AA.VV. (2011): "Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e Criteri per la microzonazione sismica", supplemento alla rivista *Ingegneria sismica*, a. XXVIII, n. 2.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

- Amorosi A., (1997a): *Detecting compositional, spatial, and temporal attributes of glaucony: a tool for provenance research*. *Sedimentary Geology*, 109: 135-153.
- Amorosi A., (1997b): *Miocene shallow-water deposits of the northern Apennines: A stratigraphic marker across a dominantly turbidite foreland-basin succession*. *Geologie en Mijnbouw*, v. 75, p. 295-307.
- Amoroso S., Monaco P., Lehane B. And Marchetti D., (2014): *Examination of the potential of the seismic dilatometer (SDMT) to estimate in situ stiffness decay curves in various soil types*. *Soils and Rocks*, Vol. 37, No. 3, 177-194. ISSN: 1980-9743. Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ABMS) and Portuguese Geotechnical Society (SPG). São Paulo, Brazil.
- ASTM, (1985): *Classification of Soils for Engineering Purposes: Annual Book of ASTM Standards, D 2487-83, 04.08*, American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 395-408.
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone, P., (1990): *Structural model of Italy - Sheet n°1*, in: Castellarin A., Coli M., Dal Piaz G.V., Sartori R., Scandone P., Vai G.B. (Eds.), *Structural model of Italy*. CNR, Progetto Finalizzato Geodinamica, Roma.
- Boccaletti M., Martelli L., (a cura di) (2004): *Carta Sismo-tettonica della Regione Emilia-Romagna, Scala 1:250.000 e Note Illustrative*. SELCA, Firenze.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Tanini C. and Vannucci G., (2004): *Seismotectonic Map of the Emilia-Romagna Region, 1:250000*. Regione Emilia-Romagna – CNR.
- Bordoni P., Azzara R.M., Cara F., Cogliano R., Cultrera G., Di Giulio G., Fodarella A., Milana G., Pucillo S., Riccio G., Rovelli A., Augliera P., Luzi L., Lovati S., Massa M., Pacor F., Puglia R., Ameri G., (2012): *Preliminary results from EMERSITO, a rapid response network for site-effect studies*. *Ann. Geophys.* 55 (4), 599–607. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-6153>.
- Boulanger R. W., Idriss I. M., (2014): *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 134 pp.
- Burrato P., Ciucci F., Valensise G., (2003): *An inventory of river anomalies in the Po Plain, northern Italy: evidence for active blind thrust faulting*, *Annals of Geophys.*, 46 (5), 865-882.
- Burrato P., Vannoli P., Fracassi U., Basili R., Valensise G., (2012): *Is blind faulting truly invisible? Tectoniccontrolled drainage evolution in the epicentral area of the May 2012, Emilia-Romagna earthquake sequence (northern Italy)*. *Annals of Geophys.*, 55(4), 525-531, doi: 10.4401/ag-6182.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

- Caputo R., Papathanasiou G., (2012): *Ground failure and liquefaction phenomena triggered by the 20 May, 2012 Emilia-Romagna (Northern Italy) earthquake: case study of Sant'Agostino - San Carlo - Mirabello zone*. Nat. Haz. Earth System Sciences, 12(11), 3177-3180, doi:10.5194/nhess-12-3177-2012.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 202 - San Giovanni in Persiceto*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 203 - Poggio Renatico*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 204 - Portomaggiore*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geomorfologica Provincia di Ferrara - Geotema S.r.l. (2016), <http://www.ferraradeltapo-unesco.it/>.
- Castellaro S., (2012): *H/V: un contributo oltre Vs30*, In: Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici, a cura di Marco Mucciarelli, ARACNE editrice, 448 pp.
- Castellaro S., Mulargia F., (2011): *Seismic soil classification from a different perspective*. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13-15.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C., Amato A., (2006): *CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002*, versione 1.1. INGV-CNT, Roma. <http://csi.rm.ingv.it/>.
- Castiglioni G., Biancotti A., Bondesan M., Cortemiglia G.C., Elimi C., Favero V., Gasperi G., Marchetti G., Orombelli G., Pellegrini G. B., Tellini C., (1999): *Geomorphological map of the Po Plain, Italy, at scale of 1:250.000*. Earth Surf. Proc. Land., 24, 1115-1120.
- Cerrina Feroni A., Ottria G., Martinelli P., Martelli L., Catanzariti R., (2002): *Carta geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo, 1: 250,000*. SELCA, Firenze.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, (2015): *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b*. [http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard\\_MS\\_4\\_0b.pdf](http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard_MS_4_0b.pdf).
- Corrado, S., Aldega, L., Zattin, M., (2010): *Sedimentary vs. tectonic burial and exhumation along the Apennines (Italy)*. Journal of the Virtual Explorer 36.
- Correggiari A., Field M.E., Bortoluzzi G., Ligi M., Penitenti D., (1992) - *Ridge and swale morphology on the North Adriatic epicontinental shelf*. Rapport CIESM 33:125.
- D.A.L. 112/2007: Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per *Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e*

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

*urbanistica*. Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007, Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007.

D.C.P. Provincia di Ferrara n. 32/2014: *Adozione della Variante al PTCP: ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale*.

Devoti, R., Esposito A., Pietrantonio G., Pisani A. R., Riguzzi F., (2011): *Evidence of largescale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction boundary*, Earth Planet. Sci. Lett., 311, 230–241, doi:10.1016/j.epsl.2011.09.034.

D.G.R. Emilia-Romagna n. 1227/2015: Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014. *Attribuzione contributi a favore degli enti locali. Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica e delle indicazioni per l'archiviazione informatica*.

D.G.R. Emilia-Romagna n. 2193/2015: *Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla Deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112*.

D.G.R. Emilia-Romagna n. 573/2016: *"O.C.D.P.C. 26 ottobre 2015, n. 293 - Annualità 2014 - Criteri per l'attribuzione di contributi per la realizzazione di interventi di riduzione del rischio sismico in edifici pubblici strategici e rilevanti, in edifici privati e per studi di microzonazione sismica, di cui all'art. 2, comma 1, lettere a), b) e c). Modalità di concessione e liquidazione dei contributi"*.

Di Capua G., Tarabusi G., (2013): *DPC-INGV S2 2012-2013 project Annex2 to D4.1 – Site-specific hazard assessment in priority areas - MIRANDOLA (MO) seismo-stratigraphic models*, Online <https://sites.google.com/site/ingvdpc2014progettos2/tasks/task-4/d4-1>.

Di Dio G., Caporale L., (1998): *Un modello fisico tridimensionale della conoide alluvionale del Fiume Reno per la gestione degli acquiferi e lo studio della subsidenza*. In: Geofluid '98 - Problemi di ingegneria: Estrazione di fluidi e subsidenza (a cura di G. Brighenti e E. Mesini), Piacenza, 3 ottobre 1998, 67-76.

Di Dio G., Molinari F., (2000): *A study of the groundwater resources in the Ferrara Province (Po River Basin, Northern Italy)*. Proceedings of III Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems, 24-27/10/2000. Bavaria, Munich, Germany: 84-86.

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

- Emergeo Working Group, (2012): *Technologies and new approaches used by the INGV EMERCEO Working Group for real-time data sourcing and processing during the Emilia Romagna (northern Italy) 2012 earthquake sequence*. ANNALS OF GEOPHYSICS, 55, 4, 2012; doi: 10.4401/ag-6117.
- Emergeo Working Group, (2013): *Liquefaction phenomena associated with the Emilia earthquake sequence of May–June 2012 (Northern Italy)*. Nat. Haz. Earth Syst. Sci., 13, 935-947.
- Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012a): *Terremoti dell’Emilia - Maggio 2012. Rilievo macrosismico MCS speditivo. Rapporto finale. 15 giugno 2012*, <http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/TerremotoEmiliaMCS.pdf>.
- Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012b): *The MCS macroseismic survey of the Emilia 2012 earthquakes*. Annals of Geophysics Vol. 55, No 4.
- Garofalo F., Foti S., Hollender F., Bard P.Y., Cornou C., Cox B.R., Ohrnberger M., Sicilia D., Asten M., Di Giulio G., Forbriger T., Guillier B., Hayashi K., Martin A., Matsushima S., Mercerat D., Poggi V., Yamanaka H., (2016): *InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods, Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 82, pp. 222-240, doi: 10.1016/j.soildyn.2015.12.010i.
- Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M., Vignolo A., (2010): *Sedimentary and Tectonic Evolution in the Eastern PoPlain and Northern Adriatic Sea Area from Messinian to Middle Pleistocene (Italy)*, in F.P. Sassi, G. Dal Piaz, and C. Doglioni, (eds.), *Nature and Geodynamics of the Northern Adriatic Lithostere*: Rend. Fis. Acc. Lincei, v. 21/1, p. 131-16.
- Govoni A., Marchetti A., De Gori P., Di Bona M., Lucente F.P., Improta L., Chiarabba C., Nardi A., Margheriti L., Piana Agostinetti N., Di Giovambattista R., Latorre D., Anselmi M., Ciaccio M.G., Moretti M., Castellano C., Piccinini D., (2014): *The 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy): imaging the thrust fault system by accurate aftershocks location*. Tectonophysics, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.02.013>.
- Gruppo di Lavoro Liquefazione, (2012): *Rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a Mirabello*. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>.
- Gruppo di lavoro MPS, (2004): *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall’Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003*. Rapp. conclusivo per il DPC, INGV, Milano-Roma, pp 65 + 5 appendici.
- Gruppo di Lavoro MS, (2008): *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Conferenza delle Regioni e Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom. [http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view\\_pub.wp?contentId=PUB1137](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Valensise G., (2007): *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and the Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*, INGV-SGA; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.
- Idriss I. M., Boulanger R. W., (2008): *Soil Liquefaction during earthquakes*. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, 469 pp.
- ISIDe Working Group, (INGV, 2010): *Italian Seismological Instrumental and parametric database*. <http://iside.rm.ingv.it>.
- Iwasaki T., Arakawa T., Tokida K., (1982): *Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes*. Proceedings of the Conference on Soil Dynam.
- L.R. Emilia-Romagna n. 19 del 30 ottobre 2008: *Norme per la riduzione del rischio sismico*. Bollettino Ufficiale Regione Emilia-Romagna n. 44 del 12 marzo 2010.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E., (2016): *DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>.
- Martelli L., Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F.C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F., Severi P., (2017): *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe, edizione 2016*.
- Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi G., Madiari C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V., Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C., Ricci L., (2013): *Microzonazione Sismica Dell'area Epicentrale Del Terremoto Della Pianura Emiliana Del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti 32° Convegno Nazionale Gngts, Trieste. Isbn: 978-88-902101-7-4.
- Martelli L., Romani M., (2013): *Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012* (Ordinanza del commissario delegato – Presidente della Regione Emilia-Romagna n. 70/2012), Relazione Illustrativa.
- Massa M., Augliera P., Carannante S., Cattaneo M., D'Alema E., Lovati S., Monachesi G., Moretti M., Piccinini D., (Seismological projects DPC-INGV 2012-2013): *May-June 2012 Emilia seismic sequence: relocated seismicity, Project S1, Base-knowledge improvement for assessing the seismogenic potential of Italy*, Deliverable D18, Task b2, <https://sites.google.com/site/ingvdpccprojects1/home>.



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

- Meletti C., Valensise G. (a cura di), (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.
- Minarelli L., Amoroso S, Tarabusi G., Stefani M., Pulelli M., (2016): *Down-hole geophysical characterization of middle-upper Quaternary sequences in the Apennine Foredeep, Mirabello, Italy*. *Annals of Geophysics*, 2016.
- Montone P., Mariucci M.T., Pierdominici S., (2012): *The Italian present-day stress map*, *Geophys. J. Int.*, 189, 705-716; doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05391.x.
- Mucciarelli M. (a cura di), (2012): *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*.
- NTC, (2008): *Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 14 gennaio 2008*. Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, www.cslp.it, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- NTC, (2018): *Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 17 gennaio 2018*. Gazzetta Ufficiale, n. 8 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 8 alla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- Ori G.G., Friend P.F., (1984): *Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets*. *Geology*, 12, 475-478.
- Paolucci E., Albarello D., D'Amico S., Lunidei E., Martelli L., Mucciarelli M., Pileggi D. (2015): *A large scale ambient vibration survey in the area damaged by May-June 2012 seismic sequence in Emilia Romagna, Italy*, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (11) pp. 3187-3206.
- Pieri M., Groppi G., (1975): *The structure of the base of the Pliocene-Quaternary sequence in the subsurface of the Po and Veneto Plains, the Pedepennine Basin and the Adriatic Sea*. *Structural model of Italy*, *Quaderni de "La Ricerca Scientifica"* 90, 409-415.
- Pieri M., Groppi G., (1981): *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*. C.N.R., *Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl.*, 414, 1-13.
- Pondrelli S., Salimbeni S., Perfetti P., Danecek P., (2012): *Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence*. *Annals of Geophys.*, 55(4), 615-621, doi: 10.4401/ag-6146.
- Rathje E. M, Kottke A. (2013) - *Strata*, <https://nees.org/resources/strata>.
- Regione Emilia-Romagna (2014): *Ordinanza n. 70 del 16 ottobre 2014 del Commissario Delegato Regione Emilia-Romagna "Approvazione programma per gli studi di microzonazione sismica" e relativi elaborati prodotti*.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

- Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, (1998): *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ufficio geologico – ENI-Agip, Divisione Esplorazione e Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120.*
- Ricci Lucchi F., (1986): *The Oligocene to Recent foreland basins of the northern Apennines*, in: Allen, P., Homewood, P. (Eds.), *Foreland basins*. Blackwell Scientific, Oxford, pp. 105-139.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M.L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi S., Rio D., (1982): *Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nel margine appenninico*, in: Cremonini G., Ricci Lucchi F. (Eds.). *Guida alla Geologia del margine appenninico-padano* Pitagora-Technoprint, Bologna, pp. 17-46.
- 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
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), (2016): *CPT15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.* doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT15>
- Scognamiglio L., Margheriti L., Mele F.M. Tinti E., Bono A., De Gori P., Lauciani V., Lucente F.P., Mandiello A.G., Marcocci C., Mazza S., Pintore S., Quintiliani M., (2012): *The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations, moment tensors and magnitudes*. *Annals of Geophys.*, **55**(4), 549-556, doi: 10.4401/ag-6159
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. *Handbuch der Geophysik*, **2**(4), 552-555.
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. *Handbuch der Geophysik*, **2**, 4, pp. 550-555.
- Sonmez H., (2003): *Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey)*. *Environ. Geology* **44**(7), pp. 862-871.
- Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G., (2009): *Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): seismotectonic implications*. *Bollettino della Società Geologica Italiana* **128**.
- 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., 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*, ASCE, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol. **127**, October, pp 817-833.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI POGGIO RENATICO

## 11 Allegati

---

Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000
Carta Geologico – Tecnica per la Microzonazione Sismica	Tavola 2	1:10.000
Carta delle frequenze naturali del terreno	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica	Tavola 4	1:10.000
Carta della velocità delle onde di taglio	Tavola 5	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 6 - $FA_{PGA}$	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 7 - $FA_{0,1 - 0,5 s}$	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 8 - $FA_{0,5 - 1,0 s}$	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 9 - $FA_{0,5 - 1,5 s}$	1:10.000

Allegato 1 - Sezioni Geologiche

Allegato 2 - Rapporti di Prova

Allegato 3 - Verifica Potenziale di Liquefazione CPTU MS

---