



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 Vigarano Mainarda (FE)



Relazione Illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Geotema S.r.l.	04/03/2020

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

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	17
3.1	Quadro geografico geomorfologico	17
3.2	Contesto geologico stratigrafico.....	19
3.3	Contesto strutturale	21
4	Dati geognostici e geofisici	26
4.1	Indagini di repertorio.....	26
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica	27
4.2.1	Indagini realizzate in situ	28
5	Modello del sottosuolo.....	32
5.1	Substrato	34
5.1.1	L'unità stratigrafica del Quaternario Marino	36
5.2	Terreni di copertura.....	37
5.2.1	Supersistema Emiliano-Romagnolo	37
6	Interpretazioni e incertezze	40
6.1	Frequenza naturale dei terreni (f_0).....	40
6.2	Substrato rigido	43
6.3	Terreni suscettibili di liquefazione.....	47
7	Metodologie di elaborazione e risultati.....	48
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali	49
7.1.1	Risposta sismica locale con modellazioni numeriche.....	49
7.1.2	Confronto tra analisi di risposta sismica locale e abachi regionali.....	85
7.1.3	Calcolo del parametro H_{SM}	87

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

7.2	Zone instabili soggette a liquefazione	89
7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione	89
8	Elaborati cartografici.....	94
8.1	Carta delle indagini (Tavola 1)	95
8.2	Carta Geologico Tecnica per la Microzonazione Sismica (Tavola 2).....	96
8.2.1	Elementi geologici ed idrogeologici.....	96
8.2.2	Forme di superficie e sepolte	97
8.2.3	Terreni di copertura.....	98
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)	99
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4).....	100
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) (Tavola 5).....	102
8.6	Carte di microzonazione sismica (Tavole da 6 a 17).....	103
9	Commenti finali e criticità.....	106
9.1	Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale.....	107
9.2	Microzonazione sismica e criticità.....	108
9.3	Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione	111
9.4	Indicazioni per la riduzione del rischio sismico	111
10	Bibliografia	113
11	Allegati	122

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

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

1 Introduzione

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

Nella fase immediatamente successiva alla sequenza sismica emiliana del 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 Vigarano Mainarda i contributi per la realizzazione dello studio di microzonazione sismica con approfondimenti 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 aggiornare i contenuti dei precedenti studi adeguandoli agli *"Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"* nazionali (Gruppo di Lavoro MS, 2008) ed all'attuale *"Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. 24/2017)"* della D.G.R. 630/2019.

1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

Il presente studio di microzonazione sismica di terzo livello del Comune di Vigarano Mainarda 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)* e nel rispetto della Delibera di Giunta Regionale D.G.R. n. 630 del 29 aprile 2019 *"Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. 24/2017)"*.

Per quanto non specificato nei suddetti documenti, 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 4.1"*, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2018), da qui in avanti *"Standard MS 4.1"*;

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

- *“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”*.

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

- 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;
- D.M. del 16 gennaio 2018 *“Norme Tecniche per le Costruzioni”*;
- D.M. del 14 gennaio 2008 *“Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”*;
- L.R. n. 24 del 21 dicembre 2017 *“Disciplina regionale sulla tutela e l’uso del territorio”*;
- L.R. n. 19 del 30 ottobre 2008 *“Norme per la riduzione del Rischio Sismico”*;
- 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 eventualmente innescati in caso di sisma.

La finalità principale di uno studio di microzonazione sismica consiste nel giungere alla 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.

Obiettivo specifico degli approfondimenti di terzo livello è invece 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. n.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

630/2019) gli studi di microzonazione sismica, necessari per la redazione e l'approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (L.R. n. 24/2017), devono interessare il territorio urbanizzato, le aree in cui siano considerati ammissibili trasformazioni edilizie od urbanistiche, gli agglomerati rurali di dimensioni significative e le fasce di territorio riguardanti le reti infrastrutturali di nuova previsione, compresi i corridoi destinati al potenziamento ed alla razionalizzazione dei sistemi per la mobilità.

Gli ambiti interessati dagli approfondimenti di terzo livello di microzonazione sismica ricalcano esattamente quelli utilizzati nei precedenti studi (Ordinanza 70/2012), in accordo con quanto stabilito con il Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna e con il "Settore Urbanistica - Edilizia privata" del Comune di Vigarano Mainarda.

1.3 Elaborati prodotti

Gli elaborati di riferimento dello studio di microzonazione sismica, come indicato nella D.G.R. n. 630/2019, 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 oltre agli aspetti d'inquadramento territoriale, geologico e normativo, i dati geologici e geofisici utilizzati per lo studio, i modelli e le metodologie di elaborazione impiegate, le principali criticità ed incertezze rilevate ed i risultati e gli elaborati cartografici prodotti.

Nel complesso il presente studio è quindi costituito da:

- 13 Tavole cartografiche descritte al capitolo 8;
- 2 Sezioni geologiche (Allegato 1);
- Archivi digitali dei dati informatizzati;
- Rapporti di prova delle indagini di nuova esecuzione (Allegato 2);
- Rapporti delle verifiche puntuali di suscettibilità a liquefazione (Allegato 3);
- Relazione illustrativa.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in conformità con quanto indicato nell'allegato A1 della D.G.R. n. 630/2019; tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica "Standard MS 4.1", che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi.

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 che strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d’interesse per l’Italia nella finestra temporale 1000-2017;
- 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 ≥ 5 e d’interesse per l’Italia nella finestra temporale 1000-2017;
- il DISS versione 3.2.1 - Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane (DISS Working Group, 2018; <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 VIGARANO MAINARDA

- il CFTI4Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia ed 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 territorio di Vigarano Mainarda 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 1000-2017.

In relazione al Comune di Vigarano Mainarda il database contiene solamente 8 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 VIGARANO MAINARDA
Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se					
1873	03	12	20	04		Appennino marchigiano	196	8	5.85	III-IV
1963	04	05	13	49	4	Finale Emilia	6	4-5	3.93	III

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04	IV
1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	4	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
2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	6-7	4.40	NF
2002	11	13	10	48	0	Franciacorta	768	5	4.21	NF

Tabella 2-1 - Valori di intensità macrosismica osservati nel Comune di Vigarano Mainarda, in occasione dei principali eventi, 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 ($3 \leq IMCS \leq 5$); NF = non avvertito (not felt) in presenza di segnalazione esplicita è equiparabile a $IMCS = 1$).

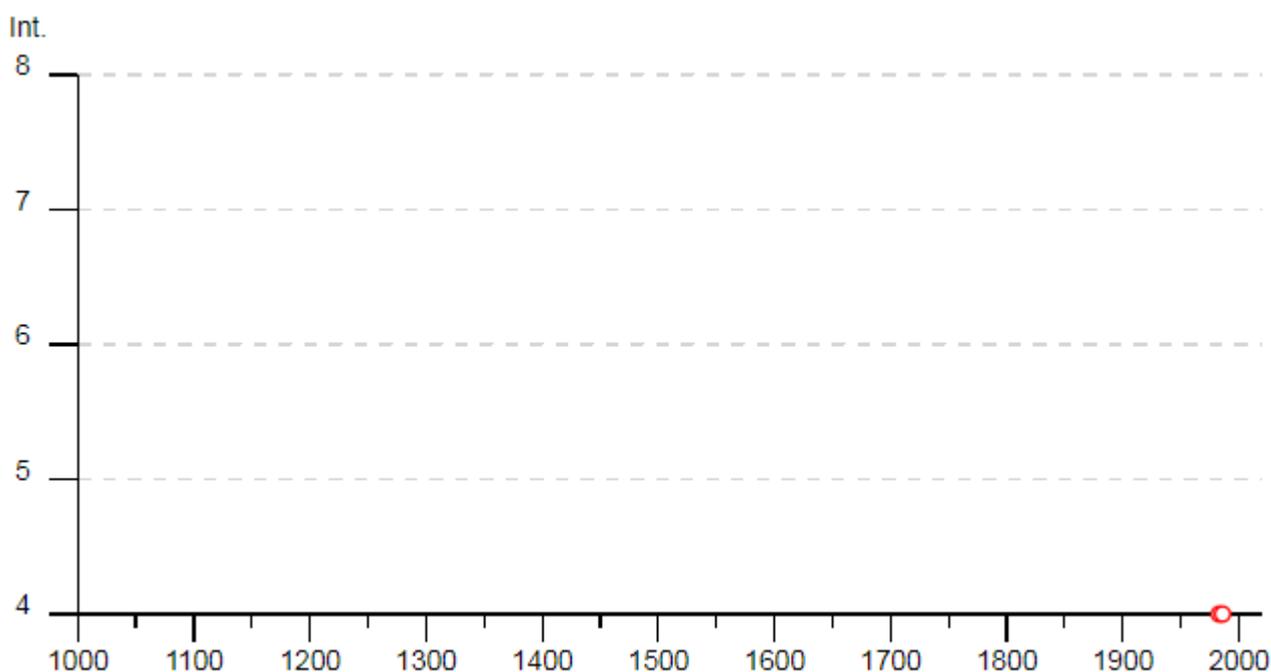


Figura 2-1 - Valori di intensità macrosismica $I_{MCS} \geq 4$ attribuite al Comune di Vigarano Mainarda, dall'anno 1000 al 2017, tratte dal database DBMI11 (Locati *et al.*, 2016).

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 fumaioi, 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 VIGARANO MAINARDA

Come è possibile notate dai dati disponibili, fra i più recenti terremoti a maggiore intensità con epicentro nelle vicinanze dell'area di studio non vengono riportati quelli che si sono verificati il 20 ed il 29 maggio 2012. Oltre a ciò, 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 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.*

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*

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

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. Nel territorio di Vigarano Mainarda, è presente un’osservazione macrosismica relativa all’abitato di Vigarano Pieve con valore di intensità pari al 6-7 grado della scala MCS.

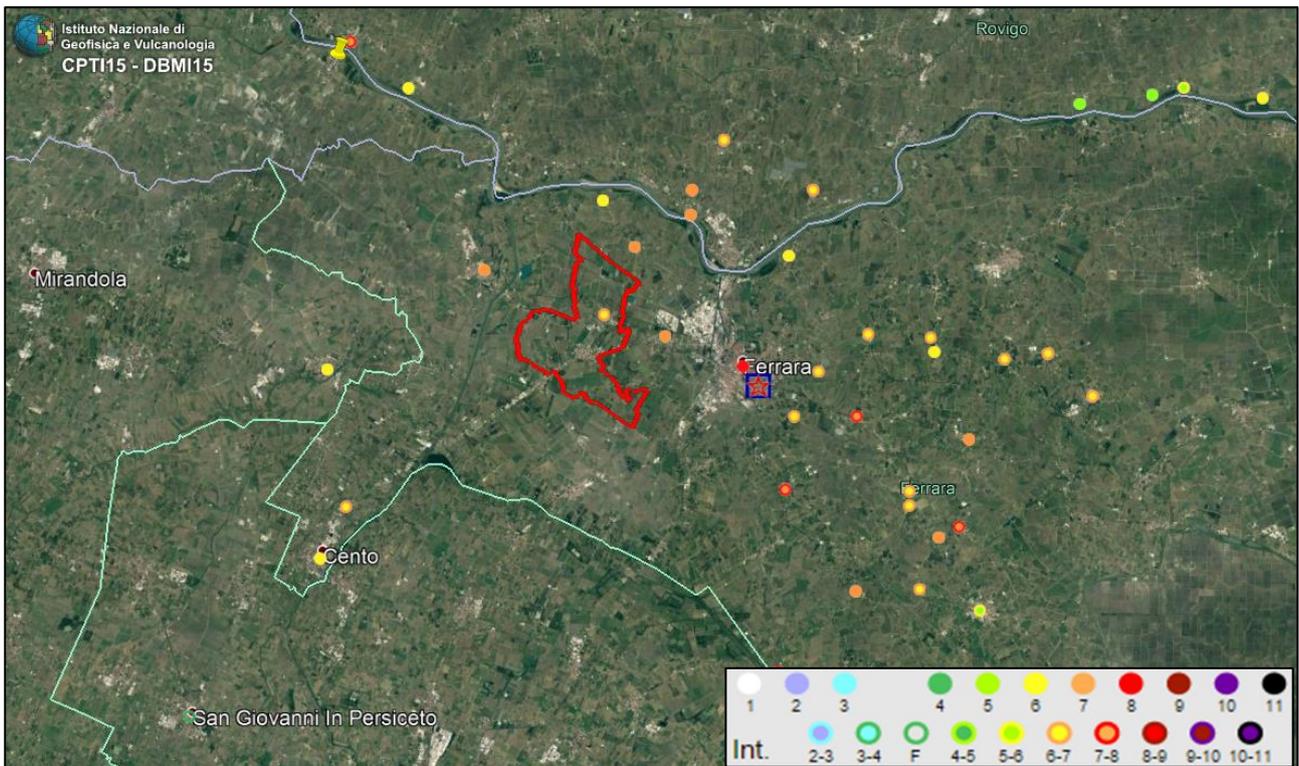


Figura 2-2 - Distribuzione degli effetti del sisma del 17 novembre 1570. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il territorio di Vigarano Mainarda.

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 - 0,150 g, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Figura 2-3).

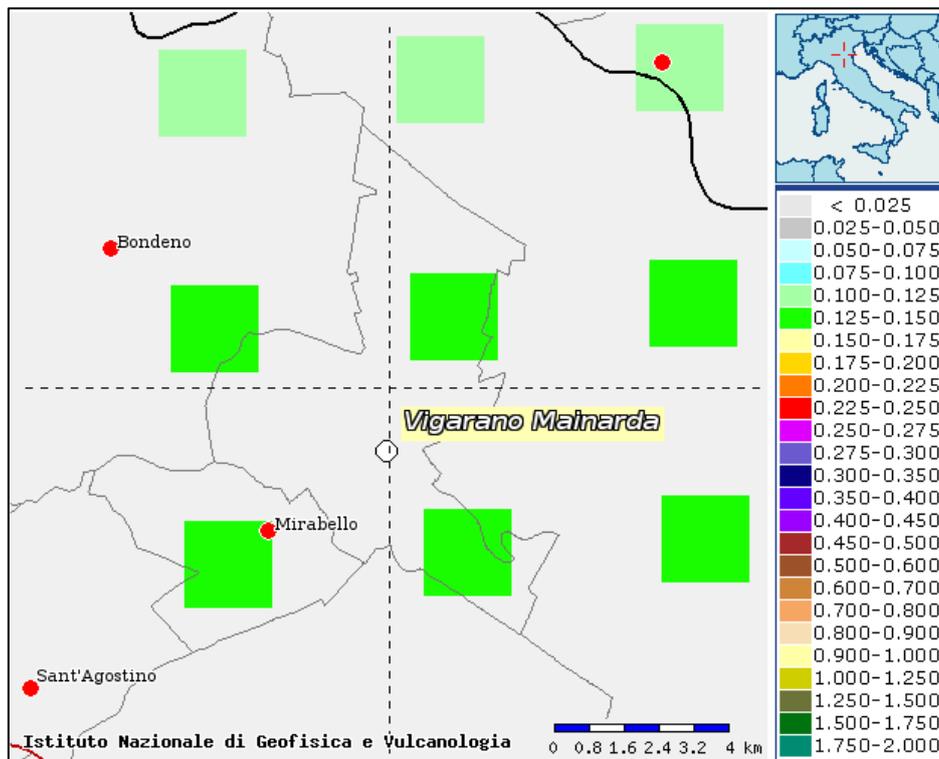
MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA


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

2.1.1 La sequenza del 2012

Tra il 20 maggio ed i primi di giugno 2012, un'importante sequenza sismica ha interessato una vasta area della bassa Pianura Padana, compresa tra le Province di Bologna, Modena, Reggio Emilia, Mantova e Ferrara. La sequenza sismica è stata generata da strutture fragili della parte frontale della catena appenninica sepolta, le cosiddette Pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981), serie di pieghe e sovrascorrimenti a vergenza nord-orientale che coinvolgono sia la successione carbonatica Mesozoica, sia la copertura sedimentaria Terziario - Quaternaria; nelle parti profonde e meridionali analoghe strutture compressive coinvolgono anche il basamento metamorfico varisico. La sequenza è stata caratterizzata da due scosse principali; la prima, di magnitudo locale M_L 5.9, 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 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 interessarono un'area estesa per oltre 50 km, in direzione est - ovest; in particolare sono state registrate cinque repliche di $M_W \geq 5.0$, con epicentri tra Novi di Modena e Vigarano Mainarda (Figura 2-4) ed oltre 3.700 scosse di $M_W \geq 1.5$ (Figura 2-4). Per l'area del Comune di Vigarano Mainarda appare particolarmente rilevante la forte scossa del primo pomeriggio del 20 maggio, avvenuta alle ore

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

15:18 ora locale, con magnitudo di 5.1 con epicentro nel territorio comunale, che ha prodotto accelerazioni superiori agli altri eventi, con associati danni.

I risultati di diversi studi sui meccanismi focali degli eventi principali suggeriscono una cinematica di tipo compressivo, legata al movimento di faglie inverse o, localmente, traspressive, lungo piani orientati essenzialmente da ovest-nord-ovest ad est-sud-est ed immergenti verso sud (Pondrelli *et al.*, 2012; Scognamiglio *et al.*, 2012). Questi dati sono in accordo con quanto emerso da studi del campo degli spostamenti derivato da misure GPS (Devoti *et al.*, 2011) e dagli indicatori del campo di stress agente su questa area (Montone *et al.*, 2012).

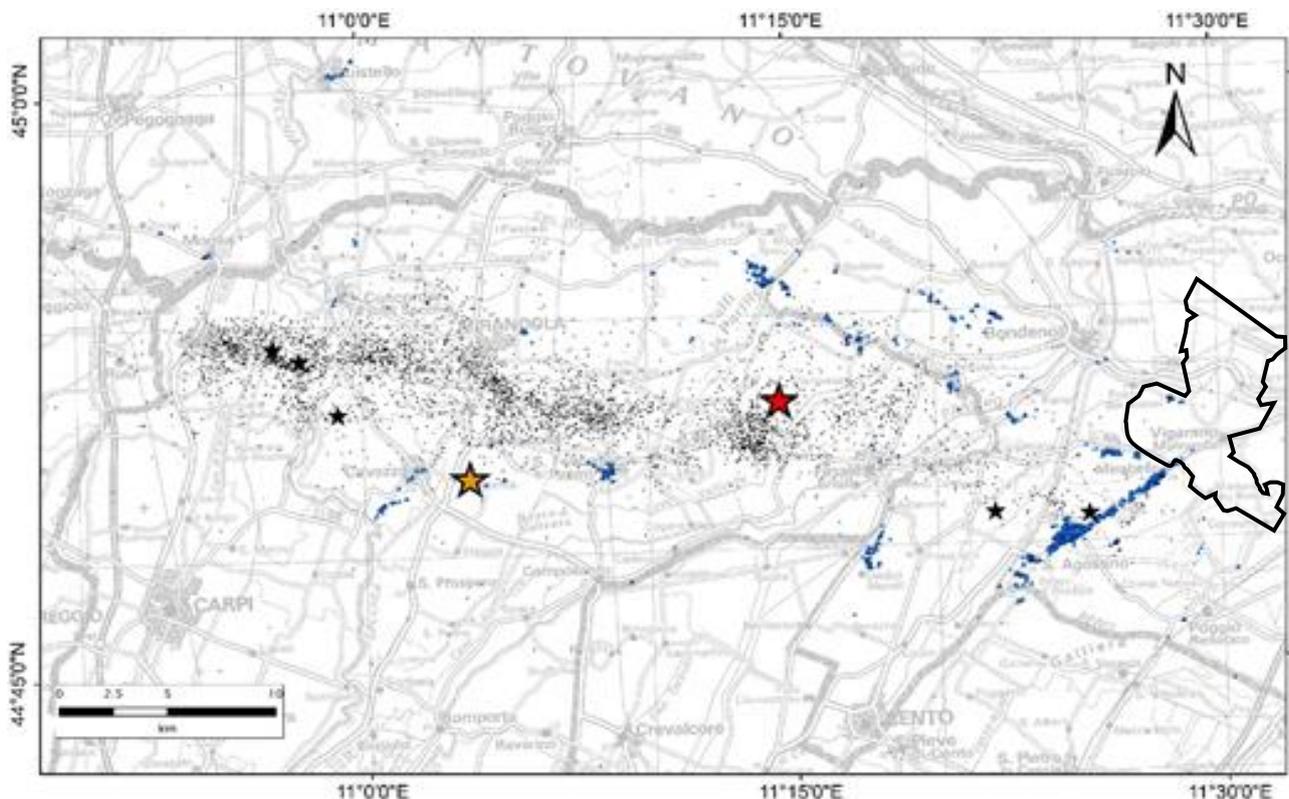


Figura 2-4 - Sequenza sismica emiliana del 2012. Le stelle rosse e arancio rappresentano rispettivamente le scosse principali del 20 e 29 maggio. Le stelle nere riportano la localizzazione degli *aftershocks* con $M_w \geq 5.0$, mentre i piccoli punti neri indicano gli eventi con $M_w \geq 1.5$. I piccoli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

Nonostante i rilievi macrosismici eseguiti immediatamente dopo le scosse (Galli *et al.*, 2012a e 2012b) abbiano determinato, nei comuni limitrofi, valori di intensità macrosismica pari al VI e VI-VII grado della scala MCS, le mappe di distribuzione degli effetti macrosismici dei singoli eventi non mostrano alcun valore riferito al territorio comunale (Figura 2-5 e Figura 2-6), benché siano stati in realtà numerosi i danni riscontrati.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

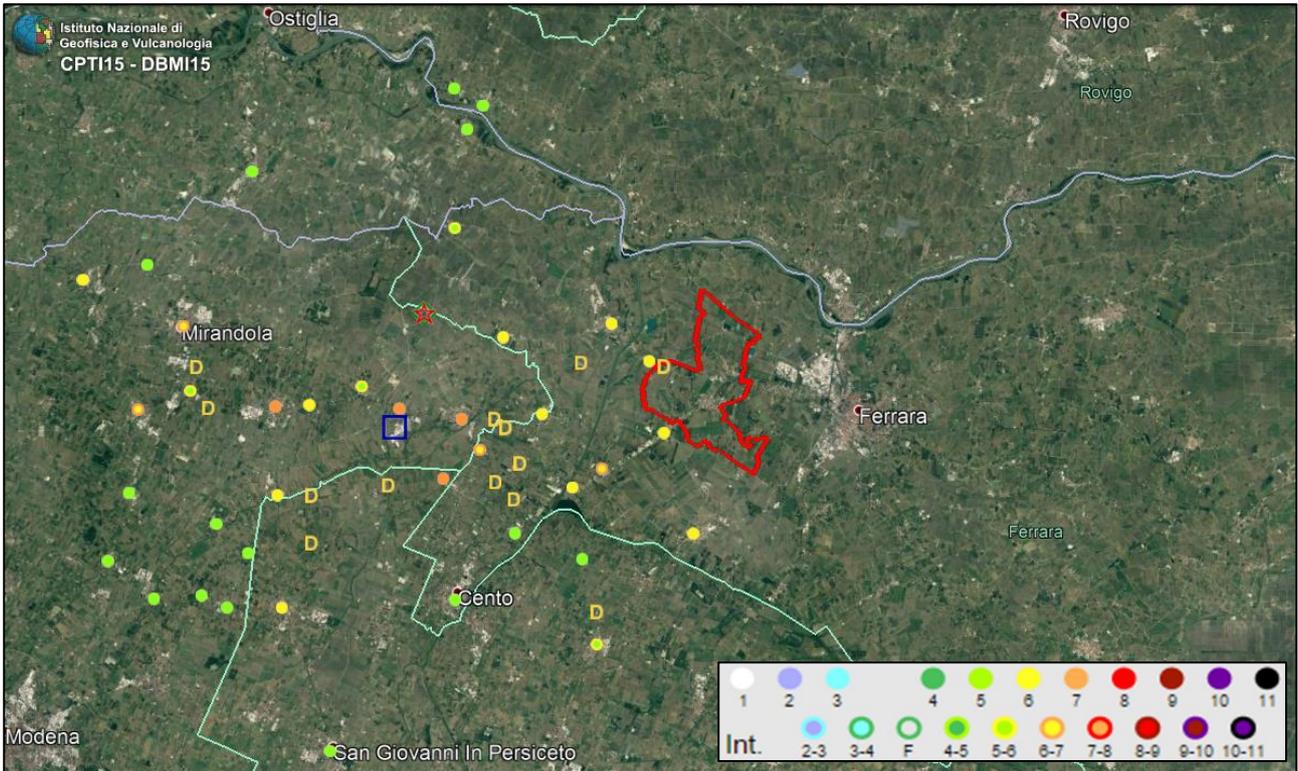


Figura 2-5 - Distribuzione degli effetti del sisma del 20 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il territorio di Vigarano Mainarda.

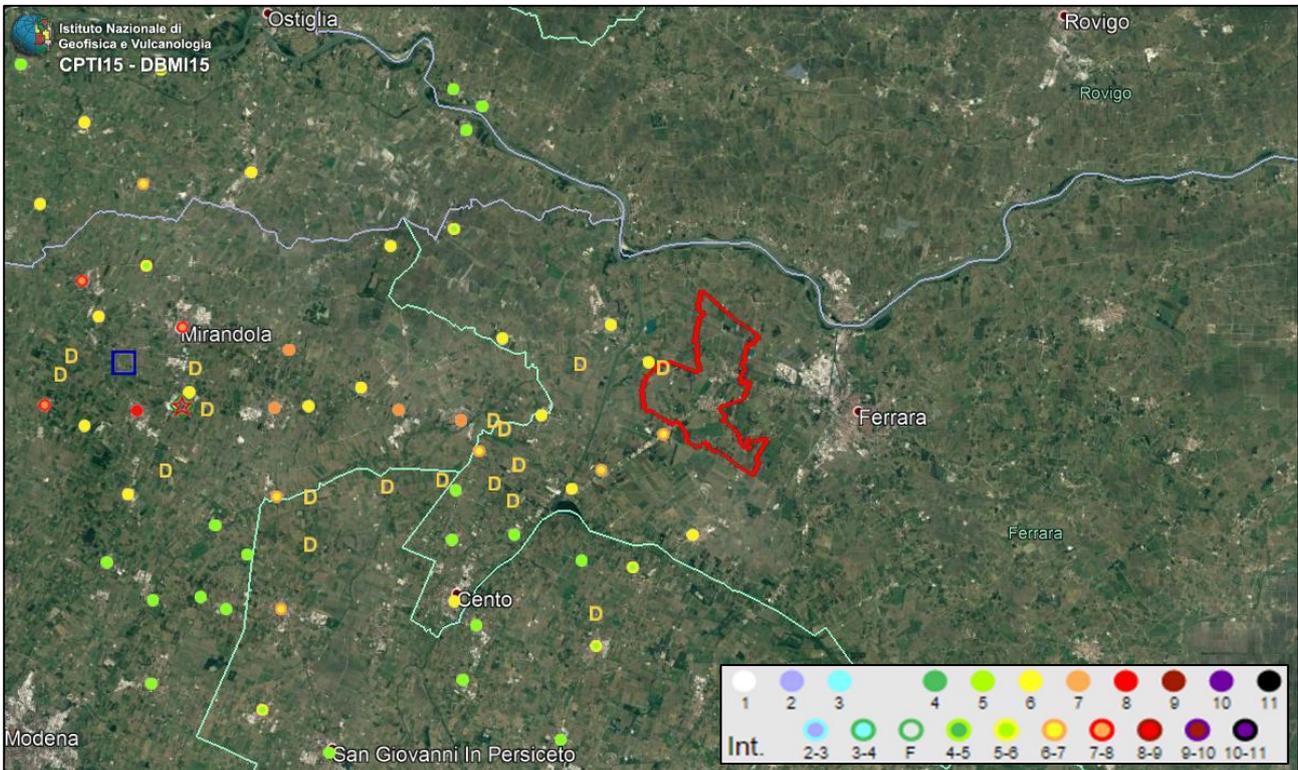


Figura 2-6 - Distribuzione degli effetti del sisma del 29 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il territorio di Vigarano Mainarda.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS Working Group, 2018) mostra come la parte settentrionale del territorio di Vigarano Mainarda sia interessata dalla presenza della sorgente sismogenetica composta ITCS050 (Figura 2-7).

Tale struttura, denominata Poggio Rusco-Migliarino, delimita il settore più esterno delle Pieghe Ferraresi e si estende con orientazione ovest - nord-ovest – est - sud-est; essa comprende la sorgente individuale di Ferrara (ITIS090), caratterizzata da magnitudo momento massima $M_{w_{max}}$ pari a 5.5, profondità tra 1 e 8 km e slip-rate compreso tra 0,39 e 0,45 mm/anno. L'esistenza di tale sorgente 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 stessa 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.

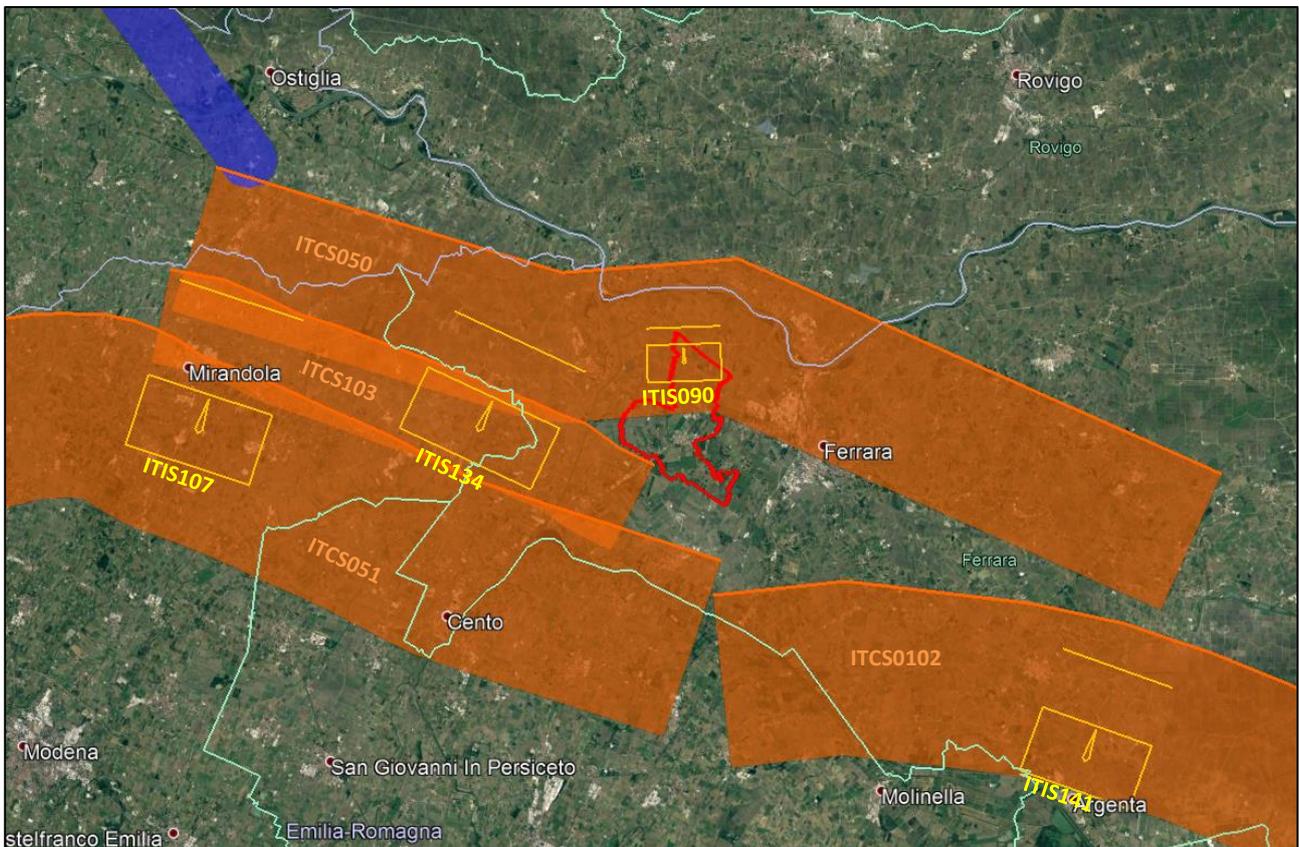


Figura 2-7 - Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) ed individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.2.1, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è rappresentato il territorio di Vigarano Mainarda.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

L'area di studio è inoltre bordata a sud da altre tre sorgenti sismogenetiche composite anch'esse approssimativamente orientate ovest - nord-ovest – est - sud-est e denominate rispettivamente Finale Emilia-Mirabello (ITCS103), Carpi-Poggio Renatico (ITCS051) e Malalbergo-Ravenna (ITCS102).

La prima di queste si estende verso occidente in direzione di Mirandola e comprende la sorgente individuale di Finale Emilia (ITIS134); essa è caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 6.1, profondità tra 3,5 e 10 km e slip-rate compreso tra 0,25 e 0,5 mm/anno. L'esistenza di tale sorgente è stata proposta sulla base della localizzazione dell'evento del 20 maggio 2012.

La seconda struttura invece comprende la sorgente individuale di Mirandola (ITIS107) ed è caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 6, profondità tra 2 e 10 km e slip-rate compreso tra 0,5 e 1,04 mm/anno. Tale sorgente, coincidente con il sovrascorrimento responsabile della scossa del 29 maggio 2012, era già conosciuta sia in base a prospezioni geologiche profonde, sia mediante l'osservazione di anomalie nel reticolo idrografico.

L'ultima struttura infine comprende la sorgente individuale di Argenta (ITIS141) ed è caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 6, profondità tra 2 e 8 km e slip-rate compreso tra 0,49 e 0,55 mm/anno.

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 I.N.G.V. nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, il territorio di Vigarano Mainarda 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 VIGARANO MAINARDA

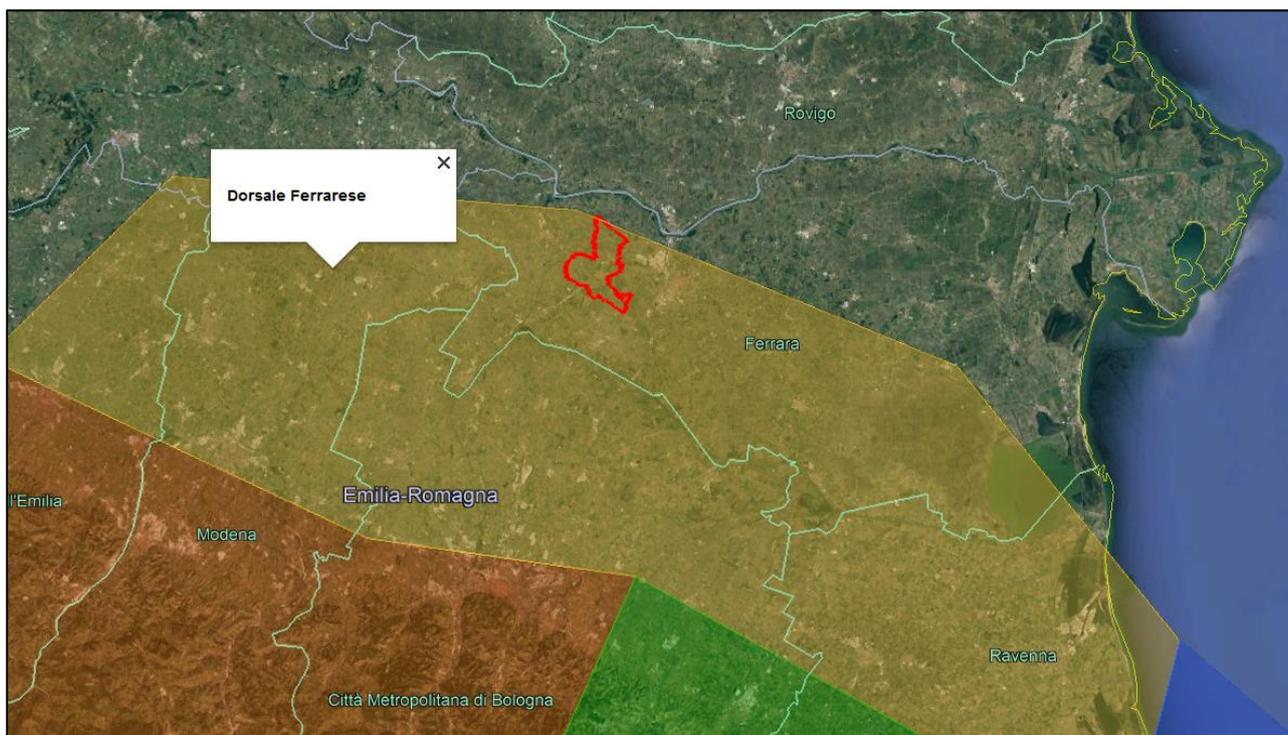


Figura 2-8 - Ubicazione del territorio comunale di Vigarano Mainarda (in rosso) rispetto alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).

3 Assetto geologico e geomorfologico dell'area

Nei paragrafi seguenti sono discussi i caratteri geografici, geomorfologici, stratigrafici e tettonici dell'area indagata, con particolare riguardo alla successione sedimentaria che costituisce il sottosuolo del Comune di Vigarano Mainarda.

3.1 Quadro geografico geomorfologico

Il territorio analizzato è parte della porzione più orientale della Provincia di Ferrara e si sviluppa in un'area di bassa pianura alluvionale formata da depositi fluviali, sia di provenienza appenninica che padana. La parte centro-meridionale del territorio comunale è dominata da depositi del fiume Reno, mentre quella settentrionale è costituita da sedimenti di Po. I corpi sedimentari affioranti a meridione sono di età recente, in quanto depositati dal Reno dopo il XV secolo, i sedimenti settentrionali sono invece più antichi e sono stati depositi dal Po tra il periodo romano e quello medievale.

La morfologia del territorio è caratterizzata da un articolato microrilievo, costituito da dossi fluviali e corpi di argine naturale che sfumano nei sedimenti di ampie depressioni interalvee. Queste strutture risultano

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

estremamente evidenti grazie alle tecniche di telerilevamento laser (LIDAR), che permettono una ricostruzione altimetrica di elevato dettaglio (Figura 3-1). I terreni topograficamente più rilevati si rinvencono nelle aree centro-meridionali, con quote variabili tra i 16 ed i 10 m. Le aree settentrionali sono invece topograficamente depresse, con quote spesso prossime ai 4 m al di sopra il livello del mare. Particolarmente marcato appare il dosso dell'alveo del Reno, che, da Cento, procede sino a Vigarano Mainarda, per poi piegare a sud-est e successivamente aprirsi a formare un sistema di canali distributori di un delta interno, formatisi durante il XVII secolo, a partire dallo sfondamento arginale del 1604.

Assai ben visibile appare anche il dosso fluviale del Po di età romana e medievale, che provenendo da Bondeno con direzione ovest-est, attraversa l'abitato di Vigarano Pieve e prosegue poi verso Ferrara. Questa struttura dossiva separa l'area meridionale, dominata dai depositi appenninici, da quella più settentrionale costituita da sedimenti del Po. Nel territorio di Vigarano, non si osservano forme legate a depositi fluviali di età preromana, in quanto tali sedimenti sono sempre sepolti nel sottosuolo (Figura 3-1).

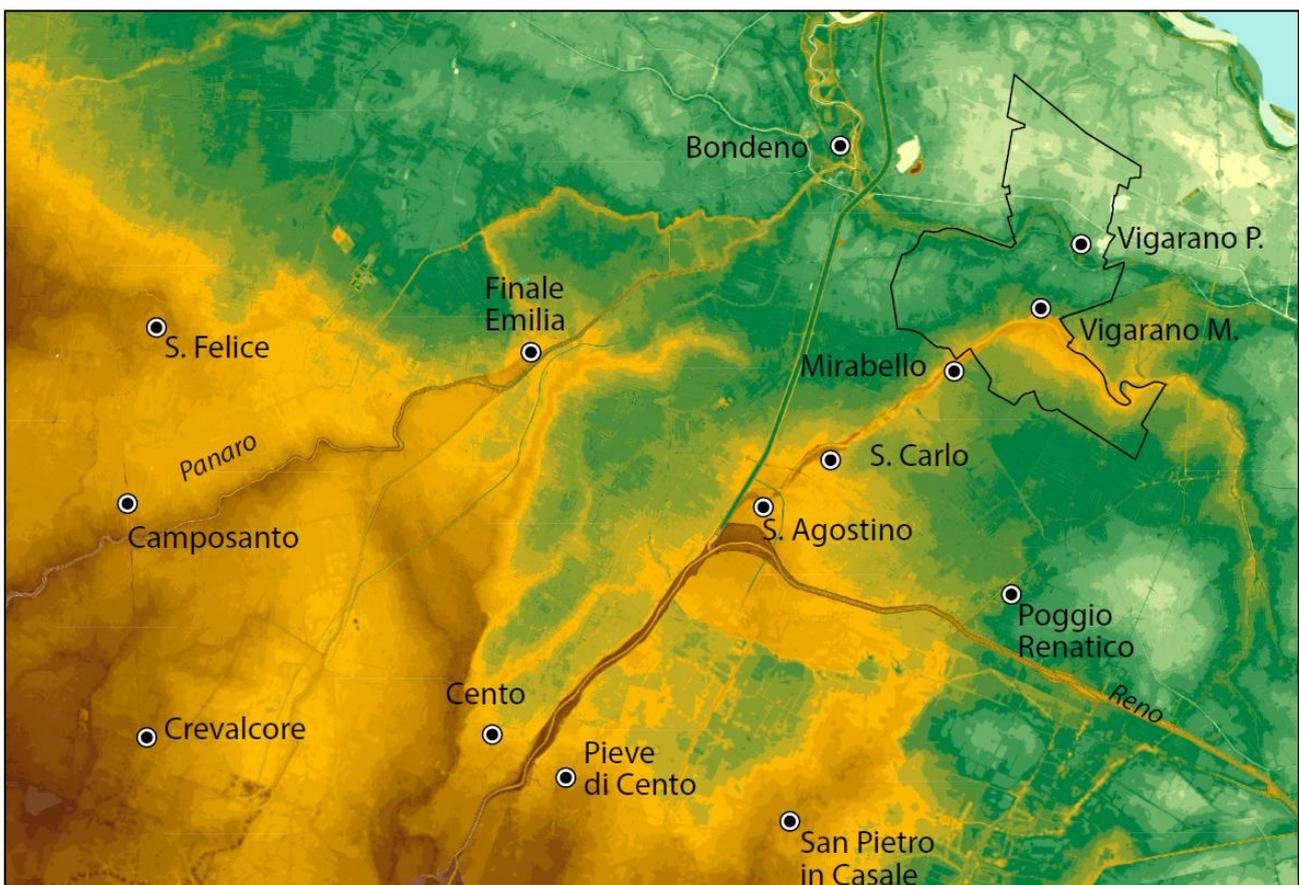


Figura 3-1 - Modello altimetrico LIDAR (dati Regione Emilia-Romagna). Estremamente evidenti appaiono il dosso del Reno allungato in direzione sudovest - nordest tra Mirabello e Vigarano Mainarda e il dosso fluviale del Po, di età romana e medievale, che attraversa Vigarano Pieve. Altrettanto evidenti risultano le depressioni interalvee (in verde) che caratterizzano le porzioni settentrionali del territorio comunale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA



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-settentrionale della carta sono riportati i corpi di riempimento di canale fluviale del Reno di età moderna, e del Po di età romana e medievale.

3.2 Contesto geologico stratigrafico

Prima degli eventi sismici del 2012 le conoscenze geologiche erano sostanzialmente limitate ai territori più meridionali ed orientali della Provincia di Ferrara. Queste aree erano state infatti oggetto di indagini geologiche svolte nell'ambito del Progetto CARG, su cui si basano le cartografie geologiche dei Fogli 202 "San Giovanni in Persiceto", 203 "Poggio Renatico", 204 "Portomaggiore", 205 "Comacchio", 187 "Codigoro" e le relative note illustrative.

I settori nord-occidentali della Provincia colpiti dal sisma, inclusa l'area di Vigarano, erano invece pressoché privi sia di cartografia geologica di superficie che di studi stratigrafici di sottosuolo, in quanto non ancora interessati dal Progetto Nazionale di Cartografia Geologica (CARG).

I primi studi, realizzati durante l'emergenza sismica del 2012, hanno gettato le basi per i successivi approfondimenti, delineando in maniera generale i principali caratteri geologico-evolutivi dell'area. 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 sabbie di canale, argine e rotta fluviale, giustapposte ad argille e limi organici di palude interalvea.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Secondo i criteri stratigrafici adottati dalla cartografia nazionale del Progetto CARG, tutti i sedimenti affioranti nel territorio comunale di Vigarano sono riferibili all'Unità di Modena (AES_{8a}), di età post-romana. Questa unità costituisce la porzione sommitale del Subsistema di Ravenna (AES8), a sua volta inquadrato nella parte più recente del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) (cfr. Note Illustrative Foglio CARG 202 "San Giovanni in Persiceto" e 203 "Poggio Renatico").

Negli ultimi anni la conoscenza dei corpi geologici affioranti nel territorio comunale è stata notevolmente migliorata ed inquadrata nel contesto geologico della Provincia di Ferrara, grazie alla realizzazione di una carta geologica omogenea a scala provinciale. La nuova cartografia, realizzata da Geotema S.r.l. nel 2016, è basata sull'analisi di immagini satellitari, modelli altimetrici e informazioni derivanti da cartografia storica, integrate da rilevamenti di terreno e confronti con indagini geognostiche sul sottosuolo prossimo alla superficie.

La carta (Figura 3-3) mostra come la parte sud-occidentale della Pianura Ferrarese sia costituita dai 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 all'Unità di Modena (AES_{8a}). Le contigue aree più depresse sono formate da sedimenti fini, sedimentati in zone interalvee palustri, talvolta con corpi di sabbie e limi da rotta fluviale o da estesi depositi di argille organiche e torbe. I corpi sedimentari di provenienza appenninica sono limitati verso nord e verso est dal rilevato dosso fluviale formato dalle sabbie del Po di Ferrara, presente da Bondeno a San Giorgio Fuori le Mura, poi da quello del Po di Primaro, fino a Traghetto. Questi dossi sono formati dai depositi granulari del Po di età medievale. A settentrione ed occidente del dosso, affiorano invece sedimenti di piana inondabile del Po, di età romana e medievale, a quote significativamente inferiori a quelle presenti più a sud, ove affiorano i depositi di provenienza appenninica.

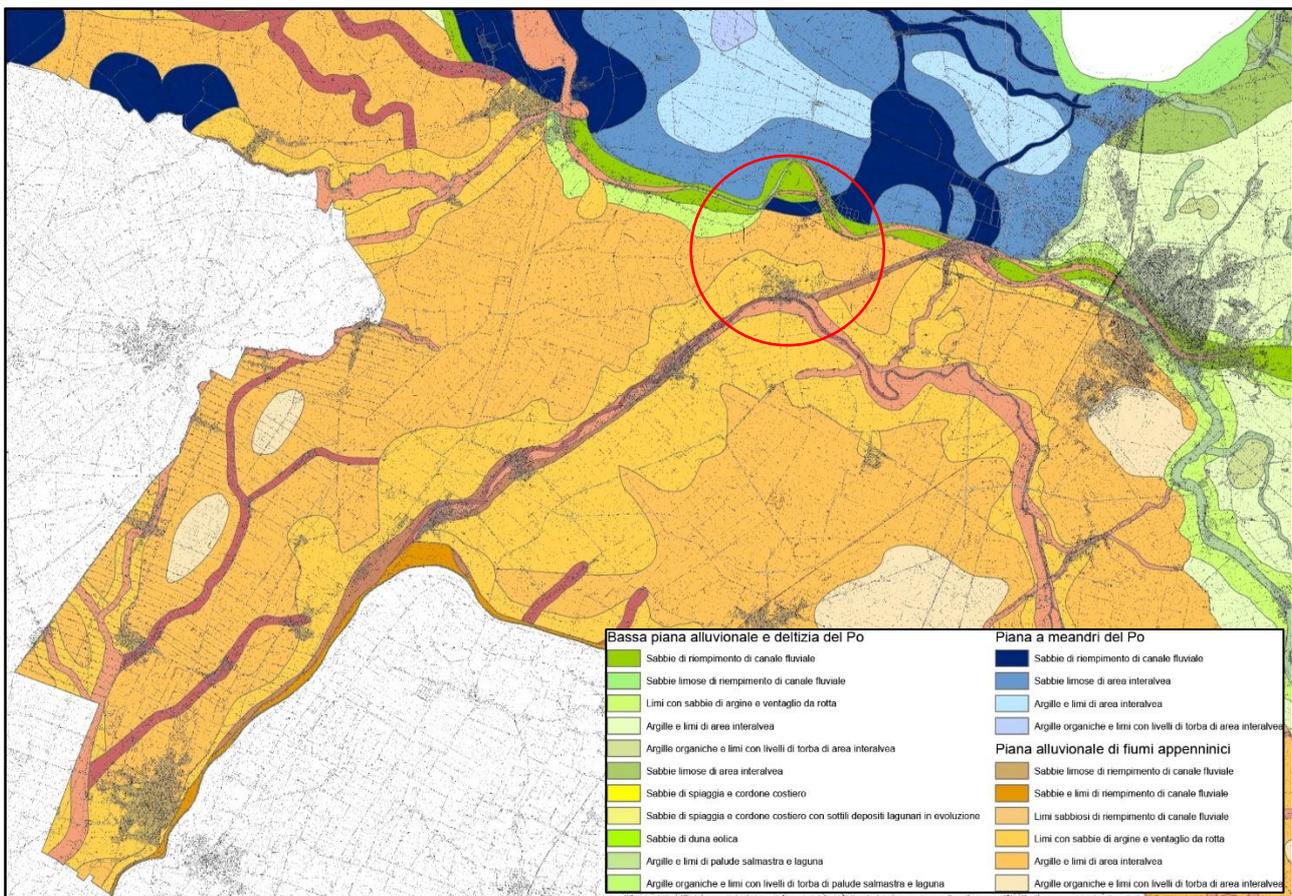
MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA


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 ed i corpi depositi dal Po. Cartografia accessibile online: <http://www.ferraradeltapo-unesco.it/>.

3.3 Contesto strutturale

L'area esaminata fa parte del bacino di avanfossa dell'Appennino, sviluppato tra l'Appennino settentrionale ed i primi rilievi veneti. L'assetto strutturale delle successioni sepolte sotto la Pianura Padana è noto, nelle sue linee generali, attraverso numerosi profili di sismica a riflessione e sondaggi profondi, realizzati per la ricerca di idrocarburi, soprattutto da parte dell'AGIP. Il sottosuolo è caratterizzato da una complessa serie di piani di scollamento e sovrascorrimenti, con vergenza settentrionale e piano di scorrimento immergente verso sud, associati ad anticlinali di rampa e più ampie pieghe sinclinaliche, interposte a i fasci di sovrascorrimento. Queste strutture compressive hanno progressivamente coinvolto l'avanfossa appenninica in età geologica recente, durante il Neogene e il Quaternario.

Le prospezioni per idrocarburi hanno permesso di riconoscere una complessa serie di pieghe e sovrascorrimenti con geometria a pianta arcuata e vergenza verso nord e nord-est (Pieri e Groppi, 1975, 1981; Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002). All'interno delle pieghe che

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

formano il fronte esterno della catena appenninica sepolta, è possibile distinguere due fasci maggiori di pieghe, con concavità rivolta verso il margine appenninico, denominati “Arco delle Pieghe Emiliane”, a nord-ovest, ed “Arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole”, a sud-est (Pieri e Groppi, 1975) (Figura 3-4).

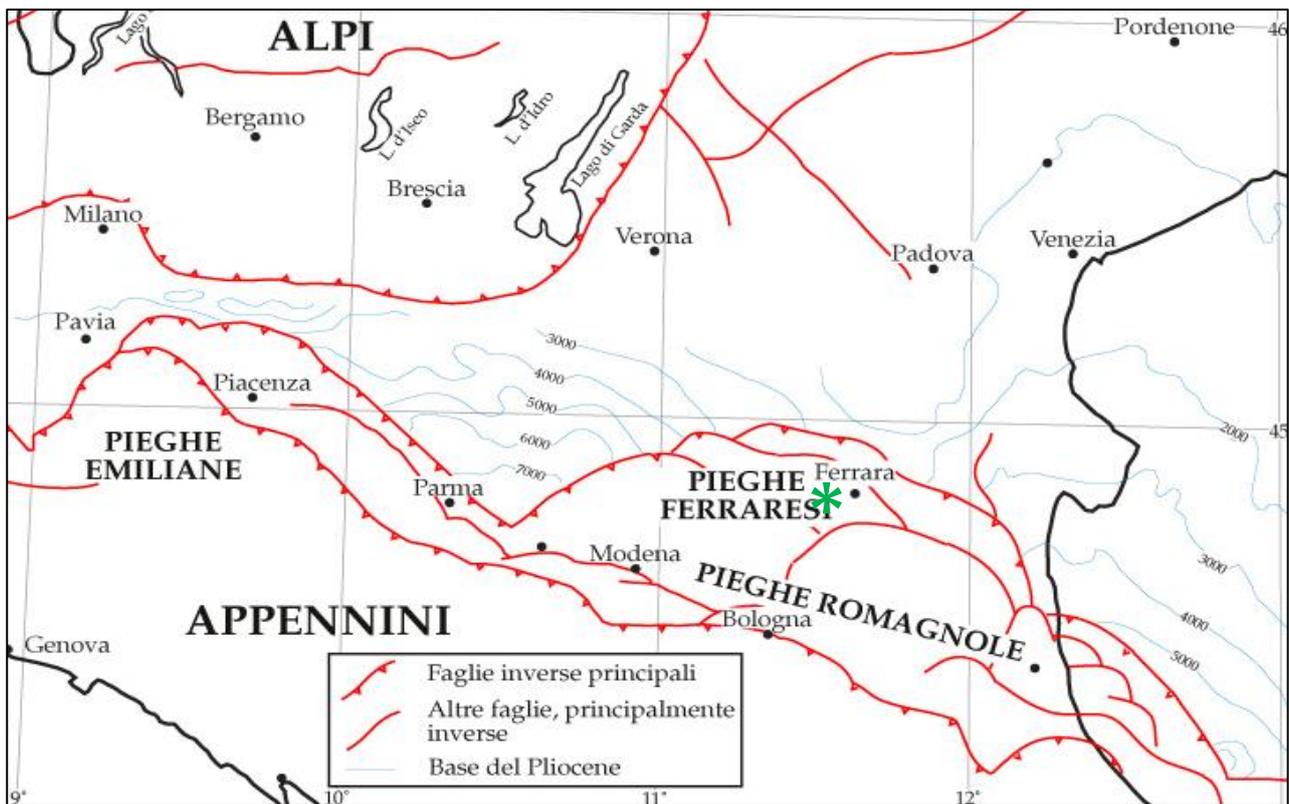


Figura 3-4 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana centro-orientale (Modificata da Burrato *et al.*, 2003, da Pieri e Groppi, 1975). L'area analizzata si trova nella parte meridionale del fascio di pieghe ferraresi.

L'arco orientale può essere a sua volta suddiviso in tre fasci di strutture 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, estese 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). Questa struttura registra le fasi più recenti e tuttora in atto della deformazione sismogenetica. La complessa struttura tettonica attiva delle Pieghe Ferraresi si sviluppa a nord della direttrice San Pietro in Casale-Pieve di Cento e, verso sud, è limitata dalla fascia di sovrascorrimenti sepolti fra Minerbio-San Giorgio di Piano (“Pieghe Romagnole” in Pieri e Groppi, 1981). Nel settore occidentale delle Pieghe Ferraresi, si possono osservare una serie di depressioni tettoniche e pieghe sinclinali che complicano ulteriormente la geometria strutturale (Figura 3-6).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

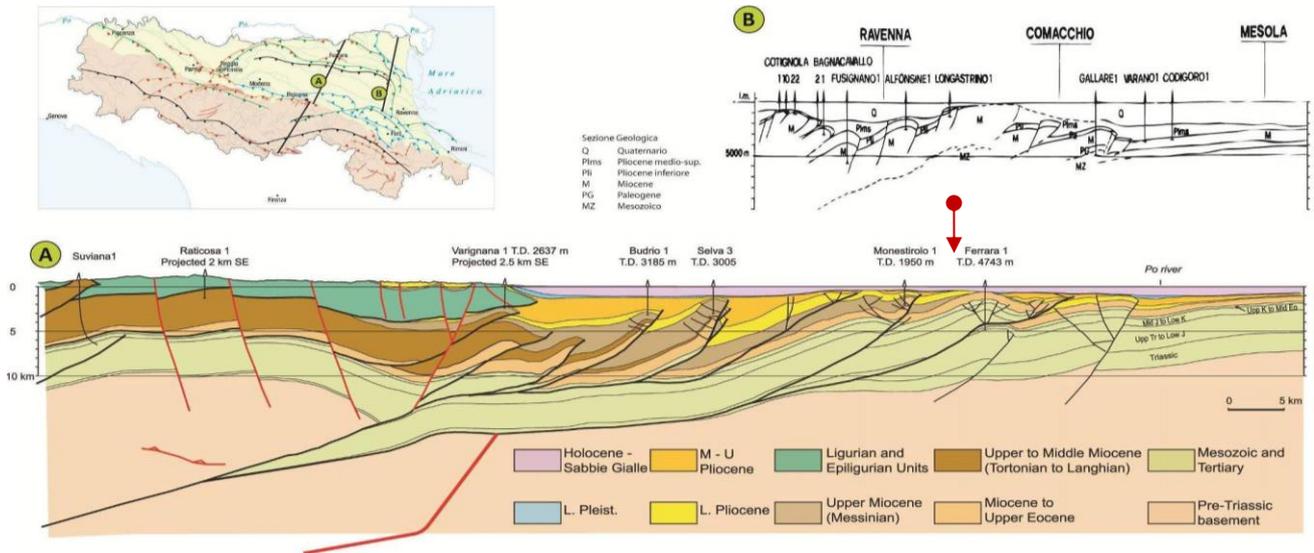


Figura 3-5 - Contesto strutturale della porzione emiliano-romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) deriva da Pieri e Groppi, 1981, mentre la sezione inferiore è presa (A) da Toscani *et al.*, 2009. L'area indagata, ubicata all'incirca in corrispondenza della freccia rossa, attraversa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

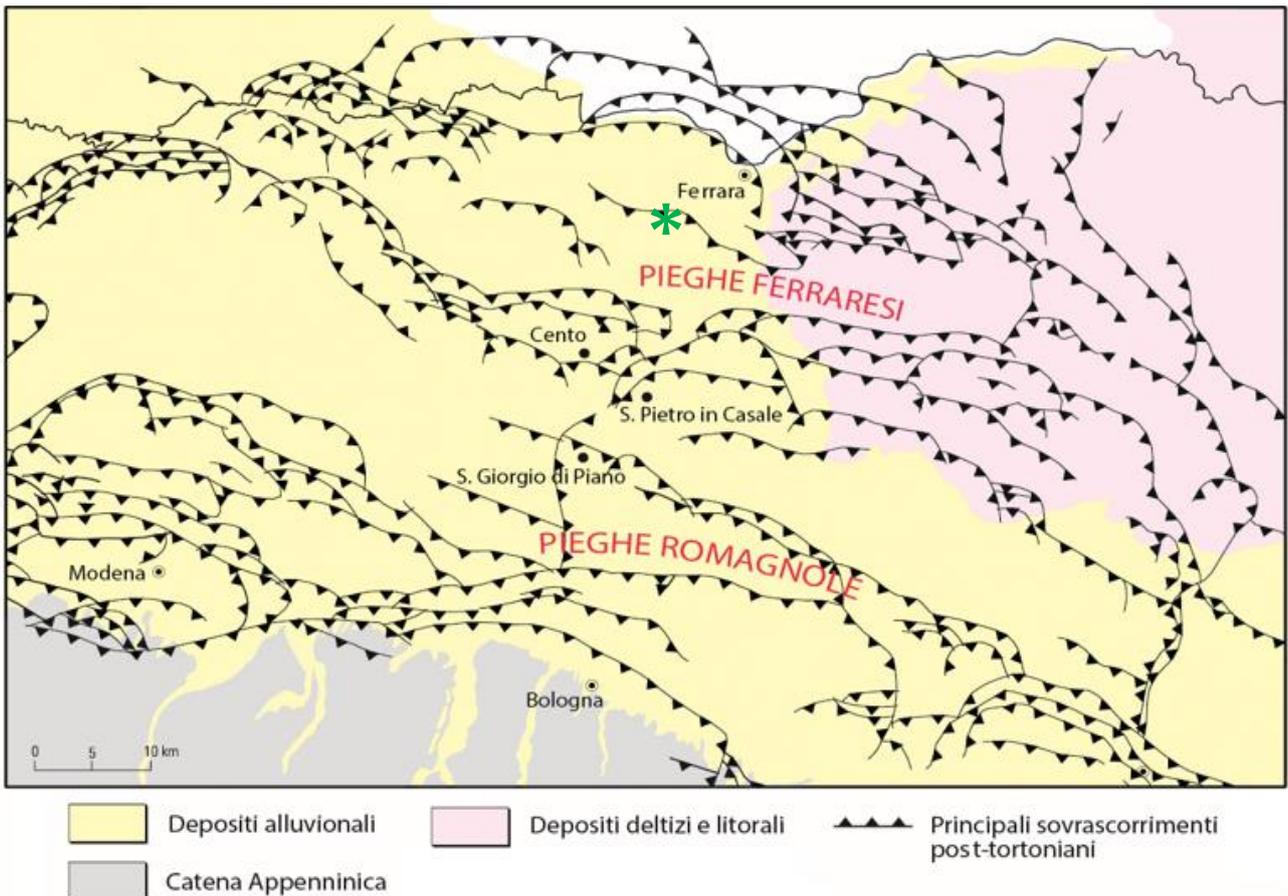


Figura 3-6 - Inquadramento delle strutture tettoniche sepolte, che illustra la complessità dell'arco delle Pieghe Romagnole e Ferraresi. Modificato dalle Note Illustrative del Foglio CARG 203, Poggio Renatico.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

La Figura 3-5 illustra due profili attraverso le Pieghe Ferraresi. La sezione A è tratta da Toscani *et al.* (2009), mentre la sezione B, tracciata alcuni km più ad est, è tratta da Pieri e Groppi (1981). Entrambe le sezioni mostrano un sovrascorrimento (*thrust*) principale profondo, che verso l'esterno si apre in ventagli (*splay*) di faglie meno profonde, associate a 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. Nella porzione centrale, la struttura di Ferrara presenta un gruppo di anticlinali di rampa, ben evidente in entrambe le sezioni.

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 di sedimenti che formano 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 sepolte (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 importanti variazioni laterali di spessore delle successioni più recenti, in buona parte deposte in condizioni di pianura alluvionale (Stefani *et al.* 2018). Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, deposto negli ultimi 350.000 - 450.000 anni (Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998) è 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 depressa. Queste grandi variazioni di spessore registrano altrettanto grandi variazioni laterali di subsidenza, indotte anche dalla deformazione delle strutture tettoniche sismogenetiche.

Il territorio comunale di Vigarano Mainarda si sviluppa con direzione prevalente nord-sud, con un allungamento sostanzialmente perpendicolare alla direzione delle strutture tettoniche sepolte. A causa di questa distribuzione geografica, il territorio attraversa varie fasce strutturali di pieghe e faglie. Schematicamente, il territorio può essere suddiviso in una parte meridionale strutturalmente più depressa e subsidente e una parte settentrionale assai più elevata. Una monoclinale immergente verso sud raccorda infatti l'asse della sinclinale meridionale, con l'anticlinale complessa, sviluppata nell'area di Casaglia, associata al sovrascorrimento frontale sepolto delle strutture appenniniche sepolte. Questo alto è interessato da diverse faglie inverse, sovrascorrimenti e retroscorrimenti. 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). I carbonati

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

mesozoici al nucleo dell'anticlinale complessa sviluppata al confine settentrionale del territorio comunale ospitano i fluidi ad alta temperatura utilizzati nel Campo Geotermico di Casaglia.

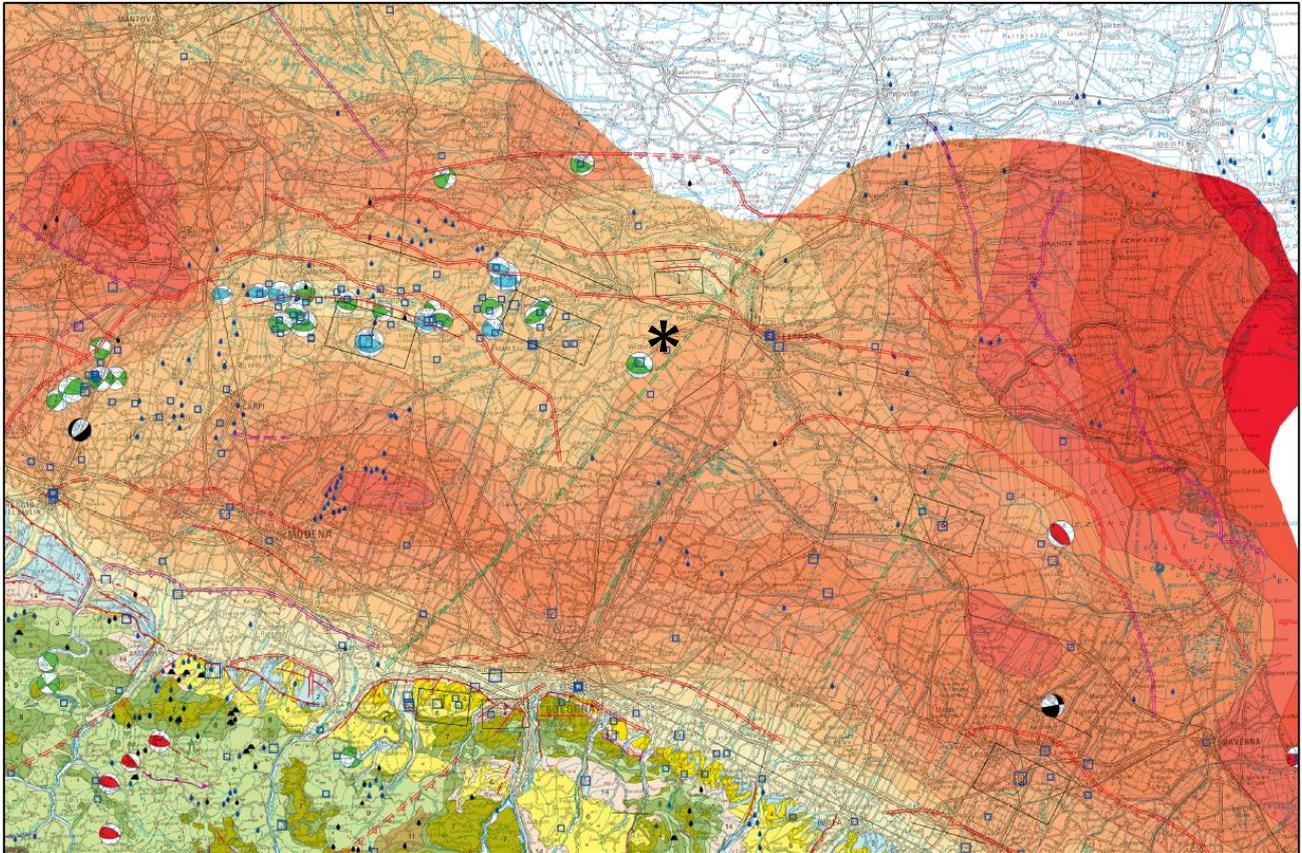


Figura 3-7 - Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017). Le linee e le tinte batimetriche indicano le isobate della base del Sintema Emiliano Romagna Superiore, superficie che appare ampiamente deformata da movimenti post-deposizionali, con le profondità minime che corrispondono all'alto strutturale di Casaglia. L'area di Vigarano Mainarda è indicata dall'asterisco.

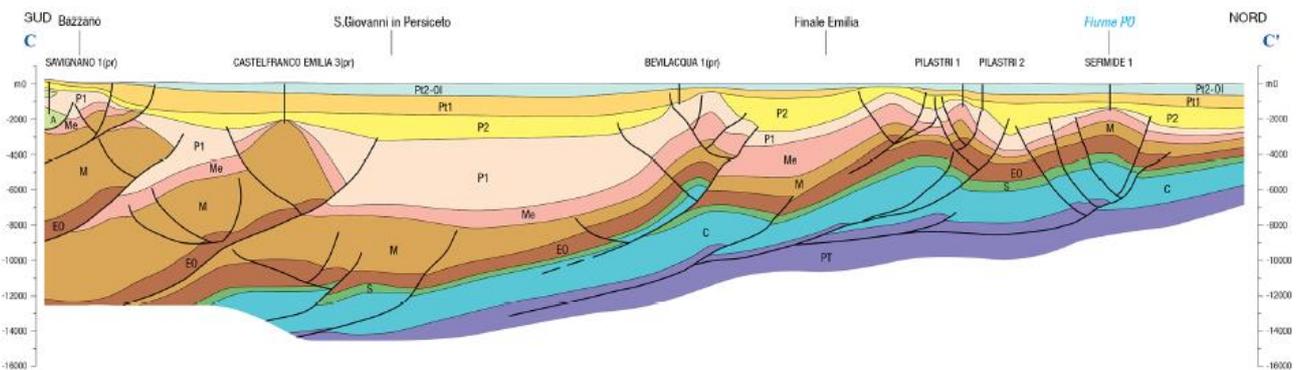


Figura 3-8 - Sezione geologica profonda C - C', allungata da Bazzano (BO) al Po. Fonte: Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017).

4 Dati geognostici e geofisici

I dati utilizzati in questo studio sono stati ricavati da indagini sia di tipo diretto quanto di tipo indiretto. 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 i log parametrici di prove penetrometriche statiche (CPT) e con piezocono (CPTu). Sono stati inoltre esaminati i rapporti di prova di indagini geofisiche tipo Down-Hole (SCPTu), HVSr e MASW.

Le ubicazioni delle prove utilizzate per lo studio di microzonazione sismica sono riportate nella carta delle indagini (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.

Aggiungendo alle indagini recuperate negli archivi sopracitati quelle raccolte presso alcuni geologi liberi professionisti nonché quelle raccolte da Geotema S.r.l., nel complesso si sono potute utilizzare ai fini della microzonazione sismica ben 313 prove pregresse di buona affidabilità, suddivise per numero e tipologia così come riportato in Tabella 4-1.

Da ultimo sono stati considerati i dati di sottosuolo dei Comuni confinanti; ciò ha permesso di aumentare le conoscenze geologiche e meglio definire geometrie e limiti dei corpi deposizionali e delle aree a diverso rischio liquefazione lungo le fasce di confine.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
Prove penetrometriche statiche	CPT	184
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTu	48
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPT	23
Sondaggi a carotaggio continuo	S	36

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	9
Multi-channel Analysis of Surface Waves	MASW	12
Array sismici	ESAC	1
TOTALE		313

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

Le indagini ritenute affidabili sono state quindi 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: profondità indagata, livello della falda, spessore degli orizzonti rilevati, ecc.. Oltre a ciò, ad ogni prova archiviata è possibile associare i propri parametri tecnici come, ad esempio, lettura di resistenza alla punta, valori di Vs misurati o frequenze di risonanza.

Per l'archiviazione dei dati acquisiti si è fatto ricorso all'applicativo software SoftMS versione 4.1 – 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.

4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

A supporto dello studio di microzonazione sismica del Comune di Vigarano Mainarda è stato necessario realizzare una specifica campagna di acquisizioni di microtremore sismico di lunga durata. Le misure realizzate, anche in notturna, hanno avuto lo scopo di verificare la presenza di amplificazioni alle basse frequenze come indicato in alcuni lavori pubblicati su riviste scientifiche internazionali (es. Mascandola *et. al.* 2019, Mascandola *et. al.* 2017, Milana *et al.* 2014).

L'abbondanza e l'omogenea distribuzione delle indagini geognostiche pregresse, ha invece consentito un'accurata ricostruzione del quadro litostratigrafico ed una buona correlabilità generale delle proprietà geotecniche dei terreni presenti nei primi trenta metri di sottosuolo. Per alcune aree si è ritenuto comunque opportuno realizzare approfondimenti attraverso l'esecuzione di nuove indagini geotecniche di tipo CPTu.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Allo stesso modo la buona disponibilità di prove geofisiche, come SCPT e MASW, ha permesso di definire le variazioni di V_{s30} alla scala dell'intero territorio indagato, senza necessità di eseguire nuove indagini.

Infine, come richiesto dagli Standard MS 4.1 (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2018), sono state inoltre rappresentate 7 indagini virtuali, rappresentative della stratigrafia teorica nei primi trenta metri da piano campagna delle corrispettive Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica individuate nell'area di studio (si veda capitolo 8.4). Tali 7 stratigrafie sono state inserite nello shape ind.pu ed i rispettivi .pdf nella cartella indagini.

4.2.1 Indagini realizzate in situ

Come detto, a supporto del presente studio sono state realizzate diverse indagini (Tabella 4-2) con lo scopo di meglio caratterizzare dal punto di vista geotecnico e geofisico alcune aree di interesse per il "Settore Urbanistica - Edilizia privata" del Comune di Vigarano Mainarda. Di seguito vengono descritte le metodologie di esecuzione e di analisi delle stesse.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
INDAGINI REALIZZATE IN SITU		
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTu	3
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	28
	TOTALE	31

Tabella 4-2 - Numero e tipologia di indagini realizzate a supporto del presente studio.

A queste si sommano, come detto, le 7 indagini virtuali realizzate come richiesto dagli Standard MS 4.1 e descritte nel capitolo 8.4.

4.2.1.1 Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu)

Le prove penetrometriche di tipo statico consentono di risalire, mediante correlazioni empiriche, alla natura dei corpi sedimentari presenti nel sottosuolo analizzando il rapporto tra resistenza alla penetrazione (q_c) ed attrito laterale (f_s) prodotto da una punta conica spinta nel terreno a velocità costante.

Le CPTu (*Cone Penetration Test with Pore Pressure measurement*) si eseguono tramite un penetrometro dotato di punta elettrica a piezocono la quale, collegata mediante cavo elettrico ad un'unità di acquisizione in superficie, permette di misurare anche il valore della pressione interstiziale (u) presente tra i pori dei sedimenti, in modo da determinare la trasmissività idraulica dei corpi sedimentari indagati.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Questa tecnica consente di meglio discriminare i terreni a scarsa permeabilità e bassa resistenza, oltre a fornire un maggior dettaglio stratigrafico dovuto all'acquisizione in automatico del dato, con una precisione centimetrica all'avanzamento.

Le indagini sono state eseguite mediante penetrometro statico equipaggiato di punta elettrica Tecnopenta G1-CPL2IN con le seguenti caratteristiche:

- diametro di base del cono $f = 35,7 \text{ mm}$
- area della punta conica $A_p = 10 \text{ cm}^2$
- angolo apertura del cono $B = 60^\circ$
- superficie laterale manicotto $A_m = 150 \text{ cm}^2$

Le prove, che hanno interessato le località riportate in Tabella 4-3 sono state generalmente spinte fino a 20 m, profondità entro la quale possono verificarsi fenomeni di liquefazione cosismica in presenza di terreni granulari poco addensati e saturi in acqua. I dati penetrometrici (q_c , f_s) sono stati elaborati sia per ricavare i principali parametri tessiturali e meccanici dei sedimenti attraversati, sia per eseguire verifiche a liquefazione con metodi semplificati.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.
CPTu1	038022P280CPTU303	44.864114°	11.461226°	Vigarano Mainarda, loc. Tortiola	19/06/2019	20 m	5,80 m
CPTu2	038022P281CPTU304	44.837495°	11.506534°	Vigarano Mainarda	19/06/2019	20 m	3,60 m
CPTu3	038022P282CPTU305	44.859950°	11.521645°	Vigarano Pieve	19/06/2019	18 m	3,40 m

Tabella 4-3 - Sintesi dei dati principali associati alle indagini penetrometriche CPTu eseguite.

4.2.1.2 Misure di microtremore a stazione singola (HVSr)

Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con sismografo (digitale) e sono state 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), presente diffusamente sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici sia all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole ($10\text{-}15 \text{ m/sec}^2$), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

acquisizione di tipo “passivo”. 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 le due componenti dei segnali registrati. A supporto del presente studio sono state effettuate 45 registrazioni di microtremore sismico. Le misure sono state eseguite con tromografo digitale “SARA” modello SL06 equipaggiato con sensore velocimetrico a tre componenti da 2.0 Hz.

L’acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 250 Hz, con un tempo di singola registrazione variabile da 30 a 60 minuti. Diverse registrazioni sono state ripetute in quanto soggette ad evidenti disturbi di natura antropica.

Tra le registrazioni effettuate 28 sono state considerate affidabili ed inserite nella banca dati a supporto dello studio (Tabella 4-4).

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	DURATA	f0	A0
HVSR1	038022P285HVSR308	44.805623°	11.524568°	Via Imperiale, Coronella	17/04/2019	30 min	0,53	2,64
HVSR2	038022P286HVSR309	44.814032°	11.516728°	Via Coronella, Coronella	17/04/2019	30 min	0,53	3,06
HVSR3	038022P287HVSR310	44.872315°	11.520227°	Via Moro, Vigarano Pieve	16/04/2019	40 min	0,62	5,04
HVSR4	038022P288HVSR311	44.807517°	11.521323°	Via Coronella, Coronella	17/04/2019	30 min	0,53	3,27
HVSR5	038022P289HVSR312	44.820597°	11.501138°	Via Cioccana, Madonna Boschi	12/06/2019	45 min	0,74	2,50
HVSR6	038022P290HVSR313	44.820698°	11.487083°	Via Madonna Boschi, Madonna Boschi	17/04/2019	30 min	0,61	3,13
HVSR7	038022P291HVSR314	44.822080°	11.492333°	Via Madonna Boschi, Madonna Boschi	17/04/2019	30 min	0,53	2,24
HVSR8	038022P292HVSR315	44.862810°	11.460590°	Via Tortiola, loc. Tortiola	15/04/2019	50 min	0,74	3,05

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

HVSR9	038022P293HVSR316	44.863270°	11.455310°	Via Tortiola, l oc. Tortiola	15/04/2019	42 min	0,74	2,81
HVSR10quater	038022P294HVSR317	44.882558°	11.510202°	Via Diamantina, loc. Diamantina	04/07/2019	53 min	0,61	5,61
HVSR11	038022P295HVSR318	44.889893°	11.507618°	Via Diamantina, loc. Diamantina	01/04/2019	55 min	0,62	6,30
HVSR12bis	038022P296HVSR319	44.836585°	11.507617°	Via Fondo Reno, Vigarano Mainarda	04/07/2019	60 min	0,61	3,64
HVSR13	038022P298HVSR321	44.838912°	11.482288°	S.S. 255, Vigarano Mainarda	16/04/2019	30 min	0,67	2,93
HVSR14	038022P299HVSR322	44.844420°	11.488455°	Via Italia, Vigarano Mainarda	16/04/2019	35 min	0,61	3,25
HVSR15bis	038022P300HVSR323	44.848863°	11.488787°	Via Pasta, Vigarano Mainarda	12/06/2019	42 min	0,64	2,66
HVSR16	038022P301HVSR324	44.837212°	11.491198°	Via Cento, Vigarano Mainarda	02/04/2019	30 min	0,61	2,82
HVSR17bis	038022P302HVSR325	44.841648°	11.493037°	Via Berlinguer, Vigarano Mainarda	13/06/2019	50min	0,64	2,64
HVSR18bis	038022P297HVSR320	44.847078°	11.499380°	Via Borsellino, Vigarano Mainarda	22/07/2019	60 min	0,61	3,58
HVSR19bis	038022P303HVSR326	44.849778°	11.498602°	S.P. 19, Vigarano Mainarda	12/06/2019	45 min	0,70	2,93
HVSR21quater	038022P304HVSR327	44.861630°	11.507183°	Via Magri, Vigarano Mainarda	12/06/2019	45 min	0,70	3,47
HVSR22bis	038022P305HVSR328	44.867333°	11.511830°	Via Il Agosto, Vigarano Pieve	18/04/2019	30 min	0,64	3,69
HVSR23bis	038022P306HVSR329	44.834935°	11.471822°	Via Frattina, Vigarano Mainarda	13/06/2019	45 min	0,67	2,64
HVSR24	038022P307HVSR330	44.854247°	11.528110°	Via Talassi, Vigarano Pieve	01/04/2019	45 min	0,77	2,93
HVSR26	038022P308HVSR331	44.849313°	11.508218°	Via Cento, Vigarano Mainarda	13/06/2019	45 min	0,67	3,08
HVSR27bis	038022P309HVSR332	44.843462°	11.504325°	Via Gutenberg, Vigarano Mainarda	18/04/2019	30 min	0,61	3,02
HVSR28	038022P310HVSR333	44.838568°	11.500672°	Via Fondo Reno, Vigarano Mainarda	08/04/2019	40 min	0,61	2,78
HVSR29	038022P311HVSR334	44.848748°	11.522133°	Via Cento, Vigarano Mainarda	18/04/2019	30 min	0,64	3,13
HVSR30	038022P312HVSR335	44.833600°	11.496423°	Via Fondo Reno, Vigarano Mainarda	08/04/2019	40 min	0,67	3,18

f_0 = Frequenza naturale - A_0 = Ampiezza del picco di f_0

Tabella 4-4 - Principali dati associati alle misure di microtremore a stazione singola HVSR eseguite.

5 Modello del sottosuolo

Una fase fondamentale dell'elaborazione della microzonazione sismica è la definizione del modello di sottosuolo e l'individuazione del substrato sismico, caratterizzato da elevati valori di rigidità e di velocità di propagazione delle onde sismiche. Esso è definito in normativa da valori di velocità delle onde di taglio (V_s) superiori ad 800 m/s. Per ottenere una stima affidabile della distribuzione delle velocità del sottosuolo occorre disporre di una calibrazione del sottosuolo derivante da fonti indipendenti, come sondaggi e profili sismici, dato che una determinata distribuzione dell'amplificazione spettrale alle varie frequenze oscillatorie è compatibile con molte combinazioni di spessori e velocità sismiche dei diversi corpi geologici. Nel territorio indagato, il basamento sismico è generalmente sepolto a notevoli profondità, ad eccezione dei settori settentrionali, dove risale per motivi tettonici, sino a profondità decisamente ridotte rispetto al contesto del sottosuolo della Pianura Padana. Il substrato è in genere raggiunto solo da un ristretto numero di pozzi, effettuati in passato, per la ricerca di idrocarburi. A queste profondità nel sottosuolo, non sono di norma disponibili misure dirette delle velocità sismiche in pozzo. I pochi dati disponibili (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016; Minarelli *et al.*, 2016) mostrano come le velocità delle onde sismiche aumentino con la profondità, ma non in modo lineare, dato che esse subiscono brusche accelerazioni in corrispondenza di varie superfici di discontinuità stratigrafica, che inquadrano le unità deposizionali nel sottosuolo. Tali superfici corrispondono a riflettori sismici e passaggi fra unità sismo-stratigrafiche, spesso associate ai limiti disconformi.

L'individuazione delle profondità dei limiti discordanti è stata ottenuta utilizzando diversi metodi geofisici, interpretati nel contesto stratigrafico regionale. I principali contrasti di impedenza associati a tali limiti sono stati identificati mediante l'uso di numerose linee sismiche, anche di recente acquisizione (Affatato *et al.*, 2019) e di misure di microtremore che hanno permesso di ricostruire la variazione a diverse frequenze del rapporto tra le componenti oscillatorie orizzontali e verticali (H/V). L'analisi di questi dati, associata alla stima delle proprietà meccaniche delle diverse unità stratigrafiche regionali, ha permesso di individuare le superfici che generano i principali contrasti di impedenza rilevabili con la tecnica HVSR. La superficie associata al maggior aumento di rigidità e di velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) è raggiunta da perforazioni, associate a misure di velocità in pozzo, effettuate nel settore settentrionale ove corrisponde alla discordanza che marca il tetto delle successioni marine marnose del Miocene. Questa superficie risulta piegata dalla deformazione tettonica, motivo per cui si approfondisce notevolmente procedendo verso sud. Nella parte centro-meridionale del territorio comunale, le unità oligo-mioceniche sono ricoperte da successioni torbiditiche del Pliocene. Queste arenarie si sono deposte in ambienti marini

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

profondi e hanno subito un processo di cementazione e litificazione per cui sono caratterizzate da velocità delle onde sismiche relativamente elevate e sono quindi anch'esse attribuite al substrato sismico.

Una seconda superficie di discordanza stratigrafica associata ad un contrasto di impedenza minore ma comunque significativo è sviluppata all'interno delle successioni quaternarie e marca il tetto dell'unità del Quaternario Marino. A causa dei movimenti tettonici sinsedimentari i depositi del Quaternario Marino presentano spessori molto variabili con valori massimi di 400 - 500 m nella parte meridionale del territorio, mentre si rastremano fortemente verso nord, sino a ridursi a poche decine di metri. Appare verosimile che, vista l'età geologica e la profondità di seppellimento, questa unità abbia rigidità e velocità prossime al valore limite di soglia del substrato rigido.

Le prime centinaia di metri di sottosuolo dell'area indagata sono interamente costituite da spesse successioni terrigene quaternarie continentali. 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. Queste potenti unità sedimentate presentano spessori estremamente variabili e un grado di litificazione molto basso o assente, come dimostrano le misure sismiche eseguite in pozzo sia nei settori settentrionali di anticlinale (Di Capua e Tarabusi, 2013) che in quelli meridionali di sinclinale (Minarelli *et al.* 2016). Le unità quaternarie prevalentemente continentali, inquadrare nel Supersistema Emiliano-Romagnolo, mostrano infatti valori massimi generalmente non superiori ai 500 m/s.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

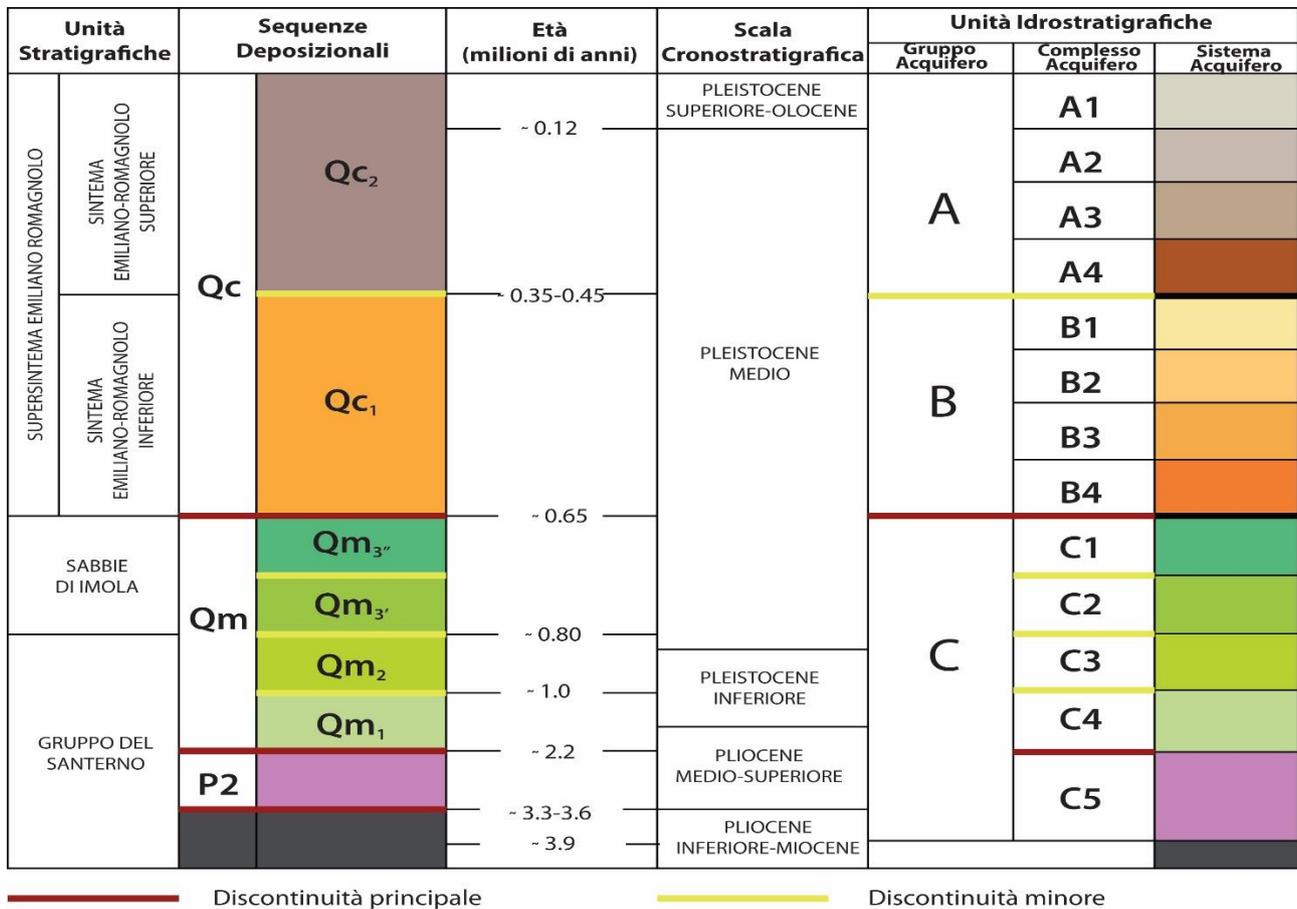


Figura 5-1 - Schema stratigrafico dei depositi plio-quadernari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche e superfici di discontinuità, sequenze deposizionali ed unità idrostratigrafiche (da Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998).

5.1 Substrato

In questo studio, con il termine “substrato” sono definite tutte le unità stratigrafiche sottostanti il Supersistema Emiliano-Romagnolo. Il substrato è generalmente limitato superiormente da una superficie di discordanza, legata ad una fase pleistocenica di deformazione e riorganizzazione strutturale dell’Avanfossa Appenninica, che marca appunto la base del suddetto Supersistema.

Le indagini profonde per la prospezione di idrocarburi da parte dell’ENI-AGIP hanno rivelato che il sottosuolo dell’area indagata registra importanti passaggi laterali di facies, sviluppatasi durante l’evoluzione mesozoica del margine continentale passivo della Tetide. Nell’area intorno a Casaglia e in buona parte del territorio indagato, il Mesozoico è caratterizzato da successioni relativamente poco potenti, simili a quelle della Piattaforma di Trento, in cui i depositi di piattaforma carbonatica del Gruppo dei Calcari Grigi sono seguiti dai sedimenti di altofondo pelagico del Rosso Ammonitico. Seguono depositi prevalentemente carbonatici del Mesozoico e del Paleogene. Ai calcari selciferi pelagici del Biancone, seguono i depositi

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

calcereo-marnosi della Scaglia Rossa e della Scaglia Cinerea. Questi depositi si trovano a profondità relativamente ridotte in corrispondenza dell'accentuato alto strutturale di Casaglia, mentre la loro profondità aumenta scendendo verso le strutture sinclinaliche sviluppate al confine meridionale dell'area indagata. Le successioni terziarie registrano un crescente apporto terrigeno, per cui ai calcari pelagici fanno seguito marne e argille marine. Sopra i depositi prevalentemente carbonatici mesozoici e paleogenici, poggiano quindi potenti successioni del Neogene, in gran parte terrigene. Queste ultime sono qui costituite, per buona parte del Miocene, da fanghi depositi in ambienti marini bacinali, anche anossici. Durante le fasi pre- e sin-evaporitiche del Messiniano, al limite meridionale del territorio indagato, si depositavano sabbie torbiditiche, alimentate dall'area lombarda, ascritte alla Formazione di Bagnolo, secondo la terminologia ENI-AGIP (Ghielmi *et al.*, 2010). Il Messiniano post-evaporitico è inizialmente caratterizzato da un'ulteriore migrazione verso nord della sedimentazione torbidica, legata alla migrazione della subsidenza, indotta dalla deformazione del bacino di avanfossa.

Gli ambienti pliocenici sono stati progressivamente coinvolti nella rapida deformazione tettonica compressiva di questa porzione dell'Avanfossa Appenninica che ne ha fortemente influenzato spessori e le condizioni deposizionali. Questi movimenti hanno indotto diffuse superfici di discordanza stratigrafica e lacuna, legate a periodi di non deposizione o erosione (Ghielmi *et al.*, 2010). Lacune e discordanze, anche angolari, sono particolarmente diffuse nelle aree corrispondenti ad anticlinali sepolte, come quella Casaglia, sviluppata nei pressi del confine settentrionale dell'area comunale indagata. I movimenti tettonici determinarono una forte differenziazione paleogeografica, in cui le isole emergenti nell'area di Casaglia si contrapponevano agli ambienti marini profondi a sedimentazione torbidica sviluppati nelle aree meridionali. Il Pliocene è qui dominato da successioni di torbiditi di mare profondo, alimentate da sabbie di provenienza alpina. Nella loro parte alta, sono presenti anche orizzonti conglomeratici, anch'essi di provenienza alpina e sudalpina (Ghielmi *et al.*, 2010). Seguendo la terminologia AGIP, queste successioni torbiditiche sono ascrivibili alle Formazioni di Porto Corsini e Porto Garibaldi. Queste unità plioceniche con spessori massimi di 1500 m di assottigliano verso nord, fino ad essere assenti nelle aree di alto strutturale. L'interruzione degli apporti torbiditici fu legata all'innalzamento del fondo marino, dovuto allo sviluppo di strutture compressive e transpressive sinistre nell'area prossima a Mirandola, che hanno indotto la deviazione dei flussi torbiditici a nord ed a sud rispetto all'area di Vigarano. Questo ha generato una discontinuità stratigrafica, associata a un netto cambio litologico e di facies deposizionale (Ghielmi *et al.*, 2010).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

La presenza di strutture compressive, lacune stratigrafiche e brusche variazioni laterali di spessore di corpi sedimentari è ben documentata nel profilo sismico di Figura 5-2 acquisito tra Bologna e la periferia occidentale di Ferrara, nei pressi di Vigarano Pieve. I depositi prevalentemente torbiditici, compresi fra le superfici di discordanza A e B, sono rappresentati in colore rosa. Il Quaternario Marino è rappresentato dalle tre unità sovrapposte di colore verde. Ben evidenti appaiono le lacune e le discordanze angolari in corrispondenza della anticlinale di rampa nell'area di San Pietro in Casale-Poggio Renatico. Lacune più pronunciate sono sviluppate sull'alto di Casaglia, contiguo al limite settentrionale del profilo sismico (Figura 5-2).

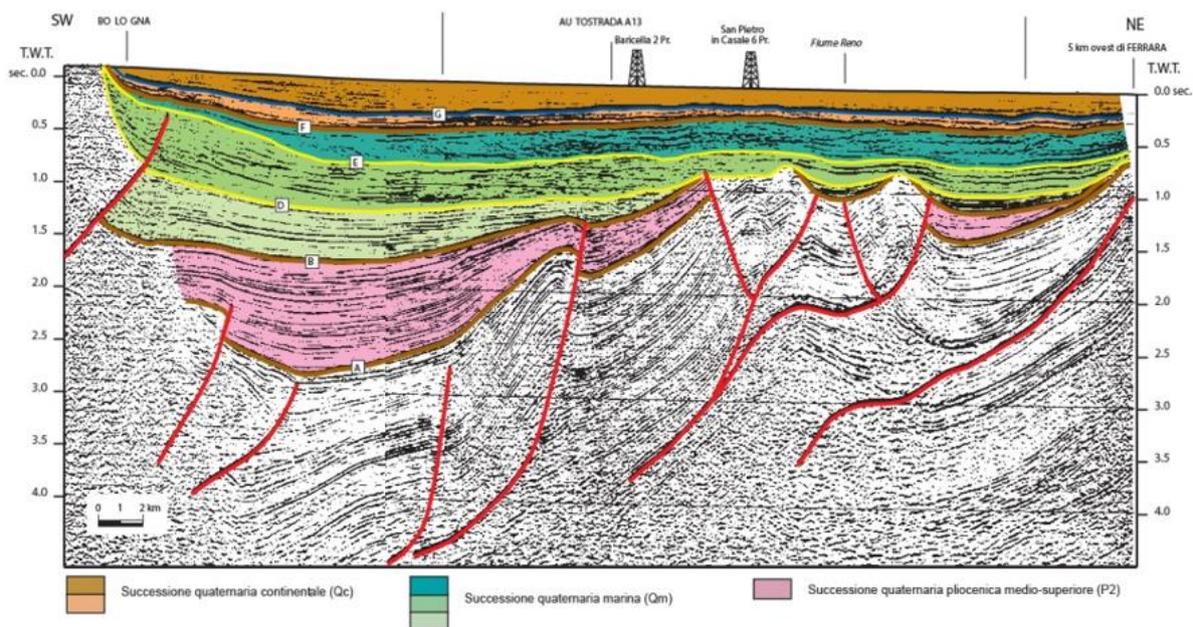


Figura 5-2 - Profilo sismico interpretato tratto da Riserve Idriche Sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

5.1.1 L'unità stratigrafica del Quaternario Marino

Le successioni del Quaternario inferiore sono inquadrare nell'unità stratigrafica del Quaternario Marino e sono formate da argille a foraminiferi platonici, che passano superiormente a facies di prodelta ed infine a sabbie di fronte delizio. Nel sottosuolo studiato, questi sedimenti marini sono riferiti alla Formazione di Ravenna, da non confondersi con l'omonimo Subsistema dell'Olocene. Facies deposizionali analoghe sono visibili in affioramento, nella fascia collinare ai piedi dell'Appennino, dover erano tradizionalmente conosciute come Calabriano, mentre sono oggi inquadrare nelle unità della Formazione di Castell'Arquato, Argille di Riolo Terme e Argille di Terra del Sole. Le sabbie deltizie invece, un tempo conosciute come Sabbie

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

di Asti o Sabbie Gialle, sono oggi inquadrati in varie unità, fra cui le Sabbie di Imola (Ricci Lucchi *et al.*, 1982). Queste successioni marine si sono deposte nella prosecuzione occidentale dell'antico Mare Adriatico, soggetta, nella parte meridionale del territorio indagato, a forte subsidenza e apporto sedimentario, mentre in quella settentrionale permanevano condizioni subaeree o di mare sottile, con fondali poco subsidenti.

Nella zona di sinclinale meridionale, l'unità del Quaternario Marino è in gran parte costituita da argille di mare aperto con spessori di oltre 500 m, che presentano invece potenze progressivamente più ridotte nelle zone centrali e ancor più in quelle settentrionali di alto strutturale. L'unità del Quaternario Marino può essere, inoltre, assente nell'area della culminazione assiale di Casaglia, dove, localmente, depositi continentali quaternari si sovrappongono direttamente alle successioni di mare profondo mioceniche.

5.2 Terreni di copertura

La parte superiore della successione quaternaria è formata da sedimenti assai poco litificati e consolidati, che sono attribuibili, in base alle proprietà elasto-meccaniche ed alla loro posizione stratigrafica, ai "terreni di copertura". Questi terreni presentano comunque notevoli variazioni petrofisiche e litologiche interne, che ne hanno permesso la suddivisione in una serie di unità stratigrafiche, qui di seguito descritte.

5.2.1 Supersistema Emiliano-Romagnolo

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 dalla 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 che registrano le fasi interglaciali. Le fasi di massima trasgressione sono caratterizzate da influenze marine, qui presenti però solo nella parte inferiore del Supersistema.

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è bipartito in Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e Superiore (AES) da una superficie di discordanza, la cui genesi fu influenzata dalla deformazione tettonica delle Pieghe Ferraresi sepolte, in una fase sviluppatasi fra 400.000 e 350.000 anni fa circa. La discordanza corrisponde, in questa area, alla scomparsa di intervalli con chiari caratteri marini. In aree di culminazione anticlinale, questa superficie di discordanza può sovrapporsi direttamente sul Pliocene o Miocene. Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è dominato, in questa area, da depositi fluviali continentali, con qualche intercalazione marino-costiera in aree meridionali subsidenti. Nell'area indagata, il Supersistema si è

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

accumulato nella fascia di interazione fra i sedimenti di provenienza appenninica e quelli del Po. Nel tempo, il fronte dei sedimenti di provenienza appenninica è migrato verso nord, a discapito di quelli padani.

5.2.1.1 Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) costituisce la parte inferiore del Supersintema Emiliano-Romagnolo ed è di norma sepolto a notevoli profondità. La caratterizzazione di quest'unità è stata effettuata sulla base delle informazioni ottenute attraverso sondaggi stratigrafici profondi, realizzati nell'ambito del progetto CARG dalla Regione Emilia-Romagna (Foglio 203 "Poggio Renatico", Foglio 204 "Portomaggiore"), oltre che di diversi log di pozzo per idrocarburi ENI-AGIP (Baura, Casaglia, Cona, Ferrara, Pavonara, Pontelagoscuro, Porotto). Mai affiorante nell'area di studio, il Sintema è troncato superiormente da una discordanza erosiva ed angolare. Nei settori meridionali maggiormente subsidenti, il Sintema può raggiungere spessori massimi di poco superiori ai 100 m, mentre può essere molto ridotto o localmente assente nelle aree più settentrionali, in corrispondenza della Dorsale Ferrarese sepolta, come ad esempio nei pozzi di Casaglia. Ove presente, il Sintema è costituito da alternanze cicliche di depositi argilloso-limosi marini e depositi prevalentemente sabbiosi, riferibili ad ambienti di facies di piana fluvio-deltizia, che superiormente sfumano in depositi di piana alluvionale. Sulla base della posizione stratigrafica, l'unità è attribuita al Pleistocene medio, cioè nell'intervallo temporale compreso tra i 650.000 e 350.000 anni. (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998).

5.2.1.2 Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) costituisce la porzione superiore del Supersintema Emiliano-Romagnolo. Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è comunemente organizzato in cinque cicli deposizionali trasgressivo-regressivi, con uno spessore medio di circa 30-40 metri ciascuno, in corrispondenza delle aree di sinclinale, ma con spessori minori nelle aree settentrionali di anticlinale poco subsidente. Nel complesso, questi cicli registrano un ulteriore allontanamento della linea di costa adriatica dalla zona qui discussa. Quest'evoluzione testimonia sia il progressivo riempimento del bacino sedimentario, sia lo spostamento verso nord degli assi depocentrali e del reticolo fluviale padano, legato al prevalere degli apporti terrigeni rispetto alla creazione di spazio di accomodamento sedimentario. Lo sviluppo di questi cicli sedimentari è stato anche controllato dalle grandi fluttuazioni glacio-eustatiche. Il limite inferiore di ciascun ciclo è formato da una superficie netta di disattivazione della sedimentazione fluviale grossolana singlaciale. La porzione basale è caratterizzata dalla presenza di limi e sabbie continentali, seguiti da argille organiche di piana alluvionale, palude e, nelle aree più subsidenti e orientali, di piana costiera, che solamente nella parte inferiore del Sintema mostrano intercalazioni di sabbie litorali o

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

fanghi salmastri. Le porzioni regressive sono invece costituite da spesse successioni di depositi fini di piana 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 vaste porzioni del sottosuolo della pianura ferrarese. Questi grandi corpi di sabbie sono stati deposti in ambienti di media pianura alluvionale fredda, durante le fasi singlaciali di stazionamento basso 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* (AES₄) e Subsintema di *Torre Stagni* (AES₅) (cfr. AES indifferenziato - Foglio 204 Portomaggiore), e in 3 cicli superiori, inquadrati nei Subsintemi di *Bazzano* (AES₆), di *Villa Verucchio* (AES₇) e di *Ravenna* (AES₈). Nella porzione più recente del Subsintema di Ravenna, è stata ulteriormente distinta l'Unità di Modena (AES_{8a}) di età post-romana. I tre Subsintemi superiori (AES₆, AES₇, AES₈), presentano tra loro forti analogie nell'organizzazione stratigrafica.

Questi cicli superiori sono i meglio conosciuti a scala regionale, dato il numero relativamente elevato 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 qui registrata da depositi palustri dulcicoli di pianura costiera, ricchi di argille organiche e torbe. La fase di stazionamento alto è caratterizzata da sabbie di canale fluviale, intercalate a potenti successioni di fanghi di piana interalvea. La parte superiore dei Subsintemi AES₆ e AES₇ è caratterizzata da sabbie grossolane di media pianura alluvionale, che passano lateralmente a sedimenti fini di pianura fredda, diffusi soprattutto nelle porzioni meridionali, soggette ad apporti appenninici. Nell'area considerata, la parte superiore del Subsintema di Bazzano (AES₆) è dominata da grandi corpi di sabbie di Po, il cui limite meridionale è ulteriormente migrato progressivamente verso nord nelle fasi successive.

L'organizzazione stratigrafica delle decine di metri più superficiali del sottosuolo è particolarmente rilevante, sia ai fini geotecnici, sia per quelli di microzonazione sismica. La legislazione vigente impone, infatti, di valutare la velocità delle onde di taglio (V_s) nei primi 30 m di sottosuolo, qui costituiti da sedimenti continentali del Pleistocene terminale e dell'Olocene, intervalli di tempo che corrispondono a fasi dell'ultima glaciazione e al post-glaciale. La porzione singlacial è ascritta al Subsintema di Villa Verucchio (AES₇), mentre la parte più recente è attribuita al Subsintema di Ravenna (AES₈)

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Nel territorio comunale, la porzione superiore del Subsistema di Villa Verucchio (AES₇) è formato da estesi corpi di sabbie grossolane di riempimento di canali del Po, che, nella porzione sudorientale del territorio comunale, sono a contatto con depositi di provenienza appenninica. Il Subsistema di Ravenna (AES₈) è formato prevalentemente da sedimenti fini, spesso depositi in ambienti umidi, stagni e paludi di acqua dolce, mentre a nord, nella fascia di Vigarano Pieve, esso è dominato dalle sabbie di riempimento del grande corpo di canale del Po di età romana e medievale.

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. La parte settentrionale è attraversata dal grande corpo di sabbie di Po, di età medievale, che conserva tuttora una netta elevazione morfologica. A nord di esso, sono sviluppati corpi di riempimento di precedenti generazioni di alvei di Po, spesso ad andamento meandriforme. A sud del corpo di paleoalveo del Po, affiorano i sedimenti limoso-sabbiosi dell'argine naturale destro, che sfumano rapidamente in fanghi di depressione interalvea. Poco a sud affiorano, invece, sedimenti di piana alluvionale alimentati dal fiume Reno. A Vigarano Mainarda infatti, lungo l'attuale strada che collega l'abitato a Mirabello e Fondo Reno, si rinvengono i depositi sabbioso-limosi del corpo di riempimento del canale fluviale di Reno, sviluppatosi durante il XVI e XVII secolo. Anche questo corpo conserva una evidente espressione geomorfologica dovuta, in parte, alle continue arginature antropiche, che non furono però in grado di impedire numerose rotte e tracimazioni, che favorirono un intenso accumulo sedimentario nella piana alluvionale. I depositi fangosi di piana alluvionale alimentati dal Reno e, quelli più antichi, dal Po sono a tratti separati da strutture arginali artificiali, attribuibili al cosiddetto Serraglio di Vigarano.

6 Interpretazioni e incertezze

In questo capitolo vengono esaminate le principali scelte interpretative che hanno guidato la redazione dello studio di microzonazione sismica. Saranno quindi evidenziate ragioni ed elementi a supporto delle interpretazioni effettuate, valutando al contempo inevitabili incertezze ad esse connesse ed eventuali 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 in cui viene effettuata la registrazione e dalle condizioni meteorologiche.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

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 comunque provocati da sorgenti di breve durata, come il passaggio di automobili, 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 le incertezze indotte alle misure, sono stati utilizzati alcuni accorgimenti durante le registrazioni dei microtremori. 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 velocimetrici ed il terreno, oltre che di verificare l'assenza di interfacce intermedie (es. cemento, fondo stradale, stabilizzato), responsabili di inversioni marcate di velocità in grado di determinare una non corretta interpretazione della curva HVSR.

Viste le problematiche rilevate è stato necessario realizzare 45 registrazioni prima di ottenere 28 misure di sismica passiva a stazione singola affidabili. In fase di elaborazione dei dati, infatti, si è potuta spesso accertare la presenza di disturbi a varie frequenze, di chiara origine antropica, che hanno portato a scartare diverse misure realizzate.

Le nuove registrazioni di microtremore (paragrafo 4.2.1.2) sono state estese a tutto il territorio comunale e, ove possibile, allineate lungo tracce di sezioni geologiche disponibili (cfr. Allegato 1) al fine di identificare i principali contrasti di impedenza nella successione stratigrafica e stimare la profondità del substrato sismico (si veda paragrafo 5.1).

Oltre la metà delle acquisizioni ha avuto durata pari o superiore a 40 minuti, e sono state analizzate con finestre variabili da 40 a 60 s. Alcune di esse sono state effettuate in notturna per limitare l'effetto di transienti legati al traffico veicolare e ad altre attività antropiche giornaliere.

Le misure di lunga durata hanno permesso di individuare picchi a bassa frequenza, compresi tra 0,2 e 0,4 Hz, la cui presenza è avvalorata da lavori pubblicati su riviste scientifiche internazionali (e.g. es. Mascandola *et. al.* 2019, Mascandola *et. al.* 2017, Milana *et al.* 2014).

Questi picchi a bassa frequenza non sono in genere visibili nelle misure HVSR pregresse disponibili. L'assenza di tali evidenze è in gran parte legata alle caratteristiche della strumentazione, ai tempi di acquisizione delle registrazioni e all'approccio di elaborazione. Gran parte delle misure pregresse sono state infatti realizzate con strumentazione poco sensibile alle basse frequenze, dotata di sensori a 4,5 Hz.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Altri fattori che compromettono la “visibilità” dei picchi a bassa frequenza sono certamente legati ai tempi di acquisizione, in genere non superiori a 30 minuti, e ad elaborazioni eseguite con finestre non più lunghe di 30 secondi.

Nonostante le inevitabili incertezze le nuove misure di microtremore hanno permesso di definire, in modo sufficientemente chiaro, le frequenze di vibrazione caratteristiche del territorio indagato e redigere una dettagliata carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3, paragrafo 8.3).

Le misure di microtremore analizzate mostrano, in genere, un picco di frequenza prevalente compreso tra 0,53 e 0,75 Hz. Picchi a frequenze più basse (< 0,5 Hz), con ampiezze comprese tra 2 e 3, sono inoltre visibili in buona parte delle misure eseguite nel territorio comunale, ad eccezione di quelle realizzate nella porzione più settentrionale (località Diamantina), dove il picco a bassa frequenza risulta assente.

Dall’analisi delle ampiezze dei picchi rilevati a frequenze maggiori di 0,5 Hz è inoltre possibile notare importanti variazioni a livello comunale. In generale i valori di ampiezza di tali picchi risultano mediamente compresi tra 2.5 e 3.5. Al contrario nella zona più settentrionale del territorio comunale, i valori di ampiezza della frequenza di picco appaiono invece molto più elevati con variazioni comprese tra 5.5 e 7.

L’osservazione di un aumento considerevole nelle ampiezze dei picchi di frequenza compresi tra 0,55 e 0,75 Hz procedendo verso nord, è confermata anche dall’analisi H/V sul dato in continuo della stazione accelerometrica della rete sismica nazionale denominata “FERS”, sita in località Casaglia (http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_30/#/station/IV/FERS).

Questo indica che nell’area più settentrionale del territorio comunale esiste un elevato contrasto di impedenza acustica all’interno della successione stratigrafica. I valori di frequenza rilevati, le stratigrafie dei pozzi ed i profili di velocità delle onde di taglio (Vs) disponibili individuano il contrasto a profondità variabili tra 150 e 200 m, al passaggio tra i terreni di copertura e il substrato sismico.

Come già accennato, nelle restanti aree del territorio comunale le ampiezze relative alle frequenze di picco nell’intervallo 0,5 - 1 Hz sono invece molto inferiori e sempre compresi tra 2.5 e 3.5. Questo indica la presenza di contrasti di impedenza minori nella successione stratigrafica e che il substrato sismico deve essere ricercato a maggiori profondità rispetto a quanto indicato per l’area più settentrionale di Diamantina.

6.2 Substrato rigido

Confrontando e correlando i dati geofisici con le sezioni stratigrafiche disponibili (Allegato 1) si è tentato di associare i principali contrasti di impedenza alle discontinuità stratigrafiche che separano le unità riconosciute nel sottosuolo a scala regionale. Le associazioni proposte contengono un notevole grado di incertezza legato alle caratteristiche intrinseche del contesto deposizionale, costituito da successioni stratigrafiche che mostrano, in genere, bassi contrasti di impedenza e graduali incrementi delle velocità delle onde sismiche con la profondità.

Per tentare di convalidare le attribuzioni sono stati inoltre analizzati i dati di alcuni pozzi per idrocarburi presenti nel territorio comunale di Ferrara e quelli delle misure di microtremore realizzate nell'ambito della microzonazione sismica di Vigarano Mainarda e Ferrara. Oltre a ciò sono stati considerati i dati di Vs provenienti dalle misure di down-hole profondo eseguite a Casaglia (Di Capua e Tarabusi, 2013) ed a Mirabello (Minarelli *et al.*, 2016) nell'ambito degli studi di microzonazione.

La Figura 6-1 mostra l'ubicazione delle principali indagini e delle sezioni geologiche utilizzate per la definizione del substrato sismico. In Figura 6-2 sono invece schematizzati i risultati di alcune delle indagini sismiche eseguite con relative interpretazioni, basate su correlazioni tra dati geofisici e stratigrafici. Picchi di frequenza compresi tra 1,5 - 0,9 Hz, ove presenti, possono essere messi in relazione con il tetto del complesso acquifero A2 (Figura 6-2) che corrisponde al tetto del Subsistema di Bazzano (AES₆) (Figura 5-1), datato circa 125.000 anni (Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998). Questa correlazione è già stata proposta in altri studi di microzonazione sismica della pianura emiliana (es. Sala Bolognese, Poggio Renatico, Ferrara). All'interno del territorio comunale la frequenza il picco prevalente è tuttavia compresa tra i 0,53 Hz dei settori meridionali maggiormente subsidenti, ed i 0,75 Hz di quelli centrali. Questo contrasto di impedenza può essere verosimilmente associato alla discontinuità stratigrafica che separa il Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) da quello Inferiore (AEI). Quest'ultima correlazione non risulta però valida per le aree più settentrionali (cfr. Diamantina) dove in questo intervallo di frequenze è presente un forte contrasto di impedenza, associato al tetto del substrato sismico, posto in corrispondenza delle unità marnose mioceniche. La correlazione con il substrato sismico è validata da dati diretti di pozzo acquisiti nell'area di Casaglia (185070P503), sia per quanto riguarda la stratigrafia (pozzo 185070P503) sia per le velocità delle onde di taglio Vs (Di Capua e Tarabusi, 2013). L'andamento e la posizione stratigrafica delle superfici descritte si evince dalla sezione realizzata dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1 e Figura 6-2), mediante correlazioni su scala regionale di sondaggi stratigrafici profondi e profili sismici.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

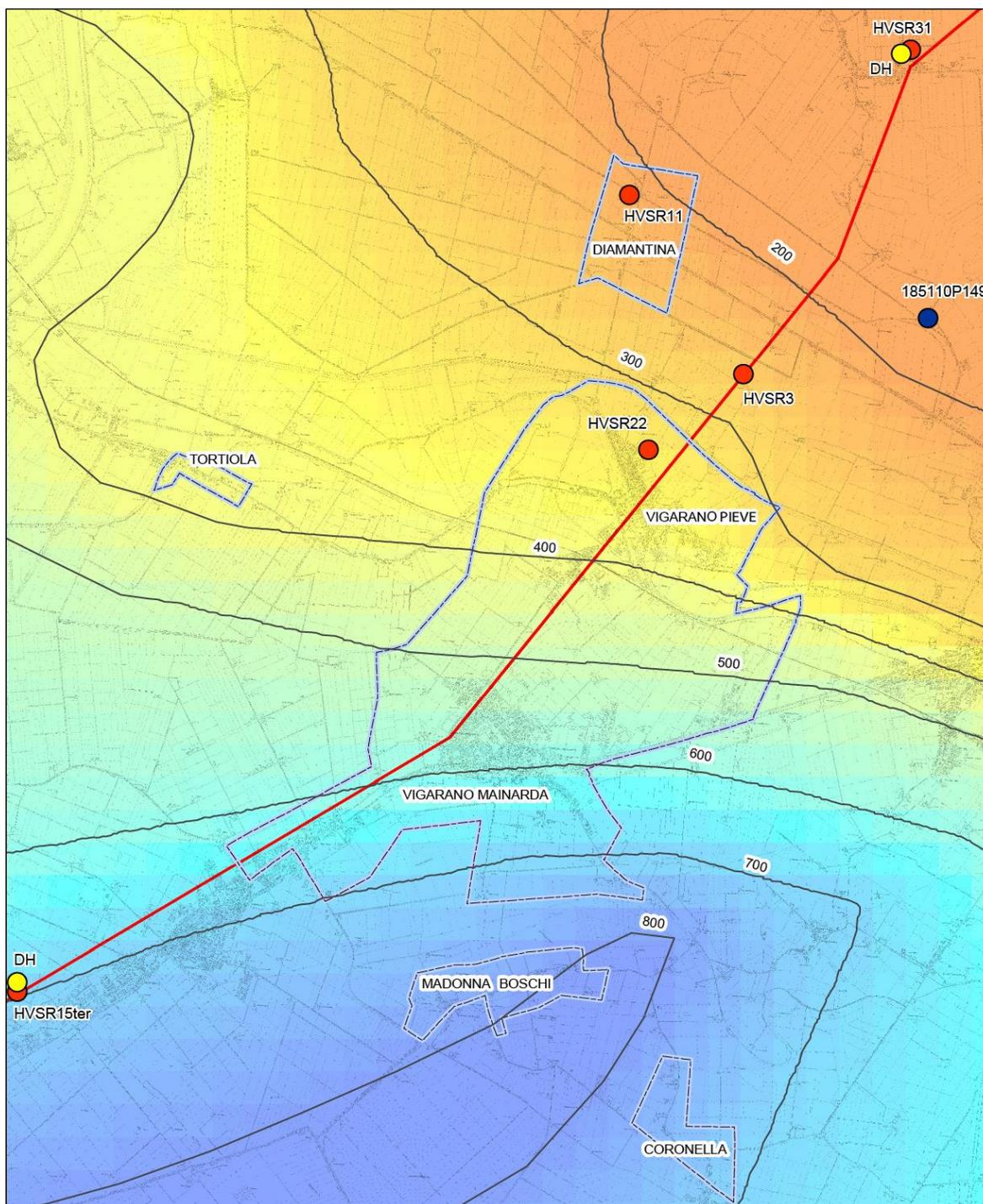


Figura 6-1 - La mappa riporta i principali elementi utilizzati per la definizione del substrato sismico. La traccia rossa rappresenta parte della sezioni geologica di bibliografia "Cento-Occhiobello" (Sezione A-A' - Allegato 1). In rosso sono rappresentate alcune delle ubicazioni delle misure HVSr realizzate per gli approfondimenti di microzonazione sismica, mentre in giallo sono indicate le perforazioni, con associate misure di velocità in pozzo pubblicate in Minarelli *et. al* 2016 e Di Capua e Tarabusi, 2013. In blu, infine, sono indicati i carotaggi profondi che raggiungono il substrato sismico.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

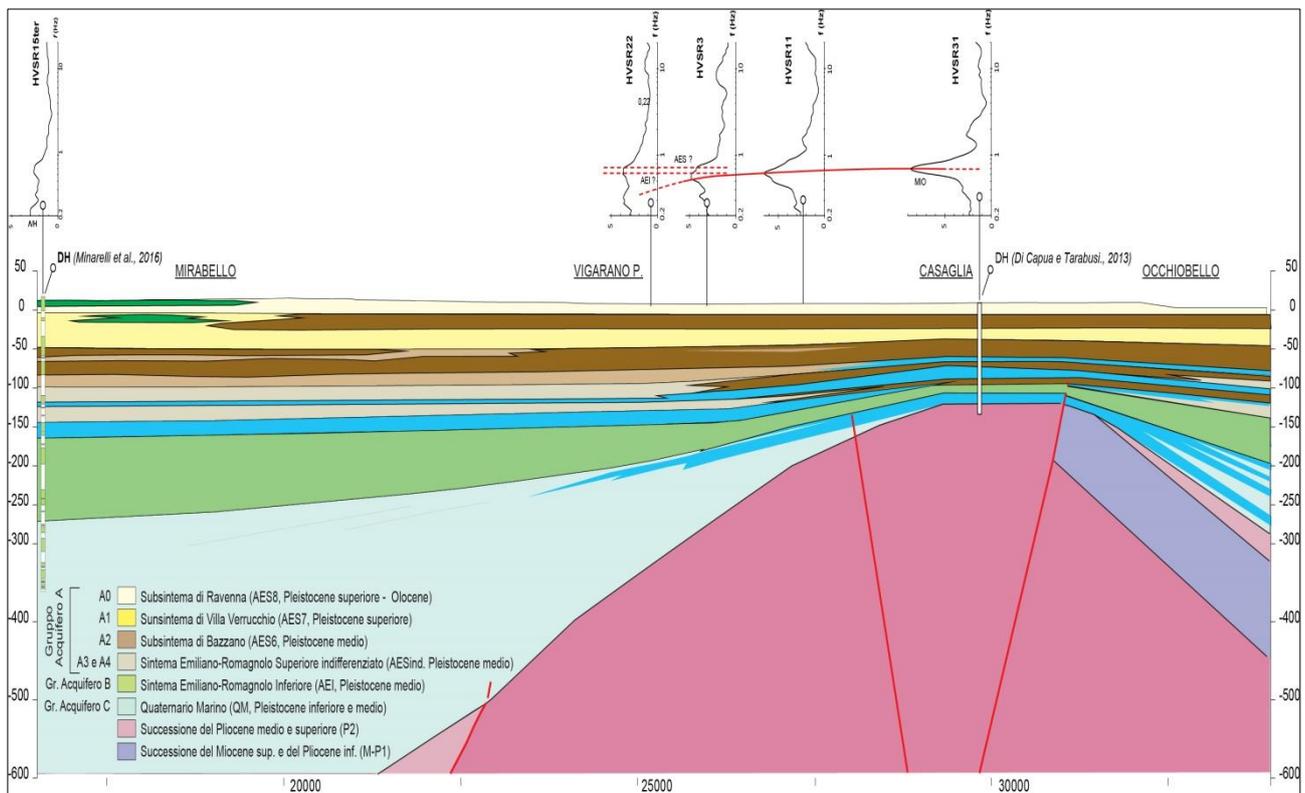


Figura 6-2 - Porzione settentrionale della sezione geologica "Cento-Occhiobello" della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (Martelli *et al.*, 2017 - Allegato 1, sezione J-J'). Sulla sezione sono riportate le curve di ellitticità ottenute dalle misure HVSR eseguite per la microzonazione di Vigarano Mainarda e Ferrara. I picchi di H/V sono stati correlati tra loro ed associati, utilizzando i valori di V_s ottenuti da down-hole profondo (185070P503), alle superfici stratigrafiche caratterizzate dai maggiori contrasti di impedenza.

Secondo i sondaggi e le sezioni geologiche disponibili, la profondità del tetto del Subsistema di Bazzano (AES₆) varia tra i 45 ed i 60 m, con le profondità minori in corrispondenza dei settori settentrionali.

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) risulta invece sepolto a profondità variabili tra 120 e 170 m con quote minori registrate sempre nei settori più settentrionali.

Un'altra importante superficie di discordanza stratigrafica, associata ad un contrasto di impedenza significativo, è sviluppata all'interno delle successioni quaternarie e marca il tetto dell'unità del Quaternario Marino. A causa dei movimenti tettonici sinsedimentari, questa superficie si ritrova a profondità molto variabili, comprese tra i 350 m dei settori comunali meridionali ed i 150 metri delle aree più settentrionali. La deformazione tettonica ha inoltre sollevato le unità mioceniche sino a circa 200 m sotto la superficie, nelle aree più settentrionali del comune (Diamantina), mentre appaiono notevolmente ribassate nelle aree meridionale, dove sono ricoperte dalle successioni torbiditiche litificate del Pliocene.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Le profondità delle superfici descritte e le frequenze acquisite tramite misure di *noise* risultano in sostanziale accordo con la relazione che lega le frequenze fondamentali desunte da analisi di sismica passiva, con i valori di velocità delle onde di taglio disponibili in bibliografia e le profondità dei suddetti contrasti di impedenza.

Come anticipato al capitolo 5, il tetto del Subsistema di Bazzano (AES₆) e quello del Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiori (AES) non possono essere considerati 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 prevalentemente continentali del Quaternario Superiore siano caratterizzate, in aree di bassa pianura alluvionale, da valori massimi generalmente non superiori ai 500 m/s. Tali valori non sono chiaramente compatibili con quelli caratteristici di un “*bedrock sismico*” di riferimento per le analisi di risposta sismica locale. Tale livello di riferimento deve, quindi, essere ricercato a profondità più elevate, associato a frequenze di picco più basse.

Misure di microtremore di lunga durata hanno permesso di individuare, su larga parte del territorio comunale, alcuni picchi a frequenze inferiori a 0,5 Hz. Le basse frequenze, in genere comprese tra 0,2 e 0,35 Hz, sono state frequentemente rilevate in altre misure di microtremore, eseguite in comuni limitrofi per scopi di microzonazione sismica. La presenza di contrasti alle basse frequenze in area emiliana è inoltre avvalorata da lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali (e.g. Mascandola *et al.*, 2019; Mascandola *et al.*, 2017; Milana *et al.*, 2014). Riflettori sismici e contrasti di impedenza ad elevate profondità sono stati infine individuati anche nell’area urbana di Ferrara e nell’area di Mirabello mediante recenti rilievi di sismica a riflessione.

In base ai dati stratigrafici disponibili ed ai valori di Vs profondi per analoghe unità stratigrafiche della pianura emiliana (Minarelli *et al.*, 2016; Petronio *et al.*, 2018), si può ragionevolmente supporre che picchi a bassa frequenza intorno ai 0.35 Hz possano essere messi in relazioni, soprattutto nelle aree meridionali, con la superficie di discordanza che marca il tetto dell’unità del Quaternario Marino. Picchi a frequenza inferiore di circa 0,20 – 0,25 Hz possono invece corrispondere al passaggio tra i depositi quaternari e quelli pliocenici, dove questi ultimi rappresenterebbero il *bedrock sismico* delle modellazioni numeriche per le aree meridionali.

Come estremamente evidente in Figura 6-2, queste superfici sono state ampiamente deformate dalla tettonica attiva, ragion per cui esse si rinvengono a profondità notevolmente variabili all’interno dell’area studiata. Queste profondità si riducono notevolmente verso nord con un conseguente avvicinamento delle diverse superfici di discordanza e contrasto. Questo comporta la manifestazioni di picchi multipli o picchi di

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

frequenza molto 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. In questi casi risulta spesso impossibile mettere in relazione tali frequenze con ben definite superfici.

6.3 Terreni suscettibili di liquefazione

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

La manifestazione di effetti di sito legati a fenomeni di liquefazione è stata documentata in occasione del sisma del 2012 sia in località Tortiola, nella porzione orientale del territorio comunale, sia in località Borgo al confine meridionale con il Comune di Terre del Reno. Condizioni predisponenti a tali fenomeni sono state invece accertate in ampie aree, già nell'ambito degli studi realizzati durante l'emergenza sismica del 2012 dalla Regione Emilia-Romagna (Martelli e Romani, 2013).

Il cospicuo numero di indagini acquisite durante lo studio di microzonazione ha consentito di meglio discriminare spessore e geometrie dei corpi liquefacibili soprattutto nelle aree prive di dati pregressi o con dati di scarsa affidabilità. Ciò ha portato alla revisione delle zone potenzialmente soggette a tali instabilità, che sono state riportate nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica come Zone di Attenzione per Liquefazione (Tavola 4, paragrafo 8.4).

Il buon numero di indagini penetrometriche con piezocono (CPTu) archiviate in banca dati, ha infine permesso la realizzazione di circa 50 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 eseguiti durante lo studio hanno ridotto notevolmente le incertezze relative alla distribuzione ed alle caratteristiche geotecniche dei corpi suscettibili a liquefazione. Queste instabilità riguardano prevalentemente le aree situate in corrispondenza del paleoalveo del Po, affiorante a Vigarano Pieve e in località Tortiola, e quelle site lungo il paleoalveo e i ventagli da rotta del Reno affioranti tra Borgo, Vigarano Mainarda e Fondo Reno. Altre aree soggette a potenziali fenomeni di liquefazione, legati alla presenza di sabbie sepolte, sono state individuate sia nelle porzioni più meridionali del territorio comunale, tra Madonna Boschi e Coronella, sia i quelle più settentrionali presso Diamantina.

L'elevata variabilità laterale nella distribuzione dei depositi sedimentari, non permette quindi di escludere in senso assoluto la presenza di locali livelli granulari saturi anche in porzioni di territorio non classificate come "zone di attenzione per liquefazioni". Questa affermazione risulta ancor più veritiera nelle aree meno

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

documentate da prove geognostiche, che nel caso specifico riguardano principalmente le zone rurali. Per tali ragioni la valutazione sito specifica del rischio di liquefazione è comunque sempre delegata ad ulteriori indagini geognostiche, 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 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 suolo, le zone sono identificate come suscettibili di instabilità e per esse sono richiesti approfondimenti di terzo livello.

Una corretta suddivisione in aree a diversa pericolosità deve essere basata su un dettagliato modello concettuale del sottosuolo. La bontà del modello è certamente funzione della disponibilità di dati geognostici e geofisici, ma altrettanto dell'esperienza del geologo 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 ottenuta mediante la tradizionale interpretazione delle facies sedimentarie e delle geometrie deposizionali correlata con le informazioni estratte dalle sezioni geologiche prodotte dalla Regione Emilia-Romagna per il "Foglio 203 - Poggio Renatico" del Progetto Nazionale CARG o pubblicate all'interno di lavori scientifici (Stefani *et. al* 2018 – Allegato 1 – sezioni A-A'). Nei paragrafi seguenti, sono descritte le metodologie utilizzate per la definizione dei modelli sismo-stratigrafici, il calcolo dei fattori di amplificazione locale e la definizione del grado di rischio associato alle diverse aree classificate come instabili.

La conformazione e l'evoluzione geologica del territorio, insieme alle osservazioni degli effetti di sito prodotti dalla sequenza sismica emiliana, consentono di attribuire alle zone instabili problematiche connesse ad amplificazione sismica e liquefazione dei terreni. Nelle aree definite come instabili sono state, pertanto, eseguite stime puntuali del potenziale di liquefazione, mediante metodologie semplificate proposte dalla letteratura internazionale, già applicate e verificate negli stessi contesti geologico-stratigrafici in seguito agli eventi sismici del 2012.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali

La sequenza sismica del 2012 ha permesso di verificare come l'area di pianura emiliana colpita sia stata interessata da fenomeni di amplificazione stratigrafica (e.g. Bordoni *ed al.*, 2012; Govoni *ed al.*, 2014). La determinazione dell'amplificazione attesa può essere ottenuta sia attraverso abachi di riferimento nazionali (ICMS - Gruppo di lavoro MS, 2008) o regionali (D.G.R. 630/2019), sia mediante analisi di risposta sismica locale.

Per gli approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello la quantificazione dell'accelerazione massima attesa in superficie (PGA) è stata ottenuta mediante calcolo della risposta sismica locale (RSL). I risultati sono stati poi confrontati con i fattori di amplificazione sismica proposti dagli abachi regionali (D.G.R. 630/2019 Regione Emilia-Romagna), al fine di verificare la 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 di accurati dati stratigrafici, geofisici e geotecnici derivati sia dagli approfondimenti di terzo livello che da precedenti studi di microzonazione sismica di aree limitrofe sono state eseguite modellazioni numeriche di risposta sismica locale. Le sette modellazioni proposte considerano sia le importanti variazioni di profondità del substrato sismico presenti nell'area di studio (paragrafo 6.2, Allegato 1 - Sezione A-A'), sia le principali differenze stratigrafiche che caratterizzano le Microzone Omogenee in Prospettica Sismica individuate all'interno del territorio comunale (Tabella 7-1).

Tali modellazioni sono state denominate:

- RSL zona 30502001 - Vigarano Mainarda (Tabella 7-2), applicata nell'area dell'abitato in cui affiorano le sabbie limose di riempimento del paleoalveo del Reno di età moderna. L'Area si sviluppa nella parte meridionale del territorio comunale in cui ancora si risentono gli effetti della struttura sinclinalica di Mirabello, ove si registrano i maggiori spessori delle unità sedimentarie quaternarie;
- RSL zona 30502002 - Vigarano Mainarda (Tabella 7-3), utilizzata nell'area dell'abitato in cui affiorano limi e sabbie fini limose che costituiscono i corpi di ventaglio da rotta e tracimazione del Reno di età moderna. Anche quest'area si sviluppa nella parte meridionale del territorio comunale in cui ancora si risentono gli effetti della struttura sinclinalica di Mirabello, ove si registrano i maggiori spessori delle unità sedimentarie quaternarie;

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

- RSL zona 30502003 - Vigarano Pieve (Tabella 7-4), applicata nella parte dell'abitato che poggia sulle sabbie e sabbie fini limose di riempimento del Po di età romana e medievale, presenti nella porzione centro-settentrionale del territorio comunale. Dal punto di vista strutturale l'area si sviluppa lungo la monoclinale, immergente verso sud, che raccorda l'asse della sinclinale meridionale di Mirabello con l'anticlinale complessa sviluppata più a nord nell'area di Casaglia;
- RSL zona 30502005 - Diamantina (Tabella 7-5), sviluppata per l'area più settentrionale del territorio comunale che risente maggiormente della presenza della piega tettonica di Casaglia, la cui culminazione assiale si incontra poco a nord di Diamantina. In quest'area le successioni quaternarie sono poco sviluppate e lacunose, ed il substrato sismico è sepolto alle minori profondità;
- RSL zona 30502005 - Madonna Boschi e Coronella (Tabella 7-6), utilizzata negli ambiti geografici più meridionali del territorio comunale in cui la successione stratigrafica è costituita da depositi di argille organiche affioranti che poggiano su significativi corpi di sabbie, sepolte a non elevata profondità. Queste aree meridionali si sviluppano al disopra della prosecuzione assiale della struttura sinclinale di Mirabello, ove le unità sedimentarie quaternarie registrano i maggiori spessori;
- RSL zona 2006 - Vigarano "Pieve" (Tabella 7-7), applicata alla porzione centrale del territorio comunale dove dominano terreni costituiti di argille sino alla profondità di circa 20 metri. Dal punto di vista strutturale l'area si sviluppa lungo la monoclinale, immergente verso sud, che raccorda l'asse della sinclinale meridionale di Mirabello con l'anticlinale complessa sviluppata più a nord nell'area di Casaglia;
- RSL zona 2007 - Madonna Boschi e Coronella (Tabella 7-8), valida per le porzioni più meridionali del territorio comunale in cui la successione stratigrafica è generalmente costituita, per le prime decine di metri di sottosuolo, da argille e limi con rare intercalazioni di sabbie. Queste aree si sviluppano lungo la prosecuzione assiale della struttura sinclinale di Mirabello, ove le unità sedimentarie quaternarie registrano i maggiori spessori.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

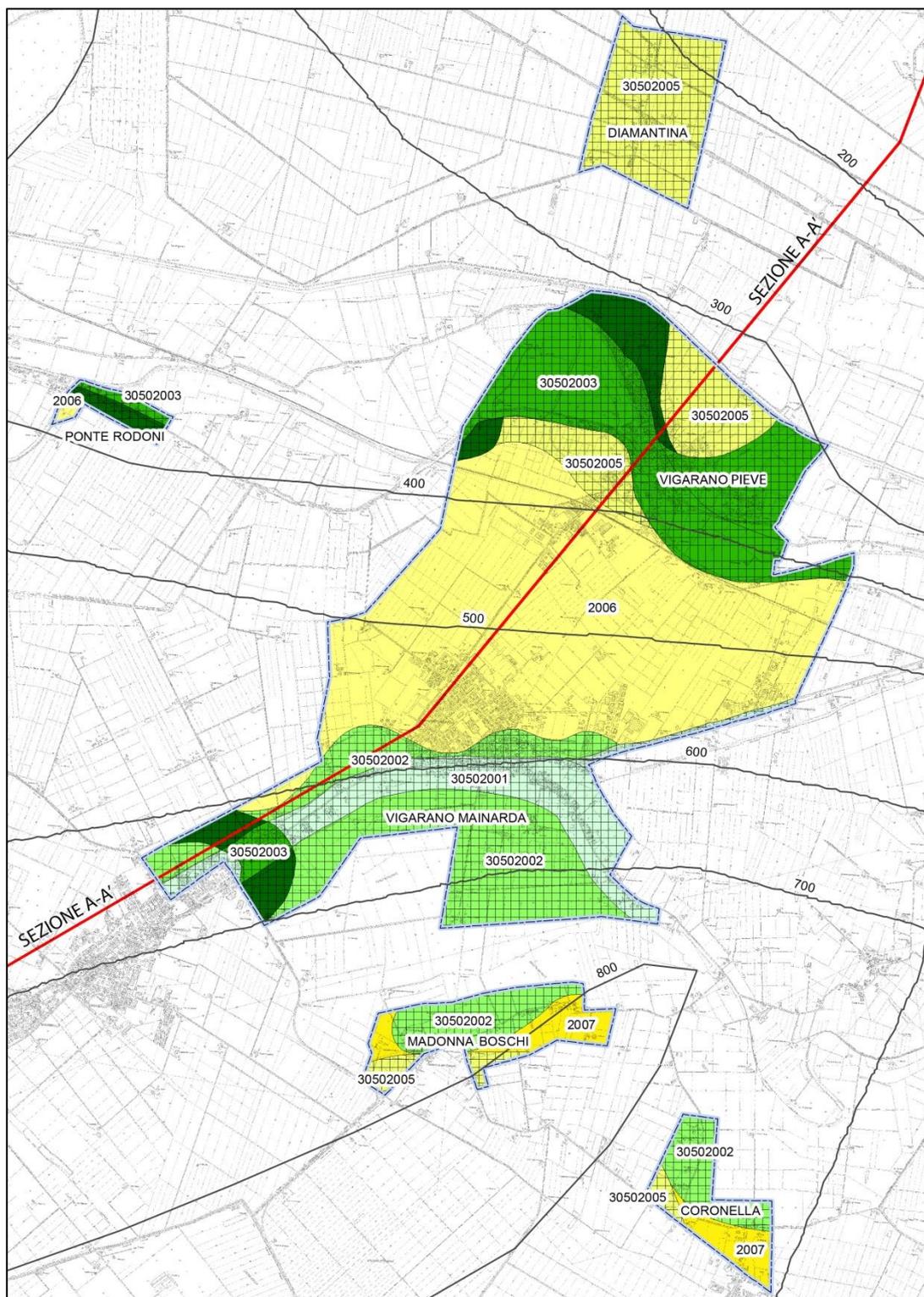


Figura 7-1 – Area del Comune di Vigarano Mainarda e distribuzione delle Microzone Omogenee identificate. In mappa sono riportate le isobate e le quote identificative della base del Quaternario Marino, che mostrano una rapida risalita dell'unità stratigrafica verso nord. In rosso è indicata la traccia della sezione stratigrafica A-A' utilizzata per verificare le profondità del substrato sismico. Come descritto per ogni Microzona Omogenea (MOPS) è stata eseguita una analisi di Risposta Sismica Locale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

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 substrato sismico.

I modelli sismo-stratigrafici proposti nello studio si basano sui risultati delle indagini geognostiche e geofisiche in situ, e laboratorio, archiviate in banca dati o disponibili da altri studi di Microzonazione Sismica eseguiti nei comuni limitrofi. Queste indagini hanno consentito la caratterizzazione dei terreni di copertura costituenti le prime decine di metri di sottosuolo. Le unità stratigrafiche più profonde sono invece state descritte utilizzando dati di letteratura e correlazioni a scala regionale realizzate mediante confronto tra sezioni geologiche (Martelli *et al.*, 2017; Molinari *et al.*, 2007, Regione Emilia-Romagna 1998), profili sismici (Affatato *et al.*, 2019) e dati di pozzo (progetto ViDEPI - www.videpi.com).

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 dalle misure dirette disponibili (es. down-hole, cross-hole) o da letteratura scientifica (Minarelli *et al.*, 2016; Di Capua e Tarabusi, 2013); (ii) le curve di decadimento del modulo di taglio ($G/G_0 - \gamma$) e di incremento del fattore di smorzamento ($D - \gamma$) ottenute dalle prove dinamiche di laboratorio disponibili o da indagini in situ con dilatometro sismico (Amoroso *et al.*, 2014) realizzate per studi di microzonazione sismica in aree limitrofe; (iii) i valori del peso per unità di volume stimati dalle prove in situ e di laboratorio disponibili.

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 30502001	RSL zona 30502002	RSL zona 30502003
DESCRIZIONE	VIGARANO MAINARDA Sabbie di paleoalveo affioranti Sinclinale - depressione strutturale	VIGARANO MAINARDA Limi e sabbie da rotta affioranti Sinclinale - depressione strutturale	VIGARANO PIEVE Sabbie di paleoalveo affioranti Monoclinale
STRATIGRAFIA SUPERFICIALE	038022P88CPTU91 (fino a 25 metri)	038022P87CPTU89 (fino a 30 metri)	038022P16CPTU16 (fino a 30 metri)
STRATIGRAFIA PROFONDA	185140P660 DB RER (fino a 90 m)	185140P660 DB RER (fino a 90 m)	185110G150 "Porotto 1" DB RER (fino a 1600 m) 185110P617 DB RER
SUBSTRATO SISMICO	Sezione A-A' (Allegato 1)	Sezione A-A' (Allegato 1)	185110G150 "Porotto 1" DB RER Sezione A-A' (Allegato 1)
V_s SUPERFICIALE	038022P88SCPT92 (fino a 25 metri)	038022P87SCPT90 (fino a 30 metri)	038022P16SCPT17 (fino a 30 metri)
V_s PROFONDA	<i>Minarelli et al. 2016</i>	<i>Minarelli et al. 2016</i>	<i>Di Capua e Tarabusi, 2013</i> <i>Minarelli et al. 2016</i>

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

	RSL zona 30502005	RSL zona 30502005	RSL zona 2006
DESCRIZIONE	DIAMANTINA Sabbie sepolte a debole profondità Anticlinale - alto strutturale	MADONNA BOSCHI E CORONELLA Sabbie sepolte a debole profondità Sinclinale - depressione strutturale	VIGARANO "PIEVE" Argille di piana dominanti Monoclinale
STRATIGRAFIA SUPERFICIALE	038022P17CPTU18 (fino a 30 metri)	038018P499CPTU547 MS Poggio Renatico (fino a 30 metri)	038022P159S163 (fino a 40 metri) 038022P248CPTU259 (fino a 30 metri)
STRATIGRAFIA PROFONDA	185110G149 "Casaglia 1" DB RER (fino a 500 m)	185140P637 DB RER (fino a 78 m) 185150P631 DB RER (fino a 93 m)	185110P612 DB RER (fino a 84 m)
SUBSTRATO SISMICO	185110G149 "Casaglia 1" DB RER 038022P295 Sezione A-A' (Allegato 1)	Sezione A-A' (Allegato 1)	Sezione A-A' (Allegato 1)
Vs SUPERFICIALE	038022P17SCPT19 (fino a 30 metri)	038018P499SCPT548 MS Poggio Renatico (fino a 30 metri)	038022P248SCPT260 (fino a 30 metri)
Vs PROFONDA	<i>Di Capua e Tarabusi, 2013</i>	<i>Minarelli et al. 2016</i>	<i>Minarelli et al. 2016</i>

	RSL zona 2007
DESCRIZIONE	MADONNA BOSCHI E CORONELLA Argille di piana dominanti Sinclinale - depressione strutturale
STRATIGRAFIA SUPERFICIALE	038018P36CPTU40 MS Poggio Renatico (fino a 30 metri)
STRATIGRAFIA PROFONDA	185140P637 DB RER (fino a 78 m) 185150P631 DB RER (fino a 93 m)
SUBSTRATO SISMICO	Sezione A-A' (Allegato 1)
Vs SUPERFICIALE	038018P36SCPT41 MS Poggio Renatico (fino a 30 metri)
Vs PROFONDA	<i>Minarelli et al. 2016</i>

Tabella 7-1 - Indicazione delle indagini e delle correlazioni da cui sono stati tratti i dati per la ricostruzione dei modelli sismo-stratigrafici di riferimento per le simulazioni di risposta sismica locale.

Le correlazioni tra dati stratigrafici, sezioni geologiche (Allegato 1), profili sismici (Figura 5-2), e le curve di ellitticità (H/V) ottenute dalle nuove misure di microtremore (paragrafo 6.1), hanno permesso di identificare i principali contrasti di impedenza nel sottosuolo e stimare natura e profondità del bedrock sismico (paragrafi 5.1 e 6.2).

La stima delle velocità delle onde di taglio (Vs) dei terreni di copertura compresi tra il bedrock e le prime decine di metri di sottosuolo è stata ricavata estrapolando i valori di Vs acquisti, mediante down-hole

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

profondi, nell'ambito della microzonazione sismica del Comune di Mirabello (Minarelli *et al.*, 2016) e per la caratterizzazione della stazione accelerometrica della rete sismica nazionale denominata "FERS", sita in località Casaglia (Di Capua e Tarabusi, 2013).

L'estrapolazione dei dati di Mirabello e Casaglia all'area di Vigarano è stata possibile considerando che, oltre ad essere territori confinanti, essi appartengono allo stesso contesto geologico-strutturale che determina la presenza delle medesime unità stratigrafiche inquadrata nel Supersistema Emiliano-Romagnolo. Nell'estrapolare ed associare le velocità alle unità stratigrafiche, sono state considerate opportune correzioni nei valori di V_s legate al diverso spessore, seppellimento e conseguente carico litostatico a cui sono sottoposte le stesse unità stratigrafiche nelle diverse aree.

I dati di velocità acquisiti a Mirabello (Minarelli *et al.*, 2016) ben descrivono, infatti, le successioni stratigrafiche delle porzioni centro-meridionali del territorio comunale, mentre quelli ottenuti a Casaglia (Di Capua e Tarabusi, 2013) sono maggiormente rappresentativi delle successioni sedimentarie sviluppate nei settori più settentrionali.

Le stime di V_s per le diverse unità stratigrafiche sono state effettuate verificando l'accordo con i principali contrasti di impedenza identificati dai picchi delle misure di H/V.

Nelle modellazioni numeriche eseguite sono stati considerati due contrasti di impedenza profondi.

La superficie associata al maggior aumento di rigidità e di velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) corrisponde, nel settore settentrionale, alla discordanza che marca il tetto delle successioni marine marnose del Miocene. Queste unità risultano piegate dalla deformazione tettonica, che ne determina il notevolmente approfondimento procedendo verso sud. Nella parte centro-meridionale del territorio comunale, dunque, il maggior contrasto di impedenza rilevato non corrisponde più alle unità mioceniche, ma al tetto delle successioni di arenarie torbiditiche del Pliocene che le ricoprono. Questo elevato contrasto, individuato tra i 700 e 200 m di profondità, identifica il bedrock sismico delle analisi numeriche di risposta sismica locale.

La seconda superficie di discordanza stratigrafica, meno profonda e associata ad un contrasto di impedenza minore ma comunque significativo, è sviluppata all'interno delle successioni quaternarie e marca il tetto dell'unità del Quaternario Marino. A causa dei movimenti tettonici sinsedimentari, i potenti depositi del Quaternario Marino si rinvengono a profondità molto variabili, comprese tra i 350 m dei settori meridionali ed i 150 metri delle aree più settentrionali, ove risalgono e si riducono a poche decine di metri di spessore. Come velocità delle onde di taglio del bedrock sismico sono stati considerati valori in linea con quelli misurati in pozzo in aree limitrofe, per unità stratigrafiche analoghe raggiunte mediante perforazioni (Di Capua e Tarabusi, 2013; Laurenzano *et al.*, 2013; Garofalo *et al.*, 2016).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

In Tabella 7-2, Tabella 7-3, Tabella 7-4, Tabella 7-5, Tabella 7-6, Tabella 7-7 e Tabella 7-8 sono riportate le sintesi dei modelli sismo-stratigrafici proposti.

RSL zona 30502001 - Vigarano Mainarda			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	3	Buonacompra SDMT2 (0-2.8) - L	125
3	5	Mirabello - M1 C1 - Sfl - UNIFI	145
8	2	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	116
10	8	Ferrara (15 m) - A Po	186
18	6	Ferrara (15 m) - A Po	225
24	5	San Carlo S10 C2 - SL deb.A - ISMGEO	264
29	18	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	235
47	19	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	279
66	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	358
84	19	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	379
103	32	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
135	16	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	379
151	19	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
170	20	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	490
190	15	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	500
205	21	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	510
226	24	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	520
250	17	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
267	27	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
294	11	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
305	7	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
312	17	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
329	23	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
352	14	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
366	11	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
377	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
402	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
427	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
452	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
477	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
502	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
527	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
552	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
577	23	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
600	Half-Space	Bedrock	1.200

Tabella 7-2 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL zona 30502001 - Vigarano Mainarda.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

RSL zona 30502002 - Vigarano Mainarda			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	4	Buonacompra SDMT2 (0-2.8) - L	125
4	4	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	145
8	2	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	116
10	8	Ferrara (15 m) - A Po	186
18	6	Ferrara (15 m) - A Po	225
24	5	San Carlo S10 C2 - SL deb.A - ISMGEO	264
29	18	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	235
47	19	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	279
66	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	358
84	19	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	379
103	32	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
135	16	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	379
151	19	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
170	20	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	489
190	15	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	490
205	21	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	490
226	24	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	490
250	17	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
267	27	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
294	11	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
305	7	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
312	17	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
329	23	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
352	12	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
364	11	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
375	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
400	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
425	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
450	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
475	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
500	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
525	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
550	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
575	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
600	Half-Space	Bedrock	1.200

Tabella 7-3 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL zona 30502002 - Vigarano Mainarda.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

RSL zona 30502003 - Vigarano Pieve			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	3	Bondeno (da 2 a 3 m) - A+L	105
3	6	Ferrara (da 3 a 9 m) - SL Po	187
9	2	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	145
11	6	Ferrara (da 9 a 16 m) - SL Po	219
17	7	Ferrara (da 9 a 16 m) - SL Po	219
24	9	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	267
33	13	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	235
46	13	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	279
59	14	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	358
73	14	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	379
87	39	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
126	15	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	379
141	19	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
160	28	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	489
188	22	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	520
210	10	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
220	18	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
238	17	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
255	27	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
282	20	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
302	8	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
310	17	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
327	23	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
350	Half-Space	Bedrock	1.200

Tabella 7-4 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL zona 30502003 - Vigarano Pieve.

RSL zona 30502005 - Diamantina			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	4	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	100
4	5	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	150
9	8	Ferrara (da 3 a 9 m) - SL Po	202
17	7	Ferrara (da 9 a 16 m) - SL Po	241
24	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	274
32	19	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	220
51	26	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	270
77	9	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	300
86	26	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	350
112	23	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	370
135	15	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	490

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

150	24	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
174	26	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
200	Half-Space	Bedrock	1.200

Tabella 7-5 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL zona 30502005 - Diamantina.

RSL zona 30502005 - Madonna Boschi e Coronella			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	2	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	125
2	3	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	135
5	4	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	118
9	3	Mirabello blast Po pre-glaciale (9-17 m) -SL	220
12	4	Mirabello blast Po pre-glaciale (9-17 m) -SL	227
16	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	227
21	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	232
26	8	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	279
34	8	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	279
42	8	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	355
50	8	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	355
58	15	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	358
73	6	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	359
79	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	379
90	19	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
109	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	379
134	19	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
153	21	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	400
174	16	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	400
190	21	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	400
211	33	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	497
244	17	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	497
261	27	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	497
288	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	512
299	7	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	512
306	17	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	519
323	27	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	542
350	35	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
385	35	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
420	35	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
455	35	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
490	35	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
525	35	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
560	35	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
595	35	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

630	35	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
665	35	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
700	Half-Space	Bedrock	1.200

Tabella 7-6 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL zona 30502005 - Madonna Boschi e Coronella.

RSL zona 2006 - Vigarano "Pieve"			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	2	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	100
2	4	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	115
6	7	Ferrara (15 m) - A Po	153
13	5	Ferrara (15 m) - A Po	206
18	6	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	264
24	9	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	270
33	9	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	270
42	14	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	235
56	14	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	279
70	13	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	358
83	14	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	379
97	36	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
133	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	379
151	14	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
165	20	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	490
185	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	510
210	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) - SL	520
235	33	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
268	17	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
285	27	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
312	11	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
323	7	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
330	17	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
347	23	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
370	14	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
384	16	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
400	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
425	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
450	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
475	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
500	Half-Space	Bedrock	1.200

Tabella 7-7 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL zona 2006 - Vigarano Pieve

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

RSL zona 2007 - Madonna Boschi e Coronella			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	3	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	125
3	2	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	157
5	3	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	118
8	6	Ferrara (15 m) - A Po	195
14	4	Ferrara (15 m) - A Po	183
18	3	San Carlo S10 C2 - SL deb.A - ISMGEO	264
21	9	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	237
30	16	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	279
46	16	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	355
62	15	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	358
77	6	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	359
83	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	379
94	19	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
113	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	379
138	19	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	379
157	19	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	400
176	16	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	400
192	18	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	400
210	33	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	490
243	17	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	490
260	27	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	497
287	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	512
298	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	512
310	17	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	519
327	23	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	542
350	14	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
364	11	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
375	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
400	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
425	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
450	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
475	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
500	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
525	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
550	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
575	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
600	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
625	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
650	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

675	25	Quaternario Marino "argille" - Lineare Elastico	800
700	Half-Space	Bedrock	1.200

Tabella 7-8 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL zona 2007 - Madonna Boschi e Coronella.

Definiti i modelli sismo-stratigrafici (Tabella 7-2, Tabella 7-3, Tabella 7-4, Tabella 7-5, Tabella 7-6, Tabella 7-7, Tabella 7-8), le analisi numeriche monodimensionali sono state eseguite mediante il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013).

Come accelerogrammi di input 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. n. 630/2019 (Figura 7-2).

Considerando le significative variazioni di pericolosità di base verificate nel territorio comunale, gli accelerogrammi sono stati scalati rispetto ai valori di $a_{g,ref}$ ottenuti dall'interpolazione delle accelerazioni definite ai nodi del reticolo su cui si basa la mappa di pericolosità sismica nazionale INGV (T_R 475 anni, 50^{esimo} percentile). Per i diversi ambiti geografici di studio sono stati quindi utilizzati valori di $a_{g,ref}$ variabili tra 0.15 g e 0,13 g. I valori più elevati sono stati ottenuti ed adottati per le aree meridionali del territorio comunale, come Coronella, Madonna Boschi e Vigarano Mainarda, mentre quelli minori per la porzione più settentrionale in cui ricade l'ambito di Diamantina. Valori intermedi di $a_{g,ref}$ pari a 0.14 g sono stati utilizzati per scalare gli accelerogrammi nelle modellazioni di risposta sismica eseguite per le fascia centrale del territorio comunale in cui ricadono gli ambiti di Vigarano Pieve e Tortiola (Figura 7-26).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

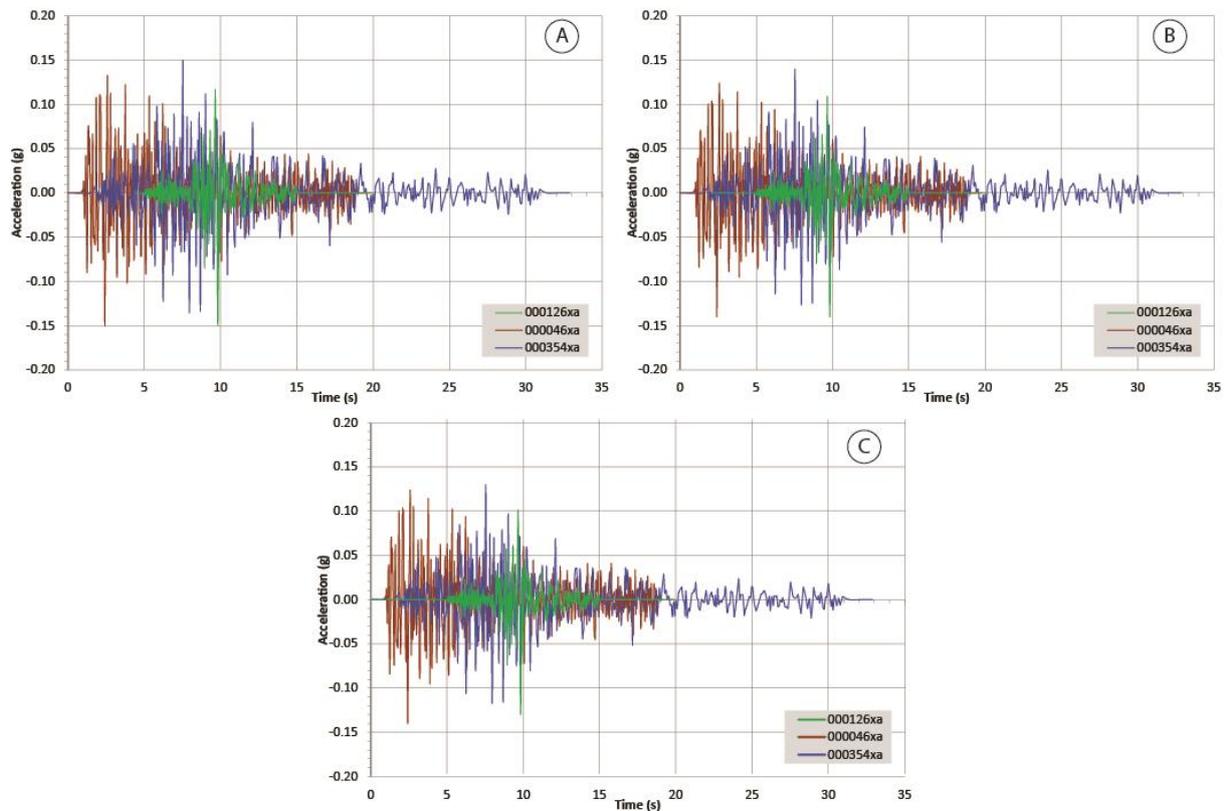


Figura 7-2 - Accelerogrammi di input per le risposte sismiche locali. I segnali, forniti dalla Regione Emilia-Romagna (D.G.R. 630/2019), sono stati scalati rispetto alla pericolosità sismica di base delle diverse aree analizzate, con valori di a_{ref} di 0,15 g per Vigarano Mainarda, Madonna Boschi e Coronella (A), di 0,14 g per Vigarano Pieve e Tortiola (B) ed infine di 0,13 g per Diamantina (C).

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 accelerazione, in input e di output ottenuti dalle simulazioni di risposta sismica locale, sono stati archiviati in formato .txt secondo quanto richiesto dagli Standard MS 4.1 (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2018).

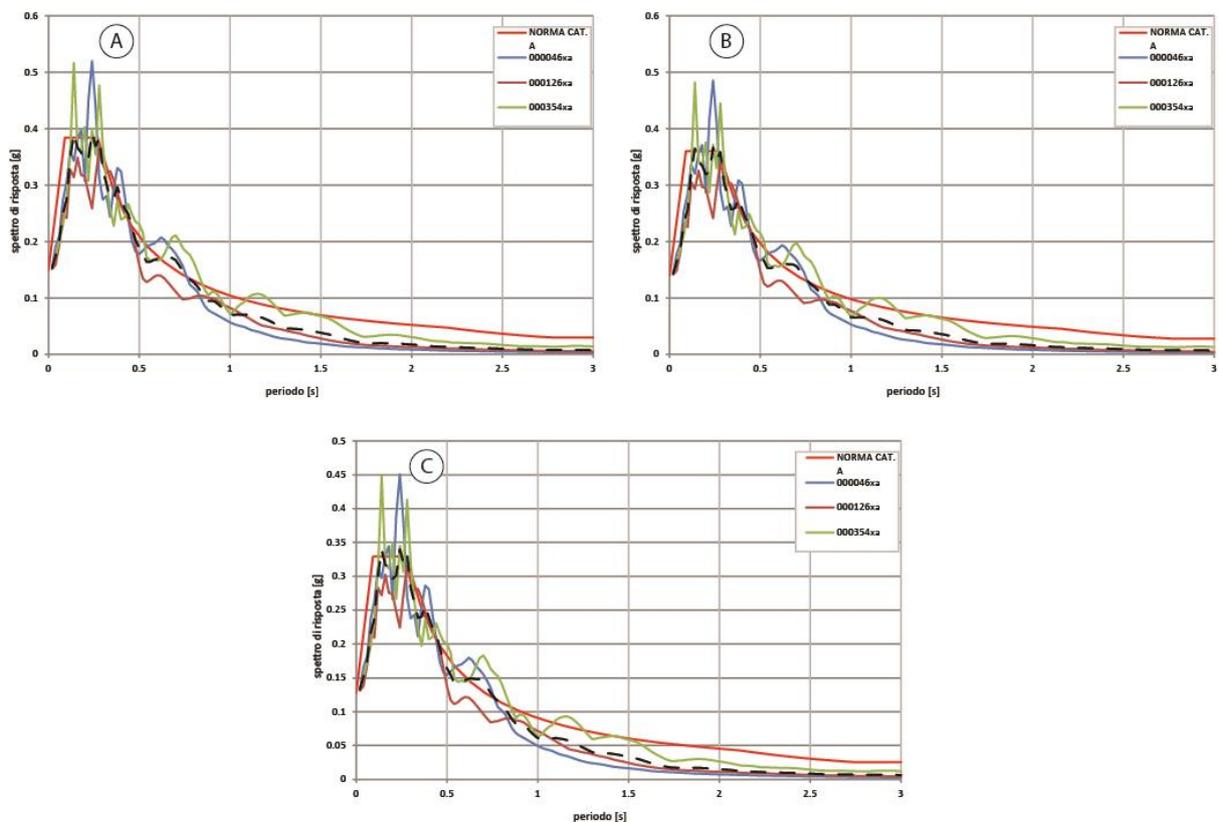
MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA


Figura 7-3 - Spettri di risposta al bedrock per i tre accelerogrammi, e loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria di sottosuolo "A" secondo le NTC2018. In figura sono presentati 3 distinti spettri di risposta al bedrock dovuti alla differente pericolosità sismica di base delle fasce di territorio analizzate. Alle aree meridionali di Vigarano Mainarda, Madonna Boschi e Coronella sono associati valori di a_{gref} di 0,15 g (A), per Vigarano Pieve e Tortiola valori di 0,14 g (B) ed infine per Diamantina valori pari a 0,13 g (C).

RSL zona 30502001 - Vigarano Mainarda

In Figura 7-7 si riporta la funzione di trasferimento, definita 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.

Si osserva una prima e più elevata amplificazione a frequenza di circa 0,30-0,35Hz e una seconda a circa 0,6 Hz, in accordo con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale. La funzione di trasferimento mostra ulteriori amplificazioni a frequenze più elevate, alcune delle quali sono armoniche superiori delle precedenti. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

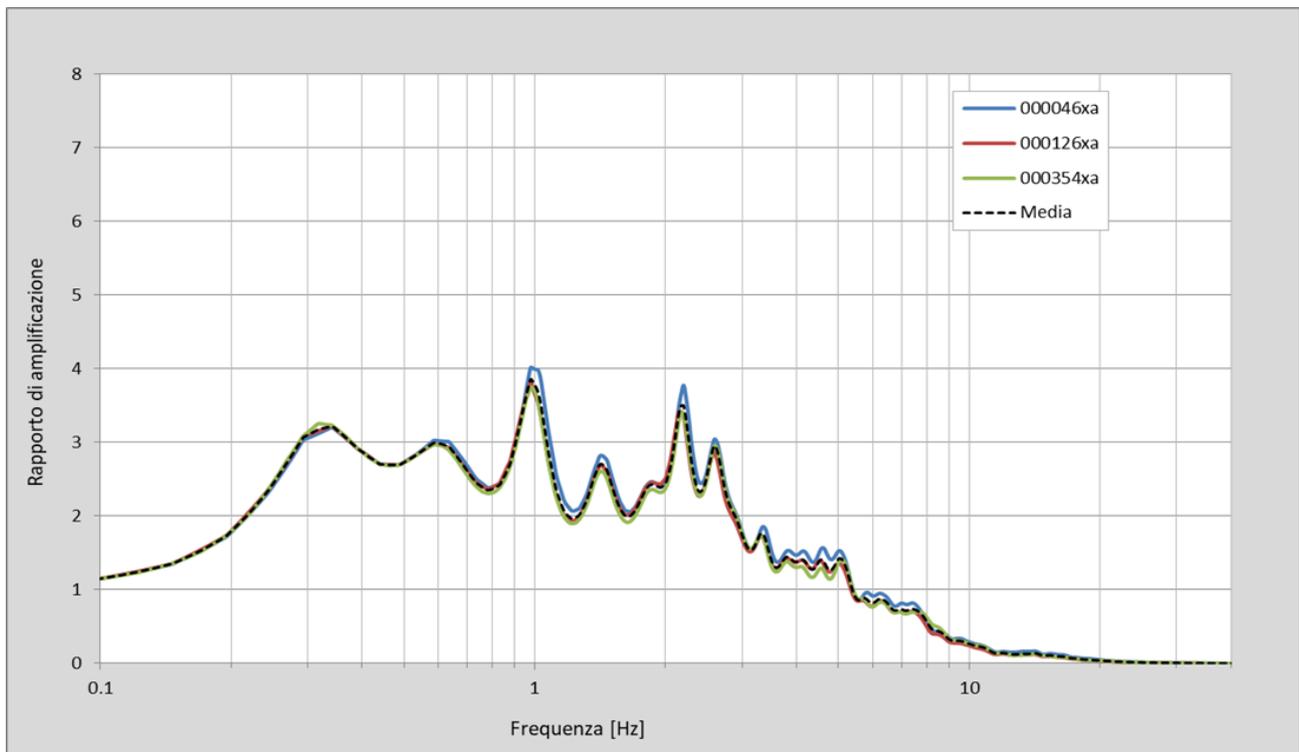


Figura 7-4 - RSL zona 30502001 - Vigarano Mainarda. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

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%, e del loro spettro medio, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 (A). Appare evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente dei singoli moti di input (forniti dalla D.G.R. n. 630/2019).

Lo spettro medio risulta, infatti, affetto da una elevata deviazione standard, sostanzialmente dovuta alla diversità dei tre terremoti utilizzati come segnali di input nella modellazione numerica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

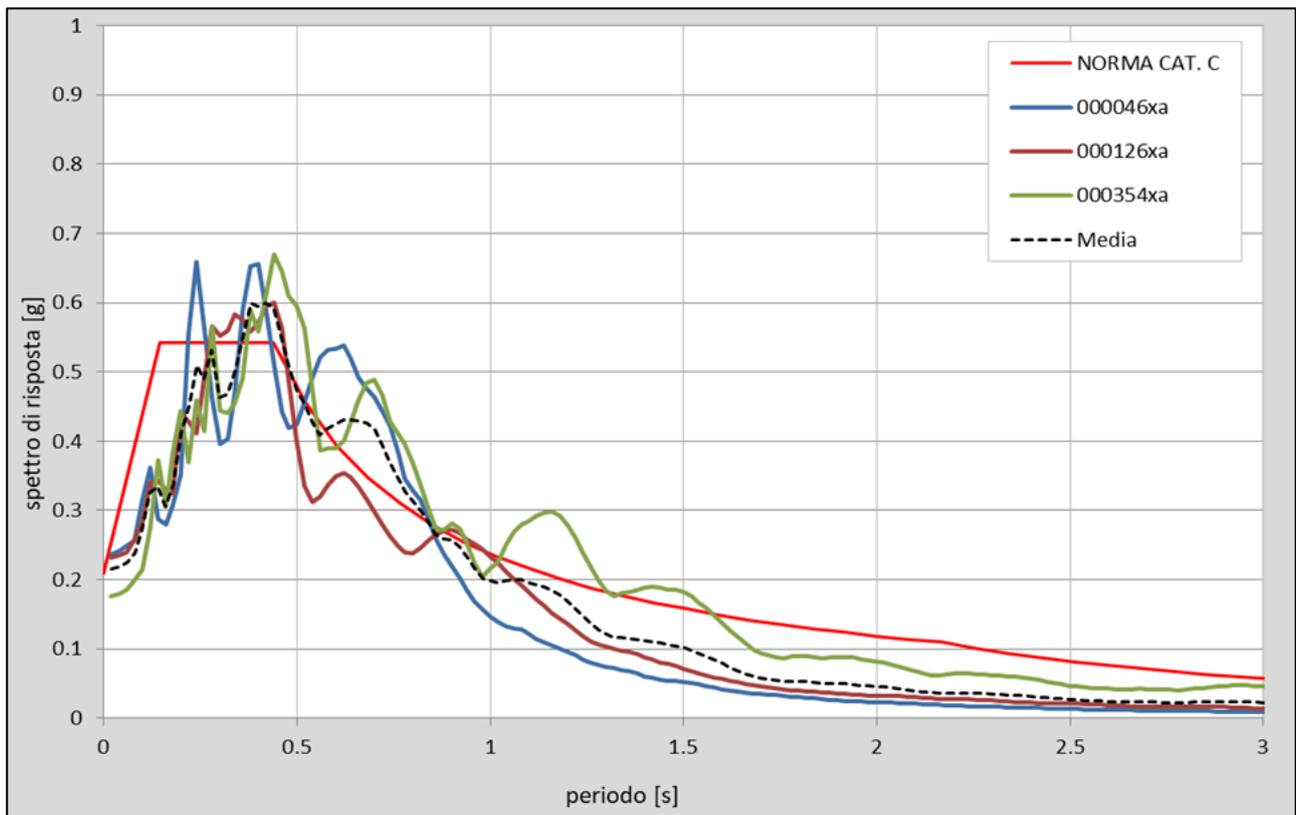


Figura 7-5 - RSL zona 30502001 - Vigarano Mainarda. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-9 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 20 m di sottosuolo per i tre terremoti di input e per la loro media. Dal grafico si nota un generale e progressivo aumento dell'accelerazione al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 4 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

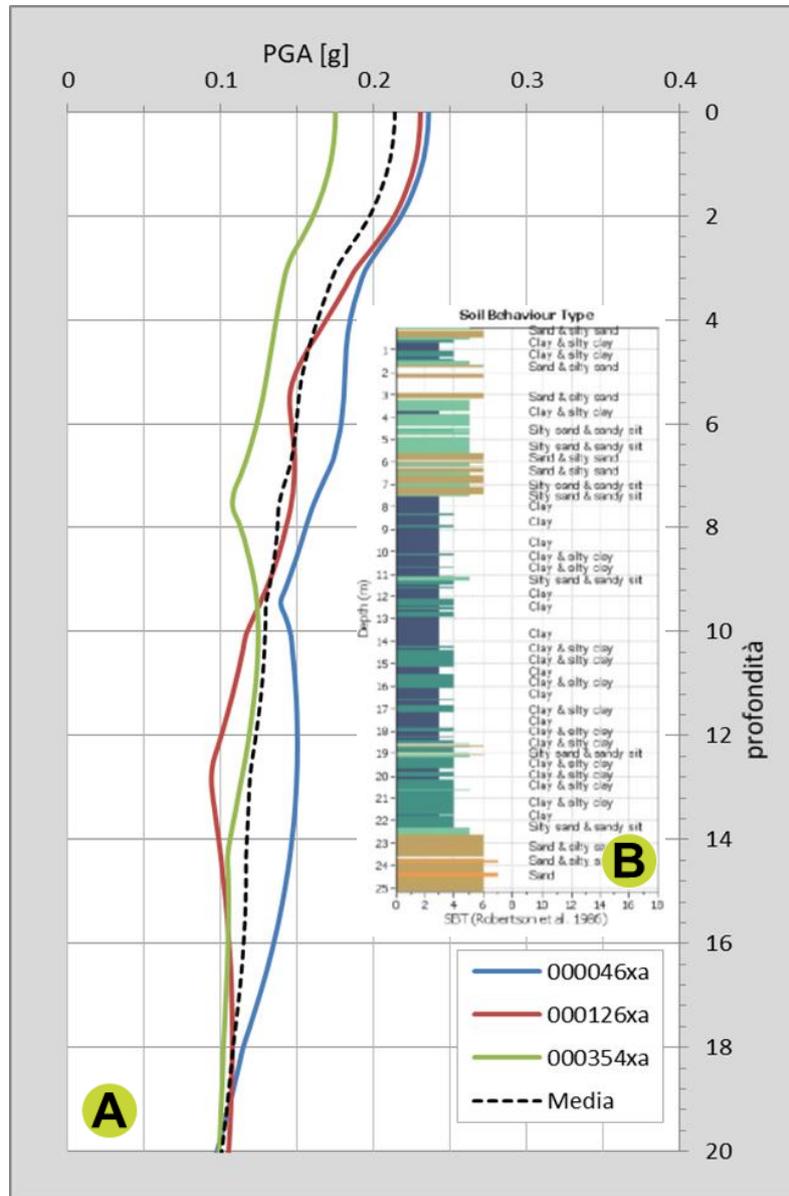


Figura 7-6 - RSL zona 30502001 - Vigarano Mainarda. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di sottosuolo (A) e relativa stratigrafia semplificata (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,21 g (Figura 7-9) si ottiene un fattore di amplificazione $FA_{PGA} = 1,40$. I fattori di amplificazione ottenuti mediante integrazione degli spettri di output in accelerazione e in pseudovelocità per prefissati periodi di vibrazione sono riassunti in Tabella 7-9.

FA_{PGA}	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1.0)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$	$SA1-FA_{(0.1-0.5)}$	$SA2-FA_{(0.4-0.8)}$	$SA3-FA_{(0.7-1.1)}$	$SA4-FA_{(0.5-1.5)}$
1,40	1,76	2,56	2,62	1,56	2,49	2,64	2,60

Tabella 7-9 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona 30502001 - Vigarano Mainarda.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

RSL zona 30502002 - Vigarano Mainarda

In Figura 7-7 si riporta la funzione di trasferimento, definita 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. Si osserva una prima e più elevata amplificazione a frequenza di circa 0,30-0,35Hz e una seconda a circa 0,6 Hz, in accordo con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale. La funzione di trasferimento mostra ulteriori amplificazioni a frequenze più elevate, alcune delle quali sono armoniche superiori delle precedenti. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

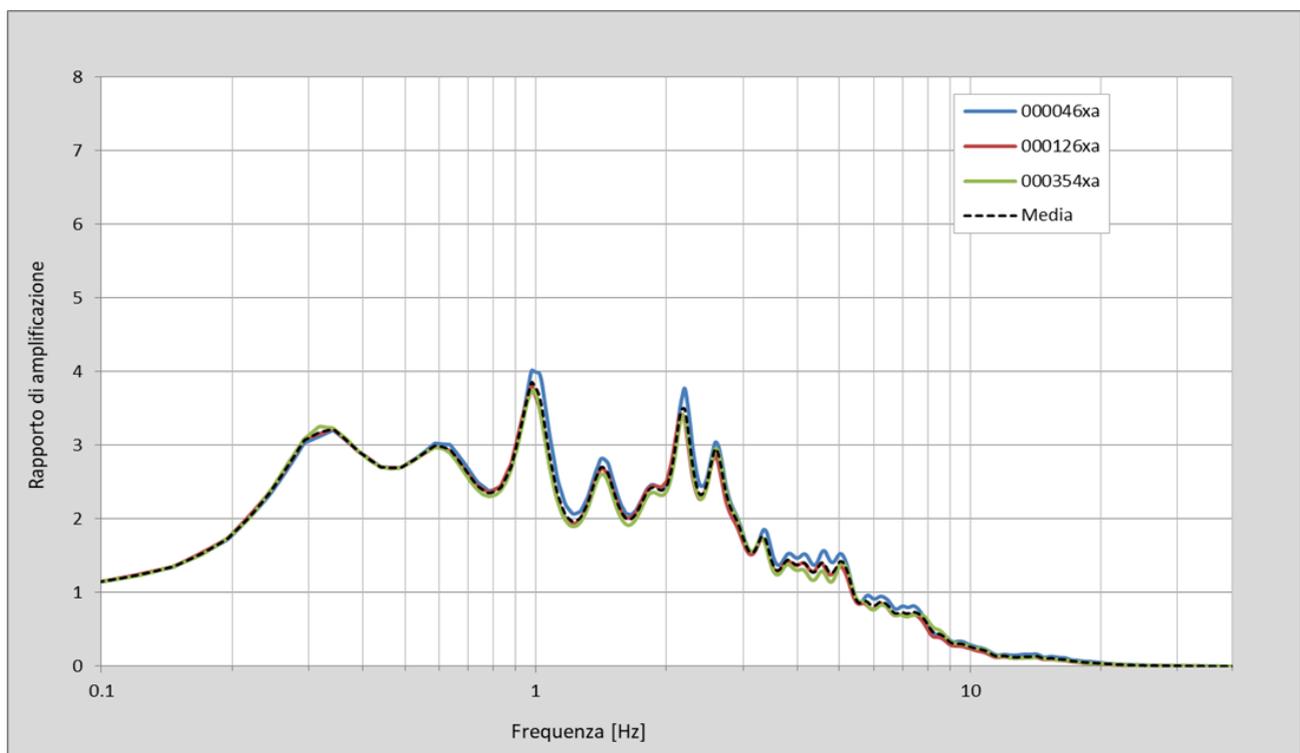


Figura 7-7 - RSL zona 30502002 - Vigarano Mainarda. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

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%, e del loro spettro medio, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 (A). Appare evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente dei singoli moti di input (forniti dalla D.G.R. n. 630/2019).

Lo spettro medio risulta, infatti, affetto da una elevata deviazione standard, sostanzialmente dovuta alla diversità dei tre terremoti utilizzati come segnali di input nella modellazione numerica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

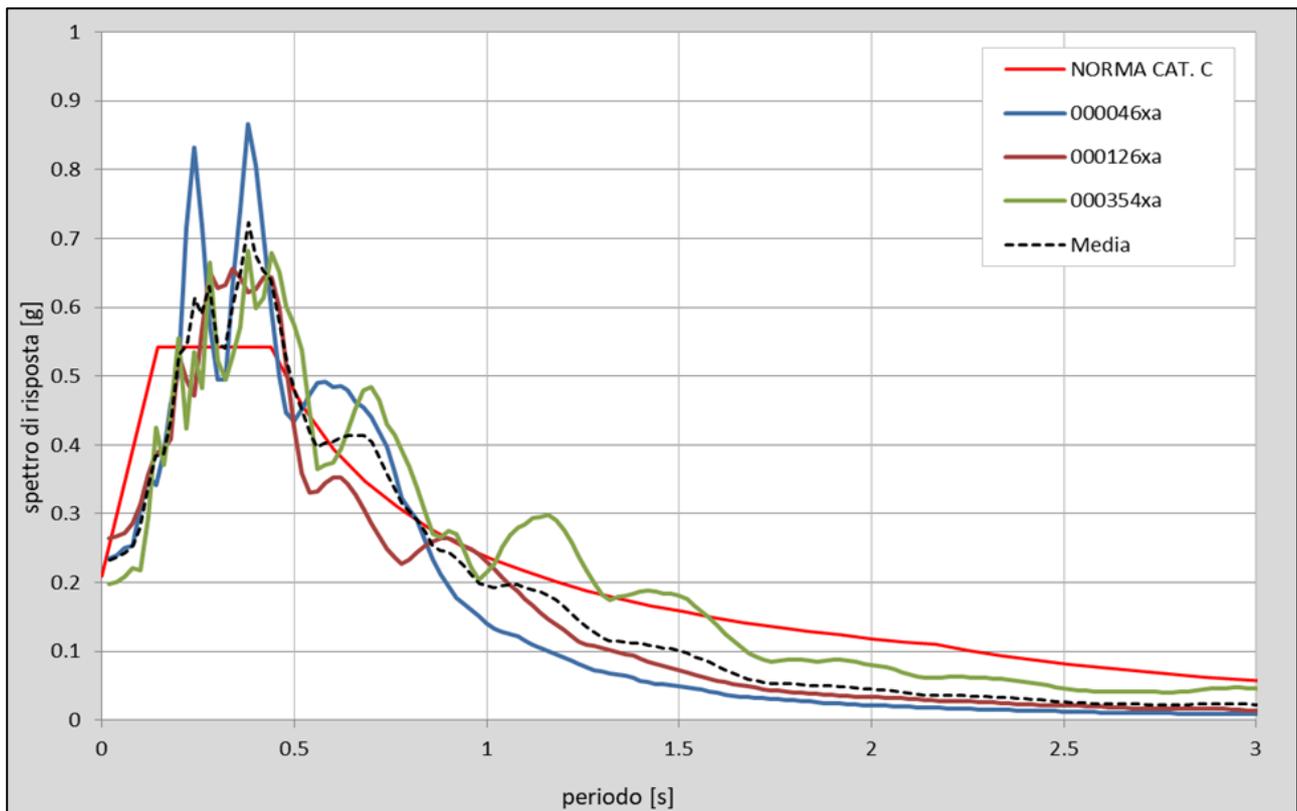


Figura 7-8 - RSL zona 30502002 - Vigarano Mainarda. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-9 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 20 m di sottosuolo per i tre terremoti di input e per la loro media. Dal grafico si nota un generale e progressivo aumento dell'accelerazione al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 4 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

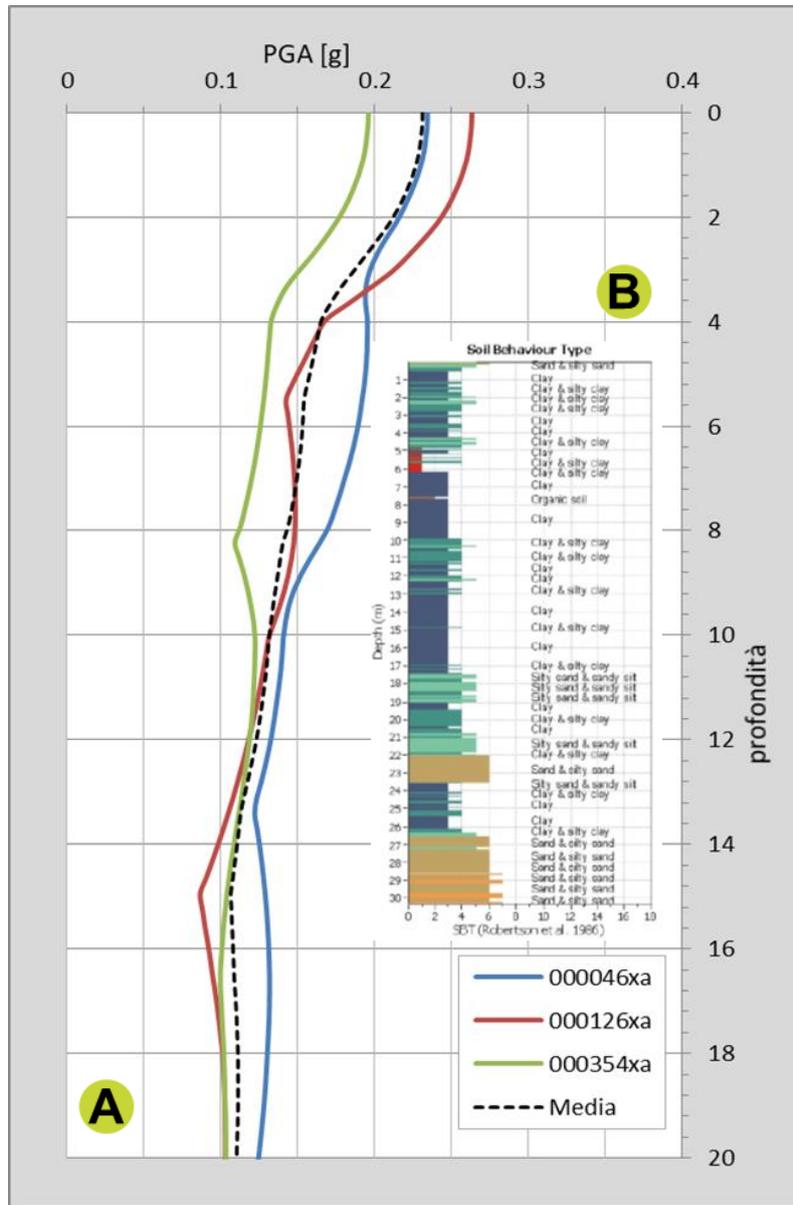


Figura 7-9 - RSL zona 30502002 - Vigarano Mainarda. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di sottosuolo (A) e relativa stratigrafia semplificata (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,23 g (Figura 7-9) si ottiene un fattore di amplificazione $FA_{PGA} = 1,51$. I fattori di amplificazione ottenuti mediante integrazione degli spettri di output in accelerazione e in pseudovelocità per prefissati periodi di vibrazione sono riassunti in Tabella 7-10.

FA_{PGA}	$SI1-FH_{(0,1-0,5)}$	$SI2-FH_{(0,5-1,0)}$	$SI3-FH_{(0,5-1,5)}$	$SA1-FA_{(0,1-0,5)}$	$SA2-FA_{(0,4-0,8)}$	$SA3-FA_{(0,7-1,1)}$	$SA4-FA_{(0,5-1,5)}$
1,51	2,00	2,48	2,54	1,79	2,48	2,55	2,52

Tabella 7-10 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona 30502002 - Vigarano Mainarda.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

RSL zona 30502003 - Vigarano Pieve

In Figura 7-10 si riporta la funzione di trasferimento, definita 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. Si osserva una prima amplificazione a frequenza di circa 0,40 - 0,45 Hz e una seconda a circa 0,95 Hz, in parziale accordo con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale. La funzione di trasferimento mostra ulteriori amplificazioni a frequenze più elevate, alcune delle quali sono armoniche superiori delle precedenti. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

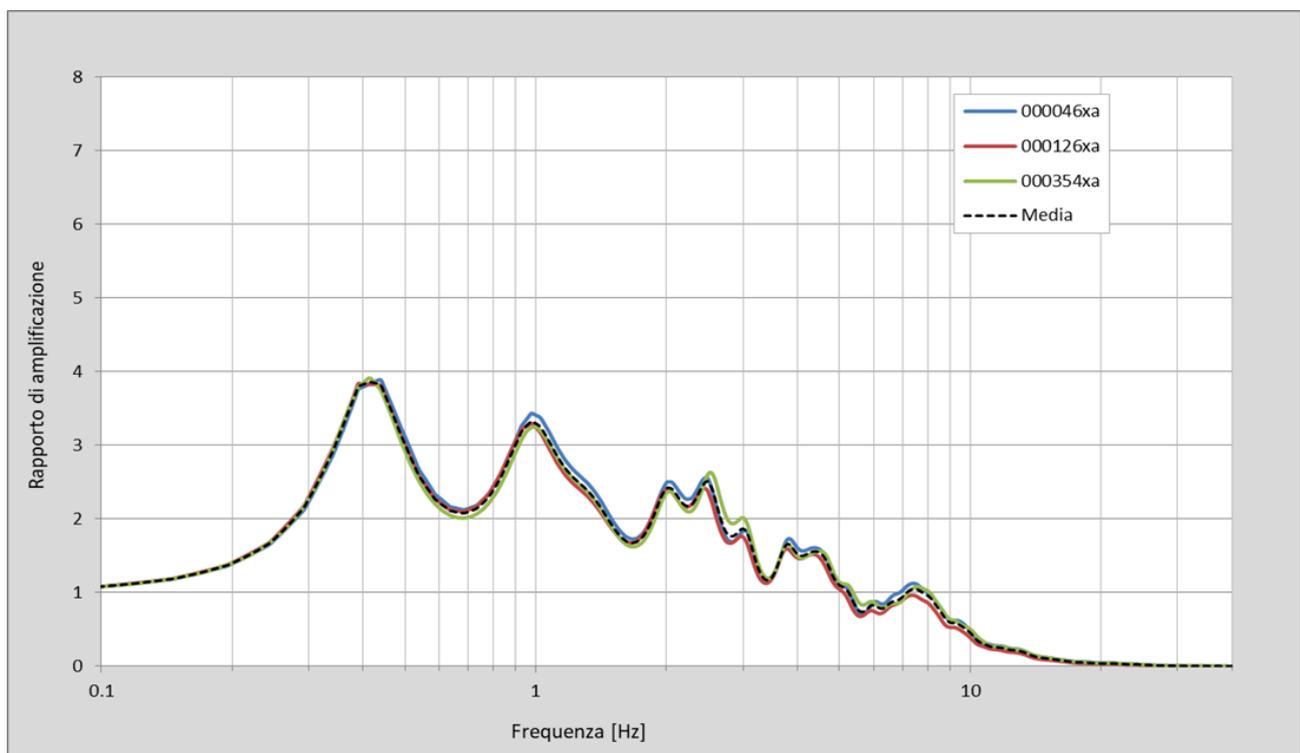


Figura 7-10 - RSL zona 30502003 - Vigarano Pieve. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

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%, e del loro spettro medio, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 (B). Appare evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente dei singoli moti di input (forniti dalla D.G.R. n. 630/2019).

Lo spettro medio risulta, infatti, affetto da una elevata deviazione standard, sostanzialmente dovuta alla diversità dei tre terremoti utilizzati come segnali di input nella modellazione numerica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

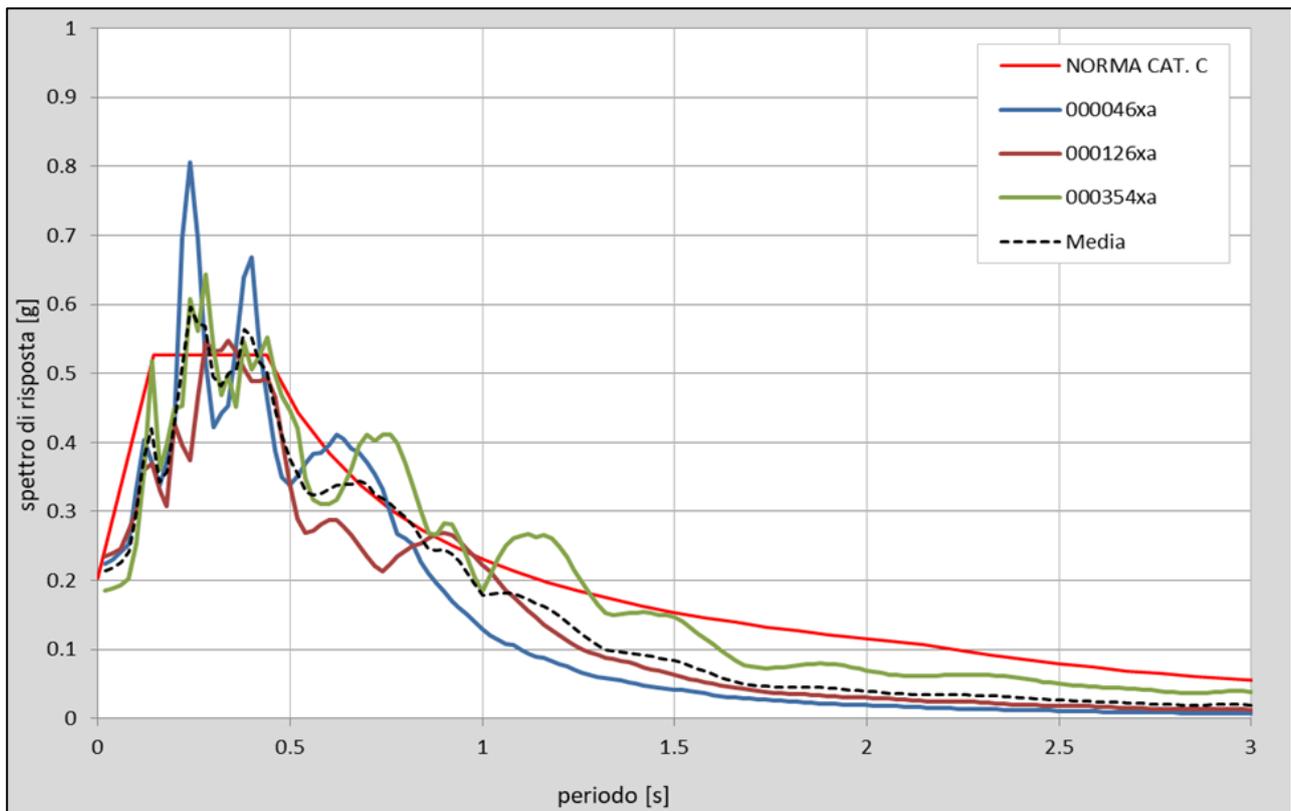


Figura 7-11 - RSL zona 30502003 - Vigarano Pieve. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-12 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 20 m di sottosuolo per i tre terremoti di input e per la loro media. Dal grafico si nota un generale e progressivo aumento dell'accelerazione al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 6 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

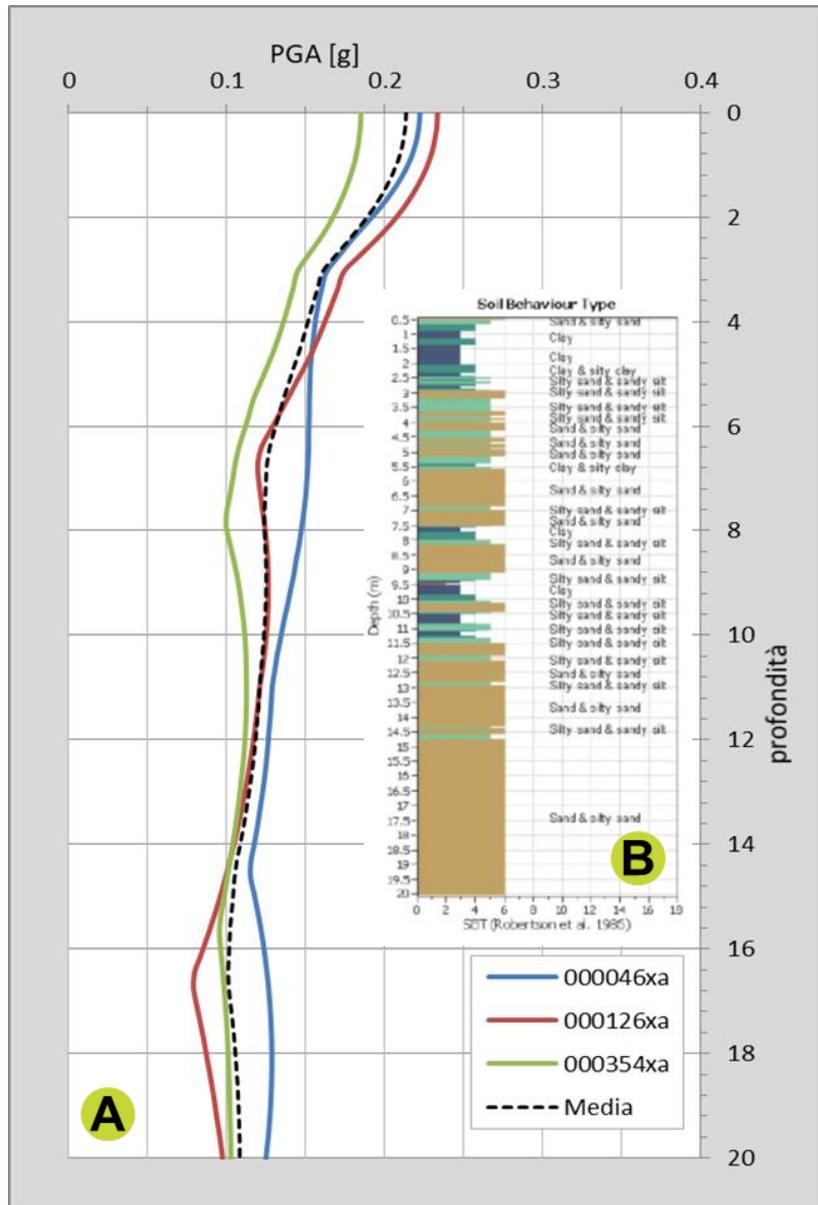


Figura 7-12 - RSL zona 30502003 - Vigarano Pieve. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di sottosuolo (A) e relativa stratigrafia semplificata (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,21 g (Figura 7-12) si ottiene un fattore di amplificazione $FA_{PGA} = 1,49$. I fattori di amplificazione ottenuti mediante integrazione degli spettri di output in accelerazione e in pseudovelocità per prefissati periodi di vibrazione sono riassunti in Tabella 7-11.

FA_{PGA}	$SI1-FH_{(0,1-0,5)}$	$SI2-FH_{(0,5-1,0)}$	$SI3-FH_{(0,5-1,5)}$	$SA1-FA_{(0,1-0,5)}$	$SA2-FA_{(0,4-0,8)}$	$SA3-FA_{(0,7-1,1)}$	$SA4-FA_{(0,5-1,5)}$
1,49	1,80	2,38	2,43	1,66	2,19	2,57	2,39

Tabella 7-11 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona 30502003 - Vigarano Pieve.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

RSL zona 30502005 - Diamantina

In Figura 7-13 si riporta la funzione di trasferimento, definita 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. Si osserva una prima e più elevata amplificazione alla frequenza di circa 0,6 Hz e una seconda a circa 1,4 Hz, in completo accordo con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale. La funzione di trasferimento mostra ulteriori amplificazioni a frequenze più elevate, alcune delle quali sono armoniche superiori delle precedenti. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

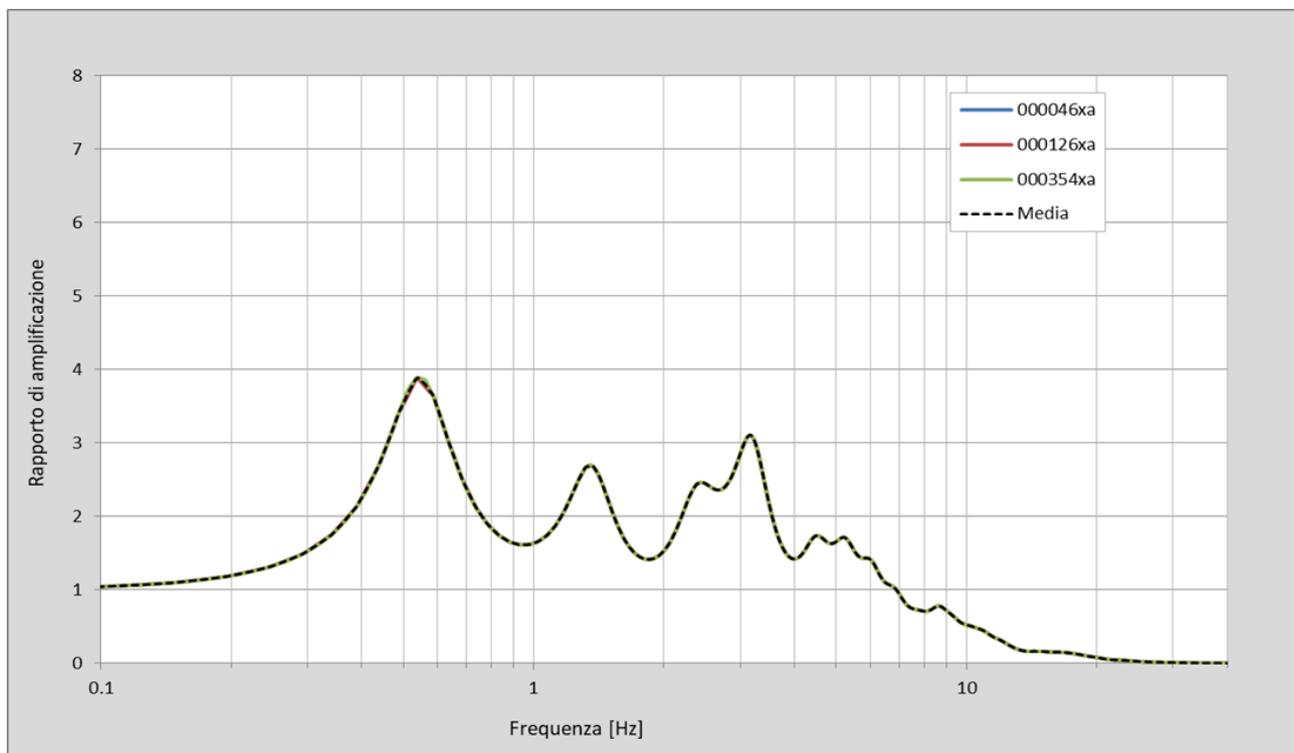


Figura 7-13 - RSL zona 30502005 - Diamantina. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

In Figura 7-14 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%, e del loro spettro medio, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 (C). Appare evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente dei singoli moti di input (forniti dalla D.G.R. n. 630/2019).

Lo spettro medio risulta, infatti, affetto da una elevata deviazione standard, sostanzialmente dovuta alla diversità dei tre terremoti utilizzati come segnali di input nella modellazione numerica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

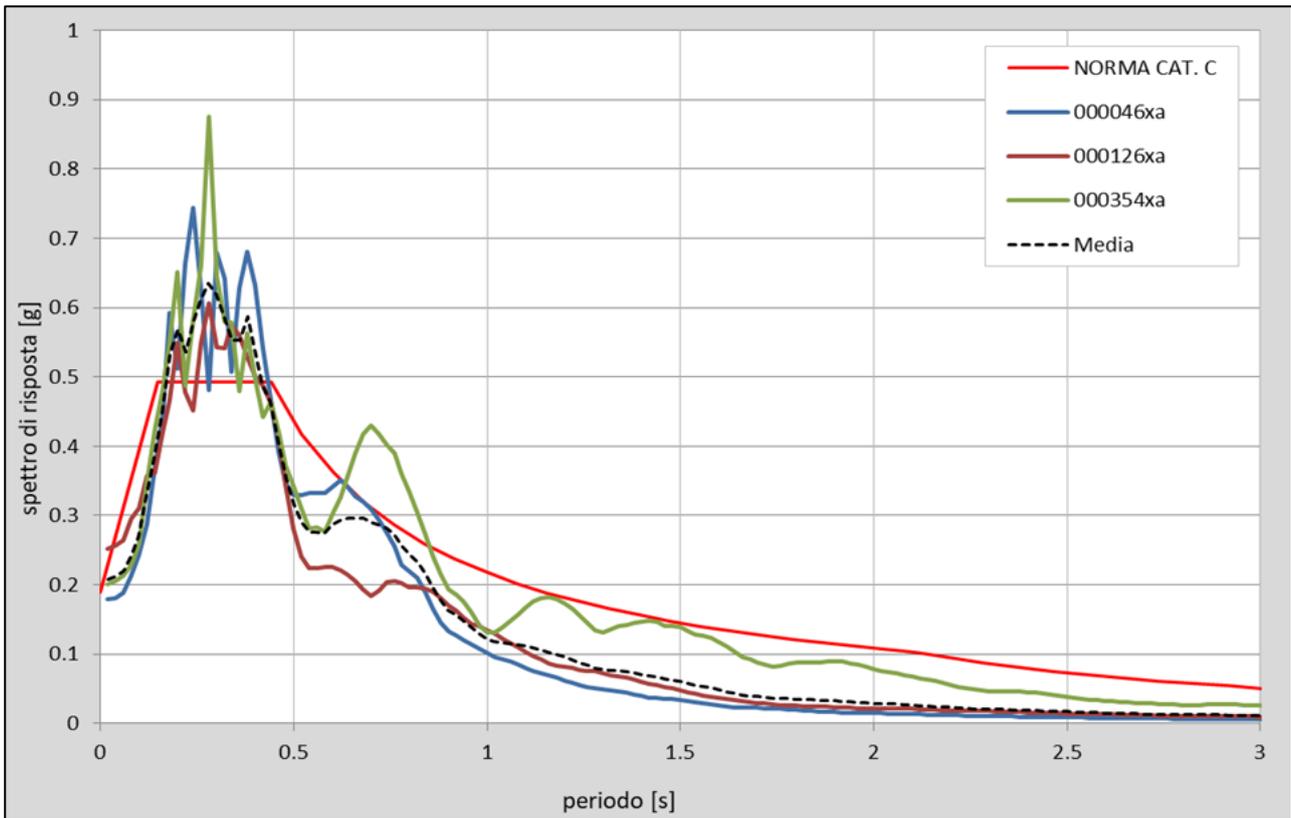


Figura 7-14 - RSL zona 30502005 - Diamantina. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-15 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 20 m di sottosuolo per i tre terremoti di input e per la loro media. Dal grafico si nota un generale e progressivo aumento dell'accelerazione al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 4 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

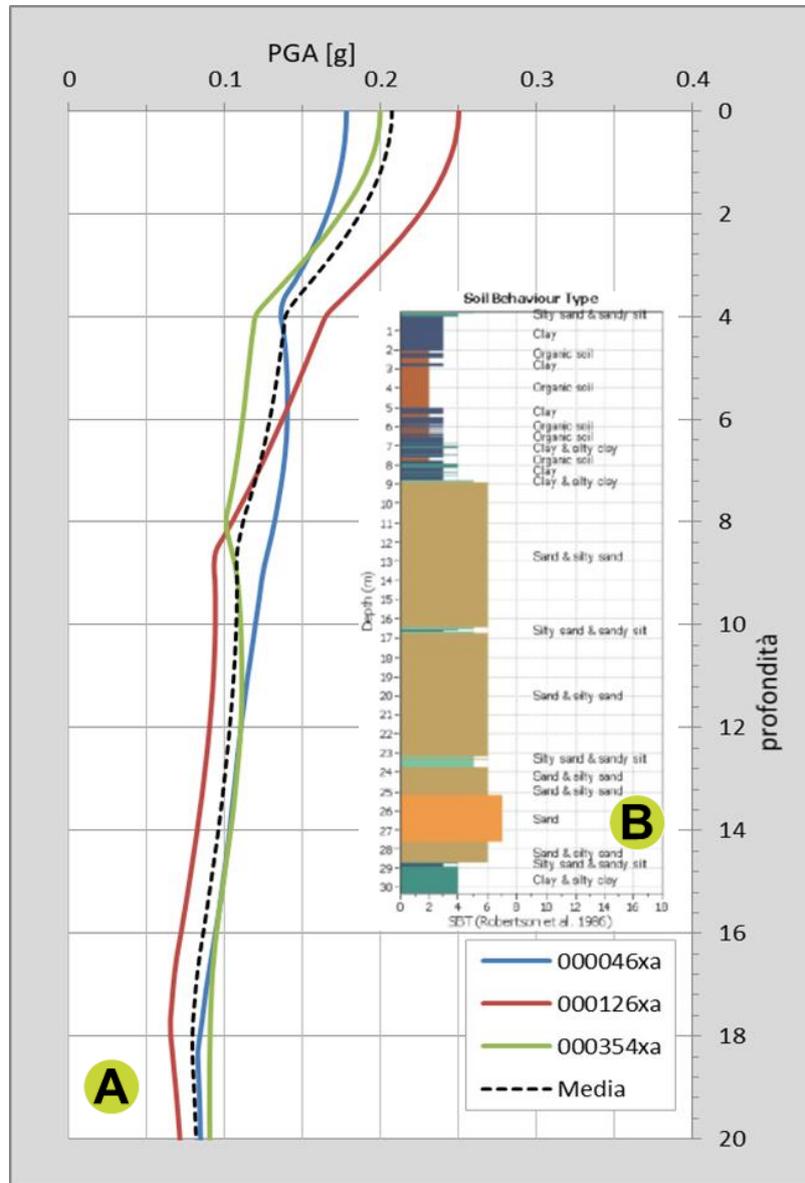


Figura 7-15 - RSL zona 30502005 - Diamantina. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di sottosuolo (A) e relativa stratigrafia semplificata (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,21 g (Figura 7-15) si ottiene un fattore di amplificazione $FA_{PGA} = 1,59$. I fattori di amplificazione ottenuti mediante integrazione degli spettri di output in accelerazione e in pseudovelocità per prefissati periodi di vibrazione sono riassunti in Tabella 7-12.

FA_{PGA}	$SI1-FH_{(0,1-0,5)}$	$SI2-FH_{(0,5-1,0)}$	$SI3-FH_{(0,5-1,5)}$	$SA1-FA_{(0,1-0,5)}$	$SA2-FA_{(0,4-0,8)}$	$SA3-FA_{(0,7-1,1)}$	$SA4-FA_{(0,5-1,5)}$
1,59	2,01	2,09	2,06	1,90	2,09	2,12	2,06

Tabella 7-12 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona 30502005 - Diamantina.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

RSL zona 30502005 - Madonna Boschi e Coronella

In Figura 7-16 si riporta la funzione di trasferimento, definita 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. Si osserva una prima e più elevata amplificazione a frequenza di circa 0,25Hz e una seconda a circa 0,55 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale. La funzione di trasferimento mostra ulteriori amplificazioni a frequenze più elevate, alcune delle quali sono armoniche superiori delle precedenti. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

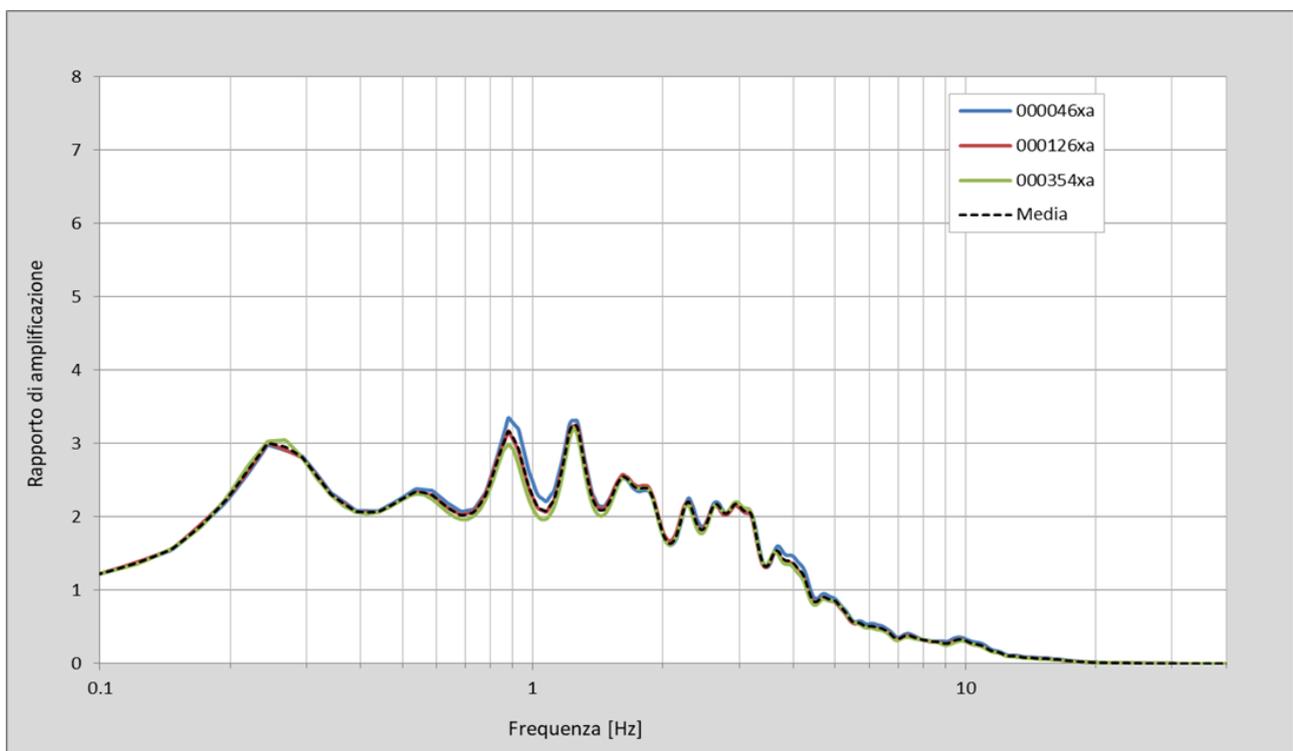


Figura 7-16 - RSL zona 30502005 - Madonna Boschi e Coronella. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

In Figura 7-17 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%, e del loro spettro medio, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 (A). Appare evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente dei singoli moti di input (forniti dalla D.G.R. n. 630/2019).

Lo spettro medio risulta, infatti, affetto da una elevata deviazione standard, sostanzialmente dovuta alla diversità dei tre terremoti utilizzati come segnali di input nella modellazione numerica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

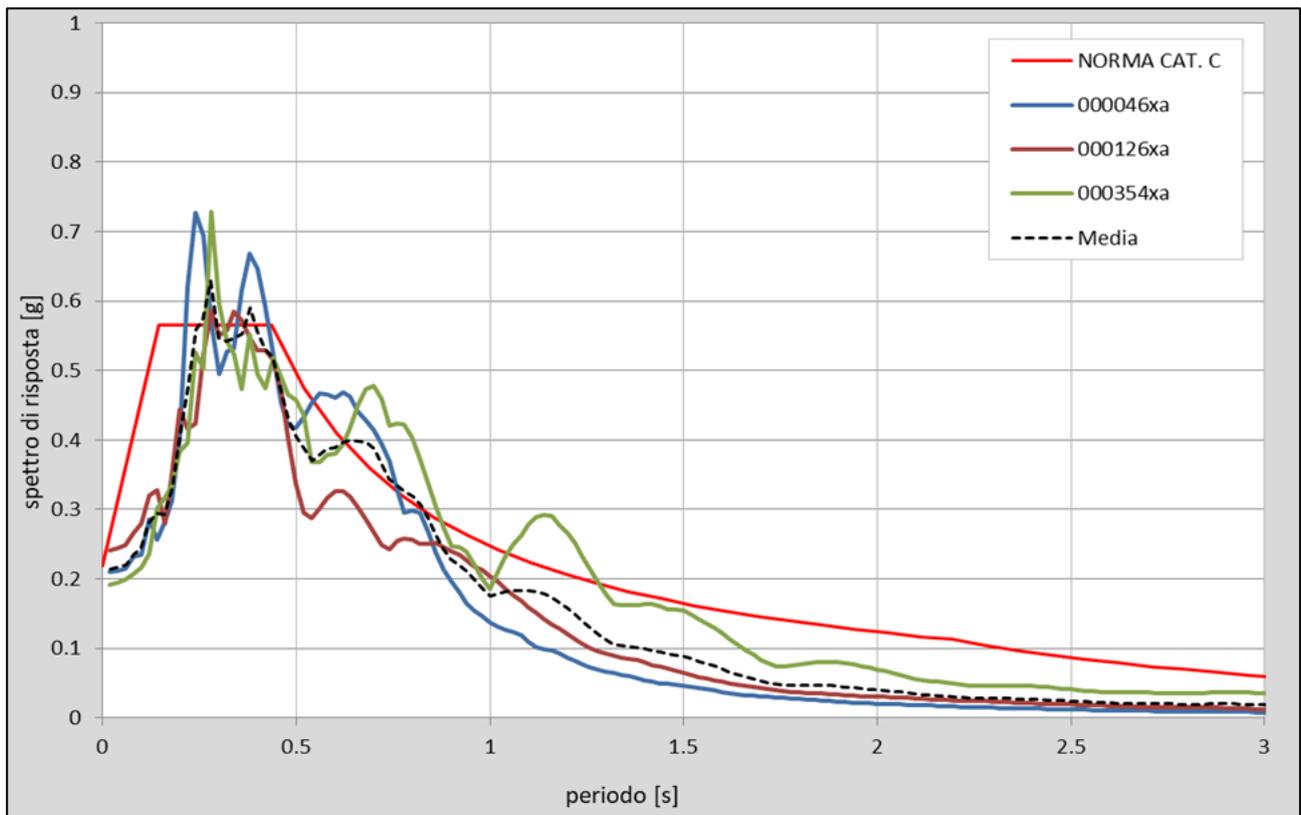


Figura 7-17 - RSL zona 30502005 - Madonna Boschi e Coronella. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-18 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 20 m di sottosuolo per i tre terremoti di input e per la loro media. Dal grafico si nota un generale e progressivo aumento dell'accelerazione al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 6 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

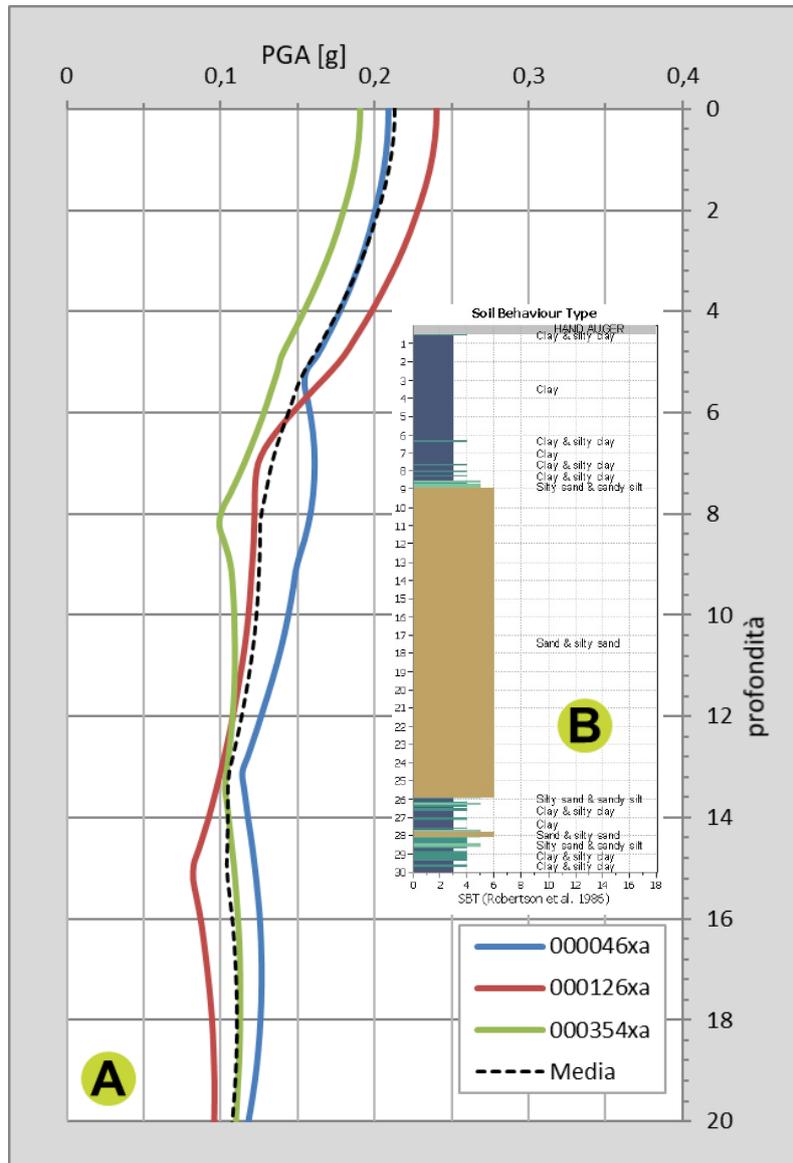


Figura 7-18 - RSL zona 30502005 - Madonna Boschi e Coronella. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di sottosuolo (A) e relativa stratigrafia semplificata (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,21 g (Figura 7-18) si ottiene un fattore di amplificazione $FA_{PGA} = 1,39$. I fattori di amplificazione ottenuti mediante integrazione degli spettri di output in accelerazione e in pseudovelocità per prefissati periodi di vibrazione sono riassunti in Tabella 7-13.

FA_{PGA}	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1.0)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$	$SA1-FA_{(0.1-0.5)}$	$SA2-FA_{(0.4-0.8)}$	$SA3-FA_{(0.7-1.1)}$	$SA4-FA_{(0.5-1.5)}$
1,39	1,72	2,39	2,41	1,55	2,26	2,48	2,40

Tabella 7-13 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona 30502005 - Madonna Boschi e Coronella.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

RSL zona 2006 - Vigarano "Pieve"

In Figura 7-19 si riporta la funzione di trasferimento, definita 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.

Si osserva una prima e più elevata amplificazione a frequenza di circa 0,35Hz e una seconda a circa 0,7 Hz, coerentemente con quanto osservato dalle misure di rumore ambientale. La funzione di trasferimento mostra ulteriori amplificazioni a frequenze più elevate, alcune delle quali sono armoniche superiori delle precedenti. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

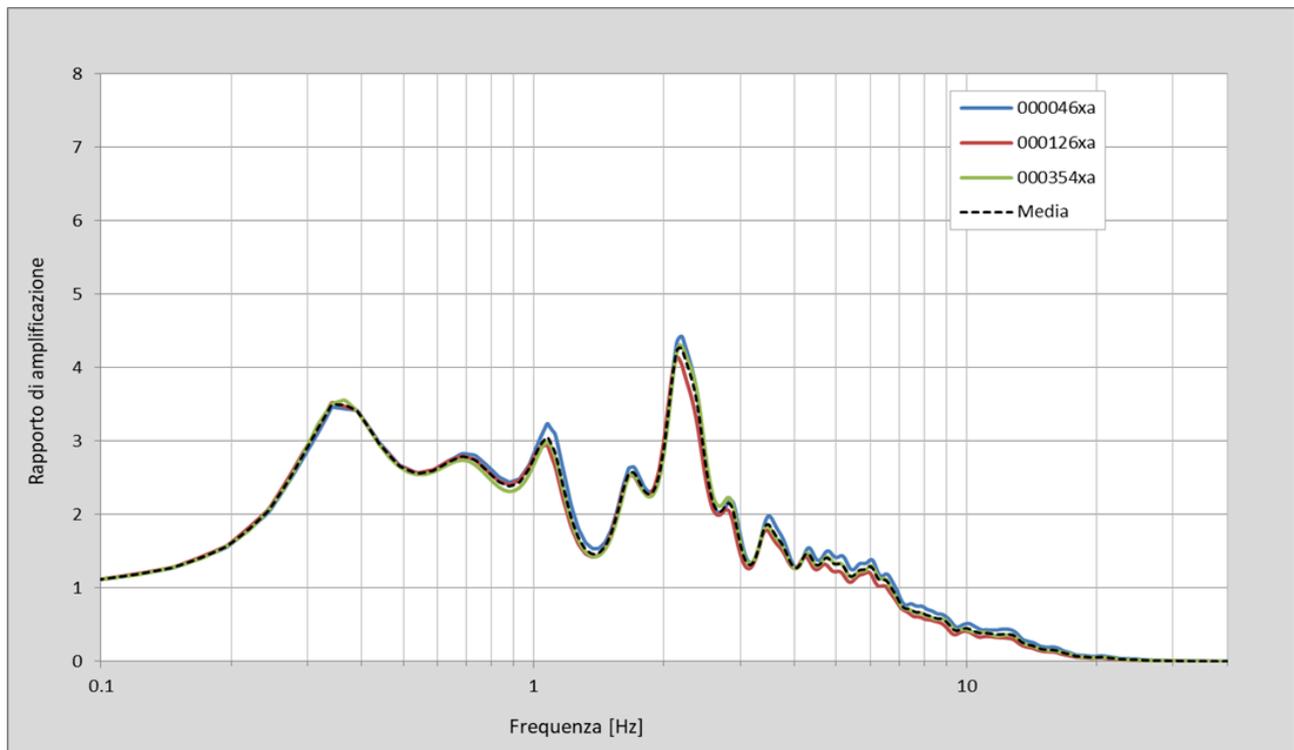


Figura 7-19 - RSL zona 2006 - Vigarano "Pieve". Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

In Figura 7-20 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%, e del loro spettro medio, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 (B). Appare evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente dei singoli moti di input (forniti dalla D.G.R. n. 630/2019).

Lo spettro medio risulta, infatti, affetto da una elevata deviazione standard, sostanzialmente dovuta alla diversità dei tre terremoti utilizzati come segnali di input nella modellazione numerica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

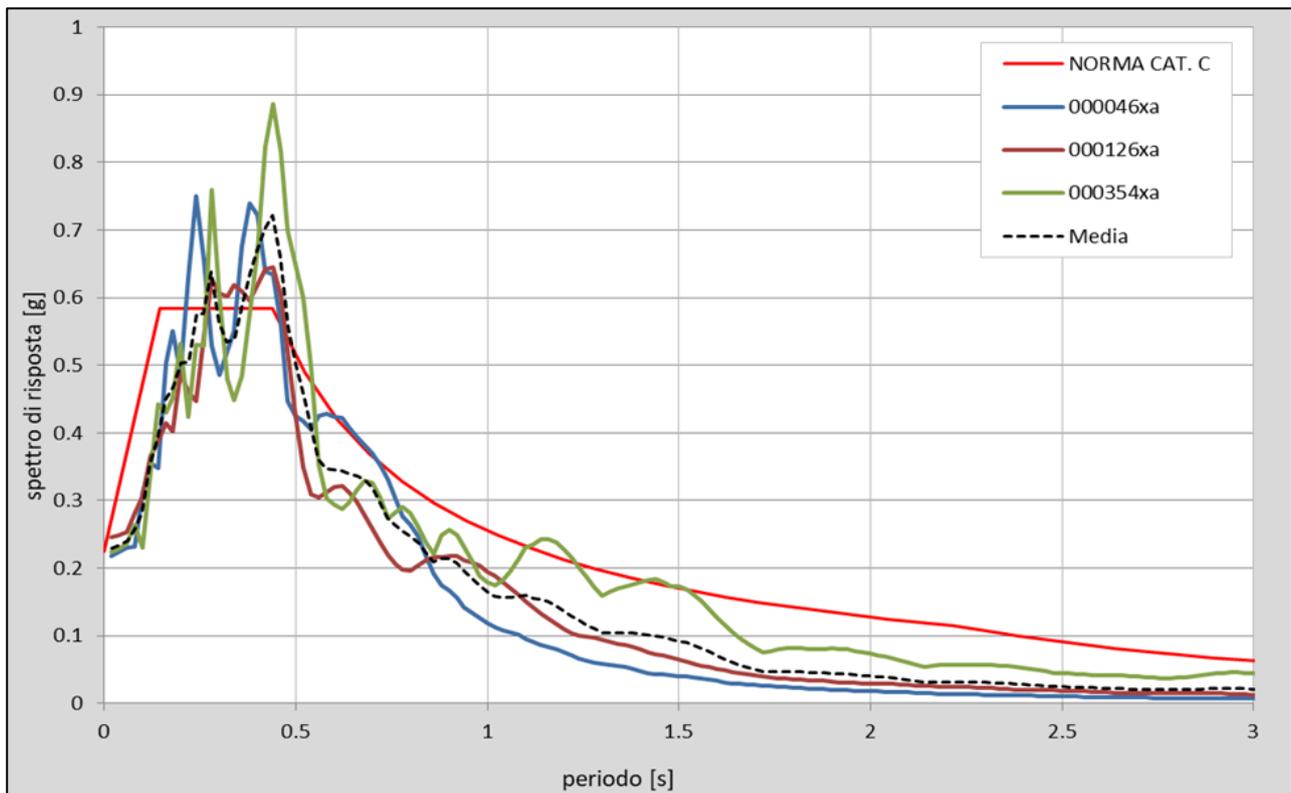


Figura 7-20 - RSL zona 2006 - Vigarano "Pieve". Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-21 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 20 m di sottosuolo per i tre terremoti di input e per la loro media. Dal grafico si nota un generale e progressivo aumento dell'accelerazione al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 5 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

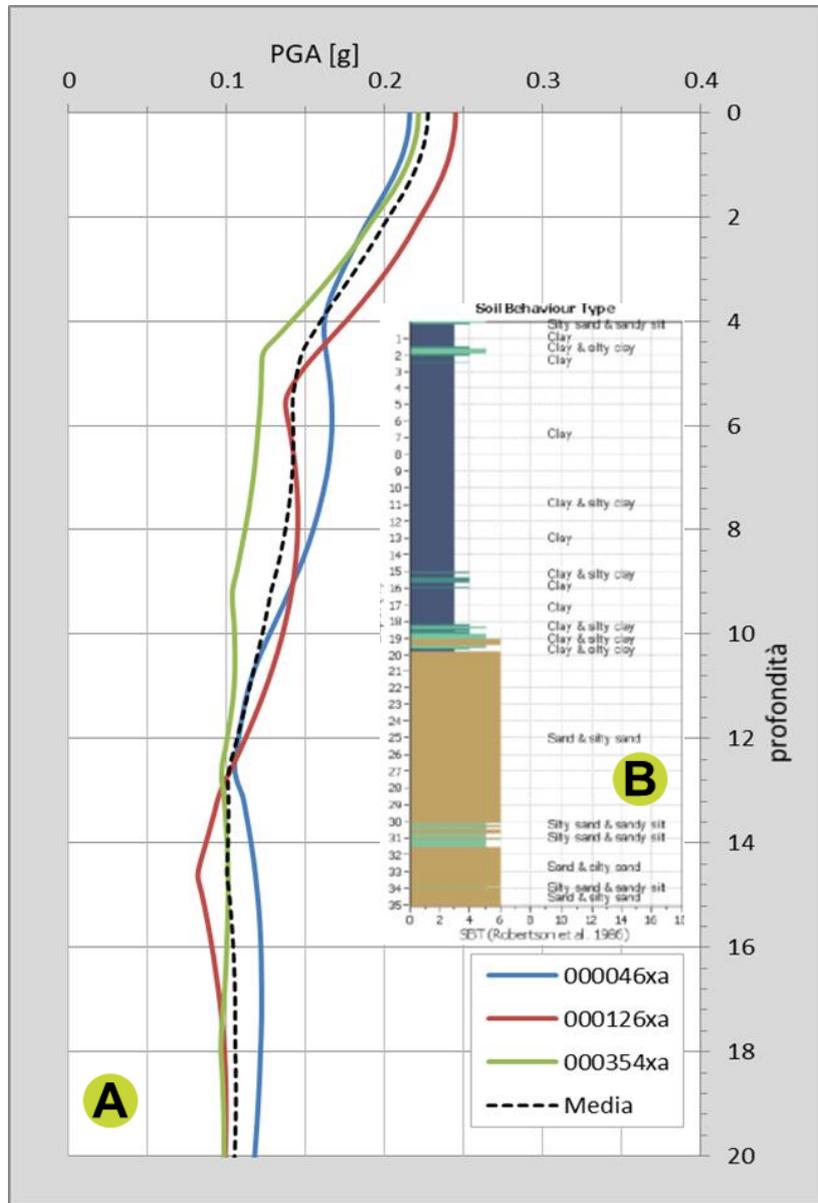


Figura 7-21 - RSL zona 2006 - Vigarano "Pieve". Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di sottosuolo (A) e relativa stratigrafia semplificata (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,23 g (Figura 7-21) si ottiene un fattore di amplificazione $FA_{PGA} = 1,59$. I fattori di amplificazione ottenuti mediante integrazione degli spettri di output in accelerazione e in pseudovelocità per prefissati periodi di vibrazione sono riassunti in Tabella 7-14.

FA_{PGA}	$SI1-FH_{(0,1-0,5)}$	$SI2-FH_{(0,5-1,0)}$	$SI3-FH_{(0,5-1,5)}$	$SA1-FA_{(0,1-0,5)}$	$SA2-FA_{(0,4-0,8)}$	$SA3-FA_{(0,7-1,1)}$	$SA4-FA_{(0,5-1,5)}$
1,59	2,17	2,24	2,32	1,93	2,46	2,25	2,30

Tabella 7-14 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona 2006 - Vigarano "intra".

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

RSL zona 2007 - Madonna Boschi e Coronella

In Figura 7-22 si riporta la funzione di trasferimento, definita 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. Si osserva una prima e più elevata amplificazione a frequenza di circa 0,25Hz e una seconda a circa 0,55 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale. La funzione di trasferimento mostra ulteriori amplificazioni a frequenze più elevate, alcune delle quali sono armoniche superiori delle precedenti. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

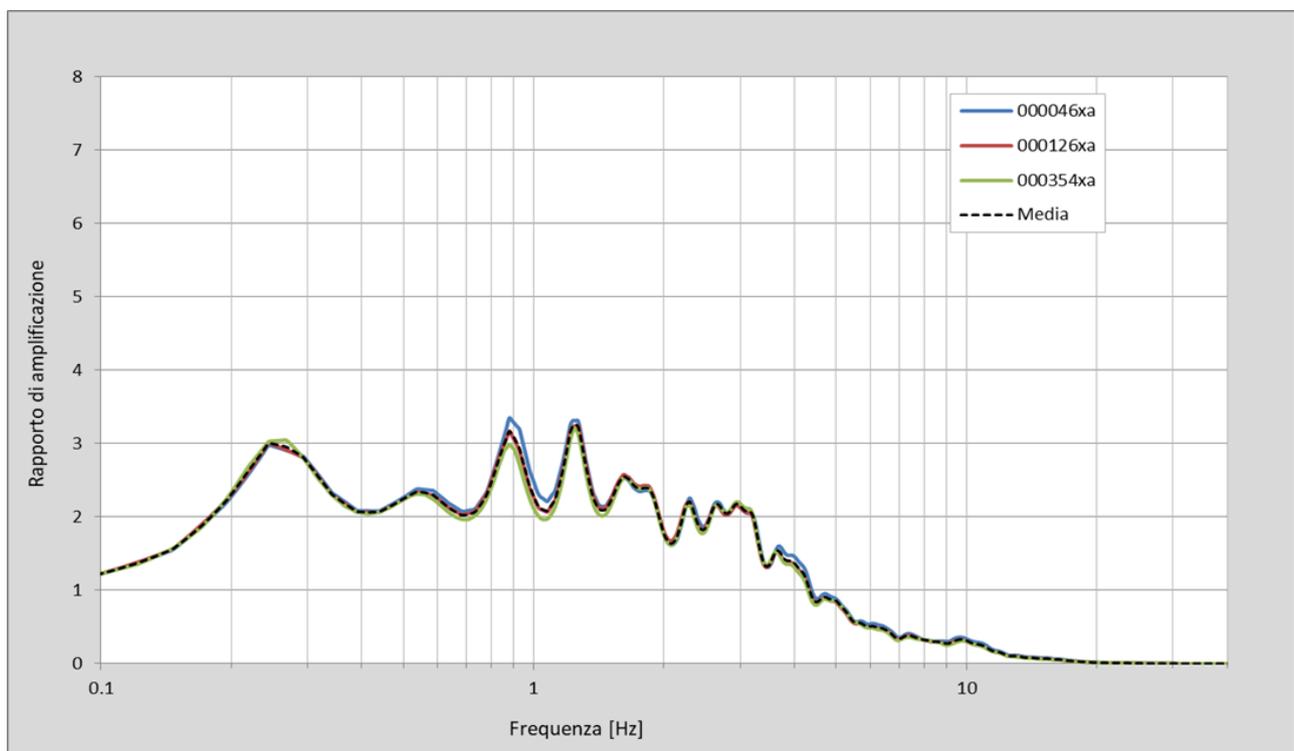


Figura 7-22 - RSL zona 2007 - Madonna Boschi e Coronella. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

In Figura 7-23 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%, e del loro spettro medio, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-2 (A). Appare evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente dei singoli moti di input (forniti dalla D.G.R. n. 630/2019). Lo spettro medio risulta, infatti, affetto da una elevata deviazione standard, sostanzialmente dovuta alla diversità dei tre terremoti utilizzati come segnali di input nella modellazione numerica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

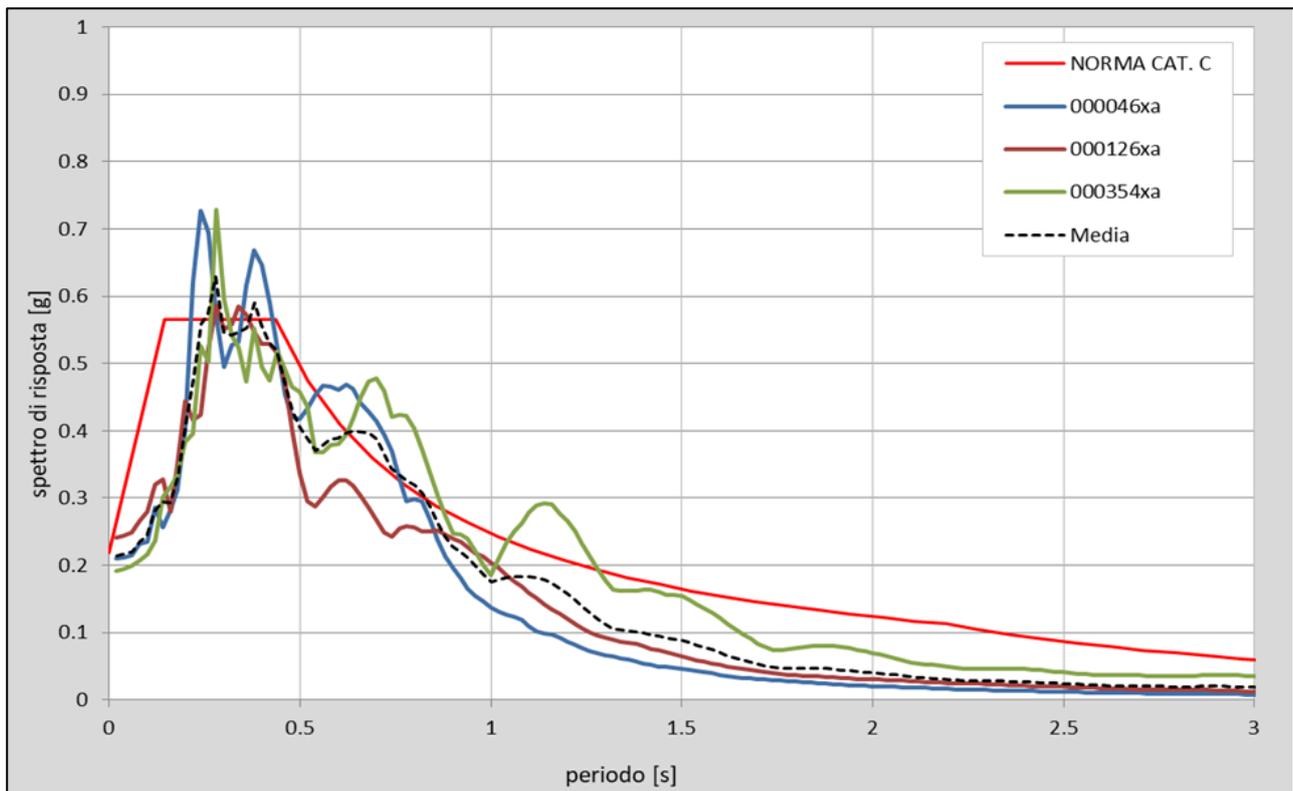


Figura 7-23 - RSL zona 2007 - Madonna Boschi e Coronella. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-24 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 20 m di sottosuolo per i tre terremoti di input e per la loro media. Dal grafico si nota un generale e progressivo aumento dell'accelerazione al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 6 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

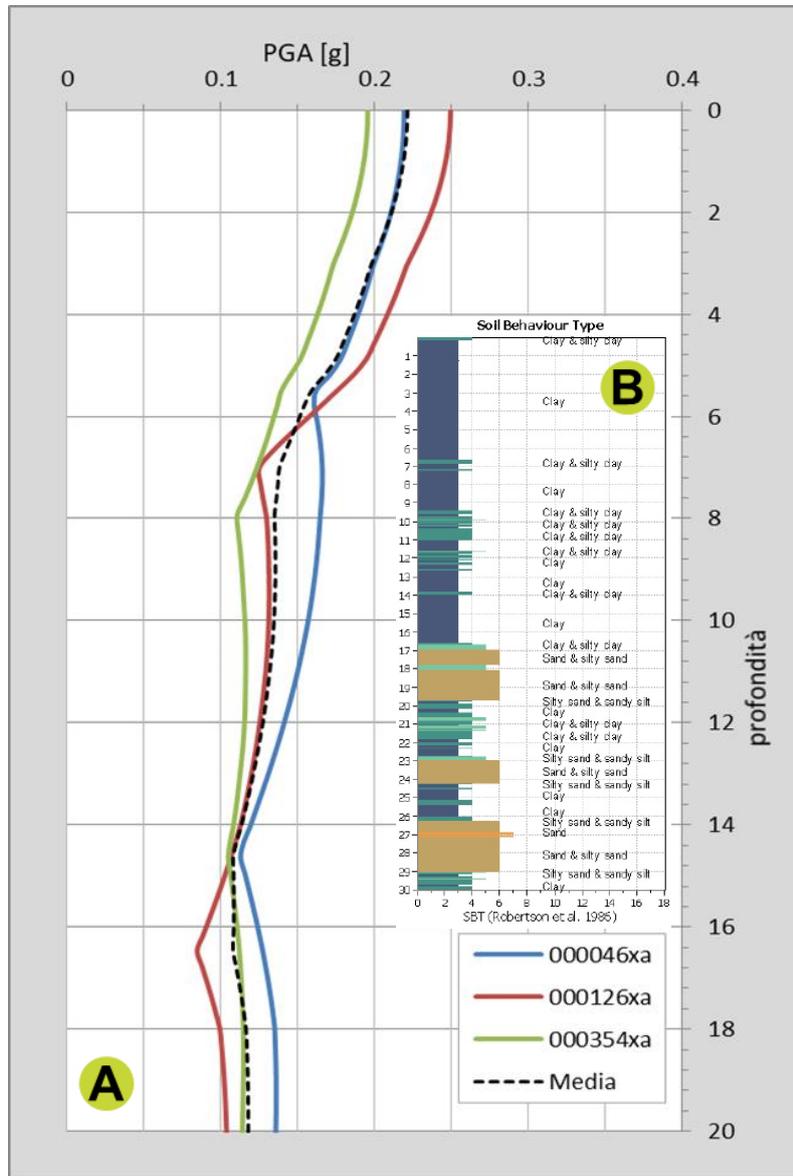


Figura 7-24 - RSL zona 2007 - Madonna Boschi e Coronella. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di sottosuolo (A) e relativa stratigrafia semplificata (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,22 g (Figura 7-24) si ottiene un fattore di amplificazione $FA_{PGA} = 1,45$. I fattori di amplificazione ottenuti mediante integrazione degli spettri di output in accelerazione e in pseudovelocità per prefissati periodi di vibrazione sono riassunti in Tabella 7-15.

FA_{PGA}	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1,0)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$	$SA1-FA_{(0.1-0.5)}$	$SA2-FA_{(0.4-0.8)}$	$SA3-FA_{(0.7-1.1)}$	$SA4-FA_{(0.5-1.5)}$
1,45	1,81	2,49	2,51	1,64	2,34	2,59	2,50

Tabella 7-15 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona 2007 - Madonna Boschi e Coronella.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

7.1.2 Confronto tra analisi di risposta sismica locale e abachi regionali

Per valutarne la consistenza e l'affidabilità complessiva dei modelli sismo-stratigrafici proposti e dei dati ottenuti dalle modellazioni, questi ultimi sono stati messi a confronto con i fattori di amplificazione indicati dagli abachi regionali (Allegato A2 - D.G.R. n. 630/2019). Tali abachi sono stati ottenuti mediante analisi di risposta sismica locale effettuate in differenti contesti geologico-stratigrafici regionali, tenendo conto delle locali variazioni di profondità del bedrock sismico e delle velocità delle onde volumetriche di taglio (onde S) a varie profondità nel sottosuolo. Per i contesti geologici della Pianura Padana sono stati elaborati tre distinti abachi, rispettivamente sviluppati per aree con profondità del substrato rigido inferiori a di 100 m ("Pianura 1"), entro i 150 m ("Pianura 2") e oltre 300 m ("Pianura 3") dalla superficie topografica.

La D.G.R. 630/2019 non prevede, quindi, abachi specifici per settori di pianura in cui il substrato rigido si collochi a profondità comprese tra i 200 ed i 300 m, come accade in larga parte del territorio di Vigarano. Per tali ragioni è stato ritenuto rappresentativo per la maggior parte dell'area di studio l'abaco di "**Pianura 3**", che descrive i "*settori di pianura caratterizzati da elevati spessori di sedimenti prevalentemente fini e poco consolidati, alternanze di limi, argille e sabbie di ambiente alluvionale e transizionale, con substrato rigido a profondità non inferiori a 300 m da p.c.*".

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,3	1,3	1,3	-	-	-

 Fattori di Amplificazione **PGA**

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,3	1,3	1,3	-	-	-
SA2	2,1	2,1	2,0	-	-	-
SA3	2,5	2,5	2,4	-	-	-
SA4	2,4	2,4	2,3	-	-	-

 Fattori di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$), **SA4** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,5	1,5	1,5	-	-	-
SI2	2,3	2,3	2,2	-	-	-
SI3	2,6	2,6	2,4	-	-	-

 Fattori di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$), **SI3** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

Dal confronto presentato in Tabella 7-16, si evince come i fattori di amplificazione proposti dall'abaco di "**Pianura 3**" non siano troppo dissimili da quelli ottenuti dalle risposte sismiche locali eseguite per le diverse microzone omogenee identificate.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

	ABACO PIANURA 3 D.G.R. 630/2019	RSL zona 30502001 - Vigarano Mainarda	RSL zona 30502002 - Vigarano Mainarda	RSL zona 30502003 - Vigarano Pieve	RSL zona 30502005 - Madonna Boschi e Coronella	RSL zona 2006 - Vigarano "intra"	RSL zona 2007 - Madonna Boschi e Coronella
FA _{PGA}	1,3	1,40	1,51	1,49	1,39	1,59	1,45
SA1-FA _(0.1-0.5)	1,3	1,56	1,79	1,66	1,55	1,93	1,64
SA2-FA _(0.4-0.8)	2,1	2,49	2,48	2,19	2,26	2,46	2,34
SA3-FA _(0.7-1.1)	2,5	2,64	2,55	2,57	2,48	2,25	2,59
SA4-FA _(0.5-1.5)	2,4	2,60	2,52	2,39	2,40	2,30	2,50
SI1-FH _(0.1-0.5)	1,5	1,76	2,00	1,80	1,72	2,17	1,81
SI2-FH _(0.5-1,0)	2,3	2,56	2,48	2,38	2,39	2,24	2,49
SI3-FH _(0.5-1.5)	2,6	2,62	2,54	2,43	2,41	2,32	2,51

Tabella 7-16 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalle modellazioni numeriche eseguite per le diverse microzone omogenee (MOPS) confrontati con quelli previsti dall'abaco di "Pianura 3" della D.G.R. 630/2019, per aree con valori Vs₃₀ di circa 200 m/s.

Per il solo ambito di Diamantina, in cui il substrato sismico è stato identificato ad una profondità di circa 200 m, il confronto tra i fattori di amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale è stato effettuato anche rispetto a quelli proposti dall'abaco di "Pianura 2". Come intuibile i fattori di amplificazione ottenuti dalla modellazione numerica, mostrano valori intermedi tra quelli proposti per "Pianura 2" e "Pianura 3" dalla D.G.R. 630/2019 (Tabella 7-17), che appaiono però del tutto coerenti con i fattori proposti dall'ormai superata D.A.L. 112/2007, che prevedeva un abaco per aree con substrato profondo ≥ 100 m da p.c.

	ABACO PIANURA 2 D.G.R. 630/2019	ABACO PIANURA 3 D.G.R. 630/2019	MEDIA P2 - P3	ABACO PIANURA 2 D.A.L. 112/2007	RSL zona 30502005 - Diamantina
FA _{PGA}	1,7	1,3	1,50	1,5	1,59
SA1-FA _(0.1-0.5)	1,8	1,3	1,55	-	1,90
SA2-FA _(0.4-0.8)	2,7	2,1	2,40	-	2,09
SA3-FA _(0.7-1.1)	3,2	2,5	2,85	-	2,12
SA4-FA _(0.5-1.5)	3,1	2,4	2,75	-	2,06
SI1-FH _(0.1-0.5)	2,0	1,5	1,75	1,8	2,01
SI2-FH _(0.5-1,0)	3,0	2,3	2,65	2,5	2,09
SI3-FH _(0.5-1.5)	3,3	2,6	2,95	-	2,06

Tabella 7-17 - Fattori di Amplificazione previsti dagli abachi di "Pianura 2" e "Pianura 3" della D.G.R. 630/2019 e della previgente D.A.L.112/2007, per aree con valori Vs₃₀ di circa 200 m/s. I coefficienti sono messi a confronto con i Fattori di Amplificazione ottenuti dalla modellazione numerica eseguite per l'area di Diamantina, sviluppata poco a sud della culminazione assiale della piega anticlinale di Casaglia.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA
7.1.3 Calcolo del parametro H_{SM}

Il parametro H_{SM} (Naso *et al.*, 2019) esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2), dato dal prodotto del parametro *Acceleration Spectrum Intensity* (ASI_{UHS}), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi $0,1s \leq T \leq 0,5s$, diviso per ΔT e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = \frac{ASI_{UHS}}{\Delta T} \times FA$$

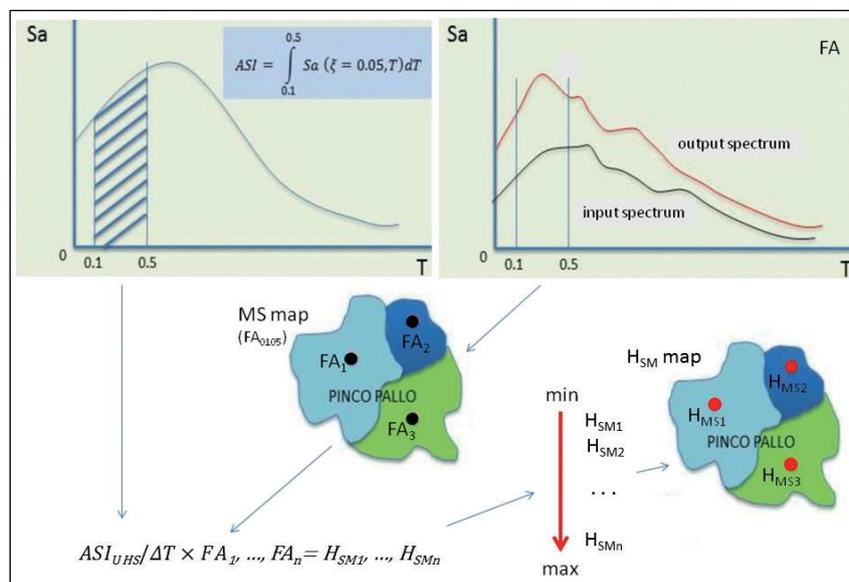


Figura 7-25 - Schema per il calcolo del parametro HSM ed esempio di mappatura (Naso *et al.*, 2019).

L'introduzione del parametro H_{SM} consente di realizzare mappe che tengano conto del rischio sismico derivato dall'interazione tra il moto sismico e la presenza di edifici con determinati "modi di vibrare". Considerando sia il rischio sismico di riferimento sia gli effetti locali, il parametro H_{SM} consente valutazioni e stime di rischio più realistiche ed omogenee a scala nazionale. Il parametro H_{SM} può essere discretizzato in classi semi-quantitative relative al livello di scuotimento, al potenziale danno agli edifici e all'intensità strumentale. Le soglie delle classi di H_{SM} proposte in Naso *et al.*, 2019 sono illustrate in Tabella 7-18.

seismic hazard	low-very low	moderate-low	moderate	high	very high
H_{SM} (cm/s^2)	≤ 180	$180 < H_{SM} \leq 340$	$340 < H_{SM} \leq 650$	$650 < H_{SM} \leq 1240$	> 1240
potential damage	none - very light	very light - moderate	moderate - heavy	heavy	very heavy
instrumental intensity	$\leq VI$	VII	VIII	IX	$\geq X$

Tabella 7-18 - Soglie per H_{SM} e altri parametri correlati (Naso *et al.*, 2019)

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

I valori di H_{SM} per le microzone identificate nei diversi ambiti geografici comunali sono stati derivati dalle rispettive analisi di risposta sismica locale, integrando gli spettri di riferimento in accelerazione nell'intervallo di periodi compreso tra 0,1s e 0,5s ed applicando la formula di Figura 7-25.

Rispetto alla classificazione proposta da Naso *et al.*, 2019, la totalità del territorio di Crevalcore ricade in una fascia a rischio sismico moderato, potenzialmente soggetta a danni all'edificato da moderati a gravi (Tabella 7-18).

Per gli approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello, la D.G.R. n. 630/2019 della Regione Emilia-Romagna richiede anche il calcolo dei valori di scuotimento in accelerazione (cm/s^2) attesi al sito per gli intervalli di periodi $0,4s \leq T \leq 0,8s$, $0,7s \leq T \leq 1,1s$ e $0,5s \leq T \leq 1,5s$. Anche questi valori sono stati determinati in modo analogo a quelli di H_{SM} , integrando gli spettri di riferimento in accelerazione per gli intervalli di periodi appena descritti e applicando la formula di Figura 7-25. I valori ottenuti per le microzone dei diversi ambiti geografici comunali sono riportati in Tabella 7-19, Tabella 7-20, Tabella 7-21, Tabella 7-22 e Tabella 7-23.

MOPS	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
30502005 (Diamantina)	499	313	180	166

Tabella 7-19 - Valori di scuotimento in accelerazione (cm/s^2) ottenuti da analisi di risposta sismica locale, area di Diamantina.

MOPS	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
30502003 (Vigarano Pieve)	468	352	234	206

Tabella 7-20 - Valori di scuotimento in accelerazione (cm/s^2) ottenuti da analisi di risposta sismica locale area Vigarano Pieve

MOPS	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
2006 (Vigarano "intra")	546	395	204	197

Tabella 7-21 - Valori di scuotimento in accelerazione (cm/s^2) ottenuti da analisi di risposta sismica locale, area tra Vigarano Pieve e Vigarano Mainarda.

MOPS	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
230502001 (Vigarano Mainarda)	471	429	255	239
230502002 (Vigarano Mainarda)	543	427	247	232

Tabella 7-22 - Valori di scuotimento in accelerazione (cm/s^2) ottenuti da analisi di risposta sismica locale, area di Vigarano Mainarda.

MOPS	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
230502005 (Coronella-Madonna Boschi)	468	389	241	221
2007 (Coronella-Madonna Boschi)	496	405	252	231

Tabella 7-23 - Valori di scuotimento in accelerazione (cm/s^2) ottenuti da analisi di risposta sismica locale, area di Coronella e Madonna Boschi.

7.2 Zone instabili soggette a liquefazione

Considerato il contesto sismotettonico ed il carattere pianeggiante del territorio in cui si colloca il Comune di Vigarano Mainarda, le instabilità sismoindotte attese nell'area sono da imputare a potenziali fenomeni di liquefazione ed espansione laterale (*lateral spreading*) oltre che a 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 attraversati. Le valutazioni hanno confermato le evidenze del 2012, indicando come principale criticità la diffusa presenza di sedimenti granulari sub-affioranti, poco addensati e saturi in acqua, così come già riportato negli elaborati di sintesi degli studi realizzati durante l'emergenza sismica del 2012 dalla Regione Emilia-Romagna (Martelli e Romani, 2013).

L'estensione e la perimetrazione di queste aree è stata notevolmente affinata (v. Tavola 4) sulla base dei risultati ottenuti dall'elaborazione di nuove indagini geognostiche acquisite nell'ambito degli approfondimenti di terzo livello (paragrafo 4.1). Per ottenere valutazioni quantitative della suscettibilità a liquefazione 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 sulla quasi totalità delle indagini penetrometriche con piezocono archiviate nell'ambito dello studio (Allegato 3).

7.2.1 Verifiche del potenziale di liquefazione

La liquefazione è un fenomeno che si verifica in occasione di forti terremoti ed interessa sedimenti granulari poco addensati e saturi in acqua, come ad esempio limi, sabbie e ghiaie, eventualmente presenti nei primi 20 m di sottosuolo.

Durante un 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 ampiamente osservato nell'area ferrarese e modenese in occasione della sequenza sismica del 2012.

Dopo gli eventi sismici del 2012, nell'area epicentrale emiliana sono stati effettuati numerosi studi di microzonazione sismica (e.g. Ordinanza R.E.R. 70/2012, O.C.D.P.C. 171/2014, O.C.D.P.C. 293/2015) nell'ambito dei quali sono state eseguite molteplici stime del potenziale di liquefazione mediante procedure semplificate suggerite dagli indirizzi regionali (D.A.L. 112/2007, D.G.R. 2193/2015, D.G.R.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

630/2019) e nazionali (Gruppo di lavoro MS, 2008). Il confronto tra i vari metodi di letteratura, tutti applicati su indagini penetrometriche statiche, ha permesso di concludere che i valori degli indici di liquefazione I_L (Iwasaki *et al.*, 1982) ottenuti attraverso i metodi di Idriss e Boulanger (2008) e Boulanger e Idriss (2014) fossero da considerare maggiormente attendibili di altri e compatibili con gli effetti di liquefazione osservati nel 2012. Per gli approfondimenti di terzo livello di microzonazione sismica sono state eseguite stime del potenziale di liquefazione su 47 prove penetrometriche a piezocono CPTu distribuite come riportato nelle tavole cartografiche di terzo livello (Tavola 6 ÷ Tavola 13). Le stime, effettuate con vari metodi, hanno evidenziato come il metodo di Boulanger e Idriss (2014) fornisca di norma indici più elevati rispetto ad altri metodi di letteratura (cfr. Idriss e Boulanger, 2008 e Robertson, 2009). Gli indici ottenuti con il metodo di Boulanger e Idriss (2014) sono stati considerati affidabili e maggiormente cautelativi, ragione per cui sono stati adottati per la realizzazione delle cartografie di sintesi dello studio.

Come parametri di input per la modellazione sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 7-25. Il valore di Mw_{max} corrisponde a quello massimo atteso per la Zona 912 della Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004 - Figura 2-8), mentre la PGA è stata ricavata moltiplicando l'accelerazione orizzontale di picco attesa al bedrock (ag_{ref}) per i fattori di amplificazione ottenuti delle risposte sismiche locali eseguite per le diverse microzone sismiche identificate nel territorio comunale (cfr. paragrafo 7.1.1).

Considerate le significative variazioni di pericolosità di base verificate per l'area di studio si è optato per attribuire distinti valori di ag_{ref} ai diversi ambiti geografici di studio, in funzione dei risultati ottenuti dall'interpolazione dei valori di accelerazione definiti ai nodi del reticolo (Figura 7-26) su cui si basa la mappa di pericolosità sismica nazionale INGV (T_R 475 anni, 50^{esimo} percentile). I valori riportati nelle tabelle seguenti sono stati arrotondati, per eccesso o per difetto, al secondo termine decimale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

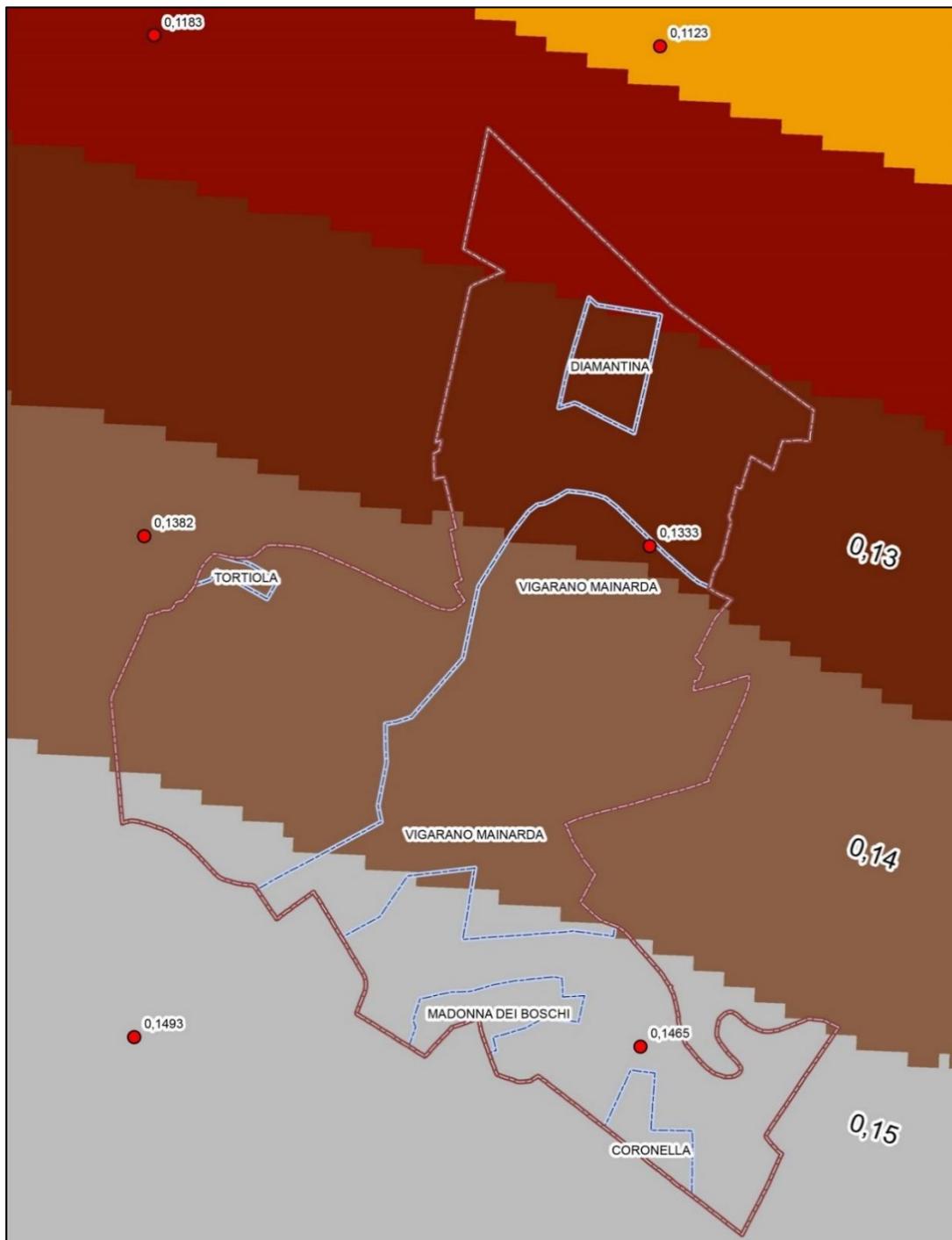


Figura 7-26 - Fasce a diversa pericolosità sismica di base ottenute dall'interpolazione dei valori di accelerazione ai nodi del reticolo (punti rossi) su cui si basa la mappa di pericolosità sismica nazionale INGV (TR 475 anni, 50^{esimo} percentile).

Ambito	MOPS	$a_{g_{ref}}$ (g)	FA PGA	PGA (g)
Diamantina	30502005	0,13	1,65	0,21
Vigarano Pieve	30502003	0,14	1,49	0,21

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

	30502004		1,59	0,22
	30502005		1,59	0,22
	2006		1,59	0,23
Vigarano Mainarda	30502001	0,15	1,40	0,21
	30502002		1,51	0,23
	30502003		1,49	0,22
	30502004		1,39	0,21
Madonna Boschi Coronella	30502002	0,15	1,51	0,23
	30502005		1,39	0,21
	2007		1,45	0,22

Tabella 7-24 - Parametri ottenuti dalle analisi di Risposta Sismica Locale eseguite per le diverse MOPS in relazione agli ambiti geografici analizzati. I valori di ag_{ref} indicati in tabella sono stati utilizzati per scalare gli accelerogrammi di input utilizzati per le analisi numeriche, al fine di tenere conto della variazioni di pericolosità di base presenti all'interno dell'area di studio.

In mancanza di studi idrogeologici di dettaglio e di analisi storico-statistiche sull'andamento delle isofreatiche, per la stima delle soggiacenze di falda da utilizzare nelle verifiche a liquefazione sono stati considerati valori maggiormente cautelativi rispetto a quelli misurati nel corso delle campagne di indagini geognostiche. In base all'analisi morfologica del modello altimetrico LIDAR è stato possibile suddividere il territorio comunale in zone depresse interalvee e zone di dosso morfologico naturale e/o artificiale.

A queste due diverse tipologie di aree sono stati rispettivamente attribuiti valori di soggiacenza della falda pari a 1 e 3 m, come già adottato per le analisi di suscettività a liquefazione eseguite negli studi di microzonazione post-sisma (Martelli *et al.*, 2013; Martelli e Romani, 2013).

Ambito	MOPS	PGA (g)	Mw_{max}	FALDA (m)
Diamantina	30502005	0,21	6,14	1 m (in zona interalvea)
Vigarano Pieve	30502003	0,21	6,14	1 m (in zona interalvea) 3 m (in presenza di dosso morfologico)
	30502004	0,22		
	30502005	0,22		
	2006	0,23		
Vigarano Mainarda	30502001	0,21	6,14	1 m (in zona interalvea) 3 m (in presenza di dosso morfologico)
	30502002	0,23		
	30502003	0,22		
	30502004	0,21		
Madonna Boschi Coronella	30502002	0,23	6,14	1 m (in zona interalvea)
	30502005	0,21		
	2007	0,22		

Tabella 7-25 - Parametri di input per la verifica del potenziale di liquefazione mediante metodo di Boulanger e Idriss (2014).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

I valori puntuali di I_L ottenuti mediante il software "Cliq 2.0" della *Geologismiki Geotechnical Software*, sono rappresentati in carta (Tavole dalla 6 alla 13) suddivisi per classi, secondo Sonmez (2003), in modo da poter distinguere tra aree a rischio di liquefazione basso ($0 < I_L \leq 2$), moderato ($2 < I_L \leq 5$), alto ($5 < I_L \leq 15$) e molto alto ($I_L > 15$).

In Tabella 7-26 sono riportati i valori di I_L relativi alle 47 indagini penetrometriche con punta elettrica analizzate per gli approfondimenti di terzo livello, mentre i rapporti di calcolo delle verifiche effettuate sono raccolti nell'Allegato 3 alla presente relazione.

CODICE	coord_X	coord_Y	PGA (g)	Mw _{max}	FALDA (m)	IL BOULANGER E IDRISS (2014)
038022P14CPTU14	223044	4974663	0,21	6,14	1	7,7
038022P15CPTU15	223370	4976763	0,21	6,14	1	8,7
038022P16CPTU16	224123	4974035	0,21	6,14	3	9,8
038022P17CPTU18	224288	4976273	0,21	6,14	1	8
038022P86CPTU88	224454	4974740	0,21	6,14	1	5,8
038022P87CPTU89	223153	4969154	0,23	6,14	1	3,7
038022P88CPTU91	221747	4970806	0,21	6,14	3	8,6
038022P160CPTU164	220022	4972006	0,23	6,14	1	4,4
038022P161CPTU165	223170	4971751	0,23	6,14	1	1,4
038022P162CPTU166	221486	4971465	0,23	6,14	1	1,4
038022P163CPTU167	224651	4967702	0,23	6,14	1	4,2
038022P238CPTU243	222487	4971346	0,23	6,14	1	2,6
038022P239CPTU245	221892	4971132	0,23	6,14	1	4
038022P240CPTU247	221854	4971137	0,23	6,14	1	3,4
038022P241CPTU248	221856	4971202	0,23	6,14	1	3,6
038022P242CPTU249	225119	4967592	0,23	6,14	1	8,3
038022P243CPTU251	223033	4973819	0,22	6,14	3	9,1
038022P244CPTU253	223017	4973813	0,22	6,14	3	8,8
038022P245CPTU254	222308	4973244	0,23	6,14	1	1,8
038022P246CPTU256	219975	4970814	0,23	6,14	1	2,7
038022P248CPTU259	224408	4971434	0,23	6,14	1	0,9
038022P250CPTU262	221376	4970518	0,21	6,14	3	10,1
038022P253CPTU267	221892	4971136	0,23	6,14	1	3,9
038022P254CPTU269	222652	4971190	0,21	6,14	3	4,2
038022P256CPTU271	223975	4968209	0,21	6,14	1	8,6
038022P257CPTU272	223997	4968232	0,21	6,14	1	8,1
038022P259CPTU276	220646	4972055	0,23	6,14	1	0,6
038022P260CPTU278	220600	4971977	0,23	6,14	1	0,1
038022P261CPTU279	220521	4972190	0,23	6,14	1	0,1
038022P263CPTU281	222507	4968922	0,23	6,14	1	4,5

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

038022P264CPTU282	224127	4974376	0,21	6,14	3	2,3
038022P265CPTU284	222133	4972289	0,23	6,14	1	1,5
038022P266CPTU286	222710	4971940	0,23	6,14	1	0,2
038022P267CPTU287	222703	4971926	0,23	6,14	1	0,3
038022P268CPTU288	224119	4973285	0,22	6,14	1	14,4
038022P272CPTU293	223295	4971452	0,23	6,14	1	3,1
038022P273CPTU294	223331	4971434	0,23	6,14	1	3,5
038022P274CPTU295	224401	4973717	0,21	6,14	3	3,1
038022P275CPTU297	224210	4973279	0,21	6,14	3	10,6
038022P276CPTU298	221980	4971011	0,21	6,14	3	4,7
038022P277CPTU299	223846	4971420	0,23	6,14	1	2,8
038022P278CPTU300	221838	4971319	0,23	6,14	1	1,5
038022P279CPTU301	223048	4974685	0,21	6,14	1	9,7
038022P280CPTU303	220434	4973948	0,21	6,14	3	11,1
038022P281CPTU304	223882	4970840	0,21	6,14	3	7,6
038022P282CPTU305	225183	4973278	0,21	6,14	1	20,1
038022P284CPTU307	222378	4969394	0,22	6,14	1	1,1

Tabella 7-26 - Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna delle prove penetrometriche CPTu. In tabella sono riportati anche i valori di PGA, Mw_{max} e soggiacenza di falda utilizzati per il calcolo di I_L per ciascuna delle verticali analizzate.

8 Elaborati cartografici

Le analisi e gli approfondimenti eseguiti nell'ambito di questo studio hanno fornito gli elementi necessari alla redazione di nuovi elaborati cartografici per il terzo livello di microzonazione sismica del Comune di Vigarano Mainarda. Le nuove conoscenze geologiche acquisite, l'applicazione dei più recenti standard di rappresentazione ed archiviazione informatica e la vigente normativa regionale in materia di microzonazione sismica (D.G.R. n. 630/2019), hanno imposto una sostanziale revisione e l'aggiornamento degli elaborati cartografici prodotti nei precedenti livelli di approfondimento di microzonazione sismica. Per queste ragioni allo studio sono stati allegati anche gli elaborati cartografici di primo e secondo livello aggiornati, oltre alle tavole grafiche prodotte per gli approfondimenti di terzo livello (Tabella 8-1).

Il territorio comunale è stato rappresentato nelle diverse cartografie mediante riquadri alla scala 1:10.000. La Carta delle indagini, la Carta Geologico Tecnica, la Carta delle frequenze naturali dei terreni e la Carta delle velocità delle onde di taglio sono state estese a tutto il territorio comunale, al fine di fornire una completa ricostruzione di elementi fondamentali per lo sviluppo studio, come la distribuzione delle indagini geognostiche o le caratteristiche geologico-tecniche dei corpi sedimentari affioranti o, ancora, le velocità

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

delle onde di taglio che li contraddistinguono. Negli altri elaborati sono invece stati caratterizzati esclusivamente gli ambiti interessati dagli approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in scala 1:10.000; la base cartografica utilizzata è costituita dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000 fornita 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 delle 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) - FH _{0,1 - 0,5 s}	Tavola 7	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FH _{0,5 - 1,0 s}	Tavola 8	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FH _{0,5 - 1,5 s}	Tavola 9	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FA _{0,1 - 0,5 s}	Tavola 10	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FA _{0,4 - 0,8 s}	Tavola 11	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FA _{0,7 - 1,1 s}	Tavola 12	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FA _{0,5 - 1,5 s}	Tavola 13	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - H _{SM0,1 - 0,5 s}	Tavola 14	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - H _{0,4 - 0,8 s}	Tavola 15	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - H _{0,7 - 1,1 s}	Tavola 16	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - H _{0,5 - 1,5 s}	Tavola 17	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 (313) che quelle realizzate per gli approfondimenti di terzo livello (31). Come richiesto dagli Standard MS 4.1 (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2018) sono inoltre rappresentate 7 indagini virtuali, che sintetizzano la stratigrafia "teorica" nei primi trenta metri di sottosuolo delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica individuate nell'area di studio.

Nella cartografia a scala 1:10.000 le indagini sono raffigurate mediante simboli definiti dagli Standard MS 4.1.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Attraverso l'utilizzo del metodo di rappresentazione proposto all'Appendice 2 dei suddetti standard, ad ogni sito d'indagine (punto blu in carta) sono 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 per la Microzonazione Sismica (Tavola 2)

Nella Carta Geologico Tecnica sono sintetizzate tutte le informazioni relative ai caratteri geologici, geomorfologici, litotecnici e geotecnici dei terreni affioranti, derivati dalla revisione critica di studi, elaborati e cartografie disponibili.

In cartografia, a scala 1:10.000, viene quindi rappresentata la distribuzione dei terreni di copertura e degli elementi geologici e morfologici in grado di modificare il moto sismico in superficie o determinare effetti locali (e.g. liquefazione cosismica), unitamente ad altre informazioni necessarie alla realizzazione della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS).

Non essendo presenti unità deposizionali riconducibili a substrato geologico, se non nel sottosuolo profondo, verranno in seguito unicamente descritte le forme di superficie e sepolte, i terreni di copertura ed altri elementi geologici ed idrogeologici riportati in carta.

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. Come evidenzia la cartografia, nel territorio comunale di Vigarano

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Mainarda non sono presenti pozzi o sondaggi con profondità tali da poter raggiungere il substrato geologico.

In relazione agli altri tematismi previsti per la carta geologico tecnica si precisa che, vista la scarsità di dati geognostici sul sottosuolo profondo, non è stato possibile ricostruire in pianta le isobate relative all'andamento della superficie considerata come substrato 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, e quindi ritenuti non utili, se non addirittura forvianti, ai fini della ricostruzione dell'andamento della superficie piezometrica.

Allo studio sono, infine, allegate due sezioni geologiche considerate rappresentative del modello di sottosuolo sia superficiale che profondo (si veda Allegato 1).

La sezione profonda (traccia A-A' - Tavola 2), estratta dalla "Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (Martelli *et al.*, 2017)", mostra l'assetto stratigrafico delle principali unità litologiche 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 e profili sismici, mentre le unità sono state interpretate sia in chiave più strettamente stratigrafica, mediante l'utilizzo di unità a limiti inconformi, sia in chiave idrogeologica in termini di gruppi acquiferi (v. Allegato 1 – sezione A-A').

L'altra sezione, più superficiale (traccia B-B' - Tavola 2), mostra 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). Questa sezione, pubblicata in Stefani *et al.*, 2018, è stata ottenuta mediante correlazione di decine di indagini penetrometriche e sondaggi a carotaggio continuo, contenuti nella banca dati geognostica regionale.

8.2.2 Forme di superficie e sepolte

Tra le numerose "Forme di superficie e sepolte" elencate negli Standard MS 4.1 (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2018), nel territorio di Vigarano Mainarda sono stati individuati solo assi di paleoalveo, rappresentati con la simbologia proposta dal Dipartimento della Protezione Civile.

Gli assi di paleoalveo riportati in carta evidenziano l'andamento di antichi alvei di origine appenninica o di Po oggi sepolti a debole profondità. 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 l'analisi di prove geognostiche di repertorio e di nuova esecuzione.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

8.2.3 Terreni di copertura

Nella porzione affiorante della successione sedimentaria quaternaria sono state distinte varie unità, ciascuna associata ad una classe stabilita mediante l'*Unified Soil Classification System (U.S.C.S. modificato, ASTM, 1985)*. Questo sistema di classificazione geotecnica dei terreni è applicabile alla maggioranza dei sedimenti non consolidati ed è frequentemente utilizzato sia in ambito geologico che ingegneristico. Le unità sono rappresentate in carta tramite colori e codici alfabetici, corrispondenti alle classi di rappresentazione e archiviazione geo-informatica *del U.S.C.S.* Il codice (e.g. SMes) è formato da una prima parte maiuscola, che descrive i caratteri granulometrici e litotecnici, seguita da una porzione minuscola, indicante l'interpretazione paleoambientale. In base a questa classificazione, sono state definite tre unità, che presentano diverso comportamento meccanico e differente suscettibilità a liquefazione cosismica:

- **SMes - sedimenti sabbiosi di alveo**

L'unità è formata da sabbie medie e fini poco addensate e con granulometria poco assortita, comprendenti una frazione fine limosa anche significativa. Questi sedimenti registrano il riempimento di canali fluviali di Po e, nella parte meridionale del territorio, di Reno. I corpi sedimentari principali di Po presentano una larghezza fra i 300 e 800 m, spessori che possono superare i 10 m e tendono ad avere granulometrie relativamente più grossolane e minore contenuto in fine rispetto ai sedimenti sabbiosi di Reno. Questi ultimi formano corpi di minori dimensioni, con larghezza di 200-500 m e spessori medi di circa 8 m. I depositi di canale di entrambi i fiumi sono talvolta sigillati da corpi più fini, limoso-argillosi, che registrano fasi di abbandono del flusso fluviale. Questi corpi fini affioranti di modesto spessore non sono stati distinti in carta per ragioni di scala e rappresentazione cartografica.

I corpi sabbiosi di Po e di Reno formano ancor oggi dossi elevati su cui si sviluppano gli abitati di Vigarano Pieve e Vigarano Mainarda.

I depositi sabbiosi di alveo sono caratterizzati da elevati livelli di permeabilità idraulica, in particolare nella direzione di allungamento dei corpi. Al contempo questi corpi sono suscettibili a fenomeni di liquefazione cosismica in grado di innescare movimenti gravitativi di espansione laterale e franamento (*lateral spreading*) in presenza di accentuate morfologie dossive.

- **MLes - sedimenti di argine naturale**

Sono formati da alternanze di sabbie fini limose, limi inorganici, 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 gradazione diretta o lamine parallele. Questi corpi fiancheggiano i corpi di paleoalveo maggiore descritti nel punto precedente e di essi viene

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

rappresentata in carta solo la porzione prossimale, più granulare e sabbiosa. Essa sfuma rapidamente in sedimenti coesivi più fini, anche ove l'espressione geomorfologica del corpo abbia ancora caratteri tipicamente arginali.

I sedimenti di argine sono caratterizzati da una permeabilità media, che aumenta in genere avvicinandosi ai corpi di paleoalveo principale. Essi sono anche potenzialmente suscettibili a fenomeni di liquefazione cosismica.

- **Olpi - sedimenti fini di piana interalvea**

Consistono di argille, argille limose, argille limose organiche, diffusamente bioturbate, a plasticità generalmente medio-bassa, depositi in ambienti di piana inondabile e depressione interalvea. Queste aree erano soggette a consistenti apporti sedimentari fini, durante episodi di piena e tracimazione fluviale. Quando i sedimenti di questa unità fiancheggiano direttamente corpi di paleoalveo, possono inglobare subordinate intercalazioni di limi e limi sabbiosi, frequentemente amalgamati dalla bioturbazione. Questi sedimenti formano la maggior parte dell'area comunale. A sud dell'antico alveo del Po di Vigarano Pieve questi sedimenti sono interamente di provenienza appenninica e mostrano spesso una più elevata frazione limosa. A nord dello stesso paleoalveo i sedimenti hanno età antica e presentano una più ridotta componente limosa, tipica dei depositi di provenienza padana.

I sedimenti coesivi di piana interalvea sono in generale caratterizzati da permeabilità assai ridotta.

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)

In questa tavola, a scala 1:10.000, 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.

Tali punti sono tematizzati con colori diversi in relazione al valore di ampiezza massima del picco di H/V. Ampiezze superiori a 3,5 sono restituite in colore rosso, mentre in arancio e giallo sono rappresentati valori di ampiezza compresi tra 2,5 e 3,5; ampiezze inferiori a 2,5 sono invece indicate in verde.

I differenti simboli grafici, cerchi e rombi, indicano rispettivamente le indagini realizzate a supporto del presente studio (Tabella 4-2) e quelle di repertorio acquisite da singoli professionisti o recuperate dagli archivi comunali (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 dalla D.G.R. n. 630/2019.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Le misure di microtremore analizzate mostrano un picco di frequenza prevalente compreso tra 0,53 e 0,75 Hz. Almeno un secondo picco, a frequenze più basse (< 0,5 Hz), è inoltre visibile in gran parte delle misure eseguite sul territorio comunale.

Dall'analisi delle ampiezze dei picchi rilevati per frequenze maggiori di 0,5 Hz è possibile notare come, nella zona nord, nei pressi della frazione Diamantina, i valori di ampiezza della frequenza di picco siano sempre molto elevati, con variazioni comprese tra 5.5 e 7. Nelle restanti aree del territorio comunale le ampiezze relative alle frequenze di picco nello stesso intervallo sono sempre decisamente inferiori e compresi tra 2,5 e 3,5.

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

La carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), 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 a scala 1:10.000, mostra la suddivisione del territorio comunale in zone suscettibili di amplificazioni locali e zone suscettibili di instabilità. Sono invece completamente assenti zone classificabili come stabili. Nella tavola sono riportate anche le ubicazioni dei punti di misura di rumore ambientale - *noise* (si veda la Tavola 3, paragrafo 8.3) e le forme di superficie e sepolte già descritte nel paragrafo 8.2 (Tavola 2). 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 di rappresentazione già citati.

Le cinque zone cartografate come instabili presentano tutte problematiche legate a potenziali fenomeni di liquefazione e sono quindi state rappresentate in carta mediante apposito retino e relativo prefisso identificativo 3050. Sono state inoltre identificate due microzone suscettibili di sola amplificazione locale a cui sono stati attribuiti i codici 2006 e 2007.

Di seguito sono riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici delle diverse Microzone (Figura 8-1) e le relative descrizioni sulla base delle quali sono state definite le classi zonali. Le descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

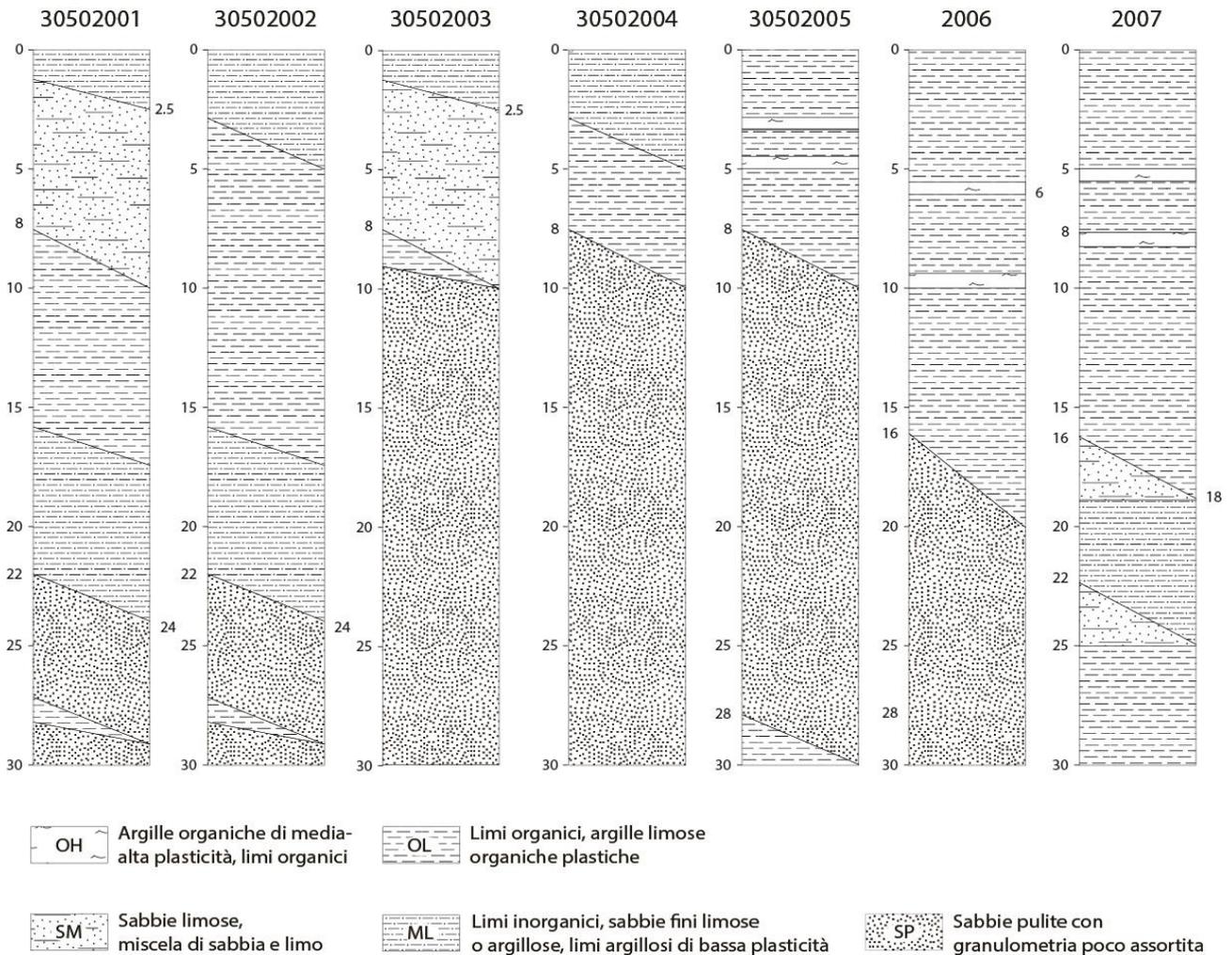


Figura 8-1 - Colonne stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti che costituiscono i primi 30 metri nelle diverse zone MOPS individuate nel territorio comunale.

Zona 30502001

Sabbie e sabbie fini limose poco addensate e liquefacibili dello spessore medi di circa 8 m, poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e subordinatamente torbose. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità. Alla base sono presenti sabbie addensate grossolane prevalentemente pulite organizzate in corpi lenticolari di spessore massimo di 3 - 4 m.

Zona 30502002

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 5 m, poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e subordinatamente torbose. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi,

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità. Alla base sono presenti sabbie addensate grossolane prevalentemente pulite organizzate in corpi lenticolari di spessore massimo di 3 - 4 m.

Zona 30502003

Sabbie e sabbie fini limose poco addensate e liquefacibili dello spessore massimo di 10 m poggiano su sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite. I due intervalli sabbiosi possono essere localmente separati da un'intercalazione di argille limose.

Zona 30502004

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 5 m, poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e subordinatamente torbose. Seguono sabbie medio grossolane spesso pulite e superiormente potenzialmente liquefacibili.

Zona 30502005

Argille organiche plastiche con livelli di torbe con spessori complessivi di 8 - 10 m poggiano su sabbie medio-grossolane spesso pulite e superiormente liquefacibili. Alla base dell'intervallo sabbioso possono essere presenti livelli di argille limose consolidate.

Zona 2006

Argille organiche plastiche con livelli di torbe e argille limose di bassa plasticità con spessori complessivi di 16-20 m poggiano su sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 2007

Argille organiche plastiche con intercalazioni limose e livelli di torbe poggiano su limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità con intercalazioni di sabbie in corpi lenticolari di spessore massimo di 3 - 4 m. Le intercalazioni sabbiose sono presenti al disotto dei 15 m di profondità.

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

La carta della velocità delle onde volumetriche di taglio mostra, a scala 1:10.000, i 36 punti di misura di Vs utilizzati per lo studio di microzonazione sismica ed i rispettivi valori di V_{S30} .

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Tali valori 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	
SCPTu	23	MASW	12
		ESAC-SPAC	1

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 le indagini indirette forniscano generalmente valori lievemente sovrastimati rispetto a quelli derivati da misure dirette tipo cono sismico (SCPTu).

La distribuzione e l'andamento dei valori di V_{s30} , in genere non inferiori a 170 m/s e mediamente superiori a 180 m/s, appare coerente 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 da 6 a 17)

Le carte di microzonazione sismica di terzo livello rappresentano gli elaborati finali di sintesi dello studi. Le cartografie sono state realizzate in accordo con quanto previsto dalla D.G.R. 630/2019, adottando le simbologie previste dagli standard di rappresentazione ed archiviazione informatica (versione 4.1) utilizzati a livello nazionale per la microzonazione sismica.

Le tavole dalla 6 alle 13, realizzate in scala 1:10.000, riportano la classificazione delle aree in base all'amplificazione attesa per prefissati periodi di vibrazione, quantificata tramite fattori parametrici espressi sia in termini di accelerazione (SA o FA) sia di pseudovelocità o intensità di Housner¹ (SI o FH):

- PGA (Tavola 6) - fattori di amplificazione espressi come rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0);
- $FH_{0,1-0,5}$ (Tavola 7) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI0) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;

¹ 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 VIGARANO MAINARDA

- $FH_{0,5-1,0}$ (Tavola 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;
- $FH_{0,5-1,5}$ (Tavola 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;
- $FA_{0,1-0,5}$ (Tavola 10) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA_0) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;
- $FA_{0,4-0,8}$ (Tavola 11) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA_0) per periodi compresi tra 0,4 e 0,8 secondi;
- $FA_{0,7-1,1}$ (Tavola 12) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA_0) per periodi compresi tra 0,7 e 1,1 secondi;
- $FA_{0,5-1,5}$ (Tavola 13) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA_0) per periodi compresi tra 0,5 e 1,5 secondi.

Le tavole dalla 14 alle 17, realizzate in scala 1:10.000, riportano invece la classificazione delle aree rispetto alla distribuzione del parametro H_{SM} (Naso *et al.*, 2019) e del parametro H che esprimono, rispettivamente, lo scuotimento in accelerazione (cm/s^2) atteso al sito per gli intervalli di periodi $0,1s \leq T \leq 0,5s$, $0,4s \leq T \leq 0,8s$, $0,7s \leq T \leq 1,1s$ e $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

I fattori di amplificazione e i valori di H_{SM} utilizzati per la redazione delle carte (Tabella 8-3, Tabella 8-4, Tabella 8-5, Tabella 8-6, Tabella 8-7, Tabella 8-8, Tabella 8-9) sono stati derivati da analisi di risposta sismica locale (paragrafo 7.1.1 e 7.1.3). Le analisi sono state eseguite tenendo conto delle diversità litotecniche delle microzone individuate e dell'assetto tettonico del territorio. I coefficienti ottenuti dalle modellazioni numeriche eseguite nelle sette macro aree (Tabella 8-3, Tabella 8-4, Tabella 8-5, Tabella 8-6, Tabella 8-7, Tabella 8-8, Tabella 8-9) sono stati confrontati con quelli proposti dagli abachi regionali (v. paragrafo 7.1.2). La sostanziale coerenza e compatibilità riscontrata ha fornito una validazione dei modelli utilizzati per la risposta sismica locale e ha permesso di caratterizzare le macro aree con i rispettivi fattori di amplificazione e valori di H_{SM} , calcolati per diversi periodi di vibrazione.

FA_{PGA}	$FH_{(0.1-0.5)}$	$FH_{(0.5-1.0)}$	$FH_{(0.5-1.5)}$	$FA_{(0.1-0.5)}$	$FA_{(0.4-0.8)}$	$FA_{(0.7-1.1)}$	$FA_{(0.5-1.5)}$	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
1,59	2,01	2,09	2,06	1,90	2,09	2,12	2,06	499	313	180	166

Tabella 8-3 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione settentrionale del territorio comunale (Diamantina), con MOPS 30502005, dove il substrato rigido è presente entro i 200 m di profondità.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

FA_{PGA}	$FH_{(0.1-0.5)}$	$FH_{(0.5-1.0)}$	$FH_{(0.5-1.5)}$	$FA_{(0.1-0.5)}$	$FA_{(0.4-0.8)}$	$FA_{(0.7-1.1)}$	$FA_{(0.5-1.5)}$	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
1,49	1,80	2,38	2,43	1,66	2,19	2,57	2,39	468	352	234	206

Tabella 8-4 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione centro - settentrionale del territorio comunale (Vigarano Pieve), con MOPS 30502003, dove il substrato rigido è presente entro i 350 m di profondità.

FA_{PGA}	$FH_{(0.1-0.5)}$	$FH_{(0.5-1.0)}$	$FH_{(0.5-1.5)}$	$FA_{(0.1-0.5)}$	$FA_{(0.4-0.8)}$	$FA_{(0.7-1.1)}$	$FA_{(0.5-1.5)}$	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
1,59	2,17	2,24	2,32	1,93	2,46	2,25	2,30	546	395	204	197

Tabella 8-5 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione centrale del territorio comunale, con MOPS 2006, dove il substrato rigido è presente entro i 500 m di profondità.

FA_{PGA}	$FH_{(0.1-0.5)}$	$FH_{(0.5-1.0)}$	$FH_{(0.5-1.5)}$	$FA_{(0.1-0.5)}$	$FA_{(0.4-0.8)}$	$FA_{(0.7-1.1)}$	$FA_{(0.5-1.5)}$	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
1,40	1,76	2,56	2,62	1,56	2,49	2,64	2,60	471	429	255	239

Tabella 8-6 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione centro - meridionale del territorio comunale (Vigarano Mainarda), con MOPS 30502001, dove il substrato rigido è presente entro i 600 m di profondità.

FA_{PGA}	$FH_{(0.1-0.5)}$	$FH_{(0.5-1.0)}$	$FH_{(0.5-1.5)}$	$FA_{(0.1-0.5)}$	$FA_{(0.4-0.8)}$	$FA_{(0.7-1.1)}$	$FA_{(0.5-1.5)}$	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
1,51	2,00	2,48	2,54	1,79	2,48	2,55	2,52	543	427	247	232

Tabella 8-7 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione centro - meridionale del territorio comunale (Vigarano Mainarda), con MOPS 30502002, dove il substrato rigido è presente entro i 600 m di profondità.

FA_{PGA}	$FH_{(0.1-0.5)}$	$FH_{(0.5-1.0)}$	$FH_{(0.5-1.5)}$	$FA_{(0.1-0.5)}$	$FA_{(0.4-0.8)}$	$FA_{(0.7-1.1)}$	$FA_{(0.5-1.5)}$	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
1,39	1,72	2,39	2,41	1,55	2,26	2,48	2,40	468	389	241	221

Tabella 8-8 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione meridionale del territorio comunale (Coronella e Madonna Boschi), con MOPS 30502005, dove il substrato rigido è presente entro i 700 m di profondità.

FA_{PGA}	$FH_{(0.1-0.5)}$	$FH_{(0.5-1.0)}$	$FH_{(0.5-1.5)}$	$FA_{(0.1-0.5)}$	$FA_{(0.4-0.8)}$	$FA_{(0.7-1.1)}$	$FA_{(0.5-1.5)}$	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
1,45	1,81	2,49	2,51	1,64	2,34	2,59	2,50	496	405	252	231

Tabella 8-9 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione meridionale del territorio comunale (Coronella e Madonna Boschi), con MOPS 2007, dove il substrato rigido è presente entro i 700 m di profondità.

Nelle cartografie elencate sono riportate sia le zone suscettibili di amplificazioni locali sia quelle suscettibili di instabilità. Queste ultime vengono distinte per mezzo di soprassegni cartografici che indicano sia la tipologia di instabilità cosismica attesa, ossia fenomeni di liquefazione, sia il grado di rischio, identificando zone di suscettibilità per le liquefazioni (ZS_{LQ}) e zone di rispetto (ZR_{LQ}). Le zone di rispetto per le liquefazioni sono caratterizzate da rischio molto elevato e devono essere assoggettate a specifici approfondimenti.

Nelle tavole cartografiche sono, infine, rappresentati anche i valori puntuali delle stime del potenziale di liquefazione eseguite sulle singole verticali d'indagine. Considerata la buona disponibilità di prove penetrometriche elettriche ed il maggior grado di affidabilità degli indici da esse ottenute si è ritenuto di

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

non riportare in carta indici derivati da verifiche effettuate su prove penetrometriche meccaniche. I valori di I_L ottenuti sono espressi 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 ($I_L > 15$).

9 Commenti finali e criticità

Gli approfondimenti di terzo livelli eseguiti nell'ambito dello studio 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) estrapolate da misure effettuate in foro sino ad elevate profondità.

Questo ha consentito di attribuire ad ogni porzione di territorio comunale indagata fattori di amplificazione per prefissati periodi di vibrazione, sia in termini di accelerazione sia di pseudovelocità (paragrafo 8.6).

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 (NTC2018), 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 del progetto da realizzare, in accordo con le suddette Norme Tecniche.

Per la determinazione del rischio di liquefazione sono state, infine, eseguite diverse verifiche di suscettibilità mediante metodi semplificati. Sulla base dei risultati ottenuti il metodo di Boulanger e Idriss (2014) è stato considerato affidabile e maggiormente cautelativo, rispetto ad altri di letteratura, e dunque utilizzato per il calcolo degli indici di liquefazione I_L (paragrafo 7.2.1).

Nei paragrafi seguenti viene proposta una sintesi delle principali criticità emerse dallo studio, oltre ad una analisi di come i caratteri geologici ed evolutivi dell'area abbiano determinato la stretta correlazione tra rischio liquefazione ed insediamento antropico. Infine sulla base dei risultati ottenuti vengono fornite indicazioni per la riduzione del rischio sismico a supporto dei nuovi strumenti di pianificazione territoriale ed urbanistica).

9.1 Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale

La parte inferiore dei corpi indagati è costituita da **sedimenti pleistocenici** di media pianura alluvionale (Figura 9-1), deposti durante fasi dell'ultima glaciazione.

Nella porzione meridionale del territorio comunale questi depositi sono costituiti da alternanze di sabbie di provenienza appenninica e grossi volumi di limi, con Vs comprese tra 200 e 250 m/sec. La profondità del tetto stratigrafico dei corpi sedimentari singlaciali aumenta procedendo verso sud a causa delle deformazioni indotte dalla subsidenza differenziale.

Nella parte centrale e settentrionale del territorio, i depositi pleistocenici singlaciali sono, invece, formati da estesi corpi di sabbie grossolane del Po con Vs anche superiori ai 300 m/s.

Secondo i criteri stratigrafici adottati dalla cartografia nazionale del Progetto CARG, i sedimenti descritti del Pleistocene terminale sono inquadrati nella parte superiore del Subsistema di Villa Verucchio (AES7). Nelle aree meridionali la parte iniziale dei **sedimenti post-glaciali** è ancora costituita da limi di provenienza appenninica, con subordinate intercalazioni di corpi di sabbie di canale fluviale (Figura 9-1). 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. Procedendo verso nord la successione limosa post-glaciale di provenienza appenninica si assottiglia notevolmente, sino a chiudersi in prossimità dell'abitato di Vigarano Pieve, dove spessi corpi di sabbie di Po di età storica si saldano direttamente a quelle singlaciali (Figura 9-1). Nella fascia più settentrionale del territorio indagato la porzione precoce dei sedimenti successivi alla glaciazione risulta probabilmente in lacuna. I sedimenti post-glaciali appena descritti costituiscono la porzione inferiore del Subsistema di Ravenna (AES8).

I sedimenti più recenti, deposti negli ultimi 5.000 anni, sono infine dominati da fanghi argillosi organici di origine sia appenninica che padana con frequenti orizzonti di torbe (Figura 9-1) deposti in ambienti di piana inondabile e palude continentale. Questi depositi coesivi presentano proprietà geotecniche mediocri e sono caratterizzati dai più bassi valori di Vs con minimi attorno ai 100 m/s.

Le ampie aree interfluviali furono attraversate da varie generazioni di canali di Reno e di Po, che hanno deposto importanti corpi allungati di sabbie, sabbie limose e limi di riempimento di canale, fiancheggiati da argini limoso-sabbiosi, che risultano più sviluppati nella parte meridionale del territorio comunale. Particolarmente evidenti sono il corpo di paleoalveo di Reno, che attraversa gli abitati di Borgo, Vigarano Mainarda e Fondo Reno, e quello di Po negli abitati di Tortiola e Vigarano Pieve.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

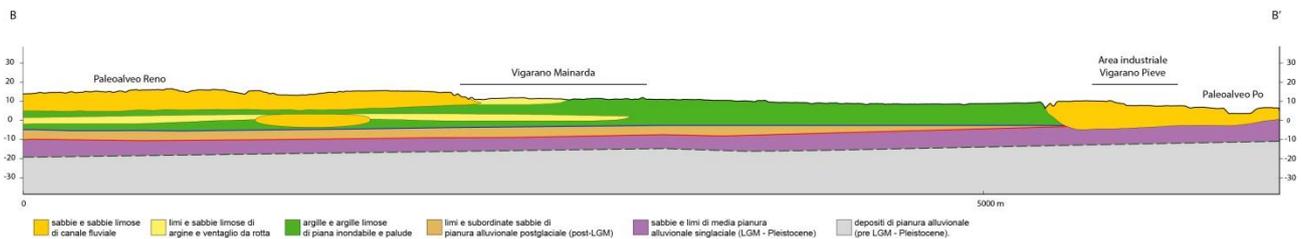


Figura 9-1 - Sezione geologica superficiale B-B' (v. Allegato 1) in cui sono evidenziati i rapporti geometrici dei corpi sedimentari costituenti la porzione sommitale dei terreni di copertura.

9.2 Microzonazione sismica e criticità

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

- la porzione più settentrionale del territorio** risente degli effetti del pronunciato alto strutturale, costituito da un'anticlinale complessa, segmentata da faglie inverse nord-vergenti e retroscorrimenti, la cui culminazione si trova in corrispondenza di Casaglia. La deformazione della struttura tettonica ha determinato il sollevamento delle unità marnose mioceniche sino alla profondità di circa 200 m, ed una riduzione a poche decine di metri di spessore delle unità del Quaternario Marino, anch'esse attribuite al substrato sismico. Su substrato poggiano, in discordata angolare, le successioni sedimentarie del Quaternario continentale, dominate da sabbie fluviali medio-grossolane, intercalate ad intervalli minori di fanghi di pianura alluvionale. Questa porzione di territorio, che si sviluppa a nord di Vigarano Pieve nei pressi di Diamantina, **è caratterizzata dai più alti fattori di amplificazione del moto sismico per periodi di vibrazione compresi tra 0.1-0.5 s** (paragrafo 7.1.1 e 8.6). Al contrario, rispetto alle restanti aree del territorio esaminato, mostra i minori coefficienti di amplificazione rispetto ai periodi di vibrazione più elevati.
- la parte centrale del territorio** comunale corrisponde alla monoclinale immergente verso sud che raccorda la sinclinale meridionale con l'anticlinale complessa, sviluppata nell'area di Casaglia. I caratteri stratigrafici appaiono intermedi rispetto a quelli delle aree contigue con un rapida riduzione verso nord degli spessori di tutte le unità deposizionali e la progressiva scomparsa delle torbiditi plioceniche. L'intervallo superiore del Quaternario mostra un forte aumento degli apporti di Po a discapito di quelli appenninici che rimangono confinati nell'area di Vigarano Mainarda. Come per i caratteri stratigrafici,

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

la fascia centrale del territorio comunale compresa tra Vigarano Pieve e Vigarano Mainarda **presenta fattori di amplificazione del moto sismico intermedi** rispetto alle aree a meridione ed a settentrione.

- c) **la porzione meridionale del territorio** comunale è interessata dalla presenza di una sinclinale compresa nelle pieghe ferraresi. 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. Le potenti successioni di arenarie torbiditiche plioceniche, sono ricoperte da fanghi marini di prodelta e sabbie di fronte deltizio padano, che costituiscono la parte inferiore delle successioni quaternarie, ad insieme al Pliocene sono state attribuite al substrato sismico. Ad esse si sovrappongono spessi depositi prevalentemente continentali ricchi di apporti di Po e superiormente di Reno ed altri fiumi appenninici. Questa porzione di territorio in cui si sviluppano gli ambiti urbani di Vigarano Mainarda, Madonna Boschi e Coronella è **caratterizzata da minori fattori di amplificazione del moto sismico per periodi di vibrazione compresi tra 0.1-0.5 s** (paragrafo 7.1.1 e 8.6) ed elevati **coefficienti di amplificazione per i periodi di vibrazione compresi tra 0.1-1.5 s**

Rispetto ai precedenti studi di Microzonazione Sismica (cfr. Ordinanza 70/2012), sono stati completamente rivisti i coefficienti di amplificazione, che sono stati estesi a periodi di vibrazione in precedenza non considerati e formulati non solamente in termini di pseudovelocità ma anche di accelerazione.

La rimodulazione dei fattori di amplificazione è stata dettata dai risultati delle risposte sismiche locali, che hanno determinato coefficienti di amplificazione non troppo dissimili da quelli proposti dai nuovi abachi regionali introdotti con la D.G.R. 630/2019. Questi abachi sono però completamente diversi da quelli della D.A.L. 112/2007 utilizzati per la redazione delle precedenti carte di microzonazione sismica e ciò rende alquanto difficoltoso un confronto con i nuovi elaborati in termini di amplificazione del moto sismico.

Per il **calcolo del potenziale di liquefazione** delle diverse aree indagate 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) per 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 di Reno e di Po affioranti** presso Borgo, Vigarano Mainarda, Tortiola e Vigarano Pieve, **o dove i corpi sabbiosi di Po sono sepolti a più debole profondità**, come accade sia negli ambiti meridionali di Madonna Boschi e Coronella, sia a settentrione presso Diamantina. Queste fasce, formate da sabbie limose poco addensate di riempimento di canale (MOPS 30502001, 30502002, 30502003, 30502005), mostrano potenziali di liquefazione generalmente elevati con I_L compresi tra 7 e 15.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Questa analisi trova conferma negli effetti di liquefazione osservati nel 2012 in località Borgo e Tortiola rispettivamente sviluppate sui corpi dossivi di paleoalveo del Reno e del Po. I gradienti topografici dei dossi fluviali contribuiscono ad aggravare i rischi connessi alla liquefazione, favorendo l'insorgere di movimenti gravitativi di espansione laterale e franamento cosismico, come ampiamente verificato nel 2012 negli abitati più a sud di San Carlo e Mirabello.

Fasce a rischio di liquefazione moderano bordano, invece, i corpi di alveo affioranti di Po e Reno. Queste zone (MOPS 30502004) costituite da limi e sabbie fini limose di argine e ventaglio da rotta mostrano indici di liquefazione I_L variabili tra 2 e 5.

Rischi di liquefazione da molto bassi a nulli ($I_L < 2$) caratterizzando invece le **aree 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 2006 e MOPS 2007).

Le aree a minor rischio corrispondono, in genere, ad **aree rurali** scarsamente abitate. Fasce classificate a **rischio liquefazione non significativo** ($I_L < 2$) interessano tuttavia **buona parte l'abitato di Vigarano Mainarda e la zona industriale meridionale di Vigarano Pieve**.

Gli indici ottenuti dalle nuove analisi di liquefazione hanno permesso di aumentare notevolmente le conoscenze relative al grado di rischio liquefazione nell'area di studio.

Raffronti con i preesistenti studi di microzonazione sismica risultano complessi sia per il numero limitato di verticali precedentemente analizzate, sia per l'utilizzo di differenti metodi semplificati e parametri di input per la stima del potenziale di liquefazione.

Gli approfondimenti di terzo livello hanno, infine, permesso la ridefinizione del bedrock sismico sulla base dei risultati delle misure di microtremore e delle velocità delle onde di taglio (V_s) acquisite in foro sino ad elevate profondità (Di Capua e Tarabusi 2013, Minarelli *et. al.* 2016). Tali misure, correlate con i dati stratigrafici utilizzati per la definizione della sezione Cento - Occhiobello (Allegato 1, sezione A-A'), hanno permesso di porre il maggior contrasto di impedenza in corrispondenza del tetto dei depositi torbiditici pliocenici nelle aree meridionali, e delle unità marnose mioceniche in quelle più settentrionali.

Questa superficie, che identifica il bedrock sismico delle analisi numeriche, si trova sepolta a profondità assai variabili, con quote comprese tra i 700 metri della fascia meridionale ed i 200 metri di profondità di quella più settentrionale. Tale condizione è stata determinata dalla deformazione tettonica che dal Pliocene ha condizionato l'evoluzione di questo settore della Pianura Padana.

Nelle analisi numeriche eseguite per la definizione dell'amplificazione del moto sismico è stata inoltre considerata una seconda superficie di discordanza stratigrafica, meno profonda e associata ad un contrasto

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

di impedenza minore ma comunque significativo. Questa superficie marca il tetto dell'unità del Quaternario Marino che, a causa dei movimenti tettonici sinsedimentari, si rinvergono nel sottosuolo a profondità molto variabili, comprese tra i 350 m dei settori meridionali ed i 150 metri delle aree più settentrionali. Vista l'età geologica e la profondità di seppellimento, per queste unità sono state considerate rigidità e velocità delle onde di taglio prossime al valore limite di soglia del substrato rigido.

9.3 Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione

Nella pianura ferrarese, emerge una forte correlazione fra la distribuzione dell'edificato, la viabilità storica e le zone a più elevato potenziale di liquefazione, in quanto i fattori che hanno controllato l'insediamento antropico storico sono gli stessi che hanno prodotto i corpi sabbiosi liquefacibili.

In questi vasti territori di bassa pianura, i limitati gradienti morfologici e la natura pensile degli alvei rendono, da sempre, 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 ed i dossi di paleoalveo costituivano le sole strutture stabilmente emerse e drenate, generalmente percorribili anche nei periodi più umidi. La natura continua degli alvei fluviali consentiva lo sviluppo di percorsi e strade, mentre gli alvei attivi rappresentavano vie di trasporto fluviale. La presenza di una falda freatica all'interno dei corpi arginali consentiva l'approvvigionamento idrico attraverso pozzi, fornendo al contempo acqua agli apparati radicali delle piante, coltivabili anche in 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 argine ed alveo. In epoca più recente, a seguito delle bonifiche idrauliche e dello sviluppo economico e tecnologico, l'impatto di questi condizionamenti territoriali si è fortemente ridotto, anche se la storica correlazione fra zone liquefacibili ed insediamento permane in parte. Infatti gli insediamenti moderni tendono a svilupparsi intorno ai centri preesistenti e buona parte della rete stradale attuale, ad eccezione di quella sovregionale, ripercorre percorsi storici su corpi di paleoalveo.

9.4 Indicazioni per la riduzione del rischio sismico

Le norme regionali in materia urbanistica e riduzione del rischio sismico prevedono che le risultanze degli studi della microzonazione sismica debbano essere recepite negli strumenti di pianificazione territoriale (P.U.G.), 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 VIGARANO MAINARDA

In base alle principali criticità emerse dagli approfondimenti di terzo livello sul Comune di Vigarano Mainarda, si indicano in sintesi le analisi e le indagini ritenute necessarie per la realizzazione di studi geologici a supporto dei diversi livelli di pianificazione territoriale (POC/PUA) ed in fase esecutiva di opere e progetti. L'analisi delle numerose indagini raccolte ha evidenziato come la presenza di livelli sabbiosi e limo-sabbiosi saturi risulti principalmente distribuita lungo le direttrici dei paleovalvei di Reno e di Po affioranti o dove i corpi sabbiosi di quest'ultimo sono sepolti a più debole profondità, come accade sia negli ambiti meridionali di Madonna Boschi e Coronella, sia a settentrione presso Diamantina.

L'evoluzione dei reticoli idrografici del Po e del Reno, 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.

La definizione dei limiti delle aree potenzialmente suscettibili di liquefazione presenta pertanto inevitabili incertezze legate all'imperfetta conoscenza del sottosuolo, nonostante il numero elevato di indagini presenti nel territorio. L'incertezza diviene maggiore in aree con scarsità di dati o con informazioni non accurate.

Per tali ragioni su tutto il territorio comunale si raccomanda l'esecuzione di specifici approfondimenti volti ad accertare la presenza di orizzonti potenzialmente liquefacibili, mediante campagne di indagini geognostiche che comprendano prove penetrometriche a piezocono spinte almeno sino alla profondità di 20 m. Tali indagini garantiscono, infatti, un'affidabile valutazione del potenziale di liquefazione attraverso metodi semplificati e una quantificazione dei cedimenti post-sismici.

Il calcolo dell'indice di potenziale di liquefazione (I_L) dovrà tenere conto dei metodi e dei parametri di input utilizzati nel presente studio (paragrafo 7.2.1). Scelte meno cautelative dovranno essere adeguatamente motivate anche attraverso approfondite indagini sul contesto idrogeologico locale e sulle soggiacenze minime della falda.

Qualora le stime semplificate di suscettibilità a liquefazione indichino un rischio elevato dovranno essere considerati sondaggi geognostici con prelievo di campioni indisturbati dei terreni granulari, da sottoporre ad analisi granulometriche e prove cicliche di laboratorio, al fine di quantificare l'effettiva suscettibilità alla liquefazione. Queste prove dovranno essere considerate a priori qualora si rinvenissero spessori significativi di depositi liquefacibili e in caso di interventi edilizi strategici e rilevanti previsti dalla pianificazione. Anche le più sofisticate analisi di liquefacibilità sono comunque sempre rappresentative di volumi di terreno limitati, specie in un contesto come quello di pianura in cui la variabilità laterale dei caratteri stratigrafici e sedimentologici risulta particolarmente elevata. L'estendere valutazioni puntuali di suscettibilità alla liquefazione ad aree limitrofe, può risultare quindi alquanto incerto e rischioso.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Dovranno perciò essere previste indagini in tipologia e numero adeguato all'estensione dell'area considerata ed alla rilevanza delle opere da realizzare.

Per quanto riguarda la definizione dell'azione sismica di progetto, come indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, si raccomanda venga effettuata mediante analisi di risposta sismica locale, soprattutto in presenza di terreni potenzialmente liquefacibili.

A tal proposito si precisa che le modellazioni e le analisi di risposta sismica eseguite in questo studio (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 con presenza di spessori significativi di depositi con caratteristiche geotecniche scadenti (bassi valori di C_u e alto indice plastico), concentrati in particolare nelle microzone 2006 e 2007 (paragrafo 8.4 - Tavola 4) dovranno essere proposte adeguate campagne di indagini geotecniche in sito e di laboratorio, per la valutazione e la quantificazione di possibili cedimenti post-sismici.

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.
- Affatato A., Baradello L., Petronio L., Barbagallo A., Sorgo D., Cristofano G., Lovo M., Maffione S., Pasciullo V., Caputo R., Stefani M., Abu Zeid N., (2019): *Prospezioni sismiche in ambiente urbano a supporto della pianificazione territoriale - parte profonda*. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, Vol. 60, supplemento 2, pp. s68-s74
- Albarelo 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 VIGARANO MAINARDA

- 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 VIGARANO MAINARDA

- 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 187 - Codigoro*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- 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 Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 205 - Comacchio*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- 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, (2018): *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1*.
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

- 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 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*.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 17050/2016: *Approvazione allegato A recante "elenco dei comuni destinatari dei contributi per studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite di emergenza di cui all'O.C.D.P.C. 293/2015 e D.C.D.P.C. del 14 dicembre 2015 (Delibera di Giunta della Regione Emilia-Romagna n. 573/2016) e attribuzione dei contributi*.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 630/2019: *Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. 24/2017)*.
- 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/ingvdpc2014projetto2/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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

- 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 (2018): *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: 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-DISS3.2.1.
- D.M. n. 14/2008: *Norme Tecniche per le Costruzioni*. Decreto del Ministero delle Infrastrutture del 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.
- D.M. n. 17/2018: *Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"*. Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 17 gennaio 2018. Supplemento Ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20/02/2018 – Serie generale, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato S.p.A., Roma.
- 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.
- Geotema S.r.l., (2015): *Carta geologica di superficie del Comune di Ferrara e note illustrative*. https://servizi.comune.fe.it/attach/territorio/docs/qc1_2_4_carta_geologica_note.pdf.
- Geotema S.r.l., (2016): *Carta Geomorfologica Provincia di Ferrara*. <http://www.ferraradeltapo-unesco.it/>.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

- 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.
- 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.
- Laurenzano G., Priolo E., Barnaba C., Gallipoli M. R., Klin P., Martelli L., Mucciarelli M., Romanelli M.; (2013): *Studio sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito ai fini della microzonazione sismica di alcuni comuni della regione Emilia-Romagna*. Rel. OGS 2013/74 Sez. CRS 26, dd. 31 luglio 2013.
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

- L.R. Emilia-Romagna n. 24 del 21 dicembre 2017: *Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio*. Bollettino Ufficiale Regione Emilia-Romagna n. 340 del 21 dicembre 2017.
- Lo Presti D., Meisina C., Squeglia N., (2009): *Applicabilità di prove penetrometriche statiche nella ricostruzione del profilo stratigrafico*. Rivista Italiana di Geotecnica, 2/2009, pag. 9-33.
- 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.
- Mascandola C., Massa M., Barani S., Lovati S., Santulin M., (2017): *Long-Period Amplification in Deep Alluvial Basins and Consequences for Site-Specific Probabilistic Seismic-Hazard Analysis: An Example from the Po Plain (Northern Italy)*. Bulletin of the Seismological Society of America 107 (2): 770-786. <https://doi.org/10.1785/0120160166>.
- Mascandola C., Massa M., Barani S., Albarello D., Lovati S., Martelli L., Poggi V., (2019): *Mapping the Seismic Bedrock of the Po Plain (Italy) through Ambient-Vibration Monitoring*. Bulletin of the Seismological Society of America 109 (1): 164-177. <https://doi.org/10.1785/0120180193>.
- 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/ingvdpcprojects1/home>.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

- 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.
- Milana, G., P. Bordoni, F. Cara (2014). *1D velocity structure of the Po River plain (Northern Italy) assessed by combining strong motion and ambient noise data*. Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 2195; doi:10.1007/s10518-013-9483-y.
- 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.
- Molinari F. C., Boldrini G., Severi P., Dugoni G., Rapti Caputo D. & Martinelli G., (2007): *Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara*. In: Dugoni G. & Pignone R. (Eds.), *Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara*. DB-MAP, Firenze, 7-61.
- 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*.
- Naso G., Martelli L., Baglione M., Brammerini F., Castenetto S., D'Intinosante V., Ercolessi G., (2019): *Maps for land management: from geology to seismic hazard*. Boll. Geof. Teor. Appl., Vol. 60, DOI 10.4430/bgta0263.
- Ori G.G., Friend P.F., (1984): *Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets*. Geology, 12, 475-478.
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

Progetto ViDEPI (2009-2021): *Visibilità dei dati afferenti all'attività di esplorazione petrolifera in Italia.*

Ministero dello sviluppo economico DGRME - Società Geologica Italiana - Assomineraria.
www.videpi.com.

Rathje E. M, Kottke A. (2013) - *Strata*, <https://nees.org/resources/strata>.

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., 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.

Robertson P. K., Cabal K.L., (2012): *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*, 5th Edition, Gregg Drilling & Testing, Inc.

Robertson P.K., Campanella R.G., Gillespie D., Greig J. (1986): *Use of piezometer cone data*. In In-Situ'86 Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering, GSP 6, ASCE, Reston, Va., Specialty Publication, SM 92, pp. 1263-1280.

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.

Stefani S., Minarelli L., Fontana A., Hajdas I., (2018): *Regional deformation of late Quaternary fluvial sediments in the Apennines foreland basin (Emilia, Italy)*. Int. J. Earth Sci. 107 (7), 2433-2447. <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1606-x>.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI VIGARANO MAINARDA

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.

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 dei terreni	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica	Tavola 4	1:10.000
Carta delle 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) - $FH_{0,1-0,5s}$	Tavola 7	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FH_{0,5-1,0s}$	Tavola 8	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FH_{0,5-1,5s}$	Tavola 9	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FA_{0,1-0,5s}$	Tavola 10	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FA_{0,4-0,8s}$	Tavola 11	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FA_{0,7-1,1s}$	Tavola 12	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FA_{0,5-1,5s}$	Tavola 13	1:10.000
Allegato 1 - Sezioni Geologiche		
Allegato 2 - Rapporti di Prova		
Allegato 3 - Verifica Potenziale di Liquefazione CPTu		