



**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 Crevalcore (BO)**



## Relazione Illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Geotema S.r.l.	26/02/2021

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

## 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 .....	6
2.1	Sismicità storica .....	8
2.1.1	La sequenza del 2012 .....	10
2.2	Sorgenti sismogenetiche .....	13
3	Assetto geologico e geomorfologico dell'area .....	16
3.1	Quadro geografico geomorfologico .....	16
3.2	Contesto geologico stratigrafico .....	18
3.3	Contesto strutturale .....	20
4	Dati geognostici e geofisici .....	24
4.1	Indagini di repertorio.....	25
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica .....	26
4.2.1	Indagini realizzate in situ .....	27
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 .....	42
6.3	Terreni suscettibili di liquefazione .....	45
7	Metodologie di elaborazione e risultati.....	47
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali .....	47
7.1.1	Risposta sismica locale con modellazioni numeriche.....	48
7.1.2	Confronto tra analisi di risposta sismica locale e abachi regionali.....	93
7.1.3	Calcolo del parametro $H_{SM}$ .....	94
7.2	Zone instabili soggette a liquefazione .....	96
7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione .....	97
8	Elaborati cartografici.....	103
8.1	Carta delle indagini (Tavola 1) .....	104
8.2	Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica (Tavola 2) .....	104
8.2.1	Elementi geologici ed idrogeologici.....	105

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

8.2.2	Terreni di copertura.....	106
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3) .....	107
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4).....	107
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	109
8.6	Carte di microzonazione sismica (Tavole da 6 a 17).....	110
9	Commenti finali e criticità.....	113
9.1	Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale.....	113
9.2	Microzonazione sismica e criticità.....	115
9.3	Indicazioni per la riduzione del rischio sismico .....	117
10	Bibliografia .....	120
11	Allegati .....	127

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

<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. geol. Massimiliano Fazzini dott. Davide Franciosi
<i>Creazione geodatabase dei dati geologici e geotecnici:</i>	dott. geol. Luca Minarelli dott. geol. Andrea Pavanati
<i>Elaborazione tavole cartografiche:</i>	dott. geol. Luca Minarelli dott. geol. Andrea Pavanati
<i>Elaborazione dei dati stratigrafici:</i>	prof. Marco Stefani dott. geol. Luca Minarelli
<i>Esecuzione ed elaborazione misure HVSR:</i>	dott. geol. Luca Minarelli

## 1 Introduzione

Il percorso di microzonazione sismica del Comune di Crevalcore 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 Crevalcore i contributi per la realizzazione del presente studio di adeguamento agli standard 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

Lo studio di microzonazione sismica di terzo livello del Comune di Crevalcore è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nella D.G.R. n. 630 del 29 aprile 2019.

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

- *"Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1"*, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2018), da qui in avanti *"Standard MS 4.1"*;
- *"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:

- 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)"*;
- D.M. del 16 gennaio 2018 *"Norme Tecniche per le Costruzioni"*;

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

- 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 infine (D.G.R. n. 630/2019) tali studi, necessari per la redazione e l’approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (L.R. 24/2017), devono interessare le aree urbanizzate e quelle potenzialmente sottoposte a trasformazioni urbanistiche, comprese le porzioni delle reti infrastrutturali principali. Gli ambiti interessati dagli approfondimenti di terzo livello di microzonazione sismica ricalcano quelli utilizzati nei precedenti studi (Ordinanza 70/2012), in accordo con quanto stabilito con il Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna e con l’Area Tecnica e assetto del Territorio del Comune di Crevalcore.

### 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:

- **17 Tavole cartografiche**, compiutamente descritte al capitolo 8;
- **6 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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

macrosismici che strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  o magnitudo  $\geq 4.0$  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  $\geq 5$  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;
- 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;



## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

- 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 Crevalcore 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 Crevalcore il database contiene 32 record relativi ad eventi sismici storici; data l'ampia mole di dati presenti, si è deciso di prendere in considerazione solamente quelli riportanti intensità macrosismiche  $IMCS \geq 5$  (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 Macroseismic 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

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

Tabella 2-2.

IN OCCASIONE DEL TERREMOTO DEL:										EFFETTI
DATA						AREA EPICENTRALE	NMDP	$I_0$	$M_w$	IMCS CREVALCORE
Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se					
1909	01	13	00	45		Emilia-Romagna orientale	867	6-7	5.36	V
1951	05	15	22	54		Lodigiano	179	6-7	5.17	V
1971	07	15	01	33	2	Parmense	228	8	5.51	V
1996	10	15	09	55	5	Pianura emiliana	135	7	5.38	V
2012	05	20	02	03	5	Pianura emiliana	53	7	6.09	VI

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

2012	05	29	07	00	0	Pianura emiliana	87	7-8	5.90	VI-VII
------	----	----	----	----	---	------------------	----	-----	------	--------

Tabella 2-1 - Valori di intensità macrosismica osservati nel Comune di Crevalcore, in occasione dei principali eventi, tratti dal database DBMI15 (Locati *et al.*, 2016).

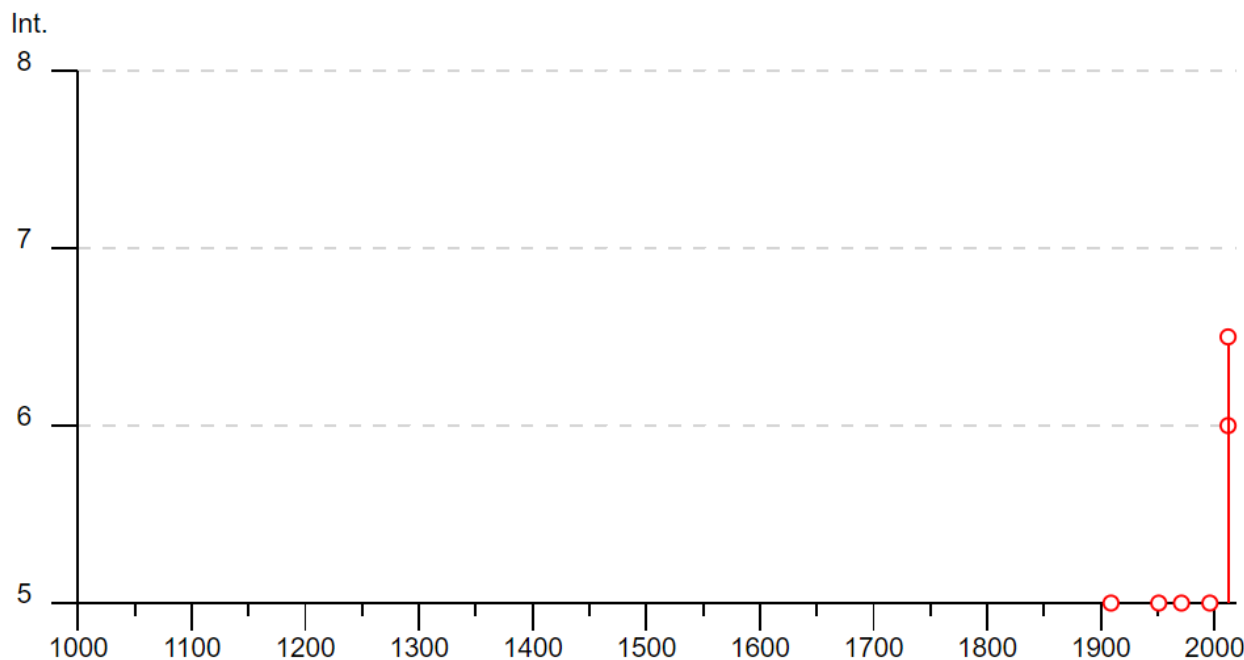


Figura 2-1 - Valori di intensità macrosismica  $I_{MCS} \geq 5$  attribuite al Comune di Crevalcore, dall'anno 1000 al 2017, tratte dal database DBMI15 (Locati *et al.*, 2016).

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

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

Come è possibile notare dai dati disponibili, i più recenti terremoti a maggiore intensità con epicentro nelle vicinanze dell'area di studio sono quelli che si sono verificati il 20 ed il 29 maggio 2012, con valori di intensità macrosismica osservati nel territorio comunale rispettivamente di VI grado e di VI-VII grado.

La Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento (INGV, 2004) mostra, per l'area in esame, un'accelerazione massima attesa su suolo rigido compresa tra 0,100 - 0,150 g, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Figura 2-2).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

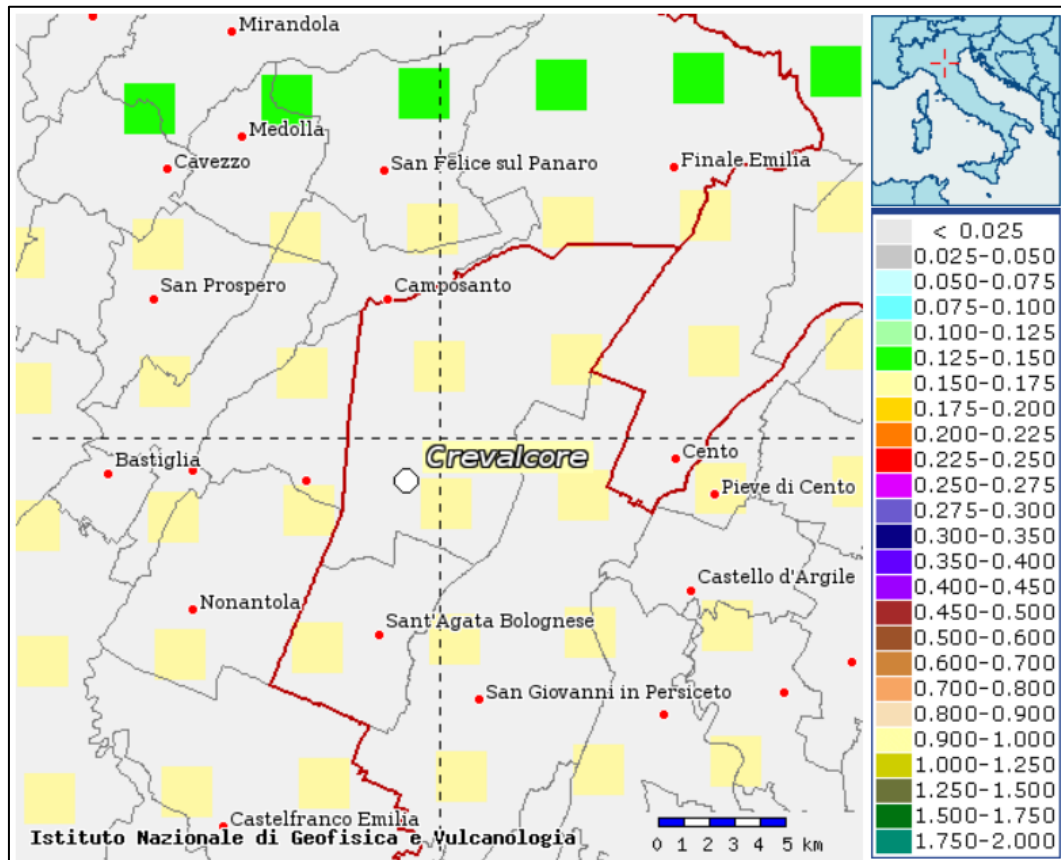


Figura 2-2 - Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento nell'intorno dell'area di studio.

### 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  $M_w$  6.1, 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 2-3), mentre la seconda, di  $M_w$  5.9, 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 2-3) (ISIDe Working Group 2016).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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 2-3), ed oltre 3.700 scosse di  $M_w \geq 1.5$  (Figura 2-3). Per l'area del Comune di Crevalcore è stata particolarmente rilevante la forte scossa avvenuta nella mattinata del 29 maggio, che ha prodotto accelerazioni superiori agli altri eventi registrati e conseguenti gravi danni associati.

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).

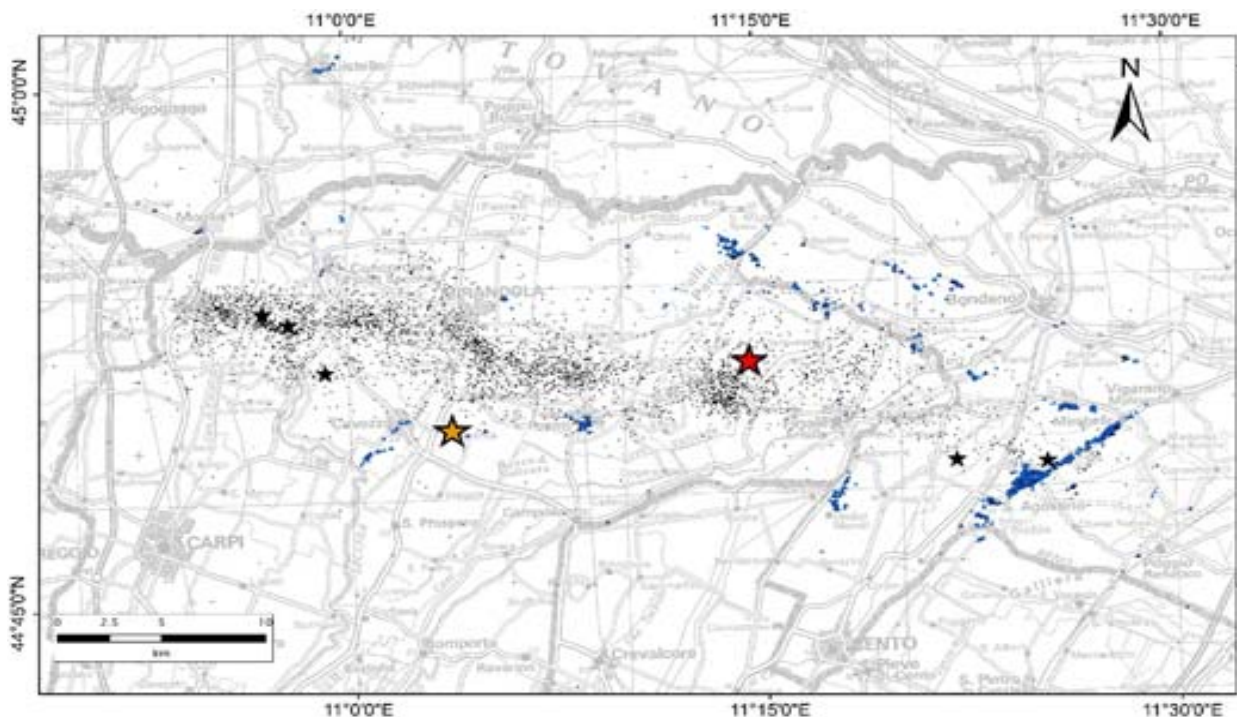


Figura 2-3 - Sequenza sismica emiliana del 2012. Le stelle rosse e arancio rappresentano rispettivamente le scosse principali del 20 e 29 maggio. Le stelle nere riportano la localizzazione degli *aftershocks* con  $M_w \geq 5.0$ , mentre i piccoli punti neri indicano gli eventi con  $M_w \geq 1.5$ . I piccoli punti blu infine evidenziano le liquefazioni osservate (Caputo e Papathanassiou, 2012; Emergeo Working Group, 2012; GdL Liquefazione RER, 2012).

I rilievi macrosismici eseguiti immediatamente dopo le scosse (Galli *et al.*, 2012a e 2012b) hanno determinato, per il territorio di Crevalcore, valori di intensità macrosismica pari al VI e VII grado della scala MCS (Figura 2-4 e Figura 2-5).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

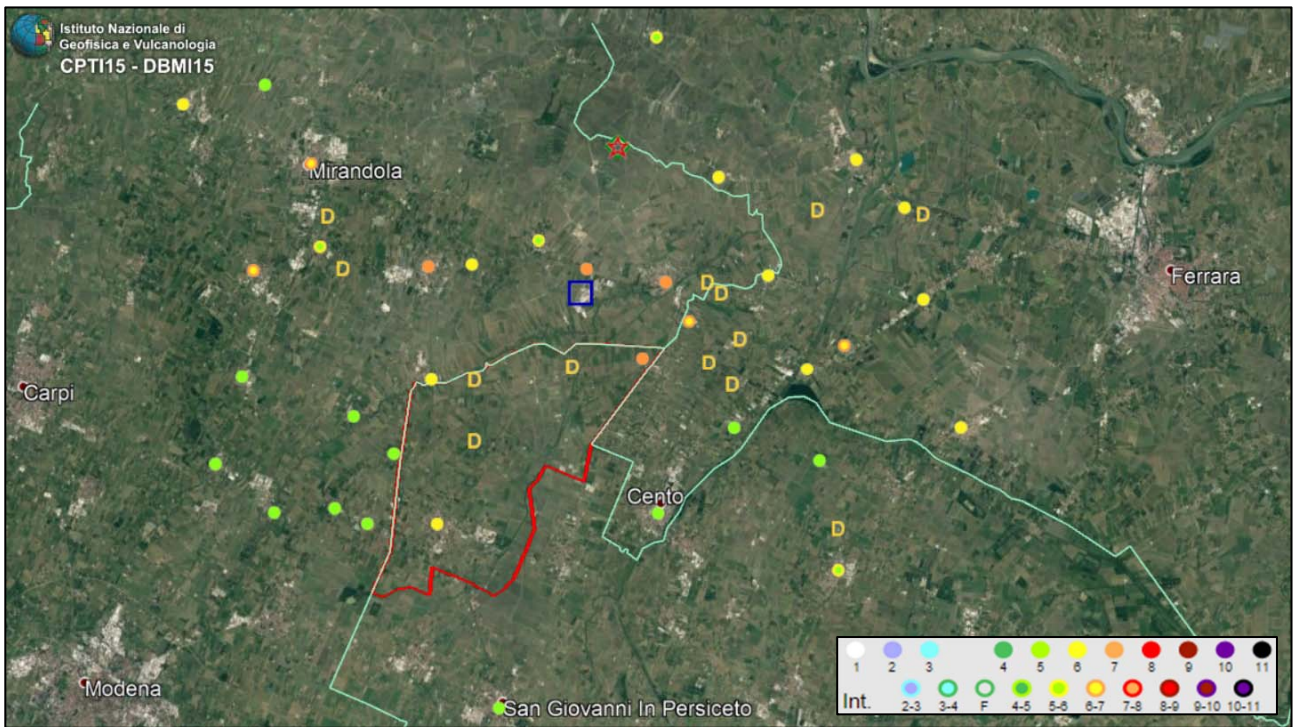


Figura 2-4 - Distribuzione degli effetti del sisma del 20 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il territorio di Crevalcore.

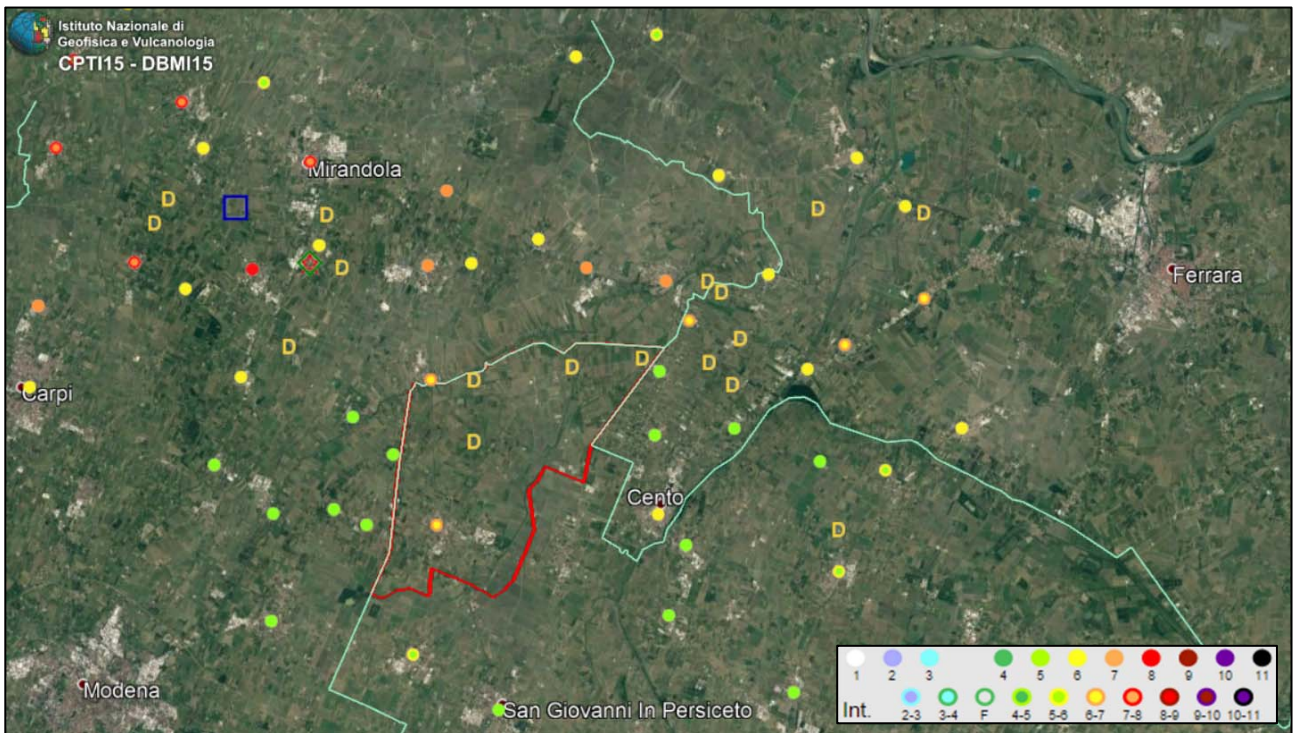


Figura 2-5 - Distribuzione degli effetti del sisma del 29 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il territorio di Crevalcore.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

Le scosse del 20 e 29 maggio 2012 hanno danneggiato gravemente il patrimonio edilizio del Comune di Crevalcore, in particolare quello storico e di uso pubblico.

Circa una trentina di edifici di carattere pubblico quali municipio, teatro, palazzi, chiese e oratori, sale civiche, cimiteri, scuole, ospedali e musei, hanno riportato una completa inagibilità con parziali crolli, che hanno principalmente interessato gli edifici più antichi.

Gli edifici ristrutturati in tempi recenti o di recente costruzione, alla pari con il patrimonio edilizio privato recente, hanno generalmente ben resistito al Sisma consentendo la prosecuzione dei servizi pubblici di base.

Il rilievo dei danni è stato effettuato tramite le Schede AeDES (Agibilità e danno nell'emergenza sismica) della Protezione Civile.

Dei 43 alloggi di Edilizia Residenziale Pubblica sottoposti ad indagine post sisma, il 37% ha registrato inagibilità risolvibili con interventi locali (Esito "B") mentre per il 7% è stata rilevata una inagibilità totale (Esito "E").

Per quanto concerne gli edifici privati danneggiati la verifica è stata effettuata su 1710 di essi, di cui 983 hanno ottenuto esito di inagibilità parziale e 582 inagibilità totale. La maggior parte dei danni di tipo "E" si è concentrata nel territorio rurale, caratterizzato da un patrimonio edilizio numericamente molto consistente, con edifici a marcata connotazione agricola di proporzioni volumetriche significative e quindi estremamente fragili.

Nel Centro Storico del Capoluogo il 35% degli edifici tutelati ha ottenuto esito di inagibilità totale senza tuttavia subire crolli, anche in relazione alla composizione ad elementi giustapposti in ambito di aggregati edilizi. Al di fuori del Centro Storico e nei centri minori più antichi, hanno principalmente interessato edifici disabitati o soggetti ad incuria e scarsa manutenzione.

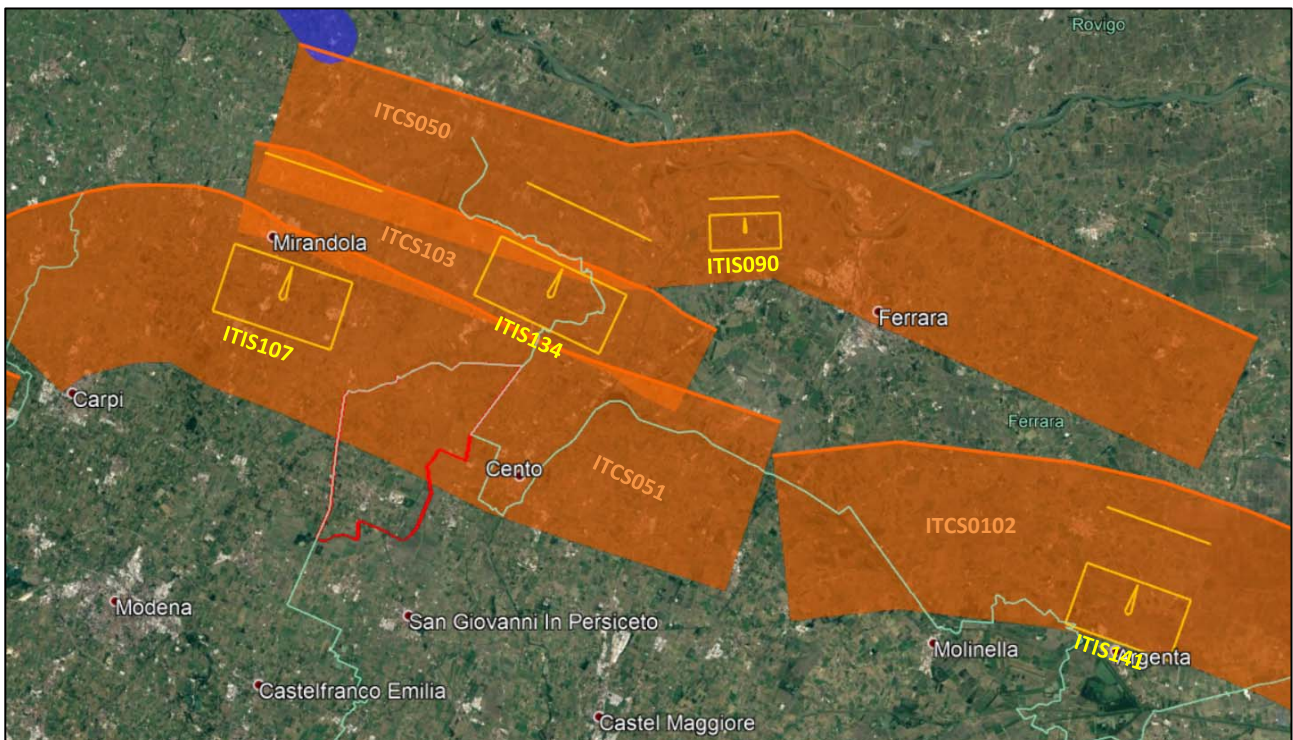
Gli edifici classificati come totalmente inagibili hanno dimostrato i classici danni su murature e solai, con rari crolli parziali che hanno principalmente interessato le coperture. Solo pochissimi edifici hanno richiesto la loro immediata demolizione dopo gli eventi.

## 2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS Working Group, 2018) mostra come il territorio comunale di Crevalcore sia interessato dalla presenza della sorgente sismogenetica composta Carpi-Poggio Renatico (ITCS051 - Figura 2-6).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

Tale struttura, che si estende con orientazione ovest - nord-ovest – est - sud-est, comprende la sorgente individuale di Mirandola (ITIS107) caratterizzata da magnitudo momento massima  $M_{w_{max}}$  pari a 6, profondità tra 2 e 10 km e slip-rate compreso tra 0,5 e 1,04 mm/anno. Questa sorgente, coincidente con il sovrascorrimento responsabile della scossa del 29 maggio 2012, era già conosciuta sia in base a prospezioni geologiche profonde sia mediante osservazione di anomalie nel reticolo idrografico.



**Figura 2-6 - 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 Crevalcore.**

L'area di studio è inoltre bordata a nord da altre due sorgenti sismogenetiche composite anch'esse approssimativamente orientate ovest - nord-ovest – est - sud-est e denominate Poggio Rusco-Migliarino (ITCS050) e Finale Emilia-Mirabello (ITCS103).

La prima struttura, che delimita il settore più esterno delle Pieghe Ferraresi, 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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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.

La seconda struttura invece comprende la sorgente individuale di Finale Emilia (ITIS134), 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.

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 Crevalcore ricade dentro alla Zona 912 "Dorsale Ferrarese", caratterizzata da un valore di  $Mw_{max}$  pari a 6,14 (Figura 2-7).

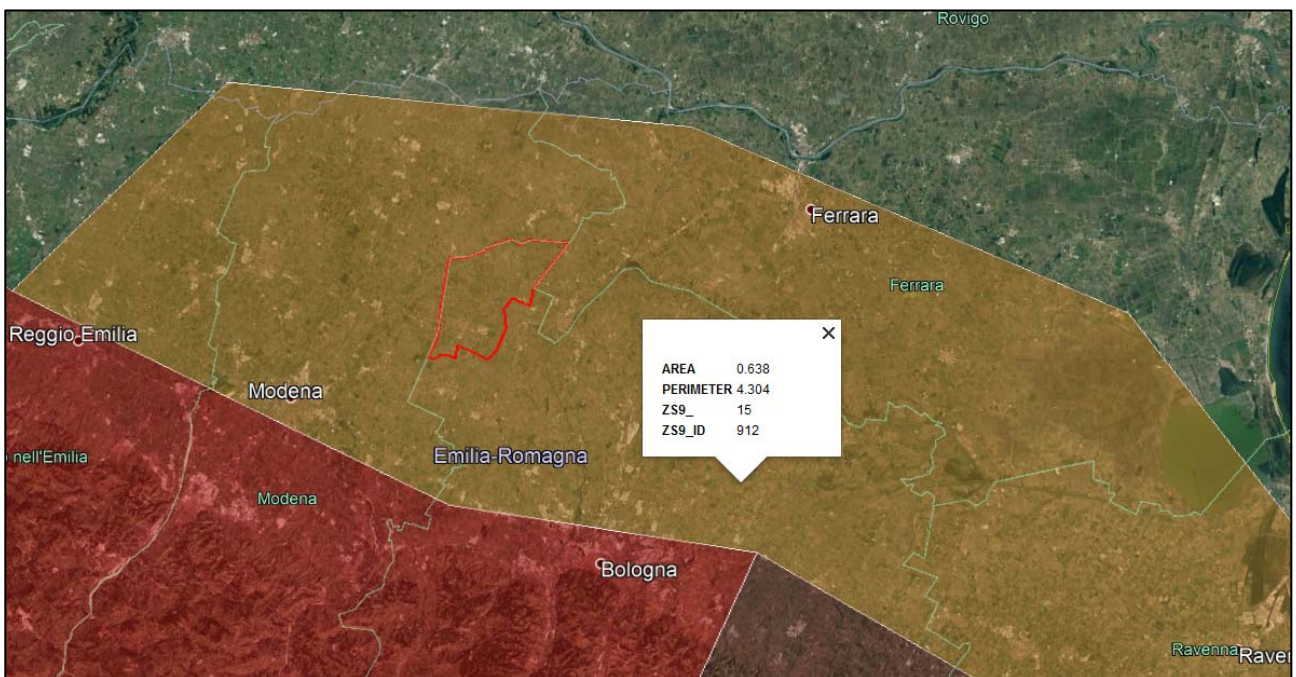


Figura 2-7 - Ubicazione del territorio comunale di Crevalcore (in rosso) rispetto alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

### 3 Assetto geologico e geomorfologico dell'area

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

#### 3.1 Quadro geografico geomorfologico

Il territorio analizzato forma la parte nord-occidentale della ex Provincia di Bologna, attualmente sostituita dall'ente amministrativo denominato "Città Metropolitana di Bologna". Il territorio, incuneato fra le provincie di Modena e di Ferrara, si sviluppa in un'area di bassa pianura alluvionale interamente formata da depositi di fiumi di provenienza appenninica, nella fascia di interferenza fra gli alvei e i canali di delta interno del Panaro e del Reno, di età prevalentemente medievale. Il territorio è caratterizzato da un microrilievo formato da modesti dossi fluviali associati a limitati corpi di argine naturale che sfumano in ampie depressioni interalvee. Questi caratteri risultano estremamente evidenti grazie alle tecniche di telerilevamento laser (LIDAR) che permettono una ricostruzione altimetrica di elevato dettaglio (Figura 3-1). Nel territorio considerato, non si osservano forme legate a depositi fluviali di età pre-medievale, in quanto tali sedimenti sono sempre sepolti nel sottosuolo.

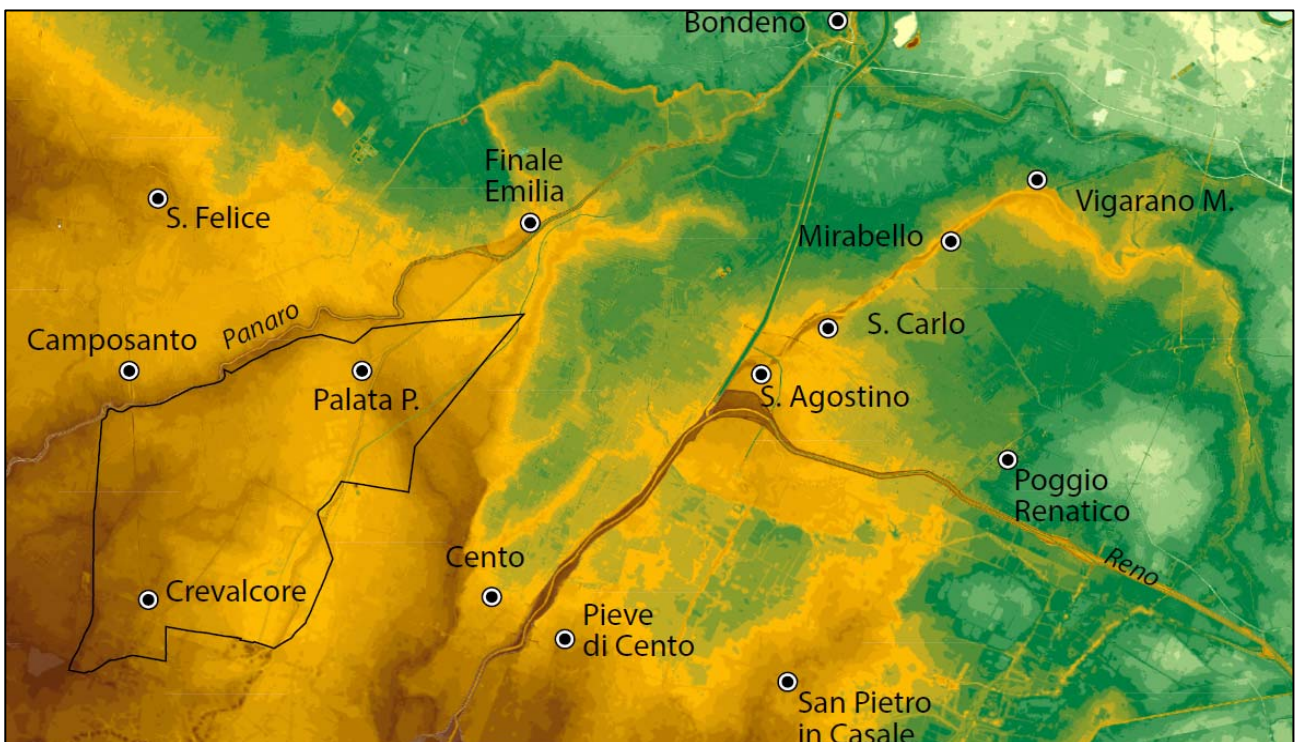


Figura 3-1 - Modello altimetrico LIDAR (dati Regione Emilia-Romagna). Evidenti appaiono i numerosi dossi del Reno allungati in direzione sud-ovest – nord-est e limitati da depressioni interalvee (in verde). Altrettanto riconoscibile è la struttura deltizia del Reno medioevale, con canali distributori ramificati sviluppatisi all'interno di ampio acquitrino continentale.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

I principali caratteri morfologici dell'area erano già stati individuati nella Carta Geomorfologica della Pianura Padana, scala 1:250.000 (Castiglioni G.B. Ed. 1999 - **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Nella carta sono infatti riportati i canali distributori che, prevenendo dal territorio modenese, formavano l'ampio sistema di delta interno del fiume Panaro, di età medievale. Questi canali, di modesta elevazione, sono circondati da estese depressioni interalvee, ben sviluppate a sud ed est di Crevalcore e nella parte settentrionale del territorio comunale.

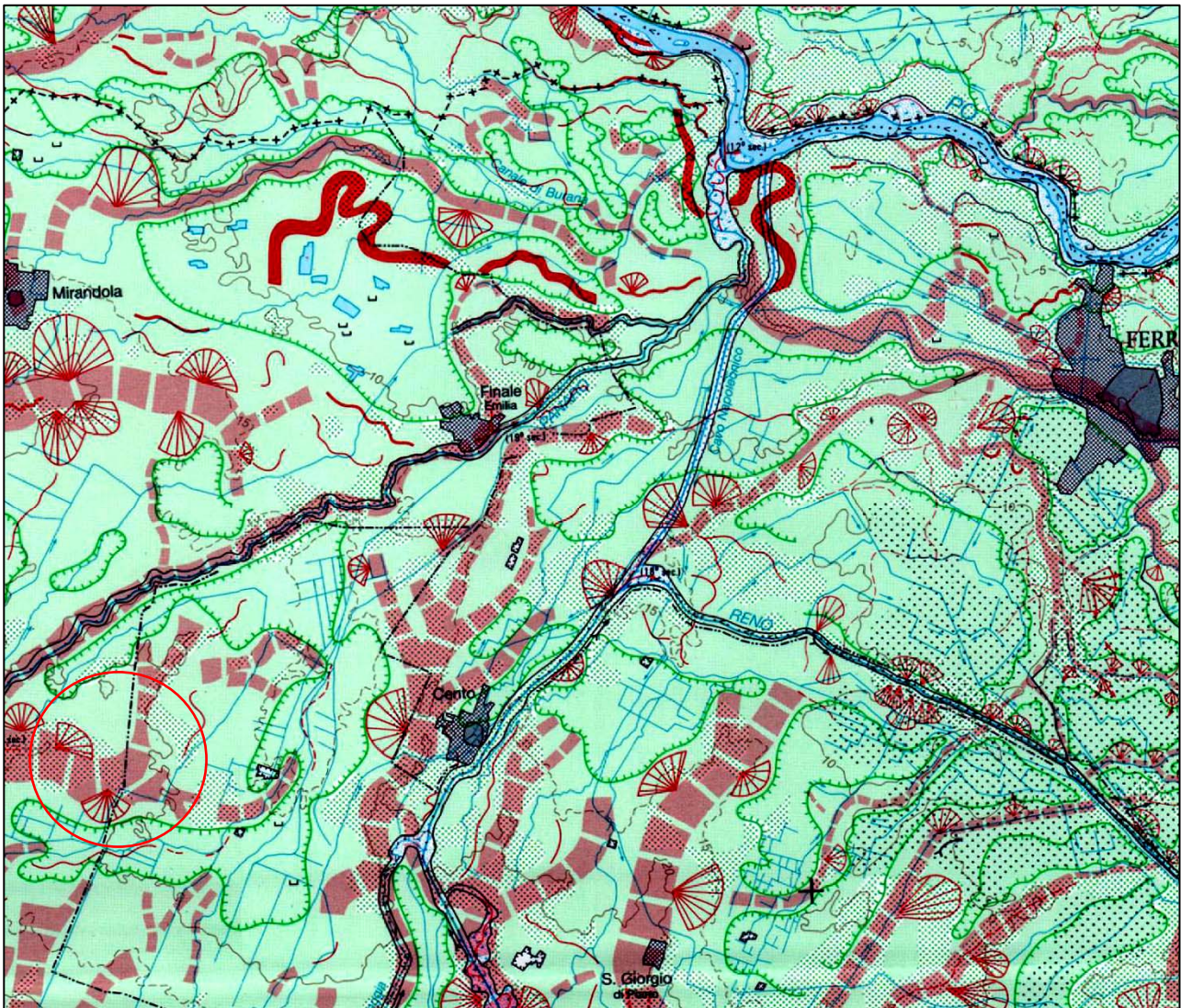


Figura 3-2 - Stralciamento dalla Carta Geomorfologica della Pianura Padana 1:250.000 (Castiglioni G.B. Ed. 1999) che illustra la complessa alternanza di corpi di paleoalveo (in rosso) e depressioni interalvee (in verde), talvolta limitate da piccole scarpate morfologiche (linee verdi).

### 3.2 Contesto geologico stratigrafico

Le conoscenze sulla geologia di superficie ed il primo sottosuolo del Comune di Crevalcore sono sostanzialmente legate agli studi effettuati per la redazione del Foglio Geologico CARG, scala 1:50.000, n.202 "San Giovanni in Persiceto" e delle relative note illustrative (Molinari e Pizzolo, 2009). Il Foglio è corredato di profili geologici che descrivono le prime decine di metri di sottosuolo, di cui uno passante poco a est del capoluogo comunale, in corrispondenza della località Beni Comunali. In superficie affiorano solo sedimenti di piana alluvionale, alimentati da fiumi appenninici, di età post-romana e quindi attribuiti, secondo i criteri della cartografia ufficiale CARG, all'Unità di Modena, AES8a.

Il territorio comunale è in gran parte interessato dai depositi di delta interno del fiume Panaro, di età medievale. Questo complesso sistema di canali si collega alla sponda destra dell'attuale alveo del Panaro nei pressi di Casoni, in comune di Bomporto. Un ramo piuttosto importante divergeva verso nord, in direzione di Camposanto, un altro fluiva verso est-sud-est, raggiungendo l'attuale località di Chiesolino della Ca' Rossa, ove si apriva in vari canali terminali, di cui il principale piegava nettamente verso nord, lambendo il centro storico di Crevalcore, per poi proseguire verso nord, superando Sammartini.

Poco a oriente di Crevalcore, si sviluppano invece corpi di riempimento di canali distributori di delta interno legati all'attività medievale del Reno, prima della sua migrazione a oriente di Cento.

L'attività sedimentaria fu particolarmente intesa in epoca altomedievale e poi diminuì progressivamente, cessando del tutto, in epoca piuttosto recente, solo dopo la robusta arginatura degli alvei del Panaro e del Reno. I sedimenti di riempimento di questi canali di delta interno, nel complesso piuttosto fini, sono costituiti da sabbie fini limose, passanti a limi sabbiosi e limi.

Nelle ampie aree interalvee, si sono accumulate vaste estensioni di argille limose, argille e argille torbose, sedimenti coesivi dalle proprietà geotecniche piuttosto scadenti. Nell'area di sedimentazione post-romana, che domina ampiamente il territorio indagato, l'unico centro antico di una certa rilevanza è Crevalcore, dato che le frequenti alluvioni e la mutevolezza del quadro idrografico ostacolavano l'insediamento storico. A meridione del territorio comunale indagato, nelle porzioni sud-occidentali del Foglio 202, affiorano sempre sedimenti di provenienza appenninica di età più antica, in buona parte legati all'attività del Panaro, di età pre-medievale. Tali depositi sono quindi attribuiti ad un intervallo del Subsistema di Ravenna AES8 precedente l'accumulo dell'Unità di Modena. In queste aree la sedimentazione si è interrotta in età pre-medievale, in parte pre-romana e vi si conserva quindi l'assetto prediale legato alla centuriazione agraria di età romana. In questa area di formazione relativamente più antica insistono gli importanti insediamenti

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

medievali di Nonantola, San Agata Bolognese e San Giovanni in Persiceto, in aree comunque lambite dai più giovani sedimenti dell'Unità di Modena AES8a.

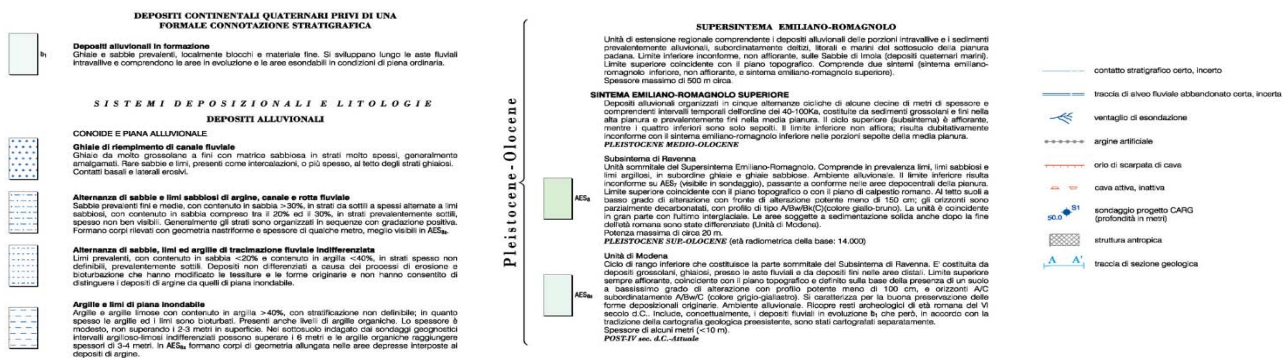
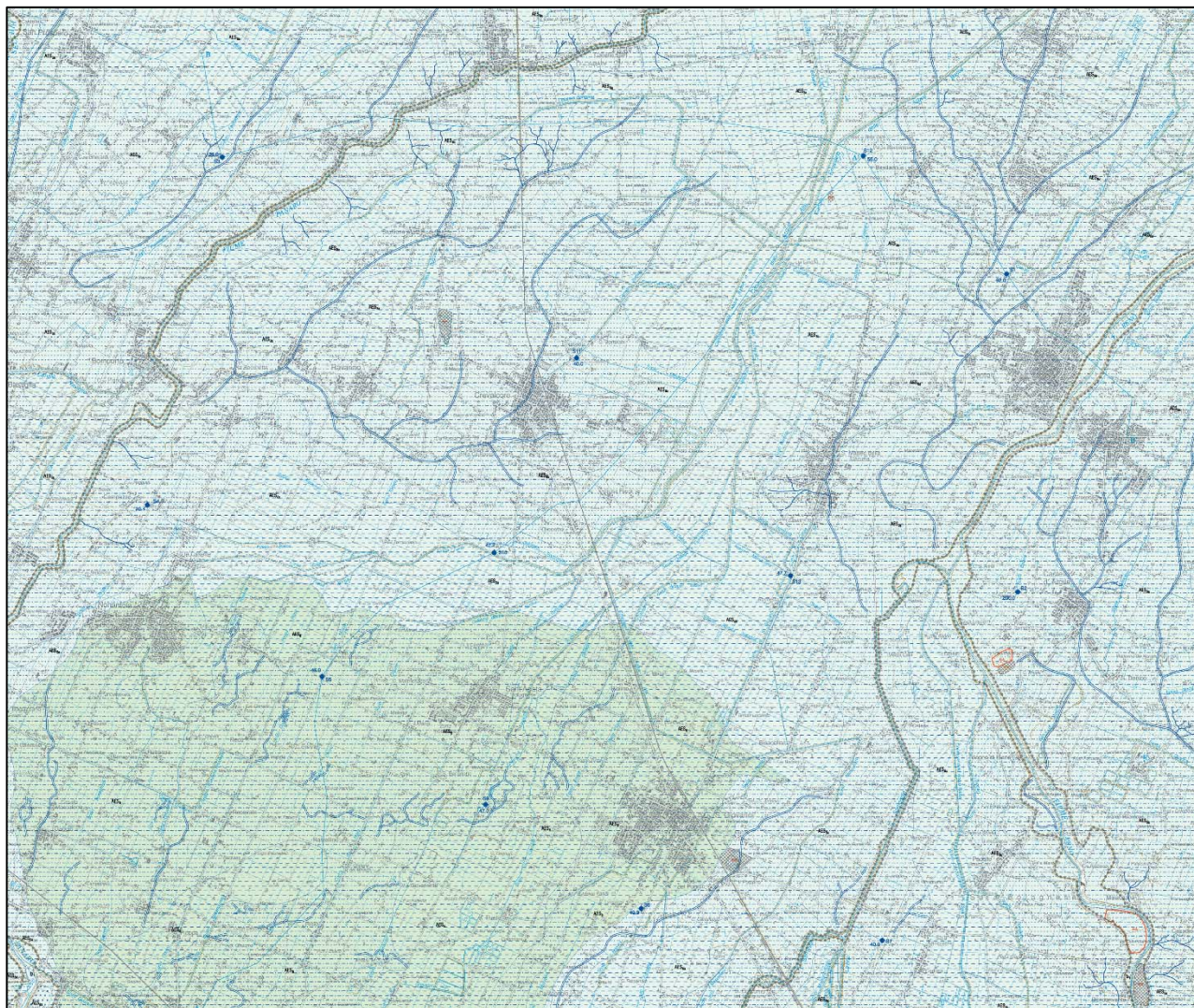


Figura 3-3 - Stralcio del Foglio CARG 202 "San Giovanni in Persiceto".

### 3.3 Contesto strutturale

L'area esaminata fa parte del bacino di Avanfossa dell'Appennino, sviluppata tra le colline pedemontane dell'Appennino settentrionale e i primi rilievi veneti.

L'assetto strutturale delle successioni sepolte sotto i sedimenti recenti della Pianura Padana è noto, nelle sue linee generali, grazie all'interpretazione di molti profili di sismica a riflessione e sondaggi profondi, realizzati per la ricerca di idrocarburi, in particolare da parte dell'AGIP. Il sottosuolo è caratterizzato da una complessa serie di piani di scollamento e sovrascorrimenti, con vergenza settentrionale, associati ad anticlinali di rampa e più ampie pieghe sinclinaliche, interposte fra i fasci di sovrascorrimento. Le prospezioni petrolifere hanno permesso di riconoscere una complessa serie di pieghe e sovrascorrimenti con geometria arcuata (Pieri e Groppi, 1975, 1981; Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002). All'interno delle pieghe che formano il fronte esterno della catena appenninica sepolta, è possibile distinguere (Pieri e Groppi, 1975) due fasci maggiori di pieghe, con convessità rivolta verso nord, denominati "Arco delle Pieghe Emiliane", a nord-ovest, ed "Arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole", ad sud-est (Figura 3-4). Queste strutture compressive hanno progressivamente coinvolto l'avanfossa appenninica in età geologica recente, tra il Neogene ed il Quaternario, con le strutture settentrionali deformatasi in modo particolare durante l'ultimo milione di anni.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

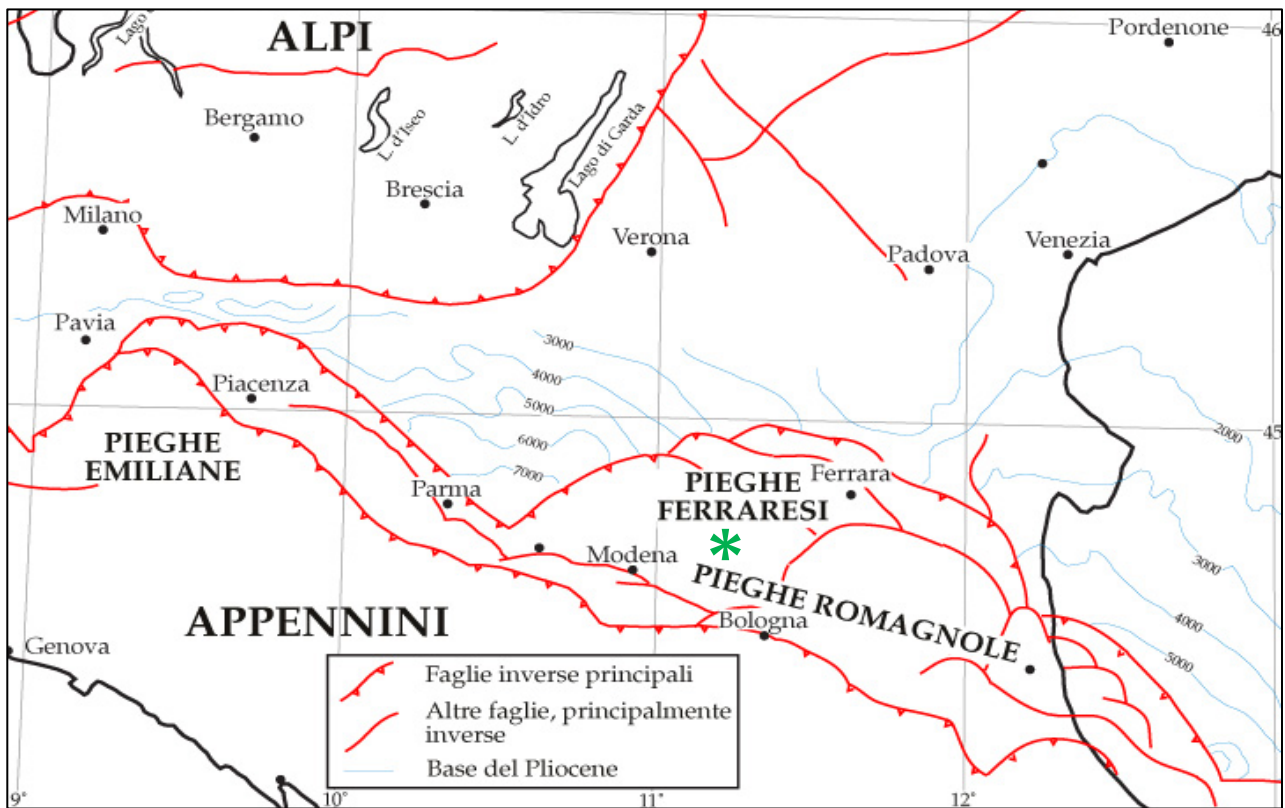


Figura 3-4 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana centro-orientale (Modificata da Burrato *et al.*, 2003, da Pieri e Groppi, 1975). L'area analizzata si trova nella parte meridionale del fascio di pieghe ferraresi.

L'arco orientale può essere a sua volta suddiviso in tre strutture minori dette "Pieghe Ferraresi", "Romagnole" e "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). La complessa struttura sismogenetica delle Pieghe Ferraresi si sviluppa a nord della direttrice San Pietro in Casale-Pieve di Cento. Verso sud, questa struttura è limitata da una fascia di pieghe e sovrascorrimenti sepolti lungo la direzione Minerbio-San Giorgio di Piano, più prossima al margine appenninico ("Pieghe Romagnole" in Pieri e Groppi, 1981).

Nel settore occidentale delle Pieghe Ferraresi, si possono osservare una serie di depressioni tettoniche e pieghe sinclinali che complicano ulteriormente la geometria strutturale, come a nord ed ovest di Crevalcore (Figura 3-6). Il centro di Crevalcore si sviluppa in corrispondenza della sinclinale estesa a sud del fascio principale delle Pieghe Ferraresi.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

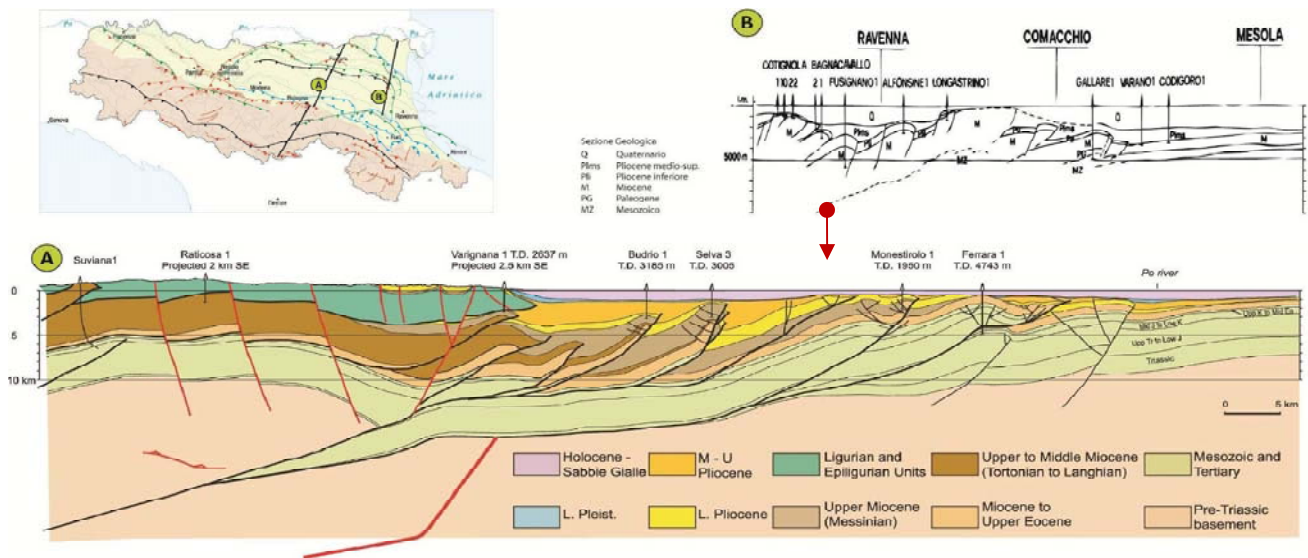


Figura 3-5 - Contesto strutturale della porzione emiliano-romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) deriva da Pieri e Groppi, 1981, mentre la sezione inferiore è presa (A) da Toscani *et al.*, 2009.

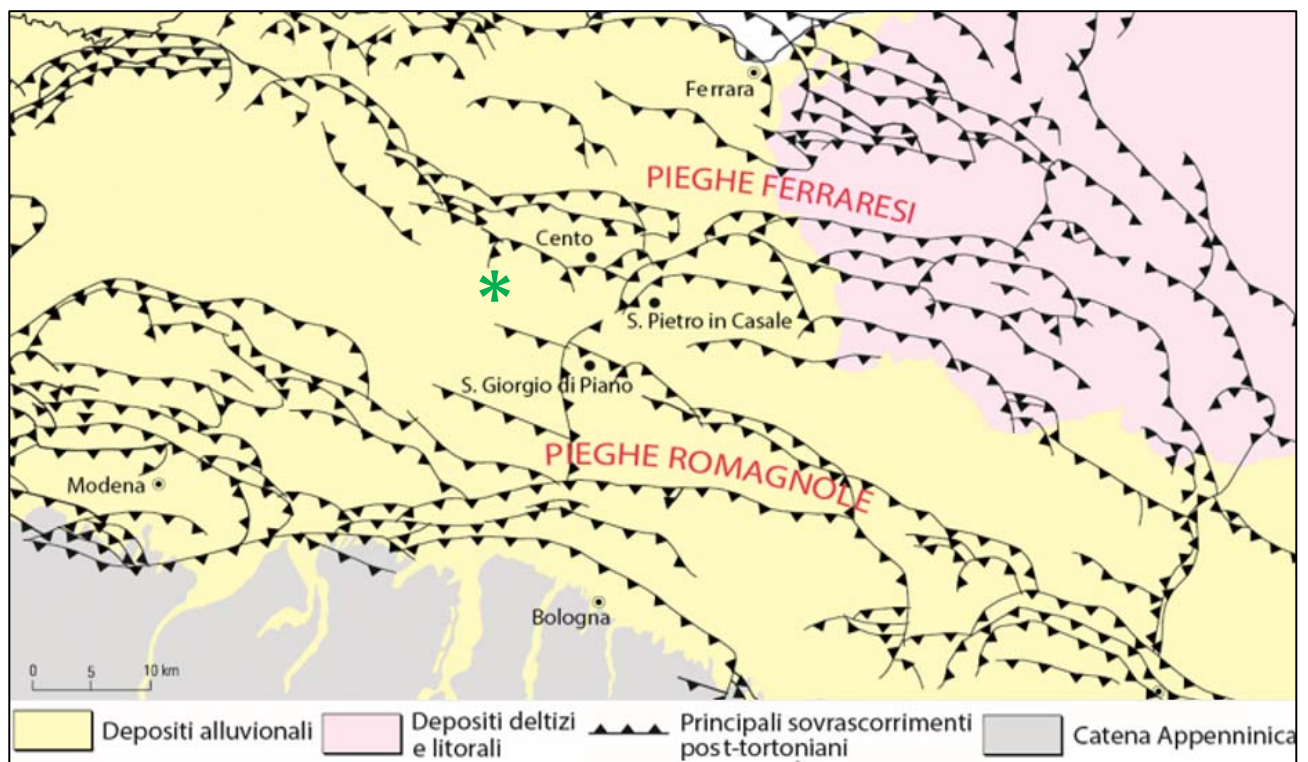


Figura 3-6 - Inquadramento delle strutture tettoniche sepolte, che illustra la complessità dell'arco delle Pieghe Romagnole e Ferraresi. I colori illustrano i caratteri delle unità geologiche affioranti. Modificato dalle Note Illustrative del Foglio CARG 203 "Poggio Renatico". L'area analizzata si sviluppa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

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, localizzata alcuni chilometri più ad est, è ricavata da Pieri e Groppi (1981).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

L'interpretazione strutturali proposte dai due autori sono diverse, anche se concordi nelle loro linee fondamentali. Entrambe le sezioni mostrano un sovrascorrimento principale profondo, che verso l'esterno si apre in un ventaglio (*splay*) di faglie meno profonde, associati retroscorrimenti di ordine minore. In sezione A, sono evidenti scollamenti tettonici multipli, sviluppati a diversi livelli strutturali, mentre la sezione B mostra superfici di scollamento generalmente più profonde. Nella porzione centrale, la struttura presenta un secondo gruppo di anticlinali di rampa, ben evidente in entrambe le sezioni.

L'insieme delle Pieghe Ferraresi rappresenta la culminazione strutturale che delimita, a nord, un'ampia sinclinale che corrisponde ad un attivo bacino di *piggy-back* (Ori e Friend, 1984), all'interno del quale si sono depositi notevoli spessori sedimentari che costituiscono la successione pliocenica marina e quaternaria marino-continentale (Figura 3-5). L'architettura stratigrafica dei depositi plio-quaternari è stata fortemente influenzata dalla deformazione tettonica sinsedimentaria e presenta quindi spessori massimi nelle aree di sinclinale e minimi in corrispondenza delle anticlinali sepolte (Correggiari *et al.*, 1992; Amorosi *et al.*, 1997 a, b; Di Dio e Caporale, 1998; Di Dio e Molinari, 2000). L'influenza dei movimenti tettonici sull'architettura deposizionale è evidenziata anche dalle grandi variazioni laterali di spessore delle successioni quaternarie più recenti, in buona parte deposte in condizioni di pianura alluvionale.

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, sedimentatosi negli ultimi 450.000 anni circa (Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998), mostra spessori che variano da meno di 70 - 90 m, in corrispondenza della culminazioni delle Anticlinali di Casaglia e di Mirandola, ad anche oltre 400 m, nelle aree di sinclinale. Questi cambiamenti di spessore registrano grandi variazioni laterali di subsidenza, indotte anche dalla deformazione delle strutture tettoniche.

Il territorio comunale di Crevalcore attraversa varie fasce strutturali di pieghe e faglie. Il territorio può essere schematicamente suddiviso in una parte meridionale strutturalmente più depressa e subsidente e una parte settentrionale meno subsidente e corrispondente anticlinale. Una monoclinale immergente verso sud raccorda infatti l'asse della sinclinale meridionale, con l'anticlinale complessa, sviluppata nell'area adiacente a Galeazza. La struttura anticlinalica continua a nord, ove è associata al sovrascorrimento frontale sepolto delle strutture appenniniche, mentre verso ovest si raccorda con la culminazione di Mirandola. L'alto strutturale 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).



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

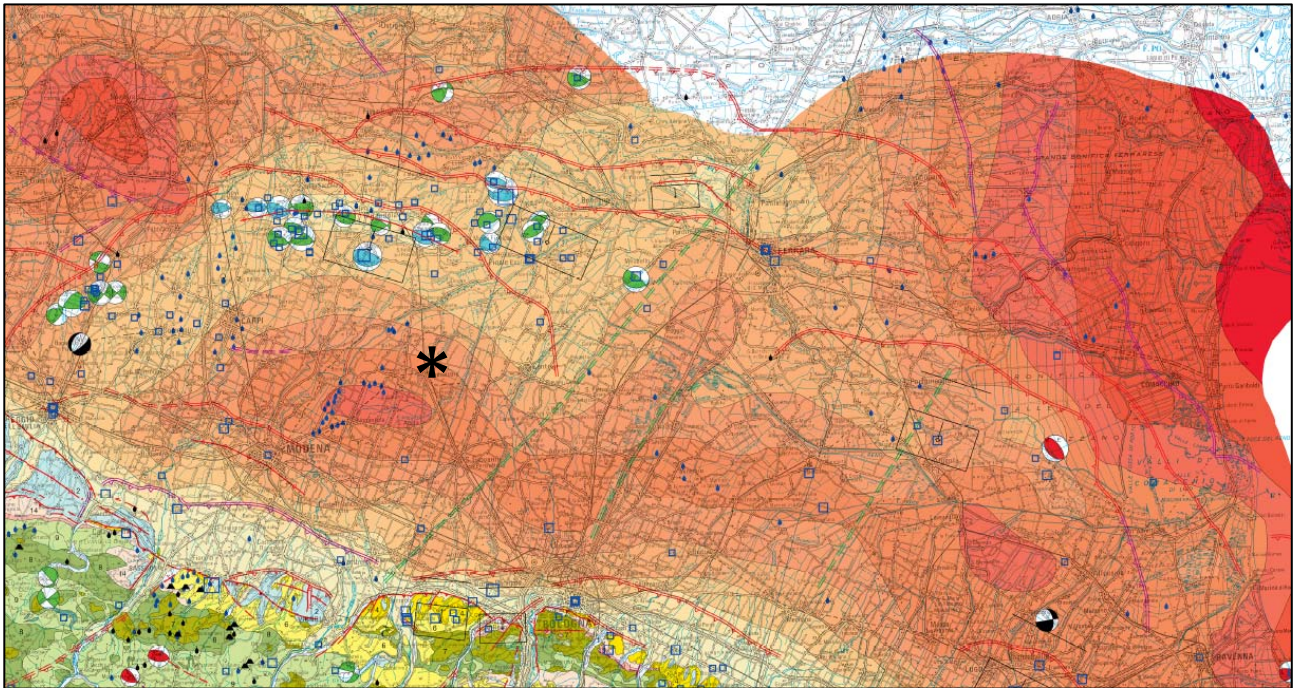


Figura 3-7 - Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017). L'area analizzata è indicata dall'asterisco.

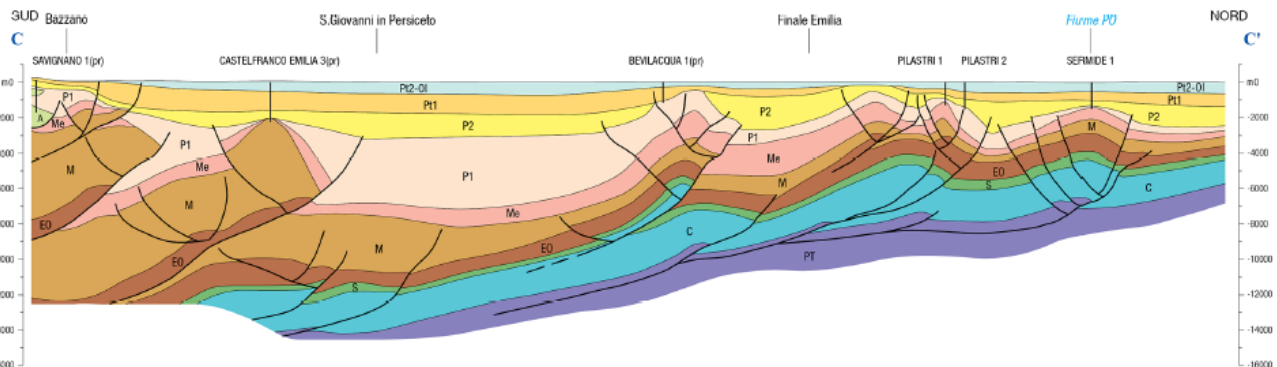


Figura 3-8 - Sezione geologica profonda C - C', da Bazzano (BO) al Po. Fonte: Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017).

## 4 Dati geognostici e geofisici

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.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

In relazione ai sistemi d'indagine indiretta, sono stati analizzati i log parametrici di prove penetrometriche statiche (CPT), con punta elettrica (CPTe) e con piezocono (CPTu). Sono stati inoltre esaminati i rapporti di prova di indagini geofisiche tipo Down-Hole (DH, SCPTu), HVSR, MASW, REMI e ESAC\_SPAC. Infine sono state raccolte prove di laboratorio di colonna risonante (CR) e triassiali cicliche (TC), utilizzate per la caratterizzazione dinamica di alcuni terreni ai fini della risposta sismica locale.

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

### 4.1 Indagini di repertorio

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

Aggiungendo alle indagini recuperate negli archivi sopracitati quelle raccolte presso alcuni geologi liberi professionisti, si sono potute utilizzare ai fini della microzonazione sismica ben 817 prove pregresse di buona affidabilità, suddivise per numero e tipologia così come riportato in Tabella 4-1.

Da ultimo sono stati considerati anche i dati di sottosuolo dei comuni confinanti che hanno permesso di 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	395
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	CPTe	96
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTu	83
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPTu	14
Prove penetrometriche dinamiche DPM	DN	3
Prove penetrometriche dinamiche DPL	SPT	3
Sondaggi a carotaggio continuo	S	9
Sondaggi con prelievo di campioni	SC	2
Pozzi per acqua	PA	13
Prove di colonna risonante	CR	3
Prove triassiali cicliche a liquefazione	TC	7

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	48
Prova sismica in foro tipo Down-Hole	DH	1
Multi-channel Analysis of Surface Waves	MASW	138
Refraction Microtremor	REMI	1
Extended Spatial Autocorrelation	ESAC_SPAC	1
	<b>TOTALE</b>	<b>817</b>

**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 4.1.1 – 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 degli studi di microzonazione sismica del Comune di Crevalcore è stato necessario realizzare una estesa campagna di acquisizioni di microtremore sismico, con lo scopo di meglio caratterizzare le frequenze di risonanza dei terreni presenti nelle aree indicate come suscettibili di trasformazioni urbanistiche e negli ambiti urbani consolidati.

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 comunque ritenuto opportuno realizzare approfondimenti attraverso l'esecuzione di nuove indagini geotecniche di tipo CPTu.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

La buona disponibilità di prove geofisiche ha infine permesso di definire le variazioni di  $V_{s30}$  alla scala dell'intero territorio indagato.

### 4.2.1 Indagini realizzate in situ

Le indagini in situ realizzate a supporto dello studio (Tabella 4-2) sono state funzionali alla caratterizzazione geotecnica e geofisica di aree prive di dati pregressi, comprese alcune di specifico interesse per il "Settore Tecnico - Edilizia privata e pubblica, urbanistica" del Comune di Crevalcore. Di seguito vengono invece 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	12
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	51
	<b>TOTALE</b>	<b>62</b>

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

#### 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. 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 da 200 kN equipaggiato di punta elettrica Punta Pagani Mod. MKJ387 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  $A_m = 150 \text{ cm}^2$

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

Le prove, che hanno interessato le località riportate in Tabella 4-3, sono state spinte sino 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 (qc, fs) 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	037024P703 CPTU729	44.716343°	11.140055°	Via Di Vittorio - Crevalcore	30/08/2019	20 m	0,00 m
CPTu2	037024P704 CPTU730	44.714367°	11.154312°	Via Guisa - Crevalcore	30/08/2019	20 m	2,30 m
CPTu3	037024P705 CPTU731	44.724779°	11.148474°	S.P.1 - Crevalcore	30/08/2019	20 m	2,20 m
CPTu4	037024P706 CPTU732	44.794241°	11.281156°	Via Provanone 9008 - Galeazza	30/08/2019	20 m	2,40 m
CPTu5	037024P707 CPTU733	44.797883°	11.276383°	Via Provanone 8471 - Galeazza	30/08/2019	20 m	3,10 m
CPTu6	037024P708 CPTU734	44.791034°	11.232398°	Via Provanone 4920 - Palata Pepoli	30/08/2019	20 m	2,60 m
CPTu7	037024P709 CPTU735	44.787010°	11.171484°	Via del Papa - Caselle	03/09/2019	20 m	3,40 m
CPTu8	037024P710 CPTU736	44.718693°	11.180302°	Via dell'Artigianato 680, - Beni Comunali	03/09/2019	20 m	0,00 m
CPTu9	037024P711 CPTU737	44.712364°	11.144303°	Via Sant'Agata - Crevalcore	03/09/2019	20 m	1,80 m
CPTu10	037024P712 CPTU738	44.764044°	11.144825°	Via del Bottazzo - Bolognina	03/09/2019	20 m	2,60 m
CPTu11	037024P713 CPTU739	44.702136°	11.167865°	Via Guisa - Crevalcore	03/09/2019	20 m	2,30 m
CPTu12	037024P714 CPTU740	44.723493°	11.155142°	Via Zanardi - Crevalcore	03/09/2019	20 m	1,05 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).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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 (10-15 m/sec<sup>2</sup>), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di 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 (HVSZ - *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 dello studio di microzonazione sono state effettuate oltre 60 registrazioni di microtremore sismico. Le misure sono state eseguite con tromografi digitali "Tromino" *modello Studio* e *modello Engy*, tecnicamente equivalenti in relazione al tipo di misura richiesta. Per confermare l'analoga risposta dei due strumenti ed effettuare una taratura reciproca, sono state realizzate coppie di misure, in cui gli strumenti sono stati posti a poca distanza l'uno dall'altro. Tutti i punti di misura sono stati georiferiti tramite GPS con precisione variabile tra 2 e 3 m.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz e con tempo di singola registrazione di 30 minuti. Alcune registrazioni sono state in seguito scartate, in quanto soggette ad evidenti disturbi di natura antropica che ne hanno pregiudicato l'interpretazione.

Le registrazioni considerate affidabili (Tabella 4-4) sono state archiviate in banca dati ed utilizzate per la redazione della carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3 paragrafo 8.3).

La campagna di misure realizzate per lo studio di microzonazione, ha consentito la caratterizzazione sismica dei terreni presenti negli ambiti d'interesse, attraverso l'individuazione della loro frequenza fondamentale di risonanza. Le misure realizzate con stazioni singole equivalenti, hanno fornito una serie di dati con caratteristiche omeogene e tra loro confrontabili, che correlati con i dati geognostici disponibili hanno permesso di stimare la profondità dei principali contrasti di impedenza in grado influenzare la risposta sismica in superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	DURATA	f0	A0
HVSR 1	037024P633 HVSR647	44.796033°	11.281242°	Via Provanone - Galeazza	18/07/2017	30 min	0,95	1,77
HVSR 3	037024P634 HVSR648	44.798825°	11.277322°	Via Romagnoli - Galeazza	18/07/2017	30 min	0,89	2,01
HVSR 4	037024P635 HVSR649	44.797247°	11.274150°	Via Provanone - Galeazza	18/07/2017	30 min	1,09	2,71
HVSR 5	037024P636 HVSR650	44.769383°	11.255831°	Via la Malfa - Bevilaqua	18/07/2017	30 min	0,70	1,82
HVSR 6	037024P637 HVSR651	44.765081°	11.250533°	Via 2 Agosto - Bevilacqua	18/07/2017	30 min	0,63	2,29
HVSR 7	037024P638 HVSR652	44.773131°	11.250044°	Via Provane - Bevilacqua	18/07/2017	30 min	0,73	1,82
HVSR 9	037024P639 HVSR653	44.790792°	11.234014°	Via Calanca - Palata Pepoli	18/07/2017	30 min	0,61	2,37
HVSR 10	037024P640 HVSR654	44.791261°	11.226728°	Via Provanone - Palata Pepoli	18/07/2017	30 min	0,78	1,82
HVSR 11	037024P641 HVSR655	44.789953°	11.222497°	Via da Vinci - Palata Pepoli	18/07/2017	30 min	0,69	1,96
HVSR 12	037024P642 HVSR656	44.790211°	11.176897°	Via Comunale - Caselle	18/07/2017	30 min	0,75	2,11
HVSR 13	037024P643 HVSR657	44.790033°	11.172047°	Via del Papa - Caselle	18/07/2017	30 min	0,59	2,01
HVSR 14	037024P644 HVSR658	44.784731°	11.170825°	S.P.9, - Caselle	18/07/2017	30 min	1,02	1,90
HVSR 15	037024P645 HVSR659	44.785375°	11.178078°	Via Signata - Caselle	18/07/2017	30 min	0,78	1,78
HVSR 16	037024P646 HVSR660	44.761206°	11.172925°	Via Spalletti - Sammartini	18/07/2017	30 min	1,00	1,85
HVSR 17	037024P647 HVSR661	44.758658°	11.169417°	S.P.9 - Sammartini	18/07/2017	30 min	0,69	2,37
HVSR 18	037024P648 HVSR662	44.766342°	11.151656°	Via Argini Nord - Bolognina	18/07/2017	30 min	0,63	2,13
HVSR 19	037024P649 HVSR663	44.763875°	11.145964°	Via del Bottazzo - Bolognina	18/07/2017	30 min	0,63	3,23
HVSR 21	037024P650 HVSR664	44.715189°	11.180214°	Via della Risaia - Beni Comunali	17/07/2017	30 min	0,88	2,26
HVSR 23	037024P651 HVSR665	44.719136°	11.171350°	Via degli Orsi- Beni Comunali	17/07/2017	30 min	0,44	1,80
HVSR 24	037024P652 HVSR666	44.716364°	11.163444°	Via Levi- Beni Comunali	17/07/2017	30 min	0,83	2,98
HVSR 25	037024P653 HVSR667	44.701831°	11.169264°	Via Albaresa, loc. loc. Guisa Pepoli	19/07/2017	30 min	0,75	1,92
HVSR 26	037024P654 HVSR668	44.705986°	11.164800°	Via Bisciastorta, loc. Boschi	19/07/2017	30 min	0,86	2,22
HVSR 27	037024P655 HVSR669	44.708756°	11.160542°	Via Guisa, Loc. Boschi	17/07/2017	30 min	1,06	1,59

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

HVSR 28	037024P656 HVSR670	44.712847°	11.157675°	Via Bisentolo Sud, loc. Cavallini	17/07/2017	30 min	0,63	1,87
HVSR 29	037024P657 HVSR671	44.705503°	11.153078°	Via Persicetanad, loc. Case Santa Sofia	19/07/2017	30 min	0,72	2,32
HVSR 30	037024P658 HVSR672	44.702031°	11.160986°	Via Borgofollo, loc. Guisa Pepoli	19/07/2017	30 min	0,78	1,95
HVSR 31 A	037024P659 HVSR673	44.709122°	11.149003°	Via Modigliani - Crevalcore	19/07/2017	30 min	0,78	2,08
HVSR 31 B	037024P660 HVSR674	44.709011°	11.149300°	Via Modigliani - Crevalcore	19/07/2017	30 min	0,83	2,03
HVSR 32	037024P661 HVSR675	44.714225°	11.140586°	Via Bachelet - Crevalcore	19/07/2017	30 min	0,78	2,23
HVSR 33	037024P662 HVSR676	44.709989°	11.141600°	Via Forcole - Crevalcore	19/07/2017	30 min	0,67	2,12
HVSR 34	037024P663 HVSR677	44.713431°	11.135408°	Via Panerazzi, loc. Chiesolino Cà Rossa	19/07/2017	30 min	0,69	1,77
HVSR 35 A	037024P664 HVSR678	44.713181°	11.128258°	Via Calcino, loc. Cà Rossa	19/07/2017	30 min	0,75	2,09
HVSR 35 B	037024P665 HVSR679	44.713303°	11.128219°	Via Calcino, loc. Cà Rossa	19/07/2017	30 min	0,78	2,03
HVSR 36	037024P666 HVSR680	44.720061°	11.158197°	Via Vassallo - Crevalcore	19/07/2017	30 min	0,69	2,24
HVSR 37	037024P667 HVSR681	44.723575°	11.158528°	Via Vassallo - Crevalcore	19/07/2017	30 min	0,70	2,63
HVSR 38	037024P668 HVSR682	44.721931°	11.152394°	Via Togliatti - Crevalcore	19/07/2017	30 min	0,61	1,70
HVSR 39	037024P669 HVSR683	44.727611°	11.154403°	Via Signata, Crevalcore	19/07/2017	30 min	0,61	2,44
HVSR 41	037024P670 HVSR684	44.717603°	11.144119°	Via Rossini - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,66	2,31
HVSR 42 A	037024P671 HVSR685	44.715383°	11.149114°	Viale Caduti di Via Fani - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,63	2,10
HVSR 42 B	037024P672 HVSR686	44.715406°	11.148747°	Viale Caduti di Via Fani - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,69	1,84
HVSR 43 A	037024P673 HVSR687	44.718314°	11.148800°	Via De Gasperi - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,70	2,20
HVSR 43 B	037024P674 HVSR688	44.718381°	11.149025°	Via De Gasperi - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,69	2,25
HVSR 44	037024P675 HVSR689	44.720675°	11.138647°	Via Callipari - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,63	1,80
HVSR 45 A	037024P676 HVSR690	44.723486°	11.141225°	Via Lercaro - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,59	1,61
HVSR 45 B	037024P677 HVSR691	44.723400°	11.141422°	Via Lercaro - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,59	1,89
HVSR 46	037024P678 HVSR692	44.721267°	11.145603°	Viale Rocchetta - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,81	1,89
HVSR 47 A	037024P679 HVSR693	44.727583°	11.145172°	Via Vittime delle Foibe - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,70	2,23



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

HVSR 47 B	037024P680 HVSR694	44.727506°	11.145394°	Via Vittime delle Foibe - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,72	1,98
HVSR 48	037024P681 HVSR695	44.725900°	11.137583°	S.S.568 - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,84	1,80
HVSR 49	037024P682 HVSR696	44.724956°	11.149631°	S.P.1 - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,77	2,07
HVSR 50	037024P683 HVSR697	44.732178°	11.141017°	Via Calanco - Crevalcore	20/07/2017	30 min	0,66	2,58

$f_0$  = 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 nord-orientali, dove risale per motivi tettonici, sino a profondità inferiori. Il substrato è 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 associati a 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 (Petronio *et al.* 2018) 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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

superfici che generano i principali contrasti di impedenza rilevabili con la tecnica HVSr. Si può ipotizzare che la superficie associata al maggior aumento di rigidità e di velocità di propagazione delle onde di taglio ( $V_s$ ) corrisponda alla discordanza che marca il tetto delle successioni torbiditiche del Pliocene. Questa superficie risulta piegata dalla deformazione tettonica, motivo per cui si approfondisce notevolmente procedendo verso sud. Queste arenarie si sono deposte in ambienti marini profondi e hanno subito un processo di cementazione e litificazione per cui sono caratterizzate da velocità delle onde sismiche relativamente elevate e sono quindi 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 superiori ai 1000 m nella parte meridionale del territorio, mentre si rastremano fortemente verso nord, sino a ridursi a circa 150 metri di spessore. 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 in aree di anticlinale della dorsale ferrarese (Di Capua e Tarabusi, 2013 - Garofalo *et al.*, 2016), sia in aree di sinclinale (Minarelli *et al.* 2016). Le unità quaternarie prevalentemente continentali, inquadrare nel Supersistema Emiliano-Romagnolo, mostrano infatti valori massimi generalmente di poco superiori ai 500 m/s.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

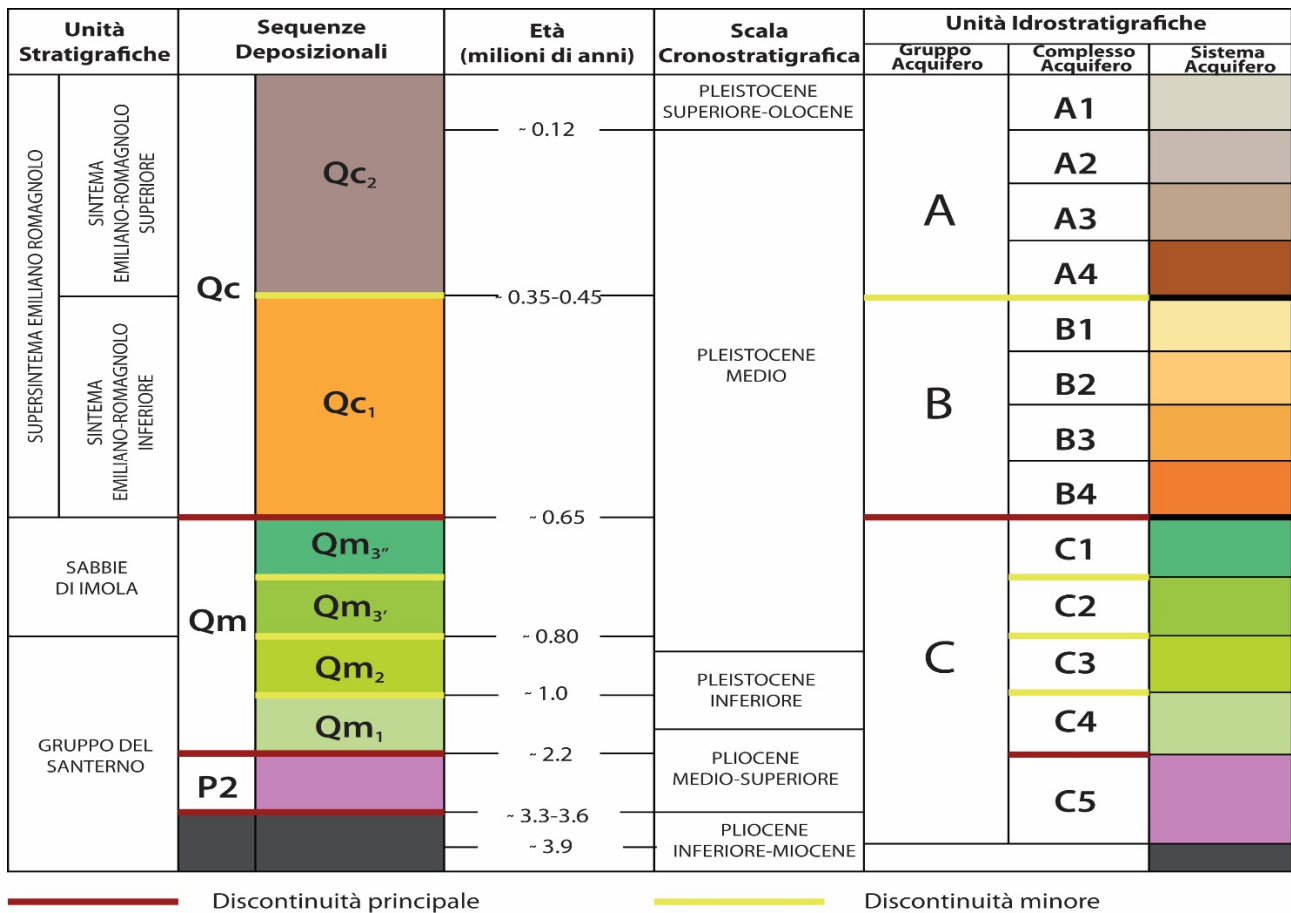


Figura 5-1 - Schema stratigrafico dei depositi plio-quadernari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche e superfici di discontinuità, sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche (da Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

## 5.1 Substrato

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.

Sopra gli spessi depositi prevalentemente carbonatici del Mesozoico e del Paleogene, poggiano le potenti successioni del Neogene, in gran parte terrigene. Queste ultime sono qui costituite per buona parte del Miocene da fanghi deposti in ambienti marini profondi, anche anossici, ricoperti da potenti unità torbiditiche del Miocene superiore e del Pliocene, deposte nel bacino d’avanfossa appenninica. Queste correnti di torbida erano generalmente alimentate da sabbie di origine alpina e provenienza occidentale. Lo spessore di queste unità supera spesso abbondantemente il chilometro. Durante le fasi pre-evaporitiche e sin-evaporitiche del Messiniano, in buona parte dell’area considerata, si depositavano spessi corpi sabbiosi

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

di conoide torbiditica, con alimentazione proveniente dall'area lombarda, ascritti alla Formazione di Bagnolo, secondo la terminologia ENI-AGIP (Ghielmi *et al.*, 2010).

Il Messiniano post-evaporitico, corrispondente alla deposizione della Formazione a Colombacci in Appennino, registrò un'ulteriore migrazione verso nord della sedimentazione torbidica. In tutta l'area analizzata, la parte finale del Messiniano è formata da unità torbiditiche ricche di sabbia e contenenti talvolta anche conglomerati, attribuite alla Formazione di Fusignano. Il Pliocene è inferiormente formato ancora da potenti corpi di torbiditi molto arenacei, ascritti alla Formazione di Canopo, che formano il più compatto corpo arenaceo presente nel sottosuolo, con intercalazioni di ghiaie e conglomerati.

Dopo la deposizione di questa formazione, le unità plioceniche sono state progressivamente coinvolte nella migrazione verso l'avampaese della deformazione tettonica compressiva di questa porzione dell'Avanfossa Appenninica. Nella porzione settentrionale dell'area indagata, durante il Pliocene, si sviluppò il fascio di sovrascorrimenti e anticlinali di rampa che dall'area di Mirandola continua in direzione sud-est, verso Ravenna. Questa deformazione sinsedimentaria ha fortemente influenzato spessori e ambienti deposizionali ed indotto superfici di discordanza stratigrafica e lacuna (Ghielmi *et al.*, 2010). Lacune e discordanze, anche angolari, sono particolarmente diffuse nelle aree corrispondenti ad anticlinali sepolte, come in quella di Galeazza nella parte nord-orientale del territorio comunale. Lo sviluppo del fascio anticlinalico suddivise il bacino torbiditico in due parti diseguali. Nella più vasta struttura meridionale, che comprende gran parte del territorio indagato, continuavano ad accumularsi le successioni di sabbie torbiditiche del Pliocene, che possono superare i 1.500 m di spessore.

Seguendo la terminologia AGIP, queste successioni sono ascrivibili alle Formazioni di Porto Corsini e Porto Garibaldi. Nell'area di sinclinale, queste successioni non presentano discordanze stratigrafiche marcate, al contrario di quanto avviene in corrispondenza delle aree di anticlinale, come al margine settentrionale del territorio analizzato.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

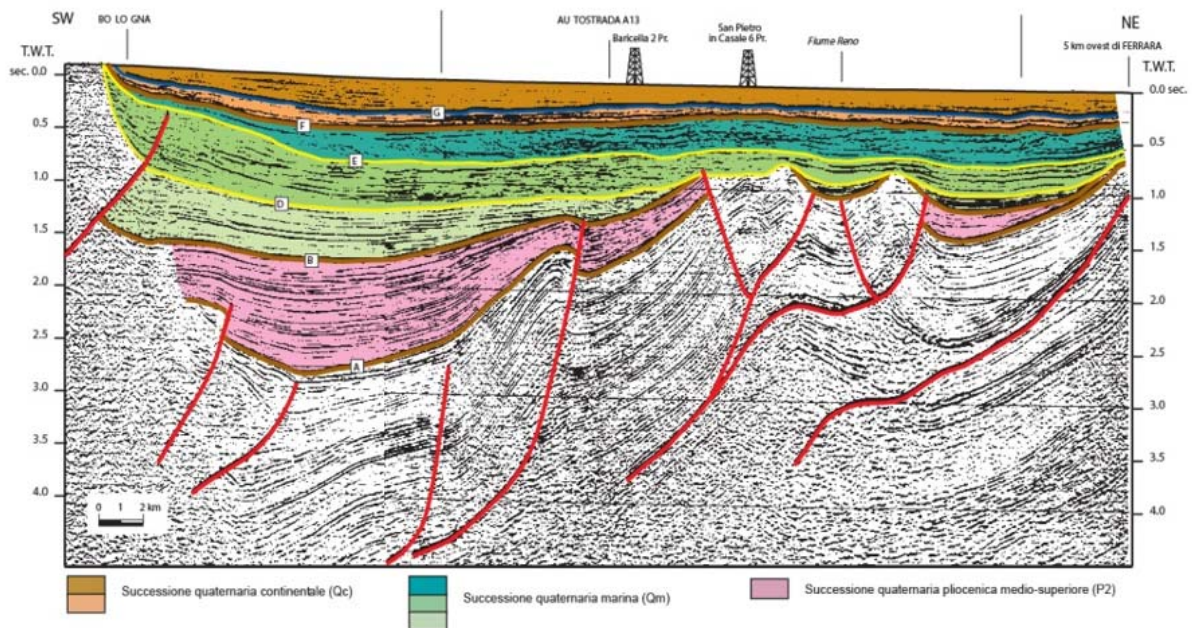


Figura 5-2 - Profilo sismico interpretato tratto da Riserve Idriche Sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998).

### 5.1.1 L'unità stratigrafica del Quaternario Marino

Le successioni del Quaternario medio-inferiore sono inquadrare nell'unità stratigrafica del Quaternario Marino. Durante la fase iniziale del Quaternario, nelle aree di anticlinale continuavano a svilupparsi lacune stratigrafiche o si depositavano sedimenti marini condensati.

Nella parte centro-meridionale dell'area indagata si passava invece bruscamente ad ambienti marini profondi, in cui continuavano a depositarsi rapidamente le sabbie torbiditiche della Formazione di Carola. Queste torbiditi passano lateralmente e verso superiormente a corpi di argille a foraminiferi platonici, che sono a loro volta ricoperti da facies di prodelta e sabbie di fronte deliziosa. Queste sequenze si sono deposte nella prosecuzione occidentale dell'antico Mare Adriatico, soggetta a forte subsidenza e rapido apporto sedimentario. Nel sottosuolo studiato questi sedimenti sono riferiti alla Formazione di Ravenna, da non confondersi con l'omonimo Subsistema dell'Olocene. Facies deposizionali analoghe sono studiabili in affioramento, nella fascia collinare ai piedi dell'Appennino, in aree ove queste unità sono state innalzate dalla deformazione compressiva tardo-quaternaria (Formazione di Castell'Arquato, Argille di Riolo Terme ed Argille di Terra del Sole - Ricci Lucchi *et al.*, 1982). Le successioni del Quaternario Marino, nella pianura emiliana, sono raggiunte solo da un limitato numero di sondaggi stratigrafici descritti in modo sufficientemente accurato, generalmente realizzati per fini di ricerca di idrocarburi.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

Nell'area considerata, l'unità del Quaternario Marino è in gran parte costituita da sabbie torbiditiche e argille di mare aperto con spessori di molte centinaia di metri nella zona di sinclinale meridionale e spessori assai più ridotti nelle zone di alto strutturale. I depositi deltizi si sovrappongono, in condizioni di relativa continuità, ai fanghi di mare più aperto e profondo. A sud dell'area considerata, verso Sala Bolognese, i sedimenti deltizi sono dominati dagli apporti dei fiumi appenninici, mentre nell'area considerata i depositi deltizi sembrano riflettere apporti del Fiume Po.

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

### 5.2 Terreni di copertura

La potente 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 450.000 e 350.000 anni fa circa. La discordanza corrisponde, in questa area, alla scomparsa di intervalli con chiari caratteri marini. Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è qui dominato da depositi fluviali continentali. Nell'area indagata, il Supersistema si è 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.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

### 5.2.1.1 Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) costituisce la parte più bassa del Supersintema Emiliano-Romagnolo. 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 a stratigrafie di pozzi per acqua e log di perforazioni per idrocarburi ENI-AGIP (Camposanto, Bevilacqua, Spada, Crevalcore, Pieve di Cento). Mai affiorante nell'area di studio, il Sintema è limitato superiormente dalla superficie di discordanza costituente il tetto dell'unità.

Nei settori meridionali estremamente subsidenti, il Sintema può raggiungere spessori di circa 200 metri, mentre mostra spessori minimi dell'ordine dei 50 metri nelle aree settentrionali, come Galeazza, in corrispondenza della struttura anticlinale appartenente alla Dorsale Ferrarese sepolta.

Il Sintema continua a registrare una evoluzione regressiva con la parte inferiore formata da sedimenti di fronte deltizia e spiaggia che passano superiormente a prevalenti depositi di piana deltizia almeno in parte attribuibili a sistemi di alimentazione padana.

Sulla base della posizione stratigrafica, l'unità è attribuita al Pleistocene medio, cioè all'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 ed è prevalentemente costituito da depositi alluvionali dai fiumi Panaro, Reno e Secchia, accumulati tra il Pleistocene medio e l'Olocene, con facies di canale, argine e piana inondabile.

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è comunemente organizzato in cinque cicli deposizionali trasgressivo-regressivi, con uno spessore massimo di circa 60 metri ciascuno in corrispondenza delle aree depocentrali meridionali, ma con spessori minori, di circa 20 metri, nelle aree settentrionali poco subsidenti di anticlinale.

Nel complesso, questi cicli registrano un ulteriore allontanamento della linea di costa adriatica dalla zona esaminata. 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 singlaciata. La porzione basale di ciascun Subsintema è caratterizzata dalla presenza di limi e sabbie

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

continentali, seguiti da argille organiche di piana alluvionale, palude e, nelle aree più subsidenti, di piana costiera. Le parti centrali sono invece costituite da spesse successioni di depositi fini di piana alluvionale, con subordinati corpi isolati nastriformi di sabbie di canale fluviale. La parte superiore dei cicli è ricca di depositi sabbiosi più grossolani, dominati da facies di riempimento di canale fluviale. Questi 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* (AES<sub>4</sub>) e Subsintema di *Torre Stagni* (AES<sub>5</sub>) (cfr. AES indifferenziato - Foglio 204 Portomaggiore), e in 3 cicli superiori, inquadrati nei Subsintemi di *Bazzano* (AES<sub>6</sub>), di *Villa Verucchio* (AES<sub>7</sub>) e di *Ravenna* (AES<sub>8</sub>). Nella porzione più recente del Subsintema di Ravenna, è stata ulteriormente distinta l'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>) di età post-romana. I tre Subsintemi superiori (AES<sub>6</sub>, AES<sub>7</sub>, AES<sub>8</sub>), presentano tra loro forti analogie nell'organizzazione stratigrafica.

Questi cicli 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 da un paleosuolo carbonatico maturo sviluppato su depositi continentali. La fase di massima ingressione della linea di costa è qui registrata da depositi palustri, 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 AES<sub>6</sub> e AES<sub>7</sub> è caratterizzata da sabbie di media pianura alluvionale, che passano lateralmente a sedimenti fini di pianura fredda. Nella porzione nord-orientale dell'area considerata, la parte superiore del Subsintema di Bazzano (AES<sub>6</sub>) è ricca di corpi di sabbie a possibile alimentazione anche padana.

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 (AES<sub>7</sub>), mentre la parte più recente è attribuita al Subsintema di Ravenna (AES<sub>8</sub>)

Nel territorio comunale, la porzione superiore del Subsintema di Villa Verucchio (AES<sub>7</sub>) è formata da alternanze di sabbie di canale fluviale di provenienza appenninica e grossi volumi di limi di media pianura alluvionale ben drenata, superiormente caratterizzati da livelli di paleosuolo. La profondità del tetto



## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

stratigrafico dei corpi sedimentari singlaciali aumenta procedendo verso sud a causa delle deformazioni indotte dalla subsidenza differenziale.

Anche la parte basale del Subsistema di Ravenna (AES<sub>8</sub>) è qui costituita da limi di provenienza appenninica, con subordinate intercalazioni di corpi di sabbie di canale fluviale. La maggior parte del subsistema è dominata da fanghi argillosi organici di origine appenninica, con frequenti orizzonti di torbe, depositi in ambienti di piana inondabile e palude continentale.

Nel territorio comunale affiorano in superficie solo sedimenti della porzione più recente dell'Olocene di età post-romana, attribuiti all'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>). Le ampie aree palustri di età medioevale erano attraversate da canali distributori di delta interno di Panaro e subordinatamente Reno, che hanno deposto corpi allungati di sabbie fini limose e limi, raramente fiancheggiati da argini limoso-sabbiosi. Meglio sviluppati appaiono il corpo di paleoalveo del Panaro presente ad ovest del centro storico di Crevalcore e quello del Reno che, provenendo da Cento, attraversa l'abitato di Bevilacqua.

## 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 nel quale viene effettuata la registrazione e dalle condizioni meteorologiche.

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

I transienti principali sono 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 infatti inserito

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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 incertezze e le problematiche esposte, è stato necessario realizzare oltre 60 registrazioni prima di ottenere 51 misure affidabili di sismica passiva a stazione singola. In fase di elaborazione dei dati, infatti, si è potuta accertare la presenza di disturbi a varie frequenze, di chiara origine antropica, che hanno portato a scartare alcune misure realizzate.

Le maggiori criticità hanno riguardato la presenza di numerosi transienti legati al traffico urbano. Altre perturbazioni sono state imputate alla linea ferroviaria del "Brennero", che attraversa il centro urbano di Crevalcore, e alle zone industriali che si sviluppano ad oriente ed a meridione di esso.

Nonostante le problematiche rilevate, 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 0,60 e 0,85 Hz, ad eccezione dell'area più settentrionale di Palata Pepoli dove le frequenze dominanti sono più elevate. Dall'analisi delle ampiezze dei picchi rilevati in questi intervalli di frequenze è possibile notare come esse siano in genere contenute, con valori inferiori a 2,5.

Questo indica la presenza di contrasti di impedenza modesti nella successione stratigrafica che, secondo i dati di velocità delle onde di taglio disponibili in letteratura per questa porzione di Pianura Padana (Minarelli *et al.*, 2016; Petronio *et al.*, 2018), possono essere in genere correlati con superfici stratigrafiche poste a profondità variabili tra 100 e 200 metri.

Picchi a frequenze più basse ( $< 0,5$  Hz), con ampiezze non superiori a 2, sono talvolta visibili in alcune misure eseguite nel territorio comunale. La presenza di picchi a frequenze comprese tra 0,2 e 0,4 Hz, è invece confermata da molte acquisizioni di lunga durata, realizzate con sensori più sensibili alle basse frequenze rispetto al Tromino. I risultati di queste misure, eseguite nell'ambito degli studi di microzonazione sismica dei comuni di Cento, Terre del Reno e Vigarano Mainarda, sono avvalorati dai dati di ricerche scientifiche pubblicati su riviste internazionali (e.g. es. Mascandola *et al.* 2019, Mascandola *et al.* 2017, Milana *et al.* 2014).

L'assenza di evidenze di picchi a bassa frequenza in molte misure realizzate nel comune di Crevalcore è in gran parte legata ai limiti della strumentazione utilizzata per le acquisizioni. La quasi totalità delle misure

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

disponibili sono state infatti realizzare con strumentazione poco sensibile alle basse frequenze, dotata di sensori a 4,5 Hz. Lo scarso potere risolutivo della strumentazione alle basse frequenze è di norma la principale criticità connessa alla visibilità di amplificazioni legate a contrasti di impedenza sismica posti ad elevate profondità.

Altri fattori che rendono difficoltosa l'individuazione di picchi a bassa frequenza sono legati ai tempi di acquisizione delle registrazioni, in genere non superiori ai 30 minuti, e all'approccio utilizzato per l'elaborazione, frequentemente eseguite con finestre non più lunghe di 30 secondi.

### 6.2 Substrato rigido

Confrontando e correlando i dati geofisici con le sezioni stratigrafiche disponibili (Allegato 1) si è tentato di associare i contrasti di impedenza alle discontinuità stratigrafiche che separano le principali 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 gradualmente incrementi delle velocità delle onde sismiche con la profondità.

Per tentare di convalidare le attribuzioni sono stati analizzati i dati di alcuni pozzi per idrocarburi presenti nel territorio comunale di Crevalcore ed in aree limitrofe, oltre a quelli provenienti da misure di microtremore sismico realizzate nell'ambito della microzonazione sismica di Crevalcore, Cento e Camposanto. Infine sono stati considerati i dati di Vs provenienti dalle misure di down-hole profondo eseguite a Mirandola (Garofalo et al., 2016) ed a Mirabello (Minarelli *et al.*, 2016), oltre ai profili di velocità derivanti da array sismici passivi e linee sismiche a riflessione (Petronio *et al.* 2018) realizzate in aree limitrofe per scopi di ricerca scientifica (<http://www.liquifact.eu/2018/03/28/updates-from-wp2-european-liquifaction-hazard-map-and-methodology-for-localized-assessment-of-liquifaction-potential/>).

La Figura 6-1 mostra l'ubicazione delle 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 in chiave stratigrafica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

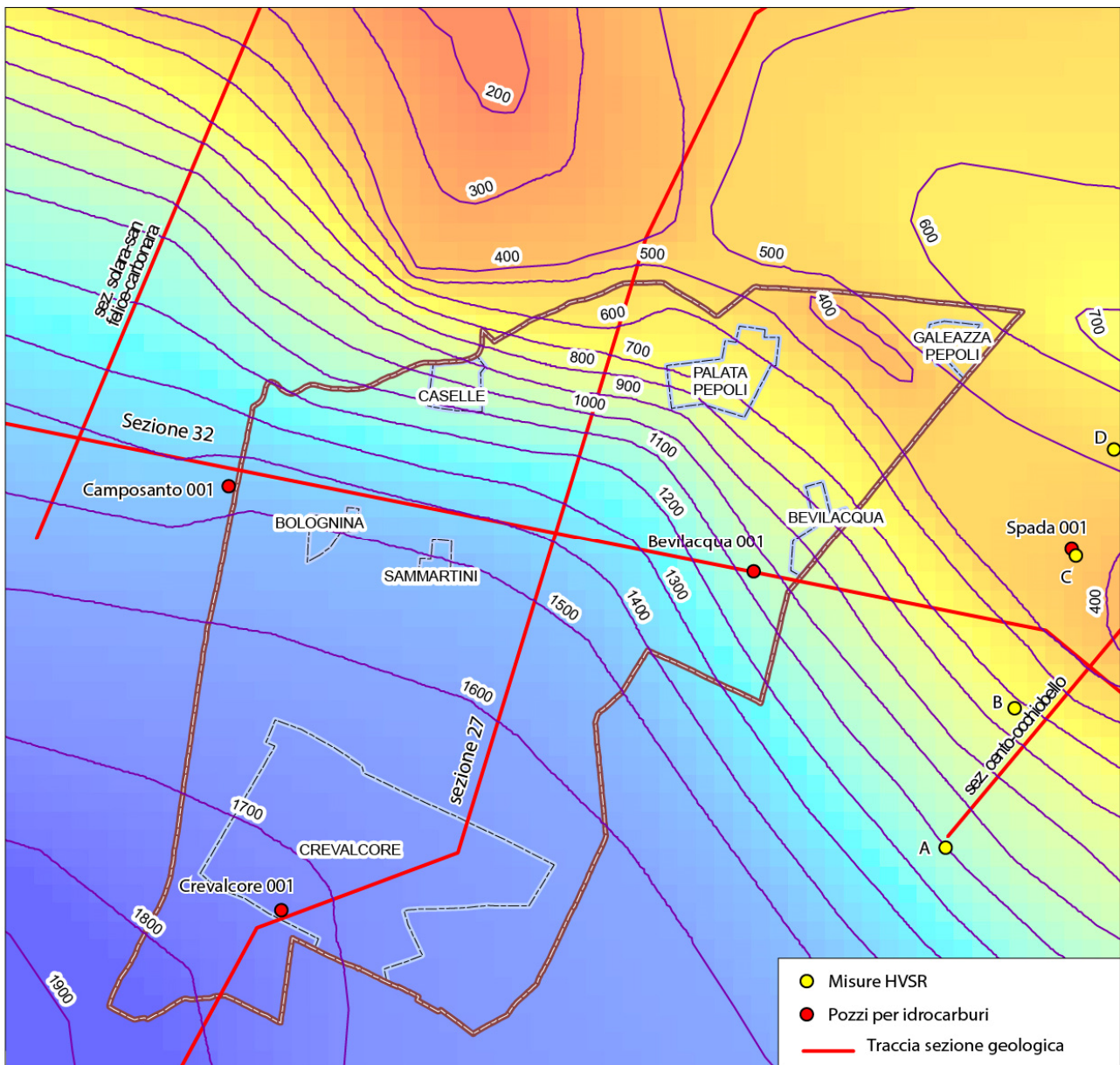


Figura 6-1 – La mappa mostra l’andamento delle isobate relative alla base dell’unità stratigrafica del Quaternario Marino e riporta i principali elementi utilizzati per la definizione del substrato sismico. La tracce rosse indicano le ubicazioni delle sezioni geologiche profonde disponibili per l’area di studio (Allegato 1). In rosso sono indicati i carotaggi profondi che raggiungono il substrato sismico, mentre in giallo sono riportate alcune delle ubicazioni delle misure HVSR realizzate per la microzonazione sismica di Cento. Queste misure di *noise* sono state eseguite lungo la sezione geologica “Cento-Occhiobello” (Martelli e Romani, 2013; Paolucci *et al.*, 2015) che si sviluppa sostanzialmente perpendicolare agli assi delle principali strutture tettoniche sepolte.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

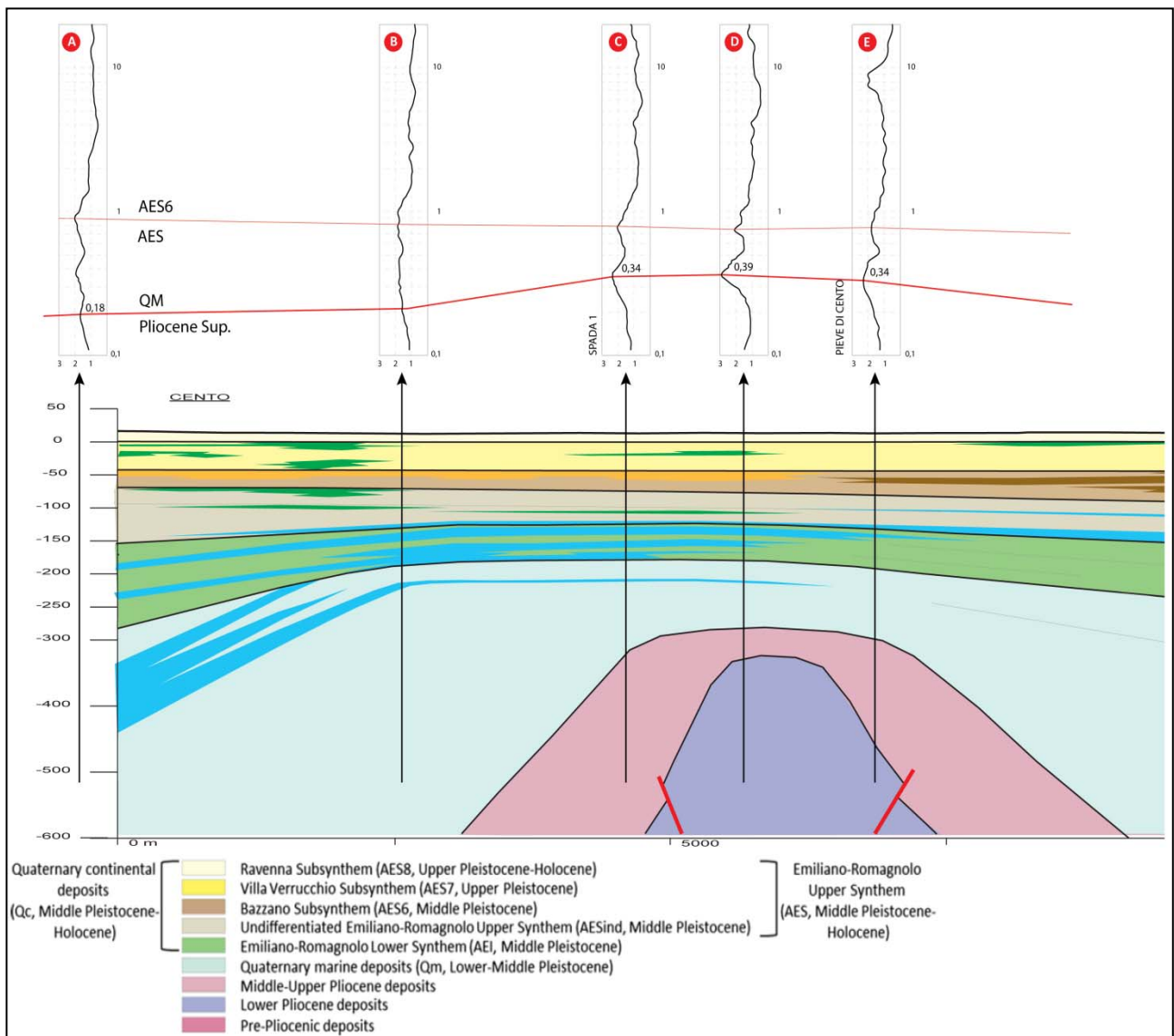


Figura 6-2 – Porzione meridionale della sezione geologica “Cento-Occhiobello” (Martelli e Romani, 2013; Paolucci et al., 2015), la cui traccia è riportata in carta in Figura 6-1. Sulla sezione sono proiettate le curve di ellitticità ottenute dalle misure HVSR realizzate per la Microzonazione di Cento (FE). I picchi di H/V sono stati correlati tra loro e associati a superfici stratigrafiche caratterizzate dai più marcati contrasti di impedenza, sulla base dei dati di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) disponibili in letteratura.

In analogia con quanto proposto in altri studi di microzonazione sismica della pianura emiliana (es. Comune di Cento - Figura 6-2) i picchi a più alta frequenza (0,85 -0,6 Hz) sono stati correlati con la base del complesso acquifero A2 (v. Allegato 1) che corrisponde alla base del Subsystema di Bazzano (AES<sub>6</sub>) (Figura 5-1), datata 230.000-250.000 anni (Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998). L’andamento e la posizione stratigrafica della superficie descritta si evince dalle sezioni del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1), realizzate mediante correlazioni su scala regionale di

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

sondaggi stratigrafici profondi e profili sismici. Tale superficie risulta sepolta a profondità variabili tra i 100 e i 200 m con quote minori registrate sempre nei settori più settentrionali.

Una forte variabilità nelle profondità di tutte le principali superfici di discontinuità stratigrafica è riscontrabile nel sottosuolo dell'intero territorio comunale e ciò dipende sia dalle deformazioni indotte dalla crescita delle strutture tettoniche, sia dalla subsidenza differenziale.

Picchi a basse frequenze ( $< 0,5$  Hz), con ampiezze non superiori a 2, sono però talvolta visibili in alcune misure eseguite nel territorio comunale. La presenza di picchi a frequenze comprese tra 0,2 e 0,4 Hz, è inoltre confermata da molte acquisizioni di lunga durata, con sensori sensibili alle basse frequenze, eseguite per gli studi di microzonazione sismica dei comuni di Cento, Terre del Reno e Vigarano Mainarda, oltre che da ricerche scientifiche pubblicati su riviste internazionali (e.g. es. Mascandola *et al.* 2019, Mascandola *et al.* 2017, Milana *et al.* 2014).

Facendo riferimento ad affidabili profili di velocità delle onde di taglio pubblicati in letteratura per l'area epicentrale emiliana (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016; Minarelli *et al.*, 2016, Petronio *et al.*, 2018), è possibile dimostrare come le unità stratigrafiche del Quaternario Superiore siano caratterizzate da graduali incrementi delle velocità delle onde sismiche con la profondità, e da valori di  $V_s$  massime generalmente di poco 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 basse frequenze di picco.

In base ai dati stratigrafici ed ai profili di  $V_s$  profondi disponibili per l'area epicentrale, è ragionevolmente supporre che i picchi a frequenze più basse possano corrispondere alle discontinuità stratigrafiche presenti al passaggio tra i depositi continentali del Quaternario Superiore e quelli dell'unità stratigrafica del Quaternario Marino, o, per le aree più settentrionali del territorio comunale, al tetto dei depositi torbiditici Pliocenici.

Considerando le età geologiche, le profondità di seppellimento e i caratteri geologico-tecnici, appare verosimile che sia il Quaternario Marino che le Unità Plioceniche abbiano rigidità e velocità tipiche di un substrato rigido.

### 6.3 Terreni suscettibili di liquefazione

Un tra le criticità emerse durante gli approfondimenti di terzo livello di microzonazione sismica è legata alla presenza di terreni potenzialmente suscettibili di liquefazione.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

In occasione del sisma 2012 non sono però state segnalate evidenze di effetti di liquefazione, come fratture o vulcanelli con fuoriuscite di sabbie, che invece hanno diffusamente interessato contigue aree del modenese, tra San Felice sul Panaro e Cavezzo, e del ferrarese tra Cento e Terre del Reno.

L'assenza di evidenze di questi fenomeni contrasta però con la presenza di condizioni predisponenti la liquefazione in alcune aree appartenenti agli ambiti comunali indagati. Già negli studi eseguiti dalla Regione Emilia-Romagna durante la fase di emergenza sismica erano stati mappati, in maniera speditiva, limiti ed estensioni delle aree potenzialmente suscettibili di liquefazione (Martelli e Romani, 2013).

L'elevato quantitativo di indagini di sottosuolo 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 fenomeni, che sono state indicate nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica come Zone di Attenzione per Liquefazione (Tavole 4a e 4b, paragrafo 8.4).

Il consistente numero di indagini penetrometriche con piezocono (CPTU) archiviate in banca dati, ha infine permesso la realizzazione 120 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 principale del Panaro, affiorante ad occidente di Crevalcore ed in località Bolognina, e dei suoi canali distributori minori che formavano un sistema di delta interno che si accresceva entro estese paludi dulcicole. Altre aree soggette a potenziali fenomeni di liquefazione sono presenti in località Bevilacqua, in corrispondenza di un paleoalveo del Reno proveniente da Cento e presso Caselle, ove affiorano i depositi granulari dei ventagli da rotta appartenenti all'attuale corso del Panaro.

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 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 202 - San Giovanni in Persiceto" del Progetto Nazionale CARG (Allegato 1 – sezioni A-A', B-B').

Nei paragrafi seguenti, sono descritte le metodologie utilizzate per la definizione dei modelli sismo-stratigrafici, il calcolo dei fattori di amplificazione locale, dei parametri di scuotimento al suolo e la definizione del grado di rischio per le instabilità rilevate. 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.

### 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



## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

nazionali (ICMS - Gruppo di lavoro MS, 2008) o regionali (D.G.R. 630/2019), sia mediante analisi di risposta sismica locale.

Negli approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello la quantificazione dell'accelerazione massima attesa in superficie (PGA) e quella degli altri parametri e fattori relativi all'amplificazione del moto sismico, 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 acquisiti durante gli approfondimenti di terzo livello e da precedenti studi di microzonazione sismica di aree limitrofe, sono state eseguite modellazioni numeriche di risposta sismica locale. Le otto modellazioni proposte considerano sia le importanti variazioni di profondità del substrato sismico presenti nell'area di studio (paragrafo 6.2, Allegato 1 - Sezioni C-C', D-D', E-E', F-F'), sia le principali differenze stratigrafiche che caratterizzano le Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica individuate all'interno del territorio comunale (Tabella 7-1)

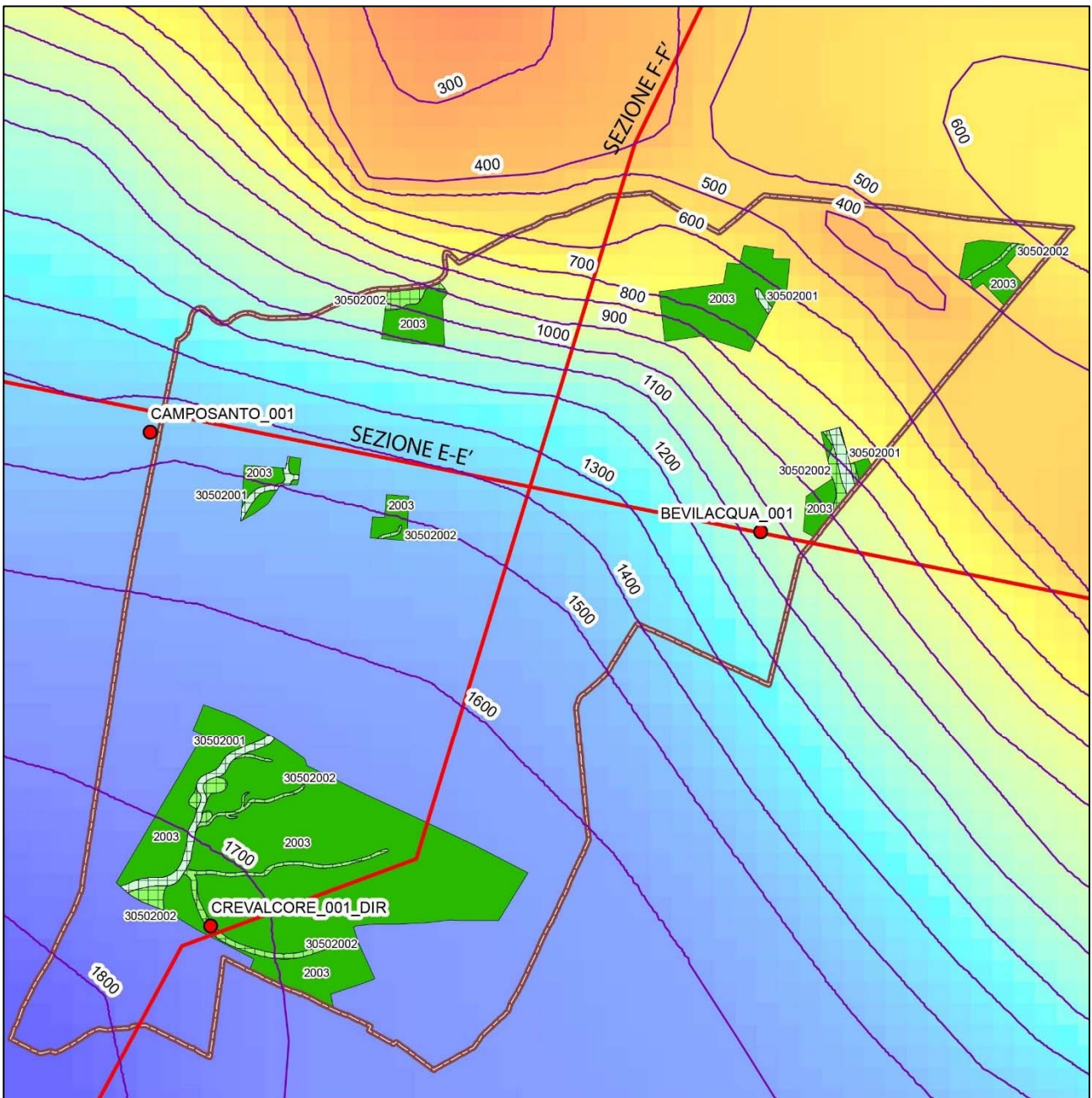
Tali modellazioni sono state denominate:

- RSL Crevalcore - MOPS 30502001 (Tabella 7-2), utilizzata per le porzioni dell'ambito di Crevalcore in cui affiorano sabbie e sabbie fini limose di riempimento di canale fluviale del Panaro. Questa modellazione è stata applicata nei settori meridionali del territorio comunale, ove si registrano i maggiori spessori delle unità sedimentarie quaternarie dovuti alla presenza di una tra le più ampie e depresse sinclinali della pianura emiliano-romagnola;
- RSL Crevalcore - MOPS 30502002 (Tabella 7-3), sviluppata per le porzioni dell'ambito di Crevalcore in cui affiorando limi e sabbie fini limose che costituiscono i corpi di ventaglio da rotta o i riempimenti di alvei minori del Panaro. Anche questa modellazione tiene conto degli elevati spessori delle unità sedimentarie quaternarie presenti nei settori meridionali del territorio comunale, dovuti alla forte subsidenza della depressione strutturale già descritta;
- RSL Crevalcore - MOPS 2003 (Tabella 7-4), applicata nelle aree di piana interalvea dell'ambito di Crevalcore, prevalentemente costituite da limi organici e argille limose organiche di bassa plasticità. Anche questa modellazione tiene conto degli elevati spessori delle unità sedimentarie quaternarie presenti nei settori meridionali del territorio comunale, dovuti alla forte subsidenza della depressione strutturale già descritta;

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

- RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 30502001 (Tabella 7-5), utilizzata nella fascia centrale del territorio comunale, compresa tra Bolognina, Palata Pepoli e Bevilacqua, in cui affiorano sabbie e sabbie fini limose di riempimento dei canali fluviali di Reno e Panaro. La modellazione considera le variazioni di spessore delle unità deposizionali quaternarie indotte dalla struttura monoclinale, immergente verso sud, che raccorda l'asse della sinclinale meridionale di Crevalcore con la piega tettonica di Galeazza che si sviluppa a settentrione;
- RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 30502002 (Tabella 7-6), applicata nella fascia centrale del territorio comunale, compresa tra Bolognina, Palata Pepoli e Bevilacqua, in cui sono presenti limi e sabbie fini limose che costituiscono i corpi di ventaglio da rotta e i riempimenti di alvei minori del Reno e del Panaro. Anche questa modellazione considera le variazioni di spessore delle unità deposizionali quaternarie indotte dalla struttura monoclinale, immergente verso sud, che raccorda l'asse della sinclinale meridionale di Crevalcore con la piega tettonica di Galeazza che si sviluppa a settentrione;
- RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 2003 (Tabella 7-7), sviluppata per le aree di piana interalvea della fascia centrale del territorio comunale, compresa tra Bolognina, Palata Pepoli e Bevilacqua. Queste aree sono sostanzialmente costituite da limi organici e argille limose organiche di bassa plasticità. Anche questa modellazione tiene conto delle variazioni di spessore delle unità deposizionali quaternarie indotte dalla struttura monoclinale, immergente verso sud, che raccorda l'asse della sinclinale meridionale di Crevalcore con la piega tettonica di Galeazza che si sviluppa a settentrione;
- RSL Galeazza - MOPS 30502002 (Tabella 7-8) utilizzata nell'ambito Galeazza, situato nella porzione nord orientale del territorio comunale, ove affiorano limi e sabbie fini limose di riempimento di alvei minori di Reno. In quest'ambito gli spessori delle unità sedimentarie quaternarie sono ridotti rispetto al resto del territorio comunale, a causa della presenza della piega anticlinale di Galeazza.
- RSL Galeazza - MOPS 2003 (Tabella 7-9), valida per le porzioni di piana interalvea dell'ambito di Galeazza, prevalentemente costituite da limi organici e argille limose organiche di bassa plasticità. Anche questa modellazione considera i ridotti spessori delle unità sedimentarie quaternarie dovuti alla presenza della piega anticlinale di Galeazza.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE



**Figura 7-1 - Area del Comune di Crevalcore e distribuzione delle Microzone Omogene 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 sono indicate le tracce delle sezioni stratigrafiche E-E' e F-F'' utilizzate per verificare le profondità del substrato sismico. Come descritto, il territorio è stato diviso in tre fasce in base alla profondità del bedrock e per ogni Microzona Omogenea (MOPS) all'interno di ogni singola fascia è stata eseguita una analisi di Risposta Sismica Locale.**

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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; Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 - Foglio 202 "San Giovanni in Persiceto" 2009, Regione Emilia-Romagna 1998), profili sismici - anche di recente acquisizione (Petronio *et al.*, 2018) - 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 geofisiche disponibili (es. down-hole, array) o da letteratura scientifica (Minarelli *et al.*, 2016; Petronio *et al.*, 2018); (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 Crevalcore – MOPS 30502001	RSL Crevalcore – MOPS 30502002	RSL Crevalcore – MOPS 2003
DESCRIZIONE	CREVALCORE Sabbie di paleoalveo affioranti Sinclinale - depressione strutturale	CREVALCORE Limi e sabbie da rotta affioranti Sinclinale - depressione strutturale	CREVALCORE Argille di piana interalvea Sinclinale - depressione strutturale
STRATIGRAFIA SUPERFICIALE	037024P171CPTU177 (fino a 27 metri)	037024P172CPTU179 (fino a 23 metri)	037024P684S699 (fino a 50 metri)
STRATIGRAFIA PROFONDA	"Crevalcore 001 dir" (fino a 2736 m)	"Crevalcore 001 dir" (fino a 2736 m)	"Crevalcore 001 dir" (fino a 2736 m)
SUBSTRATO SISMICO	"Crevalcore 001 dir" (fino a 2736 m) Sezione D-D' e F-F' (Allegato 1)	"Crevalcore 001 dir" (fino a 2736 m) Sezione D-D' e F-F' (Allegato 1)	"Crevalcore 001 dir" (fino a 2736 m) Sezione D-D' e F-F' (Allegato 1)
$V_s$ SUPERFICIALE	037024P171SCPT178 (fino a 27 metri)	037024P172SCPT180 (fino a 23 metri)	037024P684DH698 (fino a 50 metri)
$V_s$ PROFONDA	<i>Petronio et al. 2018</i> <i>Minarelli et al. 2016</i> <i>Garofalo et al. 2016</i>	<i>Petronio et al. 2018</i> <i>Minarelli et al. 2016</i> <i>Garofalo et al. 2016</i>	<i>Petronio et al. 2018</i> <i>Minarelli et al. 2016</i> <i>Garofalo et al. 2016</i>
	RSL Palata/Bevilacqua MOPS 30502001	RSL Palata/Bevilacqua MOPS 30502002	RSL Palata/Bevilacqua MOPS 2003

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

DESCRIZIONE	PALATA/BEVILACQUA Sabbie di paleoalveo affioranti Monoclinale	PALATA/BEVILACQUA Limi e sabbie da rotta affioranti Monoclinale	PALATA/BEVILACQUA Argille di piana interalvea Monoclinale
STRATIGRAFIA SUPERFICIALE	037024P198CPTU207 (fino a 25 metri) 038004P498CPTU503 (fino a 30 metri)	037024P602CPTU616 (fino a 19 metri)	037024P15CPTU18 (fino a 25 metri) 037024P13CPTU14 (fino a 30 metri) 037024P715S746 (fino a 55 metri)
STRATIGRAFIA PROFONDA	“Camposanto 001” (fino a 2508 m) “Bevilacqua 001” (fino a 1098 m)	“Camposanto 001” (fino a 2508 m) “Bevilacqua 001” (fino a 1098 m)	“Camposanto 001” (fino a 2508 m) “Bevilacqua 001” (fino a 1098 m)
SUBSTRATO SISMICO	“Camposanto 001” (fino a 2508 m) Sezione E-E' e F-F' (Allegato 1)	“Camposanto 001” (fino a 2508 m) Sezione E-E' e F-F' (Allegato 1)	“Camposanto 001” (fino a 2508 m) Sezione E-E' e F-F' (Allegato 1)
Vs SUPERFICIALE	037024P198SCPT208 (fino a 25 metri) 038004P498SCPT504 (fino a 30 metri)	-	037024P15SCPT19 (fino a 25 metri) 037024P13SCPT15 (fino a 30 metri)
Vs PROFONDA	<i>Petronio et al. 2018</i> <i>Minarelli et al. 2016</i> <i>Garofalo et al. 2016</i>	<i>Petronio et al. 2018</i> <i>Minarelli et al. 2016</i> <i>Garofalo et al. 2016</i>	<i>Petronio et al. 2018</i> <i>Minarelli et al. 2016</i> <i>Garofalo et al. 2016</i>

	RSL Galeazza – MOPS 30502002	RSL Galeazza – MOPS 2003
DESCRIZIONE	GALEAZZA Limi e sabbie da rotta affioranti Anticlinale - alto strutturale	GALEAZZA Argille di piana interalvea Anticlinale - alto strutturale
STRATIGRAFIA SUPERFICIALE	-	037024P706CPTU732 (fino a 20 metri) 038004P842CPTU880 MS Cento (fino a 30 metri)
STRATIGRAFIA PROFONDA	“Bevilacqua 001” (fino a 1098 m)	“Bevilacqua 001” (fino a 1098 m)
SUBSTRATO SISMICO	“Bevilacqua 001” (fino a 1098 m) Sezione “Cento-Occhiobello” <i>Martelli et al. 2017</i>	“Bevilacqua 001” (fino a 1098 m) Sezione “Cento-Occhiobello” <i>Martelli et al. 2017</i>
Vs SUPERFICIALE	-	038004P842SCPT881 (fino a 30 metri)
Vs PROFONDA	<i>Petronio et al. 2018</i> <i>Minarelli et al. 2016</i> <i>Garofalo et al. 2016</i>	<i>Petronio et al. 2018</i> <i>Minarelli et al. 2016</i> <i>Garofalo 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 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).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

La stima delle velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) dei terreni di copertura compresi tra il bedrock e le prime decine di metri di sottosuolo è stata ricavata estrapolando i valori di  $V_s$  acquisiti mediante down-hole profondi (Minarelli *et al.*, 2016) e indagini di sismica a riflessione (Petronio *et al.*, 2018) e array sismici, eseguiti nell'ambito del Progetto di Ricerca Europeo "Liquefact".

L'utilizzo dei dati acquisiti nella microzonazione di Mirabello (Minarelli *et al.*, 2016) e Cavezzo (Petronio *et al.*, 2018) è stato possibile considerando che i diversi territori appartengono allo stesso contesto geologico-strutturale di Crevalcore. Questo 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 unità stratigrafiche nelle diverse aree.

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.

Sulla base dei dati e delle conoscenze disponibili, sono stati considerati due contrasti di impedenza profondi nelle modellazioni numeriche di risposta sismica locale.

La superficie verosimilmente associata al maggior aumento di rigidità e di velocità di propagazione delle onde di taglio ( $V_s$ ) corrisponde alla discordanza che marca il tetto delle successioni torbiditiche del Pliocene. Questa superficie risulta piegata dalla deformazione tettonica, motivo per cui si approfondisce notevolmente procedendo verso sud. Le arenarie torbiditiche si sono deposte in ambienti marini profondi e hanno subito un processo di cementazione e litificazione per cui sono caratterizzate da velocità delle onde sismiche relativamente elevate (Garofalo *et al.*, 2016). Questo contrasto di impedenza, individuato tra i 450 e 1600 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 505 m dei settori meridionali ed i 230 metri delle aree più settentrionali.

In Tabella 7-2, Tabella 7-3, Tabella 7-4, Tabella 7-5, Tabella 7-6, Tabella 7-7, Tabella 7-8 e Tabella 7-9 sono riportate le sintesi dei modelli sismo-stratigrafici proposti.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

RSL Crevalcore – MOPS 30502001			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	2,5	Buonacompra SDMT2 (0-2.8) - L	125
2,5	3,5	Buonacompra SDMT2 (3-4.4) - S	145
6	4	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	120
10	4	Crevalcore (10m) L+A	170
14	3	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	240
17	4	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	280
21	3	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	255
24	4	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	180
28	5	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	272
33	2	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	280
35	4	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	291
39	6	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	250
45	15	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	300
60	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	360
70	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	330
80	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	350
90	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	360
100	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	375
105	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	365
110	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	392
135	27	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	375
162	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	400
170	30	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	390
200	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	480
210	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	440
218	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	460
223	15	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	440
238	13	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	460
251	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	450
271	9	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	480
280	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	470
300	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	485
320	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	500
330	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	521
340	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	530
365	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	545
390	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	560
415	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	570
440	15	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	630
455	15	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	600

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

470	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	650
475	30	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	670
505	30	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
535	27	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
562	18	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
580	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
605	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
630	28	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
658	22	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
680	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
705	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
730	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
755	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
780	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
805	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
830	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
855	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
880	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
905	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
930	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
955	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
980	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1005	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1030	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1055	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1080	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1105	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1130	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1155	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1180	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1205	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1230	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1255	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1280	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1305	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1330	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1355	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1380	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1405	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1430	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1455	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1480	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1505	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

1530	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1555	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1580	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1600	Half-Space	Bedrock – Torbiditi plioceniche	1200

Tabella 7-2 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL Crevalcore - MOPS 30502001.

RSL Crevalcore - MOPS 30502002			
PROFONDITA'	SPESORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	4	Buonacompra SDMT2 (0-2.8) - L	145
4	6	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	125
10	4	Crevalcore (10m) L+A	175
14	3	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	240
17	4	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	280
21	3	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	255
24	4	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	180
28	5	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	272
33	2	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	280
35	4	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	291
39	6	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	250
45	15	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	300
60	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	360
70	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	330
80	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	350
90	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	360
100	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	375
105	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	365
110	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	392
135	27	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	375
162	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	400
170	30	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	390
200	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	480
210	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	440
218	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	460
223	15	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	440
238	13	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	460
251	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	450
271	9	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	480
280	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	470
300	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	485
320	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	500
330	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	521
340	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	530

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

365	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	545
390	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	560
415	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	570
440	15	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	630
455	15	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	600
470	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	650
475	30	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	670
505	30	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
535	27	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
562	18	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
580	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
605	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
630	28	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
658	22	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
680	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
705	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
730	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
755	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
780	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
805	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
830	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
855	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
880	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
905	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
930	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
955	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
980	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1005	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1030	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1055	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1080	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1105	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1130	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1155	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1180	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1205	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1230	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1255	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1280	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1305	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1330	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1355	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1380	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

1405	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1430	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1455	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1480	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1505	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1530	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1555	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1580	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1600	Half-Space	Bedrock – Torbiditi plioceniche	1200

Tabella 7-3 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL Crevalcore - MOPS 30502002.

RSL Crevalcore - MOPS 2003			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	5	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	130
5	5	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	125
10	4	Crevalcore (10m) L+A	175
14	3	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	240
17	4	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	280
21	3	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	255
24	4	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	180
28	5	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	272
33	2	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	280
35	4	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	291
39	6	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	250
45	15	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	300
60	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	360
70	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	330
80	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	350
90	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	360
100	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	375
105	5	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	365
110	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	392
135	27	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	375
162	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	400
170	30	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	390
200	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	480
210	8	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	440
218	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	460
223	15	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	440
238	13	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	460
251	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	450
271	9	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	480

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

280	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	470
300	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	485
320	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	500
330	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	521
340	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	530
365	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	545
390	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	560
415	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	570
440	15	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	630
455	15	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	600
470	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	650
475	30	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	670
505	30	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
535	27	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
562	18	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
580	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
605	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
630	28	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
658	22	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
680	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
705	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
730	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
755	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
780	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
805	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
830	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
855	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
880	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
905	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
930	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
955	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
980	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1005	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1030	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1055	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1080	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1105	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1130	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1155	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1180	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1205	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1230	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1255	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

1280	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1305	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1330	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1355	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1380	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1405	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1430	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1455	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1480	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1505	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1530	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1555	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1580	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1600	Half-Space	Bedrock – Torbiditi plioceniche	1200

Tabella 7-4 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL Crevalcore - MOPS 2003.

RSL Palata/Bevilacqua – MOPS 30502001			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	2,5	Buonacompra SDMT2 (0-2.8) - L	125
2,5	3,5	Buonacompra SDMT2 (3-4.4) - S	145
6	4	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	120
10	4	Crevalcore (10m) L+A	155
14	4	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	240
18	3	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	245
21	4	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	265
25	5	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	220
30	3	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	280
33	6	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	260
39	5	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	250
44	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	310
55	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	295
67	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	310
79	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	345
90	13	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	355
103	14	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	360
117	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	450
125	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	410
150	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	450
175	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	475
185	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	490
197	9	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	510
206	21	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	500

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

227	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	515
235	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	520
245	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	520
250	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	535
270	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
290	10	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
300	15	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
315	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
335	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
360	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
380	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
400	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
425	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
450	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
475	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
500	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
525	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
550	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
575	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
600	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
625	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
650	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
675	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
700	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
725	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
750	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
775	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
800	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
825	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
850	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
875	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
900	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
925	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
950	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
975	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1000	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1025	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1050	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1075	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1100	Half-Space	Bedrock – Torbiditi plioceniche	1200

**Tabella 7-5 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 30502001.**

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

RSL Palata/Bevilacqua – MOPS 30502002			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	4	Buonacompra SDMT2 (0-2.8) - L	145
4	2	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	110
6	4	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	120
10	4	Crevalcore (10m) L+A	155
14	4	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	240
18	3	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	245
21	4	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	265
25	5	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	220
30	3	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	280
33	6	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	260
39	5	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	250
44	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	310
55	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	295
67	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	310
79	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	345
90	13	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	355
103	14	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	360
117	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	450
125	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	410
150	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	450
175	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	475
185	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	490
197	9	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	510
206	21	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	500
227	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	515
235	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	520
245	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	520
250	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	535
270	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
290	10	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
300	15	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
315	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
335	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
360	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
380	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
400	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
425	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
450	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
475	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
500	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

525	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
550	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
575	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
600	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
625	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
650	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
675	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
700	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
725	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
750	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
775	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
800	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
825	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
850	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
875	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
900	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
925	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
950	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
975	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1000	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1025	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1050	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1075	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1100	Half-Space	Bedrock – Torbiditi plioceniche	1200

Tabella 7-6 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 30502002.

RSL Palata/Bevilacqua – MOPS 2003			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	4	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	130
4	2	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	110
6	4	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	120
10	4	Crevalcore (10m) L+A	155
14	4	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	240
18	3	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	245
21	4	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	265
25	5	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	220
30	3	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	280
33	6	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	260
39	5	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	250
44	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	310
55	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	295



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

67	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	310
79	11	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	345
90	13	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	355
103	14	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	360
117	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	450
125	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	410
150	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	450
175	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	475
185	12	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	490
197	9	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	510
206	21	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	500
227	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	515
235	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	520
245	5	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	520
250	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	535
270	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
290	10	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
300	15	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
315	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
335	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
360	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
380	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
400	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
425	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
450	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
475	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
500	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
525	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
550	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
575	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
600	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
625	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
650	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
675	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
700	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
725	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
750	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
775	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
800	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
825	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
850	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
875	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
900	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

925	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
950	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
975	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1000	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1025	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1050	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1075	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
1100	Half-Space	Bedrock – Torbiditi plioceniche	1200

Tabella 7-7 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 2003.

RSL Galeazza – MOPS 30502002			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	4	Buonacompra SDMT2 (0-2.8) - L	150
4	2	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	128
6	3	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	110
9	3	Crevalcore (10m) L+A	155
12	4	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	209
16	3	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	270
19	5	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	230
24	5	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	249
29	10	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	245
39	5	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	255
44	11	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	305
55	13	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	285
68	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	320
78	19	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	335
97	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	415
117	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	395
125	17	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	420
142	15	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	455
157	13	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	480
170	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	510
180	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	520
205	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	530
230	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
250	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
270	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
295	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
320	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
345	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
370	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
395	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

420	30	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
450	Half-Space	Bedrock – Torbiditi plioceniche	1200

Tabella 7-8 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL Galeazza - MOPS 30502002.

RSL Galeazza – MOPS 2003			
PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	3	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	145
3	3	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	128
6	3	Buonacompra S1 SH2 (5.5-6) - A + L (O)	110
9	3	Crevalcore (10m) L+A	155
12	4	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	209
16	3	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	270
19	5	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	230
24	5	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	249
29	10	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	245
39	5	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	255
44	11	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	305
55	13	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	285
68	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	320
78	19	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	335
97	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	415
117	8	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	395
125	17	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	420
142	15	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	455
157	13	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	480
170	10	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	510
180	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	520
205	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	530
230	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
250	20	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
270	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
295	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
320	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
345	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
370	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
395	25	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
420	30	Quaternario Marino - Lineare Elastico	800
450	Half-Space	Bedrock – Torbiditi plioceniche	1200

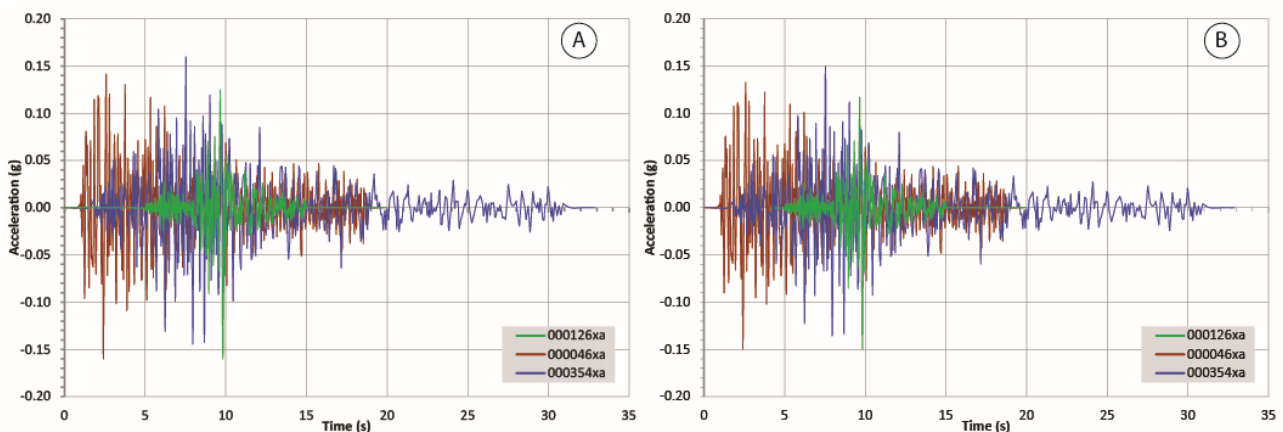
Tabella 7-9 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL Galeazza - MOPS 2003.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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 e Tabella 7-9), 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 variazioni di pericolosità di base all'interno del territorio comunale, gli accelerogrammi di input sono stati scalati rispetto alle  $a_{g,ref}$  ottenute interpolando i valori di accelerazione definite ai nodi del reticolo su cui si basa la mappa di pericolosità sismica nazionale INGV ( $T_R$  475 anni, 50<sup>esimo</sup> percentile). Per i diversi ambiti geografici sono stati quindi utilizzati valori di  $a_{g,ref}$  di 0,16 g e 0,15 g. I valori maggiori sono stati ottenuti ed adottati per la porzione meridionale del territorio comunale in cui ricade l'ambito di Crevalcore, mentre quelli meno elevati sono stati applicati al resto del territorio. (Figura 7-29).



**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  $a_{g,ref}$  di 0,16 g per l'ambito di Crevalcore (A) e di 0,15 g per il resto del territorio comunale (B).**

Sono stati infine calcolati 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 CREVALCORE

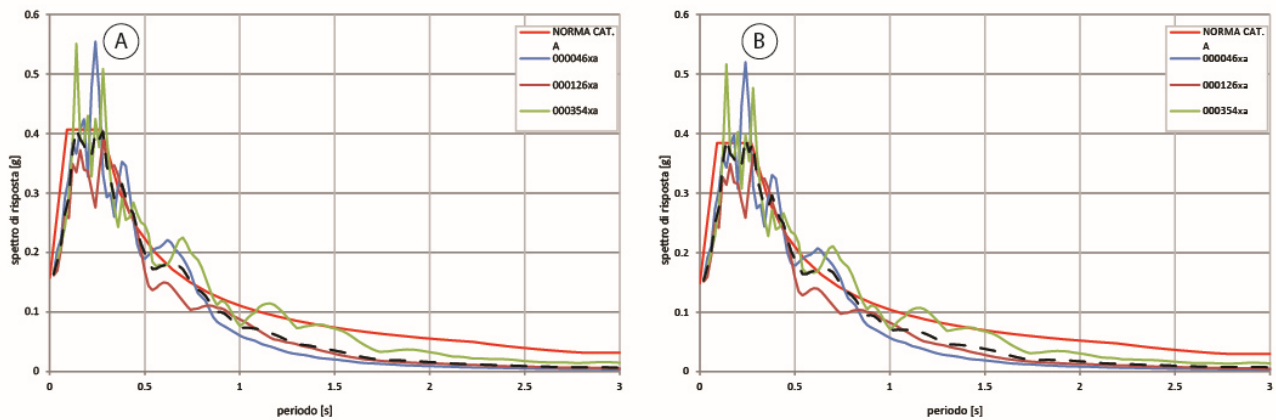


Figura 7-3 - Spettri di risposta al bedrock per i due accelerogrammi, e loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria di sottosuolo "A" secondo le NTC2018. Valori di  $a_{\text{gref}}$  di 0,16 g per Crevalcore (A) e di 0,15 g per il resto del territorio comunale (B).

RSL Crevalcore - MOPS 30502001

In Figura 7-4 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 0,30 Hz e una seconda a circa 0,70 Hz, in sostanziale 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 CREVALCORE

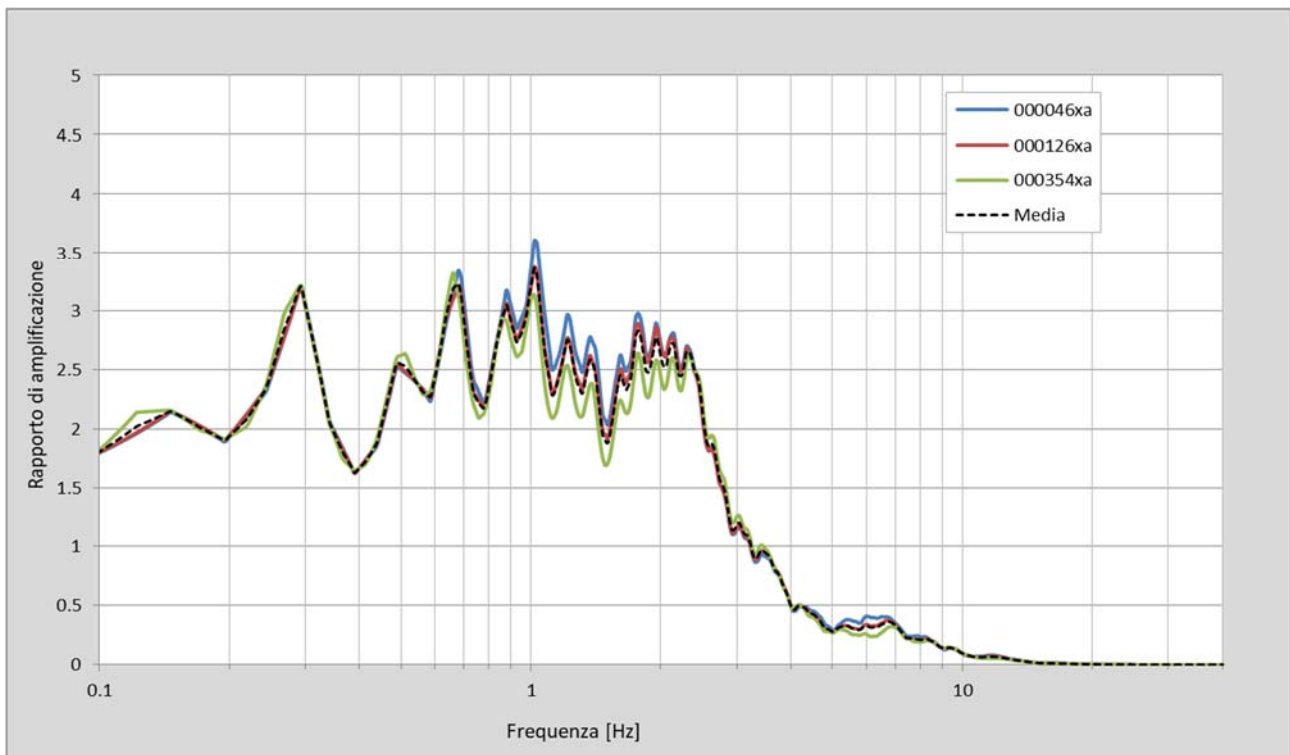


Figura 7-4 - RSL Crevalcore – MOPS 30502001. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 (A) e per la loro media.

In Figura 7-5 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, 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 CREVALCORE

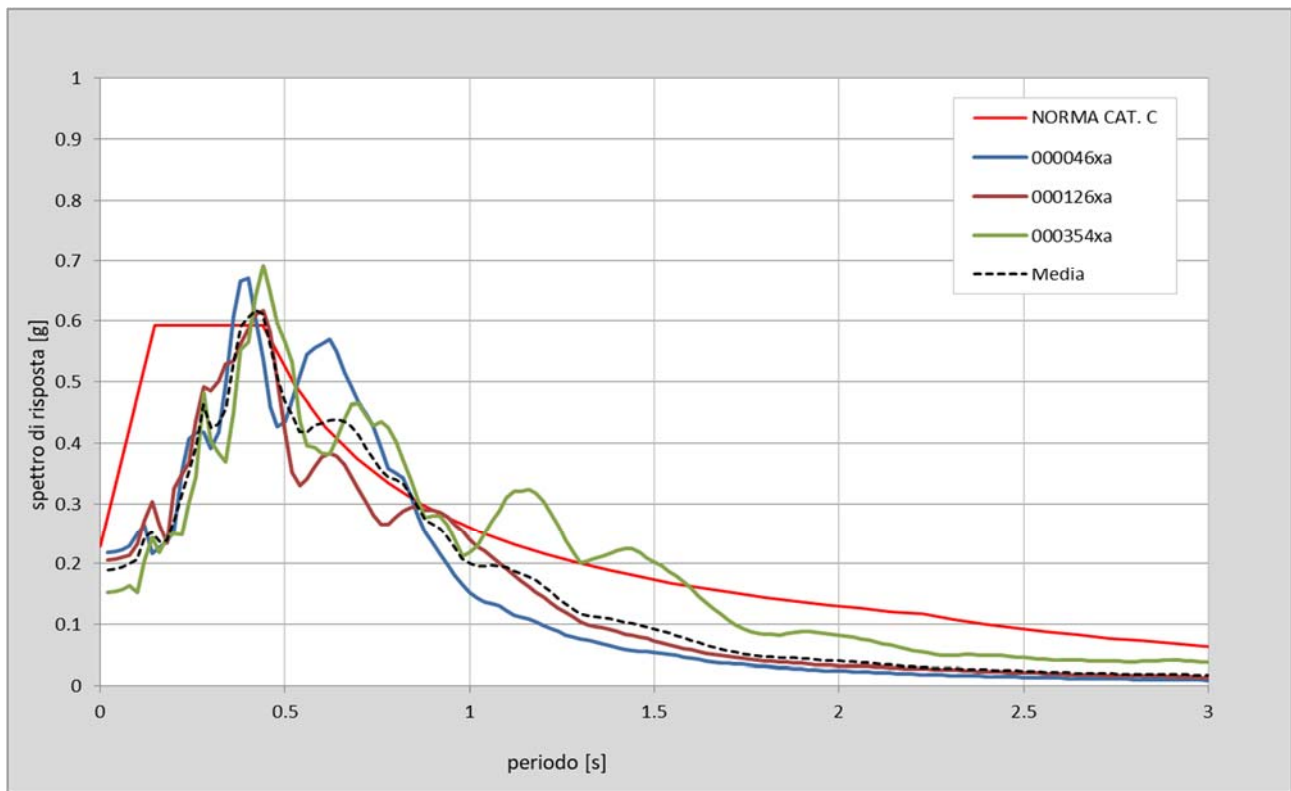


Figura 7-5 - RSL Crevalcore – MOPS 30502001. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-6 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 30 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 9 metri e la superficie.

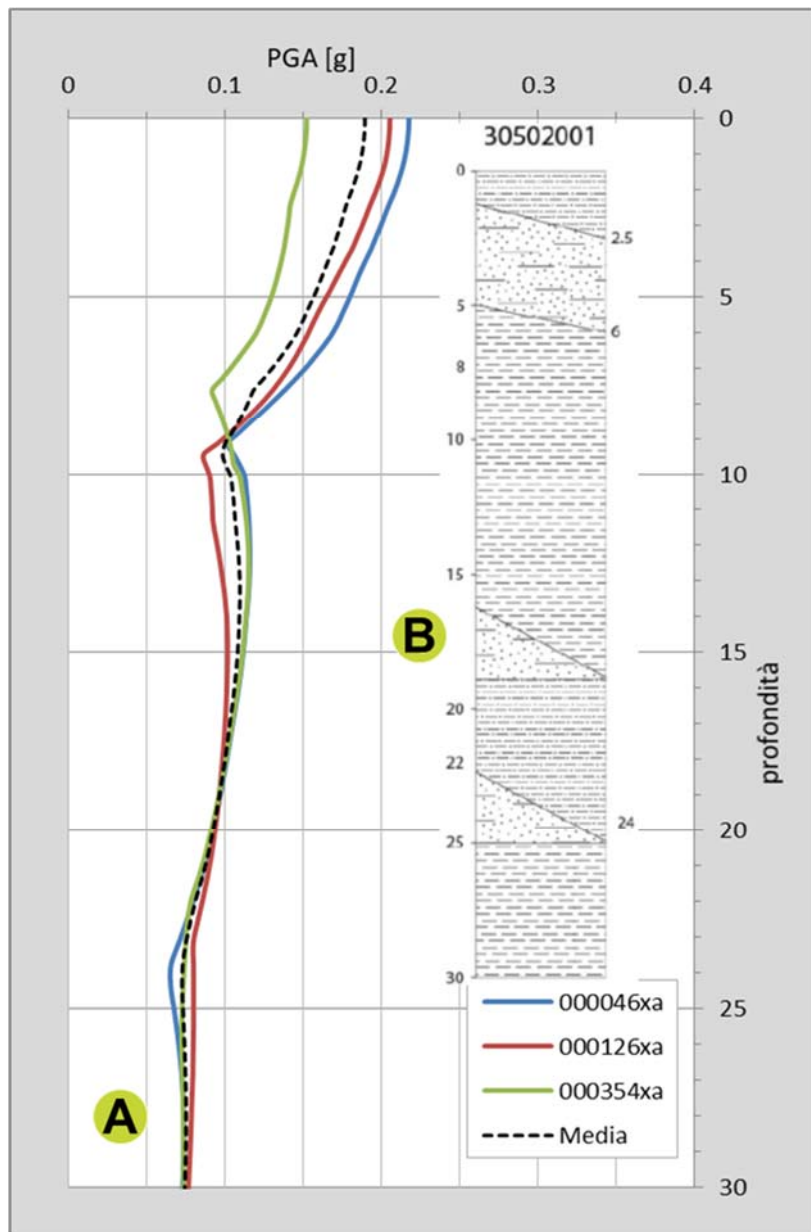
**MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE**


Figura 7-6 - RSL Crevalcore – MOPS 30502001. Andamento dell’accelerazione di picco rispetto alla profondità nei primi 30 m di sottosuolo (A). Stratigrafia semplificata della microzona in esame (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,19 g (Figura 7-6) si ottiene un fattore di amplificazione  $FA_{(PGA)} = 1,18$ . I fattori di amplificazione, ottenuti mediante integrazione degli spettri in accelerazione e in pseudovelocità di output per prefissati periodi di vibrazione, sono riassunti in Tabella 7-10.

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1.0)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$	$SA1-FA_{(0.1-0.5)}$	$SA2-FA_{(0.4-0.8)}$	$SA3-FA_{(0.7-1.1)}$	$SA4-FA_{(0.5-1.5)}$
1,18	1,55	2,52	2,59	1,31	2,40	2,61	2,56

Tabella 7-10 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona Crevalcore - MOPS 30502001.



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

RSL Crevalcore - MOPS 30502002

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 Hz e una seconda a circa 0,70 Hz, in sostanziale 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.

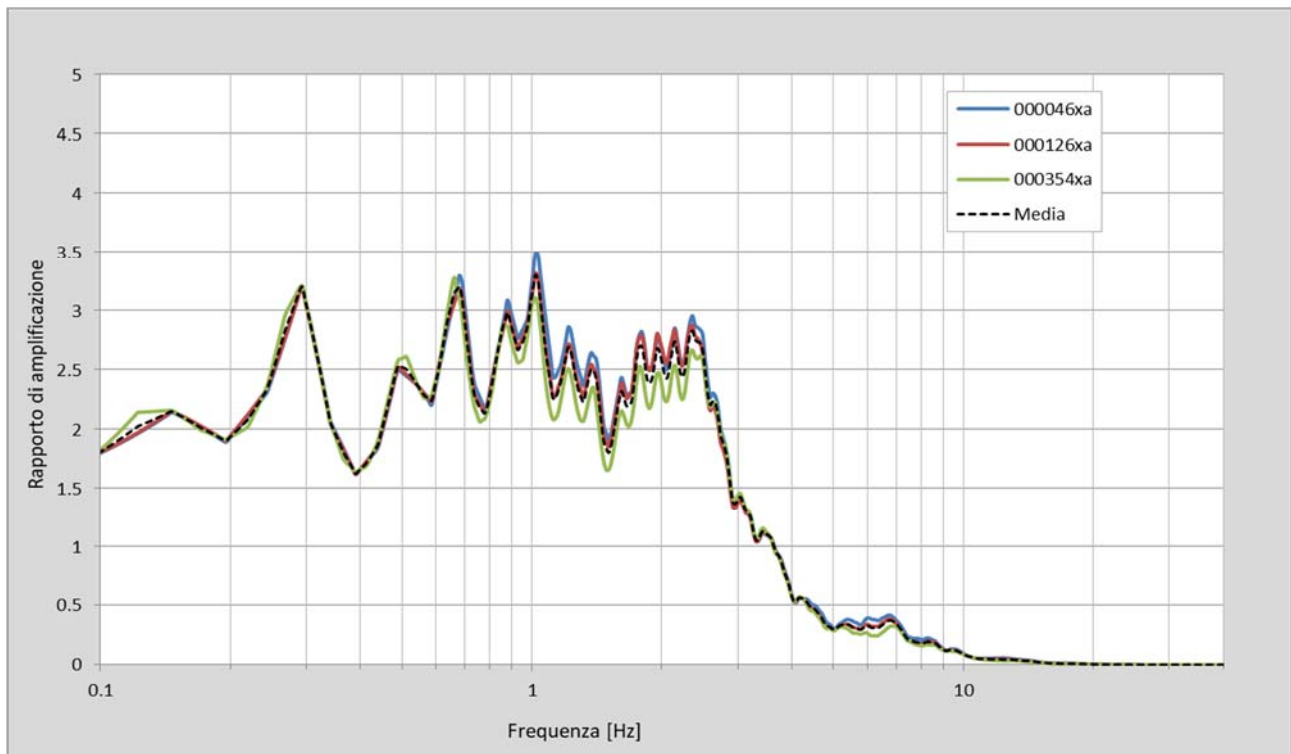


Figura 7-7 - RSL Crevalcore – MOPS 30502002. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 (A) e per la loro media.

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 CREVALCORE

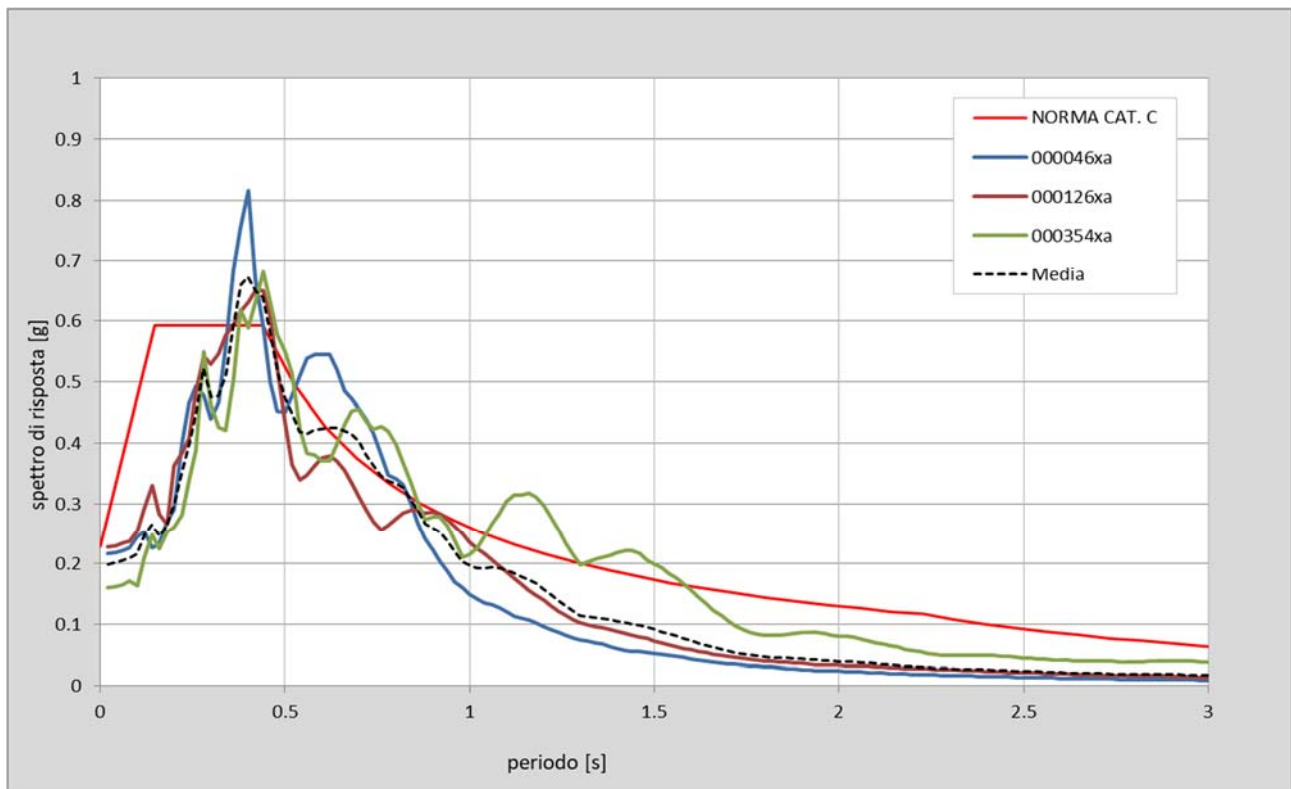


Figura 7-8 - RSL Crevalcore – MOPS 30502002. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-9 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 30 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 10 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

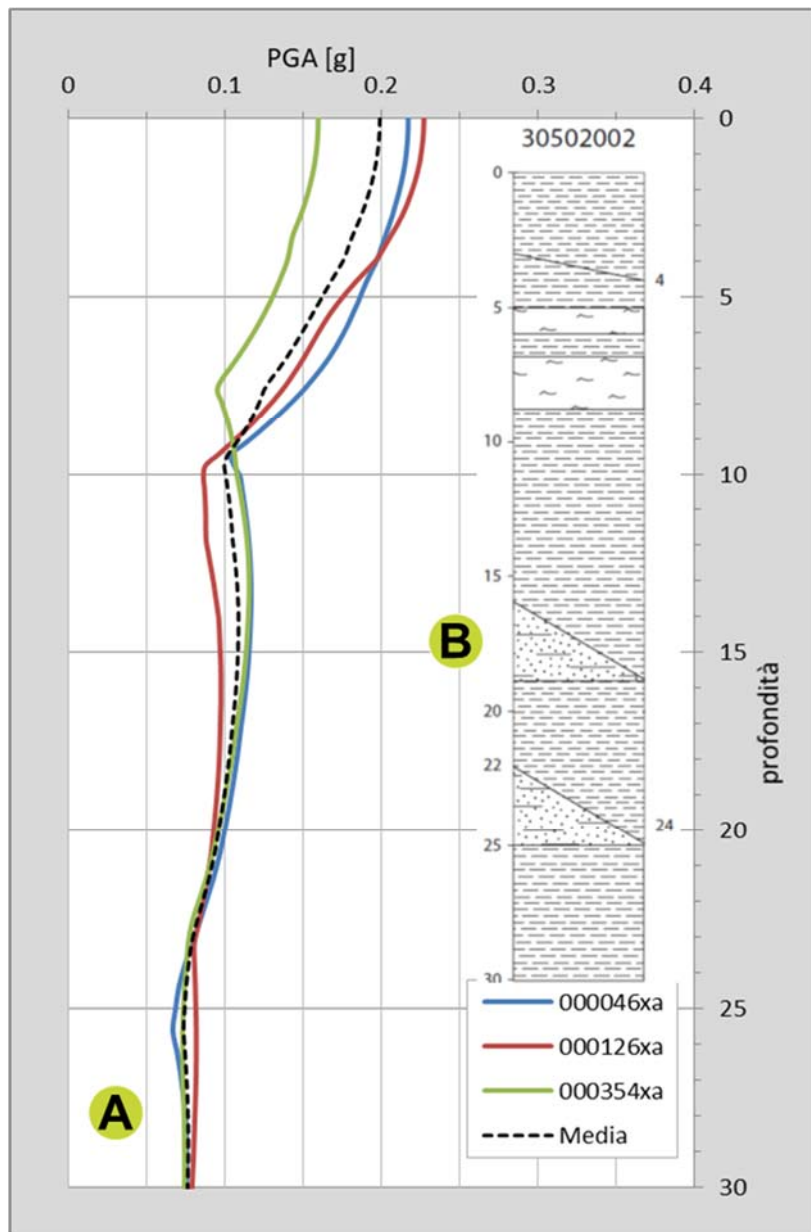


Figura 7-9 - RSL Crevalcore – MOPS 30502002. Andamento dell’accelerazione di picco rispetto alla profondità nei primi 30 m di sottosuolo (A). Stratigrafia semplificata della microzona in esame (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,20 g (Figura 7-9) si ottiene un fattore di amplificazione  $FA_{(PGA)} = 1,24$ . 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.

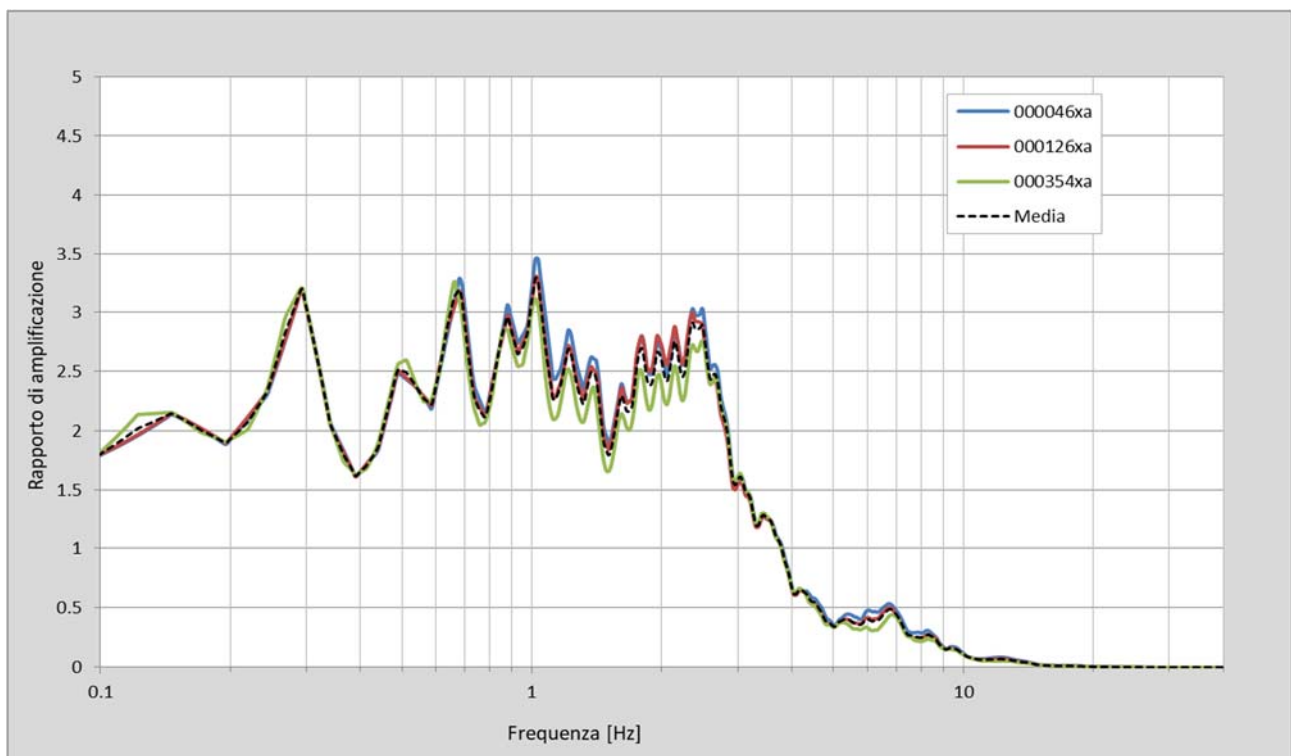
$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1.0)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$	$SA1-FA_{(0.1-0.5)}$	$SA2-FA_{(0.4-0.8)}$	$SA3-FA_{(0.7-1.1)}$	$SA4-FA_{(0.5-1.5)}$
1,24	1,67	2,46	2,54	1,42	2,39	2,55	2,51

Tabella 7-11 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona Crevalcore - MOPS 30502002.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

### RSL Crevalcore - MOPS 2003

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 e più elevata amplificazione a frequenza di circa 0,30 Hz e una seconda a circa 0,70 Hz, in sostanziale 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 Crevalcore – MOPS 2003. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 (A) 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 (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 CREVALCORE

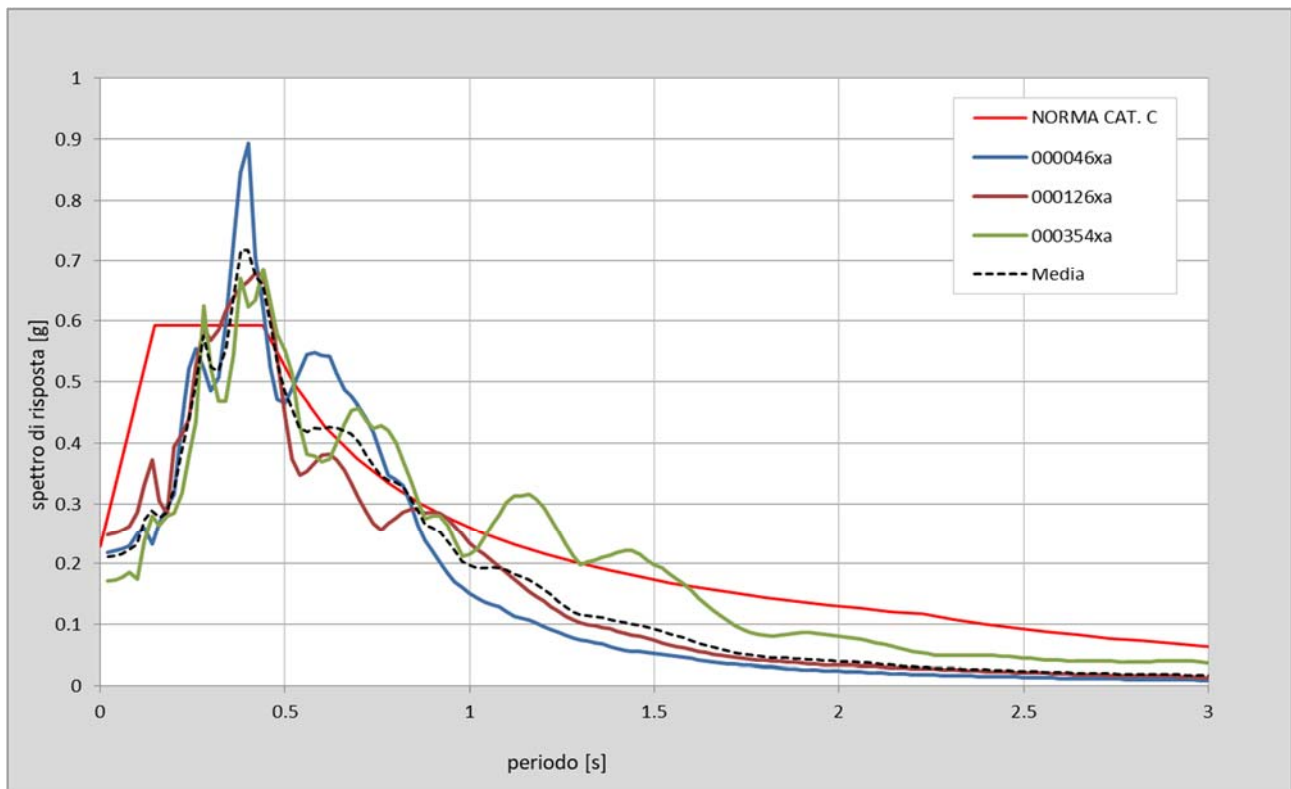


Figura 7-11 - RSL Crevalcore – MOPS 2003. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-12 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 30 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 10 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

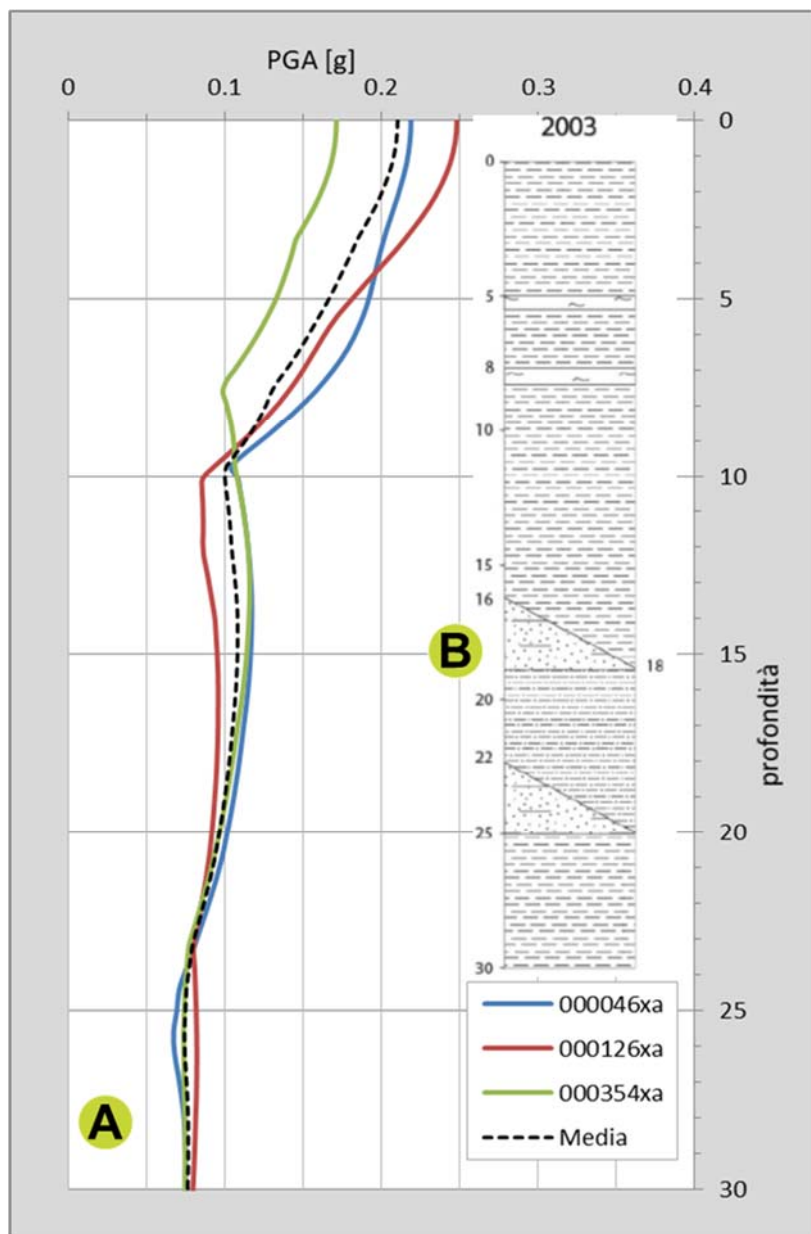


Figura 7-12 - RSL Crevalcore – MOPS 2003. Andamento dell’accelerazione di picco rispetto alla profondità nei primi 30 m di sottosuolo (A). Stratigrafia semplificata della microzona in esame (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,21 g (Figura 7-12) si ottiene un fattore di amplificazione  $FA_{(PGA)} = 1,31$ . 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.

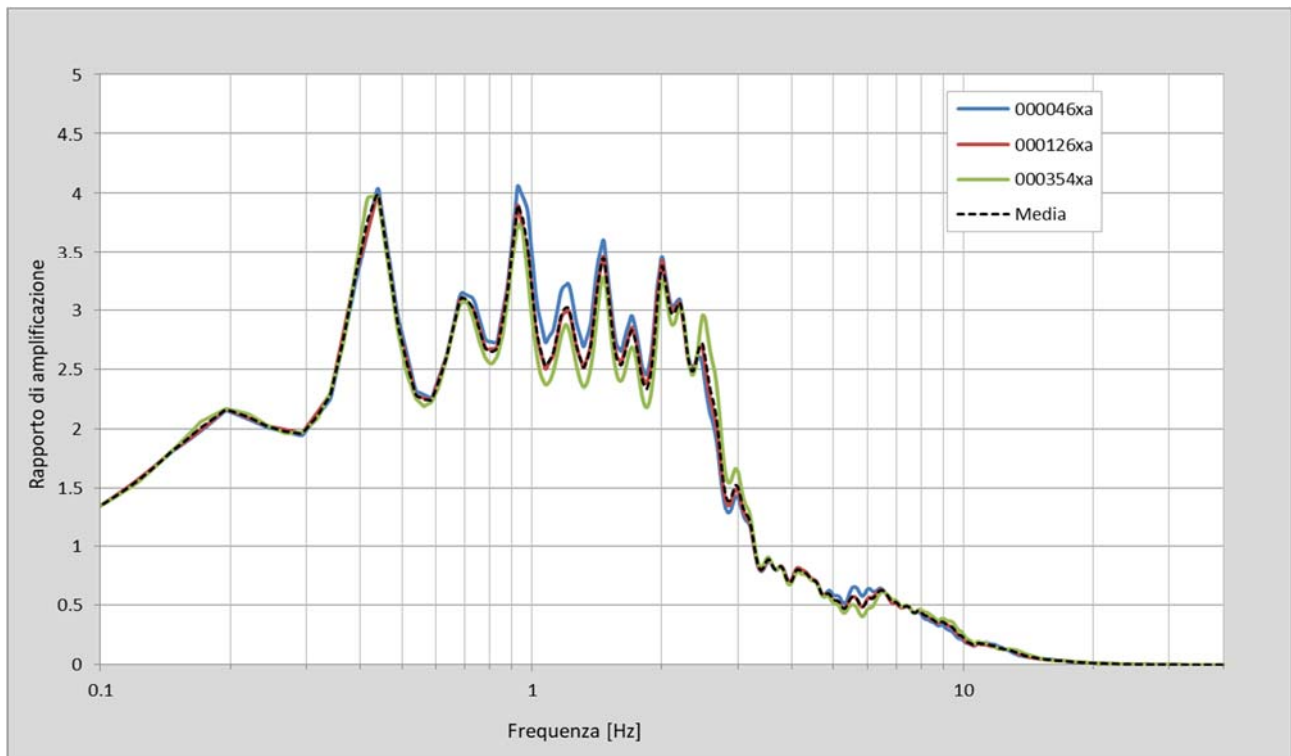
$FA_{PGA}$	SI1-FH <sub>(0.1-0.5)</sub>	SI2-FH <sub>(0.5-1.0)</sub>	SI3-FH <sub>(0.5-1.5)</sub>	SA1-FA <sub>(0.1-0.5)</sub>	SA2-FA <sub>(0.4-0.8)</sub>	SA3-FA <sub>(0.7-1.1)</sub>	SA4-FA <sub>(0.5-1.5)</sub>
1,31	1,77	2,47	2,54	1,52	2,42	2,55	2,51

Tabella 7-12 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona Crevalcore - MOPS 2003.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

### RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 30502001

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 0,42 Hz e una seconda a circa 0,90 Hz, in sostanziale 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 Palata/Bevilacqua – MOPS 30502001. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 (B) 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 (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 CREVALCORE

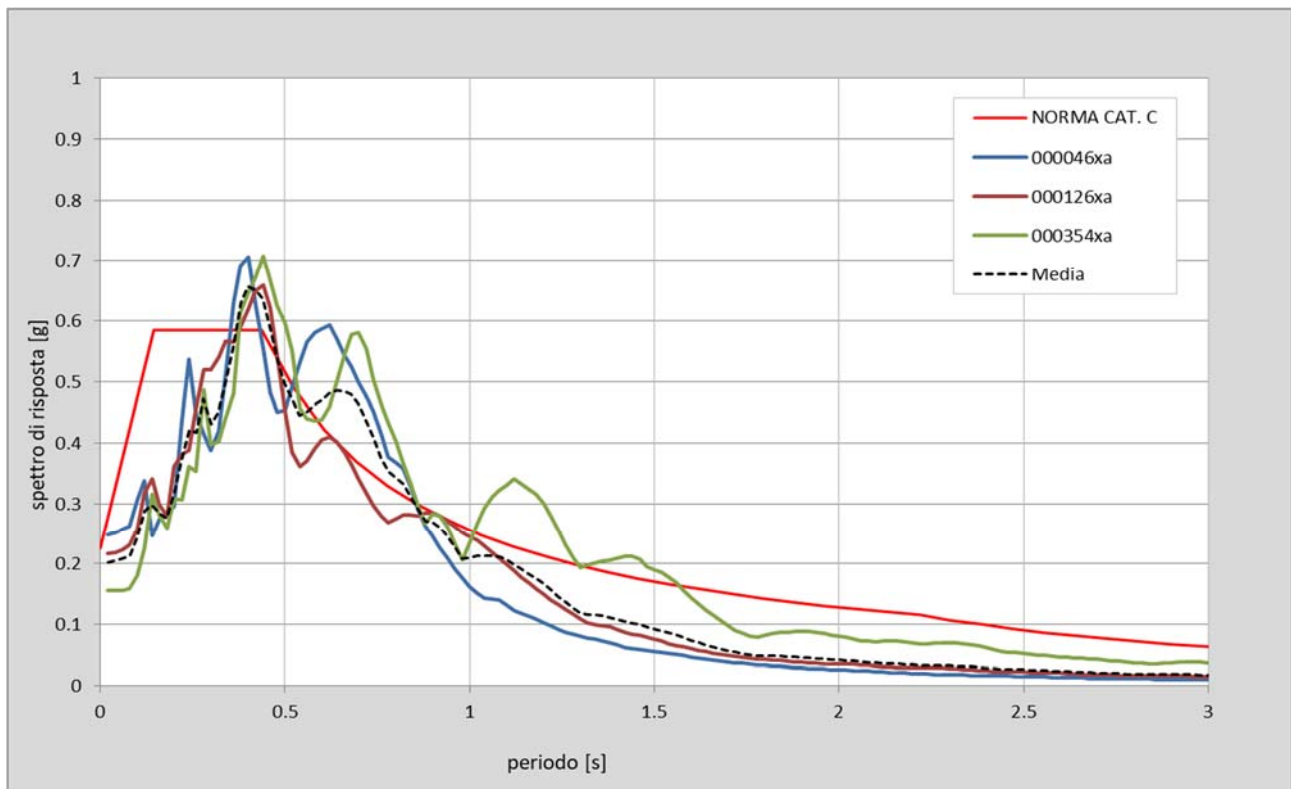


Figura 7-14 - RSL Palata/Bevilacqua – MOPS 30502001. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-15 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 30 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 gli 8 metri e la superficie.



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

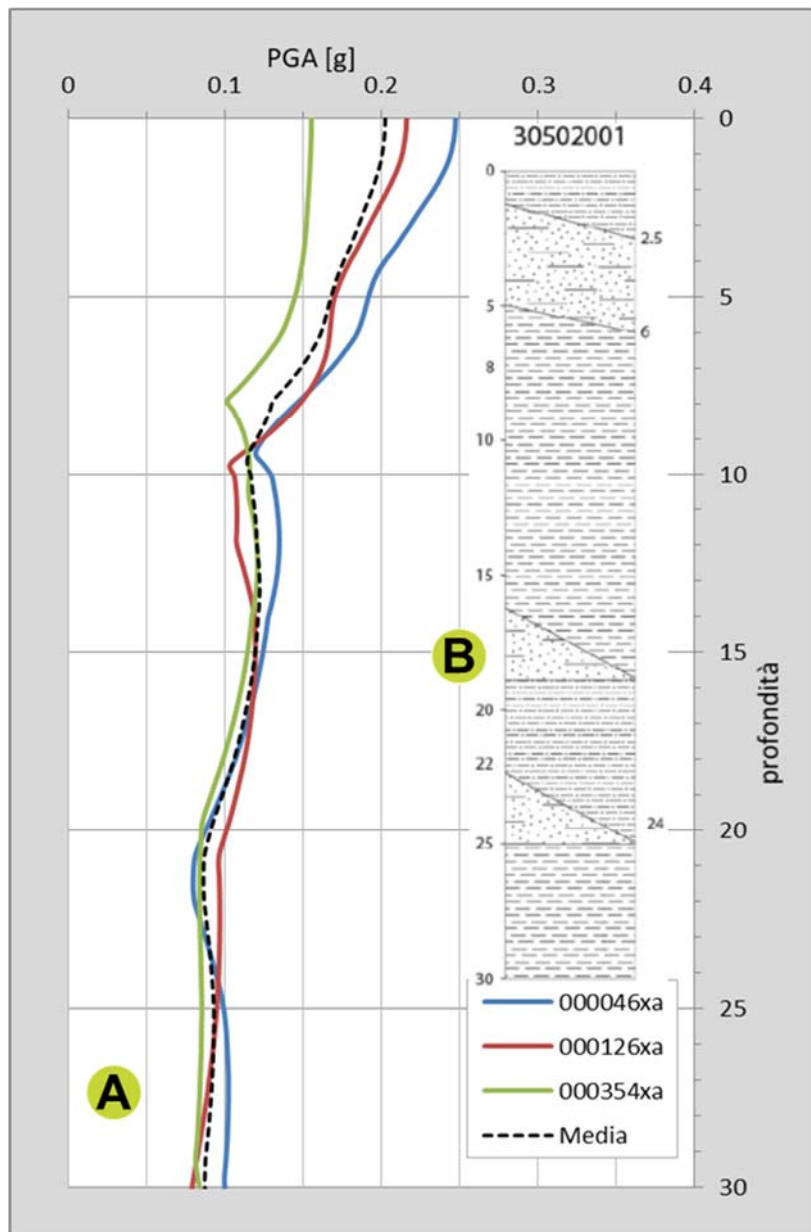


Figura 7-15 - RSL Palata/Bevilacqua – MOPS 30502001. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 30 m di sottosuolo (A). Stratigrafia semplificata della microzona in esame (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,20 g (Figura 7-15) si ottiene un fattore di amplificazione  $FA_{(PGA)} = 1,35$ . 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 <sub>(0.1-0.5)</sub>	SI2-FH <sub>(0.5-1.0)</sub>	SI3-FH <sub>(0.5-1.5)</sub>	SA1-FA <sub>(0.1-0.5)</sub>	SA2-FA <sub>(0.4-0.8)</sub>	SA3-FA <sub>(0.7-1.1)</sub>	SA4-FA <sub>(0.5-1.5)</sub>
1,35	1,77	2,83	2,88	1,51	2,75	2,89	2,87

Tabella 7-13 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona Palata/Bevilacqua - MOPS 30502001.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 30502002

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 alla frequenza di circa 0,42 Hz e una seconda a circa 0,90 Hz, in sostanziale 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.

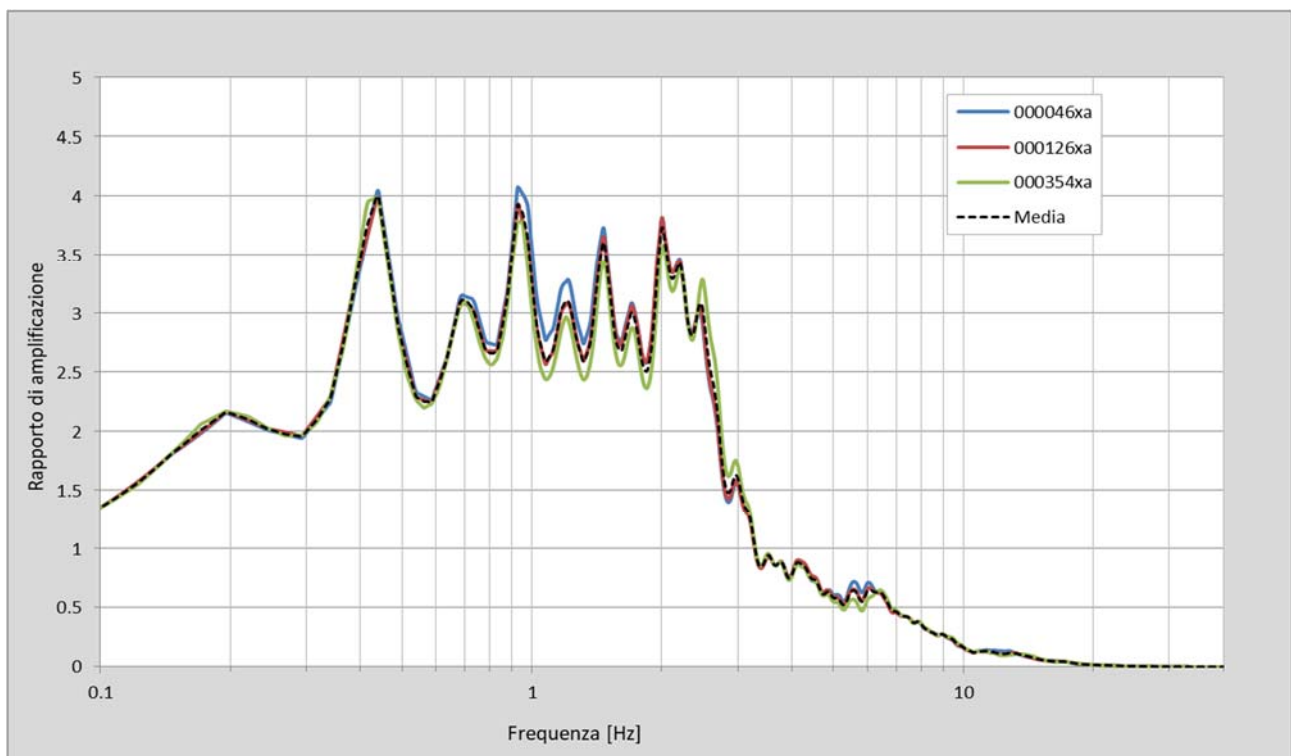


Figura 7-16 - RSL Palata/Bevilacqua – MOPS 30502002. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 (B) e per la loro media.

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 (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 CREVALCORE

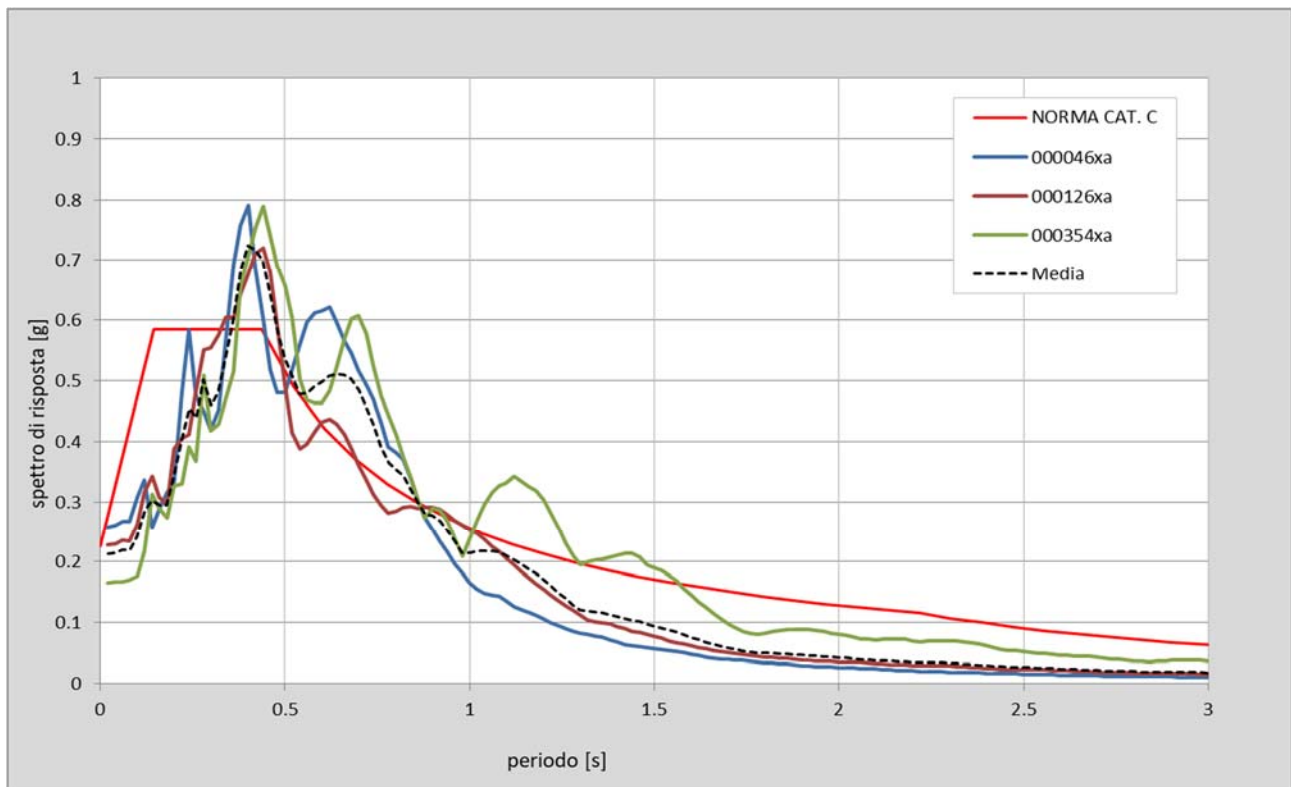


Figura 7-17 - RSL Palata/Bevilacqua – MOPS 30502002. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-18 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 30 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 9 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

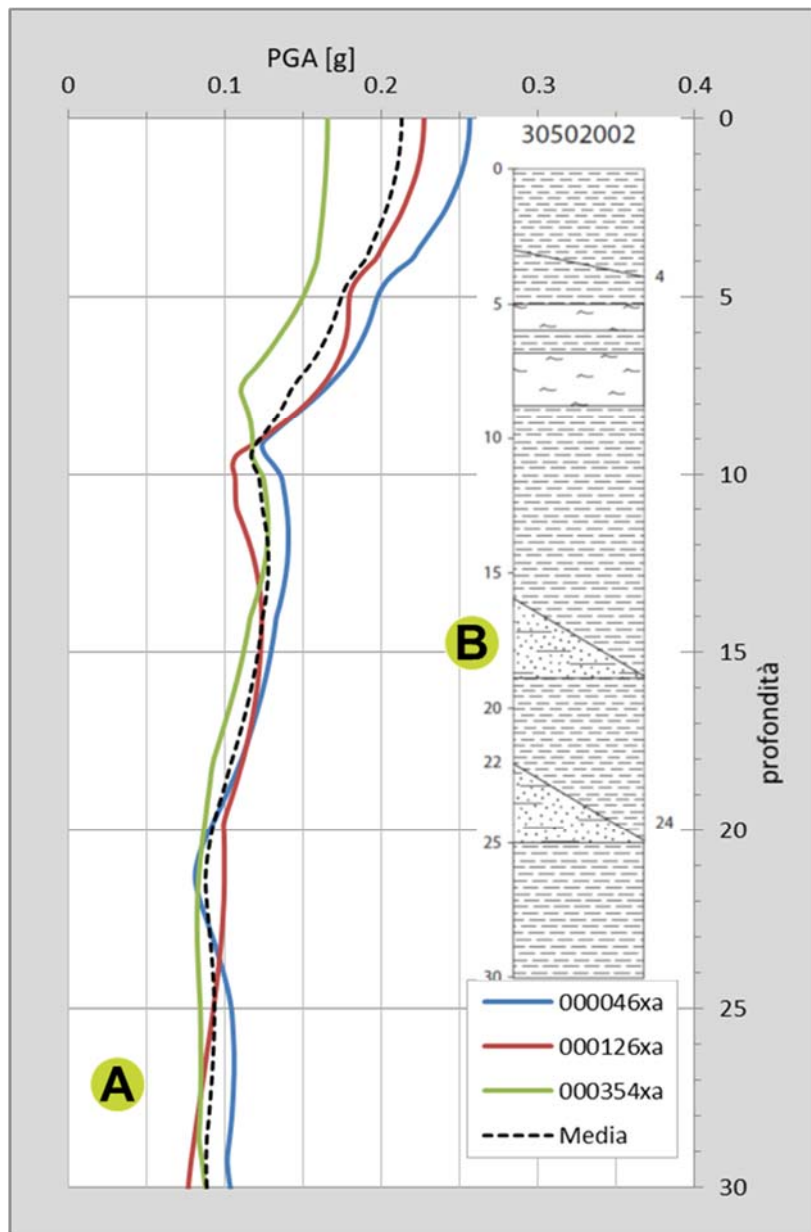


Figura 7-18 - RSL Palata/Bevilacqua – MOPS 30502002. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 30 m di sottosuolo (A). Stratigrafia semplificata della microzona in esame (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,21 g (Figura 7-18) si ottiene un fattore di amplificazione  $FA_{(PGA)} = 1,42$ . 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 <sub>(0.1-0.5)</sub>	SI2-FH <sub>(0.5-1.0)</sub>	SI3-FH <sub>(0.5-1.5)</sub>	SA1-FA <sub>(0.1-0.5)</sub>	SA2-FA <sub>(0.4-0.8)</sub>	SA3-FA <sub>(0.7-1.1)</sub>	SA4-FA <sub>(0.5-1.5)</sub>
1,42	1,91	2,95	2,97	1,63	2,93	2,98	2,97

Tabella 7-14 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona Palata/Bevilacqua - MOPS 30502002.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 2003

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 alla frequenza di circa 0,42 Hz e una seconda a circa 0,90 Hz, in sostanziale 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.

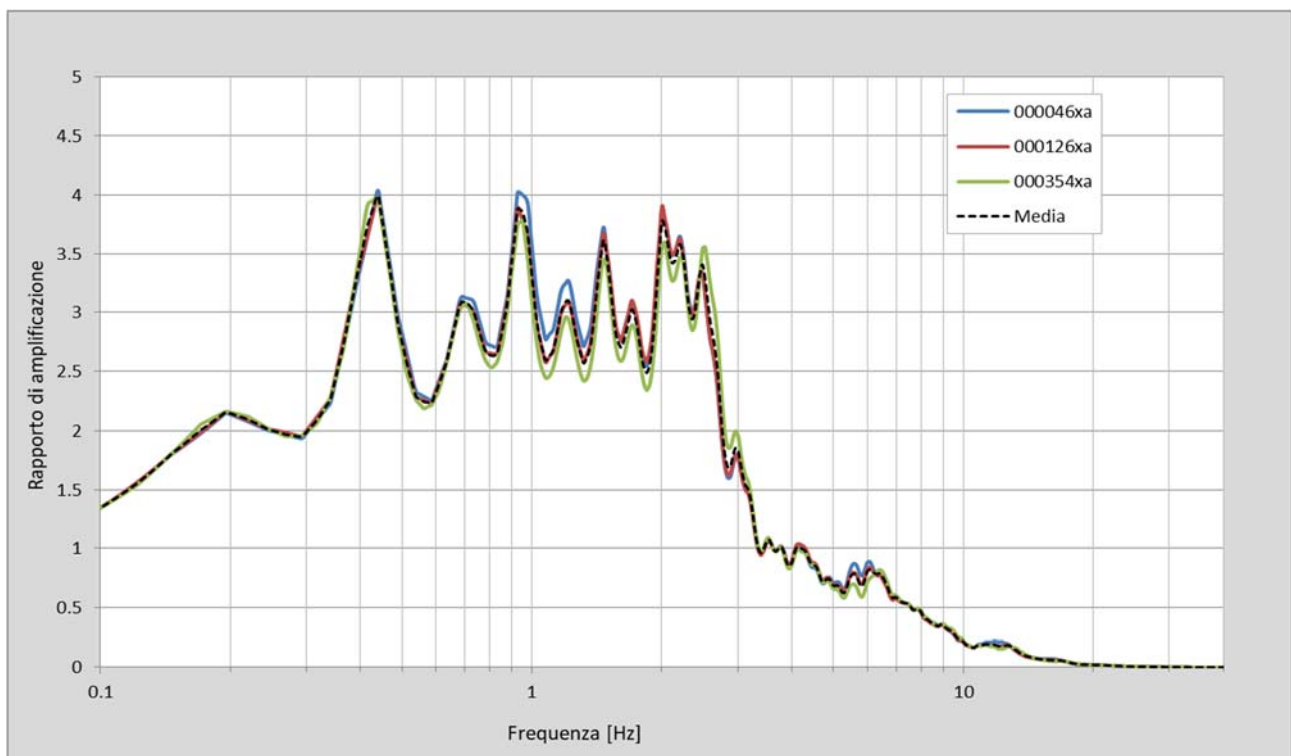


Figura 7-19 - RSL Palata/Bevilacqua – MOPS 2003. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 (B) e per la loro media.

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 CREVALCORE

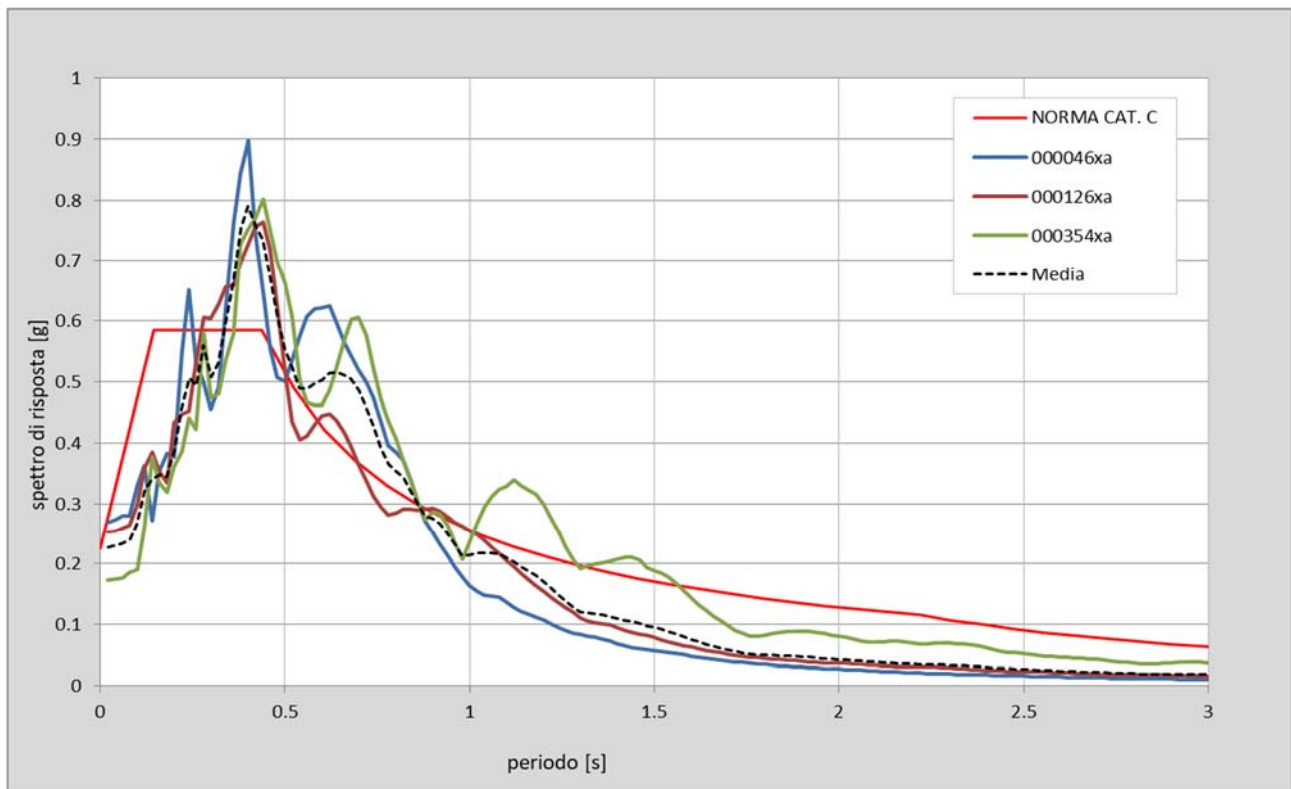


Figura 7-20 – RSL Palata/Bevilacqua – MOPS 2003. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-21 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 30 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 9 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

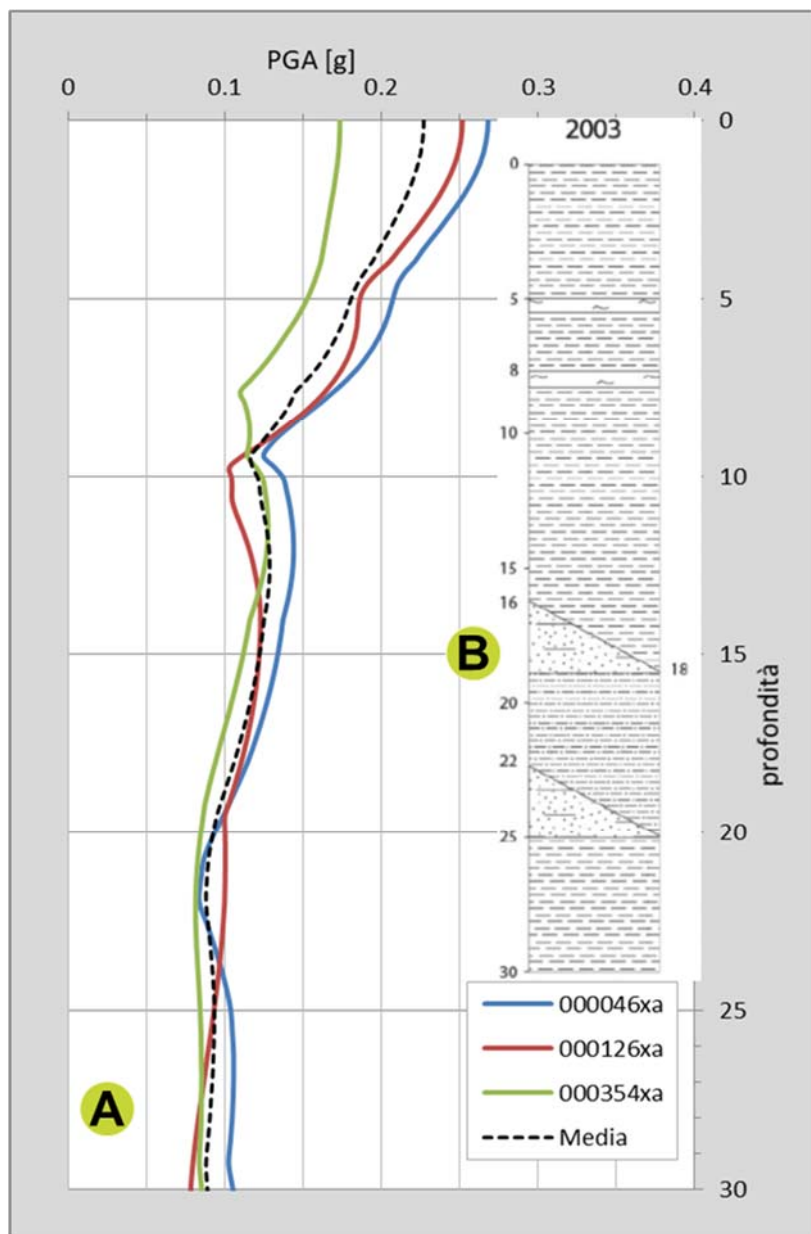


Figura 7-21 – RSL Palata/Bevilacqua – MOPS 2003. Andamento dell’accelerazione di picco con la profondità nei primi 30 m di sottosuolo (A). Stratigrafia semplificata della microzona in esame (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,23 g (Figura 7-21) si ottiene un fattore di amplificazione  $FA_{(PGA)} = 1,51$ . 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 7-15.

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1.0)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$	$SA1-FA_{(0.1-0.5)}$	$SA2-FA_{(0.4-0.8)}$	$SA3-FA_{(0.7-1.1)}$	$SA4-FA_{(0.5-1.5)}$
1,51	2,07	2,96	2,98	1,78	2,99	2,98	2,98

Tabella 7-15 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona Palata/Bevilacqua - MOPS 2003.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

RSL Galeazza - MOPS 30502002

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 0,4Hz e una seconda a circa 0,75 Hz, in sostanziale 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.

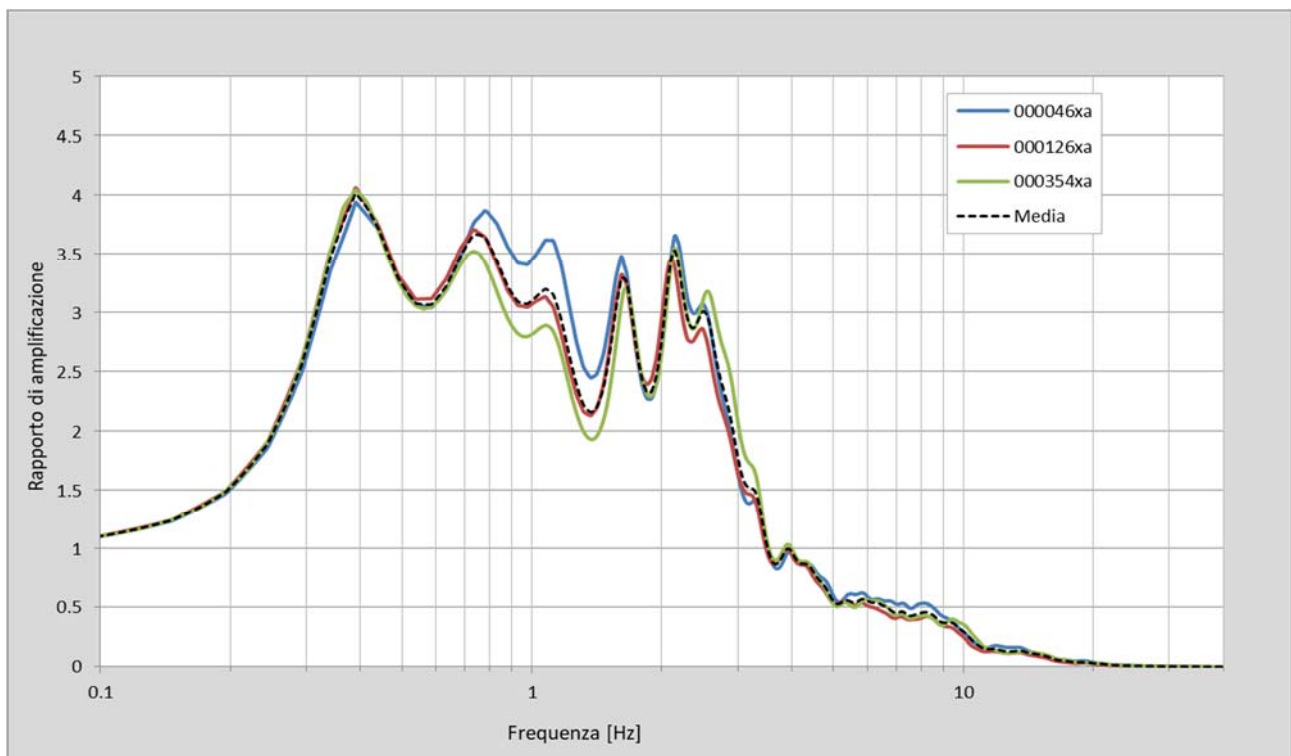


Figura 7-22 - RSL Galeazza – MOPS 30502002. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 (B) e per la loro media.

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 (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 CREVALCORE

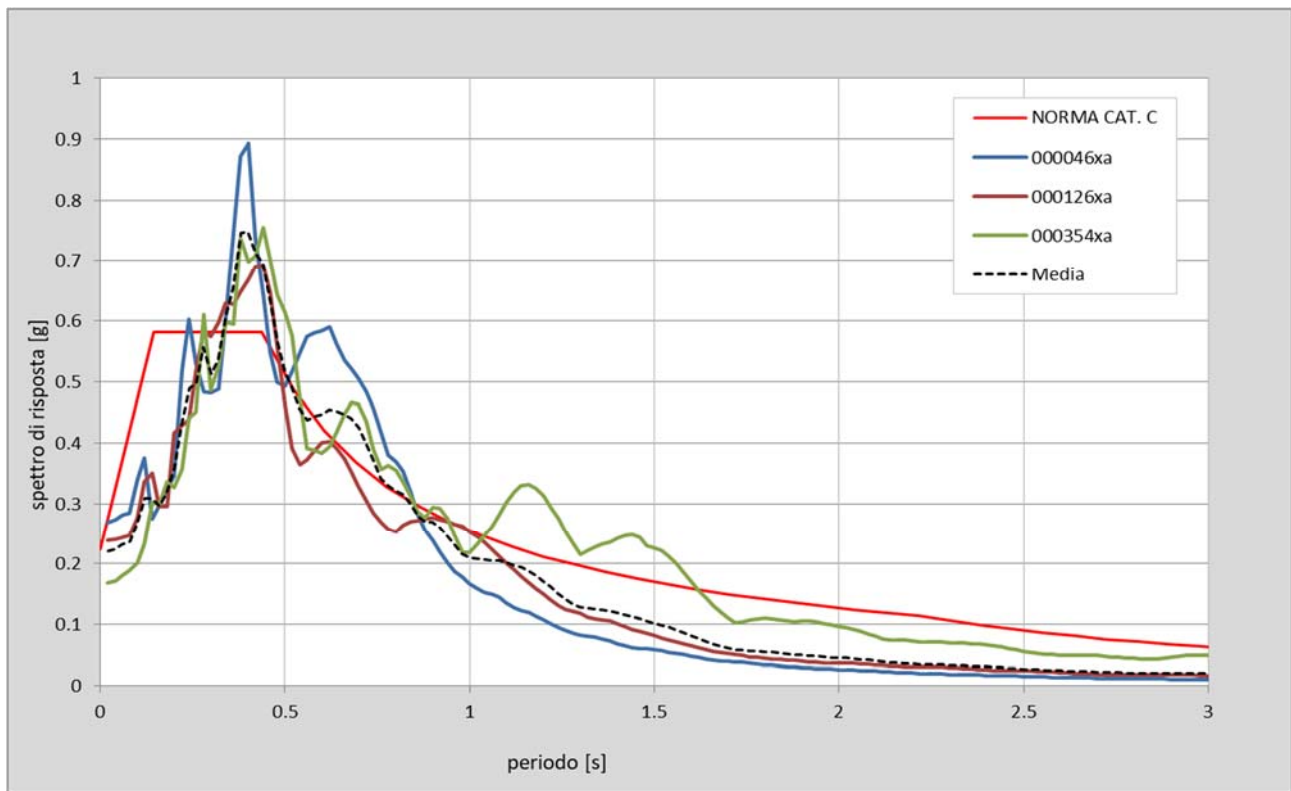


Figura 7-23 – RSL Galeazza – MOPS 30502002. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-24 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 30 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 8 metri e la superficie.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

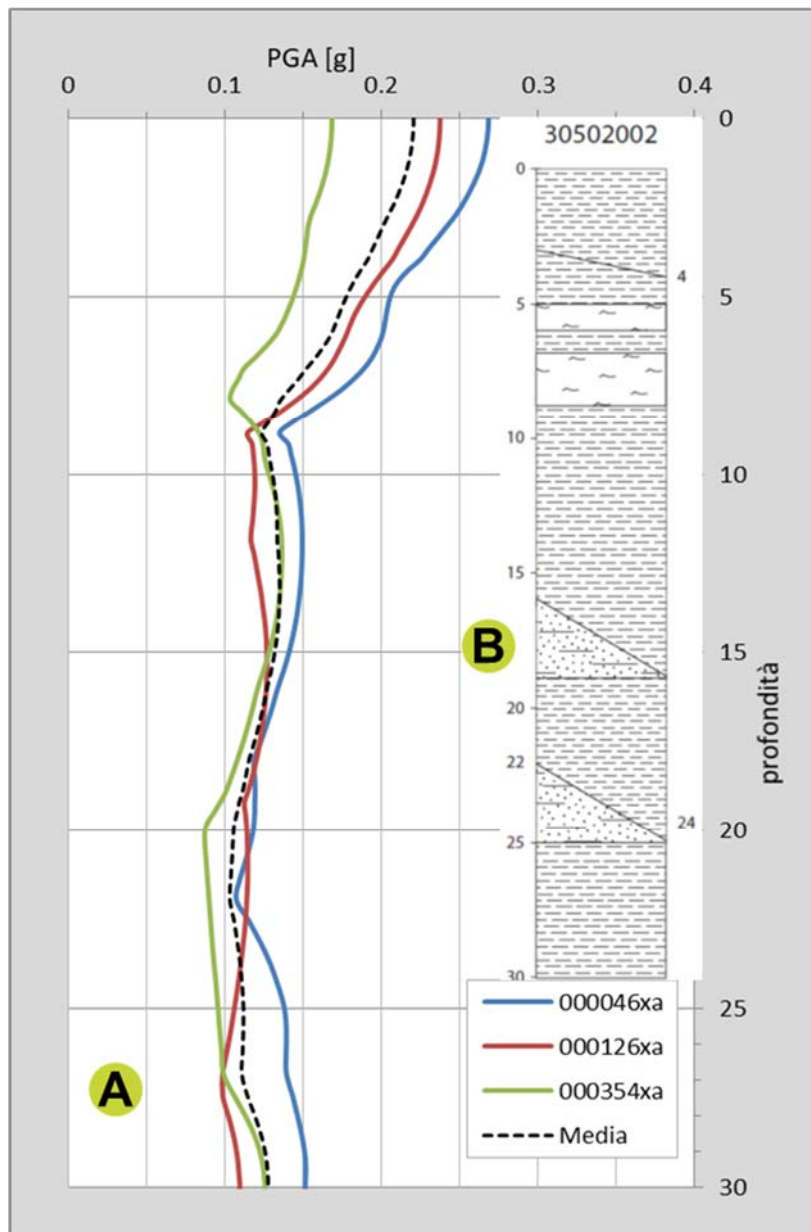


Figura 7-24 - RSL Galeazza – MOPS 30502002. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 30 m di sottosuolo (A) e relativa stratigrafia semplificata (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,22 g (Figura 7-24) si ottiene un fattore di amplificazione  $FA_{(PGA)} = 1,47$ . 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 7-16.

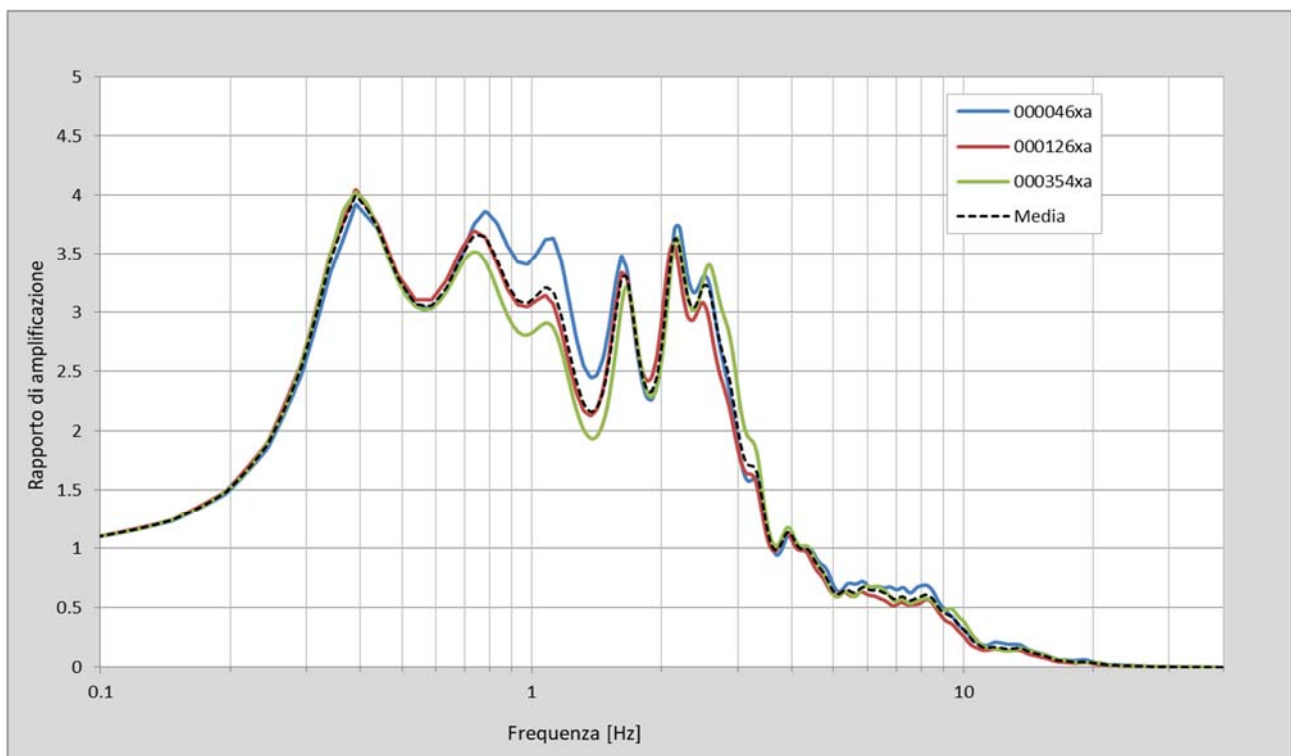
$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1.0)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$	$SA1-FA_{(0.1-0.5)}$	$SA2-FA_{(0.4-0.8)}$	$SA3-FA_{(0.7-1.1)}$	$SA4-FA_{(0.5-1.5)}$
1,47	1,99	2,71	2,87	1,71	2,70	2,78	2,82

Tabella 7-16 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona Galeazza - MOPS 30502002.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

### RSL Galeazza - MOPS 2003

In Figura 7-22/25 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 0,4Hz e una seconda a circa 0,75 Hz, in sostanziale 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 7-25 - RSL Galeazza – MOPS 2003. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 (B) e per la loro media.**

In Figura 7-26 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 CREVALCORE

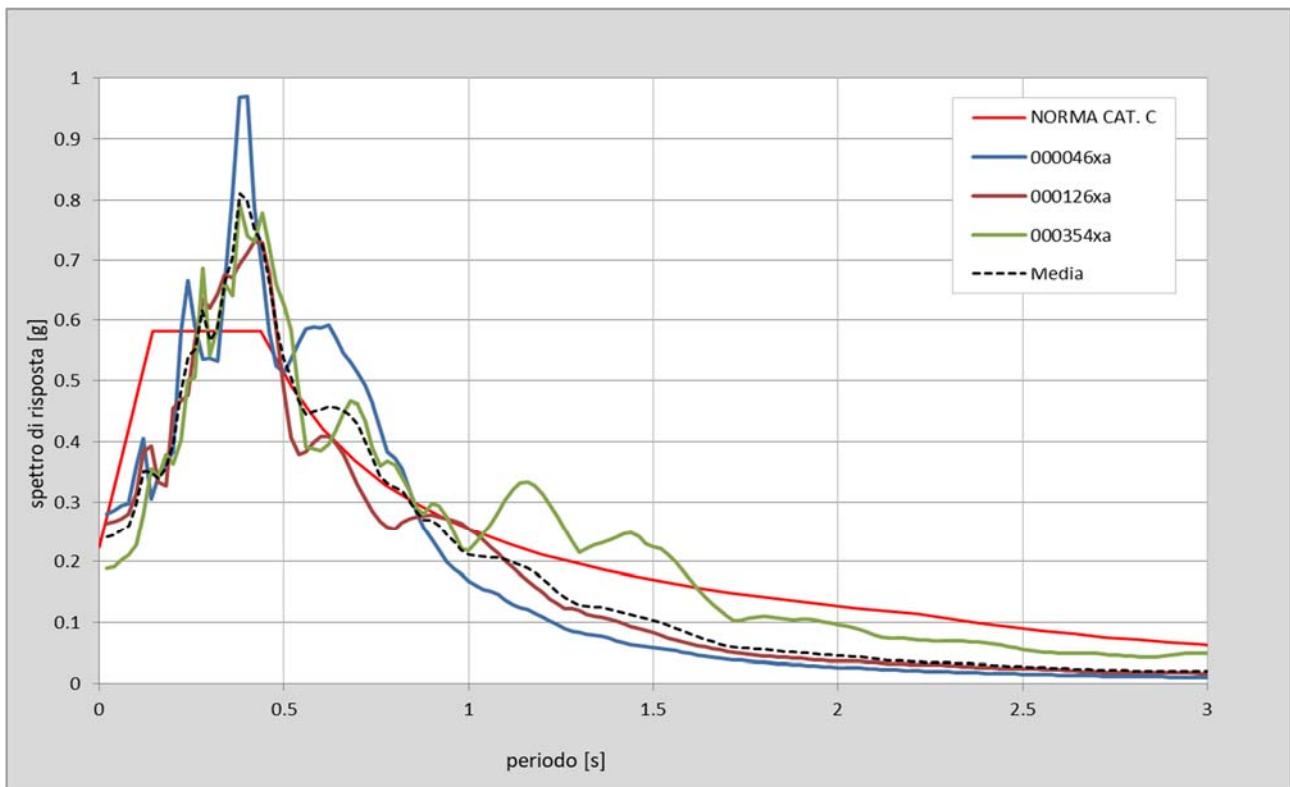


Figura 7-26 – RSL Galeazza – MOPS 2003. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-27 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 30 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 8 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

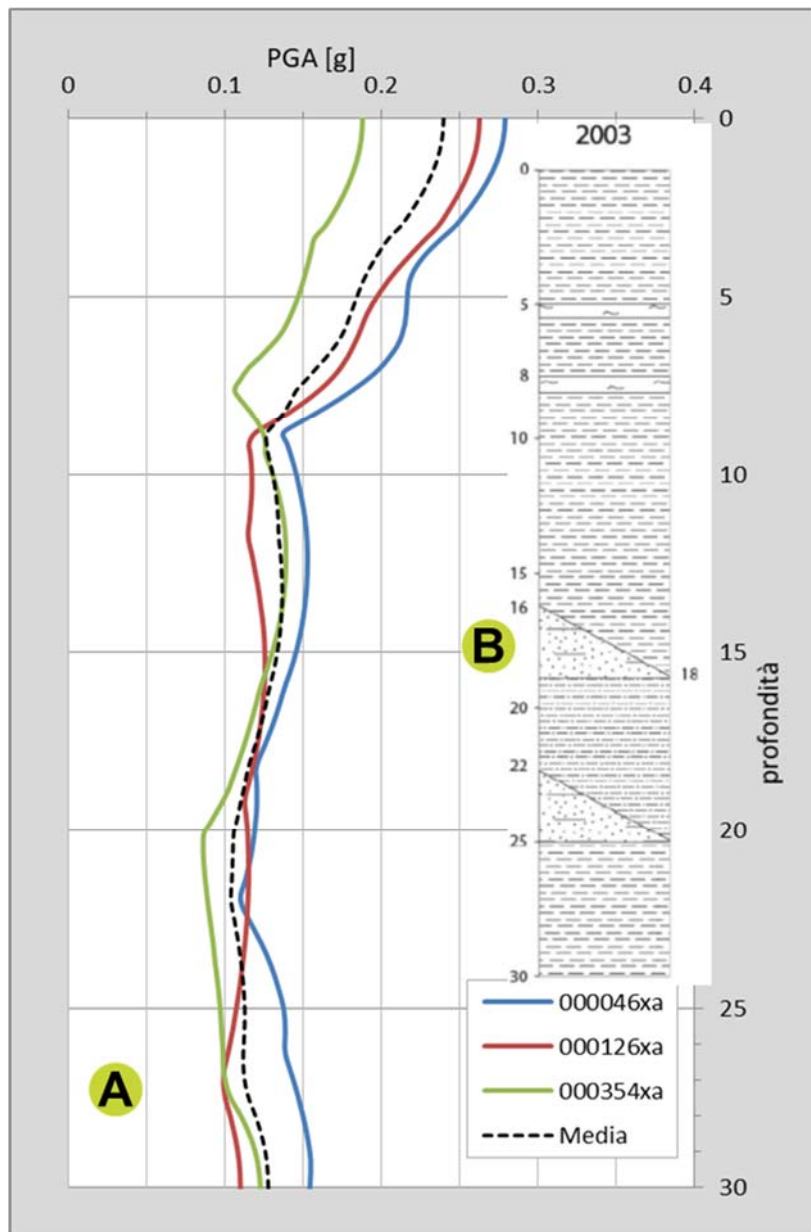


Figura 7-27 - RSL Galeazza – MOPS 2003. Andamento dell’accelerazione di picco con la profondità nei primi 30 m di sottosuolo (A). Stratigrafia semplificata della microzona in esame (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,24 g (Figura 7-24) si ottiene un fattore di amplificazione  $FA_{(PGA)} = 1,60$ . 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 7-17.

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1.0)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$	$SA1-FA_{(0.1-0.5)}$	$SA2-FA_{(0.4-0.8)}$	$SA3-FA_{(0.7-1.1)}$	$SA4-FA_{(0.5-1.5)}$
1,60	2,14	2,74	2,89	1,85	2,77	2,79	2,85

Tabella 7-17 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per la zona Galeazza - MOPS 2003.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

### 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 risultati ottenuti dalle modellazioni numeriche, 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.

Considerate le profondità del substrato rigido nel territorio comunale di Crevalcore, comprese tra i 230 ed i 500 metri, i fattori di amplificazione ottenuti dalla risposte sismiche locali sono stati messi a confronto con quelli dell'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 7-18, si evince come i fattori di amplificazione proposti dall'abaco di "**Pianura 3**" siano sostanzialmente in linea con quelli ottenuti dalle risposte sismiche realizzate per l'ambito di Crevalcore, ove il substrato rigido è sempre a profondità ben superiori ai 300 m. I fattori di amplificazione

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

ottenuti per le restanti porzioni del territorio comunale risultano, invece, sempre superiori a quelli dell'abaco di "Pianura 3", a causa della progressiva risalita del substrato rigido procedendo dai settori geografici meridionali verso quelli più settentrionali.

	ABACO PIANURA 3 D.G.R. 630/2019	RSL Crevalcore - MOPS 30502001	RSL Crevalcore - MOPS 30502002	RSL Crevalcore - MOPS 2003	RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 30502001
$FA_{PGA}$	1,3	1,18	1,24	1,31	1,35
SA1- $FA_{(0.1-0.5)}$	1,3	1,31	1,42	1,52	1,51
SA2- $FA_{(0.4-0.8)}$	2,1	2,40	2,39	2,42	2,75
SA3- $FA_{(0.7-1.1)}$	2,5	2,61	2,55	2,55	2,89
SA4- $FA_{(0.5-1.5)}$	2,4	2,56	2,51	2,51	2,87
SI1- $FH_{(0.1-0.5)}$	1,5	1,55	1,67	1,77	1,77
SI2- $FH_{(0.5-1,0)}$	2,3	2,52	2,46	2,47	2,83
SI3- $FH_{(0.5-1.5)}$	2,6	2,59	2,54	2,54	2,88

	ABACO PIANURA 3 D.G.R. 630/2019	RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 30502002	RSL Palata/Bevilacqua - MOPS 2003	RSL Galeazza - MOPS 30502002	RSL Galeazza - MOPS 2003
$FA_{PGA}$	1,3	1,42	1,51	1,47	1,60
SA1- $FA_{(0.1-0.5)}$	1,3	1,63	1,78	1,71	1,85
SA2- $FA_{(0.4-0.8)}$	2,1	2,93	2,99	2,70	2,77
SA3- $FA_{(0.7-1.1)}$	2,5	2,98	2,98	2,78	2,79
SA4- $FA_{(0.5-1.5)}$	2,4	2,97	2,98	2,82	2,85
SI1- $FH_{(0.1-0.5)}$	1,5	1,91	2,07	1,99	2,14
SI2- $FH_{(0.5-1,0)}$	2,3	2,95	2,96	2,71	2,74
SI3- $FH_{(0.5-1.5)}$	2,6	2,97	2,98	2,87	2,89

Tabella 7-18 - 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  $V_{s30}$  di circa 200 m/s.

### 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 %g), 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  $\Delta T$  e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

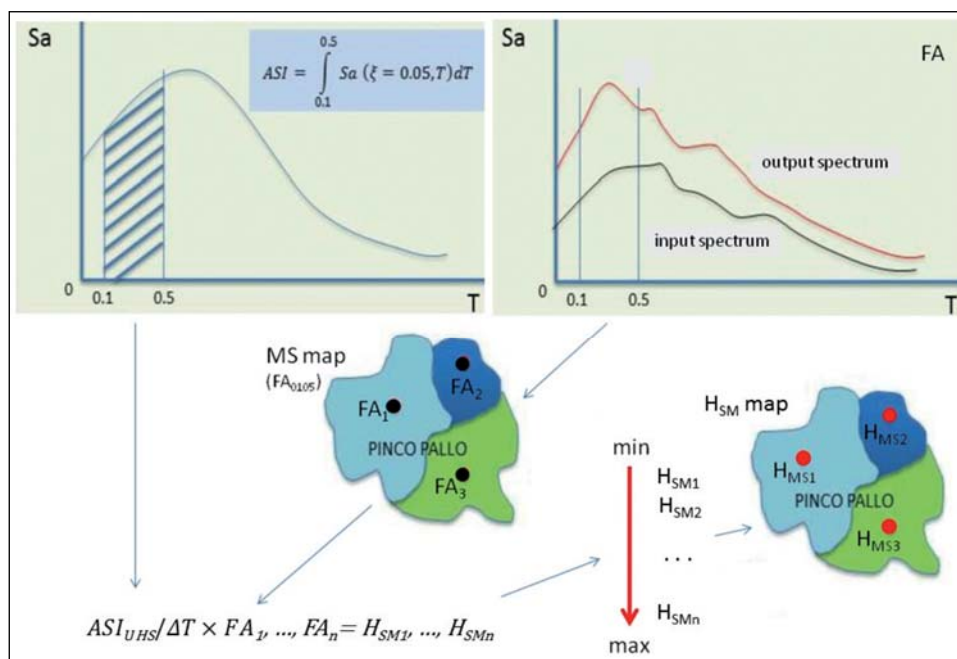


Figura 7-28 - Schema per il calcolo del parametro HSM ed esempio di mappatura (Naso *et al.*, 2019).

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 una valutazione più realistica del "pericolo" sismico permettendo di effettuare stime 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 7-19.

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

Tabella 7-19 - Soglie per  $H_{SM}$  e altri parametri correlati (Naso *et al.*, 2019)

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 e applicando la formula di Figura 7-28.



## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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 7-20).

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 (%g) 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 7-28. I valori ottenuti per le microzone dei diversi ambiti geografici comunali sono riportati in Tabella 7-20, Tabella 7-21 e Tabella 7-22.

MOPS	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
30502001 (Crevalcore)	0,43	0,44	0,27	0,25
30502002 (Crevalcore)	0,46	0,44	0,26	0,24
2003 (Crevalcore)	0,50	0,45	0,26	0,24

**Tabella 7-20 - Valori di scuotimento in accelerazione (%g) ottenuti da analisi di risposta sismica locale, area di Crevalcore.**

MOPS	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
30502001 (Palata/Bevilacqua)	0,46	0,48	0,28	0,26
30502002 (Palata/Bevilacqua)	0,50	0,51	0,29	0,27
2003 (Palata/Bevilacqua)	0,55	0,52	0,29	0,27

**Tabella 7-21 - Valori di scuotimento in accelerazione (%g) ottenuti da analisi di risposta sismica locale area Palata/Bevilacqua.**

MOPS	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
30502002 (Galeazza)	0,52	0,47	0,27	0,25
2003 (Galeazza)	0,57	0,48	0,27	0,26

**Tabella 7-22 Valori di scuotimento in accelerazione (%g) ottenuti da analisi di risposta sismica locale, area di Galeazza.**

## 7.2 Zone instabili soggette a liquefazione

Considerato il contesto sismotettonico ed il carattere pianeggiante del territorio in cui si colloca il comune di Crevalcore, 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 evidenziato la presenza di aree formate da sedimenti granulari sub-affioranti, poco addensati e saturi in acqua. L'estensione e la perimetrazione di queste aree è stata notevolmente affinata e

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

ridotta (Tavola 4) rispetto a quanto riportato negli elaborati di sintesi degli studi realizzati durante l'emergenza sismica del 2012 dalla Regione Emilia-Romagna (Martelli e Romani, 2013). La revisione è stata dettata dai risultati ottenuti dalle nuove indagini geognostiche acquisite nell'ambito degli approfondimenti di terzo livello (paragrafo 4.1).

Le valutazioni quantitative sulla suscettibilità a liquefazione e la suddivisione del territorio in relative classi di rischio, sono state ottenute attraverso stime dell'indice di potenziale liquefazione ( $I_L$ ), eseguite mediante le procedure di calcolo semplificate indicate negli indirizzi regionali per la microzonazione sismica (paragrafo 7.2.1). Le stime sono state effettuate 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. 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 120 prove penetrometriche a piezocono CPTu distribuite come riportato nelle tavole cartografiche di terzo livello (Tavola 6 ÷ Tavola 13). Le stime, effettuate con varie procedure di calcolo, 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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

Robertson, 2009). Gli indici ottenuti con il metodo di Boulanger e Idriss (2014), pur maggiormente cautelativi, sono stati considerati comunque affidabili e adottati per stesura delle cartografie di sintesi dello studio. Come parametri di input per la modellazione sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 7-24. Il valore di  $Mw_{max}$  corrisponde a quello massimo atteso per la Zona 912 della Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004 - Figura 2-7), mentre la PGA è stata ricavata moltiplicando l'accelerazione orizzontale di picco attesa al bedrock ( $a_{g,ref}$ ) 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).

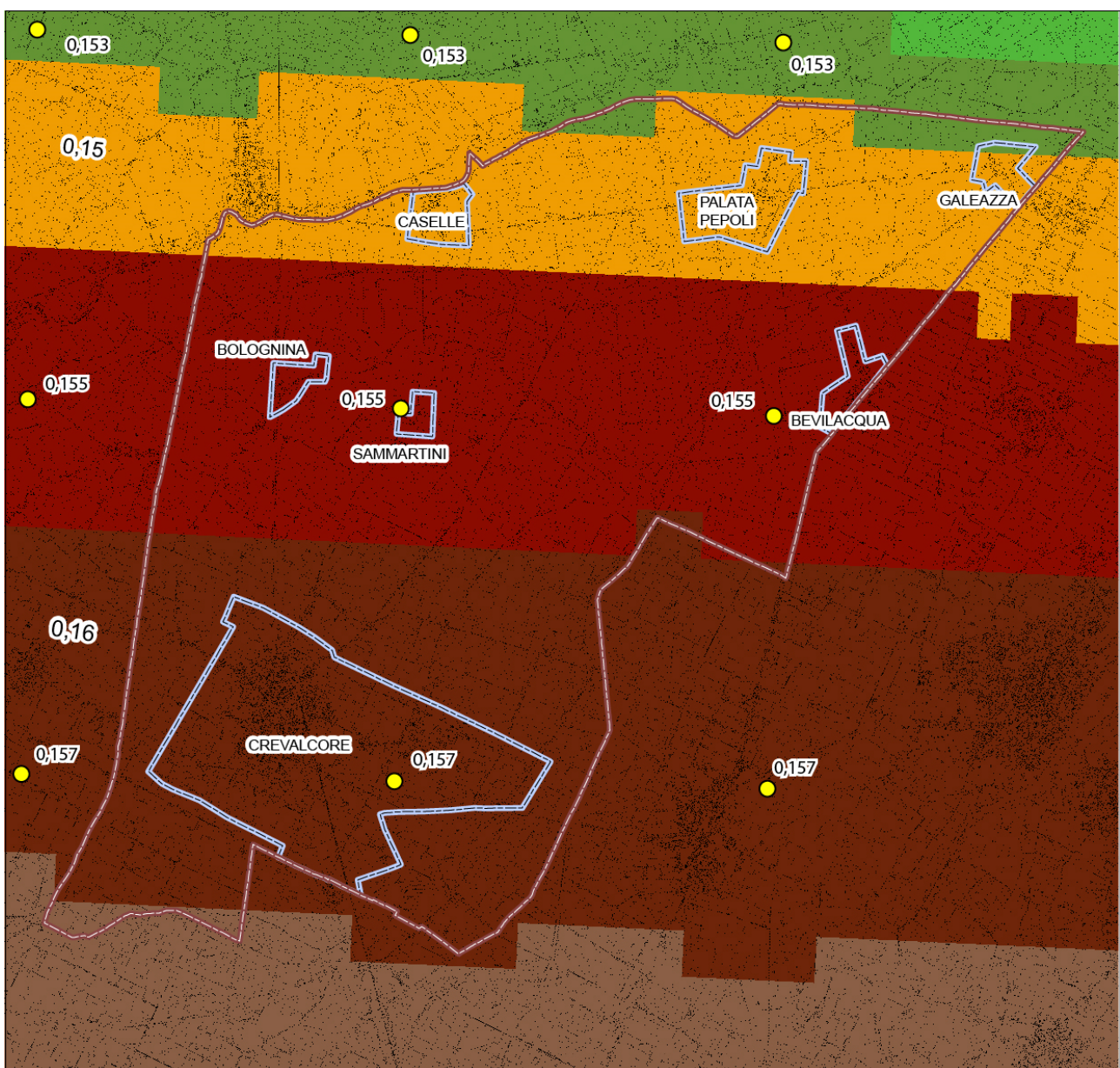


Figura 7-29 - Fasce a diversa pericolosità sismica di base ottenute dall'interpolazione dei valori di accelerazione ai nodi del reticolo (punti gialli) su cui si basa la mappa di pericolosità sismica nazionale INGV (TR 475 anni, 50<sup>esimo</sup> percentile).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

Considerate le variazioni di pericolosità di base verificate per l'area di studio si è optato per attribuire distinti valori di  $a_{g,ref}$  ai diversi ambiti geografici di studio, in funzione dei risultati ottenuti dall'interpolazione dei valori di accelerazione definiti ai nodi del reticolo (Figura 7-29) su cui si basa la mappa di pericolosità sismica nazionale INGV ( $T_R$  475 anni, 50<sup>esimo</sup> percentile). I valori riportati in Tabella 7-23 e Tabella 7-24 sono stati arrotondati, per eccesso o per difetto, al secondo termine decimale.

Ambito	MOPS	$a_{g,ref}$ (g)	FA PGA	PGA (g)
Galeazza	30502002	0,15	1,47	0,22
	2003		1,60	0,24
Bevilacqua, Palata Pepoli, Caselle, Bolognina, Sammartini	30502001	0,15	1,35	0,20
	30502002		1,42	0,21
	2003		1,51	0,23
Crevalcore	30502001	0,16	1,18	0,19
	30502002		1,24	0,20
	2003		1,31	0,21

**Tabella 7-23 - Parametri ottenuti dalle analisi di Risposta Sismica Locale eseguite per le diverse MOPS in relazione agli ambiti geografici analizzati. I valori di  $a_{g,ref}$  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 del modello altimetrico LIDAR è stato possibile notare come negli ambiti di studio non siano sostanzialmente presenti dossi morfologici rilevanti. Ciò ha condotto alla scelta di adottare, per tutto il territorio comunale, un valore di soggiacenza della falda pari a 1 m. Tale scelta appare in linea con quanto precedentemente utilizzato per le analisi di suscettività a liquefazione eseguite a Crevalcore durante gli studi di microzonazione post-sisma (Martelli *et al.*, 2013; Martelli e Romani, 2013).

Ambito	MOPS	PGA (g)	$Mw_{max}$	FALDA (m)
Galeazza	30502002	0,22	6,14	1 m
	2003	0,24		
Bevilacqua, Palata Pepoli, Caselle, Bolognina, Sammartini	30502001	0,20	6,14	1 m
	30502002	0,21		
	2003	0,22		
Crevalcore	30502001	0,19	6,14	1 m
	30502002	0,20		
	2003	0,21		

**Tabella 7-24 - 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 CREVALCORE

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 ( $2 < I_L \leq 5$ ) e alto ( $5 < I_L \leq 15$ ). In Tabella 7-25 sono riportati i valori di  $I_L$  relativi alle 120 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	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	PGA (g)	Mw <sub>max</sub>	FALDA (m)	IL BOULANGER E IDRISS (2014)
037024P2CPTU2	44,762730°	11,145795°	0,20	6,14	1	6,5
037024P12CPTU13	44,766586°	11,153187°	0,23	6,14	1	1,9
037024P14CPTU16	44,759128°	11,170628°	0,23	6,14	1	1,7
037024P15CPTU18	44,791176°	11,225759°	0,23	6,14	1	0,5
037024P16CPTU20	44,792851°	11,235861°	0,20	6,14	1	4,1
037024P50CPTU55	44,760688°	11,246219°	0,23	6,14	1	1,2
037024P53CPTU58	44,786380°	11,233595°	0,23	6,14	1	0,6
037024P55CPTU60	44,788076°	11,166446°	0,23	6,14	1	1,8
037024P62CPTU67	44,779188°	11,258421°	0,23	6,14	1	2
037024P63CPTU68	44,797712°	11,268316°	0,22	6,14	1	2,3
037024P154CPTU159	44,723560°	11,147927°	0,21	6,14	1	0
037024P155CPTU160	44,723278°	11,147533°	0,21	6,14	1	0
037024P156CPTU161	44,708536°	11,117542°	0,20	6,14	1	2,9
037024P157CPTU162	44,725720°	11,128184°	0,19	6,14	1	5,9
037024P159CPTU164	44,719253°	11,138139°	0,19	6,14	1	2
037024P170CPTU175	44,729586°	11,143701°	0,21	6,14	1	1,1
037024P171CPTU177	44,712843°	11,133242°	0,19	6,14	1	5,1
037024P172CPTU179	44,702545°	11,154875°	0,20	6,14	1	2,1
037024P189CPTU198	44,733119°	11,173070°	0,20	6,14	1	2,2
037024P190CPTU199	44,733231°	11,172994°	0,20	6,14	1	2,1
037024P191CPTU200	44,733198°	11,173223°	0,20	6,14	1	2,1
037024P192CPTU201	44,709505°	11,190022°	0,21	6,14	1	0,8
037024P193CPTU202	44,729742°	11,194892°	0,21	6,14	1	0,2
037024P194CPTU203	44,740358°	11,172717°	0,21	6,14	1	0
037024P198CPTU207	44,768080°	11,254129°	0,20	6,14	1	4,2
037024P239CPTU249	44,707624°	11,150784°	0,21	6,14	1	0,8
037024P240CPTU250	44,707812°	11,151373°	0,21	6,14	1	0,7
037024P241CPTU251	44,708018°	11,151659°	0,21	6,14	1	1,3
037024P242CPTU252	44,708500°	11,151207°	0,21	6,14	1	1,5
037024P243CPTU253	44,707994°	11,151160°	0,21	6,14	1	0,4
037024P248CPTU258	44,787601°	11,175581°	0,23	6,14	1	0,2
037024P249CPTU259	44,787571°	11,175382°	0,23	6,14	1	0,4
037024P250CPTU260	44,787830°	11,175435°	0,23	6,14	1	0,2
037024P253CPTU263	44,720340°	11,149019°	0,21	6,14	1	1,3
037024P264CPTU275	44,790926°	11,175364°	0,23	6,14	1	0,1

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

037024P265CPTE276	44,791040°	11,175600°	0,23	6,14	1	2
037024P266CPTE277	44,791135°	11,175400°	0,23	6,14	1	1
037024P285CPTE296	44,724708°	11,139732°	0,20	6,14	1	4,2
037024P286CPTE297	44,724696°	11,138543°	0,20	6,14	1	2,3
037024P287CPTE298	44,724026°	11,138013°	0,19	6,14	1	5
037024P288CPTE299	44,723643°	11,138941°	0,20	6,14	1	2,2
037024P289CPTE300	44,723469°	11,138037°	0,20	6,14	1	2,6
037024P290CPTE301	44,722938°	11,137264°	0,20	6,14	1	3,8
037024P291CPTE302	44,722397°	11,138717°	0,19	6,14	1	5,3
037024P292CPTE303	44,722939°	11,139108°	0,19	6,14	1	5,3
037024P293CPTE304	44,797695°	11,271161°	0,22	6,14	1	2,3
037024P294CPTE305	44,797653°	11,270815°	0,22	6,14	1	1,8
037024P295CPTE306	44,797393°	11,271030°	0,22	6,14	1	4
037024P300CPTE311	44,721137°	11,144847°	0,21	6,14	1	0,2
037024P301CPTE312	44,721034°	11,144561°	0,21	6,14	1	1,1
037024P302CPTE313	44,720777°	11,144821°	0,20	6,14	1	2,9
037024P316CPTE327	44,758598°	11,142926°	0,23	6,14	1	2
037024P317CPTE328	44,758799°	11,143113°	0,23	6,14	1	1,4
037024P318CPTE329	44,758819°	11,142754°	0,23	6,14	1	1,4
037024P322CPTE333	44,765151°	11,152246°	0,23	6,14	1	1,3
037024P323CPTE334	44,764926°	11,151972°	0,20	6,14	1	8,1
037024P324CPTE335	44,765162°	11,151885°	0,20	6,14	1	9,3
037024P325CPTE336	44,765518°	11,150874°	0,20	6,14	1	7,1
037024P326CPTE337	44,765417°	11,150576°	0,23	6,14	1	1,8
037024P327CPTE338	44,765312°	11,150821°	0,20	6,14	1	2,9
037024P330CPTE341	44,769583°	11,156718°	0,23	6,14	1	0,1
037024P331CPTE342	44,769631°	11,156518°	0,23	6,14	1	0,4
037024P332CPTE343	44,769738°	11,156826°	0,23	6,14	1	0,4
037024P373CPTU384	44,798020°	11,235159°	0,23	6,14	1	0,2
037024P374CPTU385	44,797827°	11,235466°	0,23	6,14	1	0,1
037024P380CPTE391	44,756838°	11,156136°	0,23	6,14	1	0,4
037024P381CPTE392	44,757033°	11,155910°	0,23	6,14	1	0,5
037024P384CPTE395	44,728288°	11,120518°	0,21	6,14	1	0,6
037024P385CPTE396	44,728197°	11,120348°	0,21	6,14	1	0
037024P386CPTE397	44,728328°	11,120307°	0,21	6,14	1	0,8
037024P404CPTE415	44,795718°	11,242259°	0,23	6,14	1	1,1
037024P405CPTE416	44,795627°	11,241963°	0,23	6,14	1	0
037024P407CPTE418	44,766597°	11,254095°	0,20	6,14	1	4,2
037024P408CPTE419	44,766411°	11,254251°	0,20	6,14	1	4
037024P423CPTU434	44,711863°	11,135971°	0,21	6,14	1	0,3
037024P424CPTU435	44,711777°	11,136060°	0,21	6,14	1	1,4
037024P444CPTE458	44,759590°	11,171974°	0,23	6,14	1	1,5
037024P445CPTE459	44,759747°	11,171771°	0,23	6,14	1	1,7
037024P446CPTE460	44,759722°	11,172273°	0,21	6,14	1	2,2
037024P473CPTU487	44,731887°	11,141687°	0,21	6,14	1	1,9
037024P530CPTE545	44,804105°	11,254505°	0,24	6,14	1	0,2

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

037024P531CPTU546	44,803930°	11,254177°	0,24	6,14	1	0
037024P532CPTU547	44,803779°	11,254264°	0,24	6,14	1	0,1
037024P533CPTU548	44,803718°	11,253904°	0,24	6,14	1	0,2
037024P540CPTU555	44,757404°	11,239165°	0,23	6,14	1	0,1
037024P553CPTU568	44,706921°	11,163118°	0,21	6,14	1	0
037024P554CPTU569	44,706783°	11,162932°	0,21	6,14	1	0
037024P555CPTU570	44,707094°	11,162694°	0,21	6,14	1	0
037024P588CPTU603	44,706748°	11,183991°	0,21	6,14	1	0,4
037024P589CPTU604	44,706681°	11,183568°	0,20	6,14	1	4,8
037024P598CPTU612	44,772714°	11,251999°	0,20	6,14	1	5,7
037024P599CPTU613	44,772940°	11,251822°	0,20	6,14	1	7,7
037024P600CPTU614	44,773247°	11,251743°	0,20	6,14	1	4,3
037024P601CPTU615	44,772745°	11,250384°	0,23	6,14	1	2
037024P602CPTU616	44,772443°	11,250783°	0,21	6,14	1	4,4
037024P604CPTU618	44,795758°	11,257302°	0,24	6,14	1	0,1
037024P605CPTU619	44,795638°	11,256440°	0,24	6,14	1	0,1
037024P606CPTU620	44,795933°	11,256758°	0,24	6,14	1	1
037024P607CPTU621	44,772781°	11,250986°	0,23	6,14	1	2
037024P608CPTU622	44,772511°	11,251408°	0,21	6,14	1	5,2
037024P629CPTU643	44,767365°	11,254149°	0,20	6,14	1	3,4
037024P631CPTU645	44,767497°	11,254055°	0,20	6,14	1	2,4
037024P691CPTU715	44,728799°	11,149716°	0,21	6,14	1	0,5
037024P692CPTU716	44,727598°	11,150824°	0,21	6,14	1	2
037024P693CPTU718	44,728294°	11,150564°	0,20	6,14	1	5
037024P694CPTU719	44,727923°	11,149740°	0,21	6,14	1	0,1
037024P695CPTU720	44,722525°	11,148395°	0,21	6,14	1	1,7
037024P696CPTU722	44,722417°	11,148021°	0,21	6,14	1	1,1
037024P703CPTU729	44,716389°	11,140065°	0,21	6,14	1	0,5
037024P704CPTU730	44,714398°	11,154246°	0,21	6,14	1	0,2
037024P705CPTU731	44,724777°	11,148487°	0,21	6,14	1	0
037024P706CPTU732	44,794253°	11,281117°	0,24	6,14	1	2
037024P707CPTU733	44,797862°	11,276349°	0,24	6,14	1	0,9
037024P708CPTU734	44,791029°	11,232402°	0,23	6,14	1	1,3
037024P709CPTU735	44,786992°	11,171447°	0,23	6,14	1	1,1
037024P710CPTU736	44,718705°	11,180288°	0,21	6,14	1	0,1
037024P711CPTU737	44,712410°	11,144295°	0,21	6,14	1	0,7
037024P712CPTU738	44,764029°	11,144809°	0,23	6,14	1	1,3
037024P713CPTU739	44,702155°	11,167744°	0,21	6,14	1	0,6
037024P714CPTU740	44,723474°	11,155094°	0,21	6,14	1	0,7

**Tabella 7-25 - Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna delle prove penetrometriche CPTu. In tabella sono riportati anche i valori di PGA,  $M_{w,max}$  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 Crevalcore. 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 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

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 dello studio, come la distribuzione delle indagini geognostiche o le caratteristiche geologico-tecniche dei corpi sedimentari affioranti o, ancora, le velocità 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 e sono basati sulla Carta Tecnica Regionale, alla 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 <sub>PGA</sub>	Tavola 6	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FH <sub>0.1 - 0.5 s</sub>	Tavola 7	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FH <sub>0.5 - 1.0 s</sub>	Tavola 8	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FH <sub>0.5 - 1.5 s</sub>	Tavola 9	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FA <sub>0.1 - 0.5 s</sub>	Tavola 10	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FA <sub>0.4 - 0.8 s</sub>	Tavola 11	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FA <sub>0.7 - 1.1 s</sub>	Tavola 12	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FA <sub>0.5 - 1.5 s</sub>	Tavola 13	1:10.000



## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $H_{SM0.1-0.5s}$	Tavola 14	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $H_{0.4-0.8s}$	Tavola 15	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $H_{0.7-1.1s}$	Tavola 16	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $H_{0.5-1.5s}$	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 (822) che quelle realizzate per gli approfondimenti di terzo livello (63). Come richiesto dagli Standard MS 4.1 (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2018) sono inoltre rappresentate 3 indagini virtuali, che sintetizzano la stratigrafia "teorica" dei primi trenta metri di sottosuolo delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica individuate nell'area di studio.

In cartografia le indagini sono raffigurate mediante simboli definiti dagli Standard MS 4.1.

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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 descritti 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 tutti 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. Nello specifico l'unica perforazione che intercetta il substrato è rappresentata da un pozzo per acqua realizzato presso la zona industriale di Crevalcore (tavola 2).

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 freatimetrici 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 sei sezioni geologiche considerate rappresentative del modello di sottosuolo sia superficiale che profondo (si veda Allegato 1).

Le quattro sezioni profonde (tracce C-C', D-D', E-E', F-F' – tavola 2), estratte rispettivamente da "cartografia geologica nazionale – foglio 202 San Giovanni in Persiceto" e "riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna", mostrano 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, mentre le unità sono state interpretate sia in chiave idrogeologica, in termini di acquiferi e acquicludo, sia in chiave più strettamente stratigrafica, mediante l'utilizzo di unità a limiti inconformi (v. Allegato 1).

Le altre sezioni, più superficiali, (tracce A-A', B-B' – tavola 2) mostrano i rapporti geometrici dei corpi sedimentari costituenti la porzione sommitale dei terreni di copertura, appartenenti all'intervallo stratigrafico considerato per la definizione delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS). Tali sezioni, realizzate a supporto di "cartografia geologica nazionale – foglio 202 San Giovanni in Persiceto",

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

sono state ottenute mediante correlazione di decine di indagini penetrometriche e sondaggi a carotaggio continuo, contenuti nella banca dati geognostica regionale (v. Allegato 1).

### 8.2.2 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:

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

L'unità è formata da limi sabbiosi e sabbie fini poco addensate e con granulometria poco assortita, comprendenti una frazione limosa anche molto significativa. Questi sedimenti registrano il riempimento di canali fluviali di Panaro nella porzione occidentale del comune, e di Reno tra le frazioni di Bevilacqua, Palata Pepoli e Galeazza. I corpi sedimentari di origine appenninica presentano una larghezza di circa 200 m e spessori massimi di circa 6 m.

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.

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

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

Questi sedimenti costituiscono generalmente corpi di argine naturale, di ventaglio da rotta o di riempimento di canali distributori minori che si originano dai principali corpi di paleoalveo affioranti.

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

Consistono di argille, argille limose, argille limose organiche, diffusamente bioturbate, a plasticità generalmente medio-bassa, deposti in ambienti di piana inondabile 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 paleolaveo, possono inglobare subordinate intercalazioni di limi e limi sabbiosi, frequentemente amalgamati dalla bioturbazione. Questi sedimenti formano la maggior parte dell'area comunale. All'interno del territorio comunale questi sedimenti sono interamente di provenienza appenninica. 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 sono restituite in colore rosso, mentre in arancio e giallo sono rappresentati valori di ampiezza compresi tra 2 e 3; ampiezze inferiori a 2 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 di microtremore sismico non è stato possibile suddividere il territorio indagato secondo le diverse classi di frequenza proposte dalla D.G.R. n. 630/2019.

Le misure di microtremore mostrano un picco di frequenza prevalente compreso tra 0,85 -0,6 Hz.

### 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.

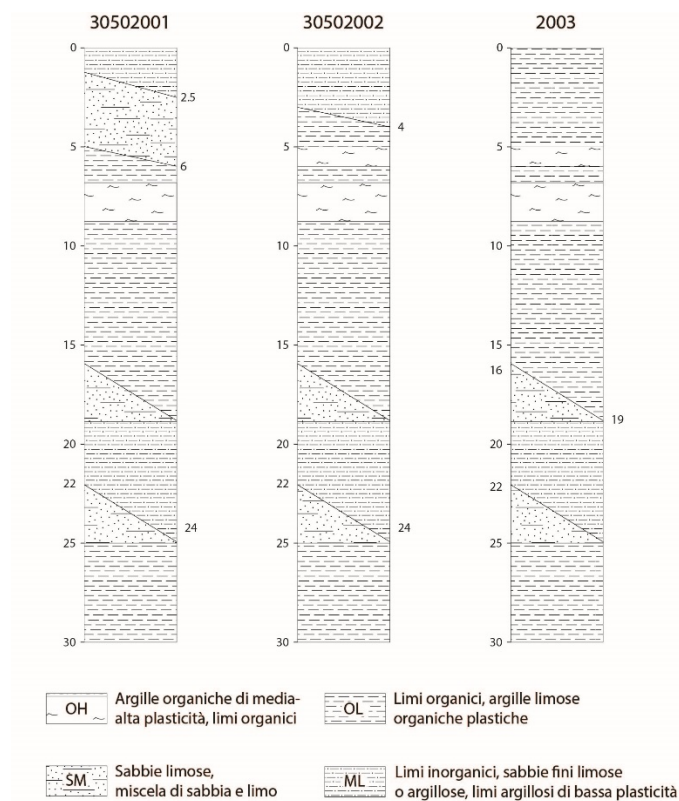
Tra gli elaborati prodotti per i precedenti studi di microzonazione sismica, la carta delle microzone omogenee è quella che ha subito maggiori modifiche. Tali revisioni si sono rese necessarie sia per adeguare l'elaborato cartografico agli standard di rappresentazione e archiviazione informatica della Commissione

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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 stabili suscettibili di amplificazioni locali e zone di attenzione per 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) 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 due 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. È stata inoltre identificata una microzona suscettibile di sola amplificazione locale a cui è stato attribuito il codice 2003. 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.



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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

### **Zona 30502001**

Limi sabbiosi e sabbie fini limose poco addensate e liquefacibili, poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e livelli di torbe. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e argille limose a bassa plasticità intercalate da corpi lenticolari di sabbie limose.

### **Zona 30502002**

Limi e limi sabbiosi liquefacibili, poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e livelli di torbe. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e argille limose a bassa plasticità intercalate da corpi lenticolari di sabbie limose.

### **Zona 2003**

Argille organiche plastiche con intercalazioni limose e livelli di torbe poggiano su limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e argille limose a bassa plasticità intercalate da corpi lenticolari di sabbie limose.

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

La carta della velocità delle onde volumetriche di taglio mostra, a scala 1:10.000, i 155 punti di misura di  $V_s$  utilizzati per lo studio di microzonazione sismica ed i rispettivi valori di  $V_{s30}$ .

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	
SCPT	14	MASW	138
DH	1	ESAC-SPAC	1
		REMI	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) e downhole (DH).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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 emiliana.

### 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 studio. 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 Housner<sup>1</sup> (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;
- $FH_{0,5-1,0}$  (Tavola 8) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI0) 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/SI0) 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/SA0) 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/SA0) 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/SA0) 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/SA0) per periodi compresi tra 0,5 e 1,5 secondi.

---

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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 (%g) atteso al sito per gli intervalli di periodi  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ , e  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  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). I valori ottenuti sono stati suddivisi sulla base delle indicazioni fornite della Regione Emilia Romagna.

Le analisi di risposta sismica locale sono state eseguite tenendo conto delle diversità litotecniche delle microzone individuate e dell'assetto tettonico del territorio. I coefficienti ottenuti dalle 8 modellazioni numeriche eseguite (Tabella 8-3, Tabella 8-4, Tabella 8-5, Tabella 8-6, Tabella 8-7, Tabella 8-8, Tabella 8-9, Tabella 8-10) 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 differenti aree con i rispettivi fattori di amplificazione e valori di  $H_{SM}$ , calcolati per diversi periodi di vibrazione.

$FA_{PGA}$	$FH_{(0.1-0.5)}$	$FH_{(0.5-1.0)}$	$FH_{(0.5-1.5)}$	$FA_{(0.1-0.5)}$	$FA_{(0.4-0.8)}$	$FA_{(0.7-1.1)}$	$FA_{(0.5-1.5)}$	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
1,18	1,55	2,52	2,59	1,31	2,40	2,61	2,56	0,43	0,44	0,27	0,25

**Tabella 8-3 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione meridionale del territorio comunale (Crevalcore), con MOPS 30502001, dove il substrato rigido è presente entro i 500 m di profondità.**

$FA_{PGA}$	$FH_{(0.1-0.5)}$	$FH_{(0.5-1.0)}$	$FH_{(0.5-1.5)}$	$FA_{(0.1-0.5)}$	$FA_{(0.4-0.8)}$	$FA_{(0.7-1.1)}$	$FA_{(0.5-1.5)}$	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
1,24	1,67	2,46	2,54	1,42	2,39	2,55	2,51	0,46	0,44	0,26	0,24

**Tabella 8-4 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione meridionale del territorio comunale (Crevalcore), con MOPS 30502002, dove il substrato rigido è presente entro i 500 m di profondità.**

$FA_{PGA}$	$FH_{(0.1-0.5)}$	$FH_{(0.5-1.0)}$	$FH_{(0.5-1.5)}$	$FA_{(0.1-0.5)}$	$FA_{(0.4-0.8)}$	$FA_{(0.7-1.1)}$	$FA_{(0.5-1.5)}$	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
1,31	1,77	2,47	2,54	1,52	2,42	2,55	2,51	0,50	0,45	0,26	0,24

**Tabella 8-5 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione meridionale del territorio comunale (Crevalcore), con MOPS 2003, dove il substrato rigido è presente entro i 500 m di profondità.**

$FA_{PGA}$	$FH_{(0.1-0.5)}$	$FH_{(0.5-1.0)}$	$FH_{(0.5-1.5)}$	$FA_{(0.1-0.5)}$	$FA_{(0.4-0.8)}$	$FA_{(0.7-1.1)}$	$FA_{(0.5-1.5)}$	$H_{SM(0.1-0.5)}$	$H_{(0.4-0.8)}$	$H_{(0.7-1.1)}$	$H_{(0.5-1.5)}$
1,35	1,77	2,83	2,88	1,51	2,75	2,89	2,87	0,46	0,48	0,28	0,26

**Tabella 8-6 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione centro - settentrionale del territorio comunale (Palata - Bevilacqua), con MOPS 30502001, dove il substrato rigido è presente entro i 270 m di profondità.**



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

FA <sub>PGA</sub>	FH <sub>(0.1-0.5)</sub>	FH <sub>(0.5-1.0)</sub>	FH <sub>(0.5-1.5)</sub>	FA <sub>(0.1-0.5)</sub>	FA <sub>(0.4-0.8)</sub>	FA <sub>(0.7-1.1)</sub>	FA <sub>(0.5-1.5)</sub>	H <sub>SM(0.1-0.5)</sub>	H <sub>(0.4-0.8)</sub>	H <sub>(0.7-1.1)</sub>	H <sub>(0.5-1.5)</sub>
1,42	1,91	2,95	2,97	1,63	2,93	2,98	2,97	0,50	0,51	0,29	0,27

**Tabella 8-7 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione centro - settentrionale del territorio comunale (Palata - Bevilacqua), con MOPS 30502001, dove il substrato rigido è presente entro i 270 m di profondità.**

FA <sub>PGA</sub>	FH <sub>(0.1-0.5)</sub>	FH <sub>(0.5-1.0)</sub>	FH <sub>(0.5-1.5)</sub>	FA <sub>(0.1-0.5)</sub>	FA <sub>(0.4-0.8)</sub>	FA <sub>(0.7-1.1)</sub>	FA <sub>(0.5-1.5)</sub>	H <sub>SM(0.1-0.5)</sub>	H <sub>(0.4-0.8)</sub>	H <sub>(0.7-1.1)</sub>	H <sub>(0.5-1.5)</sub>
1,51	2,07	2,96	2,98	1,78	2,99	2,98	2,98	0,55	0,52	0,29	0,27

**Tabella 8-8 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione centro - settentrionale del territorio comunale (Palata - Bevilacqua), con MOPS 2003, dove il substrato rigido è presente entro i 270 m di profondità.**

FA <sub>PGA</sub>	FH <sub>(0.1-0.5)</sub>	FH <sub>(0.5-1.0)</sub>	FH <sub>(0.5-1.5)</sub>	FA <sub>(0.1-0.5)</sub>	FA <sub>(0.4-0.8)</sub>	FA <sub>(0.7-1.1)</sub>	FA <sub>(0.5-1.5)</sub>	H <sub>SM(0.1-0.5)</sub>	H <sub>(0.4-0.8)</sub>	H <sub>(0.7-1.1)</sub>	H <sub>(0.5-1.5)</sub>
1,47	1,99	2,71	2,87	2,71	2,70	2,78	2,82	0,52	0,47	0,27	0,25

**Tabella 8-9 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione settentrionale del territorio comunale (Galeazza), con MOPS 30502002, dove il substrato rigido è presente entro i 230 m di profondità.**

FA <sub>PGA</sub>	FH <sub>(0.1-0.5)</sub>	FH <sub>(0.5-1.0)</sub>	FH <sub>(0.5-1.5)</sub>	FA <sub>(0.1-0.5)</sub>	FA <sub>(0.4-0.8)</sub>	FA <sub>(0.7-1.1)</sub>	FA <sub>(0.5-1.5)</sub>	H <sub>SM(0.1-0.5)</sub>	H <sub>(0.4-0.8)</sub>	H <sub>(0.7-1.1)</sub>	H <sub>(0.5-1.5)</sub>
1,60	2,14	2,74	2,89	1,85	2,77	2,79	2,85	0,57	0,48	0,27	0,26

**Tabella 8-10 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione settentrionale del territorio comunale (Galeazza), con MOPS 2003, dove il substrato rigido è presente entro i 230 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<sub>LQ</sub>) e zone di rispetto (ZR<sub>LQ</sub>). 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 non riportare in carta indici derivati da verifiche effettuate su prove penetrometriche meccaniche. I valori di I<sub>L</sub> 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<sub>L</sub> ≤ 2), quelli gialli moderato (2 < I<sub>L</sub> ≤ 5) ed i rossi rischio elevato (5 < I<sub>L</sub> ≤ 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 geofisiche, anche pregresse, effettuate sia in foro, sino ad elevate profondità, sia in superficie mediante array sismici e profili di sismica a riflessione. 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 numerose verifiche di suscettibilità mediante metodi semplificati. Sulla base dei risultati ottenuti, il metodo di Boulanger e Idriss (2014) è stato considerato 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 un sunto dei caratteri geologici ed evolutivi dell'area. 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 9-2), depositi durante fasi dell'ultima glaciazione.

In tutto il territorio comunale questi depositi sono sempre costituiti da alternanze di sabbie di provenienza appenninica e grossi volumi di limi, con  $V_s$  comprese tra 200 e 250 m/s. La profondità del tetto stratigrafico dei corpi sedimentari singlaciali aumenta procedendo verso sud a causa delle deformazioni indotte dalla subsidenza differenziale.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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). Anche la parte iniziale dei **sedimenti post-glaciali** è costituita da limi di provenienza appenninica, con subordinate intercalazioni di corpi di sabbie di canale fluviale (Figura 9-1 e Figura 9-2). Procedendo verso nord la successione limosa post-glaciale di provenienza appenninica si assottiglia progressivamente. 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. 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 appenninica con frequenti orizzonti di torbe (Figura 9-1 e Figura 9-2), deposti in ambienti di piana inondabile e palude continentale. Questi depositi coesivi presentano proprietà geotecniche anche scadenti e sono caratterizzati dai più bassi valori di Vs con minimi attorno ai 100 m/s.

Le ampie aree palustri erano attraversate da canali distributori di delta interno di Panaro e subordinatamente Reno, che hanno deposto corpi allungati di sabbie fini limose e limi, raramente fiancheggiati da argini limoso-sabbiosi. Meglio sviluppati appaiono il corpo di paleoalveo del Panaro presente ad ovest del centro storico di Crevalcore e quello del Reno che, provenendo da Cento, attraversa l'abitato di Bevilacqua.

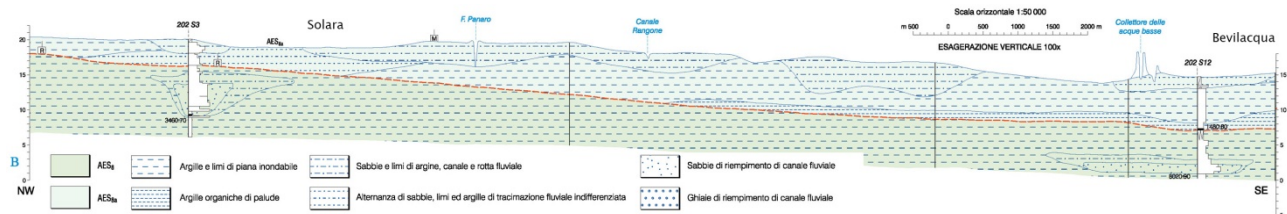


Figura 9-1 - Sezione geologica superficiale B-B' (v. Allegato 1) in cui sono schematizzati i rapporti geometrici generali dei corpi sedimentari costituenti la porzione sommitale dei terreni di copertura.

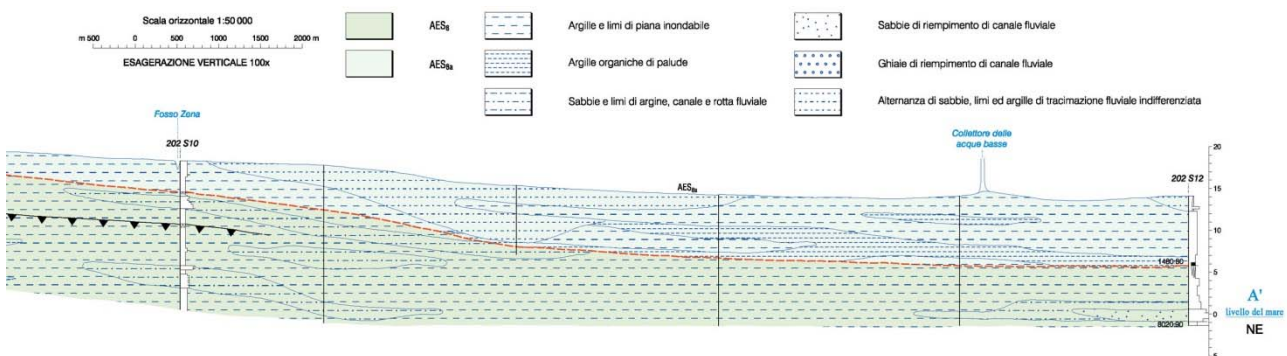


Figura 9-2 - Sezione geologica superficiale B-B' (v. Allegato 1) in cui sono schematizzati i rapporti geometrici generali dei corpi sedimentari costituenti la porzione sommitale dei terreni di copertura.

## 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:

- a) **la porzione più settentrionale del territorio** corrisponde ad una zona di alto strutturale, costituito da un'anticlinale complessa, segmentata da faglie inverse nord-vergenti e retroscorrimenti, che verso ovest si raccorda con la culminazione di Mirandola. La deformazione della struttura tettonica ha determinato il sollevamento delle unità torbiditiche plioceniche sino alla profondità di circa 400 m ed una marcata riduzione dello spessore delle unità del Quaternario Marino, anch'esse attribuite al substrato sismico. Su substrato poggiano, in discordata angolare, le successioni sedimentarie del Quaternario prevalentemente continentale, dominate da depositi tendenzialmente fini intercalati ad intervalli minori di sabbie a prevalente provenienza appenninica. Questa porzione di territorio, ove è ubicato l'abitato di Galeazza, **è caratterizzata da alti fattori di amplificazione** del moto sismico.
- b) **la parte centrale del territorio** comunale corrisponde alla monoclinale immergente verso sud che raccorda la sinclinale meridionale di Crevalcore con l'anticlinale complessa, sviluppata nell'area di Galeazza. I caratteri stratigrafici appaiono intermedi rispetto a quelli delle aree contigue con una rapida riduzione verso nord degli spessori e della profondità di tutte le unità deposizionali. Dai risultati delle analisi di risposta sismica locale, la fascia centrale del territorio comunale compresa tra Bolognina, Palata Pepoli e Bevilacqua **presenta i più elevati fattori di amplificazione del moto sismico**.
- c) **la porzione meridionale del territorio** comunale è interessata dalla presenza di una tra le più depresse e ampie sinclinali della pianura emiliano-romagnola. La struttura, sviluppata a sud nelle pieghe ferraresi, mostra il proprio depocentro qualche chilometro a meridione di Crevalcore. 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 altre torbiditi, da fanghi marini di prodelta e sabbie di fronte deltizio padano, che costituiscono la parte inferiore delle successioni quaternarie, che insieme al Pliocene sono state attribuite al substrato sismico. Ad esse si sovrappongono spessi depositi dapprima costieri, poi continentali con apporti di Po e via via sempre più ricchi di sedimenti di provenienza appenninica. Questa porzione di territorio in cui si sviluppa l'ambito urbano di Crevalcore **è caratterizzata da minori fattori di amplificazione** del moto sismico.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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 dagli abachi regionali introdotti con la D.G.R. 630/2019. Questi abachi sono però completamente diversi da quelli utilizzati per la redazione delle precedenti carte di microzonazione sismica (D.A.L. 112/2007) 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. 7.1.1 e 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 essenzialmente limitate ai **paleovalvei di Reno e Panaro** affioranti rispettivamente a Bevilacqua, a Crevalcore e Bolognina. Queste fasce, formate da sabbie limose poco addensate di riempimento di canale (MOPS 30502001) mostrano potenziali di liquefazione generalmente elevati con  $I_L$  compresi tra 5 e 9. 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 di San Carlo e Mirabello in Comune di Terre del Reno.

**Aree a rischio di liquefazione moderano** sono state, invece, identificate in corrispondenza di corpi di riempimento di canali distributori minori di delta interno e di ventagli da rotta o tracimazione. Queste zone (MOPS 30502002) formate da limi e sabbie fini limose mostrano indici di liquefazione  $I_L$  variabili tra 2 e 4.

**Rischi di liquefazione da molto bassi a nulli** ( $I_L < 2$ ) caratterizzando, invece, gran parte **del territorio comunale analizzato**. 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 2003).

**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.

Anche in questo caso, 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.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

Gli approfondimenti di terzo livello hanno, infine, permesso la ridefinizione del bedrock sismico sulla base dei risultati delle misure di microtremore e di profili profondi di velocità delle onde di taglio (Vs) disponibili per l'area epicentrale emiliana (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016; Minarelli *et al.*, 2016, Petronio *et al.*, 2018). Tali misure, correlate con i dati stratigrafici utilizzati per la definizione delle sezioni stratigrafiche disponibili (vedi Allegato 1), hanno permesso di porre il maggior contrasto di impedenza in corrispondenza del tetto dei depositi torbiditici pliocenici.

Questa superficie, che identifica il bedrock sismico delle analisi numeriche, si trova sepolta a profondità assai variabili, con quote comprese tra i 1600 metri della fascia meridionale ed i 450 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 di impedenza minore ma comunque significativo. Questa superficie marca il tetto dell'unità del Quaternario Marino che, a causa dei movimenti tettonici sinsedimentari, si rinvengono nel sottosuolo a profondità molto variabili, comprese tra i 505 m dei settori meridionali ed i 230 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 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.

In base alle principali criticità emerse dagli approfondimenti di terzo livello sul Comune di Crevalcore, si indicano, in seguito, 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 sostanzialmente confinata ai corpi affioranti di riempimento dei canali distributori di delta interno del Reno e Panaro, legati alla loro evoluzione medioevale. L'interazione tra i due reticoli idrografici dei fiumi appenninici ha portato ad una distribuzione eterogenea dei litotipi alluvionali, che nel sottosuolo

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

formano un complesso intreccio di estesi depositi limoso-argillosi e rari corpi sabbiosi ad andamento sinuoso.

I limiti delle aree classificate come potenzialmente suscettibili di liquefazione presentano, pertanto, inevitabili incertezze legate all'imperfetta conoscenza del sottosuolo, nonostante l'elevato numero di indagini disponibili nel territorio. L'incertezza diviene ovviamente maggiore in aree con scarsità di dati geognostici o con informazioni non accurate.

Per tali ragioni si raccomanda di eseguire, su tutto il territorio comunale, specifici approfondimenti volti ad accertare la presenza di orizzonti potenzialmente liquefacibili. Tali approfondimenti dovranno essere eseguiti mediante apposite 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 dei terreni. Queste prove dovranno essere considerate a priori qualora si rinvenissero spessori significativi di depositi liquefacibili e in caso di interventi edilizi strategici o 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. 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.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

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), particolarmente concentrati nella microzona 2003 (paragrafo 0 - 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.
- 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.
- 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>.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

- Boulangier 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? Tectonic-controlled 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.
- Caputo R., Papathanasiou G., (2012): *Ground failure and liquefaction phenomena triggered by the 20 May, 2012 Emilia-Romagna (Northern Italy) earthquake: case study of Sant'Agostino - San Carlo - Mirabello zone*. *Nat. Haz. Earth System Sciences*, 12(11), 3177-3180, doi:10.5194/nhess-12-3177-2012.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 202 - San Giovanni in Persiceto*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 203 - Poggio Renatico*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 204 - Portomaggiore*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geomorfologica Provincia di Ferrara - Geotema S.r.l. (2016), <http://www.ferradeltapo-unesco.it/>.
- Castellaro S., (2012): *H/V: un contributo oltre Vs30*, In: *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*, a cura di Marco Mucciarelli, ARACNE editrice, 448 pp.
- Castellaro S., Mulargia F., (2011): *Seismic soil classification from a different perspective*. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13-15.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C., Amato A., (2006): *CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002*, versione 1.1. INGV-CNT, Roma. <http://csi.rm.ingv.it/>.
- Castiglioni G., Biancotti A., Bondesan M., Cortemiglia G.C., Elimi C., Favero V., Gasperi G., Marchetti G., Orombelli G., Pellegrini G. B., Tellini C., (1999): *Geomorphological map of the Po Plain, Italy, at scale of 1:250.000*. *Earth Surf. Proc. Land.*, 24, 1115-1120.
- Cerrina Feroni A., Ottria G., Martinelli P., Martelli L., Catanzariti R., (2002): *Carta geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo, 1: 250,000*. SELCA, Firenze.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, (2015): *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b*. [http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard\\_MS\\_4\\_0b.pdf](http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard_MS_4_0b.pdf).
- Corrado, S., Aldega, L., Zattin, M., (2010): *Sedimentary vs. tectonic burial and exhumation along the Apennines (Italy)*. Journal of the Virtual Explorer 36.
- Correggiari A., Field M.E., Bortoluzzi G., Ligi M., Penitenti D., (1992) - *Ridge and swale morphology on the North Adriatic epicontinental shelf*. Rapport CIESM 33:125.
- D.A.L. 112/2007: Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per *Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e 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*.
- Di Capua G., Tarabusi G., (2013): *DPC-INGV S2 2012-2013 project Annex2 to D4.1 – Site-specific hazard assessment in priority areas - MIRANDOLA (MO) seismo-stratigraphic models*, Online <https://sites.google.com/site/ingvdpc2014progettos2/tasks/task-4/d4-1>.
- Di Dio G., Caporale L., (1998): *Un modello fisico tridimensionale della conoide alluvionale del Fiume Reno per la gestione degli acquiferi e lo studio della subsidenza*. In: Geofluid '98 - Problemi di ingegneria: Estrazione di fluidi e subsidenza (a cura di G. Brighenti e E. Mesini), Piacenza, 3 ottobre 1998, 67-76.
- Di Dio G., Molinari F., (2000): *A study of the groundwater resources in the Ferrara Province (Po River Basin, Northern Italy)*. Proceedings of III Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems, 24-27/10/2000. Bavaria, Munich, Germany: 84-86.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

- DISS Working Group, (2015): *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0.
- Emergeo Working Group, (2012): *Technologies and new approaches used by the INGV EMERGEO Working Group for real-time data sourcing and processing during the Emilia Romagna (northern Italy) 2012 earthquake sequence*. ANNALS OF GEOPHYSICS, 55, 4, 2012; doi: 10.4401/ag-6117.
- Emergeo Working Group, (2013): *Liquefaction phenomena associated with the Emilia earthquake sequence of May–June 2012 (Northern Italy)*. Nat. Haz. Earth Syst. Sci., 13, 935-947.
- Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012a): *Terremoti dell'Emilia - Maggio 2012. Rilievo macrosismico MCS speditivo. Rapporto finale. 15 giugno 2012*, <http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/TerremotoEmiliaMCS.pdf>.
- Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012b): *The MCS macroseismic survey of the Emilia 2012 earthquakes*. Annals of Geophysics Vol. 55, No 4.
- Garofalo F., Foti S., Hollender F., Bard P.Y., Cornou C., Cox B.R., Ohrnberger M., Sicilia D., Asten M., Di Giulio G., Forbriger T., Guillier B., Hayashi K., Martin A., Matsushima S., Mercerat D., Poggi V., Yamanaka H., (2016): *InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods, Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 82, pp. 222-240, doi: 10.1016/j.soildyn.2015.12.010i.
- Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M., Vignolo A., (2010): *Sedimentary and Tectonic Evolution in the Eastern PoPlain and Northern Adriatic Sea Area from Messinian to Middle Pleistocene (Italy)*, in F.P. Sassi, G. Dal Piaz, and C. Doglioni, (eds.), Nature and Geodynamics of the Northern Adriatic Lithostere: Rend. Fis. Acc. Lincei, v. 21/1, p. 131-16.
- Govoni A., Marchetti A., De Gori P., Di Bona M., Lucente F.P., Improta L., Chiarabba C., Nardi A., Margheriti L., Piana Agostinetti N., Di Giovambattista R., Latorre D., Anselmi M., Ciaccio M.G., Moretti M., Castellano C., Piccinini D., (2014): *The 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy): imaging the thrust fault system by accurate aftershocks location*. Tectonophysics, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.02.013>.
- Gruppo di Lavoro Liquefazione, (2012): *Rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a Mirabello*. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

- Gruppo di lavoro MPS, (2004): *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003*. Rapp. conclusivo per il DPC, INGV, Milano-Roma, pp 65 + 5 appendici.
- Gruppo di Lavoro MS, (2008): *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Conferenza delle Regioni e Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom.  
[http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view\\_pub.wp?contentId=PUB1137](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137).
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Valensise G., (2007): *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and the Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*, INGV-SGA;  
<http://storing.ingv.it/cfti4med/>.
- Idriss I. M., Boulanger R. W., (2008): *Soil Liquefaction during earthquakes*. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, 469 pp.
- ISIDe Working Group, (INGV, 2010): *Italian Seismological Instrumental and parametric database*.  
<http://iside.rm.ingv.it>.
- Iwasaki T., Arakawa T., Tokida K., (1982): *Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes*. Proceedings of the Conference on Soil Dynam.
- L.R. Emilia-Romagna n. 19 del 30 ottobre 2008: *Norme per la riduzione del rischio sismico*. Bollettino Ufficiale Regione Emilia-Romagna n. 44 del 12 marzo 2010.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E., (2016): *DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.  
doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>.
- Martelli L., Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F.C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F., Severi P., (2017): *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe, edizione 2016*.
- Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi G., Madiari C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V., Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C., Ricci L., (2013): *Microzonazione Sismica Dell'area Epicentrale Del Terremoto Della Pianura Emiliana Del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti 32° Convegno Nazionale Gngts, Trieste. Isbn: 978-88-902101-7-4.
- Martelli L., Romani M., (2013): *Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012* (Ordinanza del commissario delegato – Presidente della Regione Emilia-Romagna n. 70/2012), Relazione Illustrativa.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

- 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>.
- 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. Bordononi, 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.
- Montone P., Mariucci M.T., Pierdominici S., (2012): *The Italian present-day stress map*, Geophys. J. Int., 189, 705-716; doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05391.x.
- Mucciarelli M. (a cura di), (2012): *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*.
- NTC, (2008): *Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 14 gennaio 2008*. Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, [www.cslp.it](http://www.cslp.it), Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- Ori G.G., Friend P.F., (1984): *Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets*. Geology, 12, 475-478.
- Paolucci E., Albarello D., D'Amico S., Lunidei E., Martelli L., Mucciarelli M., Pileggi D. (2015): *A large scale ambient vibration survey in the area damaged by May-June 2012 seismic sequence in Emilia Romagna, Italy*, Bulletin of Earthquake Engineering, 13 (11) pp. 3187-3206.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

- Petronio L., Affatato A., Baradello L., Barbagallo A., Cristofano G., Sorgo D., Lai C.G., Poggi V. (2018): *Shear wave seismic reflection survey in the 2012 Emilia epicentral area*. Atti 37° Convegno Nazionale GNGTS, Sezione 2.2. Bologna.
- Pieri M., Groppi G., (1975): *The structure of the base of the Pliocene-Quaternary sequence in the subsurface of the Po and Veneto Plains, the Pedepennine Basin and the Adriatic Sea*. Structural model of Italy, Quaderni de "La Ricerca Scientifica" 90, 409-415.
- Pieri M., Groppi G., (1981): *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl., 414, 1-13.
- Pondrelli S., Salimbeni S., Perfetti P., Danecek P., (2012): *Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence*. Annals of Geophys., **55**(4), 615-621, doi: 10.4401/ag-6146.
- Rathje E. M, Kottke A. (2013) - *Strata*, <https://nees.org/resources/strata>.
- Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, (1998): *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ufficio geologico – ENI-Agip, Divisione Esplorazione e Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120.
- Ricci Lucchi F., (1986): *The Oligocene to Recent foreland basins of the northern Apennines*, in: Allen, P., Homewood, P. (Eds.), *Foreland basins*. Blackwell Scientific, Oxford, pp. 105-139.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M.L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi S., Rio D., (1982): *Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nel margine appenninico*, in: Cremonini G., Ricci Lucchi F. (Eds.). Guida alla Geologia del margine appenninico-padano Pitagora-Technoprint, Bologna, pp. 17-46.
- Robertson P.K., (2009): *Performance based earthquake design using the CPT*, Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - from case history to practice, IS-Tokyo, June 2009
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), (2016): *CPT15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT15>
- Scognamiglio L., Margheriti L., Mele F.M. Tinti E., Bono A., De Gori P., Lauciani V., Lucente F.P., Mandiello A.G., Marcocci C., Mazza S., Pintore S., Quintiliani M., (2012): *The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations, moment tensors and magnitudes*. Annals of Geophys., **55**(4), 549-556, doi: 10.4401/ag-6159
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, **2**(4), 552-555.
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, **2**, 4, pp. 550-555.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CREVALCORE

Sonmez H., (2003): *Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey)*. Environ. Geology 44(7), pp. 862-871.

Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G., (2009): *Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): seismotectonic implications*. Bollettino della Società Geologica Italiana 128.

Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D., Arango I., Castro G., Christian J.T., Dobry R., Finn W.D.L. Harder L.F., Hynes M.E., Ishihara K., Koester J., Liao S., Marcuson III W.F., Martin G.R., Mitchell J.K., Moriwaki Y., Power M.S., Robertson P.K., Seed R., Stokoe K.H.,: *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF*. Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, October, pp 817-833.

## 11 Allegati

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

Allegato 1 - Sezioni Geologiche

Allegato 2 - Rapporti di Prova

Allegato 3 - Verifica Potenziale di Liquefazione CPTU