



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 Cento



## Relazione Illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Geotema S.r.l.	30/03/2017

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

## Indice

1	Introduzione.....	4
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi.....	4
1.2	Lo studio di microzonazione sismica .....	5
1.3	Elaborati prodotti .....	6
2	Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento .....	7
2.1	Sismicità storica .....	8
2.1.1	La sequenza del 2012 .....	12
2.2	Sorgenti sismogenetiche .....	16
3	Assetto geologico e geomorfologico dell'area .....	18
3.1	Quadro geografico geomorfologico .....	18
3.2	Contesto geologico stratigrafico.....	20
3.3	Contesto strutturale .....	22
4	Dati geognostici e geofisici .....	27
4.1	Indagini di repertorio.....	27
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica .....	29
4.2.1	Indagini realizzate in situ .....	29
4.2.2	Indagini realizzate in laboratorio.....	40
5	Modello del sottosuolo.....	43
5.1	Substrato .....	45
5.2	Terreni di copertura.....	49
5.2.1	Quaternario Marino.....	49
5.2.2	Quaternario prevalentemente continentale (Supersistema Emiliano-Romagnolo).....	50
5.2.3	Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) .....	50
6	Interpretazioni e incertezze .....	53
6.1	Frequenza naturale dei terreni ( $f_0$ ).....	53
6.2	Substrato rigido .....	54
6.3	Terreni suscettibili di liquefazione.....	58
7	Metodologie di elaborazione e risultati.....	59
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali .....	60
7.1.1	Risposta sismica locale con modellazioni numeriche.....	61

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

7.2	Zone instabili soggette a liquefazione .....	79
7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione .....	79
8	Elaborati cartografici.....	85
8.1	Carta delle indagini (Tavola 1a - Tavola 1b).....	86
8.2	Carta Geologico Tecnica microzonazione sismica (Tavola 2a - Tavola 2b).....	87
8.2.1	Elementi geologici ed idrogeologici.....	87
8.2.2	Terreni di copertura.....	88
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3a - Tavola 3b).....	90
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4a - Tavola 4b) .....	91
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5a - 5b).....	93
8.6	Carte di microzonazione sismica (Tavole 6a - 6b, 7a - 7b, 8a - 8b, 9a - 9b) .....	94
9	Commenti finali e criticità.....	96
9.1	Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale.....	97
9.2	Microzonazione sismica e criticità.....	98
9.3	Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione .....	101
9.4	Indicazioni per la riduzione del rischio sismico .....	102
10	Bibliografia .....	103
11	Allegati .....	110

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

<i>Coordinamento dello studio di Microzonazione Sismica:</i>	dott. Luca Minarelli
<i>Redazione della relazione:</i>	dott. Luca Minarelli prof. Marco Stefani dott. geol. Massimiliano Fazzini dott. Davide Franciosi
<i>Creazione geodatabase dei dati geologici e geotecnici:</i>	dott. Luca Minarelli dott. Andrea Pavanati dott. Matteo Fusetti
<i>Elaborazione tavole cartografiche:</i>	dott. Luca Minarelli dott. Andrea Pavanati
<i>Elaborazione dei dati stratigrafici:</i>	prof. Marco Stefani dott. Luca Minarelli
<i>Esecuzione ed elaborazione indagini geognostiche:</i>	Elletipi S.r.l. - Ferrara (FE) Geologia Ferrara S.n.c. - Ro Ferrarese (FE) Geo S.r.l. - Arpino (FR)
<i>Esecuzione ed elaborazione indagini ESAC:</i>	Progeo S.r.l. - Forlì (FC)
<i>Esecuzione ed elaborazione misure HVSR:</i>	dott.ssa Ambra Mantovani

## 1 Introduzione

Il percorso di microzonazione sismica del Comune di Cento 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 maggio 2012, la Regione Emilia-Romagna, attraverso l'Ordinanza 70/2012, ha infatti realizzato studi di microzonazione sismica negli ambiti urbanizzati e suscettibili di urbanizzazione dei 17 Comuni dell'area epicentrale (Martelli *et al.*, 2013). Con Delibera di Giunta Regionale D.G.R. n. 1227/2015, sono stati infine attribuiti al Comune di Cento i contributi per la realizzazione del presente studio di microzonazione sismica con locali 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 uniformare anche i contenuti dei precedenti studi agli "indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" nazionali (Gruppo di Lavoro MS, 2008) ed agli attuali "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" recentemente aggiornati dalla D.G.R. 2193/2015.

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

Lo studio di microzonazione sismica di terzo livello del Comune di Cento è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nella Delibera di Giunta della Regione Emilia-Romagna 1227/2015 dal titolo "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".

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

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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

- Delibera di Giunta Regionale D.G.R. n. 2193/2015 “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica”;
- Variante specifica al PTCP della Provincia di Ferrara relativa ad “ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale”, adottata dal Consiglio Provinciale il 29 maggio 2014. Tale variante contiene, all’interno del proprio Quadro Conoscitivo, un documento relativo la sismicità in Provincia di Ferrara;
- L.R. n. 19 del 30 ottobre 2008 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- D.M. del 14 gennaio 2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- 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 questo specifico studio si individua nella creazione di uno strumento per la suddivisione del territorio indagato in aree omogenee, sia sulla base della risposta sismica dei terreni, sia per quanto concerne i possibili effetti locali indotti dallo scuotimento; in particolare, lo studio di terzo livello ha come finalità l’analisi dell’effettivo grado di pericolosità sismica delle aree riconosciute come instabili e/o potenzialmente instabili.

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

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Gli ambiti interessati dagli studi di microzonazione sismica sono stati utilizzati i medesimi ambiti individuati negli studi prodotti dalla Regione Emilia-Romagna attraverso l'Ordinanza 70/2012, in accordo con quanto stabilito con il "Settore 6° - Lavori pubblici e assetto" del territorio del Comune di Cento.

### 1.3 Elaborati prodotti

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

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

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

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

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in conformità con quanto indicato nell'allegato C della D.G.R. 1227/2015 dal titolo "Indicazioni per l'archiviazione informatica, rappresentazione e fornitura dei dati degli studi di microzonazione sismica e dell'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza, di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014 e decreto del 4 agosto 2014 del Capo del Dipartimento della Protezione Civile".

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

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

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

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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

### 2.1 Sismicità storica

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

In relazione al Comune di Cento il database contiene 52 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 Tabella 2-2.

IN OCCASIONE DEL TERREMOTO DEL:						EFFETTI				
DATA						AREA EPICENTRALE	NMDP	$I_0$	$M_w$	IMCS CENTO
Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se					
1505	01	03	02			Bolognese	31	8	5.62	V
1561	11	24	01	25		Ferrarese	3	5-6	4.40	V

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

1570	11	17	19	10		Ferrarese	58	7-8	5.44	VI
1672	04	14	15	45		Riminese	92	8	5.59	V
1695	02	25	05	30		Asolano	107	10	6.40	V
1978	10	19	23			Appennino forlivese	45	9	5.99	V
1779	06	04	07			Bolognese	12	7	5.22	V
1779	06	10	08	35		Bolognese	10			V
1779	07	14	19	30		Bolognese	17			V
1780	02	06	04			Bolognese	9	6-7	5.06	V
1832	03	13	03	30		Reggiano	97	7-8	5.51	V
1834	10	04	19			Bolognese	12	6	4.71	V
1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36	VI
1914	10	27	09	22		Lucchesia	660	7	5.63	VI
1920	09	07	05	55	4	Garfagnana	750	10	6.53	V
1936	10	18	03	10		Alpago Cansiglio	269	9	6.06	V
1971	07	15	01	33	2	Parmense	228	8	5.51	V
1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04	V
1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43	V
1987	07	11	01	46	5	Bassa Bolognese	15	5	4.20	V
2012	05	20	02	03	5	Pianura emiliana	53	7	6.09	V
2012	05	29	7	00	0	Pianura emiliana	87	7-8	5.90	VI

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

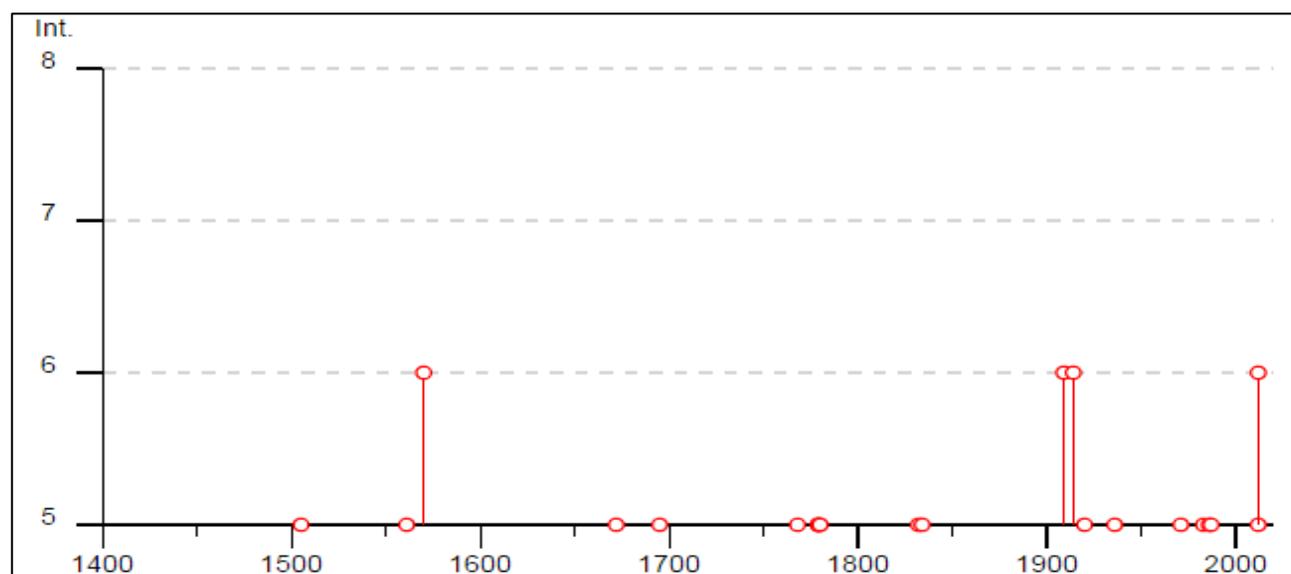


Figura 2-1 - Valori di intensità macrosismica  $I_{MCS} \geq 5$  attribuite al Comune di Cento, dall'anno 1000 al 2014, tratte dal database DBMI11 (Locati *et al.*, 2016).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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 V e di VI grado. Valori pari al VI grado sono stati osservati anche con i terremoti del 1914 della Lucchesia, del 1909 dell'Emilia Romagna orientale e del 1570 del Ferrarese, con epicentro a Ferrara.

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

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

*una vasta area comprendente le principali città emiliane, Milano, Padova e Venezia a nord; Pesaro a sud. Il quadro complessivo degli effetti è cumulativo delle scosse del 17 novembre. Numerosissime e frequenti furono le repliche ricordate e descritte, fino ai primi mesi del 1572, dalle fonti, tra le quali molteplici lettere degli ambasciatori presenti a Ferrara rintracciate negli archivi di Firenze, Urbino, Mantova, Torino. Qualche scossa fu avvertita anche nel 1573 e nel 1574.*

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

In Figura 2-2 è riportata in mappa la distribuzione degli effetti macrosismici relativi al terremoto del 17 novembre 1570, rispetto all'area del Comune di Cento.

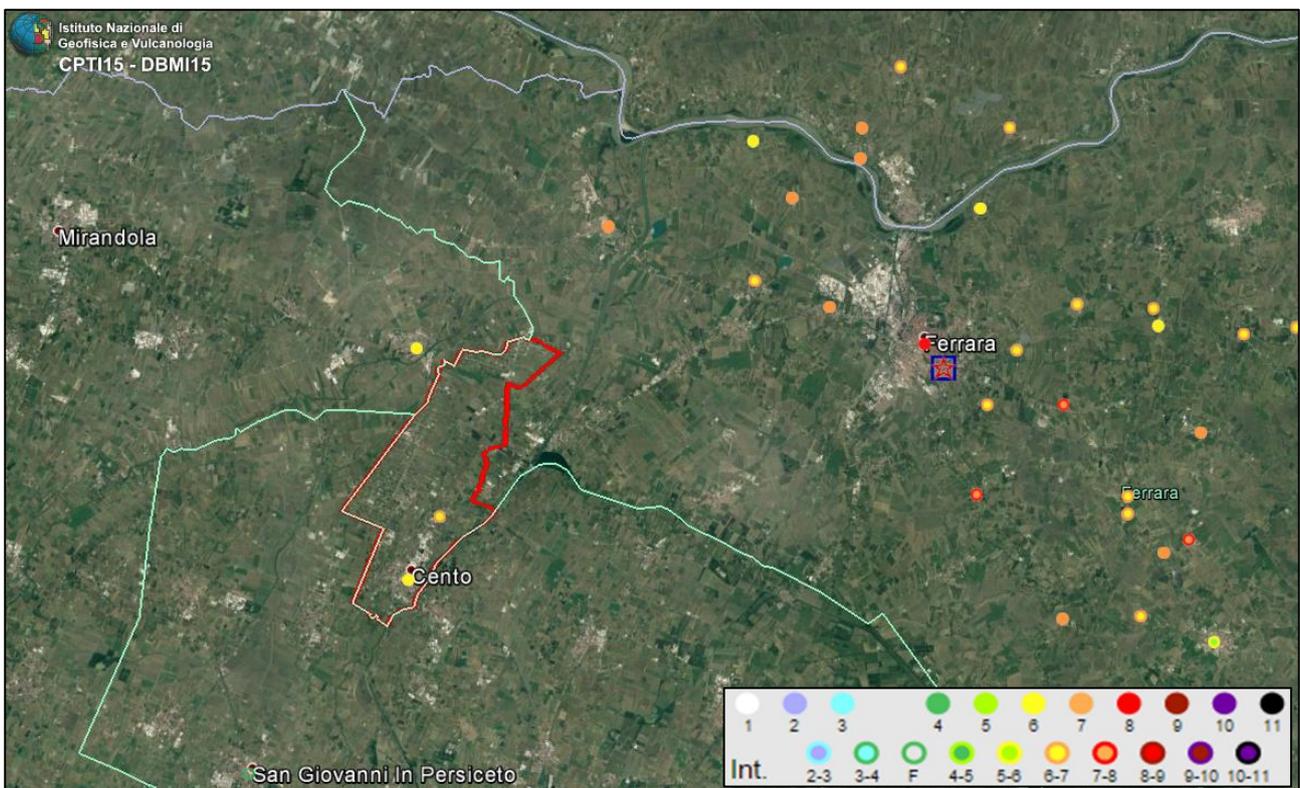


Figura 2-2 - Distribuzione degli effetti del sisma del 17 novembre 1570. Dati DBMI15. In rosso è rappresentata l'area del Comune di Cento.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

La Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento (INGV, 2004) mostra, per l'area in esame, un'accelerazione massima attesa su suolo rigido compresa tra 0,150 - 0,175 g, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Figura 2-3).

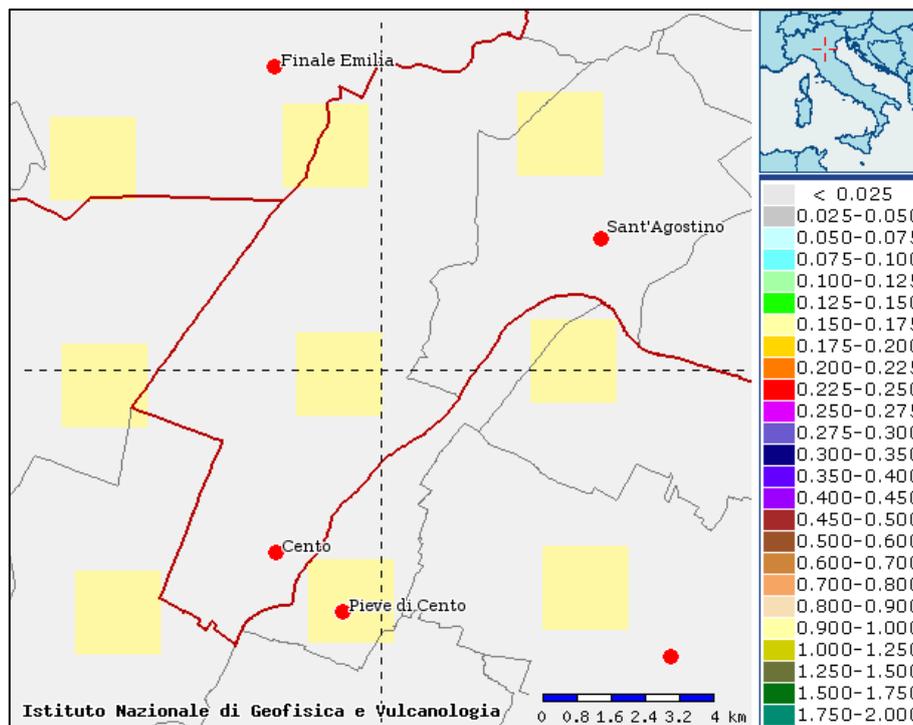


Figura 2-3 - Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento nell'intorno dell'area di studio.

### 2.1.1 La sequenza del 2012

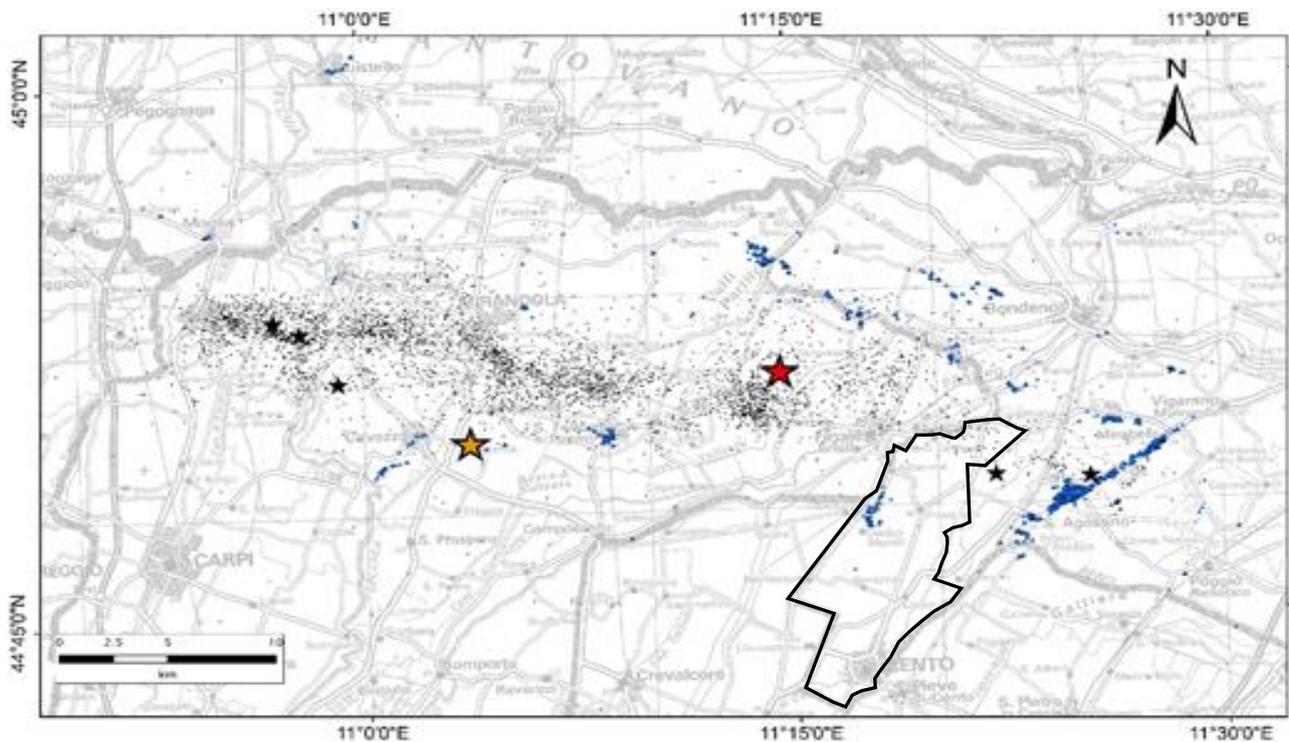
Tra il maggio ed il giugno 2012 un'importante sequenza sismica ha interessato una vasta area della Bassa Pianura Padana, compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara. La sequenza è stata caratterizzata da due scosse principali; la prima, di magnitudo locale  $M_L$  pari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

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

La sequenza sismica ha interessato le strutture fragili costituenti la parte frontale della catena appenninica sepolta, le cosiddette Pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981), serie di pieghe e sovrascorrimenti a vergenza

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

nord-orientale che coinvolgono sia la copertura sedimentaria Terziario - Quaternaria che la successione carbonatica Mesozoica.



**Figura 2-4 - Sequenza sismica emiliana del 2012. Le stelle rossa e arancio rappresentano rispettivamente le scosse del 20 e 29 maggio. Le stelle nere riportano la localizzazione degli *aftershocks* con  $M_w \geq 5,0$ , mentre i piccoli punti neri indicano gli eventi con  $M_w \geq 1,5$ . I piccoli punti blu infine evidenziano le liquefazioni osservate (Caputo e Papathanassiou, 2012; Emergo Working Group, 2012; GdL Liquefazione RER, 2012). La linea nera delimita il territorio comunale di Cento.**

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

I rilievi macrosismici eseguiti immediatamente dopo le scosse (Galli *et al.*, 2012a e 2012b) hanno determinato, per il territorio di Cento, valori di intensità macrosismica pari al VI grado della Scala MCS. Le mappe di distribuzione degli effetti macrosismici dei singoli eventi (Figura 2-5 e Figura 2-6) mostrano chiaramente come le due scosse abbiano interessato in maniera differente il territorio del Comune di Cento. I maggiori risentimenti della scossa del 20 Maggio sono, infatti, concentrati nella parte settentrionale del territorio centese con intensità pari al VI-VII grado MCS. Il capoluogo e le porzioni meridionali del territorio comunale, inizialmente meno colpite, raggiungono valori di intensità macrosismica del VI grado MCS solo dopo la scossa del 29 Maggio 2012.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

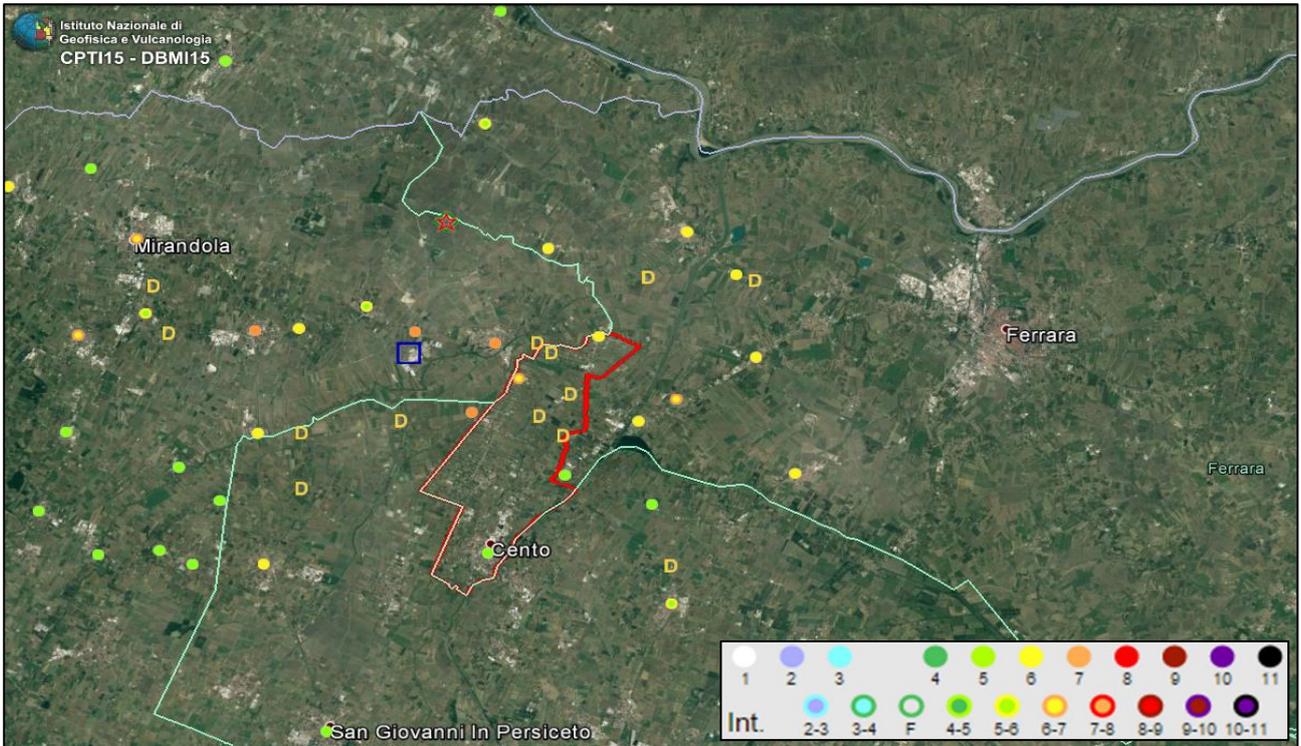


Figura 2-5 - Distribuzione degli effetti del sisma del 20 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentata l'area del Comune di Cento.

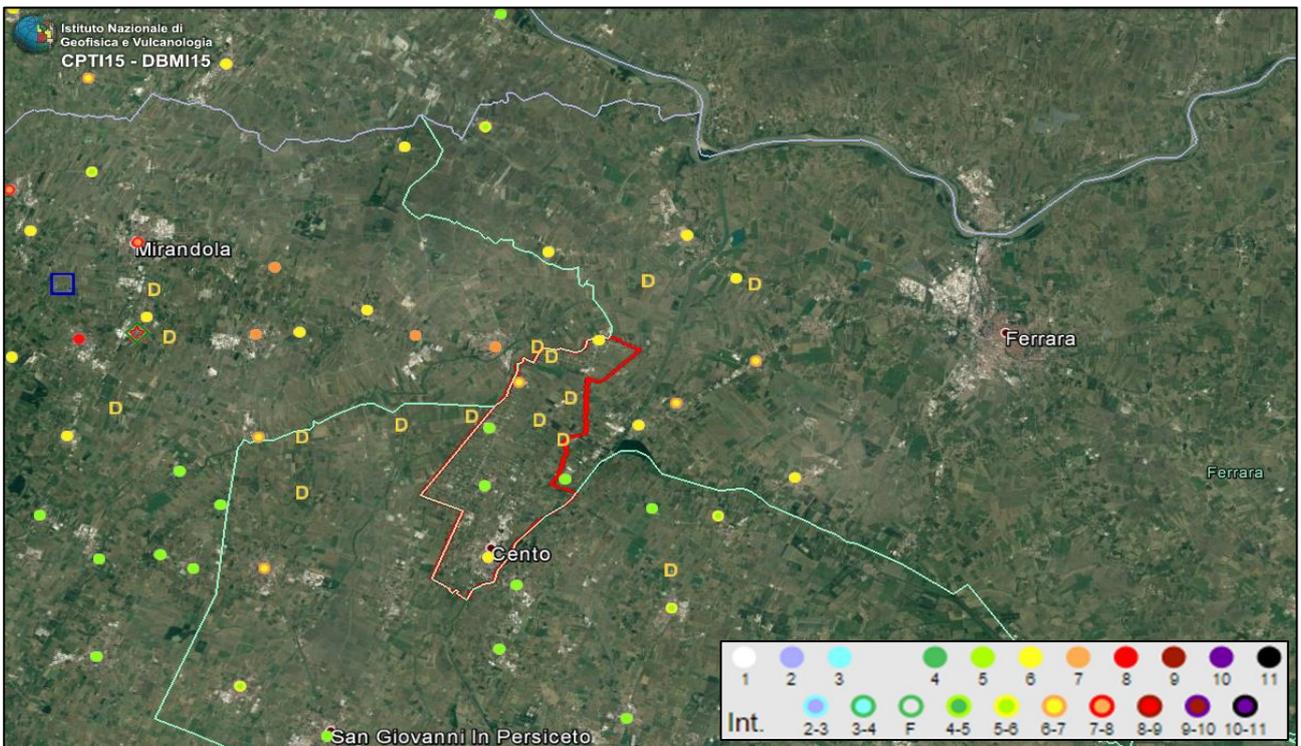


Figura 2-6 - Distribuzione degli effetti del sisma del 29 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentata l'area del Comune di Cento.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Nel territorio, duramente colpito dalla sequenza sismica del 2012, sono state verificate numerose lesioni e crolli parziali su larga parte degli edifici storici pubblici e privati, con danneggiamenti dei paramenti murari ed in corrispondenza delle connessioni tra la copertura e gli elementi strutturali degli edifici stessi. Gravi danni hanno, inoltre, interessato svariati edifici produttivi ed agricoli con crolli, anche completi, delle coperture.

I danni più ingenti al patrimonio storico e artistico hanno riguardato il parziale crollo della chiesa di S. Martino di Tours nella frazione di Buonacompra, il grave danneggiamento di tutti i campanili presenti sul territorio, tra i quali Buonacompra, Reno Centese e Casumaro, e l'inagibilità degli immobili simbolo della comunità locale quali la Pinacoteca Civica, il Teatro Borgatti, la Residenza Municipale, la Biblioteca, il Palazzo del Governatore, la Rocca di Cento, le scuole Pascoli, i complessi cimiteriali e tutti gli edifici di culto. Uno dei settori più colpiti dal sisma è stato inoltre quello scolastico: nel territorio comunale, su 26 edifici, solo 5 sono rimasti agibili, 6 presentavano un'inagibilità tale da rendere non economicamente sostenibile il ripristino delle strutture e i restanti 15 sono risultati gravemente colpiti e sottoposti a consistenti opere di ricostruzione.

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

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

Diffusi fenomeni di liquefazione sono stati invece osservati nell'abitato di Dodici Morelli, in corrispondenza di un antico alveo abbandonato del fiume Reno, ove si sono verificate eruzioni di sabbie dal sottosuolo attraverso fratture nel terreno e formazione di vulcanelli. Associati a questi effetti sono stati anche osservati cedimenti differenziali e dislocazioni laterali (GdL Liquefazione RER, 2012; Emergeo Working Group, 2013). Tali fenomeni hanno indotto danni all'edificato, compromettendo la stabilità degli edifici e del loro sistema fondale, oltre al danneggiamento delle reti dei sottoservizi.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

## 2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS Working Group, 2015) mostra come il territorio di Cento sia quasi completamente interessato dalla presenza della sorgente sismogenetica composta ITCS051, mentre la parte settentrionale è interessata dalla presenza della sorgente sismogenetica composta ITCS103 (Figura 2-7).

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

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

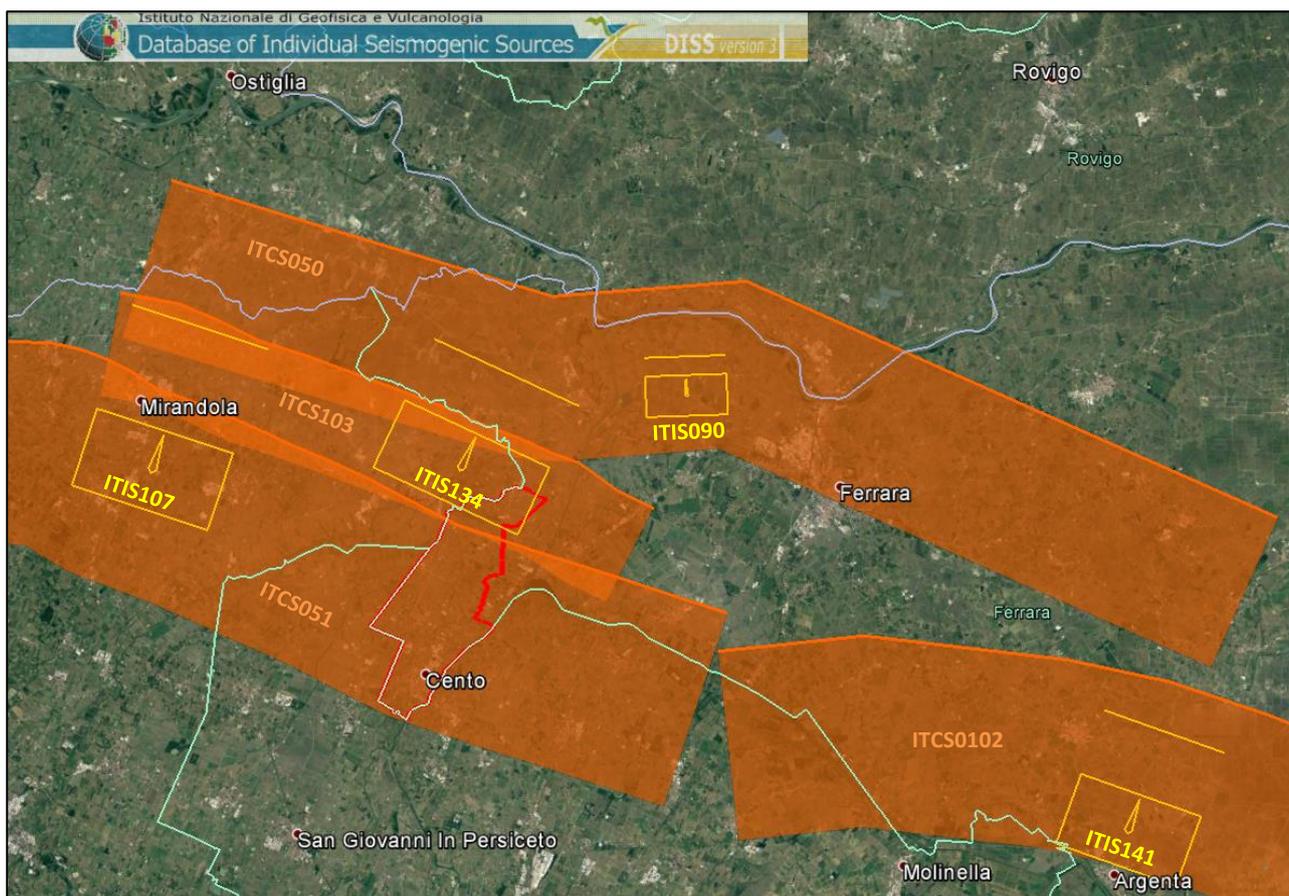


Figura 2-7 - Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) ed individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.2.0, nell'intorno dell'area di studio. In rosso l'area comunale di Cento.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

L'area di studio è inoltre bordata, a Nord ed ad Est, da altre due sorgenti sismogenetiche composte anch'esse approssimativamente orientate Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest e denominate rispettivamente Poggio Rusco - Migliarino (ITCS050) e Malalbergo - Ravenna (ITCS102).

Quella a Nord delimita il settore esterno delle Pieghe Ferraresi e comprende la sorgente individuale di Ferrara (ITIS090), a cui è assegnata una  $Mw_{max}$  pari a 5.5, profondità tra 1.4 e 4.5 km e slip-rate compreso tra 0.1 e 0.5 mm/anno; quella ad Est invece comprende la sorgente individuale di Argenta (ITIS141).

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

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

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 composta.

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

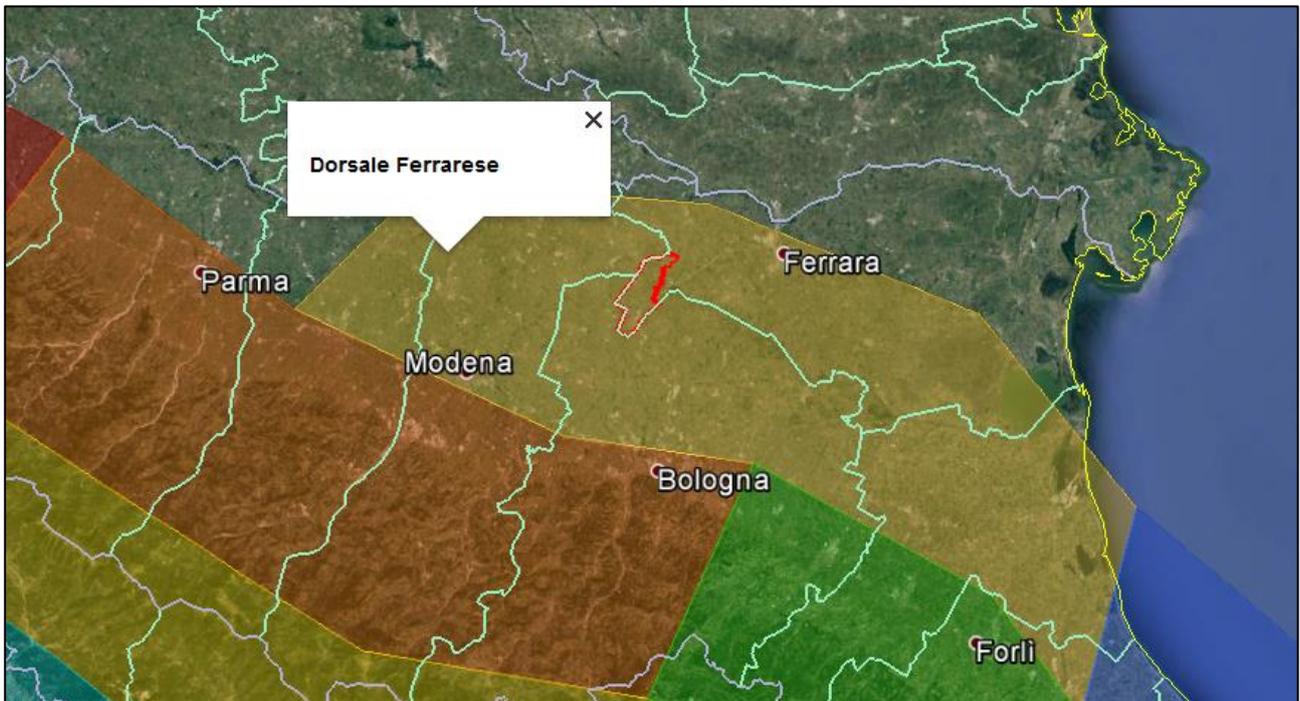


Figura 2-8 - Ubicazione del territorio comunale di Cento (in rosso) rispetto alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).

### 3 Assetto geologico e geomorfologico dell'area

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

#### 3.1 Quadro geografico geomorfologico

Il territorio analizzato forma la parte sud-orientale della Provincia di Ferrara, incuneato nella Provincia di Bologna e confinante verso ovest con quella di Modena. Il territorio si sviluppa in un'area di bassa pianura alluvionale, formata da depositi di fiumi di provenienza appenninica. In particolare, questa area è dominata dai depositi del fiume Reno. Nella parte centro-occidentale del territorio comunale questi sedimenti sono di età medievale, mentre sono più recenti in quella orientale, in quanto depositati in larga parte dopo il XV secolo. La morfologia del territorio è caratterizzata da un articolato microrilievo, costituito da dossi fluviali ed estesi corpi di argine naturale che sfumano in depressioni interalvee. Tali caratteristiche risultano estremamente evidenti grazie alle tecniche di telerilevamento laser (LIDAR), che permettono una ricostruzione altimetrica di elevato dettaglio (Figura 3-1).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

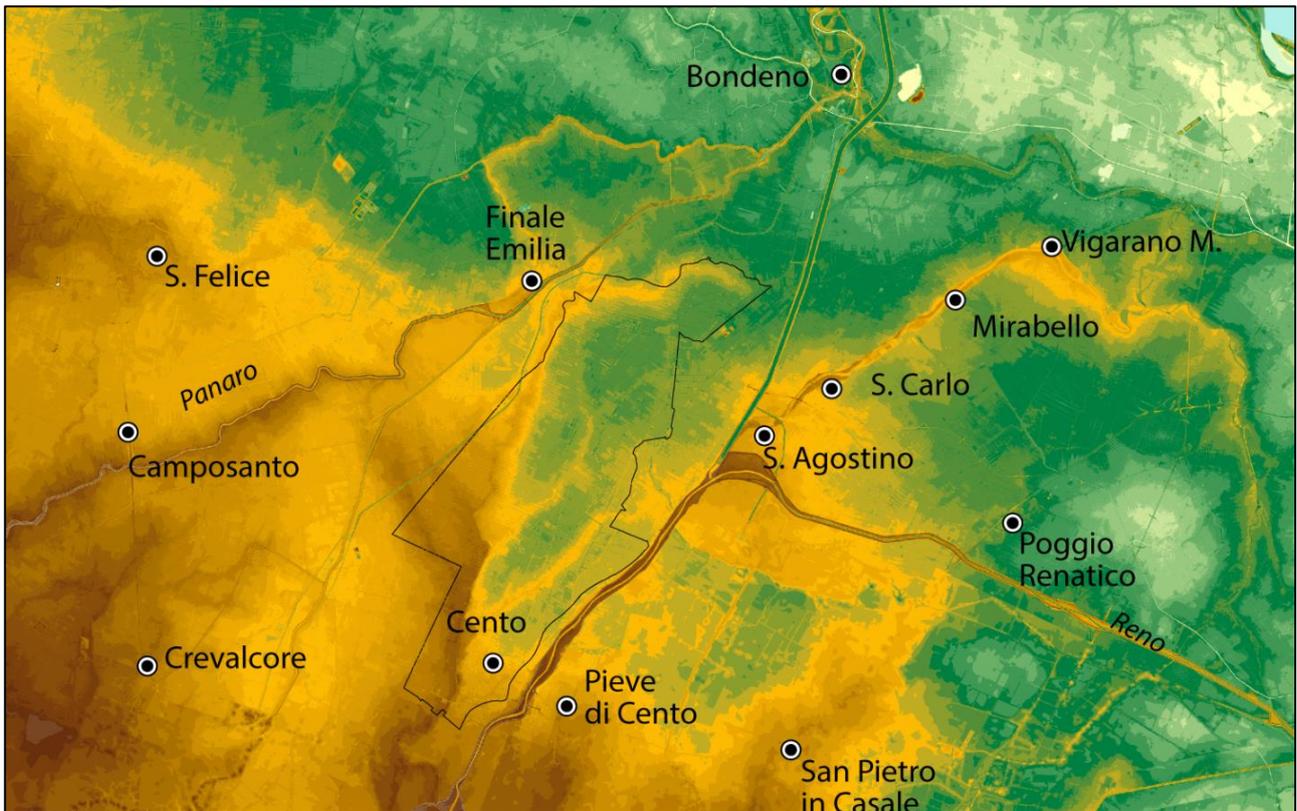


Figura 3-1 - Modello altimetrico LIDAR (dati Regione Emilia-Romagna). Evidenti appaiono i numerosi dossi del Reno allungati in direzione sudovest – nordest e limitati da depressioni interalvee (in verde). Altrettanto riconoscibile è la struttura deltizia del Reno medioevale, con canali distributori ramificati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

Questo settore di pianura mostra i terreni topograficamente più rilevati di tutto il territorio della Provincia di Ferrara, variando in quota da 21 a 10 m sopra il livello del mare. Nonostante le quote relativamente elevate, il deflusso a mare delle acque in eccesso dipende in gran parte dal sollevamento meccanico. Particolarmente marcato appare il dosso dell'alveo del Reno, che coincide ancora con l'attuale corso del fiume fra Cento e Pieve fino a Sant'Agostino, dove prosegue come forma relitta verso Vigarano Mainarda. Il dosso e il relativo corpo sedimentario si sono formati fra XV e XVIII secolo D.C.. Tutta l'area a nord del capoluogo comunale, sviluppata in direzione di Renazzo e Finale Emilia è invece formata da ampi dossi di peloalveo di Reno, che testimoniano lo sviluppo di un sistema diacrono di canali distributori di un delta interno, di età medievale. Nel territorio considerato, non si osservano forme legate a depositi fluviali di età premedievale, in quanto tali sedimenti sono sempre sepolti nel sottosuolo.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

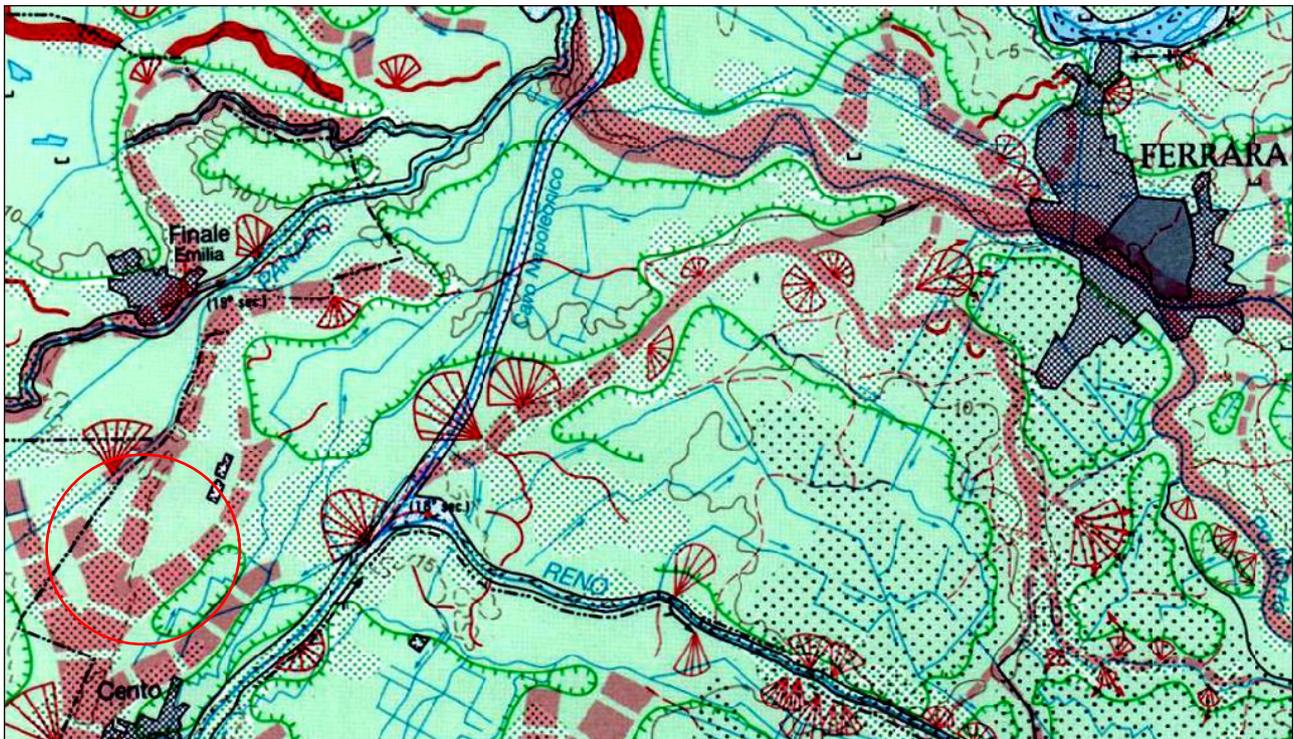


Figura 3-2 - Stralcio dalla Carta Geomorfologica della Pianura Padana 1:250.000 (Castiglioni G.B. Ed. 1999), che illustra la complessa alternanza di corpi dossivi di paleoalveo (in rosso) e depressioni interalvee (in verde), limitate da piccole scarpate morfologiche (linee verdi). Nella parte centro-meridionale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

### 3.2 Contesto geologico stratigrafico

Prima degli eventi sismici del 2012, le conoscenze geologiche erano limitate alla parte meridionale del territorio comunale. Questa area era stata infatti oggetto delle indagini geologiche e cartografiche svolte nell'ambito del Progetto CARG, su cui si basano il Foglio 202 "San Giovanni in Persiceto" e le relative note illustrative. La parte settentrionale del territorio era invece pressoché priva sia di studi stratigrafici di sottosuolo che di cartografia geologica di superficie, in quanto gli studi realizzati nell'ambito del Progetto Nazionale di Cartografia Geologica (CARG) erano limitati a territori posti poco più a sud dell'area comunale (cfr. Foglio 203 "Poggio Renatico").

I primi studi, realizzati durante l'emergenza sismica del 2012, hanno gettato le basi per i successivi approfondimenti, delineando in maniera generale i principali caratteri geologico-evolutivi dell'area.

La carta geologica di superficie in scala 1:100.000, allegata allo studio di microzonazione sismica dell'Ordinanza 70/2012 già indicava come i depositi affioranti fossero costituiti da sabbie di canale, argine e rotta fluviale, giustapposte ad argille e limi organici di palude interalvea.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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

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

La carta documenta come la porzione sud-occidentale del Ferrarese sia costituita dai grandi corpi sabbiosi di paleoalveo del Reno e di altri fiumi di provenienza appenninica. Questi corpi si sono in gran parte depositi in età assai recente e sono quindi attribuibili, come detto, all'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>). I centri abitati, la rete viaria e le infrastrutture sono in gran parte sviluppati in corrispondenza dei pronunciati dossi sabbiosi depositi, a partire dal medioevo, dal fiume Reno. Lateralmente, aree più depresse sono formate da sedimenti fangosi depositi in zone interalvee palustri, talvolta interessate da corpi di sabbie e limi da rotta fluviale o da estesi depositi di argille organiche e torbe.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

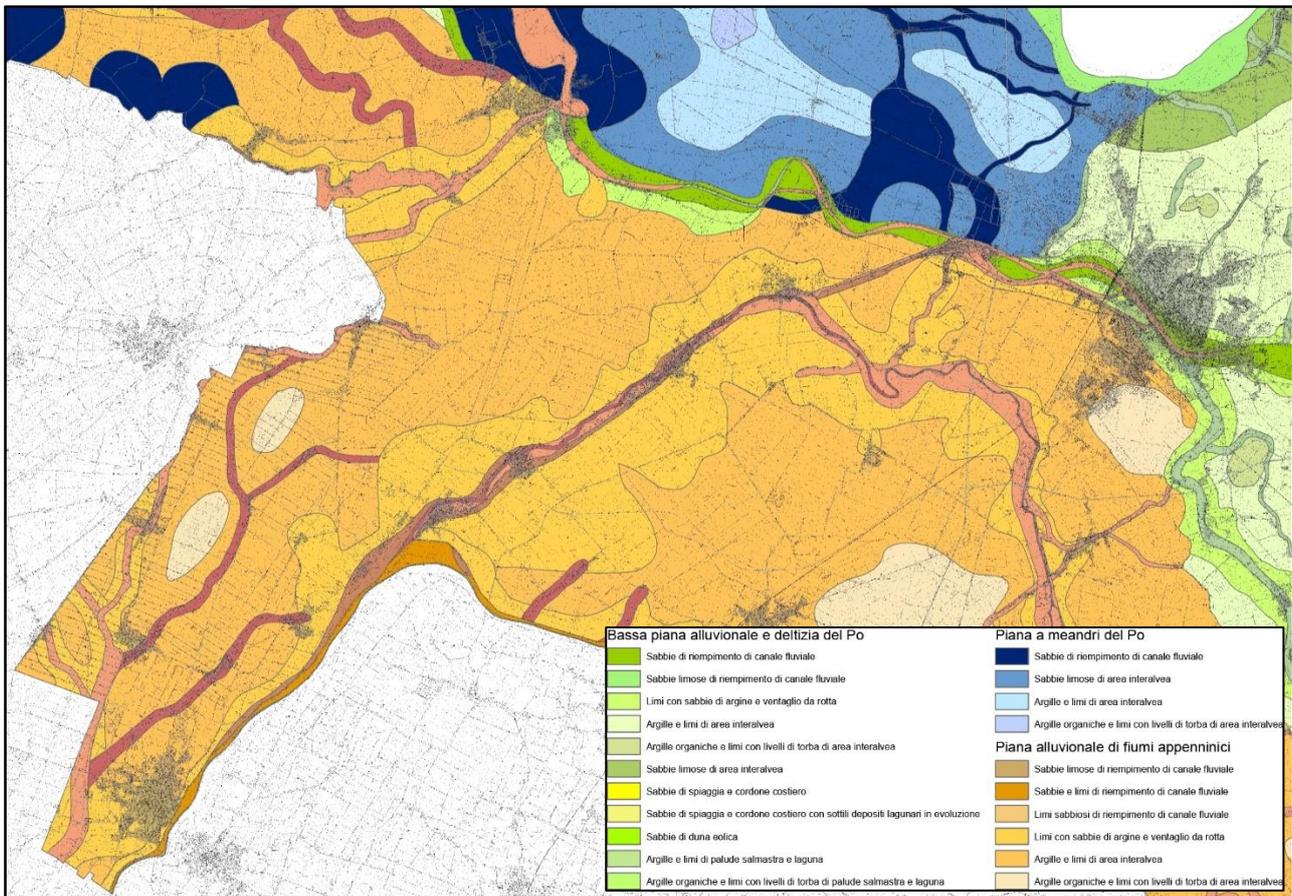


Figura 3-3 - Stralcio della Carta Geologica e Geomorfologica della Provincia di Ferrara (2016), in cui sono visibili a corpi di paleoalveo del Reno e di altri fiumi appenninici e i corpi depositi dal Po. Il territorio comunale di Cento è interamente sviluppato a cavallo del più recente paleoalveo del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

### 3.3 Contesto strutturale

L'area esaminata fa parte del bacino di Avanfossa dell'Appennino, qui sviluppato nella regione compresa tra la dorsale dell'Appennino settentrionale ed i primi rilievi veneti.

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

Le prospezioni petrolifere hanno permesso di riconoscere una complessa serie di pieghe e sovrascorrimenti con geometria a pianta arcuata e vergenza nord e nord-est (Pieri e Groppi, 1975, 1981; Bigi *et al.*, 1990;

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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 concavità rivolta verso il margine appenninico, denominati "Arco delle Pieghe Emiliane", a nord-ovest, ed "Arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole", ad sud-est (Figura 3-4).

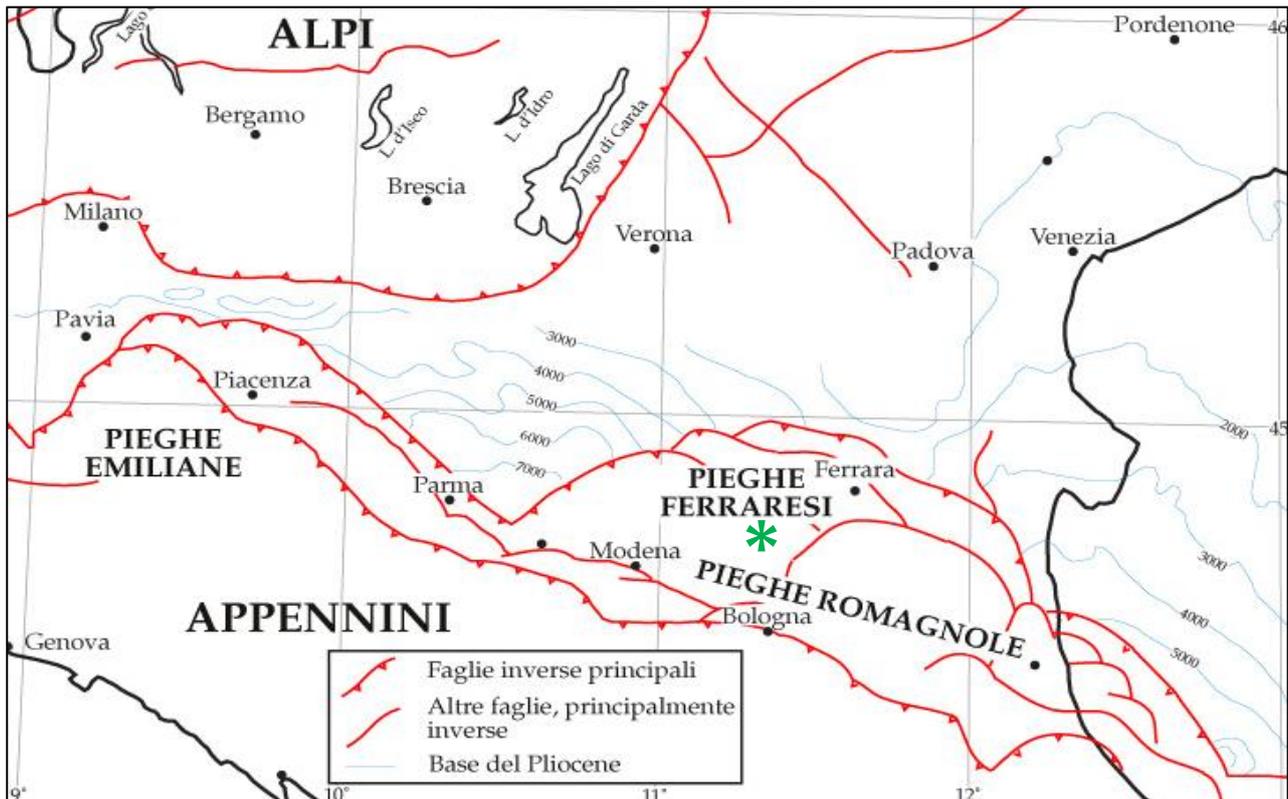


Figura 3-4 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana centro-orientale (Modificata da Burrato *et al.*, 2003, da Pieri e Groppi, 1975). L'area analizzata si trova nella parte meridionale del fascio di pieghe ferraresi.

L'arco orientale può essere a sua volta suddiviso in tre strutture minori dette "Pieghe Ferraresi", "Pieghe Romagnole" e "Pieghe Adriatiche" (Bigi *et al.*, 1990). Le Pieghe Ferraresi (Dorsale Ferrarese o "Ferrara Folds" in Pieri e Groppi, 1981) rappresentano le strutture più settentrionali, 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) e registrano le fasi più recenti e tuttora in atto della deformazione. 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 (Figura 3-6).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

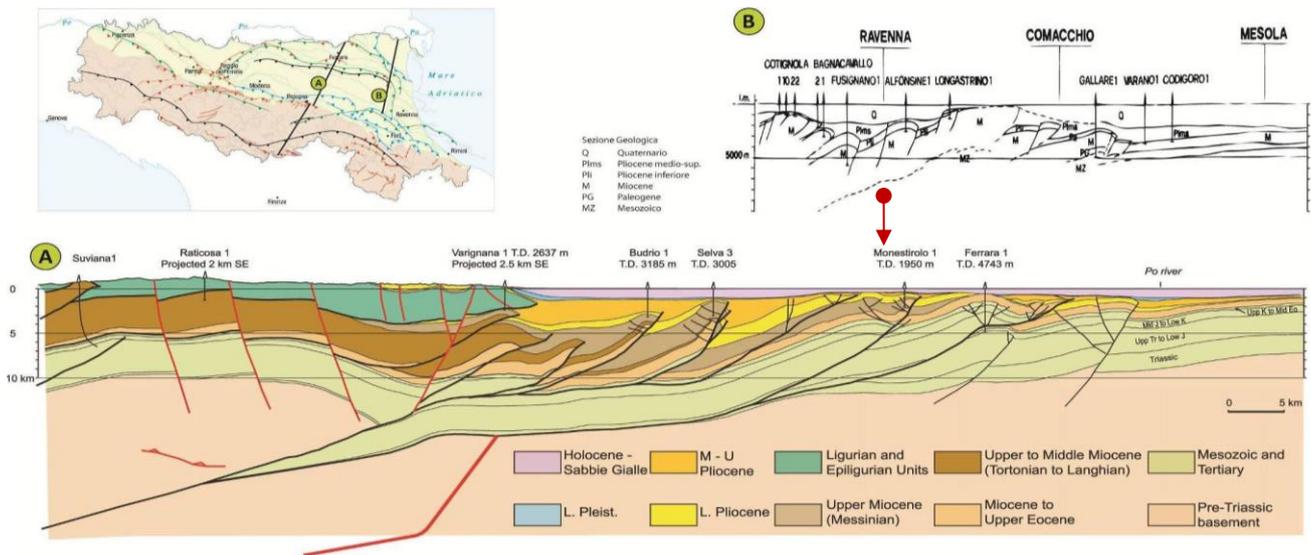


Figura 3-5 - Contesto strutturale della porzione emiliano-romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) deriva da Pieri e Groppi, 1981, mentre la sezione inferiore è presa (A) da Toscani *et al.*, 2009. L'area indagata, ubicata all'incirca in corrispondenza delle frecce rosse, attraversa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

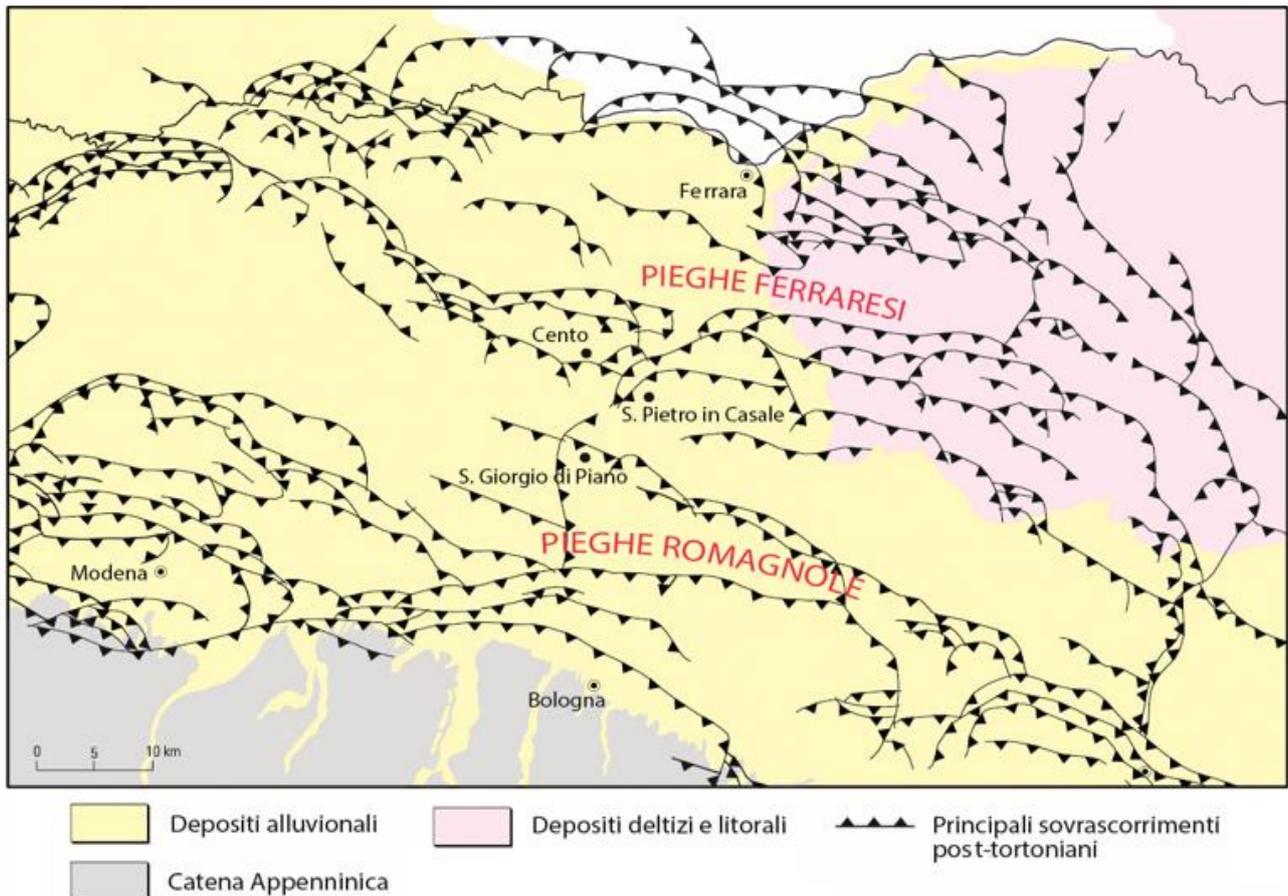


Figura 3-6 - Inquadramento delle strutture tettoniche sepolte, che illustra la complessità dell'arco delle Pieghe Romagnole e Ferraresi. I colori illustrano i caratteri delle unità geologiche affioranti. Modificato dalle Note Illustrative del Fogo CARG 203, Poggio Renatico. L'area analizzata si sviluppa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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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 km più ad est, è tratta da Pieri e Groppi (1981). Entrambe le sezioni mostrano un sovrascorrimento (*thrust*) principale profondo, che verso l'esterno si apre in ventagli (*splay*) di faglie meno profonde, associati retroscorrimenti di ordine minore. In sezione A, sono evidenti scollamenti multipli a diversi livelli strutturali, mentre la sezione B mostra superfici di scollamento generalmente più profonde. Nella porzione centrale, la struttura di Ferrara presenta un secondo gruppo di anticlinali di rampa, ben evidente in entrambe le sezioni.

L'insieme delle Pieghe Ferraresi e delle Pieghe Romagnole rappresenta la culminazione strutturale che delimita, a nord, un ampio bacino di *piggy-back* (Ori e Friend, 1984), all'interno del quale si sono depositi notevoli spessori sedimentari che costituiscono la successione pliocenica marina e quaternaria marino-continentale (Figura 3-5). L'architettura stratigrafica dei depositi plio-quaternari è stata fortemente influenzata dalla deformazione tettonica e presenta quindi spessori massimi nelle aree di sinclinale e minimi sulle anticlinali sepolte (Correggiari *et al.*, 1992; Amorosi *et al.*, 1997 a, b; Di Dio e Caporale, 1998; Di Dio e Molinari, 2000). Questo andamento è evidente anche dalle abbondanti variazioni laterali di spessore delle successioni più recenti, in buona parte deposte in condizioni di pianura alluvionale. Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, deposto negli ultimi 350-450.000 anni (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998) e limitato al tetto da una superficie topografica, mostra spessori che variano da meno di 70 m in corrispondenza della culminazione dell'Anticlinale di Casaglia, ad anche oltre 400 m nelle aree di sinclinale più depressa. Queste grandi variazioni di spessore registrano quindi altrettanto grandi variazioni laterali di subsidenza, indotte anche dalla deformazione delle strutture tettoniche sismogenetiche.

Il territorio comunale di Cento si sviluppa con direzione prevalente sudovest – nordest con un allungamento perpendicolare all'asse delle strutture tettoniche sepolte. Data questa distribuzione, esso attraversa varie fasce strutturali di pieghe e faglie. Schematicamente, il territorio può essere suddiviso in tre aree strutturalmente omogenee con caratteri stratigrafici ben distinti.

Un alto strutturale è sviluppato nella parte centrale dell'area, all'altezza di Pilastrello. Questo alto è interessato da diverse faglie inverse, sovrascorrimenti e retroscorrimenti. L'alto strutturale è limitato a nord, nei pressi di Buonacompra, da una piega sinclinale ed a sud dal fianco di un'altra ampia sinclinale che si approfondisce in direzione di Sala Bolognese.

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 CENTO

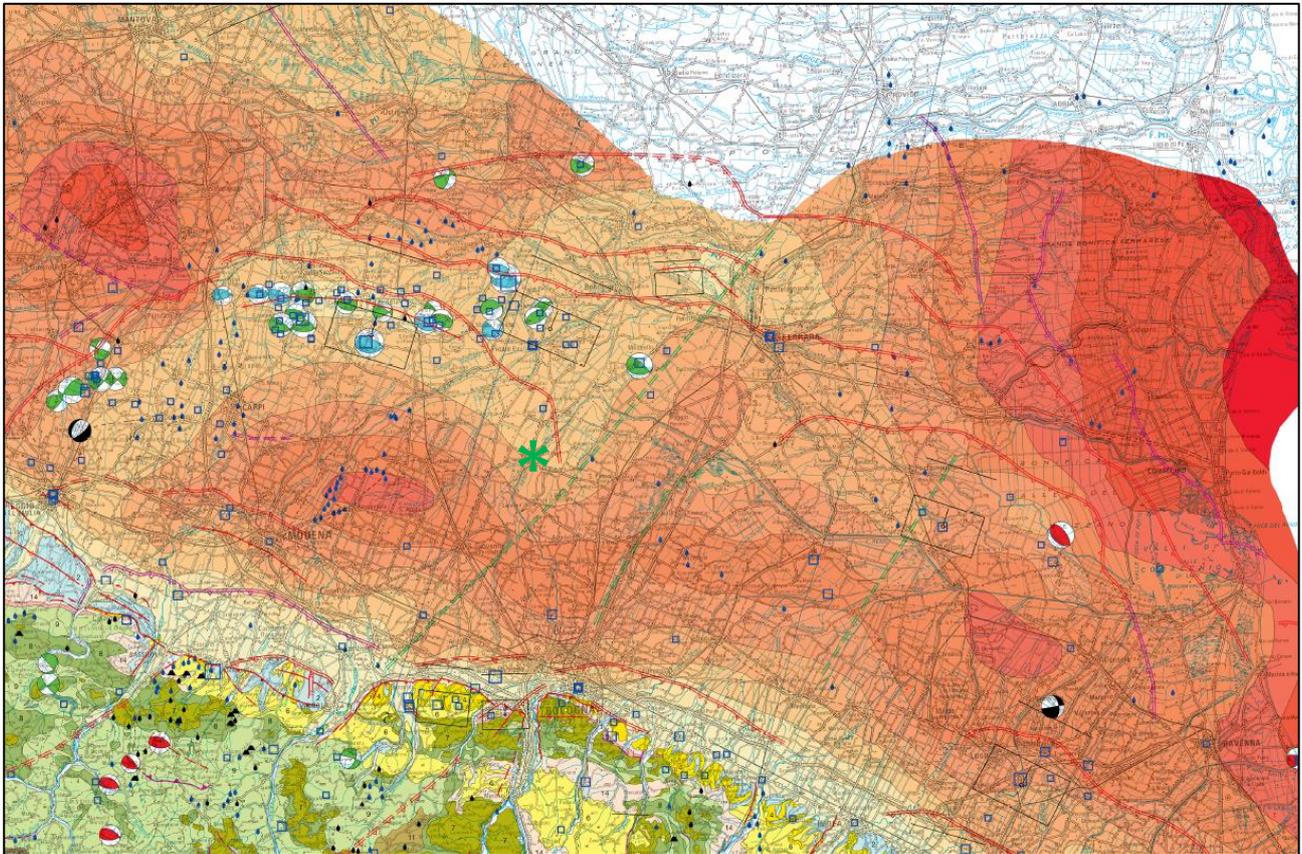


Figura 3-7 - Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017). L'area analizzata è indicata dall'asterisco.

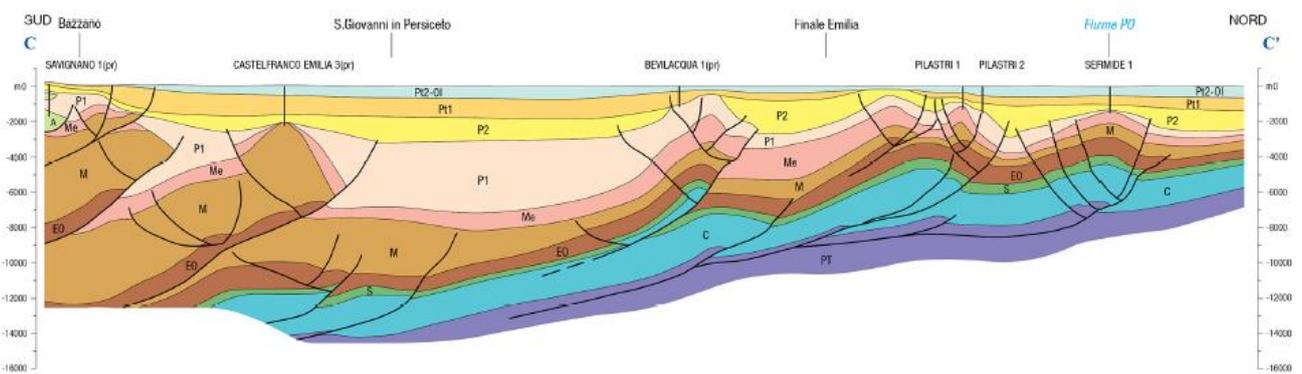


Figura 3-8 - Sezione geologica profonda C - C', da Bazzano (BO) al Po. Fonte: Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017).

## 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 e alla tipologia dei corpi sepolti a maggiori profondità, e talvolta anche in relazione alle tipologia e profondità del substrato.

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

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

### 4.1 Indagini di repertorio

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

Nel complesso si sono potute utilizzare ai fini della microzonazione sismica ben 982 prove pregresse di buona affidabilità, suddivise per numero e tipologia così come riportato in Tabella 4-1.

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

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
Prove penetrometriche statiche	CPT	468
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	CPTe	8
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTU	201
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPT	45
Prove penetrometriche dinamiche	SPT	9
Prove penetrometriche dinamiche leggere	DL	2

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Prove dilatometriche	DMT	1
Sondaggi a carotaggio continuo	S	49
Sondaggi con prelievo di campioni	SC	5
Sondaggi a distruzione di nucleo	SD	4
Pozzi per acqua	PA	4
Pozzi per idrocarburi	PI	1
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	82
Prova sismica in foro tipo Down-Hole	DH	2
Multi-channel Analysis of Surface Waves	MASW	82
Extended Spatial Autocorrelation	ESAC-SPAC	1
Refraction Microtremor	REMI	8
Prove di colonna risonante	CR	7
Prove triassiali cicliche	TC	3
	<b>TOTALE</b>	<b>982</b>

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

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

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

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Buona è risultata anche la diponibilità di indagini geofisiche pregresse volte ad individuare i principali contrasti di impedenza ed a fornire indicazioni sulle velocità delle onde di taglio a maggiori profondità.

### 4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

A supporto degli studi di microzonazione sismica del Comune di Cento sono state direttamente realizzate diverse campagne di indagini, con lo scopo di caratterizzare dal punto di vista geotecnico e geofisico le aree indicate come suscettibili di trasformazioni urbanistiche e gli ambiti urbani consolidati.

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

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
INDAGINI REALIZZATE IN SITU		
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTU	11
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPT	1
Prove dilatometriche	DMT	2
Prove dilatometriche sismiche	SDMT	2
Sondaggi con prelievo di campioni	SC	2
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	56
Extended Spatial Autocorrelation	ESAC-SPAC	2
INDAGINI REALIZZATE IN LABORATORIO		
Analisi su campione	SM	5
Prove di colonna risonante	CR	4
Prove triassiali consolidate isotropicamente - non drenata	CIU	3
<b>TOTALE</b>		<b>88</b>

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

#### 4.2.1 Indagini realizzate in situ

##### 4.2.1.1 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.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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 equipaggiato di punta elettrica Tecnopenta G1-CPL2IN con le seguenti caratteristiche:

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

Le prove sono state generalmente spinte fino a 20 m, profondità entro la quale possono verificarsi fenomeni di liquefazione cosismica in presenza di terreni granulari poco addensati e saturi in acqua.

I dati penetrometrici ( $q_c$ ,  $f_s$ ) sono stati elaborati sia per ricavare i principali parametri tessiturali e meccanici dei sedimenti attraversati, sia per eseguire verifiche a liquefazione con metodi semplificati.

Le indagini penetrometriche CPTU hanno interessato le località riportate in Tabella 4-3.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.
CPTU1	038004P858CPTU925	44.724983°	11.285920°	Via XXV Aprile, Cento	02/08/2016	20 m	2,70 m
CPTU2	038004P864CPTU932	44.837156°	11.361734°	Via Dante, Casumaro	08/08/2016	20 m	2,35 m
CPTU3	038004P859CPTU926	44.766480°	11.289955°	Via Taddia, Renazzo di Cento	01/08/2016	20 m	2,20 m
CPTU4	038004P860CPTU927	44.722126°	11.284078°	Via dei Bersaglieri, Cento	01/08/2016	20 m	2,05 m
CPTU5	038004P861CPTU928	44.747671°	11.277504°	Via Ungheria, Cento	01/08/2016	20 m	2,00 m
CPTU6	038004P865CPTU933	44.765287°	11.282170°	Via Pilastro, Renazzo	08/08/2016	20 m	2,20 m
CPTU7	038004P866CPTU934	44.787114°	11.284123°	Via del Riccio, XII Morelli	04/08/2016	20 m	2,40 m
CPTU8	038004P867CPTU935	44.826162°	11.335480°	Via Chiesa, Reno Centese	04/08/2016	20 m	2,17 m

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

CPTU9	038004P862CPTU929	44.756934°	11.311604°	Campo Sportivo di Corpo Reno	01/08/2016	20 m	1,95 m
CPTU10	038004P884CPTU960	44.828517°	11.357658°	Via Provinciale, Casumaro	25/08/2016	20 m	2,30 m
CPTU11	038004P863CPTU930	44.762210°	11.282116°	Renazzo	04/08/2016	37 m	2,15 m

**Tabella 4-3 - Sintesi dei dati principali associati alle 11 indagini penetrometriche CPTU eseguite.**

### 4.2.1.2 Prove penetrometriche statiche con cono sismico (SCPT)

Rispetto alla prova CPTU, applicando al piezocono elettrico un'asta contenete accelerometri tridimensionali, è inoltre possibile la registrazione di segnali sismici generati artificialmente; la prova SCPT (*Seismic Cone Penetration Test*) è infatti in grado di acquisire, oltre ai parametri già descritti per le CPTU, le velocità delle onde di taglio  $V_s$  e di compressione  $V_p$ , una volta che queste siano indotte tramite sistema di energizzazione (martello) montato su di un supporto a lato del penetrometro ed infisso nel terreno.

Anche questa indagine, realizzata presso la località di Renazzo (FE), è stata eseguita mediante penetrometro statico equipaggiato della medesima punta elettrica Tecnopenta G1-CPL2IN con coppia di sensori sismici distanziati di un metro (cfr. ASTM D 7400).

La prova SCPTU è stata pianificata per raggiungere la profondità di 30 metri al fine di derivare, tramite misure dirette di  $V_s$  con tecnica *Down-Hole*, il valore del parametro di velocità media  $V_{s30}$ , riportato in Tabella 4-4.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.	$V_{s30}$ (m/s)
SCPT1	038004P863CPTU930	44.762210°	11.282116°	Renazzo	04/08/2016	37 m	2,15 m	193

**Tabella 4-4 - Sintesi dei dati principali associati all'indagine penetrometrica SCPT eseguita.**

Sulla base di consolidate correlazioni empiriche, dai dati penetrometrici ( $q_c$ ,  $f_s$ ) delle indagini sono stati ricavati i principali parametri tessiturali e meccanici dei terreni attraversati, al fine di definire i caratteri litostratigrafici e geotecnici dei sedimenti presenti nelle aree indagate.

I valori parametrici riportati nel rapporto di prova allegati allo studio, sono stati utilizzati anche per eseguire la verifica del potenziale di liquefazione mediante metodi semplificati, come dettagliato nel paragrafo 7.2.1.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

### 4.2.1.3 Prove dilatometriche (DMT)

Il dilatometro piatto (DMT) è una lama di acciaio avente dimensioni 95×200×15 mm, con il bordo inferiore affilato; su di un lato dello strumento è montata una membrana metallica circolare espandibile (Figura 4-1).

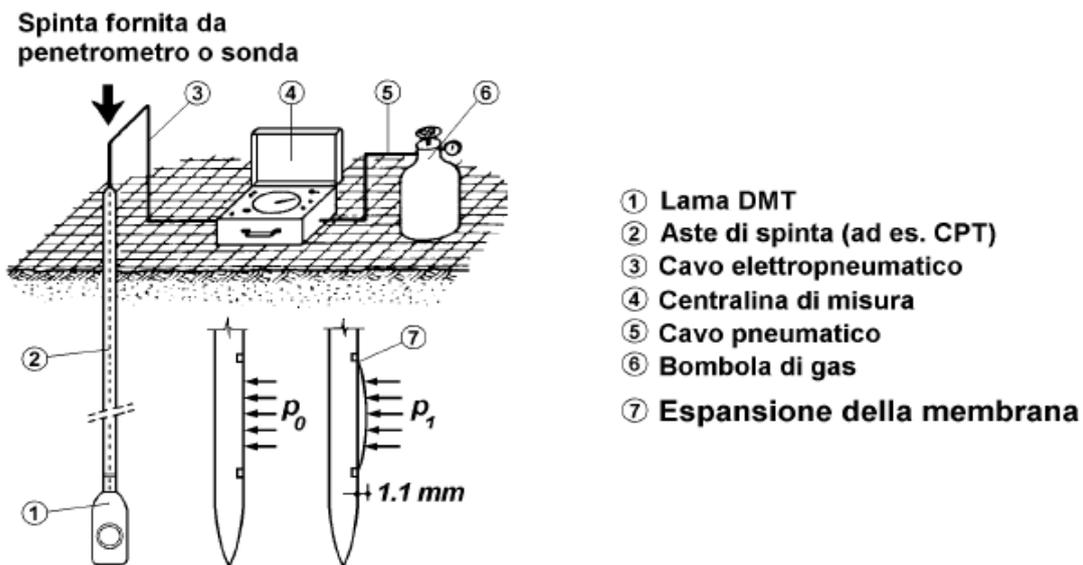


Figura 4-1 - Schema generale della prova DMT.

La prova consiste nell'infingere verticalmente la lama nel terreno mediante spinta statica, agendo su una batteria di aste, espandendo la membrana con gas in pressione e misurando le pressioni corrispondenti a due livelli di deformazione predeterminati della membrana. La lama è collegata ad una centralina di misura in superficie per mezzo di un cavo elettropneumatico (che trasmette pressione di gas e continuità elettrica) passante all'interno delle aste di spinta. Una bombola di gas, collegata alla centralina di misura per mezzo di un cavo pneumatico, costituisce la sorgente di gas necessaria per espandere la membrana. La centralina di misura è dotata di un regolatore di pressione, di manometri, di un segnalatore audiovisivo e di valvole di sfiato.

Ad intervalli regolari (generalmente ogni 20 cm) la penetrazione viene arrestata e, utilizzando la centralina di misura, viene immesso gas del quale si aumenta gradualmente la pressione, facendo dilatare la membrana contro il terreno. Ad ogni profondità, in circa 1 minuto, vengono rilevati due valori di pressione:

A. = pressione necessaria per controbilanciare la pressione del terreno ed iniziare il movimento della membrana (pressione di distacco o *lift-off*);

B. = pressione necessaria per ottenere una dilatazione del centro della membrana contro il terreno di 1.1 mm.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

A seconda della tipologia di terreno attraversato, è possibile effettuare anche la lettura del parametro  $C$  “pressione di chiusura”, sgonfiando lentamente la membrana subito dopo la lettura del parametro  $B$ . Le letture di pressione  $A$ ,  $B$ ,  $C$  devono essere corrette per mezzo dei valori  $\Delta A$ ,  $\Delta B$  determinati mediante calibrazione, per tenere conto della rigidità della membrana, e convertite in  $p_0$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ . L’attrezzatura e le metodologie di prova DMT sono standardizzate dall’ASTM e nell’Eurocodice 7.

I due valori di pressione determinati  $p_0$  e  $p_1$  vengono elaborati ottenendo tre “parametri indice”:

$I_D$  = Indice di Materiale

$K_D$  = Indice di Spinta Orizzontale

$E_D$  = Modulo Dilatometrico

Dai parametri indice  $I_D$ ,  $K_D$ ,  $E_D$ , applicando le correlazioni usuali (TC16 2001), vengono ricavati i parametri:

$M$  = Modulo edometrico (terreni sia coesivi che incoerenti)

$c_u$  = Resistenza al taglio non drenata (terreni coesivi)

$K_0$  = Coefficiente di spinta a riposo (terreni coesivi)

$OCR$  = Rapporto di sovraconsolidazione (terreni coesivi)

$\phi'$  = Angolo di resistenza al taglio (terreni incoerenti)

Il modulo edometrico  $M$  e la resistenza al taglio non drenata  $c_u$  sono ritenuti i parametri più affidabili e utili ottenuti dalla prova DMT.

Le indagini dilatometriche DMT hanno interessato le località riportate in Tabella 4-5.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	GWT
DMT1	038004P868DMT936	44.794018°	11.291670°	Via Zigalotto, XII Morelli	11/07/2016	25 m	2,3 m
DMT2	038004P869DMT938	44.805603°	11.340454°	Strada Provinciale 13 Buonacompria	11/07/2016	25 m	1,4 m

**Tabella 4-5 - Sintesi dei dati principali associati alle prove dilatometriche DMT eseguite.**

### 4.2.1.4 Prove dilatometriche sismiche (SDMT)

Il dilatometro sismico (SDMT) è una combinazione della lama DMT standard con un modulo sismico per la misura della velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$ .

Il modulo sismico (Figura 4-2) è costituito da un corpo cilindrico posto sopra la lama DMT, munito di due ricevitori distanti 0.5 m. Il segnale è amplificato e digitalizzato in profondità. La configurazione *true-interval* a due ricevitori evita possibili inesattezze nella determinazione dello zero dei tempi dall’impatto, talora riscontrate nella configurazione *pseudo-interval* con un solo ricevitore. Inoltre la coppia di sismogrammi

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

registrata dai due ricevitori ad una data profondità di prova corrisponde allo stesso colpo, anziché a colpi successivi non necessariamente identici, con sensibile miglioramento della ripetibilità delle misure di Vs (ripetibilità osservata = 1 m/s).

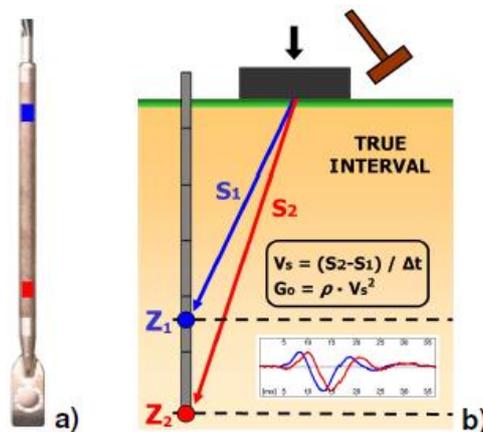


Figura 4-2 - Lama DMT e modulo sismico (a); Schema generale della prova con SDMT (b).

La Vs è ottenuta come rapporto tra la differenza di distanza tra la sorgente e i due ricevitori (S2 - S1) ed il ritardo dell'arrivo dell'impulso dal primo al secondo ricevitore (Δt). Le misure di Vs sono effettuate ogni 0,5 m di profondità.

L'energizzazione avviene in superficie mediante un martello a pendolo da 10 kg che percuote orizzontalmente una base di ferro parallelepipedica pressata verticalmente contro il terreno ed orientata con asse longitudinale parallelo all'asse dei ricevitori, in modo che essi offrano la massima sensibilità all'onda di taglio generata.

Dai valori di Vs si può ricavare il modulo di taglio iniziale G<sub>0</sub>. La sintesi della conoscenza dei valori di G<sub>0</sub> e del modulo monodimensionale M, ricavato da DMT, può essere utile per la determinazione "in situ" di curve di decadimento del modulo all'aumentare della deformazione (curve G-g o simili).

Le indagini dilatometriche SDMT hanno interessato le località riportate in Tabella 4-6.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	GWT
SDMT1	038004P868SDMT937	44.794018°	11.291670°	Via Zigalotto, XII Morelli	11/07/2016	25 m	2,3 m
SDMT2	038004P869SDMT939	44.805603°	11.340454°	Strada Provinciale 13 Buonacompra	11/07/2016	25 m	1,4 m

Tabella 4-6 - Sintesi dei dati principali associati alle prove dilatometriche SDMT eseguite.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

### 4.2.1.5 Sondaggi con prelievo di campioni (SC)

Per la caratterizzazione “diretta” delle litologie sono stati eseguiti 2 sondaggi a carotaggio continuo spinti rispettivamente alla profondità di 20 m e 30 m (Tabella 4-7), dai quali sono stati prelevati campioni indisturbati per l’esecuzione delle prove di laboratorio geotecnico previste.

Il carotaggio è stato eseguito a rotazione verticale a secco con recupero integrale e rappresentativo dei terreni attraversati, comunque non inferiore al 90 %. Sono stati utilizzati carotieri semplici di diametro 101 mm e lunghezza 1.500 mm, con corone e scarpe taglienti al widia, azionati ad aste di manovra di diametro 76 mm. Le pareti del foro sono state sostenute da tubazione metallica provvisoria di diametro 127 mm, infissa con circolazione di acqua potabile, senza l’ausilio di additivi di alcun tipo.

I campioni indisturbati sono stati prelevati con campionatori a pareti sottili di acciaio inox tipo Shelby di diametro 88.9 mm, tramite infissione a pressione della fustella. Al termine della perforazione il foro di sondaggio è stato richiuso con boiacca cemento bentonite e materiale di risulta.

La sonda impiegata è stata una ATLAS A 52, con le seguenti caratteristiche:

- coppia torcente 1.080 kgm
- velocità di rotazione 0 - 800 rpm
- corsa continua 350 cm
- spinta 5.000 kg
- trazione 5.000 kg
- portata argano manovra 3.000 kg
- pompa fanghi: C.M.O. ps 60/2 da 200 l/min

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.	N. CAMP.
SC1	038004P893SC971	44.796352°	11.324013°	Via Pilastrello, Pilastrello	24/10/2016	30 m	1,20 m	3
SC2	038004P894SC979	44.831994°	11.358469°	Via Bondenese, Casumaro	23/10/2016	20 m	1,80 m	2

Tabella 4-7 - Sintesi dei dati principali associati ai 2 sondaggi a carotaggio continuo SC eseguiti.

### 4.2.1.6 Misure di microtremore a stazione singola (HVSr)

Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con tromografo digitale Tromino e sono finalizzate all’elaborazione degli spettri di base ed alle analisi HVSr del sottosuolo (Albarellò e Castellaro, 2011). Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l'amplificazione sismica, considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

Il rumore di fondo (microtremore), presente diffusamente sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici sia all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole ( $10-15 \text{ m/sec}^2$ ), 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 (HVS<sub>R</sub> - *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Tale tecnica è utilizzata anche per la determinazione dell'amplificazione sismica locale e per stimare le frequenze principali di risonanza del sottosuolo, dati molto utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture (Castellaro, 2012; Castellaro e Mulargia, 2011).

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

Le 56 misure tromografiche realizzate a supporto dello studio di microzonazione sismica (Tabella 4-8) sono state eseguite con un tromografo digitale Tromino modello "Zero", orientato secondo il nord geografico, e georiferite tramite GPS con precisione variabile tra 2 e 3 m. L'acquisizione dei dati è stata effettuata generalmente con frequenza di campionamento di 128 Hz e con tempo di singola registrazione pari a 20 minuti. Alcune misure sono state realizzate con frequenza di campionamento di 256 Hz e tempi di acquisizione pari a 40 minuti per meglio indagare le basse frequenze.

In Tabella 4-8 sono riportati i principali dati associati a ciascuna delle 56 misure di microtremore realizzate e utilizzate per lo studio di microzonazione. Alcune acquisizioni sono state scartate e ripetute, in quanto soggette ad evidenti disturbi di natura antropica che ne hanno pregiudicato l'interpretazione (indicate come HVS<sub>R</sub>xx\_1 oppure \_2).

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, in gran parte realizzate con il medesimo strumento, hanno fornito una serie di dati

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

con caratteristiche omeogene, dunque tra loro confrontabili, che correlati con i dati geognostici disponibili hanno permesso di stimare la profondità di quello che può essere definito “substrato sismico” (paragrafo 5.1), attraverso la caratterizzazione delle superfici di disconformità stratigrafica in grado di influenzare il moto sismico in superficie.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	DATA	DURATA	f0	A0
HVSR01	038004P595HVSR602	44.8359°	11.3632°	06/05/2016	20 min	0.63	2.8
HVSR02	038004P596HVSR603	44.8323°	11.3536°	06/05/2016	20 min	0.63	3.3
HVSR03	038004P597HVSR604	44.8272°	11.3591°	06/05/2016	20 min	0.59	3.0
HVSR04_1	038004P598HVSR605	44.8292°	11.3288°	09/05/2016	20 min	0.69	2.9
HVSR05	038004P599HVSR606	44.8164°	11.3101°	06/05/2016	20 min	0.59	2.8
HVSR06_2	038004P643HVSR651	44.8128°	11.3138°	18/05/2016	20 min	0.72	3.0
HVSR07	038004P600HVSR607	44.8143°	11.3073°	06/05/2016	20 min	0.63	2.5
HVSR08_1	038004P601HVSR608	44.8045°	11.3429°	10/05/2016	20 min	0.78	3.1
HVSR09_1	038004P644HVSR652	44.8085°	11.3441°	18/05/2016	20 min	0.88	3.1
HVSR10	038004P602HVSR609	44.7961°	11.3240°	07/05/2016	20 min	0.66	3.2
HVSR11	038004P603HVSR610	44.7933°	11.3268°	07/05/2016	20 min	0.63	2.9
HVSR12	038004P604HVSR611	44.7871°	11.3352°	07/05/2016	20 min	0.64	3.3
HVSR13_1	038004P605HVSR612	44.7841°	11.3363°	10/05/2016	20 min	0.72	3.3
HVSR14_1	038004P606HVSR613	44.7674°	11.3327°	08/05/2016	20 min	0.69	2.5
HVSR15	038004P607HVSR614	44.7930°	11.2938°	07/05/2016	20 min	0.59	2.6
HVSR16_1	038004P645HVSR653	44.8002°	11.2975°	18/05/2016	20 min	0.78	2.2
HVSR17	038004P608HVSR615	44.7925°	11.2862°	07/05/2016	20 min	0.59	3.4
HVSR18	038004P646HVSR654	44.7880°	11.2871°	07/05/2016	20 min	0.53	2.1
HVSR19	038004P647HVSR655	44.7826°	11.3142°	07/05/2016	20 min	0.56	2.9
HVSR20	038004P609HVSR616	44.7666°	11.2573°	09/05/2016	20 min	0.63	2.6
HVSR21	038004P610HVSR617	44.7667°	11.2899°	09/05/2016	20 min	0.56	3.1
HVSR22	038004P648HVSR656	44.7687°	11.2824°	18/05/2016	20 min	0.5.3	3.3
HVSR23	038004P611HVSR618	44.7581°	11.2957°	08/05/2016	20 min	0.69	2.7
HVSR24	038004P612HVSR619	44.7604°	11.2844°	09/05/2016	20 min	0.63	2.7
HVSR25	038004P613HVSR620	44.7580°	11.3165°	08/05/2016	20 min	0.94	2.9
HVSR26	038004P649HVSR657	44.7533°	11.3110°	08/05/2016	20 min	0.78	2.5
HVSR27_2	038004P650HVSR658	44.7490°	11.3015°	18/05/2016	20 min	0.59	3.0
HVSR28	038004P614HVSR621	44.7492°	11.2753°	09/05/2016	20 min	0.63	2.8
HVSR29	038004P615HVSR622	44.7333°	11.2992°	08/05/2016	20 min	0.81	2.8
HVSR30	038004P616HVSR623	44.7280°	11.2822°	08/05/2016	20 min	0.94	2.3
HVSR31	038004P617HVSR624	44.7323°	11.2862°	08/05/2016	20 min	0.84	3.2
HVSR32	038004P618HVSR625	44.7317°	11.2729°	09/05/2016	20 min	0.78	2.7

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

HVSR33_1	038004P651HVSR659	44.7216°	11.2867°	18/05/2016	20 min	0.81	3.8
HVSR34	038004P619HVSR626	44.7239°	11.2828°	08/05/2016	20 min	0.88	3.0
HVSR35	038004P620HVSR627	44.7278°	11.2985°	08/05/2016	20 min	0.88	2.9
HVSR36_1	038004P621HVSR628	44.7201°	11.2901°	10/05/2016	20 min	0.75	2.8
HVSR37	038004P622HVSR629	44.7151°	11.2848°	08/05/2016	20 min	0.72	2.7
HVSR38	038004P623HVSR630	44.7221°	11.2760°	09/05/2016	20 min	0.91	2.8
HVSR39	038004P624HVSR631	44.7168°	11.2773°	10/05/2016	20 min	0.78	2.8
HVSR40	038004P625HVSR632	44.7231°	11.2638°	09/05/2016	20 min	0.69	2.5
HVSR41	038004P626HVSR633	44.7449°	11.2731°	09/05/2016	20 min	0.72	3.0
HVSR42_2	038004P652HVSR660	44.7428°	11.2844°	18/05/2016	20 min	0.69	3.0
HVSR43_1	038004P627HVSR634	44.7369°	11.2689°	10/05/2016	20 min	0.75	2.8
HVSR44_1	038004P628HVSR635	44.7510°	11.2897°	10/05/2016	20 min	0.63	2.8
HVSR45	038004P653HVSR661	44.7623°	11.2524°	09/05/2016	20 min	0.59	2.7
HVSR46	038004P629HVSR636	44.8006°	11.3308°	07/05/2016	20 min	0.69	3.7
HVSR47	038004P630HVSR637	44.8252°	11.3318°	07/05/2016	20 min	0.56	3.2
HVSR48_1	038004P631HVSR638	44.8239°	11.3398°	09/05/2016	20 min	0.63	2.6
HVSR49	038004P632HVSR639	44.8343°	11.3727°	06/05/2016	20 min	0.56	4.0
HVSR50	038004P633HVSR640	44.8201°	11.3573°	06/05/2016	20 min	0.63	3.9
TRE 002	038004P887HVSR963	44.808550°	11.344127°	24/10/2016	40 min	0.78	2.1
TRE 003	038004P888HVSR964	44.796094°	11.323992°	24/10/2016	40 min	0.91	2.0
TRE 004	038004P889HVSR965	44.782764°	11.314066°	24/10/2016	40 min	0.39	2.4
TRE 005	038004P890HVSR966	44.767408°	11.306177°	24/10/2016	40 min	0.34	2.4
TRE 006	038004P891HVSR967	44.742464°	11.295725°	24/10/2016	40 min	0.98	1.9
TRE 007	038004P892HVSR968	44.721561°	11.282689°	24/10/2016	40 min	0.88	2.0

$f_0$  = Frequenza naturale

$A_0$  = Ampiezza del picco di  $f_0$

**Tabella 4-8 - Principali dati associati alle 56 misure di microtremore a stazione singola HVSR di nuova esecuzione.**

### 4.2.1.7 Extended Spatial Autocorrelation (ESAC-SPAC)

Per poter disporre di alcuni punti di misura delle velocità delle onde di taglio a profondità superiori a 50 m nell'area del Comune di Cento, a supporto del presente studio di microzonazione sono state eseguite 2 indagini geofisiche con tecnica ESAC, i cui dati principali sono riportati in Tabella 4-9.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	Vs30
ESAC1	038004P886ESAC_SPAC962	44.791485°	11.295560°	Campo Sportivo di XII Morelli, Cento (FE)	07/07/2016	170
ESAC2	038004P885ESAC_SPAC961	44.830068°	11.360691°	Via Boschetti, Casumaro (FE)	07/07/2016	171

**Tabella 4-9 - Principali dati associati alle 2 indagini ESAC di nuova esecuzione.**

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

L'antenna sismica (*seismic array*) è una configurazione di sensori sismici distribuiti secondo geometrie variabili sull'area di indagine. Le registrazioni di rumore effettuate dai singoli sensori vengono combinate mediante una tecnica ESAC che mette in evidenza la coerenza di fase delle varie registrazioni. Se si utilizzano solo sensori verticali, la componente del segnale identificata da questo sistema di acquisizione risulta essenzialmente costituita dalla combinazione dei diversi modi di vibrazione delle onde di Rayleigh. Sebbene non esistano limitazioni alla profondità di esplorazione di questo metodo di analisi, in realtà si può assumere che la massima profondità di esplorazione, anche in condizioni ottimali, sia dell'ordine di grandezza del diametro dell'array (da D a 2D circa).

Nello specifico alcune caratteristiche strumentali e ambientali possono limitare e condizionare tale metodologia di indagine come la frequenza propria dei sensori utilizzati e la struttura di velocità del sottosuolo indagato. Infatti, in presenza di forti variazioni di impedenza sismica in corrispondenza della transizione fra i sedimenti soffici superficiali e il basamento rigido, l'energia associata alle onde superficiali tende concentrarsi nella parte più superficiale del terreno rendendo la curva di dispersione sostanzialmente insensibile alle caratteristiche del basamento.

La metodologia di indagine prevede che i sensori registrino il rumore di fondo (detto anche "microtremore") prodotto da sorgenti naturali e antropiche. Per l'acquisizione del rumore ambientale con l'Antenna Sismica sono stati utilizzati 24 geofoni da 4.5 Hz posti con una configurazione a croce con 12 ricevitori per braccio interspaziati di 5 metri. Per l'analisi ed interpretazione dei dati sismici acquisiti è stato utilizzato il codice di calcolo ESAC del software *Geopsy*.

Le informazioni relative alle caratteristiche del sottosuolo vengono ottenute a partire da una analisi di correlazione fra i segnali registrati dai diversi sensori alle diverse frequenze (funzione di coerenza). Utilizzando opportune procedure di analisi è possibile ricavare da queste misure più curve di dispersione delle onde di Rayleigh presenti nel rumore sismico ambientale.

Dato che la forma delle curve di dispersione dipende dalle variazioni delle velocità delle onde S con la profondità, risulta quindi possibile stabilire una relazione fra la forma delle curve di dispersione e la velocità delle onde S nel sottosuolo. Questa relazione è individuata da un processo di inversione delle curve di dispersione ottenute con l'obiettivo di ricostruire un profilo sismico delle onde di taglio. Tale operazione è stata svolta in maniera iterativa fino a raggiungere il *fitting* migliore fra curve sperimentali e curve calcolate. L'inversione delle curve di dispersione è stata inoltre effettuata in maniera congiunta ai rapporti spettrali H/V realizzati nella medesima area in modo da avere un maggiore controllo sul *fitting* e quindi un dato sperimentale più efficiente.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

### 4.2.2 Indagini realizzate in laboratorio

Dai due sondaggi a carotaggio continuo sono stati prelevati alcuni campioni indisturbati di terreno a profondità diverse su cui sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio geotecnico: peso di volume, umidità naturale, limiti di *Atterberg*, colonna risonante, triassiale consolidata isotropicamente - non drenata, analisi granulometrica.

In particolare dal sondaggio SC1 – realizzato a Pilastrello (FE) – sono stati prelevati n. 3 campioni, mentre dal sondaggio SC2 – realizzato a Casumaro (FE) –, sono stati prelevati n. 2 campioni.

In Tabella 4-10 sono sintetizzate le tipologie di prova eseguite su ciascun campione per cui è indicata anche la profondità di prelievo. Tutte le prove di laboratorio sono state eseguite da Elletipi S.r.l. di Ferrara (FE).

	PROF. DI PRELIEVO	DESCRIZIONE	PESO DI VOLUME	UMIDITÀ NATURALE	LIMITI DI ATTERBERG	COLONNA RISONANTE	TRIASIALE NON DRENATA	ANALISI GRANULOMETRICA
SC1 - SH1	3,4 - 4,0 m	Sabbia fine con limo argilloso grigio	X	X	X	X	X	X
SC1 - CR2	20,0 - 20,3 m	Sabbia medio fine limosa			X			X
SC1 - SH3	28,2 - 28,8 m	Limo con argilla debolmente sabbioso	X	X	X	X	X	X
SC2 - SH1	5,4 - 6,0 m	Limo con sabbia fine debolmente argilloso	X	X	X	X		X
SC2 - CR1	15,1 - 15,5 m	Limo sabbioso argilloso grigio			X	X	X	X

**Tabella 4-10 - Campioni indisturbati con indicazione delle quote di prelievo e delle prove di laboratorio eseguite.**

Nei seguenti sotto paragrafi sono riportate le descrizioni sintetiche delle prove di laboratorio di tipo più complesso tra quelle utilizzate a supporto del presente studio di microzonazione sismica.

#### 4.2.2.1 Prove di colonna risonante (CR)

Gli obiettivi delle prove di colonna risonante (RC) effettuate sono: determinare il modulo di taglio ed il rapporto di smorzamento iniziali ( $G_0$ ,  $D_0$ ), ovvero a piccoli livelli deformativi; ricavare le leggi di variazione con la deformazione tangenziale,  $\gamma$ , del modulo di taglio,  $G(\gamma)$  e del rapporto di smorzamento,  $D(\gamma)$ .

Le prove in colonna risonante sono regolamentate dallo standard ASTM D 4015.

Nel corso di prove di RC vengono misurate la frequenza di risonanza e la rotazione del provino. Dal valore della prima grandezza è possibile risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio e quindi al modulo  $G$ ; dalla misura delle rotazioni del provino si ricava la deformazione tangenziale,  $\gamma$ . Poiché la prova

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

di RC opera alle frequenze proprie di un provino cilindrico, le frequenze di prova risulteranno relativamente alte (10 ÷ 100Hz).

Durante le prove di RC viene generato un segnale elettrico sinusoidale, mediante un generatore di funzioni ed un amplificatore di potenza, che è possibile far variare in ampiezza e frequenza. Il segnale elettrico,  $V(t)$ , è trasformato in sollecitazione meccanica torsionale,  $Mt(t)$ , da un motore elettromagnetico solidale alla testa del provino mediante una piastra, *drive plate*.

La frequenza di eccitazione viene fatta variare finché il sistema non raggiunge la condizione di risonanza. Quest'ultima può essere individuata come quel valore della frequenza in corrispondenza del quale si ha: angolo di fase tra eccitazione torsionale e rotazione del sistema pari a  $\pi/2$  e massima ampiezza della risposta. In condizioni di risonanza esiste una relazione fra la velocità di propagazione delle onde di taglio,  $V_s$ , e la frequenza fondamentale,  $f_n$ , del tipo  $V_s = f(f_n, h)$  dove:  $h$  è l'altezza del provino e  $f$  una funzione che dipende dalle condizioni di vincolo del provino. Poiché al variare della frequenza varia la risposta del provino (valutata sia in termini di accelerazione che di rotazione) e poiché la frequenza fondamentale è quella in corrispondenza della quale la risposta è massima, disponendo sul provino un accelerometro, è possibile identificare la condizione di risonanza relativamente al primo modo di vibrazione. Nota la densità del provino si può risalire al modulo di taglio,  $G$ , attraverso la già citata relazione  $G = \rho V_s^2$ . Mediante l'apparecchiatura di RC è possibile determinare il rapporto di smorzamento  $D$ , agendo in due modi, o considerando il fattore di amplificazione in risonanza (*steady state method*), oppure, interrompendo l'eccitazione e misurando il decadimento delle oscillazioni libere (*amplitude decay method*). I risultati sperimentali ottenuti nel corso di prove RC vengono interpretati facendo riferimento alla teoria di propagazione delle onde di taglio in un mezzo elastico lineare per determinare il modulo di taglio  $G$ , oppure, alla teoria delle oscillazioni libere, o forzate, in un mezzo elasto-plastico per determinare il rapporto di smorzamento  $D$ .

### 4.2.2.2 Prove triassiali consolidate isotropicamente - non drenata (CIU)

La prova consiste nella determinazione dei parametri di resistenza in termini di tensioni totali ed efficaci di un campione di terreno sottoposto a condizioni di sollecitazione triassiale; la prova può inoltre essere utilizzata per la determinazione dei parametri di deformabilità non drenati.

Questa metodologia si applica tipicamente ai terreni limoso argillosi.

La prova viene eseguita su tre provini cilindrici, di diametro non inferiore a 35 mm e rapporto altezza/diametro compreso tra 2 e 2.5, preparati con apposito fustella campionatrice a partire da campioni indisturbati; per materiali poco consistenti si potrà infiggere a pressione direttamente nel campione da

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

analizzare apposita fustella calibrata. Il diametro dei provini sarà in ogni caso maggiore di 6 volte il diametro massimo delle particelle costituenti il materiale in prova.

La prova verrà viene attraverso tre distinte fasi: saturazione, consolidazione e rottura.

- *Fase di saturazione:* la saturazione preliminare viene condotta attraverso l'applicazione di back-pressure in diversi gradini di pressione di entità variabile in funzione delle caratteristiche di consistenza dei terreni in; durante tutta la fase di saturazione viene mantenuta una differenza di pressione tra pressione di cella e back-pressure compresa tra 5 e 20 kPa al fine di evitare premature consolidazioni dei provini.

Dopo ogni gradino di saturazione, una volta raggiunta la completa stabilizzazione delle pressioni, si esegue la misura del grado di saturazione raggiunto attraverso la determinazione del parametro B; la fase di saturazione si può ritenere conclusa quando il parametro B assumerà valori superiori a 0.90/0.95 in funzione del tipo di materiale.

- *Fase di consolidazione:* la fase di consolidazione viene condotta incrementando la pressione di cella fino a raggiungere il prefissato valore della pressione di consolidazione da adottare per ciascun provino. Dopo la stabilizzazione della pressione interstiziale conseguente all'incremento tensionale applicato si avvia la fase di consolidazione consentendo il drenaggio e registrando le variazioni di volume ed eventualmente le variazioni di pressione interstiziale in funzione del tempo. Dal diagramma variazione di volume - logaritmo del tempo, o in alternativa variazione di volume - radice quadrata del tempo, si determinerà il tempo di fine consolidazione  $t_{100}$  che sarà assunto come parametro base per il calcolo della velocità di rottura.
- *Fase di rottura:* durante la fase di rottura, che avviene in condizioni di drenaggio impedito si incrementa progressivamente lo sforzo deviatorico, mantenendo fissa la pressione di cella, fino ad ottenere deformazioni assiali non inferiori al 15%. Al fine di assicurare una uniforme distribuzione ed equalizzazione della sovrappressione idraulica conseguente l'incremento tensionale, la velocità di deformazione  $v_r$  viene stabilita sulla base del  $t_{100}$  di fine consolidazione e della deformazione attesa a rottura  $\epsilon_r$  secondo la seguente equazione:  $v_r = (H_c * \epsilon_r) / (1,5 - 5 * t_{100})$ .

## 5 Modello del sottosuolo

Una fase fondamentale per l'elaborazione della microzonazione sismica è stata l'individuazione del substrato sismico, caratterizzato da elevati valori di rigidità e di velocità di propagazione delle onde sismiche. Esso è definito dal valore di velocità delle onde seconde superiore agli 800 m/s.

Dato che una determinata distribuzione dell'amplificazione spettrale alle varie frequenze oscillatorie è compatibile con molte diverse combinazioni di spessori e velocità sismiche dei diversi corpi calibrati per ottenere una stima affidabile della distribuzione delle velocità del sottosuolo occorre disporre una calibrazione dell'architettura stratigrafica del sottosuolo derivante da fonti indipendenti, come sondaggi e profili sismici. Il "basamento sismico" è qui sepolto a notevoli profondità, raggiunte solo da un ridotto numero di pozzi, effettuati in passato per la ricerca di idrocarburi. A questi livelli del sottosuolo, non sono disponibili misure dirette in pozzo delle velocità sismiche, per cui si è dovuto fare ricorso a metodi indiretti, basati sullo studio dei microtremori, interpretati nel contesto geologico-stratigrafico regionale, derivato dall'interpretazione di numerose linee sismiche profonde, effettuate in gran parte dall'AGIP, e dai dati stratigrafici acquisiti durante le perforazioni profonde.

Le velocità delle onde sismiche aumenta con la profondità, non però in modo lineare, dato che esse subiscono brusche accelerazioni attraverso varie superfici di discontinuità stratigrafica, che inquadrano le unità deposizionali nel sottosuolo. Per l'individuazione delle profondità dei limiti discordanti sono stati utilizzati diversi metodi geofisici, interpretati nel contesto stratigrafico regionale del sottosuolo. I principali contrasti di impedenza, associati a tali limiti, sono stati identificati mediante misure di microtremore sismico che hanno permesso di ricostruire la variazione alle diverse frequenze vibrazionali del rapporto tra le componenti oscillatorie orizzontali e verticali (H/V o HVSR).

L'analisi di questi dati, associata alla stima delle proprietà meccaniche delle diverse unità stratigrafiche regionali, ha permesso l'individuazione della superficie che genera il principale contrasto di impedenza rilevabile con la tecnica HVSR. La superficie è associata ad un aumento della rigidità e della velocità di propagazione delle onde sismiche, individuata al tetto di successioni torbiditiche del Pliocene. Queste sabbie si sono deposte in ambienti marini profondi e hanno subito un processo di cementazione e litificazione. Esse sono limitate al tetto da una superficie netta, associata a una discordanza angolare. A questa superficie si sovrappongono sedimenti quaternari, inferiormente marini e superiormente continentali, caratterizzati da velocità di propagazione delle onde sismiche marcatamente più basse di quelle del substrato. I dati rilevati all'interno di successioni quaternarie mediante tecniche di *Down-Hole* profondo (Minarelli *et al.* 2016) in un'area vicina, nei pressi di Mirabello, mostrano come fra i 200 e i 300 m

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

di profondità le Vs siano ancora basse, con valori minori di 400 m/s, non compatibili con quelli caratteristici del substrato sismico. Tale livello di riferimento deve essere quindi generalmente individuato a profondità più elevate, e corrisponde un picco di risonanza a più bassa frequenza, correlabile con il tetto dei depositi pliocenici, che possono essere assunti come bedrock sismico dell'area di studio. Questa superficie è però stata ampiamente piegata dalla deformazione tettonica, per cui si trova oggi a profondità notevolmente variabile. Esso è relativamente prossimo alla superficie nella fascia di anticlinale, nella parte centrale del territorio comunale, mentre si trova sepolta a maggiori profondità nella fascia settentrionale e meridionale del territorio comunale. Questa superficie corrisponde sempre al tetto dei corpi di arenarie torbiditiche del Pliocene, ma è associata ad una variabile lacuna temporale. La superficie si sovrappone infatti a torbiditi di età variabile, più antica nelle aree di culminazione anticlinale, più recenti muovendosi verso le aree di sinclinale. Anche l'età della base dei successivi depositi quaternari è variabile. La combinazione di questi due fattori fa sì che la lacuna temporale associata alla discordanza che marca il tetto del substrato sismico sia più lunga nelle zone di alto strutturale e tenda a diminuire verso le adiacenti aree di sinclinale.

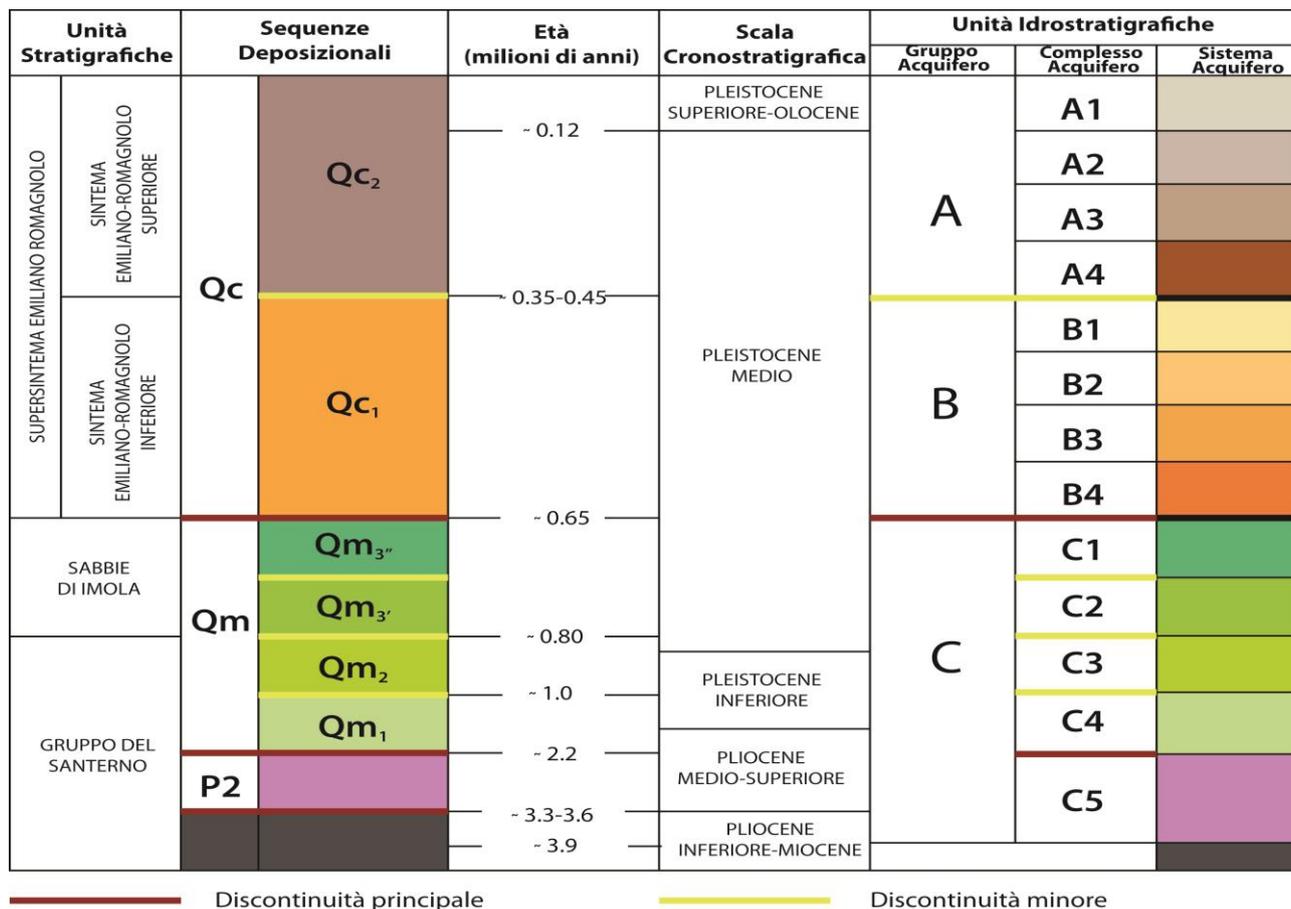


Figura 5-1 - Schema stratigrafico dei depositi plio-quaternari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche e superfici di discontinuità, sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche (da Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

## 5.1 Substrato

Ai fini della microzonazione sismica, con il termine “substrato” sono qui definite tutte le successioni sottostanti le unità stratigrafiche del Quaternario Marino (QM).

Come precedentemente accennato, il substrato è qui limitato al tetto da una superficie netta di discordanza, che marca il tetto di torbiditi plioceniche. 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 la deposizione della Formazione Marnoso-Arenacea dell’Appennino, continuata fino al Tortoniano, la zona esaminata era ancora dominata dalla sedimentazione di fanghi argillosi di ambiente marino profondo. Durante le fasi pre-evaporitiche e sin-evaporitiche del Messiniano, in buona parte dell’area considerata, si depositavano spessi corpi sabbiosi di conoide torbiditica, con alimentazione proveniente dall’area lombarda, ascritti alla Formazione di Bagnolo, secondo la terminologia ENI-AGIP (Ghielmi *et al.*, 2010).

Nell’area corrispondente alla parte più settentrionale del territorio comunale, si depositavano invece sedimenti argillosi di rampa e scarpata, progressivamente ricoperte dai sedimenti torbiditici. Nell’area bolognese si depositavano invece corpi di evaporiti gessose, in ambienti in gran parte sottomarini. Il Messiniano post-evaporitico, corrispondente alla deposizione della Formazione a Colombacci in Appennino, è stata qui inizialmente caratterizzato da un’ulteriore migrazione verso nord della sedimentazione torbidica, mentre nelle parti settentrionali del territorio analizzato si depositavano, in un intervallo limitato di tempo, fanghi di ambiente anossico, arricchiti in carbonio organico, con qualche intercalazione carbonatica. In quasi 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, sviluppati particolarmente nella parte centrale del territorio considerato.

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Appenninica. Nell'area indagata, durante il Pliocene, si è infatti sviluppato il fascio di sovrascorrimenti e anticlinali di rampa che dall'area di Mirandola prosegue verso sud-est, verso Argenta e Ravenna. Questa deformazione sinsedimentaria ha fortemente influenzato spessori e ambienti deposizionali ed indotto superfici di discordanza stratigrafica e lacuna, legate a periodi di non deposizione od erosione, sia sottomarina che subaerea (Ghielmi *et al.*, 2010). Lacune e discordanze, anche angolari, sono particolarmente diffuse nelle aree corrispondenti ad anticlinali sepolte, come quella di Dosso-Corporeno sviluppata nella parte centrale dell'area comunale indagata, o quella di Bondeno-Casaglia, a sviluppata a nord della regione indagata. Fra questi due fasci anticlinali complessi si sviluppa la sinclinale di Mirabello, lo sviluppo dell'anticlinale complessa di Dosso-Corporeno suddivide il bacino torbiditico in due parti diseguali, una meridionale più vasta, corrispondente alla sinclinale di Sala Bolognese, una settentrionale, corrispondente alla sinclinale di Mirabello. In queste aree di sinclinale continuava ad accumularsi le successioni di sabbie torbiditiche del Pliocene, che possono superare i 1.500 m di spessore.

Seguendo la terminologia AGIP, le successioni torbiditiche depostesi nelle aree di sinclinale sono in gran parte ascrivibili alle Formazioni di Porto Corsini e Porto Garibaldi. Nelle due aree di sinclinale, queste successioni non presentano discordanze stratigrafiche marcate o prolungate lacune, al contrario di quanto avviene in corrispondenza delle aree di anticlinale. Al contrario, nello stesso tempo, sul fascio anticlinale interposto alle due grandi sinclinali si sviluppavano lacune o si accumulavano lentamente successioni fangose relativamente condensate. In particolare, nell'area di alto strutturale di sollevamento corrispondente alla zona di Dosso e Corporeno si sviluppava probabilmente una lacuna particolarmente marcata, come suggerito dall'analisi dei profili sismici.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

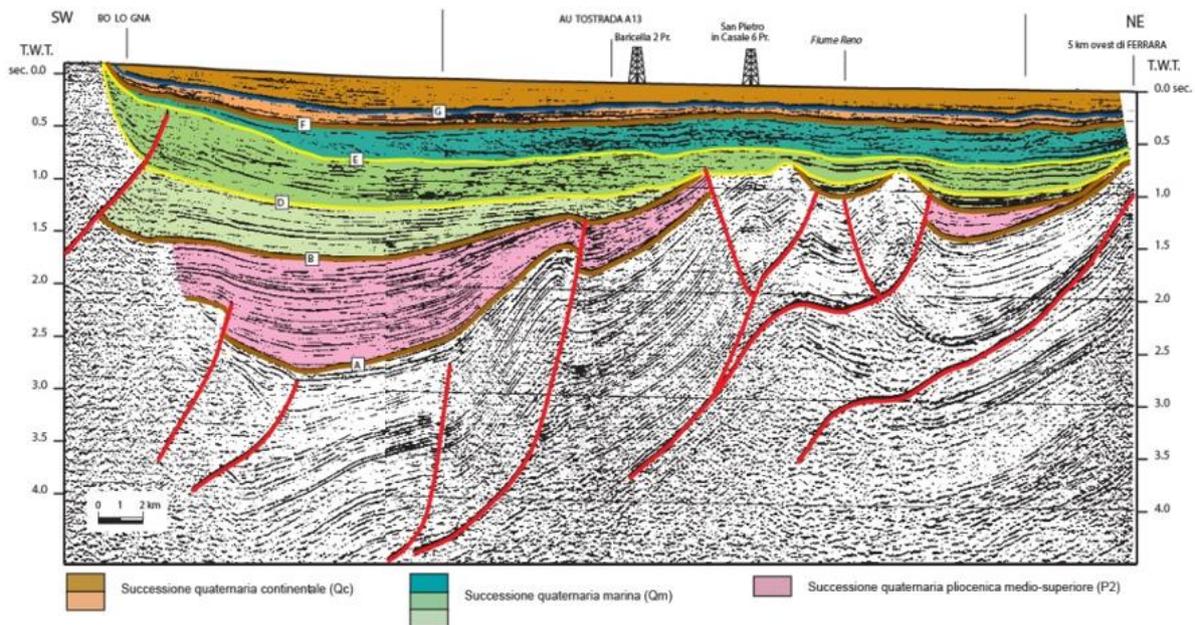


Figura 5-2 - Profilo sismico interpretato tratto da Riserve Idriche Sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

In una fase successiva, approssimativamente al limite Plio-Pleistocene, si sviluppò una discontinuità stratigrafica anche nell'area di sinclinale settentrionale, verso Mirabello. Questa discordanza fu associata ad un netto cambio litologico e di facies deposizionale, indotto dalle modifiche paleogeografiche causate da una fase di importante riorganizzazione strutturale. In questa area, la sedimentazione torbidityca della Formazione di Porto Garibaldi fu infatti bruscamente interrotta, al limite delle sequenze deposizionali PL3 e PL4 (Ghielmi *et al.*, 2010), a causa dall'innalzamento del fondo marino, in aree attualmente poste poco a est del corso del Fiume Secchia, a nord di Mirandola, che produssero una "diga sottomarina" che bloccava l'espansione delle correnti di torbida. Il rapido innalzamento tettonico di questo alto fu causato dallo sviluppo di anticlinali di rampa transpressiva sinistra. Nell'area di sinclinale settentrionale, gli spessi corpi di arenarie e arenarie-conglomeratiche sono quindi limitati superiormente da una superficie netta, a cui seguono centinaia di metri di argille poco litificate, a foraminiferi platonici, ascrivibili alla Formazione di Ravenna, di età quaternaria. Il deciso cambio litologico, di facies e di provenienza sedimentaria crea un netto contrasto di impedenza acustica associato ad un marcato aumento delle velocità sismiche, anche nella porzione settentrionale del territorio comunale indagato.

Durante la fase iniziale del Quaternario, nella parte centrale del territorio analizzato continuavano a svilupparsi una lacuna stratigrafica o si depositavano lentamente depositi marini condensati.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Nella parte meridionale dell'area indagata si passava invece bruscamente ad ambienti marini profondi, in cui continuava a depositarsi rapidamente le sabbie torbiditiche della Formazione di Carola, che lambiscono però solo marginalmente il territorio comunale, a sud del centro urbano di Cento.

Il substrato sismico nell'area di indagine è limitato a tetto da una superficie di discordanza unitaria e ben definita. Le unità sedimentarie sovrastanti la superficie sono ovunque geologicamente più recenti di quelle sottostanti. La lacuna temporale associata a questa superficie di discordanza è però assai variabile spazialmente e le unità stratigrafiche sottostanti e sovrastanti mostrano anche esse una notevole variabilità areale. Le unità torbiditiche di mare profondo sottostanti la discordanza sono di età geologica notevolmente diversa fra loro, anche se dovrebbero presentare caratteri petrofisici simili.

Nella zona di alto strutturale, nella parte centrale del territorio indagato, la lacuna cronologica è particolarmente estesa. La discordanza è netta e tronca qui in modo erosivo i depositi torbiditici di mare profondo della Formazione di Canopo ed è associata alla lacuna di una significativa parte del Pliocene. La sedimentazione ripartì poi lentamente solo nella piccola area di sinclinale mediana, ove si accumularono modesti spessori di argille marine relativamente condensate. La sedimentazione riprese diffusamente attraverso tutta la zona di alto strutturale solo durante una successiva fase del Quaternario, con la deposizione di argille di mare aperto che, come vedremo, si evolvono superiormente in depositi deltizi. Nella sinclinale corrispondente alla porzione settentrionale del territorio comunale, la superficie di discordanza si sovrappone a torbiditi plioceniche attribuibili alla Formazione di Porto Garibaldi, più recenti di quelle della Formazione del Canopi. In base ai dati sismici ricavati da profili vicini, la superficie sembra netta e corrispondere ad un evidente riflettore sismico, ma non appare associata a significative erosioni. Alla superficie si sovrappongono depositi argillosi relativamente condensati, senza lo sviluppo di una lunga lacuna cronologica.

La parte meridionale del territorio comunale, comprendente la città di Cento, corrisponde, come abbiamo visto, alla parte più settentrionale della sinclinale di Sala Bolognese. In questa parte, la superficie di discordanza corrisponde al tetto della Formazione di Porto Garibaldi, a cui seguono direttamente potenti successioni argillose marine.

Nella porzione più meridionale del territorio comunale, la superficie diventa probabilmente meno netta e, per breve estensione, vi si sovrappongono le torbiditi della Formazione di Carola, qui ridotta ad uno spessore piuttosto esiguo, a cui seguono le successioni fangose marine.

## 5.2 Terreni di copertura

Come già in precedenza accennato la successione quaternaria è formata da sedimenti assai poco litificati e consolidati, che sono attribuibili, in base alle proprietà elasto-meccaniche ed alla 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 descritte di seguito.

### 5.2.1 Quaternario Marino

Le successioni del Quaternarie inferiore sono inquadrare nell’unità stratigrafica del Quaternario Marino e sono formate da argille a foraminiferi platonici, passanti superiormente a facies di prodelta e sabbie di fronte delizio. Queste sequenze si sono deposte nella prosecuzione occidentale dell’antico Mare Adriatico, soggetta a forte subsidenza ed apporto sedimentario. Questa unità, nella pianura ferrarese e bolognese, è raggiunta solo da un limitato numero di sondaggi stratigrafici descritti in modo sufficientemente accurato, generalmente realizzati per fini di ricerca di idrocarburi.

Nell’area considerata l’unità del Quaternario Marino è in gran parte costituita da argille di mare aperto con spessori di oltre 500 m nelle zone di sinclinale e spessori assai più ridotti nella zona intermedia di alto strutturale, meno subsidente. In questa area, nella zona di sinclinale centrale, il Quaternario marino è inferiormente formato da spessori relativamente contenuti di argille marine relativamente condensate, che verso l’alto registrano un aumentano dei tassi di sedimentazione. Nel sottosuolo studiato questi sedimenti sono riferiti alla Formazione di Ravenna, da non confondersi con l’omonimo recente Subsintema. 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. Questi sedimenti argillosi erano tradizionalmente conosciuti come Calabriano, talvolta anche Piacenziano, mentre sono oggi inquadrati nelle unità litostratigrafiche affioranti della Formazione di Castell’Arquato, Argille di Riolo Terme ed Argille di Terra del Sole (Ricci Lucchi *et al.*, 1982).

Nell’area in esame 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, questi semidementi deltizi sono dominati dagli apporti del Fiume Reno, mentre nell’area qui considerata i depositi deltizi sembrano riflettere largamente un apporto da parte 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.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

La discordanza è legata alla fase di riorganizzazione strutturale datata a circa 650.000 anni (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

### **5.2.2 Quaternario prevalentemente continentale (Supersistema Emiliano-Romagnolo)**

La discordanza sopradescritta è stata scelta come limite inferiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo, formato, in questa area, da depositi fluviali continentali, intercalati inferiormente da subordinati livelli marini, costieri o salmastri, particolarmente sviluppata nelle aree di sinclinale presenti nella parte più settentrionale del territorio comunale qui analizzato. Il Supersistema Emiliano-Romagnolo registra la prosecuzione di un'evoluzione complessivamente regressiva, che porta da condizioni marine e deltizie alle attuali condizioni francamente continentali della pianura analizzata. Nell'area indagata, questo Supersistema si accumulava nella fascia di interazione fra i sedimenti di provenienza appenninica e quelli del Po.

Nel tempo geologico, il fronte dei sedimenti di provenienza appenninica è migrato verso nord, a discapito di quelli padani. Tutte i sedimenti affioranti e nelle primi metri o decine di metri di sottosuolo sono infatti interamente riferibili ai sedimenti del Fiume Reno e di altri fiumi di provenienza appenninica.

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

### **5.2.3 Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)**

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è bipartito in Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e Superiore (AES) da una superficie di discordanza, influenzata dalla deformazione tettonica delle Pieghe Ferraresi sepolte, fra 400.000 ed 350.000 anni fa circa. La discordanza corrisponde, in questa area, alla definitiva scomparsa di intervalli con chiari caratteri marini. In aree di culminazione anticlinale, la superficie di discordanza può sovrapporsi direttamente ai sedimenti del Pliocene, mentre a sud di Cento esso diventa meno marcata e si sviluppa all'interno di depositi continentali di provenienza esclusivamente appenninica. Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è organizzato in cinque cicli deposizionali trasgressivo-regressivi, che mostrano ciascuno uno spessore di circa 30-40 metri, in corrispondenza delle aree di sinclinale, spessori minori, deli circa 20-30, nella aree di alto strutturale. L'evoluzione deposizionale testimonia sia il progressivo riempimento del bacino sedimentario, sia lo spostamento verso nord degli assi depocentrali e

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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 controllato dalle grandi fluttuazioni glacio-eustatiche, che hanno influenzato sia il clima dei bacini idrografici padano-appenninici, sia il livello eustatico. Il limite inferiore dei cicli è formato da una superficie netta di disattivazione della sedimentazione fluviale grossolana singlaciale. La porzione trasgressiva basale di ciascun ciclo è caratterizzata dalla presenza di limi e sabbie continentali, seguiti da argille organiche di piana alluvionale, palude e piana costiera, che solamente nella parte inferiore del Sintema mostrano intercalazioni di sabbie litorali o fanghi salmastri. Le porzioni regressive sono invece costituite da spesse successioni di depositi fini di piana alluvionale, con subordinati corpi nastriformi isolati di sabbie di canale fluviale. Nella parte superiore dei cicli, le sabbie di canale fluviale divengono più abbondanti, fino alla formazione di corpi sabbiosi continui, lateralmente estesi in tutto il sottosuolo della pianura ferrarese. Questi grandi corpi di sabbie sono stati depositi in ambienti di media pianura alluvionale fredda, durante le fasi di stazionamento basso singlaciale del livello del mare.

Nell'ambito del Progetto di Cartografia Geologica Nazionale, i cinque cicli che compongono il Sintema sono stati suddivisi in 2 cicli inferiori definiti rispettivamente Subsintema di *Liano* (AES<sub>4</sub>) e Subsintema di *Torre Stagni* (AES<sub>5</sub>) (cfr. AES indifferenziato - Foglio 204 Portomaggiore), ed in 3 cicli superiori, inquadrati nei Subsintemi di *Bazzano* (AES<sub>6</sub>), di *Villa Verucchio* (AES<sub>7</sub>) e di *Ravenna* (AES<sub>8</sub>). Nella porzione più recente del Subsintema di Ravenna, è stata ulteriormente distinta l'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>) di età post-romana. I cicli più antichi registrano eventi trasgressivi maggiormente sviluppati verso l'entroterra rispetto a quelli più recenti. I tre Sintemi superiori (AES<sub>6</sub>, AES<sub>7</sub>, AES<sub>8</sub>), presentano tra loro forti analogie nell'organizzazione stratigrafica.

Questi cicli sono i meglio definiti a scala regionale dato il numero relativamente alto di pozzi che li attraversano, compresi diversi sondaggi a carotaggio continuo appositamente eseguiti per la cartografia geologica (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998; Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000 - es. Fogli 202-203-204). La base di ogni Subsintema, corrisponde ad una superficie erosiva incisa in sabbie fluviali singlaciali o, in aree meridionali soggette a forti apporti appenninici, ad un paleosuolo carbonatico maturo sviluppato su depositi continentali. La fase di massima ingressione della linea di costa è qui registrata dallo sviluppo di depositi palustri dulcicoli di pianura costiera, ricchi di argille organiche e torbe. La fase di stazionamento alto è invece caratterizzata da sabbie di canale fluviale intercalate a potenti successioni di fanghi di piana interalvea.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

La parte superiore dei Subsistemi AES6 e AES7 è caratterizzata da sabbie grossolane di media pianura alluvionale, che passano lateralmente a sedimenti fini di pianura fredda, diffusi soprattutto nelle porzioni meridionali.

L'organizzazione stratigrafica delle prime decine di metri di sottosuolo è particolarmente rilevante sia ai fini geotecnici sia per quelli di microzonazione sismica. La legislazione vigente impone, infatti, di valutare la velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) nei primi 30 m di sottosuolo, qui costituiti da sedimenti del Pleistocene terminale e dell'Olocene, intervalli di tempo che corrispondono a fasi dell'ultima glaciazione e all'intervallo post-glaciale. La porzione singlaciale è ascritta al Subsistema di Villa Verucchio (AES<sub>7</sub>), mentre la parte più recente è attribuita al Subsistema di Ravenna (AES<sub>8</sub>), di cui è affiorante solo l'intervallo di età post-romana, attribuito all'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>).

Il Subsistema di Ravenna (AES<sub>8</sub>) è formato prevalentemente da sedimenti fini, spesso depositi in ambienti umidi, stagni e paludi di acqua dolce. La parte inferiore è però più ricca di limi, che possono mostrare paleosuoli carbonatici maturi, assenti nella porzione superiore dell'unità. All'interno di questi corpi di piana interalvea sono presenti corpi sabbiosi nastriformi, depositi dal Reno e da altri fiumi appenninici.

La distribuzione dei sedimenti affioranti è ovviamente nota con dettaglio e accuratezza molto maggiore rispetto a quella dei corpi di sottosuolo. Nell'area indagata è interamente formata da sedimenti della porzione più recente dell'Olocene. Le parti occidentali del territorio comunale indagato sono dominate dai depositi di canali del Fiume Reno di età prevalentemente medievale, che talvolta si aprono a venagli, testimoniando lo sviluppo di sistemi diaconi di delta interno. La parte orientale del territorio considerato di età post-romana, ascritti all'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>). Questi sedimenti sono stati depositi in età moderna, a partire dal XV secolo dopo Cristo, fino all'interruzione settecentesca della dinamica deposizionale. Il territorio è dominato dalle sabbie e limi di riempimento del canale di Reno. Lateralmente, affiorano vaste plaghe di sedimenti argilloso-limosi depositi in aree di depressione interalvea e palude dulcicola, affiancati da larghe fasce di limi sabbiosi di argine naturale. Una più completa descrizione delle parti affioranti dell'Unità di Modena è fornita nel paragrafo 8.2.2, che analizza in dettaglio la carta geologica appositamente rilevata per la realizzazione di questo studio.

## 6 Interpretazioni e incertezze

In questo capitolo vengono esaminate le principali scelte effettuate a scopo interpretativo, partendo dall'esposizione del percorso logico seguito per delineare la struttura dello studio, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando anche di valutarne le inevitabili incertezze e le eventuali criticità.

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

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

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

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

Al fine di ridurre gli effetti appena descritti e limitare le incertezze indotte alle misure, sono stati utilizzati alcuni accorgimenti durante le registrazioni dei microtremori, eseguite a supporto del presente studio di microzonazione sismica.

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

Considerando le incertezze e le problematiche esposte, è stato necessario realizzare ben 67 registrazioni prima di ottenere i risultati delle 56 indagini di sismica passiva a stazione singola proposte a supporto dello studio di microzonazione. In fase di elaborazione dei dati, infatti, si è potuta talvolta accertare la presenza di disturbi a varie frequenze, di chiara origine antropica, che hanno portato a scartare alcune delle misure realizzate. In ogni caso le misure inserite nella banca dati a supporto del presente studio risultano ben distribuite arealmente, anche se con inevitabili concentrazioni di dati pregressi nelle aree più densamente

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

popolate, e senza dubbio sufficienti a caratterizzare tutti gli ambiti di studio, come si può evincere dalla Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (Tavole 3a e 3b).

La serie di microtremori realizzati a supporto dello studio di microzonazione (paragrafo 4.2.1.6) ha fornito dati con distribuzione areale e caratteristiche strumentali omogenee che, correlati con i dati geognostici disponibili, hanno permesso di stimare la profondità del substrato geologico assimilato al bedrock (paragrafo 5.1).

La maggior parte delle acquisizioni hanno avuto durata di 20-30 minuti e sono state analizzate con finestre di 20 secondi. Le ultime 10 misure realizzate (di cui 4 esterne al territorio comunale e dunque non inserite in banca dati) sono state finalizzate all'individuazione del bedrock sismico dell'area attraverso la correlazione dei risultati con i dati stratigrafici profondi disponibili. Tali misure, che hanno avuto una durata di 40 minuti e sono state analizzate con finestre di 40 secondi, che hanno permesso di "validare" i picchi a più bassa frequenza (compresi tra 0,3 e 0,5 Hz) individuati da alcune delle misure eseguite in quanto, per soddisfare i criteri "Sesame" (AA.VV., 2004), dovrebbe essere rispettata la condizione per cui  $f_0 > 10 / L_w$  (lunghezza finestra). Bisogna inoltre ricordare che i picchi di H/V a frequenze inferiori a 0,5 Hz possono essere influenzati dalle condizioni meteorologiche che li rendono in generale più o meno visibili (con ampiezza più o meno pronunciata) se le misure sono realizzate in tempi diversi (Albarello e Castellaro, 2011). Le numerose misure di rumore ambientale eseguite per gli approfondimenti di microzonazione e distribuite su tutto il territorio comunale, hanno permesso la redazione di una carta di dettaglio delle frequenze naturali dei terreni (Tavole 3a e 3b, paragrafo 8.3), in cui sono rappresentate anche le indagini pregresse, che risultano però inevitabilmente affette da disomogeneità e minor affidabilità dovute a metodi e strumenti di acquisizione diversi. Nell'area comunale, tenendo conto delle sole misure eseguite per il studio di microzonazione, le frequenze naturali dei terreni variano tra 0,34 e 0,98 Hz, con ampiezza dei picchi compresa tra 2 e 4.

## 6.2 Substrato rigido

Confrontando e correlando i dati geofisici con le sezioni stratigrafiche disponibili (v. Allegato 1) è stato possibile associare i contrasti di impedenza alle discontinuità stratigrafiche che separano le principali unità riconosciute a scala regionale. Per convalidare tale modellazione sono stati correlati i dati di alcuni pozzi per idrocarburi, presenti anche in aree limitrofe a quella del Comune di Cento, con alcune misure appositamente realizzate, ma non inserite in banca dati in quanto ricadenti al di fuori del territorio comunale.

Al fine di sintetizzare i principali risultati derivati dalle citate correlazioni vengono di seguito proposte due figure che evidenziano gli elementi utilizzati a supporto delle modellazioni. In Figura 6-1 è rappresentata

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

una mappa centrata sull'area comunale di Cento in cui sono riportati i principali elementi presenti in sezione in Figura 6-2.

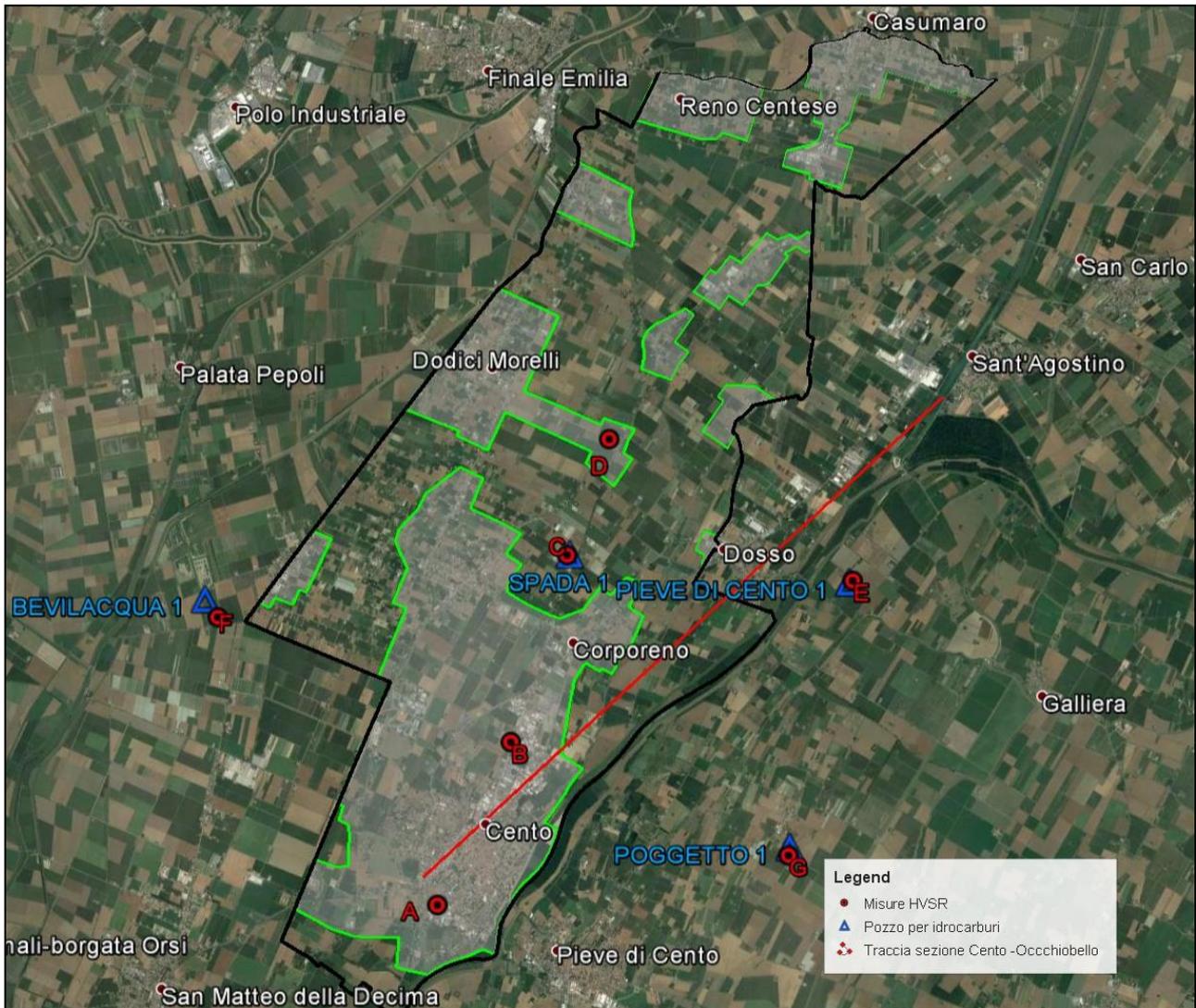


Figura 6-1 - Mappa centrata sull'area comunale di Cento in cui sono riportati i principali elementi presenti in Figura 6-2 la linea rossa rappresenta la porzione sud-ovest della sezione geologica Cento-Occhiobello (Martelli e Romani, 2013; Paolucci *et al.*, 2015); in blu sono rappresentati i pozzi per idrocarburi il cui log stratigrafico consente l'individuazione della base del Quaternario; in rosso sono localizzate le misure HVSAR utilizzate per le correlazioni con la stratigrafia profonda; in verde sono perimetrali gli ambiti di studio (urbanizzato e urbanizzabile), in nero il confine comunale di Cento.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

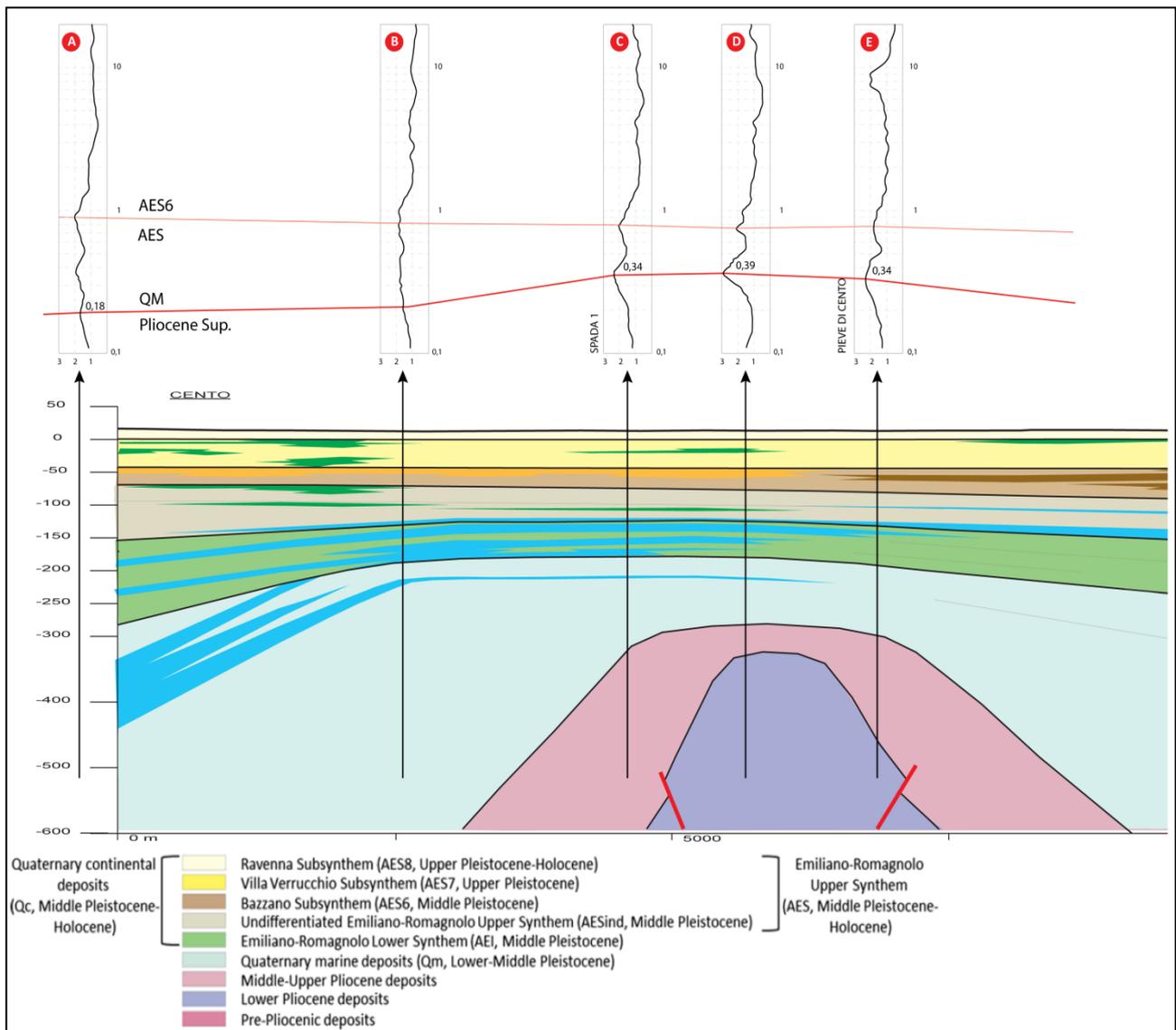


Figura 6-2 - Porzione sud-ovest della sezione geologica Cento-Occhiobello (Martelli e Romani, 2013; Paolucci *et al.*, 2015), riportata in nell'Allegato 1 (sezione G-G'), la cui traccia è riportata in carta in Figura 6-1. Sulla sezione sono proiettate le misure HVSR di cui sono riportate le tracce. I picchi di H/V sono stati correlati tra loro e con le superfici stratigrafiche che originano i più marcati contrasti di impedenza. La misura E non è presente nella banca dati in quanto eseguita all'esterno del territorio comunale. Per le restanti misure la corrispondenza coi codici della banca dati è la seguente: A: 038004P892HVS968; B: 038004P891HVS967; C: 038004P890HVS966; D: 038004P889HVS965.

In analogia con quanto riscontrato in altri recenti studi di microzonazione sismica della pianura emiliana (comuni di Mirabello e Sala Bolognese), e come visibile in Figura 6-2, è stato possibile correlare il picco a più alta frequenza, che spesso rappresenta anche quello a maggiore ampiezza, con la base del complesso acquifero A2 (v. Allegato 1) che corrisponde alla base del Subsintema di Bazzano (AES<sub>6</sub>) (Figura 5-1), datata 230.000-250.000 anni (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

L'andamento e la posizione stratigrafica di tale superficie, evidenziati nelle sezioni realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1), sono stati ricostruiti mediante correlazioni su scala regionale di sondaggi stratigrafici profondi. Secondo i sondaggi e le sezioni geologiche disponibili, la profondità della suddetta superficie varia tra gli 80 e i 90 m circa e determina il contrasto di impedenza individuato, in tutto il territorio comunale, attraverso le misure di microtremore che registrano un primo picco a frequenza variabile tra 0,98 e 0,75 Hz. Tali valori risultano confermati dalla relazione che lega le frequenze fondamentali dei terreni, desunte da analisi di sismica passiva, con le velocità delle onde di taglio disponibili e la profondità di un dato contrasto di impedenza.

Come visto nel capitolo 5, la base del Subsistema di Bazzano non può, però, essere considerata come *bedrock sismico*. Valori di velocità delle onde di taglio acquisiti in pozzo mediante tecniche cross-hole e down-hole (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016; Minarelli *et al.*, 2016), dimostrano, infatti, come le unità stratigrafiche della successione del Quaternario superiore siano caratterizzate, in aree di bassa pianura alluvionale, da valori di Vs in media inferiori ai 400 m/s, e quindi non compatibili con quelli caratteristici del "*bedrock sismico*" di riferimento per analisi di risposta sismica locale. Tale livello di riferimento deve, quindi, essere ricercato a profondità più elevate, associato a frequenze di picco più basse. Diverse misure di microtremore eseguite nel Comune di Cento, mostrano anche un secondo picco, in genere meno marcato, a frequenze molto inferiori (variabili tra 0,15 e 0,40 Hz).

Tale picco risulta quasi sempre ben visibile dalle misure di durata pari a 40 minuti realizzate proprio a questo scopo e riportate in Figura 6-1 e Figura 6-2. In base ai dati stratigrafici disponibili ed ai valori di Vs profondi per analoghe unità stratigrafiche della pianura emiliana (Minarelli *et al.*, 2016), si può ragionevolmente supporre che il picco a più bassa frequenza possa corrispondere al passaggio tra i depositi quaternari e quelli pliocenici, dove questi ultimi rappresenterebbero il *bedrock sismico* per l'area (paragrafo 5.1). Come visibile in Figura 6-2, questa superficie è stata ampiamente deformata dalla tettonica attiva, ragion per cui essa si rinviene a profondità notevolmente variabile.

Nella porzione centrale del territorio comunale, interessata dalla presenza della struttura anticlinale sepolta, tale superficie risulta più prossima alla superficie (cfr. misure C, D, E con frequenze comprese tra 0,35 e 0,39 Hz). Nelle fasce meridionali e settentrionali del territorio comunale essa, invece, si trova sepolta a maggiori profondità (misure A e B con frequenze di circa 0,2 Hz).

Al fine di determinare più accuratamente possibile la profondità del *bedrock* nelle diverse porzioni del territorio comunale, è stato considerato che:

1. la sezione Cento-Occhiobello è orientata quasi ortogonalmente all'asse delle principali strutture tettoniche, compresa quindi l'anticlinale di Mirandola, che mostra il suo culmine circa a 20 km più a

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

nord-ovest dell'area di studio e che progressivamente si approfondisce in direzione sud-est con andamento periclinale. Nella zona di culminazione di San Giacomo Roncole il passaggio tra i depositi quaternari e quelli pliocenici si ritrova a profondità inferiore ai 100 m;

2. spostandosi verso nord-est lungo la sezione Cento-Occhiobello (Figura 6-2), questa si allontana progressivamente dal territorio comunale per cui la misura D risulta distante quasi 3 km dalla sezione lungo cui è proiettata (Figura 6-1). Ne consegue che le profondità delle diverse unità stratigrafiche identificate in sezione non risultano del tutto esaustive per caratterizzare la porzione più settentrionale del territorio comunale.

Sulla base di queste considerazioni, si può assumere che in corrispondenza della misura D (Figura 6-2), il passaggio tra i depositi quaternari e quelli pliocenici sia di almeno una ventina di metri più superficiale rispetto a quanto indicato in sezione. Se il pozzo Spada (038004P895PI985) indica tale superficie a profondità di poco inferiori ai 350 m mentre il pozzo Pieve di Cento (<http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/vidempi/pozzi/dettaglio.asp?cod=4416>) a profondità di circa 300 m, è ragionevole ritenere che in corrispondenza della misura D (Figura 6-2), il passaggio tra i depositi quaternari e quelli pliocenici sia a profondità di circa 270 m dalla superficie topografica.

Su queste basi, e come è possibile verificare comparando la sezione di Figura 6-2 con la mappa di Figura 6-1, solo una porzione relativamente ridotta del territorio comunale, identificabile nelle aree delle frazioni di Dodici Morelli, Pilastrello e Molino Albergati può essere caratterizzata dalla presenza di bedrock sismico a profondità inferiore a 300 m. Nelle restanti porzioni del territorio comunale, spostandosi in direzione nord-est e a sud-ovest, tale superficie si approfondisce rapidamente arrivando a superare i 600 m di profondità (Figura 6-2).

### 6.3 Terreni suscettibili di liquefazione

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

La manifestazione di effetti di sito legati a fenomeni di liquefazione è stata ampiamente documentata in occasione del sisma del 2012, in particolare nella frazione di Dodici Morelli, mentre la presenza di condizioni predisponenti a tali fenomeni è stata accertata per ampie aree costituenti gli ambiti urbanizzati ed urbanizzabili.

Gli studi realizzati durante la fase di emergenza dalla Regione Emilia-Romagna hanno consentito di mappare chiaramente limiti ed estensione delle aree con presenza di terreni aventi caratteristiche predisponenti la liquefazione, che interessano un'ampia porzione del territorio comunale (Martelli e

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Romani, 2013). Queste ultime sono state indicate come Zone di Attenzione per Liquefazione nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavole 4a e 4b, paragrafo 8.4).

L'elevato numero di indagini penetrometriche con piezocono (CPTU) realizzate a supporto dello studio ha consentito, inoltre, di meglio discriminare spessore e geometrie dei principali corpi liquefacibili negli ambiti privi di dati pregressi o con dati di scarsa affidabilità.

L'elevato numero di indagini di tipo CPTU archiviate nella banca dati, sia pregresse che di nuova esecuzione, ha infine permesso la realizzazione di diverse decine di analisi puntuali del rischio liquefazione, effettuate mediante metodi semplificati (cfr. paragrafo 7.2.1). L'interpretazione dei risultati ottenuti rispetto al contesto geologico locale, ha portato alla definizione dei limiti delle Zone di Suscettibilità per Liquefazioni, ed alla loro suddivisione in base al diverso grado di rischio (paragrafo 8.6).

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

Per tali ragioni la valutazione sito specifica del rischio di liquefazione è comunque sempre delegata ad ulteriori indagini 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 quella di giungere ad una suddivisione del territorio esaminato in zone a diversa pericolosità sismica, in base alla loro suscettibilità ad effetti locali cosismici. Le zone sono classificate come **stabili**, nel caso in cui non si ipotizzino effetti locali di alcuna natura e come **suscettibili di amplificazioni locali** qualora siano attese esclusivamente amplificazioni del moto sismico dovute all'assetto litostratigrafico e morfologico. Qualora siano invece possibili, oltre ai fenomeni di amplificazione, effetti di deformazione permanente del territorio, le zone sono identificate come **suscettibili di instabilità** e per esse sono richiesti approfondimenti di terzo livello.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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

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

La ricostruzione dei primi 30 m di sottosuolo è stata dunque basata sia sulla tradizionale interpretazione delle facies sedimentarie e delle geometrie deposizionali, sia sulle informazioni estratte dalle sezioni geologiche semplificate prodotte per la Regione Emilia-Romagna in occasione del sisma 2012 (Allegato 1 – sezioni A-A', B-B', C-C', E-E', H-H').

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

L'evoluzione e la conformazione geologica del territorio, oltre alle osservazioni sugli effetti di sito compiute nelle aree colpite dagli eventi sismici del 2012, consentono di escludere la presenza di zone stabili, e di attribuire a quelle instabili problematiche sostanzialmente connesse ad amplificazione sismica e liquefazione dei terreni. Nelle aree definite come instabili sono, pertanto, state eseguite stime puntuali del potenziale di liquefazione mediante metodologie semplificate proposte dalla letteratura internazionale, applicate e verificate in contesti deposizionali analoghi in seguito agli eventi sismici del 2012.

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

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

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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

### 7.1.1 Risposta sismica locale con modellazioni numeriche

Sulla base dei dati stratigrafici, geofisici e geotecnici disponibili e considerando l'andamento del *bedrock sismico* nell'area di studio (paragrafo 6.2), sono state eseguite modellazioni numeriche di risposta sismica locale su 3 siti "tipo" all'interno dell'area comunale, per i quali si dispone di dati accurati per la definizione del modello sismo-stratigrafico in profondità (Tabella 7-1). Le modellazioni sono state denominate:

- RSL1 (Tabella 7-2), valida per la zona di "alto" stratigrafico (anticlinale) che interessa la porzione centrale del comune;
- RSL2 (Tabella 7-3), per la zona di "basso" stratigrafico (sinclinale) che interessa un'ampia porzione del comune a nord e a sud della zona di "alto";
- RSL3 (Tabella 7-4), per la zona di "basso" stratigrafico (sinclinale) che interessa la porzione più settentrionale del comune (Figura 7-1).

Le ultime due modellazioni, si differenziano essenzialmente per la stratigrafia dei primi 40 m al di sotto del piano campagna, che, nella zona nord del comune (RSL3 - Tabella 7-4), è caratterizzata da una maggiore presenza di depositi sabbiosi (MOPS 2001 e 2002) rispetto alle restanti aree di sinclinale (RSL2 - Tabella 7-4).

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

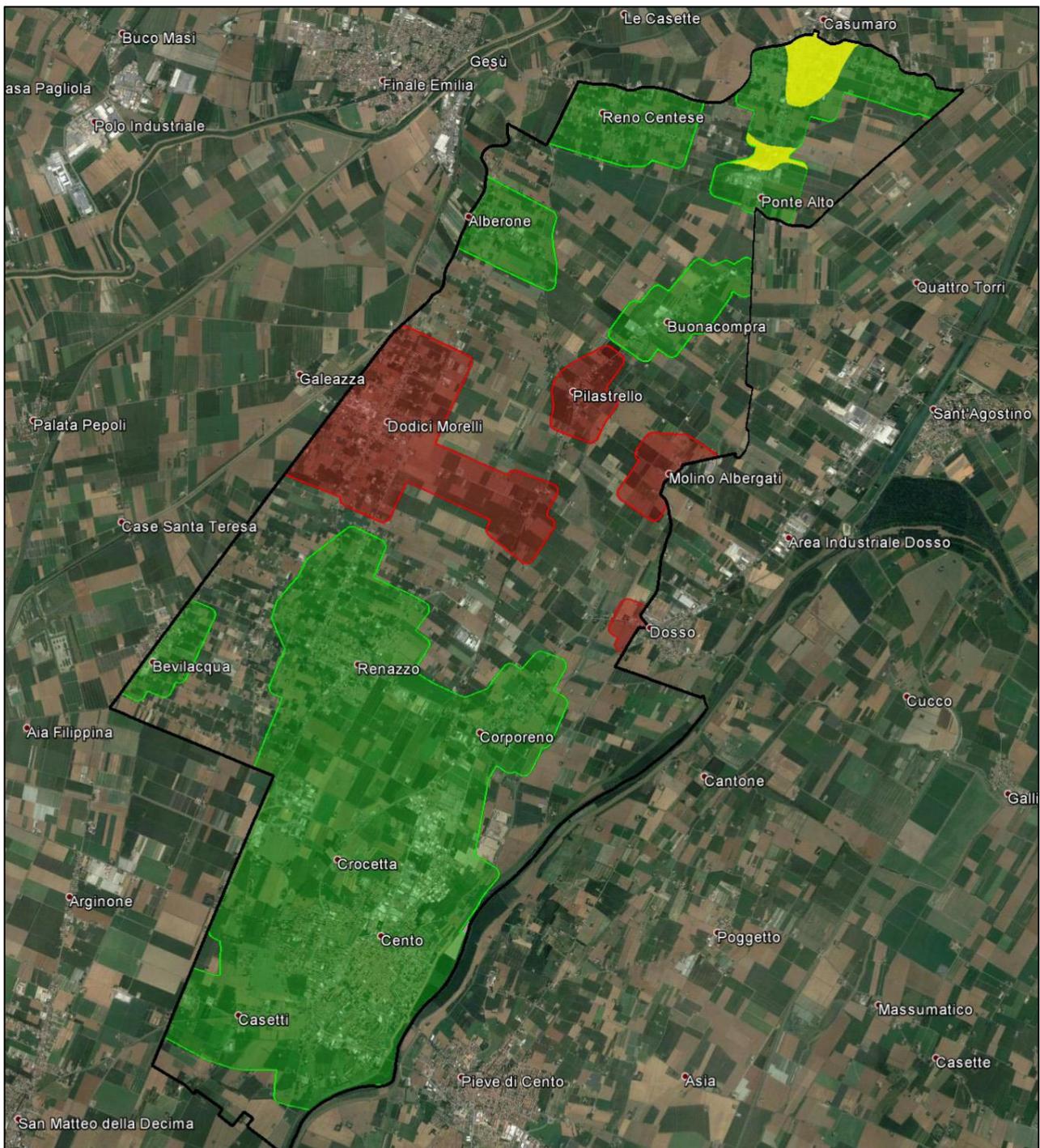


Figura 7-1 - Aree del comune di Cento oggetto della microzonazione sismica a cui sono associate le tre diverse modellazioni di risposta sismica locale: RSL1 in rosso, RSL2 in verde e RSL3 in giallo.

I modelli ricostruiti per il presente studio si basano sui risultati di indagini geognostiche e geofisiche in situ ed in laboratorio eseguite per la caratterizzazione dei terreni di copertura costituenti le prime decine di

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

metri di sottosuolo. Le unità stratigrafiche più profonde sono state invece descritte utilizzando dati di letteratura e correlazioni a scala regionale attraverso il confronto con sezioni e dati di pozzo.

I modelli sismo-stratigrafici e geotecnici sono stati definiti associando alle varie unità individuate: (i) i valori di velocità delle onde di taglio Vs ottenuti mediante misure dirette (coni sismici e ESAC) o da letteratura (Minarelli *et al.*, 2016); (ii) le curve di decadimento del modulo di taglio ( $G/G_0 - \gamma$ ) e di incremento del fattore di smorzamento ( $D - \gamma$ ) ottenute da indagini in sito con dilatometro sismico (Amoroso *et al.*, 2014) e da prove dinamiche di laboratorio su campioni indisturbati, eseguite a supporto del presente studio (Allegato 2) o di letteratura (per i livelli a maggiore profondità) ; (iii) i valori del peso per unità di volume stimati dalle prove in sito e di laboratorio disponibili.

In Tabella 7-1 sono indicate, per ciascuna delle tre modellazioni di risposta sismica locale (RSL1, RSL2 e RSL3), le indagini utilizzate per la ricostruzione del modello sismo-stratigrafico di riferimento.

	RSL1	RSL2	RSL 3
<b>Descrizione</b>	ALTO STRATIGRAFICO - ANTICLINALE (MOPS 2003, 2004, 2005)	BASSO STRATIGRAFICO - SINCLINALE (MOPS 2003, 2004, 2005)	BASSO STRATIGRAFICO - SINCLINALE (MOPS 2001, 2002)
<b>Stratigrafia superficiale</b>	038004P893S969 (fino a 30 metri)	038004P863CPTU930 (fino a 38 metri)	038004P75CPTU875 (fino a 30 metri)
<b>Stratigrafia in profondità</b>	038004P837S869 (fino a 92 metri)		
<b>Bedrock sismico</b>	Sezione Cento-Occhiobello 038004P889HVS965 Correlazione con Pozzo Pieve di Cento 1 (Figura 6-1)	Sezione Cento-Occhiobello 038004P892HVS968 Correlazione con Pozzo Poggetto 1 (Figura 6-1)	
<b>VS superficiale</b>	038004P886ESAC_SPAC962	038004P863SCPT931 (fino a 37 metri)	038004P75SCPT76 (fino a 32 metri)
<b>VS in profondità</b>	038004P886ESAC_SPAC962 (fino a 80 metri) Correlazione con DH Mirabello	038004P885ESAC_SPAC961 (fino a 72 metri) Correlazione con DH Mirabello	

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

La correlazione tra dati stratigrafici, sezioni geologiche (cfr. Allegato 1), profili sismici (Figura 5-2), e le curve H/V ottenute da tramite misure di microtremore realizzate per il presente studio (paragrafo 6.1), hanno permesso di individuare i maggiori contrasti di impedenza e stimare la profondità e la natura della bedrock sismico (paragrafi 5.1 e 6.2). Sulla base di tali analisi il bedrock, posto in corrispondenza della base dei depositi del Quaternario Marino (QM), è stato assunto ad una profondità pari a 275 m per la modellazione relativa alle zone di anticlinale (RSL1, Tabella 7-2) e di 700 m per quella relativa alle zone di sinclinale (RSL2 e RSL3).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

La stima delle velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) dei terreni di copertura compresi tra il bedrock ed i primi 70-80 m di sottosuolo è stata ricavata estrapolando i valori di  $V_s$  acquisiti, mediante down-hole profondo, durante lo studio di microzonazione di terzo livello del Comune di Mirabello (Minarelli *et al.*, 2016). L'estrapolazione dei dati di Mirabello all'area in esame è stata possibile considerando che entrambi i territori si inquadrano nel medesimo contesto geologico-strutturale che determina la presenza delle stesse unità stratigrafiche appartenenti al Supersistema Emiliano-Romagnolo. Nell'estrapolare ed associare le velocità alle unità stratigrafiche, sono stati considerati opportune correzioni nei valori di  $V_s$  legati al diverso spessore, seppellimento e conseguente carico litostatico a cui sono sottoposte le stesse unità stratigrafiche nelle diverse aree di Cento rispetto a quelle di Mirabello. Queste stime sono state effettuate verificando l'accordo con i principali contrasti di impedenza identificati dai picchi di H/V.

Per la velocità sismica del bedrock è stato infine assunto un valore sufficientemente elevato per poter riprodurre l'ampiezza del picco a più bassa frequenza osservato dalle misure di HVSR (paragrafo 6.1).

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

Tetto	Spessore	Campione/curve di decadimento - Unità geologica	$V_s$ (m/s)
0.00	4.00	Alberone di Cento (3-3.6) - AL	115.00
4.00	5.00	Buonacompra SDMT2 (4.6-13.5) - A	130.00
9.00	4.00	Buonacompra SDMT2 (4.6-13.5) - A	175.00
13.00	2.30	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	225.00
15.30	4.30	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	227.00
19.60	11.60	Pilastrello S1SH3 (28,2-28,8) AL	240.00
31.20	7.70	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	280.00
38.90	6.00	Mirabello M1 C4 - AL + T - UNIFI	260.00
44.90	9.00	Mirabello SDMT - Sf + L	323.00
53.90	4.10	Mirabello M1 C4 - AL + T - UNIFI	300.00
58.00	7.00	Mirabello SDMT - Sf + L	320.00
65.00	6.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	325.00
71.00	6.00	Mirabello SDMT - Sf + L	330.00
77.00	4.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	399.00
81.00	4.00	Mirabello SDMT - Sf + L	355.00
85.00	7.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	357.00
92.00	8.00	Mirabello SDMT - Sf + L	360.00
100.00	27.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	400.00
127.00	11.00	Mirabello SDMT - Sf + L	410.00
138.00	19.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	395.00
157.00	21.00	Mirabello SDMT - Sf + L	450.00
178.00	16.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	410.00
194.00	21.00	Mirabello SDMT - Sf + L	453.00
215.00	33.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	419.00
248.00	17.00	Mirabello SDMT - Sf + L	446.00
265.00	10.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	504.00
275.00	Half-Space	Bedrock	1200.00

Tabella 7-2 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL1 - Zona di anticlinale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Tetto	Spessore	Campione/curve di decadimento - Unità geologica	Vs (m/s)
0.00	2.60	Buonacompra SDMT2 (3-4.4) - S	130.00
2.60	5.10	Buonacompra SDMT2 (4.6-13.5) - A	145.00
7.70	3.50	Alberone di Cento (9-9.6) - L + A	140.00
11.20	4.60	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	185.00
15.80	8.70	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	230.00
24.50	1.50	Pilastrello S1SH3 (28,2-28,8) AL	190.00
26.00	12.90	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	250.00
38.90	6.00	Mirabello M1 C4 - AL + T - UNIFI	260.00
44.90	9.00	Mirabello SDMT - Sf + L	323.00
53.90	4.10	Mirabello M1 C4 - AL + T - UNIFI	300.00
58.00	7.00	Mirabello SDMT - Sf + L	320.00
65.00	6.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	325.00
71.00	6.00	Mirabello SDMT - Sf + L	330.00
77.00	4.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	399.00
81.00	4.00	Mirabello SDMT - Sf + L	355.00
85.00	7.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	357.00
92.00	8.00	Mirabello SDMT - Sf + L	360.00
100.00	27.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	400.00
127.00	11.00	Mirabello SDMT - Sf + L	410.00
138.00	19.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	395.00
157.00	21.00	Mirabello SDMT - Sf + L	450.00
178.00	16.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	410.00
194.00	21.00	Mirabello SDMT - Sf + L	453.00
215.00	33.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	419.00
248.00	17.00	Mirabello SDMT - Sf + L	446.00
265.00	27.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	504.00
292.00	11.00	Mirabello SDMT - Sf + L	514.00
303.00	7.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	518.00
310.00	17.00	Mirabello SDMT - Sf + L	527.00
327.00	23.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	534.00
350.00	14.00	Mirabello SDMT - Sf + L	544.00
364.00	11.00	Mirabello SDMT - Sf + L	550.00
375.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	562.00
400.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	573.00
425.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	583.00
450.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	593.00
475.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	603.00
500.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	612.00
525.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	621.00
550.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	630.00
575.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	639.00
600.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	647.00
625.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	655.00
650.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	663.00
675.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	671.00
700.00	Half-Space	Bedrock	1800.00

Tabella 7-3 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL2- Zona di sinclinale (MOPS 2001 e 2002).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Tetto	Spessore	Campione/curve di decadimento - Unità geologica	Vs (m/s)
0.00	4.00	Alberone di Cento (3-3.6) - AL	130.00
4.00	5.00	Buonacompra SDMT2 (4.6-13.5) - A	132.00
9.00	4.00	Buonacompra SDMT2 (4.6-13.5) - A	175.00
13.00	2.30	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	225.00
15.30	4.30	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	227.00
19.60	11.60	Pilastrello S1SH3 (28,2-28,8) AL	240.00
31.20	7.70	Alberone di Cento (15-15.5) - SL	280.00
38.90	6.00	Mirabello M1 C4 - AL + T - UNIFI	260.00
44.90	9.00	Mirabello SDMT - Sf + L	323.00
53.90	4.10	Mirabello M1 C4 - AL + T - UNIFI	300.00
58.00	7.00	Mirabello SDMT - Sf + L	320.00
65.00	6.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	325.00
71.00	6.00	Mirabello SDMT - Sf + L	330.00
77.00	4.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	399.00
81.00	4.00	Mirabello SDMT - Sf + L	355.00
85.00	7.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	357.00
92.00	8.00	Mirabello SDMT - Sf + L	360.00
100.00	27.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	400.00
127.00	11.00	Mirabello SDMT - Sf + L	410.00
138.00	19.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	395.00
157.00	21.00	Mirabello SDMT - Sf + L	450.00
178.00	16.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	410.00
194.00	21.00	Mirabello SDMT - Sf + L	453.00
215.00	33.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	419.00
248.00	17.00	Mirabello SDMT - Sf + L	446.00
265.00	27.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	504.00
292.00	11.00	Mirabello SDMT - Sf + L	514.00
303.00	7.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	518.00
310.00	17.00	Mirabello SDMT - Sf + L	527.00
327.00	23.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	534.00
350.00	14.00	Mirabello SDMT - Sf + L	544.00
364.00	11.00	Mirabello SDMT - Sf + L	550.00
375.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	562.00
400.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	573.00
425.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	583.00
450.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	593.00
475.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	603.00
500.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	612.00
525.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	621.00
550.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	630.00
575.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	639.00
600.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	647.00
625.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	655.00
650.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	663.00
675.00	25.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	671.00
700.00	Half-Space	Bedrock	1800.00

Tabella 7-4 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL3- Zona di sinclinale (MOPS 2003, 2004 e 2005).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Definiti i modelli sismo-stratigrafici (Tabella 7-2, Tabella 7-3, Tabella 7-4), sono state eseguite alcune simulazioni numeriche di analisi di risposta sismica locale variando i profili stratigrafici dei primi 30 m di sottosuolo, sulla base delle caratteristiche delle diverse MOPS individuate nello studio. Le simulazioni, realizzate mediante il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013), hanno mostrato una sostanziale omogeneità all'interno delle 3 macro-aree considerate (Figura 7-1). Ciò ha permesso di confermare la validità dei 3 singoli modelli di risposta sismica locale, che possono essere considerati rappresentativi delle 3 macro-aree individuate.

Come accelerogrammi di input (bedrock) per il calcolo della risposta sismica locale, sono stati utilizzati i tre segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193/2015 (Figura 7-2). I segnali sono stati scalati in modo da far corrispondere la loro accelerazione massima con il valore di  $a_{\text{ref}}$  derivante dai punti della griglia della mappa di pericolosità sismica elaborata da INGV per il territorio nazionale. Tale valore può essere assunto pari a 0,153 g, in considerazione di un valore medio tra quelli dei due punti ricadenti nel territorio del Comune di Cento e di quelli che ricadono nel suo immediato intorno.

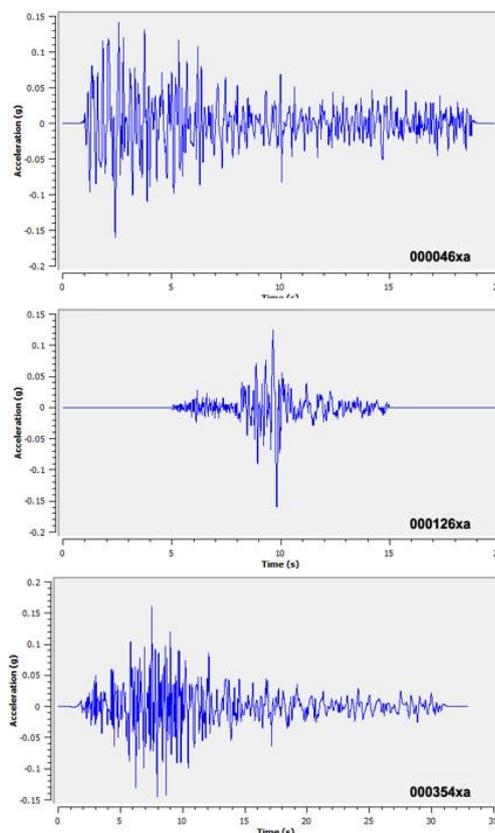


Figura 7-2 - Plot eseguito con il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013) dei segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193 del 2015, scalati per una  $a_{\text{ref}}$  pari a 0,153 e utilizzati come input per le simulazioni numeriche della risposta sismica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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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

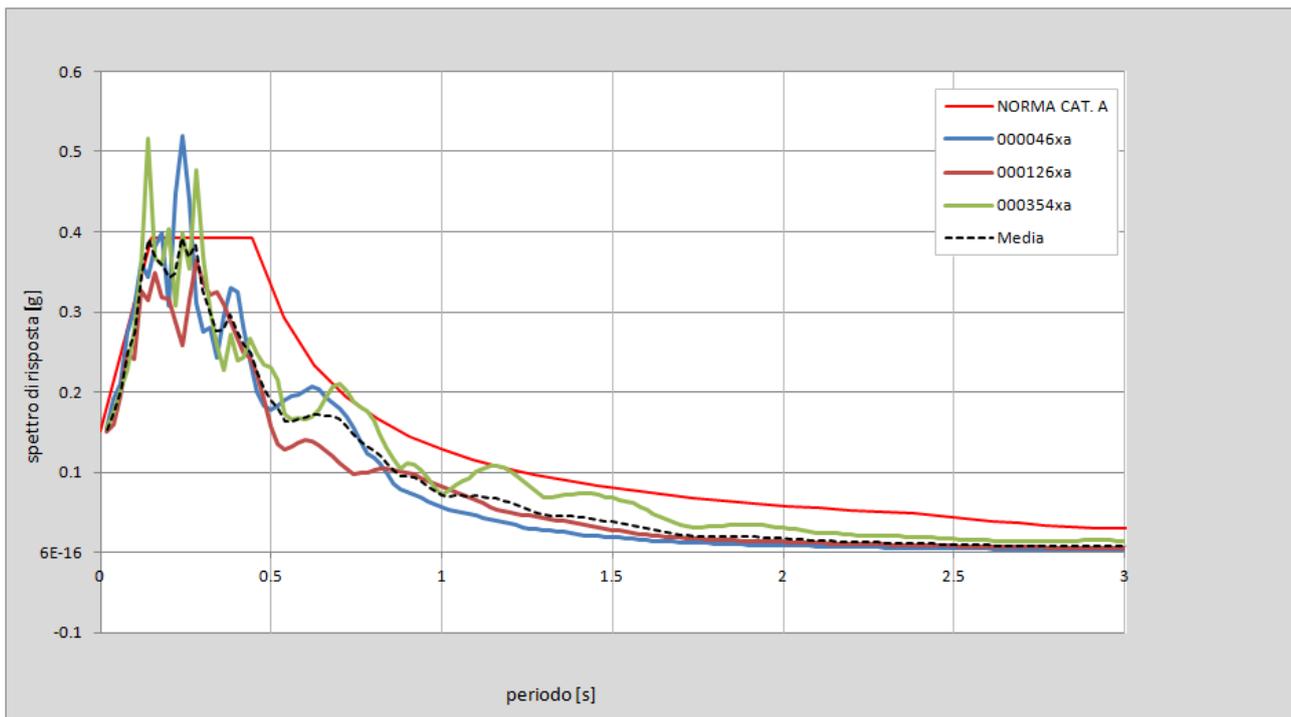


Figura 7-3 - Spettri di risposta al bedrock per i tre accelerogrammi ed il loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria A secondo le NTC2008.

### RSL1

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 compresa tra 0,35 e 0,4 Hz e una seconda a circa 0,9 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale, e a diverse altre frequenze, alcune delle quali sono armoniche superiori. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

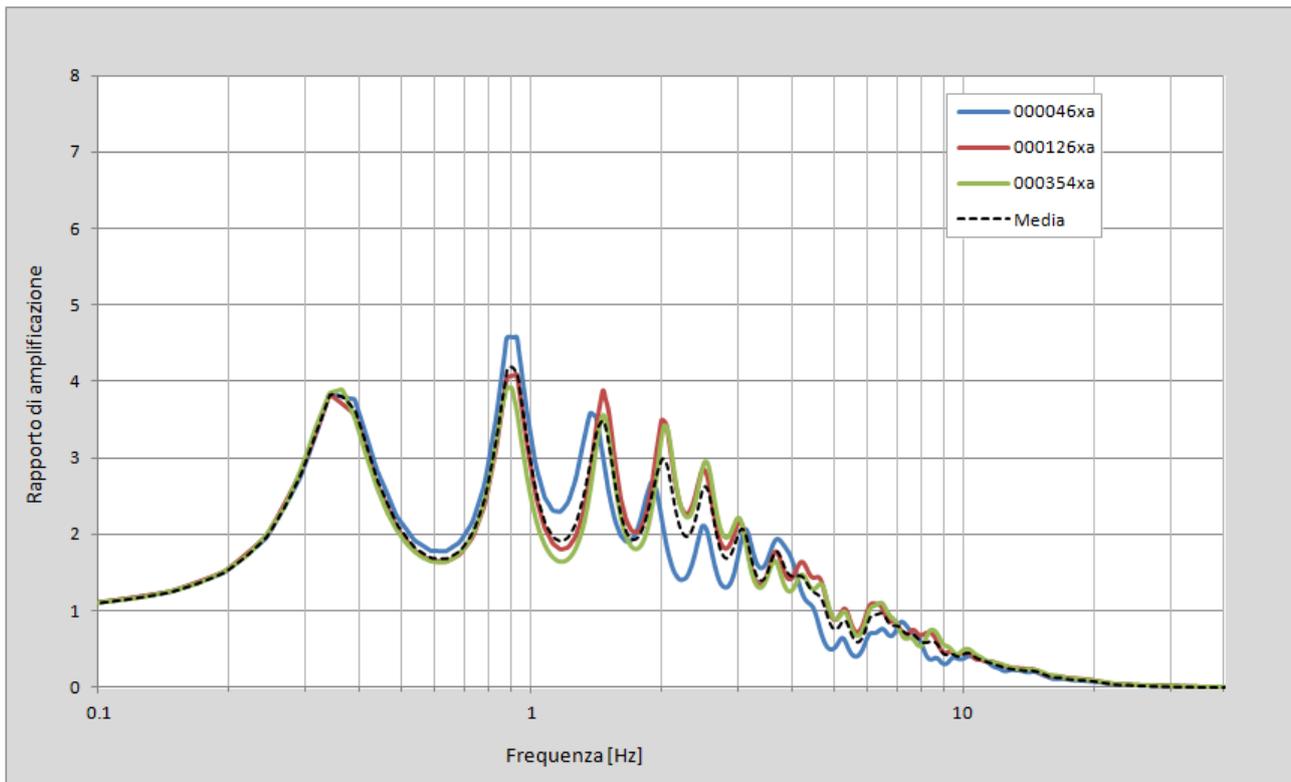


Figura 7-4 - RSL1: Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

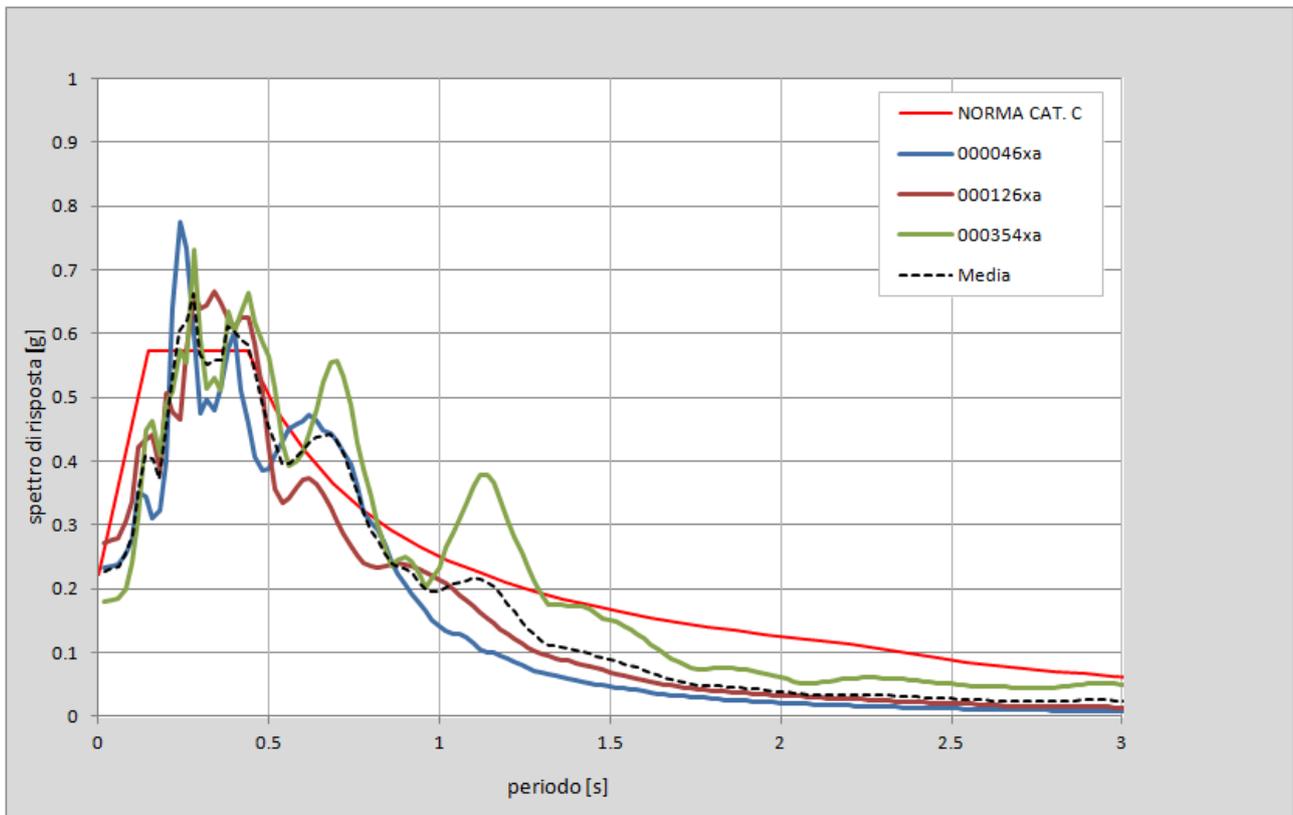


Figura 7-5 - RSL1: Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2008.

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

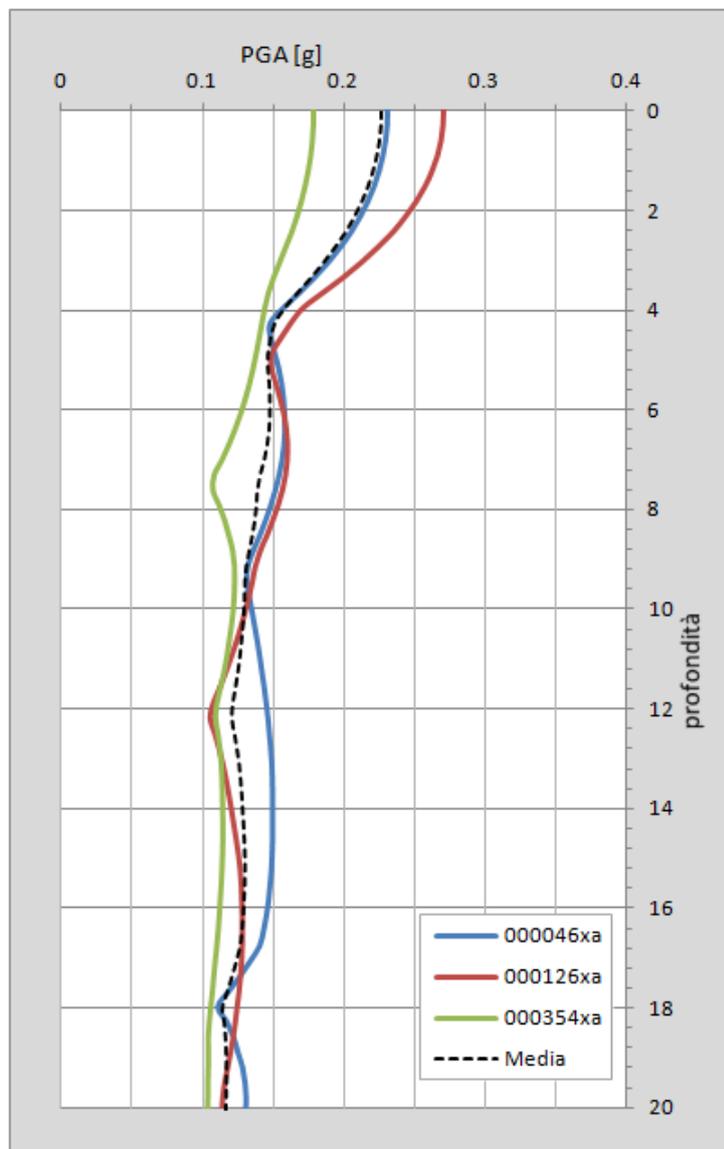


Figura 7-6 - RSL1: Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Con una accelerazione massima (PGA) attesa in superficie pari a 0,19 g (Figura 7-6) si ottiene un fattore di amplificazione  $FA(PGA) = 1,5$ .

Per la zona **RSL1** (in rosso in Figura 7-1), i fattori di amplificazione derivati in termini di intensità di Housner sono rispettivamente pari a:

$$SI1-FH_{(0.1-0.5)} = 1.7$$

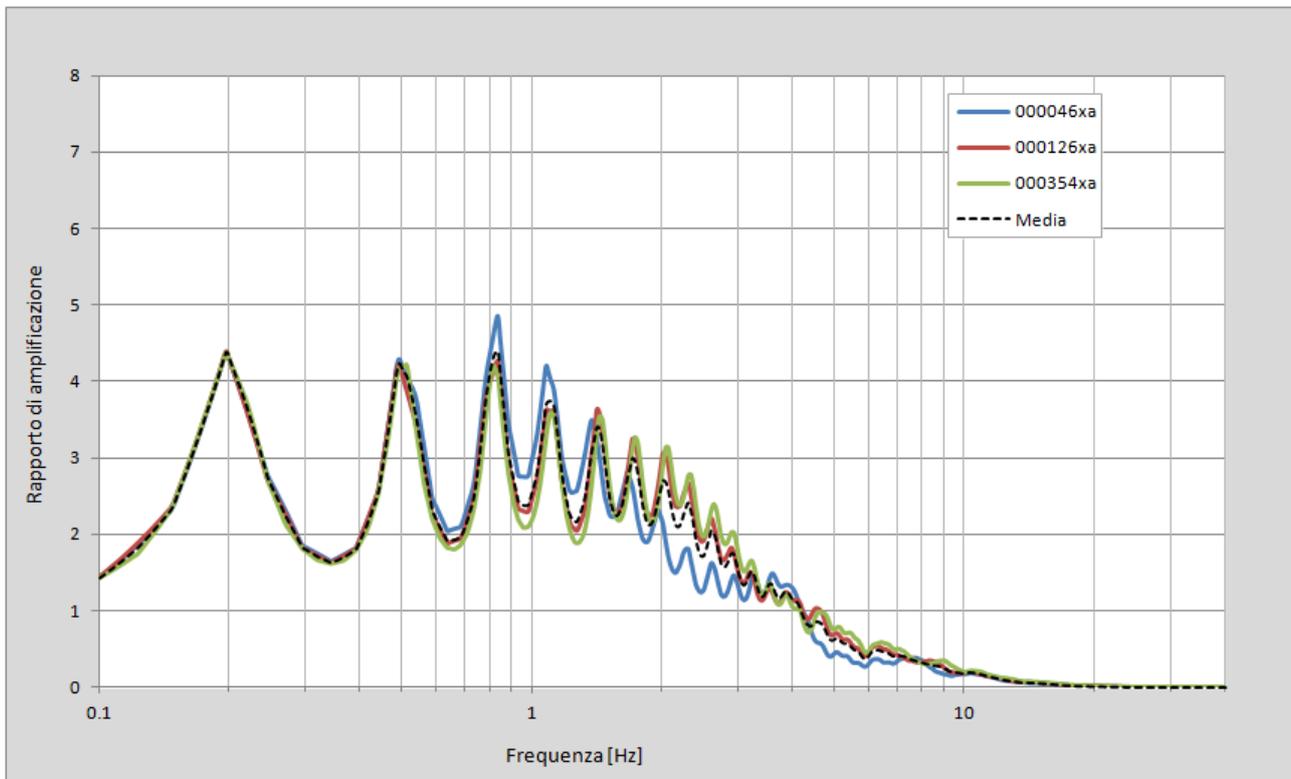
$$SI2-FH_{(0.5-1)} = 2.5$$

$$SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2.5$$

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

**RSL2**

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 amplificazione a frequenza a 0,2 Hz e una a circa 0,8 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale, ed a diverse altre frequenze, alcune delle quali sono armoniche superiori. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.



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

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

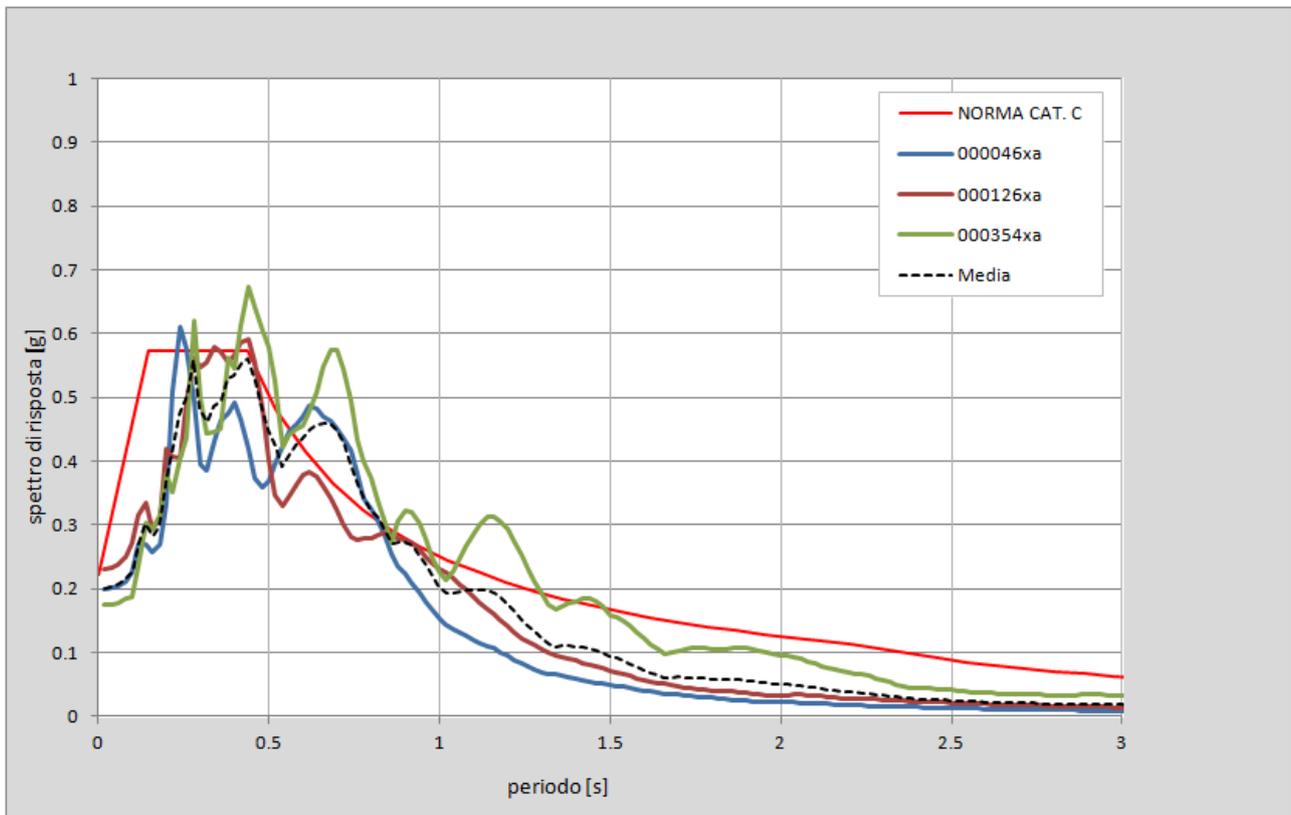


Figura 7-8 - RSL2: Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2008.

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

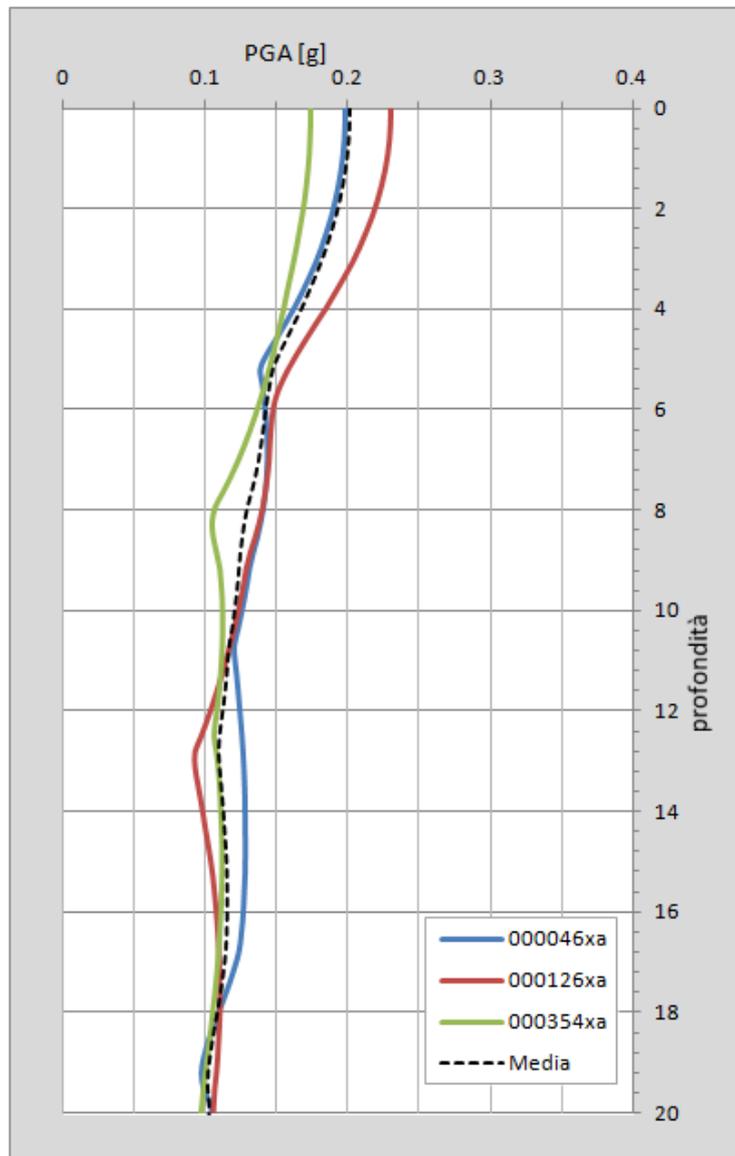


Figura 7-9 - RSL2: Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Con una accelerazione massima (PGA) attesa in superficie pari a 0,19 g (Figura 7-9) si ottiene un fattore di amplificazione **FA(PGA) = 1,3**.

Per la zona **RSL2** (in verde in Figura 7-1), i fattori di amplificazione derivati in termini di intensità di Housner sono rispettivamente pari a:

$$SI1-FH_{(0.1-0.5)} = 1.4$$

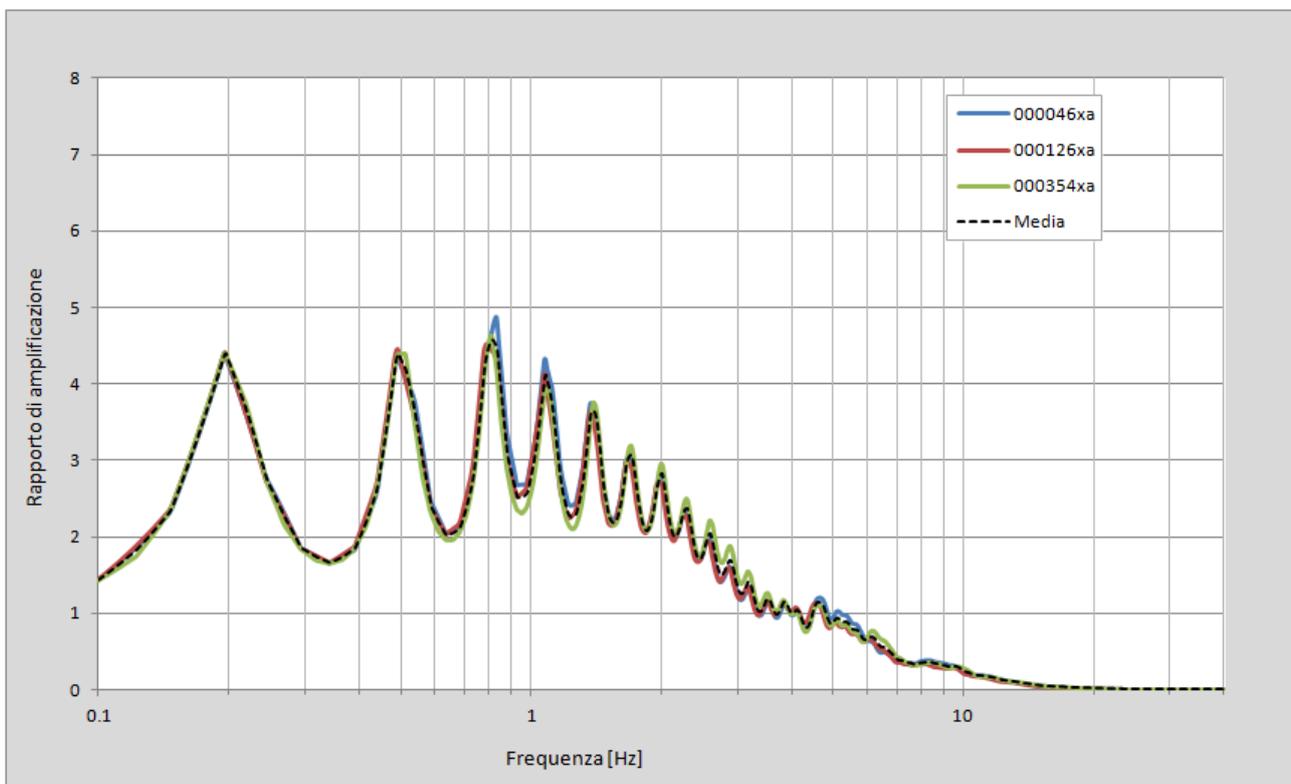
$$SI2-FH_{(0.5-1)} = 2.6$$

$$SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2.7$$

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

### RSL3

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. Analogamente a quanto ottenuto per la RSL2, di cui la modellazione condivide la stratigrafia profonda, si osserva una prima amplificazione a frequenza a 0,2 Hz e una a circa 0,8 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale, e a diverse altre frequenze, alcune delle quali sono armoniche superiori. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.



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

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

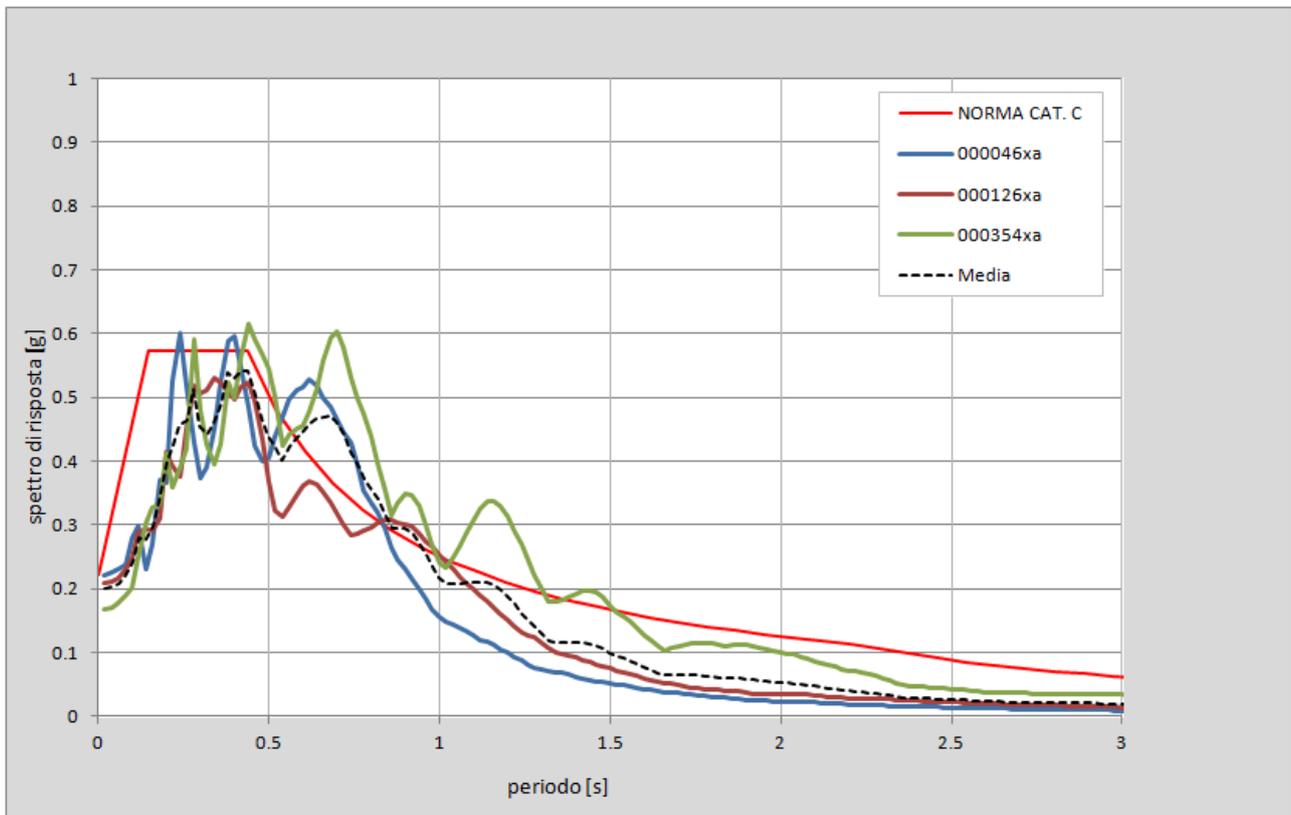


Figura 7-11 - RSL3: Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2008.

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

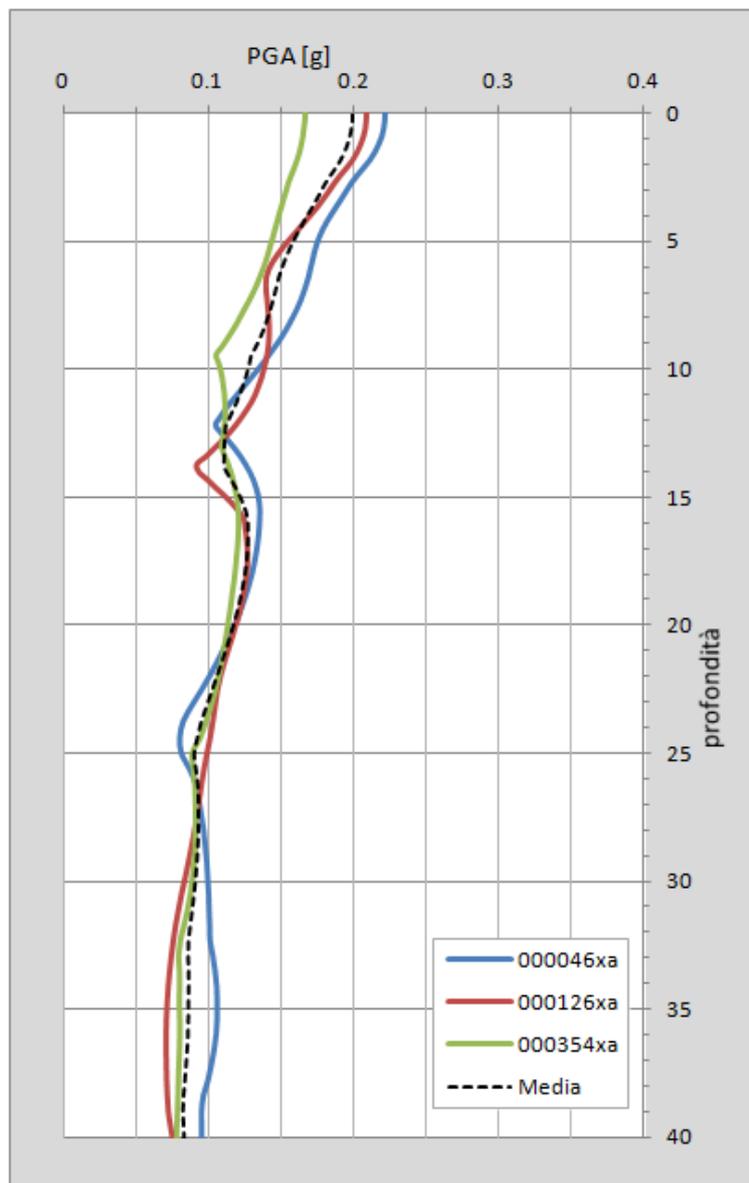


Figura 7-12 - RSL3: Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Con una accelerazione massima (PGA) attesa in superficie pari a 0,19 g (Figura 7-12) si ottiene un fattore di amplificazione **FA(PGA) = 1,3**.

Per la zona **RSL3** (in giallo in Figura 7-1), i fattori di amplificazione derivati in termini di intensità di Housner sono rispettivamente pari a:

$$SI1-FH_{(0.1-0.5)} = 1.4$$

$$SI2-FH_{(0.5-1)} = 2.8$$

$$SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2.8$$

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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

Nello specifico le zone di sinclinale (RSL2 e RSL3) presentano una stratigrafia coerente con quanto indicato nella D.G.R. 2193/2015 per le zone di "Pianura 3": *"settore di pianura caratterizzato da elevati spessori di sedimenti ....., con substrato rigido a profondità non inferiori a 300 m da p.c."*. Conseguentemente, come si può evincere da quanto messo a confronto in Tabella 7-5, i risultati delle risposte sismiche eseguite in aree di sinclinale hanno restituito fattori di amplificazione prossimi a quelli dell'abaco di riferimento.

	<b>ABACO PIANURA 3 D.G.R. 2193/2015</b>	<b>RSL2</b>	<b>RSL3</b>
<b>FA<sub>PGA</sub></b>	1.3	1.3	1.3
<b>FA<sub>SI1</sub></b>	1.5	1.4	1.4
<b>FA<sub>SI2</sub></b>	2.3	2.6	2.8
<b>FA<sub>SI3</sub></b>	2.6	2.7	2.8

**Tabella 7-5 - Fattori di amplificazione ottenuti dalle due modellazioni per le aree di sinclinale (RSL2 e RSL3) confrontate con quanto previsto dagli abachi della D.G.R. 2193/2015 per le aree di "Pianura 3" (bedrock a profondità non inferiore a 300 m dal p.c.) caratterizzate da Vs<sub>30</sub> di circa 200 m/s.**

La D.G.R. 2193/2015 non prevede però abachi specifici per settori di pianura con substrato rigido a profondità comprese tra 200 e 300 m, come l'area di anticlinale di Cento (RSL1), ma solo per zone con bedrock a meno di 100 m ("Pianura 1"), a circa 150 m ("Pianura 2") e oltre 300 m ("Pianura 3") dalla superficie topografica. Come logico i fattori di amplificazione calcolati a partire dalla modellazione RSL1, mostrano valori intermedi tra quelli proposti per "Pianura 2" e "Pianura 3" dalla D.G.R. 2193/2015 (Tabella 7-6) ed al contempo appaiono del tutto coerenti con i fattori proposti dalla ormai superata D.A.L. 112/2007, che prevedeva un abaco "Pianura 2" per aree con substrato profondo ( $\geq 100$  m da p.c.).

	<b>ABACO PIANURA 2</b>	<b>ABACO PIANURA 3 D.G.R. 2193/2015</b>	<b>Media P2-P3</b>	<b>ABACO PIANURA 2 D.A.L.112/2007</b>	<b>RSL1</b>
<b>FA<sub>PGA</sub></b>	1.7	1.3	1.5	1.5	1.5
<b>FA<sub>SI1</sub></b>	2.0	1.5	1.75	1.8	1.7
<b>FA<sub>SI2</sub></b>	3.0	2.3	2.65	2.5	2.5
<b>FA<sub>SI3</sub></b>	3.3	2.6	2.95	-	2.5

**Tabella 7-6 - Fattori di amplificazione ottenuti dalla modellazione per le aree di anticlinale (RSL) a confronto con: 1) quelli previsti dalla D.G.R. 2193/2015 per le aree di "Pianura 2" (bedrock a circa 150 m dal p.c.), "Pianura 3" (bedrock a profondità non inferiore a 300 m dal p.c.) e la loro media; 2) quelli previsti dalla D.A.L.112/2007 per le aree di "Pianura 2" (bedrock a oltre 100 m dal p.c.). Valori definiti per aree caratterizzate da Vs<sub>30</sub> di circa 200 m/s.**

## 7.2 Zone instabili soggette a liquefazione

Tra le principali instabilità sismoindotte in grado di determinare deformazioni permanenti del suolo gli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008) indicano:

- liquefazioni;
- instabilità di versante;
- cedimenti differenziali;
- faglie attive e capaci.

Per le zone suscettibili di tali possibili effetti la normativa vigente richiede approfondimenti di terzo livello. Considerando il carattere pianeggiante del territorio ed il contesto sismotettonico in cui si colloca il Comune di Cento, le instabilità attese si riducono a potenziali fenomeni di liquefazione e cedimenti differenziali.

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

L'estensione e la perimetrazione di queste aree è stata notevolmente affinata (v. Tavola 4) in base ai risultati delle nuove indagini geognostiche realizzate per gli approfondimenti di terzo livello (paragrafo 4.2). Per ottenere valutazioni quantitative della suscettibilità a liquefazione nelle aree classificate come instabili e poter suddividere il territorio in classi di rischio, sono state infine eseguite stime dell'indice di potenziale liquefazione ( $I_L$ ) con le procedure semplificate indicate dai recenti indirizzi regionali per la microzonazione sismica (paragrafo 7.2.1). Tali stime sono state eseguite su tutte le indagini penetrometriche con piezocono, raccolte e realizzate durante lo studio di microzonazione sismica (v. Allegato 3).

### 7.2.1 Verifiche del potenziale di liquefazione

La liquefazione è un fenomeno che si verifica in occasione di terremoti con magnitudo  $M > 5.5$  e interessa i sedimenti granulari (limi sabbiosi, sabbie e ghiaie sabbiose) poco addensati e saturi in acqua presenti nei primi 15-20 m di sottosuolo.

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Già durante gli studi relativi all'Ordinanza 70/2012, furono effettuate stime del potenziale di liquefazione su una trentina di indagini penetrometriche (v. Allegato 1.7 - Ordinanza 70/2012) mediante diverse procedure semplificate indicate degli indirizzi regionali (D.A.L. 112/2007, Allegato 3) e nazionali (Gruppo di lavoro MS, 2008).

Il confronto tra i vari metodi di letteratura utilizzati, tutti basati su analisi di prove penetrometriche, aveva permesso di concludere che i valori degli indici di liquefazione  $I_L$  (Iwasaki *et al.*, 1982) ottenuti con il metodo di Idriss e Boulanger (2008) fossero i meglio compatibili con gli effetti osservati, e venissero dunque utilizzati per la redazione delle mappe.

Per gli approfondimenti di terzo livello di microzonazione sismica sono state eseguite stime del potenziale di liquefazione anche con il più recente metodo di Boulanger e Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015. Tale metodo ha mediamente fornito indici di liquefazione più elevati rispetto ai metodi precedenti (cfr. Idriss e Boulanger, 2008; Robertson NCEER, 2001 e Robertson, 2009).

Considerato il metodo di Boulanger e Idriss (2014) mediamente più affidabile dei precedenti, in quanto basato su di un set più numeroso di dati, si è scelto di utilizzarlo come riferimento per la stima del potenziale di liquefazione. Sono state quindi analizzate 164 verticali d'indagine realizzate con punta elettrica e piezocono (CPTU) distribuite come riportato in Tavole 6a e 6b.

Come parametri di input per la modellazione sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 7-7. Il valore di  $Mw_{max}$  corrisponde a quello massimo atteso per la Zona 912 della Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), mentre la PGA è stata derivata moltiplicando l'agref (così come definita al paragrafo 7.1.1) per i fattori ottenuti dalla risposta sismica locale (paragrafo 7.1.1) cioè per:

- 1,5 (corrispondente alla  $FA_{PGA}$  dell'abaco "Pianura 2" della D.A.L. 112/2007) per le zone di "alto" stratigrafico - anticlinale (frazioni di Dodici Morelli, Pilastrello e Molino Albergati);
- 1,3 (corrispondente alla  $FA_{PGA}$  dell'abaco "Pianura 3" della D.G.R. 2193/2015) per le zone di "basso" stratigrafico - sinclinale (capoluogo e frazioni di Bevilacqua, Corporeno, Renazzo, Buonacompra, Alberone, Reno Centese e Casumaro).

In mancanza di uno studio idrogeologico dettagliato e di un'analisi storico-statistica dell'andamento delle isofreatiche, il valore di soggiacenza adottato è stato considerato maggiormente cautelativo rispetto a quello medio misurato nel corso delle indagini geognostiche eseguite per la microzonazione.

Parametri	$Mw_{max}$	PGA	Falda
Zona di sinclinale	6,14	0,20	1 m

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Zona di anticlinale	6,14	0,23	1 m
---------------------	------	------	-----

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

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

In Tabella 7-8 sono riportati i valori di IL relativi a tutte le 164 indagini penetrometriche con punta elettrica analizzate per gli approfondimenti di terzo livello dello studio, mentre nell'Allegato 3 sono raccolti i rapporti di calcolo delle verifiche a liquefazione eseguite sulle prove CPTU realizzate per fini di microzonazione di sismica.

Codice	Lat.	Lon.	Falda (m)	IL Boulanger e Idriss (2014)
038004P1CPTU1	44.8022	11.3035	0.20	2.7
038004P23CPTU872	44.8287	11.3274	0.20	12.3
038004P24CPTU873	44.8126	11.3144	0.20	6.0
038004P40CPTU41	44.8175	11.3189	0.20	4.5
038004P41CPTU42	44.8052	11.3306	0.20	2.5
038004P42CPTU43	44.8029	11.3263	0.20	1.3
038004P43CPTU44	44.8034	11.3252	0.20	1.9
038004P44CPTU45	44.8035	11.3233	0.20	1.6
038004P45CPTU46	44.8011	11.3206	0.20	3.4
038004P46CPTU47	44.8	11.3175	0.20	8.1
038004P47CPTU48	44.8008	11.3091	0.20	4.0
038004P48CPTU49	44.8019	11.3038	0.20	3.5
038004P49CPTU50	44.8038	11.2989	0.20	9.0
038004P50CPTU51	44.8213	11.3195	0.20	1.6
038004P51CPTU52	44.8209	11.321	0.20	7.2
038004P52CPTU53	44.8063	11.3182	0.20	11.7
038004P81CPTU82	44.8155	11.3523	0.20	1.4
038004P82CPTU83	44.815	11.341	0.20	0.5
038004P83CPTU84	44.8093	11.3326	0.20	0.9
038004P191CPTU192	44.7512	11.3001	0.20	1.1
038004P192CPTU193	44.762	11.3056	0.20	2.6
038004P193CPTU194	44.7706	11.3099	0.23	5.3
038004P194CPTU195	44.7726	11.3211	0.23	2.5
038004P195CPTU196	44.7694	11.3252	0.23	12.7
038004P196CPTU197	44.773	11.3202	0.23	1.9

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

038004P197CPTU198	44.7777	11.3109	0.23	4.9
038004P198CPTU199	44.7801	11.3064	0.23	0.5
038004P199CPTU200	44.7905	11.3092	0.23	1.9
038004P200CPTU201	44.794	11.3114	0.23	1.1
038004P201CPTU202	44.799	11.3155	0.20	2.9
038004P202CPTU203	44.7646	11.2887	0.20	2.5
038004P205CPTU206	44.7564	11.2695	0.20	0.7
038004P206CPTU207	44.7628	11.3066	0.20	1.2
038004P207CPTU208	44.7757	11.288	0.20	2.1
038004P208CPTU209	44.7835	11.3183	0.23	5.9
038004P209CPTU210	44.791	11.2976	0.23	0.9
038004P385CPTU386	44.7269	11.2836	0.20	5.0
038004P386CPTU387	44.7274	11.2844	0.20	4.9
038004P387CPTU388	44.7477	11.2993	0.20	1.1
038004P389CPTU390	44.7098	11.2752	0.20	2.7
038004P390CPTU391	44.7324	11.2841	0.20	0.8
038004P391CPTU392	44.7474	11.2975	0.20	2.5
038004P397CPTU906	44.7835	11.334	0.20	2.0
038004P398CPTU399	44.7906	11.3394	0.20	3.3
038004P408CPTU409	44.7457	11.2997	0.20	0.1
038004P428CPTU429	44.7316	11.2835	0.20	0.4
038004P429CPTU430	44.7311	11.285	0.20	0.4
038004P435CPTU436	44.7683	11.3335	0.23	7.4
038004P436CPTU437	44.7681	11.3337	0.23	4.9
038004P441CPTU442	44.7539	11.2844	0.20	2.1
038004P450CPTU451	44.7912	11.2899	0.23	4.6
038004P453CPTU455	44.7743	11.3161	0.23	0.7
038004P454CPTU457	44.7735	11.3153	0.23	0.0
038004P455CPTU458	44.728	11.2898	0.20	1.8
038004P461CPTU464	44.8243	11.3545	0.20	20.5
038004P469CPTU472	44.7282	11.2922	0.20	0.0
038004P470CPTU474	44.7279	11.2926	0.20	0.0
038004P497CPTU501	44.7151	11.2788	0.20	4.9
038004P498CPTU503	44.7657	11.2543	0.20	10.6
038004P499CPTU505	44.7658	11.2539	0.20	6.4
038004P546CPTU552	44.8087	11.3458	0.20	6.2
038004P547CPTU554	44.7291	11.2891	0.20	0.2
038004P657CPTU665	44.7344	11.2897	0.20	0.6
038004P658CPTU666	44.7331	11.2886	0.20	1.2
038004P661CPTU669	44.7553	11.2665	0.20	5.4
038004P662CPTU670	44.7551	11.2665	0.20	6.6
038004P664CPTU672	44.7239	11.2788	0.20	9.1

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

038004P665CPTU673	44.7236	11.2787	0.20	6.9
038004P666CPTU674	44.8348	11.3755	0.20	8.2
038004P673CPTU682	44.8224	11.3106	0.20	4.8
038004P674CPTU683	44.8223	11.3107	0.20	7.5
038004P687CPTU697	44.8225	11.3101	0.20	5.8
038004P688CPTU698	44.8016	11.3334	0.20	12.9
038004P689CPTU700	44.8013	11.3337	0.20	10.8
038004P695CPTU706	44.7242	11.2924	0.20	0.4
038004P696CPTU707	44.7243	11.2927	0.20	0.0
038004P697CPTU708	44.8069	11.3088	0.20	6.0
038004P698CPTU710	44.7965	11.2945	0.23	7.6
038004P705CPTU717	44.7277	11.2933	0.20	0.2
038004P706CPTU718	44.7274	11.2935	0.20	0.9
038004P709CPTU721	44.7132	11.2734	0.20	12.2
038004P710CPTU722	44.7132	11.2729	0.20	13.0
038004P725CPTU739	44.7282	11.2884	0.20	1.7
038004P726CPTU740	44.7958	11.2879	0.23	1.4
038004P730CPTU744	44.7399	11.294	0.20	0.8
038004P731CPTU745	44.7401	11.2941	0.20	1.0
038004P739CPTU753	44.7957	11.3514	0.20	1.8
038004P742CPTU756	44.7739	11.2728	0.20	7.4
038004P743CPTU757	44.7736	11.273	0.20	6.7
038004P755CPTU769	44.8194	11.3133	0.20	0.1
038004P755CPTU875	44.8312	11.3597	0.20	20.3
038004P759CPTU773	44.7389	11.298	0.20	2.0
038004P760CPTU775	44.7393	11.2988	0.20	0.3
038004P761CPTU776	44.739	11.2986	0.20	0.3
038004P762CPTU777	44.7609	11.3167	0.20	13.1
038004P763CPTU778	44.7612	11.3172	0.20	8.8
038004P764CPTU780	44.7608	11.3169	0.20	4.8
038004P766CPTU782	44.725	11.2876	0.20	8.3
038004P767CPTU784	44.7246	11.2874	0.20	10.6
038004P768CPTU785	44.7247	11.2873	0.20	9.9
038004P792CPTU818	44.7901	11.2873	0.23	20.6
038004P793CPTU819	44.7901	11.2878	0.23	7.0
038004P801CPTU827	44.7648	11.2916	0.20	2.0
038004P802CPTU828	44.7645	11.2925	0.20	1.5
038004P804CPTU831	44.7248	11.276	0.20	9.9
038004P805CPTU832	44.7262	11.2784	0.20	9.8
038004P806CPTU833	44.7259	11.2768	0.20	9.1
038004P808CPTU835	44.7282	11.2881	0.20	6.1
038004P809CPTU836	44.7208	11.2673	0.20	16.5

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

038004P811CPTU839	44.7361	11.3013	0.20	0.4
038004P812CPTU840	44.736	11.3007	0.20	0.8
038004P813CPTU841	44.725	11.2875	0.20	8.0
038004P814CPTU843	44.714	11.2763	0.20	15.4
038004P815CPTU844	44.7139	11.2765	0.20	16.9
038004P817CPTU846	44.7259	11.2806	0.20	9.6
038004P818CPTU847	44.733	11.2798	0.20	4.1
038004P819CPTU849	44.7641	11.2886	0.20	8.3
038004P821CPTU851	44.7743	11.3255	0.23	5.5
038004P824CPTU854	44.7757	11.2647	0.20	1.7
038004P825CPTU855	44.7933	11.2831	0.23	2.4
038004P829CPTU859	44.7283	11.2917	0.20	2.5
038004P830CPTU860	44.7273	11.2905	0.20	6.9
038004P833CPTU863	44.7264	11.2833	0.20	5.8
038004P834CPTU865	44.8027	11.3008	0.20	5.2
038004P835CPTU866	44.8014	11.3191	0.20	3.3
038004P838CPTU870	44.7347	11.2909	0.20	2.0
038004P839CPTU874	44.8056	11.3372	0.20	6.7
038004P840CPTU876	44.7576	11.3139	0.20	2.0
038004P841CPTU878	44.7689	11.2592	0.20	5.4
038004P842CPTU880	44.7953	11.2905	0.23	9.5
038004P843CPTU882	44.7948	11.3214	0.20	4.9
038004P844CPTU883	44.7279	11.2808	0.20	10.8
038004P845CPTU886	44.7799	11.3109	0.23	7.3
038004P846CPTU888	44.7796	11.321	0.23	5.2
038004P847CPTU890	44.7381	11.2987	0.20	1.9
038004P848CPTU892	44.7376	11.2991	0.20	1.4
038004P849CPTU894	44.762	11.2854	0.20	8.2
038004P850CPTU896	44.7618	11.284	0.20	5.6
038004P852CPTU900	44.8041	11.3508	0.20	3.2
038004P853CPTU902	44.8242	11.3393	0.20	2.8
038004P854CPTU904	44.7791	11.3257	0.23	0.3
038004P858CPTU925	44.725	11.2859	0.20	9.9
038004P859CPTU926	44.7665	11.29	0.20	6.7
038004P860CPTU927	44.7221	11.2841	0.20	11.5
038004P861CPTU928	44.7477	11.2775	0.20	7.5
038004P862CPTU929	44.7569	11.3116	0.20	9.7
038004P863CPTU930	44.7622	11.2821	0.20	11.9
038004P864CPTU932	44.8372	11.3618	0.20	4.6
038004P865CPTU933	44.7653	11.2822	0.20	2.6
038004P866CPTU934	44.7871	11.2841	0.23	20.5
038004P867CPTU935	44.8262	11.3355	0.20	0.3

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

038004P870CPTU940	44.8379	11.3625	0.20	5.9
038004P871CPTU941	44.8034	11.3313	0.20	3.0
038004P872CPTU942	44.8038	11.3307	0.20	3.3
038004P873CPTU943	44.8041	11.3311	0.20	8.0
038004P874CPTU944	44.8364	11.3566	0.20	6.1
038004P875CPTU945	44.8198	11.3508	0.20	0.6
038004P876CPTU946	44.8206	11.3518	0.20	0.0
038004P877CPTU947	44.8202	11.3517	0.20	0.0
038004P878CPTU948	44.8201	11.3519	0.20	0.0
038004P879CPTU949	44.8363	11.3568	0.20	4.5
038004P880CPTU950	44.838	11.363	0.20	2.1
038004P881CPTU951	44.8038	11.3317	0.20	5.9
038004P884CPTU960	44.8285	11.3576	0.20	15.9

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

## 8 Elaborati cartografici

Le analisi e gli approfondimenti eseguiti nell'ambito di questo studio hanno fornito gli elementi necessari alla redazione degli elaborati cartografici per il terzo livello di microzonazione sismica. Al contempo, le nuove indagini geognostiche realizzate, gli attuali standard di rappresentazione ed archiviazione informatica nazionali e la recente direttiva regionale adottata in materia di microzonazione sismica (D.G.R. 1227/2015), hanno reso necessaria una sostanziale revisione e l'aggiornamento degli elaborati cartografici prodotti nei precedenti livelli di approfondimento di microzonazione sismica.

Per queste ragioni allo studio sono stati allegati anche gli elaborati cartografici di primo e secondo livello aggiornati, oltre alle tavole grafiche prodotte per gli approfondimenti di terzo livello (Tabella 8-1). La grande estensione del Comune di Cento ha reso necessaria la realizzazione in doppia tavola di tutti gli elaborati grafici, corrispondenti rispettivamente alla porzione settentrionale ed a quella meridionale del territorio comunale.

In particolare, la Carta delle indagini e la Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica sono state estese a tutto il territorio comunale, al fine di fornire una chiara e completa visione d'insieme di alcuni elementi base per gli approfondimenti di microzonazione, come la distribuzione delle indagini geognostiche disponibili e l'andamento e l'estensione dei corpi geologici affioranti.

Negli altri elaborati invece sono stati caratterizzati solamente gli ambiti interessati dagli studi di microzonazione sismica di terzo livello.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in scala 1:10.000; la base cartografica utilizzata è costituita dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000, messa a disposizione dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

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

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

### 8.1 Carta delle indagini (Tavola 1a - Tavola 1b)

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 (982) che quelle realizzate per l'attuale approfondimento di terzo livello (88).

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

Attraverso l'utilizzo del metodo di rappresentazione proposto all'Appendice 2 dei suddetti standard, ad ogni sito d'indagine (punto viola 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 microzonazione sismica (Tavola 2a - Tavola 2b)

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

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

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

### 8.2.1 Elementi geologici ed idrogeologici

Tra gli elementi funzionali alla definizione del modello di sottosuolo, sono stati riportati in carta 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 dal sondaggio stratigrafico profondo realizzato, in località Torre Spada, per la ricerca di idrocarburi (tavola 2b).

In relazione agli altri tematismi previsti per la carta geologico tecnica negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica, si precisa che, vista la quasi totale assenza di dati geognostici sul sottosuolo profondo, non è stato possibile ricostruire in pianta, tramite isobate, l'andamento della superficie considerata come tetto del bedrock sismico in questo studio. Allo stesso modo, gli esigui dati freaticometrici disponibili non sono stati riportati in carta in quanto disomogenei e di dubbia qualità, dunque ritenuti non utili, se non addirittura forvianti, ai fini della ricostruzione dell'andamento della superficie piezometrica.

Allo studio sono, infine, allegate sezioni geologiche considerate rappresentative del modello di sottosuolo, realizzate da e per il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1). Le tre sezioni profonde (tracce D-D', F-F', G-G' – tavole 2a e 2b), estratte rispettivamente da "riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna", "cartografia geologica nazionale – foglio 202 San Giovanni in Persiceto" e "microzonazione sismica dell'area epicentrale emiliana - Ordinanza 70/2012", mostrano

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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', C-C', E-E', H-H' – tavole 2a e 2b) 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 degli studi post-sismici regionali, 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 parte affiorante delle unità di copertura si sono distinte quattro unità, ciascuna associata ad una classe prevista dagli standard di microzonazione. Queste classi sono state individuate sulla base del *Unified Soil Classification System (U.S.C.S. modificato, ASTM, 1985)*.

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

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

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

L'unità è formata da sabbie medie e fini con granulometria poco assortita che registrano il riempimento di ampi canali fluviali di Reno, ad andamento planimetrico curvilineo poco pronunciato. Questi sedimenti sono di età medievale e moderna, dato che i depositi di età premedievale sono sempre sepolti nel sottosuolo. All'interno di questi corpi, sono presenti subordinati depositi più fini, sabbioso-limosi o limosi. La presenza storica di questi canali è riflessa anche dalla toponomastica, con nomi come Renazzo, Corporeno o Dosso. In epoca medievale il canale principale di Reno scorreva a sud di Cento e ad oriente di San Matteo della Decima, dirigendosi verso nord passando per la periferia occidentale del capoluogo comunale. Esso si apriva

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

quindi in una serie di canali distributori, formando un ampio sistema delta interno, che cresceva in estese paludi dolci.

Non tutti i canali furono pienamente attivi nella stesa fase storica. Un primo canale si staccava verso nord-ovest, in direzione Corpo Reno e Dosso. Un secondo si dirigeva invece verso ovest, in direzione di Bevilacqua. Il ramo principale si dirigeva, fino al XV secolo, verso Renazzo, dopo cui si tripartiva in tre ulteriori canali, uno verso ovest, l'altro, il maggiore, verso nord, per Dodici Morelli, Alberone, Reno Centese e Casumaro. Il terzo canale si staccava in direzione nord-nord-est, verso Pilastrello, dove a sua volta si biforcava in due canali terminali minori. I canali occidentali, quello per Corporeno e quello per Pilastrello-Buonacompra sono stati probabilmente più attivi in una prima fase. Questi alvei mostrano corpi di argine assai meno sviluppati e in gran parte sepolti rispetto a quelli di età relativamente più recente che fiancheggiano i corpi di canale sviluppati nella parte più occidentale del territorio comunale.

Questo sistema entrò rapidamente in crisi durante il XV secolo, a seguito delle rotte di Bagnetto, che, fra il 1451 e il 1460, indussero lo sviluppo dell'attuale corso del Reno, in direzione di Sant'Agostino. Il nuovo corso separò definitivamente la città bassomedievale di Cento dal più antico nucleo insediativo di Pieve, interrompendo la sedimentazione degli alvei medievali fino ad allora attivi nella parte settentrionale del territorio comunale. La deposizione dei vicini corpi di sabbie e sabbie limose di argine naturale è stata progressivamente interrotta, negli ultimi secoli, dall'erezione di grandi argini artificiali. Una modesta sedimentazione fluviale permane attiva all'interno del canale arginato, al bordo orientale del territorio comunale.

- **sedimenti di argine naturale (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 corpi sono caratterizzati da una permeabilità media, che aumenta in genere avvicinandosi ai corpi di paleoalveo.

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

Consistono di argille, argille limose, argille limose organiche, diffusamente bioturbate, a plasticità generalmente medio-bassa, deposti in ambienti di piana inondabile, stagno e palude dolce. Queste aree erano soggette a consistenti apporti sedimentari fini, durante gli episodi di piena e tracimazione fluviale. Quando i sedimenti di questa unità fiancheggiano direttamente corpi di

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

paleolaveo del Reno, nella porzione centro-settentrionale del territorio comunale, possono inglobare subordinate intercalazioni di limi e limi sabbiosi, frequentemente amalgamati dalla bioturbazione.

- **argille organiche e torbe di palude dulcicola (OHpl)**

L'unità è formata da argille, spesso assai plastiche, argille limose, argille organiche, assai ricche di livelli torbosi, oggi fortemente costipati nei pressi della superficie. La frazione organica di origine vegetale è spesso abbondante. Si osservano talvolta resti di legno e foglie in eccellente stato di conservazione. Questi sedimenti conservano spesso le originarie colorazioni scure unitamente ad elevati contenuti in umidità; questi caratteri li rendono ben identificabili anche attraverso analisi di immagini a falsi colori nell'infrarosso vicino. Questi fanghi si trovano con particolare frequenza nelle parti ancora oggi particolarmente depresse dal punto di vista topografico delle piane interalvee del Reno. Questi sedimenti coesivi presentano in genere una permeabilità molto bassa e rappresentano, quindi, un efficace livello di acquicludo superficiale.

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

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

I punti di misura riportati in carta sono tematizzati con colori diversi in relazione al valore di ampiezza massima del picco di H/V. Ampiezze superiori a 2.5 sono restituite con colori arancio e rosso, mentre il verde è utilizzato per valori inferiori a 2.

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

Sulla base dei dati ottenuti dalle misure microtremore sismico non è stato possibile suddividere il territorio indagato secondo le diverse classi di frequenza proposte nell'allegato B della Delibera di Giunta Regionale D.G.R. 1227/2015. La frequenza fondamentale ( $f_0$ ), infatti, mostra generalmente valori inferiori ad 1 Hz che indicano come i fenomeni di risonanza siano dovuti alla presenza di riflettori sismici posti sempre ben al disotto dei 100 m di profondità.

A scala comunale è però possibile riconoscere un andamento nella variazione dei valori di frequenza ( $f_0$ ). Le porzioni di territorio più meridionali, come ad esempio Cento capoluogo, mostrano valori di frequenza variabili tra 0,7 e 0,9 Hz. Analogamente, la fascia settentrionale sviluppata tra Buonacompra e Casumaro, è

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

caratterizzata da frequenze fondamentali molto simili alle precedenti. Al contrario invece l'area centrale del territorio comunale, estesa tra Dodici Morelli e Pilastrello, mostra i valori più bassi tra quelli registrati, con frequenze massime attorno a 0,5 Hz e 0,4 Hz. La distribuzione dei valori frequenza ben evidenzia l'andamento dei maggiori contrasti d'impedenza nel sottosuolo ed è compatibile con le variazioni di profondità e tipologia di questi ultimi, indotte dall'evoluzione delle strutture tettoniche presenti nel territorio (v. paragrafo 6.2.).

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

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

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

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

Le diverse microzone sono state definite sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche dei primi trenta metri di sottosuolo (

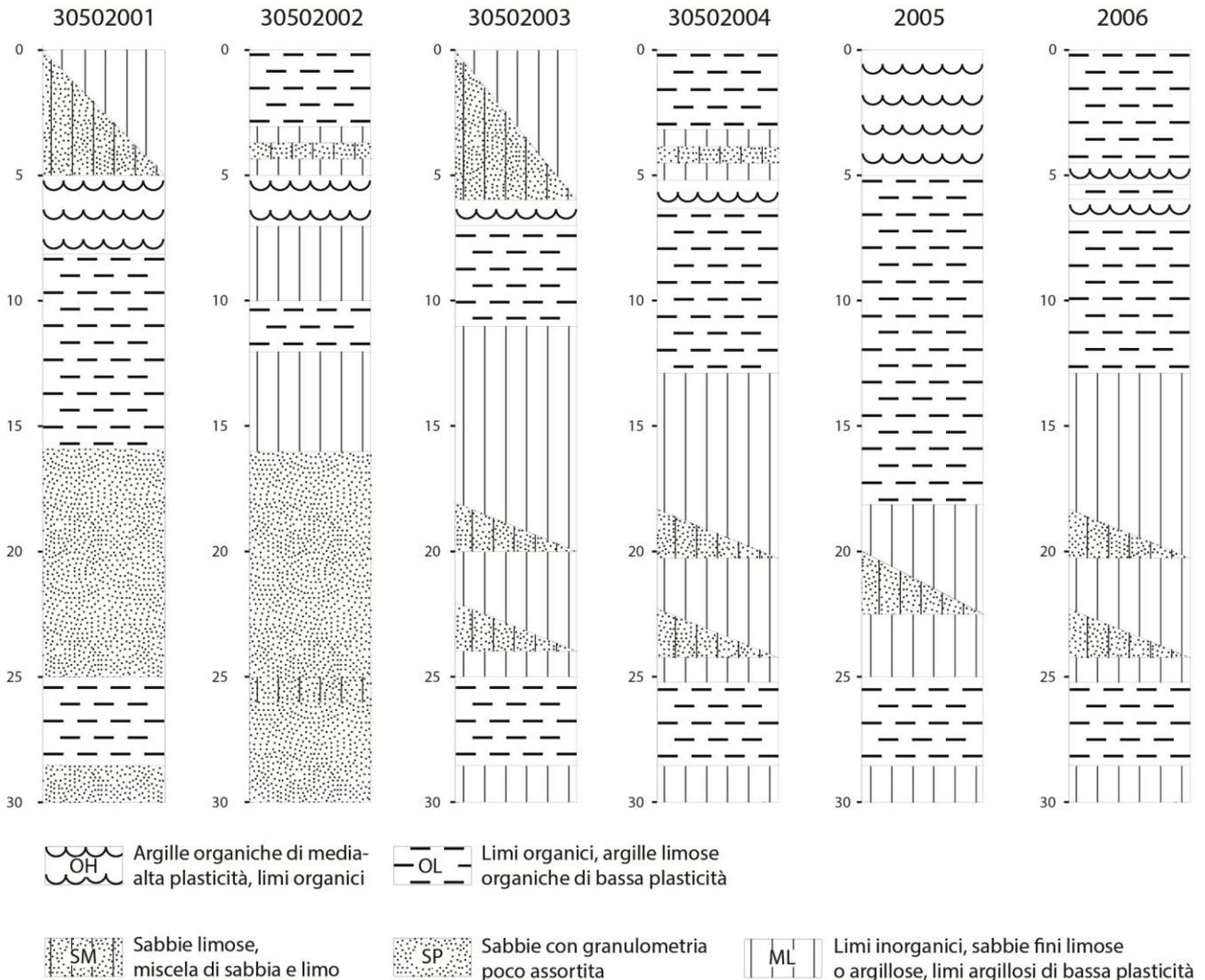
Figura 8-1) e ad esse sono stati associati codici identificativi progressivi e colorazioni distinte come previsto dagli standard sopra citati.

**Le 4 zone** cartografate come **instabili** presentano tutte problematiche legate a potenziali fenomeni di liquefazione e sono quindi state classificate come **zone di attenzione per liquefazione** ( $ZA_{LQ}$ ) e rappresentate in carta mediante apposito retino e relativo prefisso identificativo 3050. Sono state inoltre identificate due distinte microzone **suscettibili di sola amplificazione locale** a cui sono stati attribuiti i codici 2005 e 2006.

Di seguito sono riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi (

Figura 8-1) con la descrizione delle relative successioni in base alle quali sono state definite le classi zonali. Le descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO



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

**Zona 30502001**

Sabbie limose poco addensate e limi sabbiosi, poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e di torbe. Seguono argille e argille limose pedogenizzate a bassa plasticità che poggiano su sabbie talvolta limose, intervallate da argille e argille organiche.

**Zona 30502002**

Argille organiche anche plastiche con intercalazioni di torbe, poggiano su alternanze di limi sabbiosi e sabbie limose poco addensate. Seguono argille organiche plastiche e argille limose a bassa plasticità

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

alternate a limi argillosi pedogenizzati. Sabbie, talvolta limose, si estendono fino alla base della successione indagata.

### **Zona 30502003**

Sabbie limose poco addensate e limi sabbiosi, poggiano su argille organiche anche plastiche, con intercalazioni limose e di torbe. Seguono limi inorganici pedogenizzati, argille e argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie, talvolta limose, organizzate in corpi lenticolari.

### **Zona 30502004**

Argille limose organiche di media-bassa plasticità poggiano su alternanze di limi sabbiosi e sabbie limose poco addensate. Seguono argille organiche e argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di torbe, che poggiano su limi inorganici pedogenizzati. Seguono limi argillosi e argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie limose organizzate in corpi lenticolari.

### **Zona 2005**

Argille organiche plastiche con intercalazioni di torbe, poggiano su argille e argille limose a minor plasticità. Seguono limi inorganici pedogenizzati, argille e argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie, talvolta limose, organizzate in corpi lenticolari.

### **Zona 2006**

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

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

La carta della velocità delle onde volumetriche di taglio mostra, a scala 1:10.000, i 143 punti di misura di  $V_s$  utilizzati per lo studio di microzonazione sismica ed i rispettivi valori di  $V_{s30}$ .

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

MISURE DIRETTE		MISURE INDIRECTE	
SCPT	46	MASW	82
DH	2	ESAC-SPAC	3
SDMT	2	REMI	8

**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 (SCPT), down-hole (DH) o dilatometro sismico (SDMT).

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

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

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

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

- $FA_{PGA}$  (tavole 6a - 6b) - fattori di amplificazione espressi come rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico ( $PGA/PGA_0$ );
- $FA_{0,1-0,5s}$  (tavole 7a - 7b) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico ( $SI/SI_0$ ) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;
- $FA_{0,5-1s}$  (tavole 8a - 8b) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico ( $SI/SI_0$ ) per periodi compresi tra 0,5 e 1 secondi.
- $FA_{0,5-1,5s}$  (tavole 9a - 9b) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico ( $SI/SI_0$ ) per periodi compresi tra 0,5 e 1,5 secondi.

<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 CENTO

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

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$
1,5	1,7	2,5	2,5

**Tabella 8-3 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione centrale del territorio comunale, interessato dalla presenza dell'alto strutturale di "Mirandola" sviluppato tra Dodici Morelli e Pilastrello (RSL1).**

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$
1,3	1,4	2,6	2,7

**Tabella 8-4 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione centro-meridionale del territorio comunale, situato in corrispondenza della struttura sinclinalica sviluppata immediatamente a sud della anticlinale "Mirandola" (RSL2).**

$FA_{PGA}$	$SI1-FH_{(0.1-0.5)}$	$SI2-FH_{(0.5-1)}$	$SI3-FH_{(0.5-1.5)}$
1,3	1,4	2,8	2,8

**Tabella 8-5 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della porzione più settentrionale del territorio comunale, situato in corrispondenza di una struttura sinclinalica minore sviluppata immediatamente a nord della anticlinale "Mirandola" (RSL3).**

Le zone suscettibili di instabilità per liquefazione sono distinte da quelle soggette a sola amplificazione locale per mezzo di soprassegno cartografico.

Le "Zone di suscettibilità per liquefazione" sono state derivate dalle "Zone di attenzione per liquefazione" della carta MOPS (v. tavole 4a - 4b, paragrafo 8.4) utilizzando geometrie e indicazioni diverse rispetto a queste ultime, in accordo con gli standard di MS 4.0b (2015).

Le "Zone di suscettibilità per liquefazione" sono state inoltre definite e arealmente suddivise per classi di rischio, sulla base dell'indice del potenziale di liquefazione ( $I_L$ ). Le classi individuate sono riportate in carta mediante l'utilizzo dei retini previsti per le aree a rischio moderato ( $2 < I_L \leq 5$ ), elevato ( $5 < I_L \leq 15$ ) e molto alto ( $I_L > 15$ ). Si ricorda che gli indirizzi di microzonazione nazionale non prevedono che le aree a basso

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

rischio ( $2 < I_L$ ) vengano rappresentate in carta con il retino che contraddistingue le zone instabili per liquefazione, nonostante siano state verificate le condizioni predisponenti il fenomeno. Questo aspetto determina gran parte della mancata corrispondenza tra le “Zone di suscettibilità per liquefazione” e le “Zone di attenzione per liquefazione” della carta MOPS.

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

## 9 Commenti finali e criticità

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

L’amplificazione attesa è stata determinata mediante analisi numeriche di risposta sismica locale, basate su dati stratigrafici e velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) acquisiti in foro sino ad elevate profondità. Le modellazioni e le analisi di risposta sismica locale eseguite per la microzonazione (paragrafo 7.1.1) possono fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni, ma non possono in alcun modo sostituirle. Specifiche analisi di risposta sismica locale devono infatti essere eseguite tenendo conto delle caratteristiche geologico-geotecniche del sito ed in funzione della tipologia del progetto da realizzare, in accordo con le Norme Tecniche per le Costruzioni (2008).

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

Nei paragrafi seguenti viene proposta una sintesi riassuntiva dei principali caratteri geologici ed evolutivi dell’area ed una analisi di come questi ultimi abbiano determinato la stretta correlazione tra rischio

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

liquefazione e insediamento antropico. Infine vengono riepilogati i risultati dello studio condotto e le principali criticità rilevate, anche attraverso il confronto tra quanto prodotto nei precedenti elaborati di microzonazione sismica (cfr. Ordinanza 70/2012).

### 9.1 Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale

La parte inferiore dei corpi indagati è costituita da **sedimenti pleistocenici** di media pianura alluvionale (Figura 9-1), deposti durante fasi dell'ultima glaciazione. La parte più settentrionale dell'area di studio è formata da estesi corpi di sabbie grossolane del Po con Vs anche superiori ai 300 m/s.

La porzione centro-meridionale del territorio è invece costituita da alternanze di sabbie di provenienza appenninica e grossi volumi di limi, con Vs mediamente inferiori alle precedenti, comprese tra 200 e 250 m/sec. La profondità del tetto stratigrafico dei corpi sedimentari singlaciali aumenta verso sud. Questa tendenza diviene molto marcata soprattutto nel settore più meridionale del territorio centese, in direzione dell'asse della sinclinale attiva a causa delle deformazioni indotte dalla subsidenza differenziale.

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

Analogamente ai sedimenti più antichi, anche i **sedimenti post-glaciali** presentano caratteri sensibilmente diversi nella parte meridionale ed in quella settentrionale dell'area di studio. Nei settori centro-meridionali si sviluppa, infatti, una spessa successione di prevalenti limi continentali, con intercalazioni di sabbie e argille di provenienza appenninica (Figura 9-1). Sono presenti importanti livelli di paleosuoli a concrezioni carbonatiche nei quali l'alterazione diagenetica influenza notevolmente i parametri geotecnici e geofisici. Le velocità sismiche tipiche di questa unità superano di poco i 200 m/s, con bruschi incrementi in corrispondenza dei livelli di paleosuolo più evoluti. Nella parte settentrionale dell'area di studio, invece, la successione limosa si assottiglia notevolmente e spessi corpi di sabbie di meandro di Po possono saldarsi direttamente a quelle singlaciali. Tali sedimenti 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 estesi orizzonti di torbe (Figura 9-1) di ambienti di palude continentale. Questi depositi coesivi presentano scarse proprietà geotecniche e sono caratterizzati dai più bassi valori di Vs con minimi inferiori a 100 m/s.

Le ampie paludi furono però nel tempo attraversate da numerosi canali fluviali di Reno, che hanno deposto importanti corpi allungati di sabbie, sabbie limose e limi di riempimento di canale, frequentemente



## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

deltizia e marino marginale ad alimentazione padana. Le coperture quaternarie sono quindi in larga parte costituite di depositi argilloso-limosi alternati a subordinati corpi sabbiosi di alveo.

Questa porzione di territorio in cui si sviluppano gli ambiti urbani di Dodici Morelli, Pilastrello e Molino Albergati è caratterizzata da più alti valori dei fattori di amplificazione in termini di PGA, con **accelerazioni massime attese in superficie pari a 0,23 g.**

- b) **la porzione meridionale** del territorio comunale sviluppata a sud del fascio delle anticlinali ferraresi, sul fianco dell'ampia sinclinale che si approfondisce in direzione di Sala Bolognese. 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. I depositi alluvionali continentali di provenienza appenninica che costituiscono la parte sommitale delle coperture, poggiano infatti su di una potente successione di depositi marini, di prodelta e fronte deltizia ad alimentazione padana. Le coperture quaternarie sono in larga parte formate da fanghi marini e continentali in cui si intercalano subordinati corpi sabbiosi di alveo.

Questa porzione di territorio in cui si sviluppano il centro storico di Cento e gli ambiti urbani di Renazzo Bevilacqua, è caratterizzata da valori minori dei fattori di amplificazione in termini di PGA, con **accelerazioni massime attese in superficie pari a 0,20 g.**

- c) **la porzione settentrionale** del territorio comunale interessata dalla presenza di una sinclinale minore compresa nelle pieghe ferraresi. Anche questa zona è caratterizzata da una spessa successione di coperture sedimentarie. Le successioni quaternarie sono inferiormente dominate da fanghi marini di prodelta e sabbie di fronte deltizio padano a cui si sovrappongono depositi continentali ricchi di apporti di Po e superiormente di Reno ed altri fiumi appenninici. Questa porzione di territorio in cui si sviluppano gli ambiti di Casumaro, Reno Centese e Alberone e Buonacompra è caratterizzata da fattori di amplificazione in termini di PGA **paragonabili a quelli delle aree meridionali con accelerazioni massime attese in superficie pari a 0,20 g.**

Una simile tripartizione del territorio comunale era già stata proposta negli studi di microzonazione sismica realizzati dalla Regione Emilia-Romagna in seguito agli eventi del 2012.

Rispetto agli studi precedenti (cfr. Ordinanza 70/2012), l'estensione delle diverse fasce è stata modificata restringendo quella centrale, caratterizzata da substrato sismico relativamente poco profondo, alla sola area di culminazione della anticlinale.

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Allo stesso modo sono stati rivisti i coefficienti di amplificazione ed i valori di **accelerazione** di picco (PGA) che risultano inferiori a quelli proposti nel suddetto studio, passando rispettivamente da 1,5 ad 1,3 per le aree di sinclinale e da 1,7 a 1,5 per l'area di anticlinale. La rimodulazione dei fattori è stata dettata dai risultati delle risposte sismiche locali, che risultano d'altra parte coerenti con quelli proposti dai nuovi abachi regionali introdotti con la D.G.R. 2193/2015.

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

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

La distribuzione degli indici di liquefazione evidenzia come le **fasce a maggior rischio** siano collocate in **corrispondenza dei paleoalvei o dei corpi da rotta fluviale** sub-affioranti. Queste fasce, formate da sabbie e limi poco addensati di riempimento di canale e argine prossimale (MOPS 30502001, 30502002 e 30502003), mostrano potenziali di liquefazione variabili da alti ( $<5 I_L < 15$ ) a molto alti ( $I_L > 15$ ).

Questa correlazione trova riscontro nei diffusi effetti di liquefazione osservati nel 2012 nell'abitato di Dodici Morelli, che si sviluppa proprio al di sopra di un canale distributore medioevale del Reno. I gradienti topografici, legati alla presenza dei dossi fluviali ed arginali, possono aggravare i rischi connessi alla liquefazione, favorendo l'insorgere di movimenti gravitativi di espansione laterale e franamento cosismico, come verificato nel 2012 nelle località di San Carlo e Mirabello.

**Rischi di liquefazione da molto bassi a nulli** ( $I_L < 2$ ) caratterizzando invece le **aree topograficamente più depresse del territorio comunale**, che non presentano significativi corpi di sabbie nei primi 20 m di sottosuolo, in quanto essenzialmente formate da sedimenti argillosi coesivi, spesso organici, depositi in condizione di palude e depressione interalvea (MOPS 2005 e MOPS 2006). Condizioni di **rischio moderato** si riscontrano invece in **aree interfluviali** sviluppate **tra i canali distributori di Reno**, in cui sono presenti livelli sabbiosi da piena fluviale, nei primi metri di sottosuolo (MOPS 2004).

**Le aree a minor rischio** coincidono, quindi, spesso con le **aree rurali** scarsamente abitate del territorio comunale. Fasce classificate a **rischio liquefazione non significativo** ( $I_L < 2$ ) interessano anche la **porzione settentrionale** del centro storico **di Cento e l'ampia zona industriale a nord di esso**.

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

Raffronti con i preesistenti studi di microzonazione sismica risultano alquanto complessi sia per il numero limitato di verticali precedentemente analizzate, sia per l'utilizzo di differenti metodi semplificati per la stima del potenziale di liquefazione. A questo si deve inoltre aggiunge la riduzione delle accelerazioni di

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

picco utilizzate per il calcolo degli indici di liquefazione, dettata dai risultati delle risposte sismiche locali e peraltro suggerita dai nuovi abachi regionali (D.G.R. 2193/2015).

Gli approfondimenti di terzo livello hanno, infine, permesso la ridefinizione del bedrock sismico sulla base dei risultati delle misure di microtremore e delle velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) acquisite in foro sino ad elevate profondità (Minarelli *et. al.* 2016). Tali misure, correlate con i dati stratigrafici utilizzati per la definizione della sezione Cento – Occhiobello (Allegato 1, sezione G-G'), hanno permesso di porre il substrato sismico in corrispondenza del tetto dei depositi torbiditici di età Pliocenica.

Questa superficie si trova sepolta a profondità assai variabili, con quote minori di 300 metri nella fascia centrale del territorio comunale e profondità di circa 700 metri in quelle meridionali e settentrionali. Tale condizione è stata determinata dalla deformazione tettonica che dal Pliocene ha condizionato l'evoluzione di questo settore della Pianura Padana.

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

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

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

caratteristiche geotecniche e gli insediamenti moderni tendono a svilupparsi intorno ai centri preesistenti e buona parte della rete stradale attuale ripercorre percorsi storici su corpi di paleoalveo.

### 9.4 Indicazioni per la riduzione del rischio sismico

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

In base alle principali criticità emerse dallo studio di microzonazione sismica di terzo livello, si indicano in sintesi le analisi e gli approfondimenti ritenuti necessari per tale scopo, da realizzarsi per gli studi geologici a supporto dei diversi livelli di pianificazione territoriale (POC/PUA) e in fase esecutiva.

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

L'evoluzione del reticolo idrografico del fiume Reno, avvenuta nel tempo attraverso rotte, avulsioni e divagazioni, ha portato ad una distribuzione estremamente eterogenea dei litotipi alluvionali, che nel sottosuolo formano un complesso intreccio di corpi sabbiosi.

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

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

Il calcolo dell'indice di potenziale di liquefazione ( $I_L$ ) dovrà tenere conto dei metodi e dei parametri di input (magnitudo attesa in particolare) utilizzati per lo studio di microzonazione (paragrafo 7.2.1). Scelte meno cautelative andranno di conseguenza adeguatamente motivate dai tecnici incaricati delle verifiche, anche attraverso una approfondita indagine sul contesto idrogeologico locale (indicazione delle soggiacenze minime).

## MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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

Preme sottolineare come, tuttavia, anche le più sofisticate analisi di liquefacibilità risultino 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 contigue, può risultare alquanto incerto e dovranno perciò essere previste indagini di tipologia e numero adeguate all'ampiezza dell'area considerata e alla rilevanza delle opere.

Si ricorda che nelle aree caratterizzate dalla presenza di terreni potenzialmente liquefacibili la definizione dell'azione sismica non potrà avvenire mediante l'adozione delle categorie di sottosuolo, ma, come richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, mediante **analisi di risposta sismica locale**.

A tal proposito si precisa che le modellazioni e le analisi di risposta sismica eseguite per la microzonazione sismica (paragrafo 7.1.1) possono fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle norme tecniche, ma non possono in alcun modo sostituirle.

Le analisi di risposta sismica finalizzate alla definizione dell'azione sismica di progetto devono essere, infatti, realizzate sulla base di dati geologici, geotecnici e geofisici acquisiti nel sito d'interesse ed in funzione delle caratteristiche e della classe d'uso dell'opera da realizzare.

Infine anche nelle aree caratterizzate dalla presenza di spessori significativi di depositi con caratteristiche geotecniche particolarmente scadenti (bassi valori di Cu e alto indice plastico), concentrate in particolare nella microzona 2005 (

Figura 8-1 - tavole 4a e 4b) dovranno essere proposte adeguate campagne di indagini geognostiche in situ e prove geotecniche di laboratorio, per la valutazione e 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>.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

- 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>.
- Boulanger R. W., Idriss I. M., (2014): *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No.  
UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental  
Engineering, University of California, Davis, CA, 134 pp.
- Burrato P., Ciucci F., Valensise G., (2003): *An inventory of river anomalies in the Po Plain, northern Italy:  
evidence for active blind thrust faulting*, Annals of Geophys., 46 (5), 865-882.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

- 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.ferraradeltapo-unesco.it/>.
- Castellaro S., (2012): *H/V: un contributo oltre Vs30*, In: *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*, a cura di Marco Mucciarelli, ARACNE editrice, 448 pp.
- Castellaro S., Mulargia F., (2011): *Seismic soil classification from a different perspective*. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13-15.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C., Amato A., (2006): *CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002*, versione 1.1. INGV-CNT, Roma. <http://csi.rm.ingv.it/>.
- Castiglioni G., Biancotti A., Bondesan M., Cortemiglia G.C., Elimi C., Favero V., Gasperi G., Marchetti G., Orombelli G., Pellegrini G. B., Tellini C., (1999): *Geomorphological map of the Po Plain, Italy, at scale of 1:250.000*. *Earth Surf. Proc. Land.*, 24, 1115-1120.
- Cerrina Feroni A., Ottria G., Martinelli P., Martelli L., Catanzariti R., (2002): *Carta geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo, 1: 250,000*. SELCA, Firenze.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, (2015): *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b*. [http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard MS\\_4\\_0b.pdf](http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard_MS_4_0b.pdf).
- Corrado, S., Aldega, L., Zattin, M., (2010): *Sedimentary vs. tectonic burial and exhumation along the Apennines (Italy)*. *Journal of the Virtual Explorer* 36.
- Correggiari A., Field M.E., Bortoluzzi G., Ligi M., Penitenti D., (1992) - *Ridge and swale morphology on the North Adriatic epicontinental shelf*. *Rapport CIESM* 33:125.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

- 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/ingvdpc2014projetto2/tasks/task-4/d4-1>.
- Di Dio G., Caporale L., (1998): *Un modello fisico tridimensionale della conoide alluvionale del Fiume Reno per la gestione degli acquiferi e lo studio della subsidenza*. In: Geofluid '98 - Problemi di ingegneria: Estrazione di fluidi e subsidenza (a cura di G. Brighenti e E. Mesini), Piacenza, 3 ottobre 1998, 67-76.
- Di Dio G., Molinari F., (2000): *A study of the groundwater resources in the Ferrara Province (Po River Basin, Northern Italy)*. Proceedings of III Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems, 24-27/10/2000. Bavaria, Munich, Germany: 84-86.
- DISS Working Group, (2015): *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0.
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

- Robertson P.K., (2009): *Performance based earthquake design using the CPT*, Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - from case history to practice, IS-Tokyo, June 2009
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), (2016): *CPT15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT15>
- Scognamiglio L., Margheriti L., Mele F.M. Tinti E., Bono A., De Gori P., Lauciani V., Lucente F.P., Mandiello A.G., Marcocci C., Mazza S., Pintore S., Quintiliani M., (2012): *The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations, moment tensors and magnitudes*. Annals of Geophys., **55**(4), 549-556, doi: 10.4401/ag-6159
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, **2**(4), 552-555.
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, 2, 4, pp. 550-555.
- Sonmez H., (2003): *Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey)*. Environ. Geology 44(7), pp. 862-871.
- Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G., (2009): *Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): seismotectonic implications*. Bollettino della Società Geologica Italiana 128.
- Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D., Arango I., Castro G., Christian J.T., Dobry R., Finn W.D.L. Harder L.F., Hynes M.E., Ishihara K., Koester J., Liao S., Marcuson III W.F., Martin G.R., Mitchell J.K., Moriwaki Y., Power M.S., Robertson P.K., Seed R., Stokoe K.H.,: *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF*. Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, October, pp 817-833.

## 11 Allegati

Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000
Carta Geologico – Tecnica per la Microzonazione Sismica	Tavola 2	1:10.000
Carta Geologica di superficie	Tavola 2a	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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CENTO

Carta della velocità delle onde di taglio	Tavola 5	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 6 - $FA_{PGA}$	1:5.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 7 - $FA_{0,1 - 0,5 s}$	1:5.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 8 - $FA_{0,5 - 1,0 s}$	1:5.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 9 - $FA_{0,5 - 1,5 s}$	1:5.000

Allegato 1 - Sezioni Geologiche

Allegato 2 - Rapporti di Prova

Allegato 3 - Verifica Potenziale di Liquefazione CPTU MS