



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 Camposanto



Relazione Illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Geotema S.r.l.	30/10/2018

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

Indice

1	Introduzione.....	4
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi.....	4
1.2	Lo studio di microzonazione sismica	5
1.3	Elaborati prodotti	6
2	Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento	6
2.1	Sismicità storica	8
2.1.1	La sequenza del 2012	10
2.2	Sorgenti sismogenetiche	13
3	Assetto geologico e geomorfologico dell'area	15
3.1	Quadro geografico e geomorfologico	15
3.2	Contesto geologico stratigrafico.....	17
3.3	Contesto strutturale	19
4	Dati geognostici e geofisici	23
4.1	Indagini di repertorio.....	23
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica	25
4.2.1	Indagini realizzate in situ	25
5	Modello del sottosuolo.....	29
5.1	Substrato	31
5.2	Terreni di copertura.....	32
5.2.1	Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI).....	33
5.2.2	Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)	33
6	Interpretazioni e incertezze	35
6.1	Frequenza naturale dei terreni (f_0).....	35
6.2	Terreni suscettibili di liquefazione.....	37
7	Metodologie di elaborazione e risultati.....	38
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali	39
7.1.1	Risposta sismica locale con modellazioni numeriche.....	39
7.2	Zone instabili soggette a liquefazione	48
7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione	49
8	Elaborati cartografici.....	51

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

8.1	Carta delle indagini (Tavola 1)	51
8.2	Carta Geologico Tecnica microzonazione sismica (Tavola 2)	52
8.2.1	Elementi geologici ed idrogeologici.....	52
8.2.2	Terreni di copertura.....	53
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)	54
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4).....	55
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	57
8.6	Carte di microzonazione sismica (Tavole 6, 7, 8, 9).....	58
9	Commenti finali e criticità.....	59
9.1	Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale.....	60
9.2	Indicazioni per la riduzione del rischio sismico	61
10	Bibliografia	63
11	Allegati	71

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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

1 Introduzione

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

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

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

1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

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

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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”;
- PTCP della Provincia di Modena approvato con Delibera del Consiglio Provinciale n. 46 del 18 marzo 2009;
- L.R. n. 19 del 30 ottobre 2008 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- D.M. del 14 gennaio 2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- D.M. del 16 gennaio 2018 “Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- Ordinanza n. 70 del 16 ottobre 2014 del Commissario Delegato Regione Emilia-Romagna “Approvazione programma per gli studi di microzonazione sismica” e relativi elaborati prodotti.

1.2 Lo studio di microzonazione sismica

Come noto le caratteristiche geologiche e geomorfologiche locali possono determinare alterazioni nel moto sismico in superficie ed effetti di instabilità, come frane, liquefazioni o cedimenti innescati dal sisma. La finalità principale dello studio consiste nella suddivisione del territorio indagato in aree omogenee, sia sulla base della risposta sismica dei terreni, sia per quanto concerne i possibili effetti locali indotti dallo scuotimento. In particolare, lo studio di terzo livello ha come finalità l’analisi dell’effettivo grado di pericolosità sismica delle aree riconosciute come instabili e/o potenzialmente instabili.

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

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

Gli ambiti interessati dagli studi di microzonazione sismica sono stati utilizzati i medesimi ambiti individuati negli studi prodotti dalla Regione Emilia-Romagna attraverso l’Ordinanza 70/2012, in accordo con quanto stabilito con l’“Area Tecnica - Ufficio Ambiente” del Comune di Camposanto.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

1.3 Elaborati prodotti

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

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

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

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

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

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

2 Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al proprio assetto tettonico - strutturale, dunque alla presenza di quelle che vengono definite strutture "geologicamente attive". Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio, oltre alle conoscenze legate all'evoluzione delle principali strutture deformative esistenti, risultano fondamentali anche quelle relative alla storia sismica del territorio stesso,

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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 ≥ 5 o magnitudo ≥ 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 ≥ 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;
- 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;

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

- 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 Camposanto 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 Camposanto il database contiene 14 record relativi ad eventi sismici storici (Tabella 2-1 e Figura 2-1). Per ciascun terremoto sono stati quindi riportati i valori di intensità macrosismica (IMCS) osservata nel territorio comunale in occasione degli eventi considerati, l’area epicentrale, il numero di Macro seismic Data Point (NMDP), l’intensità epicentrale (I_0) e la magnitudo momento (M_w) stimata mediante relazioni empiriche. I valori di intensità sono espressi in accordo con la scala Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930), come riportato in Tabella 2-2.

IN OCCASIONE DEL TERREMOTO DEL:										EFFETTI
DATA						AREA EPICENTRALE	NMDP	I_0	M_w	IMCS POGGIO RENATICO
Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se					
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-VI
1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43	IV
1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71	IV
1987	05	08	11	10	2	Bassa modenese	24	6	4.44	VI
1987	07	11	01	46	5	Bassa bolognese	15	5	4.20	V
1988	03	15	12	03	1	Reggiano	160	6	4.57	III
1996	12	16	09	09	5	Pianura emiliana	115	5-6	4.06	NF
1998	02	21	02	21	1	Pianura emiliana	104	5	3.93	NF
2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	5-6	4.40	IV

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

2002	06	08	20	13	0	Frignano	115	4	4.23	III
2002	06	18	22	23	3	Frignano	186	4	4.30	III
2012	05	20	02	03	5	Pianura emiliana	53	7	6.09	VI
2012	05	29	7	00	0	Pianura emiliana	87	7-8	5.90	VI-VII

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

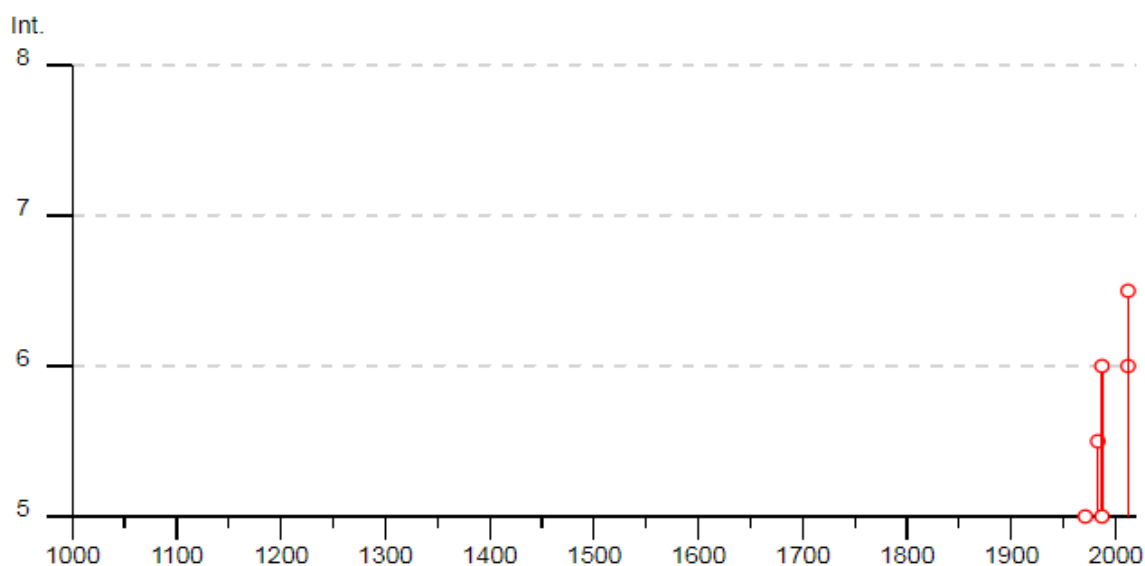


Figura 2-1 - Valori di intensità macrosismica $I_{MCS} \geq 5$ attribuite al Comune di Camposanto, dall'anno 1000 al 2014, tratte dal database DBMI11 (Locati *et al.*, 2016).

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

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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 e 0,175 g, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Figura 2-2).

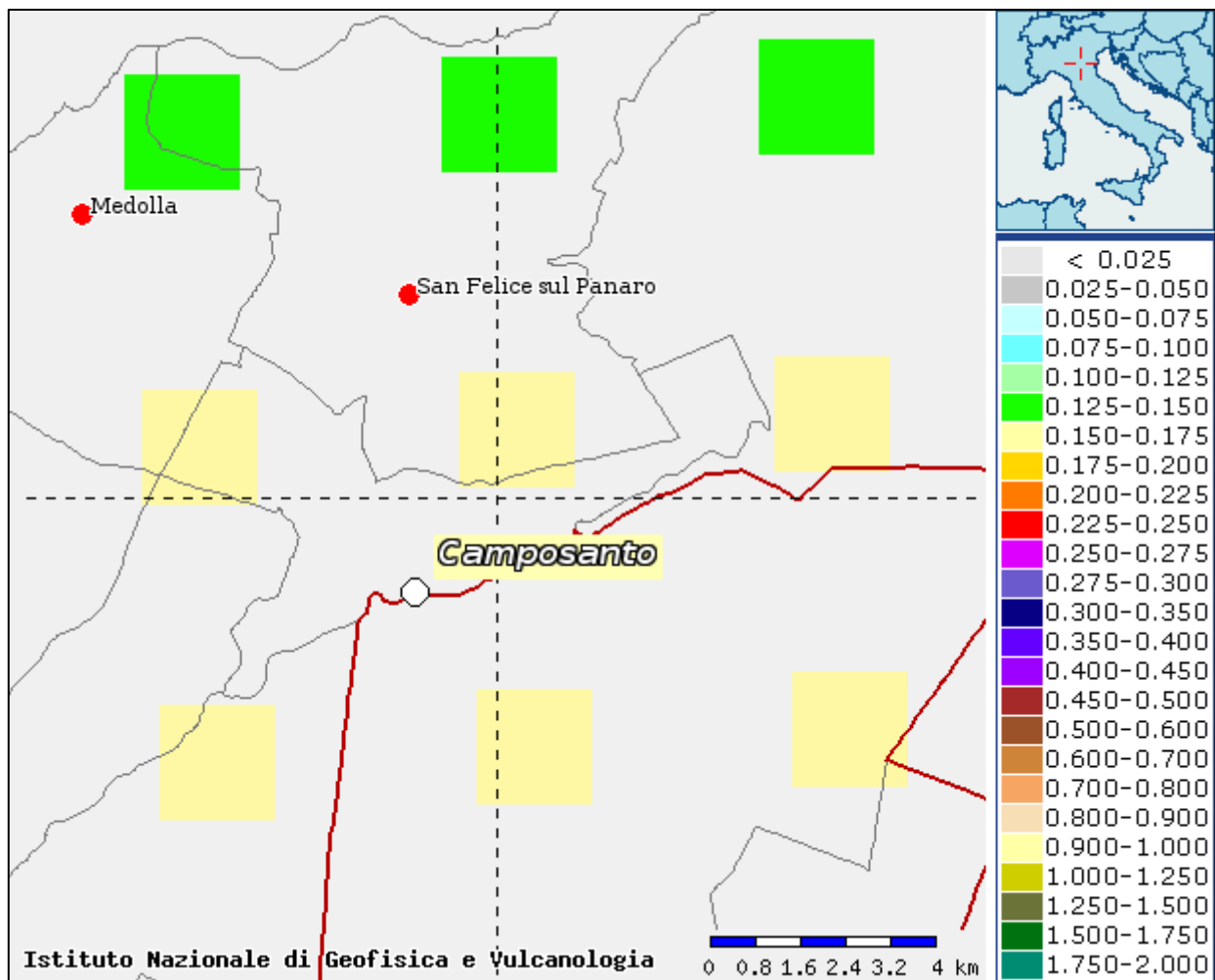


Figura 2-2 - Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento nell'intorno dell'area di studio.

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 2-3), 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 2-3) (Massa *et al.*, 2012).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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 2-3), ed oltre 3.700 scosse di $M_w \geq 1,5$ (Figura 2-3).

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

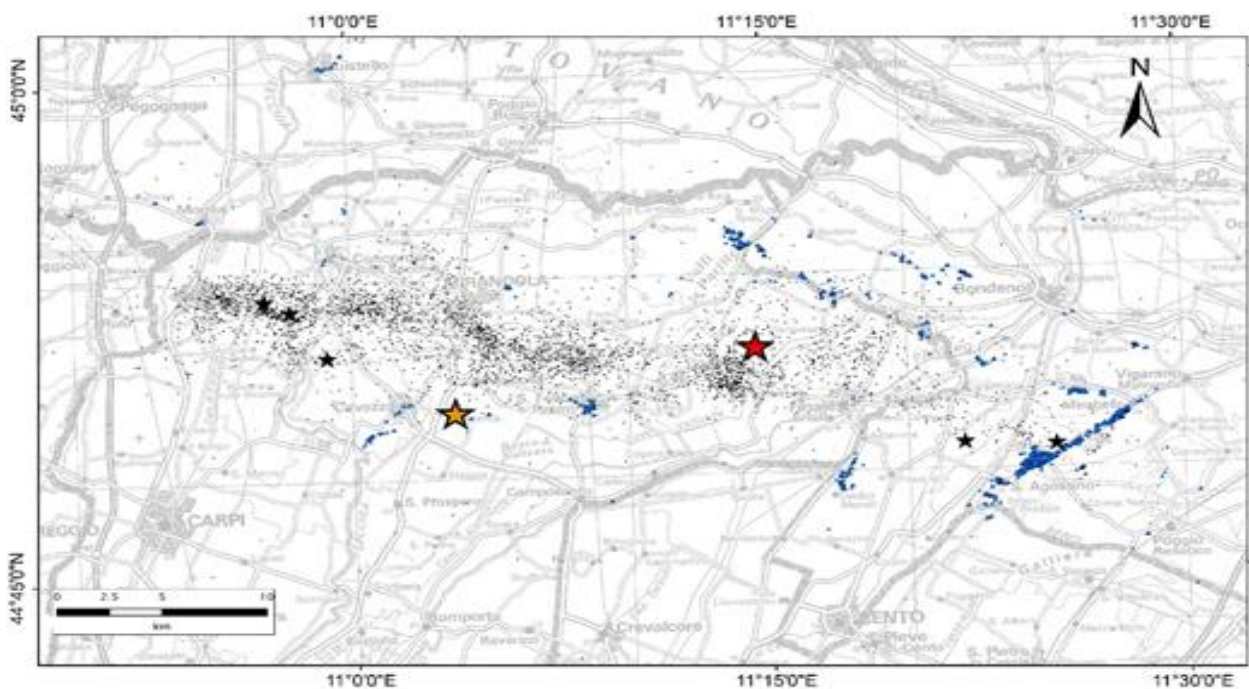


Figura 2-3 - Sequenza sismica emiliana del 2012. Le stelle rossa e arancio rappresentano rispettivamente le scosse del 20 e 29 maggio. Le stelle nere riportano la localizzazione degli *aftershocks* con $M_w \geq 5,0$, mentre i piccoli punti neri indicano gli eventi con $M_w \geq 1,5$. I piccoli punti blu infine evidenziano le liquefazioni osservate (Caputo e Papathanassiou, 2012; Emergeo Working Group, 2012; GdL Liquefazione RER, 2012).

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

I rilievi macrosismici eseguiti immediatamente dopo le scosse (Galli *et al.*, 2012a e 2012b) hanno determinato, per il territorio di Camposanto, valori di intensità macrosismica pari rispettivamente al VI ed al VI-VII grado della Scala MCS, rispettivamente il 20 ed il 29 maggio (Figura 2-4 e Figura 2-5).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

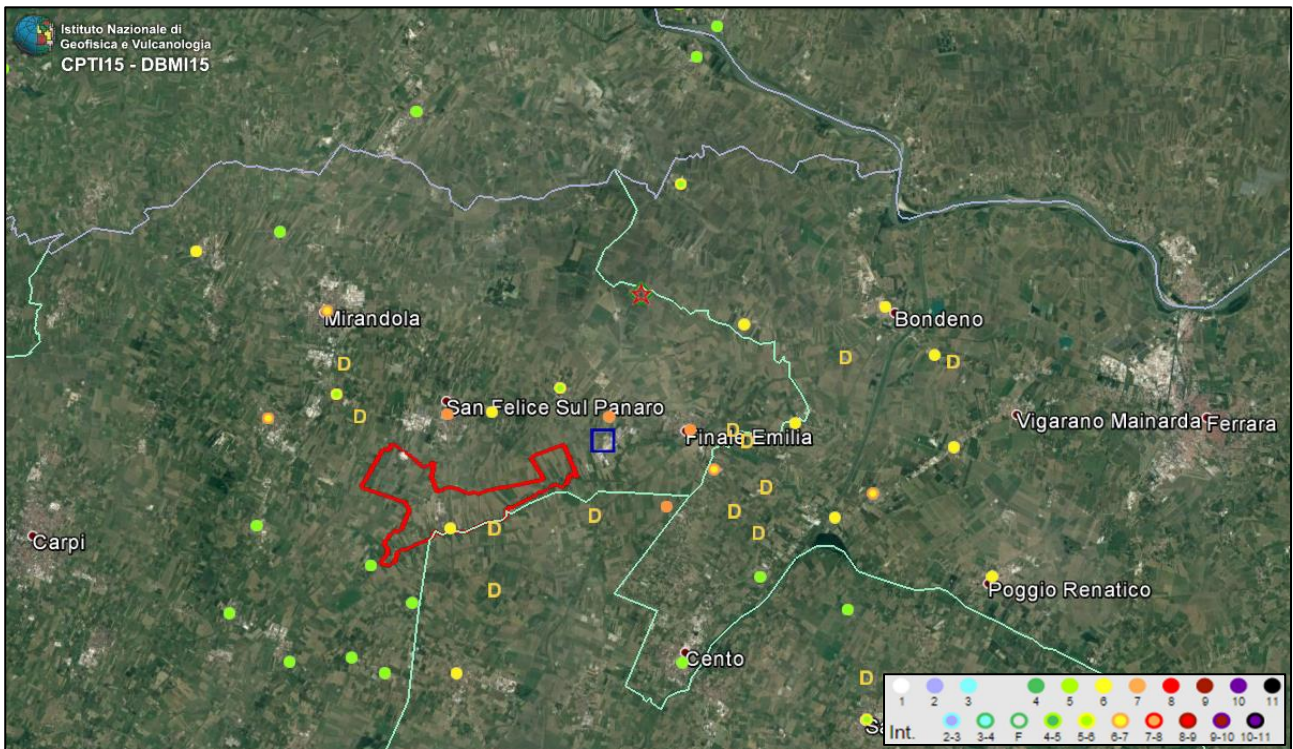


Figura 2-4 - Distribuzione degli effetti del sisma del 20 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentata l'area del Comune di Camposanto.

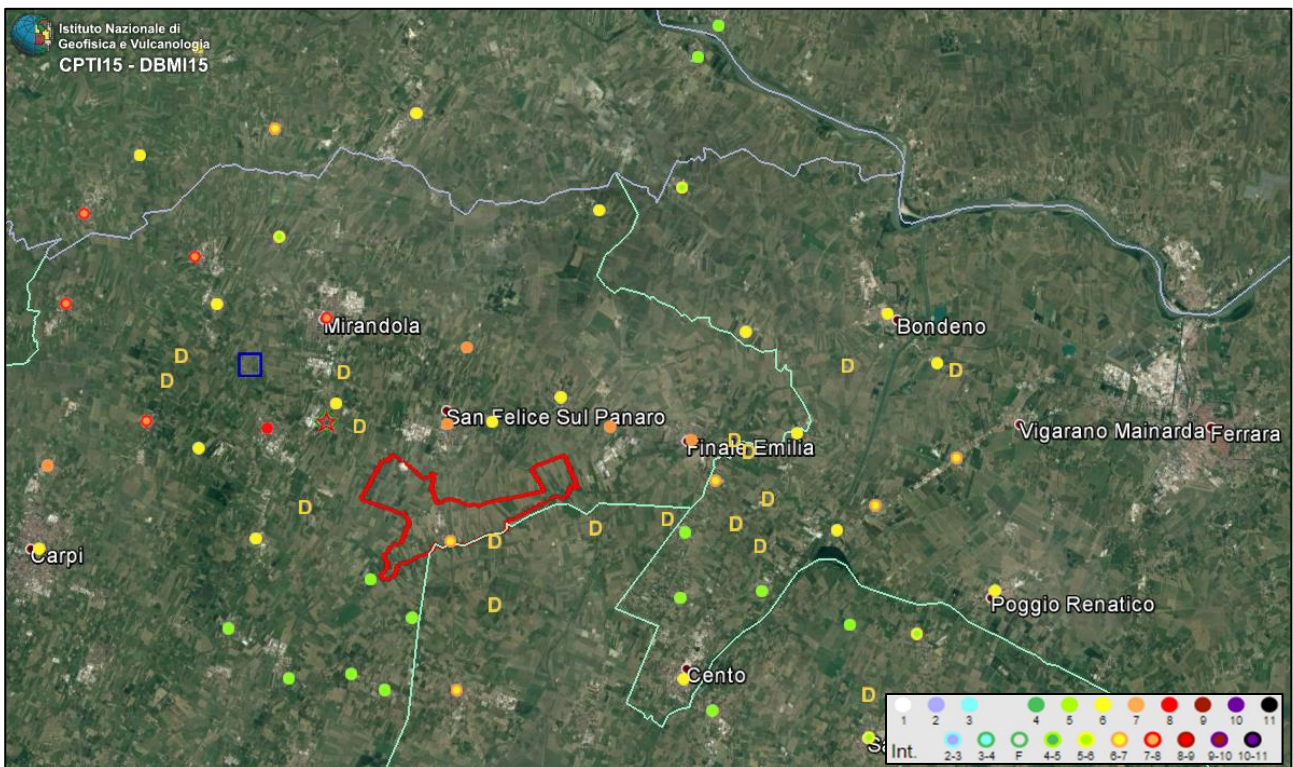


Figura 2-5 - Distribuzione degli effetti del sisma del 29 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentata l'area del Comune di Camposanto.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS Working Group, 2015) mostra come l'intero territorio comunale è interessato dalla presenza della sorgente sismogenetica composta ITCS051 denominata Carpi - Poggio Renatico ed orientata Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest; essa 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 (Figura 2-6).

Immediatamente a nord della sorgente sismogenetica composta ITCS051, è collocata la sorgente sismogenetica composta ITCS103 denominata Finale Emilia - Mirabello anch'essa orientata Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest; essa 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.

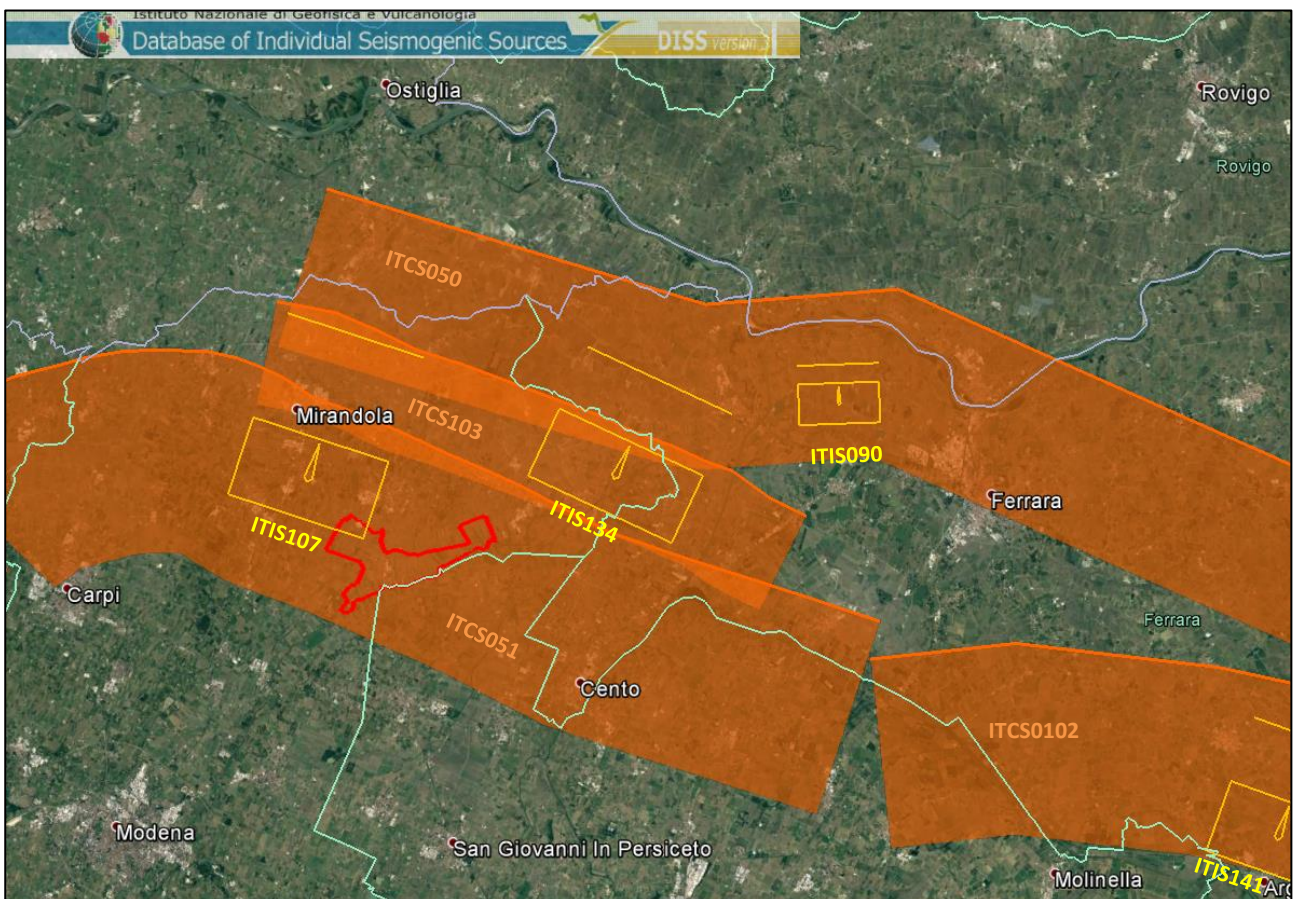


Figura 2-6 - Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) ed individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.2.0, nell'intorno dell'area di studio. In rosso l'area comunale di Camposanto.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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.

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

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, il Comune di Camposanto ricade dentro alla Zona 912 "Dorsale Ferrarese", caratterizzata da un valore di $M_{w_{max}}$ pari a 6,14 (Figura 2-7).

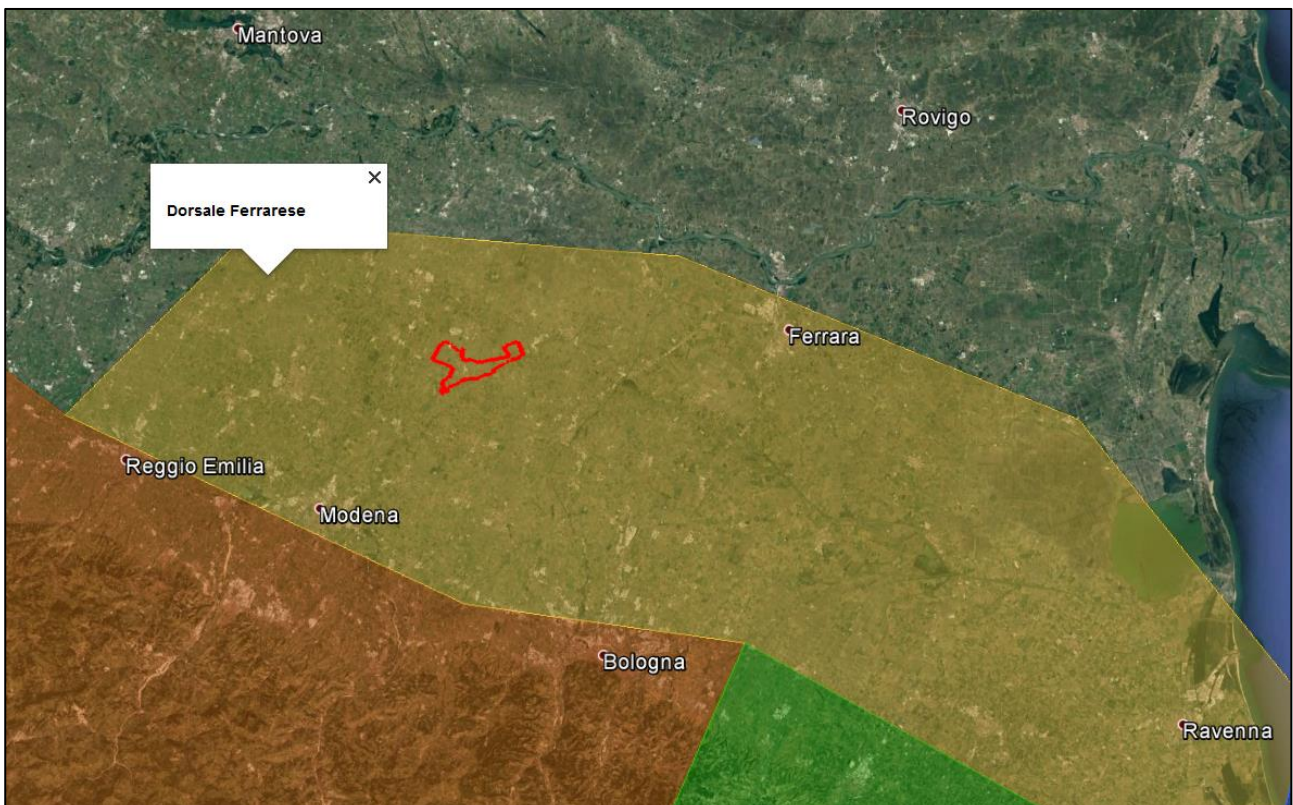


Figura 2-7 - Ubicazione del territorio comunale di Camposanto (in rosso) rispetto alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).

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 Camposanto.

3.1 Quadro geografico e geomorfologico

Il territorio analizzato fa parte della porzione nord-orientale della Provincia di Modena ed è parzialmente limitato a sud dalla Provincia di Bologna. Il Comune di Camposanto si sviluppa in un'area di bassa pianura alluvionale con quote topografiche comprese tra i 21 ed i 14 metri, formata dai depositi dei fiumi Panaro e Secchia accumulati in età storica. Le forme geomorfologiche ed i corpi sedimentari affioranti sono tutti di età recente, in quanto formati in larga parte in età medioevale. La morfologia del territorio è caratterizzata da dossi fluviali e depressioni chiuse interalvee bordate da fasce di argine naturale e ampi ventagli di esondazione. L'area del Comune è in gran parte situata in un'ampia depressione chiusa solcata da un dosso poco rilevato allungato in direzione sud-ovest nord-est. Verso sud il territorio è limitato dall'arginatura artificiale dell'attuale corso del Panaro, ultimo affluente del Po, mentre poco a nord del confine comunale si sviluppa l'ampio dosso del Secchia di prevalente età alto medievale.

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

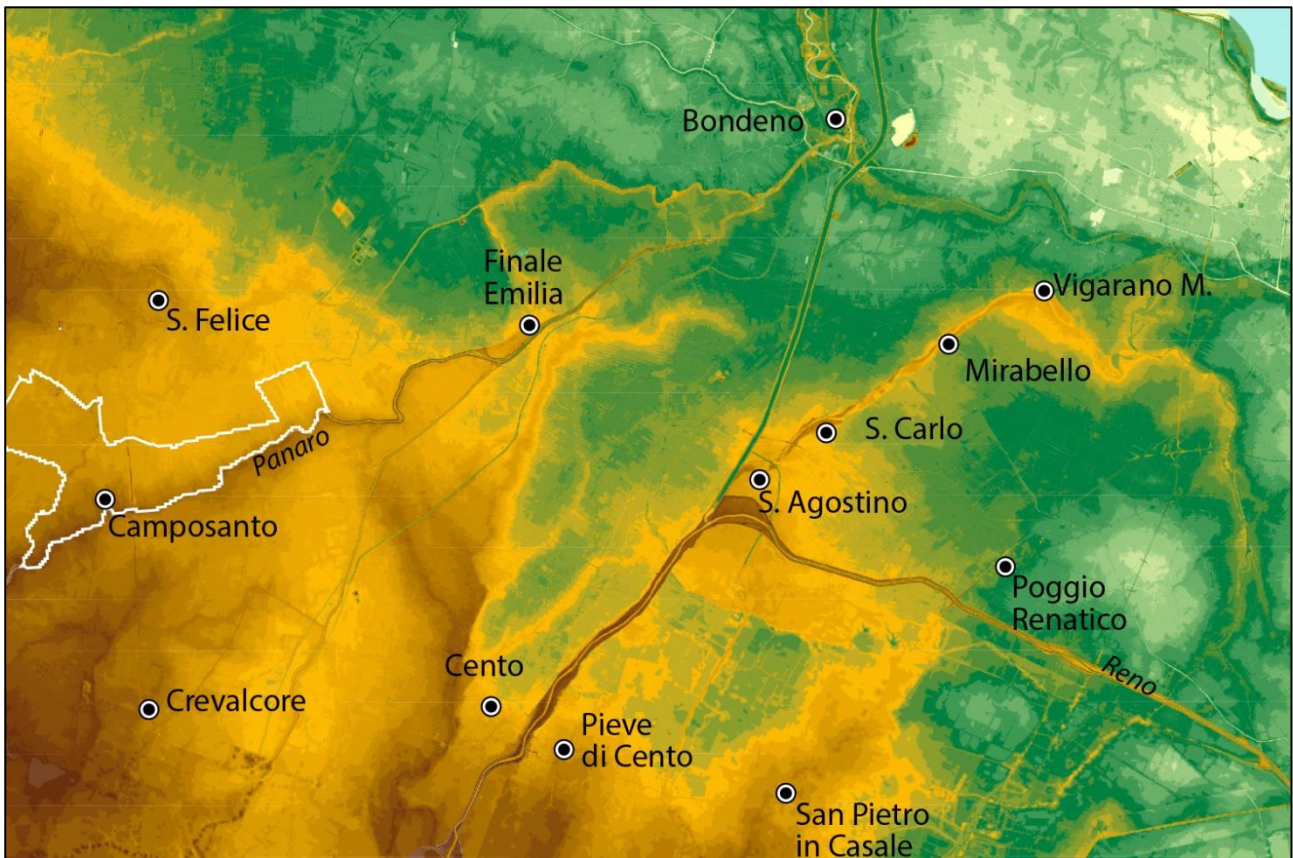


Figura 3-1 - Modello altimetrico LIDAR (dati Regione Emilia-Romagna). Le quote più basse sono rappresentate in verde chiaro, le aree topograficamente più elevate in giallo e marrone. Le quote topografiche dell'area comunale variano fra 21 e 14 m circa. Evidenti appaiono i numerosi dossi del Reno nei pressi di Cento, del Panaro tra Crevalcore e Camposanto e del Secchia ad ovest di San Felice. Ampie depressioni interalvee si sviluppano tra gli accentuati alvei dossivi raggiungendo quote altimetriche particolarmente basse nella zona ferrarese (in verde).

Nel territorio considerato non si osservano forme legate a depositi fluviali di età pre-medioevale, in quanto i sedimenti più antichi sono sempre sepolti nel sottosuolo. I principali caratteri geomorfologici dell'area erano già stati individuati nella Carta Geomorfologica della Pianura Padana 1:250.000 (Castiglioni G.B. Ed. 1999 - Figura 3-2). Nella carta geomorfologica sono riportati sia l'ampio dosso del Secchia che limita a nord l'area di studio, sia il rilevato continuo dell'attuale corso del Panaro già attivo sin dal XV secolo.

Questi corpi racchiudono quasi completamente l'ampia area depressa, delimitata dalla linea verde, in cui ricade parte dell'abitato di Camposanto. L'area interalvea è ben sviluppata e mappata anche ad ovest del dosso del paleaveo bassomedievale del Panaro che attraverso le antiche paludi giungeva a San Felice e proseguiva per Finale Emilia fino alla confluenza con il Po Bondeno (Castaldini e Raimondi 1986).

Il margine settentrionale della depressione interalvea presenta una serie di ventagli da rotta legati all'antico alveo del Secchia.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO



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 sud-orientale della carta si osservano i corpi di riempimento di canale distributore di delta interno del Reno di età medioevale, mentre a sud di Mirandola appare molto evidente il coevo ed ampio dosso del Secchia.

3.2 Contesto geologico stratigrafico

Prima degli eventi sismici del 2012, le conoscenze geologiche disponibili riguardavano esclusivamente la parte meridionale del territorio comunale. Questa area era stata infatti oggetto delle indagini svolte per la realizzazione del foglio geologico 1:50.000 CARG "San Giovanni in Persiceto" e le relative note illustrative.

Dal punto di vista sedimentologico-litologico, l'area studiata risulta suddivisa in due porzioni. La più ampia fascia di sabbie e limi sabbiosi di argine, canale e rotta fluviale è affiancata da argille e argille limose che costituiscono i depositi di tracimazione fluviale e di decantazione caratteristici delle aree più depresse del territorio comunale.

Secondo i criteri stratigrafici adottati dalla cartografia nazionale del Progetto CARG, tutti i sedimenti affioranti nell'area sono riferibili all'Unità di Modena (AES_{8a}), di età post-romana. Questa unità costituisce la parte sommitale del Subsistema di Ravenna (AES₈), inquadrato a sua volta nella parte terminale del

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) (cfr. Note Illustrative Foglio CARG 202 “San Giovanni in Persiceto”).

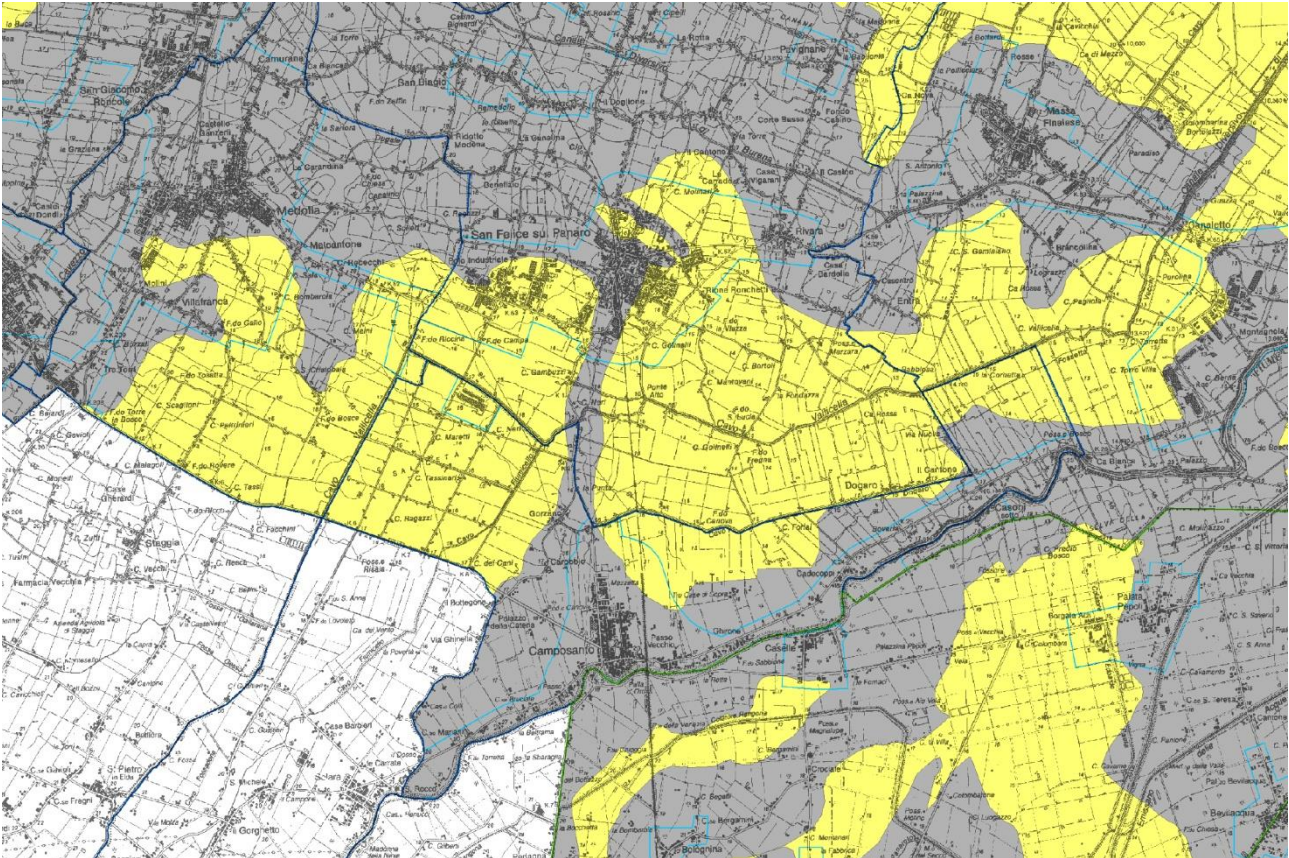


Figura 3-3 - Stralcio della Carta Geologica di superficie (Allegato 1-2, Ordinanza 70/2012) in cui sono visibili fasce allungate di sabbie e limi sabbiosi di argine, canale e rotta fluviale (in grigio) interposte a vaste plaghe di argille e argille limose che costituiscono i depositi di tracimazione fluviale e di decantazione caratteristici delle aree più depresse.

La parte settentrionale del territorio era invece pressoché priva sia di studi stratigrafici di sottosuolo che di cartografia geologica di superficie. Gli studi geologici realizzati durante l'emergenza sismica del 2012 hanno delineato in maniera generale i principali caratteri geologici anche della parte settentrionale dell'area e confermato le indicazioni derivanti dal Progetto CARG realizzato sulla porzione meridionale.

La carta geologica di superficie in scala 1:100.000, allegata allo studio di microzonazione sismica dell'Ordinanza 70/2012, indica infatti come i depositi affioranti siano costituiti da argille e limi organici di palude e piana inondabile, intercalati a corpi di sabbie di canale, argine e rotta fluviale (Figura 3-3).

Recentemente, la conoscenza dei corpi geologici affioranti nelle aree limitrofe è stata notevolmente migliorata e meglio inquadrata nel contesto geologico regionale, grazie alla realizzazione di nuove mappe geologiche a supporto degli studi di Microzonazione Sismica di Mirandola, Cavezzo, Crevalcore e dell'Alto Ferrarese.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

3.3 Contesto strutturale

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

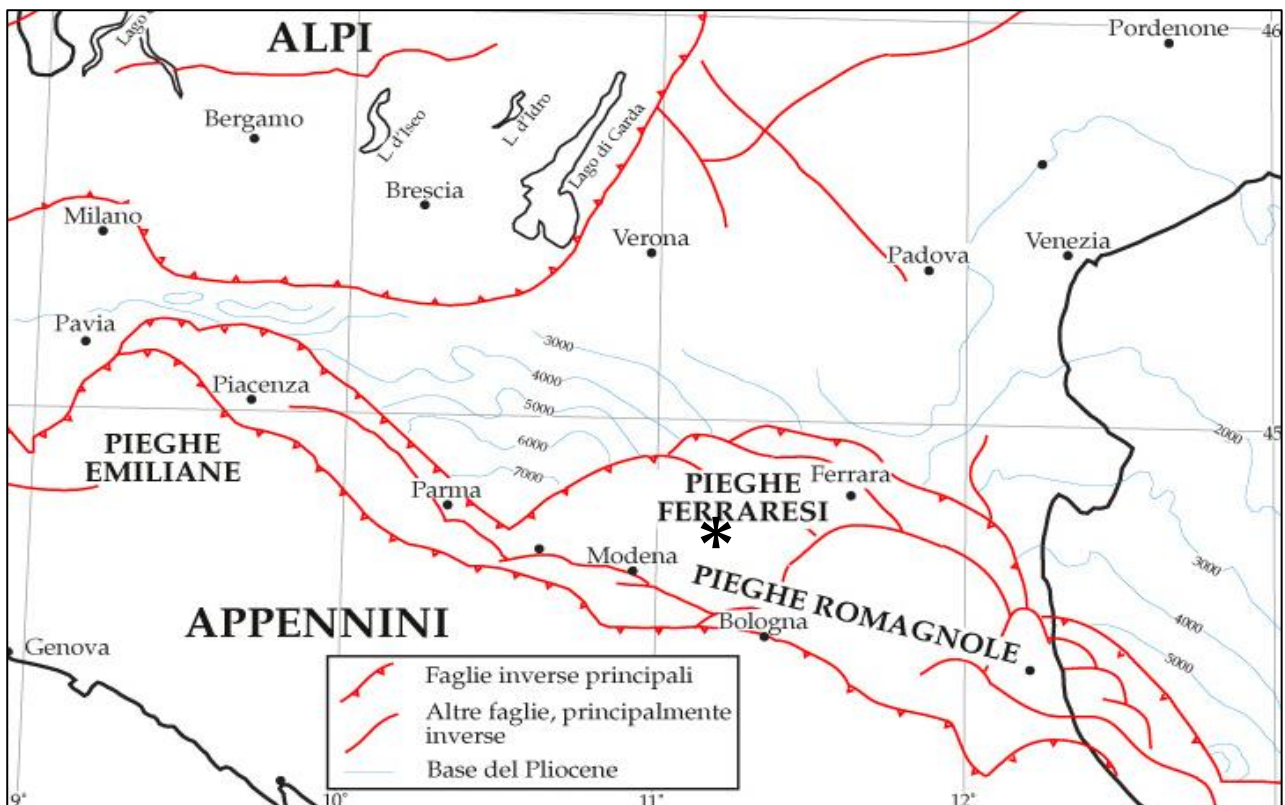


Figura 3-4 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana centro-orientale (Modificata da Burrato *et al.*, 2003, da Pieri e Groppi, 1975). L'area analizzata si trova nella parte meridionale del fascio di pieghe ferraresi.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

L'arco orientale può essere suddiviso in tre strutture minori dette "Pieghie Ferraresi", "Pieghie Romagnole" e "Pieghie Adriatiche" (Bigi *et al.*, 1990). Le Pieghie Ferraresi (Dorsale Ferrarese o "Ferrara Folds" in Pieri e Groppi, 1981) rappresentano le strutture più settentrionali, che si estendono tra Reggio Emilia e la costa adriatica (Figura 3-4, Figura 3-5), spingendosi a nord del Po tra Occhiobello e Ferrara (Bigi *et al.*, 1990).

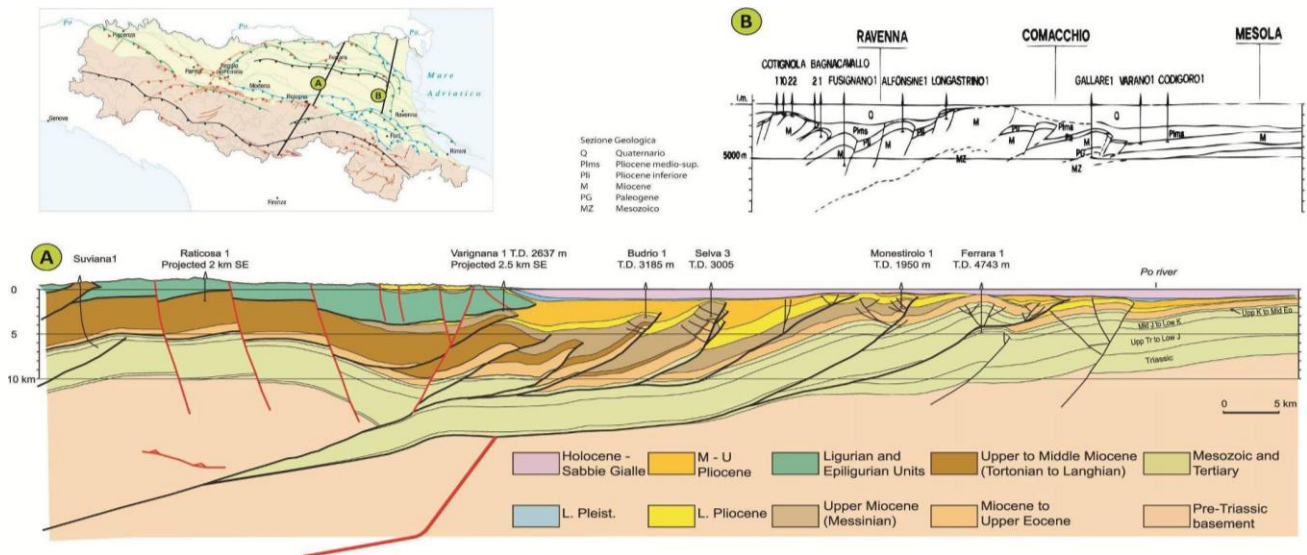


Figura 3-5 - Contesto strutturale della porzione emiliano-romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) deriva da Pieri e Groppi, 1981, mentre la sezione inferiore è presa (A) da Toscani *et al.*, 2009.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

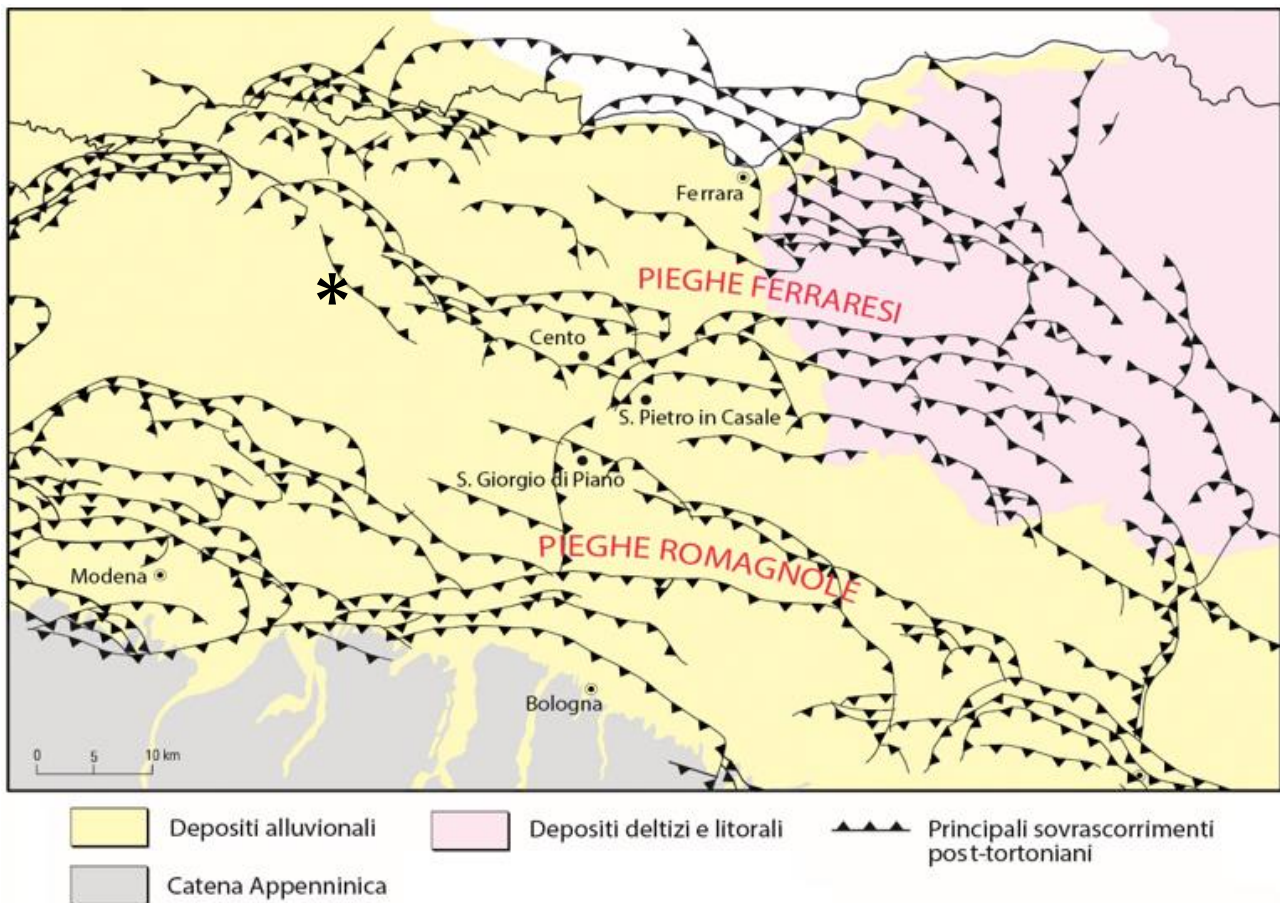


Figura 3-6 - Inquadramento delle strutture tettoniche sepolte, che illustra la complessità dell'arco delle Pieghe Romagnole e Ferraresi. I colori illustrano i caratteri delle unità geologiche affioranti. Modificato dalle Note Illustrative del Foglio CARG 203, Poggio Renatico. L'area analizzata si sviluppa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

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

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 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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

Molinari, 2000). Questo andamento è evidente anche dalle grandi 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 450.000 anni circa (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998) mostra spessori che variano da meno di 90 m in corrispondenza della culminazione dell'Anticlinale di Mirandola, 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. L'area di Camposanto è situata nella porzione più settentrionale dell'ampia sinclinale di San Giovanni in Persiceto, mentre il confine settentrionale si trova nei pressi di un importante retroscorrimento sepolto che limita l'alto strutturale di Mirandola.

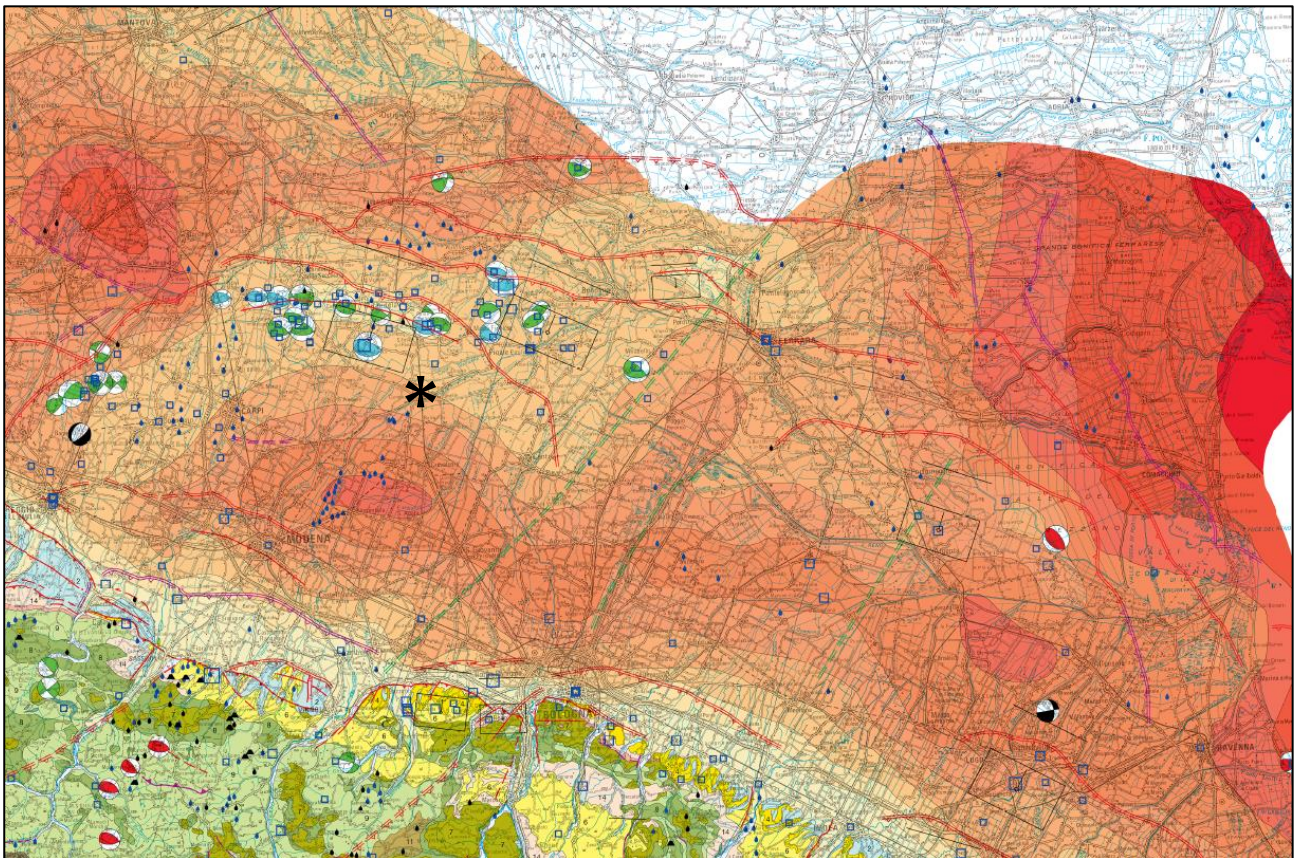


Figura 3-7 - Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017). L'area analizzata è indicata dall'asterisco.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

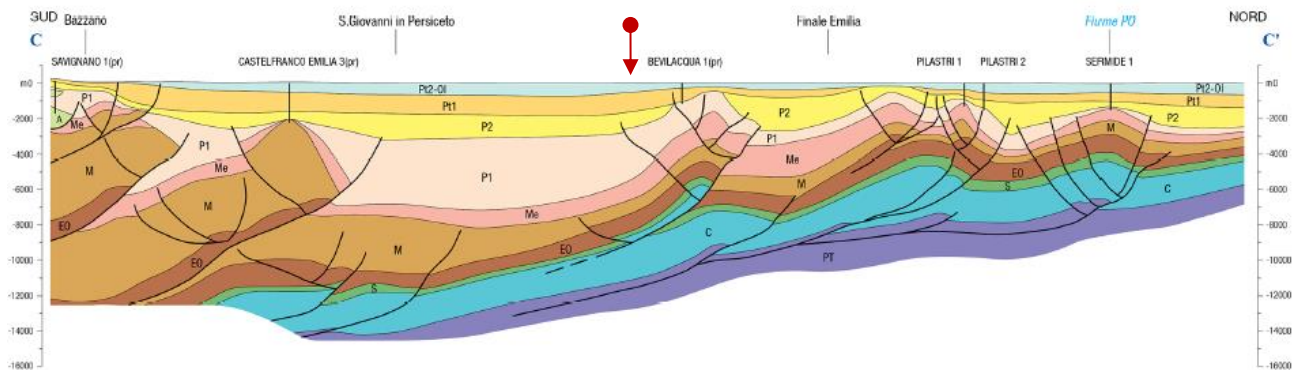


Figura 3-8 - Sezione geologica profonda C - C', da Bazzano (BO) al Po. Fonte: Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017). L'area indicata è approssimativamente indicata dalla freccia rossa.

4 Dati geognostici e geofisici

Per quanto concerne i metodi di analisi diretta del sottosuolo sono state esaminate le stratigrafie provenienti sia da sondaggi a carotaggio continuo, sia da pozzi per acqua 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 alla tipologia e profondità del substrato.

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

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

4.1 Indagini di repertorio

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

Nel complesso si sono potute utilizzare ai fini della microzonazione sismica ben 378 prove pregresse di buona affidabilità, suddivise per numero e tipologia così come riportato in Tabella 4-1.

Da ultimo sono stati considerati dati di sottosuolo di altri Comuni, ubicati in prossimità del confine amministrativo. Tali dati, non riportati in carta, hanno permesso di aumentare le conoscenze geologiche e

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

meglio definire geometrie e limiti sia dei corpi deposizionali cartografati sia delle aree a diverso rischio liquefazione lungo le fasce di confine.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
Sondaggi a carotaggio continuo	S	6
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)	CPT	241
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	CPT E	2
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPT U	26
Pozzi per acqua	PA	9
Prove sismiche in foro tipo Downhole	DH	1
Prove penetrometriche con cono sismico	SCPT	11
Stazioni microtremori a stazione singola	HVSR	29
Array sismici, ESAC/SPAC	ESAC_SPAC	1
Multi-channel Analysis of Surface Waves	MASW	52
	TOTALE	378

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

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

La distribuzione delle indagini geognostiche pregresse ha permesso la ricostruzione del quadro litostratigrafico generale e ha consentito una buona correlabilità dei corpi geologici sepolti più accurata all'interno del centro abitato di Camposanto.

La buona disponibilità di indagini geofisiche, come SCPT e MASW, ha consentito di definire adeguatamente le variazioni di Vs30 alla scala dell'intero territorio indagato.

Infine, la dubbia affidabilità e qualità delle indagini di microtremore sismico recuperate dagli archivi pubblici, non consente di avere una chiara indicazione dei valori di frequenza fondamentale presenti all'interno degli ambiti di studio.

4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

A supporto degli studi di microzonazione sismica del Comune di Camposanto è stato necessario realizzare una campagna specifica di 24 indagini di microtremore sismico con lo scopo di meglio caratterizzare dal punto di vista delle frequenze di risonanza i terreni presenti nelle aree indicate come suscettibili di trasformazioni urbanistiche e negli ambiti urbani consolidati. Sono state inoltre realizzate 5 nuove prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU) per meglio definire i caratteri geotecnici delle aree al di fuori del centro urbano.

In Tabella 4-2 si riporta una sintesi delle indagini realizzate, 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	5
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	24
	TOTALE	29

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 (qc) ed attrito laterale (fs) prodotto da una punta conica spinta nel terreno a velocità costante.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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 -CPLSD 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 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 i siti riportati in Tabella 4-3.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.
CPTU1	036004P350CPTU362	44,794071°	11,134987°	Via San Felice	28/06/2017	20 m	2,50 m
CPTU2	036004P351CPTU363	44,798176°	11,178334°	Strada Provinciale 2	03/07/2017	20 m	3,40 m
CPTU3	036004P352CPTU364	44,788517°	11,133027°	Via Paolo Borsellino	28/06/2017	20 m	2,40 m
CPTU4	036004P353CPTU365	44,787890°	11,148051°	Strada Provinciale 2	03/07/2017	20 m	2,30 m
CPTU5	036004P354CPTU366	44,783231°	11,126638°	Via Panaria ovest	03/07/2017	20 m	2.50 m

Tabella 4-3 - Sintesi dei dati principali associati alle 5 indagini penetrometriche CPTU eseguite.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

4.2.1.2 Misure di microtremore a stazione singola (HVSr)

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

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

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

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

Le 24 misure tromografiche realizzate a supporto dello studio di microzonazione sismica (Tabella 4-4) sono state eseguite con tromografi digitali "Tromino" modello Studio e modello Engy, tecnicamente equivalenti in relazione al tipo di misura richiesta. Per confermare l'analoga risposta dei due strumenti ed effettuare una taratura reciproca, sono state realizzate 2 coppie di misure, in cui gli strumenti sono stati posti a circa 7 metri di distanza l'uno dall'altro. Tutti i punti di misura sono stati georiferiti tramite GPS con precisione variabile tra 2 e 3 m.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata generalmente con frequenza di campionamento di 128 Hz e con tempo di singola registrazione pari a 30 minuti.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

In Tabella 4-4 sono riportati i principali dati associati a ciascuna delle 24 misure di microtremore realizzate per lo studio di microzonazione. Alcune acquisizioni sono state scartate e ripetute, in quanto soggette ad evidenti disturbi di natura antropica che ne hanno pregiudicato l'interpretazione.

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

PROVA	ID_SPU	DATA	F0	A0	DURATA	lat WGS84	long WGS84
HVSR01	036004P326HVSR338	14/06/2017	0.63	2.4	30 min	44.8189	11.1174
HVSR02	036004P327HVSR339	14/06/2017	0.70	2.4	30 min	44.8117	11.2164
HVSR03	036004P328HVSR340	14/06/2017	0.72	2.1	30 min	44.8092	11.2110
HVSR04	036004P329HVSR341	14/06/2017	0.66	2.4	30 min	44.8100	11.2022
HVSR05	036004P330HVSR342	14/06/2017	0.73	1.9	30 min	44.8077	11.1974
HVSR06	036004P331HVSR343	14/06/2017	0.63	2.3	30 min	44.8077	11.1974
HVSR07	036004P332HVSR344	14/06/2017	0.81	1.9	30 min	44.8019	11.1885
HVSR08	036004P333HVSR345	14/06/2017	0.78	1.9	30 min	44.8005	11.1822
HVSR09	036004P334HVSR346	14/06/2017	1.11	1.7	30 min	44.7964	11.1762
HVSR10	036004P335HVSR347	14/06/2017	0.86	2.0	30 min	44.7942	11.1709
HVSR12	036004P336HVSR348	14/06/2017	0.70	2.3	30 min	44.7840	11.1262
HVSR13	036004P337HVSR349	14/06/2017	0.81	2.3	30 min	44.7959	11.1404
HVSR14	036004P338HVSR350	14/06/2017	0.63	2.9	30 min	44.7920	11.1381
HVSR15	036004P339HVSR351	14/06/2017	0.83	2.7	30 min	44.7880	11.1363
HVSR16	036004P340HVSR352	14/06/2017	0.78	1.8	30 min	44.8005	11.1369
HVSR17A	036004P341HVSR353	14/06/2017	0.82	1.7	30 min	44.7957	11.1338
HVSR17B	036004P342HVSR354	14/06/2017	0.86	1.9	30 min	44.7956	11.1339
HVSR18	036004P343HVSR355	14/06/2017	0.84	2.4	30 min	44.7919	11.1320
HVSR19	036004P344HVSR356	14/06/2017	0.84	1.8	30 min	44.7781	11.1093
HVSR20	036004P345HVSR357	14/06/2017	0.67	1.8	30 min	44.7800	11.1130
HVSR21	036004P346HVSR358	14/06/2017	0.63	2.1	30 min	44.7811	11.1208
HVSR22	036004P347HVSR359	14/06/2017	0.83	1.5	30 min	44.8227	11.1107
HVSR23A	036004P348HVSR360	14/06/2017	0.72	1.9	30 min	44.8042	11.1628
HVSR23B	036004P349HVSR361	14/06/2017	0.74	2.0	30 min	44.8042	11.1629

f_0 = Frequenza naturale

A_0 = Ampiezza del picco di f_0

Tabella 4-4 - Principali dati associati alle 24 misure di microtremore a stazione singola HVSR di nuova esecuzione.

5 Modello del sottosuolo

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

Le unità quaternarie sono caratterizzate da un progressivo aumento della rigidità e della velocità di propagazione delle onde sismiche, causata da fenomeni come il costipamento e parziale cementazione dei sedimenti granulari ed il consolidamento dei litotipi coesivi, legato all'espulsione di fluidi come acqua e metano biogenico. L'aumento della rigidità nel sottosuolo si attua in modo progressivo, ma non spazialmente uniforme. Le superfici di non deposizione e discordanza stratigrafica corrispondano infatti a bruschi aumenti di rigidità, come dimostrano le misure di Vs eseguite in pozzo, anche a grandi profondità, nell'ambito di precedenti studi di microzonazione sismica (cfr. Ordinanza 70/2012, Minarelli *et al.* 2016). Tali superfici corrispondono spesso ai limiti disconformi fra Sintemi e Subsintemi, nonché a riflettori sismici che marcano il passaggio tra unità sismo-stratigrafiche.

Per l'individuazione delle profondità dei limiti discordanti e per la loro classificazione in termini sismici sono spesso utilizzati metodi geofisici.

Nell'ambito del Progetto di Ricerca Europeo "Liquefact" sono stati recentemente realizzati sia array sismici passivi, che utilizzano le vibrazioni antropiche e naturali presenti nel terreno, sia linee sismiche a riflessione che impiegano sorgenti artificiali controllate (Petronio *et al.* 2018).

Queste indagini, eseguite nell'area di Cavezzo da INGV di Milano e OGS di Trieste, hanno fornito profili di velocità profondi e indicazioni sui principali contatti d'impedenza presenti nel sottosuolo (<http://www.liquefact.eu/2018/03/28/updates-from-wp2-european-liquefaction-hazard-map-and-methodology-for-localized-assessment-of-liquefaction-potential>).

Il contesto geologico e strutturale suggerisce come il sottosuolo di Cavezzo presenti forti analogie con quello di Camposanto e che quindi sia possibile estrapolare i risultati ottenuti nell'ambito del Progetto Europeo al territorio di Camposanto.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

L'area di Camposanto è stata però soggetta a tassi di subsidenza maggiori rispetto a quella di Cavezzo. I corrispondenti corpi stratigrafici presentano quindi spessori maggiori e le relative superfici stratigrafiche risultano sepolte a profondità superiori.

Al fine di riconoscere i principali contrasti di impedenza nell'area di Camposanto, sono state realizzate misure di microtremore sismico che hanno permesso di ricostruire la variazione del rapporto tra le componenti orizzontali e verticali (H/V) alle diverse frequenze.

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

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

Questo limite stratigrafico, come dettagliato al paragrafo 5.2.2 e 6.1, corrisponde al tetto del Sintema Emiliano Romagnolo Inferiore "AEI" che nel territorio in esame varia tra i 150 e 125 m di profondità.

I dati di velocità delle onde di taglio disponibili (Petronio *et al.* 2018, Minarelli *et al.* 2016) mostrano come a tali profondità i valori di V_s siano ancora inferiori a 500 m/s, quindi non compatibili con quelli caratterizzanti il "bedrock sismico" di riferimento per le analisi di risposta sismica locale.

Il substrato sismico deve quindi essere ricercato a profondità più elevate a cui dovrebbe corrispondere un picco a più bassa frequenza e un più marcato aumento di velocità delle onde sismiche.

Sulla base degli studi disponibili (Petronio *et al.* 2018) e dei dati noti sul contesto stratigrafico appare plausibile porre il substrato sismico in corrispondenza del tetto dei depositi del Quaternario Marino (QM).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

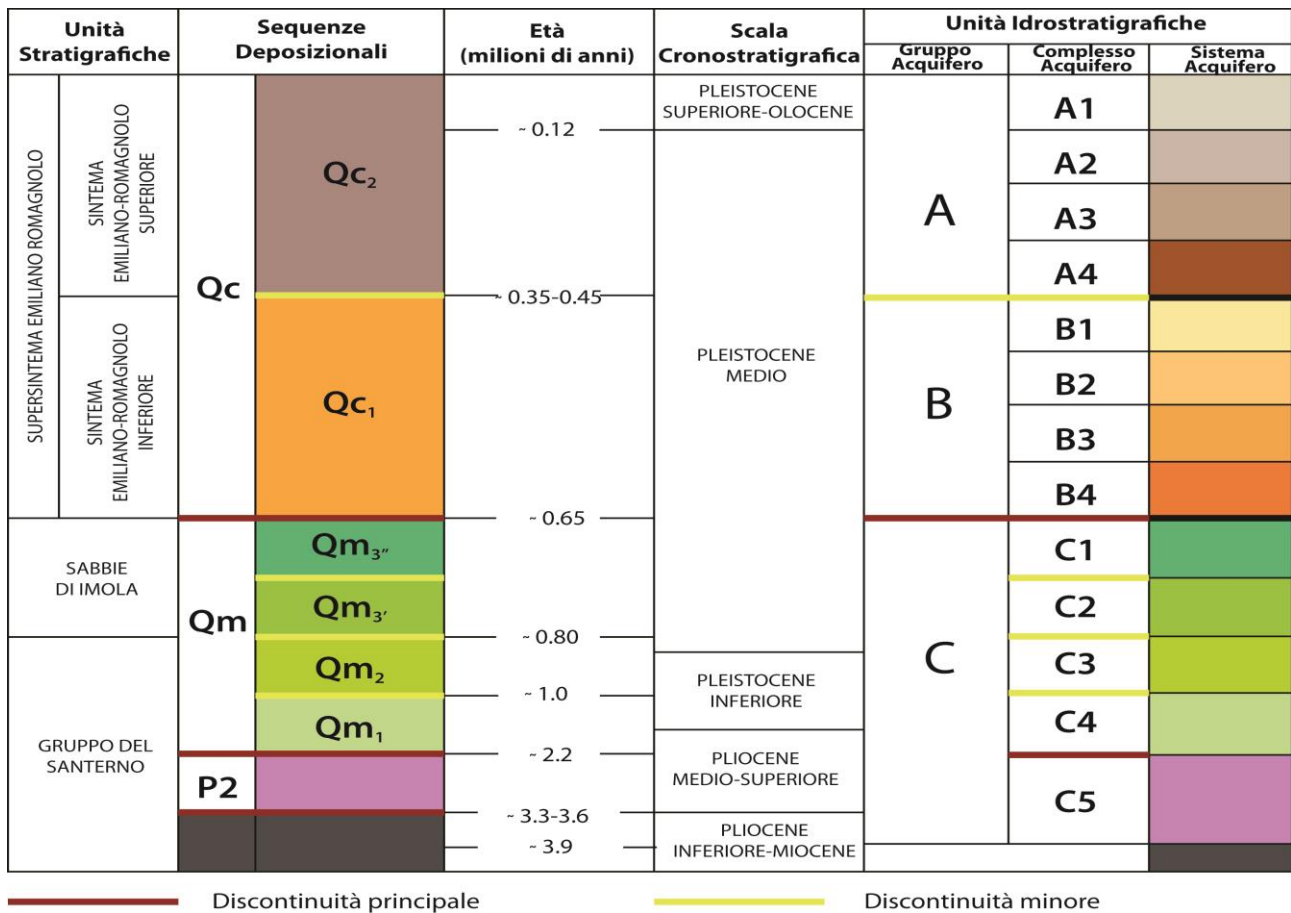


Figura 5-1 - Schema stratigrafico dei depositi plio-quadernari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche e superfici di discontinuità, sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche (da Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

5.1 Substrato

Con il termine “substrato” sono qui definite tutte le successioni sottostanti il Supersistema Emiliano-Romagnolo. Sopra i depositi prevalentemente carbonatici mesozoici e paleogenici, poggiano le potenti successioni in gran parte terrigene del Neogene. Queste ultime sono qui costituite sin dal Miocene superiore da spesse unità torbiditiche il cui accumulo continuò per tutto il Pliocene e nel Pleistocene inferiore.

Le unità plioceniche sono state progressivamente coinvolte nella rapida deformazione tettonica compressiva di questa porzione dell’Avanfossa appenninica che ne ha fortemente influenzato spessori e ambienti deposizionali.

Questi movimenti hanno indotto diffuse superfici di discordanza stratigrafica e lacuna, legate a periodi di non deposizione o erosione (Ghielmi *et al.*, 2010). Lacune e discordanze, anche angolari, sono

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

particolarmente diffuse nelle aree corrispondenti ad anticlinali sepolte, come nel fascio passate poco a nord dell'area di studio che da Mirandola si sviluppa verso Renazzo e Dosso.

A sud della struttura anticlinale si estende l'ampia e profonda sinclinale che comprende gran parte del territorio di Camposanto e si sviluppa fino alla zona depocentrale nei pressi di San Giovanni Persiceto.

Nell'area di sinclinale considerata, nel corso del Pleistocene la rapida progradazione dei sistemi deposizionali ha indotto una evoluzione marcatamente *shallowing*. La sedimentazione torbiditica di mare profondo fu quindi sostituita dall'accumulo di fanghi di prodelta passanti superiormente sabbie di fronte deltizio ad alimentazione padano-appenninica.

Queste potenti successioni, inquadrare nell'unità stratigrafica del Quaternario Marino, si sono deposte nella prosecuzione occidentale dell'antico Mare Adriatico, soggetta a forte subsidenza ed apporto sedimentario.

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

Questa discordanza, che corrisponde ad un significativo riflettore sismico (Petronio *et al.* 2018), viene proposta come il tetto del substrato sismico.

5.2 Terreni di copertura

La porzione medio-superiore della successione quaternaria è formata da sedimenti non litificati, attribuibili in base alle proprietà elasto-meccaniche e alla posizione stratigrafica ai "terreni di copertura" (cfr. parte introduttiva capitolo 5).

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

La discordanza regionale sopradescritta è stata scelta come limite inferiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo, formato, in questa area, da depositi fluviali continentali, intercalati inferiormente da livelli marini, costieri o salmastri, maggiormente sviluppati verso est. Il Supersistema Emiliano-Romagnolo registra la prosecuzione di un'evoluzione complessivamente regressiva, che porta da condizioni marine alle attuali condizioni francamente continentali. Nell'area indagata, il Supersistema si è accumulato nella fascia di interazione fra i sedimenti di provenienza appenninica e quelli del Po. Nel tempo geologico, il fronte dei sedimenti di provenienza appenninica è migrato verso nord e nord-est, a discapito di quelli padani.

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è formato da ripetute alternanze di livelli dominati da sedimenti granulari sabbiosi ed altri ricchi di sedimenti fini. Questa alternanza è stata fortemente influenzata dal

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

susseguirsi di fasi glaciali ed interglaciali. Le fasi glaciali sono registrate da depositi fluviali di pianura alluvionale fredda, con granulometrie marcatamente più grossolane di quelle delle fasi interglaciali. Le fasi di massima trasgressione sono caratterizzate da influenze marine, qui sviluppate soprattutto nella parte inferiore del Supersintema.

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

5.2.1 Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI)

La porzione inferiore del Supersintema Emiliano-Romagnolo è la meno conosciuta, dato che, nell'area di studio, essa non è raggiunta da nessuno carotaggio stratigrafico di buona qualità. Le rare informazioni a disposizione derivano quindi solo dalle scarse descrizioni di pozzi per acqua profondi, non sempre affidabili, e da logs elettrici realizzati in vecchi pozzi terebrati per la ricerca di idrocarburi, oltre che da profili sismici. L'integrazione dei dati disponibili, all'interno del quadro stratigrafico regionale ha comunque permesso di ricostruire i caratteri generali dell'unità. Nel territorio considerato questo intervallo presenta spessori di oltre 130 m, mentre raggiunge i 200 m nell'area depocentrale meridionale, in corrispondenza dell'asse della sinclinale di San Giovanni in Persiceto, riducendosi a circa 60 m in corrispondenza della culminazione anticlinale della struttura di Mirandola, nei pressi di Dosso. L'unità presenta alternanze di unità fini e corpi sabbiosi, che sembrano registrare l'alternanza fra sedimenti di pianura alluvionale e depositi marino-deltizi, verosimilmente di provenienza padana. Il tetto dell'unità corrisponde ad una superficie di discordanza e non deposizione, associata alla scomparsa di influenze marine e allo spostamento verso nord della fascia deposizionale del Fiume Po.

5.2.2 Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è organizzato in cinque cicli deposizionali trasgressivo-regressivi, con uno spessore di circa 30-35 metri ciascuno, in corrispondenza delle aree di sinclinale come quella di Camposanto. Lo sviluppo di questi cicli sedimentari, in gran parte costituiti da depositi continentali, 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 singlaciali. La porzione trasgressiva basale

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

di ciascun ciclo è caratterizzata dalla presenza di limi e sabbie continentali, seguiti da argille organiche palustri di piana alluvionale e costiera. Le porzioni regressive sono invece costituite da 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 ampie porzioni di sottosuolo della pianura modenese e ferrarese. Questi grandi corpi di sabbie sono stati deposti 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* (AES₄) e Subsintema di *Torre Stagni* (AES₅) (cfr. AES indifferenziato - Foglio 202-203-204), ed in 3 cicli superiori, inquadrati nei Subsintemi di *Bazzano* (AES₆), di *Villa Verucchio* (AES₇) e di *Ravenna* (AES₈). Nella porzione più recente del Subsintema di Ravenna, è stata ulteriormente distinta l'Unità di Modena (AES_{8a}) di età post-romana.

I cicli più antichi registrano eventi trasgressivi maggiormente sviluppati verso l'entroterra rispetto a quelli più recenti. I tre Subsintemi superiori (AES₆, AES₇, AES₈), presentano tra loro forti analogie nell'organizzazione stratigrafica.

Questi cicli sono i meglio definiti a scala regionale dato il numero relativamente alto di pozzi che li attraversano, compresi diversi sondaggi a carotaggio continuo appositamente eseguiti per la cartografia geologica (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998; Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000 - es. Fogli 202-203-204). La base di ciascun Subsintema, corrisponde ad una superficie erosiva incisa in sabbie fluviali singlaciali o, in aree meridionali soggette a forti apporti appenninici, ad un paleosuolo carbonatico maturo sviluppato su depositi continentali. La fase di massimo avvicinamento della linea di costa è registrata da depositi continentali palustri di bassa pianura, 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. La parte superiore del Subsintema AES₆ è caratterizzata da sabbie grossolane di media pianura alluvionale, che passano lateralmente a sedimenti fini di pianura fredda. Nell'area considerata, la parte superiore del Subsintema di Bazzano (AES₆) è dominata da corpi di sabbie lateralmente estesi di provenienza appenninica, che verso nord e verso est passano a depositi di Po (sondaggio S13 - Foglio 203). La porzione inferiore del Subsintema di Villa Verucchio (AES₇) è costituita da sedimenti di piana alluvionale prevalentemente fini, analoghi al corrispondente intervallo del sottostante Subsintema di Bazzano (AES₆). Questo intervallo del Subsintema di Villa Verucchio (AES₇) viene correlato alla fase di trasgressione marina Tirreniana.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

In gran parte del territorio comunale, la porzione superiore del Subsistema di Villa Verucchio (AES₇) è costituita da alternanze di sabbie e limi di provenienza appenninica. Nei pressi del confine settentrionale, invece, lo stesso intervallo stratigrafico è formato da estesi corpi di sabbie grossolane di riempimento di canali del Po.

La porzione superiore di AES₇, attribuita all'ultimo glaciale al Pleistocene terminale, si è infatti deposta nella zona di interferenza fra i canali a treccia del Po ed i fiumi di origine appenninica, che presentavano canali di dimensioni relativamente più contenute e granulometrie più fini.

Il Subsistema di Ravenna (AES₈) è formato prevalentemente da sedimenti fini, spesso deposti in ambienti umidi, stagni e paludi di acqua dolce. La parte inferiore è però più ricca di limi, che possono mostrare paleosuoli carbonatici, assenti nella porzione superiore dell'unità. All'interno di questi sedimenti di piana interalvea sono presenti corpi sabbioso limosi nastriformi, deposti dal Secchia e dal Panaro, e nella parte più settentrionale, nei pressi del confine comunale, dal fiume Po. I corpi sabbiosi di Po sono meglio sviluppati nel sottosuolo del Comune di San Felice sul Panaro.

La distribuzione dei sedimenti affioranti è ovviamente nota con dettaglio e accuratezza molto maggiore rispetto a quella dei corpi di sottosuolo. L'area indagata è interamente formata da sedimenti della porzione più recente dell'Olocene, di età post-romana, ascritti all'Unità di Modena (AES_{8a}). Questi sedimenti sono stati deposti in gran parte in età medievale e moderna. Il territorio è ampiamente dominato da argille e argille torbose deposte in aree di depressione interalvea e palude dulcicola, associate a plaghe di limi sabbiosi di argine naturale e ventaglio da rotta particolarmente sviluppati nella porzione sud occidentale dell'abitato di Camposanto. Corpi allungati di riempimento di canale fluviale del fiume Panaro sono sviluppati in una stretta fascia coincidente con la via Bottegone ed in corrispondenza dell'attuale alveo fluviale.

6 Interpretazioni e incertezze

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

6.1 Frequenza naturale dei terreni (f_0)

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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

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

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

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

Alcune misure sono state eseguite in contemporanea a breve distanza l'una dall'altra, al fine di verificare la ripetibilità delle acquisizioni e la sostanziale coerenza dei dati registrati con i diversi strumenti utilizzati nella campagna di indagine (paragrafo 4.2.1.).

Diverse misure hanno mostrato perturbazioni e disturbi di origine antropica che ne hanno pregiudicato l'interpretazione e sono quindi state ripetute. Le maggiori criticità hanno riguardato la presenza di numerosi transienti legati al traffico urbano. Altre perturbazioni sono state imputate alla linea ferroviaria del "Brennero", che borda ad est l'abitato di Camposanto, e alla zona industriale che si sviluppa nella parte settentrionale dell'ambito di studio.

La serie di microtremori realizzati a supporto dello studio di microzonazione, ha permesso la redazione di una dettagliata carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3, paragrafo 8.3), che nell'area variano tra 0,63 e 0,85 Hz con ampiezze dei picchi generalmente contenute e comunque inferiori a 2,5.

Tali picchi di frequenza risultano quindi legati a modesti contrasti di impedenza che, secondo i dati disponibili sulle velocità delle onde di taglio nel sottosuolo (Petronio *et al.*, 2018), potrebbero essere correlati con superfici stratigrafiche poste a profondità variabili tra 120 e 150 metri. Tenendo conto di queste considerazioni e sulla base delle indicazioni contenute nella Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (Martelli *et al.*, 2017) è plausibile associare tali frequenze alla discordanza al tetto del Sintema Emiliano Romagnolo Inferiore che si sviluppa, nell'area in esame, alle suddette profondità.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

Le misure di microtremore disponibili non evidenziano nessun altro picco a frequenze inferiori che possano essere associate al tetto del substrato sismico.

Queste frequenze si collocano però oltre il limite di sensibilità strumentale dei sismografi comunemente utilizzati per le misure di microtremore.

6.2 Terreni suscettibili di liquefazione

La principale criticità rilevata all'interno del territorio comunale di Camposanto è legata alla presenza di terreni potenzialmente suscettibili di liquefazione.

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

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

Le analisi condotte per gli approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello, hanno permesso di rivedere e modificare i precedenti limiti areali (cfr. Tavole 4, paragrafo 8.4) sulla base di nuove indagini e di altre prove realizzate nell'ambito del processo di ricostruzione post-sisma.

I nuovi dati acquisiti ha permesso di meglio discriminare spessore e geometrie dei principali corpi liquefacibili in ambiti privi di dati pregressi o con dati di scarsa affidabilità. Al contempo, sulle indagini penetrometriche con piezocono (CPTu) sono state eseguite analisi puntuali del rischio liquefazione mediante metodi semplificati (cfr. paragrafo 7.2.1). L'interpretazione dei risultati ottenuti rispetto al contesto geologico locale ha portato alla definizione dei limiti delle Zone di Suscettibilità per Liquefazioni ed alla loro suddivisione in base al diverso grado di rischio (paragrafo 8.6).

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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

7 Metodologie di elaborazione e risultati

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

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 sulla tradizionale interpretazione delle facies sedimentarie e delle geometrie deposizionali.

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

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

7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali

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

Per le aree classificate come soggette ad amplificazioni locali ed instabilità (cfr. liquefazione) la quantificazione dell'accelerazione massima attesa in superficie (PGA) è stata ottenuta mediante calcolo della risposta sismica locale (RSL). I risultati sono stati confrontati con i fattori di amplificazione sismica proposti dagli abachi regionali (D.G.R. 2193/2015), al fine di verificare la coerenza dei coefficienti di amplificazione ottenuti attraverso i due differenti approcci e valutare l'applicabilità degli uni o degli altri all'intero territorio in esame.

7.1.1 Risposta sismica locale con modellazioni numeriche

La sostanziale omogeneità delle contesto geologico-strutturale e la presenza di un solo ambito urbano sviluppato su di un ristretta area del territorio comunale, hanno suggerito, sin dallo studio di microzonazione eseguito per l'Ordinanza 70/2012, l'adozione di fattori di amplificazione stratigrafica omogenei per tutta l'area di studio (Martelli e Romani, 2013).

Per verificare tale assunzione è stato ricostruito un modello sismo-stratigrafico "tipo" per l'area del centro storico di Camposanto considerando i dati stratigrafici, geofisici e geotecnici più accurati tra quelli disponibili.

Sulla base di questo modello sismo-stratigrafico sono state eseguite analisi numeriche di risposta sismica locale, considerando, di volta in volta, le principali variazioni stratigrafiche e meccaniche riscontrate nelle diverse MOPS. 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.

Il modello proposto per questo studio si basa sui risultati di indagini geognostiche e geofisiche in situ e prove di laboratorio per la caratterizzazione dei terreni di copertura che costituiscono le prime decine di metri di sottosuolo di aree limitrofe. Le unità stratigrafiche più profonde sono state invece descritte utilizzando dati di letteratura e correlazioni a scala regionale attraverso il confronto con sezioni

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

stratigrafiche (cfr. Allegato 1) e dati da pozzo come quelli per esplorazione di idrocarburi Dogaro 002 e Camposanto 001.

Il modello sismo-stratigrafico e geotecnico è stato definito associando alle varie unità individuate: (i) i valori di velocità delle onde di taglio V_s ottenuti da misure dirette disponibili (es. con sismici e down-hole) o da letteratura (es. Petronio *et al.*, 2018); (ii) le curve di decadimento del modulo di taglio ($G/G_0 - \gamma$) e di incremento del fattore di smorzamento ($D - \gamma$) ottenute da indagini pregresse eseguite con dilatometro sismico (Amoroso *et al.*, 2014) e da prove dinamiche di laboratorio su campioni indisturbati prelevati in aree limitrofe o estratte da letteratura; (iii) i valori del peso per unità di volume stimati dalle prove in sito e di laboratorio disponibili.

In Tabella 7-1 sono indicate le indagini utilizzate per la ricostruzione del modello sismo-stratigrafico di riferimento.

	Modello RSL MOPS 2004
Descrizione	Prevalenti argille-limose con intercalazioni sabbie generalmente al di sotto i 15 metri di profondità
Stratigrafia superficiale	036004P112S119 (fino a 50 metri)
Stratigrafia profonda	http://portalesgi.isprambiente.it/it/categorie-db/sondaggi (DOGARO 002 – CAMPOSANTO 001)
Bedrock sismico	Sezioni A-A' e B-B' (Allegato 1) http://portalesgi.isprambiente.it/it/categorie-db/sondaggi (DOGARO 002 – CAMPOSANTO 001)
Vs superficiale	036004P112DH272 (fino a 50 metri)
Vs profonda	Petronio <i>et al.</i> , 2018 http://www.liquifact.eu/2018/03/28/updates-from-wp2-european-liquefaction-hazard-map-and-methodology-for-localized-assessment-of-liquefaction-potential

Tabella 7-1 - Indicazione delle indagini e delle correlazioni su cui si basa la ricostruzione del modello sismo-stratigrafico di riferimento per le simulazioni di risposta sismica locale.

Le correlazioni tra dati stratigrafici, sezioni geologiche (cfr. Allegato 1), e curve H/V ottenute tramite misure di microtremore (paragrafo 6.1), hanno consentito di individuare alcuni dei principali contrasti di impedenza presenti nel sottosuolo. Profili sismici (es. Petronio *et al.*, 2018) ed altri dati geofisici acquisiti a Cavezzo e inquadrati nel contesto stratigrafico regionale hanno infine permesso di individuare il bedrock in corrispondenza di un marcato riflettore sismico posto al tetto del Quaternario Marino (QM). Al disotto dell'abitato di Camposanto questa superficie è stata assunta ad una profondità di circa 320 m, considerando che l'area in esame è stata soggetta a tassi di subsidenza maggiori rispetto a quella di Cavezzo.

In accordo con il Servizio Sismico della Regione Emilia-Romagna, la stima delle velocità delle onde di taglio dei terreni di copertura è stata in gran parte ricavata estrapolando e mediando i valori di V_s acquisti a

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

Cavezzo tramite sismica a riflessione e array sismici, nell'ambito del Progetto di Ricerca Europeo "Liquefact".

L'estrapolazione dei dati di Cavezzo è stata possibile considerata la vicinanza delle aree, il medesimo contesto geologico-strutturale e la presenza delle stesse unità stratigrafiche inquadrata all'interno del Supersistema Emiliano-Romagnolo. Nell'estrapolare ed associare le velocità alle unità stratigrafiche, sono state considerate opportune correzioni nei valori di Vs legate al diverso spessore, seppellimento e conseguente carico litostatico a cui sono sottoposte le unità stratigrafiche a Camposanto rispetto alle stesse presenti a Cavezzo.

In Tabella 7-2 è riportato in sintesi il modello sismo-stratigrafico proposto nel quale è stata assunta una velocità del *bedrock* sismico pari a 800 m/s.

profondità (m)	spessore (m)	Soil type	Campione	Prova	Vs (m/s)
0	4	Argilla limosa	Alberone di Cento (3-3.6 m)	CR	163
4	5	Argilla limosa organica	Mirabello - M1 C2 - UNIFI	CR	160
9	8	Argilla	Buonacompra (4.6-13.5 m)	SDMT	235
17	2	Argilla	Buonacompra (4.6-13.5 m)	SDMT	212
19	4	Sabbia limosa	Alberone di Cento (15-15.5m)	CR	260
23	10	Argilla limosa	Pilastrello S1SH3 (28,2-28,8 m)	CR	214
33	4	Sabbia limosa	Buonacompra (15.2-19.6 m)	SDMT	308
37	6	Argilla limosa + torba	Mirabello M1 C4 -UNIFI	CR	292
43	10.9	Argilla limosa + torba	Mirabello M1 C4 -UNIFI	CR	290
53.9	4.1	Argilla limosa + torba	Mirabello M1 C4 -UNIFI	CR	300
58	7	Sabbia fine limosa	Mirabello	SDMT	317
65	6	Limo + Argilla	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) RER	CR	331
71	6	Sabbia fine limosa	Mirabello	SDMT	346
77	4	Limo + Argilla	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) RER	CR	356
81	4	Sabbia fine limosa	Mirabello	SDMT	365
85	7	Limo + Argilla	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) RER	CR	382
92	8	Sabbia fine limosa	Mirabello	SDMT	401
100	27	Limo + Argilla	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) RER	CR	466
127	11	Sabbia fine limosa	Mirabello	SDMT	493
138	12	Limo + Argilla	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) RER	CR	539
150	21	Sabbia fine limosa	Mirabello	SDMT	650
171	16	Limo + Argilla	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) RER	CR	665
187	21	Sabbia fine limosa	Mirabello	SDMT	684
208	33	Limo + Argilla	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) RER	CR	714
241	17	Sabbia fine limosa	Mirabello	SDMT	730
258	27	Limo + Argilla	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) RER	CR	755

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

285	11	Sabbia fine limosa	Mirabello	SDMT	765
296	7	Limo + Argilla	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) RER	CR	771
303	17	Sabbia fine limosa	Mirabello	SDMT	780
320	Half-Space	Bedrock			800

Tabella 7-2 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato come input per il calcolo della RSL.

Definito il modello sismo-stratigrafico (Tabella 7-2), sono state eseguite alcune simulazioni numeriche di analisi di risposta sismica locale. Le simulazioni, realizzate mediante software STRATA (Rathje & Kottke, 2013), sono state effettuate variando i profili stratigrafici ed i caratteri geotecnici e geofisici tipici delle MOPS identificate nel territorio comunale. Le MOPS differiscono tra loro essenzialmente per i caratteri stratigrafici e meccanici dei terreni più superficiali, differenze che in questo caso influenzano solo marginalmente la risposta sismica. Questo ha permesso di estendere i risultati ottenuti dalle modellazioni alla totalità delle MOPS rilevate.

I risultati della simulazione espressi in termini di spettri di risposta e accelerazioni di picco sono riportati nelle pagine seguenti.

Come accelerogrammi di input (*bedrock*) per il calcolo della risposta sismica locale, sono stati utilizzati i tre segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193/2015 (Figura 7-1). I segnali sono stati scalati in modo da far corrispondere la loro accelerazione massima con il valore di a_{gref} derivante dai punti della griglia della mappa di pericolosità sismica elaborata da INGV per il territorio nazionale. L'accelerazione può essere assunta pari a 0,153 g, valore ottenuto dall'interpolazione dei quattro nodi della griglia che identificano la cella di cui Camposanto è baricentro.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

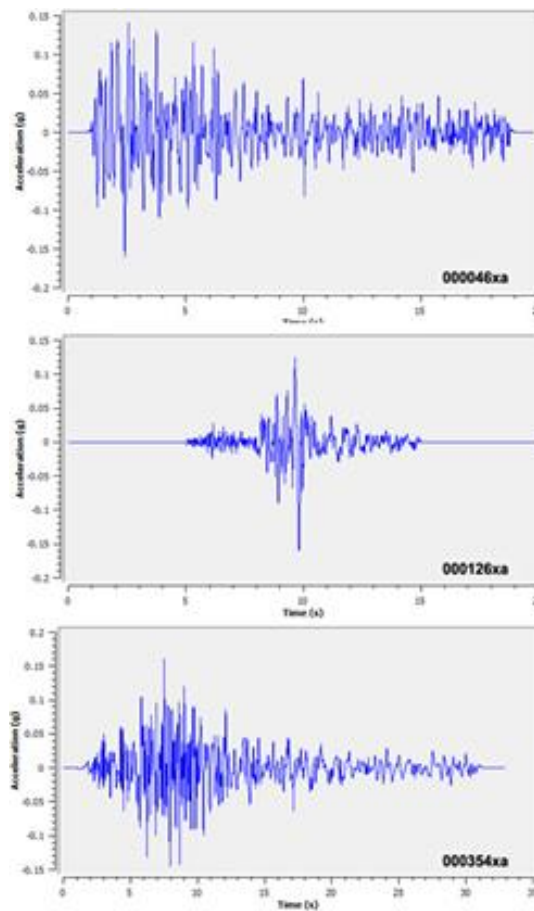


Figura 7-1 - Plot eseguito con il software STRATA (Rathje & Kottke, 2013) dei segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193 del 2015, scalati per una a_{ref} pari a 0,153 e utilizzati come input per le simulazioni numeriche della risposta sismica locale.

Sono stati quindi calcolati e confrontati gli spettri di risposta al *bedrock* (Figura 7-2) ed in superficie per un periodo di ritorno di 475 anni con uno smorzamento assunto pari al 5%. Gli spettri elastici in pseudo accelerazione in input e in output, relativi alla simulazione di risposta sismica locale, sono stati quindi archiviati nel database in formato .txt secondo quanto richiesto dagli Standard MS 4.0b (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2015).



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

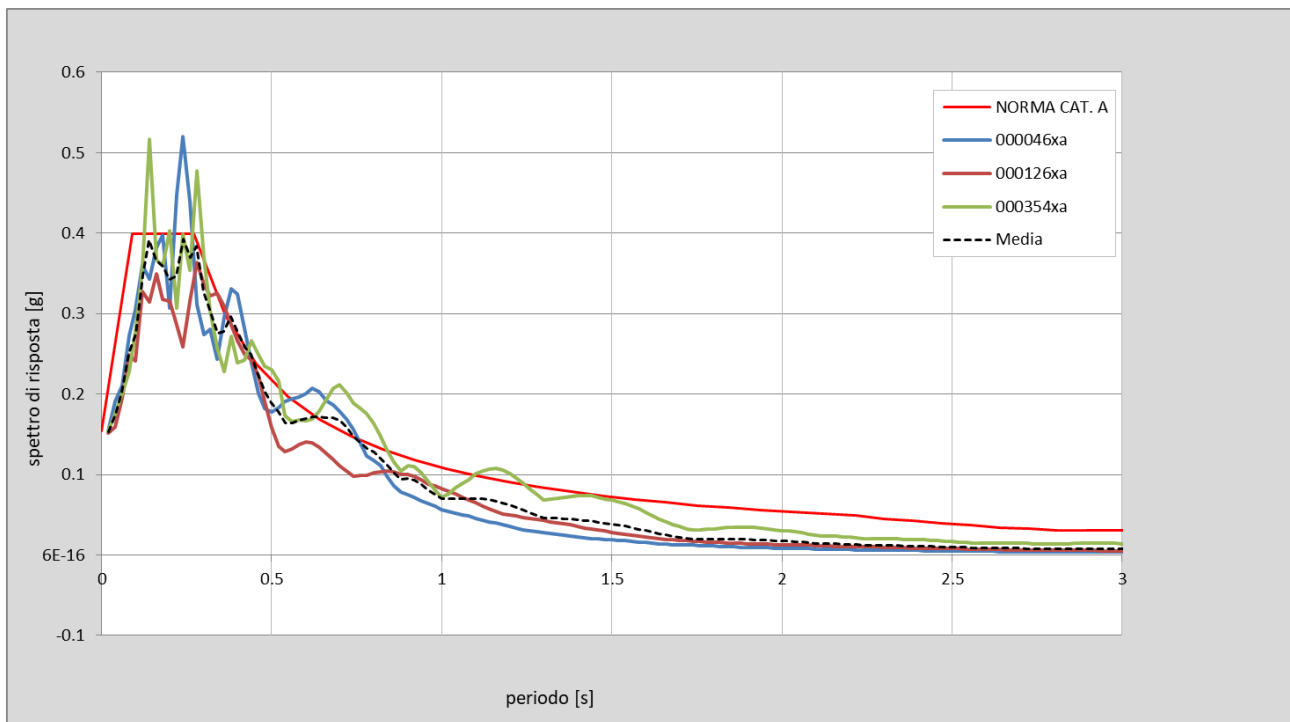


Figura 7-2 - Spettri di risposta al bedrock per i tre accelerogrammi ed il loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria A secondo le NTC2018.

In Figura 7-3 si riportano le funzioni di trasferimento, definite come il rapporto tra lo spettro di Fourier del segnale in superficie in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro media. Nel grafico si osserva una prima amplificazione a frequenza compresa tra 0,55 e 0,6 Hz e una seconda, più blanda e meno chiara, tra 0,8 e 0,9 Hz, coerentemente con quanto riscontrato in parte delle misure di rumore ambientale. La presenza di altre frequenze, alcune delle quali armoniche superiori delle precedenti, appare legata al basso smorzamento delle coperture.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

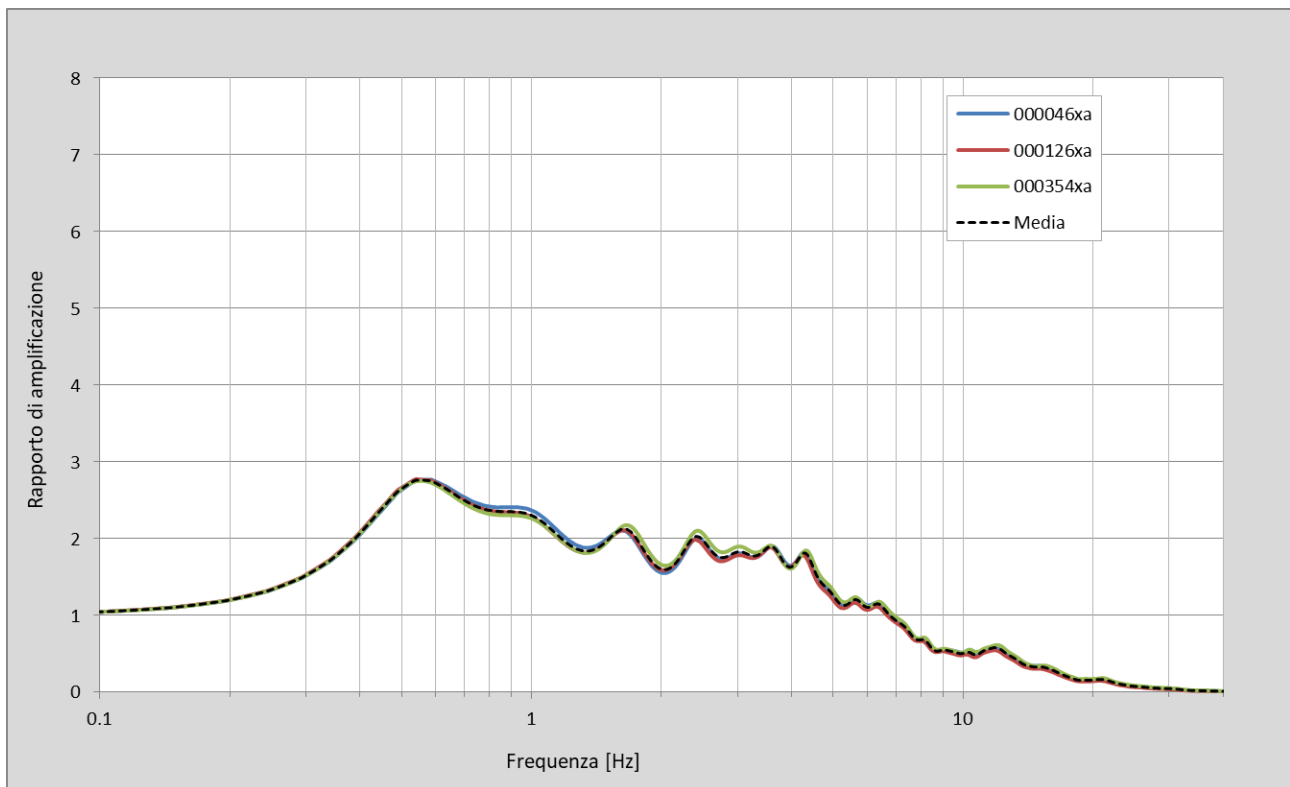


Figura 7-3 - Funzione di trasferimento, definita come rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al *bedrock*, per i 3 terremoti di Figura 7-2 e per la loro media.

In Figura 7-4 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 7-1 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 CAMPOSANTO

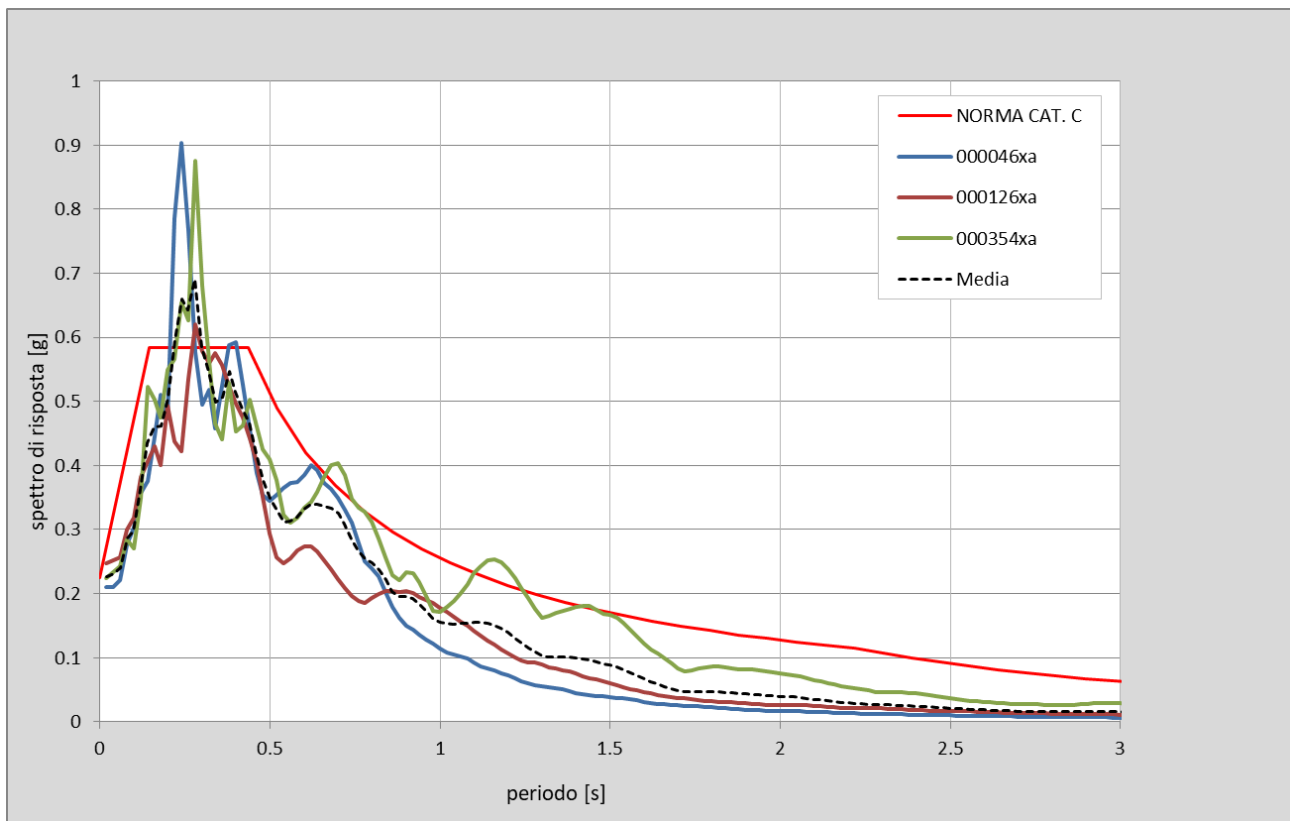


Figura 7-4 - RSL zona 2001: Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-5 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 i 7-8 metri e la superficie.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

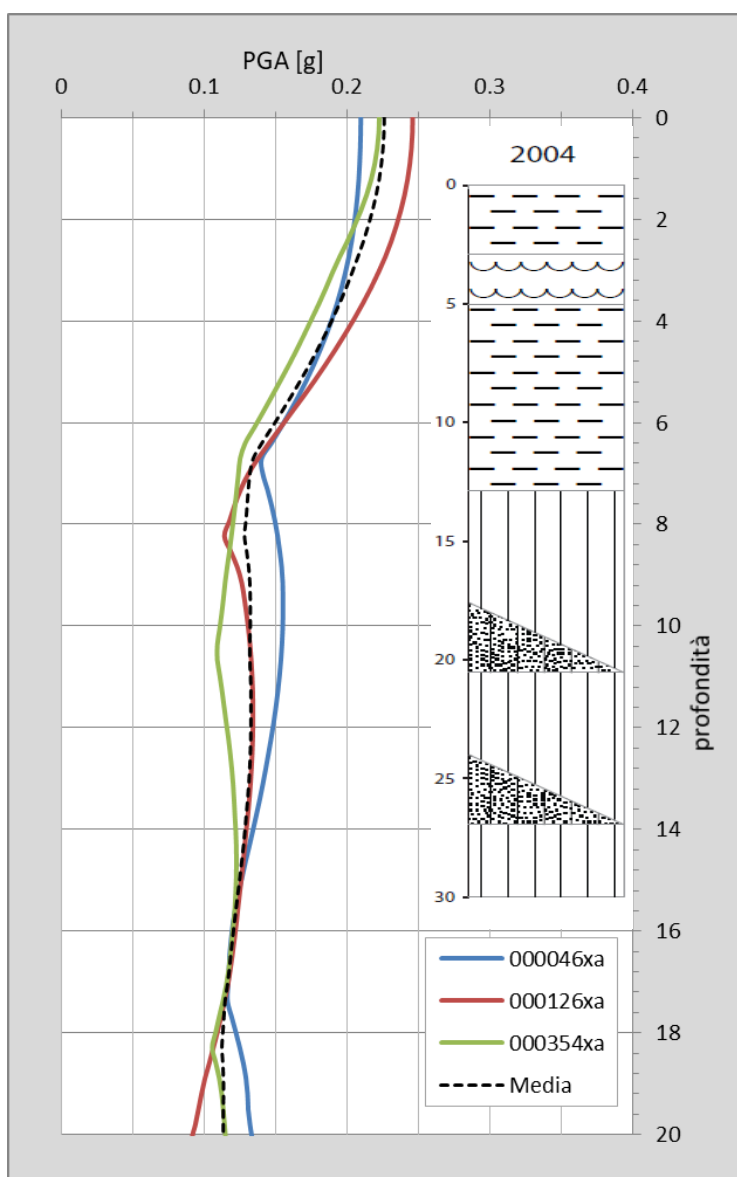


Figura 7-5 - Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

L'accelerazione massima (PGA) attesa in superficie ottenuta mediante risposta sismica locale risulta pari a 0,23 g il che determina un fattore di amplificazione **FA (PGA) = 1,48**.

I fattori di amplificazione derivati in termini di intensità di Housner sono risultati rispettivamente pari a $SI1-FH_{(0.1-0.5)} = 1.62$; $SI2-FH_{(0.5-1)} = 1.96$ e $SI3-FH_{(0.5-1.5)} = 2.03$.

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

Nello specifico l'area di depressione strutturale di Camposanto mostra una successione stratigrafica al limite con quanto indicato nella D.G.R. 2193/2015 per le zone di "Pianura 3": *"settore di pianura caratterizzato da elevati spessori di sedimenti, con substrato rigido a profondità non inferiori a 300 m da p.c"*. Come si evince dalla Tabella 7-3, i risultati della risposta sismica locale non presentano un grande accordo con i fattori di amplificazione proposti dall'abaco di riferimento, ma sono più simili a quelli indicati dal vecchio abaco regionale di "Pianura 2" (D.A.L. 112/2007).

	ABACO PIANURA 3 DGR 2193/2015	ABACO PIANURA 2 D.A.L.112/2007	RSL2004
FA _{PGA}	1.3	1.5	1.48
FA _{S11}	1.5	1.8	1.62
FA _{S12}	2.3	2.5	1.96
FA _{S13}	2.6	-	2.03

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

7.2 Zone instabili soggette a liquefazione

Il carattere pianeggiante del territorio ed il contesto geologico e sismotettonico in cui si colloca il Comune di Camposanto, riducono i potenziali fenomeni di instabilità attesi a liquefazione e cedimenti differenziali. I dati geognostici raccolti a supporto dello studio di microzonazione, sono stati singolarmente analizzati rispetto alle possibili criticità legate alla natura dei terreni. Le valutazioni hanno confermato le evidenze del 2012, indicando come principale criticità la diffusa presenza di orizzonti granulari saturi potenzialmente liquefacibili, così come riportato negli elaborati di sintesi redatti a seguito dell'Ordinanza 70/2012 (Martelli e Romani, 2013).

L'estensione e la perimetrazione di queste aree è stata affinata (v. Tavola 4) a fronte dei risultati di nuove indagini geotecniche acquisite nell'ambito degli approfondimenti di terzo livello (paragrafo 4.2). Per ottenere valutazioni quantitative della suscettibilità a liquefazione nelle aree classificate come instabili e poter suddividere il territorio in classi di rischio, sono state infine eseguite stime dell'indice di potenziale liquefazione (IL) 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 di cui è stato recuperato il dato numerico durante lo studio di microzonazione sismica (v. Allegato 3).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

7.2.1 Verifiche del potenziale di liquefazione

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

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

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

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

Sono state quindi analizzate 28 verticali d'indagine realizzate con punta elettrica con piezocono (CPTu) distribuite su tutto il territorio comunale, come riportato in Tavola 6.

Come parametri di input per la modellazione sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 7-4. Il valore di $M_{w_{max}}$ corrisponde a quello massimo atteso per la Zona 912 della Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), mentre il valore di PGA coincide con quello ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale. In mancanza di uno studio idrogeologico dettagliato e di un'analisi storico-statistica dell'andamento delle isofreatiche, è stato considerato un valore di soggiacenza maggiormente cautelativo rispetto a quello medio misurato nel corso delle indagini geognostiche eseguite per la microzonazione. In accordo con il precedente studio di microzonazione (Ordinanza 70/2012) è stata assunta una soggiacenza della falda pari ad 1 metro rispetto alla superficie topografica.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

Parametri	Mwmax	PGA	Falda
	6,14	0,23	1 m

Tabella 7-4 - Parametri di input per la verifica puntuale del potenziale di liquefazione con metodo di Boulanger e Idriss (2014).

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

In Tabella 7-5 sono riportati i valori di I_L relativi a tutte le 28 indagini penetrometriche con punta elettrica analizzate, mentre nell’Allegato 3 sono raccolti i rapporti di calcolo delle verifiche eseguite.

Codice	Lat.	Lon.	PGA	IL Boulanger e Idriss (2014)
036004P26CPTU26	44,819492	11,114887	0,23	4,5
036004P28CPTU29	44,808928	11,205671	0,23	3,4
036004P31CPTU33	44,797706	11,136961	0,23	3,2
036004P32CPTU35	44,796135	11,144024	0,23	1,6
036004P33CPTU37	44,790607	11,162193	0,23	1,1
036004P34CPTU39	44,778131	11,109222	0,23	2,1
036004P35CPTU41	44,780538	11,116953	0,23	2,4
036004P117CPTU124	44,791842	11,138521	0,23	2
036004P260CPTU267	44,818127	11,200202	0,23	2,7
036004P261CPTU268	44,818204	11,199661	0,23	0
036004P264CPTU271	44,813978	11,103761	0,23	4,8
036004P268CPTU276	44,788561	11,138804	0,23	0,8
036004P269CPTU277	44,788361	11,138550	0,23	1
036004P270CPTU279	44,788893	11,138782	0,23	1,3
036004P271CPTU280	44,789113	11,138232	0,23	2,8
036004P272CPTU281	44,789414	11,138680	0,23	2,8
036004P273CPTU283	44,789398	11,138213	0,23	1,7
036004P278CPTU288	44,786377	11,137612	0,23	9,1
036004P279CPTU289	44,786132	11,137428	0,23	3,4
036004P280CPTU291	44,786051	11,137835	0,23	2,1
036004P281CPTU292	44,785967	11,138175	0,23	5,7
036004P282CPTU293	44,786390	11,138013	0,23	9,5
036004P283CPTU294	44,786116	11,138365	0,23	9,8
036004P350CPTU362	44,794054	11,135025	0,23	7
036004P351CPTU363	44,798175	11,178171	0,23	15
036004P352CPTU364	44,788537	11,132977	0,23	4,4
036004P353CPTU365	44,787905	11,148070	0,23	7,3
036004P354CPTU366	44,783175	11,126580	0,23	4,6

Tabella 7-5 - Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna delle prove penetrometriche CPTU. In tabella è riportato anche il valore di della PGA attesa in superficie ed utilizzata per il calcolo di I_L su ciascuna verticale.

8 Elaborati cartografici

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

La modesta estensione geografica dell'area di studio ha permesso di descrivere i caratteri geotecnici, individuare le aree suscettibili di effetti locali e definire il tipo di effetti attesi mediante la redazione di un'unica tavola per ogni elaborato cartografico, focalizzata sugli ambiti oggetto della microzonazione. In accordo con l'ufficio tecnico del Comune di Camposanto sono stati confermati come ambiti di studio le stesse aree già indagate in seguito agli eventi sismici del 2012 (Ordinanza 70/2012). Gli elaborati di primo livello, ad esclusione della carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica, sono state redatte per l'intero territorio comunale. Al contrario il terzo livello è rappresentato esclusivamente all'interno degli ambiti di approfondimento.

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

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

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

8.1 Carta delle indagini (Tavola 1)

La carta delle indagini consente di visualizzare l'ubicazione delle prospezioni geologiche e geofisiche utilizzate per lo studio di microzonazione sismica e comprende, pertanto, sia quelle di repertorio (378) sia quelle realizzate per questi approfondimenti di terzo livello (29).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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

Utilizzando il metodo di rappresentazione proposto all'Appendice 2 dei suddetti standard, ad ogni sito d'indagine (punto viola in carta) 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 2)

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

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

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

8.2.1 Elementi geologici ed idrogeologici

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

Gli standard di rappresentazione e archiviazione informatica prevedono che i pozzi ed i sondaggi vengano tematizzati in colore verde nel caso in cui la loro profondità raggiunga il substrato geologico, mentre in

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

colore rosso nel caso contrario. Nel caso specifico nessuna perforazione intercetta il substrato, di conseguenza sono presenti unicamente simboli di colore rosso.

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 inoltre allegare sezioni geologiche considerate rappresentative del modello di sottosuolo, realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna nell'ambito degli studi di microzonazione prodotti immediatamente dopo il sisma del 2012 (Martelli e Romani, 2013), e per la pubblicazione "Riserve Idriche Sotterranee della Regione Emilia-Romagna" (v. Allegato 1). Le sezioni profonde (tracce A-A' e B-B'), mostrano l'assetto stratigrafico delle principali unità litologiche riconosciute nel sottosuolo comunale. I rapporti geometrici e l'andamento dei corpi sedimentari sono stati ricostruiti alla scala regionale mediante correlazioni di sondaggi stratigrafici profondi e profili sismici, mentre le unità sono state interpretate sia in chiave idrostratigrafica, in termini di acquiferi e acquicludo, sia strettamente stratigrafica mediante l'utilizzo di unità a limiti inconformi (v. Allegato 1).

8.2.2 Terreni di copertura

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

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

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

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

L'unità è formata da sabbie limose con granulometria poco assortita che rappresentano i sedimenti depositi dal Panaro in età contemporanea all'interno dell'attuale alveo delimitato dagli argini

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

artificiali e del paleoalveo dello stesso Panaro, visibile ad ovest del centro abitato di Camposanto, che con direzione sud ovest - nord est in età medioevale si dirigeva verso il centro abitato di San Felice sul Panaro.

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

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

Questi sedimenti formano generalmente corpi di argine naturale o ventaglio da rotta e sono presenti in tutta la fascia sud del territorio comunale. Si trovano associati all'attuale alveo del Panaro, in quanto costituivano il suo argine naturale sinistro prima che il corso del fiume venisse stabilizzato con la realizzazione dell'attuale sistema arginale artificiale.

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

Consistono di argille, argille limose, argille limose organiche, diffusamente bioturbate, a plasticità generalmente medio-bassa, deposti in ambienti di piana inondabile, stagno e palude dolce. Questi sedimenti, che formano la maggior parte del territorio comunale, sono stati deposti in aree soggette a consistenti apporti sedimentari fini, durante gli episodi di piena e tracimazione fluviale.

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)

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

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

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 di microtremore sismico non è stato possibile suddividere il territorio indagato secondo le diverse classi di frequenza proposte nell'allegato B della Delibera di Giunta

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

Regionale D.G.R. 1227/2015, in quanto le frequenze rilevate risultano sostanzialmente sempre inferiori ad 1 Hz e con valori distribuiti in maniera sostanzialmente omogenea su tutta l'area di studio.

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

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

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

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

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

Le 3 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. È stata inoltre identificata una microzona **suscettibile di sola amplificazione locale** a cui è stato attribuito il codice 2004.

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 CAMPOSANTO

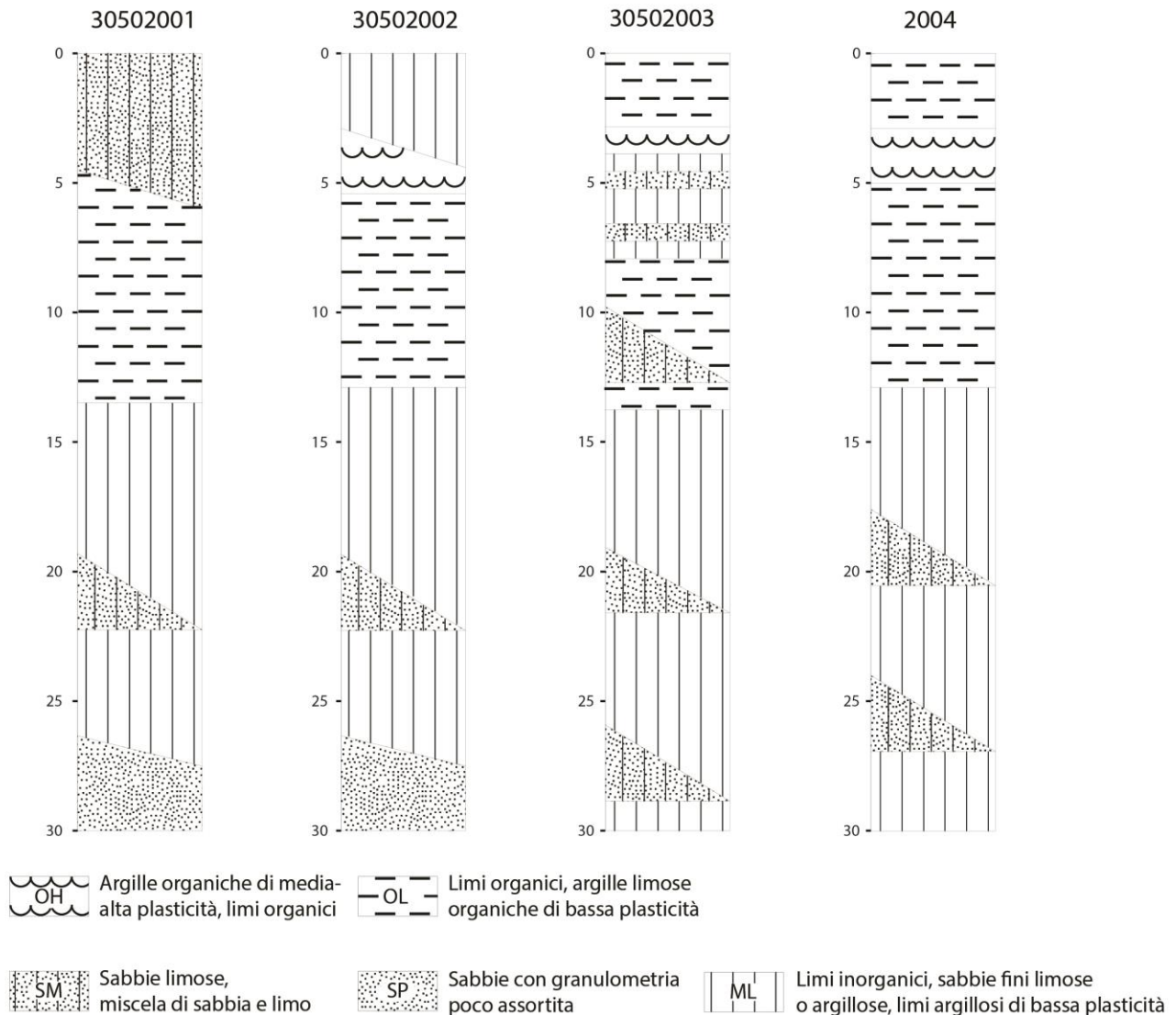


Figura 8-1 - Colonne stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti che costituiscono i primi 30 metri nelle diverse zone MOPS individuate nel territorio comunale.

Zona 30502001

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

Zona 30502002

Limi inorganici e sabbie fini limose, poggiano su argille organiche plastiche e argille limose organiche con intercalazioni di limi e di torbe. Seguono limi inorganici pedogenizzati e limi argillosi di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie limose, organizzate in corpi lenticolari.

Zona 30502003

Argille limose e argille organiche plastiche con intercalazioni di torbe poggiano su alternanze fitte di limi inorganici e sabbie fini limose. Seguono argille limose organiche, limi argillosi pedogenizzati di bassa plasticità, con intercalazioni di sabbie limose, organizzate in corpi lenticolari.

Zona 2004

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

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

La carta della velocità delle onde volumetriche di taglio mostra, a scala 1:10.000, i 65 punti di misura di V_s utilizzati per lo studio di microzonazione sismica ed i rispettivi valori di V_{s30} .

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

MISURE DIRETTE		MISURE INDIRETTE	
SCPT	11	MASW	52
DH	1	ESAC-SPAC	1

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

Osservando le V_{s30} si nota come, in alcuni casi, le indagini indirette forniscano valori lievemente sovrastimati rispetto a quelli derivati da misure dirette tipo cono sismico (SCPT) o down-hole (DH). La distribuzione e l'andamento dei valori di V_{s30} , mediamente intorno ai 200 m/s, sono comunque coerenti

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

con quelli di terreni analoghi che formano il primo sottosuolo di gran parte della bassa pianura alluvionale emiliano-romagnola.

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

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

Gli elaborati in scala 1:10.000, riportano la classificazione delle aree indagate in base all'amplificazione attesa, quantificata tramite fattori parametrici (FA) espressi in termini di accelerazione di picco al suolo e di intensità di Housner¹ per i diversi periodi di vibrazione previsti dagli indirizzi regionali dell'Emilia-Romagna (D.G.R. 2193/2015):

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

I fattori di amplificazione utilizzati per la redazione delle carte (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) sono stati derivati da analisi di risposta sismica locale (paragrafo 7.1.1). Le analisi sono state eseguite tenendo conto delle diversità litotecniche e meccaniche delle microzone individuate nel territorio comunale. I coefficienti ottenuti dalle modellazioni numeriche, confrontati con quelli proposti dagli abachi regionali (v. paragrafo 7.1.1). I fattori di amplificazioni ottenuti presentano discrepanze rispetto ai fattori proposti dall'abaco di riferimento di Pianura 3 (D.G.R. 2193/2015), mentre risultano più affini a quelli indicati dal vecchio abaco regionale di "Pianura 2" (D.A.L. 112/2007).

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

F_{PGA}	$F_{A_{0,1-0,5s}}$	$F_{A_{0,5-1s}}$	$F_{A_{0,5-1,5s}}$
1,46	1,62	1,96	2,03

Tabella 8-3 - Fattori di amplificazione utilizzati per la redazione delle carte di microzonazione sismica.

La sostanziale omogeneità delle contesto geologico-strutturale e la presenza di un solo ambito urbano sviluppato su di un ristretta area del territorio comunale, hanno suggerito l'adozione di fattori di amplificazione stratigrafica omogenei per tutta l'area di studio, in accordo con quanto proposto in Martelli e Romani, 2013.

Le zone suscettibili di instabilità per liquefazione sono state distinte da quelle soggette a sola amplificazione locale per mezzo di soprassegno cartografico. Dalle geometrie delle "Zone di attenzione per liquefazione" rappresentate nella carta MOPS (v. tavola 4, paragrafo 8.4), sono state derivate quelle delle "Zone di suscettibilità per liquefazione". Queste ultime sono state suddivise per classi di rischio sulla base degli indici del potenziale di liquefazione (I_L) ottenuti da analisi semplificate eseguite su prove penetrometriche a piezocono (CPTu). Le classi individuate sono riportate in carta mediante l'utilizzo dei retini previsti per le aree a rischio moderato ($2 < I_L \leq 5$) e elevato ($5 < I_L \leq 15$). Si ricorda che gli indirizzi di microzonazione nazionale non prevedono che le aree a basso rischio ($0 < I_L$) vengano rappresentate in carta con il retino che contraddistingue le zone instabili per liquefazione.

Rispetto a quanto previsto dagli Standard MS 4.0b, nelle carte sono rappresentati anche i valori puntuali delle stime del potenziale di liquefazione eseguite sulle singole verticali d'indagine. Considerato il numero di prove elettriche disponibili 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 ($2 < I_L \leq 5$) e i rossi elevato ($5 < I_L \leq 15$).

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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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 sino ad elevate profondità, mediante sismica a riflessione e array sismici nell'ambito di progetti di ricerca (es. Petronio *et al.*, 2018).

Le modellazioni e le analisi di risposta sismica locale eseguite per la microzonazione (paragrafo 7.1.1) possono fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni, ma non possono in alcun modo sostituirle. Specifiche analisi di risposta sismica locale devono infatti essere eseguite tenendo conto delle caratteristiche geologico-geotecniche del sito ed in funzione della tipologia di progetto o di opera da realizzare, in accordo con le suddette Norme Tecniche. Per la determinazione del rischio di liquefazione sono state, inoltre, eseguite numerose verifiche di suscettibilità mediante metodi semplificati. Sulla base dei risultati ottenuti il metodo di Boulanger e Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015, è stato considerato come maggiormente cautelativo ed affidabile per il calcolo degli indici di liquefazione I_L (paragrafo 7.2.1).

Nei paragrafi seguenti viene proposta una sintesi dei principali caratteri geologici ed evolutivi dell'area ed una analisi di come questi ultimi abbiano determinato la stretta correlazione tra rischio liquefazione e insediamento antropico. Infine vengono riepilogati i risultati dello studio condotto e le principali criticità rilevate.

9.1 Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale

La parte inferiore dei corpi indagati è costituita da **sedimenti pleistocenici** di media pianura alluvionale, depositi durante fasi dell'ultima glaciazione.

La parte più settentrionale dell'area di studio è formata da estesi corpi di sabbie grossolane del Po con V_s anche superiori ai 300 m/s. Verso sud si passa ad alternanze di sabbie di provenienza appenninica e grossi volumi di limi, con V_s comprese tra 200 e 250 m/s e quindi inferiori alle precedenti. La profondità del tetto stratigrafico dei corpi sedimentari singlaciali aumenta verso sud, 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. In gran parte dell'area di Camposanto si sviluppa una spessa successione di prevalenti argille continentali, con intercalazioni di sabbie e limi di provenienza appenninica. Sono inferiormente presenti livelli di paleosuolo a concrezioni carbonatiche nei quali l'alterazione diagenetica influenza i parametri geotecnici e geofisici. Le velocità

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

sismiche tipiche di questa unità superano di poco i 200 m/s, con bruschi incrementi in corrispondenza dei livelli di paleosuolo più evoluti. Al margine settentrionale dell'area di studio, invece, la successione argilloso limosa viene sostituita da spessi corpi di sabbie di alveo di Po. Tali sedimenti costituiscono la porzione inferiore del **Subsistema di Ravenna** (AES₈).

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

All'interno dei sedimenti fangosi si trovano corpi allungati di sabbie limose di riempimento di canale di Panaro mentre, nella parte più settentrionale del territorio comunale, sono sviluppati antichi corpi sabbiosi di Po ricoperti da più recenti depositi di paleoalveo del Secchia e del Panaro. In superficie affiorano corpi allungati di Panaro fiancheggiati da modesti depositi prevalentemente limosi di argine naturale e ventaglio da rotta, che sfumano in ampie estensioni di fanghi di depressione interalvea.

9.2 Indicazioni per la riduzione del rischio sismico

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

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

L'analisi delle indagini raccolte per lo studio di microzonazione ha evidenziato come la presenza di livelli sabbiosi e limo-sabbiosi saturi, risulti distribuita lungo le direttrici di antichi alvei semiseppolti, e lungo l'alveo del Panaro attuale.

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

Pertanto, la definizione dei limiti delle aree potenzialmente suscettibili di liquefazione e delle diverse classi di rischio presenta inevitabili incertezze legate all'imperfetta conoscenza del sottosuolo, nonostante il

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

numero elevato di indagini presenti nel territorio. L'incertezza diviene maggiore laddove non si disponga di dati stratigrafici attendibili o adeguatamente distribuiti.

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

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

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

Tuttavia, anche le più sofisticate analisi di liquefacibilità sono sempre da considerarsi rappresentative di volumi di terreno limitati, specie in un contesto come quello di pianura in cui la variabilità laterale dei caratteri stratigrafici e sedimentologici risulta particolarmente elevata. Estendere valutazioni puntuali di suscettibilità alla liquefazione ad aree contigue può risultare alquanto incerto e pertanto è altamente consigliabile prevedere indagini di tipologia e numero adeguate all'ampiezza dell'area considerata e alla rilevanza delle opere.

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

Si precisa inoltre che le modellazioni e le analisi di risposta sismica eseguite per la microzonazione (paragrafo 7.1.1) possono fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle norme tecniche, ma non possono in alcun modo sostituirle. Le analisi di risposta sismica finalizzate alla definizione

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

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 2004 (Figura 8-1 - Tavola 4) dovranno essere proposte adeguate campagne di indagini geotecniche in sito e di laboratorio, per la valutazione e quantificazione di possibili cedimenti indotti.

10 Bibliografia

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

- 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>.
- Boulangier R. W., Idriss I. M., (2014): *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 134 pp.
- Burrato P., Ciucci F., Valensise G., (2003): *An inventory of river anomalies in the Po Plain, northern Italy: evidence for active blind thrust faulting*, Annals of Geophys., 46 (5), 865-882.
- Burrato P., Vannoli P., Fracassi U., Basili R., Valensise G., (2012): *Is blind faulting truly invisible? Tectoniccontrolled drainage evolution in the epicentral area of the May 2012, Emilia-Romagna earthquake sequence (northern Italy)*. Annals of Geophys., 55(4), 525-531, doi: 10.4401/ag-6182.
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C., Amato A., (2006): *CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002*, versione 1.1. INGV-CNT, Roma. <http://csi.rm.ingv.it/>.
- Castiglioni G., Biancotti A., Bondesan M., Cortemiglia G.C., Elimi C., Favero V., Gasperi G., Marchetti G., Orombelli G., Pellegrini G. B., Tellini C., (1999): *Geomorphological map of the Po Plain, Italy, at scale of 1:250.000*. Earth Surf. Proc. Land., 24, 1115-1120.
- Cerrina Feroni A., Ottria G., Martinelli P., Martelli L., Catanzariti R., (2002): *Carta geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo, 1: 250,000*. SELCA, Firenze.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, (2015): *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b*. [http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard MS_4_0b.pdf](http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard_MS_4_0b.pdf).
- Corrado, S., Aldega, L., Zattin, M., (2010): *Sedimentary vs. tectonic burial and exhumation along the Apennines (Italy)*. Journal of the Virtual Explorer 36.
- Correggiari A., Field M.E., Bortoluzzi G., Ligi M., Penitenti D., (1992) - *Ridge and swale morphology on the North Adriatic epicontinental shelf*. Rapport CIESM 33:125.
- D.A.L. 112/2007: Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per *Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica*. Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007, Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007.
- D.C.P. Provincia di Ferrara n. 32/2014: *Adozione della Variante al PTCP: ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale*.
- Devoti, R., Esposito A., Pietrantonio G., Pisani A. R., Riguzzi F., (2011): *Evidence of largescale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction boundary*, Earth Planet. Sci. Lett., 311, 230–241, doi:10.1016/j.epsl.2011.09.034.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 1227/2015: Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014. *Attribuzione contributi a favore degli enti locali. Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica e delle indicazioni per l'archiviazione informatica*.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 2193/2015: *Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla Deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112*.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 573/2016: *"O.C.D.P.C. 26 ottobre 2015, n. 293 - Annualità 2014 - Criteri per l'attribuzione di contributi per la realizzazione di interventi di riduzione del rischio sismico in edifici"*

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

pubblici strategici e rilevanti, in edifici privati e per studi di microzonazione sismica, di cui all'art. 2, comma 1, lettere a), b) e c). Modalità di concessione e liquidazione dei contributi”.

Di Capua G., Tarabusi G., (2013): *DPC-INGV S2 2012-2013 project Annex2 to D4.1 – Site-specific hazard assessment in priority areas - MIRANDOLA (MO) seismo-stratigraphic models*, Online <https://sites.google.com/site/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 EMERCEO Working Group for real-time data sourcing and processing during the Emilia Romagna (northern Italy) 2012 earthquake sequence*. ANNALS OF GEOPHYSICS, 55, 4, 2012; doi: 10.4401/ag-6117.

Emergeo Working Group, (2013): *Liquefaction phenomena associated with the Emilia earthquake sequence of May–June 2012 (Northern Italy)*. Nat. Haz. Earth Syst. Sci., 13, 935-947.

Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012a): *Terremoti dell'Emilia - Maggio 2012. Rilievo macrosismico MCS speditivo. Rapporto finale. 15 giugno 2012*, <http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/TerremotoEmiliaMCS.pdf>.

Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012b): *The MCS macroseismic survey of the Emilia 2012 earthquakes*. Annals of Geophysics Vol. 55, No 4.

Garofalo F., Foti S., Hollender F., Bard P.Y., Cornou C., Cox B.R., Ohrnberger M., Sicilia D., Asten M., Di Giulio G., Forbriger T., Guillier B., Hayashi K., Martin A., Matsushima S., Mercerat D., Poggi V., Yamanaka H., (2016): *InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods, Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 82, pp. 222-240, doi: 10.1016/j.soildyn.2015.12.010i.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

- Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M., Vignolo A., (2010): *Sedimentary and Tectonic Evolution in the Eastern PoPlain and Northern Adriatic Sea Area from Messinian to Middle Pleistocene (Italy)*, in F.P. Sassi, G. Dal Piaz, and C. Doglioni, (eds.), *Nature and Geodynamics of the Northern Adriatic Lithostere*: Rend. Fis. Acc. Lincei, v. 21/1, p. 131-16.
- Govoni A., Marchetti A., De Gori P., Di Bona M., Lucente F.P., Improta L., Chiarabba C., Nardi A., Margheriti L., Piana Agostinetti N., Di Giovambattista R., Latorre D., Anselmi M., Ciaccio M.G., Moretti M., Castellano C., Piccinini D., (2014): *The 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy): imaging the thrust fault system by accurate aftershocks location*. *Tectonophysics*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.02.013>.
- Gruppo di Lavoro Liquefazione, (2012): *Rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a Mirabello*. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>.
- Gruppo di lavoro MPS, (2004): *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003*. Rapp. conclusivo per il DPC, INGV, Milano-Roma, pp 65 + 5 appendici.
- Gruppo di Lavoro MS, (2008): *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Conferenza delle Regioni e Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom. http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137.
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Valensise G., (2007): *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and the Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*, INGV-SGA; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.
- Idriss I. M., Boulanger R. W., (2008): *Soil Liquefaction during earthquakes*. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, 469 pp.
- ISIDe Working Group, (INGV, 2010): *Italian Seismological Instrumental and parametric database*. <http://iside.rm.ingv.it>.
- Iwasaki T., Arakawa T., Tokida K., (1982): *Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes*. Proceedings of the Conference on Soil Dynam.
- 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>.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

- 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.
- Minarelli L., Amoroso S, Tarabusi G., Stefani M., Pulelli M., (2016): *Down-hole geophysical characterization of middle-upper Quaternary sequences in the Apennine Foredeep, Mirabello, Italy.* Annals of Geophysics, 2016.
- Montone P., Mariucci M.T., Pierdominici S., (2012): *The Italian present-day stress map*, Geophys. J. Int., 189, 705-716; doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05391.x.
- Mucciarelli M. (a cura di), (2012): *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici.*
- NTC, (2008): *Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 14 gennaio 2008.* Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, www.cslp.it, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- NTC, (2018): *Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 17 gennaio 2018.* Gazzetta Ufficiale, n. 8 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 8 alla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- Ori G.G., Friend P.F., (1984): *Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets.* Geology, 12, 475-478.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

- 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.
- Petronio L., Affatato A., Baradello L., Barbagallo A., Cristofano G., Sorgo D., Lai C.G., Poggi V. (2018): *Shear wave seismic reflection survey in the 2012 Emilia epicentral are*. Atti 37° Convegno Nazionale GNGTS, Sezione 2.2. Bologna.
- Pieri M., Groppi G., (1975): *The structure of the base of the Pliocene-Quaternary sequence in the subsurface of the Po and Veneto Plains, the Pedepennine Basin and the Adriatic Sea*. Structural model of Italy, Quaderni de "La Ricerca Scientifica" 90, 409-415.
- Pieri M., Groppi G., (1981): *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl., 414, 1-13.
- Pondrelli S., Salimbeni S., Perfetti P., Danecek P., (2012): *Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence*. Annals of Geophys., 55(4), 615-621, doi: 10.4401/ag-6146.
- Rathje E. M, Kottke A. (2013) - *Strata*, <https://nees.org/resources/strata>.
- Regione Emilia-Romagna (2014): *Ordinanza n. 70 del 16 ottobre 2014 del Commissario Delegato Regione Emilia-Romagna "Approvazione programma per gli studi di microzonazione sismica" e relativi elaborati prodotti*.
- Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, (1998): *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ufficio geologico – ENI-Agip, Divisione Esplorazione e Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120.
- Ricci Lucchi F., (1986): *The Oligocene to Recent foreland basins of the northern Apennines*, in: Allen, P., Homewood, P. (Eds.), Foreland basins. Blackwell Scientific, Oxford, pp. 105-139.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M.L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi S., Rio D., (1982): *Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nel margine appenninico*, in: Cremonini G., Ricci Lucchi F. (Eds.). Guida alla Geologia del margine appenninico-padano Pitagora-Technoprint, Bologna, pp. 17-46.
- Robertson P.K., (2009): *Performance based earthquake design using the CPT*, Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - from case history to practice, IS-Tokyo, June 2009

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

- 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., Marocci C., Mazza S., Pintore S., Quintiliani M., (2012): *The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations, moment tensors and magnitudes*. Annals of Geophys., **55**(4), 549-556, doi: 10.4401/ag-6159
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, **2**(4), 552-555.
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, 2, 4, pp. 550-555.
- Sonmez H., (2003): *Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey)*. Environ. Geology 44(7), pp. 862-871.
- Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G., (2009): *Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): seismotectonic implications*. Bollettino della Società Geologica Italiana 128.
- Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D., Arango I., Castro G., Christian J.T., Dobry R., Finn W.D.L. Harder L.F., Hynes M.E., Ishihara K., Koester J., Liao S., Marcuson III W.F., Martin G.R., Mitchell J.K., Moriwaki Y., Power M.S., Robertson P.K., Seed R., Stokoe K.H.,: *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF*. Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, October, pp 817-833.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI CAMPOSANTO

11 Allegati

Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000
Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica	Tavola 2	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica	Tavola 4	1:10.000
Carta della velocità delle onde di taglio	Tavola 5	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FAPGA	Tavola 6	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA0.1 - 0.5 s	Tavola 7	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA0.5 - 1 s	Tavola 8	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA0.5 - 1,5 s	Tavola 9	1:10.000

Allegato 1 - Sezioni Geologiche

Allegato 2 - Rapporti di Prova

Allegato 3 - Verifica Potenziale di Liquefazione CPTU MS
