



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 Bondeno (FE)



Relazione Illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia–Romagna	Geotema S.r.l.	31/01/2023

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

Indice

1	Introduzione.....	4
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi.....	4
1.2	Lo studio di microzonazione sismica	5
1.3	Elaborati prodotti	6
2	Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento	7
2.1	Sismicità storica	8
2.1.1	La sequenza del 2012	12
2.2	Sorgenti sismogenetiche	17
3	Assetto geologico e geomorfologico dell'area	19
3.1	Quadro geografico geomorfologico	19
3.2	Contesto geologico stratigrafico.....	21
3.3	Contesto strutturale	23
4	Dati geognostici e geofisici	28
4.1	Indagini di repertorio.....	28
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica	30
4.2.1	Indagini realizzate in situ	30
5	Modello del sottosuolo	37
5.1	Substrato	40
5.1.1	L'unità stratigrafica del Quaternario Marino	41
5.2	Terreni di copertura.....	42
5.2.1	Supersistema Emiliano-Romagnolo	42
6	Interpretazioni e incertezze	46
6.1	Frequenza naturale dei terreni (f_0).....	46
6.2	Substrato rigido	47
6.3	Terreni suscettibili di liquefazione.....	49
7	Metodologie di elaborazione e risultati.....	50
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali	51
7.1.1	Analisi di risposta sismica locale con modellazioni numeriche	52

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

7.1.2	Calcolo del parametro H_{SM}	62
7.2	Zone instabili soggette a liquefazione	64
7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione	64
8	Elaborati cartografici.....	72
8.1	Carta delle indagini (Tavola 1a - 1b)	73
8.2	Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica (Tavola 2a - 2b)	74
8.2.1	Elementi geologici ed idrogeologici.....	74
8.2.2	Terreni di copertura.....	75
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3a - 3b)	76
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4a - 4b).....	77
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5a - 5b).....	81
8.6	Carte di microzonazione sismica (Tavole da 6a - 6b a 17a - 17b).....	81
9	Commenti finali e criticità.....	85
9.1	Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale.....	86
9.2	Microzonazione sismica e criticità.....	87
9.3	Indicazioni per la riduzione del rischio sismico	89
10	Bibliografia	91
11	Allegati	100

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

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

1 Introduzione

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

Nella fase immediatamente successiva alla sequenza sismica emiliana del 2012, la Regione Emilia-Romagna, attraverso l'Ordinanza 70/2012, ha infatti realizzato studi di microzonazione sismica negli ambiti urbanizzati e suscettibili di urbanizzazione dei 17 Comuni dell'area epicentrale (Martelli *et al.*, 2013).

Con Determinazione di Giunta Regionale n. 17050/2016, sono stati infine destinati al Comune di Bondeno i contributi per la realizzazione del presente studio di microzonazione sismica con approfondimenti di terzo livello ed analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (C.L.E.).

Questa fase conclusiva del percorso di microzonazione fornisce l'occasione per aggiornare i contenuti dei precedenti studi adeguandoli agli *"Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"* nazionali (Gruppo di Lavoro MS, 2008) ed alle attuali D.G.R. 476/2021 *"Aggiornamento dell'Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)"* di cui alla *Deliberazione della Giunta Regionale 29 aprile 2019, n. 630* e D.G.R. 564/2021 *"Integrazione della propria Deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'Allegato A, Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)"*.

1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

Il presente studio di microzonazione sismica di terzo livello del Comune di Bondeno è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nelle attuali D.G.R. 476/2021 *"Aggiornamento dell'Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)"* di cui alla *Deliberazione della Giunta Regionale 29 aprile 2019, n. 630* e D.G.R. 564/2021 *"Integrazione della propria Deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'Allegato A, Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)"*.

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 DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

- *“Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2”*, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2020), da qui in avanti *“Standard MS 4.2”*;
- *“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”*;
- Linee Guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazione (LQ)(v. 1.0 Roma, 2018);
- Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni (v. 2.0 Roma, 2022).

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

- D.M. del 14 gennaio 2008 *“Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”*;
- D.M. del 16 gennaio 2018 *“Norme Tecniche per le Costruzioni”*;
- L.R. n. 19 del 30 ottobre 2008 *“Norme per la riduzione del Rischio Sismico”*;
- Ordinanza n. 70 del 16 ottobre 2012 del Commissario Delegato Regione Emilia-Romagna *“Approvazione programma per gli studi di microzonazione sismica”* e relativi elaborati prodotti;
- L.R. n. 24 del 21 dicembre 2017 *“Disciplina regionale sulla tutela e l’uso del territorio”*;
- Variante specifica al PTCP della Provincia di Ferrara relativa ad *“ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale”*, adottata dal Consiglio Provinciale il 29 maggio 2014. Tale variante contiene, all’interno del proprio Quadro Conoscitivo, un documento relativo la sismicità in Provincia di Ferrara.

1.2 Lo studio di microzonazione sismica

Come noto, le caratteristiche geologiche e geomorfologiche locali possono determinare alterazioni nel moto sismico in superficie ed effetti di instabilità, come frane, liquefazioni o cedimenti eventualmente innescati in caso di sisma. La finalità principale di uno studio di microzonazione sismica consiste nel giungere alla suddivisione del territorio indagato in aree omogenee, sia sulla base della risposta sismica dei terreni, sia per quanto concerne i possibili effetti locali indotti dallo scuotimento.

Obiettivo specifico degli approfondimenti di terzo livello è invece l’analisi dell’effettivo grado di pericolosità sismica delle aree riconosciute come instabili e/o potenzialmente instabili. In un contesto di pianura

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

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

Gli studi di microzonazione sismica si pongono quindi come strumenti fondamentali per la prevenzione e la riduzione del rischio sismico, fornendo elementi capaci di indirizzare le scelte di pianificazione urbanistica verso zone a minore pericolosità, ed orientare gli interventi di mitigazione in aree a rischio instabilità, fornendo anche utili indicazioni preliminari per la progettazione. Secondo gli indirizzi regionali (D.G.R. n. 476/2021 e D.G.R. n. 564/2021) gli studi di microzonazione sismica, necessari per la redazione e l'approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (L.R. n. 24/2017), devono interessare il territorio urbanizzato, le aree in cui siano considerati ammissibili trasformazioni edilizie od urbanistiche, gli agglomerati rurali di dimensioni significative e le fasce di territorio riguardanti le reti infrastrutturali di nuova previsione, compresi i corridoi destinati al potenziamento ed alla razionalizzazione dei sistemi per la mobilità.

Gli ambiti interessati dagli approfondimenti di terzo livello di microzonazione sismica ricalcano esattamente quelli utilizzati nei precedenti studi (Ordinanza 70/2012), in accordo con quanto stabilito con il Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna e con il "Settore Tecnico - Area ambiente e territorio (AAT)" del Comune di Bondeno.

1.3 Elaborati prodotti

Gli elaborati di riferimento dello studio di microzonazione sismica, come indicato nelle D.G.R. n. 476/2021 e D.G.R. n. 564/2021, sono rappresentati dalle tavole cartografiche di sintesi e dagli archivi digitali contenenti i dati informatizzati ad esse associate. La relazione illustrativa rappresenta, invece, il documento tecnico che accompagna gli elaborati cartografici; essa illustra oltre agli aspetti d'inquadramento territoriale, geologico e normativo, i dati geologici e geofisici utilizzati per lo studio, i modelli e le metodologie di elaborazione impiegate, le principali criticità ed incertezze rilevate ed i risultati e gli elaborati cartografici prodotti.

Nel complesso il presente studio è quindi costituito da:

- **17 Tavole cartografiche**, descritte al capitolo 8;
- **5 Sezioni geologiche** (Allegato 1);

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

- **Archivi digitali dei dati informatizzati;**
- **Rapporti di prova delle indagini di nuova esecuzione (Allegato 2);**
- **Rapporti delle verifiche puntuali di suscettibilità a liquefazione (Allegato 3);**
- **Dettagli delle analisi di Risposta Sismica Locale (Allegato 4);**
- **Relazione illustrativa.**

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in conformità con quanto indicato nelle sopracitate delibere regionali; tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica “Standard MS 4.2”, che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi.

2 Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

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

- il CPTI15 v4.0 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 4.0 (Rovida *et al.*, 2020; Rovida *et al.*, 2022; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15>), che fornisce 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 1000-2020;
- il DBMI15 v4.0 - Database Macrosismico Italiano versione 4.0 (Locati *et al.*, 2022; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15>), 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 1000-2020;
- il DISS versione 3.3.0 - Database Italiano delle Sorgenti Sismogenetiche (DISS Working Group, 2021; <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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

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 CFTI5Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)(Guidoboni *et al.*, 2018; Guidoboni *et al.*, 2019; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>), che include 1.259 terremoti per la sola area italiana (di cui 98 terremoti che si sono rivelati falsi), e fornisce informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti. Nel catalogo sono anche presenti dati relativi ai parametri epicentrali, ad effetti locali sismoindotti (fagliazione superficiale, frane, maremoti, ecc.) e danni ai centri storici ed a beni monumentali;
- la Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>), che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri spettrali” riferiti all’accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell’azione sismica;
- la Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004; <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e che ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica di base a scala nazionale.

2.1 Sismicità storica

La ricostruzione della sismicità storica del territorio di Bondeno è stata effettuata basandosi innanzitutto sull’analisi del Database Macrosismico Italiano - DBMI15 v4.0 (Locati *et al.*, 2022), il quale consente la

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

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 1000-2020.

In relazione al Comune di Bondeno il database contiene 35 record relativi ad eventi sismici storici; data l'ampia mole di dati presenti, si è deciso di prendere in considerazione solamente quelli riportanti intensità macrosismiche $IMCS \geq 5$ (Tabella 2-1 e Figura 2-1). Per ciascun terremoto sono stati quindi riportati i valori di intensità macrosismica ($IMCS$) osservata nel territorio comunale in occasione degli eventi considerati, l'area epicentrale, il numero di Macroseismic Data Point (NMDP), l'intensità epicentrale (I_0) e la magnitudo momento (M_w) stimata mediante relazioni empiriche. I valori di intensità sono espressi in accordo con la scala Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930), come riportato in Tabella 2-2.

IN OCCASIONE DEL TERREMOTO DEL:										EFFETTI
DATA						AREA EPICENTRALE	NMDP	I_0	M_w	IMCS BONDENO
Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se					
1511	03	26	15	30		Friuli-Slovenia	120	9	6.32	V-VI
1570	11	17	19	10		Ferrarese	58	7-8	5.44	VII
1909	01	13	00	45		Emilia-Romagna orientale	867	6-7	5.36	V
1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	4	4.43	VI
2012	05	20	02	03	5	Pianura emiliana	53	7	6.09	VI
2012	05	29	07	00	0	Pianura emiliana	87	7-8	5.90	VI

Tabella 2-1 - Valori di intensità macrosismica osservati nel Comune di Bondeno, in occasione dei principali eventi, tratti dal database DBMI15 v4.0 (Locati et al., 2022).

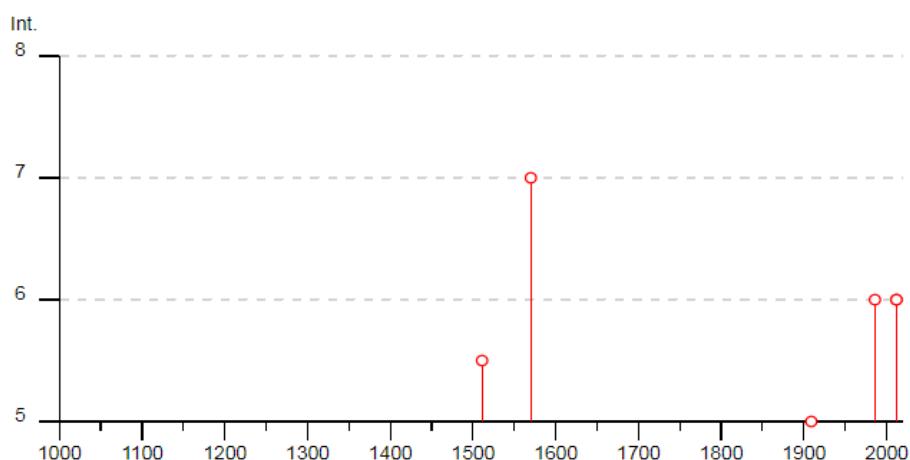


Figura 2-1 - Valori di intensità macrosismica $IMCS \geq 5$ attribuite al Comune di Bondeno, dall'anno 1000 al 2020, tratte dal database DBMI15 v4.0 (Locati et al., 2022).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

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

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

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 di VI grado.

Valori pari al VII grado sono stati invece osservati con il terremoto del 1570 del Ferrarese, con epicentro a Ferrara. Di quest'ultimo terremoto, verificatosi il 17 novembre 1570, con intensità epicentrale pari al VII-VIII grado e magnitudo momento pari a 5.44, si riporta di seguito un estratto dal catalogo CFTI5med dei commenti storico-critici e delle descrizioni degli effetti locali.

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

della campagna, dei quali sono documentati soprattutto i danni agli edifici religiosi. La scossa fu sentita in una vasta area comprendente le principali città emiliane, Milano, Padova e Venezia a nord; Pesaro a sud. Il quadro complessivo degli effetti è cumulativo delle scosse del 17 novembre. Numerosissime e frequenti furono le repliche ricordate e descritte dalle fonti fino ai primi mesi del 1572; qualche scossa fu avvertita anche nel 1573 e nel 1574.”.

Le fonti storiche riportano anche evidenze di effetti geologici di sito legati al sisma: “*effetti di liquefazione del terreno nell’area urbana di Ferrara e nelle immediate vicinanze (in alcuni casi con emissione di fumi o con fuoriuscita di sabbie bollenti) e apertura di fessure con fuoriuscita di “una schiuma nera”. Presso Stellata il Po subì un temporaneo arresto del flusso delle acque; il loro innalzamento e il successivo rapido abbassamento causarono danni ai mulini.”.*

In Figura 2-2 è riportata in mappa la distribuzione degli effetti macrosismici relativi al terremoto del 17 novembre 1570 rispetto all’area del comune di Bondeno.

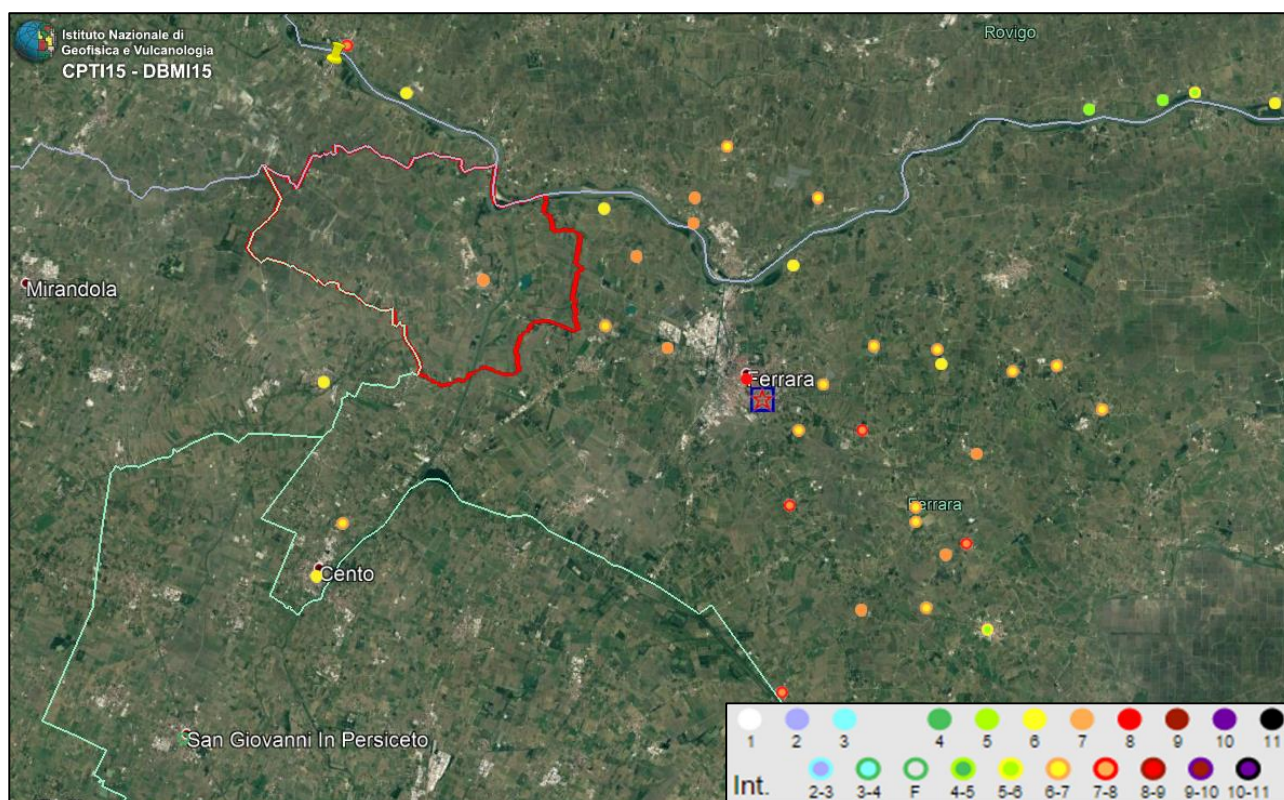


Figura 2-2 - Distribuzione degli effetti del sisma del 17 novembre 1570. Dati DBMI15 v4.0. In rosso è rappresentato il territorio di Bondeno.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

La Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento (INGV, 2004) mostra, per l'area in esame, un'accelerazione massima attesa su suolo rigido compresa tra 0,100 - 0,150 g, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Figura 2-3).

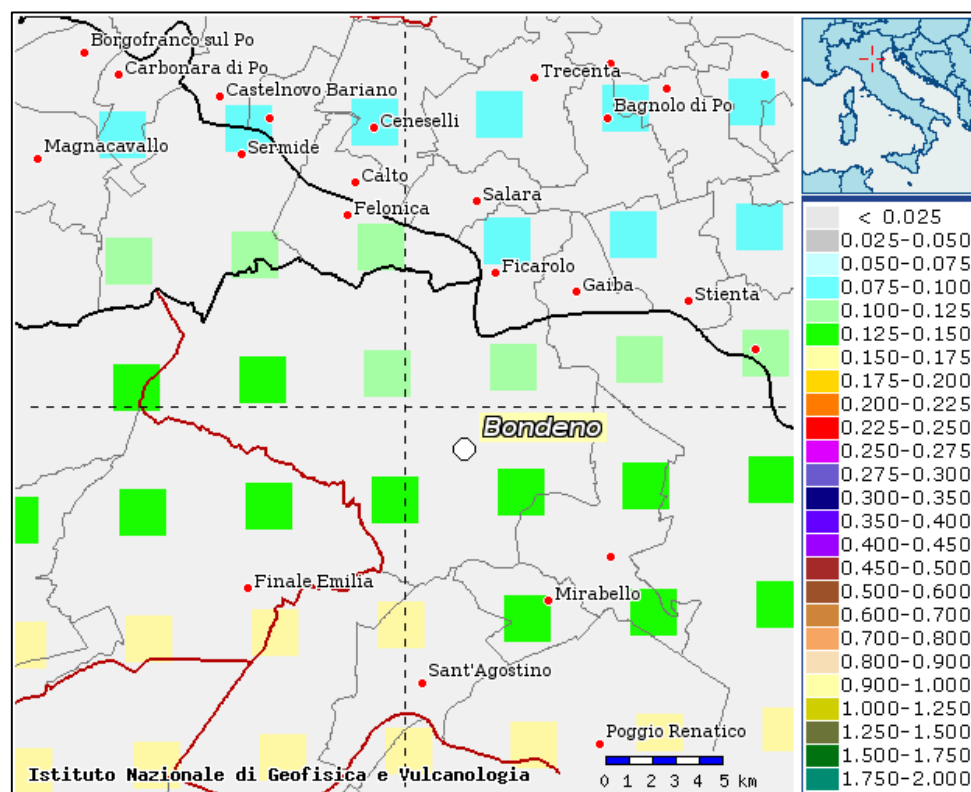


Figura 2-3 - Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento nell'intorno dell'area di studio.

2.1.1 La sequenza del 2012

Tra il 20 maggio ed i primi di giugno 2012, un'importante sequenza sismica ha interessato una vasta area della bassa Pianura Padana, compresa tra le Province di Bologna, Modena, Reggio Emilia, Mantova e Ferrara. La sequenza sismica è stata generata da strutture fragili della parte frontale della catena appenninica sepolta, le cosiddette Pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981), serie di pieghe e sovrascorrimenti a vergenza nord-orientale che coinvolgono sia la successione carbonatica Mesozoica, sia la copertura sedimentaria Terziario - Quaternaria; nelle parti profonde e meridionali analoghe strutture compressive coinvolgono anche il basamento metamorfico varisco.

La sequenza è stata caratterizzata da due scosse principali; la prima, di magnitudo momento M_w 6.1, il 20 maggio, alle 4:03 ora locale, con epicentro tra Finale Emilia e San Felice sul Panaro (44°51'50" N, 11°14'31"

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

E, profondità 6,3 km - Figura 2-4), mentre la seconda, di M_w 5.9, è avvenuta il 29 maggio alle 9:00 ora locale, con epicentro tra Mirandola e Medolla, ($44^{\circ}50'00''$ N, $11^{\circ}03'37''$ E, profondità 13,5 km - Figura 2-4) (ISIDe Working Group 2016).

Scosse successive interessarono un'area estesa per oltre 50 km, in direzione est - ovest; in particolare sono state registrate cinque repliche di $M_w \geq 5.0$, con epicentri tra Novi di Modena e Vigarano Mainarda (Figura 2-4), ed oltre 3.700 scosse di $M_w \geq 1.5$ (Figura 2-4). Per l'area del Comune di Bondeno particolarmente rilevante è stata la forte scossa della notte del 20 maggio, che ha prodotto diffusi danni all'edificato ed effetti di liquefazione qui sviluppati soprattutto in aree rurali.

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

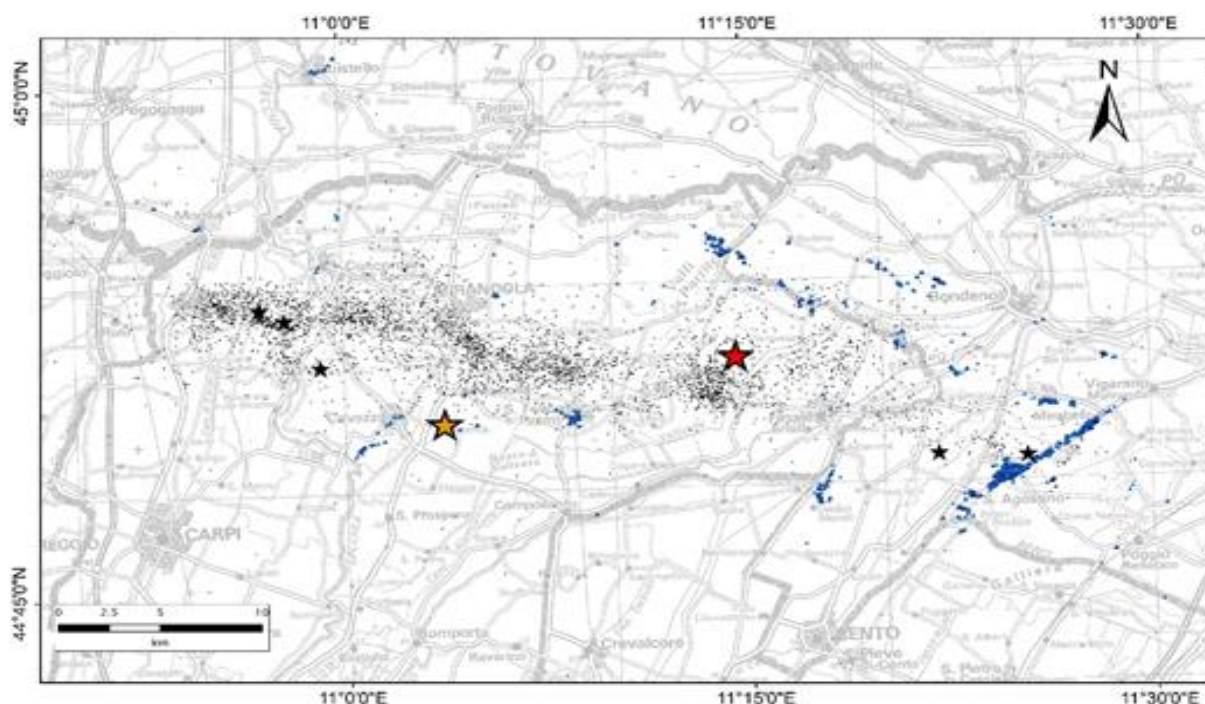


Figura 2-4 - Sequenza sismica emiliana del 2012. Le stelle rosse e arancio rappresentano rispettivamente le scosse principali del 20 e 29 maggio. Le stelle nere riportano la localizzazione degli *aftershocks* con $M_w \geq 5.0$, mentre i piccoli punti neri indicano gli eventi con $M_w \geq 1.5$. I piccoli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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

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

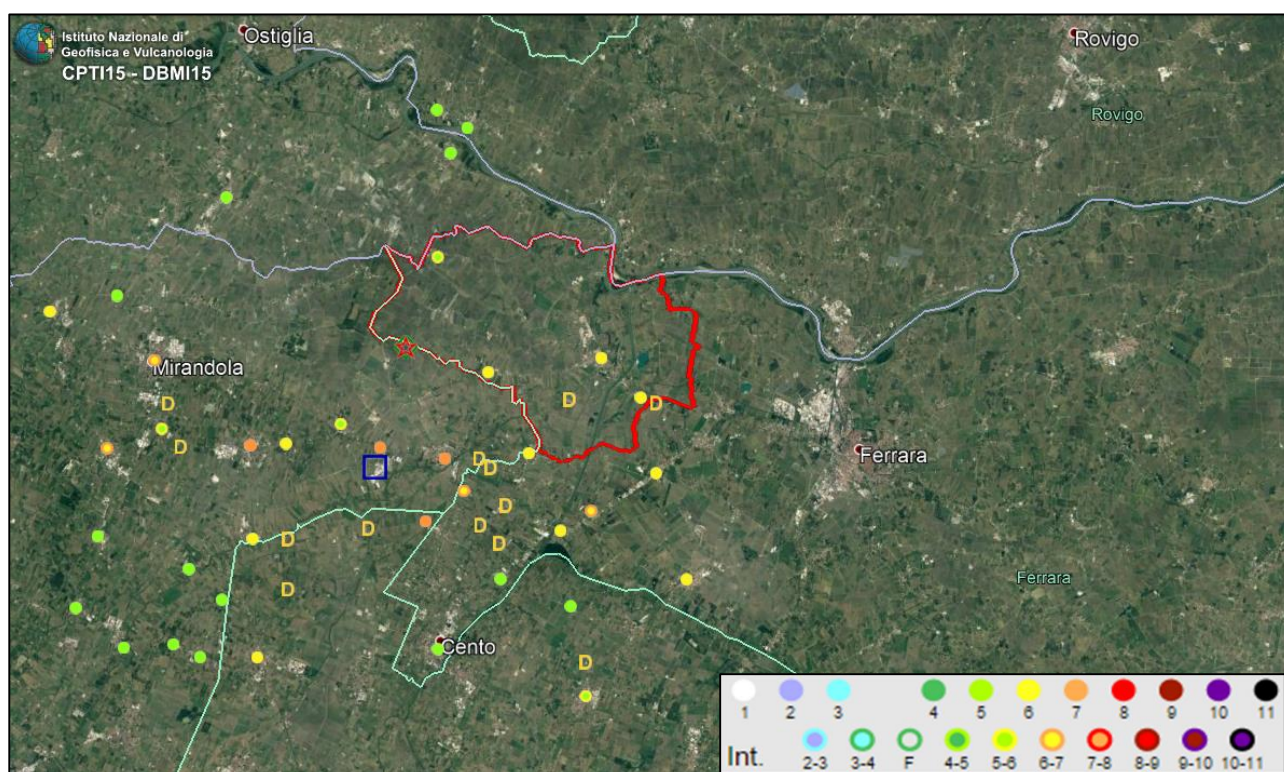


Figura 2-5 - Distribuzione degli effetti del sisma del 20 maggio 2012. Dati DBMI15 v4.0. In rosso è rappresentato il territorio di Bondeno.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

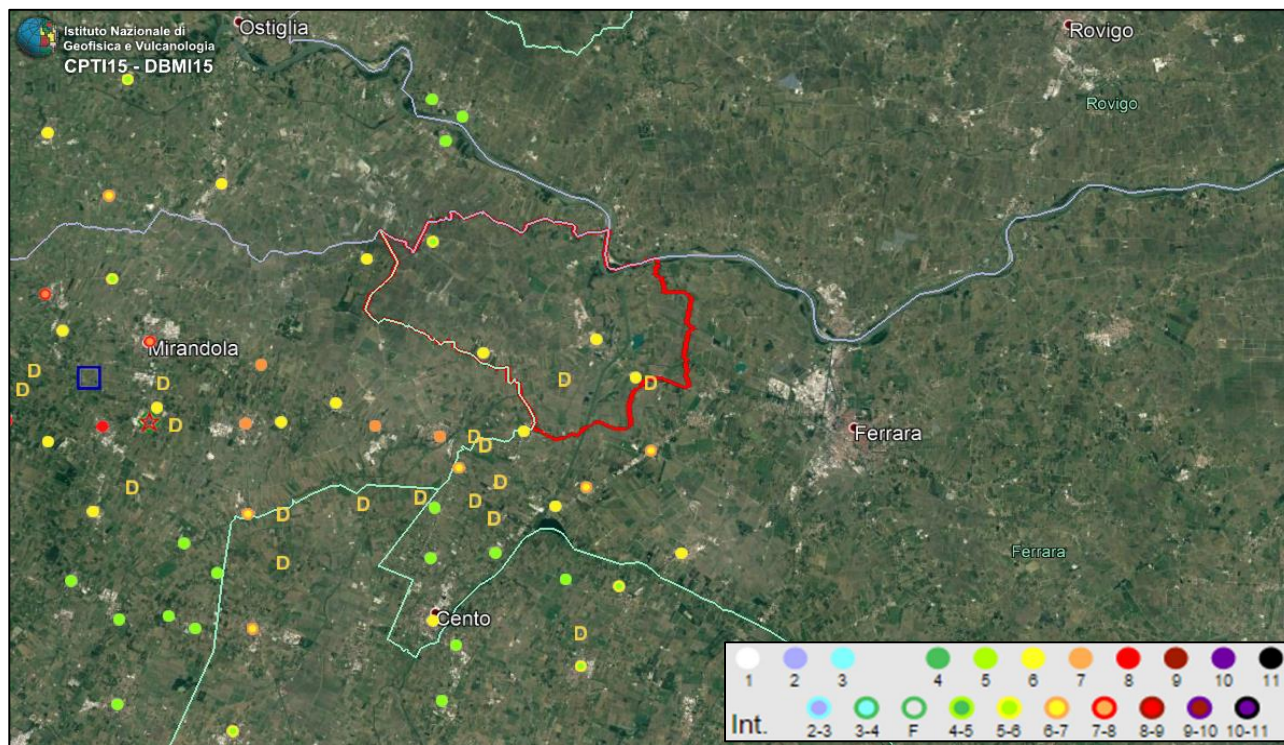


Figura 2-6 - Distribuzione degli effetti del sisma del 29 maggio 2012. Dati DBMI15 v4.0. In rosso è rappresentato il territorio di Bondeno.

Nel territorio, duramente colpito dalla sequenza sismica del 2012, si sono verificate numerose lesioni e crolli parziali su larga parte degli edifici storici pubblici e privati, con danneggiamenti dei paramenti murari ed in corrispondenza delle connessioni tra la copertura e gli elementi strutturali degli edifici stessi. Gravi danni hanno interessato anche svariati edifici produttivi. In ogni caso, la natura prevalentemente agricola del territorio bondenese ha fatto sì che il maggior numero di danni si sia verificato sugli edifici rurali, sia residenziali che a servizio dell'attività agricola.

I danni più ingenti al patrimonio storico e artistico hanno riguardato la totalità delle chiese presenti sul territorio, alcune delle quali come la Chiesa di San Giovanni sita nel Borgo storico del capoluogo, la Chiesa del Sacro Cuore e la Beata Vergine di Lourdes site nel centro di Bondeno sono ancora chiuse al culto. E' stato danneggiato anche il Duomo del capoluogo, che ha riportato gravi danni alla Torre Matildea, quali il distacco delle scale dalle pareti esterne agli ultimi piani e il crollo della voltina dell'ultimo solaio. Ma ancora danni importanti sono stati registrati alla chiesa della frazione di Burana, Stellata e al Santuario della Madonna della Pioppa di Settepolesini. Il cimitero di Bondeno ha subito ingenti crolli e distacchi dei volti della parte monumentale, attualmente in corso di ripristino.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

La Rocca Possente di Stellata sita nella zona golenale del Po, ha subito danni soprattutto alla volte del piano terra e piano primo, questi ultimi dovuti alle sollecitazioni di tipo verticale indotte dal sisma ed amplificate da effetti di punzonamento generati da alcuni elementi strutturali.

Il settore scolastico ha visto la realizzazione di tre scuole, tutte primarie, per le frazioni di Scortichino e Pilastri, oltre che per il capoluogo Bondeno. Le strutture hanno sostituito quelle esistenti, dichiarate nel 2012 inagibili poi ripristinate per altri usi differenti da quello scolastico. I danni del terremoto hanno portato, infine, alla demolizione della palestra del liceo sito nel capoluogo.

Ingenti danni hanno interessato l'infrastruttura viaria del Ponte Rana, che collega due porzioni importanti dell'abitato di Bondeno Capoluogo; attualmente il ponte risulta già demolito ed è in corso la realizzazione del nuovo manufatto a sostituzione.

Un importante fenomeno di dissesto si è verificato sulle strutture arginali del Canale Diversivo, dove sono presenti alcuni agglomerati residenziali, sparsi lungo tutta la lunghezza dell'argine, nel territorio comunale. Le strutture arginali sono state interessate da importanti fenomeni deformativi e fratturazioni che si sono manifestati parallelamente all'argine e alla strada comunale "Argine Diversivo" che corre longitudinalmente all'argine stesso. Contestualmente sono stati riscontrati una serie di dissesti, quali distacchi e rotazioni di corpi di fabbrica originariamente accostati, lesioni nei muri di sostegno, crepe e gravi danneggiamenti strutturali nelle abitazioni, senz'altro associabili al sistema di fratture nel terreno indotto dal sisma. Ulteriori effetti osservati durante le due principali scosse della sequenza emiliana, sono stati l'amplificazione del moto sismico ed i fenomeni di liquefazione, diffusi in corrispondenza di antichi alvei fluviali, oggi abbandonati e sepolti.

Le stazioni della Rete Accelerometrica Nazionale e quelle temporanee installate immediatamente dopo la scossa del 20 maggio, hanno registrato, nell'area epicentrale, valori di accelerazione orizzontali in superficie superiori a 0,2 g e localmente prossime a 0,4 g. Tali accelerazioni, anche di molto superiori a quelle considerate per la redazione della mappa di pericolosità di base dell'area (Figura 2-3), sono state determinate da evidenti fenomeni di amplificazione stratigrafica del moto sismico.

La manifestazione di fenomeni di liquefazione è stata abbondantemente documentata dopo la scossa del 20 maggio, nelle aree agricole occidentali del territorio comunale comprese tra Burana, Scortichino e Santa Bianca (Emergeo Working Group, 2013). Oltre ad eruzioni di sabbie dal sottosuolo attraverso fratture nel terreno e formazione di vulcanelli, sono stati anche osservati cedimenti differenziali e localmente dislocazioni laterali.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il Database italiano delle sorgenti sismogenetiche versione 3.3.0 (DISS Working Group, 2021) mostra come il territorio comunale di Bondeno sia interessato dalla presenza di due sorgenti sismogenetiche composite, ITCS050 nella parte settentrionale ed ITCS103 in quella meridionale (Figura 2-7).

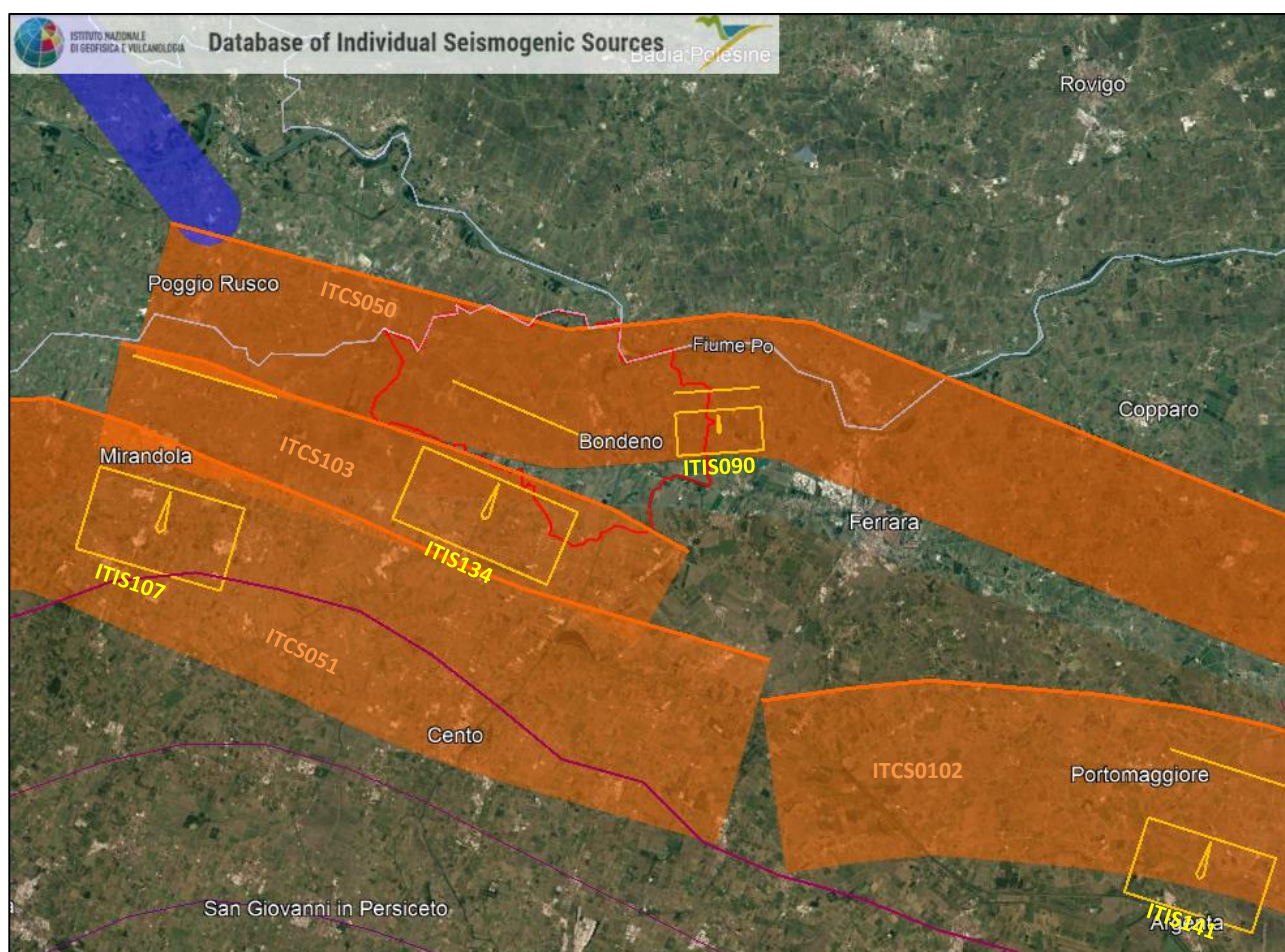


Figura 2-7 - Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) ed individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.3.0, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è rappresentato il territorio di Bondeno.

La prima struttura, denominata Poggio Rusco-Migliarino, delimita il settore più esterno delle Pieghe Ferraresi e si estende con orientazione ovest - nord-ovest – est - sud-est; essa comprende la sorgente individuale di Ferrara (ITIS090), caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 5.5, profondità tra 1,4 e 4,5 km e slip-rate compreso tra 0,10 e 0,50 mm/anno. L'esistenza di tale sorgente è avvalorata sia da dati di sottosuolo (Pieri e Groppi, 1981; Boccaletti e Martelli, 2004; Burrato *et al.*, 2003;

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

2012), sia da attività tettonica “relativamente recente”, alla quale si riconduce il terremoto di Ferrara del 17 novembre 1570; l’ubicazione della stessa è stata proposta in base ad anomalie del reticolo idrografico, in particolare alla deviazione dell’alveo del fiume Po in prossimità di Stellata, interpretata come possibile conseguenza della deformazione indotta dall’attività tettonica della struttura sepolta.

La seconda struttura invece, denominata Finale Emilia-Mirabello ed anch’essa orientata ovest - nord-ovest – est - sud-est, comprende la sorgente individuale di Finale Emilia (ITIS134), caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 6.1, profondità tra 4,0 e 8,5 km e slip-rate compreso tra 0,25 e 0,5 mm/anno. L’esistenza di tale sorgente è stata proposta sulla base della localizzazione dell’evento del 20 maggio 2012.

L’area di studio è inoltre bordata a sud da altre due sorgenti sismogenetiche composite anch’esse approssimativamente orientate ovest - nord-ovest – est - sud-est e denominate Carpi-Poggio Renatico (ITCS051) e Malalbergo-Ravenna (ITCS102).

La prima di queste comprende la sorgente individuale di Mirandola (ITIS107) ed è caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 6, profondità tra 4,0 e 7,0 km e slip-rate compreso tra 0,5 e 1,04 mm/anno. La seconda struttura invece comprende la sorgente individuale di Argenta (ITIS141) ed è caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 5,8, profondità tra 3,0 e 6,3 km e slip-rate compreso tra 0,49 e 0,55 mm/anno.

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

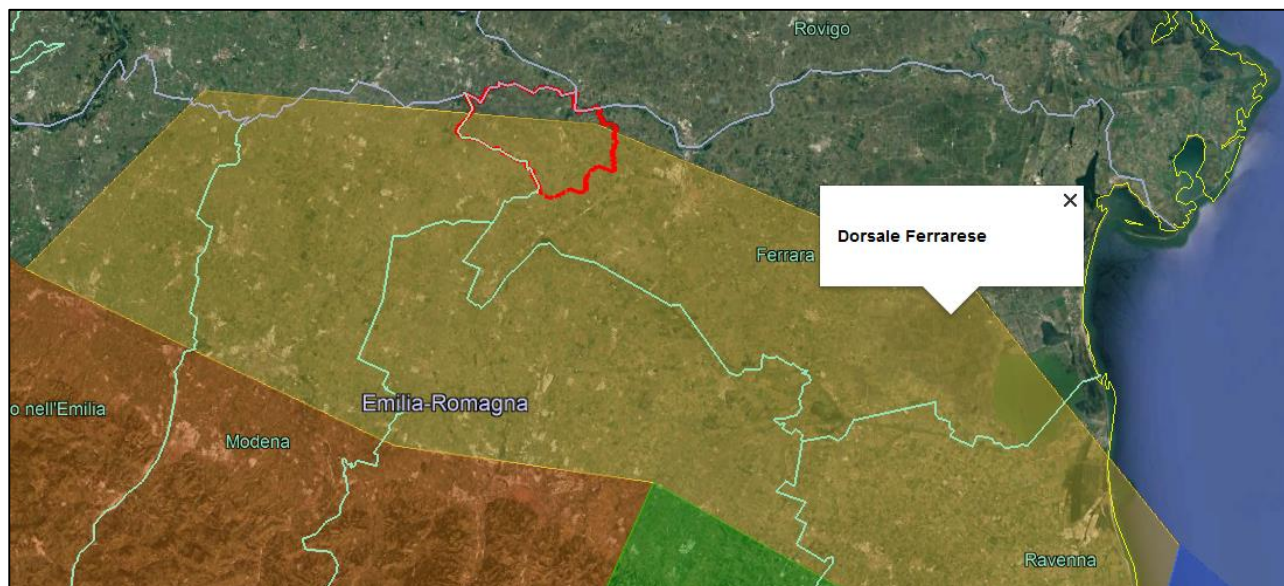


Figura 2-8 - Ubicazione del territorio comunale di Bondeno (in rosso) rispetto alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).

3 Assetto geologico e geomorfologico dell'area

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

3.1 Quadro geografico geomorfologico

Il territorio analizzato è parte della porzione più nord-orientale della Provincia di Ferrara e si sviluppa in un'area di bassa pianura alluvionale formata da depositi fluviali, sia di provenienza appenninica che padana. A nord di Bondeno il territorio comunale è limitato dall'attuale alveo del Po, che marca il confine tra la Regione Emilia-Romagna e la Regione Veneto.

L'assetto geomorfologico del territorio è caratterizzato da un articolato microrilievo, costituito da forme a meandro leggermente rilevate, dossi fluviali allungati, piccole strutture di argine naturale che sfumano in ampie depressioni interalvee. Queste strutture risultano estremamente evidenti grazie alle tecniche di telerilevamento laser (LIDAR), che permettono una ricostruzione altimetrica di elevato dettaglio (Figura 3-1). Particolarmente marcato, con quote tra i 10 e 12 m, appare il dosso fluviale del Po di età

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

romana e medievale, che provenendo da Stellata con direzione dapprima nord-sud, poi, a valle di Bondeno, est-ovest, prosegue verso di Ferrara. A nord di Bondeno questo dosso contiene l'attuale alveo del Panaro che lo ripercorre in direzione opposta a quella dell'antico Po, formando strutture attive a meandro. Questa struttura dossiva separa le ampie aree occidentale e meridionale, dominate da morfologie formate da depositi appenninici, da quella più orientale costituita esclusivamente da strutture formate da sedimenti di Po. Figura 3-1. L'ampia area occidentale è caratterizzata da dossi fluviali minori, con quote attorno agli 8-9 m, allungati in direzione WNW-ESE, che limitano strette depressioni interalvee sviluppate nella medesima direzione. Al margine sud occidentale di quest'area, sono presenti morfologie relitte a meandro di Po. La porzione più meridionale del territorio è invece formata da una singola depressione interalvea, limitata a nord ovest dall'alveo del Panaro ed a nord est dal dosso fluviale del Po di Ferrara. Infine la porzione orientale del territorio comunale ospita evidenti strutture a meandro di età medievale bordate ad est dalle zone topograficamente più depresse con quote attorno ai 5 m.

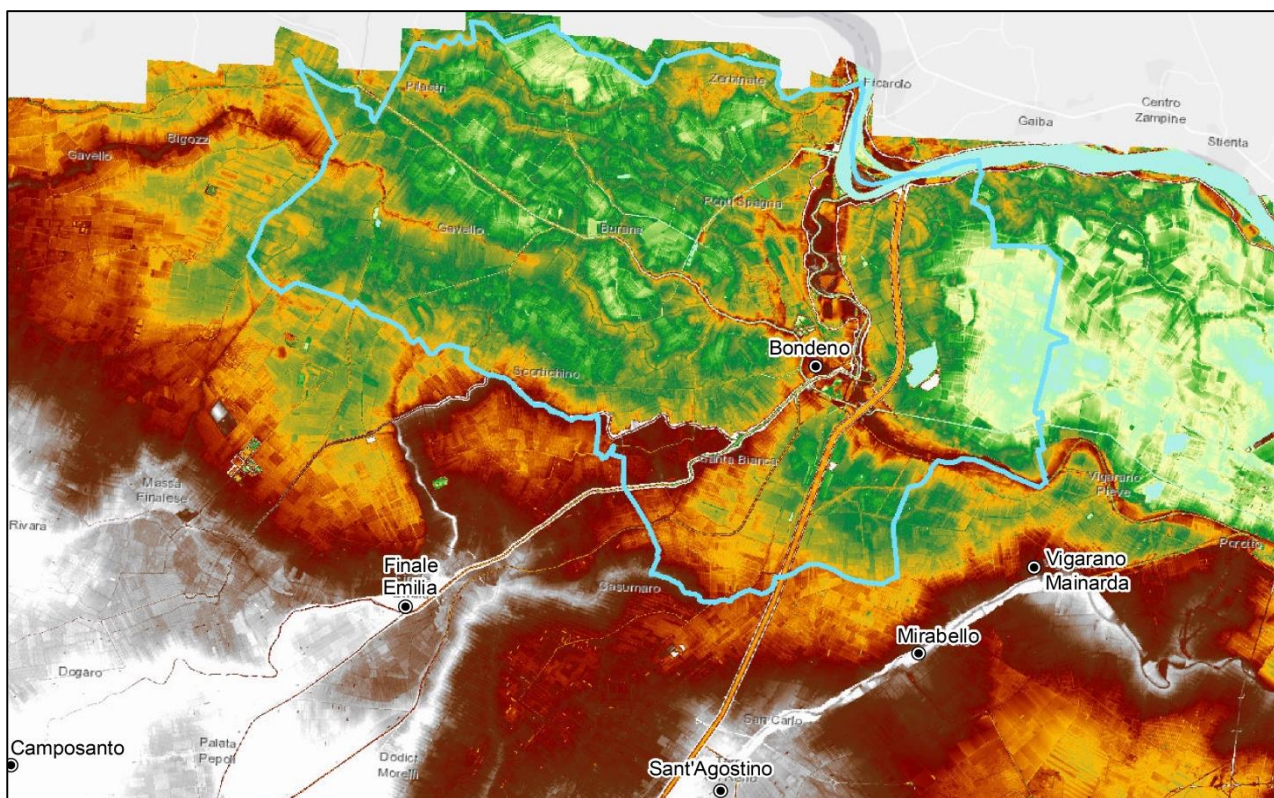


Figura 3-1 - Modello altimetrico LIDAR (dati Regione Emilia-Romagna). Estremamente evidente (in marrone) appare il dosso fluviale del Po di età romana e medievale che costeggia l'abitato di Bondeno. Subito ad ovest di esso si osservano morfologie a meandro di Po. Altri rilievi dossivi caratterizzano la parte occidentale del territorio comunale. Altrettanto evidenti risultano le depressioni interalvee (in verde) che caratterizzano le porzioni più orientali e settentrionali del territorio comunale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

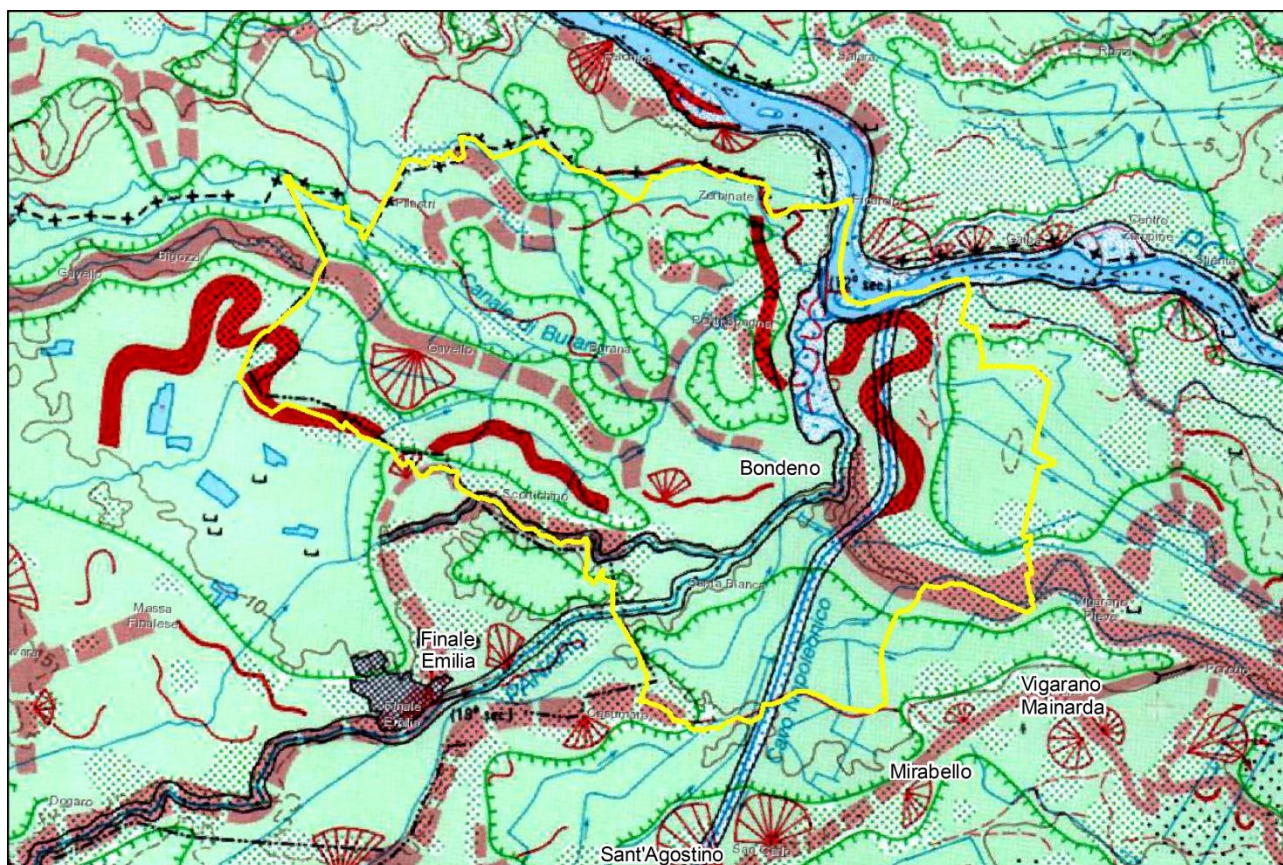


Figura 3-2 - Stralcio dalla Carta Geomorfologica della Pianura Padana 1:250.000 (Castiglioni G.B. Ed. 1999), che illustra la complessa alternanza di corpi dossivi di paleoalveo (in rosso) e depressioni interalvee (in verde), limitate da piccole scarpate morfologiche (linee verdi). Nella parte centro-meridionale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

3.2 Contesto geologico stratigrafico

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

I primi studi, realizzati durante l'emergenza sismica del 2012, hanno gettato le basi per i successivi approfondimenti, delineando in maniera generale i principali caratteri geologico-evolutivi dell'area. La carta geologica di superficie in scala 1:100.000, allegata allo studio di microzonazione sismica dell'Ordinanza 70/2012, già indicava come i depositi affioranti nel territorio comunale fossero costituiti da sabbie di canale, argine e rotta fluviale, giustapposte ad argille e limi organici di palude interalvea.

Secondo i criteri stratigrafici adottati dalla cartografia nazionale del Progetto CARG, tutti i sedimenti affioranti nell'area di studio sono riferibili al Subsintema di Ravenna (AES8), a sua volta inquadrato nella parte più recente del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) (cfr. Note Illustrative Foglio CARG 202 "San Giovanni in Persiceto" e 203 "Poggio Renatico").

Negli ultimi anni la conoscenza del contesto geologico è notevolmente aumentata grazie ad alcune pubblicazione scientifiche, agli studi di microzonazione sismica dei comuni emiliani limitrofi e alla carta geologica della Provincia di Ferrara. La cartografia provinciale, realizzata da Geotema S.r.l. nel 2016, e recenti cartografie geologico-tecniche delle microzonazioni sono basate sull'analisi di immagini satellitari, modelli altimetrici e informazioni derivanti da cartografia storica, integrate da rilevamenti di terreno e confronti con indagini geognostiche sul sottosuolo prossimo alla superficie.

La carta provinciale (Figura 3-3) mostra come la parte nord-occidentale della pianura ferrarese sia costituita dai corpi sabbiosi di paleoalveo del Po e di altri fiumi minori di provenienza appenninica, quali Secchia e Panaro e nella porzione meridionale del territorio di Bondeno anche del Reno. Questi corpi sono stati deposti in età recente e sono quindi interamente attribuibili al Subsintema di Ravenna (AES8), le cui parti più recenti appartengono all'Unità di Modena (AES8a). Le contigue aree depresse sono formate da sedimenti fini, con livelli di argille organiche e torbe, deposti in zone interalvee inondabili, talvolta intercalati a sedimenti limoso-sabbiosi da rotta fluviale.

La carta distingue ampie aree di sedimenti di provenienza appenninica indicati da tinte giallo-marrone, mentre le altre tinte identificano i depositi di Po. In blu sono rappresentati i corpi sabbiosi di barra di meandro del Po. Le ricerche svolte nell'ambito della microzonazione sismica hanno sostanzialmente confermato quanto rappresentato nella carta provinciale, ad eccezione dell'estensione dei corpi di meandro a nord di Bondeno e della larghezza dei paleoalvei minori della zona occidentale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

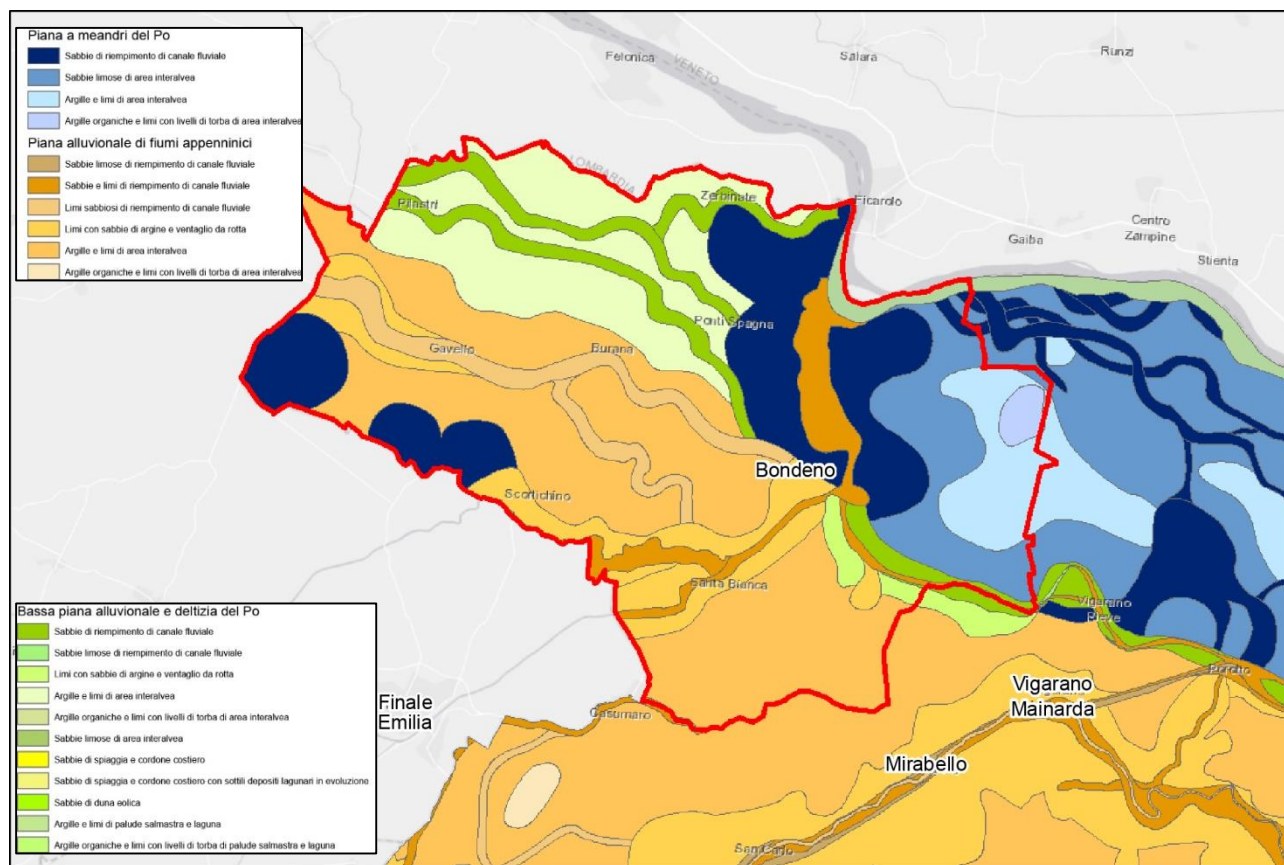


Figura 3-3 - Stralcio della Carta Geologica e Geomorfologica della Provincia di Ferrara (2016). Cartografia accessibile online: <http://www.ferradeltapo-unesco.it/>.

3.3 Contesto strutturale

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

Le prospezioni per idrocarburi hanno permesso di riconoscere una complessa serie di pieghe e sovrascorrimenti con geometria a pianta arcuata e vergenza verso nord e nord-est (Pieri e Groppi, 1975,

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

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 due fasci maggiori di pieghe, con concavità rivolta verso il margine appenninico, denominati "Arco delle Pieghe Emiliane", a nord-ovest, ed "Arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole", a sud-est (Pieri e Groppi, 1975) (Figura 3-4).

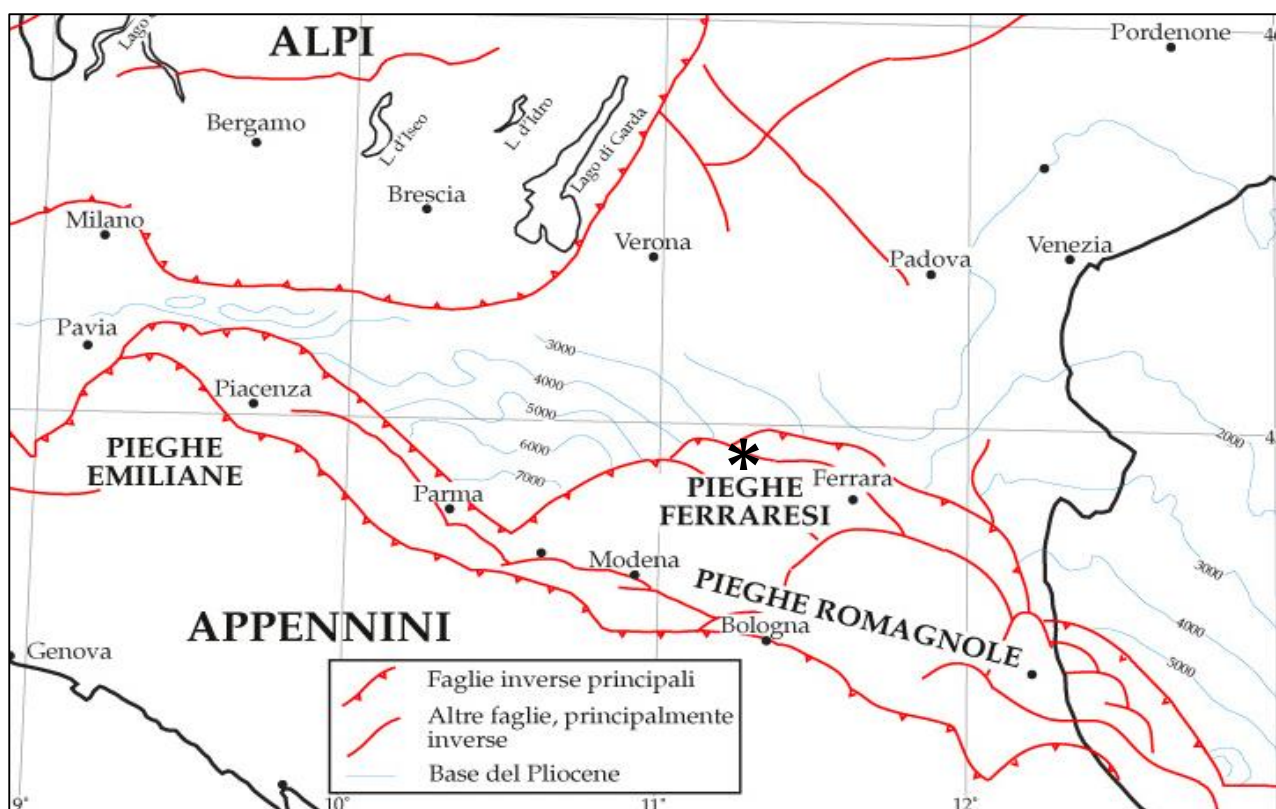


Figura 3-4 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana centro-orientale (Modificata da Burrato *et al.*, 2003, da Pieri e Groppi, 1975). L'area analizzata si trova nella parte meridionale del fascio di pieghe ferraresi.

L'arco orientale può essere ulteriormente suddiviso in tre fasci di strutture dette "Pieghe Ferraresi", "Pieghe Romagnole" e "Pieghe Adriatiche" (Bigi *et al.*, 1990). Le Pieghe Ferraresi (Dorsale Ferrarese o "Ferrara Folds" in Pieri e Groppi, 1981) rappresentano le strutture più settentrionali, estese tra Reggio Emilia e la costa adriatica (Figura 3-4, Figura 3-5), che si spingono a nord del Po, tra Occhiobello e Ferrara (Bigi *et al.*, 1990). Questa struttura registra le fasi più recenti e tuttora in atto della deformazione sismogenetica. Nel settore occidentale delle Pieghe Ferraresi, si possono osservare una serie di depressioni tettoniche e pieghe sinclinali che complicano ulteriormente la geometria strutturale (Figura 3-6).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

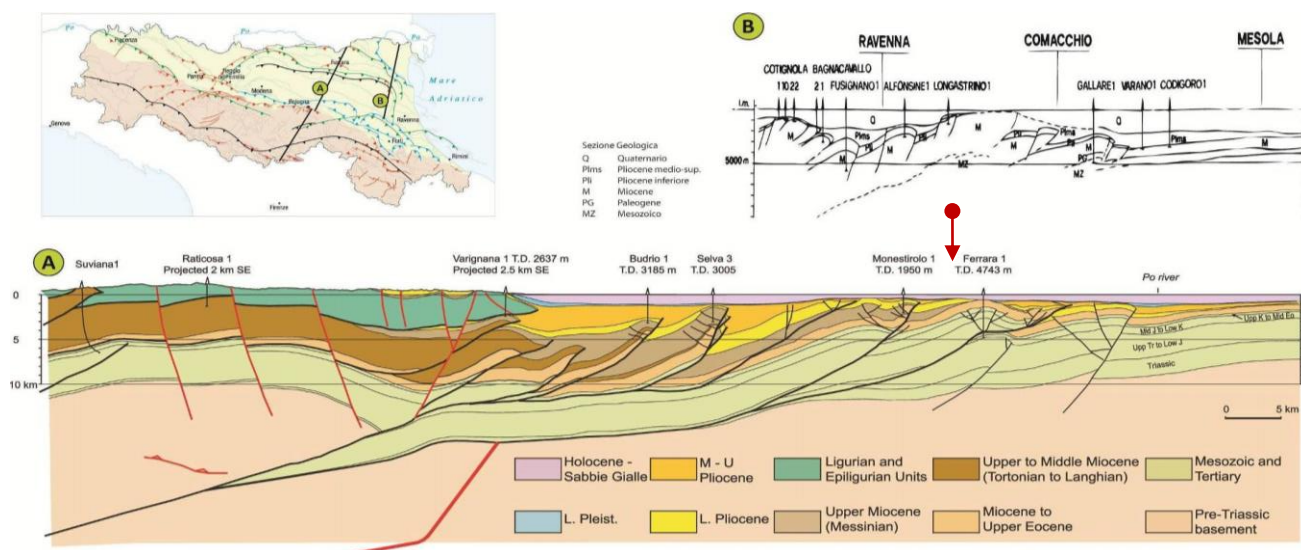


Figura 3-5 - Contesto strutturale della porzione emiliano-romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) deriva da Pieri e Groppi, 1981, mentre la sezione inferiore è presa (A) da Toscani *et al.*, 2009. L'area indagata, ubicata all'incirca in corrispondenza della freccia rossa, attraversa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

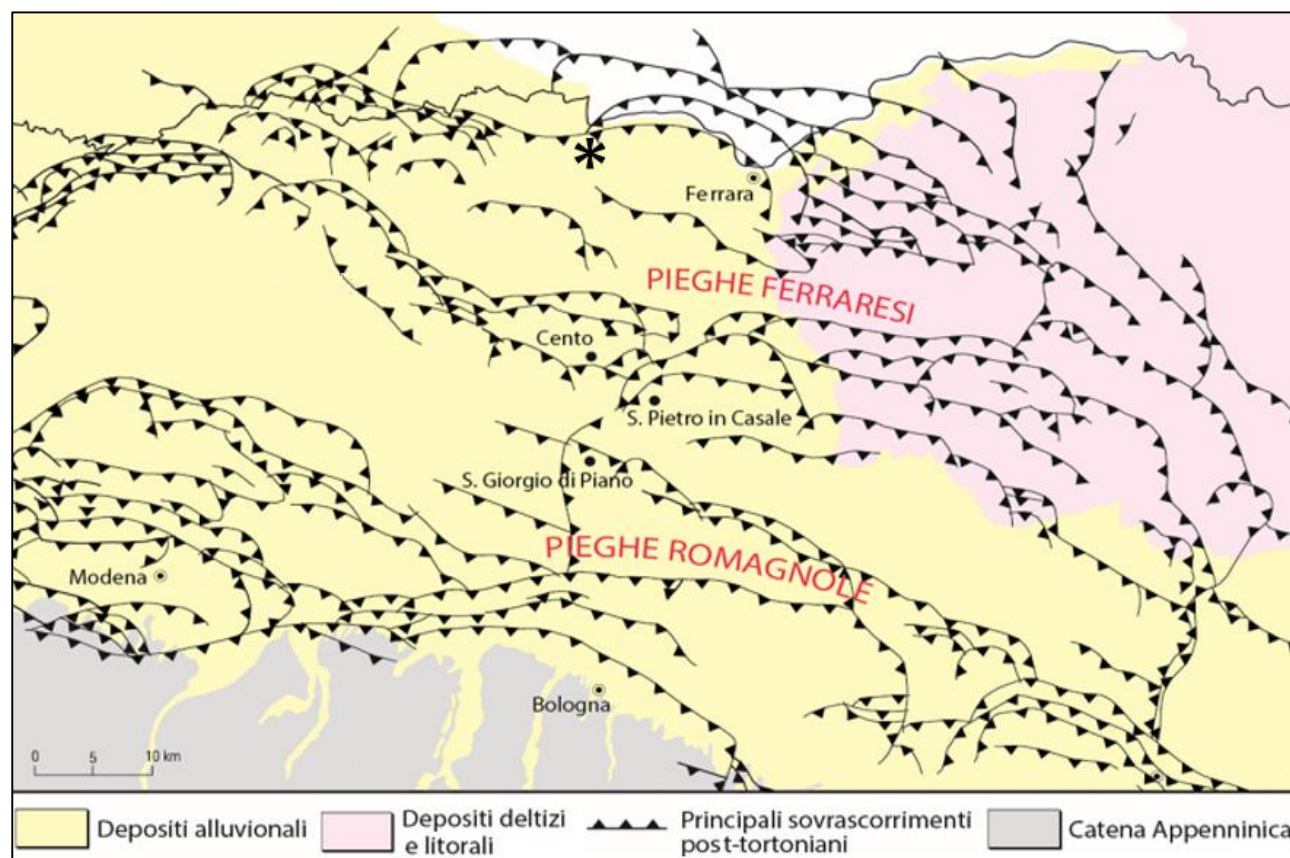


Figura 3-6 - Inquadramento delle strutture tettoniche sepolte, che illustra la complessità dell'arco delle Pieghe Romagnole e Ferraresi. Modificato dalle Note Illustrative del Foglio CARG 203, Poggio Renatico.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

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

L'insieme delle Pieghe Ferraresi e delle Pieghe Romagnole rappresenta la culminazione strutturale che delimita, a nord, un ampio bacino di *piggy-back* (Ori e Friend, 1984), all'interno del quale si sono depositi notevoli spessori di sedimenti che formano la successione pliocenica marina e quaternaria marino-continentale (Figura 3-5). L'architettura stratigrafica dei depositi plio-quaternari è stata fortemente influenzata dalla deformazione tettonica e presenta quindi spessori massimi nelle aree di sinclinale e minimi sulle anticlinali sepolte (Correggiari *et al.*, 1992; Amorosi *et al.*, 1997 a, b; Di Dio e Caporale, 1998; Di Dio e Molinari, 2000). Questo andamento è evidente anche dalle importanti variazioni laterali di spessore delle successioni tardo pleistoceniche e oloceniche deposte in condizioni di pianura alluvionale (Stefani *et al.*, 2018). Queste grandi variazioni di spessore registrano altrettanto ampie variazioni laterali di subsidenza, indotte anche dalla deformazione delle strutture tettoniche sismogenetiche.

Il territorio comunale di Bondeno si sviluppa interamente al di sopra del fascio esterno dei sovrascorrimenti delle Pieghe Ferraresi, sismicamente attivi. Tali strutture sono ben visibili nei profili di sismica a riflessione prodotti negli anni '50 dalla Società Petrolifera Italiana (ora ENI-AGIP) e nelle diverse interpretazioni geologiche degli stessi, proposte in letteratura (es. Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002; Corrado *et al.*, 2010; Pieri e Groppi, 1981; Toscani *et al.*, 2009).

L'area strutturalmente più elevata si sviluppa nella porzione nord-orientale del comune, tra Salvatonica e Settepolesini, che corrisponde alla marcata anticlinale il cui asse culmina più a est sotto Casaglia (Figura 3-7) mentre si abbassa in direzione di Bondeno. La maggior parte del territorio corrisponde ad un vasto plateau strutturale, lateralmente esteso ma meno pronunciato di quello di Casaglia. Questa struttura si abbassa piuttosto gradualmente verso nord e nord-ovest in direzione del fronte esterno della catena sepolta e verso sud-est in direzione dell'asse di una sinclinale minore sviluppata all'interno delle Pieghe Ferraresi. Nei pressi del confine sud-occidentale del territorio comunale il plateau strutturale si articola in due anticlinali lateralmente giustapposte (Figura 3-8, vedi pozzo Pilastri 1).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

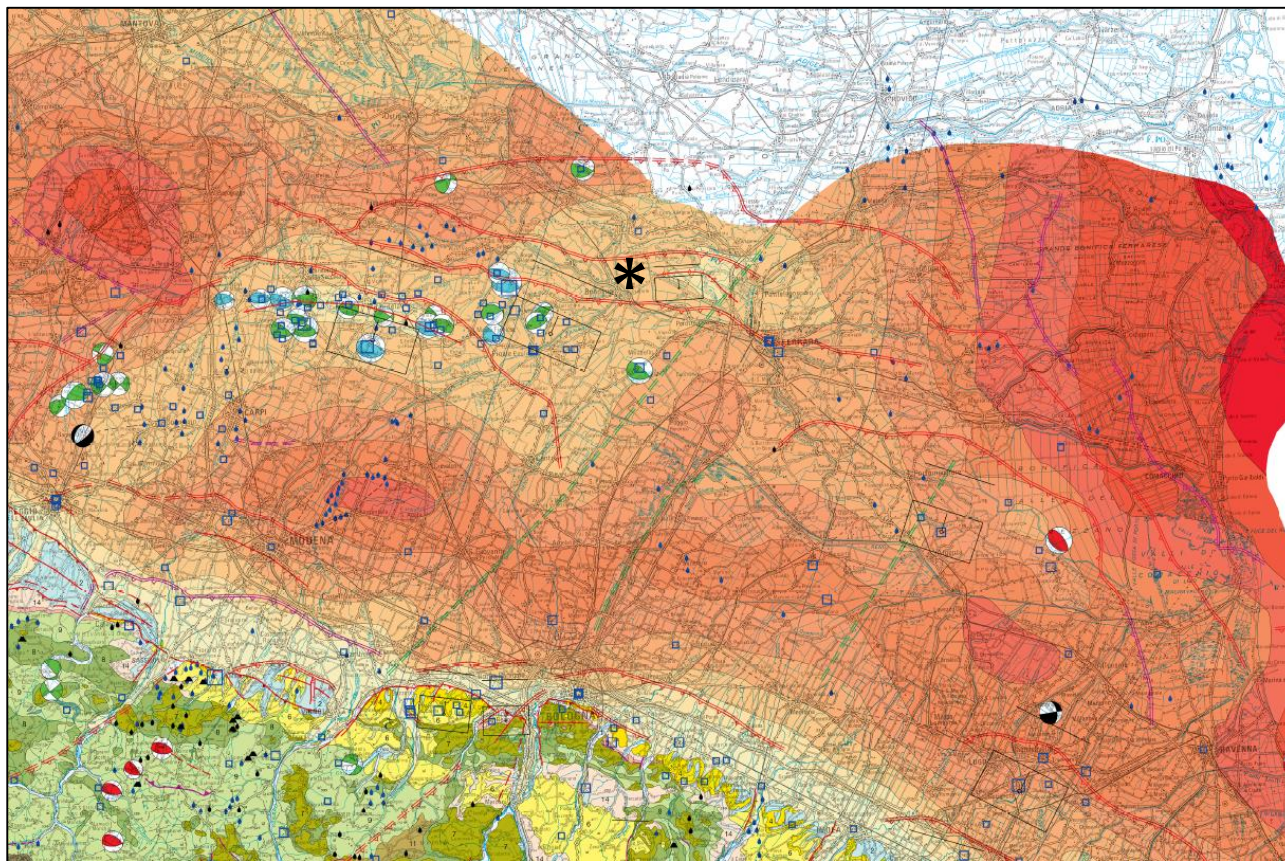


Figura 3-7 - Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017). Le linee e le tinte batimetriche indicano le isobate della base del Sintema Emiliano Romagnolo Superiore, superficie che appare ampiamente deformata da movimenti post-deposizionali,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

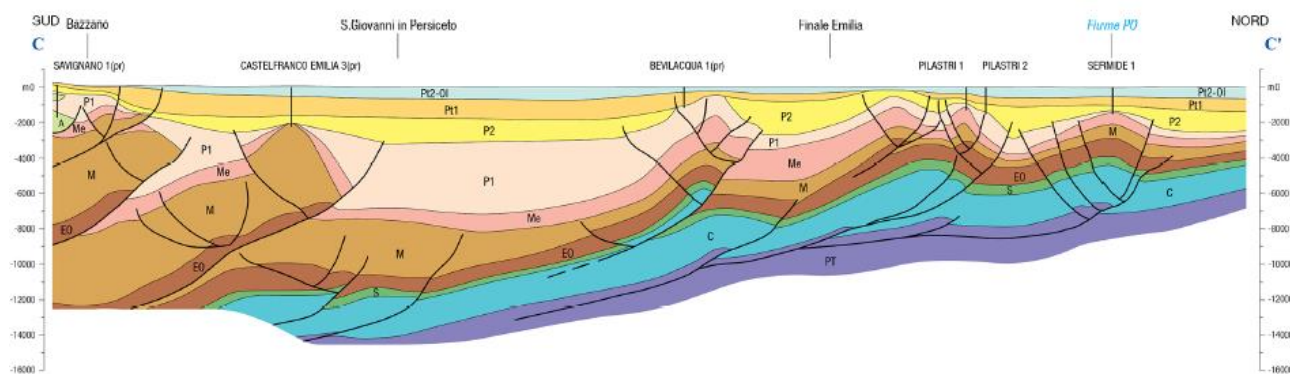


Figura 3-8 - Sezione geologica profonda C - C', allungata da Bazzano (BO) al Po. Fonte: Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017).

4 Dati geognostici e geofisici

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

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

Le ubicazioni delle prove utilizzate per lo studio di microzonazione sismica sono riportate nella carta delle indagini (Tavola 1) descritta al paragrafo 8.1. Come richiesto dagli Standard MS 4.2 (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2020) sono inoltre rappresentate in mappa 14 indagini virtuali, che sintetizzano la stratigrafia "teorica" dei primi trenta metri di sottosuolo delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica individuate nell'area di studio.

4.1 Indagini di repertorio

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

Aggiungendo alle indagini recuperate negli archivi sopracitati quelle raccolte presso alcuni geologi liberi professionisti nonché quelle raccolte da Geotema S.r.l., nel complesso si sono potute utilizzare ai fini della microzonazione sismica ben 1.049 prove pregresse di buona affidabilità, suddivise per numero e tipologia così come riportato in Tabella 4-1. Da ultimo sono stati considerati i dati di sottosuolo dei Comuni

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

confinanti; ciò ha permesso di aumentare le conoscenze geologiche e meglio definire geometrie e limiti dei corpi deposizionali e delle aree a diverso rischio liquefazione lungo le fasce di confine.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
Prove penetrometriche statiche	CPT	383
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	CPTE	18
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTu	240
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPT	58
Prove dilatometriche	DMT	5
Prove dilatometriche sismiche	SDMT	4
Sondaggi a carotaggio continuo	S	87
Sondaggi con prelievo di campioni	SC	1
Analisi su campione	SM	5
Pozzi per acqua	PA	39
Pozzi per idrocarburi	PI	1
Prove di colonna risonante	CR	4
Prove triassiali CU (consolidate non drenata)	CU	1
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	123
Prova sismica in foro tipo Cross-Hole	CH	2
Prova sismica in foro tipo Down-Hole	DH	2
Multi-channel Analysis of Surface Waves	MASW	71
Refraction Microtremor	REMI	1
Extended Spatial Autocorrelation	ESAC_SPAC	4
TOTALE		1.049

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

Le indagini ritenute affidabili sono state quindi organizzate ed archiviate in una banca dati informatizzata e georeferenziata in ambiente GIS ESRI, la cui struttura risponde alle specifiche indicate dal Dipartimento nazionale della Protezione Civile (D.P.C.) per gli studi di microzonazione sismica. Un archivio informatizzato consente di strutturare e sistematizzare il patrimonio informativo disponibile, al fine di renderlo più facilmente consultabile, fruibile ed aggiornabile. La struttura della banca dati consente, inoltre, di associare al dato geografico (sito d'indagine) degli attributi alfanumerici relativi alle diverse prove realizzate come:

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

profondità indagata, livello della falda, spessore degli orizzonti rilevati, ed altro. Oltre a ciò, ad ogni prova archiviata è possibile associare i propri parametri tecnici come, ad esempio, lettura di resistenza alla punta, valori di Vs misurati o frequenze di risonanza.

Per l'archiviazione dei dati acquisiti si è fatto ricorso all'applicativo software SoftMS versione 4.2 – messo a disposizione dal D.P.C. – che, attraverso maschere dedicate, consente l'inserimento dei dati all'interno di tabelle costituite da un insieme di record, gerarchicamente organizzate in modo da memorizzare in maniera indipendente le informazioni legate al sito di indagine, alle prove in esso realizzate ed ai parametri tecnici di ognuna di queste.

4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

A supporto dello studio di microzonazione sismica del Comune di Bondeno è stato necessario realizzare una specifica campagna di acquisizioni di microtremore sismico, con lo scopo di verificare le frequenze naturali dei terreni. L'abbondanza e l'omogenea distribuzione delle indagini geognostiche pregresse, ha invece consentito un'accurata ricostruzione del quadro litostratigrafico ed una buona correlabilità generale delle proprietà geotecniche dei terreni presenti nei primi trenta metri di sottosuolo. Per alcune aree si è ritenuto comunque opportuno realizzare approfondimenti attraverso l'esecuzione di nuove indagini geotecniche di tipo CPTu.

La buona disponibilità di prove geofisiche ha permesso infine di definire le variazioni di V_{s30} alla scala dell'intero territorio indagato, anche grazie all'esecuzione delle nuove indagini SDMT realizzate a Bondeno ed a Gavello località Redena.

4.2.1 Indagini realizzate in situ

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

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
INDAGINI REALIZZATE IN SITU		
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTu	6

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

Prove dilatometriche	DMT	2
Prove dilatometriche sismiche	SDMT	2
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	17
TOTALE		27

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

4.2.1.1 Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu)

Le prove penetrometriche di tipo statico consentono di risalire, mediante correlazioni empiriche, alla natura dei corpi sedimentari presenti nel sottosuolo analizzando il rapporto tra resistenza alla penetrazione (q_c) ed attrito laterale (f_s) prodotto da una punta conica spinta nel terreno a velocità costante. Le CPTu (*Cone Penetration Test with Pore Pressure measurement*) si eseguono tramite un penetrometro dotato di punta elettrica a piezocono la quale, collegata mediante cavo elettrico ad un'unità di acquisizione in superficie, permette di misurare anche il valore della pressione interstiziale (u) presente tra i pori dei sedimenti, in modo da determinare la trasmissività idraulica dei corpi sedimentari indagati. Questa tecnica consente di meglio discriminare i terreni a scarsa permeabilità e bassa resistenza, oltre a fornire un maggior dettaglio stratigrafico dovuto all'acquisizione in automatico del dato, con una precisione centimetrica all'avanzamento.

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

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

Le prove, che hanno interessato le località riportate in Tabella 4-3 sono state 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.
CPTu1	038003P930 CPTU1010	44.881739°	11.427332°	Centro sportivo Via Napoleonica, Bondeno	13/02/2018	20 m	6,20 m
CPTu2	038003P931 CPTU1011	44.882088°	11.422171°	Via della Fornace, Bondeno	13/02/2018	20 m	0,70 m
CPTu3	038003P932 CPTU1012	44.887949°	11.414050°	Via Pironi, Bondeno	13/02/2018	20 m	4,20 m
CPTu4	038003P933 CPTU1013	44.889331°	11.414977°	Via Manzoni, Bondeno	13/02/2018	20 m	2,55 m
CPTu5	038003P934 CPTU1014	44.915397°	11.430678°	S.P.19, loc. San Biagio	13/02/2018	20 m	5,40 m
CPTu6	038003P935 CPTU1015	44.904201°	11.404071°	Via Donne del 18 Febbraio, loc. Borgo Scala	13/02/2018	20 m	4,50 m

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

4.2.1.2 Prove dilatometriche (DMT)

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

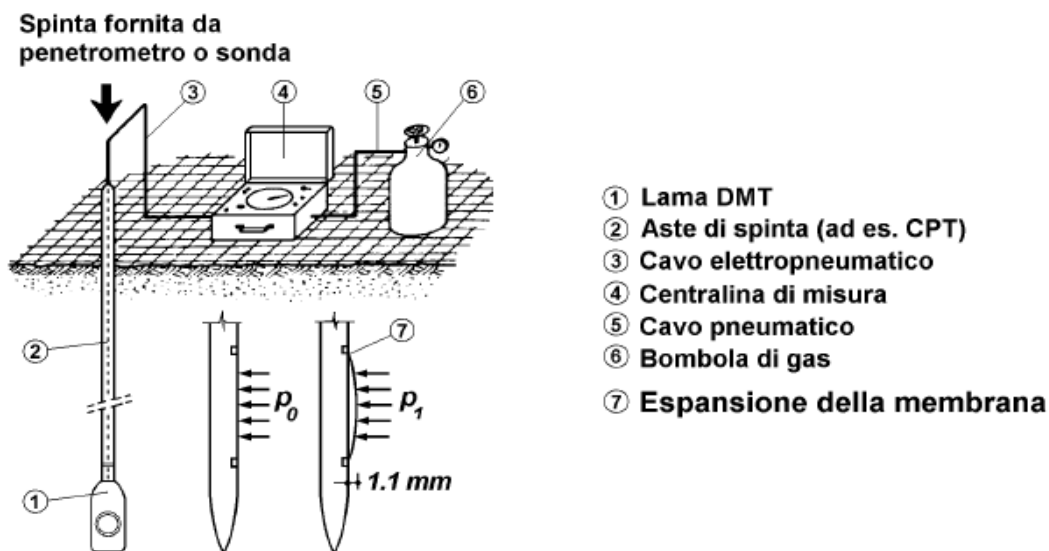


Figura 4-1 - Schema generale della prova DMT.

La prova consiste nell'infingere verticalmente la lama nel terreno mediante spinta statica, agendo su una batteria di aste, espandendo la membrana con gas in pressione e misurando le pressioni corrispondenti a due livelli di deformazione predeterminati della membrana. La lama è collegata ad una centralina di misura

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

in superficie per mezzo di un cavo elettropneumatico (che trasmette pressione di gas e continuità elettrica) passante all'interno delle aste di spinta. Una bombola di gas, collegata alla centralina di misura per mezzo di un cavo pneumatico, costituisce la sorgente di gas necessaria per espandere la membrana. La centralina di misura è dotata di un regolatore di pressione, di manometri, di un segnalatore audiovisivo e di valvole di sfiato.

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

- A. = pressione necessaria per controbilanciare la pressione del terreno ed iniziare il movimento della membrana (pressione di distacco o *lift-off*);
- B. = pressione necessaria per ottenere una dilatazione del centro della membrana contro il terreno di 1.1 mm.

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

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

I_D = Indice di Materiale;

K_D = Indice di Spinta Orizzontale;

E_D = Modulo Dilatometrico.

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

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

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

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

OCR = Rapporto di sovraconsolidazione (terreni coesivi);

ϕ' = Angolo di resistenza al taglio (terreni incoerenti).

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.
DMT1	038003P859 DMT914	44.885510°	11.420241°	Piazza Gramsci, Bondeno	29/05/2017	22,6 m	3,0 m
DMT2	038003P860 DMT916	44.918907°	11.277184°	Via Comunale Gavello, loc. Redena	28/05/2017	19,2 m	3,0 m

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

4.2.1.3 Prove dilatometriche sismiche (SDMT)

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

Il modulo sismico (Figura 4-2) è costituito da un corpo cilindrico posto sopra la lama DMT, munito di due ricevitori distanti 0,5 m. Il segnale è amplificato e digitalizzato in profondità. La configurazione *true-interval* a due ricevitori evita possibili inesattezze nella determinazione dello zero dei tempi dall'impatto, talora riscontrate nella configurazione *pseudo-interval* con un solo ricevitore. Inoltre la coppia di sismogrammi registrata dai due ricevitori ad una data profondità di prova corrisponde allo stesso colpo, anziché a colpi successivi non necessariamente identici, con sensibile miglioramento della ripetibilità delle misure di V_s (ripetibilità osservata = 1 m/s).

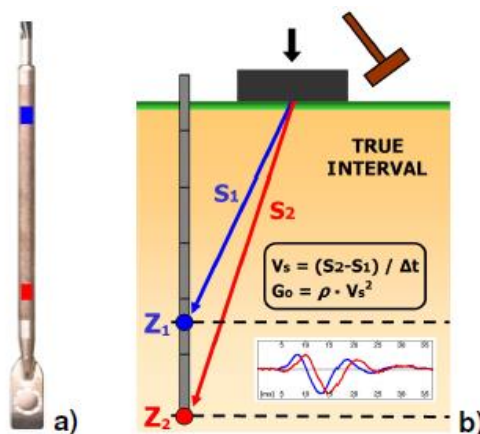


Figura 4-2 - Lama DMT e modulo sismico (a); Schema generale della prova con SDMT (b).

La V_s è ottenuta come rapporto tra la differenza di distanza tra la sorgente ed i due ricevitori ($S_2 - S_1$) ed il ritardo dell'arrivo dell'impulso dal primo al secondo ricevitore (Δt). Le misure di V_s sono effettuate ogni 0,5 m di profondità.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

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

Dai valori di V_s si può ricavare il modulo di taglio iniziale G_0 . La sintesi della conoscenza dei valori di G_0 e del modulo monodimensionale M , ricavato da DMT, può essere utile per la determinazione "in situ" di curve di decadimento del modulo all'aumentare della deformazione (curve G-g o simili).

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

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.
SDMT1	038003P859 SDMT915	44.885510°	11.420241°	Piazza Gramsci, Bondeno	29/05/2017	30 m	3,0 m
SDMT2	038003P860 SDMT917	44.918907°	11.277184°	Via Comunale Gavello, loc. Redena	28/05/2017	19 m	3,0 m

Tabella 4-5 - Sintesi dei dati principali associati alle prove dilatometriche sismiche SDMT eseguite.

4.2.1.4 Misure di microtremore a stazione singola (HVSr)

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

del sottosuolo, dati molto utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture (Castellaro, 2012; Castellaro e Mulargia, 2011).

Il metodo considera i microtremori derivanti da onde di superficie (onde di *Rayleigh*) nelle componenti orizzontali e verticali, che vengono amplificate per effetto di sito a causa della presenza di discontinuità stratigrafiche nel sottosuolo. È quindi possibile ricostruire la forma spettrale del microtremore, in cui i picchi alle diverse frequenze rappresentano il rapporto tra le due componenti dei segnali registrati. A supporto del presente studio sono state effettuate 22 registrazioni di microtremore sismico. Le misure sono state eseguite con tromografo digitale "Tromino Zero", orientato secondo il nord geografico, e georiferite tramite GPS con precisione variabile tra 2 e 3 m.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz e con tempo di singola registrazione di 20 o 30 minuti. Considerando le caratteristiche dello strumento utilizzato ($f_c = 4,5$ Hz) è stato ritenuto opportuno individuare la frequenza fondamentale all'interno dell'intervallo compreso tra 0,5 e 20 Hz. Sulla base dei risultati osservati, si è deciso di scartare alcune registrazioni in quanto soggette ad evidenti disturbi di natura antropica che ne hanno pregiudicato l'interpretazione.

Tra le registrazioni effettuate 17 sono state considerate affidabili ed inserite nella banca dati a supporto dello studio (Tabella 4-6).

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	DURATA	f ₀	A ₀
HVSR1	038003P1HVSR1	44.923570°	11.451950°	S.P.19, loc. Salvatonica	24/05/2016	20 min	0,81	2,90
HVSR2	038003P2HVSR2	44.926332°	11.448370°	S.P.19, loc. Salvatonica	24/05/2016	20 min	0,94	2,87
HVSR5	038003P3HVSR3	44.915978°	11.431043°	S.P.19, loc. San Biagio	24/05/2016	20 min	0,91	3,43
HVSR6	038003P4HVSR4	44.834891°	11.379045°	Via Suore, Casumaro	18/05/2016	20 min	0,69	3,52
HVSR7	038003P5HVSR5	44.865146°	11.392692°	Via Benin, loc. Santa Bianca	25/05/2016	20 min	0,56	5,08
HVSR8	038003P6HVSR6	44.878942°	11.329887°	Via Cilea, loc. Scortichino	25/05/2016	20 min	0,69	4,24
HVSR10	038003P7HVSR7	44.915836°	11.284521°	Via Comunale Gavello Abbandonato, loc. Forna	25/05/2016	20 min	0,50	3,66
HVSR12	038003P8HVSR8	44.924759°	11.385896°	Via Condotti, loc. Baj	24/05/2016	20 min	0,84	3,07
HVSR13	038003P9HVSR9	44.947118°	11.398880°	Via Ferrarese, loc. Zerbinato	25/05/2016	20 min	0,63	2,90

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

HVSR14	038003P10HVSR10	44.949312°	11.417925°	S.P.18, loc. Stellata	25/05/2016	20 min	0,63	3,50
HVSR15	038003P11HVSR11	44.865978°	11.452034°	Via per Vigarano, loc. Ponte Rodoni	24/05/2016	20 min	0,78	2,49
HVSR16	038003P12HVSR12	44.871701°	11.433237°	Via per Vigarano, loc. Schiavona	24/05/2016	20 min	0,75	2,39
HVSR18	038003P13HVSR13	44.890724°	11.404490°	Via Vittime dell'undici Settembre, Bondeno	24/05/2016	20 min	0,63	3,58
HVSR19	038003P14HVSR14	44.884071°	11.414827°	Via Vigna, Bondeno	24/05/2016	20 min	0,69	3,16
HVSR20	038003P15HVSR15	44.909404°	11.399147°	Via Arianuova, loc. Marmagna	24/05/2016	20 min	0,66	3,30
HVSR Parco Carlotta	038003P865HVSR924	44.885331°	11.420503°	Piazza Gramsci, Bondeno	21/06/2017	30 min	0,78	2,72
HVSR DH RER	038003P866HVSR925	44.883415°	11.428131°	Via Fermi, Bondeno	21/06/2017	30 min	0,78	2,72

f_0 = Frequenza naturale

A_0 = Ampiezza del picco di f_0

Tabella 4-6 - Principali dati associati alle misure di microtremore a stazione singola HVSR eseguite.

5 Modello del sottosuolo

Una fase fondamentale dell'elaborazione della microzonazione sismica è la definizione del modello di sottosuolo e l'individuazione del substrato sismico, caratterizzato da elevati valori di rigidità e di velocità di propagazione delle onde sismiche. Esso è definito in normativa (NTC18) da valori di velocità delle onde di taglio (V_s) superiori ad 800 m/s. Per ottenere una stima affidabile della distribuzione delle velocità del sottosuolo occorre disporre di una calibrazione derivante da fonti indipendenti, come sondaggi stratigrafici e misure sismiche in pozzo, dato che una determinata distribuzione dell'amplificazione spettrale alle varie frequenze oscillatorie è compatibile con molte combinazioni di spessori e velocità sismiche dei diversi corpi geologici. Nel territorio indagato, il basamento sismico è generalmente sepolto a notevoli profondità, ad eccezione dei settori nord-orientali dove risale per motivi tettonici. Il substrato è in genere raggiunto solo da un ristretto numero di pozzi, effettuati in passato, per la ricerca di idrocarburi. A queste profondità nel sottosuolo, non sono di norma disponibili misure dirette delle velocità sismiche in pozzo. I pochi dati disponibili (Casaglia - Di Capua e Tarabusi, 2013; Mirandola - Garofalo *et al.*, 2016; Mirabello - Minarelli *et al.*, 2016) mostrano come le velocità delle onde sismiche aumentino con la profondità, ma non in modo

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

lineare, dato che esse subiscono brusche accelerazione in corrispondenza di varie superfici di discontinuità stratigrafica, che inquadrano le unità deposizionali nel sottosuolo. Tali superfici corrispondono a riflettori sismici e passaggi fra unità sismo-stratigrafiche, spesso associate ai limiti disconformi.

L'individuazione delle profondità dei limiti discordanti è stata ottenuta utilizzando diversi metodi geofisici, interpretati nel contesto stratigrafico regionale. I principali contrasti di impedenza associati a tali limiti sono stati identificati mediante l'uso di numerose linee sismiche, anche di recente acquisizione (Affatato *et al.*, 2019, Petronio *et al.*, 2023) e di misure di microtremore che hanno permesso di ricostruire la variazione a diverse frequenze del rapporto tra le componenti oscillatorie orizzontali e verticali (H/V). L'analisi di questi dati, associata alla stima delle proprietà meccaniche delle diverse unità stratigrafiche regionali, ha permesso di individuare le superfici che generano i principali contrasti di impedenza rilevabili con la tecnica HVSr. La superficie associata al maggior aumento di rigidità e di velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) è raggiunta da perforazioni, associate a misure di velocità in pozzo, effettuate ad est del territorio comunale (Casaglia) ove corrisponde alla marcata discordanza angolare al tetto delle successioni marine marnose del Miocene. Questa superficie discordanza risulta piegata dalla deformazione tettonica, motivo per cui si approfondisce notevolmente procedendo verso ovest e nord-ovest.

Soprattutto nella parte nord-occidentale del territorio comunale, le marne e argille marine mio-plioceniche sono ricoperte da successioni torbiditiche, prevalentemente distali, del Pliocene superiore e Quaternario inferiore. Queste arenarie sono ricoperte da argille marine quaternarie. Le arenarie torbiditiche sono verosimilmente assenti sotto l'abitato di Bondeno e quasi certamente nella parte più orientale del territorio comunale tra Salvatona e Settepolesini. Questa variazione stratigrafica laterale registra l'attivazione tardo Pliocenica delle pieghe esterne ferraresi e dell'alto di Casaglia che ha indotto altofondi marini e, almeno a Casaglia, isole emerse.

Le torbiditi plio-pleistoceniche, inquadrare nelle formazioni di Porto Garibaldi e della più recente Carola, hanno subito litificazione per cui sono verosimilmente caratterizzate da velocità delle onde sismiche elevate e sono quindi attribuite al substrato sismico. Le arenarie torbiditiche si correlano lateralmente verso oriente con sedimenti litificati coevi, depositi in ambienti marini meno profondi, anch'essi appartenenti al substrato sismico.

Una seconda superficie di discordanza stratigrafica associata ad un contrasto di impedenza minore, ma comunque significativo, è sviluppata all'interno delle successioni quaternarie e marca il tetto dell'unità del Quaternario Marino. A causa dei movimenti tettonici sinsedimentari, i depositi del Quaternario Marino

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

presentano spessori molto variabili con valori massimi nella parte nord occidentale e più meridionale del territorio, mentre si rastremano fortemente verso est. Appare verosimile che, vista l'età geologica e la profondità di seppellimento, questa unità abbia rigidzze e velocità prossime al valore limite di soglia del substrato rigido.

Le prime centinaia di metri di sottosuolo dell'area indagata sono interamente costituite da successioni terrigene quaternarie continentali. La loro organizzazione stratigrafica è stata fortemente controllata sia dalla ciclicità eustatica e climatica legata all'alternanza di fasi glaciali ed interglaciali, sia dalla deformazione tettonica sin-sedimentaria. Queste unità sedimentate presentano spessori variabili e un grado di litificazione molto basso o assente, come dimostrano le misure sismiche eseguite in pozzo sia nei settori orientali di anticlinale (Di Capua e Tarabusi, 2013) che in quelli sud orientali di sinclinale (Minarelli *et al.* 2016). Le unità quaternarie prevalentemente continentali, inquadrare nel Supersistema Emiliano-Romagnolo, mostrano infatti valori massimi generalmente non superiori ai 500 m/s.

Unità Stratigrafiche		Sequenze Deposizionali	Età (milioni di anni)	Scala Cronostratigrafica	Unità Idrostratigrafiche		
					Gruppo Acquifero	Complesso Acquifero	Sistema Acquifero
SUPERSISTEMA EMILIANO ROMAGNOLO	SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE	Qc	- 0.12	PLEISTOCENE SUPERIORE-OLOCENE <			

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

5.1 Substrato

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

Le indagini profonde per la prospezione di idrocarburi da parte dell’ENI-AGIP hanno rivelato che il sottosuolo dell’area indagata registra importanti passaggi laterali di facies, sviluppatisi durante l’evoluzione mesozoica del margine continentale passivo della Tetide. Nell’area intorno a Casaglia e in buona parte del territorio indagato, il Mesozoico è caratterizzato da successioni relativamente poco potenti, simili a quelle della Piattaforma di Trento, in cui i depositi di piattaforma carbonatica del Gruppo dei Calcari Grigi sono seguiti dai sedimenti di altofondo pelagico del Rosso Ammonitico. Seguono depositi prevalentemente carbonatici delle parti successive del Mesozoico e del Paleogene. Ai calcari selciferi pelagici del Biancone, seguono i depositi calcareo-marnosi della Scaglia Rossa e della Scaglia Cinerea. Le successioni terziarie registrano un crescente apporto terrigeno, per cui ai calcari pelagici fanno seguito marne e argille marine. Sopra i depositi prevalentemente carbonatici mesozoici e paleogenici, poggiano quindi potenti successioni del Neogene, in gran parte terrigene. Queste ultime sono qui costituite, per buona parte del Miocene, da fanghi depositi in ambienti marini bacinali che verso nord passano ad ambienti di rampa e piattaforma. Durante il Messiniano si ebbero qui sedimentazioni evaportiche ed emersioni (Ghielmi *et al.*, 2010). Il Pliocene è caratterizzato da una migrazione verso nord della sedimentazione torbidica, legata alla migrazione della subsidenza, indotta dalla deformazione del bacino di avanfossa. La sedimentazione torbidica raggiunse l’area indagata solamente nella parte più recente del Pliocene.

Gli ambienti pliocenici sono stati progressivamente coinvolti nella rapida deformazione tettonica compressiva di questa porzione dell’Avanfossa Appenninica che ha fortemente influenzato gli spessori delle successioni e gli 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 particolarmente diffuse nelle aree corrispondenti ad anticlinali sepolte, come quella Casaglia, sviluppata nella parte più orientale dell’area comunale indagata. I movimenti tettonici determinarono una forte differenziazione paleogeografica, in cui le isole emergenti nell’area di Casaglia si contrapponevano agli ambienti marini profondi a sedimentazione torbidica sviluppati nelle

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

aree meridionali e centro-occidentali. Il Pliocene superiore e il Quaternario basale contengono successioni di torbiditi di mare profondo, alimentate da sabbie di provenienza alpina (Ghielmi *et al.*, 2010). Seguendo la terminologia AGIP, queste successioni torbiditiche sono ascrivibili alle Formazioni di Porto Garibaldi e della Carola. La presenza di strutture compressive, lacune stratigrafiche e brusche variazioni laterali di spessore di corpi sedimentari è ben documentata nel profilo sismico di Figura 5-2 acquisito tra Bologna e la periferia occidentale di Ferrara. I depositi francamente torbiditici pliocenici, compresi fra le superfici di discordanza A e B, sono rappresentati in colore rosa (Figura 5-2). I depositi quaternari di ambiente marino costituiscono le tre unità sovrapposte di colore verde, non tutte appartenenti al substrato sismico. Ben evidenti appaiono le lacune e le discordanze angolari in corrispondenza della anticlinale di rampa nell'area di San Pietro in Casale-Poggio Renatico. Lacune più pronunciate sono sviluppate sull'alto di Casaglia, contiguo al limite settentrionale del profilo sismico (Figura 5-2).

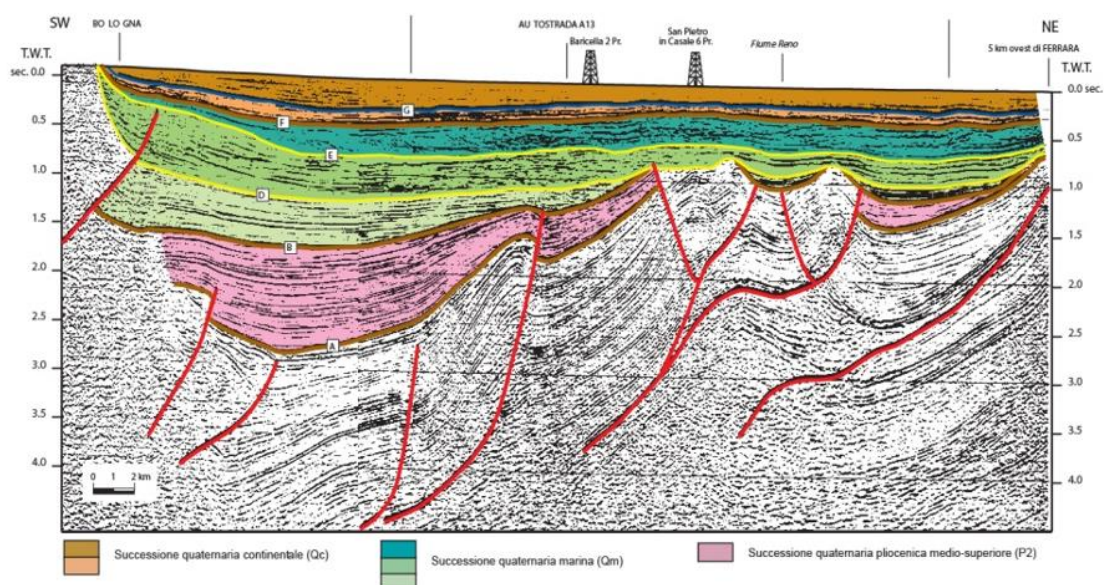


Figura 5-2 - Profilo sismico interpretato tratto da Riserve Idriche Sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998).

5.1.1 L'unità stratigrafica del Quaternario Marino

Le successioni quaternarie deposti in ambienti marini di rampa e delta sono inquadrare nell'unità stratigrafica del Quaternario Marino e sono formate da argille a foraminiferi platonici, che passano superiormente a fanghi di prodelta ed infine a sabbie di fronte delizio. Nel sottosuolo studiato, questi sedimenti marini sono riferiti alla Formazione di Ravenna, da non confondersi con l'omonimo Subsistema

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

dell'Olocene. Facies deposizionali analoghe sono visibili in affioramento, nella fascia collinare ai piedi dell'Appennino, dover erano tradizionalmente conosciute come Calabriano, mentre sono oggi inquadrare nelle unità della Formazione di Castell'Arquato, Argille di Riolo Terme e Argille di Terra del Sole. Le sabbie deltizie invece, un tempo conosciute come Sabbie di Asti o Sabbie Gialle, sono oggi inquadrare in varie unità, fra cui le Sabbie di Imola (Ricci Lucchi *et al.*, 1982). Queste successioni marine si sono deposte nella prosecuzione occidentale dell'antico Mare Adriatico, soggetta, in aree a sud del territorio indagato, a forte subsidenza e apporto sedimentario. All'interno dell'area esaminata, l'unità del Quaternario Marino è in gran parte costituita da argille di mare aperto con intercalazioni sabbiose deltizie. Gli spessori maggiori si sviluppano nelle porzione nord orientale del territorio (Pilastri) ove si raggiungono potenze di circa 300 m. Lo spessore si riduce invece progressivamente nelle zone centrali e orientali verso Bondeno e Salvatonica. L'unità del Quaternario Marino può essere assente nella zona di culminazione tettonica di Casaglia, ad oriente dell'area indagata, dove depositi continentali quaternari si sovrappongono direttamente alle successioni di mare profondo mioceniche.

5.2 Terreni di copertura

La parte superiore della successione quaternaria è formata da sedimenti non litificati che sono attribuibili, in base alle proprietà elasto-meccaniche ($V_s < 800$ m/s) ed alla loro posizione stratigrafica, ai "terreni di copertura". Questi terreni presentano comunque notevoli variazioni petrofisiche e litologiche interne, che ne hanno permesso la suddivisione in una serie di unità stratigrafiche, qui di seguito descritte.

5.2.1 Supersintema Emiliano-Romagnolo

Il Supersintema Emiliano-Romagnolo è formato da ripetute alternanze di livelli dominati da sedimenti granulari sabbiosi ed altri ricchi di sedimenti fini. Questa alternanza è stata fortemente influenzata dalla susseguirsi di fasi glaciali ed interglaciali. Le fasi glaciali sono registrate da depositi fluviali di pianura alluvionale fredda, con granulometrie marcatamente più grossolane di quelle che registrano le fasi interglaciali. Le fasi di massima trasgressione sono caratterizzate da influenze marine, qui presenti però solo nella parte inferiore del Supersintema. Il Supersintema Emiliano-Romagnolo è dominato, in questa area, da depositi fluviali continentali, con qualche intercalazione marino-costiera in aree nord-occidentali più subsidenti.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è bipartito in Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e Superiore (AES) da una superficie di discordanza, la cui genesi fu influenzata dalla deformazione tettonica delle Pieghe Ferraresi sepolte, in una fase sviluppatasi fra 400.000 e 350.000 anni fa circa. La discordanza corrisponde, in questa area, alla scomparsa di intervalli con chiari caratteri marini. In aree di culminazione anticlinale (es. Casaglia), questa superficie di discordanza può sovrapporsi direttamente sul Pliocene o Miocene. Nell'area indagata, il Supersistema si è accumulato nella fascia di interazione fra i sedimenti di provenienza appenninica e quelli del Po. Nelle fasi più recenti, il fronte dei sedimenti di provenienza appenninica è migrato verso nord, a discapito di quelli padani.

5.2.1.1 Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) costituisce la parte inferiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo ed è di norma sepolto a notevoli profondità. La caratterizzazione di quest'unità è stata effettuata sulla base delle informazioni ottenute attraverso sondaggi stratigrafici profondi, realizzati nell'ambito del progetto CARG dalla Regione Emilia-Romagna (Foglio 202 "San Giovanni in Persiceto", Foglio 203 "Poggio Renatico", Foglio 204 "Portomaggiore"), e di diversi log di pozzo per idrocarburi ENI-AGIP (es. Baura, Casaglia, Cona, Ferrara, Pavonara, Pontelagoscuro, Porotto, Pilastri 1, Pilastri 2). Mai affiorante nell'area di studio, il Sintema è troncato superiormente da una discordanza erosiva ed angolare. Nei settori nord-occidentali maggiormente subsidenti, il Sintema può raggiungere spessori massimi di circa 100 m, mentre può essere molto ridotto o localmente assente nelle aree più orientali, in corrispondenza della Dorsale Ferrarese sepolta, come ad esempio nei pozzi di Casaglia. Il Sintema è costituito da alternanze cicliche di depositi argilloso-limosi marini e depositi prevalentemente sabbiosi, riferibili ad ambienti di facies di piana fluvio-deltizia, che superiormente sfumano in depositi di piana alluvionale. Sulla base della posizione stratigrafica, l'unità è attribuita al Pleistocene medio, cioè nell'intervallo temporale compreso tra circa 650.000 e 350.000 anni (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998).

5.2.1.2 Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) costituisce la porzione superiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo. Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è comunemente organizzato in cinque cicli deposizionali trasgressivo-regressivi, con uno spessore medio di circa 30-40 metri ciascuno, in corrispondenza delle aree di sinclinale, ma con spessori minori nelle aree di anticlinale poco subsidente. Nel complesso, questi cicli registrano un ulteriore allontanamento della linea di costa adriatica dalla zona

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

qui discussa. Quest'evoluzione testimonia sia il progressivo riempimento del bacino sedimentario, sia lo spostamento verso nord degli assi depocentrali e del reticolo fluviale padano, legato al prevalere degli apporti terrigeni rispetto alla creazione di spazio di accomodamento sedimentario.

Lo sviluppo di questi cicli sedimentari è stato anche controllato dalle grandi fluttuazioni glacio-eustatiche. Il limite inferiore di ciascun ciclo è formato da una superficie netta di disattivazione della sedimentazione fluviale grossolana singlaciale. La porzione basale è caratterizzata dalla presenza di limi e sabbie continentali, seguiti da argille organiche di piana alluvionale e da spesse successioni di depositi fini di piana alluvionale, con subordinati corpi nastriformi isolati di sabbie di canale fluviale. Nella parte superiore dei cicli, le sabbie di canale fluviale divengono più abbondanti, fino a formare corpi sabbiosi continui, lateralmente estesi, soprattutto in aree soggette agli apporti di Po. Questi grandi corpi di sabbie sono stati depositi in ambienti di media pianura alluvionale fredda, durante le fasi singlaciali di stazionamento basso del livello del mare.

Nell'ambito del Progetto di Cartografia Geologica Nazionale, i cinque cicli che compongono il Sintema sono stati suddivisi in 2 cicli inferiori definiti rispettivamente Subsintema di *Liano* (AES₄) e Subsintema di *Torre Stagni* (AES₅) (cfr. AES indifferenziato - Foglio 202 "San Giovanni in Persiceto"), e in 3 cicli superiori, inquadrati nei Subsintemi di *Bazzano* (AES₆), di *Villa Verucchio* (AES₇) e di *Ravenna* (AES₈). Nella porzione più recente del Subsintema di Ravenna, è stata ulteriormente distinta l'Unità di Modena (AES_{8a}) di età post-romana.

I tre Subsintemi superiori (AES₆, AES₇, AES₈), presentano tra loro forti analogie nell'organizzazione stratigrafica. Questi cicli superiori sono i meglio conosciuti a scala regionale, dato il numero relativamente elevato di pozzi che li attraversano, compresi diversi sondaggi a carotaggio continuo appositamente eseguiti per la cartografia geologica (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998; Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000 - es. Fogli 202-203-204). La base di ciascun Subsintema, corrisponde ad una superficie erosiva incisa in sabbie fluviali singlaciali o, in aree meridionali soggette ad apporti appenninici, ad un paleosuolo carbonatico maturo sviluppato su depositi continentali. La fase di massima ingressione della linea di costa è qui registrata da depositi palustri dulcicoli di pianura, ricchi di argille organiche e torbe. La fase di stazionamento alto è caratterizzata da sabbie di canale fluviale, intercalate a potenti successioni di fanghi di piana interalvea. La parte superiore dei Subsintemi AES₆ e AES₇ è caratterizzata da sabbie grossolane di media pianura alluvionale, che passano verso sud a sedimenti fini di pianura fredda, soggetta ad apporti appenninici. Nell'area considerata, la parte superiore del Subsintema di Bazzano (AES₆) è

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

dominata da grandi corpi di sabbie di Po, il cui limite meridionale è ulteriormente migrato progressivamente verso nord nelle fasi successive.

L'organizzazione stratigrafica della parte più superficiale del sottosuolo è particolarmente rilevante, sia ai fini geotecnici, sia per quelli di microzonazione sismica. La legislazione vigente (NTC18) impone, infatti, di valutare la velocità delle onde di taglio (V_s) nei primi 30 m di sottosuolo, qui costituiti da sedimenti continentali del Pleistocene terminale e dell'Olocene, intervalli di tempo che corrispondono a fasi dell'ultima glaciazione e al post-glaciale. La porzione singlaciale è ascritta al Subsintema di Villa Verucchio (AES₇), mentre la parte più recente è attribuita al Subsintema di Ravenna (AES₈).

Nel territorio comunale, la porzione superiore del Subsintema di Villa Verucchio (AES₇) è formato da estesi corpi di sabbie grossolane di riempimento di canali del Po, che, al margine più meridionale del territorio (Casumaro), sono a contatto con depositi prevalentemente limosi di provenienza appenninica.

Il Subsintema di Ravenna (AES₈) è formato prevalentemente da sedimenti fini, spesso depositi in ambienti umidi che contengono corpi allungati di sabbie di canale fluviale sepolte a varie profondità o affioranti. 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, dall'epoca protostorica all'attuale.

Il corpo sabbioso affiorante più importate è stato depositato dal Po di età romana e medievale, che provenendo da Stellata prosegue per Bondeno e si dirige poi verso Ferrara. Questo corpo di Po mostra sequenze di barra di meandro particolarmente ben preservate tra Salvatonica e Settepolesini. In quest'area, come a Bondeno, i corpi di alveo Olocenico incidono e sono a contatto diretto con le sabbie singlaciali pleistoceniche, come anche documentato dai rinvenimenti paleontologici della cava di Settepolesini. A nord di Bondeno questo il corpo di sabbie di Po contiene i sedimenti più recenti e più fini del Panaro, che rimaneggiando le sabbie del Po ha formato minori strutture a meandro. Analoghi corpi di meandro di Po di età più antica subaffiorano, o sono sepolti a debole profondità, in varie aree del territorio comunale, come a nord-est di Pilastri, nei pressi di Scortichino e Burana e ad est di Salvatonica. Fanghi di Po costituiscono, invece, la parte più superficiale del sottosuolo nella porzione più orientale del territorio studiato.

Nelle ampie aree occidentali e meridionali del comune affiorano estesamente sedimenti coesivi di provenienza appenninica alternati a corpi allungati fluviali di minore estensione anch'essi di origine appenninica, riconducibili ai bacini del Secchia, Panaro e Reno.

6 Interpretazioni e incertezze

In questo capitolo vengono esaminate le principali scelte interpretative che hanno guidato il presente studio di microzonazione sismica. Saranno quindi evidenziate ragioni ed elementi a supporto delle interpretazioni effettuate, valutando al contempo inevitabili incertezze ad esse connesse ed eventuali criticità rilevate.

6.1 Frequenza naturale dei terreni (f_0)

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

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

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

Al fine di ridurre gli effetti appena descritti e limitare le incertezze indotte alle misure, sono stati utilizzati alcuni accorgimenti durante le registrazioni dei microtremori. Lo strumento di misura è stato inserito in una piccola buca scavata nel terreno in modo da ridurre al minimo le perturbazioni indotte dal vento sul segnale. La rimozione della parte superficiale del suolo ha permesso anche di migliorare l'accoppiamento tra i sensori velocimetrici ed il terreno, oltre che di verificare l'assenza di interfacce intermedie (es. cemento, fondo stradale, stabilizzato), responsabili di inversioni marcate di velocità in grado di determinare una non corretta interpretazione della curva HVSR.

Viste le problematiche rilevate è stato necessario realizzare 22 registrazioni prima di ottenere 17 misure di sismica passiva a stazione singola affidabili. In fase di elaborazione dei dati, infatti, si è potuta spesso accertare la presenza di disturbi a varie frequenze, di chiara origine antropica, che hanno portato a scartare diverse misure realizzate. Presso l'abitato di Bondeno sono stati registrati diversi disturbi legati sia al traffico veicolare che alle attività produttive nelle aree a prevalente vocazione industriale (come in località

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

Marmagna); è stato inoltre necessario scartare alcune misure realizzate in località Settepolesini e Pilastrì, sia a causa di disturbi di origine antropica che a problemi di accoppiamento suolo-strumento.

Le nuove registrazioni di microtremore (paragrafo 4.2.1.4) sono state effettuate in ambiti privi di dati pregressi; la maggior parte delle acquisizioni hanno avuto durata media di 20 minuti, e sono state analizzate con finestre variabili da 20 a 40 s.

L'analisi dei dati ha evidenziato la sostanziale assenza di picchi a bassa frequenza che vengono invece riportati in diverse pubblicazioni scientifiche internazionali (e.g. es. Mascandola *et. al.* 2019, Mascandola *et. al.* 2017, Milana *et al.* 2014).

L'assenza di tali evidenze potrebbe essere in gran parte legata alle caratteristiche della strumentazione, ai tempi di acquisizione delle registrazioni e all'approccio di elaborazione. Gran parte delle misure pregresse sono state infatti realizzate con strumentazione poco sensibile alle basse frequenze, dotata di sensori a 4,5 Hz. Altri fattori che compromettono la "visibilità" dei picchi a bassa frequenza sono certamente legati ai tempi di acquisizione, in genere non superiori a 30 minuti, e ad elaborazioni eseguite con finestre non più lunghe di 30 secondi. Nonostante le incertezze descritte è stato comunque possibile identificare alcune frequenze di vibrazione caratteristiche del territorio indagato.

Le nuove misure e le numerose indagini di microtremore pregresse hanno permesso di definire le frequenze caratteristiche nelle diverse aree indagate e redigere una dettagliata carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3a - 3b, paragrafo 8.3).

In tutte le misure le frequenze fondamentali (f_0) acquisite mostrano valori sempre inferiori ad 1 Hz, indice della presenza di riflettori sismici posti costantemente al disotto dei 100 m di profondità. I valori di frequenza fondamentale superiori a 0,7 Hz e caratterizzati da ampiezze più elevate, osservati nel settore nord-est del territorio comunale, sono stati messi in relazione con la presenza nel sottosuolo dell'alto strutturale noto come "alto di Casaglia". Valori di frequenza inferiori a 0,7 Hz con ampiezze minori caratterizzano gli altri settori del territorio.

6.2 Substrato rigido

Correlando i dati geofisici con le sezioni stratigrafiche e alcuni pozzi per idrocarburi disponibili (Figura 6-1) si è tentato di definire le variazioni laterali di profondità del tetto del substrato rigido.

Questa ricostruzione stratigrafica presenta un notevole grado di incertezza legato alle caratteristiche intrinseche del contesto geologico, caratterizzato da successioni stratigrafiche che mostrano, in genere,

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

bassi contrasti di impedenza e un incremento relativamente graduale delle velocità delle onde sismiche con la profondità.

Valori di velocità delle onde di taglio acquisiti in pozzo, mediante tecniche cross-hole e down-hole (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016; Minarelli *et al.*, 2016), dimostrano, come le unità stratigrafiche prevalentemente continentali del Quaternario Superiore siano caratterizzate, in aree di bassa pianura alluvionale, da valori massimi di velocità generalmente non superiori ai 500 m/s. Questi risultati sono in ottimo accordo con i profili di velocità derivati da indagini di sismica a riflessione, effettuate nelle stesse aree geografiche (Petronio *et al.*, 2018; Affatato *et al.*, 2019; Petronio *et al.*, 2023). Valori di V_s non superiori a 500 m/s sono chiaramente molto inferiori a quelli caratteristici di un “*bedrock* sismico” di riferimento per le analisi di risposta sismica locale. Tale livello deve, quindi, essere ricercato a profondità più elevate.

Dati inediti acquisiti in pozzo nei pressi di Mirabello mostrano che il primo contrasto di impedenza significativo si sviluppa all’interno delle successioni quaternarie e marca il tetto dell’unità del Quaternario Marino. Sulla base di queste considerazioni e in analogia con altri studi di microzonazione sismica compiuti in aree limitrofe (es. Vigarano Mainarda, Crevalcore) il tetto del substrato sismico, caratterizzato da velocità superiori a 800 m/s, è stato posto in corrispondenza della base del Quaternario Marino.

Considerando l’età geologica, le profondità di seppellimento e i caratteri geologico-tecnici, appare verosimile che le Unità Plioceniche abbiano rigidezze e velocità tipiche di un substrato rigido. La Figura 6-1 mostra l’andamento della base del Quaternario Marino, corrispondente al tetto del *bedrock* sismico, e l’ubicazione delle indagini e delle sezioni geologiche utilizzate per la definizione di tale superficie. Una forte variabilità nella profondità della superficie di discontinuità stratigrafica considerata è riscontrabile nel sottosuolo del territorio comunale e ciò dipende dalle deformazioni indotte dalla crescita delle strutture tettoniche che hanno generano subsidenza differenziale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

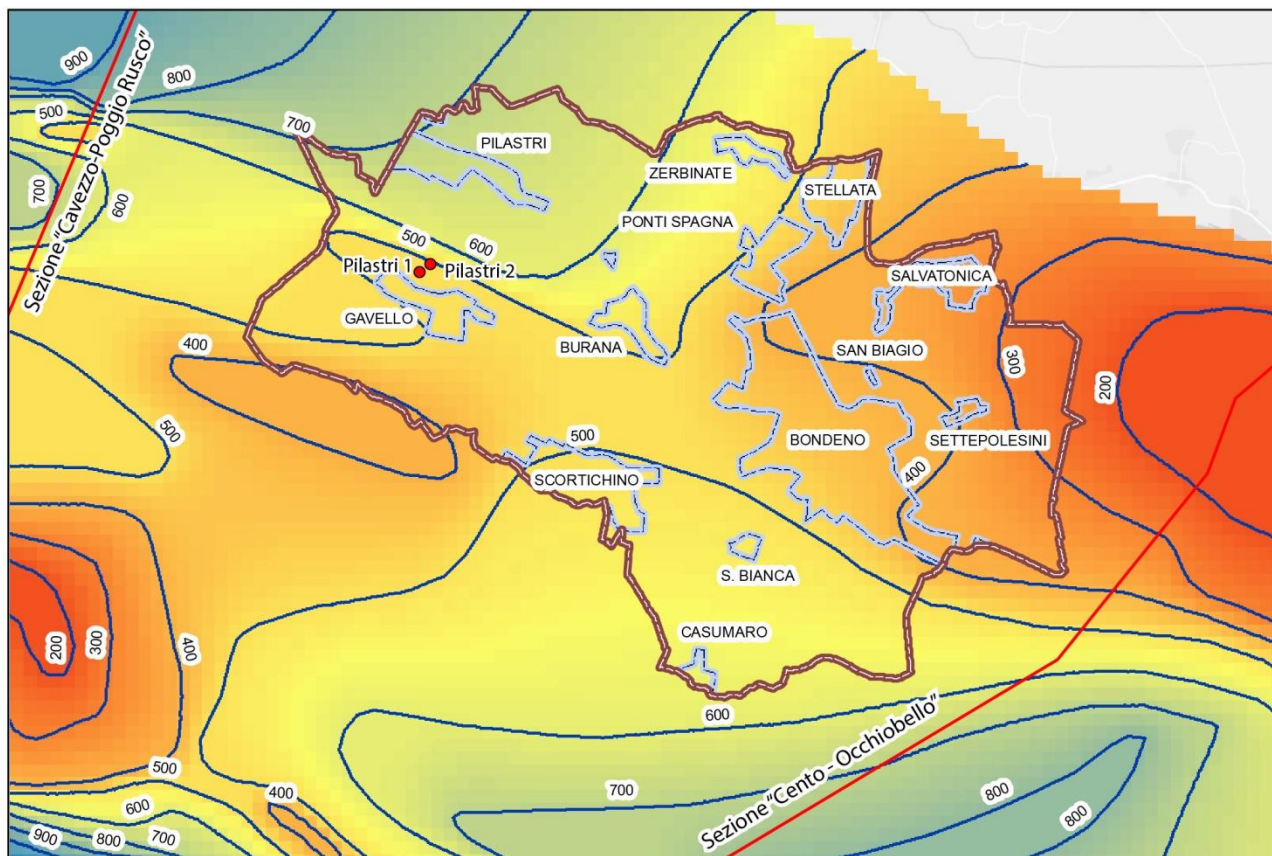


Figura 6-1 - La mappa mostra l'andamento delle isobate relative alla base dell'unità stratigrafica del Quaternario Marino e riporta i principali elementi utilizzati per la definizione del substrato sismico. La tracce rosse indicano le ubicazioni delle sezioni geologiche profonde disponibili nei pressi dell'area di studio (Martelli *et al.*, 2017). In rosso sono indicati i pozzi per idrocarburi che penetrano nel substrato sismico.

6.3 Terreni suscettibili di liquefazione

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

La manifestazione di fenomeni di liquefazione è stata abbondantemente documentata in occasione del sisma del 2012, nelle aree agricole occidentali del territorio comunale comprese tra Burana, Scortichino e Santa Bianca (Emergeo Working Group, 2013). Gli studi realizzati durante l'emergenza sismica dalla Regione Emilia-Romagna avevano già consentito una mappatura speditiva delle aree potenzialmente suscettibili di liquefazione (Martelli e Romani, 2013).

Il considerevole quantitativo di indagini reperite durante lo studio di microzonazione, ha reso possibile una più accurata definizione dello spessore e delle geometrie dei corpi potenzialmente liquefacibili soprattutto

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

nelle aree prive di dati pregressi o precedentemente corredate di dati di scarsa affidabilità. Questo ha permesso di accertare la presenza di condizioni predisponenti la liquefazione in vaste aree degli ambiti di studio e eseguire una revisione dei limiti e della estensione delle zone potenzialmente soggette a tale instabilità. Le aree così ridefinite sono state indicate nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica come Zone di Attenzione per Liquefazione (ZA_{LQ} - Tavole 4a e 4b, paragrafo 8.4).

L'elevato numero di indagini penetrometriche con piezocono (CPTU) archiviate in formato numerico, ha infine permesso la realizzazione di 241 analisi puntuali di suscettibilità a liquefazione, effettuate mediante metodi semplificati (cfr. paragrafo 7.2.1). Per ogni verticale di indagine è stato calcolato l'indice del potenziale di liquefazione (LPI). Sulla base della distribuzione areale degli elementi geologici e dei valori degli indici (LPI) è stato possibile definire i limiti spaziali delle Zone di Suscettibilità (ZS_{LQ}) e delle Zone di Rispetto (ZR_{LQ}) per le liquefazioni. Le Zone di Suscettibilità (ZS_{LQ}) sono state poi ulteriormente suddivise in base al loro diverso grado di pericolosità (paragrafo 8.6).

Gli approfondimenti geotecnici compiuti per il terzo livello di microzonazione sismica hanno notevolmente ridotto le incertezze relative alla distribuzione ed alle caratteristiche meccaniche dei corpi suscettibili di liquefazione. Queste instabilità riguardano prevalentemente aree situate in corrispondenza di paleoalvei di Po e di fiumi di provenienza appenninica e ventagli da rotta e tracimazione, costituiti da sedimenti sabbioso-limosi poco addensati e posti sottofalda. All'interno del territorio comunale, questi depositi formano, nelle prime decine di metri di sottosuolo, spessi ed estesi corpi sabbiosi coalescenti o, più raramente, lenti isolate di limitata estensione.

L'elevata variabilità laterale nella distribuzione dei depositi sedimentari non permette quindi di escludere la presenza di locali livelli granulari saturi anche in porzioni di territorio non classificate come zone di attenzione per liquefazioni (ZA_{LQ}). Questa è particolarmente vero nelle aree meno documentate da prove geognostiche, principalmente in zone rurali. Per tali ragioni la valutazione di sito della pericolosità di liquefazione necessita sempre di ulteriori indagini geognostiche specifiche, da realizzarsi, ad esempio, in occasione di nuove fasi di pianificazione territoriale e/o nella progettazione di interventi o costruzioni.

7 Metodologie di elaborazione e risultati

La finalità di uno studio di microzonazione sismica è giungere ad una suddivisione del territorio esaminato in zone a diversa pericolosità sismica, in base alla loro suscettibilità ad effetti locali cosismici.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

Le zone sono classificate come stabili, nel caso in cui non si ipotizzino effetti locali di alcuna natura, e come suscettibili di amplificazioni locali, qualora siano attese esclusivamente amplificazioni del moto sismico dovute all'assetto litostratigrafico e morfologico. Qualora siano invece possibili, oltre ai fenomeni di amplificazione, effetti di deformazione permanente del suolo, le zone sono identificate come suscettibili di instabilità e per esse sono richiesti approfondimenti di terzo livello.

Una corretta suddivisione in aree a diversa pericolosità deve essere basata su un dettagliato modello concettuale del sottosuolo. La bontà del modello è certamente funzione della disponibilità di dati geognostici e geofisici, ma altrettanto dell'esperienza del geologo che lo definisce.

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

La ricostruzione dei primi 30 m di sottosuolo è stata ottenuta mediante la tradizionale interpretazione delle facies sedimentarie e delle geometrie deposizionali ottenuta dalla correlazione di indagini geognostiche che hanno portato alla realizzazione delle sezioni geologiche dell'Allegato 1 (sezioni A-A', B-B', C-C', D-D', E-E'). Nei paragrafi seguenti, sono descritte le metodologie utilizzate per la definizione dei modelli sismo-stratigrafici, il calcolo dei fattori di amplificazione locale e la definizione del grado di rischio associato alle diverse aree classificate come instabili.

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

7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali

La sequenza sismica del 2012 ha permesso di verificare come l'area di pianura emiliana colpita sia stata interessata da fenomeni di amplificazione stratigrafica (e.g. Bordoni *ed al.*, 2012; Govoni *ed al.*, 2014). La determinazione dell'amplificazione attesa può essere ottenuta sia attraverso l'utilizzo degli abachi di riferimento, sia mediante analisi di risposta sismica locale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

Per le aree classificate come soggette ad amplificazioni locali ed instabilità (cfr. liquefazione) la quantificazione dei principali fattori di amplificazione del moto sismico è stata ottenuta mediante calcolo della risposta sismica locale (RSL). Questi fattori di amplificazione sono presentati sia in termini di accelerazione (FA_{PGA} - Tavola 6a - 6b, $FA_{0.1-0.5}$ - Tavola 10a - 10b, $FA_{0.4-0.8}$ - Tavola 11a - 11b, $FA_{0.7-1.1}$ - Tavola 12a - 12b, $FA_{0.5-1.5}$ - Tavola 13a - 13b), sia di pseudovelocità o intensità di Housner ($FH_{0.1-0.5}$ - Tavola 7a - 7b, $FH_{0.5-1.0}$ - Tavola 8a - 8b, $FH_{0.5-1.5}$ - Tavola 9a - 9b). Essendo l'area in esame in contesto di pianura, il valore del coefficiente di amplificazione topografica ST è stato assunto ovunque pari a 1.

7.1.1 Analisi di risposta sismica locale con modellazioni numeriche

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

Sulla base dei dati stratigrafici, geofisici e geotecnici disponibili, e considerando la possibile variazione della profondità del *bedrock* sismico e delle principali discontinuità stratigrafiche presenti nell'area di studio (capitoli 5 e 6), sono state eseguite diverse modellazioni numeriche preliminari di risposta sismica locale, per testare la variabilità dei risultati al variare dei diversi parametri di input.

In ragione della notevole estensione dell'area comunale di Bondeno vi sono infatti numerose decine di possibili combinazioni delle 14 MOPS individuate nel presente studio (paragrafo 8.4) con le variazioni della profondità del *bedrock* sismico, compreso tra i 350 e i 650 metri (capitolo 6.2), associate agli 8 punti della griglia della mappa di pericolosità sismica elaborata da INGV per il territorio nazionale, ricadenti all'interno del territorio del comunale o nelle sue immediate vicinanze.

Il confronto attento dei risultati di tutte le modellazioni preliminari eseguite, ha suggerito la possibilità di eseguire alcune semplificazioni e associazioni, le quali hanno consentito di ridurre a 14 il numero di differenti analisi di risposta sismica che risultano sufficienti a rappresentare e quantificare, con la giusta approssimazione, tutte le diverse specificità presenti negli ambiti di studio.

Come vedremo nei paragrafi seguenti, le 14 analisi di risposta sismica locale eseguite per il presente studio di microzonazione (RSL numerate da 01 a 14) sono il risultato della combinazione tra 3 differenti modelli sismo-stratigrafici superficiali (MOD 1, MOD 2 e MOD3), 4 modelli sismo-stratigrafici profondi (A-350, B-

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

450, C-650 e D-600) e 6 differenti punti della griglia INGV, a ciascuno dei quali è associato un gruppo di 7 accelerogrammi reali, spettro-compatibili, come indicato dalla D.G.R. 564/2021. Sulla base di queste risultanze sono quindi stati modellati, a supporto del presente studio, 14 siti “tipo” a ciascuno dei quali è stato associato un modello sismo-stratigrafico superficiale, uno profondo ed un punto della griglia INGV (Tabella 7-1).

Nome RSL	Modello superficiale	Modello profondo	ID punto griglia
RSL01	MOD1	A-350	ID_14956
RSL02	MOD1	B-450	ID_15177
RSL03	MOD1	B-450	ID_14954
RSL04	MOD1	B-450	ID_14955
RSL05	MOD1	B-450	ID_15178
RSL06	MOD1	C-650	ID_14954
RSL07	MOD2	A-350	ID_14956

Nome RSL	Modello superficiale	Modello profondo	ID punto griglia
RSL08	MOD2	B-450	ID_15177
RSL09	MOD2	B-450	ID_14954
RSL10	MOD2	B-450	ID_14955
RSL11	MOD2	B-450	ID_15178
RSL12	MOD2	C-650	ID_14954
RSL13	MOD2	D-600	ID_15399
RSL14	MOD3	D-600	ID_15399

Tabella 7-1 - Modelli e punti della griglia associati alle 14 analisi di risposta sismica locale.

Così come la Tabella 7-1 anche la Figura 7-1 rappresenta un riferimento per l'intero capitolo. Essa riporta una carta MOPS semplificata, su cui sono indicati gli ambiti di studio e la loro associazione ai modelli profondi e ai punti della griglia.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

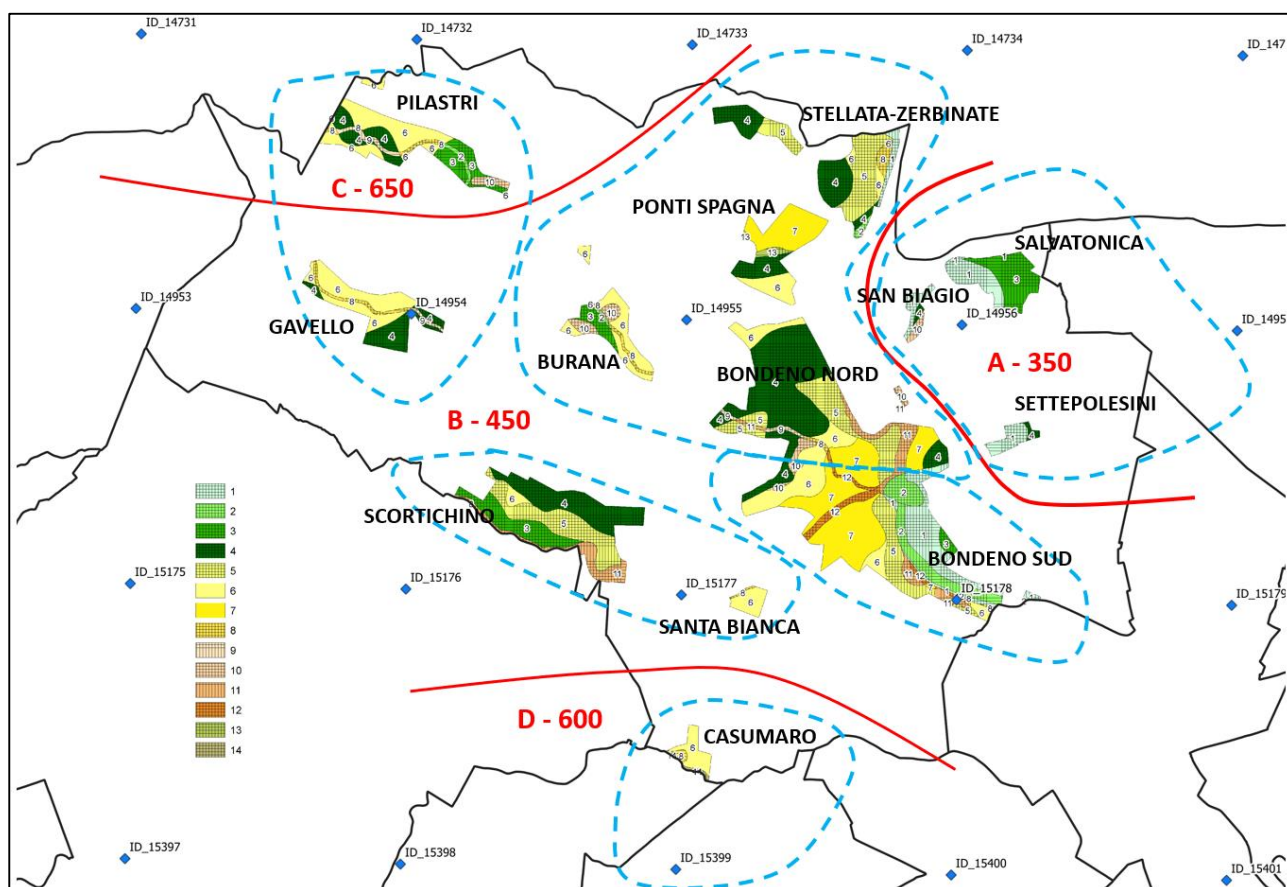


Figura 7-1 - Le aree colorate rappresentano una versione semplificata della carta MOPS. In rosso sono indicate le delimitazioni delle aree su cui sono stati applicati i 4 diversi modelli profondi, mentre in azzurro sono rappresentate le associazioni degli ambiti o delle loro porzioni ai 6 diversi punti della griglia INGV.

I modelli sismo-stratigrafici ricostruiti per il presente studio si basano sui risultati di indagini geognostiche e geofisiche in situ ed in laboratorio (dati di aree limitrofe), eseguite per la caratterizzazione dei terreni di copertura costituenti le prime decine di metri di sottosuolo, mentre le unità stratigrafiche più profonde sono state descritte utilizzando dati di letteratura e correlazioni a scala regionale attraverso il confronto con sezioni e dati di pozzo.

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 mediante misure dirette (*down-hole*, coni sismici e ESAC) per i primi 30 metri, o da letteratura (Minarelli *et al.*, 2016) per profondità maggiori; (ii) le curve di decadimento del modulo di taglio ($G/G_0 - \gamma$) e di incremento del fattore di smorzamento ($D - \gamma$) ottenute da prove dinamiche di laboratorio su campioni indisturbati o da indagini in situ con dilatometro sismico (Amoroso *et*

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

al., 2014), eseguite nel territorio di Bondeno o in aree limitrofe, a supporto degli studi realizzati durante la fase di emergenza post-sismica dalla Regione Emilia-Romagna (Martelli e Romani, 2013), o di quelli più recenti di terzo livello eseguiti in altri comuni della Pianura emiliana, oppure ricavate da dati di letteratura (per i livelli più sabbiosi) ; (iii) i valori del peso per unità di volume stimati dalle prove in sito e di laboratorio disponibili.

La correlazione tra dati stratigrafici, sezioni geologiche (cfr. Allegato 1), e curve H/V ottenute da tramite misure di microtremore realizzate per il presente studio (paragrafo 4.2.1.4), hanno permesso di individuare i maggiori contrasti di impedenza e stimare la profondità e la natura della *bedrock* sismico anche se non è stato direttamente raggiunto dalle indagini (paragrafi 5.1 e 6.2). Sulla base di tali analisi il *bedrock* sismico è stato posto, per tutte le modellazioni, in corrispondenza della superficie tra la base dei depositi del Quaternario Marino (QM) e il tetto dei depositi del Pliocene.

Nei due paragrafi successivi sono dettagliate le caratteristiche dei modelli sismo-stratigrafici alla base delle 14 analisi di risposta sismica eseguite.

7.1.1.1 Modelli sismo-stratigrafici superficiali

Come descritto in precedenza, le modellazioni numeriche preliminari eseguite all'interno degli ambiti di studio hanno evidenziato la possibilità di accorpare le 14 differenti MOPS distinte nel presente studio (paragrafo 8.4) e di ridurre a 3 i diversi modelli sismo-stratigrafici superficiali da utilizzare per le analisi di risposta sismica locale necessarie per il terzo livello di approfondimento. Nello specifico i primi due modelli (MOD1 e MOD2) rappresentano una sintesi "ideale" di diverse MOPS, mentre il terzo (MOD3) rappresenta la sola MOPS14 (Tabella 7-2).

I 3 modelli di Tabella 7-2, le cui caratteristiche di dettaglio di ogni singolo strato sono state definite come indicato al paragrafo precedente, sono stati inseriti come "Soil Profile" nel software STRATA (Rathje e Kottke, 2013), per i primi 30 metri di profondità dal piano di campagna, in combinazione con i modelli profondi del paragrafo seguente.

MOD1		MOPS 30502001, 30502002, 30502003, 30502004 e 30502009	
Tetto	Base	Unità geologica-geotecnica	Vs (m/s)
0	4.5	Bondeno (da 2 a 3 m) - A+L	145
4.5	8	Scortichino S2C2 (CR) SL -7m	165
8	9.5	Scortichino S2C2 (CR) SL -7m	195

MOD2		MOPS 30502005, 30502006, 30502007, 30502008, 30502010, 30502011, 30502012, 2013	
Tetto	Base	Unità geologica-geotecnica	Vs (m/s)
0	5	Bondeno (da 2 a 3 m) - A+L	160
5	12	Scortichino S5C5 (CR) LA +T -9m	185
12	14	Scortichino S5C5 (CR) LA +T -9m	160

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

9.5	15.5	Scortichino S2C5 (CR) S deb.L-15m	210
15.5	23	Scortichino S3C5 (CR) S deb.L-15m	235
23	30	Scortichino S3C5 (CR) S deb.L-15m	280

14	25	Scortichino S3C5 (CR) S deb.L-15m	235
25	30	Scortichino S3C5 (CR) S deb.L-15m	290

MOD3		MOPS 2014	
Tetto	Base	Unità geologica-geotecnica	Vs (m/s)
0	5	Poggio Renatico (3.6 m) - LdS	145
5	12	Scortichino S5C5 (CR) LA +T -9m	185
12	14	Scortichino S5C5 (CR) LA +T -9m	160
14	25	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	235
25	30	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	265

Tabella 7-2 - Modelli sismo-stratigrafici superficiali utilizzati in input per le diverse analisi di risposta sismica locale, con indicazione delle MOPS rappresentate da ciascun modello.

In estrema sintesi: il primo modello (MOD1) sintetizza tutte le MOPS caratterizzate dalla presenza di uno spessore superficiale di pochi metri di argille e limi al di sopra di livelli sabbiosi fino alla profondità di 30 metri; il secondo modello (MOD2) sintetizza tutte le MOPS caratterizzate dalla presenza di uno spessore di almeno 10 metri di argille e limi al di sopra di livelli sabbiosi fino alla profondità di 30 metri; il terzo modello (MOD3) rappresenta la MOPS14, caratterizzata dalla presenza di uno spessore di pochi metri di sabbie in superficie, al di sopra di livelli prevalentemente limosi e argillosi fino alla profondità di 30 metri.

7.1.1.2 Modelli sismo-stratigrafici profondi

Come detto, le modellazioni numeriche preliminari eseguite all'interno degli ambiti di studio hanno evidenziato la necessità di utilizzare 4 distinti modelli sismo-stratigrafici profondi, che sintetizzano le caratteristiche più significative presenti nell'area di studio, finalizzate alle analisi di risposta sismica locale necessarie per il terzo livello di approfondimento (Tabella 7-3).

I 4 modelli di Tabella 7-3, le cui caratteristiche di dettaglio di ogni singolo strato sono state definite come indicato al paragrafo precedente, sono stati inseriti come "*Soil Profile*" nel software STRATA (Rathje e Kottke, 2013), per profondità superiori ai 30 metri dal piano di campagna, in combinazione con i modelli superficiali del paragrafo precedente (Tabella 7-2).

Per pervenire alla definizione di tali modelli profondi è stata almeno in parte necessaria l'estrapolazione dei dati di zone diverse all'area in esame. In particolare, è stata seguita la metodologia proposta da Minarelli *et al.*, 2016, considerando che i territori indagati si inquadrano nel medesimo contesto geologico-strutturale, che determina la presenza delle stesse unità stratigrafiche appartenenti al Supersistema Emiliano-

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

Romagnolo. Nell'estrapolare ed associare le velocità alle unità stratigrafiche, sono stati considerati opportune correzioni nei valori di V_s legati al diverso spessore, seppellimento e conseguente carico litostatico a cui sono sottoposte le stesse unità stratigrafiche nelle diverse aree. Queste stime sono state effettuate verificando l'accordo con i principali contrasti di impedenza identificati dai picchi di H/V.

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

La superficie verosimilmente associata al maggior aumento di rigidità e di velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) corrisponde alla discordanza che marca il tetto delle successioni torbiditiche del Pliocene. Questa superficie risulta piegata dalla deformazione tettonica, motivo per cui la sua profondità risulta piuttosto variabile all'interno dell'area di studio. Le arenarie torbiditiche si sono deposte in ambienti marini profondi e hanno subito un processo di cementazione e litificazione per cui sono caratterizzate da velocità delle onde sismiche relativamente elevate (Garofalo *et al.*, 2016). Questo contrasto di impedenza, individuato nel sottosuolo del comune di Bondeno tra i 450 e 650 m di profondità, identifica il *bedrock* sismico delle analisi numeriche di risposta sismica locale.

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

Un'altra superficie di discordanza stratigrafica, meno profonda e associata ad un contrasto di impedenza minore ma comunque significativo, è sviluppata all'interno delle successioni quaternarie e marca il tetto dell'unità del Quaternario Marino. A causa dei movimenti tettonici sinsedimentari, nell'area di studio tale superficie si rinviene a profondità molto variabili, comprese tra i 210 e i 350 metri.

A-350			
Tetto	Base	Unità geologica-geotecnica	V_s (m/s)
30	40	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	280
40	46	Mirabello M1 C4 - AL + T - UNIFI	360
46	65	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	385
65	83	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	400
83	97	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	425
97	133	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	435
133	151	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	485
151	165	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	500
165	185	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	525
185	210	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	530
210	225	Lienare Elastico Argilla	800
225	250	Lineare Elastico Argilla	800
250	275	Lineare Elastico Argilla	800

B-450			
Tetto	Base	Unità geologica-geotecnica	V_s (m/s)
30	40	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	270
40	46	Mirabello M1 C4 - AL + T - UNIFI	350
46	65	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	375
65	83	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	390
83	97	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	400
97	133	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	420
133	151	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	460
151	165	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	470
165	185	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	490
185	210	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	510
210	235	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	520
235	250	Lienare Elastico Argilla	800
250	275	Lineare Elastico Argilla	800

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

275	300	Lineare Elastico Argilla	800
300	325	Lineare Elastico Argilla	800
325	350	Lineare Elastico Argilla	800
350		Bedrock	1200

C-650			
Tetto	Base	Unità geologica-geotecnica	Vs (m/s)
30	12	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	320
42	15	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	325
57	16	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	330
73	15	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	360
88	10	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	365
98	7	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	380
105	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	385
125	20	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	390
145	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	400
165	15	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	480
180	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	490
200	15	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	520
215	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	530
240	25	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	540
265	20	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	550
285	15	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	560
300	20	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	590
320	30	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	600
350	25	Lineare Elastico Argilla	800
375	25	Lineare Elastico Argilla	800
400	25	Lineare Elastico Argilla	800
425	25	Lineare Elastico Argilla	800
450	25	Lineare Elastico Argilla	800
475	25	Lineare Elastico Argilla	800
500	25	Lineare Elastico Argilla	800
525	25	Lineare Elastico Argilla	800
550	25	Lineare Elastico Argilla	800
575	25	Lineare Elastico Argilla	800
600	25	Lineare Elastico Argilla	800
625	25	Lineare Elastico Argilla	800
650		Bedrock	1200

275	300	Lienare Elastico Argilla	800
300	325	Lienare Elastico Argilla	800
325	350	Lienare Elastico Argilla	800
350	375	Lienare Elastico Argilla	800
375	400	Lienare Elastico Argilla	800
400	425	Lienare Elastico Argilla	800
425	450	Lienare Elastico Argilla	800
450		Bedrock	1200

D-600			
Tetto	Base	Unità geologica-geotecnica	Vs (m/s)
30	17	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	290
47	19	Mirabello - M1 C3 - AL + T - UNIFI	320
66	18	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	360
84	19	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	380
103	32	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	385
135	16	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	410
151	19	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	415
170	20	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	475
190	15	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	480
205	21	Scortichino S3C7 (CR) S deb.L-40m	490
226	24	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	500
250	25	Lineare Elastico Argilla	700
275	25	Lineare Elastico Argilla	725
300	25	Lineare Elastico Argilla	750
325	25	Lineare Elastico Argilla	775
350	25	Lineare Elastico Argilla	800
375	25	Lineare Elastico Argilla	800
400	25	Lineare Elastico Argilla	800
425	25	Lineare Elastico Argilla	800
450	25	Lineare Elastico Argilla	800
475	25	Lineare Elastico Argilla	800
500	25	Lineare Elastico Argilla	800
525	25	Lineare Elastico Argilla	800
550	25	Lineare Elastico Argilla	800
575	25	Lineare Elastico Argilla	800
600		Bedrock	1200

Tabella 7-3 - Modelli sismo-stratigrafici superficiali utilizzati in input per le diverse analisi di risposta sismica locale. Sono evidenziate: in arancio la superficie di discordanza stratigrafica più superficiale (tetto QM); in rosso il bedrock sismico (base QM).

Nella mappa di Figura 7-1 sono rappresentate in rosso le aree di applicazione dei 4 modelli sismo-stratigrafici profondi di Tabella 7-3 rispetto agli ambiti di studio del Comune di Bondeno.

7.1.1.3 Segnali di input

Per la scelta degli accelerogrammi di input da utilizzare è stato prima necessario associare, a ciascuna analisi, il punto della griglia più prossimo (Tabella 7-1 e Figura 7-1, in blu). Nei casi dubbi è stato adottato un

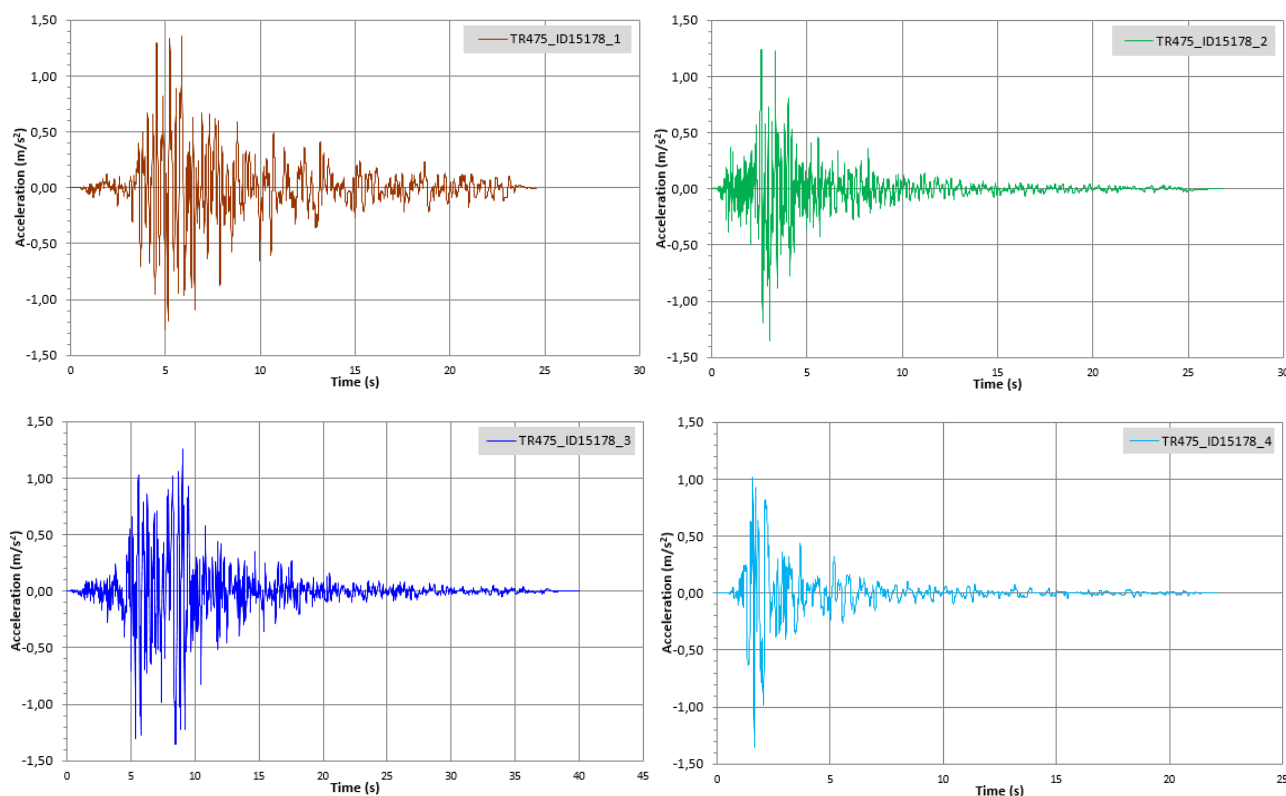
MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

criterio conservativo, associando il punto con il valore di *Agref* più elevato. La Tabella 7-4 mostra il valore di *Agref* per ciascuno dei punti della griglia considerati.

ID punto griglia	Agref
ID_14954	0.127
ID_14955	0.123
ID_14956	0.118
ID_15177	0.142
ID_15178	0.138
ID_15399	0.151

Tabella 7-4 - Modelli sismo-stratigrafici profondi utilizzati in input per le diverse analisi di risposta sismica locale.

Come accelerogrammi di input (al *bedrock*) per il calcolo della risposta sismica locale, sono stati utilizzati, per ciascuno dei 6 punti della griglia considerati, i 7 segnali di riferimento messi a disposizione dalla Regione Emilia-Romagna tramite *webgis*, come previsto dalla D.G.R. 564/2021. A titolo esemplificativo, di seguito sono riportati i grafici dei 7 accelerogrammi del punto "ID_15178" della griglia INGV (Figura 7-2).



MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

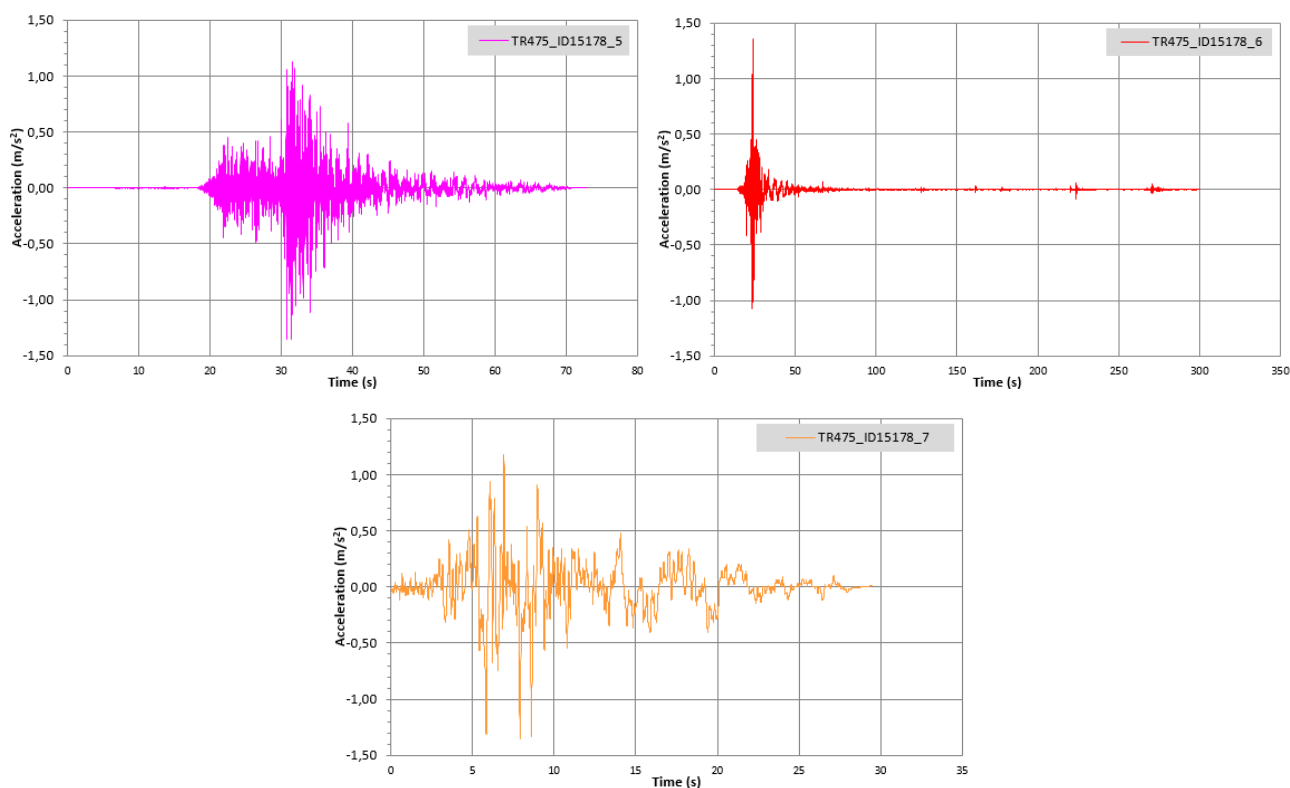


Figura 7-2 - Grafici dei 7 accelerogrammi del punto "ID_15178" della griglia INGV.

7.1.1.4 Analisi di risposta sismica locale

Le 14 analisi di risposta sismica locale sono state eseguite con il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013), utilizzando i dati illustrati nei paragrafi precedenti, nelle combinazioni dettagliate in Tabella 7-1 ed illustrate in Figura 7-1.

Sono stati quindi calcolati e confrontati gli spettri di risposta al *bedrock* ed in superficie per un periodo di ritorno di 475 anni con uno smorzamento assunto pari al 5%. Per ciascuna delle 14 analisi, gli spettri elastici sia in pseudo accelerazione che pseudo velocità, in input e in output, per ciascuno dei 7 accelerogrammi, sono stati quindi archiviati nel database in formato .txt secondo quanto richiesto dagli Standard MS 4.2 (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2020).

Data la numerosità delle analisi eseguite, è stato creato un apposito documento (Allegato 4), in cui sono raccolti i seguenti tipi di grafici che sintetizzano i risultati ottenuti:

- **funzione di trasferimento:** definita come il rapporto tra lo spettro di Fourier del segnale in superficie in funzione della frequenza, per i 7 accelerogrammi di input e per la loro mediana. La prime amplificazioni

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

che si osservano a più basse frequenze risultano in tutti i casi coerenti coi dati delle misure di rumore ambientale. Si rilevano infatti un primo picco in corrispondenza del *bedrock sismico* e un secondo entro i depositi quaternari quindi a diverse altre frequenze, alcune delle quali sono armoniche superiori. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

- **spettro 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%: sono rappresentati gli spettri ottenuti a partire dai 7 accelerogrammi e lo spettro mediano, al *bedrock* e in superficie. Risulta evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente del moto di input, risultando quindi piuttosto differenti per alcuni dei 7 accelerogrammi utilizzati.
- **accelerazione di picco (PGA) nei primi 30 m di sottosuolo**: il grafico né mostra l'andamento in funzione della profondità per i 7 terremoti di input e per la loro mediana. Si nota un generale progressivo aumento al diminuire della profondità, che diventa più accentuato avvicinandosi alla superficie.

La Tabella 7-5 riporta tutti i fattori di amplificazione calcolati tra *bedrock* e superficie per ciascuna delle 14 analisi eseguite. Si tratta dei fattori di amplificazione previsti dalla D.G.R. 476/2021 e per i quali sono state realizzate le carte di microzonazione sismica di terzo livello (paragrafo 8.6 e Tavole da 6 a 17).

Nome RSL	FA _{PGA}	SI1 FH _{0.1-0.5}	SI2 FH _{0.5-1.0}	SI3 FH _{0.5-1.5}	SI1 FA _{0.1-0.5}	SA2 FA _{0.4-0.8}	SA3 FA _{0.7-1.1}	SA4 FA _{0.5-1.5}
RSL01	1.6	2.0	2.6	2.5	1.9	2.4	2.6	2.5
RSL02	1.5	1.8	2.3	2.3	1.7	2.2	2.4	2.3
RSL03	1.6	1.9	2.4	2.4	1.8	2.2	2.4	2.4
RSL04	1.6	1.9	2.4	2.4	1.8	2.3	2.4	2.4
RSL05	1.5	1.8	2.3	2.4	1.7	2.2	2.4	2.3
RSL06	1.4	1.7	2.0	2.1	1.5	2.0	2.0	2.0
RSL07	1.7	2.1	2.8	2.6	1.7	2.5	2.6	2.5
RSL08	1.6	2.0	2.5	2.5	1.8	2.4	2.5	2.5
RSL09	1.7	2.1	2.5	2.5	1.9	2.5	2.6	2.5
RSL10	1.7	2.1	2.5	2.5	1.9	2.5	2.6	2.5
RSL11	1.6	2.0	2.5	2.5	1.8	2.4	2.5	2.5
RSL12	1.4	1.8	2.1	2.2	1.6	2.2	2.1	2.2
RSL13	1.4	1.8	2.3	2.3	1.6	2.1	2.4	2.3
RSL14	1.4	1.8	2.5	2.5	1.6	2.3	2.6	2.4

Tabella 7-5 - Valori dei diversi fattori di amplificazione calcolati per ciascuna delle 14 analisi di risposta sismica locale.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

7.1.2 Calcolo del parametro H_{SM}

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

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

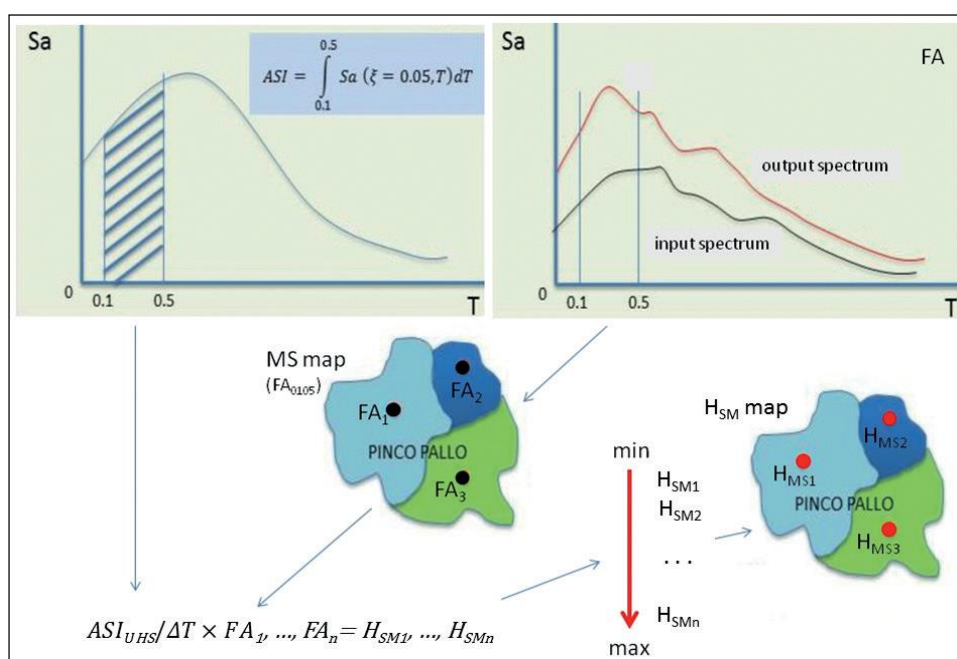


Figura 7-3 - Schema per il calcolo del parametro H_{SM} ed esempio di mappatura (Naso *et al.*, 2019).

L'introduzione del parametro H_{SM} consente di realizzare mappe che tengano conto del rischio sismico derivato dall'interazione tra il moto sismico e la presenza di edifici con determinati "modi di vibrare".

Considerando sia il rischio sismico di riferimento sia gli effetti locali, il parametro H_{SM} consente una valutazione più realistica del "pericolo" sismico permettendo di effettuare stime omogenee a scala nazionale. Il parametro H_{SM} può essere discretizzato in classi semi-quantitative relative al livello di scuotimento, al potenziale danno agli edifici e all'intensità strumentale. Le soglie delle classi di H_{SM} proposte in Naso *et al.*, 2019 sono illustrate in Tabella 7-6.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

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

Tabella 7-6 - Soglie per H_{SM} e altri parametri correlati (Naso *et al.*, 2019)

I valori di H_{SM} per le microzone identificate nei diversi ambiti geografici comunali, sono stati derivati dalle rispettive analisi di risposta sismica locale, integrando gli spettri di riferimento in accelerazione nell'intervallo di periodi compreso tra 0,1s e 0,5s e applicando la formula di Figura 7-3.

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

Per gli approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello, la normativa regionale richiede anche il calcolo dei valori di scuotimento in accelerazione (cm/s²) attesi al sito per gli intervalli di periodi $0,4s \leq T \leq 0,8s$, $0,7s \leq T \leq 1,1s$ e $0,5s \leq T \leq 1,5s$. Anche questi valori sono stati determinati in modo analogo a quelli di H_{SM} , integrando gli spettri di riferimento in accelerazione per gli intervalli di periodi appena descritti e applicando la formula di Figura 7-3. I valori ottenuti per le microzone dei diversi ambiti geografici comunali sono riportati in Tabella 7-7.

Nome RSL	$H_{SM0.1-0.5}$		$H_{0.4-0.8}$		$H_{0.7-1.1}$		$H_{0.5-1.5}$	
	cm/s ²	g	cm/s ²	g	cm/s ²	g	cm/s ²	g
RSL01	398	0,41	268	0,27	160	0,16	154	0,16
RSL02	428	0,44	284	0,29	177	0,18	168	0,17
RSL03	403	0,41	261	0,27	161	0,16	153	0,16
RSL04	396	0,40	256	0,26	157	0,16	150	0,15
RSL05	422	0,43	279	0,28	173	0,18	165	0,17
RSL06	345	0,35	231	0,24	133	0,14	132	0,13
RSL07	418	0,43	297	0,30	169	0,17	164	0,17
RSL08	457	0,47	313	0,32	186	0,19	179	0,18
RSL09	429	0,44	289	0,29	169	0,17	163	0,17
RSL10	421	0,43	282	0,29	165	0,17	159	0,16
RSL11	450	0,46	308	0,31	182	0,19	175	0,18
RSL12	362	0,37	254	0,26	140	0,14	141	0,14
RSL13	442	0,45	283	0,29	177	0,18	171	0,17
RSL14	431	0,44	305	0,31	194	0,20	185	0,19

Tabella 7-7 - Valori di scuotimento in accelerazione.

7.2 Zone instabili soggette a liquefazione

La conformazione geologica e morfologica del territorio di Bondeno limita la tipologia di instabilità potenzialmente attese in caso di sisma ai soli fenomeni di liquefazione, lateral-spreading e cedimenti differenziali. Questi effetti sono stati ampiamente documentati nell'area durante la sequenza sismica del 2012.

I numerosi dati geognostici raccolti a supporto dello studio di microzonazione sono stati singolarmente analizzati rispetto a tali possibili criticità. Le valutazioni hanno confermato le evidenze del 2012, indicando la diffusa presenza terreni liquefacibili costituiti da sedimenti sabbioso-limosi poco addensati e saturi in acqua, affioranti o sepolti a debole profondità.

L'estensione e la perimetrazione delle aree liquefacibili è stata notevolmente affinata (v. Tavola 4a - 4b) rispetto agli studi precedenti (Martelli e Romani, 2013), anche grazie a nuove indagini geotecniche acquisite nell'ambito degli approfondimenti di terzo livello (paragrafo 4.2). Per ottenere valutazioni quantitative della suscettibilità alla liquefazione e poter suddividere il territorio in differenti classi di pericolosità, sono state realizzate stime dell'indice di potenziale liquefazione (I_L - Iwasaki *et al.*, 1982) con le procedure semplificate indicate dai recenti indirizzi regionali per la microzonazione sismica (paragrafo 7.2.1). Le stime sono state eseguite sulle indagini penetrometriche con piezocono, archiviate nell'ambito dello studio di Microzonazione (Allegato 3).

7.2.1 Verifiche del potenziale di liquefazione

La liquefazione è un fenomeno che si verifica in occasione di terremoti significativi ed interessa sedimenti granulari poco addensati e saturi in acqua, come ad esempio limi, sabbie e ghiaie, generalmente posti nei primi 15-20 m di sottosuolo.

Durante un 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 ampiamente osservato nell'area modenese e ferrarese in occasione della sequenza sismica del 2012. In seguito agli eventi del 2012, nell'area epicentrale emiliana sono stati effettuati molti studi di microzonazione sismica, nell'ambito dei quali sono state eseguite numerosissime stime del potenziale di

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

liquefazione mediante procedure semplificate, richiamate dai recenti indirizzi regionali (D.G.R. n. 476/2021 e D.G.R. n. 564/2021) e nazionali (Gruppo di lavoro MS, 2008). Il confronto tra i vari metodi di letteratura, basati su indagini penetrometriche statiche, ha permesso di concludere che i valori degli indici di liquefazione I_L ottenuti con i metodi di Idriss e Boulanger (2008) e Boulanger e Idriss (2014) fossero da considerare maggiormente attendibili di altri e meglio compatibili con gli effetti osservati nel 2012.

Per gli approfondimenti di terzo livello sono state eseguite stime del potenziale di liquefazione su 241 prove penetrometriche a piezocono (CPTu) distribuite spazialmente come riportato nelle Tavole dalla 6 alla 17. Tali stime, effettuate con vari metodi, hanno evidenziato come quello proposto da Boulanger e Idriss (2014) fornisca indici di norma più elevati rispetto ad altri metodi di letteratura (cfr. Idriss e Boulanger, 2008 e Robertson, 2009). Gli indici ottenuti con il metodo di Boulanger e Idriss (2014) sono stati considerati affidabili e maggiormente cautelativi, ragione per cui sono stati adottati per la realizzazione delle cartografie di sintesi dello studio.

Come parametri di input per la modellazione sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 7-8. Come magnitudo $M_{w_{max}}$ è stato considerato quello massimo atteso per la Zona 912 della Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004 - Figura 2-8), mentre i valori di PGA sono stati attenuati dalle diverse modellazioni di risposta sismica locale effettuate all'interno del territorio comunale (paragrafo 7.1.1).

In mancanza di studi idrogeologici di dettaglio e di analisi storico-statistiche sull'andamento delle isofreatiche, per le stime della soggiacenza di falda utilizzate nelle verifiche a liquefazione sono stati considerati valori maggiormente cautelativi rispetto a quelli misurati nel corso di diverse campagne di indagini geognostiche.

Mediante analisi morfologica del modello altimetrico di superficie LIDAR, il territorio comunale è stato suddiviso in zone intervalvee e zone di dosso morfologico naturale o artificiale. A queste aree sono stati attribuiti valori di soggiacenza della falda rispettivamente di 1 e 3 m, come già proposto per le analisi di suscettività a liquefazione eseguite negli studi di microzonazione post-sisma (Martelli *et al.*, 2013; Martelli e Romani, 2013).

I valori puntuali di I_L ottenuti utilizzando il software "Cliq 2.0" della *Geologismiki Geotechnical Software*, sono rappresentati in carta (Tavole dalla 6 alla 14) suddivisi secondo le classi di Sonmez (2003), in modo da poter distinguere tra aree a pericolosità di liquefazione bassa ($0 < I_L \leq 2$), moderata ($2 < I_L \leq 5$), alta ($5 < I_L \leq 15$) e molto alta ($I_L > 15$).

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

In Tabella 7-8 sono riportati i valori di I_L relativi alle 241 indagini penetrometriche con punta elettrica analizzate per gli approfondimenti di terzo livello, mentre i rapporti di calcolo delle verifiche effettuate sono raccolti nell'Allegato 3 alla presente relazione.

CODICE	coord_X	coord_Y	PGA (g)	Mw _{max}	FALDA (m)	IL BOULANGER E IDRISS (2014)
038003P17CPTU17	209232	4984747	0,18	6,14	1	5,1
038003P38CPTU38	209913	4982311	0,18	6,14	1	5,8
038003P39CPTU39	209508	4980792	0,20	6,14	1	1,2
038003P40CPTU40	207093	4978440	0,20	6,14	1	7
038003P51CPTU51	209551	4975984	0,23	6,14	3	4,9
038003P53CPTU53	209588	4976020	0,21	6,14	1	7,9
038003P55CPTU55	215827	4984157	0,21	6,14	1	4,3
038003P56CPTU56	213795	4984248	0,21	6,14	1	9
038003P57CPTU57	215238	4983724	0,21	6,14	3	2,8
038003P125CPTU125	215908	4978979	0,20	6,14	1	10,9
038003P126CPTU126	215277	4978871	0,20	6,14	1	8,9
038003P127CPTU127	214790	4978224	0,20	6,14	1	12,9
038003P128CPTU128	217007	4983086	0,21	6,14	1	2
038003P129CPTU129	216035	4983137	0,21	6,14	1	1,5
038003P130CPTU130	216610	4983570	0,21	6,14	1	8,5
038003P131CPTU131	216051	4982402	0,21	6,14	1	4,6
038003P132CPTU132	210961	4983599	0,18	6,14	1	6
038003P133CPTU133	212467	4981013	0,21	6,14	1	2,4
038003P134CPTU134	215934	4980859	0,21	6,14	1	0,5
038003P135CPTU135	212202	4983323	0,18	6,14	1	4,6
038003P136CPTU136	217032	4981113	0,21	6,14	1	19,6
038003P137CPTU137	216942	4981138	0,21	6,14	3	2,8
038003P138CPTU138	216873	4981147	0,21	6,14	1	15,6
038003P139CPTU139	214257	4978436	0,20	6,14	1	8,9
038003P140CPTU140	217962	4980689	0,19	6,14	3	0,2
038003P206CPTU208	217622	4980647	0,19	6,14	1	10,3
038003P207CPTU209	217396	4979131	0,21	6,14	1	2,3
038003P208CPTU210	220561	4980497	0,19	6,14	1	2,7
038003P210CPTU212	217769	4982886	0,20	6,14	1	18,3
038003P211CPTU213	217692	4982923	0,21	6,14	1	5
038003P212CPTU214	217439	4981891	0,20	6,14	1	11,7
038003P214CPTU216	217260	4981912	0,20	6,14	1	17,7
038003P215CPTU217	217831	4980832	0,19	6,14	1	8,9

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

038003P216CPTU218	217811	4980777	0,19	6,14	3	0,9
038003P217CPTU219	217805	4980733	0,19	6,14	1	18
038003P218CPTU220	219380	4981288	0,19	6,14	1	1,9
038003P219CPTU221	219387	4981233	0,19	6,14	3	0,3
038003P220CPTU222	219380	4981141	0,19	6,14	1	10,6
038003P221CPTU223	222322	4978071	0,19	6,14	1	8
038003P304CPTU306	215032	4973087	0,23	6,14	1	13,4
038003P305CPTU307	214683	4977949	0,20	6,14	3	7,2
038003P306CPTU308	214566	4977911	0,20	6,14	3	4,9
038003P307CPTU309	214538	4977836	0,21	6,14	1	3,3
038003P308CPTU310	214205	4976516	0,21	6,14	1	10,9
038003P309CPTU311	214230	4976216	0,21	6,14	1	13,7
038003P310CPTU312	214888	4975384	0,23	6,14	1	3,1
038003P311CPTU313	215208	4974957	0,23	6,14	3	1,7
038003P312CPTU314	215219	4974945	0,23	6,14	3	2,6
038003P313CPTU315	215318	4974806	0,23	6,14	3	2
038003P314CPTU316	215321	4974112	0,23	6,14	1	0,9
038003P315CPTU317	214265	4973365	0,23	6,14	1	11,6
038003P316CPTU318	214082	4972786	0,21	6,14	1	2,3
038003P318CPTU320	216725	4976686	0,21	6,14	1	1,9
038003P320CPTU322	210485	4975473	0,21	6,14	1	3,8
038003P321CPTU323	211375	4975363	0,23	6,14	3	3,5
038003P322CPTU324	211341	4975329	0,23	6,14	3	3,9
038003P324CPTU326	211310	4975324	0,23	6,14	3	5,7
038003P325CPTU327	211323	4975372	0,21	6,14	1	4,1
038003P327CPTU329	211930	4974793	0,23	6,14	3	9,1
038003P328CPTU330	212370	4977368	0,21	6,14	1	8,6
038003P329CPTU331	215807	4976699	0,20	6,14	1	8
038003P330CPTU332	212668	4976403	0,21	6,14	1	12,4
038003P331CPTU333	218195	4977084	0,21	6,14	1	0,2
038003P435CPTU438	218172	4977059	0,21	6,14	1	1,5
038003P436CPTU439	220203	4976813	0,19	6,14	1	5
038003P437CPTU440	221741	4974950	0,21	6,14	1	14,8
038003P438CPTU442	214747	4972308	0,21	6,14	3	4,4
038003P444CPTU448	214502	4971787	0,21	6,14	1	6,1
038003P445CPTU449	214513	4972222	0,21	6,14	3	9,5
038003P446CPTU450	214771	4972429	0,21	6,14	1	0,2
038003P447CPTU451	213897	4972344	0,21	6,14	1	3,8
038003P448CPTU452	213844	4971679	0,21	6,14	1	2

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

038003P449CPTU453	214086	4971168	0,21	6,14	1	2
038003P450CPTU454	215723	4972027	0,21	6,14	1	1
038003P459CPTU463	215999	4977621	0,20	6,14	3	5
038003P481CPTU486	207197	4984778	0,18	6,14	1	1,2
038003P482CPTU488	206179	4980602	0,20	6,14	3	10,6
038003P483CPTU490	209222	4983169	0,18	6,14	3	5,5
038003P484CPTU492	214509	4984076	0,20	6,14	1	3,3
038003P485CPTU494	215421	4981353	0,21	6,14	1	3,6
038003P493CPTU508	209846	4976356	0,23	6,14	1	7,8
038003P494CPTU509	211914	4980124	0,21	6,14	1	4,5
038003P495CPTU510	212370	4979833	0,21	6,14	1	2
038003P496CPTU511	213599	4971172	0,21	6,14	1	4,4
038003P497CPTU512	207343	4983923	0,18	6,14	1	1,6
038003P498CPTU513	217527	4983304	0,21	6,14	1	4,2
038003P499CPTU514	217160	4982421	0,21	6,14	1	4,3
038003P500CPTU515	218294	4977311	0,21	6,14	1	0,8
038003P501CPTU516	218615	4977207	0,20	6,14	1	9,8
038003P502CPTU517	216476	4977966	0,20	6,14	1	8,9
038003P503CPTU518	215970	4977269	0,21	6,14	1	2,9
038003P504CPTU519	216277	4977393	0,21	6,14	3	2,1
038003P505CPTU520	215593	4978930	0,20	6,14	1	11,6
038003P506CPTU521	215488	4979465	0,20	6,14	1	5,8
038003P507CPTU522	215853	4979589	0,20	6,14	1	11,5
038003P546CPTU563	216185	4976416	0,22	6,14	1	2
038003P547CPTU565	216180	4976390	0,22	6,14	1	1,8
038003P548CPTU566	216196	4976444	0,22	6,14	1	2
038003P550CPTU568	217466	4975645	0,22	6,14	3	0,7
038003P563CPTU593	207710	4982674	0,18	6,14	1	0,8
038003P564CPTU594	207710	4982714	0,18	6,14	1	0,5
038003P567CPTU597	214535	4973205	0,23	6,14	1	21,6
038003P568CPTU598	210064	4976471	0,23	6,14	1	2,8
038003P573CPTU603	209841	4967161	0,21	6,14	1	12,5
038003P575CPTU605	217679	4983025	0,21	6,14	1	7,5
038003P578CPTU608	212226	4980246	0,21	6,14	1	8,6
038003P579CPTU610	217584	4977329	0,21	6,14	1	9,7
038003P580CPTU612	209421	4982743	0,21	6,14	1	7,7
038003P582CPTU615	207088	4982544	0,18	6,14	1	1,1
038003P595CPTU628	206422	4983712	0,21	6,14	1	4
038003P603CPTU637	213371	4983130	0,21	6,14	1	0,8

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

038003P604CPTU638	213350	4983105	0,21	6,14	1	3,6
038003P605CPTU639	212850	4983698	0,21	6,14	1	3,4
038003P606CPTU640	212819	4983673	0,21	6,14	1	2,2
038003P609CPTU644	214870	4981660	0,21	6,14	1	3,2
038003P610CPTU645	214890	4981647	0,21	6,14	1	2,7
038003P623CPTU658	211704	4980871	0,21	6,14	1	5,8
038003P624CPTU659	211703	4980854	0,21	6,14	1	7,4
038003P626CPTU661	211884	4979965	0,20	6,14	1	6,3
038003P627CPTU662	211813	4979986	0,20	6,14	1	5,1
038003P628CPTU663	211835	4979973	0,20	6,14	1	3,3
038003P629CPTU664	211848	4979986	0,20	6,14	1	8,6
038003P651CPTU687	214534	4979915	0,21	6,14	1	0,7
038003P652CPTU688	214569	4979928	0,21	6,14	1	0,6
038003P671CPTU707	217797	4973534	0,22	6,14	1	5,1
038003P672CPTU708	208762	4977980	0,21	6,14	1	1,9
038003P673CPTU709	208760	4977957	0,21	6,14	1	3,9
038003P677CPTU713	213725	4979006	0,21	6,14	1	3,8
038003P678CPTU714	213734	4978886	0,21	6,14	3	2,1
038003P679CPTU716	215721	4977794	0,20	6,14	1	2,5
038003P680CPTU717	215731	4977797	0,20	6,14	1	2,7
038003P683CPTU720	219851	4978915	0,19	6,14	1	4,9
038003P684CPTU721	219875	4978943	0,19	6,14	1	2,8
038003P685CPTU926	215042	4981631	0,21	6,14	1	1
038003P686CPTU927	215031	4981611	0,21	6,14	1	1,1
038003P687CPTU724	206636	4979156	0,20	6,14	1	2,5
038003P688CPTU725	206629	4979116	0,20	6,14	1	2,9
038003P699CPTU736	207641	4977815	0,21	6,14	1	5,6
038003P700CPTU737	207599	4977814	0,21	6,14	1	6,1
038003P703CPTU741	207300	4976900	0,21	6,14	1	9,4
038003P704CPTU742	207315	4976928	0,21	6,14	1	9,1
038003P712CPTU750	209517	4976993	0,23	6,14	1	3,1
038003P713CPTU751	209460	4976992	0,23	6,14	1	2,6
038003P715CPTU753	209331	4977435	0,21	6,14	1	2,8
038003P716CPTU754	209356	4977420	0,21	6,14	1	2,6
038003P764CPTU802	222494	4974384	0,21	6,14	1	14,1
038003P765CPTU803	218036	4975868	0,21	6,14	1	11
038003P766CPTU804	218035	4975860	0,21	6,14	1	9
038003P767CPTU805	219410	4974230	0,22	6,14	1	1,4
038003P768CPTU806	219398	4974213	0,22	6,14	1	3,7

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

038003P769CPTU808	219249	4975645	0,21	6,14	1	4,6
038003P770CPTU809	219268	4975673	0,21	6,14	1	2,2
038003P771CPTU811	211548	4975343	0,23	6,14	1	12,8
038003P777CPTU817	215301	4974782	0,23	6,14	1	4,6
038003P780CPTU820	218473	4975234	0,21	6,14	3	13,4
038003P789CPTU829	218691	4974550	0,22	6,14	3	0,2
038003P790CPTU830	218663	4974541	0,22	6,14	3	0
038003P794CPTU834	212989	4971780	0,21	6,14	1	4,5
038003P795CPTU835	212999	4971803	0,21	6,14	1	12,7
038003P797CPTU837	209655	4979389	0,20	6,14	1	9
038003P798CPTU838	219145	4973395	0,22	6,14	1	2,9
038003P799CPTU839	219146	4973391	0,22	6,14	1	3,5
038003P805CPTU845	214412	4977998	0,20	6,14	3	3,1
038003P808CPTU848	215628	4975262	0,22	6,14	1	6,8
038003P809CPTU849	215678	4975293	0,22	6,14	1	1,8
038003P813CPTU854	218037	4976121	0,21	6,14	3	9,9
038003P814CPTU855	218054	4976157	0,21	6,14	3	9,3
038003P815CPTU856	216028	4977712	0,20	6,14	3	2,3
038003P816CPTU857	215951	4977683	0,20	6,14	3	2,8
038003P823CPTU865	214588	4976191	0,22	6,14	1	10,9
038003P824CPTU866	214554	4976163	0,22	6,14	1	9,9
038003P828CPTU870	218171	4975280	0,21	6,14	3	13,9
038003P829CPTU871	212077	4982347	0,21	6,14	1	2,2
038003P830CPTU872	212078	4982382	0,21	6,14	1	1,4
038003P831CPTU873	206727	4983718	0,18	6,14	1	6,4
038003P832CPTU875	214202	4971466	0,21	6,14	1	1,8
038003P840CPTU883	210965	4978586	0,21	6,14	3	3,1
038003P841CPTU885	211669	4979859	0,21	6,14	1	2,5
038003P842CPTU886	211678	4979799	0,21	6,14	1	4,5
038003P843CPTU888	210837	4982000	0,21	6,14	1	5,8
038003P844CPTU889	210765	4981989	0,21	6,14	1	6
038003P846CPTU892	214227	4983381	0,21	6,14	3	3,9
038003P847CPTU894	214217	4983352	0,21	6,14	3	5,6
038003P848CPTU896	216510	4982578	0,20	6,14	1	3,8
038003P849CPTU898	216487	4982600	0,20	6,14	1	12,8
038003P852CPTU902	205440	4982788	0,18	6,14	1	9,1
038003P853CPTU904	208202	4980164	0,20	6,14	1	10,4
038003P854CPTU906	215731	4981341	0,21	6,14	1	0,3
038003P857CPTU910	214351	4975096	0,23	6,14	1	12,4

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

038003P858CPTU912	212153	4974139	0,21	6,14	1	3,4
038003P861CPTU918	218852	4974557	0,21	6,14	3	10,4
038003P862CPTU920	208458	4978061	0,21	6,14	1	2,8
038003P867CPTU928	218754	4974478	0,22	6,14	3	5,6
038003P868CPTU930	218776	4974493	0,22	6,14	3	7,5
038003P869CPTU931	216052	4977892	0,20	6,14	1	7,7
038003P870CPTU932	216947	4976407	0,22	6,14	1	1,4
038003P871CPTU934	217286	4976434	0,22	6,14	3	3,4
038003P872CPTU936	217219	4983349	0,21	6,14	1	4,1
038003P873CPTU938	217535	4982639	0,21	6,14	1	1,7
038003P874CPTU940	217510	4982612	0,21	6,14	1	2,5
038003P875CPTU941	215576	4974973	0,23	6,14	3	0,3
038003P876CPTU943	215090	4980845	0,20	6,14	1	4,3
038003P877SCPT945	215084	4980824	0,20	6,14	1	3,7
038003P878CPTU946	212526	4976334	0,21	6,14	1	11
038003P879CPTU948	212502	4976322	0,21	6,14	1	12,4
038003P882CPTU951	217464	4975717	0,22	6,14	3	0,5
038003P883CPTU952	217339	4975696	0,22	6,14	3	0,8
038003P884CPTU953	217386	4975655	0,22	6,14	3	0,5
038003P885CPTU954	217584	4975640	0,22	6,14	3	0,3
038003P899CPTU968	207071	4983756	0,18	6,14	1	5,6
038003P900CPTU970	207101	4983759	0,18	6,14	1	10,4
038003P901CPTU971	219168	4976892	0,21	6,14	3	5,8
038003P902CPTU972	219192	4976894	0,21	6,14	1	23,8
038003P903CPTU973	219351	4976886	0,21	6,14	1	32,4
038003P904CPTU975	219090	4976456	0,21	6,14	3	4,7
038003P905CPTU976	219227	4976362	0,21	6,14	1	23
038003P906CPTU977	218909	4976112	0,21	6,14	3	7,5
038003P907CPTU978	218919	4976098	0,21	6,14	1	22,6
038003P908CPTU979	219061	4976025	0,21	6,14	1	23,4
038003P909CPTU980	218805	4975979	0,21	6,14	3	7,9
038003P910CPTU981	218820	4975969	0,21	6,14	1	24
038003P912CPTU984	215854	4975494	0,22	6,14	1	5,7
038003P913CPTU986	209022	4983387	0,18	6,14	1	8
038003P914CPTU988	207941	4983249	0,18	6,14	1	1,9
038003P915CPTU990	215486	4976555	0,22	6,14	1	4,4
038003P916CPTU992	219380	4974525	0,21	6,14	3	12,2
038003P917CPTU994	215790	4979085	0,20	6,14	1	5,9
038003P918CPTU996	215693	4979096	0,20	6,14	1	11,8

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

038003P919CPTU997	214910	4976344	0,21	6,14	1	9,5
038003P920CPTU999	214879	4976366	0,21	6,14	1	7,5
038003P921CPTU1000	212275	4978331	0,21	6,14	1	15,6
038003P922CPTU1001	212295	4978314	0,21	6,14	1	9,7
038003P928CPTU1007	212328	4979366	0,21	6,14	1	1,3
038003P929CPTU1008	212357	4979375	0,21	6,14	1	3,1
038003P930CPTU1010	217838	4976024	0,22	6,14	3	5,8
038003P931CPTU1011	217434	4976080	0,22	6,14	3	3,4
038003P932CPTU1012	216820	4976760	0,21	6,14	1	4
038003P933CPTU1013	216900	4976911	0,21	6,14	1	1,3
038003P934CPTU1014	218267	4979751	0,20	6,14	1	5,1
038003P935CPTU1015	216113	4978602	0,21	6,14	1	2,4
038003P323CPTU325	211335	4975354	0,23	6,14	3	2,3

Tabella 7-8 - Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna delle prove penetrometriche CPTU. In tabella sono riportati anche i valori di Mw, PGA e soggiacenza di falda utilizzati per il calcolo di I_L per ciascuna delle verticali analizzate.

8 Elaborati cartografici

Le analisi e gli approfondimenti eseguiti nell'ambito di questo studio hanno fornito gli elementi necessari alla redazione di nuovi elaborati cartografici per il terzo livello di microzonazione sismica del Comune di Bondeno. Le nuove conoscenze geologiche acquisite, l'applicazione dei più recenti standard di rappresentazione ed archiviazione informatica e la vigente normativa regionale in materia di microzonazione sismica (D.G.R. n. 476/2021 e D.G.R. n. 564/2021), hanno imposto una sostanziale revisione e l'aggiornamento degli elaborati cartografici prodotti nei precedenti livelli di approfondimento di microzonazione sismica. Per queste ragioni allo studio sono stati allegati anche gli elaborati cartografici di primo e secondo livello aggiornati, oltre alle tavole grafiche prodotte per gli approfondimenti di terzo livello (Tabella 8-1).

Il territorio comunale è stato rappresentato nelle diverse cartografie mediante riquadri alla scala 1:10.000. Per tutti gli elaborati sono stati caratterizzati esclusivamente gli ambiti interessati dagli approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello distribuiti su due tavole.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in scala 1:10.000 e sono basati sulla Carta Tecnica Regionale, alla scala 1:5.000, fornita dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

ELABORATO	RIFERIMENTO	SCALA
Carta delle indagini	Tavola 1a - 1b	1:10.000
Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica	Tavola 2a - 2b	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3a - 3b	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica	Tavola 4a - 4b	1:10.000
Carta delle velocità delle onde di taglio	Tavola 5a - 5b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - FA_{PGA}	Tavola 6a - 6b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FH_{0.1-0.5s}$	Tavola 7a - 7b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FH_{0.5-1.0s}$	Tavola 8a - 8b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FH_{0.5-1.5s}$	Tavola 9a - 9b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FA_{0.1-0.5s}$	Tavola 10a - 10b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FA_{0.4-0.8s}$	Tavola 11a - 11b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FA_{0.7-1.1s}$	Tavola 12a - 12b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $FA_{0.5-1.5s}$	Tavola 13a - 13b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $H_{SM0.1-0.5s}$	Tavola 14a - 14b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $H_{0.4-0.8s}$	Tavola 15a - 15b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $H_{0.7-1.1s}$	Tavola 16a - 16b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (Livello 3) - $H_{0.5-1.5s}$	Tavola 17a - 17b	1:10.000

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

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

La carta delle indagini consente di visualizzare l'ubicazione delle prospezioni geologiche e geofisiche utilizzate per lo studio di microzonazione sismica e comprende, pertanto, sia quelle di repertorio (1.049) che quelle realizzate per l'attuale approfondimento di terzo livello (27). Come richiesto dagli Standard MS 4.2 (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2020) sono inoltre rappresentate 14 indagini virtuali, che sintetizzano la stratigrafia "teorica" dei primi trenta metri di sottosuolo delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica individuate nell'area di studio.

In cartografia le indagini sono raffigurate mediante simboli definiti dagli Standard MS 4.2.

Attraverso l'utilizzo del metodo di rappresentazione proposto all'Appendice 2 dei suddetti standard, ad ogni sito d'indagine (punto viola in carta) sono associati i simboli grafici delle diverse tipologie di prove in esso realizzate (es. prova penetrometrica statica con piezocono, sondaggio a distruzione ecc.).

Il numero presente a fianco di ogni simbolo identifica il quantitativo di prove di un determinato tipo realizzate nel sito. Utilizzando il metodo appena citato, il posizionamento dei simboli in cartografia avviene

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

in maniera automatica e non modificabile. Ciò implica che per un sito ubicato in prossimità del limite amministrativo, il contrassegno della prova possa cadere anche al di fuori del territorio comunale. Si precisa inoltre che il rispetto delle procedure indicate negli standard non consente di differenziare graficamente le prove pregresse da quelle realizzate per gli approfondimenti di terzo livello.

Per ulteriori dettagli in merito a provenienza, tipologia e qualità delle indagini riportate in carta, si rimanda al capitolo 4.

8.2 Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica (Tavola 2a - 2b)

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

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

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

8.2.1 Elementi geologici ed idrogeologici

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

Gli standard di rappresentazione e archiviazione informatica prevedono che i pozzi ed i sondaggi vengano tematizzati in colore verde nel caso in cui la loro profondità raggiunga il substrato geologico, mentre in colore rosso nel caso contrario. Nello specifico l'unica perforazione che intercetta il substrato è rappresentata da un pozzo per idrocarburi realizzato a nord del centro abitato di Gavello (tavola 2a). In relazione agli altri tematismi previsti per la carta geologico tecnica si precisa che, vista la scarsità di dati geognostici sul sottosuolo profondo, non è stato possibile ricostruire in pianta le isobate relative all'andamento della superficie considerata come substrato sismico in questo studio. Allo stesso modo gli

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

esigui dati freaticometrici disponibili non sono stati riportati in carta in quanto disomogenei e di dubbia qualità, e quindi ritenuti non utili, se non addirittura forvianti, ai fini della ricostruzione dell'andamento della superficie piezometrica.

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

Le cinque sezioni, tutte superficiali, (tracce A-A', B-B', C-C', D-D', E-E' – Tavola 2a - 2b) mostrano i rapporti geometrici dei corpi sedimentari costituenti la porzione sommitale dei terreni di copertura, appartenenti all'intervallo stratigrafico considerato per la definizione delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS). Tali sezioni, sono state ottenute mediante correlazione di decine di indagini penetrometriche e sondaggi a carotaggio continuo, contenuti nella banca dati della Microzonazione Sismica (v. Allegato 1).

8.2.2 Terreni di copertura

Nella porzione affiorante della successione sedimentaria quaternaria sono state distinte tre unità, ciascuna associata ad una classe prevista dagli standard di microzonazione. Oltre a queste è stata individuata una fascia contenente abbondanti riempimenti artificiali derivanti dallo scavo del Cavo Napoleonico e da altri grossi scavi. Quest'area è stata classificata come zona con "terreni contenenti resti di attività antropica (RI)". Le classi in seguito descritte sono state individuate sulla base del *Unified Soil Classification System* (U.S.C.S. modificato, ASTM, 1985).

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

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

L'unità è formata da limi sabbiosi e sabbie fini poco addensate e con granulometria poco assortita, comprendenti una frazione limosa anche molto significativa. Questi sedimenti registrano il

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

riempimento di canali fluviali di Po, i quali hanno una larghezza anche di circa 1500 m in corrispondenza di meandri e spessori massimi di circa 16 m.

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

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

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

Questi sedimenti costituiscono generalmente corpi di argine naturale, di ventaglio da rotta, di riempimento di canali fluviali di fiumi appenninici come il Panaro e il Secchia e di canali distributori minori che si originano dai principali corpi di paleoalveo affioranti.

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

Consistono di argille, argille limose, argille limose organiche, diffusamente bioturbate, a plasticità generalmente medio-bassa, deposti in ambienti di piana inondabile e depressione interalvea. Queste aree erano soggette a consistenti apporti sedimentari fini, durante episodi di piena e tracimazione fluviale. Quando i sedimenti di questa unità fiancheggiano direttamente corpi di paleoalveo, possono inglobare subordinate intercalazioni di limi e limi sabbiosi, frequentemente amalgamati dalla bioturbazione. Questi sedimenti formano la maggior parte dell'area comunale. All'interno del territorio comunale questi sedimenti sono interamente di provenienza appenninica.

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

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

In questa tavola, a scala 1:10.000, sono riportati i punti di misura di microtremore a stazione singola utilizzati per lo studio di microzonazione con i rispettivi valori di frequenza di risonanza fondamentale. Tali punti sono tematizzati con colori diversi in relazione al valore di ampiezza massima del picco di H/V. Ampiezze superiori a 3 sono restituite in colore rosso, mentre in arancio e giallo sono rappresentati valori di ampiezza compresi tra 2 e 3; ampiezze inferiori a 2 sono invece indicate in verde.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

I differenti simboli grafici, cerchi e rombi, indicano rispettivamente le indagini realizzate a supporto del presente studio (Tabella 4-2) e quelle di repertorio acquisite da singoli professionisti o recuperate dagli archivi comunali (Tabella 4-1).

Sulla base dei dati ottenuti dalle misure di microtremore sismico non è stato possibile suddividere il territorio indagato secondo le diverse classi di frequenza proposte dalle D.G.R. n. 476/2021 e D.G.R. n. 564/2021. Le misure di microtremore mostrano un picco di frequenza prevalente compreso tra 1,0 - 0,5 Hz.

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

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

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

L'elaborato, realizzato a scala 1:10.000, mostra la suddivisione del territorio comunale in zone stabili suscettibili di amplificazioni locali e zone di attenzione per instabilità. Sono invece completamente assenti zone classificabili come stabili. Nella tavola sono riportate anche le ubicazioni dei punti di misura di rumore ambientale - *noise* (si veda la Tavola 3, paragrafo 8.3), le assi di paleoalveo come forme di superficie e sepolte e tutti i siti in cui sono stati osservati fenomeni di liquefazione nel corso degli eventi sismici del 2012. Le diverse microzone sono state definite sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche dei primi trenta metri di sottosuolo (Figura 8-1) ed ad esse sono stati associati codici identificativi progressivi e colorazioni distinte, come previsto dagli standard di rappresentazione già citati.

Le dodici zone cartografate come instabili presentano tutte problematiche legate a potenziali fenomeni di liquefazione e sono quindi state rappresentate in carta mediante apposito retino e relativo prefisso identificativo 3050. Sono state inoltre identificate due microzone suscettibili di sola amplificazione locale a cui sono stati attribuiti i codici 2013 e 2014. Di seguito sono riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici delle diverse Microzone (Figura 8-1) e le relative descrizioni sulla base delle quali sono state definite le classi zonali. Le descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

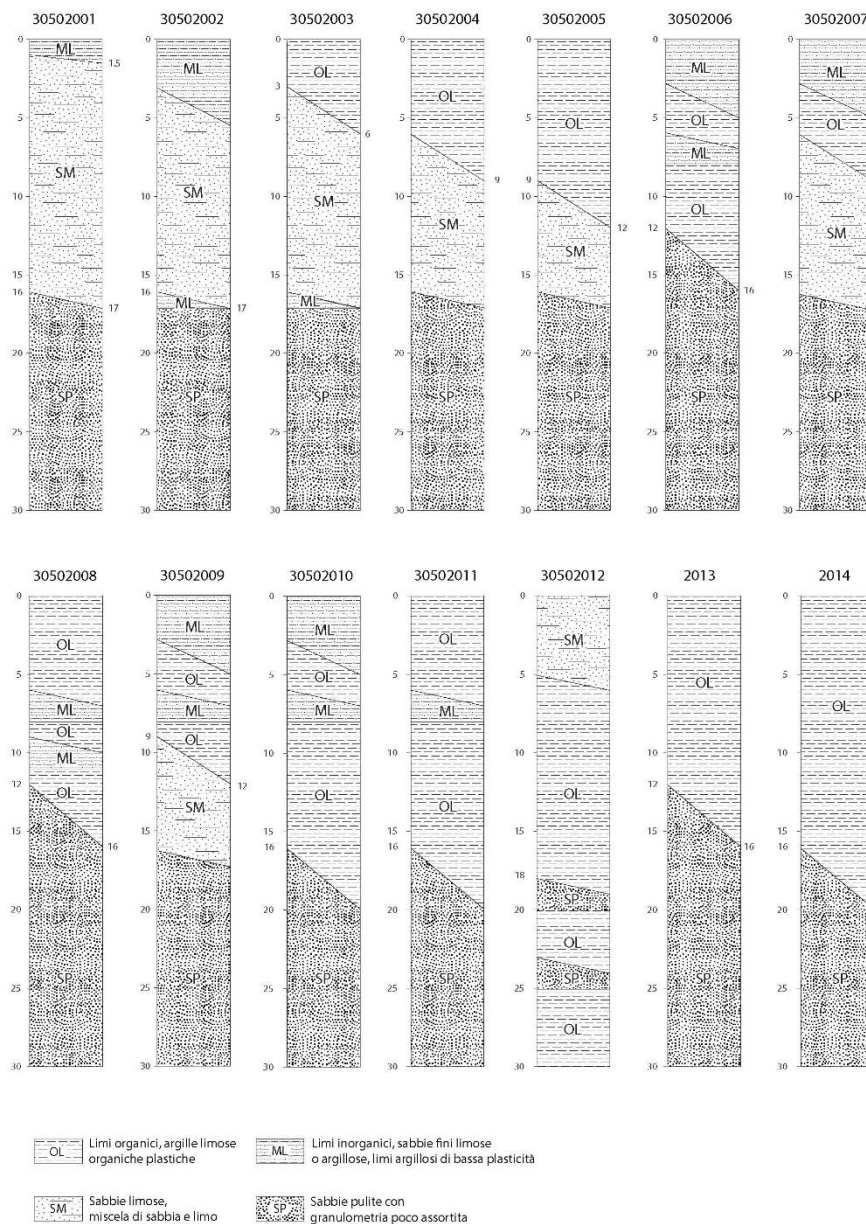


Figura 8-1 - Colonne stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti che costituiscono i primi 30 metri nelle diverse zone MOPS individuate nel territorio comunale.

Zona 30502001

Sabbie e sabbie fini limose poco addensate e liquefacibili dello spessore massimo di 16 m, poggiano su sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

Zona 30502002

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 6 m, poggiano su sabbie e sabbie fini limose, poco addensate e liquefacibili, dello spessore massimo di 14 m. Seguono sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite. I due intervalli sabbiosi possono essere localmente separati da un'intercalazione di argille limose.

Zona 30502003

Argille limose organiche plastiche dello spessore massimo di 6 m, poggiano su sabbie e sabbie fini limose, poco addensate e liquefacibili, dello spessore massimo di 14 m. Seguono sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite. I due intervalli sabbiosi possono essere localmente separati da un'intercalazione di argille limose.

Zona 30502004

Argille limose organiche plastiche dello spessore massimo di 9 m, poggiano su sabbie e sabbie fini limose, poco addensate e liquefacibili, dello spessore massimo di 11 m. Seguono sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 30502005

Argille limose organiche più o meno plastiche dello spessore massimo di 12 m, poggiano su sabbie e sabbie fini limose, poco addensate e liquefacibili, dello spessore massimo di 8 m. Seguono sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 30502006

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 5 m, poggiano su argille limose organiche più o meno plastiche, dello spessore di circa 10 m, con intercalazioni limoso sabbiose. Seguono sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 30502007

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 5 m, poggiano su argille limose organiche plastiche. Seguono sabbie e sabbie fini limose poco addensate e liquefacibili dello spessore di circa 10 m. Alla base sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

Zona 30502008

Argille limose organiche più o meno plastiche dello spessore massimo di 16 m, con frequenti intercalazioni limoso sabbiose liquefacibili, poggiano su sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 30502009

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 5 m, poggiano su alternanze di argille limose organiche plastiche e limi inorganici e sabbie fini limose. Seguono sabbie e sabbie fini limose poco addensate e liquefacibili. Alla base sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 30502010

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 5 m, poggiano su argille limose organiche più o meno plastiche, dello spessore di circa 15 m, con intercalazioni limoso sabbiose. Alla base sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 30502011

Argille limose organiche più o meno plastiche dello spessore massimo di 20 m, con intercalazioni limoso sabbiose liquefacibili, poggiano su sabbie medio-grossolane addensate prevalentemente pulite.

Zona 30502012

Sabbie e sabbie fini limose poco addensate e liquefacibili dello spessore massimo di 6 m, poggiano su argille limose e limi organici più o meno plastici con intercalazioni di sabbie addensate medio-grossolane, prevalentemente pulite, organizzate in corpi lenticolari.

Zona 2013

Argille limose organiche più o meno plastiche con spessori di 12-16 m, poggiano su sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 2014

Argille limose organiche più o meno plastiche con spessori complessivi di 16-20 m poggiano su sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

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

La carta della velocità delle onde volumetriche di taglio mostra, a scala 1:10.000, i 137 punti di misura di V_s utilizzati per lo studio di microzonazione sismica ed i rispettivi valori di V_{s30} .

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

MISURE DIRETTE		MISURE INDIRETTE	
SCPT	55	MASW	70
DH	2	ESAC-SPAC	1
CH	2	REMI	1
SDMT	6		

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

La distribuzione e l'andamento dei valori di V_{s30} , in genere non inferiori a 170 m/s e mediamente superiori a 180 m/s, appare coerente con quelli di terreni analoghi che formano il primo sottosuolo di gran parte della bassa pianura alluvionale emiliana.

8.6 Carte di microzonazione sismica (Tavole da 6a - 6b a 17a - 17b)

Le carte di microzonazione sismica di terzo livello rappresentano gli elaborati finali di sintesi dello studio. Le cartografie sono state realizzate in accordo con quanto previsto dalle D.G.R. n. 476/2021 e D.G.R. n. 564/2021, adottando le simbologie previste dagli standard di rappresentazione ed archiviazione informatica (versione 4.2) utilizzati a livello nazionale per la microzonazione sismica.

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

- PGA (Tavola 6) - fattori di amplificazione espressi come rapporto tra le massime ampiezze

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 BONDENO

dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0);

- $FH_{0,1-0,5}$ (Tavola 7) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (S_i/S_{i0}) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;
- $FH_{0,5-1,0}$ (Tavola 8) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (S_i/S_{i0}) per periodi compresi tra 0,5 e 1 secondi;
- $FH_{0,5-1,5}$ (Tavola 9) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (S_i/S_{i0}) per periodi compresi tra 0,5 e 1,5 secondi;
- $FA_{0,1-0,5}$ (Tavola 10) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA_0) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;
- $FA_{0,4-0,8}$ (Tavola 11) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA_0) per periodi compresi tra 0,4 e 0,8 secondi;
- $FA_{0,7-1,1}$ (Tavola 12) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA_0) per periodi compresi tra 0,7 e 1,1 secondi;
- $FA_{0,5-1,5}$ (Tavola 13) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA_0) per periodi compresi tra 0,5 e 1,5 secondi.

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

I fattori di amplificazione e i valori di H_{SM} utilizzati per la redazione delle carte (Tabella 8-3, Tabella 8-4) sono stati derivati da analisi di risposta sismica locale (paragrafo 7.1.1). I valori ottenuti sono stati suddivisi sulla base delle indicazioni fornite della Regione Emilia Romagna.

Le analisi di risposta sismica locale sono state eseguite tenendo conto delle diversità litotecniche delle microzone individuate e dell'assetto tettonico del territorio. I coefficienti ottenuti dalle 8 modellazioni numeriche eseguite (Tabella 8-3, Tabella 8-4, Tabella 8-5, Tabella 8-6, Tabella 8-7, Tabella 8-8, Tabella 8-9, Tabella 8-10, Tabella 8-11, Tabella 8-12, Tabella 8-13, Tabella 8-14, Tabella 8-15 e Tabella 8-16) sono stati

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

confrontati con quelli proposti dagli abachi regionali (v. paragrafo 7.1.2). La sostanziale coerenza e compatibilità riscontrata ha fornito una validazione dei modelli utilizzati per la risposta sismica locale e ha permesso di caratterizzare le differenti aree con i rispettivi fattori di amplificazione e valori di HSM, calcolati per diversi periodi di vibrazione.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,6	2,0	2,6	2,5	1,9	2,4	2,6	2,5	0,41	0,27	0,16	0,16

Tabella 8-3 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della MOPS 30502001 per gli ambiti di Settepolesini, San Biagio e Salvatonica, della MOPS 30502003 per Salvatonica e della MOPS 30502004 per Settepolesini e San Biagio.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,5	1,8	2,3	2,3	1,7	2,2	2,4	2,3	0,44	0,29	0,18	0,17

Tabella 8-4 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle MOPS 30502003 e 30502004 per l'ambito di Scortichino.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,6	1,9	2,4	2,4	1,8	2,2	2,4	2,4	0,41	0,27	0,16	0,16

Tabella 8-5 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle MOPS 30502004 e 30502007 per l'ambito di Gavello.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,6	1,9	2,4	2,4	1,8	2,3	2,4	2,4	0,40	0,26	0,16	0,15

Tabella 8-6 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della MOPS 30502001 per gli ambiti di Stellata-Zerbinate, della MOPS 30502002 per la porzione nord dell'ambito di Bondeno, per gli ambiti di Stellata-Zerbinate e Burana, della MOPS 30502003 per Burana, della MOPS 30502004 per Bondeno nord, Ponti Spagna e Stellata-Zerbinate e della MOPS 30502009 per la porzione nord dell'ambito di Bondeno.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,5	1,8	2,3	2,4	1,7	2,2	2,4	2,3	0,43	0,28	0,18	0,17

Tabella 8-7 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle MOPS 30502001, 30502002, 30502003, 30502004 e 30502007 per la porzione sud dell'ambito di Bondeno.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,4	1,7	2,0	2,1	1,5	2,0	2,0	2,0	0,35	0,24	0,14	0,13

Tabella 8-8 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle MOPS 30502002, 30502003, 30502004 e 30502007 per l'ambito di Pilastri.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,7	2,1	2,8	2,6	1,7	2,5	2,6	2,5	0,43	0,30	0,17	0,17

Tabella 8-9 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della MOPS 30502008 per l'ambito di San Biagio.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,6	2,0	2,5	2,5	1,8	2,4	2,5	2,5	0,47	0,32	0,19	0,18

Tabella 8-10 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della MOPS 30502005 per l'ambito di Scortichino, della MOPS 30502006 per gli ambiti di Scortichino e Santa Bianca, della MOPS 30502009 per Scortichino e della MOPS 2013 per Scortichino e Santa Bianca.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,7	2,1	2,5	2,5	1,9	2,5	2,6	2,5	0,44	0,29	0,17	0,17

Tabella 8-11 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle MOPS 30502006 e 2013 per l'ambito di Gavello.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,7	2,1	2,5	2,5	1,9	2,5	2,6	2,5	0,43	0,29	0,17	0,16

Tabella 8-12 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della MOPS 30502005 per gli ambiti di Stellata-Zerbinat e per la porzione nord dell'ambito di Bondeno, della MOPS 30502006 per gli ambiti di Stellata-Zerbinat, Burana e Bondeno nord, della MOPS 30502008 per Burana e Bondeno nord, della MOPS 30502009 per Bondeno nord, della MOPS 30502011 per Ponti Spagna, della MOPS 2013 per Bondeno nord, Burana, Stellata-Zerbinat e Ponti Spagna e della MOPS 2014 per Ponti Spagna e Bondeno nord.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,6	2,0	2,5	2,5	1,8	2,4	2,5	2,5	0,46	0,31	0,19	0,18

Tabella 8-13 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle MOPS 30502005, 30502008, 30502009, 30502010, 2013 e 2014 per la porzione sud dell'ambito di Bondeno.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,4	1,8	2,1	2,2	1,6	2,2	2,1	2,2	0,37	0,26	0,14	0,14

Tabella 8-14 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle MOPS 30502006, 30502008 e 2013 per l'ambito di Pilastrì.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,4	1,8	2,3	2,3	1,6	2,1	2,4	2,3	0,45	0,29	0,18	0,17

Tabella 8-15 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione delle MOPS 30502006 e 2013 per l'ambito di Casumaro.

FA _{PGA}	FH _(0.1-0.5)	FH _(0.5-1.0)	FH _(0.5-1.5)	FA _(0.1-0.5)	FA _(0.4-0.8)	FA _(0.7-1.1)	FA _(0.5-1.5)	H _{SM(0.1-0.5)}	H _(0.4-0.8)	H _(0.7-1.1)	H _(0.5-1.5)
1,4	1,8	2,5	2,5	1,6	2,3	2,6	2,4	0,44	0,31	0,20	0,19

Tabella 8-16 - Fattori di amplificazione utilizzati per la caratterizzazione della MOPS 30502012 per l'ambito di Casumaro.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

Nelle cartografie elencate sono riportate sia le zone suscettibili di amplificazioni locali sia quelle suscettibili di instabilità. Queste ultime vengono distinte per mezzo di soprassegni cartografici che indicano sia la tipologia di instabilità cosismica attesa, ossia fenomeni di liquefazione, sia il grado di rischio, identificando zone di suscettibilità per le liquefazioni (ZS_{LQ}) e zone di rispetto (ZR_{LQ}). Le zone di rispetto per le liquefazioni sono caratterizzate da rischio molto elevato e devono essere assoggettate a specifici approfondimenti. Nelle tavole cartografiche sono rappresentati anche i valori puntuali delle stime del potenziale di liquefazione eseguite sulle singole verticali d'indagine. Considerata la buona disponibilità di prove penetrometriche elettriche ed il maggior grado di affidabilità degli indici da esse ottenute si è ritenuto di non riportare in carta indici derivati da verifiche effettuate su prove penetrometriche meccaniche. I valori di I_L ottenuti sono espressi mediante etichette numeriche associate a simboli quadrati con colorazioni distinte a seconda del grado di rischio. I simboli bianchi indicano rischio di liquefazione basso ($0 < I_L \leq 2$), quelli gialli moderato ($2 < I_L \leq 5$) ed i rossi rischio elevato ($5 < I_L \leq 15$).

Infine troviamo rappresentati in carta i valori numerici delle amplificazioni per effetto stratigrafico agenti su ogni singola porzione di territorio mediante etichette di colore azzurro, così come da Tabella 8-3, Tabella 8-4, Tabella 8-5, Tabella 8-6, Tabella 8-7, Tabella 8-8, Tabella 8-9, Tabella 8-10, Tabella 8-11, Tabella 8-12, Tabella 8-13, Tabella 8-14, Tabella 8-15 e Tabella 8-16.

9 Commenti finali e criticità

Gli approfondimenti di terzo livelli eseguiti nell'ambito dello studio hanno permesso di determinare l'amplificazione sismica attesa e quantificare la pericolosità da liquefazione nelle aree caratterizzate dalla presenza di condizioni predisponenti.

L'amplificazione attesa è stata stimata mediante analisi numeriche di risposta sismica locale, basate su dati stratigrafici e velocità delle onde di taglio (V_s) estrapolate da misure eseguite in pozzo sino ad elevate profondità.

Questo ha consentito di attribuire ad ogni porzione di territorio comunale indagata fattori di amplificazione per prefissati periodi di vibrazione, sia in termini di accelerazione sia di pseudovelocità (paragrafo 8.6). Le modellazioni e le analisi di risposta sismica locale eseguite per la microzonazione (paragrafo 7.1.1) possono fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018), ma non possono in alcun modo sostituirle. Specifiche analisi di risposta

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

sismica locale devono infatti essere eseguite tenendo conto delle caratteristiche geologico-geotecniche del sito ed in funzione della tipologia del progetto da realizzare, in accordo con le suddette Norme Tecniche. Per la determinazione della pericolosità da liquefazione sono state eseguite numerose verifiche di suscettibilità mediante metodi semplificati. Sulla base dei risultati ottenuti il metodo di Boulanger e Idriss (2014) è stato considerato affidabile e maggiormente cautelativo rispetto ad altri di letteratura, e dunque utilizzato per il calcolo degli indici di liquefazione I_L (paragrafo 7.2.1).

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

9.1 Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale

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

Nella maggior parte del territorio, i depositi pleistocenici singlaciali sono formati da estesi corpi di sabbie grossolane del Po (Figura 9-1), con Vs anche superiori ai 300 m/s.

Nella porzione più meridionale del territorio comunale (Casumaro) questi depositi sono costituiti da alternanze di sabbie di provenienza appenninica e grossi volumi di limi, con Vs comprese tra 200 e 250 m/s. Secondo i criteri stratigrafici adottati dalla cartografia nazionale del Progetto CARG, i sedimenti descritti del Pleistocene terminale sono inquadrati nella parte superiore del Subsistema di Villa Verucchio (AES₇). Nelle aree più meridionali, la parte iniziale dei sedimenti post-glaciali è ancora costituita da limi di provenienza appenninica, con subordinate intercalazioni di corpi di sabbie di canale fluviale. Le velocità sismiche tipiche di questa unità superano di poco i 200 m/s con bruschi incrementi in corrispondenza dei livelli di paleosuolo più evoluti. Nella restante e più ampia parte del territorio comunale, questo intervallo stratigrafico è costituito da corpi sabbiosi di meandro limitati lateralmente da estesi corpi prevalentemente coesivi di piana inondabile (Figura 9-1). I sedimenti post-glaciali appena descritti costituiscono la porzione inferiore del Subsistema di Ravenna (AES₈).

I sedimenti più recenti, depositi negli ultimi 5.000 anni, sono infine dominati da fanghi argillosi di origine sia appenninica che padana con orizzonti organici depositi in ambienti di piana inondabile e palude

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

continentale. Questi depositi coesivi presentano proprietà geotecniche mediocri e sono caratterizzati dai più bassi valori di Vs con minimi attorno ai 120 m/s.

Le ampie aree interfluviali furono attraversate da varie generazioni di canali di Po, Secchia, Panaro e marginalmente del Reno, che hanno deposto corpi allungati sabbioso-limosi. Corpi di barra di meandro sono stati depositi dal Po fino in età basso medievale. I corpi di riempimento di canale fluviale sono talvolta fiancheggiati da argini naturali limoso-sabbiosi. Particolarmente evidente è il corpo di paleoalveo di Po che si sviluppa tra Stellata e Ponte Rodoni (parte orientale della Figura 9-1).

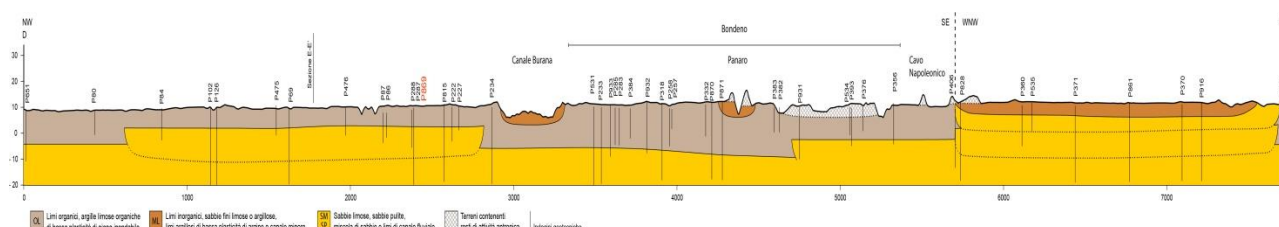


Figura 9-1 - Sezione geologica superficiale D-D' (v. Allegato 1) in cui sono evidenziati i rapporti geometrici dei corpi sedimentari costituenti la porzione sommitale dei terreni di copertura.

9.2 Microzonazione sismica e criticità

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

- La maggior estensione del territorio comunale corrisponde ad un vasto plateau strutturale, lateralmente esteso che si raccorda verso est con il più pronunciato alto di Casaglia. In quest'area il substrato sismico è sepolto ad una profondità variabile tra 350 e 450 m con lievi gradienti di variazione laterale. Questa porzione di territorio, che comprende i principali centri abitati mostra fattori di amplificazione del moto sismico piuttosto omogenei arealmente, con le massime amplificazioni nei periodi di vibrazione medio-alti (0.5-1.5 s) (paragrafi 7.1.1 e 8.6). La complessità dei primi 30 metri di sottosuolo genera variazioni locali minori dei fattori di amplificazione (es. Tavola 11b).
- Nell'area meridionale di Casumaro ed in quella nord occidentale di Pilastri, strutturalmente più depresse e interessate da maggior subsidenza, il substrato sismico è maggiormente sepolto a profondità comprese tra 600 e 650 metri. Queste parti mostrano sempre i minori fattori di

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

amplificazione del moto sismico. Anche queste aree risentono della complessità stratigrafica delle prime decine di metri di sottosuolo.

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

La rimodulazione dei fattori di amplificazione è stata dettata dai risultati delle risposte sismiche locali che hanno utilizzato i nuovi segnali di input introdotti dalle recenti norme regionali (D.G.R. 476/2021 e D.G.R. 564/2021). Questi profondi cambiamenti rendono alquanto difficoltoso un confronto tra i vecchi e nuovi elaborati di microzonazione in termini di amplificazione del moto sismico.

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

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

La distribuzione areale degli indici di liquefazione mostra come le fasce a pericolosità molto elevata ($I_L > 15$) siano collocate in corrispondenza dei corpi di meandro del Po affioranti presso Settepolesini, Salvatonica e Stellata, in aree frequentemente al di fuori degli ambiti di microzonazione.

Zone a pericolosità elevata ($5 < I_L \leq 15$) corrispondono ai corpi allungati di riempimento di canale fluviale di Po sub-affioranti (es. Bondeno e Ponte Rodoni) e corpi a meandro sepolti a debole profondità (es. Burana, Scortichino). La presenza di corpi liquefacibili trova conferma negli effetti di liquefazione osservati nel 2012 in aree agricole tra Burana, Scortichino e Santa Bianca. La scarsa presenza di liquefazioni nella parte nord orientale del territorio è stata influenzata dalla maggior distanza dall'epicentro del 20 maggio 2012. Anche le fasce più ristrette dei depositi affioranti di alveo dei fiumi appennini possono presentare elevati indici di liquefazione (es. Panaro).

I gradienti topografici dei dossi fluviali contribuiscono ad aggravare i rischi connessi alla liquefazione, favorendo l'insorgere di movimenti gravitativi di espansione laterale e franamento cosismico, come ampiamente verificato nel 2012 negli abitati più a sud di San Carlo e Mirabello.

Rischi di liquefazione da molto bassi a nulli ($I_L < 2$) caratterizzando le estese aree prevalentemente rurali, presenti, ad esempio, a sud-ovest di Bondeno. Queste aree non presentano significativi corpi di sabbie nei

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

primi 20 m di sottosuolo, in quanto essenzialmente formate da sedimenti argillosi coesivi, spesso organici, deposti in condizione di palude e depressione interalvea.

Gli indici ottenuti dalle nuove analisi di liquefazione hanno permesso di aumentare notevolmente le conoscenze relative alla distribuzione della pericolosità da liquefazione nell'area di studio.

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

Gli approfondimenti di terzo livello hanno, infine, permesso la ridefinizione del bedrock sismico sulla base dei risultati delle misure di microtremore e delle velocità delle onde di taglio (V_s) acquisite in foro sino ad elevate profondità (Di Capua e Tarabusi 2013, Minarelli *et. al.* 2016). Tali misure, correlate con i dati stratigrafici e sismotettonici regionali hanno permesso di porre il maggior contrasto di impedenza in corrispondenza del tetto delle torbiditi del Pleistocene inferiore nella maggior parte dell'area studiata. Questa superficie, che identifica il bedrock sismico delle analisi numeriche, si trova sepolta a profondità assai variabili, con quote comprese tra circa 650 e 350 metri. Tale condizione è stata determinata dalla deformazione tettonica che dal Pliocene ha condizionato l'evoluzione di questo settore della Pianura Padana.

Nelle analisi numeriche eseguite per la definizione dell'amplificazione del moto sismico è stata inoltre considerata una seconda superficie di discordanza stratigrafica, meno profonda e associata ad un contrasto di impedenza minore ma comunque significativo. Questa superficie marca il tetto dell'unità del Quaternario Marino che, a causa dei movimenti tettonici sinsedimentari, si trova sepolto a profondità variabili, comprese tra i 200 m e i 350 metri nelle aree maggiormente subsidenti. Vista l'età geologica e la profondità di seppellimento, per queste unità sono state considerate rigidezze e velocità delle onde di taglio prossime al valore limite di soglia del substrato rigido.

9.3 Indicazioni per la riduzione del rischio sismico

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

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

In base alle principali criticità emerse dagli approfondimenti di terzo livello sul Comune di Bondeno, sono di seguito indicate le analisi e le indagini ritenute necessarie per la realizzazione di studi geologici a supporto dei diversi livelli di pianificazione territoriale (POC/PUA) ed in fase esecutiva di opere e progetti.

Le stime del potenziale di liquefazione effettuate su numerose indagini penetrometriche a piezocono, hanno evidenziato la presenza di livelli sabbioso-limosi saturi e liquefacibili, lungo le direttrici dei paleoalvei del Po, del Secchia, del Panaro e, al limite meridionale del territorio comunale, del Reno.

L'evoluzione dei reticoli idrografici di questi sistemi fluviali, avvenuta nel tempo attraverso rotte, avulsioni e divagazioni, ha portato ad una distribuzione estremamente eterogenea dei litotipi alluvionali che, in superficie e nel sottosuolo, formano un complesso intreccio di corpi sabbioso-limosi.

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

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

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

Qualora le stime semplificate di suscettibilità a liquefazione indichino un rischio molto elevato dovranno essere considerati sondaggi geognostici con prelievo di campioni indisturbati dei terreni granulari, da sottoporre ad analisi granulometriche e prove cicliche di laboratorio, al fine di quantificare l'effettiva suscettibilità alla liquefazione. Queste prove dovranno essere considerate a priori qualora si rinvenissero spessori significativi di depositi liquefacibili e in caso di interventi edilizi strategici e rilevanti previsti dalla pianificazione.

Anche le più sofisticate analisi di liquefacibilità sono comunque sempre rappresentative di volumi di terreno limitati, specie in un contesto come quello di pianura in cui la variabilità laterale dei caratteri

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

stratigrafici e sedimentologici risulta particolarmente elevata. L'estendere valutazioni puntuali di suscettibilità alla liquefazione ad aree limitrofe, può risultare quindi alquanto incerto e rischioso. Dovranno perciò essere previste indagini in tipologia e numero adeguato all'estensione dell'area considerata ed alla rilevanza delle opere da realizzare.

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

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

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

Infine anche nelle aree caratterizzate dalla presenza di spessori significativi di depositi con caratteristiche geotecniche scadenti (bassi valori di C_u e alto indice plastico), concentrate in particolare nelle microzone 2013 e 2014 (Tavola 4a e Tavola 4b) dovranno essere proposte adeguate campagne di indagini geognostiche in situ e prove geotecniche di laboratorio, per la valutazione e la quantificazione di possibili cedimenti post-sismici.

10 Bibliografia

- AA.VV., (2004): *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. Deliverable D23.12 of the SEASAME project, April, [Online], <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV., (2011): *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*. Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII - n. 2.
- Affatato A., Baradello L., Petronio L., Barbagallo A., Sorgo D., Cristofano G., Lovo M., Maffione S., Pasciullo V., Caputo R., Stefani M., Abu Zeid N., (2019): *Prospezioni sismiche in ambiente urbano a supporto della pianificazione territoriale - parte profonda*. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, Vol. 60, supplemento 2, pp. s68-s74.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

- Albarello D., Castellaro S., (2011): *Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola*. In AA.VV. (2011): "Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e Criteri per la microzonazione sismica", supplemento alla rivista Ingegneria sismica, a. XXVIII, n. 2.
- 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., Lehané B. And Marchetti D., (2014): *Examination of the potential of the seismic dilatometer (SDMT) to estimate in situ stiffness decay curves in various soil types*. Soils and Rocks, Vol. 37, No. 3, 177-194. ISSN: 1980-9743. Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ABMS) and Portuguese Geotechnical Society (SPG). São Paulo, Brazil.
- ASTM, (1985): *Classification of Soils for Engineering Purposes*: Annual Book of ASTM Standards, D 2487-83, 04.08, American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 395-408.
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone, P., (1990): *Structural model of Italy - Sheet n°1*, in: Castellarin A., Coli M., Dal Piaz G.V., Sartori R., Scandone P., Vai G.B. (Eds.), Structural model of Italy. CNR, Progetto Finalizzato Geodinamica, Roma.
- Boccaletti M., Martelli L., (a cura di) (2004): *Carta Sismo-tettonica della Regione Emilia-Romagna, Scala 1:250.000 e Note Illustrative*. SELCA, Firenze.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Tanini C. and Vannucci G., (2004): *Seismotectonic Map of the Emilia-Romagna Region, 1:250000*. Regione Emilia-Romagna - CNR.
- Bordoni P., Azzara R.M., Cara F., Coglianò R., Cultrera G., Di Giulio G., Fodarella A., Milana G., Pucillo S., Riccio G., Rovelli A., Augliera P., Luzi L., Lovati S., Massa M., Pacor F., Puglia R., Ameri G., (2012): *Preliminary results from EMERSITO, a rapid response network for site-effect studies*. Ann. Geophys. 55 (4), 599–607. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-6153>.
- Boulanger R. W., Idriss I. M., (2014): *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 134 pp.
- Burrato P., Ciucci F., Valensise G., (2003): *An inventory of river anomalies in the Po Plain, northern Italy: evidence for active blind thrust faulting*, Annals of Geophys., 46 (5), 865-882.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

- Burrato P., Vannoli P., Fracassi U., Basili R., Valensise G., (2012): *Is blind faulting truly invisible? Tectonic-controlled drainage evolution in the epicentral area of the May 2012, Emilia-Romagna earthquake sequence (northern Italy)*. *Annals of Geophys.*, 55(4), 525-531, doi: 10.4401/ag-6182.
- Caputo R., Papathanasiou G., (2012): *Ground failure and liquefaction phenomena triggered by the 20 May, 2012 Emilia-Romagna (Northern Italy) earthquake: case study of Sant'Agostino - San Carlo - Mirabello zone*. *Nat. Haz. Earth System Sciences*, 12(11), 3177-3180, doi:10.5194/nhess-12-3177-2012.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 202 - San Giovanni in Persiceto*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 203 - Poggio Renatico*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 204 - Portomaggiore*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Castellaro S., (2012): *H/V: un contributo oltre Vs30*, In: *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*, a cura di Marco Mucciarelli, ARACNE editrice, 448 pp.
- Castellaro S., Mulargia F., (2011): *Seismic soil classification from a different perspective*. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13-15.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C., Amato A., (2006): *CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002*, versione 1.1. INGV-CNT, Roma. <http://csi.rm.ingv.it/>.
- Castiglioni G., Biancotti A., Bondesan M., Cortemiglia G.C., Elimi C., Favero V., Gasperi G., Marchetti G., Orombelli G., Pellegrini G. B., Tellini C., (1999): *Geomorphological map of the Po Plain, Italy, at scale of 1:250.000*. *Earth Surf. Proc. Land.*, 24, 1115-1120.
- Cerrina Feroni A., Ottria G., Martinelli P., Martelli L., Catanzariti R., (2002): *Carta geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo, 1: 250,000*. SELCA, Firenze.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, (2018): *Linee Guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazione (LQ)v. 1.0*, Roma.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, (2020): *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2*.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, (2022): *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni v. 2.0*, Roma.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

- 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.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. 476/2021: *Aggiornamento dell'"Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)" di cui alla Deliberazione della Giunta Regionale 29 aprile 2019, n. 630*.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 564/2021: *Integrazione della propria Deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'Allegato A, "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)*.
- Di Capua G., Tarabusi G., (2013): DPC-INGV S2 2012-2013 project Annex2 to D4.1 – Site-specific hazard assessment in priority areas - MIRANDOLA (MO) seismo-stratigraphic models, Online <https://sites.google.com/site/ingvdpc2014progettos2/tasks/task-4/d4-1>.
- Di Dio G., Caporale L., (1998): *Un modello fisico tridimensionale della conoide alluvionale del Fiume Reno per la gestione degli acquiferi e lo studio della subsidenza*. In: Geofluid '98 - Problemi di ingegneria: Estrazione di fluidi e subsidenza (a cura di G. Brighenti e E. Mesini), Piacenza, 3 ottobre 1998, 67-76.
- Di Dio G., Molinari F., (2000): *A study of the groundwater resources in the Ferrara Province (Po River Basin, Northern Italy)*. Proceedings of III Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems, 24-27/10/2000. Bavaria, Munich, Germany: 84-86.
- DISS Working Group (2021): *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

D.M. n. 14/2008: *Norme Tecniche per le Costruzioni*. Decreto del Ministero delle Infrastrutture del 14 gennaio 2008. Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, www.cslp.it, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.

D.M. n. 17/2018: *Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"*. Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 17 gennaio 2018. Supplemento Ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20/02/2018 – Serie generale, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato S.p.A., Roma.

Emergeo Working Group, (2012): *Technologies and new approaches used by the INGV EMERGEO Working Group for real-time data sourcing and processing during the Emilia Romagna (northern Italy) 2012 earthquake sequence*. ANNALS OF GEOPHYSICS, 55, 4, 2012; doi: 10.4401/ag-6117.

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

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

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

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

Geotema S.r.l., (2016): *Carta Geomorfologica Provincia di Ferrara*. <http://www.ferraradeltapo-unesco.it/>.

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*

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

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., Sgattoni G., Valensise G., (2018): *CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). doi: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>.

Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valensise G., (2019): *CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area, Scientific Data 6, Article number: 80 (2019)*.
doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>.

Idriss I. M., Boulanger R. W., (2008): *Soil Liquefaction during earthquakes*. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, 469 pp.

ISIDe Working Group, (INGV, 2010): *Italian Seismological Instrumental and parametric database*.
<http://iside.rm.ingv.it>.

Iwasaki T., Arakawa T., Tokida K., (1982): *Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes*. Proceedings of the Conference on Soil Dynam.

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

L.R. Emilia-Romagna n. 19 del 30 ottobre 2008: *Norme per la riduzione del rischio sismico*. Bollettino Ufficiale Regione Emilia-Romagna n. 44 del 12 marzo 2010.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

- L.R. Emilia-Romagna n. 24 del 21 dicembre 2017: *Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio*. Bollettino Ufficiale Regione Emilia-Romagna n. 340 del 21 dicembre 2017.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A., (2022): *Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.4>.
- 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., Madiati C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Bramerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V., Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C., Ricci L., (2013): *Microzonazione Sismica Dell'area Epicentrale Del Terremoto Della Pianura Emiliana Del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti 32° Convegno Nazionale Gngts, Trieste. Isbn: 978-88-902101-7-4.
- Martelli L., Romani M., (2013): *Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012* (Ordinanza del commissario delegato – Presidente della Regione Emilia-Romagna n. 70/2012), Relazione Illustrativa.
- Mascandola C., Massa M., Barani S., Lovati S., Santulin M., (2017): *Long-Period Amplification in Deep Alluvial Basins and Consequences for Site-Specific Probabilistic Seismic-Hazard Analysis: An Example from the Po Plain (Northern Italy)*. Bulletin of the Seismological Society of America 107 (2): 770-786. <https://doi.org/10.1785/0120160166>.
- Mascandola C., Massa M., Barani S., Albarello D., Lovati S., Martelli L., Poggi V., (2019): *Mapping the Seismic Bedrock of the Po Plain (Italy) through Ambient-Vibration Monitoring*. Bulletin of the Seismological Society of America 109 (1): 164-177. <https://doi.org/10.1785/0120180193>.
- Massa M., Augliera P., Carannante S., Cattaneo M., D'Alema E., Lovati S., Monachesi G., Moretti M., Piccinini D., (Seismological projects DPC-INGV 2012-2013): *May-June 2012 Emilia seismic sequence: relocated seismicity, Project S1, Base-knowledge improvement for assessing the seismogenic potential of Italy*, Deliverable D18, Task b2, <https://sites.google.com/site/ingvdpcprojects1/home>.
- Meletti C., Valensise G. (a cura di), (2004): *Zonazione sismogenetica ZS9 - App.2 al Rapporto conclusivo*. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

- Milana, G., P. Bordoni, F. Cara (2014). *1D velocity structure of the Po River plain (Northern Italy) assessed by combining strong motion and ambient noise data*. Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 2195; doi:10.1007/s10518-013-9483-y.
- Minarelli L., Amoroso S, Tarabusi G., Stefani M., Pulelli M., (2016): *Down-hole geophysical characterization of middle-upper Quaternary sequences in the Apennine Foredeep, Mirabello, Italy*. Annals of Geophysics, 2016.
- Molinari F. C., Boldrini G., Severi P., Dugoni G., Rapti Caputo D. & Martinelli G., (2007): *Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara*. In: Dugoni G. & Pignone R. (Eds.), Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara. DB-MAP, Firenze, 7-61.
- Montone P., Mariucci M.T., Pierdominici S., (2012): *The Italian present-day stress map*, Geophys. J. Int., 189, 705-716; doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05391.x.
- Naso G., Martelli L., Baglione M., Bramerini F., Castenetto S., D'Intinosante V., Ercolessi G., (2019): *Maps for land management: from geology to seismic hazard*. Boll. Geof. Teor. Appl., Vol. 60, DOI 10.4430/bgta0263.
- Ori G.G., Friend P.F., (1984): *Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets*. Geology, 12, 475-478.
- Petronio L., Affatato A., Baradello L., Barbagallo A., Cristofano G., Sorgo D., Lai C.G., Poggi V., (2018): *Shear wave seismic reflection survey in the 2012 Emilia epicentral area*. Atti 37° Convegno Nazionale NGTGS, Sezione 2.2. Bologna.
- Petronio L., Baradello L., Poggi V., Minarelli L., Böhm G., Affatato A., Barbagallo A., Cristofano G., Sorgo D., Martelli L., Lai C.G. (2023). *Combining SH- and P-wave seismic reflection survey to support seismic response analysis. A case study from Cavezzo (Italy) after the 2012 Emilia earthquake*. Engineering Geology, Vol. 313, 106916, ISSN 0013-7952. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106916>.
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

- Pondrelli S., Salimbeni S., Perfetti P., Danecek P., (2012): *Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence*. Annals of Geophys., 55(4), 615-621, doi: 10.4401/ag-6146.
- Rathje E. M, Kottke A. (2013) - *Strata*, <https://nees.org/resources/strata>.
- Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, (1998): *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ufficio geologico – ENI-Agip, Divisione Esplorazione e Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120.
- Ricci Lucchi F., 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.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., (2020): *The Italian earthquake catalogue CPTI15*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(7), 2953-2984. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00818-y>.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A., (2022): *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.4>.
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

11 Allegati

Carta delle indagini	Tavola 1a-1b	1:10.000
Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica	Tavola 2a-2b	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3a-3b	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica	Tavola 4a-4b	1:10.000
Carta della velocità delle onde di taglio	Tavola 5a-5b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di terzo livello - FAPGA	Tavola 6a-6b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di terzo livello - FH0105	Tavola 7a-7b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di terzo livello - FH0510	Tavola 8a-8b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di terzo livello - FH0515	Tavola 9a-9b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di terzo livello - FA0105	Tavola 10a-10b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di terzo livello - FA0408	Tavola 11a-11b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di terzo livello - FA0711	Tavola 12a-12b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di terzo livello - FA0515	Tavola 13a-13b	1:10.000

MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO DEL COMUNE DI BONDENO

Carta di microzonazione sismica di terzo livello - HSM	Tavola 14a-14b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di terzo livello - H0408	Tavola 15a-15b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di terzo livello - H0711	Tavola 16a-16b	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di terzo livello - H0515	Tavola 17a-17b	1:10.000
Allegato 1 - Sezioni Geologiche		
Allegato 2 - Rapporti di Prova		
Allegato 3 - Verifica Potenziale di Liquefazione CPTu		
Allegato 4 - Dettagli delle analisi di Risposta Sismica Locale		