



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 Sala Bolognese



Relazione Illustrativa

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

Indice

1	Introduzione	5
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi	5
1.2	Lo studio di microzonazione sismica	6
1.3	Elaborati prodotti	7
2	Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento	8
2.1	Sismicità storica	9
2.1.1	La sequenza del 2012.....	12
2.2	Sorgenti sismogenetiche	15
3	Assetto geologico e geomorfologico dell'area	18
3.1	Quadro geografico geomorfologico	18
3.2	Contesto geologico stratigrafico.....	19
3.3	Evoluzione generale delle successioni del Quaternario Superiore	24
4	Dati geognostici e geofisici	25
4.1	Indagini di repertorio.....	26
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica	27
4.2.1	Indagini realizzate in situ	28
4.2.2	Indagini realizzate in laboratorio	31
5	Modello del sottosuolo	34
5.1	Substrato.....	36
5.1.1	Quaternario Marino (QM)	37
5.2	Terreni di copertura.....	40
5.2.1	Supersistema Emiliano-Romagnolo	40

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

5.2.2	Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)	41
6	Interpretazioni e incertezze	43
6.1	Frequenza naturale dei terreni (f_0)	44
6.2	Terreni suscettibili di liquefazione	47
6.3	Piezometria	47
7	Metodologie di elaborazione e risultati	50
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali	51
7.1.1	Risposta sismica locale con modellazioni numeriche	52
7.2	Zone instabili soggette a liquefazione	60
7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione	61
8	Elaborati cartografici	64
8.1	Carta delle indagini (Tavole 1a - 1b)	65
8.2	Carta Geologico Tecnica microzonazione sismica (Tavole 2a - 2b)	65
8.2.1	Forme di superficie e sepolte	66
8.2.2	Elementi geologici ed idrogeologici	66
8.2.3	Terreni di copertura	67
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)	69
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4)	70
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5)	73
8.6	Carte di microzonazione sismica (Tavole 6, 7, 8, 9)	74
9	Commenti finali e criticità	76
9.1	Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale	77
9.2	Microzonazione sismica e criticità	77

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

9.3	Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione	79
9.4	Indicazioni per la riduzione del rischio sismico	80
10	Bibliografia	82
11	Allegati	91

*Coordinamento dello studio di
Microzonazione Sismica:*

dott. Luca Minarelli

Redazione della relazione:

dott. Luca Minarelli
prof. Marco Stefani
dott. geol. Massimiliano Fazzini

*Creazione geodatabase dei dati
geologici e geotecnici:*

dott. Luca Minarelli
dott. Andrea Pavanati
dott. Matteo Fusetti

Elaborazione tavole cartografiche:

dott. Luca Minarelli
dott. Andrea Pavanati

Elaborazione dei dati stratigrafici:

prof. Marco Stefani
dott. Luca Minarelli

*Esecuzione ed elaborazione prove
geognostiche in situ e laboratorio:*

Elletipi Srl – Geofe Srl

1 Introduzione

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

Nella fase immediatamente successiva alla sequenza sismica emiliana del maggio 2012, la Regione Emilia-Romagna, attraverso l'Ordinanza 70/2012, ha infatti realizzato studi di microzonazione sismica negli ambiti urbanizzati e suscettibili di urbanizzazione dei 17 Comuni dell'area epicentrale (Martelli *et al.*, 2013). Con Delibera di Giunta Regionale D.G.R. n. 1227/2015, sono stati infine attribuiti al Comune di Sala Bolognese i contributi per la realizzazione del presente studio di microzonazione sismica con locali approfondimenti di terzo livello.

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

1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

Lo studio di microzonazione sismica di terzo livello del Comune di Sala Bolognese è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nella Delibera di Giunta della Regione Emilia-Romagna 1227/2015 dal titolo "Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014. Attribuzione contributi a favore degli Enti Locali. Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica e delle indicazioni per l'archiviazione informatica".

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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

- Delibera di Giunta Regionale D.G.R. n. 2193/2015 “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica”;
- Variante specifica al PTCP della Provincia di Bologna in materia di riduzione del rischio sismico, approvata con Delibera del Consiglio Provinciale n. 57 del 28 ottobre 2013;
- L.R. n. 19 del 30 ottobre 2008 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- D.M. del 14 gennaio 2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- Ordinanza n. 70 del 16 ottobre 2014 del Commissario Delegato Regione Emilia-Romagna “Approvazione programma per gli studi di microzonazione sismica” e relativi elaborati prodotti.

1.2 Lo studio di microzonazione sismica

Come noto le caratteristiche geologiche e geomorfologiche locali possono determinare alterazioni nel moto sismico in superficie ed effetti di instabilità, come frane, liquefazioni o cedimenti, innescati in caso di terremoto.

Gli studi di microzonazione sismica vengono pertanto utilizzati come strumenti per la suddivisione del territorio indagato in aree omogenee, sia sulla base della risposta sismica dei terreni, sia per quanto concerne i possibili effetti locali indotti dallo scuotimento.

Nello specifico, lo studio di microzonazione sismica di terzo livello ha come finalità l’analisi dell’effettivo grado di pericolosità sismica delle aree riconosciute come instabili e potenzialmente instabili. Nel contesto in esame, ciò si applica mediante valutazione approfondita della risposta sismica locale, in termini di amplificazione attesa e stima degli indici di rischio legati alle aree soggette a liquefazione e densificazione. Gli studi di microzonazione sismica si pongono quindi come strumenti fondamentali per la prevenzione e la riduzione del rischio sismico, fornendo elementi capaci di indirizzare le scelte di pianificazione urbanistica verso zone a minore pericolosità, ed orientare gli interventi di mitigazione in aree a rischio instabilità, fornendo anche utili indicazioni preliminari per la progettazione.

Secondo gli indirizzi regionali (D.G.R. 2193/2015) tali studi, necessari per la redazione e l’approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (L.R. 19/2008), devono interessare le aree urbanizzate e quelle potenzialmente sottoposte a trasformazioni urbanistiche, comprese le porzioni delle reti infrastrutturali principali.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Gli ambiti insediati e quelli urbanizzabili interessati dalla microzonazione sismica sono stati indicati dal 3° Settore Tecnico - Servizio Gestione Territorio del Comune di Sala Bolognese, in relazione a quanto stabilito nello strumento urbanistico generale PSC e nel Regolamento Urbanistico Edilizio RUE approvati.

1.3 Elaborati prodotti

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

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

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

- 11 Tavole cartografiche, compiutamente descritte al capitolo 8;
- 4 Sezioni geologiche;
- Archivi digitali dei dati informatizzati;
- Relazione illustrativa;
- Rapporti di prova delle indagini di nuova esecuzione;
- Rapporti elaborazione "CLiq" delle indagini penetrometriche eseguite per Microzonazione Sismica.

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

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

2 Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

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

- il CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015 (Rovida *et al.*, 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), che raccoglie dati parametrici omogenei, sia macrosismici, sia strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2014;
- il DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 (Locati *et al.*, 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), che fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2014.
- il DISS versione 3.2.0 - Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane (DISS Working Group, 2015; <http://diss.rm.ingv.it>), che contiene informazioni relative a sorgenti individuali e composite in grado di generare terremoti di magnitudo pari a 5.5 o superiore. Le sorgenti sono rappresentate in pianta in modo semplificato tramite rettangoli o poligoni georeferenziati 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 tutte le registrazioni dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale relative ai terremoti avvenuti dal 2003 ad oggi;
- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello *et al.*, 2006; <http://csi.rm.ingv.it/>), che contiene tutte le registrazioni dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale relative ai terremoti avvenuti tra il 1981 ed il 2002;

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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

2.1 Sismicità storica

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

In relazione al Comune di Sala Bolognese il database contiene solamente 6 record relativi ad eventi sismici storici (Tabella 2-1). Per ciascun terremoto sono riportati i valori di intensità macrosismica (IMCS) osservata nel territorio comunale in occasione degli eventi considerati, l’area epicentrale, il numero di Macro seismic Data Point (NMDP), l’intensità epicentrale (I_0) e la magnitudo momento (M_w) stimata mediante relazioni empiriche. I valori di intensità sono espressi in accordo con la scala Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930), come riportato in Tabella 2-2.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

IN OCCASIONE DEL TERREMOTO DEL:										EFFETTI
DATA						AREA EPICENTRALE	NMDP	Io	Mw	IMCS SALA BOLOGNESE
Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se					
1972	10	25	21	56	1	Appennino settentrionale	198	5	4.87	3
1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04	4
1992	04	17	11	59	0	Appennino bolognese	56	4-5	4.11	NF
2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	5-6	4.40	3-4
2002	06	18	22	23	3	Frignano	186	4	4.30	NF
2012	05	29	7	00	0	Pianura emiliana	87	7-8	5.90	5

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

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

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

Come è possibile osservare dai dati disponibili, il terremoto più forte e prossimo all'area in esame risulta essere quello del 29 maggio 2012, con intensità epicentrale pari al VII-VIII grado della scala MCS e magnitudo momento pari a 5.90.

Oltre a tale evento, analizzando attraverso i cataloghi la storia sismica dei centri vicini a Sala Bolognese, si può notare come il numero di osservazioni macrosismiche associate a eventi storici cresca notevolmente se si considerano i centri urbani già sviluppati in età basso medievale.

La città di Bologna, ad esempio, annovera ben 204 registrazioni di terremoti, con effetti di danno ampiamente documentati (Guidoboni *et al.*, 2007), nel periodo compreso fra l'anno 1000 ed il 2014 (Figura 2-1).

Con intensità epicentrale pari al VIII grado della scala MCS e magnitudo momento pari a 5.62, la scossa del 3 gennaio 1505, seconda di una sequenza sismica costituita di 3 scosse, è quella che ha prodotto i maggiori effetti di danno nella città.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

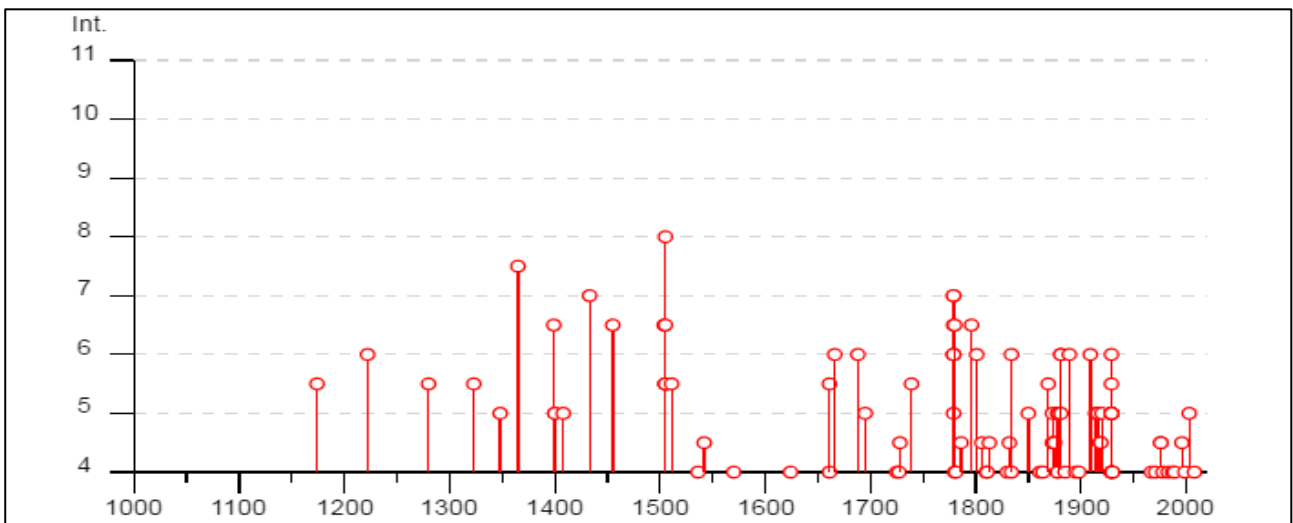


Figura 2-1 - Valori di intensità macrosismica $I_{MCS} \geq 4$ attribuite al Comune di Bologna, dall'anno 1000 al 2014, tratte dal database DBMI15 (Locati *et al.*, 2016).

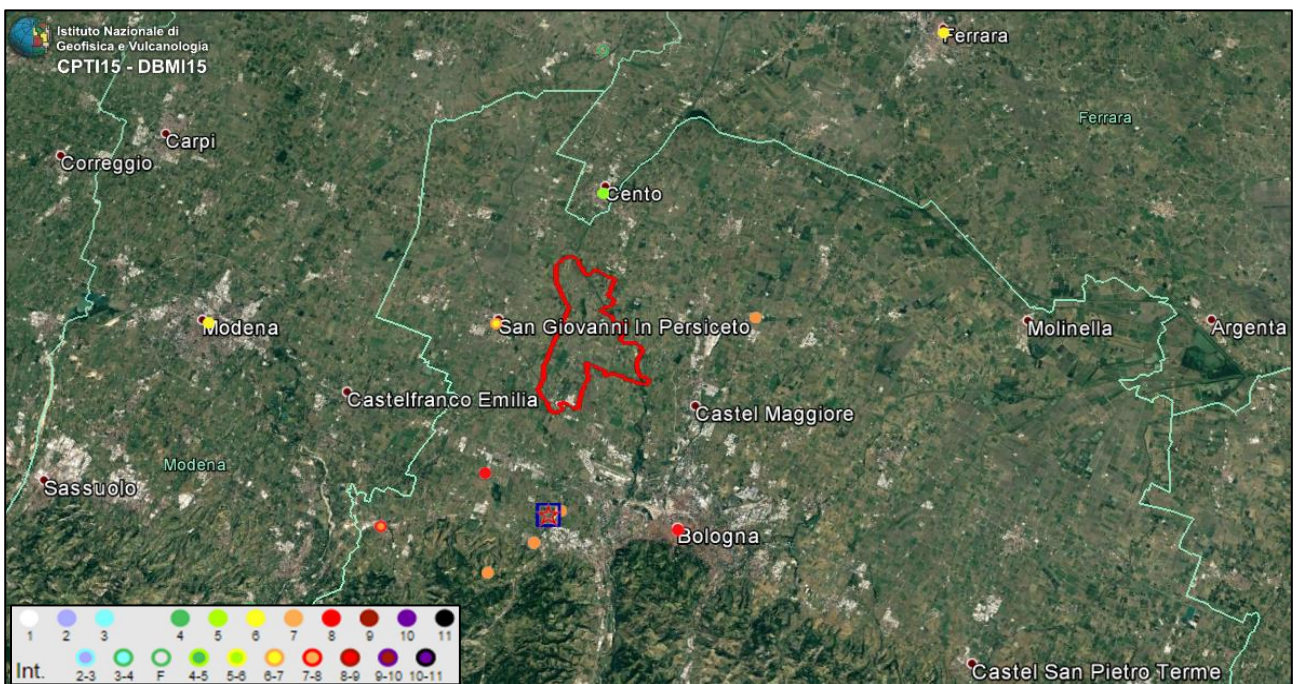


Figura 2-2 - Effetti della scossa del 3 gennaio 1505. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il perimetro del Comune di Sala Bolognese che si colloca in una fascia priva di dati, compresa però tra aree in cui le intensità macrosismiche risultano variabili tra il VI e VII grado della scala MCS.

Dalle osservazioni relative a località vicine all'epicentro, si riscontrano intensità macrosismiche sostanzialmente comprese tra il VII ed il VIII grado. Rispetto al Comune di Sala Bolognese invece, collocato in un'ampia fascia di territorio priva di dati, esso è compreso tra aree in cui le intensità macrosismiche risultano variabili tra il VI e VII grado (Figura 2-2).

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Gli effetti principali della sequenza sismica del 1504-1505 sono descritti dettagliatamente nel catalogo CFTI4M. Di seguito si riporta una sintesi di quelli principali come descritti nelle varie fonti storiche:

Questa sequenza sismica cominciò il 31 dicembre 1504 e si protrasse per quasi cinque mesi, fino a oltre la metà di maggio 1505. Interessò soprattutto Bologna e la vicina area pedeappenninica dove i danni furono rilevanti.

Le scosse più forti furono tre: la prima avvenne il 31 dicembre 1504 alle ore 4:00 GMT circa (le 11 e mezza in orario "all'italiana"). A Bologna la scossa fece cadere numerosi comignoli e causò lesioni nelle volte di vari edifici, fra cui la chiesa di S.Francesco; la chiesa di S.Giacomo subì danni anche alla facciata. A Modena fu molto forte e fece cadere qualche comignolo.

La scossa più forte della sequenza avvenne il 3 gennaio 1505 alle ore 2:00 GMT circa (le 9 e mezza in orario "all'italiana"). A Bologna ci furono gravi danni alle abitazioni e agli edifici pubblici, civili e religiosi. Le case crollate totalmente furono poche, ma molte abitazioni subirono danni diffusi. La parte dell'area urbana più colpita fu quella verso la pianura, compresa tra porta S.Donato e porta S.Isaia. Risultarono danneggiati soprattutto gli edifici "a volta" (come le chiese e i palazzi), e la parte più alta di numerose torri, tanto che alcune dovettero essere abbattute o abbassate per evitarne il crollo sugli edifici vicini. Nel palazzo Bentivoglio, uno dei più danneggiati, crollarono la facciata, la sala grande, cinque volte del portico e il "torresino" della vicina torre collegata al palazzo; varie stanze risultarono inoltre lesionate e tutto l'edificio sconnesso e indebolito. Più in ombra, dal punto di vista degli effetti, rimane l'area extraurbana, a cui le fonti dedicano scarsa attenzione: a Confortino, Bentivoglio e Rigosa subirono gravi danni gli edifici di proprietà della famiglia Bentivoglio; a San Lorenzo in Collina e Zola Predosa il terremoto causò lesioni nelle case e il crollo di colombaie. Ci furono danni leggeri a Ferrara, Modena, Reggio nell'Emilia. La scossa fu sentita a Firenze, Forlì, Venezia, Verona, Vicenza, e in molte altre località.

Un'altra scossa molto forte avvenne il 20 gennaio, alle ore 23:50 GMT circa (le 7 della notte in orario "all'italiana"). A Bologna si aggravarono i danni alle volte di alcuni edifici, fra cui la cattedrale di S.Pietro, le chiese di S.Petronio e S.Martino, la torre del palazzo del Podestà e l'ospedale di S.Maria della Vita. Questa scossa fu sentita in un'area estesa da Forlì e Faenza, a Venezia e Verona.

2.1.1 La sequenza del 2012

Tra il maggio ed il giugno 2012 un'importante sequenza sismica ha interessato una vasta area della Bassa Pianura Padana, compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara. La sequenza è stata caratterizzata da due scosse principali; la prima, di magnitudo locale M_L pari a 5.9, si è verificata il 20 maggio alle 4:03 ora locale, con epicentro tra Finale Emilia e San Felice sul Panaro (44°51'50"

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

N, 11°14'31" E, profondità 6,3 km - Figura 2-3), mentre la seconda, di M_L pari a 5.8, è avvenuta il 29 maggio alle 9:00 ora locale con epicentro tra Mirandola e Medolla, (44°50'00" N, 11°03'37" E, profondità 13,5 km - Figura 2-3) (Massa *et al.*, 2012).

Scosse successive hanno interessato un'area estesa oltre 50 km in direzione Est - Ovest; in particolare sono state registrate cinque repliche di $M_w \geq 5,0$, aventi epicentri distribuiti tra Novi di Modena e Vigarano Mainarda (Figura 2-3), ed oltre 3.700 scosse di $M_w \geq 1,5$ (Figura 2-3).

La sequenza sismica ha interessato le strutture fragili costituenti la parte frontale della catena appenninica sepolta, le cosiddette Pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981): serie di pieghe e sovrascorrimenti Nord e Nord-Est vergenti che coinvolgono sia la copertura sedimentaria Terziario - Quaternaria che la successione carbonatica Mesozoica.

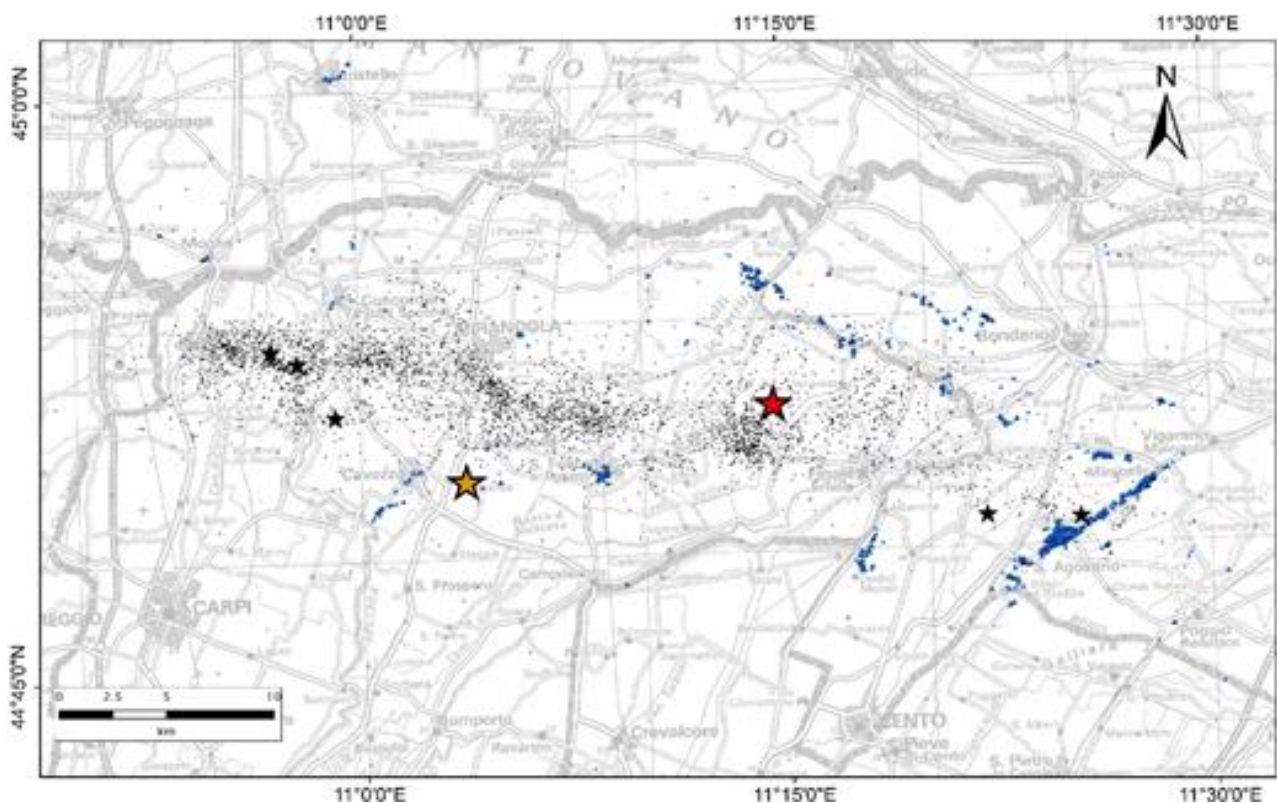


Figura 2-3 - Sequenza sismica emiliana del 2012. Le stelle rossa e arancio rappresentano rispettivamente le scosse del 20 e 29 maggio. Le stelle nere riportano la localizzazione degli aftershocks con $M_w \geq 5,0$, mentre i piccoli punti neri indicano gli eventi con $M_w \geq 1,5$. I piccoli punti blu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

I maggiori effetti locali 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,

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

oggi abbandonati e sepolti, di fiumi a provenienza appenninica (Reno, Panaro, Secchia) e subordinatamente del Po.

Relativamente al Comune di Sala Bolognese, il Database Macrosismico Italiano - DBMI15 (Locati *et al.*, 2016) riporta per l'evento del 29 maggio un valore di intensità macrosismica osservato pari al V grado della scala MCS (Tertulliani *et al.*, 2012 - Tabella 2-1 e Figura 2-4)

Tale scossa infatti, e quella precedente del 20 maggio, sono state avvertite in maniera distinta in tutta l'area comunale, ed hanno comportato diversi danni sia agli edifici pubblici che a quelli privati. I danni rilevati sono stati tali da rendere parzialmente o totalmente inagibili alcuni fabbricati, per i quali è stato necessario adottare misure atte a scongiurare rischi per l'incolumità pubblica e privata. I danni sono essenzialmente riconducibili alle lesioni sui paramenti murari ed in corrispondenza delle connessioni tra la copertura e gli elementi strutturali degli edifici stessi.

Al fine di comprendere meglio l'entità dei danni rilevati, per i quali è stato necessario adottare appositi atti per la messa in sicurezza degli immobili, è utile riportare numero ed oggetto delle Ordinanze Sindacali emesse sia per gli edifici pubblici che per quelli privati.

Le **tre ordinanze** relative ad edifici pubblici hanno avuto come oggetto:

- cimitero di Padulle, parzialmente agibile in attesa dei lavori di consolidamento definitivi;
- casa della Cultura, parzialmente agibile in attesa delle opere di consolidamento statico della scala di sicurezza;
- complesso Villa Terracini "Edificio lato est della villa", inagibile;
- complesso Villa Terracini "Villa", inagibile;
- complesso Villa Terracini "Barchessa", parzialmente agibile in attesa di controlli e verifiche ulteriori;
- cimitero comunale di Sala, da rivedere;
- palestra di Padulle, inagibile in attesa di controlli e verifiche approfondite;
- ecomuseo del Dosolo, inagibile;
- ex scuole di Bagno di Piano, agibili con prescrizioni;
- cimitero di Bonconvento, edificio agibile con prescrizioni e impedimenti alla pedonabilità locale;
- poliambulatorio e alloggi, edificio agibile, parziale inagibilità delle cantine sotto il terrazzo sud-est.

Per quanto concerne gli edifici privati, l'adozione delle **quarantasei Ordinanze Sindacali** ha comportato l'evacuazione, alla data del 10 luglio 2012, di quindici persone dalle proprie abitazioni.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

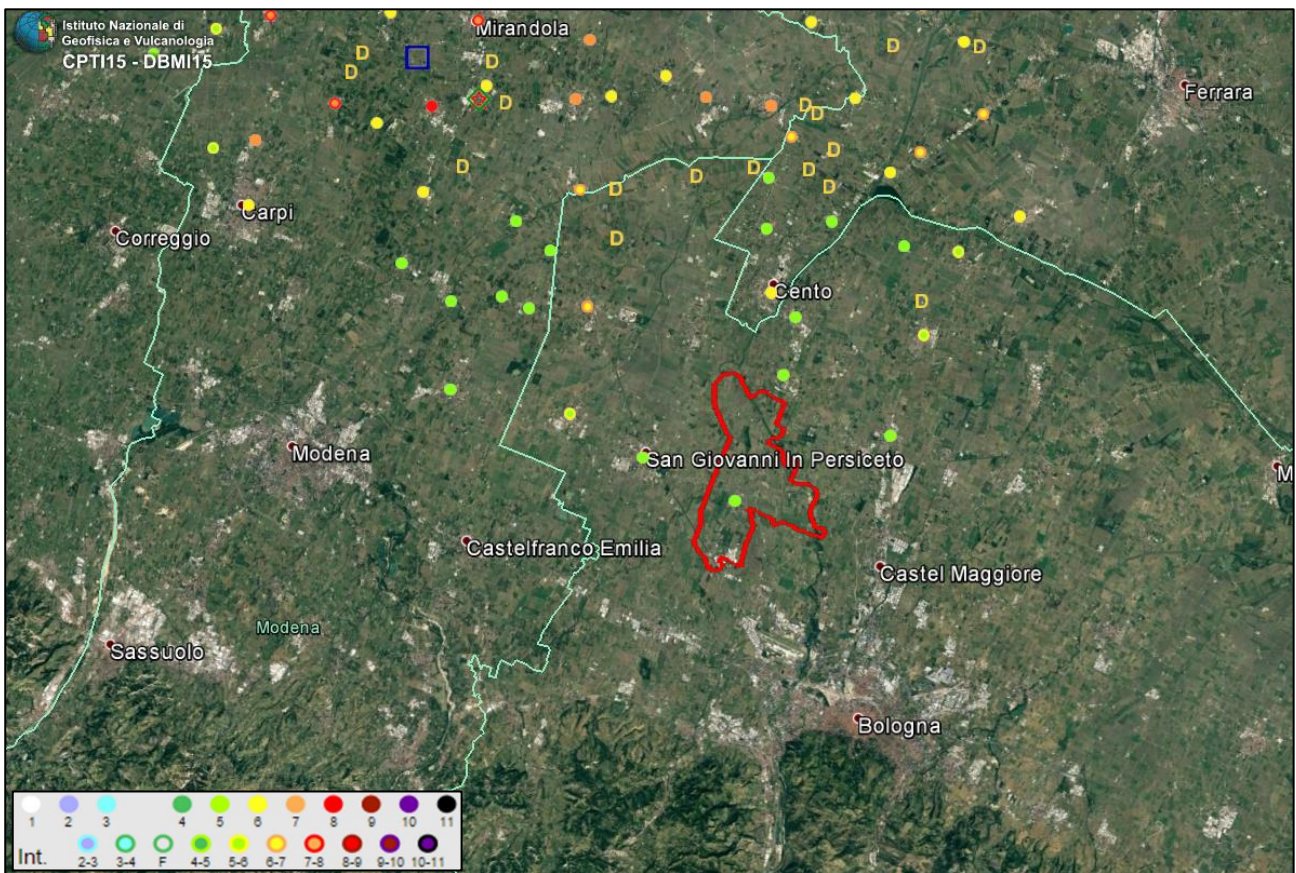


Figura 2-4 - Distribuzione degli effetti del sisma del 29 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentata l'area del Comune di Sala Bolognese.

2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS Working Group, 2015) mostra la presenza a nord ed a sud del territorio di Sala Bolognese di due sorgenti sismogenetiche composite, denominate rispettivamente ITCS051 "Carpi - Poggio Renatico" e ITCS047 "Castelvetro di Modena-Castel San Pietro Terme" (Figura 2-5). La prima struttura, orientata Est - Sud-Est – Ovest - Nord-Ovest, comprende la sorgente individuale di Mirandola (ITIS107), caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 6, profondità tra 4 e 7 km e slip-rate compreso tra 0.5 e 1.04 mm/anno.

La seconda struttura invece, orientata Ovest - Sud-Ovest e lungo la quale paiono essersi concentrati i maggiori eventi dell'area bolognese, comprende le sorgenti individuali ITIS091 "Casalecchio di Reno" e ITIS103 "Crespellano", associate rispettivamente alla scossa del 3 gennaio 1505 ed a quella del 20 aprile 1929. La sorgente ITIS091 è caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 5.5, profondità tra 2 e 4.2 km e slip-rate compreso tra 0.1 e 0.5 mm/anno; la sorgente ITIS103 è invece caratterizzata da

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 5.6, profondità tra 2 e 4.5 km e slip-rate compreso tra 0.1 e 0.5 mm/anno.

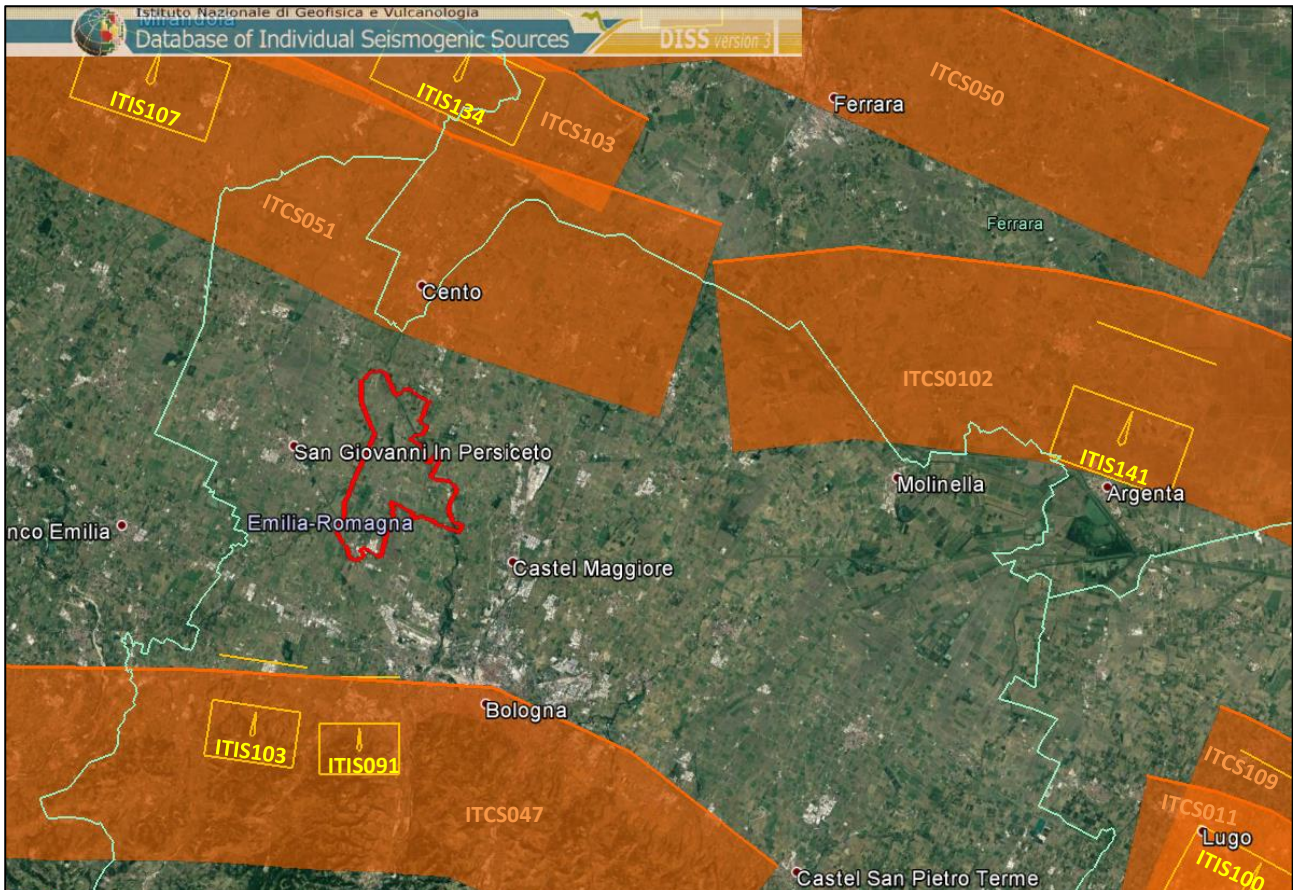


Figura 2-5 - Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) ed individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.2.0, nell'intorno dell'area di studio. In rosso l'area comunale di Sala Bolognese.

Queste strutture fragili, a vergenza tendenzialmente nord-est, sono soggette ad un attivo campo di stress tettonico compressivo, che induce movimenti inversi o inverso - trascorrenti, associati ad una attività sismica relativamente frequente di magnitudo massima stimata pari a 5.6.

Di questa attività esiste una significativa documentazione storica (Guidoboni *et al.*, 2007), per sua natura evidentemente incompleta. La scarsa estensione areale delle singole strutture sismogenetiche comporta, durante gli eventi sismici, la liberazione di un quantitativo di energia normalmente moderato, in grado comunque di determinare effetti significativi in superficie, data la ridotta profondità delle strutture e gli importanti fattori di focalizzazione ed amplificazione sismica.

Verso sud, al di sotto della fascia pedecollinare e appenninica affiorante, i sovrascorrimenti tettonicamente attivi coinvolgono, molto probabilmente, il basamento cristallino, metamorfosato in età varisca

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

(Figura 3-3). I caratteri strutturali e sismogenetici di queste strutture fragili sepolte sono oggi ancora mal conosciuti, ragion per cui risulta alquanto complesso associare valori di magnitudo massima al sistema sorgente. Il contesto suggerisce comunque la possibilità che esse possano generare rilasci di energia sismica più rari nel tempo, ma di magnitudo significativamente maggiore rispetto a quelle imputabili alle strutture meglio documentate sotto la pianura, per le quali permangono tuttavia interrogati relativi ai tempi di ritorno degli eventi ad esse relazionati.

Bisogna inoltre considerare che l'area di Sala Bolognese può risentire degli effetti provocati da eventi associati a strutture sismogenetiche più distanti rispetto a quelle appena citate, come avvenuto nel caso del sisma del 20 maggio 2012 originato dalla sorgente composita ITCS103 "Finale Emilia - Mirabello".

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

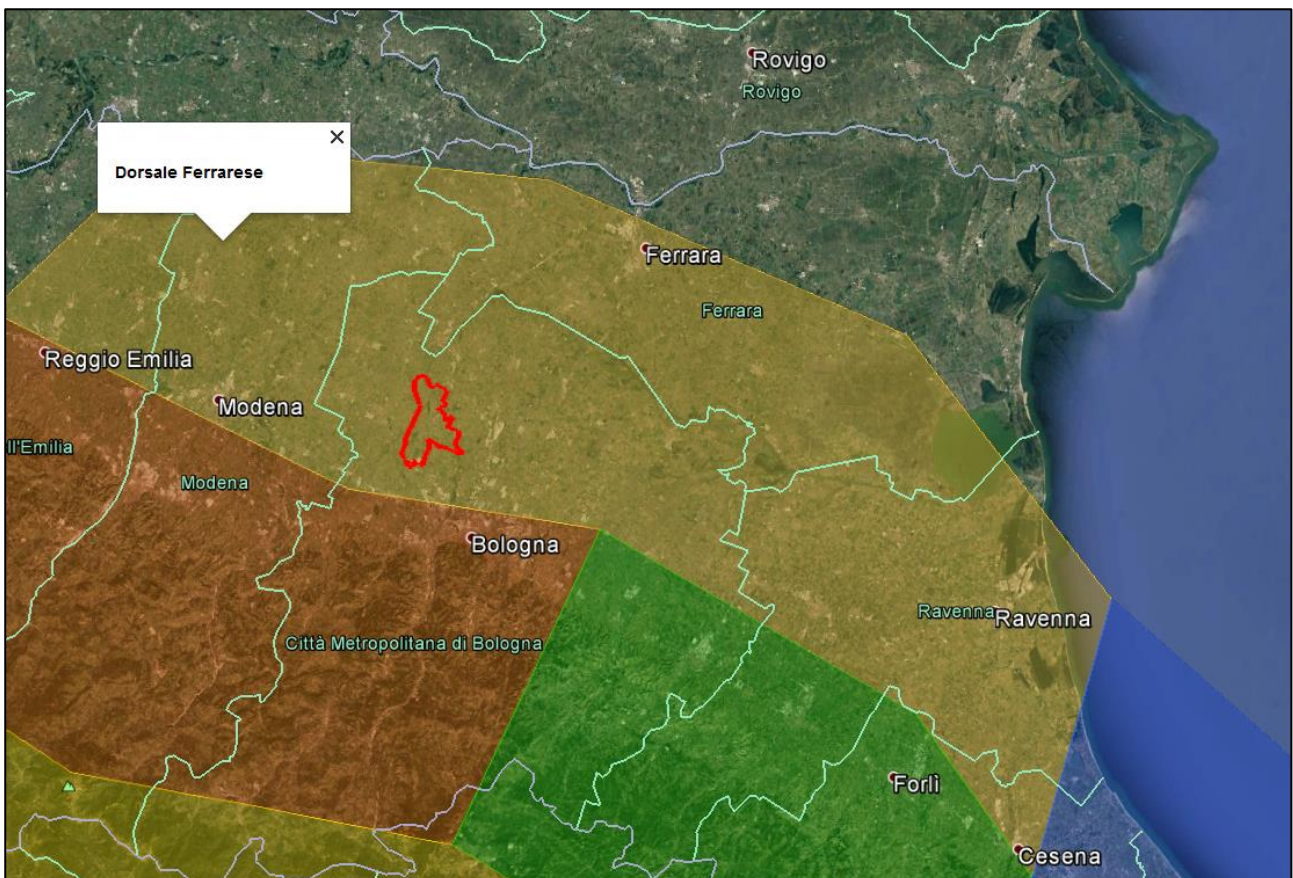


Figura 2-6 - Ubicazione del territorio comunale di Sala Bolognese (in rosso) rispetto alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).

3 Assetto geologico e geomorfologico dell'area

Nei paragrafi seguenti verranno dapprima delineati i caratteri geografici e geomorfologici dell'area in esame, per poi descriverne l'assetto geologico-strutturale e le caratteristiche litostratigrafiche, sottolineando, con maggior dettaglio, l'evoluzione delle successioni sedimentarie del Quaternario Superiore, che costituiscono le prime centinaia di metri di sottosuolo del Comune di Sala Bolognese.

3.1 Quadro geografico geomorfologico

Il territorio comunale di Sala Bolognese è situato nella porzione sud-occidentale della pianura bolognese, poco a nord della Via Emilia ed a poco più di dieci chilometri a settentrione rispetto alla fascia pedecollinare ed allo sbocco dei fiumi in pianura. Nonostante la vicinanza alla catena appenninica, l'area presenta marcati caratteri di bassa pianura alluvionale, costituita da sedimenti relativamente fini depositi in età recente. La fascia di alta pianura alluvionale ben drenata, formata da sedimenti grossolani sabbioso-ghiaiosi, è assai poco sviluppata nella pianura bolognese come nel resto dell'Emilia, al contrario di quanto accade nelle regioni a nord del corso del fiume Po.

Sedimenti grossolani in affioramento sono presenti solamente allo sbocco in pianura dei principali fiumi, generalmente a ridosso della Via Emilia, dove formano piccole conoidi, peraltro discontinue e mal definite. Sedimenti grossolani più antichi, coevi alle fasi glaciali tardo-quaternarie, sono di contro meglio sviluppati nel sottosuolo, come ad esempio nell'area di Calderara di Reno e, in parte, di Sala Bolognese. Lo scarso sviluppo di sedimenti grossolani permeabili di alta pianura è legato sia alla natura geo-litologica della vicina catena appenninica, sia all'attiva subsidenza dell'area di pianura. L'Appennino è, infatti, qui molto ricco di litotipi argillosi mal litificati, sia nelle unità caotiche Liguridi che nel Pliocene marino. In questa area, solamente il fiume Reno è in grado di trasportare un'abbondante frazione ghiaioso - sabbiosa, comunque sempre associata a grandi quantità di limi ed argille. La forte subsidenza della pianura a nord della Via Emilia ha abbassato notevolmente i sedimenti granulari depositi durante l'ultima fase singlaciale, caratterizzata da una ridotta copertura vegetale e quindi da una maggiore produzione erosiva di sedimenti grossolani. Tali sedimenti sono invece ancora in gran parte affioranti a nord del Po. La stessa subsidenza ha inoltre favorito lo sviluppo, durante l'Olocene, di ampie depressioni palustri a bassa energia idrodinamica, che hanno consentito l'accumulo di sedimenti fangosi prossimi alla superficie.

Fino al XIX secolo l'area in oggetto era, infatti, parte di una vasta estensione di paludi continentali ed ambienti umidi solcata dai dossi allungati degli alvei di origine appenninica. Questa regione umida era

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

sviluppata fra due fasce meglio drenate; quella sud, contigua alla Via Emilia, e quella a nord, legata ai paleoalvei del fiume Po. Il territorio analizzato è oggi soggetto a condizioni idrografiche ben diverse ed in gran parte artificiali, indotte dalle massicce opere di bonifica e regimazione idraulica dei fiumi. La parte orientale del Comune è caratterizzata dalla presenza dell'alveo attuale del fiume Reno, in buona parte rimodellato artificialmente o costretto da alte arginature. Nella porzione occidentale del territorio sono invece presenti gli alvei in gran parte artificiali del torrente Samoggia e dei suoi due modesti affluenti Ghironda e Lavino, oltre a canali di bonifica idraulica. La pianura interposta fra gli alvei artificiali pensili è caratterizzata da blande ondulazioni, di cui le parti più rilevate corrispondono ai dossi di paleoalveo degli appena citati fiumi appenninici minori, che in epoca storica scorrevano più ad oriente rispetto ad oggi, convergendo verso il centro di Sala Bolognese. I bassi gradienti morfologici e la diffusa presenza di depressioni interalvee, implica elevati rischi di tipo idraulico per tracimazione e rotta, di cui è necessario tenere conto in sede di valutazione integrata dei rischi territoriali.

3.2 Contesto geologico stratigrafico

Nell'area oggetto dello studio, affiorano sedimenti di pianura alluvionale di età molto recente, attribuibili alla parte più superiore dell'Olocene, corrispondente all'Unità di Modena della cartografia ufficiale CARG della Regione Emilia-Romagna (Foglio 202 "S. Giovanni in Persiceto"). Nel sottosuolo, è presente una spessa successione quaternaria, dominata da litotipi argillosi e, subordinatamente, sabbiosi. Tali coltri sono state deposte nella porzione sud-orientale del grande bacino sedimentario di avanfossa della Pianura Padana; porzione corrispondente alla parte meridionale della catena appenninica sepolta, che, verso settentrione, si sviluppa fino a nord del attuale Po.

L'assetto strutturale del sottosuolo è stato, in passato, indagato attraverso numerosi profili di sismica a riflessione, realizzati per la ricerca di idrocarburi da parte dell'ENI-AGIP, dalla cessata Società Petrolifera Italiana e di altre compagnie. Queste ricerche sismiche hanno permesso di riconoscere una complessa serie di pieghe e sovrascorrimenti a pianta arcuata e vergenza mediamente nord-nordest (Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002; Pieri e Groppi, 1975, 1981). Nella porzione più esterna della catena appenninica, è possibile riscontrare la presenza di due grandi archi di pieghe anticlinali e sovrascorrimenti, con concavità rivolta verso il margine appenninico (Pieri e Groppi, 1975), denominati, ad ovest, "Arco delle Pieghe Emiliane" ed ad est "Arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole".

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

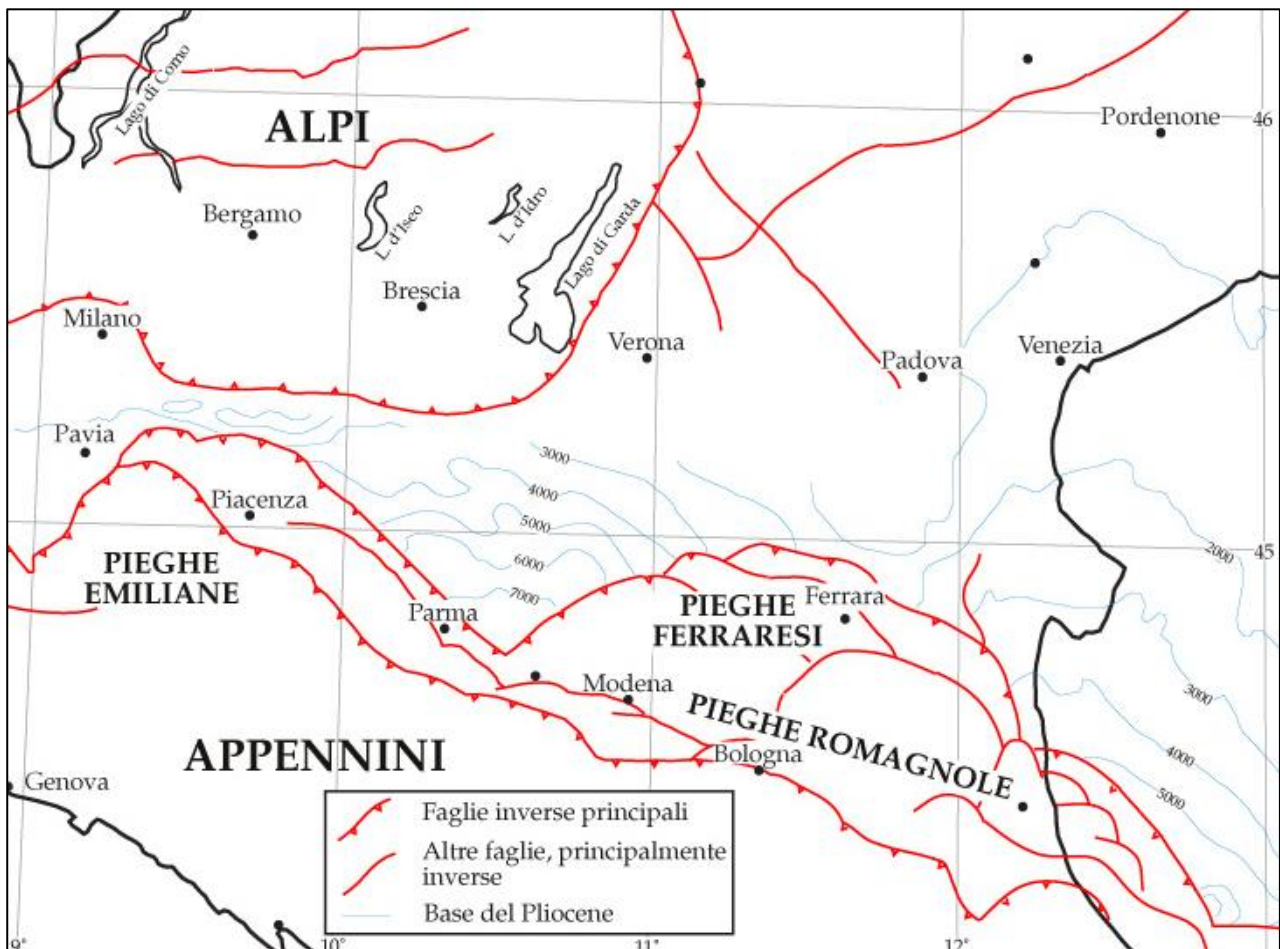


Figura 3-1 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana ottenuta da dati di superficie e di sottosuolo (da Pieri e Groppi, 1975). Le isobate si riferiscono alla profondità della base dei sedimenti pliocenici. Modificata da Burrato *et al.*, 2003.

L'arco orientale può essere suddiviso in tre fasce strutturali minori, dette "Pieghe Ferraresi", "Pieghe Romagnole" e "Pieghe Adriatiche" (Bigi *et al.*, 1990); le Pieghe Ferraresi (Dorsale Ferrarese o "Ferrara Folds" di Pieri e Groppi, 1981) rappresentano le strutture più settentrionali (Figura 3-1). Le Pieghe Ferraresi si sviluppano a nord della direttrice S. Pietro in Casale - Pieve di Cento, (Figura 3-2) e verso sud sono limitate da una fascia di pieghe e sovrascorrimenti sepolti, più prossima al margine appenninico e sub-parallela ad esso ("Pieghe Romagnole" in Pieri e Groppi, 1981). Questo fascio di sovrascorrimenti e pieghe, con direzione assiale prevalente N 110°, è sviluppata fra l'allineamento San Giovanni in Persiceto, Minerbio e San Giorgio di Piano e l'Appennino affiorante.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

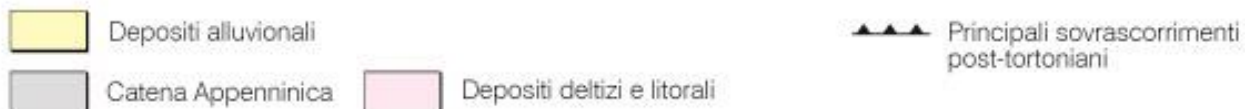
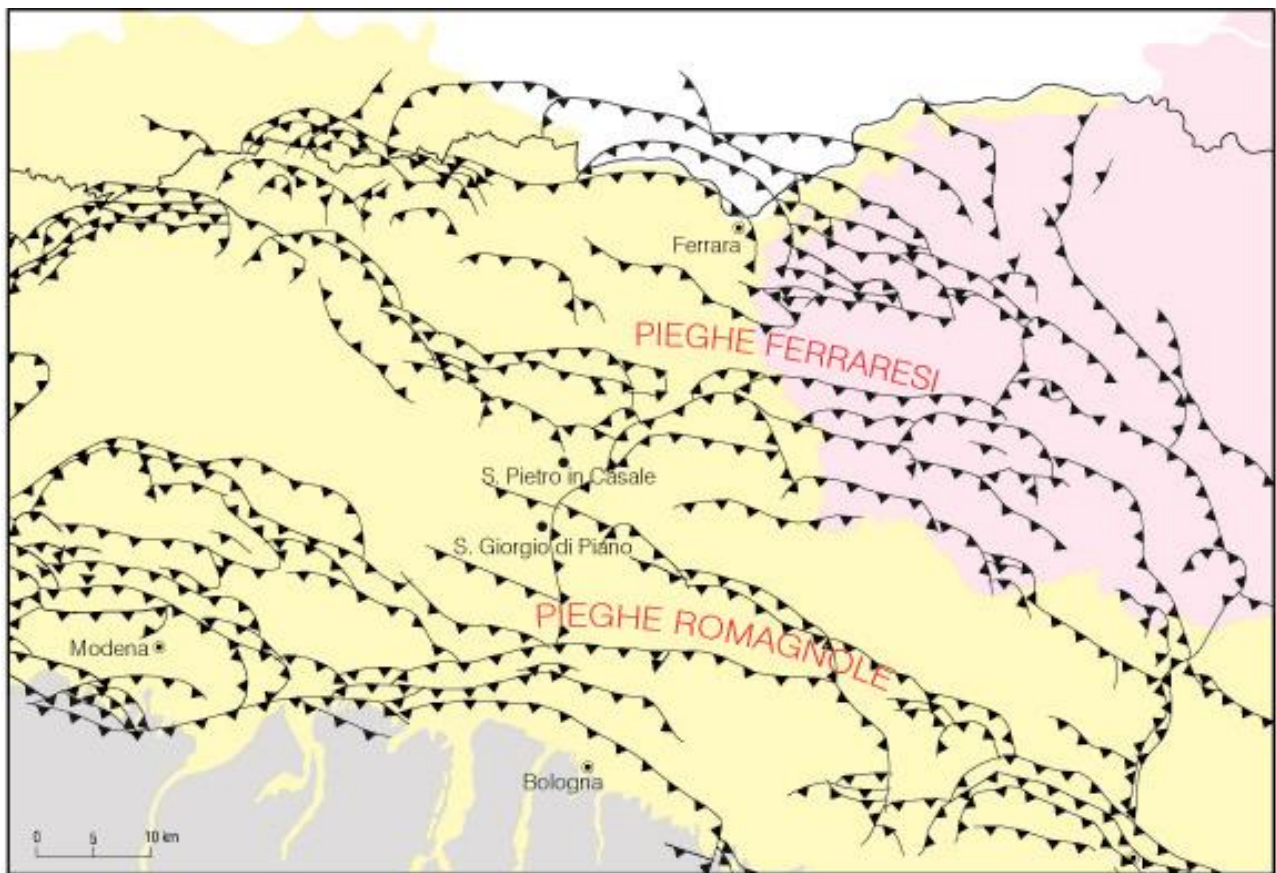


Figura 3-2 - Inquadramento tettonico che mostra la complessità delle strutture dell'arco delle Pieghe Romagnole e Ferraresi. Modificato dalle Note Illustrative del Foglio CARG 203 "Poggio Renatico".

Le Pieghe Ferraresi a nord ed il fronte sepolto delle falde Liguridi prossimo alla Via Emilia, delimitano un ampio bacino satellite (*piggy-back* Ori e Friend, 1984), interessato da sovrascorrimenti e pieghe minori, all'interno del quale si sono depositi i grandi spessori sedimentari del Pliocene marino e Quaternario marino - continentale (Figura 3-4), coevi alla deformazione e all'avanzamento verso nord delle strutture tettoniche. Immediatamente a sud del territorio comunale indagato si sviluppa un sovrascorrimento che limita a nord le Unità Liguridi, comprendenti frammenti oceanici e complessi caotici totalmente alloctoni, in parte coinvolti in antichi processi di subduzione. Nel sottosuolo fra Calderara di Reno e Sala Bolognese si localizza una importante discontinuità geologico strutturale che induce un brusco aumento della subsidenza e quindi dello spessore delle successioni stratigrafiche Quaternarie, verso nord. Come vedremo, questo contrasto strutturale influenza anche la risposta sismica locale e lo spessore del "substrato rigido, come identificato

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

dalle misure effettuate anche durante lo svolgimento di questo lavoro. Nell'area analizzata in dettaglio, le strutture dell'Appennino sepolto coinvolgono le unità della copertura meso - cenozoica e spesse successioni plio - pleistoceniche sindeformative.

L'evoluzione temporale di queste complesse strutture compressive ha registrato l'avanzamento verso l'avampaese della deformazione del margine appenninico attraverso fasi parossistiche (Farabegoli *et al.*, 1997; Ricci Lucchi, 1986; Ricci Lucchi *et al.*, 1982), della durata di poche centinaia di migliaia di anni (es. Tortoniano superiore, Messiniano superiore, Pliocene inferiore e medio, Pleistocene inferiore). Queste fasi hanno indotto superfici di discordanza e di riarrangiamento dell'architettura deposizionale, che permettono di suddividere i potenti corpi sedimentari in una serie di grandi unità stratigrafiche a limiti in conformi.

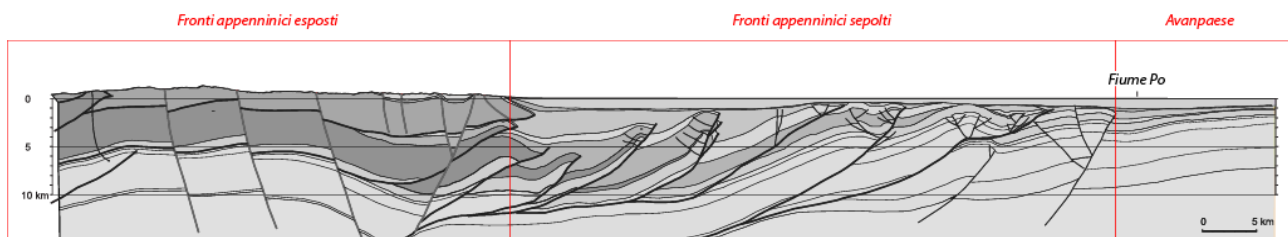


Figura 3-3 - Domini tettonici dalla Dorsale Appenninica alla Pianura Veneta. Profilo geologico esemplificativo secondo l'interpretazione di Toscani *et al.*, 2009.

L'architettura stratigrafica dei depositi plio - quaternari fu quindi molto influenzata dalla deformazione di queste fasce di sovrascorrimenti sepolti e presenta quindi spessori massimi nelle depressioni strutturali e minimi sulle anticlinali sepolte (Correggiari *et al.*, 1992; Amorosi *et al.*, 1997 a; b; Di Dio e Caporale, 1998). Nella fascia prossima all'attuale piede dell'Appennino affiorante, nessuna faglia sembra coinvolgere la base dei depositi quaternari che sigillano strutture fragili che paiono attive fino al tetto del Pliocene. Nelle strutture più avanzate, la base dei depositi quaternari risulta invece tagliata da strutture fragili e ciò testimonia un progressivo trasferimento dell'attività tettonica verso la parte più esterna dell'arco ed il margine frontale della catena appenninica sepolta (es. Picotti e Pazzaglia 2008; Toscani *et al.*, 2009). L'attività delle strutture sepolte più esterne determina un forte controllo sull'evoluzione deposizionale e la precoce deformazione plastica dei sedimenti recenti, oltre ad innescare fenomeni perturbativi dei sedimenti stessi, come la liquefazione cosismica delle sabbie.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

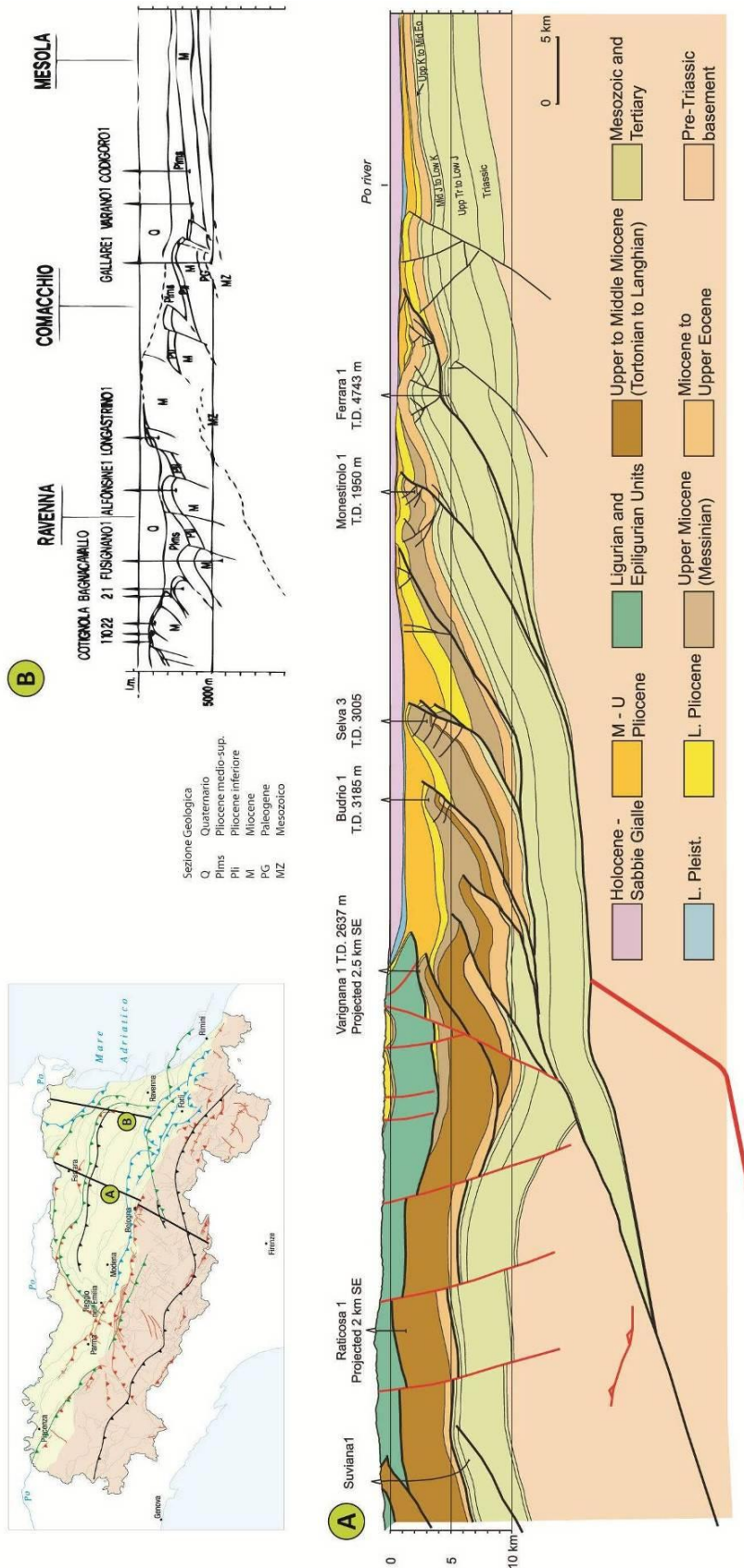


Figura 3-4 - Contesto strutturale della porzione emiliano-Romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) da Pieri e Groppi, 1981 mentre la sezione inferiore (A) da Toscani et al., 2009.

3.3 Evoluzione generale delle successioni del Quaternario Superiore

Pochi chilometri a sud del territorio esaminato, nei pressi della Via Emilia, è attualmente situata la linea che divide la porzione in attivo sollevamento della catena, da quella di pianura in rapido abbassamento. Nonostante questa vicinanza, l'area comunale di Sala Bolognese è già interessata da forte subsidenza, legata sia all'attiva deformazione della parte sepolta della catena appenninica sia alla compattazione delle spesse successioni Plio-Pleistoceniche sottostanti. Durante il Quaternario questa area subsidente ha registrato elevatissimi tassi di sedimentazione, dovuti ai forti apporti terrigeni provenienti dalla vicina catena appenninica. Gli elevati apporti sedimentari operati dai fiumi sono legati alla rapida erosione di litotipi terrigeni quali argille marine plioceniche o complessi caotici Liguridi, spesso poco litificati, che costituiscono in prevalenza la porzione settentrionale della catena appenninica affiorante.

L'architettura deposizionale delle successioni quaternarie è stata, dunque, fortemente influenzata dalla coeva deformazione tettonica, molto attiva in questa porzione del bacino sedimentario Padano, ancora oggi caratterizzata da un'elevata attività sismica.

Nonostante la subsidenza, particolarmente forte nelle aree di sinclinale come quella di Sala Bolognese, le successioni stratigrafiche quaternarie registrano sempre un andamento marcatamente shallowing, evidenziando un'evoluzione da ambienti marini aperti e relativamente profondi a condizioni francamente continentali. Questa evoluzione deposizionale è influenzata dai grandi cicli trasgressivo regressivi. Unità marine si intercalano perciò ripetutamente a corpi continentali, separati da superfici di discordanza stratigrafica. Verso terra, queste stesse fluttuazioni sono registrate dall'alternanza di unità granulometricamente fini di bassa pianura alluvionale e corpi grossolani di sabbie e ghiaie di alta pianure. Le superfici maggiori, spesso associate a discordanze angolari, sono controllate dalle fasi parossistiche di deformazione, che hanno caratterizzato in tempi diversi le strutture tettoniche migranti verso l'avampaese. Superfici minori, ma comunque molto marcate, sono state generate da fluttuazioni climatiche e glacio-eustatiche, con una frequenza temporale intorno ai 100.000 anni. Queste fluttuazioni permettono le suddivisioni stratigrafiche inquadrare dai Sintemi adottati dalla cartografia della Regione Emilia-Romagna e anche qui utilizzati.

Durante le fasi glaciali, il livello del mare era 120-130 m più in basso dell'attuale e grandi ghiacciai riempivano le valli alpine, spesso giungendo in pianura; in Appennino settentrionale esistevano solo piccoli apparati glaciali isolati, come quelli del Corno Alle Scale nell'alto bacino del Reno ma la copertura vegetale era ridotta e le fasce vegetazionali considerevolmente spostate verso quote topografiche inferiori; i fiumi potevano inoltre avere grandi portate, legate a brevi fasi di disgelo. L'insieme di questi fattori facevano sì

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

che i fiumi depositassero in pianura sedimenti assai più grossolani di quelli delle fasi interglaciali, con ghiaie e ciottoli allo sbocco della pianura e grandi volumi di sabbie e sabbie limose attraverso la pianura alluvionale.

I caratteri geolitologici dell'Appennino, la limitatezza dei corpi glaciali e la copertura vegetazionale comunque presente facevano rendevano la sedimentazione ghiaioso-ciottolosa assai meno estesa ai piedi degli Appennini che delle alpi, limitandola essenzialmente a piccole conoidi e corpi allungati di canale, allo sbocco dei maggiori fiumi appenninici, nel caso considerato del paleo-Reno. Queste ghiaie e ghiaie ciottolose sono ben sviluppate all'altezza della Via Emilia, mentre l'area analizzata è sita alla terminazione settentrionale dei corpi più grossolani, che passavano verso valle a sabbie ghiaiose, sabbie e sabbie limose.

Le fasi glaciali terminavano con un rapido scioglimento dei ghiacci montani, con una rapida risalita del livello marino e diffusa trasgressione che, come precedentemente accennato, non raggiungeva più l'area considerata, durante la deposizione del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore.

Le fasi di risalita del livello del mare sono registrate da spesse successioni di limi, con subordinate sabbie ed argille, deposte in ambienti di pianura alluvionale, mentre le fasi di massima trasgressione sono caratterizzate dalla diffusione di argille organiche e torbe, deposte in ampie paludi continentali dolci, alternate ai depositi dei fiumi appenninici. Le fasi di stazionamento alto del livello eustatico sono caratterizzate anche esse da diffuse sabbie e sabbie limose di riempimento degli alvei fluviali, alternate a grossi volumi di argille e limi di piana inondabile. Il tetto dei depositi singlaciali è spesso assai netto, specie nell'area interessata dai sedimenti di Po; meno marcato nell'area oggetto dello studio in cui, comunque, è molto evidente l'alternanza di sedimenti granulari grossolani e coesivi fini, che registra qui l'effetto delle grandi fluttuazioni climatiche ed eustatiche del Quaternario.

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 realizzati per la perforazione dei pozzi per acqua, che seppur meno dettagliate delle prime, offrono informazioni sui corpi sepolti a maggiori profondità.

In relazione ai sistemi d'indagine indiretta, sono stati analizzati log parametrici derivanti da prove penetrometriche statiche (CPT) e con piezocono digitale (CPTU e SCPTU), oltre ai rapporti di prova provenienti da indagini di tipo geofisico come HVSR e MASW.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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

4.1 Indagini di repertorio

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

Aggiungendo alle indagini della banca dati regionale quelle recuperate negli archivi comunali, quelle raccolte presso alcuni geologi liberi professionisti e quelle realizzate per la microzonazione sismica di secondo livello, si sono potute utilizzare ai fini di microzonazione sismica ben 540 prove pregresse di buona affidabilità, suddivise per numero e tipologia così come riportato in Tabella 4-1.

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

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	PRE MS II LIV.	MS II LIV.	PRE MS III LIV.
Prove penetrometriche statiche	CPT	337		11
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	CPTE	5		
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTU	16	3	14
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPT		3	1
Prove penetrometriche dinamiche leggere	DL	2		
Sondaggi a carotaggio continuo	S	19		
Sondaggi a distruzione di nucleo	SD	34		
Pozzi per acqua	PA	34		
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	16	35	2
Multi-channel Analysis of Surface Waves	MASW	3	4	1
	TOTALE	466	45	29

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

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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

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

4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

A supporto degli studi di microzonazione sismica del Comune di Sala Bolognese sono state realizzate diverse campagne di indagini, con lo scopo di caratterizzare dal punto di vista geotecnico e geofisico le aree indicate come suscettibili di trasformazioni urbanistiche e gli ambiti urbani consolidati, estendendo, in alcuni casi, le misure alle aree rurali al fine di migliorare la definizione dei confini delle diverse microzone. In Tabella 4-2 si riporta una sintesi delle indagini direttamente realizzate con finalità di microzonazione sismica, mentre in seguito sono descritte le metodologie di esecuzione e di analisi delle stesse.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
INDAGINI REALIZZATE IN SITU		
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTU	16
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPT	1
Sondaggi a carotaggio continuo	S	1
Sondaggi con prelievo di campioni	SC	1
INDAGINI REALIZZATE IN LABORATORIO		
Analisi su campione	SM	4
Prove di colonna risonante	CR	2

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Prove triassiali CU (consolidate non drenata)	CU	2
TOTALE		27

Tabella 4-2 - Numero e tipologia di indagini realizzate per la microzonazione sismica di terzo livello.

4.2.1 Indagini realizzate in situ

4.2.1.1 Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)

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

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 prove penetrometriche sono state eseguite utilizzando un penetrometro GeoMill da 200 kN di spinta massima, montato su autocarro Mercedes Unimog 4 X 4 e dotato 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 $A_m = 150 \text{ cm}^2$

L'acquisizione dei dati avviene infatti ogni 2 cm di avanzamento della punta; le prove sono state per la maggior parte spinte fino alla profondità di 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 i metodi semplificati.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Le indagini penetrometriche CPTU sono state realizzate in zone d'ambito prive di dati pregressi o in cui erano disponibili dati di scarsa qualità, ed hanno interessato le località riportate in Tabella 4-3.

PROVA	ID_INDP	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.
CPTU 1	037050P59580 CPTU59822	44.584645°	11.250716°	Via Bizzarri, Osteria Nuova - Z.I. Stelloni	21/04/2016	20 m	3,10 m
SCPTU 2	037050P59585 CPTU59827	44.608138°	11.253584°	Via Sant'Antonio, Sala Bolognese	21/04/2016	30 m	2,10 m
CPTU 3	037050P59581 CPTU59823	44.613319°	11.257417°	Via Gramsci, Sala Bolognese	21/04/2016	20 m	1,00 m
CPTU 4	037050P59582 CPTU59824	44.583041°	11.234899°	Via de Gasperi, Osteria Nuova	21/04/2016	25 m	1,85 m
CPTU 5	037050P59583 CPTU59825	44.625531°	11.272701°	Via Fratelli Bastia, Padulle	21/04/2016	20 m	1,60 m
CPTU 6	037050P59584 CPTU59826	44.617349°	11.257989°	Via Gramsci, Sala Bolognese	21/04/2016	20 m	0,90 m
CPTU A	037050P59590 CPTU59833	44.578343°	11.239731°	Via Gramsci, Osteria Nuova	06/09/2016	20 m	2,90 m
CPTU B	037050P59600 CPTU59843	44.588335°	11.238143°	Via Gramsci, Osteria Nuova	24/09/2016	20 m	2,75 m
CPTU C	037050P59591 CPTU59834	44.585516°	11.235366°	Via Gramsci, Osteria Nuova	06/09/2016	20 m	4,50 m
CPTU D	037050P59592 CPTU59835	44.583256°	11.251742°	Osteria Nuova - Z.I. Stelloni	05/09/2016	20 m	1,70 m
CPTU E	037050P59593 CPTU59836	44.581230°	11.253294°	Osteria Nuova - Z.I. Stelloni (BO)	05/09/2016	20 m	1,60 m
CPTU F	037050P59594 CPTU59837	44.582729°	11.248867°	Osteria Nuova - Z.I. Stelloni	05/09/2016	20 m	3,90 m
CPTU G	037050P59595 CPTU59838	44.583879°	11.248982°	Osteria Nuova - Z.I. Stelloni	05/09/2016	20 m	3,80 m
CPTU H	037050P59596 CPTU59839	44.581474°	11.238897°	Osteria Nuova - Z.I. Stelloni	08/09/2016	20 m	2,50 m
CPTU I	037050P59601 CPTU59844	44.611575°	11.253834°	Via Grazia Deledda, Sala Bolognese	24/09/2016	20 m	2,30 m
CPTU L	037050P59602 CPTU59845	44.609934°	11.255540°	Via Dondarini, Sala Bolognese	20/09/2016	20 m	2,65 m
CPTU M	037050P59603 CPTU59846	44.629967°	11.274504°	Via Che Guevara, Padulle	19/09/2016	20 m	2,70 m

Tabella 4-3 - Sintesi dei dati principali associati alle 17 indagini penetrometriche CPTU eseguite.

4.2.1.2 Prove penetrometriche statiche con cono sismico (SCPT)

Rispetto alla prova CPTU, applicando al piezocono elettrico un'asta contenete accelerometri tridimensionali, è inoltre possibile la registrazione di segnali sismici generati artificialmente; la prova SCPT

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

(*Seismic Cone Penetration Test*) è infatti in grado di acquisire, oltre ai parametri già descritti per le CPTU, le velocità delle onde di taglio V_s , una volta che queste siano indotte tramite sistema di energizzazione (martello) montato su di un supporto a lato del penetrometro ed infisso nel terreno.

Anche questa indagine, realizzata presso la località di Sala Bolognese (BO), è stata eseguita mediante penetrometro GeoMill da 200 kN di spinta massima, montato su autocarro Mercedes Unimog 4 X 4 e equipaggiato di piezocono sismico G1- CPL2IN di Tecnopenta con coppia di sensori sismici distanziati di un metro (cfr. ASTM D 7400).

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

PROVA	ID_INDPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.	V_{s30}
SCPT 2	037050P59585 SCPT59828	44.608138°	11.253584°	Via Sant'Antonio, Sala Bolognese	21/04/2016	30 m	2,10 m	203 m/s

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

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

I valori parametrici riportati nei rapporti di prova allegati allo studio, sono stati utilizzati anche per eseguire la verifica del potenziale di liquefazione mediante metodi semplificati (paragrafo 7.2.1).

4.2.1.3 Sondaggi a carotaggio continuo (S) con prelievo di campioni (SC)

Per la caratterizzazione "diretta" delle litologie è stato eseguito 1 sondaggio a carotaggio continuo spinto alla profondità di 20 m (Tabella 4-5). Il carotaggio è stato eseguito a rotazione verticale a secco con recupero integrale e rappresentativo dei terreni attraversati, comunque non inferiore all'90 %.

Sono stati utilizzati carotieri semplici di diametro 101 mm e lunghezza 1500 mm, con corone e scarpe taglienti al widia, azionati ad aste di manovra di diametro 76 mm. Le pareti del foro sono state sostenute da tubazione metallica provvisoria di diametro 127 mm, infissa con circolazione di acqua potabile, senza l'ausilio di additivi di alcun tipo.

Nel foro di sondaggio sono stati prelevati campioni indisturbati per l'esecuzione delle prove di laboratorio geotecnico previste (cfr. paragrafo 4.2.2).

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

I campioni indisturbati sono stati prelevati con campionatori a pareti sottili di acciaio inox tipo Shelby di diametro 88.9 mm, tramite infissione a pressione della fustella.

Le caratteristiche tecniche e meccaniche della sonda ATLAS A 52, impiegata per la perforazione sono seguenti:

- Coppia torcente: 1080 kgm
- Velocità di rotazione: 0 - 800 rpm
- Corsa continua: 350 cm
- Spinta: 5000 kg
- Trazione: 5000 kg
- Portata argano: 3000 kg
- Pompa fanghi: C.M.O. ps 60/2 da 200 l/min

PROV A	ID_INDP	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.	N. CAMP.
S1	037050P59604 S59847	44.345563°	11.142994°	Via Antonio Labriola, Stelloni	07/09/2016	20 m	2,1 m	6

Tabella 4-5 - Sintesi dei dati principali associati al sondaggio a carotaggio continuo S1 eseguito.

4.2.2 Indagini realizzate in laboratorio

Dal sondaggio a carotaggio continuo S1, sono stati prelevati quattro campioni rimaneggiati (CR 1, CR 2, CR 3, CR 4) e due campioni indisturbati (SH 1, SH 2) di terreno a profondità diverse; i campioni CR 2 e CR 3 sono stati aperti e descritti in laboratorio, ma non sono stati sottoposti ad alcuna prova.

Sui rimanenti quattro campioni invece, sono state eseguite analisi granulometriche (norma A.S.T.M. D 422) e limiti di Atterberg (norma UNI CEN ISO/TS 17892-12). Infine sui due campioni indisturbati SH 1 e SH 2 sono state effettuate prove di umidità (UNI EN ISO 17892-1), massa volumetrica apparente (UNI EN ISO 17892-2), colonna risonante (A.S.T.M. D 4015) e triassiale - consolidata non drenata (A.S.T.M. D 4767).

Nella Tabella 4-6 sono state sintetizzate le tipologie di prova eseguite su ciascun campione, per ognuno dei quali è indicata anche la profondità di prelievo.

CAMPIONE	PROF. DI PRELIEVO	LITOLOGIA	ANALISI GRAN.	LIMITI ATTERBERG	UMIDITA'	MASSA VOLUMICA APPARENTE	COLONNA RISONANTE CR	TRIASSIALE CU
S 1 CR 1	3 - 5 m	Sabbia medio fine limosa	X	X				

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

S 1 SH 1	6 - 6,60 m	Limo con argilla sabbioso	X	X	X	X	X	X
S 1 CR 4	14,75 - 15,50 m	Sabbia medio fine	X	X				
S 1 SH 2	17,80 - 18,40 m	Limo con argilla con tracce di sostanza organica e legno	X	X	X	X	X	X

Tabella 4-6 - Sintesi delle prove di laboratorio eseguite sui campioni di terreno prelevati nel sondaggio S 1.

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

4.2.2.1 Prova di colonna risonante (CR)

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

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

Nel corso di prove di RC vengono misurate la frequenza di risonanza e la rotazione del provino. Dal valore della prima grandezza è possibile risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio e quindi al modulo G ; dalla misura delle rotazioni del provino si ricava la deformazione tangenziale, γ . Poiché la prova di RC opera alle frequenze proprie di un provino cilindrico, le frequenze di prova risulteranno relativamente alte (10 ÷ 100Hz).

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

La frequenza di eccitazione viene fatta variare finché il sistema non raggiunge la condizione di risonanza. Quest'ultima può essere individuata come quel valore della frequenza in corrispondenza del quale si ha: angolo di fase tra eccitazione torsionale e rotazione del sistema pari a $\pi/2$ e massima ampiezza della risposta.

In condizioni di risonanza esiste una relazione fra la velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s , e la frequenza fondamentale, f_n , del tipo $V_s = f(f_n, h)$ dove: h è l'altezza del provino e f una funzione che dipende dalle condizioni di vincolo del provino. Poiché al variare della frequenza varia la risposta del provino (valutata sia in termini di accelerazione che di rotazione) e poiché la frequenza fondamentale è

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

quella in corrispondenza della quale la risposta è massima, disponendo sul provino un accelerometro, è possibile identificare la condizione di risonanza relativamente al primo modo di vibrazione. Nota la densità del provino si può risalire al modulo di taglio, G , attraverso la già citata relazione $G = \rho v_s^2$. Mediante l'apparecchiatura di RC è possibile determinare il rapporto di smorzamento D , agendo in due modi, o considerando il fattore di amplificazione in risonanza (*steady state method*), oppure, interrompendo l'eccitazione e misurando il decadimento delle oscillazioni libere (*amplitude decay method*).

I risultati sperimentali ottenuti nel corso di prove RC vengono interpretati facendo riferimento alla teoria di propagazione delle onde di taglio in un mezzo elastico lineare per determinare il modulo di taglio G , oppure, alla teoria delle oscillazioni libere, o forzate, in un mezzo elasto-plastico per determinare il rapporto di smorzamento D .

4.2.2.2 Prova Triassiale Consolidata - Non Drenata (CU)

La prova consiste nella determinazione dei parametri di resistenza in termini di tensioni totali ed efficaci di un campione di terreno sottoposto a condizioni di sollecitazione triassiale; la prova può inoltre essere utilizzata per la determinazione dei parametri di deformabilità non drenati. Questa metodologia si applica tipicamente ai terreni limoso argillosi.

La prova viene eseguita su tre provini cilindrici, di diametro non inferiore a 35 mm e rapporto altezza/diametro compreso tra 2 e 2.5, preparati con apposito fustella campionatrice a partire da campioni indisturbati; per materiali poco consistenti si potrà infiggere a pressione direttamente nel campione da analizzare apposita fustella calibrata. Il diametro dei provini sarà in ogni caso maggiore di 6 volte il diametro massimo delle particelle costituenti il materiale in prova.

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

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Fase di consolidazione: la fase di consolidazione viene condotta incrementando la pressione di cella fino a raggiungere il prefissato valore della pressione di consolidazione da adottare per ciascun provino. Dopo la stabilizzazione della pressione interstiziale conseguente all'incremento tensionale applicato si avvia la fase di consolidazione consentendo il drenaggio e registrando le variazioni di volume ed eventualmente le variazioni di pressione interstiziale in funzione del tempo.

Dal diagramma variazione di volume - logaritmo del tempo, o in alternativa variazione di volume - radice quadrata del tempo, si determinerà il tempo di fine consolidazione t_{100} che sarà assunto come parametro base per il calcolo della velocità di rottura.

Fase di rottura: durante la fase di rottura, che avviene in condizioni di drenaggio impedito si incrementa progressivamente lo sforzo deviatorico, mantenendo fissa la pressione di cella, fino ad ottenere deformazioni assiali non inferiori al 15%. Al fine di assicurare una uniforme distribuzione ed equalizzazione della sovrappressione idraulica conseguente l'incremento tensionale, la velocità di deformazione v_r viene stabilita sulla base del t_{100} di fine consolidazione e della deformazione attesa a rottura ϵ_r secondo la seguente equazione:

$$v_r = (H_c * \epsilon_r) / (1,5 * t_{100})$$

5 Modello del sottosuolo

Le prime centinaia di metri del sottosuolo indagato sono interamente costituite da spesse successioni terrigene quaternarie non litificate, formate da sedimenti depositi in ambienti di pianura alluvionale e deltizia. Manca quindi il contatto netto fra unità rocciose rigide antiche e depositi sciolti di copertura che ha permesso di definire il concetto di substrato rigido in microzonazioni di aree collinari e montuose, come, ad esempio, nel caso dell'Abruzzo. Risulta quindi necessario definire con precisione i concetti di substrato e terreni di copertura utilizzati in questo lavoro, rispetto a quanto previsto negli standard emanati dalla commissione tecnica di microzonazione sismica (ICMS, 2008). Le unità di sottosuolo sono caratterizzate da un progressivo aumento della rigidità e della velocità di propagazione delle onde sismiche, causata da fenomeni come il costipamento e cementazione dei sedimenti granulari ed il consolidamento dei litotipi coesivi, legati all'espulsione di fluidi dal sottosuolo, come acqua e metano biogenico. L'aumento della rigidità nel sottosuolo si attua in modo progressivo, ma non spazialmente uniforme, dato che superfici di non deposizione e discordanza stratigrafica corrispondano a bruschi aumenti di questo parametro meccanico, come dimostrano le misure di V_s eseguite in pozzo durante gli studi di Microzonazione dell'Ordinanza 70/2012 e quelle profonde realizzate a supporto dello studio di microzonazione di terzo

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

livello del Comune di Mirabello (Minarelli *et al.* 2016). Tali superfici corrispondano spesso ai limiti disconformi fra Sintemi e Subsintemi e frequentemente a riflettori sismici e passaggi fra unità sismo-stratigrafiche.

Per l'individuazione delle profondità dei limiti discordanti e per la loro classificazione sono stati utilizzati diversi metodi geofisici, interpretati nel contesto stratigrafico regionale del sottosuolo. I principali contrasti di impedenza associati a tali limiti, sono stati identificati mediante misure di microtremore sismico che hanno permesso di ricostruire la variazione del rapporto tra le componenti orizzontali e verticali (H/V o HVSR) alle diverse frequenze.

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

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

Questo limite stratigrafico (cfr. paragrafo 5.2.2) è posto ad una profondità variabile tra i 130 e i 170 m e corrisponde alla base del Subsistema di Bazzano (AES₆). La differenza di profondità è stata causata dalla deformazione tettonica che ha indotto un maggior abbassamento della superficie in corrispondenza della zona assiale della sinclinale.

La base del Subsistema di Bazzano non può, però, essere considerata come *bedrock sismico*. Valori di velocità delle onde di taglio acquisiti in pozzo mediante tecniche cross-hole e down-hole (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016; Minarelli *et al.*, 2016), dimostrano, infatti, come le unità stratigrafiche della successione del Quaternario superiore siano caratterizzate, in aree di bassa pianura alluvionale, da valori di Vs in media inferiori ai 400 m/s, e quindi non compatibili con quelli caratteristici del "*bedrock sismico*" di riferimento per analisi di risposta sismica locale. Tale livello di riferimento deve, quindi, essere ricercato a profondità più elevate, associate a frequenze di picco più basse.

Sulla base delle misure disponibili e dei dati noti sul contesto stratigrafico regionale risulta plausibile che un picco meno pronunciato a più bassa frequenza rilevato in diverse misure a circa 0,25 Hz (vedi par. 6.1) sia correlabile con il tetto dei depositi del Quaternario Marino (QM), che possono essere quindi considerati come *bedrock sismico* dell'area di studio.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Unità Stratigrafiche		Sequenze Deposizionali	Età (milioni di anni)	Scala Cronostratigrafica	Unità Idrostratigrafiche		
					Gruppo Acquifero	Complesso Acquifero	Sistema Acquifero
SUPERSINTEMA EMILIANO ROMAGNOLO	SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE	Qc ₂	~ 0.12	PLEISTOCENE SUPERIORE-OLOCENE	A	A1	
						A2	
						A3	
						A4	
	SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	Qc ₁	~ 0.35-0.45	PLEISTOCENE MEDIO	B	B1	
						B2	
						B3	
						B4	
SABBIE DI IMOLA	Qm	Qm _{3''}	~ 0.65	C	C1		
		Qm _{3'}			C2		
GRUPPO DEL SANTERNO	P2	Qm ₂	~ 0.80		C3		
		Qm ₁	~ 1.0		C4		
			~ 2.2		C5		
			~ 3.3-3.6				
			~ 3.9	PLEISTOCENE INFERIORE			
				PLIOCENE MEDIO-SUPERIORE			
				PLIOCENE INFERIORE-MIOCENE			

— Discontinuità principale — Discontinuità minore

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

5.1 Substrato

Nell'area di studio, si attribuiscono al "substrato" tutte le unità sottostanti il Supersistema Emiliano-Romagnolo (Figura 5-1), che in questa area si sono deposte interamente in ambienti marini. Sopra i depositi prevalentemente carbonatici mesozoici e paleogenici, poggiano potenti successioni, in gran parte terrigene, del Neogene. Queste ultime sono qui costituite, fino a tutto il Miocene, da fanghi deposti in ambienti marini profondi anche anossici, ricoperti da spesse unità torbiditiche plioceniche. Queste arenarie torbiditiche di mare profondo sono coeve ed analoghe a quelle che ospitano la parte superiore dello storico giacimento di petrolifero di Cortemaggiore (PC) e sono state quindi oggetto di ricerche per idrocarburi in

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

aree contigue a quella comunale qui considerata (es. pozzi Case Pinelli, Crevalcore, Castelfranco Emilia). Le unità plioceniche sono state progressivamente coinvolte nella rapida deformazione tettonica compressiva di questa porzione dell'Avanfossa appenninica, deformazione che ne ha fortemente influenzato spessori e ambienti deposizionali. Questi movimenti hanno indotto diffuse superfici di discordanza stratigrafica e lacuna (Ghielmi *et al.*, 2010), particolarmente marcate nelle aree corrispondenti ad anticlinali sepolti, come quelle settentrionali di Mirandola e Casaglia e in quelle meridionali della fascia pedecollinare e della Via Emilia. Fra questi fasci anticlinali complessi si sviluppa la profonda sinclinale di Sala Bolognese, dove gli spessori delle sequenze Plioceniche superano i 2000 m. Il Pliocene è dominato da potentissime successioni di torbiditi di tipo flyshoide, deposte in ambienti di mare profondo ed alimentate da sabbie di provenienza alpina (Ghielmi *et al.*, 2010). Seguendo la terminologia AGIP, queste successioni torbiditiche sono ascrivibili alle Formazioni di Canopo, Porto Corsini e Porto Garibaldi. Condizioni di mare profondo permanevano in questa area anche nella parte iniziale del Quaternario che ha poi registrato un'evoluzione marcatamente "shallowing", fino allo sviluppo di condizioni di pianura alluvionale.

5.1.1 Quaternario Marino (QM)

Nell'area di sinclinale soggetta a forti apporti terrigeni, la sedimentazione torbiditica di mare profondo proseguì anche durante la prima parte del Quaternario, con la deposizione della Formazione di Carola (Ghielmi *et al.*, 2010). Il Pleistocene è stato caratterizzato dal perdurare di una significativa deformazione di origine tettonica e da una rapida evoluzione degli ambienti di sedimentazione da condizioni di mare profondo a sistemi costieri. Questa successione non è direttamente raggiunta da sondaggi profondi nel Comune di Sala Bolognese, ma è conosciuta dall'interpretazione dei numerosi profili sismici disponibili nell'area (Figura 5-2) e da sondaggi di aree limitrofe. Nella pianura bolognese e ferrarese, infatti, i depositi appartenenti all'unità del Quaternario Marino (QM) sono raggiunti solo da un limitato numero di sondaggi stratigrafici descritti in modo sufficientemente accurato e realizzati per fini di ricerca di idrocarburi. Facies deposizionali analoghe, anche non strettamente coeve, sono studiabili in affioramento nella fascia collinare ai piedi dell'Appennino, ove queste unità sono state innalzate dalla deformazione compressiva tardo-quaternaria.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

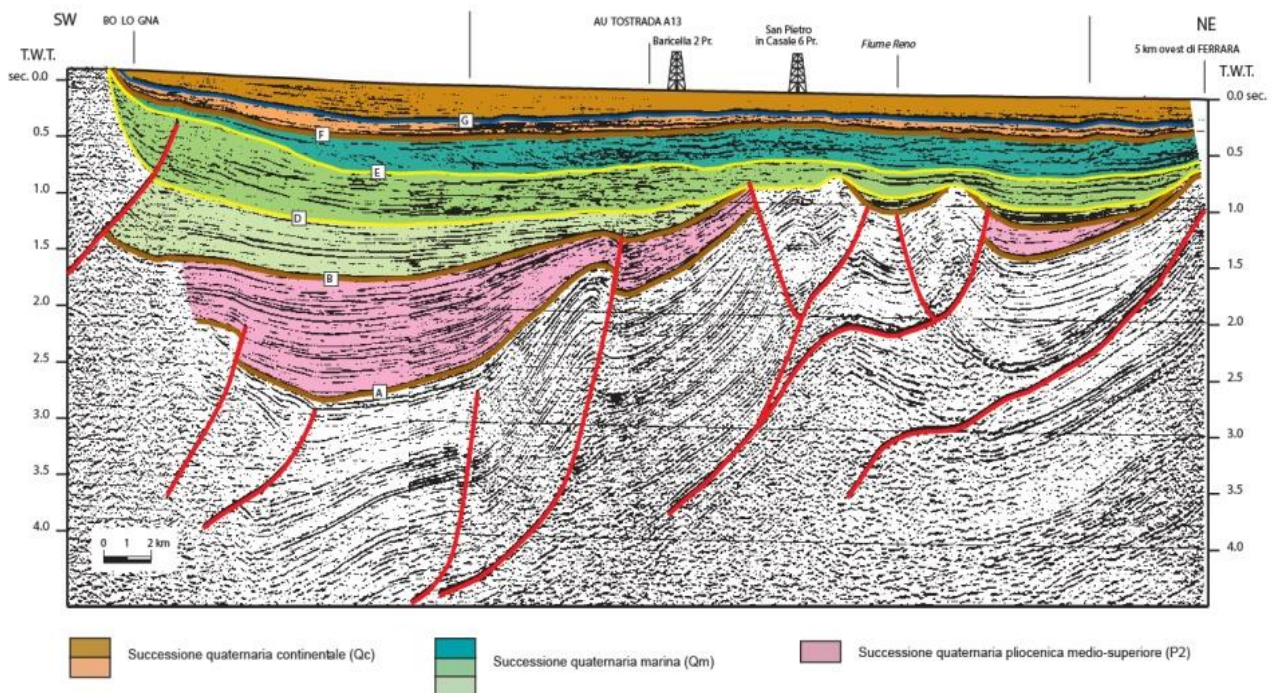


Figura 5-2 Profilo sismico interpretato tratto da Riserve Idriche Sotterranee della Regione Emilia- Romagna (RER-ENI/AGIP, 1998) passante pochi chilometri ad est dell'area di studio.

Ai sedimenti sabbiosi di origine torbiditica della Formazione di Carola, seguono argille a foraminiferi platonici, qui non particolarmente sviluppate e spesse, che passano superiormente a facies di prodelta e sabbie di fronte deliziosa. Queste sequenze si sono deposte nella prosecuzione occidentale dell'antico Mare Adriatico, soggetta a forte subsidenza ed apporto sedimentario. Sedimenti argillosi analoghi, anche se spesso più antichi, affiorano estesamente nella fascia pedecollinare appenninica, originando frequentemente morfologie calanchive. Questi sedimenti argillosi erano tradizionalmente conosciuti come Calabriano, talvolta anche impropriamente come Piacenziano, mentre sono oggi inquadrati nelle unità litostratigrafiche affioranti della Formazione di Castell'Arquato, Argille di Riolo Terme ed Argille di Terra del Sole (Ricci Lucchi *et al.*, 1982). Nel sottosuolo litologie analoghe sono invece riferite, dalla terminologia litostratigrafica dell'AGIP, alla Formazione di Ravenna, da non confondersi con l'omonimo recente Subsistema, istituito dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. I corpi sabbiosi sono spesso, invece, conosciuti come Sabbie Gialle (*Auctt.*) o Sabbie di Imola (Amorosi *et al.* 1998a), mentre nella stratigrafia del sottosuolo erano frequentemente riferite dall'AGIP alle Sabbie di Asti, che in senso stretto hanno però un'età più antica, essendosi generalmente sedimentate durante il Pliocene. Sistemi pliocenici sostanzialmente analoghi affiorano in modo spettacolare nelle prime colline bolognesi,

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

con le litofacies argillose e sabbioso-conglomeratiche della Formazione del Monte Adone. Le sabbie di ambiente deltizio sono in forte evidenza morfologica nel Contrafforte Appenninico.

Nel sottosuolo della regione considerata, i profili sismici mostrano marcate cliniformi, che corrispondono alle clinostratificazioni prodotte dalla progradazione verso nord di un fronte deltizio (Figura 5-2). Nella parte sommitale dell'Unità del Quaternario Marino questo corpo deltizio che progradava verso nord interagisce ed è in parte ricoperto da corpi sabbiosi provenienti da settentrione.

Il contesto paleogeografico dimostra chiaramente come il corpo di delta progradante verso nord possa essere attribuito all'antico Reno che per tutto il Quaternario sfociava in mare e poi in pianura nell'attuale posizione prossima a Casalecchio di Reno. Il corpo che avanzava da ovest e interagiva, in una fase tardiva, con il delta del Reno è molto probabilmente da attribuirsi al delta del Po, che avanzava verso oriente sull'antico golfo dell'Adriatico. Entrambi i corpi deltizi sono limitati al tetto da una superficie di discordanza stratigrafica che marca la base del Supersintema Emiliano Romagnolo. Questa superficie è indicativamente data intorno ai 650.000 anni fa (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998). I corpi deltizi sottostanti la discordanza si sono invece depositi tra i 900.000 e 700.000 anni, opinione condivisa anche dalle ricostruzioni paleogeografiche proposte da Ghielmi *et al.* 2010. In questa fase, il delta del Reno si sviluppava a pochi chilometri dalla uscita del fiume da aree appenniniche con significativi gradienti topografici, per cui l'area era direttamente soggetta ad apporti di ghiaie e ciottoli. Corpi di sabbie ghiaiose e ghiaie conglomeratiche sono conosciute del sottosuolo, sia a ovest di Bologna che nel sondaggio profondo effettuato per la ricerca di idrocarburi nei pressi di Castelfranco Emilia. Anche i caratteri dei riflettori sismici dei profili sono ben compatibili con la presenza, nell'area, di corpi deltizi sabbioso-conglomeratici. Tutto questo fa ritenere che la parte deltizia sommitale del Quaternario Marino sia qui formata da sabbie, sabbie ghiaiose e conglomerati.

Il tetto del Quaternario Marino coincide con la superficie di discordanza stratigrafica sopra descritta, indotta da una fase di deformazione compressiva di questa porzione di avanfossa. La discordanza di origine tettonica individuabile nel sottosuolo dell'area indagata, appare assai più marcata nelle aree di anticlinale sviluppate più a nord, in corrispondenza di Cento-Renazzo e, in modo ancora più netto, a Casaglia, per poi passare in condizioni di paraconcordanza nelle aree di avampaese non raggiunte dalla deformazione compressiva appenninica. La superficie di discordanza è associata ad un contrasto di impedenza acustica e ad un cambio di litologia e facies sedimentarie, con il passaggio da facies deltizie grossolane a prevalenti depositi fini di pianura alluvionale, non litificati, verosimilmente caratterizzati da minori velocità di propagazione delle onde sismiche. Questo netto cambiamento delle proprietà fisiche associate alla

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

propagazione delle onde sismiche ha suggerito di porre il tetto del substrato sismico in corrispondenza di questa discordanza, come già accennato.

5.2 Terreni di copertura

La successione quaternaria continentale inquadrata nel Supersistema Emiliano-Romagnolo è formata da sedimenti non litificati e poco consolidati, qui attribuiti, in base alle proprietà elasto-meccaniche ed alla posizione stratigrafica, ai “terreni di copertura” (cfr. parte introduttiva capitolo 5).

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

5.2.1 Supersistema Emiliano-Romagnolo

La discordanza regionale sopradescritta è stata scelta come limite inferiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo, dominato, in questa area, da depositi fluviali continentali, che verso est e nord passano a depositi costieri e marini.

La dinamica deposizionale e quindi l'architettura stratigrafica del Supersistema Emiliano-Romagnolo è stata fortemente influenzata dalle ampie variazioni eustatiche, legate a fluttuazioni climatiche fra fasi glaciali ed interglaciali, che hanno interessato tutto il Quaternario.

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo registra la prosecuzione di un'evoluzione complessivamente regressiva, che porta da condizioni costiere alle attuali condizioni francamente continentali. L'area, inizialmente situata nella fascia di interazione fra i sedimenti di provenienza appenninica e quelli del Po, vede la progressiva progradazione dei sistemi deposizionali alluvionali appenninici da SO verso NE ed il conseguente arretramento dei depositi fluvio-deltizi e costieri.

Tale progradazione mostra due fasi di sviluppo distinte a cui corrispondono i due Sistemi nei quali il Supersistema è stato suddiviso. La parte inferiore del Supersistema (Cfr. Sistema Emiliano Romagnolo Inferiore - AEI) è costituita da alternanze cicliche di depositi fini e grossolani, prevalentemente sabbie, riferibili ad associazioni di facies di piana costiera e deltizia e piana alluvionale.

La parte superiore del Supersistema (Cfr. Sistema Emiliano Romagnolo Superiore - AES) è costituita di depositi alluvionali dei fiumi Reno, Lavino, Samoggia e Ghironda appartenenti all'intervallo Pleistocene medio - attuale, approfonditamente descritti nei paragrafi seguenti. Il Sistema è costituito dall'alternanza ciclica di argille organiche, limi, sabbie e ghiaie di ambiente alluvionale, con facies di conoide distale, piana inondabile, canale, argine e rotta fluviale.

5.2.2 Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)

Il Supersintema Emiliano-Romagnolo è bipartito in Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e Superiore (AES) da una superficie di discordanza, influenzata dalla deformazione tettonica delle Pieghe Ferraresi sepolte, fra 450.000 ed 350.000 anni fa circa. In aree di culminazione anticlinale, la superficie di discordanza può sovrapporsi direttamente al Pliocene o addirittura al Miocene come nel caso di Casaglia, mentre nell'area in esame è meno marcata e si sviluppa all'interno di depositi continentali di provenienza esclusivamente appenninica.

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore è organizzato in cinque cicli deposizionali trasgressivo-regressivi, con spessori che possono raggiungere i 55-65 m nel settore assiale della sinclinale, come ad esempio a Sala Bolognese.

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

Nell'ambito del Progetto di Cartografia Geologica Nazionale, i cinque cicli che compongono il Sintema sono stati suddivisi in 2 cicli inferiori definiti rispettivamente Subsintema di *Liano* (AES₄) e Subsintema di *Torre Stagni* (AES₅) (cfr. AES indifferenziato - Foglio 204 Portomaggiore), ed in 3 cicli superiori, inquadrati nei Subsintemi di *Bazzano* (AES₆), di *Villa Verucchio* (AES₇) e di *Ravenna* (AES₈). Nella porzione più recente del Subsintema di Ravenna, è stata ulteriormente distinta l'Unità di Modena (AES_{8a}) di età post-romana.

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

Questi ultimi sono i meglio definiti a scala regionale dato il numero relativamente alto di indagini che li attraversa, 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

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

202-203-204). L'articolazione stratigrafica dei tre Subsistemi superiori è perciò conosciuta con maggiore dettaglio. La base di ciascun Subsistema, corrisponde ad un paleosuolo carbonatico relativamente maturo sviluppato su depositi singlaciali grossolani. La fase di massima ingressione della linea di costa, che non ha mai però raggiunto l'area in questione, è qui registrata da depositi palustri dulcicoli di pianura alluvionale, ricchi di argille organiche e torbe. La fase di stazionamento alto è invece caratterizzata da sabbie di canale fluviale intercalate a potenti successioni di fanghi di piana interalvea. La parte superiore dei Subsistemi AES₆ e AES₇ è caratterizzata da sabbie grossolane di media pianura alluvionale, che passano lateralmente a sedimenti fini di pianura fredda, diffusi soprattutto nelle porzioni settentrionali. Spostandosi verso aree meridionali, la parte superiore è dominata da corpi ghiaioso-sabbiosi di riempimento di canale fluviale, che registrano lobi di conoide alluvionale ad alimentazione appenninica.

L'organizzazione stratigrafica delle prime decine di metri di sottosuolo è particolarmente rilevante sia ai fini geotecnici sia per quelli di microzonazione sismica. La legislazione vigente impone, infatti, di valutare la velocità delle onde di taglio (Vs) nei primi 30 m di sottosuolo, qui costituiti da sedimenti del Pleistocene terminale e dell'Olocene, intervalli di tempo che corrispondono a fasi dell'ultima glaciazione ed al successivo periodo post-glaciale. La porzione singlacial è ascritta al Subsistema di Villa Verucchio (AES₇), mentre la parte più recente è attribuita al Subsistema di Ravenna (AES₈), di cui è affiorante solo l'intervallo di età post-romana, attribuito all'Unità di Modena (AES_{8a}).

In entrambi i Subsistemi, si osserva un'importante variazione laterale di facies sedimentarie e caratteri granulometrici e geochimico-mineralogici. La parte orientale del territorio comunale è infatti formata dai sedimenti del fiume Reno, più grossolani, mentre la parte occidentale è costituita da sedimenti più fini, deposti da fiumi minori, come Samoggia, Lavino e Ghironda, che si originano nei piccoli bacini imbriferi delle contigue colline.

Il Subsistema di Villa Verucchio (AES₇) è costituito, verso sud-est, da corpi allungati di ghiaie di riempimento di canale del Reno, che passano rapidamente verso nord a sabbie grossolane e sabbie ghiaiose, mentre lateralmente si sviluppano corpi sabbioso-limosi di argine. La porzione occidentale dello stesso Subsistema è invece formata da corpi nastriformi di sabbie di riempimento di canale fluviale minore, intercalati lateralmente e verticalmente a corpi di limi e limi sabbiosi. Questi sedimenti formano il complesso acquifero "A1" (cfr. Figura 5-1) descritto nello studio sulle riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna (RER & ENI-Agip, 1998).

Il Subsistema di Ravenna (AES₈) è formato prevalentemente da sedimenti fini, spesso deposti in ambienti umidi, stagni e paludi di acqua dolce. La parte inferiore è però più ricca di limi, che possono mostrare

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

paleosuoli carbonatici, assenti nella porzione superiore dell'unità. All'interno di questi corpi di piana interalvea sono presenti corpi sabbiosi nastriformi, depositi dal Reno e da altri fiumi appenninici.

Anche qui si ritrova marcata la variazione laterale di facies, con la porzione orientale dominata dalle sabbie e sabbie fini limose deposte dal fiume Reno. I corpi sabbiosi di alveo passano lateralmente a sabbie limose e limi di argine, particolarmente ampi, soprattutto nella parte nord-orientale dell'area. Ai corpi di argine e di canale sono intercalati da argille limose e argille di piana inondabile e depressione interalvea.

Nella porzione occidentale del territorio comunale, lo stesso Subsintema è in massima parte formato da argille limose, argille, argille organiche e torbe, deposte in diffusi ambienti umidi. Il contenuto in limo è spesso non trascurabile, come la diffusa presenza di resti vegetali, mentre sono assenti i paleosuoli. Ai sedimenti argillosi si intercalano corpi allungati di sabbie limose, limi sabbiosi e limi, di riempimento di canale fluviale minore, affiancati da ampi corpi di limi e limi argillosi di argine naturale, che sfumano lateralmente nei sedimenti di piana inondabile, palude e depressione interalvea.

I terreni affioranti appartengono, infine, alla porzione più recente dell'Olocene, di età post-romana, e sono ascritti all'Unità di Modena (AES_{8a}). Questi sedimenti sono stati depositi in epoca medievale e moderna sino all'interruzione della dinamica deposizionale, dovuta all'innalzamento di arginature fluviali e alla completa artificializzazione degli alvei. Il territorio è dominato da sedimenti fangosi depositi in aree di depressione interalvea e palude dulcicola, intercalati da corpi sabbiosi allungati appartenenti a canali fluviali, affiancati dalle larghe fasce di limi di argine naturale. Come nel sottosuolo, la parte orientale del territorio è formata dai estesi corpi di sabbie del Reno, mentre la parte centro-occidentale è ricca di depositi interalvei, solcati dai corpi sabbioso-limosi minori del Samoggia, Lavino e Ghironda.

Una più completa descrizione delle parti affioranti dell'Unità di Modena è fornita nel paragrafo 8.2.3 che analizza in dettaglio la carta geologico-tecnica realizzata nell'ambito dello studio di microzonazione sismica.

6 Interpretazioni e incertezze

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

6.1 Frequenza naturale dei terreni (f_0) e bedrock

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

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

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

Al fine di ridurre gli effetti appena descritti e limitare le incertezze indotte alle misure, sono stati utilizzati alcuni accorgimenti durante le registrazioni dei microtremori, eseguite nel 2014 per gli approfondimenti di Microzonazione Sismica di secondo livello.

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

Considerando le incertezze e le problematiche esposte, è stato necessario realizzare ben 48 registrazioni prima di ottenere i risultati delle 35 indagini di sismica passiva a stazione singola proposte a supporto dello studio di microzonazione. In fase di elaborazione dei dati, infatti, si è potuta accertare la presenza di diffusi disturbi a varie frequenze, di chiara origine antropica, che hanno portato a scartare alcune delle misure realizzate.

Nell'area settentrionale dell'abitato di Padulle, a prevalente vocazione industriale, è stato necessario ripetere alcune misure a causa degli importanti disturbi connessi alle attività produttive. Le perturbazioni che hanno, invece, determinato la ripetizione di diverse misure nell'abitato di Sala Bolognese sono imputabili ai numerosi transienti legati al traffico urbano lungo la strada provinciale e alle condizioni praticamente ventose della giornata in cui sono state effettuate alcune registrazioni. Le poche misure replicate ad Osteria Nuova erano invece affette da disturbi legati al traffico ferroviario.

L'assenza di misure in piccole zone di ambito, considerate comunque marginali e periferiche (Tavola 3), è stata determinata dall'impossibilità di accedervi.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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

Tutte le acquisizioni hanno avuto durata di 30 minuti e sono state analizzate con finestre di 60 secondi, che hanno permesso di “validare” i picchi a più bassa frequenza (compresi tra 0,2 e 0,3 Hz) individuati dalla alcune delle misure eseguite in quanto, per soddisfare i criteri “Sesame” (AA.VV., 2004), dovrebbe essere rispettata la condizione per cui $f_0 > 10 / L_w$ (lunghezza finestra). Bisogna inoltre ricordare che i picchi di H/V a frequenze inferiori a 0,5 Hz possono essere influenzati dalle condizioni meteorologiche che li rendono in generale più o meno visibili (con ampiezza più o meno pronunciata) se le misure sono realizzate in tempi diversi (Albarelo e Castellaro, 2011).

Le numerose misure di rumore ambientale eseguite per gli approfondimenti di microzonazione e distribuite su tutto il territorio comunale, hanno permesso la redazione di una carta di dettaglio delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3, paragrafo 8.3), che nell’area comunale variano tra 0,55 e 0,75 Hz, con ampiezza dei picchi compresa tra 3 e 4. Confrontando i dati geofisici con le sezioni stratigrafiche disponibili (v. Allegato 1) è stato possibile associare i contrasti di impedenza alle discontinuità stratigrafiche che separano le principali unità riconosciute a scala regionale (Figura 5-1).

Questa analisi comparata ha permesso di attribuire il maggiore contrasto di impedenza sopra descritto, alla base del complesso acquifero A2 (v. Allegato 1 – sezione geologica D-D’) che corrisponde alla base del Subsistema AES6 (Figura 5-1), datata 230.000- 250.000 anni (RER & ENI-Agip, 1998). L’andamento e la posizione stratigrafica di tale superficie, evidenziato nelle sezioni realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1), sono stati ricostruiti mediante correlazioni su scala regionale di sondaggi stratigrafici profondi. Secondo le sezioni geologiche disponibili la profondità della suddetta, superficie che origina il contrasto di impedenza visibile tra 0,55 e 0,75 Hz, varia dai 130 m delle aree meridionali e settentrionali, ai 170 m nelle porzioni centrali del territorio comunale. Rispetto all’attendibilità di queste profondità si tenga presente che nell’area di studio solamente un pozzo raggiunge tale superficie (Tavola 2) e di conseguenza il vincolo stratigrafico della sua superficie risulta alquanto teorico. Il trend di variazione delle frequenze fondamentali acquisite (Tavola 3), caratterizzate da valori minimi nella parte centrale del territorio comunale, ben riflette invece l’andamento della base di AES6 (v. Allegato 1 – sezione geologica D-D’) in accordo con quello della struttura sinclinalica, che mostra il depocentro proprio in corrispondenza dei valori più bassi di f_0 .

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Diverse misure mostrano però anche altri picchi, in genere meno marcati, a frequenze molto inferiori (intorno a 0,25 e 0,15 Hz) (Figura 6-1). In base ai dati stratigrafici disponibili ed ai valori di Vs profondi, per analoghe unità stratigrafiche della pianura emiliana, si può ragionevolmente supporre che il primo dei picchi presenti a più bassa frequenza (0,25 Hz), possa corrispondere al passaggio tra i depositi fini di pianura alluvionale dell'unità AEI e quelli deltizi grossolani del Quaternario Marino (paragrafo 5.1). È ragionevole supporre che quest'ultima unità, il cui tetto, nell'area di Sala Bolognese dovrebbe essere presente a profondità indicativamente comprese tra 500 e 650 metri, possa rappresentare il bedrock sismico dell'area, in analogia con quanto individuato in altre aree della pianura emiliano-romagnola. Il picco spesso visibile a frequenza ancora inferiore (0,15 Hz) può essere invece originato da un contrasto di impedenza presente all'interno dei depositi ghiaiosi del Quaternario Marino.

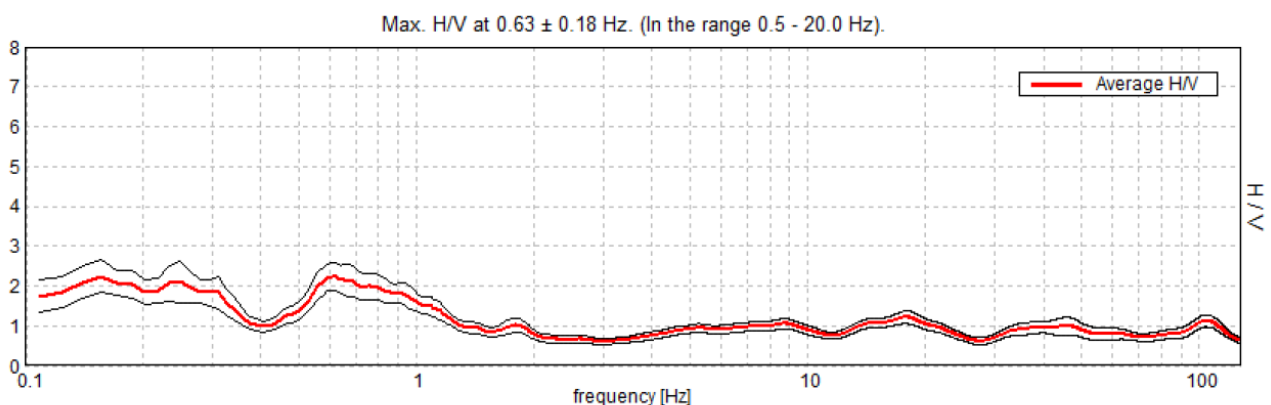


Figura 6-1 - Curva HVSr di una misura di rumore ambientale realizzata in località Tavernelle (prova 037050P59550HVSr59788) in cui sono visibili i picchi a bassa frequenza. Si nota che oltre al picco a 0,63 Hz se ne distingue bene un secondo a circa 0,25 Hz ed un terzo a circa 0,15 Hz.

Le conoscenze dirette sul substrato geologico, definito come al paragrafo 5.1, sono in ogni caso, in quest'area, alquanto limitate ed incerte. Nel contesto strutturale di sinclinale in cui si colloca il territorio in esame, le unità sedimentarie che costituiscono il substrato si sviluppano a grande profondità e solo raramente sono indagate da sondaggi geognostici, realizzati per lo sfruttamento delle falde acquifere profonde o a scopo di ricerca per il progetto nazionale di cartografia geologica CARG.

Vista la scarsità di carotaggi continui profondi, si è fatto ampio utilizzo delle indagini geofisiche per individuare, mediante contrasto di impedenza, possibili superfici di disconformità stratigrafiche in grado di influenzare il moto sismico in superficie.

Solo sfruttando la relazione che lega le frequenze fondamentali dei terreni, desunte da analisi di sismica passiva, con le velocità delle onde di taglio disponibili e la profondità di un dato contrasto di impedenza, è

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

stato possibile stimare la posizione stratigrafica del tetto del bedrock, inteso come superficie a maggior contrasto.

6.2 Terreni suscettibili di liquefazione

La principale criticità che interessa il territorio comunale di Sala Bolognese è legata alla presenza di terreni potenzialmente suscettibili di liquefazione. La presenza di condizioni predisponenti al fenomeno è stata accertata già durante gli approfondimenti di secondo livello e confermata dalle indagini eseguite nell'ambito di questo studio di microzonazione sismica.

Gli approfondimenti eseguiti per il terzo livello di analisi hanno consentito di rivalutare limiti ed estensione delle aree aventi caratteristiche predisponenti la liquefazione, indicate come Zone di Attenzione per Liquefazione nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4 – paragrafo 8.4).

L'elevato numero di indagini penetrometriche con piezocono realizzate nell'ambito dello studio ha consentito, inoltre, di meglio discriminare spessore e geometrie dei principali corpi liquefacibili negli ambiti urbanizzati ed urbanizzabili privi di dati pregressi o con dati di scarsa qualità.

L'esecuzione di decine di analisi puntuali di suscettibilità a liquefazione, effettuate mediante metodi semplificati applicati ad indagini penetrometriche CPTu e CPT (cfr. paragrafo 7.2.1), ha condotto alla definizione dei limiti delle Zone di Suscettibilità per Liquefazioni ed alla loro suddivisione in base al diverso grado di rischio (paragrafo 8.6) definito mediante l'interpretazione degli indici I_L ottenuti rispetto al contesto geologico locale.

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

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

6.3 Piezometria

Il territorio comunale di Sala Bolognese ricade all'interno del complesso idrogeologico della pianura alluvionale appenninica.

Dal punto di vista idrostratigrafico, l'alternanza di sedimenti a granulometria variabile ha determinato, su tutta la bassa pianura, la formazione di un sistema acquifero multistrato, con alternanze di acquiferi ad alta permeabilità ed acquitardi/acquicludi a permeabilità molto bassa.

L'assetto idrogeologico dell'area di studio è caratterizzato dalla presenza di un sottile acquifero di tipo freatico, dello spessore di alcuni metri, sovrapposto ad un complesso sistema multifalda di acquiferi confinati, che prosegue nel sottosuolo per alcune centinaia di metri (v. Allegato 1 – Sezioni geologiche).

I dati riportati nel Quadro Conoscitivo del PSC Associato Unione Terre d'Acqua (Tavole 6/t9b e 6/t9c - Franchi 2008) mostrano come la soggiacenza della falda acquifera superficiale nel Comune di Sala Bolognese sia complessivamente compresa tra 1,50 m e 4,50 m di profondità dal piano campagna. I livelli misurati tra marzo ed aprile 2007, evidenziano soggiacenze minime (1,50 m) in corrispondenza dell'abitato di Sala Bolognese, mentre le massime si rinvergono a nord ovest di Bagno di Piano (4 m) ed a nord di Bonconvento (4,5 m). Nei pressi dell'abitato di Padulle, i valori sono invece compresi fra i 2,5 ed i 3 m mentre, nella parte meridionale del territorio comunale fra la zona industriale "Stelloni" e l'abitato di Osteria Nuova, la falda si attesta mediamente intorno a 2,5 m (Figura 6-2).

Per quanto riguarda l'acquifero più profondo, il PSC riporta un livello statico mediamente compreso tra 15,00 e 30,00 m dal piano campagna.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE



Figura 6-2 Livelli piezometrici rilevati nei fori delle indagini penetrometriche realizzate a supporto dello studio di microzonazione sismica di secondo livello. Periodo di misura luglio - agosto 2014.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

I livelli piezometrici misurati nell'estate del 2014 nei fori delle indagini eseguite a supporto della Microzonazione Sismica di secondo livello (Figura 6-2) hanno probabilmente risentito del clima termico stagionale molto mite e dei frequenti episodi temporaleschi, confermando solo in parte l'andamento della falda superficiale riportato nel Quadro Conoscitivo del PSC. Prova ne è che le ulteriori misure eseguite tra la primavera e la tarda estate del 2016, durante lo studio di Microzonazione Sismica di terzo livello (Figura 6-2), hanno risentito in maniera differente di condizioni climatiche caratterizzate da una trimestre invernale lievemente più piovoso della media, ma decisamente mite e con penuria di nevicate sui rilievi e dei trimestri primaverile ed estivo mediamente piovosi ma più caldi del clima medio di 1-2°C. Ciò conferma una stretta relazione anche a livello di scala locale, con la variabilità stagionale nei valori di soggiacenza della falda freatica, che in alcune aree ha prodotto fluttuazioni fino ad un metro e mezzo, con valori anche prossimi alla superficie topografica.

Vista la diffusa presenza di terreni superficiali limoso-sabbiosi stagionalmente insaturi, si è ritenuto opportuno adottare, per le verifiche di suscettibilità a liquefazione, un principio cautelativo proprio in ragione delle escursioni stagionali della falda freatica, soprattutto in assenza di studi idrogeologici di dettaglio e di analisi storico-statistiche sull'andamento delle isofreatiche. Le valutazioni qualitative di rischio liquefazione sono state, pertanto, eseguite considerando un valore di soggiacenza cautelativo pari a 1 m. Per le ragioni appena esposte tale approccio è consigliato anche per gli studi a supporto di strumenti di pianificazione territoriale o urbanistica e di progetti edilizi.

7 Metodologie di elaborazione e risultati

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

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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 metri di sottosuolo è stata dunque basata sia sulla tradizionale interpretazione delle facies sedimentarie e delle geometrie deposizionali, sia sulle informazioni estratte dalle sezioni geologiche realizzate nell'ambito del progetto "conoide del fiume Reno" della Regione Emilia-Romagna (Allegato 1 – sezioni A-A', B-B', C-C', D-D').

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

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

7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Gli approfondimenti di terzo livello e le analisi di risposta sismica locale hanno evidenziato una sostanziale omogeneità delle condizioni sismo-stratigrafiche del territorio comunale di Sala Bolognese, già supposta in base alle conoscenze pregresse sul contesto geologico e strutturale.

Queste osservazioni hanno suggerito l'adozione di fattori di amplificazione stratigrafica omogenei per tutta l'area di studio, in accordo con quanto proposto negli studi di microzonazione sismica realizzati dalla Regione Emilia-Romagna (Martelli e Romani, 2013) per i Comuni il cui territorio corrisponde ad aree di sinclinale sepolta. Per tali ragioni al paragrafo 7.1.1 è proposto un modello di risposta sismica locale unico, ritenuto sostanzialmente valido per l'intero territorio comunale.

A tal proposito si precisa che la modellazione proposta in questo studio, avente finalità di pianificazione territoriale, fornisce solo un riferimento generale per le analisi di risposta sismica locale prescritte dalle vigenti norme tecniche per le costruzioni. Le risposte sismiche locali dovranno infatti essere realizzate ex-novo sulla base di dati geologici e geofisici direttamente acquisiti nel sito di interesse e commisurati alle opere in progetto.

7.1.1 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 alla superficie. Tali procedure necessitano pertanto della definizione di un modello sismo-stratigrafico profondo che descriva le caratteristiche geotecniche e geofisiche delle successioni sedimentarie che ricoprono il bedrock sismico.

Tale modello è stato qui ricostruito basandosi su indagini geognostiche e geofisiche in situ ed in laboratorio eseguite per caratterizzare i terreni di copertura costituenti i primi 30 metri di sottosuolo. Le unità stratigrafiche più profonde sono invece state descritte utilizzando dati di letteratura e correlazioni a scala regionale.

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 o da letteratura (Minarelli et al., 2016).; (ii) le curve di decadimento del modulo di taglio ($G/G_0 - \gamma$) e di incremento del fattore di smorzamento ($D - \gamma$) ottenute da indagini in sito (cfr. Microzonazione Sismica Comune di Cento) con dilatometro sismico (Amoroso et al., 2014) e da prove dinamiche di laboratorio su campioni indisturbati; (iii) i valori del peso per unità di volume stimati dalle prove in sito e di laboratorio disponibili.

In particolare i caratteri geofisici e geotecnici dei primi 30 metri sono stati definiti nell'area compresa tra la zona industriale di Stelloni e l'abitato di Osteria Nuova in cui, oltre alla disponibilità di dati di V_s acquisti

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

mediante tecnica down-hole, è stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo (037050P59604S59847) con prelievo di campioni indisturbati sottoposti ad analisi di laboratorio.

Gli spessori e le caratteristiche tessiturali delle principali unità stratigrafiche profonde sono invece stati desunti da log accurati di sondaggi a carotaggio continuo eseguiti per il progetto CARG, come il 202-S2 spinto sino a 200 metri, e da altri di minor dettaglio ma più profondi realizzati in aree limitrofe per esplorazione di idrocarburi ("Case Pinelli 001", "Castelfranco Emilia 003" e "Crevalcore 001").

La correlazione tra dati stratigrafici, sezioni geologiche (cfr. Allegato 1), profili sismici (Figura 5-2), e le curve H/V registrate tramite misure di microtremore realizzate per gli studi di microzonazione sismica di secondo livello, hanno permesso di individuare i maggiori contrasti di impedenza e stimare la profondità e la natura della bedrock sismico (paragrafo 5.1). Sulla base di queste analisi il bedrock è stato individuato ad una profondità di circa 550 m, in corrispondenza del tetto dei depositi del Quaternario Marino (QM).

La stima delle velocità delle onde di taglio (V_s) dei terreni di copertura compresi tra il bedrock ed i primi 30 metri di sottosuolo è stata ricavata estrapolando i valori di V_s acquisti, mediante down-hole profondo, durante lo studio di microzonazione di terzo livello del Comune di Mirabello (Minarelli *et al.*, 2016).

L'extrapolazione dei dati di Mirabello all'area in esame è stata resa possibile grazie alle analogie del contesto geologico-strutturale e alla comune presenza delle unità stratigrafiche appartenenti al Supersistema Emiliano-Romagnolo. Nell'extrapolare ed associare le velocità alle unità stratigrafiche, sono stati considerati opportuni incrementi nei valori di V_s legati al maggior spessore, seppellimento e conseguente carico litostatico a cui sono sottoposte le stesse unità stratigrafiche a Sala Bolognese rispetto a quelle di Mirabello. Queste stime sono state effettuate verificando l'accordo con i principali contrasti di impedenza identificati dai picchi di H/V.

Per la velocità sismica del bedrock è stato infine assunto un valore sufficientemente elevato per poter riprodurre l'ampiezza del picco a più bassa frequenza osservato dalle misure di HVSR (paragrafo 6.1). In Tabella 7-1 e illustra una sintesi del modello sismo-stratigrafico proposto.

Tetto	Spessore	Campione/curve di decadimento - Unità geologica	V_s (m/s)
0.00	1.40	Cento SDMT2 (0-2.8) - L	95
1.40	1.60	Cento SDMT2 (0-2.8) - L	170
3.00	2.20	Cento SDMT2 (3-4.4) - S	160
5.20	9.55	Sala Bolognese SH1 (6-6.5) - LA+S	180
14.75	1.25	Cento S1SH1 (3,40-4,00) Sf + LA	200
16.00	4.00	Sala Bolognese SH2 (17.8-18.4) - L+A	190
20.00	2.00	Cento SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	200
22.00	6.00	Idriss 1990 - Sabbie	212
28.00	12.00	Cento S1SH3 (28,2-28,8) AL	245
40.00	4.00	Idriss 1990 - Sabbie	258

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

44.00	13.00	Cento S1SH3 (28,2-28,8) AL	303
57.00	4.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	316
61.00	12.00	Idriss 1990 - Sabbie	357
73.00	27.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	449
100.00	8.00	Idriss 1990 - Sabbie	457
108.00	12.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	469
120.00	10.00	Idriss 1990 - Sabbie	479
130.00	14.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	493
144.00	14.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	530
158.00	29.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	544
187.00	5.00	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	547
192.00	8.00	Idriss 1990 - Sabbie	551
200.00	25.00	Idiss 1990 - Argille	563
225.00	25.00	Idriss 1990 - Sabbie	576
250.00	25.00	Idiss 1990 - Argille	588
275.00	25.00	Idriss 1990 - Sabbie	601
300.00	25.00	Idiss 1990 - Argille	606
325.00	25.00	Idriss 1990 - Sabbie	611
350.00	25.00	Idiss 1990 - Argille	616
375.00	25.00	Idriss 1990 - Sabbie	621
400.00	25.00	Idiss 1990 - Argille	626
425.00	25.00	Idriss 1990 - Sabbie	631
450.00	25.00	Idiss 1990 - Argille	636
475.00	25.00	Idriss 1990 - Sabbie	641
500.00	25.00	Idiss 1990 - Argille	646
525.00	25.00	Idriss 1990 - Sabbie	651
550.00		Bedrock	1000

Tabella 7-1 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL.

Definito il modello sismo-stratigrafico (Tabella 7-1) sono state eseguite alcune simulazioni numeriche di analisi di risposta sismica locale variando i profili stratigrafici dei primi 30 metri di sottosuolo, sulla base delle caratteristiche delle diverse MOPS individuate nello studio. Le simulazioni, realizzate mediante il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013), hanno mostrato una sostanziale omogeneità areale. Ciò ha permesso di estendere un singolo modello di risposta sismica locale all'intero territorio comunale.

Come accelerogrammi di input (bedrock) per il calcolo della risposta sismica locale, sono stati utilizzati i tre segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193/2015 (Figura 7-1). I segnali sono stati scalati in modo da far corrispondere la loro accelerazione massima con il valore di a_{gr} derivante dai punti della griglia della mappa di pericolosità sismica elaborata da INGV per il territorio nazionale. Tale valore può essere assunto pari a 0,16 g, in considerazione di un valore medio tra quelli dei due punti ricadenti nel territorio del Comune di Sala Bolognese e di quelli che ricadono nel suo immediato intorno.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

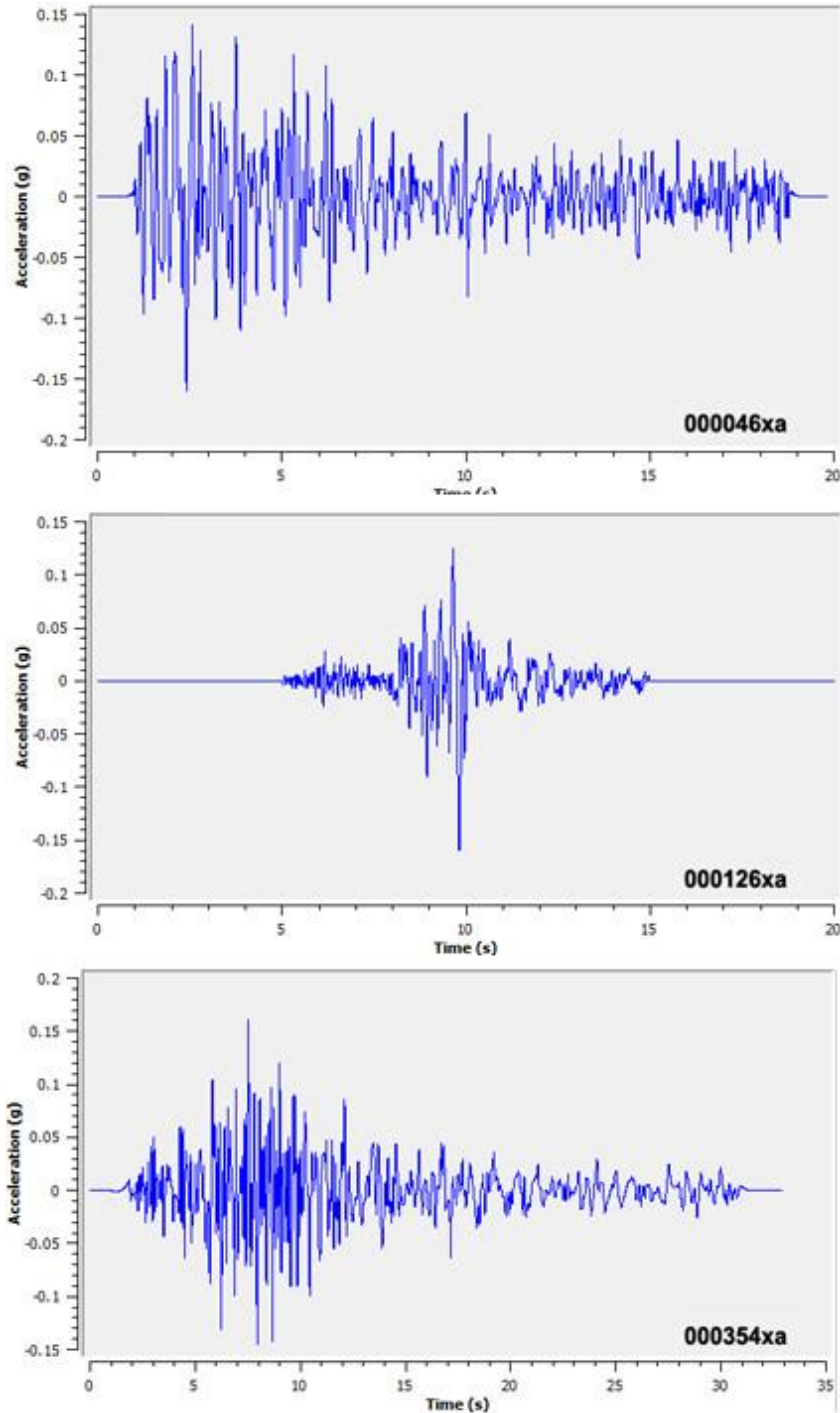


Figura 7-1 - Plot eseguito con il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013) dei segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. 2193 del 2015, scalati per una a_{ref} pari a 0,15 e utilizzati come input per le simulazioni numeriche della risposta sismica locale.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Sono stati quindi calcolati e confrontati gli spettri di risposta al bedrock (Figura 7-2) e in superficie (Figura 7-4) per un periodo di ritorno di 475 anni con uno smorzamento assunto pari al 5%. Gli spettri elastici in pseudo accelerazione in input e in output, relativi alla simulazione di risposta sismica locale, sono stati quindi archiviati nel database in formato .txt secondo quanto richiesto dagli Standard MS 4.0b (Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2015).

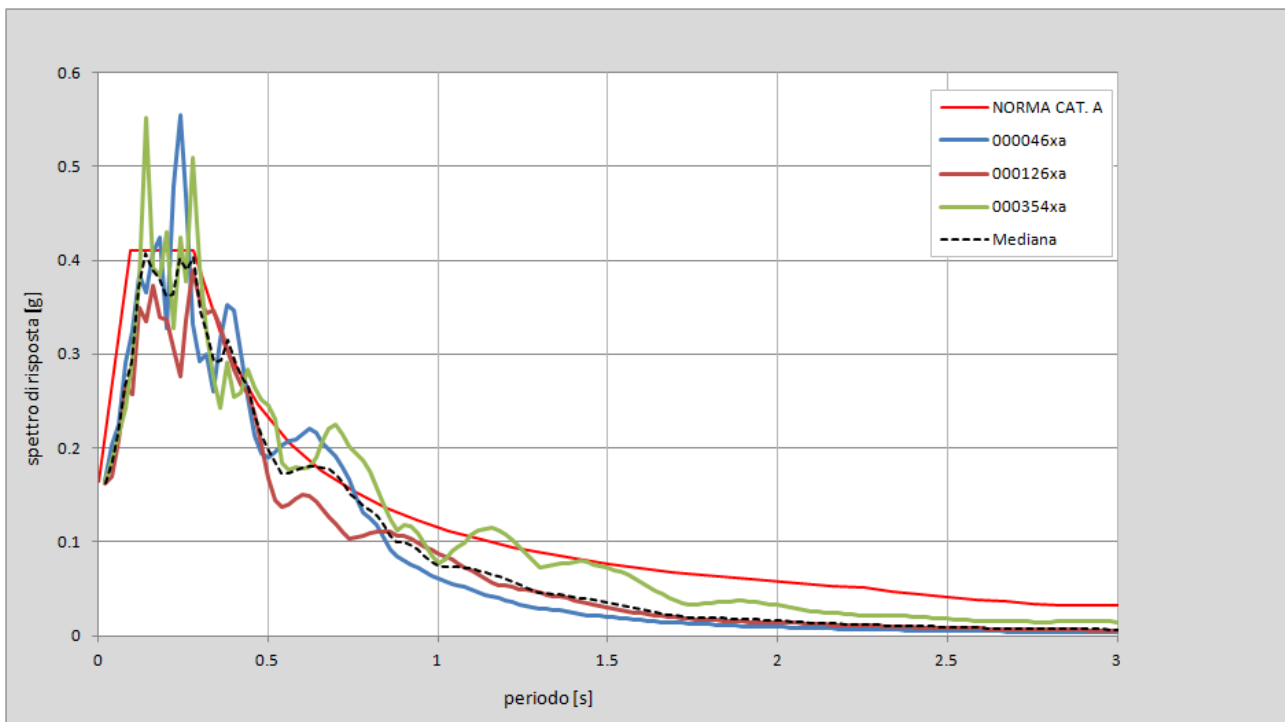


Figura 7-2 - Spettri di risposta al bedrock per i tre accelerogrammi e il loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria A secondo le NTC2008.

In Figura 7-3 si riporta il rapporto tra lo spettro atteso al bedrock e quello atteso in superficie, in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro mediana. Si osserva una prima amplificazione a frequenza di circa 0.3 Hz e una seconda a circa 0,7 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale e a diverse altre frequenze, alcune delle quali sono armoniche superiori. La visibilità di queste ultime appare legata al basso smorzamento delle coperture.

In Figura 7-4 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-1 e lo spettro mediano. Risulta evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente del moto di input, risultando quindi piuttosto differenti per i tre accelerogrammi utilizzati. In questo caso lo spettro mediano risulta caratterizzato da una deviazione

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

standard relativamente alta, dovuta alla sostanziale diversità dei tre soli terremoti utilizzati come input per gli studi di microzonazione sismica (segnali di riferimento D.G.R. 2193/2015).

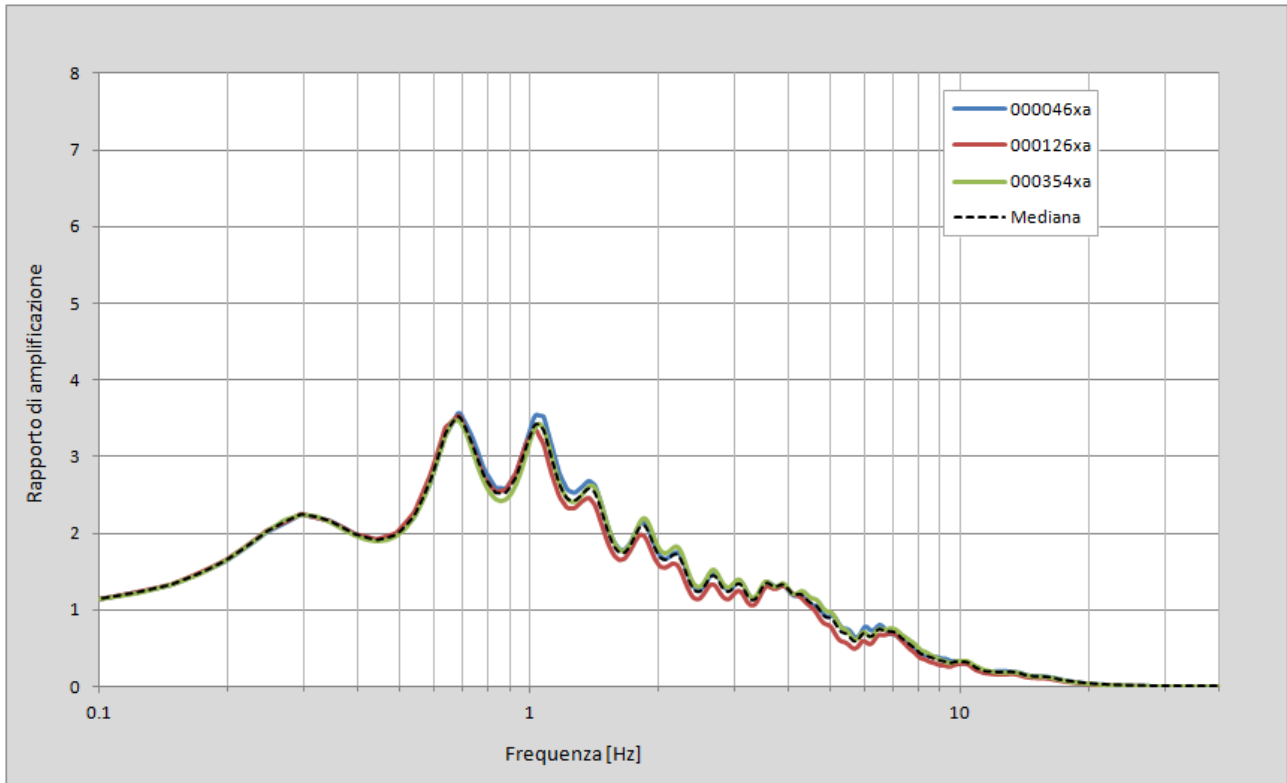


Figura 7-3 - Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-1 e per la mediana.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

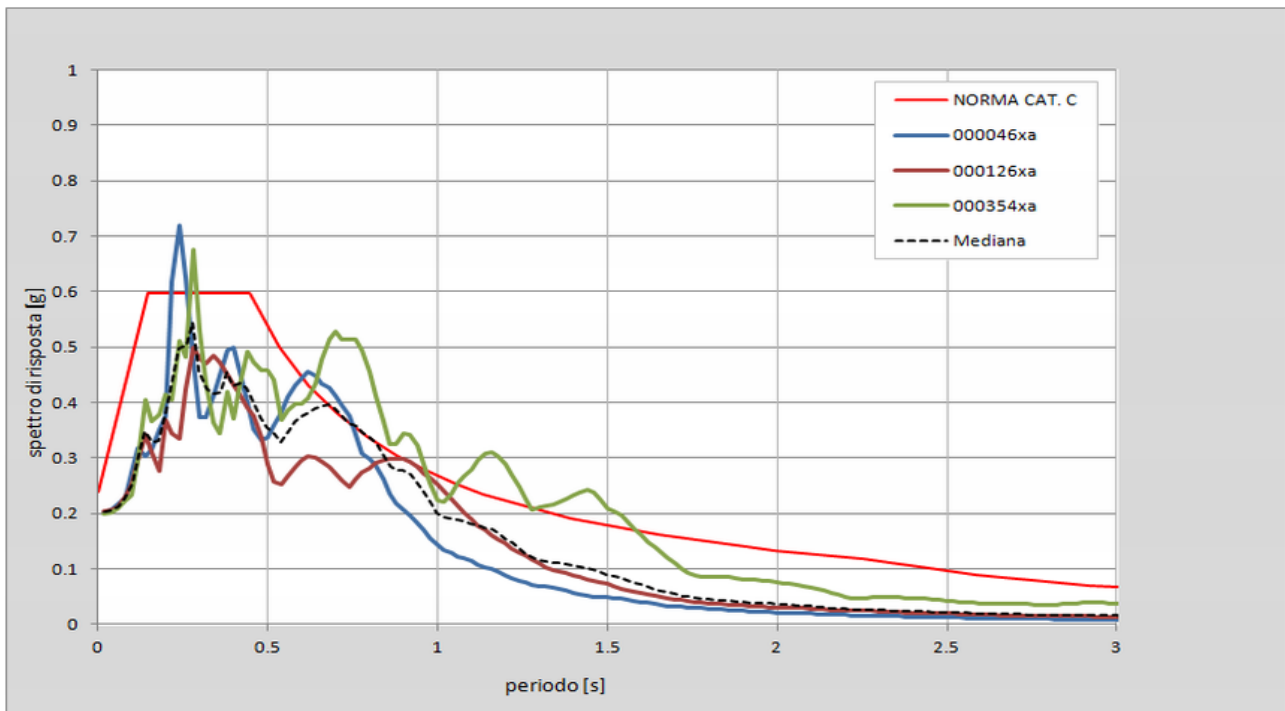


Figura 7-4 - Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi e il loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2008.

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

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

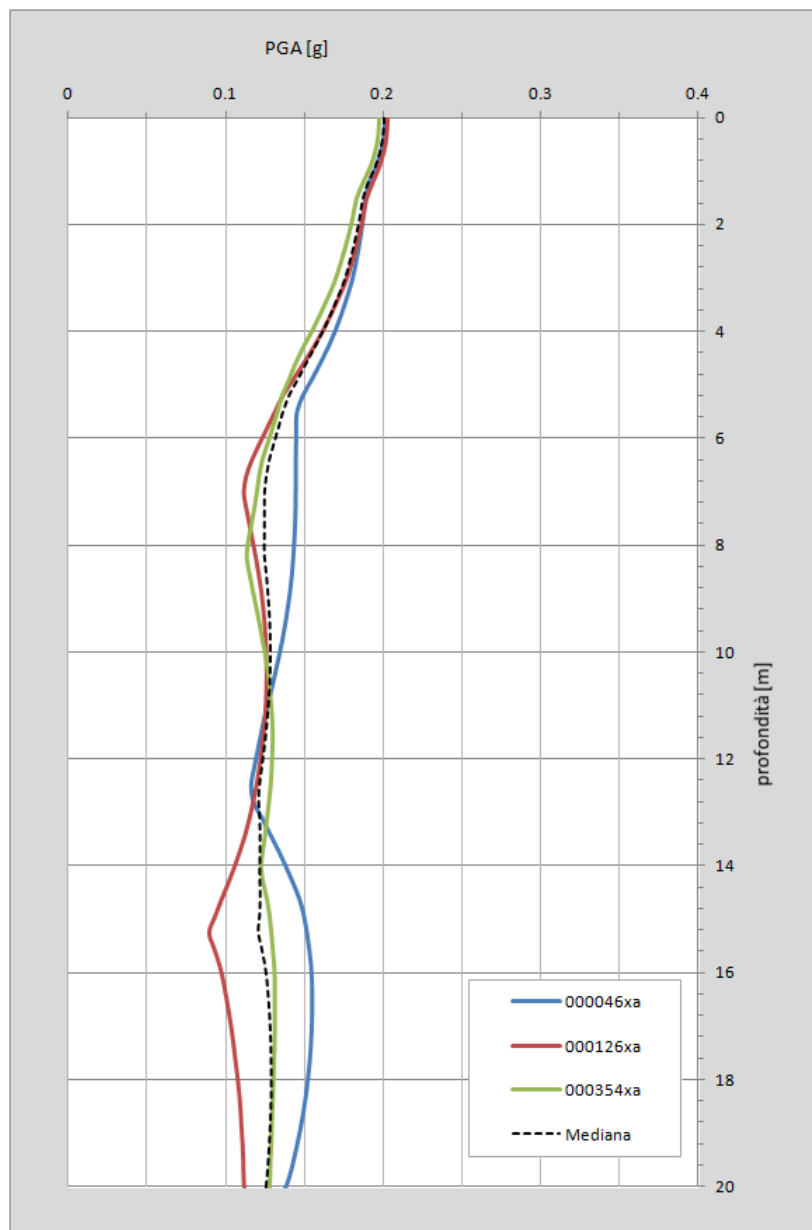


Figura 7-5 - Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di terreno.

Con una accelerazione massima (PGA) attesa in superficie pari a 0,20 g (Figura 7-5) si ottiene un fattore di amplificazione $FA(PGA) = 1,3$. I fattori di amplificazione derivati in termini di intensità di Housner sono rispettivamente pari a: $SI1-FH_{(0,1-0,5)} = 1,5$, $SI2-FH_{(0,5-1)} = 2,4$, $SI3-FH_{(0,5-1,5)} = 2,5$. Questi dati appaiono coerenti con il modello sismo-stratigrafico del sito in esame e complessivamente in linea con quanto indicato dagli abachi della D.G.R. 2193/2015 per le zone di "Pianura 3" caratterizzate da valori di V_{s30} compresi tra 150 e 200 m/s (cfr. Tabella 7-2).

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

VS ₃₀ (m/s)	150	200	250	300	350	400
FA _{PGA}	1.3	1.3	1.3	-	-	-
FA _{S11}	1.5	1.5	1.5	-	-	-
FA _{S12}	2.3	2.3	2.2	-	-	-
FA _{S13}	2.6	2.6	2.4	-	-	-

Tabella 7-2 - Fattori di amplificazione per le aree di "Pianura 3" (bedrock a profondità non inferiore a 300 m dal p.c.) secondo quanto previsto dagli abachi della D.G.R. 2193/2015.

7.2 Zone instabili soggette a liquefazione

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

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

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

Le analisi eseguite nel 2014 sulle indagini geognostiche disponibili per gli approfondimenti di microzonazione sismica di primo livello, avevano già permesso di verificare l'esistenza di terreni granulari saturi nei primi 20 m di sottosuolo e di individuare le aree instabili potenzialmente soggette a liquefazione. L'estensione e la perimetrazione di queste aree è stata qui affinata (v. Tavola 4) in base ai risultati delle nuove indagini geognostiche realizzate per gli approfondimenti di terzo livello (paragrafo 4.2)

Per ottenere valutazioni quantitative della suscettibilità a liquefazione nelle aree classificate come instabili e poter suddividere il territorio in classi di rischio, sono state infine eseguite stime dell'indice di potenziale liquefazione (I_L) con le procedure semplificate indicate dai recenti indirizzi regionali per la microzonazione sismica (paragrafo 7.2.1). Tali stime sono state eseguite su tutte le indagini penetrometriche con piezocono raccolte e realizzate a supporto degli studi di microzonazione sismica di secondo e terzo livello (v. Allegato 3) e su alcune prove penetrometriche statiche ritenute idonee a tale scopo.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

7.2.1 Verifiche del potenziale di liquefazione

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

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

Già durante lo studio di microzonazione sismica di secondo livello sono state eseguite valutazioni di suscettibilità a liquefazione utilizzando diverse procedure semplificate indicate nei previgenti indirizzi regionali (D.A.L. 112/2007,) e nazionali (Gruppo di lavoro MS, 2008), sulla base delle esperienze degli studi microzonazione sismica realizzati dopo gli eventi sismici del 2012 (v. Allegato 1.7 – Ordinanza 70/2012).

Rispetto ai metodi utilizzati nel precedente studio di microzonazione, per questi approfondimenti di terzo livello sono state eseguite stime del potenziale di liquefazione anche con il più recente metodo di Boulanger & Idriss (2014), suggerito dalla D.G.R. 2193/2015. Tale metodo ha mediamente fornito indici di liquefazione più elevati rispetto ai metodi precedenti (cfr. Idriss & Boulanger, 2008; Robertson NCEER 2001 e Robertson 2009 - Figura 7-6).

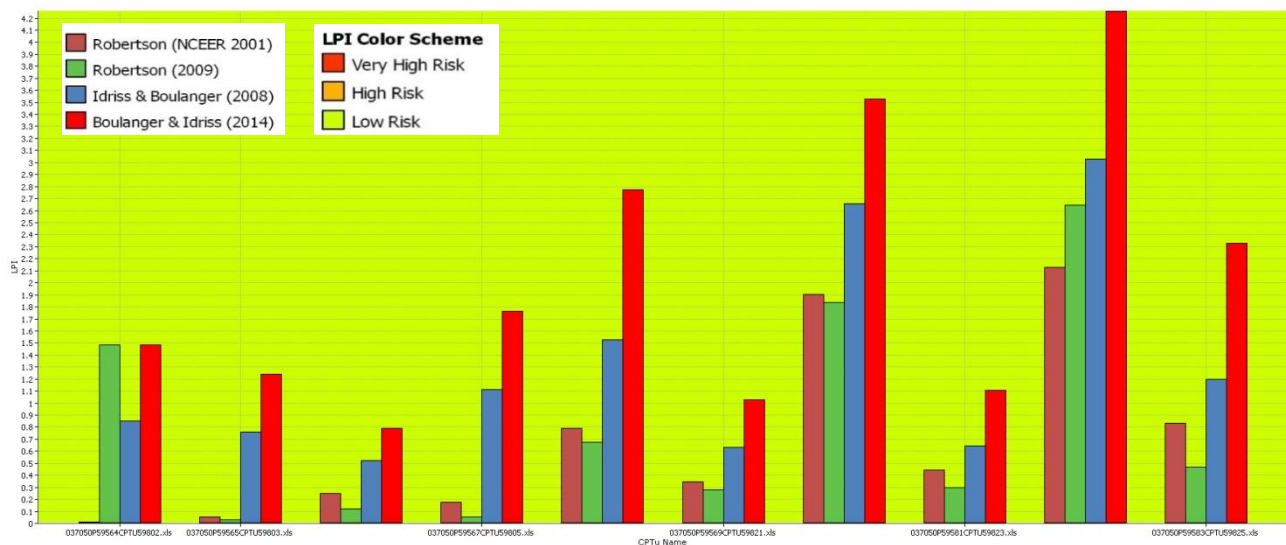


Figura 7-6 - Confronto tra diversi metodi di letteratura per la stima del potenziale di liquefazione, applicati allo stesso set di prove penetrometriche CPTU.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Considerato il metodo di Boulanger & Idriss (2014) mediamente più affidabile dei precedenti, in quanto basato su di un set più numeroso di dati, si è scelto di utilizzarlo come riferimento per la stima del potenziale di liquefazione. Sono state quindi analizzate 51 verticali d'indagine realizzate con punta elettrica, e 8 con punta meccanica distribuite come riportato in Tavola 6.

Come parametri di input per la modellazione sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 7-3. Il valore di Mw_{max} corrisponde a quello massimo atteso per la Zona 912 della Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), mentre la PGA è stata derivata, anche a seguito di una analisi critica dei valori ottenuti dalla risposta sismica locale (paragrafo 7.1.1), moltiplicando l'agref (così come definita al paragrafo 7.1.1) per il valore di FA_{PGA} dell'abaco "Pianura 3" degli indirizzi regionali (Tabella 7-2).

In mancanza di uno studio idrogeologico dettagliato e di un'analisi storico-statistica dell'andamento delle isofreatiche, il valore di soggiacenza adottato è stato considerato maggiormente cautelativo rispetto a quello medio misurato nel corso delle indagini geognostiche eseguite per la microzonazione e a quelli riportati nel Quadro Conoscitivo del PSC Associato Unione Terre d'Acqua (cfr. paragrafo 0).

Parametri	Mw_{max}	PGA	Falda
	6,14	0,21	1 m

Tabella 7-3 - Parametri di input utilizzati per la verifica puntuale del potenziale di liquefazione mediante metodo di Boulanger & Idriss (2014).

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

Nell'istogramma di Figura 7-7 sono riportati i valori di I_L delle 59 indagini penetrometriche analizzate per gli approfondimenti di terzo livello, mentre nell'Allegato 3 sono raccolti i rapporti delle verifiche a liquefazione delle sole CPTU eseguite a supporto degli approfondimenti di microzonazione di sismica di secondo e terzo livello.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

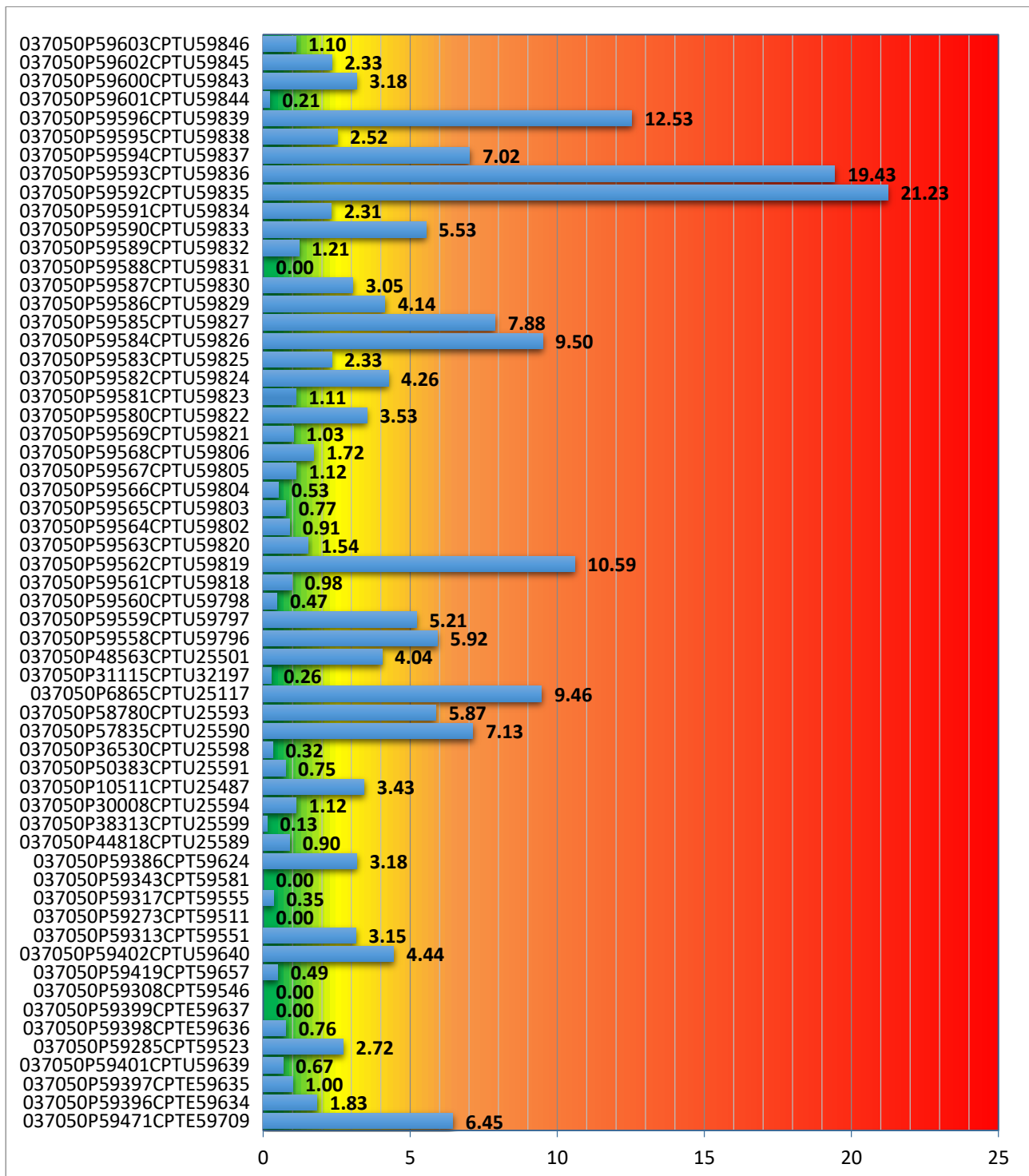


Figura 7-7 - Indice del potenziale di liquefazione calcolato secondo il metodo di Boulanger & Idriss (2014) di ciascuna delle prove penetrometriche considerate per gli approfondimenti di microzonazione di sismica di terzo livello.

8 Elaborati cartografici

Le analisi e gli approfondimenti eseguiti nell'ambito di questo studio hanno fornito gli elementi necessari alla redazione degli elaborati cartografici per il terzo livello di microzonazione sismica. Al contempo, le nuove indagini geognostiche realizzate, gli attuali standard di rappresentazione ed archiviazione informatica nazionali (versione 4.0b) e la recente direttiva regionale adottata in materia di microzonazione sismica (D.G.R. 1227/2015) hanno reso necessaria la revisione, in parte anche sostanziale, degli elaborati cartografici prodotti nei precedenti livelli di approfondimento di microzonazione sismica.

Per queste ragioni allo studio sono stati nuovamente allegati gli elaborati cartografici di primo e secondo livello aggiornati, oltre alle tavole grafiche prodotte per gli approfondimenti di terzo livello (Tabella 8-1).

La forma e l'estensione del Comune di Sala Bolognese, hanno reso necessaria la realizzazione di una doppia tavola per alcuni elaborati grafici di primo livello. La scelta è stata dettata dalla necessità di fornire una chiara e completa visione d'insieme di alcuni elementi base per gli approfondimenti di microzonazione, come la distribuzione delle indagini geognostiche disponibili e l'andamento e l'estensione dei corpi geologici affioranti nel territorio comunale .

La carta delle Indagini e quella Geologico-Tecnica, sono state quindi suddivise, per ragioni di scala, in due tavole (v. Tavola 1a - 1b e Tavola 2a - 2b), comprendenti rispettivamente la porzione settentrionale e quella meridionale del territorio comunale.

I restanti elaborati sono stati realizzati rappresentando in carta solo gli ambiti oggetto della microzonazione sismica di dettaglio (v. paragrafo 1.2), mediante la suddivisione delle singole tavole in riquadri in scala 1 : 5.000.

La base cartografica utilizzata in tutti gli elaborati è costituita dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000, messa a disposizione dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

ELABORATO	RIFERIMENTO	SCALA
Carta delle indagini	Tavola 1a - Tavola 1b	1:10.000
Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica	Tavola 2a - Tavola 2b	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3	1:5.000
Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica – MOPS	Tavola 4	1:5.000
Carta delle velocità delle onde di taglio - Vs	Tavola 5	1:5.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA _{PGA}	Tavola 6	1:5.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA _{0,1 - 0,5 s}	Tavola 7	1:5.000
Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA _{0,5 - 1 s}	Tavola 8	1:5.000

Carta di microzonazione sismica (livello 3) - FA _{0,5-1,5s}	Tavola 9	1:5.000
--	----------	---------

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

8.1 Carta delle indagini (Tavole 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 (540) che quelle realizzate per l'attuale approfondimento di terzo livello (27).

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

Attraverso l'utilizzo del metodo di rappresentazione proposto all'Appendice 2 dei suddetti standard, ad ogni sito d'indagine (punto viola in carta) sono associati i simboli grafici delle diverse tipologie di prove in esso realizzate (es. prova penetrometrica statica con piezocono, sondaggio a distruzione ecc.). Il numero presente a fianco di ogni simbolo identifica il quantitativo di prove di un determinato tipo realizzate nel sito. Utilizzando il metodo appena citato, il posizionamento dei simboli in cartografia avviene in maniera automatica e non modificabile. Ciò implica che per un sito ubicato in prossimità del limite amministrativo, il contrassegno della prova possa cadere anche al di fuori del territorio comunale.

Si precisa inoltre che il rispetto delle procedure indicate negli standard non consente di differenziare graficamente le prove pregresse da quelle realizzate per gli approfondimenti di terzo livello. Per ulteriori dettagli in merito a provenienza, tipologia e qualità delle indagini riportate in carta, si rimanda al capitolo 4.

8.2 Carta Geologico Tecnica microzonazione sismica (Tavole 2a - 2b)

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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

8.2.1 Forme di superficie e sepolte

Tra le forme di superficie e sepolte proposte dagli standard di rappresentazione e archiviazione informatica, sono state individuate e riportate in carta quelle riferibili ad assi di paleoalveo e strutture sinclinaliche.

Gli assi di paleoalveo cartografati evidenziano l'andamento di antichi alvei, oggi sepolti a debole profondità, di Reno, Samoggia, Ghironda e Lavino. Le paleo-direzioni dei corsi fluviali, indicate dal verso delle frecce del simbolo grafico, sono state ricostruite mediante l'utilizzo di fonti e cartografie storiche o attraverso l'analisi di prove geognostiche di repertorio e mostrano un'orientazione sostanzialmente perpendicolare alla catena appenninica (Tavola 2b).

Per quanto riguarda gli elementi tettonico-strutturali, la porzione centrale del territorio comunale è interessata dall'asse della sinclinale Bologna – Bomporto – Reggio Emilia indicato nella carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (Boccaletti et al., 2004), e riportato in mappa leggermente modificato, in base alle informazioni derivanti dalle misure di microtremore sismico disponibili.

8.2.2 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.

L'omogenea distribuzione dei dati consente una caratterizzazione a scala comunale e favorisce l'individuazione delle prospezioni geognostiche utilizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna per la realizzazione delle sezioni geologiche rappresentative del modello di sottosuolo (Cfr. Tavole 2a e 2b con sezioni geologiche in Allegato 1).

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 nessuna delle 70 perforazioni riportate in carta intercetta il substrato.

In relazione agli altri tematismi previsti per la carta geologico tecnica negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica, si precisa che, vista la quasi totale assenza di dati geognostici sul sottosuolo profondo, non è stato possibile ricostruire in pianta, tramite isobate, l'andamento della superficie considerata come tetto del bedrock sismico in questo studio. Allo stesso modo, gli esigui dati freaticimetrici

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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

Allo studio sono, infine, allegate 4 sezioni geologiche considerate rappresentative del modello geologico di sottosuolo, realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna per il Progetto Conoide del Reno (v. Allegato 1).

Le tre sezioni trasversali (tracce A-A', B-B', C-C' – Tavole 2a, 2b) e quella longitudinale (traccia D-D' – Tavole 2a, 2b) rispetto alla catena appenninica, mostrano i rapporti stratigrafici principali delle unità sedimentarie riconosciute nel sottosuolo comunale. Tali rapporti sono stati ricostruiti alla scala regionale mediante correlazioni di sondaggi stratigrafici profondi, mentre le unità sono state interpretate in chiave idrostratigrafica, in termini di acquiferi e acquicludo (v. Allegato 1).

8.2.3 Terreni di copertura

In base dei criteri per la definizione del modello geologico già descritti al paragrafo 5.2, nella parte sommitale e affiorante dei terreni di copertura olocenici sono state distinte sei unità, ognuna delle quali associabile ad una delle classi predefinite negli standard di microzonazione. Tali classi sono state definite mediante l'*Unified Soil Classification System (USCS - modificato, ASTM, 1985)*, un sistema di classificazione dei suoli utilizzato sia in ingegneria sia in geologia, che può essere applicato alla maggioranza dei materiali non consolidati.

Per ognuna delle unità perimetrata sono stati riportati in cartografia colorazione e codici alfabetici corrispondenti alle rispettive classi (*USCS*) individuate negli standard di rappresentazione ed archiviazione informatica. Il codice alfabetico che identifica le unità, costituito da una prima porzione maiuscola e da una seconda minuscola (es. **SMes**), indica rispettivamente i caratteri litotecnici e gli ambienti di genesi deposizionale che contraddistinguono i terreni di copertura.

Sulla base della classificazione appena citata sono state definite unità riconducibili a:

- **depositi di depressione interalvea** costituiti da argille, argille limose, argille limose organiche, diffusamente bioturbate, a plasticità generalmente medio-bassa, deposti in ambienti di piana inondabile, stagno e palude dolce, soggette a consistenti apporti sedimentari fini, durante gli episodi di piena e tracimazione fluviale (**OLpi**). Le parti topograficamente più depresse erano caratterizzate dalla deposizione di argille, spesso assai plastiche, argille limose, argille organiche, assai ricche di livelli torbosi, oggi fortemente ossidati e costipati nei pressi della superficie (**OHpi**). Questi sedimenti conservano spesso le originarie colorazioni scure unitamente ad elevati contenuti in umidità; caratteri che li rendono ben identificabili anche attraverso analisi di immagini a falsi

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

colori nell'infrarosso vicino. Questi sedimenti coesivi presentano in genere una permeabilità molto bassa e rappresentano, quindi, un efficace livello di acquicludo superficiale.

- **corpi di argine naturale** deposti fra le vaste aree interalvee e i corpi fluviali. Sono formati da limi inorganici, sabbie fini limose, loam, limi argillosi a bassa plasticità (**MLes**), in cui talvolta si osservano gradazioni dirette o abbondanti intraclasti fangosi o resti organici. I sedimenti del corpo di argine naturale del Reno mostrano nel complesso granulometrie sabbiose più grossolane di quelle associate ai corsi d'acqua minori. Questi corpi sono caratterizzati da una permeabilità media, che aumenta in genere avvicinandosi ai corpi di paleoalveo.
- **corpi fluviali appenninici secondari** con larghezze e spessori stratigrafici assai minori e granulometrie decisamente più fini di quelli di Reno. Essi sono composti da sabbie limose, limi sabbiosi e subordinati limi (**SMes**), mentre i corpi arginali, dai limiti mal definiti, sono formati prevalentemente da limi. La diffusione di granulometrie fini è legata anche alla composizione litologica della porzione collinare dei piccoli bacini idrografici da cui provengono i sedimenti, dominata da litologie fini, quali ad esempio quelle delle argille marine plioceniche. Questo studio ha permesso di determinare l'andamento di questi paleoalvei, che in epoca relativamente recente scorrevano più ad oriente degli alvei attuali, di origine quasi interamente artificiale. In epoca post-romana, Ghironda e Lavino confluivano nel paleoalveo del torrente Samoggia nella parte sud-occidentale dell'attuale territorio comunale (Tavola 2b). Negli ultimi secoli, l'evoluzione idrografica di questi corsi d'acqua è stata radicalmente mutata dallo scavo di lunghi canali di scolo rettilinei, che forzano il Ghironda a gettarsi nel Lavino, insieme alle acque di collettori di bonifica innalzate meccanicamente. Poco a valle di questa confluenza, il Lavino confluisce a sua volta nel Samoggia, che poi prosegue con corso affatto artificiale, segnando il confine nord-occidentale del territorio comunale.
- **depositi dell'alveo del Reno** sono dominati da sabbie medie con granulometria poco assortita (**SPes**) che riempiono ampi canali ad andamento curvilineo, fino a pseudomeandriiforme, come ad esempio a sud di Malacappa. Sono presenti anche sedimenti sabbioso limosi o limosi, comunque subordinati. Le sabbie grossolane e ghiaie ben sviluppate a cavallo della Via Emilia non giungevano più, in epoca storica, nell'area esaminata. In epoca medievale, i canali analizzati rifornivano verso nord un ramificato sistema di canali di Reno, che è entrato in crisi, durante il XV secolo, a seguito delle rotte di Bagnetto, che hanno indotto lo sviluppo dell'attuale corso, verso Sant'Agostino. La deposizione dei vicini corpi di sabbie e sabbie limose di argine naturale è stata progressivamente

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

interrotta, negli ultimi secoli, dall'erezione di grandi argini artificiali. Nella parte nord-orientale del territorio comunale, la dinamica fluviale è stata poi ulteriormente alterata dal taglio di un ampio drizzagno rettilineo, secondo la corda dell'ansa fluviale precedente, per favorire il deflusso delle piene. Una modesta sedimentazione fluviale permane attiva all'interno del canale arginato ed artificializzato.

- **terreni contenenti resti di attività antropica (Rlzz)** presenti nel territorio comunale, ma non nelle zone di ambito, sono situati in corrispondenza di riempimenti artificiali di discariche e aree di cava dismesse, come , ad esempio, all'interno dei corpi sabbiosi di riempimento di canali di Reno, fra Malacappa e Villa Celia e ad ovest di Villa Bonfiglioli, e a nord di Padulle.

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3)

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

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

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

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

A scala comunale è però possibile riconoscere un andamento nella variazione dei valori di frequenza (f_0). Le porzioni di territorio più meridionali (Stelloni ed Osteria Nuova) e la fascia settentrionale (Padulle e Bagno di Piano) mostrano valori di f_0 simili, generalmente compresi tra 0,63 e 0,78 Hz, mentre l'area centrale (Sala Bolognese) mostra i valori più bassi tra quelli registrati (0,58 – 0,59 Hz). La distribuzione dei valori frequenza è conforme all'andamento della struttura sinclinalica, che mostra il depocentro proprio in corrispondenza dei valori più bassi di f_0 .

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Dalla tematizzazione cartografica è possibile anche notare come il picco del rapporto H/V delle diverse misure sia, di norma, caratterizzato da valori di ampiezza massima inferiori a 3, indicativi di bassi contrasti di impedenza alla base delle coperture. Le sporadiche misure riportanti ampiezze maggiori di 3 sono da considerarsi non rappresentative.

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

La carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) o carta delle aree suscettibili di effetti locali, è l'elaborato di sintesi fondamentale del primo livello di approfondimento degli studi microzonazione.

Tra gli elaborati prodotti per i precedenti livelli di microzonazione sismica, la carta delle microzone omogenee è quella che ha subito le maggiori modifiche. Tali revisioni si sono rese necessarie in seguito ai risultati delle nuove indagini geognostiche realizzate (paragrafo 4.2) e a causa delle novità sulle vestiture cartografiche introdotte dai più recenti standard di rappresentazione e archiviazione informatica della Commissione Tecnica di microzonazione sismica.

L'elaborato mostra, mediante riquadri alla scala 1:5.000, la suddivisione degli ambiti comunali studiati in **zone suscettibili di amplificazioni locali** e **zone suscettibili di instabilità**, in quanto non sono presenti zone classificabili come stabili. Nella tavola sono riportate le stesse forme di superficie e sepolte già presenti nella carta geologico tecnica (tavole 2a - 2b, paragrafo 8.2.1) e le ubicazioni dei punti di misura di rumore ambientale (tavola 3, paragrafo 8.3).

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

Le 4 zone cartografate come **instabili** presentano tutte problematiche legate a potenziali fenomeni di liquefazione e sono quindi state classificate come **zone di attenzione per liquefazione** (ZA_{LQ}) e rappresentate in carta mediante apposito retino e relativo prefisso identificativo 3050. Sono state inoltre identificate tre distinte microzone **suscettibili di sola amplificazione locale** a cui sono stati attribuiti i codici 2001, 2005 e 2006.

Di seguito è riportato lo schema dei rapporti litostratigrafici più significativi (Figura 8-1) con la descrizione delle diverse successioni litostratigrafiche in base alle quali sono state definite le microzone. Le descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

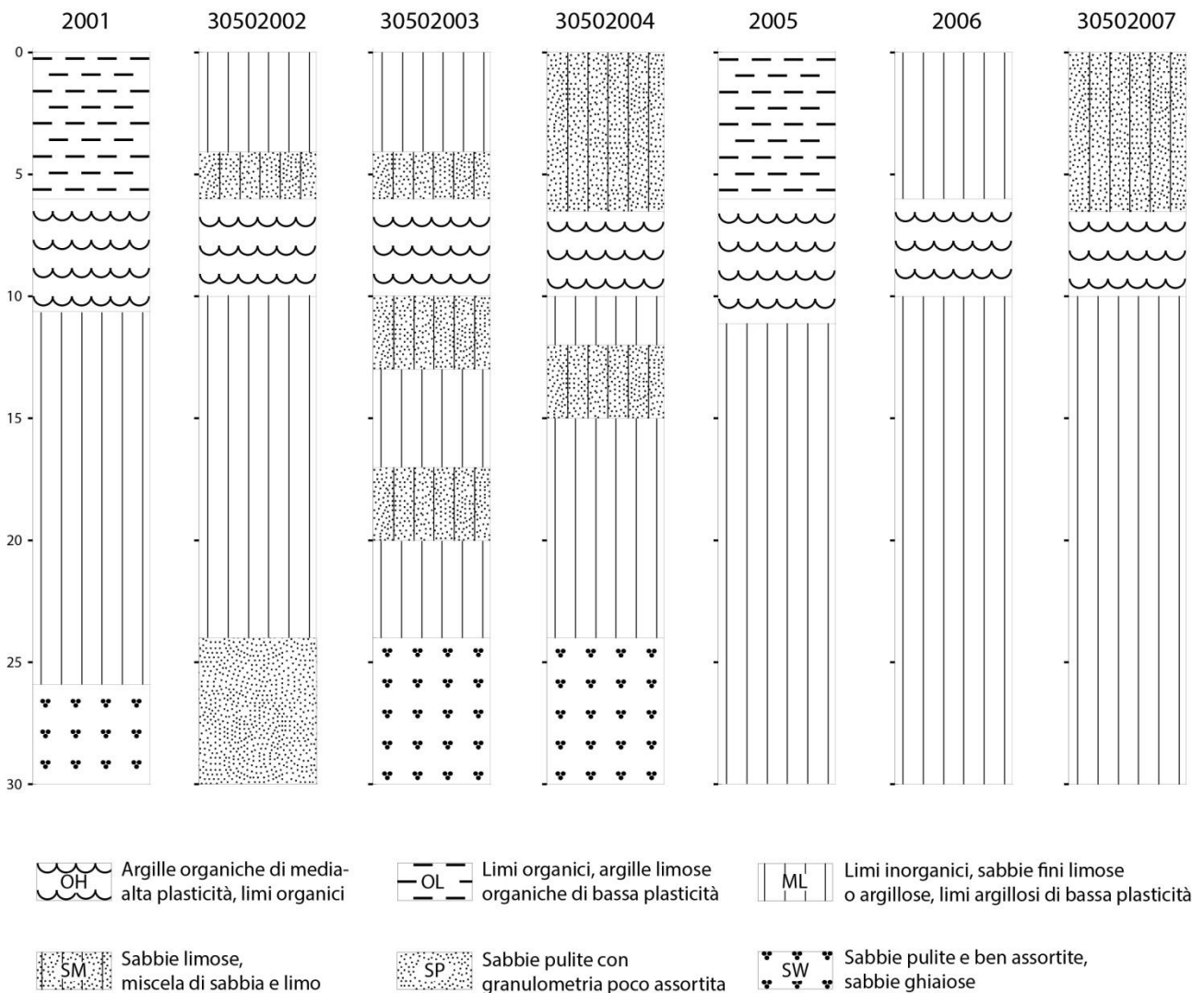


Figura 8-1 - Colonne stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti che costituiscono i primi 30 metri nelle diverse zone MOPS individuate nel territorio comunale

Zona 2001

Terreni argillosi e argilloso-limosi consolidati, dello spessore complessivo di circa 6 metri, poggiano su spessori comparabili di argille, argille limose e argille organiche di plasticità medio-alta e torbe. Questi livelli sono seguiti da una spessa serie di limi inorganici, talvolta sabbiosi, e limi argillosi di bassa plasticità con paleosuoli a concrezioni carbonatiche. Alla base della successione indagata sono presenti sabbie ghiaiose talvolta limose di probabile spessore decametrico.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Zona 30502002

Terreni limosi con livelli sabbiosi anche metrici poco addensati dello spessore complessivo di circa 5 metri, poggiano su spessori comparabili di argille, argille limose e argille organiche di plasticità medio-alta e torbe. Questi livelli sono seguiti da una spessa serie di limi inorganici, talvolta sabbiosi, e limi argillosi di bassa plasticità con paleosuoli a concrezioni carbonatiche. Alla base della successione indagata sono presenti sabbie pulite e sabbie limose.

Zona 30502003

Terreni limosi con livelli sabbiosi anche metrici poco addensati dello spessore complessivo di circa 5 metri, poggiano su spessori comparabili di argille, argille limose e argille organiche di plasticità medio-alta e torbe. Seguono limi inorganici, limi argillosi di bassa plasticità con livelli di paleosuolo a concrezioni carbonatiche, con diffuse intercalazioni plurimetriche di sabbie e sabbie fini limose. Alla base della successione indagata sono presenti sabbie ghiaiose, talvolta limose, di probabile spessore decametrico.

Zona 30502004

Corpi sabbiosi e sabbioso-limosi poco addensati, con spessori massimi dell'ordine di 6-7 metri, poggiano su spessori comparabili di argille, argille limose e argille organiche di plasticità medio-alta e torbe. Questi livelli sono seguiti da una spessa serie di limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi di bassa plasticità, che nella parte superiore mostrano intercalazioni plurimetriche di sabbie e sabbie fini limose. Alla base della successione indagata sono presenti sabbie ghiaiose talvolta limose di probabile spessore decametrico.

Zona 2005

Terreni argillosi e argilloso-limosi consolidati dello spessore complessivo di circa 6 metri, poggiano su spessori comparabili di argille, argille limose e argille organiche di plasticità medio-alta e torbe. Questi livelli sono seguiti da una serie di limi inorganici, talvolta sabbiosi e limi argillosi di bassa plasticità con paleosuoli a concrezioni carbonatiche, che si estendono, con spessori pluridecametrici, fino alla base della successione indagata.

Zona 2006

Terreni limosi e limoso argillosi dello spessore complessivo di circa 5 metri, poggiano su spessori comparabili di argille, argille limose e argille organiche di plasticità medio-alta e torbe. Questi livelli sono seguiti da una serie di limi inorganici, talvolta sabbiosi e limi argillosi di bassa plasticità con paleosuoli a

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

concrezioni carbonatiche, che si estende, con spessori pluridecametrici, fino alla base della successione indagata.

Zona 30502007

Corpi sabbiosi e sabbioso-limosi poco addensati con spessori massimi fino a 6-7 metri, poggiano su spessori comparabili di argille, argille limose e argille organiche di plasticità medio-alta e torbe. Questi livelli sono seguiti da una serie di limi inorganici, talvolta sabbiosi, e limi argillosi di bassa plasticità con paleosuoli a concrezioni carbonatiche, che si estende, con spessori pluridecametrici, fino alla base della successione indagata.

Appare opportuno segnalare che nel territorio comunale possono essere presenti altre tipologie di instabilità che però interessano aree non urbanizzate ne indicate come soggette a futura urbanizzazione. Le aree, ubicate fra Malacappa e Villa Celia, ad ovest di Villa Bonfiglioli e a nord di Padulle (codice Rlzz, tavole 2a e 2b, paragrafo 8.2.3), possono essere interessate da cedimenti differenziali cosismici a causa della natura caotica e eterogena degli riempimenti artificiali di discariche e aree di cava dismesse, mentre potenziali instabilità alle strutture arginali del Reno possono verificarsi soprattutto in corrispondenza dell'area di cava esistente a sud di Malacappa.

Altre aree rurali marginali poste nella zona centro meridionale al confine con Calderara di Reno, possono essere interessate da cedimenti differenziali anche cosismici a causa della presenza di spesse successioni di depositi di palude formate da argille organiche plastiche e torbe.

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

La carta della velocità delle onde volumetriche di taglio mostra, attraverso riquadri alla scala 1:5.000, i 13 punti di misura di Vs utilizzati ai fini dello studio di microzonazione sismica ed i rispettivi valori di Vs₃₀.

I valori di Vs₃₀ sono stati ricavati dall'elaborazione dei dati di velocità delle onde S acquisiti mediante misure geofisiche di tipo diretto ed 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	5	MASW	8

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

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Osservando le V_{S30} si nota come le indagini indirette forniscano valori tra loro a volte discrepanti, verosimilmente frutto delle diverse tecniche di interpretazione ed inversione utilizzate per ricavare il dato. Al contrario le V_{S30} ottenute mediante misure dirette tipo cono sismico (SCPT) risultano tra loro molto più omogenee. I valori di V_{S30} ottenuti, spesso inferiori a 225 m/s, sono comunque coerenti con quelli di terreni analoghi che formano il primo sottosuolo di gran parte della bassa pianura alluvionale emiliano-romagnola.

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

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

Mediante riquadri alla scala 1:5.000, vengono illustrati i risultati delle analisi e delle valutazioni eseguite per gli approfondimenti di microzonazione di terzo livello negli ambiti comunali urbanizzati e suscettibili di future trasformazioni urbanistiche.

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

- FA_{PGA} (tavola 6) - fattori di amplificazione espressi come rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0);
- $FA_{0,1-0,5s}$ (tavola 7) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (S_i/S_{i0}) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;
- $FA_{0,5-1s}$ (tavola 8) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (S_i/S_{i0}) per periodi compresi tra 0,5 e 1 secondi.
- $FA_{0,5-1,5s}$ (tavola 9) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (S_i/S_{i0}) per periodi compresi tra 0,5 e 1,5 secondi.

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

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

I fattori di amplificazione utilizzati per la redazione delle carte (Tabella 8-3) sono derivati dall'analisi critica tra i coefficienti ottenuti mediante analisi di risposta sismica locale (paragrafo 7.1.1) e quelli proposti dall'abaco "Pianura 3" degli indirizzi regionali (Tabella 7-2). Sulla base delle lievi differenze osservate ed in accordo con il Settore Tecnico e Servizio Gestione Territorio del Comune di Sala Bolognese si è deciso di adottare sempre il fattore di amplificazione maggiormente cautelativo, fosse esso derivante da risposta sismica locale o proposto dalla normativa regionale.

FA _{PGA}		FA _{0,1-0,5s}		FA _{0,5-1s}		FA _{0,5-1,5s}	
Abaco	RSL	Abaco	RSL	Abaco	RSL	Abaco	RSL
<u>1,3</u>	1,25	<u>1,5</u>	1,45	2,3	<u>2,4</u>	<u>2,6</u>	2,5

Tabella 8-3 - Fattori di amplificazione utilizzati per la redazione delle carte di microzonazione sismica. Il valore sottolineato indica quello assunto come riferimento per lo studio di microzonazione sismica di livello 3.

In ragione dell'omogeneità dei caratteri sismostratigrafici di sottosuolo e della correlabilità tra i fattori di amplificazione ottenuti e quelli proposti dagli abachi regionali (D.G.R. 2193/2015), i coefficienti di Tabella 8-3 sono stati considerati validi per l'intera area di studio e riportati in carta tramite la colorazione corrispondente alla propria classe di amplificazione.

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

Le "Zone di suscettibilità per liquefazione" sono state derivate dalle "Zone di attenzione per liquefazione" della carta MOPS (Tavola 4 e paragrafo 8.4) utilizzando geometrie e indicazioni diverse rispetto a queste ultime, come ammesso dagli standard di MS 4.0b (2015).

Le "Zone di suscettibilità per liquefazione" sono state inoltre definite e arealmente suddivise per classi di rischio, sulla base dell'indice del potenziale di liquefazione (I_L). Le classi individuate sono riportate in carta mediante l'utilizzo dei retini previsti per le aree a rischio moderato ($2 < I_L \leq 5$), alto ($5 < I_L \leq 15$) e molto alto ($I_L > 15$). Si ricorda che gli attuali indirizzi di microzonazione non prevedono l'utilizzo di un retino per le aree a rischio basso ($2 < I_L$) che comunque permangono classificate come aree instabili ed indicate nella carta MOPS come "zone di attenzione", in ragione della presenza delle condizioni predisponenti alla liquefazione. Questo aspetto determina buona parte della mancata corrispondenza tra le "Zone di suscettibilità per liquefazione" e le "Zone di attenzione per liquefazione" della carta MOPS, che però dipende anche dalle nuove indagini e dalle verifiche effettuate per gli approfondimenti di terzo livello.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Rispetto a quanto previsto dagli Standard MS 4.0b, nelle carte sono rappresentati anche i valori puntuali delle stime del potenziale di liquefazione eseguite sulle singole verticali d'indagine. Considerata l'elevata disponibilità di prove elettriche e il maggior grado di affidabilità degli indici da esse ottenute si è ritenuto opportuno non riportare in carta indici derivati da precedenti verifiche effettuate su prove meccaniche.

I valori di I_L ottenuti sono esplicitati attraverso etichette numeriche associate a simboli quadrati con colorazioni distinte a seconda del grado di rischio. I quadrati bianchi indicano rischio di liquefazione basso ($0 < I_L \leq 2$), quelli gialli rischio moderato ($2 < I_L \leq 5$), quelli rossi rischio alto ($5 < I_L \leq 15$) e quelli viola rischio molto elevato (> 15).

9 Commenti finali e criticità

Gli approfondimenti di terzo livello eseguiti per lo studio di microzonazione sismica hanno permesso di determinare, per le aree urbanizzate e urbanizzabili, oltre che per le fasce a ridosso delle reti infrastrutturali, l'amplificazione sismica attesa e quantificare il grado di rischio nelle aree caratterizzate dalla presenza di condizioni predisponenti la liquefazione.

L'amplificazione attesa è stata determinata mediante analisi numerica di risposta sismica locale, basata su dati stratigrafici e velocità delle onde di taglio (V_s) acquisiti in foro sino ad elevate profondità. Queste ultime sono state estrapolate da aree limitrofe con caratteri geologico-strutturali e sismici affini a quelli di Sala Bolognese.

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

Nei paragrafi successivi viene dunque proposta una sintesi dei principali caratteri geologici ed evolutivi dell'area ed una analisi di come questi abbiano determinato la stretta correlazione tra rischio liquefazione e insediamento antropico. Infine sono riepilogati i risultati dello studio condotto e le principali criticità rilevate, anche attraverso il confronto tra quanto prodotto e considerato nel precedente studio di microzonazione sismica (livello II).

9.1 Organizzazione stratigrafica ed evoluzione deposizionale

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

La parte meridionale e quella più orientale dell'area di studio sono formate da corpi allungati di ghiaie sabbiose di riempimento di canale del Reno, che passano rapidamente verso nord a sabbie grossolane e sabbie ghiaiose che costituiscono i depositi della conoide alluvionale distale del fiume.

La porzione nord occidentale dello stesso intervallo stratigrafico è invece formata da corpi nastriformi di sabbie di riempimento di canali fluviali minori, intercalati lateralmente e verticalmente a estesi corpi di limi e limi sabbiosi. La profondità del tetto stratigrafico dei corpi sedimentari singlaciali aumenta verso nord, in direzione dell'asse della sinclinale attiva, anche a causa delle deformazioni indotte dalla subsidenza differenziale.

I sedimenti post-glaciali mostrano invece caratteri più omogeni rispetto ai precedenti. Tutta l'area di studio è infatti caratterizzata da una spessa e monotona successione di depositi interalvei costituiti da prevalenti limi continentali pedogenizzati, all'interno dei quali sono presenti corpi sabbiosi nastriformi, depositi dal Reno e da fiumi appenninici minori.

I sedimenti più recenti, accumulati negli ultimi 5.000 anni, sono invece stati in gran parte depositi in ambienti umidi di palude continentale, come dimostrano le diffuse argille limose, argille organiche e torbe, che costituiscono la porzione occidentale e centro meridionale del territorio comunale. Ai sedimenti argillosi si intercalano corpi allungati di sabbie fini limose, limi sabbiosi e limi, di riempimento di canale fluviale minore, affiancati da ampi corpi di limi e limi argillosi di argine naturale.

La porzione orientale è invece formata dalle sabbie più grossolane e sabbie limose deposte dal fiume Reno. I corpi sabbiosi di alveo passano lateralmente a sabbie limose e limi di argine, particolarmente sviluppati, soprattutto nella parte nord-orientale dell'area.

9.2 Microzonazione sismica e criticità

Sulla base delle nuove conoscenze acquisite mediante gli approfondimenti di terzo livello, il territorio di Sala Bolognese è stato suddiviso in aree a diversa pericolosità sismica, in base alla suscettibilità alla liquefazione dei terreni presenti. Tali aree riflettono la distribuzione tridimensionale dei corpi sedimentari di origine fluviale e possono essere differenziate in:

- a) aree su cui si sviluppano gran parte degli **abitati di Osteria Nuova, Sala Bolognese e Padulle**, principalmente formate da limi sabbiosi e sabbie limose di riempimento di canale e argine prossimale di

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Samoggia, Lavino e Ghironda. Queste fasce, morfologicamente più rilevate, **mostrano nel primo sottosuolo corpi granulari saturi con significativi indici di liquefazione (I_L)** anche superiori a 7. Gli indici più elevati appaiono concentrati nella porzione meridionale del territorio comunale, più prossima all'area di alimentazione sedimentaria, e sembrano diminuire verso nord in corrispondenza dell'abitato di Padulle dove raggiungono valori moderati. **I maggiori rischi di liquefazione interessano**, dunque, gran parte delle aree appartenenti alle **zone MOPS "30502004" e "30502007" su cui si sviluppano** porzioni significative degli **ambiti consolidati urbani e la viabilità storica**. **Il rischio di liquefazione si riduce progressivamente fino ad essere considerato non significativo** spostandosi lateralmente nelle fasce di argine distale formate dai terreni prevalentemente limosi e limoso argillosi, inquadrati nella **zona MOPS "2006"**.

b) zone su cui sorgono **l'area industriale di Stelloni** e le **località di Bagno di Piano e di Bonconvento** caratterizzate dalla presenza di limi con frequenti intercalazioni di sabbie limose e limi sabbiosi da ventaglio da rotta e argine fluviale. Queste aree, inquadrare nelle **zone MOPS 30502002 e 30502003**, presentano indici di liquefazione (I_L) variabili da moderato a molto alto. **L'area a rischio più elevato** corrisponde alla **porzione sud occidentale della zona industriale di Stelloni** in cui si raggiungono valori puntuali di I_L ben oltre 15, **con indici massimi anche superiori a 20**. Questi livelli altamente liquefacibili si ritrovano generalmente nei primi 6 metri di sottosuolo e sono associati a importanti ventagli e canali da rotta fortemente alimentati da antichi fiumi appenninici, probabilmente il Samoggia. **La parte settentrionale della stessa area industriale presenta indici di liquefazione meno elevati**, data la minor alimentazione di sabbie nella parte distale dei ventagli di rotta.

Le località di **Bagno di Piano e di Bonconvento** presentano anch'esse indici di liquefazione (I_L) alti. Anche in queste aree i livelli liquefacibili si ritrovano nei primi metri di sottosuolo e sono legati alla presenza di orizzonti sabbiosi di ventagli da rotta del vicino fiume Reno di età post-romana.

c) **zone di ambito di espansione ad oriente dell'area industriale di Stelloni**, che **non presentano corpi di sabbie fluviali nei primi 25 m di sottosuolo**, essendo **costituite da sedimenti argillosi coesivi**, spesso organici, depositi in ambienti di palude e depressione interalvea.

Sabbie ghiaiose fluviali sono generalmente presenti solo a maggiore profondità, facenti parte delle unità sedimentatesi durante l'ultima glaciazione. Il significativo **carico litostatico** e il grado di **addensamento dei corpi granulari ostacolano l'insorgere di fenomeni di liquefazione**. Queste aree, inquadrare **nella zona MOPS 2001**, possono essere quindi considerate **esenti da rischio di liquefazione**

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

cosismica, **visti i valori puntuali di I_L generalmente al disotto di 1**, ma risultano comunque soggette a fenomeni di amplificazione del moto sismico in superficie.

Il valore di accelerazione (PGA) utilizzato per il calcolo degli indici di liquefazione è stato determinato mediante risposta sismica locale e considerato rappresentativo a scala comunale, vista la sostanziale omogeneità delle condizioni sismo-stratigrafiche, in analogia con quanto osservato in altre aree della bassa pianura emiliana.

Rispetto allo studio di microzonazione sismica di secondo livello, i coefficienti di amplificazione ed i valori di accelerazione di picco in superficie (PGA) sono stati rivisti e risultano inferiori ai precedenti, passando rispettivamente da 1,5 a 1,3 e da 0,24 g a 0,21 g. La rimodulazione è stata dettata dai risultati della risposta sismica locale, che ha confermato quanto recentemente introdotto dai nuovi abachi regionali (D.G.R. 2193/2015) che prevedono coefficienti di amplificazione della PGA pari a 1,3 in contesti di pianura caratterizzati da elevati spessori di coperture sedimentarie (> 300 m). Tale valore, moltiplicato per una a_{ref} pari a 0,16 (così come definita al paragrafo 7.1.1) determina un valore di PGA pari a 0,21, utilizzato in input per il calcolo degli indici di liquefazione.

Infine gli approfondimenti di terzo livello hanno permesso la ridefinizione del bedrock sismico sulla base dei risultati delle misure di microtremore correlate con dati stratigrafici profondi e velocità delle onde di taglio (v_s) delle principali unità stratigrafiche di copertura (Minarelli et al., 2016). Questo ha permesso di individuare, con buona approssimazione, il bedrock sismico ad profondità compresa tra 500 e 650 metri, in corrispondenza del passaggio tra i depositi fini di pianura alluvionale dell'unità AEI e quelli deltizi grossolani del Quaternario Marino (paragrafo 5.1).

9.3 Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione

Nel territorio in esame emerge una forte correlazione fra la distribuzione dell'edificato storico e di quello precedente il Secondo Conflitto Mondiale, e le zone a più elevato potenziale di liquefazione.

Questa infelice correlazione non è casuale ed interessa gran parte dei centri abitati e nuclei storici della bassa Pianura Padano-Veneta, in quanto i fattori che hanno controllato la nucleazione e lo sviluppo degli insediamenti sono gli stessi che hanno prodotto i corpi sabbiosi liquefacibili. In questi vasti territori di bassa pianura i limitati gradienti morfologici e gli alvei fluviali naturalmente pensili rendono lo scolo delle acque molto difficoltoso, particolarmente nelle aree più subsidenti. La diffusione storica di aree umide, paludi, stagni e lagune costiere ha, quindi, fortemente limitato le possibilità di sviluppo agricolo ed insediativo. In questo contesto i corpi arginali e i dossi sabbiosi di paleoalveo costituivano le sole strutture stabilmente

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

emerse e drenate, percorribili anche nei periodi più umidi. La natura continua degli alvei fluviali consentiva il tracciamento di percorsi e strade, mentre gli alvei attivi hanno rappresentato, storicamente, importanti vie di trasporto fluviale. La presenza di falda libera all'interno dei corpi acquiferi freatici consentiva l'approvvigionamento idrico attraverso pozzi superficiali, fornendo al contempo acqua agli apparati radicali delle piante coltivate anche nei periodi siccitosi. La combinazione di questi fattori ha fatto sì che i centri antichi si enucleassero nella quasi totalità dei casi su corpi sabbiosi di alveo fluviale. A seguito delle diffuse bonifiche idrauliche e allo sviluppo economico e tecnologico in epoca più recente, questi condizionamenti territoriali si sono fortemente ridotti, anche se la correlazione fra zone sabbiose liquefacibili e insediamento permane. Infatti le zone morfologicamente depresse con sedimenti fangoso-torbosi presentano scarse caratteristiche geotecniche e gli insediamenti moderni tendono a svilupparsi intorno ai centri preesistenti e buona parte della rete stradale attuale ripercorre percorsi storici su corpi di paleoalveo.

9.4 Indicazioni per la riduzione del rischio sismico

Le risultanze degli studi della microzonazione sismica devono essere recepite dai Comuni mediante apposita variante agli strumenti di pianificazione (es. PSC), predisponendo cartografie e norme di piano che contengano indicazioni ed indirizzi per la riduzione del rischio sismico.

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

L'analisi integrata dei dati delle numerose indagini raccolte a supporto dello studio di microzonazione ha evidenziato come, nel territorio indagato, la presenza di livelli sabbiosi e limo-sabbiosi saturi risulti distribuita lungo le direttrici dei paleoalvei affioranti dei fiumi Lavino, Ghironda, Samoggia e Reno, su cui oggi si sviluppano gli abitati di Osteria Nuova, Sala Bolognese e Padulle.

La migrazione di questi sistemi fluviali, avvenuta nel tempo attraverso rotte, avulsioni e divagazioni, ha portato ad una distribuzione estremamente eterogenea dei litotipi alluvionali, che nel sottosuolo forma un complesso intreccio di corpi sabbiosi sedimentari.

Pertanto la definizione dei limiti delle aree potenzialmente suscettibili di liquefazione e delle diverse classi di rischio, presenta inevitabili incertezze, legate all'imperfetta conoscenza del sottosuolo, soprattutto là dove non si dispone di dati stratigrafici attendibili o adeguatamente distribuiti.

Per queste ragioni su tutto il territorio comunale si raccomanda l'esecuzione di specifici approfondimenti volti ad accertare la presenza di orizzonti potenzialmente liquefacibili, mediante adeguate campagne di

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

indagini geognostiche che comprendano prove penetrometriche con punta elettrica, preferibilmente a piezocono, spinte almeno sino a 20 metri di profondità. Tali indagini garantiscono, infatti, una più affidabile valutazione del potenziale di liquefazione e una quantificazione dei cedimenti post-sismici.

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

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

Preme sottolineare come, tuttavia, anche le più sofisticate analisi di liquefacibilità risultino sempre rappresentative di volumi di terreno limitati, specie in un contesto come quello di pianura in cui la variabilità laterale dei caratteri stratigrafici e sedimentologici risulta particolarmente elevata. L'estendere valutazioni puntuali di suscettibilità alla liquefazione ad aree contigue, può risultare alquanto incerto e dovranno perciò essere previste indagini di tipologia e numero adeguate all'ampiezza dell'area considerata e alla rilevanza delle opere.

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

A tal proposito si precisa che la modellazione e l'analisi di risposta sismica eseguita per la microzonazione sismica (paragrafo 7.1) possono fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle norme tecniche, ma non possono in alcun modo sostituirle.

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

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

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

nelle microzone 2001 e 2005 (Figura 8-1 - Tavola 6) dovranno essere proposte adeguate campagne di indagini geognostiche in situ e prove geotecniche di laboratorio, per la valutazione e quantificazione di possibili cedimenti post-sismici.

10 Bibliografia

- AA.VV., (2004): *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. Deliverable D23.12 of the SEASAME project, April, [Online], <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV., (2011): *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*. Supplemento alla rivista Ingegneria Sismica Anno XXVIII - n. 2.
- 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., Lehane B. And Marchetti D., (2014): *Examination of the potential of the seismic dilatometer (SDMT) to estimate in situ stiffness decay curves in various soil types*. *Soils and Rocks*, Vol. 37, No. 3, 177-194. ISSN: 1980-9743. Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ABMS) and Portuguese Geotechnical Society (SPG). São Paulo, Brazil.
- ASTM, (1985): *Classification of Soils for Engineering Purposes: Annual Book of ASTM Standards, D 2487-83, 04.08*, American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 395-408.
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone, P., (1990): *Structural model of Italy - Sheet n°1*, in: Castellarin A., Coli M., Dal Piaz G.V., Sartori R., Scandone P., Vai G.B. (Eds.), *Structural model of Italy*. CNR, Progetto Finalizzato Geodinamica, Roma.
- Blake A., (1941): *On the estimation of focal depth from macroseismic data*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 31, 3.
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

- Bonini L., Toscani G., Seno S., (2014): *Three-dimensional segmentation and different rupture behavior during the 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy)*. Tectonophysics 630, 33-42.
- Bordoni P., Azzara R.M., Cara F., Cogliano R., Cultrera G., Di Giulio G., Fodarella A., Milana G., Pucillo S., Riccio G., Rovelli A., Augliera P., Luzi L., Lovati S., Massa M., Pacor F., Puglia R., Ameri G., (2012): *Preliminary results from EMERSITO, a rapid response network for site-effect studies*. Ann. Geophys. 55 (4), 599–607. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-6153>.
- Boulanger R. W., Idriss I. M., (2014): *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 134 pp.
- Bruno L., Amorosi A., Severi P., Costagli B., (2016): *Late Quaternary aggradation rates and stratigraphic architecture of the southern Po Plain, Italy*. Basin Research 1–15 [http:// dx.doi.org/10.1111/bre.12174](http://dx.doi.org/10.1111/bre.12174).
- Burrato P., Ciucci F., Valensise G., (2003): *An inventory of river anomalies in the Po Plain, northern Italy: evidence for active blind thrust faulting*, Annals of Geophys., 46 (5), 865-882.
- Burrato P., Vannoli P., Fracassi U., Basili R., Valensise G., (2012): *Is blind faulting truly invisible? Tectoniccontrolled drainage evolution in the epicentral area of the May 2012, Emilia-Romagna earthquake sequence (northern Italy)*. Annals of Geophys., 55(4), 525-531, doi: 10.4401/ag-6182.
- Caputo R., Papathanasiou G., (2012): *Ground failure and liquefaction phenomena triggered by the 20 May, 2012 Emilia-Romagna (Northern Italy) earthquake: case study of Sant’Agostino - San Carlo - Mirabello zone*. Nat. Haz. Earth System Sciences, 12(11), 3177-3180, doi:10.5194/nhess-12-3177-2012.
- Caputo R., Iordanidou K., Minarelli L., Papathanassiou G., Poli M.E., Rapti-Caputo D., Sboras S., Stefani M., Zanferrari A., (2012): *Geological evidence of pre-2012 seismic events, Emilia-Romagna, Italy*. Ann. Geophysics, 55(4), 743-749, doi: 10.4401/ag-6148.
- Caputo R., Poli M.E., Minarelli L., Rapti D., Sboras S., Stefani M., Zanferrari A., (2016): *Palaeoseismological evidence for the 1570 Ferrara earthquake, Italy*. Tectonics 35 (6), 1423-1445.
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Carta Geomorfologica Provincia di Ferrara - Geotema S.r.l. (2016),
<http://visore.cgu-ferrara.it/Html5Viewer/Index.html?configBase=http://visore.cgu-ferrara.it/Geocortex/Essentials/REST/sites/UNESCO/viewers/VisoreHTML5/virtualdirectory/Resources/Config/Default>.

Castellaro S., (2012): *H/V: un contributo oltre Vs30*, In: Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici, a cura di Marco Mucciarelli, ARACNE editrice, 448 pp.

Castellaro S., Mulargia F., (2011): *Seismic soil classification from a different perspective*. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13-15.

Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C., Amato A., (2006): *CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002*, versione 1.1. INGV-CNT, Roma. <http://csi.rm.ingv.it/>.

Castiglioni G., Biancotti A., Bondesan M., Cortemiglia G.C., Elimi C., Favero V., Gasperi G., Marchetti G., Orombelli G., Pellegrini G. B., Tellini C., (1999): *Geomorphological map of the Po Plain, Italy, at scale of 1:250.000*. Earth Surf. Proc. Land., 24, 1115-1120.

Cerrina Feroni A., Ottria G., Martinelli P., Martelli L., Catanzariti R., (2002): *Carta geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo, 1: 250,000*. SELCA, Firenze.

Commissione tecnica per la microzonazione sismica, (2015): *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.0b*. http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard_MS_4_0b.pdf.

Corrado, S., Aldega, L., Zattin, M., (2010): *Sedimentary vs. tectonic burial and exhumation along the Apennines (Italy)*. Journal of the Virtual Explorer 36.

Correggiari A., Field M.E., Bortoluzzi G., Ligi M., Penitenti D., (1992) - *Ridge and swale morphology on the North Adriatic epicontinental shelf*. Rapport CIESM 33:125.

D.A.L. 112/2007: Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per *Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica*. Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007, Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007.

D.C.P. Provincia di Ferrara n. 32/2014: *Adozione della Variante al PTCP: ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale*.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

- Devoti, R., Esposito A., Pietrantonio G., Pisani A. R., Riguzzi F., (2011): *Evidence of largescale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction boundary*, Earth Planet. Sci. Lett., 311, 230–241, doi:10.1016/j.epsl.2011.09.034.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 1227/2015: Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014. *Attribuzione contributi a favore degli enti locali. Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica e delle indicazioni per l'archiviazione informatica.*
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 2193/2015: *Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla Deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112.*
- Di Capua G., Tarabusi G., (2013): *DPC-INGV S2 2012-2013 project Annex2 to D4.1 – Site-specific hazard assessment in priority areas - MIRANDOLA (MO) seismo-stratigraphic models*, Online <https://sites.google.com/site/ingvdpc2014progettos2/tasks/task-4/d4-1>.
- Di Dio G., Caporale L., (1998): *Un modello fisico tridimensionale della conoide alluvionale del Fiume Reno per la gestione degli acquiferi e lo studio della subsidenza*. In: Geofluid '98 - Problemi di ingegneria: Estrazione di fluidi e subsidenza (a cura di G. Brighenti & E. Mesini), Piacenza, 3 ottobre 1998, 67-76.
- Di Dio G., Molinari F., (2000): *A study of the groundwater resources in the Ferrara Province (Po River Basin, Northern Italy)*. Proceedings of III Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems, 24-27/10/2000. Bavaria, Munich, Germany: 84-86.
- DISS Working Group, (2015): *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0.
- Emergeo Working Group, (2013): *Liquefaction phenomena associated with the Emilia earthquake sequence of May–June 2012 (Northern Italy)*. Nat. Haz. Earth Syst. Sci., 13, 935-947.
- Facciorusso J., Madaia C., Vannucchi G., (2012): *Risposta sismica locale e pericolosità di liquefazione a S. Carlo e Mirabello*. Rapporto 3 ottobre 2012. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>.
- Farabegoli E., Onorevoli G., Ruffino C., Costantini B., (1997): *Subsurface structure of southern Po Plain Quaternary deposits (Ravenna Province, Italy)*. Special publication, Bologna University-Agip (Eds.) 12.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

- Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012a): *Terremoti dell'Emilia - Maggio 2012. Rilievo macrosismico MCS speditivo. Rapporto finale. 15 giugno 2012*, <http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/TerremotoEmiliaMCS.pdf>.
- Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012b): *The MCS macroseismic survey of the Emilia 2012 earthquakes*. Annals of Geophysics Vol. 55, No 4.
- Garofalo F., Foti S., Hollender F., Bard P.Y., Cornou C., Cox B.R., Ohrnberger M., Sicilia D., Asten M., Di Giulio G., Forbriger T., Guillier B., Hayashi K., Martin A., Matsushima S., Mercerat D., Poggi V., Yamanaka H., (2016): *InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 82, pp. 222-240, doi: 10.1016/j.soildyn.2015.12.010i.
- Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M., Vignolo A., (2010): *Sedimentary and Tectonic Evolution in the Eastern PoPlain and Northern Adriatic Sea Area from Messinian to Middle Pleistocene (Italy)*, in F.P. Sassi, G. Dal Piaz, and C. Doglioni, (eds.), *Nature and Geodynamics of the Northern Adriatic Lithostere*: Rend. Fis. Acc. Lincei, v. 21/1, p. 131-16.
- Govoni A., Marchetti A., De Gori P., Di Bona M., Lucente F.P., Improta L., Chiarabba C., Nardi A., Margheriti L., Piana Agostinetti N., Di Giovambattista R., Latorre D., Anselmi M., Ciaccio M.G., Moretti M., Castellano C., Piccinini D., (2014): *The 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy): imaging the thrust fault system by accurate aftershocks location*. *Tectonophysics*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.02.013>.
- Gruppo di Lavoro Liquefazione, (2012): *Rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a Mirabello*. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>.
- Gruppo di lavoro MPS, (2004): *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003*. Rapp. conclusivo per il DPC, INGV, Milano-Roma, pp 65 + 5 appendici.
- Gruppo di Lavoro MS, (2008): *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Conferenza delle Regioni e Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom. http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137.
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Valensise G., (2007): *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and the Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*, INGV-SGA; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

- 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.
- Lai C. G., Bozzoni F., Mangriotis M-D., Martinelli M, (2012): *Geotechnical Aspects of May 20, 2012 M5.1 Emilia Earthquake, Italy*, EUCENTRE, July 2012.
- L.R. Emilia-Romagna n. 19 del 30 ottobre 2008: *Norme per la riduzione del rischio sismico*. Bollettino Ufficiale Regione Emilia-Romagna n. 44 del 12 marzo 2010.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E., (2016): *DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>.
- Martelli L., (2011): *Quadro sismotettonico dell'Appennino emiliano-romagnolo e della Pianura Padana centrale*. Atti del 30° convegno nazionale GNGTS, Trieste 14-17 novembre 2011, sessione 1.2, 152-156.
- 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., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V., Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C., Ricci L., (2013): *Microzonazione Sismica Dell'area Epicentrale Del Terremoto Della Pianura Emiliana Del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti 32° Convegno Nazionale Gngts, Trieste. Isbn: 978-88-902101-7-4.
- Martelli L., Romani M., (2013): *Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012* (Ordinanza del commissario delegato – Presidente della Regione Emilia-Romagna n. 70/2012), Relazione Illustrativa.
- Massa M., Augliera P., Carannante S., Cattaneo M., D'Alema E., Lovati S., Monachesi G., Moretti M., Piccinini D., (Seismological projects DPC-INGV 2012-2013): *May-June 2012 Emilia seismic sequence: relocated seismicity, Project S1, Base-knowledge improvement for assessing the seismogenic potential of Italy*, Deliverable D18, Task b2, <https://sites.google.com/site/ingvdpcprojects1/home>.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

- Meletti C., Valensise G. (a cura di), (2004): *Zonazione sismogenetica ZS9 - App.2 al Rapporto conclusivo. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003)*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- Milana G., Bordoni P., Cara F., (2014): *1D velocity structure of the Po River plain (Northern Italy) assessed by combining strong motion and ambient noise data*. Bull Earthquake Eng (2014) 12: 2195. DOI:10.1007/s10518-013-9483-y.
- Minarelli L., Amoroso S, Tarabusi G., Stefani M., Pulelli M., (2016): *Down-hole geophysical characterization of middle-upper Quaternary sequences in the Apennine Foredeep, Mirabello, Italy*. Annals of Geophysics, 2016.
- Montone P., Mariucci M.T., Pierdominici S., (2012): *The Italian present-day stress map*, Geophys. J. Int., 189, 705-716; doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05391.x.
- Mucciarelli M. (a cura di), (2012): *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*.
- NTC, (2008): *Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 14 gennaio 2008*. Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, www.cslp.it, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- Ori G.G., Friend P.F., (1984): *Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets*. Geology, 12, 475-478.
- Papathanassiou G., Caputo R., Rapti-Caputo D., (2012): *Liquefaction-induced ground effects triggered by the 20th May, 2012 Emilia-Romagna (Northern Italy) earthquake*. Annals of Geophys., 55(4), doi: 10.4401/ag-6147.
- Papathanassiou G., Mantovani a., Tarabusi G., Rapti D., Caputo R. (2015): *Assessment of liquefaction potential for two liquefaction prone areas considering the May 20, 2012 Emilia (Italy) earthquake*, Engineering Geology, vol. 189, April, pp. 1-16, DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.02.002.
- Pasolini C., Gasperini P., Albarello D., Lolli B., D'Amico V., (2008): *The Attenuation of Seismic Intensity in Italy, Part I: Theoretical and Empirical Backgrounds*, Bull Seism. Soc. Am., Vol. 98(2), 682-691.
- Paolucci E., Albarello D., D'Amico S., Lunidei E., Martelli L., Mucciarelli M., Pileggi D. (2015): *A large scale ambient vibration survey in the area damaged by May-June 2012 seismic sequence in Emilia Romagna, Italy*, Bulletin of Earthquake Engineering, 13 (11) pp. 3187-3206.
- Picotti V., Pazzaglia F.J., (2008): *A new active tectonic model for the construction of the Northern Apennines mountain front near Bologna (Italy)*. Journal of Geophysical Research, 113(B8), pp.1-24.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

- Pieri M., Groppi G., (1975): *The structure of the base of the Pliocene-Quaternary sequence in the subsurface of the Po and Veneto Plains, the Pedepennine Basin and the Adriatic Sea*. Structural model of Italy, Quaderni de "La Ricerca Scientifica" 90, 409-415.
- Pieri M., Groppi G., (1981): *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl., 414, 1-13.
- Pondrelli S., Salimbeni S., Perfetti P., Danecek P., (2012): *Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence*. Annals of Geophys., **55**(4), 615-621, doi: 10.4401/ag-6146.
- Rathje E. M, Kottke A. (2013) - *Strata*, <https://nees.org/resources/strata>.
- RER & 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 & Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120.
- Ricci Lucchi F., (1986): *The Oligocene to Recent foreland basins of the northern Apennines*, in: Allen, P., Homewood, P. (Eds.), *Foreland basins*. Blackwell Scientific, Oxford, pp. 105-139.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M.L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi S., Rio D., (1982): *Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nel margine appenninico*, in: Cremonini G., Ricci Lucchi F. (Eds.). Guida alla Geologia del margine appenninico-padano Pitagora-Technoprint, Bologna, pp. 17-46.
- Robertson P.K., (2009): *Performance based earthquake design using the CPT*, Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - from case history to practice, IS-Tokyo, June 2009
- Robertson P.K., Wride C.E., (1998): *Cyclic Liquefaction and its Evaluation based on the CPT Canadian*. Geotechnical Journal, 1998, Vol. 35, August.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), (2016): *CPT15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPT15>
- Scognamiglio L., Margheriti L., Mele F.M. Tinti E., Bono A., De Gori P., Lauciani V., Lucente F.P., Mandiello A.G., Marcocci C., Mazza S., Pintore S., Quintiliani M., (2012): *The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations, moment tensors and magnitudes*. Annals of Geophys., **55**(4), 549-556, doi: 10.4401/ag-6159
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, **2**(4), 552-555.
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, **2**, 4, pp. 550-555.

MICROZONAZIONE SISMICA LIVELLO 3 - COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Stefani, Minarelli L., Pavanati A., Furin S., Tarabusi G., Gamberi S., (2014): *Studio di microzonazione sismica di dettaglio dell'area del Comune di Mirabello (FE) basata sull'interpolazione tridimensionale di dati geologici e geofisici puntuali.*

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.

Trincardi F., Correggiari A., Roveri M., (1994): *Late Quaternary transgressive erosion and deposition in a modern epicontinental shelf: The Adriatic Semienclosed Basin.* Geo-Marine Letters, 14, 41-51.

Veronese T., Romagnoli M., (2014): *Considerazioni sulla valutazione del rischio di liquefazione indotta da sisma, sui terreni della bassa pianura padana.* Il Geologo dell'Emilia-Romagna.

Waelbroeck C., Labeyrie L., Michel E., Duplessy J.C., McManus J., Lambeck K., Balbon E., Labracherie M., (2002): *Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records.* Quaternary Science Reviews, 21, 295-305.

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

11 Allegati

Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000
Carta Geologico – Tecnica per la Microzonazione Sismica	Tavola 2	1:10.000
Carta Geologica di superficie	Tavola 2a	1:10.000
Carta delle frequenze naturali del terreno	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica	Tavola 4	1:10.000
Carta della velocità delle onde di taglio	Tavola 5	1:10.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 6 - FA_{PGA}	1:5.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 7 - $FA_{0,1-0,5 s}$	1:5.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 8 - $FA_{0,5-1,0 s}$	1:5.000
Carta di Microzonazione Sismica Livello 3	Tavola 9 - $FA_{0,5-1,5 s}$	1:5.000

Allegato 1 - Sezioni Geologiche

Allegato 2 - Rapporti di Prova

Allegato 3 - Verifica Potenziale di Liquefazione CPTU MS
