



**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 2

**Regione Emilia-Romagna**  
**Comune di Sala Bolognese**



## Relazione Illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Geotema S.r.l.	14/06/2015

## Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b> .....	<b>4</b>
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi .....	4
1.2	Lo studio di microzonazione sismica .....	5
1.3	Elaborati prodotti .....	6
<b>2</b>	<b>Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento</b> .....	<b>7</b>
2.1	Sismicità storica.....	8
2.1.1	La sequenza del 2012.....	13
2.2	Sorgenti sismogenetiche .....	14
<b>3</b>	<b>Assetto geologico e geomorfologico dell'area</b> .....	<b>17</b>
3.1	Quadro geografico geomorfologico.....	17
3.2	Contesto geologico stratigrafico.....	18
3.3	Evoluzione generale delle successioni del Quaternario Superiore .....	24
<b>4</b>	<b>Dati geotecnici e geofisici</b> .....	<b>26</b>
4.1	Indagini di repertorio .....	26
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica.....	28
4.2.1	Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU) e cono sismico (SCPTU).....	28
4.2.2	Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) .....	34
4.2.3	Misure di microtremore a stazione singola (HVSr).....	37
<b>5</b>	<b>Modello del sottosuolo</b> .....	<b>40</b>
5.1	Substrato .....	42
5.1.1	Quaternario Marino .....	42
5.1.2	Quaternario prevalentemente continentale (Supersistema Emiliano-Romagnolo) .....	43
5.1.3	Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES).....	44
5.2	Terreni di copertura .....	46
<b>6</b>	<b>Interpretazioni e incertezze</b> .....	<b>49</b>
6.1	Substrato rigido .....	49
6.2	Terreni potenzialmente liquefacibili.....	51
6.3	Frequenza naturale dei terreni ( $f_0$ ).....	52

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

6.4	Velocità delle onde di taglio (Vs) .....	54
6.5	Piezometria .....	55
<b>7</b>	<b>Metodologie di elaborazione e risultati.....</b>	<b>57</b>
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali.....	58
7.2	Zone instabili potenzialmente soggette a liquefazione .....	60
7.2.1	Verifiche del potenziale di liquefazione .....	61
<b>8</b>	<b>Elaborati cartografici .....</b>	<b>66</b>
8.1	Carta delle indagini (Tavole 1a - 1b) .....	67
8.2	Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica (Tavole 2a - 2b).....	68
8.2.1	Forme di superficie e sepolte.....	68
8.2.2	Elementi geologici .....	69
8.2.3	Terreni di copertura.....	70
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavola 3).....	72
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (Tavola 4).....	73
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Tavola 5).....	78
8.6	Carte di microzonazione sismica (Tavola 6 - Tavola 7 - Tavola 8).....	79
<b>9</b>	<b>Commenti finali e criticità .....</b>	<b>80</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>83</b>

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

*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. Alfio Carroccio

*Elaborazione tavole cartografiche:*

dott. Luca Minarelli  
dott. Andrea Pavanati

*Elaborazione dei dati stratigrafici:*

prof. Marco Stefani  
dott. Luca Minarelli

---

*Esecuzione ed elaborazione misure  
di microtremore a stazione singola:*

dott.ssa Ambra Mantovani

*Esecuzione ed elaborazione prove  
penetrometriche statiche (CPTu e  
SCPTu):*

dott. geol. Leonardo Calzolari

*Esecuzione ed elaborazione  
indagini MASW:*

Progeo s.r.l. – Forlì (FC)

## 1 Introduzione

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

Lo studio di Microzonazione Sismica di secondo livello del Comune di Sala Bolognese è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato C della Delibera di Giunta della Regione Emilia-Romagna 1919/2013 dal titolo "Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione civile 52/13 a favore degli Enti locali".

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 3.0", redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), da qui in avanti "Standard MS 3.0";
- "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica", approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome (Gruppo di lavoro MS, 2008) e successive modifiche e integrazioni (AA.VV., 2011), da qui in avanti "ICMS".

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

- Delibera Assemblea Legislativa (DAL) n. 112/2007 Art. 16 c.1 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica";
- Variante al PTCP della Provincia di Bologna in materia di rischio sismico, adottata dal Consiglio Provinciale il 14/1/2013;
- L.R. 30/10/2008 n.19 "Norme per la riduzione del Rischio Sismico";
- D.M. del 14/01/2008 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".

## 1.2 Lo studio di microzonazione sismica

Strumento fondamentale per la prevenzione e la riduzione del rischio sismico, la microzonazione conduce alla suddivisione dettagliata del territorio in base alla risposta locale dei terreni durante un evento sismico e ai possibili effetti indotti dallo scuotimento.

Come noto, le caratteristiche geologiche e geomorfologiche locali possono determinare alterazioni nel moto sismico in superficie. Le conoscenze derivate dagli studi di microzonazione si pongono, dunque, come elementi capaci di indirizzare le scelte di pianificazione urbanistica verso zone a minore pericolosità, di orientare interventi di mitigazione del rischio in zone con particolari criticità e di fornire indicazioni utili anche per la progettazione.

Le finalità di uno studio di microzonazione sismica con approfondimenti di secondo livello possono essere sintetizzate nella definizione di un modello geologico di sottosuolo - in termini litologici, stratigrafici e tettonici - che consenta l'individuazione di aree a diversa pericolosità sismica sulla base della suscettibilità ad effetti cosismici locali. Per queste aree devono essere definiti nel dettaglio gli effetti locali potenzialmente indotti, l'amplificazione attesa ed eventuali ulteriori approfondimenti necessari di terzo livello.

Secondo gli indirizzi regionali (D.A.L. 112/2007) tali studi, necessari per la redazione e l'approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (L.R. 19/08), devono necessariamente interessare le aree urbanizzate e quelle potenzialmente sottoposte a trasformazioni urbanistiche, comprese le porzioni delle reti infrastrutturali principali.

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

### 1.3 Elaborati prodotti

Gli elaborati di riferimento dello studio di microzonazione sismica sono rappresentati dalle tavole cartografiche di sintesi e dai dati informatizzati, sotto forma di archivi digitali, ad esse associate.

La relazione illustrativa rappresenta, invece, il documento tecnico che accompagna gli elaborati cartografici; illustra i criteri adottati per studio; descrive le metodologie d'analisi dei dati e 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:

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

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in conformità con quanto indicato nell'allegato D della Delibera Regione Emilia-Romagna 1919/2013 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. 52/2013 e decreto del 15 aprile 2013 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 3.0" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012), 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 e 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 dello territorio stesso, vale a dire tutte le informazioni riguardanti i terremoti avvenuti in epoca storica e gli effetti ad essi associati.

L’inquadramento sismotettonico dell’area è stato di conseguenza realizzato anche attraverso la consultazione di diversi *database* pubblici, sviluppati da vari Enti e gruppi di ricerca:

- il CPTI11 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2011 (Rovida et al., 2011 - <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia fino alla data dell’ultimo aggiornamento;
- il DBMI11 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI11 (Locati et al., 2011 - <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi et al., 2007);
- 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 AG (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri



## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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 ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica di base a scala nazionale;
- il Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.1.1 (DISS Working Group, 2010 e Basili et al., 2008 - <http://diss.rm.ingv.it>), che contiene informazioni relative a sorgenti individuali e composite in grado di generare terremoti di magnitudo pari a 5.5 o superiore. Le sorgenti sono rappresentate in pianta in modo semplificato tramite segmenti o aree georeferenziate che indicano rispettivamente singole faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite). Per ognuna delle sorgenti il database contiene informazioni che consentono la ricostruzione tridimensionale della struttura sismogenetica.
- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello et al., 2006 - <http://csi.rm.ingv.it/>), che contiene tutte le registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale relative ai terremoti avvenuti tra il 1981 ed il 2002;
- il Database ISIDe (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutte le registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale relative ai terremoti avvenuti dal 2003 ad oggi;

### 2.1 Sismicità storica

Per la ricostruzione della sismicità storica del Comune di Sala Bolognese ci si è innanzitutto basati sull’analisi del database Macrosismico Italiano - DBMI11 (Locati et al., 2011), 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.

In relazione al Comune di Sala Bolognese il database contiene esclusivamente tre record relativi ad eventi sismici storici. Per ciascun terremoto sono riportati il valore di intensità avvertita nel territorio comunale (IMCS) in occasione di ogni specifico evento, l’epicentro macrosismico (Ax), il numero di località nelle quali il sisma è stato avvertito (Np), l’intensità

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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 2-1.

Effetti	In occasione del terremoto del:				
I [MCS]	Data	Ax	Np	$I_0$	$M_w$
4	1983 11 09 16:29	Parmense	850	6-7	5.06 ±0.09
NF	1992 04 17 11:59	Monteveglia	56	4-5	4.32 ±0.18
2-3	2000 06 18 07:42	Parmense	300	5-6	4.43 ±0.09

**Tabella 2-1 Intensità macrosismiche osservate a Sala Bolognese tratte dal database DBMI11 (Locati et al., 2011). 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  $I_{MCS} = 1$ ).**

Come è possibile osservare dai dati disponibili, il terremoto più forte e prossimo all'area in esame risulta essere quello del 9 novembre 1983, con intensità epicentrale pari al VII grado della scala MCS e magnitudo equivalente pari a 5.06. Questo evento non è tuttavia riportato nel database CFTI4med, nel quale, come sisma più forte e prossimo all'area di Sala Bolognese, è riportato quello avvenuto il 3 gennaio 1505. Tale evento, di intensità epicentrale pari al VIII grado della scala MCS e magnitudo equivalente pari a 5.6, si identifica come il secondo di una sequenza sismica costituita di 3 scosse principali.

In Figura 2-1 e Figura 2-2 sono rappresentate le mappe degli effetti dei terremoti sopra citati nell'area comunale di Sala Bolognese.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

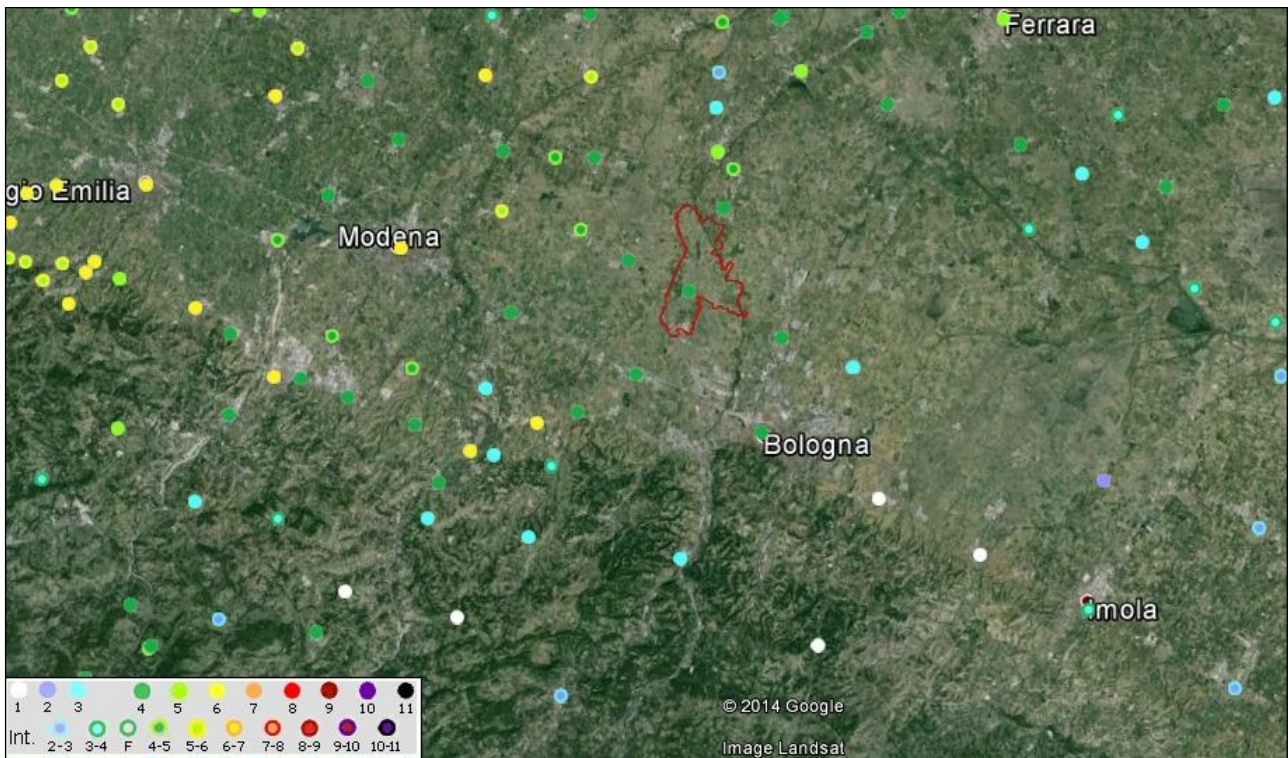


Figura 2-1 Effetti della sisma del 03/11/1983. Dati DBMI11. In rosso area del Comune di Sala Bolognese.

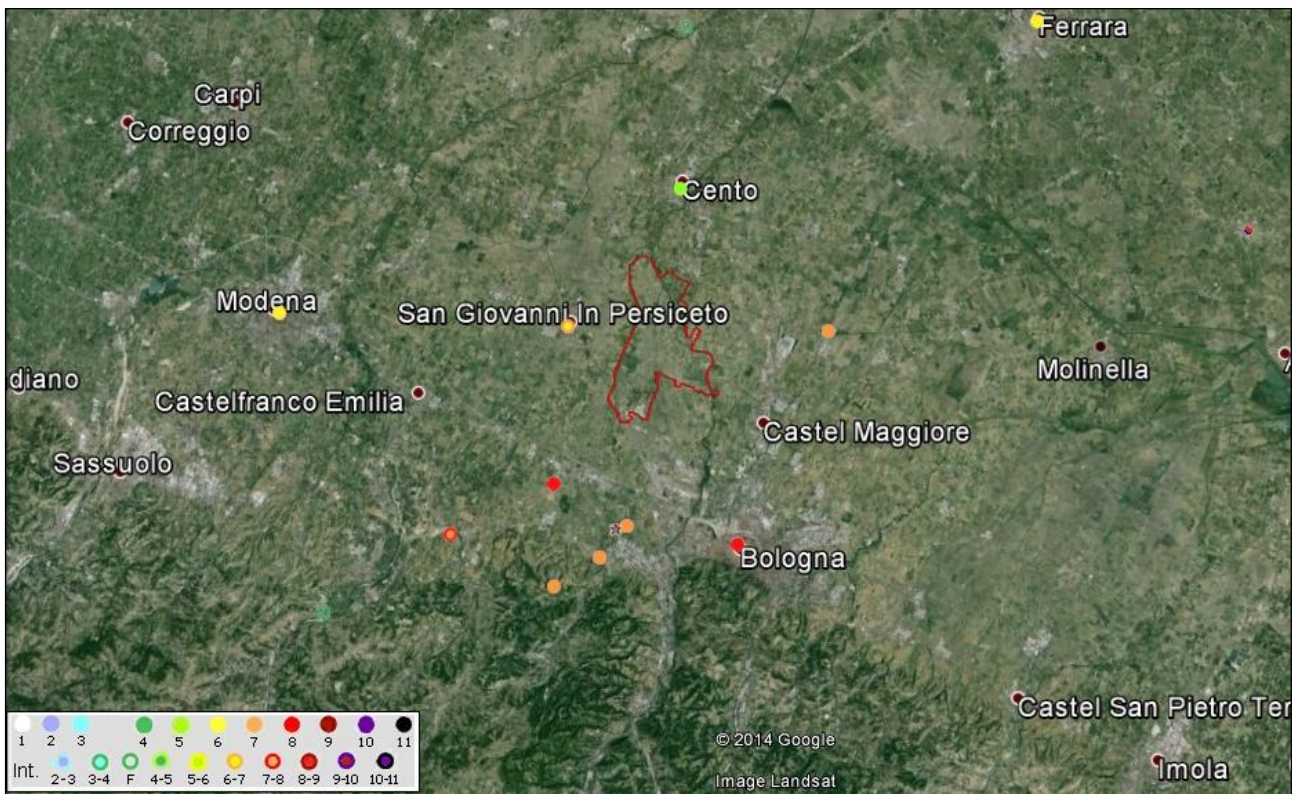


Figura 2-2 Effetti del sisma del 03/01/1505 Dati CFTI4med. In rosso area del Comune di Sala Bolognese.



## MICROZONAZIONE SISMICA DEL 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.*

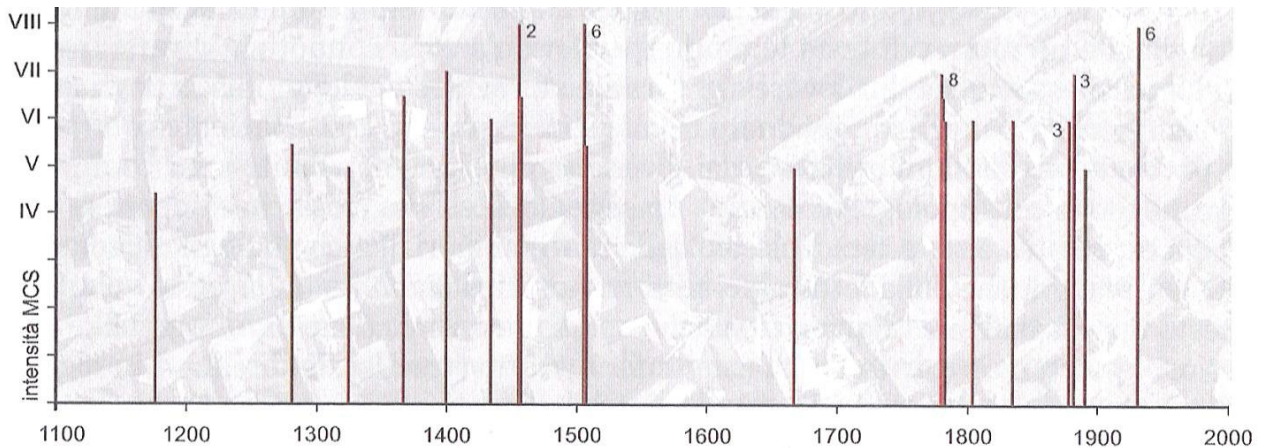
*Le scosse più forti furono tre: la prima avvenne il 31 dicembre 1504 alle ore 4:00 GMT circa (le 11 e mezza in orario "all'italiana"). A Bologna la scossa fece cadere numerosi comignoli e causò lesioni nelle volte di vari edifici, fra cui la chiesa di S.Francesco; la chiesa di S.Giacomo subì danni anche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

In generale, per uno studio approfondito degli effetti degli eventi sismici nel territorio bolognese, è opportuno riferirsi al volume *I terremoti a Bologna e nel suo territorio dal XII al XX secolo* (Boschi e Guidoboni, 2003), da cui sono stati sintetizzati i dati del CFTI4Med che, a

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

loro volta, costituiscono il riferimento del CPTI11. In Figura 2-3 è riportato il grafico della cronologia dei terremoti noti con effetti di danno nell'area di Bologna.



**Figura 2-3 Cronologia e intensità epicentrale dei 38 terremoti noti per l'area di Bologna tra il XII e il XX secolo con effetti locali superiori o uguali al grado V-VI MCS (da Boschi e Guidoboni, 2003).**

Oltre al già citato evento del gennaio 1505, il catalogo CFTI4med riporta altri due terremoti che hanno prodotto effetti pari al VIII grado della scala MCS in area bolognese. In merito all'evento del 6 febbraio 1455, la localizzazione epicentrale risulta assai incerta, approssimativamente nella media valle del Reno all'altezza di Marzabotto mentre la scossa del 20 aprile 1929 risulta localizzata tra i comuni di Monteveglio e Monte San Pietro.

Per la sequenza sismica del 1929 si riporta, di seguito, un estratto degli effetti principali osservati proveniente dal catalogo CFTI4Med:

*La sequenza sismica del 1929, caratterizzata da quasi 100 scosse, cominciò il 10 aprile 1929 e si protrasse fino all'ottobre successivo. Gli eventi di maggiore intensità furono sei e avvennero nell'intervallo di un mese: il 10 aprile (ore 5:43:12 GMT), il 19 aprile (4:15:22 GMT), il 20 aprile (1:09:46 GMT), il 22 aprile (8:25:33 GMT), il 29 aprile (18:35:59 GMT) e l'11 maggio (19:22:48 GMT). [...]*

*La terza scossa, avvenuta il 20 aprile, fu la più forte di tutta la sequenza: causò danni in oltre 600 siti su un'area di 680 kmq del pedeappennino fra i fiumi Reno e Samoggia e fu sentita in tutta l'Italia centro-settentrionale fino alla Toscana e alle Marche, su un'area di circa 150.000 kmq. I danni maggiori, consistenti in crolli parziali e gravi dissesti strutturali, colpirono alcune località dei comuni di Monte San Pietro e Zola Predosa. Negli altri siti le tipologie di danno più diffuse furono: strapiombi di muri, lesioni più o meno gravi ai muri e agli architravi di porte e finestre, dissesti ai tetti e ai pavimenti, caduta di comignoli. [...]*

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

### 2.1.1 La sequenza del 2012

Relativamente agli effetti delle due scosse principali, del 20 e del 29 maggio, della sequenza sismica emiliana del 2012, i rapporti dei rilievi macrosismici eseguiti (Galli et al., 2012a e 2012b) citano, per la provincia di Bologna, solo le località più settentrionali e non è quindi attribuito alcun valore di intensità al sito nel Comune di Sala Bolognese. In ogni caso, poiché ai comuni di Argelato, Bentivoglio e San Giovanni in Persiceto è stata attribuita una intensità pari al grado V° MCS, sulla base delle informazioni raccolte si può stimare anche per l'area in oggetto un analogo valore di intensità macrosismica.

Le scosse, infatti, 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 e 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;

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

- 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.

### 2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il database DISS (*DISS Working Group*, 2010) indica la presenza, poco a sud dell'area in esame (Figura 2-4), di due sorgenti sismogenetiche individuali, ITIS091 e ITIS103, associate rispettivamente alla scossa del 3 gennaio 1505 e a quella del 20 aprile 1929. Entrambe rientrano nella fascia delimitata dalla sorgente composita ITCS047, lungo la quale paiono essersi concentrati i maggiori eventi dell'area 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.

La profondità di tali strutture varia tra 2 e 8 km, mentre lo slip-rate è compreso tra 0.1 e 0.5 mm/anno.

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 e 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 varisica (Figura 3-4). I caratteri strutturali e sismogenetici di queste



## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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.

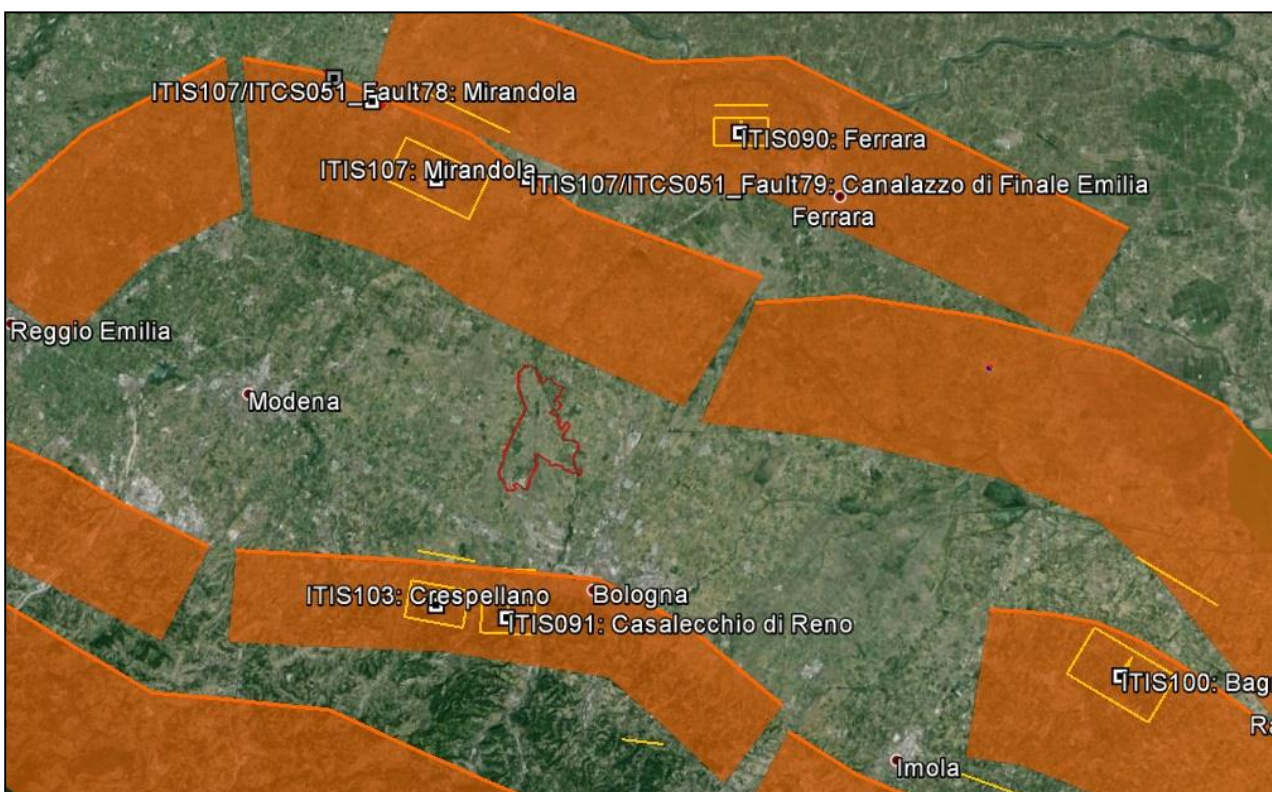
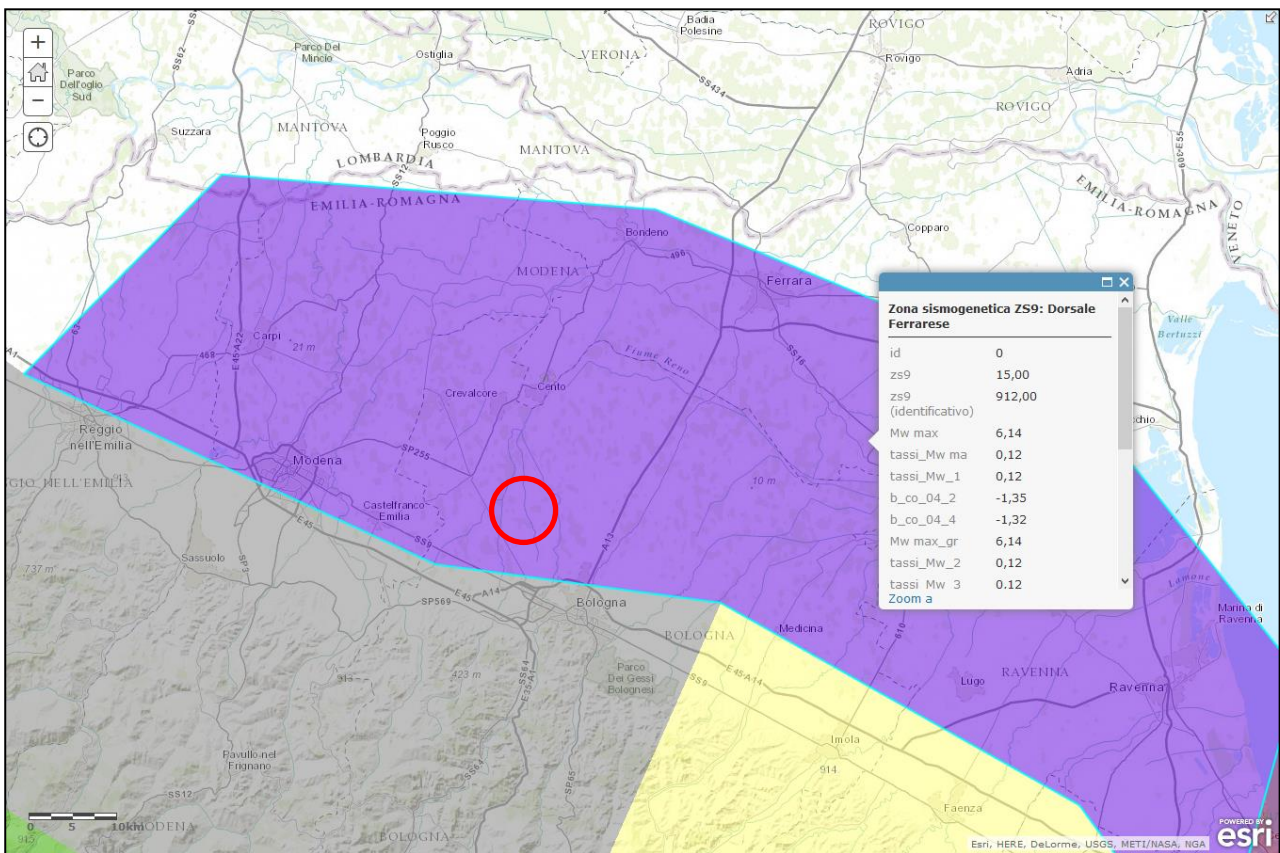


Figura 2-4 Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) e individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.1.1, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è riportata l'area comunale di Sala Bolognese.



**MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE**


**Figura 2-5 Ubicazione del territorio comunale di Sala Bolognese (in rosso) rispetto alla zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).**

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 (Figura 2-4), come avvenuto nel caso dei sismi del maggio 2012 originati dalle sorgenti composite ITCS050 e ITCS051.

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9 (Figura 2-5), 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, l'area in esame ricade entro la Zona 912, caratterizzata da un valore di  $Mw_{max}$  pari a 6.14.

### **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 è situato nella porzione sud-occidentale della pianura bolognese, poco a nord della Via Emilia e 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-quadernarie, 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

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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 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.

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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 & 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 & Groppi, 1975), denominati, ad ovest, "Arco delle Pieghe Emiliane" ed ad est "Arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole".

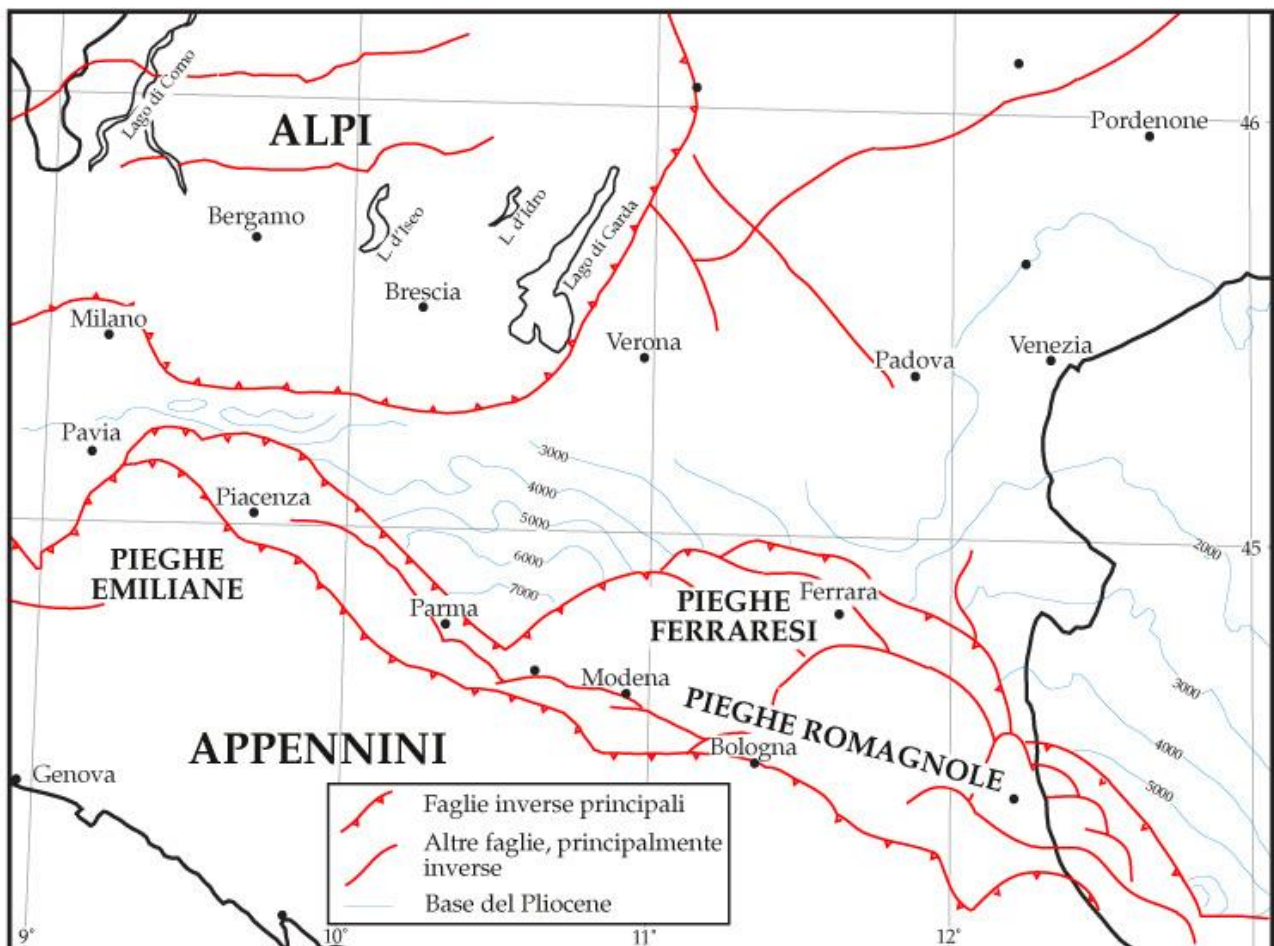
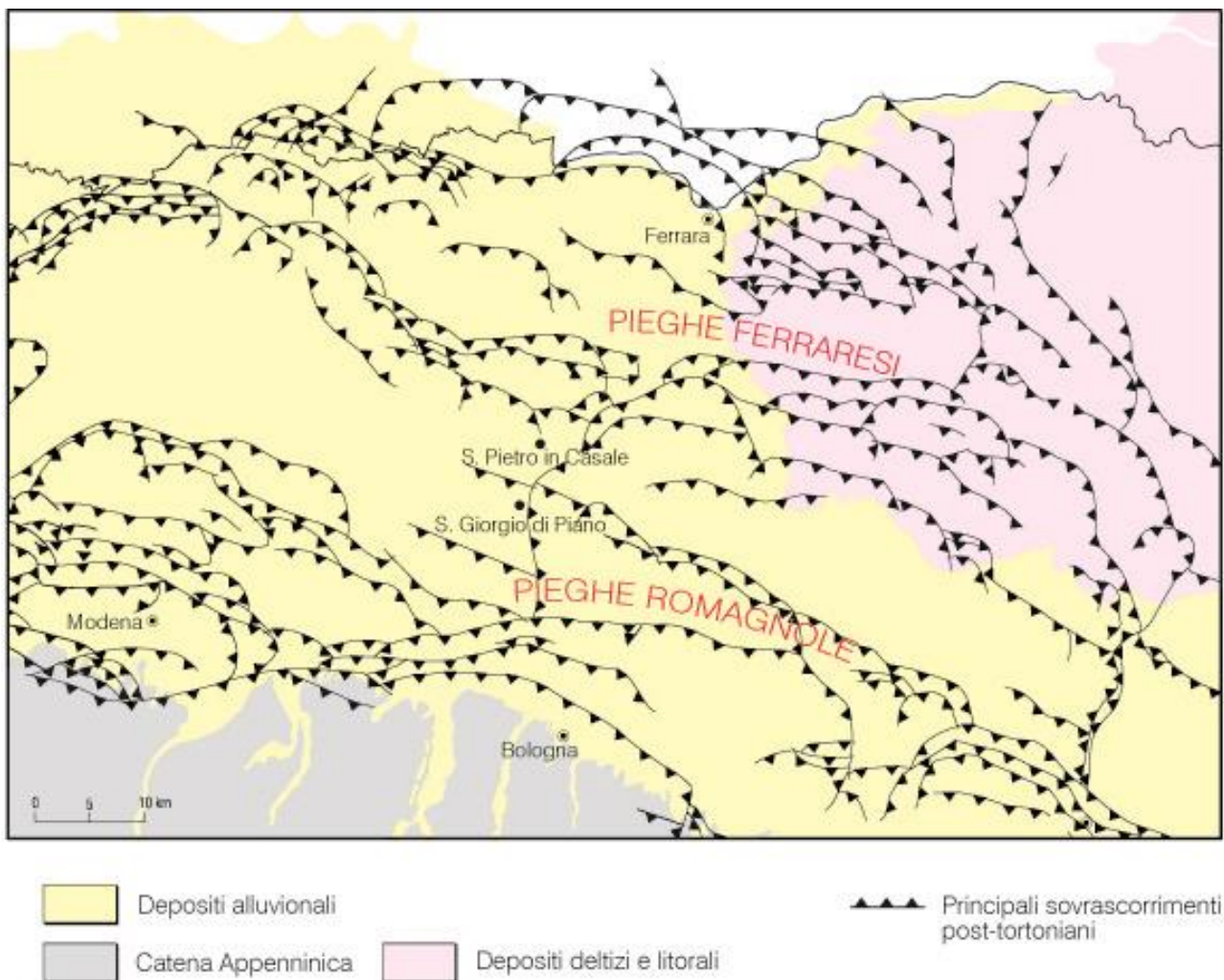


Figura 3-1 Carta strutturale semplificata della Pianura Padana ottenuta da dati di superficie e di sottosuolo (da Pieri & Groppi, 1975). Le isobate si riferiscono alla profondità della base dei sedimenti pliocenici. Modificata da Burrato et al., 2003.



## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

L'arco orientale può essere suddiviso in tre fasci strutturali minori, dette "Pieghe Ferraresi", "Pieghe Romagnole" e "Pieghe Adriatiche" (Bigi et al., 1990); le Pieghe Ferraresi (Dorsale Ferrarese o "*Ferrara Folds*" di Pieri & 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 & 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.

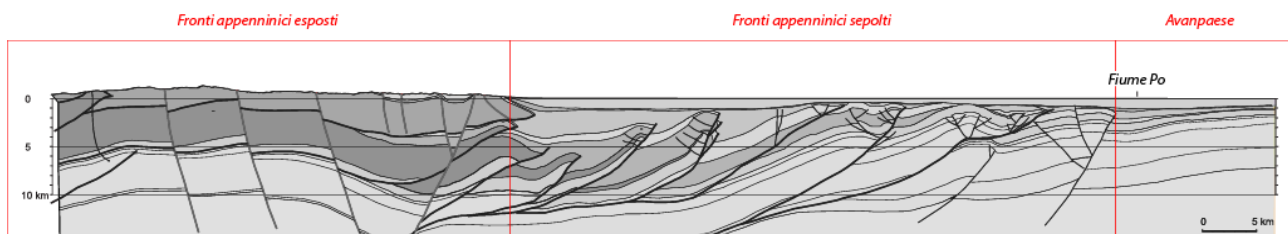


**Figura 3-2 Inquadramento tettonico che mostra la complessità delle strutture dell'arco delle Pieghe Romagnole e Ferraresi. Modificato dalle Note Illustrative del Foglio CARG 203, Poggio Renatico.**

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Le Pieghe Ferraresi a nord ed il fronte sepolto delle falde Liguridi prossimo alla Via Emilia, delimitano un ampio bacino satellite (*piggy-back* Ori & 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 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.

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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 & 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 & 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 DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

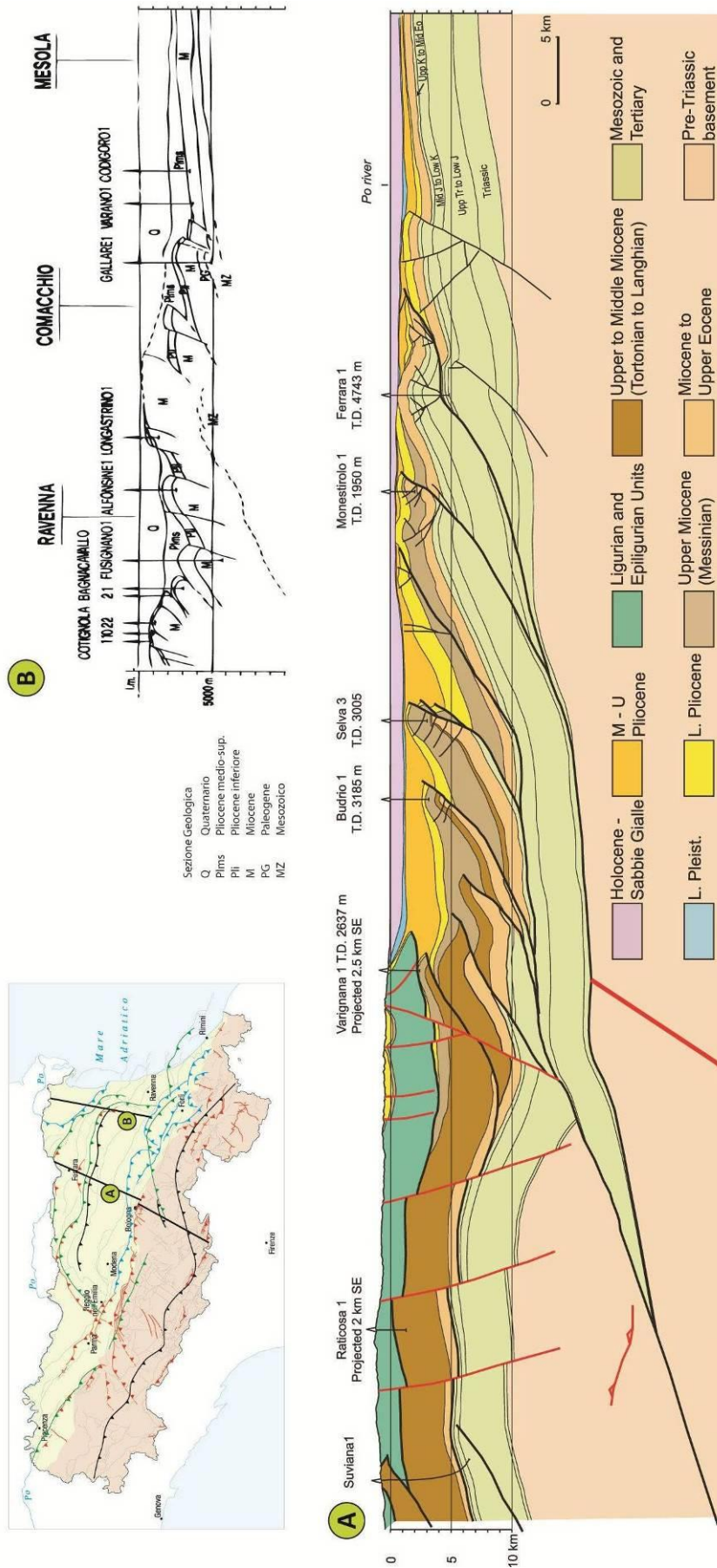


Figura 3-4 - Contesto strutturale della porzione emiliano-Romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) da Pieri & Groppi, 1981 mentre la sezione inferiore (A) da Toscani *et al.*, 2009.



### 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.

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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 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 rendere 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, ma l'area qui analizzata si trovava nei pressi della 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 geotecnici e geofisici

I dati utilizzati in questo studio sono stati ricavati da indagini sia di tipo diretto sia 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.

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, MASW e DOWN HOLE. Le ubicazioni delle prove utilizzate per lo studio di microzonazione sismica sono riportate nella carta delle indagini – scala 1:10.000 (Tavole 1a e 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 da indagini realizzate a supporto della Pianificazione Territoriale e delle pratiche edilizie.

L'approfondito lavoro di ricerca negli archivi comunali ha consentito di individuare e aggiungere alle indagini derivanti dalla banca dati regionale, ben 231 prove pregresse considerate di buona affidabilità realizzate nell'ultimo decennio nel Comune di Sala Bolognese.

L'ampio repertorio d'indagini acquisite è stato integrato da alcune raccolte mirate effettuate presso geologi professionisti che, su richiesta, hanno fornito rapporti di prova estratti dai propri archivi. Da ultimo sono stati consultati dati di sottosuolo ubicati in comuni limitrofi e posti a breve distanza dal confine comunale. Pur non essendo riportati in carta (cfr. Tavola 1a - 1b), tali dati sono risultati utili per integrare le conoscenze relative all'area studiata.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Tipologia di prova	Numero
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica	323
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	5
Prove penetrometriche statiche con piezocono	16
Prove penetrometriche dinamiche leggere	2
Sondaggi a carotaggio continuo	19
Sondaggi a distruzione di nucleo	34
Pozzi per acqua	31
Misure di microtremore a stazione singola	16
Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)	3

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

In Tabella 4-1 si riporta una sintesi delle indagini pregresse utilizzate nello studio di microzonazione, suddivise per numero e tipologia. Delle 449 indagini acquisite, 218 sono state derivate dalla banca dati geognostica regionale, mentre le restanti 231 sono state selezionate, raccolte e informatizzate nell'ambito dello studio di microzonazione sismica in oggetto.

Le indagini ritenute affidabili sono state raccolte, organizzate e archiviate in una banca dati informatizzata e georeferenziata in ambiente GIS ESRI, la cui struttura risponde alle specifiche indicate dal DPC 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  $V_s$  misurati o frequenze di risonanza.

Per l'archiviazione della mole di dati acquisiti si è fatto ricorso all'applicativo software SoftMS versione 3.0, messo a disposizione dal Dipartimento nazionale della Protezione Civile (DPC). Attraverso maschere dedicate, il software consente l'inserimento dei dati all'interno di tabelle costituite da un insieme di record, gerarchicamente organizzate in modo da memorizzare in maniera indipendente le informazioni legate al sito di indagine, alle prove in esso realizzate ed ai parametri tecnici di ognuna di queste.

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Nonostante la profondità d'indagine spesso non molto elevata, l'abbondanza e la distribuzione delle indagini geognostiche pregresse ha consentito la ricostruzione di un quadro litostratigrafico tutto sommato chiaro e di buona correlabilità generale, almeno per quanto concerne i terreni più superficiali. Molto meno numerose sono invece risultate le indagini geofisiche pregresse, volte ad accertare la profondità del bedrock sismico ed a misurare la velocità delle onde di taglio nei primi trenta metri di sottosuolo ( $V_{s30}$ ).

### 4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

Allo scopo di caratterizzare dal punto di vista geomeccanico e geofisico, in primo luogo, le aree indicate come suscettibili di trasformazioni urbanistiche negli strumenti di pianificazione comunale, sono state realizzate specifiche campagne di indagini. Le indagini hanno interessato anche gli ambiti urbani consolidati in cui la carenza di dati non avrebbe reso possibile un corretto percorso di microzonazione sismica.

Ai fini dello studio sono, dunque, state eseguite:

- 3 Prove penetrometriche statiche con piezocono digitale (CPTU);
- 3 Prove penetrometriche statiche con cono sismico (SCPTU);
- 4 Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW);
- 35 Misure di microtremore a stazione singola (HVSr).

In seguito vengono descritte le metodologie operative di esecuzione e di analisi di tali prove, di cui vengono riportati in tabella i principali dati e risultati, unitamente ai codici identificativi originali e a quelli assegnati in seguito all'archiviazione in banca dati.

#### 4.2.1 Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU) e cono sismico (SCPTU)

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.

Tramite penetrometro dotato di punta elettrica a piezocono (CPTU - *Cone Penetration Test with Pore Pressure measurement*), collegata mediante cavo elettrico ad una unità di acquisizione in

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

superficie, è possibile 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 discriminare meglio i terreni a scarsa permeabilità e bassa resistenza, oltre a fornire un maggior dettaglio stratigrafico dovuto all'acquisizione in automatico del dato ad ogni centimetro di avanzamento.

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

Le nuove indagini sono state eseguite mediante penetrometro statico, con spinta massima nominale di 20 t, montato su cingolato leggero Pagani TG63-200 autoancorante, equipaggiato di punta elettrica Mh297 con diametro  $\varnothing = 36$  mm, angolo di apertura  $60^\circ$ , superficie di  $10 \text{ cm}^2$  e manicotto di frizione laterale con superficie  $150 \text{ cm}^2$ .

Le prove penetrometriche realizzate per lo studio di microzonazione sono state ubicate all'interno degli ambiti urbanizzati e urbanizzabili tenendo conto sia delle necessità urbanistiche e pianificatorie comunali, sia della distribuzione e delle caratteristiche del dato geologico disponibile. Per quanto riguarda gli aspetti geologici, si è tentato di individuare e caratterizzare parametricamente i principali corpi sabbiosi superficiali, la cui presenza nelle aree di studio era già nota attraverso dati di bibliografia.

Le indagini penetrometriche hanno, dunque, interessato le località riportate in Tabella 4-2.

Prova	ID_SPU	Lat WGS84	Lon WGS84	Località	data
CPTU1	037050P59558	44,6512	11,2806	Bagno di Piano - Cimitero	24/07/2014
CPTU2	037050P59559	44,6045	11,3107	Bonconvento - Chiesa	02/08/2014
CPTU3	037050P59560	44,5901	11,2577	Stelloni- Area industriale	02/08/2014
SCPTU1	037050P59561	44,6310	11,2805	Padulle- Cimitero	24/07/2014
SCPTU2	037050P59562	44,5829	11,2459	Stelloni- Area industriale	02/08/2014
SCPTU3	037050P59563	44,5806	11,2380	Osteria Nuova - Scuola Primaria	24/07/2014

**Tabella 4-2 Principali dati associati alla prove penetrometriche di nuova esecuzione.**

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Le prove CPTU sono state spinte fino alla profondità massima di 20 metri, spessore entro il quale possono verificarsi fenomeni di liquefazione cosismica in presenza di terreni granulari poco addensati e saturi in acqua.

Le SCPTU sono state pianificate per raggiungere, invece, 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  $V_{s30}$ . Tale parametro permette di discriminare la categoria di sottosuolo per la definizione dell'azione sismica (O.P.C.M. 3274/2003), ma è anche fondamentale per determinare i coefficienti di amplificazione sismica tramite gli abachi proposti dagli indirizzi della Regione Emilia-Romagna (DAL 112/2007).

Dei tre sismoconi realizzati, nessuno ha però raggiunto la profondità preventivata causa rifiuto strumentale dovuto alla presenza di terreni basali con resistenze alla punta decisamente elevate ( $R_p > 400 \text{ kg/cm}^2$ ).

Nella Tabella 4-3 sono riportate le profondità effettivamente raggiunte dalle indagini ed il corrispettivo valore di  $V_{s30}$  ottenuto mediando le singole  $V_s$  misurate ad ogni metro di infissione, con dati di velocità da bibliografia relativi ai depositi granulari costituenti la base della successione indagata.

Prova	ID_SPU	Località	Prof. (m)	$V_{s30}$ (m/s)
SCPTU1	037050P59561	Padulle - Cimitero	28	208
SCPTU2	037050P59562	Stelloni - Area industriale	23	228
SCPTU3	037050P59563	Osteria Nuova - Scuola Primaria	26	212

**Tabella 4-3 Sintesi dei dati principali associati ai 3 sismoconi (SCPTU) eseguiti.**

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, come dettagliato nel paragrafo 7.2.1.

Di seguito sono riportati, in forma tabellare, dati di sintesi relativi alla successione litostratigrafica indagata ed i principali parametri geotecnici dei terreni che la costituiscono.



**MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE**

geostudiocalzolari

Via G. Matteotti 178 - 46025 Poggio Rusco (MN)  
tel, fax 0386 740284 - cell. 333 4273452

**SUCCESSIONE LITOLOGICA E PARAMETRI GEOTECNICI**

<b>Commissa:</b> Comune di Sala Bolognese					<b>Legenda</b>								
<b>Località:</b> Sala Bolognese (BO)					<b>FC</b>	Contenuto di fine in percentuale			<b>OCR</b>	Grado di sovraconsolidazione			
<b>Prova:</b> CPTu 1					<b>yt</b>	Peso dell'unità di volume totale			<b>Mo</b>	Modulo edometrico			
<b>Data di indagine:</b> 24 luglio 2014					<b>su</b>	Resistenza o Coesione non drenata			<b>Ey</b>	Modulo di Young			
<b>Falda:</b> m da p.c.					<b>Dr</b>	Densità relativa			<b>c'</b>	Coesione drenata			
<b>Liv. Piezometrico:</b> 2.50 m da p.c.					<b>φ'</b>	Resistenza drenata o di attrito			<b>μ</b>	Coefficiente di Poisson			
<b>Latitudine:</b> 44 39.0803N													
<b>Longitudine:</b> 11 16.8372E													
Robertson (1990)	Quota base strato da p.c.	Resistenza alla punta	Resistenza di attrito laterale	Yi F. (2010)	Robertson & Cabal (2009)	Terzaghi (1943)	Khulawy & Mayne (1990)	Jamiolkowski et al (2001)	Mayne (2009)	Togliani (2012)	Lambe & Withman (1983) - Gmax	c'	μ
Litologia	Z (cm)	qc (MPa)	fs (kPa)	FC%	yt (kN/m <sup>3</sup> )	su (kPa)	φ' (°)	Dr (%)	OCR	Mo (MPa)	Ey (MPa)	(kPa)	
Sabbia limosa	70	2.98	47.39	47	17.7	-	36	63	32.3	12.5	196.6	2	0.39
Limo argilloso - Argilla limosa	472	1.20	51.56	76	17.4	50	25	-	3.2	14.4	199.9	7	0.39
Limo sabbioso	606	1.62	24.98	55	16.8	-	29	13	1.3	6.8	139.0	3	0.17
Sabbia limosa	650	1.96	18.38	45	16.5	-	31	17	1.3	8.0	113.3	3	0.14
Argilla limosa	700	0.78	25.74	86	16.6	35	22	-	1.3	4.6	139.5	10	0.38
Limo argilloso - Argilla limosa	814	0.69	17.46	83	16.2	32	22	-	0.9	3.6	108.0	8	0.38
Argilla limosa	906	0.78	30.69	89	16.9	36	22	-	1.4	4.8	156.8	13	0.38
Limo argilloso - Argilla limosa	940	1.10	43.40	82	17.3	52	23	-	0.9	6.1	190.1	10	0.41
Argilla limosa	1184	1.23	72.69	89	18.0	57	24	-	1.7	8.4	250.3	19	0.40
Limo argilloso - Argilla limosa	1284	1.62	65.42	79	17.9	77	24	-	1.2	10.1	234.8	17	0.42
Argilla limosa	1472	1.27	53.59	89	17.6	58	23	-	1.3	7.5	213.0	20	0.40
Limo argilloso - Argilla limosa	1516	2.85	85.11	67	18.5	90	27	-	1.2	16.1	276.9	17	0.37
Sabbia limosa	1566	5.48	58.17	37	18.2	-	33	33	1.2	24.6	228.2	7	0.22
Argilla limosa	1702	1.72	107.59	92	18.6	77	24	-	1.6	10.8	305.9	29	0.41
Argilla	1788	1.03	49.03	99	17.4	43	22	-	0.9	4.7	199.2	18	0.38
Limo argilloso - Argilla limosa	1886	2.29	53.81	74	17.8	80	25	-	1.0	11.5	214.6	19	0.39
Argilla limosa	2000	1.20	36.49	93	17.1	50	23	-	0.9	5.6	169.8	21	0.39

**Tabella 4-4 Sintesi litostratigrafica e principali parametri geotecnici dei terreni - Prova CPTu1**

geostudiocalzolari

Via G. Matteotti 178 - 46025 Poggio Rusco (MN)  
tel, fax 0386 740284 - cell. 333 4273452

**SUCCESSIONE LITOLOGICA E PARAMETRI GEOTECNICI**

<b>Commissa:</b> Comune di Sala Bolognese					<b>Legenda</b>								
<b>Località:</b> Sala Bolognese (BO)					<b>FC</b>	Contenuto di fine in percentuale			<b>OCR</b>	Grado di sovraconsolidazione			
<b>Prova:</b> CPTu 2					<b>yt</b>	Peso dell'unità di volume totale			<b>Mo</b>	Modulo edometrico			
<b>Data di indagine:</b> 2 agosto 2014					<b>su</b>	Resistenza o Coesione non drenata			<b>Ey</b>	Modulo di Young			
<b>Falda:</b> m da p.c.					<b>Dr</b>	Densità relativa			<b>c'</b>	Coesione drenata			
<b>Liv. Piezometrico:</b> 4.20 m da p.c.					<b>φ'</b>	Resistenza drenata o di attrito			<b>μ</b>	Coefficiente di Poisson			
<b>Latitudine:</b> 44 34.9895N													
<b>Longitudine:</b> 11 14.7602E													
Robertson (1990)	Quota base strato da p.c.	Resistenza alla punta	Resistenza di attrito laterale	Yi F. (2010)	Robertson & Cabal (2009)	Terzaghi (1943)	Khulawy & Mayne (1990)	Jamiolkowski et al (2001)	Mayne (2009)	Togliani (2012)	Lambe & Withman (1983) - Gmax	c'	μ
Litologia	Z (cm)	qc (MPa)	fs (kPa)	FC%	yt (kN/m <sup>3</sup> )	su (kPa)	φ' (°)	Dr (%)	OCR	Mo (MPa)	Ey (MPa)	(kPa)	
Sabbia limosa	148	6.16	80.91	29	18.6	-	37	71	20.3	27.4	266.4	4	0.43
Limo sabbioso	208	4.57	154.15	51	19.3	-	34	49	5.8	26.3	357.6	5	0.33
Limo argilloso - Argilla limosa	300	2.15	100.42	72	18.5	105	27	-	3.2	27.0	294.5	10	0.46
Argilla limosa	412	0.94	43.22	87	17.2	44	23	-	2.0	6.9	186.9	8	0.39
Limo argilloso - Argilla limosa	480	1.38	39.96	72	17.3	43	25	-	1.3	7.6	180.3	6	0.34
Argilla limosa	530	0.56	18.59	93	16.3	24	20	-	0.9	2.4	105.5	5	0.35
Limo sabbioso	582	1.91	20.25	51	16.7	-	30	13	1.1	7.7	121.0	2	0.12
Argilla limosa	622	0.61	11.56	88	16.0	25	21	-	0.9	2.5	80.7	6	0.36
Limo sabbioso	676	1.46	13.37	56	16.3	-	27	6	0.9	6.3	84.8	4	0.22
Sabbia limosa	734	3.00	12.89	30	16.3	-	32	23	1.1	13.6	89.2	3	0.17
Argilla limosa	1150	1.02	42.06	90	17.0	44	22	-	1.2	5.7	170.9	13	0.38
Limo argilloso - Argilla limosa	1216	2.40	158.42	83	19.2	112	25	-	1.5	16.0	366.8	20	0.44
Argilla limosa	1402	1.93	121.90	89	18.7	88	24	-	1.7	13.2	318.2	26	0.42
Limo argilloso - Argilla limosa	1642	1.95	48.48	77	17.6	78	25	-	0.9	9.5	200.3	15	0.40
Argilla limosa	1878	1.17	28.92	92	16.8	48	22	-	0.9	5.1	147.9	18	0.38
Limo argilloso - Argilla limosa	1928	1.20	14.83	83	16.2	50	22	-	0.6	4.4	97.8	12	0.39
Argilla limosa	2088	1.22	17.51	86	16.4	51	22	-	0.7	5.0	109.2	17	0.39

**Tabella 4-5 Sintesi litostratigrafica e principali parametri geotecnici dei terreni - Prova CPTu2**



**MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE**

geostudiocalzolari

 Via G. Matteotti 178 - 46025 Poggio Rusco (MN)  
 tel, fax 0386 740284 - cell. 333 4273452

**SUCCESSIONE LITOLOGICA E PARAMETRI GEOTECNICI**

<b>Comessa:</b> Comune di Sala Bolognese <b>Località:</b> Sala Bolognese (BO) <b>Prova:</b> CPTu 3 <b>Data di indagine:</b> 2 agosto 2014 <b>Falda:</b> m da p.c. <b>Liv. Piezometrico:</b> 2.95 m da p.c. <b>Latitudine:</b> 44 35.4162N <b>Longitudine:</b> 11 15.4435E					<b>Legenda</b> <b>FC</b> Contenuto di fine in percentuale <b>OCR</b> Grado di sovraconsolidazione <b>yt</b> Peso dell'unità di volume totale <b>Mo</b> Modulo edometrico <b>su</b> Resistenza o Coesione non drenata <b>Ey</b> Modulo di Young <b>Dr</b> Densità relativa <b>c'</b> Coesione drenata <b>φ'</b> Resistenza drenata o di attrito <b>μ</b> Coefficiente di Poisson									
Robertson (1990)	Quota base strato da p.c.	Resistenza alla punta	Resistenza di attrito laterale	Yi F. (2010)	Robertson & Cabal (2009)	Terzaghi (1943)	Khulawy & Mayne (1990)	Jamiolkowski et al (2001)	Mayne (2009)	Togliani (2012)	Lambe & Withman (1983) - Gmax	c'	μ	
Litologia	Z (cm)	qc (MPa)	fs (kPa)	FC%	yt (kN/m <sup>3</sup> )	su (kPa)	φ' (°)	Dr (%)	OCR	Mo (MPa)	Ey (MPa)	(kPa)		
Limo argilloso - Argilla limosa	84	2.36	116.06	70	18.5	86	31	-	22.6	73.7	300.8	8	0.47	
Argilla limosa	276	0.96	62.88	91	17.5	46	24	-	5.3	14.4	216.7	10	0.41	
Limo argilloso - Argilla limosa	928	1.07	35.04	76	17.0	48	24	-	1.2	6.7	162.7	8	0.39	
Argilla limosa	1596	1.08	38.87	90	17.2	47	23	-	1.3	5.9	179.3	18	0.39	
Limo argilloso - Argilla limosa	1630	1.49	16.84	72	16.4	42	25	-	0.6	6.2	104.3	9	0.33	
Argilla limosa	1974	1.14	29.70	92	16.9	47	22	-	0.9	5.2	151.4	19	0.39	
Limo argilloso - Argilla limosa	2084	1.32	17.33	81	16.4	55	23	-	0.6	5.1	106.9	14	0.40	

**Tabella 4-6 Sintesi litostratigrafica e principali parametri geotecnici dei terreni - Prova CPTu3**

geostudiocalzolari

 Via G. Matteotti 178 - 46025 Poggio Rusco (MN)  
 tel, fax 0386 740284 - cell. 333 4273452

**SUCCESSIONE LITOLOGICA E PARAMETRI GEOTECNICI**

<b>Comessa:</b> Comune di Sala Bolognese <b>Località:</b> Sala Bolognese (BO) <b>Prova:</b> SCPTu 1 <b>Data di indagine:</b> 24 luglio 2014 <b>Falda:</b> m da p.c. <b>Liv. Piezometrico:</b> 2.00 m da p.c. <b>Latitudine:</b> 44.630882 <b>Longitudine:</b> 11.280404					<b>Legenda</b> <b>FC</b> Contenuto di fine in percentuale <b>OCR</b> Grado di sovraconsolidazione <b>yt</b> Peso dell'unità di volume totale <b>Mo</b> Modulo edometrico <b>su</b> Resistenza o Coesione non drenata <b>Ey</b> Modulo di Young <b>Dr</b> Densità relativa <b>c'</b> Coesione drenata <b>φ'</b> Resistenza drenata o di attrito <b>μ</b> Coefficiente di Poisson									
Robertson (1990)	Quota base strato da p.c.	Resistenza alla punta	Resistenza di attrito laterale	Yi F. (2010)	Robertson & Cabal (2009)	Terzaghi (1943)	Khulawy & Mayne (1990)	Jamiolkowski et al (2001)	Mayne (2009)	Togliani (2012)	Lambe & Withman (1983) - Gmax	c'	μ	
Litologia	Z (cm)	qc (MPa)	fs (kPa)	FC%	yt (kN/m <sup>3</sup> )	su (kPa)	φ' (°)	Dr (%)	OCR	Mo (MPa)	Ey (MPa)	(kPa)		
Sabbia limosa	52	6.11	141.91	35	18.7	-	37	82	46.5	26.8	303.9	4	0.48	
Argilla limosa	152	1.72	131.78	87	18.6	85	27	-	11.7	52.4	323.7	13	0.45	
Limo argilloso - Argilla limosa	922	1.04	41.52	76	17.1	45	24	-	1.5	7.4	177.7	9	0.39	
Argilla limosa	982	1.12	63.23	88	17.8	52	23	-	1.7	7.8	233.0	19	0.40	
Limo argilloso - Argilla limosa	1090	1.38	49.70	79	17.6	64	24	-	1.2	8.5	206.3	14	0.41	
Argilla limosa	2444	1.36	53.30	90	17.5	60	24	-	1.1	7.5	204.9	23	0.40	
Sabbia limosa	2628	8.21	37.85	22	17.9	-	32	40	1.0	38.9	181.1	9	0.25	
Sabbia con Limo	2750	14.98	52.19	8	18.5	-	33	56	1.2	75.4	222.7	11	0.33	
Sabbia pulita	2806	29.50	88.21	2	19.4	-	35	72	1.9	160.3	292.3	18	0.42	

**Tabella 4-7 Sintesi litostratigrafica e principali parametri geotecnici dei terreni - Prova SCPTu1**

**MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE**

geostudiocalzolari

Via G. Matteotti 178 - 46025 Poggio Rusco (MN)  
tel.fax 0386 740284 - cell. 333 4273452

**SUCCESSIONE LITOLOGICA E PARAMETRI GEOTECNICI**

<b>Comessa:</b> Comune di Sala Bolognese					<b>Legenda</b>									
<b>Località:</b> Sala Bolognese (BO)					<b>FC</b> Contenuto di fine in percentuale					<b>OCR</b> Grado di sovraconsolidazione				
<b>Prova:</b> SCPTu 2					<b>yt</b> Peso dell'unità di volume totale					<b>Mo</b> Modulo edometrico				
<b>Data di indagine:</b> 2 agosto 2014					<b><math>s_u</math></b> Resistenza o Coesione non drenata					<b>Ey</b> Modulo di Young				
<b>Falda:</b> m da p.c.					<b>Dr</b> Densità relativa					<b>c'</b> Coesione drenata				
<b>Liv. Piezometrico:</b> 1.35 m da p.c.					<b><math>\phi'</math></b> Resistenza drenata o di attrito					<b><math>\mu</math></b> Coefficiente di Poisson				
<b>Latitudine:</b> 44 34.9895N														
<b>Longitudine:</b> 11 14.7602E														
Robertson (1990)	Quota base strato da p.c.	Resistenza alla punta	Resistenza di attrito laterale	Yi F. (2010)	Robertson & Cabal (2009)	Terzaghi (1943)	Khulawy & Mayne (1990)	Jamiolkowski et al (2001)	Mayne (2009)	Togliani (2012)	Lambe & Withman (1983) - Gmax	c'	$\mu$	
Litologia	Z (cm)	qc (MPa)	fs (kPa)	FC%	yt (kN/m <sup>3</sup> )	su (kPa)	$\phi'$ (°)	Dr (%)	OCR	Mo (MPa)	Ey (MPa)	(kPa)		
Limo argilloso - Argilla limosa	28	1.41	29.82	65	16.9	43	32	-	42.2	54.0	141.5	5	0.46	
Argilla limosa	134	1.07	55.37	87	17.6	53	27	-	13.1	27.6	218.9	10	0.44	
Limo argilloso - Argilla limosa	482	1.20	58.04	66	17.6	49	26	-	2.5	11.6	219.6	8	0.38	
Sabbia limosa	524	2.39	19.78	34	16.6	-	32	25	1.8	10.7	117.9	3	0.19	
Limo argilloso - Argilla limosa	776	0.94	21.01	69	16.4	34	24	-	1.2	5.5	119.0	8	0.34	
Limo sabbioso	814	1.64	23.20	55	16.7	-	30	12	1.2	6.9	131.6	4	0.14	
Sabbia limosa	886	2.52	17.51	36	16.6	-	31	22	1.5	10.3	108.3	4	0.17	
Limo sabbioso	912	1.63	24.37	58	16.8	-	28	10	1.1	7.7	135.2	6	0.21	
Sabbia limosa	1062	3.14	22.68	35	16.8	-	32	25	1.3	15.0	125.6	5	0.20	
Sabbia con Limo	1136	6.85	21.14	9	17.1	-	35	47	1.7	34.4	125.3	6	0.29	
Sabbia limosa	1220	3.20	15.55	33	16.5	-	32	24	1.2	14.2	100.2	5	0.17	
Argilla limosa	2026	1.09	30.83	89	16.9	45	23	-	1.1	5.6	155.5	20	0.39	
Limo argilloso - Argilla limosa	2100	1.57	35.38	80	17.3	69	24	-	0.7	7.0	172.6	15	0.42	
Sabbia pulita	2316	29.84	116.64	3	19.6	-	35	76	2.5	164.8	322.3	19	0.44	

**Tabella 4-8 Sintesi litostratigrafica e principali parametri geotecnici dei terreni - Prova SCPTu2**

geostudiocalzolari

Via G. Matteotti 178 - 46025 Poggio Rusco (MN)  
tel.fax 0386 740284 - cell. 333 4273452

**SUCCESSIONE LITOLOGICA E PARAMETRI GEOTECNICI**

<b>Comessa:</b> Comune di Sala Bolognese					<b>Legenda</b>									
<b>Località:</b> Sala Bolognese (BO)					<b>FC</b> Contenuto di fine in percentuale					<b>OCR</b> Grado di sovraconsolidazione				
<b>Prova:</b> SCPTu 3					<b>yt</b> Peso dell'unità di volume totale					<b>Mo</b> Modulo edometrico				
<b>Data di indagine:</b> 24 luglio 2014					<b><math>s_u</math></b> Resistenza o Coesione non drenata					<b>Ey</b> Modulo di Young				
<b>Falda:</b> m da p.c.					<b>Dr</b> Densità relativa					<b>c'</b> Coesione drenata				
<b>Liv. Piezometrico:</b> 1.60 m da p.c.					<b><math>\phi'</math></b> Resistenza drenata o di attrito					<b><math>\mu</math></b> Coefficiente di Poisson				
<b>Latitudine:</b> 44 34.8539N														
<b>Longitudine:</b> 11 14.2831E														
Robertson (1990)	Quota base strato da p.c.	Resistenza alla punta	Resistenza di attrito laterale	Yi F. (2010)	Robertson & Cabal (2009)	Terzaghi (1943)	Khulawy & Mayne (1990)	Jamiolkowski et al (2001)	Mayne (2009)	Togliani (2012)	Lambe & Withman (1983) - Gmax	c'	$\mu$	
Litologia	Z (cm)	qc (MPa)	fs (kPa)	FC%	yt (kN/m <sup>3</sup> )	su (kPa)	$\phi'$ (°)	Dr (%)	OCR	Mo (MPa)	Ey (MPa)	(kPa)		
Limo sabbioso	64	3.12	88.52	56	18.5	-	36	62	27.6	23.6	275.8	3	0.40	
Argilla limosa	148	1.19	64.02	84	17.8	61	26	-	8.4	25.7	234.5	10	0.44	
Sabbia limosa	210	3.56	40.84	27	17.7	-	34	43	4.0	16.4	189.1	3	0.28	
Sabbia con Limo	244	8.86	69.32	10	18.6	-	36	66	5.7	43.9	251.2	5	0.40	
Limo argilloso - Argilla limosa	268	1.17	91.21	72	17.9	59	25	-	2.6	13.4	259.9	8	0.43	
Limo sabbioso	366	2.15	50.94	50	17.6	-	31	24	2.4	10.7	204.2	4	0.23	
Limo argilloso - Argilla limosa	862	1.20	56.07	74	17.7	60	25	-	1.6	9.9	218.8	11	0.41	
Argilla limosa	1052	0.81	34.39	90	17.0	38	22	-	1.3	5.0	166.6	15	0.38	
Limo argilloso - Argilla limosa	1470	1.41	42.51	78	17.3	60	24	-	1.1	8.2	182.0	15	0.40	
Sabbia limosa	1534	3.87	46.55	44	17.9	-	32	27	1.2	15.7	202.1	6	0.19	
Limo argilloso - Argilla limosa	1570	2.43	53.92	67	17.8	52	28	-	1.0	12.1	215.8	13	0.30	
Argilla limosa	2220	1.20	44.83	91	17.5	56	23	-	1.1	6.8	194.4	24	0.40	
Limo argilloso - Argilla limosa	2302	2.63	79.92	76	18.2	113	28	-	0.9	15.0	255.7	23	0.42	
Sabbia limosa	2386	7.14	90.52	39	18.8	-	31	37	1.1	31.0	282.0	9	0.24	
Limo argilloso - Argilla limosa	2402	4.32	172.91	74	19.5	195	30	-	1.3	27.5	384.2	36	0.46	
Sabbia pulita	2432	31.95	115.33	4	19.7	-	35	76	2.3	177.9	334.0	19	0.44	
Sabbia con Limo	2498	18.17	106.62	10	19.4	-	34	61	1.5	91.6	314.8	13	0.36	
Sabbia pulita	2564	25.67	105.78	5	19.5	-	34	69	1.8	136.4	315.6	16	0.40	

**Tabella 4-9 Sintesi litostratigrafica e principali parametri geotecnici dei terreni - Prova SCPTu3**

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

### 4.2.2 Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW)

La stima dell'amplificazione stratigrafica richiede la conoscenza della velocità di propagazione delle onde di taglio volumetrico ( $V_s$ ) nei primi 30 metri di sottosuolo. Per ottenere un maggior numero di registrazioni di tale parametro sul territorio vengono, di norma, utilizzate misure di tipo indiretto, in quanto più economiche e di rapida realizzazione rispetto ad acquisizioni effettuate mediante tecniche di tipo diretto. Il metodo *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) è una tecnica di indagine geofisica non invasiva che stima il profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) alle varie profondità, basandosi sulla registrazione delle onde di superficie effettuata da sensori collocati temporaneamente sulla superficie del terreno. Questa tecnica restituisce una modellazione del sottosuolo sfruttando il fenomeno della **dispersione geometrica** delle onde di Rayleigh, onde di superficie ad oscillazione ellittico - retrograda, attraverso le quali si propaga gran parte dell'energia meccanica liberata da una sorgente impulsiva alla superficie topografica.

Come noto, in un mezzo elastico ideale, omogeneo ed isotropo, la velocità di propagazione delle onde di Rayleigh è indipendente dalla frequenza e ciò implica che alle diverse lunghezze d'onda corrisponda la stessa velocità di fase ( $V_R$ ). Le onde di Rayleigh assumono invece un comportamento dispersivo in un mezzo verticalmente eterogeneo, costituito da strati con proprietà meccaniche diverse. Ad ogni lunghezza d'onda corrisponde, in questo secondo caso, una determinata velocità di fase che varia al variare delle caratteristiche meccaniche dello strato interessato dalla propagazione delle onde meccaniche. Dalla lunghezza d'onda dipende anche la profondità di sottosuolo raggiunta dalla perturbazione oscillatoria; in particolare, all'aumentare della lunghezza d'onda  $\lambda$ , aumenta la profondità del sottosuolo interessato dalla propagazione dell'onda stessa. Ne deriva che le componenti a frequenza più bassa, con  $\lambda$  e velocità di fase più grandi, penetrano a profondità maggiori e sono quindi influenzate da strati più lontani dalla superficie topografica rispetto a quelle a frequenza più alta, con  $\lambda$  e velocità di fase minori, che risentono solo delle proprietà dei livelli superficiali.

L'andamento delle velocità di fase in funzione della lunghezza d'onda o della frequenza è detta curva di dispersione. Dall'analisi della curva di dispersione è possibile risalire alla distribuzione verticale monodimensionale di  $V_s$  nel sottosuolo, utilizzando la semplice relazione algebrica:

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

$$V_R = \left( \frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} \right) V_S$$

dove  $V_R$  è la velocità di fase delle onde Rayleigh di superficie,  $V_S$  è la velocità delle onde volumetriche di taglio e  $\nu$  è il coefficiente di Poisson.

La propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo verticalmente eterogeneo è un fenomeno multi-modale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, sussistono diverse lunghezze d'onda alle diverse profondità. Di conseguenza, ad una determinata frequenza possono corrispondere diverse velocità di fase e differenti modi di vibrazione possono esibirsi simultaneamente.

Per discriminare i modi di vibrazione delle onde di Rayleigh e rappresentarne la relazione di dispersione è necessario trasformare la rappresentazione del campo di moto dal dominio spazio-tempo al dominio frequenza - velocità di fase. Diverse metodologie di elaborazione consentono di estrarre dai sismogrammi acquisiti le caratteristiche dispersive del sito in esame. Tra le più diffuse vi è l'analisi spettrale in dominio di frequenza  $f$  (numero di oscillazioni nell'unità di tempo) e numero onda  $k$  (numero di onde nell'unità di lunghezza), che corrisponde ovviamente al reciproco della lunghezza d'onda e che dipende anche dalla velocità di propagazione spaziale dell'onda stessa (Strobbia, 2003). L'analisi spettrale del segnale di sito permette la definizione della curva di dispersione sperimentale attraverso la relazione:

$$V_R(f) = \frac{f}{k}$$

dove  $V_R$  è la velocità di fase delle onde Rayleigh,  $f$  è la frequenza e  $k$  il numero d'onda.

La curva di dispersione ottenuta, viene successivamente interpretata attraverso un processo di inversione che fornisce il profilo verticale della velocità delle onde volumetriche di taglio e quindi una stima della distribuzione monodimensionale della rigidità in funzione della profondità del sottosuolo. Questa inversione avviene comunemente attraverso procedure computazionali di affinamento del modello numerico del sottosuolo alla curva di dispersione

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

ricavata dalle misure sul terreno. La procedura di modellazione numerica per tentativi computazionali (*trial and error*) consente di determinare un modello monodimensionale di sottosuolo, che interpreti la distribuzione di  $V_s$  in funzione della profondità stratigrafica. In tale modello, la curva di dispersione misurata viene confrontata con una curva di dispersione teorica progressivamente affinata fino a convergere sulla migliore riproduzione numerica del dato misurato (*best fitting computation*). La buona sovrapposizione fra queste due curve valida la compatibilità del modello di sottosuolo con le misure.

A supporto dello studio di Microzonazione Sismica sono state realizzate indagini MASW di tipo attivo; metodo in cui le onde meccaniche che inducono l'oscillazione nel sottosuolo vengono generate artificialmente e contestualmente misurate da stendimenti lineari di sensori. Questa tecnica consente di ottenere una curva di dispersione sperimentale per frequenze generalmente maggiori di 4-5 Hz fornendo, quindi, informazioni sulle prime decine di metri di sottosuolo, informazioni utili alla determinazione dei valori di  $V_{s30}$ .

I dati acquisiti ed elaborati con le procedure sopra descritte sono stati, poi, confrontati e opportunamente tarati con i dati stratigrafici e litologici presenti in bibliografia (pozzi, sezioni stratigrafiche ecc.) e con le curve HVSR misurate nei siti (paragrafo 4.2.3) in modo da vincolare le curve ottenute e derivare i valori di  $V_{s30}$ .

La campagna di indagini geofisiche con tecnica MASW è stata condotta, per conto dello Studio scrivente, dalla società Progeo S.r.l. di Forlì (FC), che ha realizzato 4 prove di tipo attivo per la ricostruzione di profili verticali di  $V_s$  fino alla profondità di 30 metri. I principali dati relativi a queste prove sono di seguito riportati in Tabella 4-10.

Prova	ID_SPU	LatWGS84	LonWGS84	Località	data	$V_{s30}$
MASW 1	037050L1	44,5902	11,2574	Bagno di Piano-Cimitero	22/07/2014	188
MASW 2	037050L6	44,6044	11,3109	Bonconvento-Chiesa	22/07/2014	232
MASW 3	037050L7	44,5902	11,2574	Sala Bolognese-Chiesa	22/07/2014	244
MASW 4	037050L8	44,6161	11,2565	Stelloni-Area Industr.	22/07/2014	250

**Tabella 4-10 Sintesi dei dati principali associati alle 4 MASW**



## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Le acquisizioni sono state effettuate tramite stendimento sismico di superficie di lunghezza pari a 57,5 m, composto da 24 geofoni da 4,5 Hz aventi interdistanza di 2,5 m.

Il sismografo utilizzato è un dispositivo modulare a 24 canali GEODE (Geometrics); l'intervallo di campionamento è stato selezionato a 0,5 millisecc e il tempo di registrazione è stato fissato in 5 secondi.

Come sistema di energizzazione è stato utilizzato un maglio strumentato, attraverso il quale sono state realizzate una sequenza di energizzazioni esterne allo stendimento, rispettivamente ad un capo ed all'altro dello stesso.

L'esecuzione di più registrazioni distinte invece della tradizionale procedura di *stacking*, permette di eseguire una serie di controlli statistici sulla qualità dei dati acquisiti. In particolare è possibile stimare l'incertezza sui punti della curva di dispersione e verificare che l'ipotesi di monodimensionalità sia rispettata dal sito.

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

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

Il rumore di fondo (microtremore), presente ovunque sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici che all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole (10-15 m/s<sup>2</sup>), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione dette passive.

Tutte le onde elastiche dalla sorgente al sito, subiscono modifiche al loro tragitto ed attenuazioni in relazione alla natura del sottosuolo attraversato. Le informazioni stratigrafiche contenute nei microtremori sono sovrapposte al rumore casuale e possono essere estratte attraverso metodologie come quella di Nakamura dei rapporti spettrali (HVSr

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

– *horizontal to vertical spectral ratio*). Tale tecnica è utilizzata anche per la determinazione dell'amplificazione sismica locale e per stimare le frequenze principali di risonanza del sottosuolo, dati molto utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture (Castellaro, 2012 e Castellaro e Mulargia, 2011).

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

Le 35 misure tromografiche realizzate a supporto dello studio di microzonazione sismica (Tabella 4-11) sono state eseguite con un tromografo digitale Tromino modello "Zero", orientato secondo il nord geografico, e georiferite tramite GPS con precisione variabile tra 2 e 3 metri. L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 256 Hz e con tempo di singola registrazione pari a 30 minuti.

In Tabella 4-11 sono riportati i principali dati associati a ciascuna delle 35 misure di microtremore realizzate e utilizzate per lo studio di microzonazione. La natura progressiva ma non continua della numerazione delle stesse (cfr. campo Prova - Tabella 4-11) dipende dal fatto che alcune acquisizioni sono state scartate e ripetute, in quanto soggette ad evidenti disturbi di natura antropica che ne hanno pregiudicato l'interpretazione.

La campagna di misure realizzate per lo dello studio di microzonazione, ha consentito la caratterizzazione sismica dei terreni presenti negli ambiti d'interesse, attraverso l'individuazione della loro frequenza fondamentale di risonanza. Le misure, realizzate tutte con lo stesso strumento, hanno fornito una serie di dati con caratteristiche omogenee, dunque tra loro confrontabili, che correlati con i dati geognostici disponibili hanno permesso di stimare la profondità di quello che può essere definito "substrato sismico" (paragrafo 6.1), attraverso la caratterizzazione delle superfici di disconformità stratigrafica in grado di influenzare il moto sismico in superficie.

**MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE**

Prova	ID_SPU	data	f0	A0	Lat WGS84	Lon WGS84
SB_01	037050P59520	02/04/2014	0,59	2,7	44,6533	11,2771
SB_02	037050P59521	02/04/2014	0,73	2,65	44,6510	11,2814
SB_04	037050P59522	02/04/2014	0,59	2,49	44,6310	11,2806
SB_05	037050P59523	02/04/2014	0,72	2,69	44,6332	11,2773
SB_07	037050P59524	02/04/2014	0,59	2,6	44,6242	11,2715
SB_08	037050P59525	02/04/2014	0,67	2,46	44,6270	11,2760
SB_09	037050P59526	02/04/2014	0,59	2,54	44,6256	11,2732
SB_10	037050P59527	02/04/2014	0,58	3,15	44,6291	11,2791
SB_15	037050P59528	03/04/2014	0,61	2,6	44,6098	11,2558
SB_16	037050P59529	03/04/2014	0,55	2,55	44,6099	11,2523
SB_17	037050P59530	03/04/2014	0,63	2,39	44,6081	11,2570
SB_18	037050P59531	03/04/2014	0,72	2,98	44,5898	11,2367
SB_19	037050P59532	03/04/2014	0,61	2,47	44,5865	11,2405
SB_20	037050P59533	08/04/2014	0,59	3,08	44,6135	11,2586
SB_22	037050P59534	08/04/2014	0,56	2,88	44,6116	11,2534
SB_23	037050P59535	08/04/2014	0,61	2,7	44,5841	11,2383
SB_24	037050P59536	08/04/2014	0,61	2,71	44,5828	11,2351
SB_27	037050P59537	08/04/2014	0,61	3,09	44,5824	11,2453
SB_29	037050P59538	08/04/2014	0,63	2,6	44,5851	11,2610
SB_30	037050P59539	09/04/2014	0,72	2,43	44,6510	11,2806
SB_32	037050P59540	09/04/2014	0,67	2,32	44,6355	11,2849
SB_33	037050P59541	09/04/2014	0,72	2,48	44,6301	11,2746
SB_34	037050P59542	09/04/2014	0,78	1,98	44,6307	11,2712
SB_35	037050P59543	09/04/2014	0,73	2,4	44,6212	11,2657
SB_36	037050P59544	09/04/2014	0,75	2,58	44,6050	11,3111
SB_37	037050P59545	09/04/2014	0,69	2,58	44,6179	11,2568
SB_39	037050P59546	16/04/2014	0,77	2,65	44,6347	11,2814
SB_40	037050P59547	16/04/2014	0,66	2,12	44,6357	11,2774
SB_41	037050P59548	16/04/2014	0,72	2,17	44,6206	11,2470
SB_42	037050P59549	16/04/2014	0,73	2,43	44,6161	11,2528
SB_43	037050P59550	16/04/2014	0,63	2,24	44,5801	11,2351
SB_44	037050P59551	16/04/2014	0,7	2,29	44,5782	11,2399
SB_46	037050P59552	16/04/2014	0,63	2,45	44,5781	11,2344
SB_47	037050P59553	16/04/2014	0,72	2,39	44,5901	11,2577
SB_48	037050P59554	16/04/2014	0,7	2,37	44,5880	11,2504

**Tabella 4-11 Sintesi dei dati principali associati alle 35 misure HVSR eseguite. Durata acquisizione 30 min.**



## 5 Modello del sottosuolo

Le prime centinaia di metri di sottosuolo dell'area indagata sono interamente formate da sedimenti di pianura alluvionale e deltizia, non litificati. 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 terreno 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 precoce 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 dimostrato anche dalle misure della velocità delle onde seconde realizzate in pozzo durante gli studi dell'Ordinanza 70/2012. Queste superfici corrispondano spesso ai limiti disconformi fra Sintemi e Subsintemi e frequentemente a riflettori sismici e passaggi fra unità sismo-stratigrafiche. La difficoltà ed il notevole costo dell'acquisizione di dati diretti di sottosuolo, tramite sondaggi geofisico-stratigrafici profondi, rende necessaria la stima della profondità dei limiti discordanti mediante metodi geofisici indiretti, inquadrati ed interpretati nel contesto stratigrafico regionale del sottosuolo. Per identificare i principali contrasti di impedenza associati a tali limiti, sono state realizzate 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 stratigrafico regionale del sottosuolo di pianura ha permesso l'individuazione di una superficie principale, associata ad un significativo aumento della rigidità e della velocità di propagazione delle onde sismiche, all'interno della successione del Quaternario superiore. Questa superficie, come dettagliato in seguito, è posta ben ad oltre i 100 m di profondità e corrisponde alla base stratigrafica discordante del Subsistema di Bazzano AES<sub>6</sub> della cartografia ufficiale CARG della Regione Emilia-Romagna. Le successioni sottostanti sono quindi qui attribuite al substrato

**MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE**

sismico (*seismic bedrock*). Va tenuto comunque presente che questo substrato quaternario, pur presentando un aumento della rigidità e velocità sismica rispetto ai sedimenti sciolti olocenici prossimi alla copertura, è comunque formato da sedimenti terrigeni, prevalentemente fini, ancora assai imperfettamente litificati. Tali depositi presentano valori di rigidità e quindi velocità decisamente inferiori rispetto agli 800 m/s caratteristici di un substrato roccioso, formato ad esempio da carbonati mesozoici come quelli presenti nelle aree epicentrali abruzzesi e friulane.

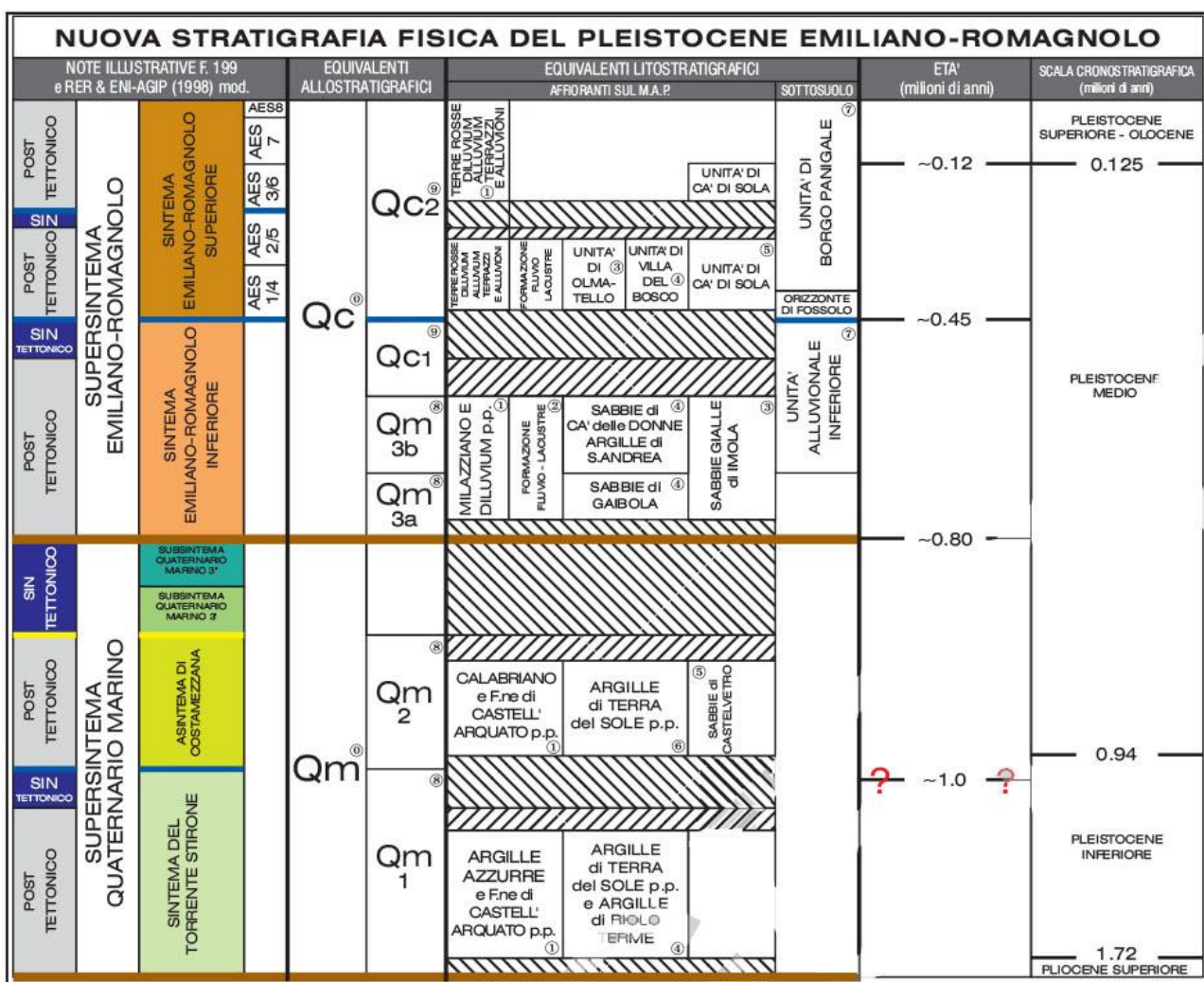


Figura 5-1 Schema geologico-stratigrafico regionale dei depositi quaternari di sottosuolo tratto da Riserve Idriche Sotterranee della Regione Emilia-Romagna (RER-ENI/AGIP, 1998) e recentemente rivisto ed aggiornato nella stesura delle Note Illustrative del Foglio 199 "Parma Sud". Le linee marroni indicano le discontinuità principali, mentre le blu quelle minori. Le aree tratteggiate indicano aree lacuna stratigrafica. Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia - 1:50.000. Foglio 202 "San Giovanni in Persiceto".

## 5.1 Substrato

Come appena accennato, il termine “substrato” inquadra qui tutte le successioni sottostanti il Subsintema di Bazzano (AES<sub>6</sub>). Sopra i corpi carbonatici mesozoici e le potenti successioni terrigene terziarie, segue una spessa successione quaternaria. Il Quaternario registra qui un andamento globalmente regressivo, responsabile della presenza di corpi marini nella sua porzione inferiormente, e di unità prevalentemente continentali nella sua parte superiore. L’organizzazione stratigrafica di queste unità è stata fortemente controllata sia dalla ciclicità eustatica e climatica legata all’alternanza di fasi glaciali ed interglaciali, sia all’attiva deformazione tettonica sin-sedimentaria di questa porzione dell’Avanfossa Appenninica.

### 5.1.1 Quaternario Marino

Le sequenze quaternarie sono inferiormente formate da depositi marini, con foraminiferi platonici e bentonici, passanti superiormente a facies di prodelta e fronte delizio, inquadrati nel Supersintema Quaternario Marino (Figura 5-1), depositi nella prosecuzione occidentale dell’antico Mare Adriatico, soggette a forte subsidenza e apporto delizioso. Questo Supersintema è raggiunto nell’area a nord-ovest di Bologna solo da un limitato numero di sondaggi descritti in modo accurato. Facies deposizionali analoghe sono evidenti in affioramento nella fascia collinare ai piedi dell’Appennino, ove queste unità sono state innalzate dalla deformazione compressiva quaternaria. Questi sedimenti terrigeni erano tradizionalmente conosciuti come Calabriano, talvolta anche Piacenziano e sono oggi inquadrati come Formazione di Castell’Arquato, Argille di Riolo Terme ed Argille di Terra del Sole (Figura 5-1), con strati posti nella fascia pedecollinare emiliana e romagnola (Ricci Lucchi et Al., 1982). Simili unità affiorano limitatamente anche nella fascia collinare compresa nell’area metropolitana bolognese.

Le unità marine sono superiormente troncate da una marcata superficie di discordanza stratigrafica, anche angolare, corrispondente ad un netto riflettore sismico ed associata ad una lacuna cronologica, indotta dal coinvolgimento dell’area nella propagazione verso l’avanfossa nella deformazione compressiva della catena.

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

La discordanza di origine tettonica è individuabile nel sottosuolo dell'area indagata, anche attraverso l'esame di profili sismici, ma passa, verso nord, in condizioni di paraconcordanza in aree di avampaese, non raggiunte dalla deformazione compressiva appenninica.

L'importante fase di deformazione descritta è qui data a circa 800.000 anni (Figura 5-1), mentre strutture analoghe diventano in genere sempre più recenti, procedendo verso nord.

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

La discordanza sopradescritta è stata scelta come limite basale del Supersistema Emiliano-Romagnolo che, in questa area, è formato in prevalenza da depositi continentali di origine fluviale, che verso nord ed est 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 fluttuazioni climatiche fra fasi glaciali ed interglaciali, che hanno interessato tutto il Quaternario.

A scala regionale il Supersistema comprende due Sintemi distinti (Emiliano-Romagnolo Inferiore - AEI e Emiliano-Romagnolo Superiore - AES), fra loro separati da una discordanza di origine tettonica. Di questi, solamente la porzione sommitale dei depositi costituenti AES affiora in superficie nell'area in esame, mentre i depositi di AEI sono stati individuati esclusivamente nel sottosuolo della pianura.

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo registra la prosecuzione di un'evoluzione complessivamente regressiva, che porta da condizioni marine alle attuali condizioni francamente continentali. L'area indagata, 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 Sintemi nei quali il Supersistema è stato suddiviso.

La parte inferiore del Supersistema (Cfr. Sintema Emiliano Romagnolo Inferiore - AEI) è costituita da depositi basali argilloso-limosi di prodelta e corpi sabbiosi di ambiente marino marginale e spiaggia. La porzione sommitale di AEI, è invece qui formata di alternanze cicliche

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

di depositi fini e grossolani, quali ghiaie e sabbie, riferibili ad associazioni di facies di piana deltizia, di piana alluvionale drenata e di conoide distale.

La parte superiore del Supersintema (Cfr. Sintema Emiliano Romagnolo Superiore - AES) è, infine, costituita di depositi alluvionali dei fiumi Secchia, Panaro, Reno e dal torrente Samoggia, appartenenti all'intervallo Pleistocene medio - attuale, approfonditamente descritti nei paragrafi seguenti. Nel sottosuolo della pianura AES è costituito dall'alternanza ciclica di argille organiche, limi, sabbie e ghiaie di con ambiente alluvionale, con le caratteristiche facies di piana inondabile, canale, argine e rotta fluviale.

Dal punto di vista delle proprietà sismiche, la parte medio-inferiore del Supersintema è stata attribuita, in questo studio, al "substrato" (AEI e AES basale), mentre la sua parte sommitale costituisce la "copertura", separata dal resto in base a dati sismici ed alle frequenze di risonanza ottenute mediante misure tomografiche.

### 5.1.3 Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES)

La superficie di discordanza che separa il Sintema Emiliano Romagnolo Inferiore (AEI) da quello Superiore (AES) è legata alle deformazioni tettoniche più recenti, che hanno interessato le Pieghe Ferraresi sepolte, fra 500.000 ed 400.000 anni fa circa (Figura 5-1).

Questa discordanza, qui sviluppata all'interno di depositi continentali di origine appennina, non è sempre di immediata individuazione, mentre verso nord (v. Foglio 203 "Poggio Renatico") essa è molto marcata e segna frequentemente il tetto dei depositi marini.

La successione sedimentaria riferibile ad AES è costituita dalla sovrapposizione di cicli deposizionali di spessore pluridecametrico ed evoluzione coarsening-upward (CU). La parte basale di ogni ciclo è caratterizzata da depositi fini, dominati da facies di tracimazione fluviale e piana inondabile, mentre la porzione sommitale ha depositi grossolani, dominati da facies di riempimento di canale fluviale. Nel settore depocentrale, queste unità raggiungono uno spessore di circa 60-70 m, e sono caratterizzate da un'evoluzione di tipo trasgressivo-regressiva (T-R).

Le oscillazioni glacioeustatiche che hanno prodotto ripetute alternanze di depositi fluviali e marini nell'Adriatico settentrionale e nella fascia costiera emiliano-romagnola, hanno qui



## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

influito, in condizioni già francamente continentali, sugli apporti sedimentari dei fiumi appenninici.

Durante le fasi glaciali, il livello marino era 120-130 m più basso dell'attuale e i grandi ghiacciai alpini spesso giungendo in pianura, mentre in Appennino settentrionale esistevano solamente piccoli corpi glaciali isolati, come quelli del Bacino del Reno nella zona del Corno alle Scale, durante l'ultima glaciazione. Una copertura vegetale ridotta, il limite vegetazionale spostato verso le basse quote e le grandi portate dei fiumi nelle brevi fasi di disgelo, determinavano la deposizione di sedimenti assai più grossolani di quelli legati alle fasi interglaciali, con ghiaie e ciottoli deposti nell'alta 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, rendevano la sedimentazione ghiaioso-ciottolosa limitata 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 qui analizzata è situata nei pressi della terminazione settentrionale dei corpi più grossolani, che passavano verso valle a sabbie ghiaiose, sabbie e sabbie limose.

Le fasi di rapida risalita del livello marino legate al repentino scioglimento dei ghiacci alla fine delle fasi glaciali, 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 frequentemente assai netto in aree poste molto più a nord, interessate dai depositi sedimentari di Po; meno marcato nell'area qui discussa, in cui permane molto evidente l'alternanza di sedimenti granulari grossolani e coesivi fini.

## 5.2 Terreni di copertura

In base alle proprietà elasto-meccaniche e alla posizione stratigrafica, i 3 cicli deposizionali più superficiali riconosciuti all'interno del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) nel sottosuolo di pianura (cfr. Foglio 202 "San Giovanni in Persiceto"), sono stati attribuiti ai "terreni di copertura" (cfr. parte introduttiva capitolo 5).

Questi cicli sono i meglio definiti a scala regionale dato il numero relativamente alto di pozzi che li attraversano, compresi diversi sondaggi a carotaggio continuo appositamente eseguiti per la cartografia geologica (Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998; Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000 - es. Fogli 219-220-201-202).

Mediante rapporti geometrici e continuità fisiche con i corpi ghiaiosi di terrazzo e di conoide alluvionale, i 3 cicli deposizionali sono stati correlati con i tre Subsintemi di Bazzano (AES<sub>6</sub>), Villa Verucchio (AES<sub>7</sub>) e Ravenna (AES<sub>8</sub>) (v. Figura 5-1), definiti in affioramenti e caratterizzanti, nel sottosuolo indagato, da sedimenti mai cementati e solo moderatamente consolidati.

Questi terreni presentano notevoli variazioni petrofisiche e litologiche interne, associate a due marcati contatti stratigrafici, che segnano il tetto di due corpi di sedimenti singlaciali.

L'alternanza di depositi granulari, quali sabbie e ghiaie singlaciali, assai permeabili, e sedimenti prevalentemente argilloso-limosi, con orizzonti di argille organiche impermeabili, guida l'architettura idrostratigrafica dell'area, in cui i maggiori corpi acquiferi corrispondono alle fasi di deposizione singlaciale (RER & ENI-Agip, 1998). Questi corpi acquiferi sabbiosi sono in genere sepolti a profondità di alcune decine di metri, e ciò impedisce lo sviluppo di significativi fenomeni di liquefazione cosismica, importanti invece all'interno di corpi di sabbie di canale fluviale più prossimi alla superficie.

La perdurante deformazione tettonica ha generato tassi di subsidenza fortemente variabile anche su brevi distanze. Se la fascia pedecollinare è in innalzamento, la subsidenza aumenta esponenzialmente spostandosi a nord della Via Emilia, verso il nucleo della grande sinclinale, il cui asse interessa la fascia centrale del territorio di Sala Bolognese. In conseguenza di questi movimenti tuttora attivi, lo spessore delle unità stratigrafiche quaternarie aumenta enormemente spostandosi dal piede delle colline alla zona depocentrale, come evidentemente accrescono, nella stessa direzione, anche gli spessori e la profondità dei corpi acquiferi. Anche

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

i caratteri deposizionali e granulometrici dei sedimenti mutano assai rapidamente spostandosi lateralmente. In corrispondenza dei maggiori fiumi la parte pedecollinare dei Subsintemi è dominata da corpi di sabbie grossolane, ghiaie e ghiaie ciottolose, ad elevata permeabilità, con pochi orizzonti fini di acquitardo e acquicludo. Questi corpi altamente permeabili, posti allo sbocco dei fiumi in pianura, rappresentano aree di importante infiltrazione delle acque fluviali e di ricarica dei corpi acquiferi a valle. Lateralmente, nella fascia pedecollinare, si sviluppano sedimenti più fini, di natura sabbioso-limosi, spesso ricchi di paleosuoli maturi, che presentano nel complesso valori di permeabilità e conducibilità idraulica minori, pur rappresentando comunque aree di infiltrazione. Verso nord, nel sottosuolo di pianura, i corpi acquiferi corrispondenti ai sedimenti singlaciali si sfrangiano e si approfondiscono, formando, sotto l'area comunale indagata, corpi sovrapposti separati da efficaci orizzonti di acquicludo. Nel territorio comunale la presenza di diffusi sedimenti a bassa permeabilità nei pressi della superficie, rende in genere sostanzialmente indipendenti dalla circolazione idrica superficiale i corpi acquiferi sepolti a più di qualche decina di metri.

La distribuzione nel sottosuolo di corpi granulari o di sedimenti coesivi fini non litificati, influenza ovviamente anche la propagazione delle onde sismiche, favorendo fenomeni di amplificazione in tutta l'area del Comune di Sala Bolognese.

L'organizzazione stratigrafica delle prime decine di metri di sottosuolo risulta inoltre oltremodo rilevante ai fini geotecnici e di microzonazione sismica. Come noto, infatti, la legislazione vigente impone di valutare la velocità delle onde volumetriche di taglio ( $V_s$ ) nei primi 30 m di sottosuolo, che nel caso specifico sono interamente costituiti da sedimenti depositi in ambienti continentali tra il Pleistocene terminale e l'Olocene. I sedimenti depositi durante l'ultima glaciazione sono ascritti al Subsintema di Villa Verucchio ( $AES_7$ ), mentre quelli più recenti sono attribuiti al Subsintema di Ravenna ( $AES_8$ ), di cui affiora solamente l'intervallo di età post-romana, corrispondente all'Unità di Modena ( $AES_{8a}$ ).

In entrambi i Subsintemi, 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, depositi da fiumi minori, che si originano nei piccoli bacini imbriferi delle contigue colline.

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Il Subsintema di Villa Verucchio (AES<sub>7</sub>) 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. Queste sabbie presentano i valori di resistenza alla punta penetrometrica e di velocità delle onde volumetriche di taglio più elevati tra quelli rilevati. La porzione orientale dello stesso Subsintema è invece formato 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" descritto nello studio sulle riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna (RER & ENI-Agip, 1998).

Il Subsintema di Ravenna AES<sub>8</sub> è, invece, formato prevalentemente da sedimenti fini, spesso depositi in ambienti umidi, stagni e paludi di acqua dolce. La parte inferiore è però più ricca di limi, che possono mostrare paleosuoli carbonatici maturi, del tutto assenti nella porzione superiore dell'unità.

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. Le sabbie oloceniche di Reno presentano valori di resistenza alla punta penetrometrica mediamente compresi tra i 4 a 6 MPa, con valori di attrito laterale tra i più bassi rilevati in zona. I primi 7 metri dell'indagine CPTU2 (v. Allegato 1) mostrano un tipico profilo penetrometrico di queste sabbie fluviali. Queste sabbie fluviali, sede di una falda freatica ben sviluppata, presentano un elevato potenziale di liquefazione cosismica.

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 maturi. 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.

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Questi corpi argillosi poco consolidati presentano valori di resistenza alla punta penetrometrica anche molto bassi, e velocità  $V_s$  generalmente intorno ai 150-160 m/s (cfr. Allegato 1, SCPTU 2).

Gli ampi corpi di sedimenti coesivi fini non presentano ovviamente rischi di liquefazione cosismica, che può però svilupparsi all'interno dei corpi allungati di sabbie fini e limi di riempimento di canale fluviale e di argine naturale.

La distribuzione dei sedimenti affioranti, ovviamente nota con maggiore dettaglio e accuratezza, presenta un'organizzazione analoga a quella dei corpi geologici sepolti nei primi metri di sottosuolo. L'area indagata è interamente formata da sedimenti della porzione più recente dell'Olocene, di età post-romana, ascritti all'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>). 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 interalvea, solcati dai corpi sabbioso-limosi minori del Samoggia, Lavino e Ghironda.

## 6 Interpretazioni e incertezze

Le principali scelte interpretative che hanno condotto alla definizione del modello geologico di sottosuolo e all'identificazione di aree a diversa pericolosità e suscettibilità ad effetti locali cosismici, sono di seguito analizzate tentando di evidenziarne i punti di forza e gli elementi a sostegno, senza trascurarne gli aspetti di incertezza ed eventuali criticità non risolvibili a questo livello di approfondimento.

### 6.1 Substrato rigido

Le conoscenze dirette sul substrato geologico, definito come al paragrafo 5.1, sono in quest'area alquanto limitate ed incerte. Nel contesto strutturale di sinclinale in cui si colloca il



## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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 discontinuità stratigrafiche in grado di influenzare il moto sismico in superficie.

Sfruttando la relazione che lega le frequenze fondamentali dei terreni, desunte da analisi di sismica passiva (paragrafo 4.2.3), con le velocità delle onde di taglio disponibili ( $V_s$  paragrafi 4.2.1 e 4.2.2) e la profondità di un dato contrasto di impedenza, è stato possibile stimare la posizione stratigrafica del tetto del bedrock, inteso come superficie a maggior contrasto.

Valori di  $V_{s30}$  essenzialmente minori di 250 m/s (Tavola 5) e frequenze fondamentali ( $f_0$ ) sostanzialmente comprese tra 0,55 e 0,75 Hz con ampiezze poco pronunciate (Tavola 3) indicano la presenza di riflettori sismici posti sempre al disotto dei 100 m di profondità.

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, alla base del complesso acquifero A2 (v. Allegato 1 – sezione geologica D-D') che corrisponde alla base del Subsistema  $AES_6$  (Figura 5-1), datata 230.000- 250.000 anni (RER & ENI-Agip, 1998). Continuo in tutta l'area di studio ed in grado di originare un picco ricorrente alle basse frequenze, questo orizzonte potrebbe essere assimilato a substrato rigido di riferimento, sebbene i propri valori di  $V_s$  siano sempre ben inferiori a 800 m/s. A supporto di tale scelta si sottolinea che la base di Subsistema  $AES_6$  è stata assunta come bedrock in ampie porzioni dei territori interessati degli studi post-sismici realizzati tramite Ordinanza 70/2012 dalla Regione Emilia-Romagna.

L'andamento e la posizione stratigrafica del substrato, evidenziati nelle sezioni realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1), sono stati ricostruiti mediante correlazioni su scala regionale di sondaggi stratigrafici profondi. Secondo le sezioni geologiche disponibili la profondità del bedrock varia dai 170 m delle aree

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

meridionali e settentrionali, ai 190 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 il substrato geologico (Tavola 2) e di conseguenza il vincolo stratigrafico della sua superficie risulta alquanto teorico. Il trend di variazione delle frequenze fondamentali acquisite, caratterizzate da valori minimi nella parte centrale del territorio comunale, ben riflette invece l'andamento della base di AES<sub>6</sub> (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  $f_0$ .

### 6.2 Terreni potenzialmente liquefacibili

Una delle maggiori incertezze messa in evidenza dallo studio di microzonazione sismica riguarda la distribuzione e l'estensione dei terreni potenzialmente liquefacibili presenti nella parte sommitale delle coperture quaternarie.

Nonostante il numero considerevole di indagini disponibili all'interno degli ambiti interessati dalla microzonazione (302 indagini geognostiche), oltre il 50% di queste raggiunge solamente i 10 metri di profondità. Delle rimanenti, solo 64 indagini superano i 15 metri, indagando dunque lo spessore di sottosuolo potenzialmente interessato da fenomeni di liquefazione. Tra queste ultime quelle che consentono di effettuare stime sul potenziale di liquefazione dei terreni presenti, sono essenzialmente 51, pari al 17% del totale delle prove disponibili.

Considerando anche la distribuzione disomogenea delle indagini e ricordando che l'applicazione alle CPT dei principali metodi speditivi per il calcolo del potenziale di liquefazione può fornire stime anche scarsamente affidabili, appare chiaro come ad oggi non sia possibile discriminare con sufficiente dettaglio distribuzione ed estensione dei terreni liquefacibili.

Per questa ragione si è ritenuto opportuno classificare tra le **zone di attenzione per liquefazione di tipo 1** (v. Tavola 4) ampie aree degli ambiti comunali indagati. Tali ambiti, essendo interessati da terreni con caratteristiche predisponenti la liquefazione, saranno sicuro oggetto di approfondimenti di microzonazione sismica di terzo livello, nella cui sede, a fronte di nuove indagini, verranno rivalutate estensione e caratteristiche del rischio, mediante l'individuazione di zone di Suscettibilità e Rispetto per liquefazioni.

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Preme comunque sottolineare che la variabilità nella distribuzione dei depositi sedimentari, anche su brevi distanze, non permette di escludere in senso assoluto la presenza di locali livelli granulari saturi in acqua anche in quelle porzioni di territorio attualmente non classificate come "Zone di attenzione per liquefazione". Per tali ragioni la valutazione sito specifica è comunque sempre delegata ad ulteriori indagini geognostiche, da realizzarsi in successive fasi di pianificazione e nella progettazione esecutiva di eventuali interventi.

Rispetto alla distribuzione areale del rischio da liquefazione, non deve essere dimenticato come questa sia stata fortemente influenzata dalle strette relazioni fra la storia idrografica dell'area, l'accumulo dei corpi sedimentari e lo sviluppo in epoca storica dell'insediamento umano.

Nel complesso, i sedimenti granulari di alveo formano corpi acquiferi superficiali a buona permeabilità e trasmissività idraulica. I corpi di paleoalveo, più o meno dossivi, hanno rappresentato fino ad oggi dei percorsi attrattivi all'insediamento umano, che perciò si è storicamente focalizzato sulle aree che presentano il maggiore pericolo di liquefazione cosismica. Solo gli insediamenti industriali recenti, sviluppati nella parte meridionale del territorio comunale, si sono sviluppati indipendentemente dalla rete stradale ed infrastrutturale storica e sono perciò collocati in aree di depressione interalvea, meno soggetta a fenomeni di liquefazione, ma comunque interessate da importanti fattori di amplificazione sismica. Particolare attenzione va invece posta alle aree ove gli argini artificiali di fiumi pensili, fortemente sopraelevati sulle piane circostanti, insistono su corpi sabbiosi, potenzialmente soggetti a fenomeni di liquefazione e sifonamento, in particolare lungo le sponde del Reno.

### **6.3 Frequenza naturale dei terreni ( $f_0$ )**

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

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

I transienti principali sono provocati da sorgenti di breve durata, come il passaggio di automobili e treni, la cui influenza dipende dall'energia e dalla distanza. Il traffico urbano di

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

una strada ad elevato scorrimento ad esempio, è una sorgente di onde a grande ampiezza e breve periodo, mentre i disturbi di natura industriale possono generare picchi estremamente ampi, o massimi locali multipli, in alcun modo connessi alle condizioni geologiche del sito.

Al fine di ridurre gli effetti appena descritti e limitare quindi le incertezze indotte alle misure, sono stati utilizzati alcuni accorgimenti durante l'esecuzione dei microtremori descritti al paragrafo 4.2.3.

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

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 5) è stata determinata dall'impossibilità di effettuare l'accesso.

La serie di microtremori realizzati a supporto dello studio di microzonazione (paragrafo 4.2.3) ha fornito dati con distribuzione areale e caratteristiche strumentali omogenee che, correlati con i dati geognostici disponibili, hanno permesso di stimare la profondità del substrato geologico assimilato al bedrock (paragrafo 6.1).

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Le frequenze fondamentali ( $f_0$ ) acquisite mostrano valori sempre inferiori ad 1 Hz (Tabella 4-10), indice della presenza di riflettori sismici posti costantemente al disotto dei 100 m di profondità. Le variazioni di frequenza a scala comunale (Tavola 3) sono state messe in relazione, in quanto compatibili, con l'andamento della struttura sinclinalica, che mostra il depocentro proprio in corrispondenza dei valori minori di  $f_0$ , registrati nella parte centrale del territorio indagato.

### 6.4 Velocità delle onde di taglio ( $V_s$ )

La stima dei Fattori di Amplificazione (F.A.) mediante procedura semplificata richiede sia la conoscenza della profondità del substrato rigido (paragrafo 6.1), sia quella della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) nei primi 30 metri di sottosuolo. Quest'ultimo parametro permette sia di discriminare la categoria di sottosuolo per la definizione dell'azione sismica (O.P.C.M. 3274/2003), sia di determinare i coefficienti di amplificazione sismica tramite gli abachi proposti dagli indirizzi della Regione Emilia-Romagna (DAL 112/2007).

Ad integrazione dei pochi dati geofisici pregressi (Tabella 4-1), sono state realizzate sette nuove indagini per la determinazione della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ), tre delle quali di tipo diretto mediante tecnica *Down-Hole* (paragrafo 4.2.1), mentre quattro di tipo indiretto con metodo *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW).

La nuova campagna di indagini ha portato ad una distribuzione più omogenea dei dati di  $V_{s30}$  sul territorio indagato, che ora vede la presenza di almeno due punti di misura per ogni ambito e/o centro abitato maggiore (Tavola 5), nonostante il numero complessivo delle stesse permanga comunque non elevato.

I risultati ottenuti dalle registrazioni di campo evidenziano sempre una leggera sovrastima dei valori di  $V_{s30}$  ottenuti dalle elaborazioni delle misure indirette di tipo MASW (Tabella 4-10) rispetto a quelli acquisiti direttamente, metro per metro, con tecnica *Down-Hole* (Tabella 4-3). Questa discrepanza è legata alle incertezze derivanti dall'utilizzo di una tecnica che stima il profilo di velocità delle onde di taglio nel sottosuolo ( $V_s$ ), basandosi sulla registrazione delle onde di superficie, invece che acquisire direttamente i tempi di arrivo delle onde di taglio. Nonostante questo va ricordato che, a discapito di una minor precisione del dato, le indagini



## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

indirette tipo MASW sono decisamente più economiche e di rapida realizzazione rispetto a quelle tipo *Down-Hole*.

Nessuno dei tre sismoconi realizzati per l'acquisizione diretta dei moduli delle velocità delle onde di taglio mediante *Down-Hole*, ha però raggiunto i 30 metri di profondità a causa del rifiuto strumentale, determinato dalla presenza di terreni con resistenze alla punta decisamente elevate ( $R_p > 400 \text{ kg/cm}^2$ ).

Le  $V_{S30}$  (Tabella 4-3) sono state quindi ottenute mediando le singole  $V_s$  misurate ad ogni metro di infissione, con dati di velocità derivati da comunicazioni scientifiche. I valori di  $V_s$  dei depositi granulari alla base della successione indagata contengono, quindi, un certo grado di incertezza, tale da non pregiudicare comunque i risultati della misura.

Considerando valori di propagazione delle onde di taglio generalmente piuttosto bassi per i primi 30 metri di sottosuolo (Tabella 4-3 e Tabella 4-10) e non avendo a disposizione indicazioni sulle  $V_s$  a maggiori profondità, è necessario assumere che queste aumentino nella parte bassa dei terreni di copertura, ai fini di poter giustificare la posizione stratigrafica del bedrock rispetto ai valori di frequenza ( $f_0$ ) variabili tra 0,55 e 0,75 Hz.

Sulla base della distribuzione dei valori di  $V_{S30}$ , ottenuti dall'elaborazione delle misure geofisiche disponibili (Tavola 5), è stato possibile suddividere il territorio indagato in due macro-aree corrispondenti rispettivamente a valori di  $V_{S30}$  maggiori e minori di 225 m/s.

Questo dato, associato a quello della profondità del bedrock sismico (paragrafo 6.1), ha permesso di ricavare i fattori di amplificazione per ogni singola area, mediante l'utilizzo degli abachi proposti dagli indirizzi della Regione Emilia-Romagna (paragrafo 7.1).

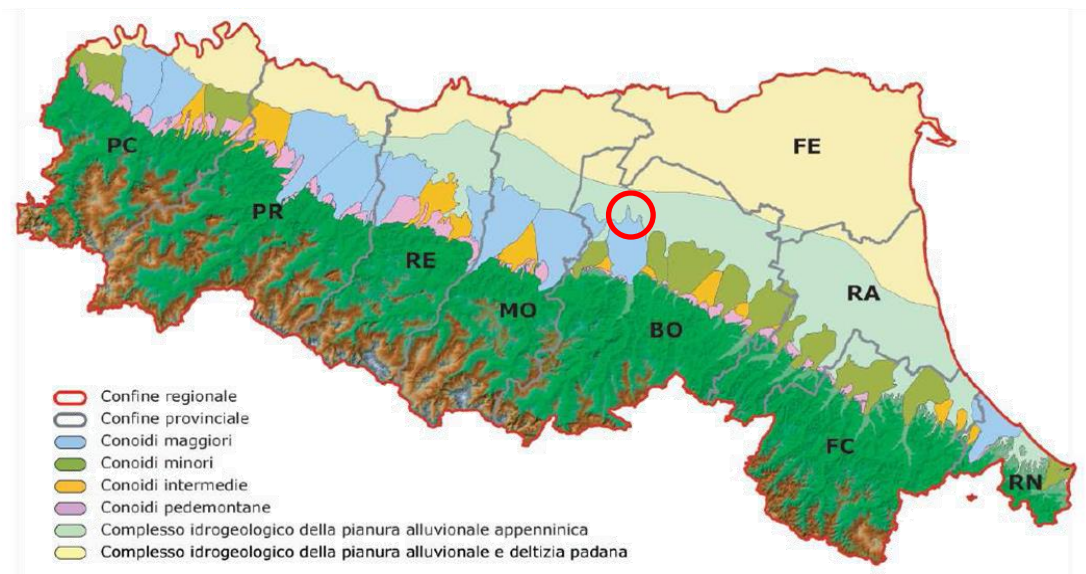
### 6.5 Piezometria

Il territorio comunale di Sala Bolognese ricade all'interno del complesso idrogeologico della pianura alluvionale appenninica, come illustrato in Figura 6-1.

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.

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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).



**Figura 6-1 Distribuzione dei complessi idrogeologici riconosciuti in Regione Emilia-Romagna. Piano di Tutela delle Acque Regione Emilia Romagna.**

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 mediamente 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 rinvennero 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 intorno a 2,5 m.

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 DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Prova	Località	Piezometria	Prova	Piezometria	
CPTu 1	Bagno di Piano	2,5 m	SCPTu 1	Padulle	2,0 m
CPTu 2	Buonconvento	4,2 m	SCPTu 2	Stelloni	1,3 m
CPTu 3	Stelloni nord	3,0 m	SCPTu 3	Osteria Nuova	1,6 m

**Tabella 6-1 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.**

I livelli piezometrici misurati nei fori delle indagini realizzate a supporto dello studio (Tabella 6-1) sembrano confermare l'andamento della falda superficiale riportato nel Quadro Conoscitivo del PSC, nonostante le misurazioni siano state effettuate in anni e stagioni diverse. La semplice comparazione dei dati potrebbe condurre a considerare molto limitati se non assenti i normali fenomeni di escursione stagionale della falda freatica, cosa che appare decisamente improbabile se si considerano le condizioni meteorologiche dell'estate del 2014, caratterizzata da clima termico molto mite, precipitazioni decisamente sopra la media climatica e scarsa evaporazione/evapotraspirazione.

Considerando quindi che nei terreni di copertura possono essere presenti depositi sabbiosi e limoso-sabbiosi superficiali stagionalmente insaturi, si ritiene opportuno adottare, nei successivi approfondimenti di microzonazione e nelle fasi di pianificazione e progettazione degli interventi, un principio cautelativo, ponendo particolare attenzione alla valutazione dei depositi potenzialmente liquefacibili, proprio in ragione delle escursioni stagionali della falda freatica.

In assenza di uno studio idrogeologico dettagliato e di un'analisi storico-statistica dell'andamento delle isofreatiche, come prima valutazione qualitativa del rischio liquefazione dei terreni si è scelto di considerare un valore di soggiacenza cautelativo pari a 1 m.

## 7 Metodologie di elaborazione e risultati

La finalità di uno studio di microzonazione sismica con approfondimenti di secondo livello è quella di giungere a una suddivisione del territorio indagato in zone a diversa pericolosità sismica, sulla base della suscettibilità delle stesse ad effetti locali cosismici.

Queste zone sono classificate come **stabili**, nel caso in cui non si ipotizzino effetti locali di alcuna natura, come **suscettibili di amplificazioni locali** qualora siano attese esclusivamente

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

amplificazioni del moto sismico dovute all'assetto litostratigrafico e morfologico, e come **suscettibili di instabilità** se, oltre a fenomeni di amplificazione, si sospettino effetti di deformazione permanente del territorio.

Nei paragrafi seguenti saranno descritte le metodologie utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione previsti e identificare le caratteristiche dei locali fenomeni di instabilità che interessano le aree esaminate, nonché i risultati ottenuti dalle elaborazioni effettuate ai fini dello studio di microzonazione sismica.

Si specifica che nel Comune di Sala Bolognese risultano completamente assenti le zone stabili, in quanto sono sempre attesi fenomeni di amplificazione locale del moto sismico. Le aree classificate come suscettibili di instabilità, per le quali sono richiesti approfondimenti di terzo livello, presentano tutte potenziali problematiche legate a fenomeni di liquefazione.

### 7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali

Come precedentemente accennato nelle zone classificate come **suscettibili di amplificazioni locali** sono attesi fenomeni di amplificazioni del moto sismico dipendenti dall'assetto litostratigrafico e morfologico locale.

Per suddividere il territorio in aree a maggiore e minore pericolosità in base all'amplificazione attesa, è stato necessario calcolare i fattori di amplificazione per ogni singola area analizzata, scegliendo se utilizzare gli abachi nazionali degli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008) o quelli di riferimento regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007).

Nel caso specifico si è ritenuto più opportuno utilizzare gli abachi regionali in quanto in grado di fornire una più corretta stima dell'amplificazione sismica rispetto agli abachi nazionali degli ICMS, poiché costruiti sulla base di esperienze dirette e modelli di risposta sismica locale specifici per il contesto litologico-stratigrafico regionale.

I diversi abachi proposti nell'Allegato 2 della DAL 112/2007 sono stati costruiti sulla base dei differenti contesti geologici regionali, delle locali variazioni di profondità del *bedrock* sismico e della velocità delle onde volumetriche di taglio (onde S) a varie profondità nel sottosuolo.

La scelta dell'abaco più corretto per il contesto geologico-stratigrafico di Sala Bolognese è stata effettuata tenendo conto di quanto riportato nella DGR 1919/2013. L'allegato C ricorda come tale scelta vada effettuata non solo considerando le caratteristiche litologiche e

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

morfologiche dell'area, ma valutando attentamente le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo, in particolare la profondità ed il tipo di substrato.

Basandosi sulle valutazioni effettuate analizzando la cartografica e gli elaborati di primo livello e confrontando le indagini geognostiche e geofisiche (paragrafo 4.1 e 4.2) con le sezioni geologiche realizzate dal Servizio Geologico regionale, è stato possibile selezionare, tra quelli proposti per la Pianura Padana e Costa Adriatica, l'abaco relativo alla "Pianura 2".

Quest'abaco risulta, infatti, rappresentativo dell'intero contesto geologico-stratigrafico comunale, sintetizzabile attraverso un profilo stratigrafico costituito da alternanze di sabbie e peliti, con spessori anche decametrici, talora con intercalazioni di orizzonti di ghiaie (di spessore anche decine di metri), con substrato profondo ( $\geq 100$  m da p.c.).

Le indicazioni relative alla profondità del substrato (paragrafo 6.1) sono state ottenute incrociando i dati delle indagini di microtremore, che evidenziano bassi valori di  $f_0$  ed ampiezze limitate dovute a lievi contrasti di impedenza alla base delle coperture (paragrafo 8.3), con quelli delle stratigrafie profonde utilizzate dal Servizio Geologico regionale per la costruzione delle sezioni di riferimento.

Per la stima dei Fattori di Amplificazione (F.A.) con procedura semplificata in aree di pianura dell'Emilia-Romagna, risulta necessaria, oltre alla definizione dello spessore del deposito di copertura e della profondità del *bedrock*, la conoscenza della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) nei primi 30 metri di sottosuolo.

Sulla base della distribuzione dei valori di  $V_{s30}$ , ottenuti dall'elaborazione delle misure geofisiche disponibili (Tavola 5), è stato possibile suddividere il territorio indagato in due macro-aree corrispondenti rispettivamente a valori di  $V_{s30}$  maggiori e minori di 225 m/s. Ciò ha consentito di attribuire ad ogni porzione di territorio i rispettivi fattori di amplificazione sia in termini di accelerazione di picco al suolo ( $FA_{PGA}$ - Tavola 6) sia di intensità di Housner per vari periodi di vibrazione ( $FA_{0.1-0.5s}$  - Tavola 7,  $FA_{0.5-1s}$  - Tavola 8).

Essendo le zone sostanzialmente pianeggianti, il valore del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  è stato assunto ovunque pari a 1.



## 7.2 Zone instabili potenzialmente soggette a liquefazione

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

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

Per le zone suscettibili a 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 indagini geognostiche disponibili (paragrafi 4.1 e 4.2) hanno permesso di stabilire che la principale causa di instabilità potenziale negli ambiti indagati è legata alla presenza di condizioni predisponenti la liquefazione.

Al fine d'individuare e definire l'estensione delle aree instabili potenzialmente soggette a liquefazione (v. paragrafo 8.4) si è proceduto all'analisi dettagliata delle verticali disponibili, con lo scopo di verificare l'esistenza di importanti spessori di terreni granulari nei primi 20 m di sottosuolo. L'importanza di tali spessori è stata valutata applicando i criteri adottati da Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna per gli studi di microzonazione realizzati nei Comuni appartenenti all'area epicentrale della sequenza sismica del maggio 2012. Sono stati quindi considerati rilevanti, ai fini della liquefazione, orizzonti granulari poco addensati e saturi in acqua dello spessore di:

- almeno 40 cm, se presenti nei primi 5 m di sottosuolo;
- almeno 1 m se presenti tra 5 e 10 m;
- almeno 2 m se presenti oltre i 10 m rispetto alla superficie topografica.

Per ottenere infine, una prima valutazione qualitativa del rischio liquefazione nelle aree classificate come instabili, sono state eseguite alcune stime dell'indice di liquefazione  $I_L$  con le procedure semplificate indicate dagli indirizzi regionali (paragrafo 7.2.1). Tali stime sono

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

state effettuate esclusivamente sulle verticali d'indagine realizzate a supporto dello studio di microzonazione (Tabella 7-3).

### 7.2.1 Verifiche del potenziale di liquefazione

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

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.

Tra le cause principali di danneggiamento e crollo, la liquefazione è un effetto di sito dipendente dalla combinazione di una serie di fattori suddivisi tra "scatenanti" (eventi sismici attesi) e "predisponenti" (caratteristiche meccaniche dei sedimenti).

Nell'effettuare le verifiche del potenziale di liquefazione è necessario quindi considerare le caratteristiche degli eventi sismici attesi tra cui magnitudo e accelerazione su suolo rigido di riferimento.

Per la stima della magnitudo attesa si è fatto riferimento alla zonazione sismogenetica nazionale - ZS9 (Meletti e Valensise, 2004) come indicato al paragrafo 2.8 degli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008), che indica per i territori che ricadono nella Zona 912, valori di magnitudo  $M_{w_{max}}$  pari a 6,14. Tale zonazione, infatti, propone il valore di magnitudo più cautelativo (elevato) tra quelle proposte in letteratura.

In relazione all'accelerazione su suolo rigido di riferimento a livello nazionale sono, invece, disponibili le mappe di pericolosità sismica realizzate nell'ambito della Convenzione INGV-DPC 2004-2006 (<http://esse1.mi.ingv.it/>). A scala regionale con la redazione e l'approvazione dei "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" (DAL 112/2007) sono disponibili tabelle e formule propedeutiche alla valutazione preliminare dell'amplificazione locale oltre a dati fondamentali per valutazioni più accurate della risposta sismica, quali:

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

- lo spettro di risposta normalizzato per l'Emilia-Romagna ( $T_r = 475$  anni e smorzamento del 5%);
- i valori di accelerazione massima orizzontale al suolo rigido  $a_{refg}$  (10% probabilità di superamento in 50 anni) di ogni Comune dell'Emilia-Romagna.

Vista la presenza di terreni di copertura in grado di amplificare il moto sismico, per la verifica del potenziale di liquefazione il valore di  $a_{refg}$  deve essere moltiplicato per il  $FA_{PGA}$  (paragrafo 7.1 e 8.6), in modo da ottenere il valore di accelerazione di picco alla superficie ( $a_{gmax s}$ ).

In Tabella 7-1 sono riportati i valori dei parametri appena descritti, relativi al Comune di Sala Bolognese. Il valore di  $a_{refg}$  è stato derivato dall'allegato 4 della DAL 112/2007, mentre quello di  $FA_{PGA}$  è stato definito nell'ambito dello studio di microzonazione attraverso gli abachi regionali (paragrafo 7.1 e 8.6). Essendo il valore di  $FA_{PGA}$  costante per l'intero territorio comunale, lo sarà anche quello relativo all'accelerazione di picco alla superficie ( $a_{gmax s}$ ).

Parametri	$a_{refg}$		$FA_{PGA}$		$a_{gmax s}$
	0,161	x	1,5	=	0.2415

**Tabella 7-1 Valori di accelerazione massima attesa su suolo rigido ( $a_{refg}$ ) e alla superficie ( $a_{gmax s}$ ) validi per il Comune di Sala Bolognese. In tabella è riportato anche il valore di  $FA_{PGA}$  definito mediante abachi regionali nell'ambito dello studio di microzonazione.**

Tra i metodi semplificati di analisi del rischio liquefazione raccomandati dagli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (Allegato 3 della DAL 112/2007), sono presenti quelli basati su prove CPT. Come noto però, tali metodi sono stati sviluppati sulla base di dati ottenuti da indagini penetrometriche con punta elettrica. Esperienze e raffronti diretti dimostrano come l'applicazione di tali metodi a dati ottenuti da prove penetrometriche con punta meccanica porti a risultati a volte sensibilmente differenti e in genere ad una sottostima del valore di  $I_L$  (Veronese e Romagnoli, 2014).

Numerose verifiche effettuate su verticali di indagine nelle aree interessate da liquefazione nel maggio 2012, hanno mostrato come, tra i vari metodi speditivi proposti dalla letteratura internazionale, quello di Idriss e Boulanger (2008) risulti di norma maggiormente cautelativo rispetto, ad esempio, a quello di Robertson e Wride (1998), suggerito dagli indirizzi regionali (Martelli et al., 2013).

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Come accennato al paragrafo 7.2, per ottenere prima valutazione qualitativa del rischio liquefazione nelle aree classificate come instabili, sono state eseguite stime dell'indice di liquefazione  $I_L$ . Queste ultime sono state effettuate solamente sulle 6 prove penetrometriche con punta elettrica realizzate per gli approfondimenti di secondo livello dello studio di microzonazione.

Le ragioni sopra esposte hanno condotto al calcolo dell'Indice di Liquefazione ( $I_L$ ) (Iwasaki, 1978) mediante il metodo proposto da Idriss e Boulanger (2008), implementato in un foglio di calcolo Excel. Per l'elaborazione sono stati utilizzati come parametri di input l'accelerazione massima attesa in superficie ( $a_{gmax\ s}$ ), la magnitudo massima attesa ( $Mw_{max}$ ) e la profondità della falda rispetto alla superficie topografica, i cui valori corrispondenti sono riportati in Tabella 7-2.

Parametri	Valori
$Mw_{max}$	6,14
$a_{gmax\ s}$	0.2415
Soggiacenza falda	1 m

**Tabella 7-2 Valori dei parametri utilizzati per il calcolo del Indice di Liquefazione ( $I_L$ )**

Come discusso in precedenza, il valore di magnitudo massima attesa corrisponde a quello definito, per la zona 912, dalla zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), mentre il valore di accelerazione massima attesa alla superficie ( $a_{gmax\ s}$ ) è stato ottenuto moltiplicando il valore di  $a_{refg}$  per il  $FA_{PGA}$ .

Per le verifiche sveditive è stato considerato un valore di soggiacenza della falda pari ad 1 m. 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 e a quelli riportati nel Quadro Conoscitivo del PSC Associato Unione Terre d'Acqua (cfr. paragrafo 6.5).

I valori puntuali di  $I_L$  ottenuti sono stati, infine, raggruppati in classi, secondo Sonmez (2003), in modo da poter distinguere tra siti a rischio di liquefazione basso ( $0 < I_L \leq 2$ ), medio ( $2 < I_L \leq 5$ ) ed elevato ( $5 < I_L \leq 15$ ). Delle sei verticali analizzate (Tabella 7-3) solamente una ha

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

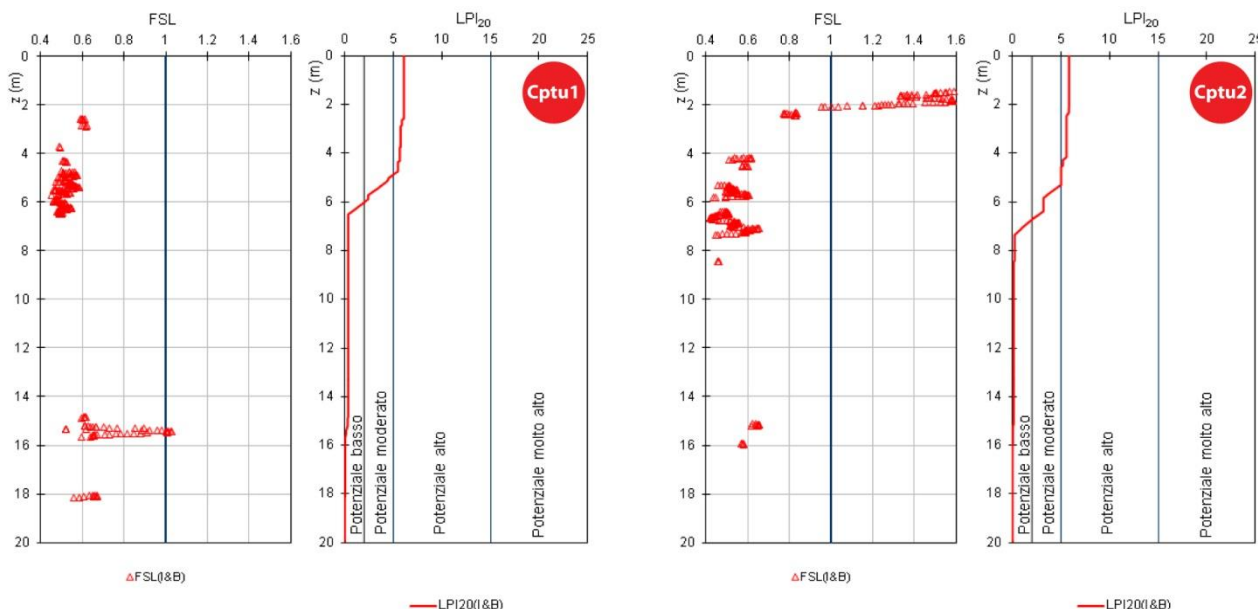
evidenziato un rischio liquefazione tendenzialmente nullo, mentre non sono stati ottenuti valori di  $I_L \geq 15$ , corrispondenti a rischi di liquefazione molto elevati.

Verticale	$a_{max s}$	$I_L$ (I&B)	Verticale	$a_{max s}$	$I_L$ (I&B)
CPTu 1	0.2415	6.09	SCPTu 1	0.2415	1.29
CPTu 2	0.2415	5.82	SCPTu 2	0.2415	9.74
CPTu 3	0.2415	0.3	SCPTu 3	0.2415	1.72

**Tabella 7-3** Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna delle prove penetrometriche elettriche realizzate per gli approfondimenti di secondo livello. In tabella è riportato anche il valore di accelerazione di picco alla superficie utilizzata per il calcolo di  $I_L$ .

Per tutte le verticali analizzate sono di seguito riportati i grafici relativi all'andamento in profondità dell'indice del potenziale di liquefazione ( $I_L$ ) e del fattore di sicurezza (FSL). Tali andamenti consentano di stimare il contributo dei diversi orizzonti litostratigrafici all'indice totale ( $I_L$ ).

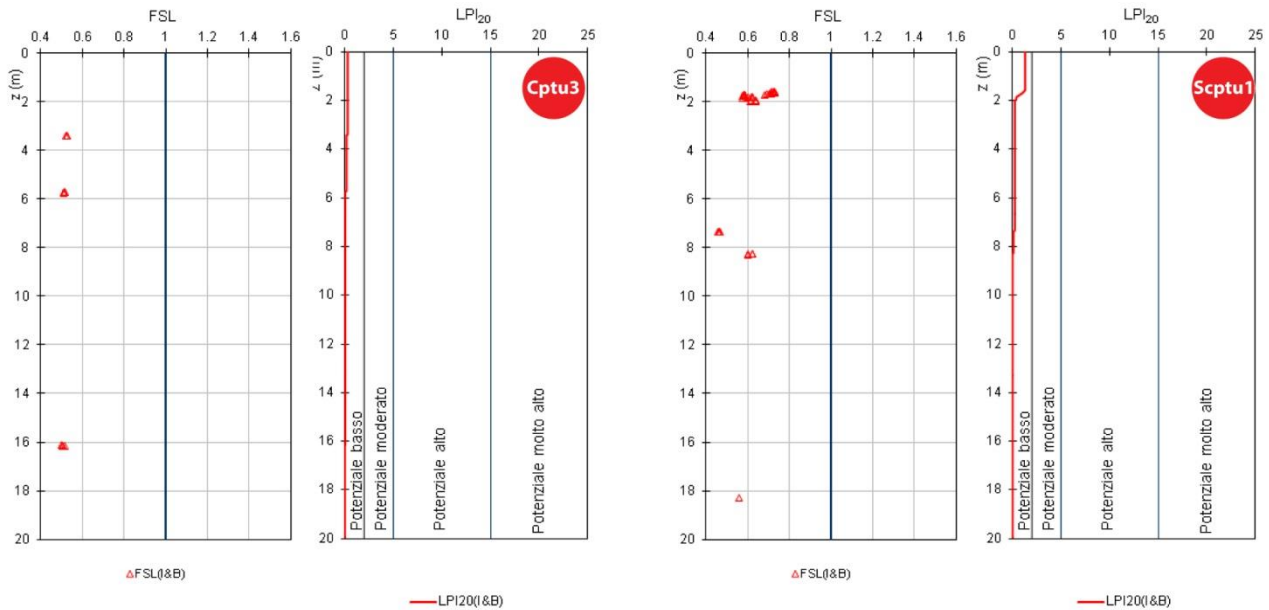
Quando il fattore  $FSL > 1$  i corrispondenti orizzonti litostratigrafici vengono considerati non liquefacibili, al contrario, se  $FSL < 1$ , gli stessi sono potenzialmente soggetti a fenomeni di liquefazione. Non va dimenticato che anche quando  $FSL > 1$  si possono verificare dopo il terremoto cedimenti permanenti del terreno.



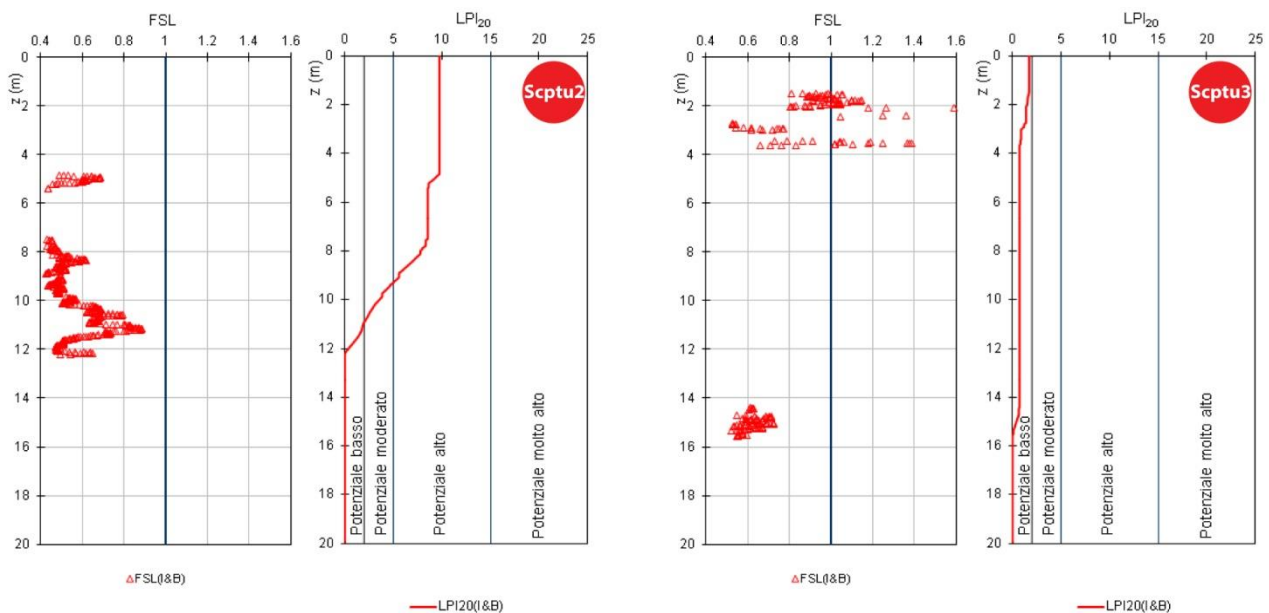
**Figura 7-1** Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali CPTu1 e CPTu2. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).



**MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE**



**Figura 7-2** Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali CPTu3 e SCPTu1. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).



**Figura 7-3** Andamento in profondità dell'Indice Potenziale di Liquefazione e del Fattore di Sicurezza calcolato sulle verticali SCPTu2 e SCPTu3. Nei grafici viene anche riportata la classe di rischio secondo Sonmez (2003).

## 8 Elaborati cartografici

Le tavole cartografiche realizzate per gli approfondimenti di primo e secondo livello di questo studio di microzonazione sismica, sono state redatte secondo quanto indicato nella Delibera n.1919/2013 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna ed in conformità con le linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

La forma e l'estensione latitudinale del Comune di Sala Bolognese, hanno reso necessaria la realizzazione di una doppia tavola per tutti quegli elaborati che, come indicato negli standard di rappresentazione, dovevano essere redatti in scala 1 : 10.000. Per rappresentare l'intero territorio, quindi, la Carta delle Indagini e quella Geologico Tecnica sono state sviluppate su due tavole in formato A0 (v. Tavola 1a - 1b e Tavola 2a - 2b), comprendenti rispettivamente la porzione settentrionale e quella meridionale del territorio comunale.

I restanti elaborati sono stati sempre realizzati in formato A0 ma 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 di ognuna delle 10 tavole prodotte 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.

<b>Elaborato</b>	<b>Riferimento</b>	<b>Scala</b>
<i>Carta delle indagini</i>	Tavole 1a – 1b	1:10.000
<i>Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica</i>	Tavole 2a -2b	1:10.000
<i>Carta delle frequenze naturali dei terreni</i>	Tavola 3	1:5.000
<i>Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (livello 1)</i>	Tavola 4	1:5.000
<i>Carta delle velocità delle onde di taglio (Vs)</i>	Tavola 5	1:5.000
<i>Carta di microzonazione sismica (livello 2) - FA<sub>PGA</sub></i>	Tavola 6	1:5.000
<i>Carta di microzonazione sismica (livello 2) - FA<sub>0.1 - 0.5 s</sub></i>	Tavola 7	1:5.000
<i>Carta di microzonazione sismica (livello 2) - FA<sub>0.5 - 1 s</sub></i>	Tavola 8	1:5.000

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

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

### 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, quindi, sia quelle di repertorio (466) che quelle realizzate per l'attuale approfondimento di secondo livello (45).

Nella cartografia a scala 1 : 10.000, le indagini sono raffigurate mediante simboli definiti dagli standard di rappresentazione e archiviazione informatica - versione 3.0 - della Commissione tecnica nazionale per la microzonazione sismica (anno 2013).

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 medesimo sito.

Utilizzando il metodo sopra 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.

Il rispetto delle procedure indicate negli standard non consente, inoltre, di differenziare graficamente le prove pregresse da quelle realizzate per lo studio di microzonazione sismica.

Per riuscire ad identificare in cartografia le indagini realizzate per lo studio si tenga presente che:

- l'ubicazione delle 35 nuove misure di microtremore è desumibile della Tavola 3, in cui esse sono rappresentata da simbolo grafico circolare;
- le 3 prove penetrometriche statiche con cono sismico realizzate sono le uniche disponibili sul territorio comunale (Tavola 1a e 1b);
- le 3 prove penetrometriche statiche con piezocono sono le uniche rispettivamente ubicate negli ambiti di Bagno di Piano, Bonconvento e Stelloni;
- le 4 MASW sono invece quelle il cui valore di Vs30 risulta compreso tra 188 e 250 m/s (Tavola 5).

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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

### **8.2 Carta Geologico Tecnica per la microzonazione sismica (Tavole 2a - 2b)**

Nella Carta Geologico-Tecnica per la Microzonazione Sismica sono riportate 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 effetti locali, la distribuzione dei terreni di copertura più superficiali e altre informazioni necessarie alla definizione del modello di sottosuolo e funzionali alla realizzazione della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica.

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

#### **8.2.1 Forme di superficie e sepolte**

Tra le numerose forme di superficie e sepolte elencate nelle linee guida, nel territorio Sala Bolognese sono state individuate quelle riferibili ad assi di paleoalveo, tracce di sezioni geologiche e strutture sinclinaliche.

Gli assi di paleoalveo riportati in carta evidenziano l'andamento di antichi alvei di Reno, Samoggia, Ghironda e Lavino, oggi sepolti a debole profondità. 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 in scala 1:250.000 (Boccaletti et al.,

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

2004), e riportato in mappa leggermente modificato, in base alle informazioni derivanti delle misure di microtremore sismico disponibili.

Allo studio sono 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 idro-stratigrafica, in termini di acquiferi e acquicludo (v. Allegato 1).

### 8.2.2 Elementi geologici

Come indicato nelle standard della Commissione Tecnica di microzonazione sismica (versione 3.0 – 2013), 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. Il loro numero e l'omogenea distribuzione dei dati consente una buona leggibilità dell'elaborato cartografico e favorisce, al contempo, l'individuazione delle prospezione 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).

I 66 sondaggi e pozzi riportati in carta sono stati tematizzati in colore verde nel caso in cui la loro profondità raggiuga il substrato geologico (paragrafo 5.1), mentre in colore rosso in caso contrario. Come è possibile osservare dalla cartografia solamente un pozzo raggiunge il substrato geologico. Questa indagine intercetta la superficie di base del complesso acquifero A2, superficie continua alla scala regionale e considerata, ai fini dello studio, assimilabile al cosiddetto *bedrock* sismico (substrato rigido paragrafo 6.1).

L'andamento di questa superficie nel sottosuolo è ricostruito mediante correlazioni di sondaggi stratigrafici profondi realizzati dal Servizio Geologico regionale per il Progetto Conoide del Reno. L'abbondanza di sondaggi nell'area pedeappenninica, posta a sud rispetto



## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

al Comune di Sala Bolognese, consente una buona caratterizzazione e ricostruzione della base di A2, che diviene sempre più dubbia e sfumata spostandosi in direzione nord, a causa della scarsa disponibilità di sondaggi profondi. Nel territorio comunale la superficie in questione è vincolata, infatti, da un solo punto e dunque la sua posizione stratigrafia risulta alquanto incerta.

Relativamente ad altri tematismi previsti per la carta geologico tecnica negli standard di rappresentazione e archiviazione, 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. Infine, gli esigui dati freatimetrici disponibili non sono stati riportati in carta in quanto disomogenei e di dubbia qualità, dunque ritenuti non utili, se non addirittura forvianti, ai fini dello studio.

### 8.2.3 Terreni di copertura

Sulla base dei criteri per la definizione del modello geologico già descritti al capitolo 5, 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 perimetrate 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 sopra 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, depositi in

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

ambienti di piana inondabile, stagno e palude dolce, soggette a consistenti apporti sedimentari fini, durante gli episodi di piena e tracimazione fluviale (**OLpl**). 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 (**OHpl**). 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 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

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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 pseudomeandri-forme, 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 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)

Nella tavola, in cui sono rappresentati unicamente gli ambiti comunali interessati dalla microzonazione, sono riportati, in scala 1:5.000, i punti di misura di microtremore a stazione singola con i rispettivi valori acquisiti della frequenza di risonanza fondamentale ( $f_0$ ).

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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 in carta (cerchi e rombi) indicano rispettivamente le indagini di nuova esecuzione (35), realizzate per gli approfondimenti di secondo livello, e quelle di repertorio (14) acquisite da singoli professionisti o recuperate dagli archivi comunali.

Sulla base dei dati ottenuti dalle misure microtremore sismico non è stato possibile suddividere il territorio indagato secondo le classi di frequenza proposte nell'allegato C della Delibera di Giunta Regionale 1919/2013. 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 al disotto dei 100 m di profondità. A scala comunale è però possibile riconoscere un trend di variazione minore della 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  $f_0$ .

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.

Questa tavola è stata realizzata per le sole aree oggetto dello studio di microzonazione sismica di dettaglio (zone urbanizzate e urbanizzabili), i cui ambiti sono presentati in carta mediante riquadri alla scala 1:5.000.

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Come indicato nell'allegato C dalla D.G.R. 1919/2013, questa cartografia riporta la classificazione del territorio indagato in **zone suscettibili di amplificazioni locali** e **zone suscettibili di instabilità** in quanto risultano completamente assenti zone classificabili come stabili. Nella tavola sono, inoltre, riportate le stesse forme di superficie e sepolte già presenti nella carta geologico tecnica (tavole 2a e 2b, paragrafo 8.2.1) e le ubicazioni dei punti di misura del rumore ambientale (tavola 3, paragrafo 8.3) come richiesto dagli standard della Commissione Tecnica di microzonazione sismica (versione 3.0 – 2013).

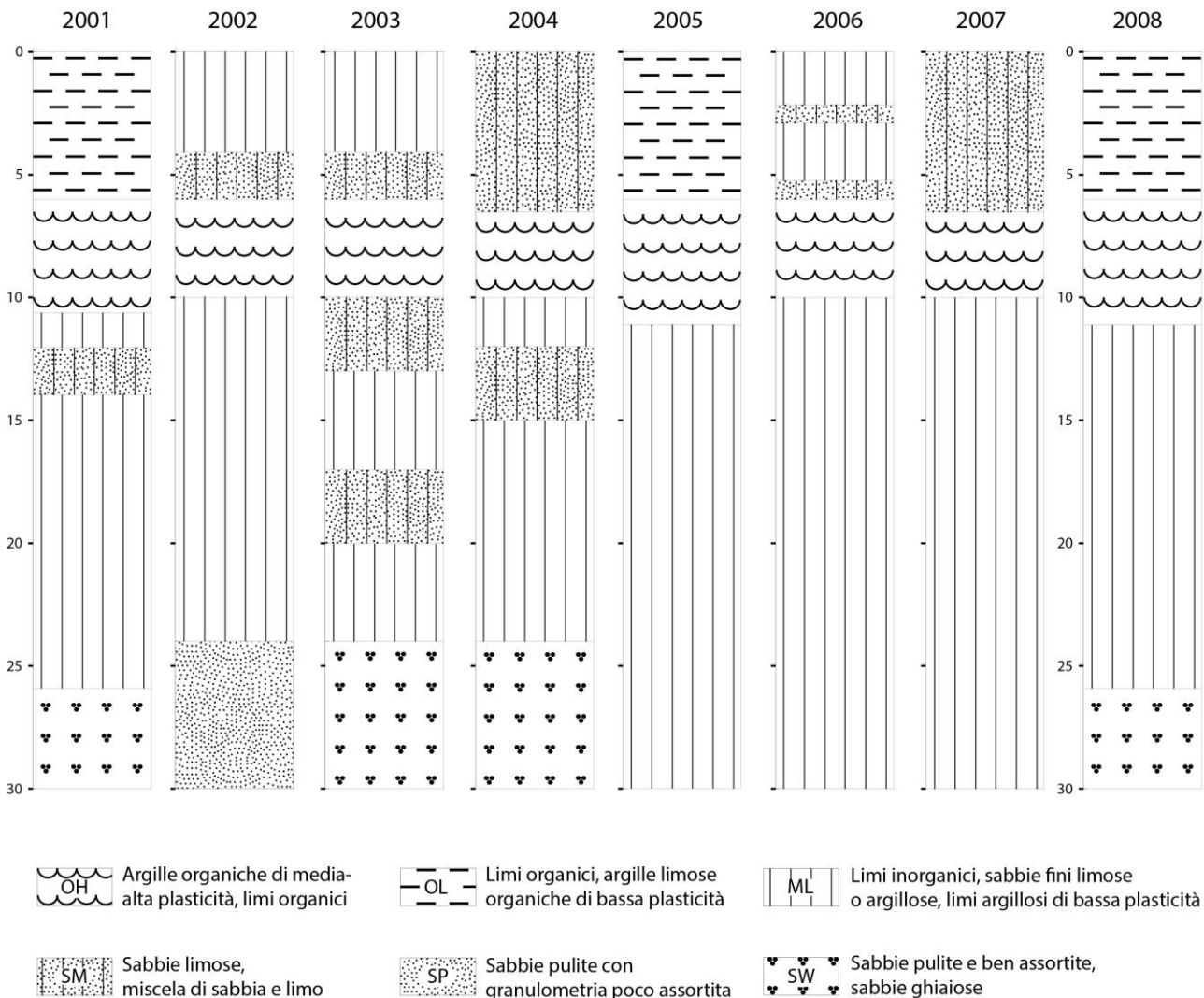
**Le zone suscettibili di amplificazioni locali** sono state definite sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica (Figura 8-1) e distinte in 8 classi di cui in carta sono ben visibili le perimetrazioni.

Alle classi individuate sono stati associati codici identificativi numerici progressivi (2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008) e successivamente attribuite colorazioni distinte, utilizzando toni in sequenza del verde, giallo e marrone, come previsto dagli standard sopra citati.

Di seguito sono riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi (Figura 8-1) con la descrizione delle relative successioni in base alle quali sono state definite le classi zonali. Tali descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.



**MICROZONAZIONE SISMICA DEL 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 5-6 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, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi di bassa plasticità, che nella parte superiore possono presentare intercalazioni plurimetriche di sabbie e sabbie fini limose. Alla base della successione indagata sono presenti sabbie ghiaiose talvolta limose di probabile spessore decametrico.

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

### **Zona 2002**

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 2003**

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 2004**

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, 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 sabbiosi intercalati ad orizzonti sabbiosi poco addensati dello spessore complessivo di circa 5 metri, poggiano su spessori comparabili di argille, argille

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

limose e argille organiche di plasticità medio-alta e torbe. Questi livelli sono seguiti da una serie di limi inorganici, talvolta sabbiosi, limi argillosi di bassa plasticità con paleosuoli a concrezioni carbonatiche, che si estende, con spessori pluridecametrici, fino alla base della successione indagata.

### **Zona 2007**

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.

### **Zona 2008**

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.

**Le zone** cartografate come **suscettibili di instabilità**, per le quali sono richiesti approfondimenti di terzo livello, presentano tutte potenziali problematiche legate a fenomeni di liquefazione. Considerato il livello di approfondimento dello studio ed il contesto sismotettonico locale, tali aree sono state classificate come **zone di attenzione per liquefazione di tipo 1** e rappresentate in carta mediante retino con relativo codice identificativo (3050), come previsto dagli standard di microzonazione adottati.

Appare opportuno segnalare che nel territorio comunale possono essere presenti altre tipologie di instabilità che però interessano aree non urbanizzate né 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 RIzz, tavole 2a e 2b, paragrafo 8.2.1), 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

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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, tutti i 10 punti di misura di  $V_s$  utilizzati ai fini dello studio di microzonazione sismica, ed i rispettivi valori di  $V_{s30}$  associati.

I valori di  $V_{s30}$  sono stati ricavati dall'elaborazione dei dati di velocità delle onde S acquisiti sia mediante misure geofisiche di tipo diretto (paragrafo 4.2.1) sia di tipo indiretto (paragrafo 4.2.2). 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.

Per gli approfondimenti di secondo livello qui descritti, sono state eseguite 7 nuove indagini geofisiche, 3 delle quali di tipo diretto (SCPTU) e 4 di tipo indiretto (MASW).

Il rispetto delle procedure indicate negli standard (Commissione Tecnica di microzonazione sismica - 2013) non consente di differenziare graficamente le prove pregresse da quelle realizzate per il presente studio. Le nuove indagini possono essere identificate in cartografia considerando che le 4 MASW mostrano valori di  $V_{s30}$  compresi tra 188 e 250 m/s, mentre i 3 coni sismici (SCPTU) sono le uniche misure dirette di  $V_s$  disponibili sul territorio comunale.

Considerando la distribuzione e l'andamento dei valori di  $V_{s30}$ , ottenuti dall'elaborazione delle misure geofisiche disponibili, è stato possibile suddividere il territorio indagato in due macro-aree corrispondenti rispettivamente a valori maggiori e minori di 225 m/s.

Questo dato, associato a quello della profondità del bedrock sismico (paragrafo 6.1), ha permesso di ricavare i fattori di amplificazione per ogni singola area, mediante l'utilizzo degli abachi proposti dagli indirizzi della Regione Emilia-Romagna (paragrafo 7.1).

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Sulla base della distribuzione dei valori di  $V_{s30}$ , ottenuti dall'elaborazione delle misure geofisiche disponibili, è stato possibile suddividere il territorio indagato in due macro-aree corrispondenti rispettivamente a valori di  $V_{s30}$  maggiori e minori di 225 m/s.

Questo dato, associato a quello della profondità del bedrock sismico (paragrafo 6.1), ha permesso di ricavare i fattori di amplificazione per ogni singola area, mediante l'utilizzo degli abachi proposti dagli indirizzi della Regione Emilia-Romagna (paragrafo 7.1).

### **8.6 Carte di microzonazione sismica (Tavola 6 - Tavola 7 - Tavola 8)**

Come gran parte dei precedenti elaborati cartografici anche queste tavole sono state realizzate per le sole aree oggetto dello studio di microzonazione sismica di dettaglio (zone urbanizzate e urbanizzabili), i cui ambiti sono presentati in carta mediante riquadri alla scala 1:5.000.

Le tre Carte di Microzonazione Sismica di secondo livello o Carte dei fattori di amplificazione delle aree (Tavola 6, Tavola 7, Tavola 8), sono state realizzate in accordo con quanto previsto dall'Allegato C dalla D.G.R. 1919/2013 e rappresentano gli elaborati di sintesi finale per gli studi di microzonazione con approfondimenti di secondo livello. Esse riportano la classificazione delle aree indagate in base all'amplificazione attesa, quantificata tramite fattori parametrici di amplificazione in termini di accelerazione di picco al suolo ( $FA_{PGA}$  - Tavola 6) e di intensità di Housner per vari periodi di vibrazione ( $FA_{0.1-0.5s}$  - Tavola 7,  $FA_{0.5-1s}$  - Tavola 8).

I fattori di amplificazione utilizzati ( $FA_{PGA}$ ,  $FA_{0.1-0.5s}$ ,  $FA_{0.5-1s}$ ) sono stati calcolati sulla base dell'abaco "Pianura 2" proposto dagli indirizzi regionali (DAL 112/2007), in quanto in grado di fornire una più corretta stima dell'amplificazione sismica rispetto agli abachi nazionali degli ICMS, poiché costruiti sulla base di esperienze dirette e modelli di risposta sismica locale specifici per il contesto litologico-stratigrafico regionale.

Alle diverse aree indagate è stato, quindi, attribuito un valore per ognuno dei tre fattori di amplificazione considerati ( $FA_{PGA}$ ,  $FA_{0.1-0.5s}$ ,  $FA_{0.5-1s}$ ), riportato in carta tramite la colorazione corrispondente alla propria classe parametrica di valori di amplificazione (standard Commissione Tecnica di microzonazione sismica, versione 3.0 - 2013).



## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Le zone suscettibili di amplificazioni locali soggette, inoltre, ad instabilità dovute a potenziali fenomeni di liquefazione (zone di attenzione per liquefazione di tipo 1) sono rappresentate in carta mediante retino, come previsto dagli standard di microzonazione sopra citati.

## 9 Commenti finali e criticità

La conclusione del percorso di microzonazione sismica di secondo livello ha condotto sia alla determinazione dell'amplificazione attesa, in termini di accelerazione di picco al suolo (FAPGA- Tavola 6) e di intensità di Housner per vari periodi di vibrazione (FA0.1-05s – Tavola 7, FA0.5-1s – Tavola 8), sia all'individuazione delle zone in cui la presenza di terreni granulari, potenzialmente saturi in acqua, potrebbe indurre fenomeni di liquefazione cosismica. Per tali aree, interessate da fenomeni di instabilità, risultano necessari approfondimenti di terzo livello.

Pur essendo la principale criticità rilevata su scala comunale, le verifiche sul potenziale di liquefazione, quando effettuate, sono state di norma eseguite su dati derivanti da indagini penetrometriche statiche di tipo meccanico (CPT) che - come visto al paragrafo 4.1 - costituiscono la maggior parte del patrimonio geognostico disponibile sul territorio indagato. Oltre alle recenti esperienze che dimostrano come gli indici di liquefazione calcolati su prove di tipo CPT con punta meccanica risultino spesso scarsamente affidabili (Veronese, 2014), tali verifiche son state di norma effettuate utilizzando valori di magnitudo e di accelerazione assai meno cautelativi di quelli suggeriti dalle procedure indicate negli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008).

Le stime quantitative del rischio liquefazione effettuate sulle CPTU e SCPTU eseguite per lo studio di microzonazione sismica hanno utilizzato i parametri di input suggeriti dagli ICMS (Tabella 7-2). I risultati ottenuti mediante metodi semplificati hanno evidenziato un rischio elevato per alcune delle aree studiate (Tabella 7-3), come ad esempio Bagno di Piano, Buonconvento ed Osteria Nuova.

A tal proposito si sottolinea che per le future fasi di pianificazione territoriale o di progettazione esecutiva di interventi, il calcolo del potenziale di liquefazione andrebbe eseguito riferendosi alle procedure (metodi semplificati su prove penetrometriche statiche

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

con punta elettrica spinte ad almeno 20 metri di profondità) e ai parametri di input (magnitudo attesa in particolare) utilizzati per lo studio di microzonazione. Scelte meno cautelative andrebbero di conseguenza adeguatamente motivate dai tecnici incaricati delle verifiche, anche attraverso una approfondita indagine sul contesto idrogeologico locale (indicazione delle soggiacenze minime).

Il limitato numero di prove penetrometriche elettriche realizzate sinora sul territorio comunale non consente di quantificare numericamente il rischio nelle diverse zone indagate, ma solamente di perimetrare le aree potenzialmente soggette a fenomeni di liquefazione (v. paragrafo 6.2).

Dal quadro fin qui descritto, emerge la necessità di approfondimenti di terzo livello per diverse aree urbanizzate e urbanizzabili oggi indicate cautelativamente come "Zone di attenzione per liquefazioni". Allo stato attuale, infatti, è possibile solamente effettuare considerazioni di tipo qualitativo, secondo le quali le zone MOPS "2003" e "2004" (cfr. paragrafo 8.4 e Tavola 2a e 2b) dovrebbero essere caratterizzate da rischio mediamente maggiore rispetto alle rimanenti, mentre le zone MOPS "2008" e "2005" dovrebbero essere interessate da rischi tendenzialmente molto bassi se non del tutto assenti.

Gli approfondimenti di terzo livello dovrebbero essere in primo luogo finalizzati alla definizione dell'effettivo potenziale di liquefazione dei depositi, attraverso l'esecuzione di un congruo numero di prove penetrometriche statiche con punta elettrica.

L'esecuzione di queste nuove indagini, su cui sarà possibile applicare in maniera affidabile i principali metodi semplificati per il calcolo degli indici di liquefazione, permetterà di rivalutare sia l'estensione che le caratteristiche del rischio, mediante l'individuazione di zone di Suscettibilità e Rispetto per liquefazioni.

Negli approfondimenti di terzo livello dovrà essere posta particolare attenzione a tutte quelle aree in cui la distribuzione e la qualità dei dati geognostici non risulta attualmente sufficiente per una caratterizzazione di dettaglio, come ad esempio nell'area settentrionale dell'abitato di Padulle, in quella meridionale di Sala Bolognese ed in quella centrale ed industriale di Osteria Nuova.

Nelle aree ritenute a maggior rischio, si ritiene opportuno realizzare prove di tipo diretto (sondaggi geognostici) che consentano il prelievo di campioni dei depositi granulari posti

## MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

entro i 20 metri di profondità, da sottoporre ad analisi granulometriche e prove cicliche di laboratorio, al fine di quantificare l'effettiva suscettibilità alla liquefazione. Sulla base di prove cicliche sui campioni, potranno essere quantificati anche i possibili cedimenti.

Queste prove dovranno considerarsi indispensabili qualora si rinvergano spessori significativi di depositi i cui fusi granulometrici rientrano nelle fasce di possibile liquefazione, o in caso di interventi edilizi di elevata entità previsti dagli strumenti urbanistici comunali.

Da ultimo, occorre rammentare come 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 variazione laterale dei caratteri stratigrafici e sedimentologici risulta particolarmente elevata. Ciò considerato, in fase di piano urbanistico attuativo (PUA) e di progettazione degli interventi, si dovrà sempre prevedere una adeguata campagna di indagini geognostiche, in quanto può risultare alquanto pericoloso estendere valutazioni puntuali sulla liquefacibilità ad areali contigui più o meno estesi. Appare ovvio come nella scelta di tipologia e numero delle indagini da prevedere, si debba tenere conto anche della rilevanza delle opere da realizzare.

## 10 Bibliografia

- 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 "Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e Criteri per la microzonazione sismica", 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.
- ASTM, (1985): Classification of Soils for Engineering Purposes: Annual Book of ASTM Standards, D 2487-83, 04.08, American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 395-408.
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone, P., (1990): Structural model of Italy - Sheet n°1, in: Castellarin A., Coli M., Dal Piaz G.V., Sartori R., Scandone P., Vai G.B. (Eds.), Structural model of Italy. CNR, Progetto Finalizzato Geodinamica, Roma.
- Boccaletti M., 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.
- Boschi E. e Guidoboni E., (2003): I terremoti a Bologna e nel suo territorio dal XII al XX secolo, INGV-SGA, Roma-Bologna.
- Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 202 - San Giovanni in Persiceto, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Castellaro S., (2012): "H/V: un contributo oltre Vs30", In: Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici, a cura di Marco Mucciarelli, ARACNE editrice, 448 pp.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

- Castellaro S. e 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/>.
- 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 MS3907, (2014): *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica degli studi di MS vers. 3.0*, [http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS\\_3.0\\_open.pdf](http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS_3.0_open.pdf).
- Correggiari A, Field ME, Bortoluzzi G, Ligi M, and Penitenti D (1992b) Ridge and swale morphology on the North Adriatic epicontinental shelf. Rapport CIESM 33:125.
- DAL 40/2005: Piano di Tutela delle Acque. Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 40 del 21/12/2005, Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna n. 20 del 13/02/2006.
- DAL 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.
- DCP Provincia di Bologna n. 57/2013: Approvazione della Variante al PTCP in materia di rischio sismico.
- DGR Emilia-Romagna n. 1919/2013: Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 52/13 a favore degli Enti locali.
- DISS Working Group, (2010): *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Di Dio, G., & L. Caporale. "Un modello fisico tridimensionale della conoide alluvionale del Fiume Reno per la gestione degli acquiferi e lo studio della subsidenza." BRIGHENTI G. & MESINI E.(a cura di), *Problemi di Geoingegneria: estrazione di fluidi e subsidenza*, GEOfluid 98 (1998): 67-76.

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.

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.

Franchi V., (2008): *Relazione geologica del quadro conoscitivo per il PSC associato "Terre d'acqua"*.

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.

Gruppo di Lavoro MPS, (2004): *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003*. Rapp. conclusivo per il DPC, INGV, Milano-Roma, pp 65 + 5 appendici.

Gruppo di Lavoro MS, (2008): *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Conferenza delle Regioni e Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom. [http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view\\_pub.wp?contentId=PUB1137](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137).

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Valensise G., (2007): *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and the Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*, INGV-SGA; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.

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



MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

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

Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., e Yasuda S., (1978): *A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan*". 3rd International conference on microzonation, San Francisco, pp. 885-896.

Legge Regione 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. and Stucchi M. (eds.), (2011): *DBMI11, the 2011 version of the Italian Macroseismic Database*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>.

Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi G., Madiari C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V., Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C., Ricci L., (2013): *Microzonazione Sismica Dell'area Epicentrale Del Terremoto Della Pianura Emiliana Del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti 32° Convegno Nazionale Gngts, Trieste. Isbn: 978-88-902101-7-4.

Meletti C. e 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.

Mucciarelli M. (a cura di), (2012): *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*.

NTC, (2008): *Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 14 gennaio 2008*. Gazzetta Ufficiale, n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento Ordinario n. 30, [www.cslp.it](http://www.cslp.it), Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.

OPCM 3274/2003. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003: Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. G.U. n. 155, 08/05/2003, suppl. ord. N. 72.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

- Ori G., Friend P., (1984): *Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets*. Geology 12, 475-478.
- 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.
- Pieri M. and 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. and Groppi G., (1981): *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl., **414**, 1-13.
- 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. e Wride C.E., (1998): *Evaluating Cyclic Liquefaction Potential using the CPT*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, No. 3.
- Rovida A., Camassi R., Gasperini P. e Stucchi M., (2011): *CPTI11, La versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani*, Milano Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>.
- Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, **2**(4), 552-555.
- Sonmez H., (2003): *Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey)*. Environ Geology 44(7), 862-871.
- Strobbia C., (2003): *Surface Wave Methods: acquisition, processing and Inversion*. PhD dissertation, Politecnico di Torino, 317 pp.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI SALA BOLOGNESE

Stucchi, M., R. Camassi, A. Rovida, M. Locati, E. Ercolani, C. Meletti, P. Migliavacca, F. Bernardini, R. Azzaro, (2007): *DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04*. Quad. Geofis. 49, 38 (in Italian), available at <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04>.

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.

Veronese T. (2014) - Esperienze nei territori colpiti dal sisma dell'Emilia (maggio 2012)- casi di studio, *Il Geologo dell'Emilia-Romagna*, no. 50.