



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



**CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME**

Attuazione dell'articolo 11 dalla legge 24 giugno 2009, n.77

MICROZONAZIONE SISMICA

Livello 2

Regione Emilia-Romagna
Comune di Calderara di Reno



Relazione illustrativa

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Studio di geologia Gabriele Tarabusi	15/05/2013

*Coordinamento dello studio di
Microzonazione Sismica:* dott. geol. Gabriele Tarabusi

Redazione della relazione: dott. geol. Gabriele Tarabusi
dott. geol. Ruggero Mazzoni
dott.ssa Margherita Aguzzi

*Creazione geodatabase dei dati geologici
e geotecnici:* dott. geol. Gabriele Tarabusi
dott.ssa Margherita Aguzzi

Elaborazione tavole cartografiche: dott. geol. Gabriele Tarabusi
arch. Maria Beatrice Tarabusi

Elaborazione dei dati stratigrafici: dott. geol. Ruggero Mazzoni

*Esecuzione ed elaborazione misure di
microtremore a stazione singola:* dott. geol. Gabriele Tarabusi
dott. geol. Ruggero Mazzoni

*Esecuzione ed elaborazione prove
penetrometriche statiche (CPT):* dott. geol. Leonardo Calzolari

*Esecuzione ed elaborazione indagini
MASW:* Tecnogefisica s.n.c. – Carpi (MO)

INDICE

1. Introduzione	2
2. Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento	4
3. Assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico	10
4. Dati geotecnici e geofisici	19
5. Modello del sottosuolo	30
6. Interpretazioni e incertezze	32
7. Metodologie di elaborazione e risultati	36
8. Elaborati cartografici	46
9. Commenti finali e criticità	53
10. Bibliografia	55

1. INTRODUZIONE

1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

Il presente studio di Microzonazione Sismica di secondo livello del comune di Calderara di Reno, è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato C della Delibera 1302/2012 (Regione Emilia-Romagna, 2012) della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna, dal titolo "Criteri per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica, di cui all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 4007/2012, e decreto del 16 marzo 2012 del capo del Dipartimento della Protezione Civile".

Per quanto non specificato nel suddetto documento, il riferimento tecnico per la realizzazione dello studio e per l'elaborazione e la redazione delle tavole cartografiche è stato "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 AA.VV., 2011) e successive modifiche e integrazioni (da qui in avanti "ICMS").

Nella redazione dello studio ci si è inoltre riferiti alle seguenti normative:

- 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

Scopo della microzonazione sismica è la suddivisione dettagliata del territorio in base al comportamento dei terreni durante un evento sismico e ai possibili effetti indotti dallo scuotimento. Essa rappresenta uno strumento di prevenzione e riduzione del rischio sismico particolarmente efficace se realizzato e applicato già in fase di pianificazione urbanistica.

Costituisce quindi un supporto fondamentale agli strumenti di pianificazione comunale per indirizzare le scelte urbanistiche verso quelle aree a minore pericolosità sismica.

Per ottimizzare costi e tempi la microzonazione sismica è attualmente richiesta nelle aree urbanizzate, in quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche e lungo le fasce a cavallo delle reti infrastrutturali (Regione Emilia-Romagna, 2012).

Le aree urbanizzate in cui realizzare la microzonazione sismica sono state indicate dal Servizio Pianificazione Urbanistica - Paesaggio - S.I.T. del Comune di Calderara di Reno, che ha identificato anche le zone suscettibili di trasformazioni urbanistiche, con particolare

riferimento alle aree che risultano inserite nel Piano Operativo Comunale (POC) in corso di approvazione.

1.3 Elaborati prodotti

I documenti di riferimento e sintesi del presente studio sono costituiti dalle tavole cartografiche (corredate da due sezioni geologiche) e dai dati informatizzati ad esse associate. La presente relazione, oltre a caratterizzare e inquadrare l'area del comune nel contesto geologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie.

Gli elaborati dello studio di microzonazione sismica sono i seguenti:

- le 11 tavole cartografiche (illustrate al capitolo 8);
- le due sezioni;
- gli archivi informatizzati dei dati;
- il documento che raccoglie tutti i rapporti delle indagini di nuova esecuzione;
- la presente relazione.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate, per il primo e il secondo livello di approfondimento, nell'allegato D della Delibera 1302/2012 (Regione Emilia-Romagna, 2012) 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 Presidente del Consiglio dei Ministri n. 4007/2012 e Decreto del 16 marzo 2012 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 2.0" (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi. Si segnala a questo proposito che l'obbligo di attenersi in modo rigoroso ai suddetti standard di rappresentazione, ha vincolato il presente studio sia a livello di articolazione di tavole (numero e tipologia) e relazione (titoli e ordine dei capitoli), che a livello di rappresentazione cartografica (tematismi rappresentati, legende e denominazioni, ma anche layout, colori e font dei caratteri) e di contenuti descrittivi.

2. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale, dunque alla presenza di strutture geologicamente “attive”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è quindi l’indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui terremoti avvenuti nel passato) e della geologia strutturale locale, fattori strettamente connessi tra loro.

Per realizzare l’inquadramento sismotettonico della presente relazione sono stati utilizzati database pubblici sviluppati da diversi 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 al 2011;
- 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 terremoti storici più forti avvenuti sul territorio italiano, e fornisce anche informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti, sui parametri epicentrali, sugli effetti dei terremoti sull’ambiente fisico (fagliazione superficiale, frane sismo-indotte, maremoti, ecc.), sul danneggiamento dei centri storici e di beni monumentali;
- la Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>) che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri spettrali” riferiti all’accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell’azione sismica.
- la Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004; <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- 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 sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore;

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello et al., 2006; <http://csi.rm.ingv.it/>) che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;
- il Database ISIDe (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 2003 ad oggi.

2.1 Sismicità storica

Il DBMI11 (Locati et al., 2011), consente la consultazione online solo per le località a cui sono associate almeno 3 osservazioni e Calderara di Reno e le sue frazioni non risultano presenti in tale elenco. Lo stesso database attualmente non permette il download dell'intero dataset, per cui non è possibile verificare la presenza di risentimenti associati alle singole località. La consultazione della precedente versione, il DMBIO4 (Stucchi et al., 2007), che al contrario fornisce all'utente i dati completi, ha permesso di accertare che non sono presenti risentimenti per tutto il territorio comunale. Tale assenza di dati è chiaramente imputabile alla mancanza o al non reperimento di fonti storiche relative all'area di Calderara di Reno. In ogni caso, per un quadro di riferimento degli effetti dei terremoti storici è possibile riferirsi alle osservazioni relative alle località più vicine all'area comunale, a cui risultano associate intensità massime comprese tra il grado V e il grado VIII della scala MCS.

Il terremoto più forte e più prossimo all'area in esame, secondo quanto riportato nel CPTI11, che cita come fonte il CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007), risulta essere quello del 3 gennaio 1505, il secondo di una sequenza con 3 scosse principali, con intensità epicentrale valutata del grado VIII della scala MCS e magnitudo equivalente pari a 5.6. In figura 1 è rappresentata la mappa degli effetti del terremoto dai dati CFTI4Med in rapporto al perimetro comunale di Calderara di Reno, che si colloca in un'area con effetti compresi tra i gradi VII e VIII della scala MCS.

Per la sequenza sismica del 1504-1505, il catalogo CFTI4Med riporta la seguente sintesi degli effetti principali:

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

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

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.



Figura 1. Effetti della scossa del 3 gennaio 1505 da dati CFTI4Med. Con la linea rossa è rappresentato il perimetro del comune di Calderara di Reno.

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), dal cui studio sono stati in seguito sintetizzati i dati del CFTI4Med, che a loro volta costituiscono il riferimento del CPTI11 per questa area. In figura 2 è riportato il grafico della cronologia dei terremoti noti con effetti di danno nell'area di Bologna.

Oltre al già citato evento del gennaio 1505, altri due terremoti hanno prodotto effetti pari al grado VIII della scala MCS in area Bolognese e sono la scossa del 6 febbraio 1455 (localizzata in modo assai incerto nella Media Valle del Reno, all'altezza di Marzabotto) e

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

quella del 20 aprile 1929, localizzata tra i comuni di Monteveglio e Monte San Pietro, una decina di chilometri a sud-ovest del comune di Calderara di Reno.

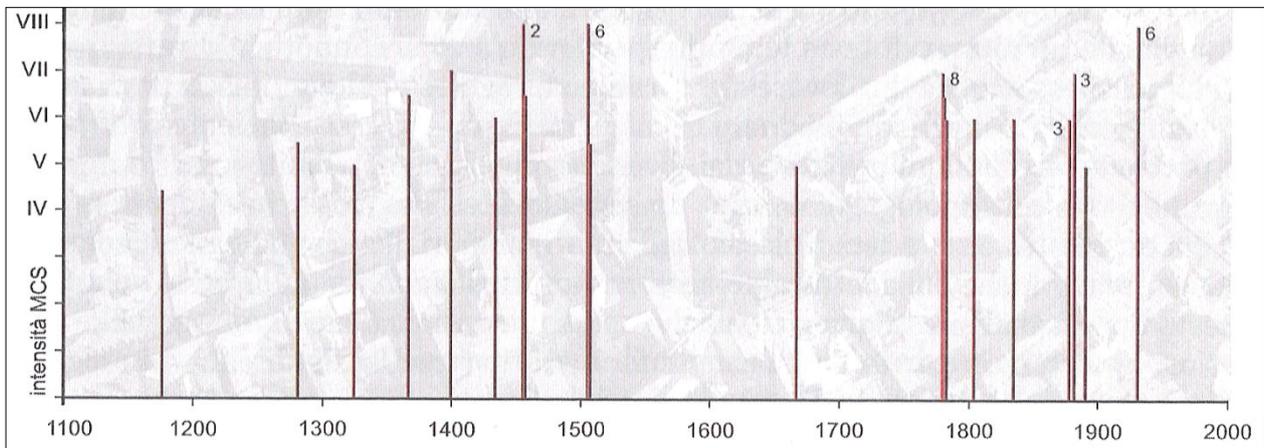


Figura 2. Cronologia e intensità epicentrale dei 38 terremoti noti per l'area di Bologna tra il XII e il XX secolo con effetti locali superiori o uguali al grado V-VI MCS (da Boschi e Guidoboni, 2003).

Viene di seguito riportato un estratto della sintesi degli effetti principali proposta dal catalogo CFTI4Med per la sequenza sismica del 1929:

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 -nestre, dissesti ai tetti e ai pavimenti, caduta di comignoli. [...]

Alla luce dei dati storici, una caratteristica ricorrente della sismicità dell'area in esame pare essere quella di manifestarsi in sequenze della durata di diversi mesi, in cui la scossa più forte non è necessariamente la prima che si verifica e in cui sono diverse le scosse con magnitudo maggiore di 5. Quanto alla frequenza e ai tempi di ritorno dei singoli eventi, la finestra di osservazione disponibile pare troppo limitata per trarre conclusioni.

2.2 La sequenza del maggio 2012

Relativamente agli effetti delle due scosse principali, del 20 e del 29 maggio, della sequenza sismica emiliana di un anno fa, 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 Calderara di Reno. In ogni caso, poiché ai paesi di Argelato, Bentivoglio e San Giovanni in Persiceto è 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.

2.3 Sorgenti sismogenetiche

Il database DISS (DISS Working Group, 2010) indica la presenza, poco a sud dell'area in esame (figura 3), 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. Si tratta di una porzione del fronte compressivo pedeappenninico, un sistema di faglie con vergenza nord-est, a cui è associata una magnitudo massima pari a 5.6, in analogia con quella presunta del massimo terremoto storico dell'area (3 gennaio 1505). La profondità è indicata tra 2 e 8 km, mentre lo slip-rate è compreso tra 0.1 e 0.5 mm/anno.

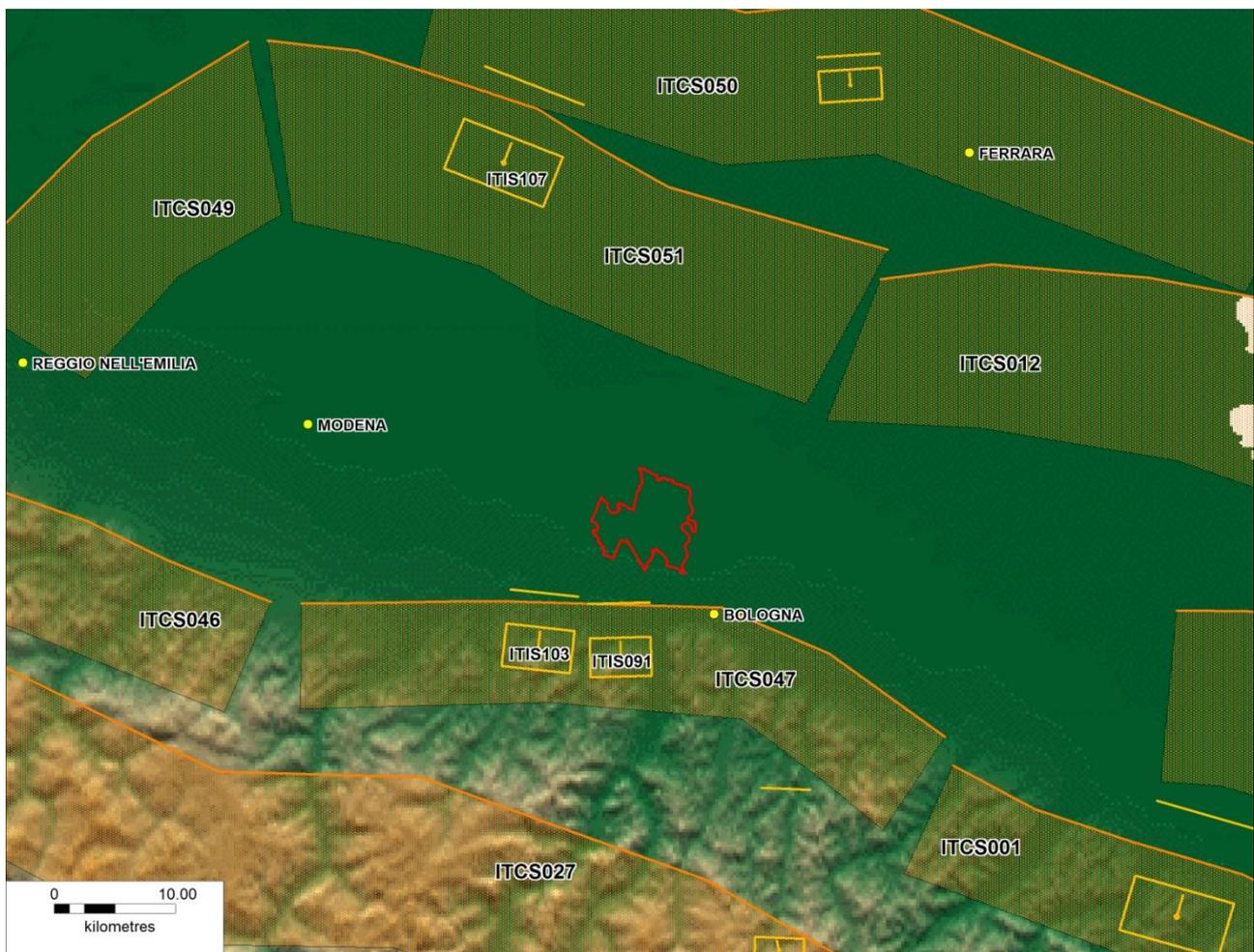


Figura 3. Le sorgenti sismogenetiche del database DISS 3.1.1, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è riportata l'area comunale di Calderara di Reno.

Le più importanti questioni aperte citate nel database DISS, a cui è difficile dare una risposta allo stato attuale delle conoscenze, riguardano i tempi di ritorno dei terremoti associati alle sorgenti individuali e la magnitudo massima associabile all'area sottesa dalla sorgente composita. Non si può infatti stabilire se in questa porzione del fronte compressivo pedeappenninico possono verificarsi solo eventi relativamente frequenti di magnitudo attorno a 5.6, o se sono anche possibili terremoti, più rari, di magnitudo superiore.

Bisogna inoltre tenere conto che l'area di Calderara di Reno può anche risentire degli eventi associati a strutture sismogenetiche più distanti rispetto a quelle appena citate (figura 3), come i terremoti del maggio 2012, originati dalle sorgenti composite ITCS050 e ITCS051.

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, l'area in esame ricade entro la Zona 912, caratterizzata da un valore di Mw_{max} pari a 6.14.

3. ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO

3.1 Inquadramento geologico

Il territorio del comune di Calderara di Reno si posiziona nella parte centro-meridionale della Pianura Padana che costituisce, dal punto di vista geologico, un grande bacino subsidente plio-quadernario di tipo sedimentario, che comincia a delinearsi sin dall'inizio del Triassico (225 milioni di anni fa) e viene interessato da subsidenza differenziata sia nel tempo (Mesozoico, Cenozoico, ma soprattutto Pliocene e Quaternario) che nello spazio, con movimenti verticali controllati dai caratteri strutturali presenti in profondità.

Il contesto geologico di riferimento è pertanto quello del Bacino Padano che strutturalmente rappresenta un'area di avanfossa che si è originata per la subduzione della microplacca padano-adriatica al di sotto dell'orogene appenninico (Dondi & D'Andrea, 1986; Pieri & Groppi, 1981).

L'area oggetto dello studio di microzonazione sismica si trova al margine esterno del fronte emerso della catena appenninica settentrionale, strutturata nel Miocene superiore-Pliocene inferiore, nella fascia di alta pianura padana dove si rinvencono spessi depositi alluvionali e in cui le deformazioni, sepolte, sono prevalentemente del Pliocene superiore e Quaternario. Tali deformazioni sepolte, presenti a nord di Calderara di Reno, rappresentano il vero fronte appenninico che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano-veneta secondo una serie di archi (figura 4) disposti a formare una fascia circa parallela al bordo appenninico (Pieri & Groppi, 1981).

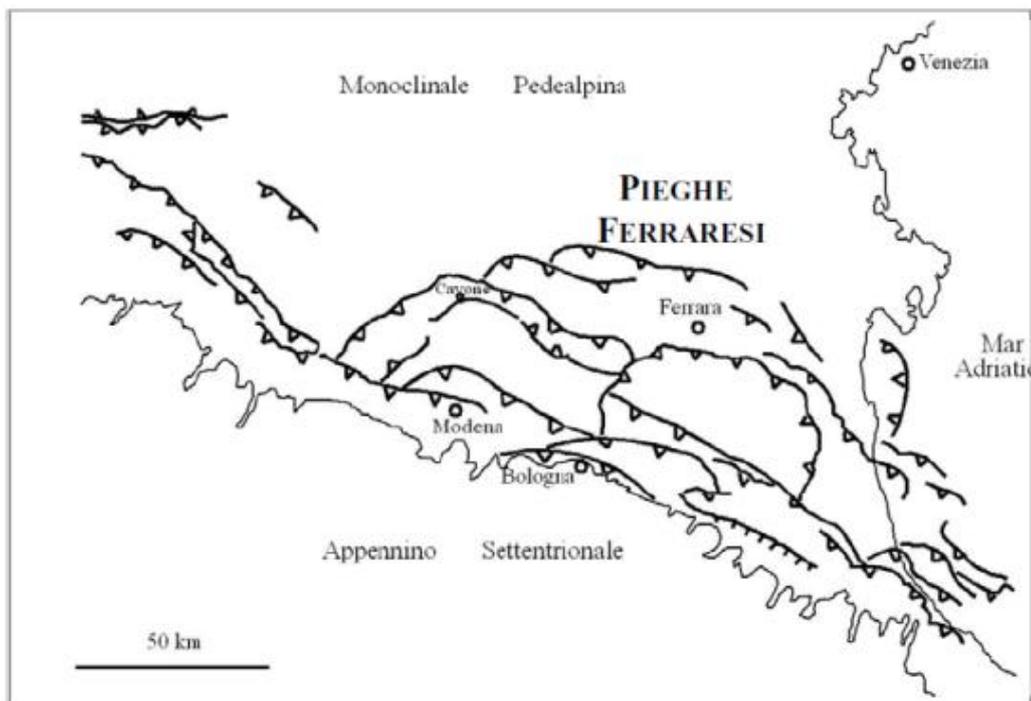


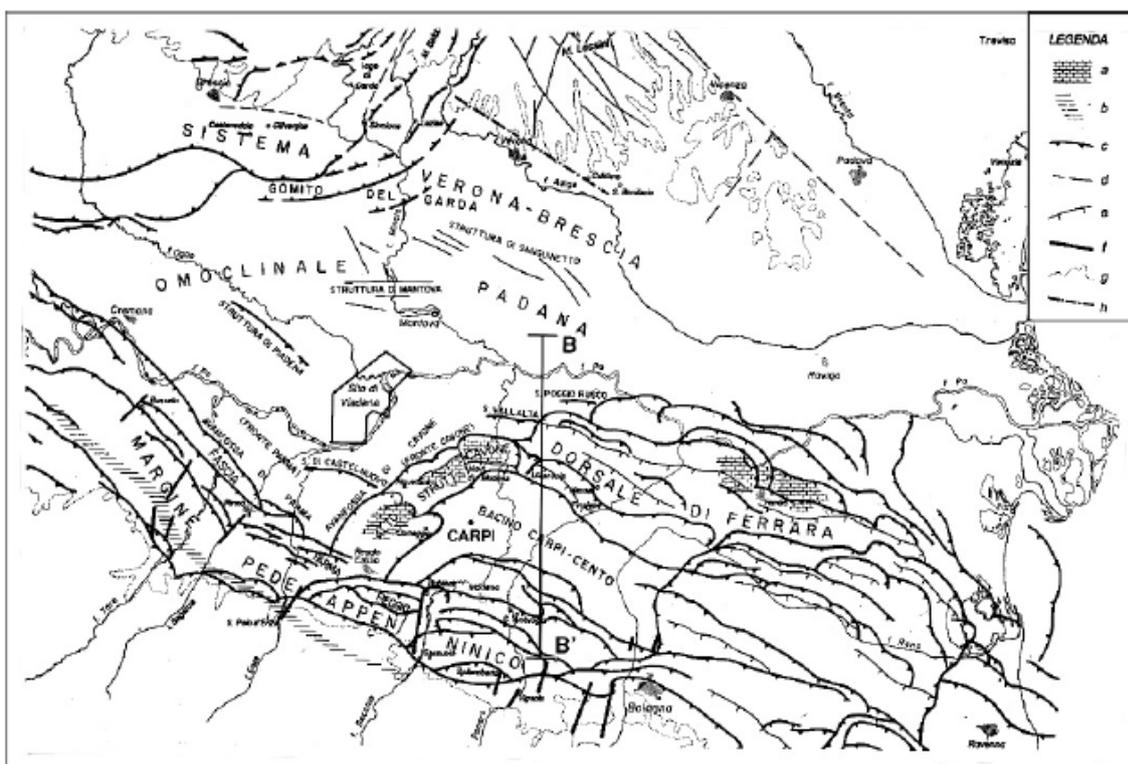
Figura 4. Schema tettonico del settore emiliano e romagnolo-ferrarese, con la suddivisione in Pieghe Emiliane, Ferraresi, Romagnole ed Adriatiche (da Dondi et al., 1982). In particolare si evidenziano le strutture sepolte che interessano la pianura emiliana.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

In particolare, questa porzione di alta pianura emiliana, in cui si colloca il comune di Calderara di Reno, è caratterizzata dalla presenza di due elementi tettonici significativi che ne hanno condizionato e orientato i processi deposizionali e le dinamiche geomorfologiche dal Pliocene fino ad oggi:

- la "Zona delle pieghe pedeappenniniche", dal margine collinare alla Via Emilia, costituita da una successione di sinclinali ed anticlinali, con asse a vergenza appenninica, spesso fagliate e sovrascorse sul fianco Nord;
- la "Zona della Sinclinale di Bologna-Bomporto-Reggio Emilia", dove i depositi quaternari raggiungono il loro massimo spessore di tutta la pianura Padana.

Il territorio del comune di Calderara di Reno dal punto di vista strutturale è pertanto una sinclinale subsidente riempita dai depositi alluvionali portati dai corsi d'acqua appenninici collocata tra la porzione più esterna dell'Appennino settentrionale (Zona delle pieghe pedeappenniniche) a sud e la "Dorsale di Ferrara" a nord (Franchi, 2008).



Legenda: a) nucleo carbonatico, mesozoico sepolto; b) minimo dell'anomalia gravimetrica; c) accavallamento principale; d) faglia verticale; e) faglia diretta; f) faglia diretta trasversale al margine appenninico; g) limite tra rilievo e pianura; h) faglia di "Verona".

Figura 5. Carta degli elementi tettonici significativi dell'area Padana centro-orientale, nella quale sono visibili i sovrascorrimenti principali, la zona delle pieghe appenniniche e il bacino di Carpi-Cento (Serva, 1990).

Dal punto di vista strutturale la Pianura Padana non costituisce una unità omogenea: fanno infatti parte del suo sottosuolo le pieghe più esterne dell'Appennino settentrionale e delle Alpi meridionali lombarde, l'avampaese comune alle due catene e, nel Veneto, l'avampaese della Alpi meridionali orientali e della catena dinarica (figura 5); su questi

elementi è impostata l'avanfossa pliocenico-quadernaria dell'Appennino. Questo settore del bacino padano è riempito da una spessa coltre di sedimenti clastici sin-tettonici, di età prevalentemente pliocenica e pleistocenica che sigillano le strutture deformative plicative sottostanti.

La fase pliocenica viene denominata di *flysch*, in contrasto con i sedimenti di *molassa* che hanno caratterizzato la fase successiva, nella quale divenne dominante l'*input* di materiale erosivo proveniente dallo smantellamento della catena Appenninica (Zoetemeijer, 1993). Con il Pleistocene si instaura un nuovo ciclo sedimentario (Qm, Ricci Lucchi et al., 1982), che porta al colmamento del Bacino Padano in un regime di subsidenza generalizzata. Gran parte delle aree precedentemente emerse vengono ricoperte dal mare ed inizia una sedimentazione nettamente sabbiosa che prosegue poi, ininterrottamente, fino all'Attuale. Successivamente, la sedimentazione diviene esclusivamente continentale, e prosegue con i depositi fluvio-lacustri delle alluvioni Padane (Qc, Ricci Lucchi et al., 1982). I sedimenti sabbiosi, limosi ed argillosi, che riempiono la parte più superficiale del bacino, sono stati deposti dal fiume Po e dagli altri fiumi tributari che provengono dalla catena Appenninica, compreso il fiume Reno (Dondi et al., 1982; Pieri, 1984; Dondi & D'Andrea, 1986; Ori, 1993; Vittori & Ventura, 1995; Amorosi et al., 1999).

Nel Pleistocene medio, quindi, la prosecuzione del sollevamento comporta il definitivo instaurarsi della deposizione continentale e inizia la sequenza deposizionale denominata Supersistema Emiliano Romagnolo; le tre Sequenze deposizionali proposte dalla Regione Emilia-Romagna per caratterizzare i depositi sedimentari a partire dal Pliocene medio-superiore corrispondono a cicli trasgressivo-regressivi.

I depositi del Quaternario, soprattutto del Pleistocene medio-superiore, rappresentano degli accumuli disposti in amplissime ondulazioni, con geometrie lenticolari che indicano il colmamento delle depressioni residue dei bacini pliocenici precedenti.

3.1 Paleogeografia e inquadramento geomorfologico e litologico

Come riportato nella Relazione geologica a corredo del quadro conoscitivo per il PSC associato Terre d'acqua (Franchi, 2008) l'area di studio ha una complessa evoluzione paleogeografica, in particolare l'andamento dei paleoalvei e degli alvei attuali è stato fortemente condizionato dall'evoluzione strutturale profonda della Pianura Padana, da fenomeni climatici e da interventi antropici di deviazione, regimazione e bonifica (figura 6).

In particolare si evidenzia la presenza di paleo alvei del fiume Reno e del torrente Lavino anche nel territorio del comune di Calderara di Reno che trova conferma nella presenza di dorsali morfologiche e dalle litostratigrafie sia delle indagini eseguite sia di quelle recuperate nell'archivio comunale.

Le informazioni circa l'evoluzione paleo-idrografica dei corsi d'acqua principali nell'area di studio, fiume Reno e torrente Lavino, desunte da fonti bibliografiche, indicano in particolare che per quanto riguarda il fiume Reno, in origine, uscendo da Casalecchio e dopo aver costeggiato Bologna, scorreva più verso est, dalla zona di Pescarola-Corticella

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

alle terre più basse di Minerbio e Baricella per innestarsi in un alveo antico del Po a sud di Ferrara, detto in seguito Po di Primaro (Franchi, 2008).

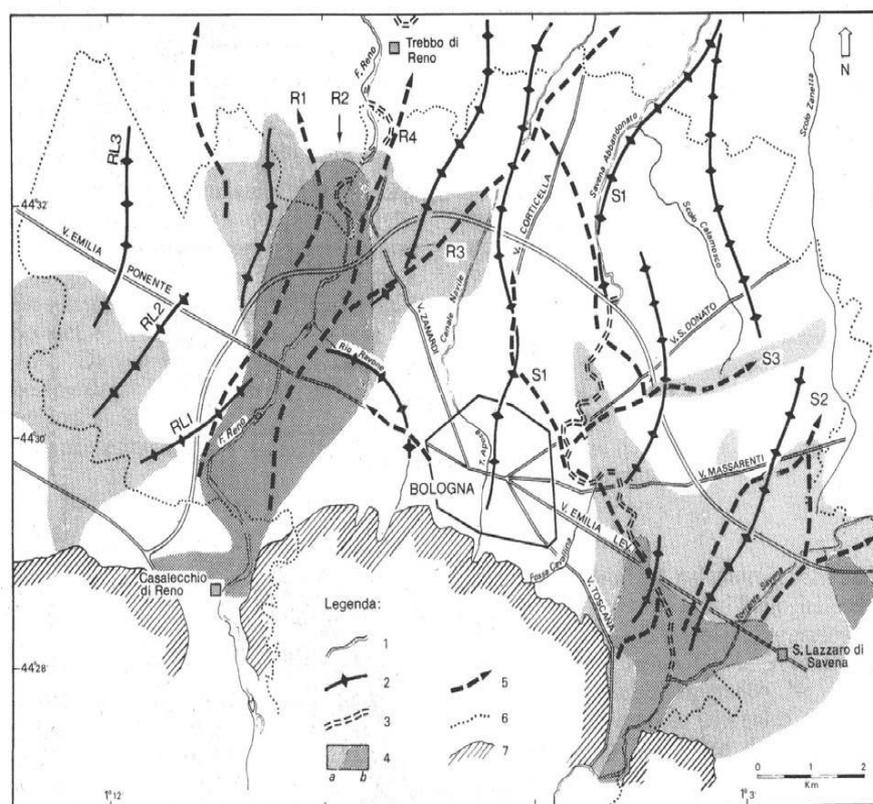


Figura 6. Reticolo idrografico attuale e ricostruzione del reticolo idrografico antico del fiume Reno. Legenda: 1) Alvei attuali; 2) Posizioni di paleoalvei dedotti dalla presenza di dorsali morfologiche; 3) percorsi storici individuati in base a documenti o indicazioni storiche; 4) lobi sabbiosi (a) o ghiaiosi (b) della litologia superficiale; 5) assi di dorsali o di lobi ghiaiosi profondi; 6,7) limiti Comunali e del rilievo collinare (Elmi et al., 1984).

In una seconda fase, a partire dal medioevo, l'alveo di pianura del fiume Reno si sarebbe spostato più ad occidente attraverso numerose rotture di argini e vari interventi antropici; la storia del Reno è stata pertanto molto lunga e complessa, svolgendosi su un'area di pianura più vasta e anche diversa da quella toccata attualmente.

In sintesi, considerando l'evoluzione strutturale e geomorfologica deposizionale, si evidenzia che la litologia di superficie della zona di alta pianura è costituita in prevalenza da depositi fluviali continentali a matrice sabbioso-ghiaiosa con alvei e canali frequenti e con tendenza allo sviluppo di meandri; nell'ambito deposizionale del conoide del fiume Reno tali depositi grossolani nei primi 30 metri di profondità si spingono dal margine appenninico verso la pianura per una fascia di circa 15 km interessando pertanto anche l'area in esame.

Sinteticamente nel territorio del comune di Calderara di Reno si evidenzia la presenza di 10-20 metri di depositi coesivi (argillosi e limosi), con locali livelli metrici sabbiosi e limo-sabbiosi, al di sotto dei quali si incontrano le ghiaie e le sabbie costituenti le strutture sepolte (dossi) relative ai conoidi del Reno e del Lavino.

3.2 Subsidenza

Per quanto concerne il fenomeno della subsidenza le informazioni sono state desunte dai rapporti di monitoraggio realizzati da Arpa - Dipartimento d'Ingegneria Ambientale in collaborazione con il Servizio geologico della Regione Emilia-Romagna e presenti sui rispettivi siti web.

La fascia in cui ricade il territorio del comune di Calderara di Reno è da sempre soggetta ad un più o meno rapido abbassamento del suolo, sia per azioni tettoniche, quali l'affossamento del bacino sedimentario, sia per motivi legati alla natura ed alla stratigrafia dei sedimenti, depositatesi nei recenti periodi geologici ed in progressiva compattazione a causa del loro stesso peso.

All'abbassamento del suolo per cause naturali, nel periodo tra gli anni '60 e '70, si è andata a sovrapporre, sino a divenire causa dominante, una componente "artificiale" di tipo antropico imputabile principalmente all'estrazione di fluidi dal sottosuolo ed in particolare al forte prelievo idrico industriale e agricolo dalle falde che ha persino provocato problemi nel corretto funzionamento della rete scolante gestita dai Consorzi di Bonifica.

La campagna di monitoraggio della subsidenza del 2000-2006 (figura 7), eseguita da Arpa, ha affiancato al metodo classico della livellazione geometrica di alta precisione, utilizzato nei precedenti monitoraggi eseguiti negli anni '80 e '90, la tecnica dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari. I risultati di tale monitoraggio indicano per l'area ovest della pianura bolognese abbassamenti generalmente in accentuata riduzione rispetto al periodo di monitoraggio precedente (1992-2000).

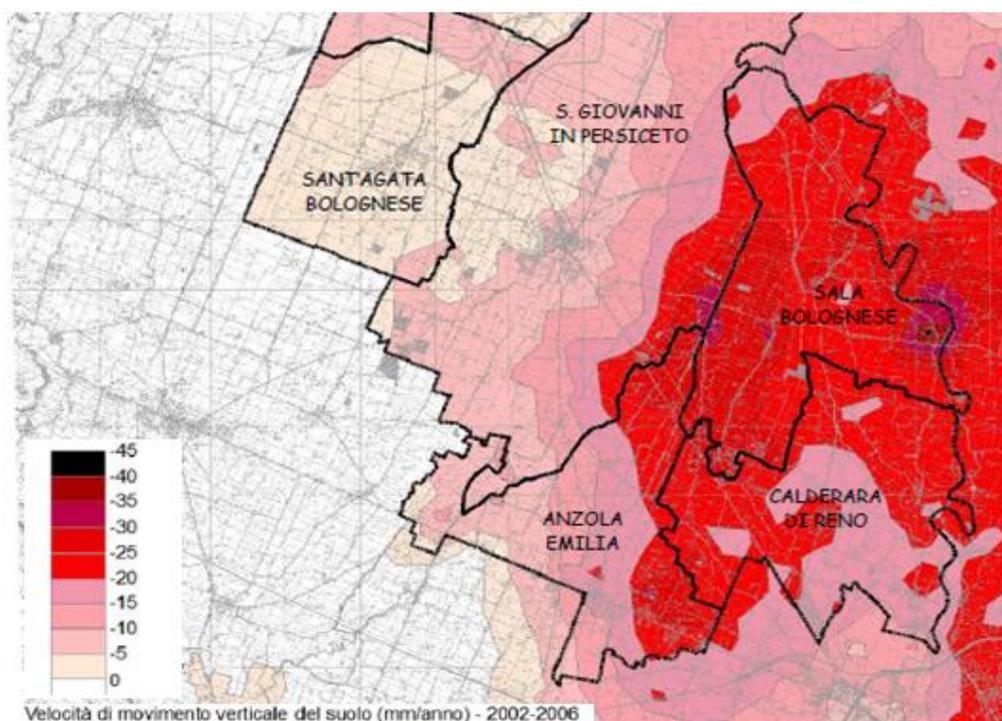


Figura 7. Carta delle velocità di abbassamento verticale del suolo nel periodo 2002-2006 (Arpa Ingegneria Ambientale, 2007).

I valori maggiori (20 – 30 mm/anno) si rilevano nella parte orientale dei territori comunali di San Giovanni in Persiceto, oltre che su buona parte dei territori di Sala Bolognese e in parte Calderara di Reno e Anzola Emilia.

3.3 Scavernamenti

In Pianura Padana e in particolare nei territori di pianura del bolognese e modenese sono stati segnalati, nell'ultimo ventennio, alcuni fenomeni di sprofondamento che hanno interessato i depositi alluvionali quaternari e le coperture più superficiali.

Tali strutture, che sembrano manifestarsi in superficie in tempi rapidi e si presentano come “buchi” di varie dimensioni e forma, vengono comunemente denominate “sprofondamenti e/o scavernamenti del piano di campagna” SPD, oppure nella letteratura scientifica “meso-pseudo-dolines” (Mpd, doline) e collassi o “meso-pseudo-sinkholes” (Mps, inghiottitoi) (Franchi, 2008).

Le morfologia degli “scavernamenti” è essenzialmente di due tipi:

- 1) cavità dell'ordine di qualche metro e profondità generalmente inferiore a 2 m, a geometria variabile. Talvolta il collasso del materiale di margine all'interno dello sprofondamento modifica la forma iniziale;
- 2) cavità strette (15-50 cm) a forma di conca a sezione da sub-circolare ad ellittica. In quest'ultimo caso, generalmente l'asse maggiore può superare 2 m di lunghezza con un tratto iniziale rappresentato da una tipica fessura a cunicolo (Bianchi et al., 2008).

Tra le ipotesi più accreditate per la genesi dei collassi vi sono (Franchi, 2008):

- 1) volumi di gas in sovrappressione, ospitati in cavità superficiali e capaci di sostenere il sovrastante strato di terreno agrario;
- 2) distacchi ciechi della copertura in superficie, con l'apertura di fenditure al di sotto del terreno che si trova sospeso sulle camere vuote.

Altri studi recenti indicano che l'origine degli “scavernamenti” sia da ricercare in sottrazioni di massa in zone poco profonde della successione stratigrafica; in particolare il fenomeno pare strettamente legato alla distribuzione della torba o/e sedimenti facilmente compattabili, presenti nelle prime decine di metri sotto il piano campagna, in molti casi inoltre il fenomeno è amplificato dall'eccessivo pompaggio dell'acqua metanifera presente nella torba stessa (Bianchi et al., 2008).

Le numerose ricerche e gli studi geomorfologici specifici indicano pertanto come sia ancora incerta la spiegazione di tali fenomeni, che preoccupano per la loro difficile collocazione spazio temporale e perché, sebbene ad oggi non risultino avere mai causato danni ad edifici o infrastrutture, non è possibile escludere che questo possa avvenire in futuro (Franchi, 2008).

In riferimento allo studio in oggetto si rileva comunque che ad oggi non sono segnalati e censiti fenomeni di sprofondamento nel territorio comunale di Calderara di Reno.

3.4 Idrogeologia

Per la corretta interpretazione e descrizione idrogeologica dell'area si può fare riferimento alla figura 8 che fornisce uno schema di comparazione tra la nomenclatura utilizzata in letteratura nell'ambito della definizione delle unità geologiche riconosciute classicamente, le sequenze deposizionali e la denominazione delle unità idrostratigrafiche proposta più recentemente.

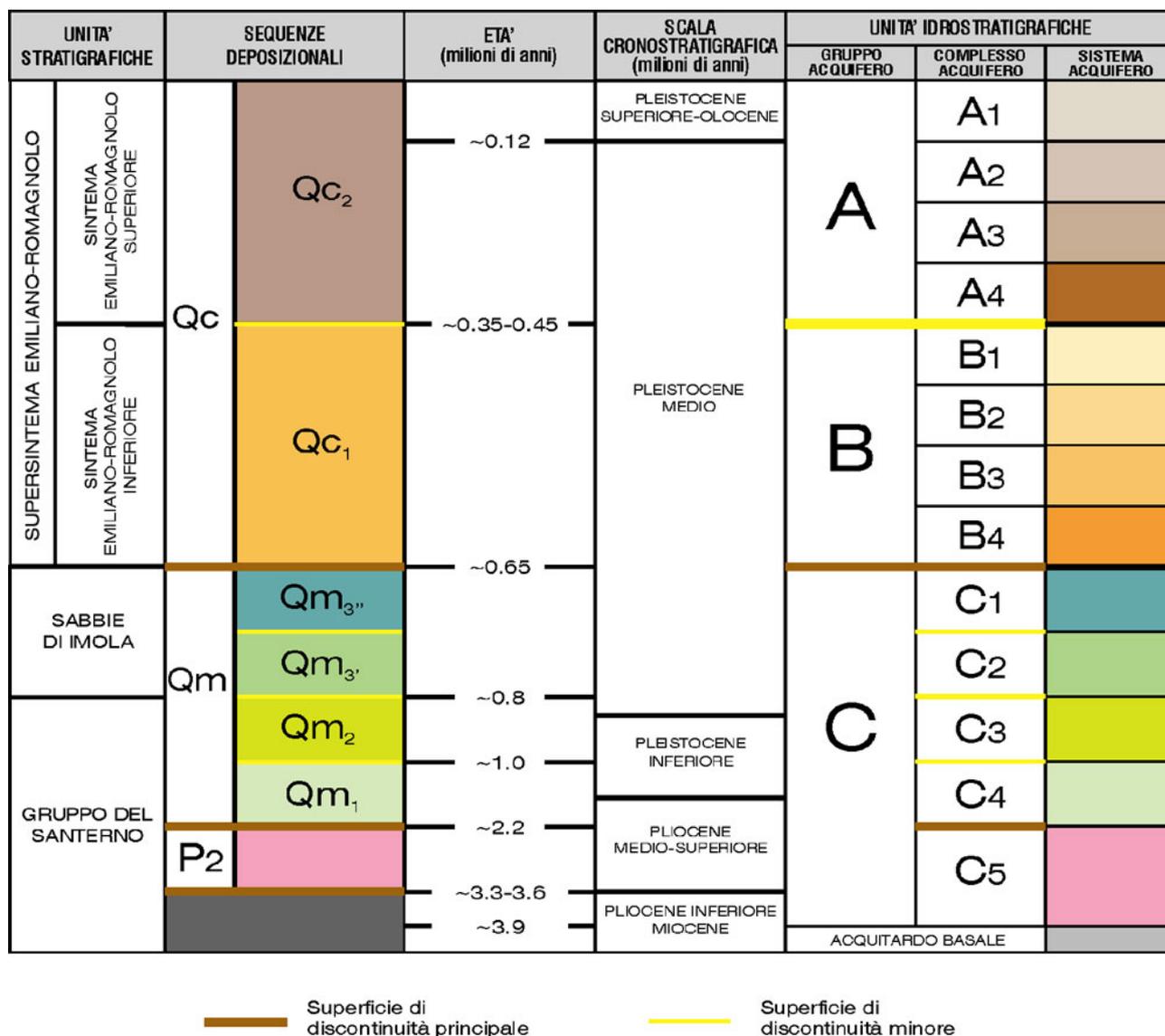


Figura 8. Schema della suddivisione dei depositi della pianura in tre unità stratigrafiche, denominate Gruppi Acquiferi A, B e C (Regione Emilia-Romagna et al., 1998)

I rilievi piezometrici eseguiti nell'area per il presente studio di microzonazione sismica e i numerosi dati estratti dalle relazioni geologiche consultate presso l'archivio comunale, confermano l'esistenza di un acquifero multifalda costituito da un complesso di falde superficiali ed un complesso di falde profonde (figura 9).

In particolare, relativamente alla piezometria della falda acquifera superficiale i dati desunti dal Quadro Conoscitivo del PSC di Calderara di Reno indicano una soggiacenza abbastanza regolare, con valori mediamente compresi tra 1,00 m e 3,00 m di profondità

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

dal piano di campagna ed una alimentazione che avviene tramite l'infiltrazione delle acque meteoriche dalla superficie (Tav. 9a/b/c del Quadro conoscitivo del PSC associato. Franchi, 2008).

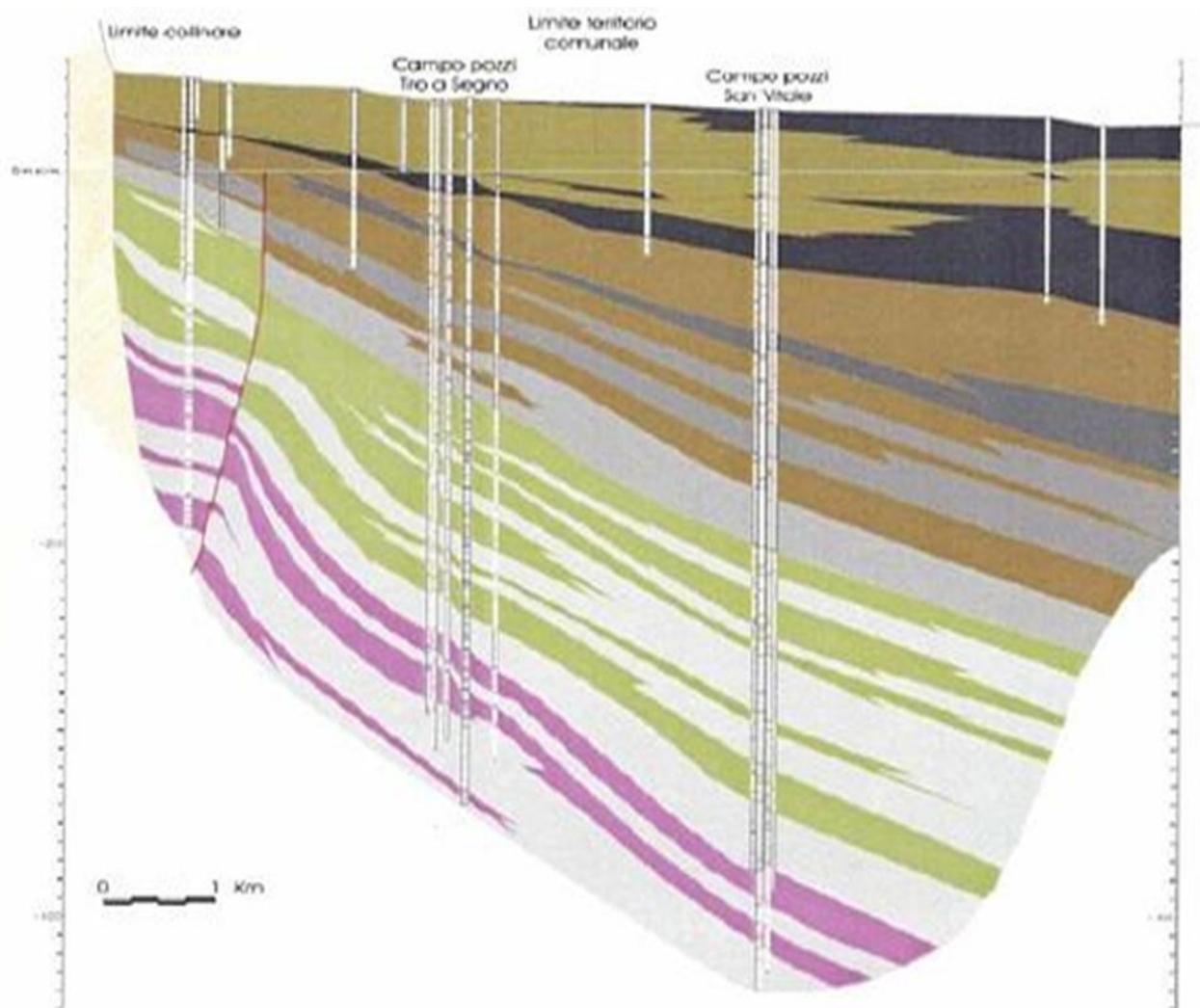


Figura 9. Sezione idrogeologica dell'area oggetto di studio nella quale si evidenzia la presenza di un acquifero multifalda e dei campi pozzi acquedottistici di Tiro a Segno e di San Vitale che influenzano fortemente le peizometrie dell'area di conoide (Franchi, 2008).

Per quanto riguarda l'acquifero più profondo, si rileva un livello statico che si attesta a profondità variabili mediamente comprese tra 15,00 m ed i 30,00 m dal piano campagna.

I dati piezometrici rilevati negli anni evidenziano una profonda depressione nel conoide del Reno, dovuta agli intensi prelievi dei campi pozzi acquedottistici presenti (Borgo Panigale, Tiro a Segno e San Vitale), che giunge anche a -55 m dal piano campagna (figura 10); in particolare il campo pozzi di San Vitale presente nel territorio del comune di Calderara di Reno dispone di una batteria di dodici pozzi profondi da 400 m a 450 m che intercettano diversi livelli dell'acquifero della conoide del fiume Reno a partire da circa 95 m di profondità (Franchi, 2008).

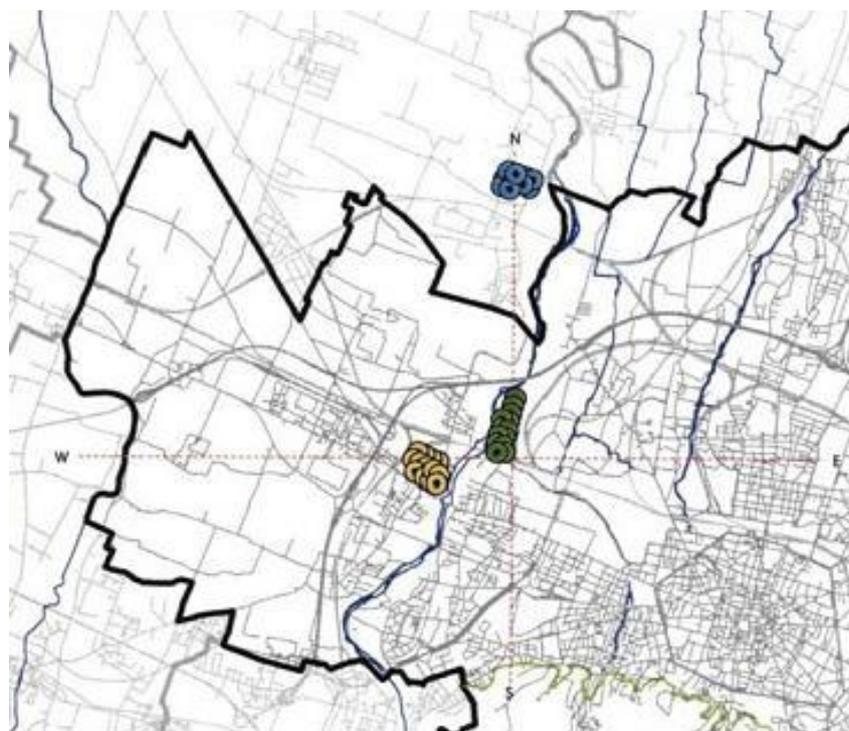


Figura 10. Ubicazione dei campi pozzi acquedottistici presenti nella zona di conoide del fiume Reno (Borgo Panigale, Tiro a Segno e San Vitale). Il cono di depressione dell'acquifero produce i suoi effetti sul territorio di tutti i comuni presenti in questa porzione pianura, come Calderara di Reno (Franchi, 2008).

Il richiamo causato dall'emungimento dei pozzi profondi si trasmette anche negli acquiferi più superficiali; infatti sono documentati fenomeni di drenanza fino a circa 200 metri di profondità, pur verificandosi con particolare evidenza tra il piano campagna e i 70 metri di profondità dove la differenza tra le quote piezometriche dei diversi acquiferi è pari a circa 20-30 m.

Sebbene l'evoluzione piezometrica nella conoide del Fiume Reno negli ultimi 30 anni, indica come a partire dal 1985 si assista ad una stabilizzazione delle quote con indizi di risalita, la piezometria della porzione sud-est del territorio comunale è ancora fortemente depressa e influenzata dal cono di emungimento presente, come testimoniato anche dai dati freaticometrici rilevati e acquisiti.

4. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

Le indagini geognostiche e geofisiche utilizzate nel presente studio di microzonazione sismica sono localizzate nella tavola 1 (Carta delle indagini, in scala 1:10.000), descritta al paragrafo 8.1.

4.1 Indagini di repertorio

Per le finalità dello studio di microzonazione sismica è stato raccolto e sistematizzato in una banca dati georeferenziata, un vasto repertorio di indagini geognostiche pregresse. I dati sono stati messi a disposizione da diversi soggetti:

- dai diversi servizi del Settore Governo e Sviluppo del Territorio del Comune di Calderara di Reno, che ha fornito alcune relazioni geologiche e ha consentito l'accesso al proprio archivio di pratiche edilizie;
- dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, che ha fornito i dati della propria banca dati geognostica;
- da alcuni geologi professionisti che, a seguito di specifica richiesta, hanno fornito dei rapporti di indagine tratti dai propri archivi.

In particolare è stato effettuato un approfondito lavoro di ricerca presso l'archivio cartaceo presente presso la sede del Comune di Calderara di Reno, contenente pratiche urbanistiche, edilizie e di deposito del cemento armato; sono pertanto state estratte tutte le relazioni geologiche e le relative indagini geognostiche dal 2007 ad oggi e, in maniera mirata, alcune relazioni geologiche antecedenti, relative ad aree rivelatesi, nel corso dello studio, di particolare interesse per la caratterizzazione geologica del sottosuolo.

TIPOLOGIA	NUMERO
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica	450
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica	17
Prove penetrometriche statiche con piezocono	13
Prove penetrometriche con piezocono sismico	3
Prove penetrometriche dinamiche leggere	15
Prove penetrometriche dinamiche pesanti	1
Prove penetrometriche in foro (SPT)	11
Sondaggi a carotaggio continuo	68
Sondaggi a distruzione di nucleo	81
Pozzi per acqua	149
Trincee o pozzetti esplorativi	2
Misure di microtremore a stazione singola	24
Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)	8

Tabella 1: Numero di indagini pregresse per tipologia, raccolte e utilizzate per il presente studio.

Nella tabella 1 è riportata una sintesi dei dati delle indagini pregresse utilizzate nello studio di microzonazione e archiviate nella banca dati. Il numero totale delle indagini pregresse disponibili è 842, di cui 383 provenienti dalla banca dati geognostica regionale e

459 raccolte e informatizzate per il presente studio. Sono state inoltre consultati i risultati di indagini realizzate nei comuni limitrofi a breve distanza dal confine. Alcune di queste, sebbene non siano riportate nella carta delle indagini, sono risultate assai utili per integrare i dati presenti nell'area di Calderara di Reno.

L'archivio informatizzato presenta innumerevoli vantaggi rispetto alla semplice catalogazione cartacea, tra questi la rapida accessibilità, il confronto immediato dei dati inseriti e la possibilità di un continuo aggiornamento. Inoltre la struttura della banca dati consente di associare al dato geografico (punto di indagine) e a quello iconografico (rapporto di prova in pdf), degli attributi alfanumerici che permettono di accedere interattivamente ai dati sintetici più importanti (profondità raggiunta, livello della falda misurato, quota del tetto delle ghiaie e del primo orizzonte sabbioso, presenza o meno di uno spessore significativo di terreni compressibili ecc.). La presenza di tali campi informativi ha permesso di realizzare delle carte tematiche specifiche ed efficaci rappresentazioni di sintesi che hanno consentito di ottenere un quadro immediato delle caratteristiche dei terreni studiati, alle diverse scale.

Dall'analisi della distribuzione delle verticali delle numerose indagini geognostiche pregresse e dei dati ad esse associati, si è potuto quindi osservare che buona parte del territorio comunale, ed in particolare la sua porzione urbanizzata, presenta caratteristiche geomeccaniche dei terreni ben note, da cui emerge un quadro tutto sommato chiaro e di buona correlabilità generale, come dettagliato al capitolo 5.

Molto meno numerose sono invece risultate le indagini geofisiche pregresse, volte ad accertare la profondità del bedrock sismico dell'area e a misurare direttamente la velocità delle onde di taglio nei primi trenta metri di profondità (V_{s30}).

Relativamente alla qualità dei dati, è chiaramente emerso che, data l'eterogeneità dell'archivio, non sempre indagini della stessa tipologia possono essere ritenute allo stesso modo attendibili. Dal confronto di indagini analoghe eseguite da soggetti diversi, in tempi diversi sulla stessa area, si sono evidenziati risultati a volte non coerenti. Per quanto possibile è stata quindi fatta una prima valutazione speditiva sull'affidabilità dei dati raccolti, tenendone opportunamente conto in sede di elaborazione e di studio. Alcune di queste valutazioni sono richiamate nei successivi capitoli.

4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

Al fine di caratterizzare le aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche previste dal Piano Strutturale Comunale e dal Piano Operativo Comunale, e le zone dell'urbanizzato che risultavano meno conosciute dal punto di vista geomeccanico e geofisico, sono stati integrati i dati pregressi con specifiche campagne di indagini.

In particolare sono state eseguite:

- 10 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT);
- 8 Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW);
- 72 misure di microtremore a stazione singola.

4.2.1 Prove penetrometriche statiche (CPT)

Le prove penetrometriche statiche permettono di acquisire il valore di resistenza della punta all'infissione e dell'attrito laterale, variabili con il variare delle caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche dei terreni. La conoscenza di questi parametri viene poi correlata attraverso l'ausilio di correlazioni empiriche che permettono una stima delle possibili caratteristiche tecniche dei terreni attraversati e di definirne un profilo stratigrafico.

Le prove sono state eseguite nel marzo 2013 con un penetrometro statico da 20 t montato su cingolato Pagani Tg63, le cui caratteristiche sono dettagliate nei rapporti di prova allegati.

L'acquisizione dei dati avviene ogni 20 cm di avanzamento e le prove sono state spinte fino al rifiuto dello strumento (con $R_p > 400 \text{ kg/cm}^2$). 7 prove sono arrivate ad oltre 20 metri di profondità, in due casi si sono fermate a circa 10 metri (CPT1 e CPT4), mentre in un caso la prova si è arrestata a 4,6 metri di profondità.

I dati penetrometrici (R_p , F_s) sono stati elaborati per ricavare i principali parametri tessiturali e meccanici dei sedimenti attraversati, riportati nei rapporti di prova allegati, e per eseguire la verifica alla liquefazione con metodi semplificati, come dettagliato nel capitolo 7.

Le prove sono state ubicate in corrispondenza dei centri abitati presenti nel territorio comunale tenendo conto delle trasformazioni urbanistiche previste. In particolare 4 prove sono state realizzate presso l'abitato di Calderara di Reno, 2 al Bargellino, 1 a Lippo, 1 a Longara, 1 a Sacerno e 1 a Tavernelle.

Vengono di seguito riportate le stratigrafie schematiche elaborate sulla base dei dati penetrometrici per mezzo di consolidate correlazioni a partire dai valori di resistenza alla punta e attrito laterale, trascurando i valori di picco isolati.

CPT1	Data: 22/03/2013	Località: Bargellino Via Turrini		Falda da p.c.: 5.9 m	
Intervallo (m)	Litologia prevalente	R_p min. (Kg/cm^2)	R_p med. (Kg/cm^2)	R_p max. (Kg/cm^2)	R_p/F_s
0 - 0,6	Terreno vegetale	11	45	88	15-25
0,6 - 5,8	Argilla limosa localmente sabbiosa consistente	15	26	32	15-42
5,8 - 7,2	Argilla organica plastica	6	9	11	10-18
7,2 - 8,4	Argilla con limi mediamente consistente	7	9	12	13-42
8,4 - 10,4	Ghiaia sabbiosa molto addensata	280	360	530	60-130

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

CPT2	Data: 22/03/2013	Località: Calderara di Reno Via Di Vittorio		Falda da p.c.: 2.05 m	
Intervallo (m)	Litologia prevalente	Rp min. (Kg/cm²)	Rp med. (Kg/cm²)	Rp max. (Kg/cm²)	Rp/Fs
0 - 0,6	Terreno vegetale	4	7	14	12-18
0,6 - 9,6	Argilla mediamente consistente e argille-limose	11	16	22	15-33
9,6 - 12	Limo argilloso localmente sabbioso	10	20	36	20-64
12 - 19,4	Argilla limosa consistente	10	14	20	18-25
19,4 - 22,4	Argilla molto consistente	18	23	32	13-18
22,4 - 22,8	Sabbia con ghiaia ben addensata	180	250	345	10-19

CPT3	Data: 22/03/2013	Località: Calderara di Reno Via della Mimosa (nord)		Falda da p.c.: 3.5 m	
Intervallo (m)	Litologia prevalente	Rp min. (Kg/cm²)	Rp med. (Kg/cm²)	Rp max. (Kg/cm²)	Rp/Fs
0 - 0,6	Terreno vegetale sovraconsolidato	5	9	14	20-70
0,6 - 3,8	Limo argilloso mediamente consistente	10	15	19	15-32
3,8 - 7,8	Argilla da plastica a mediamente consistente	4	7	9	13-28
7,8 - 13,2	Sabbia limosa e sabbia addensata	50	200	350	20-90
13,2 - 23,4	Alternanza di limi argillosi e argille limose consistenti	18	24	36	15-25
23,4 - 24,2	Ghiaia sabbiosa molto addensata	198	300	530	10-50

CPT4	Data: 22/03/2013	Località: Bargellino Via Roma		Falda da p.c.: 9. 30 m	
Intervallo (m)	Litologia prevalente	Rp min. (Kg/cm²)	Rp med. (Kg/cm²)	Rp max. (Kg/cm²)	Rp/Fs
0 - 0,4	Terreno vegetale	2	10	16	12
0,4 - 1,2	Argilla plastica poco consistente	8	12	16	11-14
1,2 - 6	Argilla limosa mediamente consistente	10	15	23	17-28
6 - 7,4	Argilla organica plastica	6	7	8	15-21
7,4 - 9,2	Argille sabbiose limose consistenti	9	15	25	16-63
9,2 - 10,2	Ghiaia in matrice sabbiosa molto addensata	340	450	650	65-150

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

CPT5	Data: 22/03/2013	Località: Lippo Via Castaldini		Falda da p.c.: assente	
Intervallo (m)	Litologia prevalente	Rp min. (Kg/cm²)	Rp med. (Kg/cm²)	Rp max. (Kg/cm²)	Rp/Fs
0 - 0,6	Terreno vegetale	9	11	13	11-19
0,6 - 2,6	Argilla e argilla limosa consistente	15	20	32	16-32
2,6 - 3,6	Sabbia argillosa limosa mediamente addensata	60	67	76	40-60
3,6 - 4,6	Ghiaia e sabbia molto addensata	240	450	600	50-84

CPT6	Data: 29/03/2013	Località: Sacerno Chiesa		Falda da p.c.: 3.0 m	
Intervallo (m)	Litologia prevalente	Rp min. (Kg/cm²)	Rp med. (Kg/cm²)	Rp max. (Kg/cm²)	Rp/Fs
0 - 0,8	Terreno vegetale sovracconsolidato	8	18	35	11-25
0,8 - 1,8	Argilla plastica poco consistente	6	11	15	11-15
1,8 - 3,2	Sabbia limosa mediamente addensata	42	70	115	30-66
3,2 - 4,0	Argilla mediamente consistente	8	9	11	15-33
4,0 - 11,0	Limi argillosi consistenti	13	20	29	19-32
11,0 - 21,6	Argilla sabbioso-limosa	15	28	38	25-45
21,6 - 23,4	Sabbia limosa mediamente addensata	28	40	63	15-90
23,4 - 24,8	Sabbia con ghiaia addensata	170	250	310	20-100

CPT7	Data: 29/03/2013	Località: Tavernelle Via Bazzane		Falda da p.c.: 2.7 m	
Intervallo (m)	Litologia prevalente	Rp min. (Kg/cm²)	Rp med. (Kg/cm²)	Rp max. (Kg/cm²)	Rp/Fs
0 - 0,4	Terreno vegetale	7	7	7	18-35
0,4 - 7	Argilla limosa consistente	13	16	22	17-25
7 - 8,6	Argilla limosa mediamente consistente	7	11	13	18-22
8,6 - 10,6	Argilla mediamente consistente	9	17	30	22-43
10,6 - 17,0	Argilla da poco consistente a plastica	9	11	12	15-21
17,0 - 20,8	Argilla sabbioso-limosa	11	15	20	15-22
20,8 - 23,4	Ghiaia sabbiosa addensata	240	340	500	40-100

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

CPT8	Data: 29/03/2013	Località: Calderara di Reno Via della Mimosa (sud)		Falda da p.c.: 4.2 m	
Intervallo (m)	Litologia prevalente	Rp min. (Kg/cm²)	Rp med. (Kg/cm²)	Rp max. (Kg/cm²)	Rp/Fs
0 - 1	Terreno vegetale sovraconsolidato	4	6	8	15-20
1 - 5,2	Argilla limosa sabbiosa consistente	15	21	28	16-38
5,2 - 6,8	Argilla mediamente consistente	6	9	15	15-27
6,8 - 9,2	Sabbia limosa addensata	105	230	380	20-90
9,2 - 14,8	Limo argilloso debolmente sabbioso consistente	9	11	12	15-21
14,8 - 23,4	Limo argilloso consistente	19	28	38	17-28
23,4 - 24	Ghiaia e sabbia molto addensata	120	300	430	10-34

CPT9	Data: 29/03/2013	Località: Calderara di Reno Via Armaroli		Falda da p.c.: 1.2 m	
Intervallo (m)	Litologia prevalente	Rp min. (Kg/cm²)	Rp med. (Kg/cm²)	Rp max. (Kg/cm²)	Rp/Fs
0 - 0,8	Terreno vegetale sovraconsolidato	7	11	15	15
0,8 - 9	Argilla limosa mediamente consistente	8	13	18	12-33
9 - 11,6	Argilla da poco consistente a plastica	7	9	14	10-24
11,6 - 18,2	Limo argilloso consistente	12	14	17	11-25
18,2 - 21,2	Argilla limosa compatta	13	19	23	10-21
21,2 - 22	Ghiaia e sabbia molto addensata	110	300	480	14-59

CPT10	Data: 29/03/2013	Località: Longara Via Caduti della Libertà		Falda da p.c.: 1.3 m	
Intervallo (m)	Litologia prevalente	Rp min. (Kg/cm²)	Rp med. (Kg/cm²)	Rp max. (Kg/cm²)	Rp/Fs
0 - 0,8	Terreno vegetale sovraconsolidato	6	9	13	16-20
0,8 - 4	Limo sabbioso e sabbia limosa	9	15	29	21-42
4 - 9	Argilla mediamente consistente	7	10	16	15-27
9 - 15,8	Limo argilloso molto consistente	9	19	27	16-30
15,8 - 20,8	Argilla limosa consistente	9	13	17	13-20
20,8 - 24,8	Limo argilloso sabbioso e sabbia limosa	16	40	70	18-45
24,8 - 25,8	Ghiaia in matrice sabbiosa molto addensata	280	360	600	22-110

4.2.2 Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW)

Le prospezioni sismiche che prevedono l'utilizzo di onde superficiali (Onde di taglio - onde Sh/Sv) note in letteratura come MASW – Multichannel Spectral Analysis of Waves (Park et al., 1999; Park et al., 2007) realizzate a supporto del presente studio di microzonazione sismica, hanno previsto acquisizioni con tecnica in sismica attiva mediante l'utilizzo di massa battente come sorgente di onde superficiali.

Attraverso l'analisi del contenuto di onde superficiali, in questo caso onde di Rayleigh, che costituiscono un particolare tipo di onde dal comportamento dispersivo in un mezzo stratificato come il sottosuolo, è possibile ricavare indirettamente la velocità delle onde di taglio (V_S) secondo l'equazione:

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

ν : rapporto di Poisson
 V_R : velocità onde di Rayleigh

La fase di elaborazione analizza il contenuto in frequenza delle onde registrate per la discriminazione dei diversi modi di vibrazione delle onde di Rayleigh (onde R) nella banda d'interesse; in particolare data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 20 Hz), la tecnica di acquisizione per onde di superficie necessita di geofoni (ad asse verticale) con frequenza di taglio non superiore a 4,5 Hz.

Con la tecnica MASW (indagine sismica non invasiva di superficie) si ottiene una modellazione del sottosuolo, basandosi sulla propagazione delle onde di Rayleigh, oggi realizzata mediante approcci multi stazioni, che risultano robusti ed efficienti (Lai e Wilmanski, 2005) rispetto ai primi approcci del metodo, che si basavano essenzialmente su 2 ricevitori. Queste prove sfruttano la proprietà della dispersione geometrica, che rende la velocità di propagazione delle onde di Rayleigh (V_R) dipendente dalla frequenza di eccitazione in mezzi verticalmente eterogenei.

L'onda di Rayleigh costituisce un particolare tipo d'onda sismica ed è facilmente individuabile in quanto ha una velocità differente dai treni d'onda delle onde P ed S risultando più lenta anche di queste ultime, con una velocità di propagazione $V_R \approx 0,9 \div 0,96 V_S$.

Gli elementi a bassa frequenza penetrano quindi più in profondità, con velocità di fase in genere più alta, rispetto alle componenti ad alta frequenza. Il calcolo del profilo delle velocità delle onde di Rayleigh, visualizzato dai grafici $V(\text{fase})/f(\text{frequenza})$, tramite elaborazioni e programmi dedicati, è convertito in profili V_S / profondità.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

Per l'indagine sismica sono state acquisite registrazioni con massa battente esterna da 10 Kg ed in linea con lo stendimento sismico; le Basi Masw eseguite, per le possibilità operative presenti in corrispondenza dei siti di intervento, presentano (Compreso il punto di shot) la geometria come sotto indicato:

- Numero geofoni 24
- Spaziatura geofoni 1,5 m
- Lunghezza stendimento geofonico 34,5 m
- Distanza punto di shot da ultimo geofono 15 m
- Lunghezza complessiva 49,5 m

I dati sono stati campionati utilizzando un sismografo multicanale ad incrementi di segnale, della P.A.S.I. mod. 16SG24 a 24 canali, attraverso l'impiego di 24 geofoni da 4,5 Hz collegati in serie da due cavi con lunghezza pari a 33 m l'uno.

L'interpretazione delle tecniche di rilievo sismico MASW traggono spunto come sopra accennato dalle prime tecniche studiate da Nazarian e Stokoe (1984-94) che per primi hanno presentato il metodo SASW, che utilizzava una sorgente d'impulso e 2 soli sismometri di rilevazione (1 Hz). Tale tecnica, come d'altronde anche la MASW, è basata sul fatto che osservando il segnale che si propaga nel suolo a seguito di una energizzazione, è notorio che la quasi totalità dell'energia (circa 2/3 o più) si propaga tramite onde superficiali (onde di Rayleigh).

Dal sismogramma tramite una trasformata nel dominio frequenza (f) – numero d'onda (k), si ottengono le tracce cui corrispondono i massimi spettrali (senza trascurare i modi superiori se presenti). Si può così risalire alla curva di dispersione (cioè un grafico ampiezza/frequenza) mediante la relazione: $VR(f)=f/k$, che consente di individuare il segnale proprio, relativo alle onde superficiali che interessano tale metodologia.

Il processo iniziale di individuazione della curva di dispersione caratteristica del sito in esame, è ottenuto tramite il software SWAN® (vers. 2008), seguito poi da una fase di elaborazione-interpretazione. Eseguendo una "analisi spettrale" si procede sostanzialmente nella risoluzione del cosiddetto problema inverso: a partire dalla curva di dispersione misurata in situ, si arriva al modello di stratificazione del terreno con i relativi parametri sismici.

L'indagine geofisica è stata realizzata per conto dello Studio scrivente dalla Società Tecnogeofisica snc di Carpi (MO) ed è consistita nella effettuazione di 8 prove sismiche tipo MASW per consentire la ricostruzione di profili verticali di Vs fino alla profondità di 30 metri dal piano campagna. A tal fine sono stati esaminati i dati ottenuti dalle prospezioni sismiche di superficie, opportunamente tarati coi dati stratigrafici e litologici presenti in bibliografia (pozzi, sezioni stratigrafiche ecc.) e con le curve HVSr misurate nei siti (paragrafo 4.2.3).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

In base a quanto sopra, ai vari strati sismo-stratigrafici individuati è stato associato il valore della velocità V_s direttamente misurate, consentendo di ottenere la V_{s30} , cioè la velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo, dall'espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

Le 8 indagini MASW sono state eseguite nel marzo 2013, in associazione con 8 delle 10 prove penetrometriche statiche realizzate per il presente studio di microzonazione sismica e ubicate in corrispondenza dei principali centri abitati presenti nel territorio comunale, anche in considerazione delle trasformazioni urbanistiche previste. Nella tabella 2 sono riportati i valori di V_s registrati per ciascuna prova e si rimanda ai rapporti allegati per il dettaglio di ogni singola indagine, mentre nella tavola 5 lo stesso dato di V_s è indicato puntualmente sulla cartografia tecnica regionale.

In sintesi valori di V_s per il sottosuolo più superficiale (con spessori pari a circa 3-6 metri per le prove n. 2 e 4 e 7-12 metri per le restanti) sono associabili a sedimenti prevalentemente fini e tendono ad aumentare con la profondità, con un netto incremento in corrispondenza del passaggio a livelli più rigidi che corrispondono a litologie granulari ghiaiose e sabbiose.

Prova	Località	Vs30
MASW1	Bargellino – via Turrini	275
MASW2	Rizzola levante – POC via Roma	307
MASW3	Longara - POC via Caduti della Libertà	214
MASW4	Lippo - via Castaldini	388
MASW5	Calderara di Reno – ARS via Armaroli	239
MASW6	Tavernelle - via Bazzane	248
MASW7	Calderara di Reno - POC via delle Mimose nord	237
MASW8	Sacerno - Chiesa	246

Tabella 2. Valori di V_{s30} calcolati dalle prove MASW.

4.2.3 Misure di microtremore a stazione singola

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 (Albarello e Castellaro, 2011). Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l'amplificazione sismica, 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 ($10-15 \text{ m/s}^2$), 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 – 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.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 30 minuti per 8 misure e pari a 14 minuti per le restanti 64.

Nella tabella 3 sono riportati i dati principali associati a ciascuna delle 72 misure di microtremore realizzate e utilizzate per il presente studio di microzonazione.

Si precisa che la numerazione progressiva delle indagini di sismica passiva è univoca ma non continua in quanto il numero totale delle misure eseguite nelle diverse campagne di indagine (100) è superiore al numero delle misure riportate in questo studio (72). Le 28 misure non presenti, che rimangono comunque archiviate nella banca dati dello studio scrivente, non sono state utilizzate perché soggette ad evidenti disturbi esterni per lo più di natura antropica che ne hanno pregiudicato un corretto utilizzo (paragrafo 6.3).

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

Codice	Lon	Lat	Data	Durata	f0	Amplif.	Codice	Lon	Lat	Data	Durata	f0	Amplif.
R001	11.3072	44.5578	20130319	14 min	4.47	3.2	R052	11.2706	44.5388	20130328	14 min	3.8	2.2
R002	11.3082	44.5657	20130319	14 min	3.66	2.5	R053	11.2663	44.5369	20130328	14 min	3.8	2.3
R004	11.2785	44.5666	20130319	14 min	2.41	1.9	R054	11.263	44.5434	20130328	14 min	3.69	3
R005	11.2683	44.5684	20130319	14 min	1.88	2	R055	11.263	44.5464	20130328	14 min	6.25	2.9
R007	11.2654	44.5647	20130319	14 min	2.4	1.7	R056	11.2609	44.5504	20130328	14 min	3.75	1.9
R008	11.2685	44.5633	20130319	14 min	1.88	2	R057	11.2593	44.5467	20130328	14 min	3.75	2
R009	11.2707	44.5591	20130319	14 min	2.38	2.2	R059	11.267	44.5444	20130328	14 min	4.3	2.2
R011	11.2771	44.564	20130319	14 min	2.28	2.1	R060	11.2644	44.5608	20130328	14 min	4.44	1.8
R012	11.2728	44.5623	20130319	14 min	1.03	1.9	R063	11.2653	44.5488	20130328	14 min	3.84	1.7
R013	11.2742	44.5654	20130319	14 min	1.88	2.2	R064	11.2651	44.5508	20130328	14 min	3.8	1.8
R014	11.2724	44.5679	20130319	14 min	1.81	2.1	R065	11.2548	44.5533	20130328	14 min	3.44	2.1
R015	11.2704	44.565	20130319	14 min	1.88	1.9	R066	11.2509	44.5564	20130328	14 min	3.22	1.7
R016	11.27	44.562	20130319	14 min	1.94	1.9	R067	11.3089	44.5672	20130417	14 min	2.91	2.1
R017	11.267	44.5592	20130319	14 min	16.88	2	R068	11.3056	44.5677	20130417	14 min	3.66	2
R019	11.2774	44.5598	20130319	14 min	1.97	1.8	R069	11.3042	44.5681	20130417	14 min	1.97	1.9
R020	11.2715	44.5547	20130319	14 min	3.97	1.8	R070	11.3062	44.5713	20130417	14 min	2.56	2.1
R021	11.3014	44.5724	20130321	14 min	2.4	1.7	R071	11.3051	44.5766	20130417	14 min	1.03	1.7
R024	11.2999	44.5696	20130321	14 min	1.03	1.8	R072	11.3022	44.5742	20130417	14 min	1.03	1.7
R026	11.2927	44.546	20130321	14 min	7.5	2.8	R073	11.3027	44.5702	20130417	14 min	2.38	2
R027	11.286	44.5451	20130321	14 min	4.28	2.8	R074	11.3014	44.5602	20130417	14 min	4.06	2
R028	11.312	44.5561	20130321	14 min	3.69	2.2	R075	11.2897	44.5493	20130417	14 min	3.72	2.2
R029	11.3055	44.5442	20130321	14 min	5.31	3.5	R076	11.2922	44.5533	20130417	14 min	3.13	2.6
R030	11.3018	44.5391	20130321	14 min	4.88	2	R078	11.2856	44.5534	20130417	14 min	2.81	2
R031	11.3053	44.534	20130321	14 min	13.31	3.5	R081	11.2732	44.5582	20130417	14 min	1.88	2.4
R032	11.2658	44.5424	20130322	30 min	4.59	3.4	R083	11.2569	44.5716	20130418	14 min	1.06	1.6
R034	11.2654	44.5656	20130322	30min	2.03	1.8	R084	11.2684	44.5656	20130418	14 min	2.04	1.8
R039	11.2313	44.559	20130328	30 min	0.84	1.4	R085	11.2629	44.5617	20130418	14 min	16.44	2.8
R040	11.3088	44.5923	20130328	30min	0.75	1.7	R088	11.2448	44.5704	20130421	14 min	0.88	1.7
R041	11.2484	44.5728	20130328	30 min	0.92	1.9	R089	11.2436	44.5804	20130421	14 min	0.75	1.8
R042	11.2749	44.5677	20130328	30 min	1.88	1.6	R090	11.277	44.5671	20130421	14 min	1.69	1.6
R044	11.3043	44.5744	20130328	30 min	1.03	1.9	R091	11.2854	44.554	20130421	14 min	3.13	2
R045	11.3028	44.536	20130328	30min	12.19	2.2	R093	11.2836	44.5489	20130421	14 min	2.6	1.8
R048	11.2704	44.5513	20130418	14 min	2.66	2	R094	11.2611	44.5442	20130421	14 min	2.97	2.4
R049	11.2307	44.5545	20130417	14 min	0.81	1.3	R095	11.2451	44.5613	20130421	14 min	2.06	1.9
R050	11.2392	44.5753	20130417	14 min	0.91	1.9	R097	11.2664	44.5673	20130421	14 min	1.97	2
R051	11.2693	44.534	20130328	14 min	4.31	2.5	R099	11.2737	44.5452	20130421	14 min	2.94	2.2

Tabella 3. Principali dati associati alle 72 misure di microtremore a stazione singola.

Questa campagna di indagine geofisica, proprio perché così estesa sul territorio comunale, è risultata molto importante ai fini della caratterizzazione sismica dei terreni, in quanto ha permesso di accertare la presenza di aree oggetto di possibili fenomeni di risonanza, anche significativi, originati da contrasti di impedenza all'interno dei depositi, di mapparne in dettaglio l'andamento e di stimarne con buona precisione la profondità. In particolare, come dettagliato nel capitolo 5, le misure eseguite hanno evidenziato la presenza di un'area a forte contrasto di impedenza proprio in corrispondenza del conoide ghiaioso sepolto del fiume Reno, con un significativo aumento dell'ampiezza dei picchi di H/V anche su brevi distanze. Per questo motivo si è deciso di realizzare un numero consistente di misure di microtremore a stazione singola, alcune delle quali sono state eseguite anche in aree dove non erano strettamente necessari gli studi di microzonazione, cioè al di fuori delle aree urbanizzate, di quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche e delle fasce a cavallo delle reti infrastrutturali, al fine di ottenere un quadro complessivo per l'intera area comunale e di mappare nel dettaglio tutta la zona ad alto contrasto di impedenza caratterizzandola sia dal punto di vista delle frequenze che da quello delle ampiezze dei picchi H/V.

5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Al fine di ricostruire il modello geologico di sottosuolo del territorio comunale sono stati inizialmente analizzati i dati di tutte le indagini di repertorio disponibili, indicate nel capitolo 4; successivamente sono state analizzate ed interpretate le indagini geognostiche e geofisiche di nuova realizzazione previste per il presente studio di microzonazione sismica.

A seguito del lavoro di raccolta e sistematizzazione dei dati di repertorio e dell'esecuzione delle nuove indagini, i dati stratigrafici oggi disponibili per l'area di Calderara di Reno sono molto numerosi e, pur con evidenti concentrazioni in alcune aree, anche tutto sommato ben distribuiti sull'intero territorio comunale. Questo consente di ottenere una attendibile ricostruzione delle caratteristiche litologiche e sismiche dei primi 20-30 metri di sottosuolo nelle aree urbanizzate ed in alcuni casi anche al di fuori di queste. Le nuove indagini eseguite consentono inoltre anche una prima valutazione dei terreni in cui si prevedono interventi di trasformazione urbanistica previsti dal PSC e su cui sono in corso le procedure per l'attuazione di specifici POC.

5.1 Terreni di copertura

In generale la litostratigrafia del sottosuolo di Calderara di Reno desunta dalle indagini conferma l'assetto geologico-strutturale descritto nell'inquadramento, riportato nel capitolo 3, con la presenza, a partire dal piano di campagna, di spessori variabili di terreni limo-argillosi, con locali livelli anche metrici di sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi, che poggiano su un livello di ghiaie e sabbie ben addensate. Tale stratigrafia generale trova conferma in tutte le 10 prove penetrometriche statiche eseguite per il presente studio e le cui stratigrafie sono riportate al paragrafo 4.2.1.

La carta geologico tecnica (tavola 2 e paragrafo 8.2), è un elaborato differente da una classica carta geologica o litologica, in quanto è finalizzata alla definizione del modello di sottosuolo utile per uno studio di microzonazione sismica. Per la suddivisione delle aree a diversa litologia dei terreni di copertura, è stata utilizzata come base iniziale la "carta degli elementi geologici superficiali che possono determinare effetti locali", tavola 1 della recente variante al PTCP in materia di rischio sismico (Provincia di Bologna, 2013), che nell'area indagata identifica due aree, una caratterizzata dalla presenza di "limi e argille" e una da "sabbie prevalenti". Sono state quindi realizzate due ulteriori suddivisioni: una prima attraverso l'identificazione di una stretta fascia lungo il tratto più meridionale del corso del fiume Reno, caratterizzata da una prevalenza fin dai primi metri di ghiaie e ghiaie sabbiose; una seconda attraverso l'identificazione delle aree di cava, ma solo quelle attualmente riempite con terreni riportati.

Le suddivisioni litologiche dei terreni di copertura appena descritte sono servite come base generale per la realizzazione della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4 e paragrafo 8.4).

5.2 Tetto delle ghiaie e “conoide alluvionale”

I molti dati stratigrafici disponibili hanno permesso di ricostruire alla scala 1:10.000, con un buon dettaglio, le isobate del tetto delle prime ghiaie dalla superficie topografica, che sono riportate nella carta geologico tecnica (tavola 2). Le misure di microtremore a stazione singola eseguite su tutta l'area comunale hanno permesso di identificare aree caratterizzate da un differente valore di frequenza fondamentale, correlabile in genere con il tetto delle prime ghiaie, quando la potenza dello strato ghiaioso è almeno di alcuni metri (tavola 3 e capitolo 8.3). L'osservazione delle curve H/V ha permesso inoltre di individuare un'ampia zona, nella porzione sud-occidentale dell'area comunale, caratterizzata da una maggiore ampiezza dei picchi (a frequenze comprese tra 3 e 13 Hz) e quindi un maggior contrasto di impedenza (punti di misura tematizzati in arancio e rosso nella tavola 3), dovuti alla presenza, al di sotto dei primi livelli limosi, di un potente orizzonte di ghiaie e ghiaie-sabbiose ben addensate (Castellaro et al., 2005). Sulla restante porzione del territorio comunale, caratterizzata da picchi meno pronunciati o addirittura assenti in corrispondenza del tetto delle prime ghiaie, lo spessore e/o l'addensamento dell'orizzonte ghiaioso-sabbioso è più ridotto. Tale ricostruzione litostratigrafica è avvalorata dai dati dei sondaggi e dei pozzi per acqua più profondi.

Sulla base di tali evidenze, nella carta geologico tecnica è stato possibile distinguere un'area definita di “conoide alluvionale” (quella a maggiore contrasto di impedenza), che può non coincidere con il conoide identificato nelle diverse carte geomorfologiche disponibili, ognuna delle quali peraltro propone limiti diversi (Provincia di Bologna, 2013; Franchi, 2008; Bergonzoni e Elmi, 2003; Regione Emilia-Romagna, 1999; Castiglioni, 1997). In questa sede, per lo scopo del presente studio, non interessa entrare nel merito della definizione geomorfologica dei limiti del conoide, ma piuttosto riuscire ad identificare una zona specifica con caratteristiche rilevanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie.

6. INTERPRETAZIONI ED INCERTEZZE

Nel presente capitolo vengono esaminate le principali scelte a scopo interpretativo effettuate, partendo dall'esposizione della logica seguita, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando anche di valutarne le inevitabili incertezze e le eventuali criticità non risolvibili in questo livello di approfondimento.

6.1 Substrato rigido

Per la porzione di pianura in esame non risulta semplice identificare univocamente una o più superfici che possano corrispondere al substrato rigido, per il quale le linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012) richiedono l'archiviazione di dati specifici, qualora disponibili (capitolo 8.4).

Come esposto nel paragrafo 5.2, la distribuzione delle ghiaie sul territorio e la profondità del tetto del primo orizzonte rispetto alla superficie topografica non sono ovunque coerenti con i picchi in frequenza e le loro ampiezze, poiché entrano sicuramente in gioco fattori variabili arealmente quali lo spessore, la granulometria e l'addensamento della facies ghiaiosa. Inoltre, dai risultati delle indagini MASW, la velocità dei livelli di ghiaia più superficiali normalmente non raggiunge i 500 m/s. Per queste ragioni, perlomeno in larga parte del territorio comunale, il tetto delle ghiaie non può essere considerato il bedrock sismico di riferimento.

Molte delle misure di microtremore hanno evidenziato un picco, quasi sempre molto poco pronunciato, a frequenze comprese tra 0,75 e 1,2 Hz, che può essere correlato con la superficie che separa gli acquiferi A1 e A2 (figura 8), evidenziata dalle sezioni AA' e BB', corrispondente alla base del Pleistocene superiore (125.000 anni) e che nell'area si rinviene a profondità variabili tra i 75 (sud-est) e i 110 metri (nord-ovest). Questo orizzonte, continuo in tutta l'area di studio e che origina un picco ricorrente alle basse frequenze, potrebbe rappresentare, per l'intero territorio comunale, il substrato rigido di riferimento, sebbene sia ipotizzabile che anch'esso risulti caratterizzato da valori di Vs inferiori a 800 m/s. Nella carta geologico tecnica sono stati inseriti i punti di alcuni pozzi per acqua con una stratigrafia sufficientemente chiara da permettere di identificare la base del complesso acquifero A1 (tavola 2 e paragrafo 8.2).

In conclusione, anche sulla scorta di precedenti esperienze di studi di microzonazione sismica in situazioni analoghe, per il presente studio, ed in particolare per elaborare la carta di microzonazione sismica di secondo livello (tavole da 6.1 a 8.2 e paragrafo 8.6), si è operata la seguente scelta: Limitatamente alle aree in cui è stato riscontrato un primo potente livello ghiaioso che origina un maggiore contrasto di impedenza, e identificate nella carta geologico tecnica dalla forma di superficie "conoide alluvionale", questo è stato considerato come pseudo-bedrock. Per le restanti aree, in cui gli spessori degli orizzonti di ghiaia più superficiali sono limitati e il contrasto di impedenza risulta meno marcato, il bedrock (o pseudo-bedrock) sismico è rappresentato dal tetto del complesso acquifero A2 (base del complesso acquifero A1).

Secondo le linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012) è previsto che vengano prodotte, solo come shapefile e solo se disponibili, le isobate del substrato rigido. Vengono quindi consegnate nel formato richiesto le isobate della base del complesso acquifero A1 per la zona di studio e un suo intorno di circa 2 chilometri (dalla banca dati del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna).

6.2 Distribuzione dei livelli limo-sabbiosi a Calderara di Reno-Lippo- Bargellino

La carta geologico tecnica (tavola 2), riporta le isobate del tetto del primo livello ghiaioso dalla superficie topografica (paragrafo 8.2.3), che presenta un generale approfondimento a partire dalla porzione meridionale del corso del Fiume Reno (dove si ritrova a meno di 5 metri di profondità) muovendosi in direzione nord-ovest. Mettendo a confronto l'andamento delle isobate con l'estensione dell'area di conoide alluvionale, riportata sempre nella tavola 2, si può notare che, a partire dalla zona compresa tra le frazioni di Lippo e Bargellino, si estende un "lobo" ghiaioso, di spessore ridotto (da sezioni e dati di pozzi e sondaggi), in direzione nord-nord-ovest, verso Calderara di Reno, il cui tetto si mantiene a profondità inferiore a 10 metri, fino ad arrivare quasi alla periferia a sud del capoluogo. Tale livello ghiaioso risulta ben individuabile nella sezione BB'. Analizzando i numerosi dati geognostici raccolti, è proprio in corrispondenza dell'assottigliamento e della chiusura di tale livello ghiaioso verso nord (Calderara capoluogo), est (Lippo) e ovest (Bargellino) che si rinvergono, anche entro i primi 10 metri di profondità, diffusi livelli sabbiosi e limo-sabbiosi. Si sottolinea che, dai dati disponibili, tali depositi granulari (in genere saturi), risultano organizzati in corpi di spessore variabile, a geometria lenticolare, con frequenti brusche chiusure laterali. Le considerazioni e gli approfondimenti fatti a seguito del rinvenimento di tali litologie (capitolo 7), hanno comunque permesso di delimitare un'ampia area instabile per la presenza depositi potenzialmente liquefacibili (tavola 4), il cui perimetro risulta maggiormente attendibile per le aree di interesse della microzonazione sismica di dettaglio, cioè nelle aree urbanizzate, in quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche e lungo le fasce a cavallo delle reti infrastrutturali (definite al paragrafo 1.2 e delimitate in azzurro nella tavola 4), per cui sono disponibili sufficienti dati geognostici. Al di fuori delle "aree di interesse" la stessa perimetrazione, in ragione delle più ridotte informazioni disponibili, può invece fornire solo un'indicazione di massima.

6.3 Determinazione della frequenza naturale dei terreni (f_0)

Come dettagliato al paragrafo 4.2.3 è stata condotta, a supporto del presente studio, una estesa campagna di misure di microtremore a stazione singola. L'esecuzione delle singole misure ha presentato alcune difficoltà legate principalmente alla scarsa disponibilità per alcune porzioni di territorio (in località Lippo e Bargellino in particolare), di aree con terreno naturale ove posizionare gli strumenti di misura (Castellaro e Mulargia, 2010).

In relazione alla frequente presenza di inversioni di velocità (strati più lenti al di sotto di strati più veloci e rigidi) evidenziata dalle curve H/V (presenza di minimi di ampiezza inferiore a 1), si è provveduto a scartare alcune misure per cui si è ritenuto che tale

occorrenza potesse nascondere o comunque alterare eventuali picchi significativi di origine stratigrafica (Castellaro e Mulargia, 2009b).

In fase di elaborazione dei dati, in particolare nelle registrazioni eseguite nelle stesse località di Lippo e Bargellino, si è inoltre accertata la presenza di diffusi disturbi a varie frequenze, di chiara origine antropica (dovuti alle attività industriali e artigianali e a quelle legate al vicino aeroporto di Bologna).

Per le suddette ragioni, diverse misure si sono dovute ripetere e quindi ben 28 non sono state utilizzate nelle elaborazioni perché soggette ad evidenti disturbi che ne hanno pregiudicato un corretto utilizzo.

6.4 Determinazione della velocità delle onde di taglio (V_s)

Per poter essere correttamente applicati, gli abachi indicati nell'Allegato A2 degli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007) prevedono la conoscenza della profondità del substrato rigido (paragrafo 6.1) e della velocità delle onde di taglio dei primi metri di depositi (V_{s30} o V_{sH}).

Per questa ragione, a integrazione dei pochi dati geofisici esistenti volti alla misurazione diretta del parametro V_s (11 dati puntuali), sono state realizzate, per il presente studio, 8 indagini con tecnica MASW (capitolo 4.2.2). Sono così in tutto disponibili 19 punti di misura diretta del valore di V_s fino a 30 metri (3 da cono sismico e 16 da MASW), che sono riportati nella tavola 5, i cui contenuti sono illustrati in dettaglio nel paragrafo 8.5. Considerando le indagini geofisiche di nuova realizzazione, la distribuzione dei dati puntuali è ora buona, per lo meno nelle aree di interesse della microzonazione sismica di dettaglio (aree urbanizzate, suscettibili di trasformazioni urbanistiche e fasce a cavallo delle reti infrastrutturali), anche se il numero assoluto rimane sicuramente non elevato. In ogni caso, anche attraverso opportune correlazioni con altri dati geognostici e geofisici, è stato possibile suddividere il territorio indagato in macro-aree per classi di V_s (V_{sH} nella zona di "conoide alluvionale" e V_{s30} nel resto dell'area comunale), così come definite dagli abachi dell'Allegato A2 degli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007): 200-250-300 m/s. Una volta scelto l'abaco di riferimento, questo dato, associato a quello della profondità del bedrock (o pseudo-bedrock) sismico, ha permesso di ricavare i fattori di amplificazione per ogni singola area (paragrafo 7.1).

6.5 Piezometria

Come definito in sede di inquadramento (capitolo 3), nell'area in esame è stata accertata l'esistenza di un acquifero multifalda costituito da un primo complesso di falde superficiali ed un secondo di falde profonde (figura 9).

In particolare, relativamente alla piezometria della falda acquifera superficiale i dati desunti dal Quadro Conoscitivo del PSC di Calderara di Reno indicano una soggiacenza abbastanza regolare, con valori mediamente compresi tra 1,00 m e 3,00 m di profondità dal piano di campagna ed una alimentazione che avviene tramite l'infiltrazione delle acque

meteoriche dalla superficie (Tav. 9a/b/c del Quadro conoscitivo del PSC associato. Franchi, 2008).

Per quanto riguarda l'acquifero più profondo, si rileva un livello statico che si attesta a profondità variabili mediamente comprese tra 15,00 m ed i 30,00 m dal piano campagna.

I dati piezometrici rilevati negli anni evidenziano una profonda depressione nel conoide del Reno, dovuta agli intensi prelievi dei campi pozzi acquedottistici presenti, che giunge anche a -55 m dal piano campagna (figura 10) e il richiamo causato dall'emungimento dei pozzi profondi si trasmette certamente anche negli acquiferi più superficiali (paragrafo 3.4).

I livelli idrici misurati nei fori delle 10 penetrometrie realizzate per il presente studio confermano tale indicazione con valori di soggiacenza compresi tra 1,2 e 4,2 metri da p.c. ad esclusione delle prove eseguite nella porzione sud-est del territorio comunale (CPT1, CPT4 e CPT5) dove i valori sono inferiori e dovuti presumibilmente proprio a fenomeni di drenanza causati dalla depressione artificiale dell'acquifero per gli emungimenti dai pozzi acquedottistici.

Pertanto, sebbene siano presenti spessori di depositi sabbiosi e limo-sabbiosi a volte insaturi, si ritiene opportuno adottare, nelle successive fasi di pianificazione e nella progettazione degli interventi, un principio cautelativo, ponendo particolare attenzione alla valutazione dei depositi potenzialmente liquefacibili, proprio in ragione di tale depressione artificiale della superficie piezometrica che porterebbe a sottostimare il rischio di tale possibile effetto locale.

7. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Il fine ultimo di uno studio di microzonazione di secondo livello è quello di pervenire a una suddivisione del territorio indagato in zone stabili (non presenti nell'area comunale di Calderara di Reno), zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione, e zone instabili, per cui si richiedono approfondimenti di terzo livello (tavole da 6.1 a 8.2). I paragrafi del presente capitolo illustrano quindi i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione sul territorio e per identificare le aree instabili, che nell'area di Calderara sono essenzialmente quelle soggette a potenziali fenomeni di liquefazione e quelle un tempo sede di cave, oggi tombate con terreni di natura eterogenea.

7.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali - Calcolo dei fattori di amplificazione

Innanzitutto si precisa che il calcolo dei fattori di amplificazione ha interessato solo le aree di interesse della microzonazione sismica di dettaglio, cioè le aree urbanizzate, quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche e le fasce a cavallo delle reti infrastrutturali (Regione Emilia-Romagna, 2012).

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, devono essere calcolati, nel secondo livello di microzonazione sismica, i fattori di amplificazione, scegliendo se utilizzare gli abachi nazionali degli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008) o quelli di riferimento regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007). Nel presente studio la scelta è caduta su questi ultimi, poiché si ritiene che, per come sono strutturati, consentano una migliore e più corretta modellazione per lo specifico caso del comune di Calderara di Reno.

La prima scelta da fare, per poter determinare i fattori di amplificazione (F_{PGA} , $FA_{0,1-0,5s}$, $FA_{0,5-1s}$) secondo i criteri regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007), è quella relativa a quali abachi utilizzare. A questo proposito vale la pena di citare un breve estratto dell'allegato C della DGR 1302/2012 (Regione Emilia-Romagna, 2012):

Si ricorda che la scelta degli abachi per la stima dell'amplificazione non dipende dalle sole caratteristiche litologiche e morfologiche dell'area ma deve essere attentamente valutata sulla base delle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo, in particolare della profondità del substrato rigido. Per questa valutazione si raccomanda di porre particolare attenzione alla cartografia di primo livello, in particolare alla carta delle MOPS e degli elementi geologici sepolti che possono modificare il moto in superficie e alla carta delle frequenze naturali dei terreni.

Nel caso del comune di Calderara si è tenuto conto proprio di quanto appena citato e sono stati utilizzati 3 abachi distinti per le 3 aree del territorio comunale con differenti caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo ritenute importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie (paragrafi 5.2 e 6.1):

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

- *A2.1.1 - Appennino e margine appenninico-padano (V_s substrato < 800 m/s)*
Utilizzato per l'area di "conoide alluvionale" (tavole 2 e 4), caratterizzata dalla presenza di potenti orizzonti di ghiaie (pseudo-bedrock sismico) al di sotto di un primo livello limoso di spessore massimo di 18 metri, (elevato contrasto di impedenza riscontrato nei grafici di H/V ottenuti dalle indagini di microtremore a stazione singola)
- *A2.1.2 - Pianura Padana e Costa Adriatica (Pianura1, substrato < 100 m da p.c.)*
Utilizzato per l'area in cui gli spessori degli orizzonti di ghiaia più superficiali sono limitati (bassi contrasti di impedenza riscontrati nei grafici di H/V ottenuti dalle indagini di microtremore a stazione singola) e il bedrock (o pseudo-bedrock) sismico è rappresentato dal tetto del complesso acquifero A2 (base del complesso acquifero A1), posto ad una profondità inferiore a 100 metri dalla superficie topografica. Il dato di profondità è ricavato dai dati stratigrafici di alcuni pozzi per acqua (tavola 2) correlati con le aree caratterizzate da valori di $f_0 > 1$ Hz (tavola 3).
- *A2.1.2 - Pianura Padana e Costa Adriatica (Pianura2, substrato > 100 m da p.c.)*
Utilizzato per l'area in cui gli spessori degli orizzonti di ghiaia più superficiali sono limitati (bassi contrasti di impedenza riscontrati nei grafici di H/V ottenuti dalle indagini di microtremore a stazione singola) e il bedrock (o pseudo-bedrock) sismico è rappresentato dal tetto del complesso acquifero A2 (base del complesso acquifero A1), posto ad una profondità di uguale o superiore a 100 metri dalla superficie topografica. Il dato di profondità è ricavato dai dati stratigrafici di alcuni pozzi per acqua (tavola 2) correlati con le aree caratterizzate da valori di $f_0 \leq 1$ Hz (tavola 3).

Nell'area di "conoide alluvionale" in cui è stato applicato l'abaco A2.1.1, si è dovuto tenere conto di due fattori: la profondità dello pseudo-bedrock (H) e la velocità delle onde S fino a tale quota (V_sH nella tavola 5): seguendo le indicazioni relative alla profondità del tetto delle ghiaie di tavola 2, è stato quindi suddiviso il territorio in aree a differenti classi di profondità dello pseudo-bedrock (5-10-15-20); seguendo le indicazioni relative alle registrazioni puntuali della velocità delle onde S di tavola 5, è stato suddiviso il territorio indagato in macro-aree differenti per classi di V_sH (200-250). La combinazione di questi due livelli poligonali ha restituito la suddivisione della porzione di territorio in oggetto in aree a diversi fattori di amplificazione per ciascuno dei tre parametri previsti dagli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007): F_{APGA} , $FA_{0,1-0,5s}$, $FA_{0,5-1s}$.

Nelle aree in cui sono stati applicati gli abachi A2.1.2 (Pianura1 o Pianura2), si è dovuto tenere conto della velocità delle onde S fino alla profondità di 30 metri (V_{s30} nella tavola 5): seguendo le indicazioni relative alle registrazioni puntuali della velocità delle onde S di tavola 5, è stato suddiviso il territorio indagato in macro-aree differenti per classi di V_{s30} (200-250-300). Ciò ha consentito la suddivisione della porzione di territorio in oggetto in aree a diversi fattori di amplificazione per ciascuno dei tre parametri previsti dagli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007): F_{APGA} , $FA_{0,1-0,5s}$, $FA_{0,5-1s}$.

7.2 Verifiche del potenziale di liquefazione

Le verifiche del potenziale di liquefazione, assai delicate e complesse da compiere alla scala territoriale, richiedono la stima del "fattore scatenante" (evento sismico atteso), dei "fattori predisponenti" (caratteristiche meccaniche dei sedimenti) e dei possibili "effetti" sulle strutture esistenti o di progetto (Crespellani et al., 1991). Le caratteristiche dell'evento sismico atteso sono la magnitudo e l'accelerazione a_g su suolo rigido di riferimento. I fattori predisponenti sono indicati nelle carte di microzonazione di 2° livello in particolare il dato di FA_{PGA} per le diverse zone e quello relativo alla presenza dei depositi granulari saturi (tavole 6.1 e 6.2).

Sulla base dei dati geognostici relativi alle 10 prove CPT eseguite per il presente studio di microzonazione e in considerazione del rinvenimento su diverse verticali di livelli limosi e sabbiosi entro i primi 20 metri di profondità, si è proceduto ad una preliminare verifica della liquefazione con metodi semplificati, come dettagliato nel paragrafo 7.2.3.

7.2.1 Stima della magnitudo attesa

Secondo quanto indicato al paragrafo 2.8 degli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008), nelle verifiche di liquefazione (così come in quelle di stabilità dei versanti) si deve tener conto della magnitudo attesa. Nelle verifiche di liquefazione il valore di magnitudo determina:

- se sia possibile non effettuare la verifica (insieme ad altre condizioni);
- il valore del coefficiente MSF (Magnitude Scale Factor) che corregge il valore del rapporto fra CRR e CSR per determinare il valore attuale fattore di sicurezza.

La ragione per la quale la magnitudo entra in gioco è che, tanto più è elevata, tanto maggiore è l'energia rilasciata e, quindi, la capacità di generare cicli di deformazione del terreno di numero ed ampiezza tali da produrre sovrappressioni neutre e fenomeni di liquefazione.

La magnitudo è quindi una grandezza molto importante per la definizione della pericolosità e quindi dell'azione sismica (Galli et al., 1999), ma la stima della magnitudo attesa al sito presenta caratteri di incertezza e imprevedibilità evidenziati anche negli studi di pericolosità.

Un metodo semplice e in favore di sicurezza che può essere utilizzato per stimare quale sia il valore di magnitudo da considerare ai fini delle valutazioni, preferibilmente per le verifiche di liquefazione, per il sito o la microzona di interesse, viene indicato negli stessi ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008). Secondo tale metodo, per i siti che cadono in una delle 36 zone sismogenetiche della la zonazione sismogenetica nazionale - ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), si assume come M il valore di $M_{w_{max}}$ della zona relativa.

Nel caso del comune di Calderara di Reno, che ricade entro la Zona 912, il valore di $M_{w_{max}}$ è 6.14, valore che può essere quindi utilizzato per le verifiche di liquefazione con le procedure che nell'ingegneria geotecnica sismica vengono denominate "metodi semplificati".

Sulla base delle attuali conoscenze relative alle sorgenti sismogenetiche che interessano l'area di studio e riportate nel paragrafo 2.3, si ritiene che tale valore cautelativo di magnitudo (**Mw=6.14**) possa essere opportunamente adottato al fine di tenere conto del livello di incertezza proprio sulla magnitudo massima possibile per l'area di studio.

7.2.2 Calcolo dell'accelerazione al suolo

Per la determinazione del valore di accelerazione su suolo rigido di riferimento sono disponibili le mappe di pericolosità sismica realizzate per la Convenzione INGV-DPC 2004 - 2006 (progetto S1). Nell'ambito del progetto è stata calcolata una "pericolosità di base" fondata su un reticolo di punti di riferimento, costruito per l'intero territorio nazionale. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g (accelerazione orizzontale massima del suolo, come definita dall'OPCM 3519/2006, corrispondente a quella che in ambito internazionale viene chiamata PGA) e dei principali "parametri spettrali" riferiti all'accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica (fattore di amplificazione massima f_0 e periodo di inizio del tratto a velocità costante T^*c). Il reticolo di riferimento ed i dati di pericolosità sismica vengono forniti dall'INGV e sono pubblicati nel sito <http://esse1.mi.ingv.it/> (INGV, 2004).

In questo contesto nazionale la Regione Emilia-Romagna ha elaborato ed approvato (con la Delibera Regionale n.112 del maggio 2007) gli "indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", in coerenza con la L.R. n.20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio".

Gli Indirizzi sono stati elaborati sulla scorta degli esiti delle specifiche indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale. In questo senso, la delibera fornisce abachi e formule propedeutiche alla valutazione preliminare dell'amplificazione locale, dati che tengono conto delle caratteristiche sismiche riscontrate nel contesto regionale. Il documento fornisce anche i dati fondamentali per valutazioni più accurate della risposta sismica:

- lo spettro di risposta normalizzato per l'Emilia-Romagna (per $T_r = 475$ anni e smorzamento del 5%);
- i valori di a_{gref} di ogni Comune ed i segnali di riferimento (accelerogrammi), anch'essi già scalati per ogni singolo Comune.

Per il comune di Calderara di Reno il valore di a_{gref} è pari a 0.165 (l'unità di misura è g, vale a dire l'accelerazione di gravità, corrispondente a 9.8 m/s^2).

Per ottenere il valore di $a_{gmax s}$ (picco di accelerazione alla superficie dei depositi) su ogni sito analizzato, si deve moltiplicare a_{gref} per il valore di FA_{PGA} indicato per l'area in esame nella carta di microzonazione sismica di secondo livello (tavole 6.1 e 6.2).

Nel caso dell'area comunale di Calderara di Reno avremo quindi diversi possibili valori di $a_{gmax s}$ che variano da un minimo di **0.25g** (0.165×1.5) a un massimo di **0.41g** (0.165×2.5).

Tali valori potranno essere quindi utilizzati in input per le verifiche con procedura semplificata, operando una scelta dell' $a_{gmax s}$ di riferimento sulla base della localizzazione della verticale di indagine utilizzata.

Si segnala che sebbene le attuali specifiche contenute nelle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012) non consentano di indicare in carta (tavole da 6.1 e 8.2) i fattori di amplificazione anche nelle aree instabili, tali valori sono stati in ogni caso calcolati su tutta l'area oggetto dello studio di microzonazione sismica approfondito (aree urbanizzate, aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche e fasce a cavallo delle reti infrastrutturali) e risultano disponibili in formato digitale (shape file georiferiti).

7.2.3 Verifiche con i metodi semplificati

Come indicato nella DAL n. 112/2007, tra i metodi semplificati sono raccomandati quelli basati su prove CPT. Recenti verifiche, eseguite dallo studio scrivente in collaborazione con enti e istituti specializzati su numerose verticali di indagine realizzate nelle aree in cui si è verificata la liquefazione a seguito delle scosse del Maggio 2012, hanno suggerito, tra i vari metodi proposti dalla letteratura internazionale, l'utilizzo di quello formalizzato da Idriss e Boulanger (2008). Tale metodo risulta quasi sempre maggiormente cautelativo di quello di Robertson e Wride (1998) e pare poter discriminare meglio di altri le differenze del potenziale di liquefazione in aree che sono state interessate o meno dal fenomeno.

Per il presente studio sono state quindi eseguite le verifiche alla liquefazione su tutte e 10 le verticali delle prove penetrometriche statiche, utilizzando il programma di calcolo "Cliq 1.7" della Geologismiki Geotechnical Software, sviluppato in collaborazione col Prof. Peter Robertson. L'algoritmo di calcolo utilizzato si basa sul metodo di Idriss e Boulanger (2008).

I parametri di input scelti sono:

- **Mw = 6.14** (come definito nel paragrafo 7.2.1)
- **$a_g = 0.25, 0.28$ o 0.38** a seconda del valore di $F_{A_{PGA}}$ (come definito nel paragrafo 7.2.2). In tabella 4 è indicato il valore utilizzato per ciascuna verticale.

Per queste prime verifiche speditive è stato utilizzato il valore della falda misurato nel corso delle indagini, valutato cautelativo anche in considerazione del fatto che sono state eseguite a seguito di un lungo periodo di intense precipitazioni anche nevose. È opportuno però che ulteriori e più approfondite verifiche permettano una più precisa valutazione di quale possa essere il valore corretto da utilizzare, così come definito ai paragrafi 6.5 e 9.2.

Al termine della procedura, per ogni verticale è stato valutato l'indice del potenziale di liquefazione IL (Iwasaki et al., 1982), riportato in tabella 4, e che viene così definito:

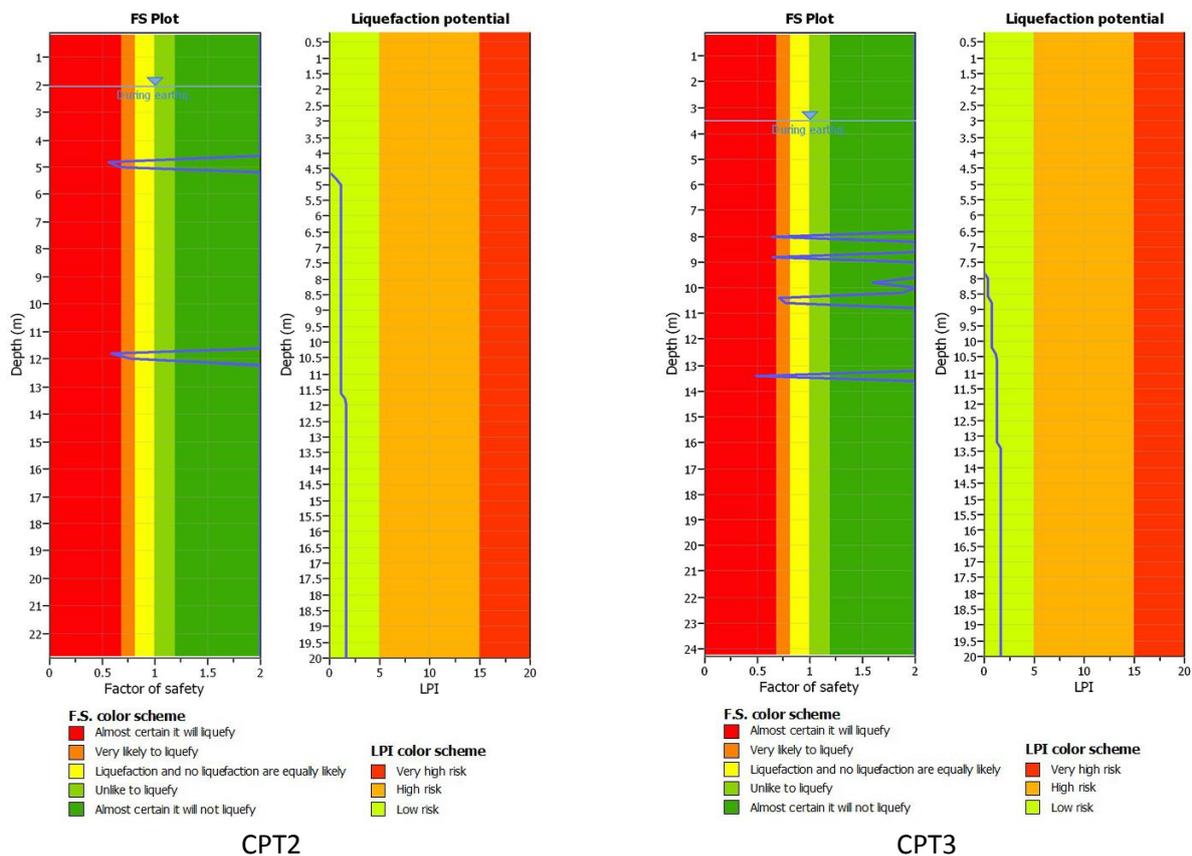
- $0 < IL \leq 5$ il rischio di liquefazione è basso
- $5 < IL \leq 15$ il rischio di liquefazione è elevato
- $IL > 15$ il rischio di liquefazione è molto elevato

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

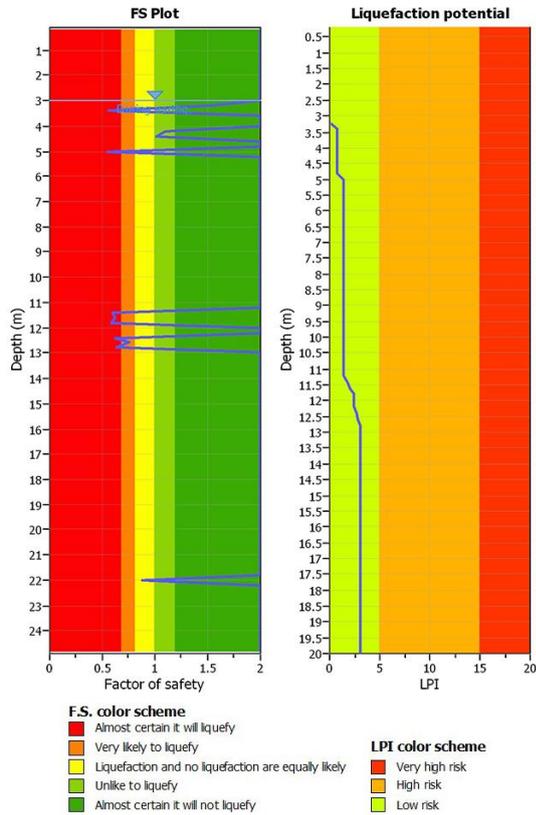
Verticale	$a_{g \max s}$	IL	Verticale	$a_{g \max s}$	IL
CPT1	0.38	0.7	CPT6	0.25	2.6
CPT2	0.28	1.7	CPT7	0.25	0
CPT3	0.28	1.7	CPT8	0.28	1.5
CPT4	0.28	0	CPT9	0.28	0
CPT5	0.28	0.8	CPT10	0.28	2.9

Tabella 4. Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna verticale di indagine. Nella seconda colonna è indicato il picco di accelerazione alla superficie dei depositi utilizzato nel calcolo.

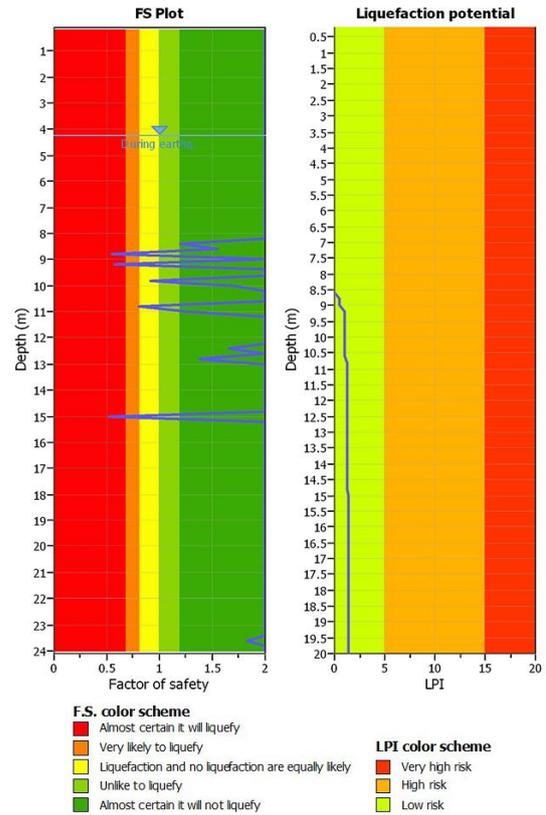
In 3 delle verticali esplorate il rischio di liquefazione è risultato nullo (IL=0), mentre per le restanti 7 il rischio è risultato basso. Per le 5 verticali che hanno $IL > 1$ vengono di seguito proposti i grafici dell'andamento in profondità del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione e dell'indice IL.



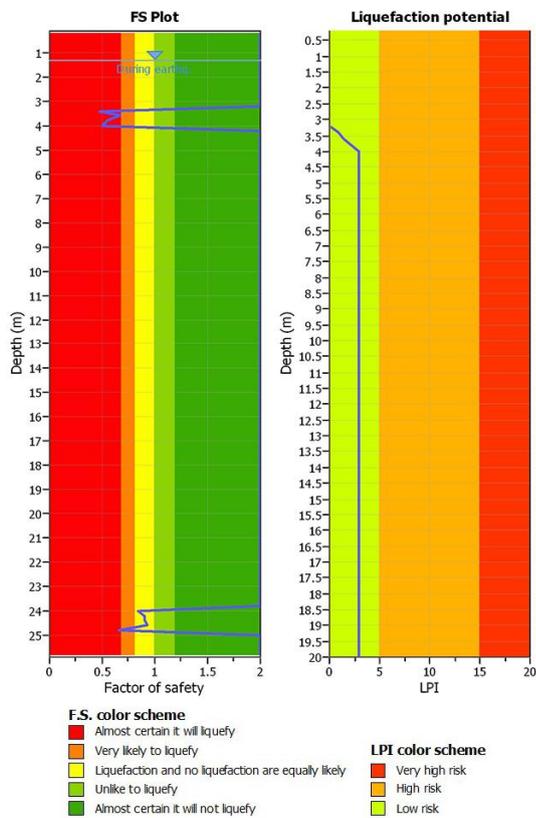
MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO



CPT6



CPT8



CPT10

7.2.4 Considerazioni conclusive sul calcolo del potenziale di liquefazione

Le prove eseguite per il presente studio portano a stimare, attraverso i metodi semplificati, come basso o nullo il rischio liquefazione dei depositi sabbiosi in caso di sisma, su tutte le verticali di indagine. Delle 5 prove che hanno restituito indici del potenziale di liquefazione maggiori di 1, le CPT3, CPT6, CPT8 e CPT10 rientrano in aree in cui è indicata la possibile occorrenza di fenomeni di liquefazione (tavola 4) e presentano infatti, ad eccezione della sola CPT10, spessori significativi di terreni granulari nei primi 20 metri. La sola CPT2 con un indice di poco inferiore a 1.7, non rientra nelle aree potenzialmente soggette a liquefazione. In ogni caso la stratigrafia emersa dall'indagine ha evidenziato la presenza solo di pochi orizzonti granulari di spessore decimetrico, che non paiono poter generare rilevanti fenomeni di instabilità.

Al di là di quanto emerso dai calcoli coi metodi speditivi eseguiti sulle nuove verticali di indagine, si è ritenuto di eseguire una prima stima del potenziale di liquefazione nelle aree che presentavano i maggiori spessori di terreni potenzialmente liquefacibili.

Per il presente studio di microzonazione sono state consultate 120 relazioni geologiche eseguite dal 2007 ad oggi presenti nell'archivio comunale. Dalla loro analisi è emerso che nelle verifiche alla liquefazione, quando eseguite, sono stati sempre utilizzati valori di magnitudo e di accelerazione assai meno cautelativi di quelli suggeriti dalle procedure indicate negli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008). Su una decina di verticali campione, in aree in cui sono presenti spessori significativi di terreni granulari saturi, è stata quindi eseguita una verifica con la metodologia di calcolo e con i parametri specificati al capitolo 7.2.3. Gli indici del potenziale di liquefazione così calcolati hanno evidenziato un rischio da elevato a molto elevato per molte delle aree oggetto di approfondimento. Pur rappresentando un dato significativo, si tratta in ogni caso di una stima preliminare e si rimanda ai necessari approfondimenti di terzo livello per la quantificazione del potenziale di liquefazione sulle singole aree.

7.3 Identificazione delle aree instabili potenzialmente soggette a liquefazione

La prima stima effettuata coi metodi speditivi appena descritta, associata a puntuali valutazioni litologiche e geomeccaniche delle stratigrafie di tutte le indagini disponibili, ha permesso di identificare le aree potenzialmente soggette a fenomeni di liquefazione (tavola 4 e tavole da 6.1 a 8.2). Per tale operazione si è partiti dalle indicazioni presenti nella tavola 2 della variante al PTCP in materia di rischio sismico (Provincia di Bologna, 2013), corrispondenti alle aree con terreni di copertura "SM" della carta geologico tecnica (tavola 2), verificandone l'eventuale riscontro coi dati geognostici. Si è quindi esteso l'approfondimento al resto dell'area comunale, delimitando gli areali in cui, dai dati disponibili, risultano presenti spessori significativi di depositi granulari, anche dove la tavola 2 della variante al PTCP non li indica. La carta MOPS (tavola 4), riporta, per l'intero territorio comunale, l'estensione delle aree instabili perché presentano depositi potenzialmente liquefacibili (codice 3050). È opportuno chiarire che tali perimetrazioni risultano maggiormente attendibili per le aree di interesse della microzonazione sismica di dettaglio, cioè le aree urbanizzate, quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche e le

fasce a cavallo delle reti infrastrutturali (delimitate in azzurro nella tavola 4), per cui sono disponibili sufficienti dati geognostici. Al di fuori di tali “aree di interesse” la stessa perimetrazione può invece fornire solo un’indicazione di massima. In ogni caso va evidenziato come all’interno delle aree instabili “potenzialmente liquefacibili” è stata riscontrata una certa variabilità nella distribuzione dei depositi granulari saturi anche su verticali di indagine molto ravvicinate, per cui non è raro che a distanza di poche decine di metri si assista alla chiusura laterale di lenti sabbiose anche spesse (paragrafo 6.2). Tale dato suggerisce la necessità per un geologo professionista di accertare sempre puntualmente la stratigrafia e evidenza che può essere un esercizio molto pericoloso estendere delle valutazioni puntuali sulla liquefacibilità dei depositi granulari saturi ad un areale più o meno esteso.

Si segnala infine che il confronto tra le aree con depositi potenzialmente liquefacibili così ottenuta e quelle, di natura analoga, riportate nella “Carta di microzonazione sismica” del PSC associato (Franchi, 2008), ha evidenziato una corrispondenza solo parziale. Ciò può essere almeno in parte imputato sia al maggior numero e alla migliore qualità di dati geognostici oggi disponibili, sia al diverso livello di approfondimento dei due studi.

7.3.1 Potenziale liquefazione. Sacerno e Tavernelle.

Per le aree comprese tra le frazioni di Sacerno e Tavernelle le poche indagini disponibili a profondità di almeno 20 metri non hanno permesso di estendere le singole valutazioni del potenziale di liquefazione su areali ampi. È stato invece possibile, sulla base di diversi dati puntuali ben distribuiti, confermare con buona precisione il confine della potenziale liquefazione che attraversa la zona industriale nord di Tavernelle così come indicato nella tavola 2 della variante al PTCP (Provincia di Bologna, 2013). Per queste ragioni, tra gli abitati di Sacerno e Tavernelle la carta delle MOPS (tavola 4) e successive riportano le stesse delimitazioni della tavola 2 del PTCP per quanto concerne le aree con depositi potenzialmente soggetti a liquefazione.

7.3.1 Potenziale liquefazione. Bargellino, Calderara di Reno e Lippo.

Per la zona degli abitati di Bargellino, Calderara di Reno e Lippo, sulla base dei numerosi dati geognostici disponibili è stato possibile individuare un esteso areale in cui sono presenti depositi potenzialmente liquefacibili, che non è cartografato nella tavola 2 della variante al PTCP (Provincia di Bologna, 2013). Si sottolinea che, in diversi punti di quest’area, le verifiche speditive eseguite su verticali di prove penetrometriche statiche di archivio (paragrafo 7.2.4), scelte perché evidenziavano la presenza di spessori significativi di depositi granulari saturi nei primi 20 metri, hanno restituito valori dell’indice del potenziale di liquefazione alti o molto alti.

7.3.1 Potenziale liquefazione. Longara e Castel Campeggi.

Nella tavola 2 della variante al PTCP (Provincia di Bologna, 2013), la frazione di Longara rientra interamente in una zona soggetta a sola amplificazione, ma immediatamente a ovest e a nord si trova il confine dell’area con depositi potenzialmente

soggetti a liquefazione. I dati geognostici disponibili per Longara sono abbastanza numerosi e ben distribuiti, ma spesso raggiungono profondità insufficienti per una valutazione adeguata del potenziale di liquefazione. Per questa ragione, avendo calcolato su un paio di verticali un valore dell'indice di liquefazione solo di poco inferiore a 5, si ritiene opportuno indicare per tutta l'area la presenza di depositi potenzialmente liquefacibili, rimandandone la verifica ad ulteriori approfondimenti di terzo livello.

Per la piccola frazione di Castel Campeggi, pur disponendo di un numero limitato di verticali di indagini utili, si può comunque confermare la presenza di depositi potenzialmente liquefacibili, così come indicato nella tavola 2 della variante al PTCP (Provincia di Bologna, 2013).

7.4 Ex aree di cava riempite

Tra le aree instabili, oltre a quelle con depositi potenzialmente liquefacibili, sono indicate le aree di cava dismesse (e quindi riempite con terreni di varia natura) note, che vengono inserite tra le zone che necessitano di approfondimenti di terzo livello. Una stima di pericolosità sismica su queste aree risulta infatti particolarmente complessa e richiede in genere una analisi della risposta sismica locale con procedure di terzo livello che utilizzino codici di calcolo bidimensionali.

8. ELABORATI CARTOGRAFICI

Le 11 tavole cartografiche (tabella 5) sono state realizzate secondo le specifiche indicate, per il primo e il secondo livello di approfondimento, nell'allegato D della Delibera 1302/2012 (Regione Emilia-Romagna, 2012) e risultano conformi alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012).

Elaborato cartografico	Tavola/e di riferimento	Scala di rappresentazione
Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000
Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica	Tavola 2	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3	1:10.000
Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (livello 1)	Tavola 4	1:10.000
Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola 5	1:10.000
Carta di microzonazione sismica (livello 2) - FAPGA	Tavole 6.1 e 6.2	1:5.000
Carta di microzonazione sismica (livello 2) - FAPGA	Tavola 7.1 e 7.2	1:5.000
Carta di microzonazione sismica (livello 2) - FAPGA	Tavola 8.1 e 8.2	1:5.000

Tabella 5. Elaborati cartografici redatti per lo studio di microzonazione sismica.

L'estensione e la forma dell'area del comune di Calderara di Reno hanno consentito di comprendere l'intero territorio comunale (ad eccezione di una piccola porzione dell'estremo nord, comunque non urbanizzata) alla scala 1:10.000 entro la dimensione massima di una singola tavola (A0) prevista dalle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012). Tutte le carte, eccetto quelle di secondo livello (tabella 5), sono quindi state redatte alla scala 1:10.000, consentendo una visione di insieme dei dati rappresentati per l'intero territorio. Per tutte queste cartografie è stato infatti possibile fornire le informazioni richieste per l'intera area comunale, e non solo per quelle oggetto della microzonazione sismica di dettaglio (aree urbanizzate, suscettibili di trasformazioni urbanistiche e fasce a cavallo delle reti infrastrutturali). Le carte di microzonazione sismica di secondo livello (tavole da 6.1 a 8.2) sono state invece redatte alla scala 1:5.000 e interessano le sole aree oggetto della microzonazione sismica di dettaglio (paragrafo 1.2).

Per tutte le 11 carte realizzate, la base cartografica è costituita dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000, messa a disposizione del presente studio dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

8.1. Carta delle indagini (tavola 1)

La carta delle indagini, realizzata alla scala 1:10.000, permette la visione di insieme delle localizzazioni delle prospezioni geologiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio (in tutto 932), comprendendo sia quelle di nuova realizzazione (90), sia quelle di repertorio (842).

Tutte le indagini sono distinte con le simbologie definite negli standard di rappresentazione 2012 degli studi di microzonazione (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012). Per le sole indagini di nuova realizzazione sono indicati i codici univoci che le identificano, attraverso i quali è possibile risalire ai rapporti di prova riportati in allegato.

Per maggiori dettagli sulle indagini riportate in carta, relativi alla provenienza, alla tipologia e alla qualità dei dati, si rimanda al capitolo 4.

8.2. Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica (tavola 2)

Per descrivere la carta geologico tecnica è opportuno partire dalle “forme di superficie e sepolte” presenti nell’area di studio, poiché la definizione dell’area di “conoide alluvionale” viene ripresa nella descrizione relativa ai “terreni di copertura”.

8.2.1 Forme di superficie e sepolte

Tra le numerose forme di superficie e sepolte elencate nelle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012), nel territorio del comune di Calderara di Reno si individuano le seguenti:

Conoide alluvionale: Identifica un’ampia area caratterizzata da un elevato contrasto di impedenza evidenziato dai risultati delle misure di microtremore a stazione singola (tematizzato in rosso nella tavola 3), dovuto alla presenza, al di sotto dei primi livelli limosi, di un potente orizzonte di ghiaie e ghiaie-sabbiose ben addensate. Per la descrizione dettagliata dei criteri utilizzati per l’identificazione di tale area si rimanda al paragrafo 5.2.

Orlo di scarpata morfologica (10-20m): Con questo tratto viene identificata in carta la scarpata dell’area di cava, oggi dismessa, della zona di “Fondo Olmo” ad est della località Bargellino.

8.2.2 Terreni di copertura

Relativamente alle unità geologico-litotecniche previste dalle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012) per la carta geologico-tecnica, nel comune di Calderara di Reno sono presenti i soli “terreni di copertura”, mentre non si rinvencono unità affioranti ascrivibili a “substrato geologico rigido o non rigido”. Secondo i criteri dettagliati al capitolo 5 per la definizione del modello geologico dell’area, sono state distinte, all’interno dei “terreni di copertura”, quattro differenti unità, ognuna associabile (come litologia, sigla in maiuscolo e colore in carta) ad una delle classi predefinite delle linee guida. Viene inoltre indicato con la sigla in minuscolo il codice relativo agli ambienti deposizionali dei terreni di copertura definiti sempre nelle linee guida. Sono quindi distinte le seguenti unità:

RI: *Aree di cava riempite con terreni di natura eterogenea.*

Rientrano in questa classe le aree di cava note che risultano attualmente completamente tombate. Non sono comprese le zone di cava attualmente in uso, sebbene possano presentare al loro interno aree con terreni riportati.

GM: *Ghiaie e ghiaie sabbiose prevalenti con sottili livelli limosi. Ambiente genetico-deposizionale: conoide alluvionale (ca).*

Si tratta delle litologie del primo sottosuolo presenti in una stretta fascia lungo il tratto più meridionale del fiume Reno, che borda il confine orientale del Comune di Calderara di Reno. Dopo un ridotto spessore superficiale di limi (sempre inferiore a 5 metri), inizia una potente successione di ghiaie e ghiaie sabbiose, in genere ben addensate, intervallate da sottili e rari livelli limosi.

ML: *Limi argillosi e argille limose prevalenti con locali livelli di limi sabbiosi e sabbie. Ambiente genetico-deposizionale: conoide alluvionale (ca) e piana pedemontana (pd).*

Si tratta delle litologie del primo sottosuolo prevalenti nella zona indagata, la cui estensione areale viene ripresa dal corrispondente livello della “carta degli elementi geologici superficiali che possono determinare effetti locali” della recente variante al PTCP in materia di rischio sismico (Provincia di Bologna, 2013). Al di sotto della superficie topografica sono prevalenti le litologie limo-argillose con locali livelli limo-sabbiosi e sabbie. Nella zona di “conoide alluvionale” si passa, tra i 5 e i 18 metri di profondità, a spessi livelli ghiaiosi e ghiaioso-sabbiosi in genere ben addensati, con intercalazioni limo-argillose. Nell’area di “piana pedemontana” ai livelli limo-argillosi si intercalano, a partire da profondità variabile, dei livelli ghiaioso-sabbiosi di spessore limitato e addensamento medio.

SM: *Sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi prevalenti alternati a limi argillosi e argille limose. Ambiente genetico-deposizionale: piana pedemontana (pd).*

L’estensione areale di questo livello viene ripresa dal corrispondente livello della “carta degli elementi geologici superficiali che possono determinare effetti locali” della recente variante al PTCP in materia di rischio sismico (Provincia di Bologna, 2013).

8.2.3 Elementi geologici

Rispetto a quanto previsto nelle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012), non sono riportati in carta tutti i pozzi e sondaggi disponibili (oltre 200), ma i soli 7 pozzi profondi per cui è disponibile una stratigrafia sufficientemente chiara da permettere l’identificazione del tetto del complesso acquifero A2 (base complesso acquifero A1), anche con l’aiuto delle sezioni geologiche. Tale scelta è stata operata per favorire una maggiore chiarezza dell’elaborato, allo scopo di fare emergere i soli dati certi e non appesantire la cartografia con dati poco utili allo studio di microzonazione. Si ritiene in ogni caso che il dato delle sezioni geologiche, unito a quello della profondità della base del complesso acquifero A1 sulle 7 verticali ben distribuite sull’area comunale, fornisca una informazione sufficientemente chiara ed esaustiva per le finalità del presente studio.

Sondaggi: Sono indicati 7 pozzi per acqua che hanno raggiunto la base del complesso acquifero A1, una superficie continua in tutta l’area di studio, che rappresenta il tetto del substrato rigido almeno per una buona parte del territorio comunale (capitolo 6.1) Il numero indica la profondità rispetto alla superficie topografica.

Isobate del tetto delle ghiaie: I numerosi dati stratigrafici disponibili hanno permesso di ricostruire alla scala 1:10.000, con un buon dettaglio, soprattutto nelle aree urbanizzate e a meno di locali incongruenze tra dati di diversa origine e qualità, le isobate del tetto delle prime ghiaie dalla superficie topografica. Tali isobate, con equidistanza 5 metri, arrivano fino ad una profondità di 20

metri, in quanto solo pochissime indagini hanno rinvenuto il tetto delle prime ghiaie a profondità di 25 metri o superiore.

Sezioni: Sono allegare allo studio 2 sezioni geologiche, una trasversale e una longitudinale rispetto alla catena appenninica, realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, la cui traccia è riportata in carta. La ricostruzione litostratigrafica generale e l'estensione dei primi livelli ghiaiosi in particolare, appare coerente coi dati stratigrafici puntuali disponibili e con l'andamento delle isobate del tetto delle ghiaie realizzate per il presente studio.

Relativamente ad altri tematismi previsti dalle linee guida per la carta geologico tecnica, si specifica che non sono presenti elementi tettonico strutturali noti, se non un sovrascorrimento profondo indicato nella carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna in scala 1:250.000 (Boccaletti et al., 2008), che non si è ritenuto utile riportare ai fini dello studio di microzonazione.

8.3. Carta delle frequenze naturali dei terreni (tavola 3)

La carta delle frequenze naturali dei terreni, realizzata alla scala 1:10.000, riporta la suddivisione del territorio comunale in aree per classi di frequenza, secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera 1302/2012 (Regione Emilia-Romagna, 2012): $f_0 \leq 1$ hz, $1 < f_0 \leq 2$ hz, $2 < f_0 \leq 8$ hz, $f_0 > 8$ hz. Sono inoltre riportati i 96 (24 di archivio e 72 di nuova realizzazione) punti di misura, con l'indicazione del valore della frequenza di risonanza fondamentale (f_0) registrata e quella di un eventuale secondo picco significativo a frequenza maggiore. Tali punti di misura sono tematizzati con colori per valore di ampiezza massima del picco di H/V. I valori superiori a 2.5 sono rappresentati coi colori arancio e rosso. I dati acquisiti attraverso l'estesa campagna di misure di microtremore realizzata a supporto del presente studio (paragrafo 4.2.3), correlati coi dati geognostici disponibili (Castellaro, 2005), hanno permesso di individuare l'area in cui gli spessori dei depositi ghiaiosi sono prevalenti (paragrafo 5.2), di definire la profondità del tetto di quello che può essere definito il substrato rigido (paragrafo 6.1) e di individuare quindi le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, per la definizione dei fattori di amplificazione (paragrafo 7.1).

È opportuno precisare che la suddivisione in aree per classi di frequenza risulta ovviamente più attendibile in corrispondenza delle principali località, poiché supportata da un numero di dati maggiore, mentre nelle aree di campagna si è dovuto ricorrere a metodi di interpolazione. Si limitano infine a poche unità le verticali di misura in cui si sono registrati valori del picco di frequenza fondamentale non in linea con la classe di appartenenza, probabilmente in ragione di qualche anomalia locale.

8.4. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (tavola 4)

La carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera 1302/2012 (Regione Emilia-Romagna, 2012), presenta la suddivisione del territorio comunale in zone suscettibili di instabilità e zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, oltre a riportare le stesse "forme di superficie e

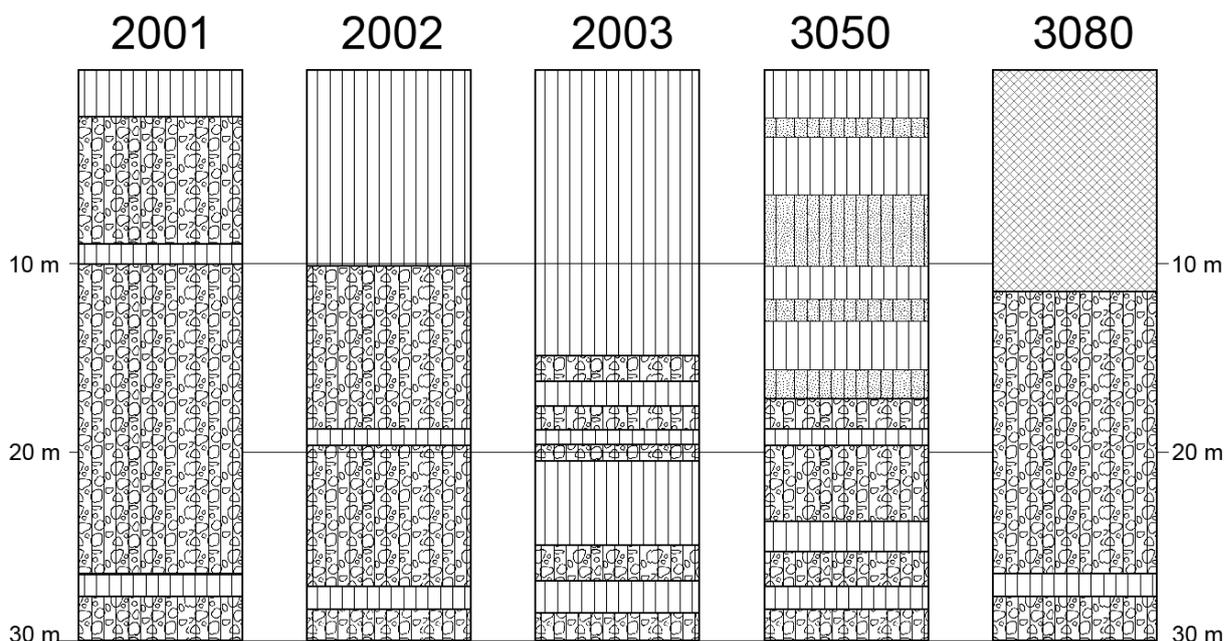
MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

sepolte” già presenti nella carta geologico tecnica (tavola 2, paragrafo 8.2.1). Tale carta rappresenta l’elaborato fondamentale della microzonazione sismica di primo livello.

Le zone suscettibili di instabilità (per cui sono richiesti approfondimenti di terzo livello) presenti all’interno del comune di Calderara di Reno, sono di due tipi: le aree potenzialmente soggette a fenomeni di liquefazione (codice 3050), identificate sulla base dei criteri descritti al paragrafo 7.3, e quelle sede di cave oggi dismesse e riempite con terreni di varia natura, descritte al paragrafo 7.4 e per cui si al momento si è utilizzato il codice 3080, relativo ad aree con cedimenti differenziali, poiché non è presente alcun codice specifico nelle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012).

Le zone stabili suscettibili di amplificazioni locali sono distinte, sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica, in 3 classi (codici 2001, 2002 e 2003) ordinate secondo una generale diminuzione della granulometria media dei depositi.

Per le cinque classi individuate vengono di seguito riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi, così come richiesto dalle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012).



2001: Terreni di copertura costituiti da un primo livello limo-argilloso a consistenza media di spessore inferiore a 5 metri, seguito da orizzonti ghiaioso-sabbiosi ad addensamento medio e rare alternanze limo-argillose.

2002: Terreni di copertura costituiti da un primo livello limo-argilloso a consistenza media di spessore compreso tra 5 e 18 metri seguito da livelli in prevalenza ghiaioso-sabbiosi ad addensamento medio alternati a limi e argille.

2003: Terreni di copertura costituiti da livelli in prevalenza limo-argillosi a consistenza media, alternati a livelli limo-sabbiosi e ghiaioso-sabbiosi ad addensamento medio.

3050: Terreni di copertura con stratigrafia assimilabile a quelle delle zone 2002 e 2003, ma caratterizzati dalla presenza, intervallati ai primi metri limo-argillosi, di spessori significativi di sabbie-limose e limi-sabbiosi potenzialmente liquefacibili.

3080: Terreni di copertura con stratigrafia assimilabile a quelle delle zone 2001 e 2002, ma caratterizzati dalla presenza di spessori variabili di riempimenti di natura eterogenea (aree di cava dismesse).

Secondo le linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012) eventuali dati relativi alle isobate del substrato rigido non devono essere riportati in carta, ma solo archiviati in formato elettronico. Vengono quindi consegnate nel formato richiesto le isobate della base del complesso acquifero A1 per la zona di studio e un suo intorno di circa 2 chilometri (dalla banca dati del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna).

8.5. Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavola 5)

Nella carta della velocità delle onde di taglio, realizzata alla scala 1:10.000, secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera 1302/2012 (Regione Emilia-Romagna, 2012), sono riportati tutti i punti di misura di Vs (19), di archivio (11) e nuova realizzazione (8). con indicazione del valore di Vs30 o VsH(Vs30), del tipo di prova da cui è stato ricavato il dato e l'anno di esecuzione. Le MASW di nuova realizzazione (paragrafo 4.2.2) sono numerate per consentirne il riconoscimento diretto in carta.

I dati di velocità riportati in questa cartografia, opportunamente correlati con altri dati geognostici e geofisici, hanno permesso di suddividere il territorio indagato in macro-aree per classi di Vs (VsH nella zona di "conoide alluvionale" e Vs30 nel resto dell'area comunale), così come definite dagli abachi dell'Allegato A2 degli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007): 200-250-300 m/s. Questo dato, associato a quello della profondità del bedrock (o pseudo-bedrock) sismico, ha permesso di ricavare i fattori di amplificazione per ogni singola area (paragrafo 7.1).

Relativamente agli ulteriori dati geofisici utilizzati per quanto sopra descritto, nella stessa tavola 5 sono indicate, con diversa simbologia e senza labels le misure di microtremore a stazione singola che sono servite come punti di controllo (Castellaro e Mulargia 2007 e 2009a).

8.6. Carte di microzonazione sismica (tavole da 6.1 a 8.2)

Le 6 carte di microzonazione sismica, realizzate alla scala 1:5.000, secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera 1302/2012 (Regione Emilia-Romagna, 2012), identificano le zone suscettibili di instabilità e zone stabili suscettibili di amplificazioni locali e rappresentano gli elaborati finali di sintesi della microzonazione di secondo livello.

A differenza della carta MOPS di primo livello (tavola 4 e paragrafo 8.4), queste cartografie sono state realizzate solamente per le aree oggetto dello studio di microzonazione sismica di dettaglio (aree urbanizzate, suscettibili di trasformazioni urbanistiche e fasce a cavallo delle reti infrastrutturali) ad una scala di maggior dettaglio e aggiungono, alle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, la quantificazione dei tre fattori di amplificazione previsti dagli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007): FA_{PGA} , $FA_{0,1-0,5s}$, $FA_{0,5-1s}$, attraverso la suddivisione del territorio analizzato sulla base di classi predefinite, contraddistinte da colori differenti (paragrafo 7.1).

Per quanto concerne invece le zone suscettibili di instabilità, le aree individuate e cartografate corrispondono a quelle della carta MOPS di primo livello (paragrafo 8.4 e tavola 4).

Si evidenzia che le attuali specifiche contenute nelle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2012) non consentono di indicare in carta (tavole da 6.1 e 8.2) i fattori di amplificazione anche nelle aree instabili, perché previsti solo per quelle stabili soggette ad amplificazione. Per fornire comunque il dato ed ovviare al problema almeno parzialmente, tali valori sono stati in ogni caso calcolati su tutta l'area oggetto dello studio di microzonazione sismica di dettaglio (aree urbanizzate, suscettibili di trasformazioni urbanistiche e fasce a cavallo delle reti infrastrutturali) e risultano disponibili in formato digitale (shape file georiferiti).

9. Commenti finali e criticità

Il presente studio di microzonazione sismica di secondo livello ha permesso di suddividere il territorio del comune di Calderara di Reno sulla base dell'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità sismica (tavole 6.1, 6.2, 7.1, 7.2, 8.1 e 8.2) e di individuare le zone in cui sono presenti spessori di terreni potenzialmente liquefacibili in caso di sisma, per cui sono richiesti approfondimenti di terzo livello.

9.1 Effetti attesi e approfondimenti richiesti

Per il presente studio di microzonazione sono state consultate 120 relazioni geologiche eseguite dal 2007 ad oggi, presenti nell'archivio comunale. Dalla loro analisi è emerso che le verifiche alla liquefazione, quando eseguite, sono sempre state condotte solo sulla base dei risultati delle prove penetrometriche statiche e attraverso l'utilizzo di metodi di calcolo semplificati, anche in aree in cui sono presenti spessori significativi di terreni granulari saturi. Inoltre i valori di magnitudo e di accelerazione utilizzati per tali verifiche sono in genere assai meno cautelativi di quelli suggeriti dalle procedure indicate negli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008). Utilizzando questi ultimi valori, così come indicato al paragrafo 7.2, gli indici del potenziale di liquefazione stimati coi metodi semplificati evidenziano un rischio elevato per diverse aree indicate nel presente studio come potenzialmente liquefacibili.

Alla luce di questo, si rende necessaria l'esecuzione di indagini differenti e di approfondimenti specifici nelle aree ritenute a rischio maggiore, sia sulla base delle litologie individuate dalle prove penetrometriche (pericolosità), sia in relazione all'entità degli interventi edilizi previsti dagli strumenti urbanistici comunali (esposizione). In particolare si ritiene indispensabile affrontare ulteriori verifiche quantitative che accertino l'effettiva suscettibilità alla liquefazione dei depositi granulari, con prove che consentano il prelievo di campioni, rappresentativi degli orizzonti presenti a profondità inferiore ai 20 metri, da sottoporre ad analisi granulometriche. I risultati potranno essere riferiti ai grafici delle fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione, come indicato nell'allegato A3 degli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007). Qualora si rinverano spessori significativi di depositi i cui campioni rientrano nelle fasce di possibile liquefazione, dovranno essere prelevati ulteriori campioni da sottoporre a prove dinamiche di laboratorio, anche allo scopo di quantificarne i possibili cedimenti.

In ogni caso occorre ricordare che prove anche molto raffinate di liquefacibilità, risultano rappresentative soltanto di volumi di terreno modesti; pertanto in fase di piano urbanistico attuativo (PUA) e di progettazione degli interventi si dovrà tener conto di tale aspetto per dimensionare le relative indagini al fine di ottimizzare le risorse in funzione della rilevanza delle opere.

Relativamente alle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali identificate dalla cartografia di sintesi della microzonazione di secondo livello (paragrafo 8.6 e tavole da 6.1 a 8.2), si segnala che il territorio comunale di Calderara di Reno risulta suddiviso in aree,

anche di estensione relativamente ridotta, caratterizzate da fattori di amplificazione molto diversi (ad esempio valori di F_{PGA} compresi tra 1.5 e 2.5). Ciò è dovuto principalmente alla variabilità di alcune caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie (paragrafo 7.1) e alla conseguente scelta di utilizzare, per parte del territorio indagato, l'abaco di riferimento *A2.1.1 - Appennino e margine appenninico-padano* degli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007). In ragione di questi risultati (marcata variabilità e alti valori massimi dei fattori di amplificazione) si ritiene necessaria particolare attenzione nella determinazione della corretta categoria di sottosuolo, ove sia consentito un approfondimento geologico e sismico sui terreni con approccio semplificato (D.M. del 14/01/2008), valutando l'opportunità, per i casi più problematici, di eseguire comunque le analisi di risposta sismica locale attraverso approfondimenti di terzo livello.

9.2 Considerazioni conclusive e prescrizioni

Fermo restando quanto indicato nel paragrafo precedente, per tutti i nuovi interventi edilizi sul territorio comunale, valgono le seguenti prescrizioni generali per la riduzione del rischio sismico:

- in fase esecutiva è richiesto in tutti i casi un approfondimento geologico, geotecnico e sismico, conforme al DM 14 gennaio 2008, corredato da nuove indagini geognostiche e geofisiche, con lo scopo di definire in dettaglio le caratteristiche dell'area di intervento;
- dovrà essere attentamente valutata l'eventuale presenza di orizzonti granulari saturi e, nel caso, valutarne il potenziale di liquefazione anche con procedure di terzo livello, quantificandone i cedimenti a seguito di terremoto, tenendo presente che, poiché è stata riscontrata una certa variabilità nella distribuzione dei depositi granulari saturi anche su verticali di indagine molto ravvicinate, risulta pericoloso estendere delle valutazioni puntuali sulla liquefacibilità dei depositi granulari saturi ad un areale più o meno esteso;
- si dovrà sempre definire la quota della falda nel primo sottosuolo, la sua escursione stagionale ed il suo valore medio annuale rappresentativo, tenendo nella dovuta considerazione gli effetti di depressione artificiale degli acquiferi originata da prelievi di acqua da pozzo;
- le strutture di fondazione non dovranno appoggiare su terreni con caratteristiche geomeccaniche differenti, o su riporto, così come non si dovranno adottare strutture di tipo misto (es. edificio con fondazioni in parte superficiali e in parte profonde), al fine di evitare che si possano originare effetti differenziali, sia riguardo all'amplificazione sismica che ai cedimenti;
- in fase progettuale definitiva ed esecutiva si dovrà tenere conto dei valori di frequenza fondamentale dei terreni di fondazione (anche a seguito di ulteriori misure HVSR) indicati nella tavola 3, evitando la realizzazione di strutture aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno, specialmente dove si registrino elevati valori di ampiezza dei picchi H/V (zona di "conoide alluvionale" ed eventuali altre aree).

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.

Albarelo D. e Castellaro S. (2011) - Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. In AA.VV. (2011) - Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII - n.2.

Amorosi A., Colalongo M. L., Pasini G. e Preti D. (1999) - Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Romagna coastal plain (northern Italy). *Sedimentology*, 46, 99-121.

Arpa Ingegneria Ambientale (2007) - Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Analisi interferometria.

Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M. e Boschi E. (2008) - The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. *Tectonophysics*.

Bergonzoni A. e Elmi C. (2003) - Il territorio di pianura del Comune di Bologna, Carta geomorfologica, Carta della litologia superficiale. Ed. SELCA, Firenze.

Bianchi E., Castellarin A., Rodorigo S. e Vico G. (2008) - I sinkholes in Pianura Padana. (The sinkholes in the Padana Plain). *Mem. Descr. Carta Geol. d'It. LXXXV*, pp. 409 - 418

Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P. e Vannucci G. (2004) - Carta sismotettonica della regione Emilia-Romagna; Note illustrative. A cura di : Boccaletti M. e Martelli L., Servizio geologico sismico e dei suoli.

Boschi E. e Guidoboni E. 2003, I terremoti a Bologna e nel suo territorio dal XII al XX secolo, INGV-SGA, Roma-Bologna.

Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) - Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. *Geologia e tecnica ambientale*, 3.

Castellaro S. e Mulargia F. (2007) - Stime di $vS30$ a stazione singola tramite misure HVSR vincolate. GNGTS, Roma.

Castellaro S. e Mulargia F. (2009a) - $Vs30$ estimates using con-strained H/V measurements. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99, 761-773.

Castellaro S. e Mulargia F. (2009b) - The effect of velocity inversions on H/V. *Pure Appl. Geophys.*, 166, 567-592.

Castellaro S. e Mulargia F. (2010) - How Far from a Building Does the Ground-Motion Free-Field Start? The Cases of Three Famous Towers and a Modern Building. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 2080-2094.

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.

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 Mucciarelli M..

Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C. e Amato A., (2006) - CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002, versione 1.1. INGV-CNT, Roma

<http://csi.rm.ingv.it/>

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

Castiglioni G. B. (Coordinatore) (1997) - Carta geomorfologica della Pianura Padana, alla scala 1:250.000. SELCA, Firenze.

Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2012) - Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 2.0.

http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/Standard_MSv2_0_pdf3.pdf

Crespellani T., Nardi R. e Simoncini C. (1991) - La liquefazione del terreno in condizioni sismiche. Zanichelli, Bologna.

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/>, © INGV 2010 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.1.1

Dondi L. e D'Andrea M. G. (1986) - La Pianura Padana e Veneta dall'Oligocene superiore al Pleistocene. *Giornale di Geologia*, ser3°, 48/1-2, 197-225.

Dondi L., Mostardini F. e Rizzini A. (1982) - Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nella Pianura Padana. In: Guida alla geologia del margine appenninico padano (a cura di: Cremonini G. e Ricci Lucchi F.), Guida Geol. Reg., S. G. I., 47-58.

Elmi C., Bergonzoni A., Massa T. e Montaletti V. (1984) - Il territorio di pianura della provincia di Bologna, aspetti geologici e geotecnici. *Giornale di Geologia*, n.46.

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

Galli, P. e Meloni F. (1993) - Nuovo catalogo nazionale dei processi di liquefazione avvenuti in occasione dei terremoti storici in Italia. *Il Quaternario*, 271-292

Galli P., Meloni F. e Rossi A. (1999) - Historical liquefaction in Italy: relationship between epicentral distance and seismic parameters. European Geophysical Society XXVIII General Assembly Natural Hazards NH3, The Hague, Netherlands.

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 MS (2008) - Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd. Disponibili nel sito web del Dipartimento della Protezione Civile, area "Rischio Sismico"

http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833

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

Idriss, I.M. e Boulanger, R.W. (2008) - Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

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

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2004) - I dati online della pericolosità sismica in Italia. <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S. and Sato, H. (1982) - Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods, Proc., 3rd Int. Conf. on Microzonation, Seattle, Vol.3, pp1319-1330.

Lai C.G., Wilmanski K. (a cura di) (2005) - Surface Waves in Geomechanics: Direct and Inverse Modeling for Soils and Rocks, CISM Lecture Notes No. 481, CISM-Springer Verlag, pp. 385, ISBN: 3-211-27740-4.

Locati M., Camassi R. e Stucchi M. (a cura di) (2011) - DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano. Milano, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11> DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11

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.

Ori G. G. (1993) - Continental depositional systems of the Quaternary of the Po Plain (northern Italy). *Sedimentary Geology*, 83, 1-14.

Panizza M., Bettelli G., Castaldini D., Barbieri M. e Capitani M. (2001) - Studio della Pericolosità sismica delle Province di Modena e Reggio Emilia. Università degli Studi di Modena, Dipartimento di Scienze della Terra.

Park C.B., Miller R.D. e Xia J.(1999) - Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.

Park C.B., Miller R.D., Xia J. e Ivanov J. (2007) - Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. *The Leading Edge* 26, 60.

Pieri M. (1984) - Storia delle ricerche nel sottosuolo padano fino alle ricostruzioni attuali. In: Cento anni di geologia italiana. Vol. giub. I Centenario della S.G.I., 155-176, Bologna.

Pieri M. e Groppi G. (1981) - Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy). Progetto Finalizzato Geodinamica, publ.n° 414, C.N.R., 23.

Provincia di Bologna (2013) - Variante al PTCP in materia di rischio sismico, Bologna.

Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, ENI - AGIP (1998) - Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000, Bologna.

Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (1999) - Carta Geologica di pianura dell'Emilia-Romagna - scala 1:250.000. Ed. SELCA, Firenze.

Regione Emilia-Romagna - Legge Regionale n. 20/2000 - Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio.

Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, CNR - Centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino (2002) - Carta Geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo - scala 1:250.000. Ed. SELCA, Firenze.

Regione Emilia-Romagna - Delibera Regionale n. 112/2007 - Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della LR 20/2000 Disciplina generale sulla tutela del territorio, in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica".

Regione Emilia-Romagna - Delibera Regionale n. 1302/2012 - Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione e concessione dei contributi di cui all'OPCM 4007/2012 a favore degli enti locali.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI CALDERARA DI RENO

Ricci Lucchi F., Colalongo M. L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi I. e Rio D. (1982) - Evoluzione sedimentaria e paleogeografia del margine appenninico. In: "Guida alla geologia del margine appenninico-padano" a cura di Cremonini G. e Ricci Lucchi F., Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. Ital., 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. (a cura di) (2011) - CPTI11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>.

Serva L. (1990) - Il ruolo delle scienze della terra nelle analisi di sicurezza di un sito per alcune tipologie di impianti industriali: il terremoto di riferimento per il sito di Viadana (MN). Boll. Soc. Geol. It., 109, 375-411.

Stucchi M., Camassi R., Rovida A., Locati M., Ercolani E., Meletti C., Migliavacca P., Bernardini F. e Azzaro R. (2007) - DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04. Quaderni di Geofisica, Vol 49, pp.38. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>

Vittori E. e Ventura G. (1995) - Grain size of fluvial deposits and late Quaternary climate: A case study in the Po River valley (Italy). Geology, 23(8), 735-738.

Zoetemeijer R. (1993) - Tectonic Modelling of Foreland Basins, thin skinned thrusting, syntectonic sedimentation and lithospheric flexure. PhD Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam.